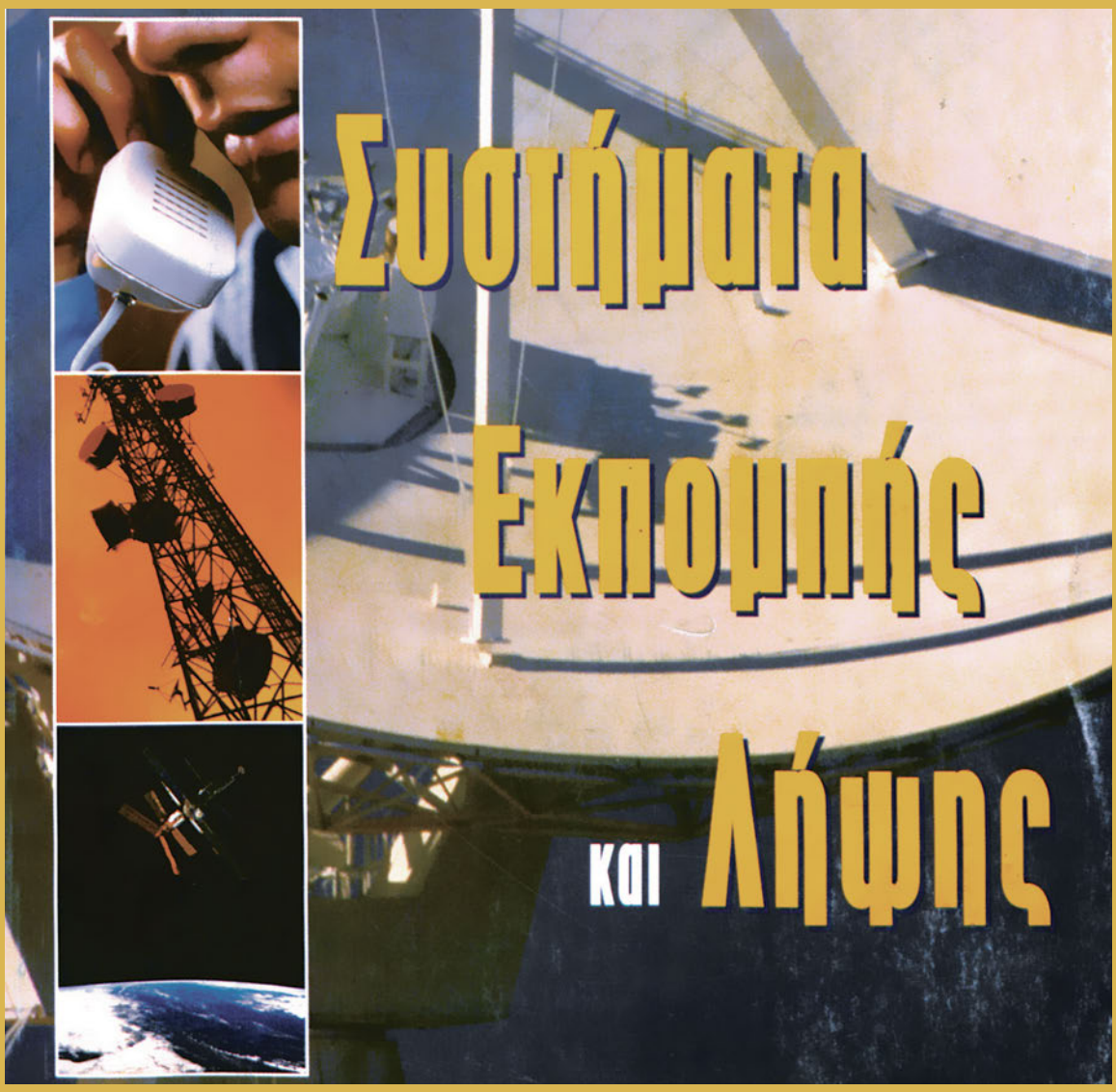
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ



Συστήματα Εκπομπής και Λήψης

Γ΄ ΕΠΑ.Λ.

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Δρ. Αθανάσιος Α. Νασιόπουλος
Δημήτριος Χατζόπουλος

Η συγγραφή και η επιστημονική επιμέλεια του βιβλίου πραγματοποιήθηκε υπό την αιγίδα του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΛΗΨΗΣ

Γ΄ ΕΠΑ.Λ.

Ειδικότητα: Τεχνικών Ηλεκτρονικών και Υπολογιστικών Συστημάτων, Εγκαταστάσεων, Δικτύων και Τηλεπικοινωνιών

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ
«ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ

- **Νασιόπουλος Α. Αθανάσιος,** *Δρ.Φυσικός – Ηλεκτρονικός Μηχανικός, Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρονικής, ΤΕΙ Αθηνών.*
- **Χατζόπουλος Δημήτριος,** *Φυσικός – Ραδιοηλεκτρολόγος Καθηγητής Δ/θμιας Εκπαίδευσης.*

ΟΜΑΔΑ ΚΡΙΣΗΣ

- **Πάσχος Ιωάννης,** *Σχολικός Σύμβουλος Ηλεκτρονικών.*
- **Βαφέας Δημήτριος,** *Φυσικός Ρ/Η – Διπλωμ. Ηλεκτρ. Μηχανικός, υπάλληλος ΕΡΤ Α.Ε.*
- **Σαμαράκης Κωνσταντίνος,** *Ηλεκτρονικός Μηχανικός Καθηγητής Δ/θμιας Εκπαίδευσης.*

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ

Κανελλόπουλος Δ. Χαράλαμπος, Σύμβουλος του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου.

ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ

Φορτούνη Κωστούλλα, Φιλόλογος, Καθηγήτρια Δ/θμιας Εκπαίδευσης.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Νταράρα Μαρία

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΞΩΦΥΛΛΟΥ & ΠΡΟΕΚΤΥΠΩΣΗ ΒΙΒΛΙΟΥ

ΣΥΝΘΕΣΗ

ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ
Επιστημονικός Υπεύθυνος του τομέα «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ»,
Δρ. ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΔΗΜ. ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΣ (PH.D)
(Σύμβουλος του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου)

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ

Η επανέκδοση του παρόντος βιβλίου πραγματοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων «Διόφαντος» μέσω ψηφιακής μακέτας.

— ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ —

Κεφάλαιο 1:
Η έννοια του ακουστικού σήματος

1.1 Παλμική κίνηση–ήχος 7
1.1.1 Διάδοση του ήχου 7
1.1.2 Απλοί και σύνθετοι ήχοι 8
1.1.3 Χαρακτηριστικά του ήχου 9
1.2 Ακουστικά σήματα και παραγωγή τους 10
1.2.1 Η ανθρώπινη φωνή 11
1.3 Ηλεκτρακουστικές διατάξεις 11
1.3.1 Ηχεία 12
1.3.2 Συστήματα Μονό-Στέρεο 18
1.3.3 Περιφερειακός (surround) ήχος 20
1.3.4 Ηχοληψία 23
Ανακεφαλαίωση *25*
Ερωτήσεις αυτοεξέτασης 26

Κεφάλαιο 2:
Η έννοια του τηλεοπτικού σήματος

2.1 Το φως και οι ιδιότητές του 30
2.1.1 Τα χαρακτηριστικά του φωτός .. 31
2.1.2 Τα χαρακτηριστικά του χρώματος 32
2.1.3 Φως και όραση 33
2.2 Πρωτεύοντα χρώματα και ο συνδυασμός τους για την παραγωγή των υπολοίπων χρωμάτων 35
2.2.1 Χρωματομετρία – χρωμικές συντεταγμένες 36
2.3 Η έννοια της φωτεινότητας και της χρωμικότητας 38
2.4 Μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρικό σήμα 40
2.4.1 Ηλεκτρική μεταβίβαση της εικόνας 42
2.4.2 Η τηλεοπτική κάμερα 44
2.4.3 Το ηλεκτρονικό πυροβόλο 46
2.4.4 Σάρωση 48
2.4.5 Συγχρονισμός 51
2.4.6 Διατάξεις εικονοληψίας 53
2.4.7 Η έγχρωμη τηλεοπτική κάμερα . 60
2.4.8 Παραγωγή συνθετικής εικόνας . 63
2.5 Δομή του σύνθετου τηλεοπτικού σήματος 67
Ανακεφαλαίωση 72
Ερωτήσεις αυτοεξέτασης 74

Κεφάλαιο 3:
Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες. Ηλεκτρομαγνητικό κύμα και τεχνικές διαμόρφωσης

3.1 Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες 75
3.2 Σήματα και συστήματα 79
3.3 Τα ηλεκτρικά σήματα 82
3.3.1 Ορισμός του σήματος 82
3.3.2 Διάκριση των σημάτων 84
3.4 Ανάλυση των σημάτων 87
3.5 Εύρος ζώνης λειτουργίας. Φίλτρα 91
3.6 Η ανάγκη της διαμόρφωσης 95
3.7 Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα 97
3.7.1 Ορισμός του ηλεκτρομαγνητικού κύματος 97
3.7.2 Ισχύς και πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος 99
3.7.3 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα .. 100
3.8 Διαμορφώσεις 101
3.8.1 Γενικά περί διαμορφώσεων 101
3.8.2 Αναλογικές διαμορφώσεις 102
3.8.2.1 Διαμορφώσεις πλάτους (AM) 104
3.8.2.2 Διαμόρφωση συχνότητας (FM) 112
3.8.3 Σύγκριση των διαμορφώσεων AM και FM 116
Ανακεφαλαίωση 118
Ερωτήσεις αυτοεξέτασης 120
Ασκήσεις 121

Κεφάλαιο 4:
Τεχνικές μετάδοσης

4.1 Ασύρματες τεχνικές. Φαινόμενα διάδοσης 123
4.2 Τρόποι διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος 126
4.2.1 Γενικά 126
4.2.2 Κύματα εδάφους 127
4.2.3 Κύματα χώρου ή ιονοσφαιρικά κύματα 128
4.3 Επίδραση της συχνότητας στη διάδοση 133
4.3.1 Γενικά 133
4.3.2 Διάδοση των υπερμακρών (VLF) κυμάτων 133
4.3.3 Διάδοση των μακρών (LF) κυμάτων 134
4.3.4 Διάδοση των μεσαίων κυμάτων (MF) 134
4.3.5 Διάδοση των βραχέων κυμάτων (HF) 135
4.3.6 Διάδοση υπερβραχέων κυμάτων 137
4.3.7 Διάδοση των μικροκυμάτων ... 138
4.4 Τύποι ραδιοζεύξεων 139
4.4.1 Εφαρμογές ραδιοφωνίας 139
4.4.2 Εφαρμογές ραδιοτηλεφωνίας . 140
4.4.3 Μικροκυματικές ραδιοζεύξεις .. 142
4.4.4 Δορυφορικές ζεύξεις 142
4.5 Γραμμές μεταφοράς. Ομοαξονικό καλώδιο 144
4.6 Οπτικές ζεύξεις. Οπτική ίνα 148
Ανακεφαλαίωση 151
Ερωτήσεις αυτοεξέτασης 153
Ασκήσεις *155*

Κεφάλαιο 5:
Συστήματα εκπομπής ραδιοτηλεοπτικών σημάτων

5.1 Γενικά περί συστημάτων εκπομπής . 157
5.2 Γένεση του φέροντος σήματος Ταλαντωτές 159
5.3 Διαμορφωτές 164
5.3.1 Διαμορφωτές πλάτους AM με φέρον 165

5.3.2 Διαμορφωτές απλής ζώνης χωρίς φέρον (SSBsc) 168
5.3.3 Διαμορφωτές συχνότητας 171
5.4 Ειδικοί τύποι διαμορφώσεων 176
5.4.1 Στερεοφωνική διαμόρφωση 176
5.4.2 Διαμόρφωση υποβαθμισμένης πλευρικής ζώνης (VSB) 178
5.5 Ενισχυτές ισχύος Υψηλών Συχνοτήτων 180
5.5.1 Γραμμικοί ενισχυτές..... 180
5.5.2 Ενισχυτής ισχύος (RF) τάξης λειτουργίας C..... 183
5.6 Τηλεοπτικοί πομποί 185
5.6.1 Τηλεοπτικός πομπός μονόχρωμου σήματος 186
5.6.2 Τηλεοπτικός πομπός έγχρωμης εικόνας 190
5.7 Δορυφορικές εκπομπές τηλεόρασης 195
Ανακεφαλαίωση 197
Ερωτήσεις αυτοεξέτασης 199
Ασκήσεις..... 201

Κεφάλαιο 6:
Συστήματα ακτινοβολίας
6.1 Γραμμές μεταφοράς 204
6.1.1. Τρέχοντα κύματα 204
6.1.2 Στάσιμα κύματα 205
6.1.3 Συντονισμένες γραμμές..... 207
6.1.4 Γραμμές με ωμικό φορτίο 209
6.1.5 Προσαρμογή 211
6.2 Η έννοια της κεραίας 213
6.2.1 Τύποι κεραιών εκπομπής 215
6.2.2 Χαρακτηριστικά κεραιών 216
6.2.3 Τύποι κεραιών εκπομπής 219
6.3 Ακτινοβολούμενη ισχύς και ένταση πεδίου 225
6.4 Λήψη επίγειου και δορυφορικού σήματος 227
Ανακεφαλαίωση 230
Ερωτήσεις αυτοεξέτασης 232

Κεφάλαιο 7:
Ραδιοφωνικοί δέκτες
7.1 Γενικά χαρακτηριστικά ραδιοφωνικού δέκτη 233
7.1.1 Εισαγωγή 233
7.1.2 Απλός ραδιοφωνικός δέκτης άμεσης ενίσχυσης 235
7.2 Υπερετερόδυνος δέκτης 236
7.2.1 Γενικό διάγραμμα υπερετερόδυνου δέκτη 236
7.2.2 Επιλογή της ενδιάμεσης συχνότητας του υπερ-ετερόδυνου δέκτη 238
7.3 Αυτόματος έλεγχος κέρδους του δέκτη 241
7.4 Δέκτης με δύο στάδια ετεροδύνωσης.. 243
7.4.1 Παρασιτική απόκριση του δέκτη 243
7.4.2 Δέκτης με δύο στάδια ετεροδύνωσης (μετάθεσης συχνότητας)... 244
7.5 Αποδιαμορφώσεις πλάτους 246
7.5.1 Εισαγωγή 246
7.5.2 Αποδιαμόρφωση ή φώραση αναπτύγματος 246
7.5.3 Σύγχρονη ή σύμφωνη φώραση.. 248
7.5.4 Αποδιαμόρφωση σημάτων DSBsc και SSBsc..... 251
7.6 Αποδιαμόρφωση ή διευκρίνιση συχνότητας 252
7.6.1 Διευκρινιστής με φίλτρο 252
7.6.2 Άλλα κυκλώματα αποδιαμόρφωσης 255
7.7 Θόρυβος και ευαισθησία στο δέκτη . 256
7.8 Σύγκριση AM και FM ως προς το θόρυβο 259
Ανακεφαλαίωση 260
Ερωτήσεις αυτοεξέτασης 261
Ασκήσεις 262

Κεφάλαιο 8:
Τηλεοπτικοί δέκτες
8.1 Δομικό διάγραμμα τηλεοπτικού δέκτη 264
8.1.1 Το τμήμα εισόδου του δέκτη ... 265
8.1.2 Το τμήμα εικόνας του δέκτη 266
8.1.3 Το τμήμα ήχου του δέκτη 270
8.1.4 Το τμήμα σάρωσης και συγχρονισμού του δέκτη 271
8.1.5 Το τροφοδοτικό του δέκτη 272
8.2 Η οθόνη του τηλεοπτικού δέκτη 273
8.2.1 Ο καθοδικός σωλήνας 273
8.2.2 Η λυχνία καθοδικών ακτίνων (CRT) 274
8.2.3 Η έγχρωμη λυχνία CRT..... 276
8.2.4 Η επίπεδη οθόνη CRT..... 280
8.2.5 Άλλες επίπεδες οθόνες 281
Ανακεφαλαίωση 284
Ερωτήσεις αυτοεξέτασης 286

Κεφάλαιο 9:
Σύγχρονες τεχνικές -προοπτικές
9.1 Ψηφιακές τεχνικές μετάδοσης..... 287
9.1.1 Εισαγωγή 287
9.1.2 Δειγματοληψία και ψηφιοποίηση αναλογικού σήματος 290
9.1.3 Χαρακτηριστικά μιας ψηφιακής μετάδοσης..... 292
9.2 Ψηφιακές διαμορφώσεις αναλογικού φέροντος 295
9.2.1 Διαμόρφωση ASK ή OOK 295
9.2.2 Διαμόρφωση FSK δύο καταστάσεων M 296
9.2.3 Διαμόρφωση PSK 298
9.3 TELETEXT – Τηλεκείμενο 301
9.4 Τηλεόραση 16:9 και τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας..... 304
9.5 Συμπίεση Ψηφιακών δεδομένων 307
9.6 Η τηλεόραση ως μέσο αμφίδρομης επικοινωνίας 311
Ανακεφαλαίωση 313
Ερωτήσεις αυτοεξέτασης 315

— ΠΡΟΛΟΓΟΣ —

Η εποχή που ζούμε χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα και τον τεράστιο όγκο πληροφοριών και δεδομένων. Οι Τηλεπικοινωνίες, η πληροφορική και οι νέες τεχνολογίες έχουν να παρουσιάσουν καθημερινά νέα προϊόντα και υπηρεσίες που βομβαρδίζουν κυριολεκτικά μηχανικούς, τεχνικούς και καταναλωτές, επηρεάζοντας καταλυτικά όλους τους τομείς της καθημερινής ζωής.

Πριν μερικά χρόνια ο όρος Τηλεπικοινωνίες περιοριζόταν στο γεγονός της απλής μετάδοσης μηνυμάτων λόγου (φωνής) ή εικόνας με λίγους αποδέκτες, ενώ σήμερα ο ίδιος όρος αγκαλιάζει όλο το φάσμα της καθημερινότητας και απευθύνεται στις πλατιές μάζες. Η μικροηλεκτρονική και η μαζική εμφάνιση των υπολογιστών απλοποίησε την επαφή του ανθρώπου με τη μηχανή και διευκόλυνε την επικοινωνία του με τον έξω κόσμο. Καθένας από μας, στο σπίτι ή στο γραφείο του, διαθέτει ένα πλήθος τηλεπικοινωνιακών συσκευών για να στείλει ή να πάρει μηνύματα και μπορούμε κάθε στιγμή να ανταλλάξουμε τεράστιο όγκο πληροφοριών με την άλλη άκρη της γης.

Ένα μεγάλο τμήμα των σύγχρονων Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων ή Δικτύων όπως ονομάζονται σήμερα αναφέρεται στις ασύρματες επικοινωνίες ή Ραδιοεπικοινωνίες, που αποτελεί και το κύριο αντικείμενο του παρόντος βιβλίου. Σήμερα ο διαχωρισμός Ενσύρματες – Ασύρματες επικοινωνίες γίνεται όλο και δυσκολότερος, δεδομένου ότι το Δίκτυο των επικοινωνιών τείνει να γίνει ενιαίο και παγκόσμιο.

Αυτή η έκρηξη των τεχνολογιών προσθέτει συνεχώς νέες γνώσεις και νέα γνωστικά αντικείμενα για μελέτη. Τοποθετείται κύρια το ερώτημα πώς αυτές οι νέες γνώσεις και αλλαγές ενσωματώνονται στην εκπαίδευση ανώδυνα και με τρόπο που να αφομοιώνονται χωρίς κλυδωνισμούς όταν κάθε φορά προστίθενται νέα στοιχεία.

Σε κάθε περίπτωση απαιτείται η αποσαφήνιση των βασικών εννοιών που αναφέρονται σε μια διαδικασία. Στις τηλεπικοινωνίες για παράδειγμα πρέπει κανείς να επιμείνει στην έννοια της πληροφορίας, η οποία δεν ορίζεται εύκολα ποσοτικά και τις περισσότερες φορές μάλιστα αντιπροσωπεύει ένα φυσικό μέγεθος που δεν ανήκει στον τομέα της ηλεκτρονικής. Από την έννοια της πληροφορίας σιγά σιγά αφομοιώνεται η έννοια του σήματος σαν ηλεκτρικού μεγέθους και στη συνέχεια θα δοθεί έμφαση στην έννοια του συστήματος ή του υποσυστήματος που θα επεξεργαστεί το σήμα για να δώσει κάποιο συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Πρέπει επίσης να επιμείνει στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως τη ζώνη λειτουργίας, τη δυναμική του και μέσα από αυτά τα χαρακτηριστικά, να ορίσει τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές που πρέπει να θέσει για να πετύχει την σωστή σχεδίαση του. Ας σημειώσουμε ότι ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα πρέπει να μπορεί να συνυπάρξει στον ίδιο χώρο με άλλα αντίστοιχα συστήματα. Για παράδειγμα σε μια πόλη πρέπει να συνυπάρχουν και να λειτουργούν επιτυχώς πολλοί ραδιοφωνικοί ή τηλεοπτικοί σταθμοί. Δεν είμαστε μόνοι που τηλεφωνούμε και χρησιμοποιούμε κάποιο τμήμα του τηλεφωνικού δικτύου σε δεδομένη χρονική στιγμή, κλπ. Η έννοια της προσαρμογής ενός υποσυνόλου (σταδίου) με το επόμενο, η έννοια του ηλεκτρομαγνητικού φορέα που χρησιμοποιείται για τη ζεύξη (καλώδιο, οπτική ίνα,το κενό στις ασύρματες ζεύξεις), η διαδικασία της διαμόρφωσης, αποτελούν επίσης βασικές έννοιες των τηλεπικοινωνιών.

Αυτή τη προσέγγιση των πραγμάτων προσπαθήσαμε να εφαρμόσουμε στο παρόν βιβλίο που εστιάζει στα συστήματα εκπομπής και λήψης, δηλαδή στις ασύρματες επικοινωνίες.

Το βιβλίο αποτελείται από εννιά κεφάλαια και έχει γραφτεί σύμφωνα με το αναλυτικό πρόγραμμα. Ξεκινώντας από τις βασικές έννοιες του ακουστικού και οπτικού (video) σήματος εστιάζει και αναλύει όλα τα στάδια επεξεργασίας του σήματος στον πομπό και στον δέκτη. Παρουσιάζονται επίσης οι τεχνικές μετάδοσης και ορίζονται όλα τα βασικά μεγέθη που επηρεάζουν αλλά και καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και την ποιότητα των συστημάτων. Οι λειτουργικές μονάδες και τα δομικά διαγράμματα παρουσιάζονται αναλυτικά και σχολιάζονται οι βασικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται ευρέως στις εφαρμογές ραδιοφωνίας και τηλεόρασης. Στο τέλος, σε συντομία, παρουσιάζονται οι νέες ψηφιακές τεχνικές επεξεργασίας του σήματος, οι σύγχρονες εφαρμογές ψηφιακής και αμφίδρομης τηλεόρασης και επιχειρείται δειλά μια προβολή στο μέλλον.

Στο τέλος κάθε κεφαλαίου γίνεται ανακεφαλαίωση των γνώσεων και περιληπτικά παρουσιάζονται τα βασικότερα συμπεράσματα για διευκόλυνση των μαθητών. Οι ερωτήσεις στο τέλος κάθε κεφαλαίου έχουν στόχο την καλύτερη αφομοίωση των γνώσεων. Στα κεφάλαια 3, 4, 5, 7, όπου υπάρχουν αναπόφευκτα μαθηματικές σχέσεις, δίνονται υπό μορφή εφαρμογών υποδειγματικά λυμένες ασκήσεις. Στα ίδια κεφάλαια, στο τέλος, υπάρχει ένα σύνολο απλών ασκήσεων που σίγουρα βοηθούν την πληρέστερη κατανόηση.

Τελικοί κριτές αν πετύχαμε θα είναι οι εκπαιδευτικοί που θα διδάξουν αυτό το αντικείμενο και βέβαια οι μαθητές που στις σελίδες αυτού του βιβλίου θα αναζητήσουν την κατανόηση του αντικειμένου. Τα σχήματα είναι πολλά και κατανοητά ώστε να διευκολύνουν το μαθητή και να τον ανακουφίζουν από τις μαθηματικές σχέσεις που πρέπει να ομολογήσουμε ότι είναι σε κάποιες περιπτώσεις αναπόφευκτες. Ευπρόσδεκτες οι παρατηρήσεις αυτών που θα χρησιμοποιήσουν αυτό το βιβλίο. Θα ληφθούν υπόψη σε επόμενη έκδοση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε τις ευχαριστίες μας προς τους κ. Βαφέα Δημήτριο, Πάσχο Ιωάννη και Σαμαράκη Κωνσταντίνο, που ήταν κριτές στο έργο, για τις πολύτιμες και επιμελημένες παρατηρήσεις τους. Ευχαριστίες απευθύνουμε επίσης στη φιλόλογο κ. Φορτούνη Κωστούλλα που είχε την γλωσσική επιμέλεια, καθώς και στους κ. Χ. Κανελλόπουλο και Α. Βιδιαδάκη για την συνεργασία από πλευράς Παιδαγωγικού Ινστιτούτου. Πρόσθετες ευχαριστίες ανήκουν στο κ. Κ. Σαμαράκη, για τις παρατηρήσεις του στο σύνολο του βιβλίου, που βασίστηκαν στην εμπειρία από την πρώτη, έστω και μερική, χρήση του στους μαθητές.

Οι συγγραφείς
Αθανάσιος Νασιόπουλος
Δημήτριος Χατζόπουλος

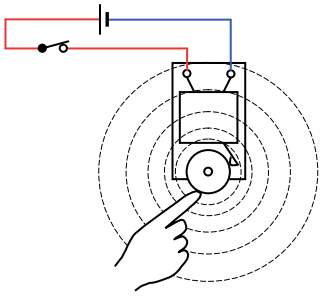
Στο κεφάλαιο αυτό θα γνωρίσουμε τη φυσική έννοια του ήχου και τους τρόπους με τους οποίους συλλαμβάνονται, καταγράφονται και αναπαράγονται τα ακουστικά σήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

1.1 Παλμική κίνηση – ήχος

Ήχος ονομάζεται το αίτιο που διεγείρει το αισθητήριο της ακοής, δηλαδή το αυτί μας. Οι ήχοι παράγονται από παλλόμενα σώματα. Αυτό είναι εύκολο να το διαπιστώσουμε, αν με την άκρη του δακτύλου μας αγγίξουμε, για παράδειγμα, το καμπανάκι ενός ηλεκτρικού κουδουνιού την ώρα που αυτό ηχεί. Θα διαπιστώσουμε τότε ότι το κουδούνισμα συνοδεύεται από αισθητές δονήσεις του μετάλλου (σχήμα 1-1).



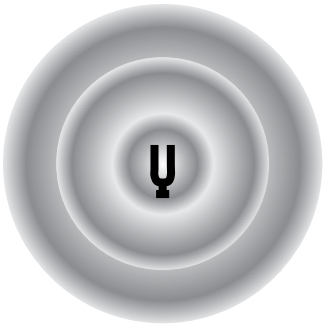
Σχήμα 1-1.
Παραγωγή ήχου από παλμική κίνηση σώματος.

1.1.1 Διάδοση του ήχου

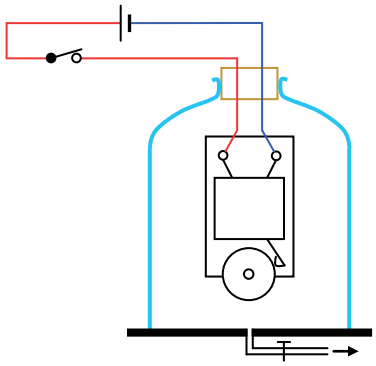
Για να φτάσει ο ήχος μέχρι το αυτί μας, πρέπει να διασχίσει την απόσταση που το χωρίζει από την πηγή του, διαδιδόμενος μέσα στον αέρα. Αυτό γίνεται ως εξής:

Η επιφάνεια του σώματος που πάλλεται θέτει σε κίνηση τα μόρια του αέρα, με τα οποία βρίσκεται σε επαφή. Επειδή ο αέρας είναι ελαστικό μέσο, τα κινούμενα μόριά του μεταδίδουν την κίνηση και στα γειτονικά τους μόρια. Με τον τρόπο αυτό οι παλμικές κινήσεις του σώματος που παράγει τον ήχο προκαλούν ένα «πήγαινε – έλα» στα μόρια του αέρα, το οποίο διαδίδεται σφαιρικά στο γύρω χώρο σαν κύμα και ονομάζεται *ακουστικό κύμα* (σχήμα 1-2).

Το κύμα αυτό αποτελείται από τοπικά πυκνώματα και αραιώματα του αέρα, που προκαλούν τοπικές αυξομειώσεις της πίεσής του. Αυτές οι αυξομειώσεις διαδίδονται μέσα στον αέρα με ταχύτητα που εξαρτάται από την πυκνότητα και τη θερμοκρασία του. Σε γενικές γραμμές είναι περίπου 340 μέτρα το δευτερόλεπτο.



Σχήμα 1-2.
Διάδοση του ήχου.



Σχήμα 1-3.
Αδυναμία διάδοσης του ήχου στο κενό.

Όταν το ηχητικό κύμα φτάσει στο αυτί μας, οι αυξομειώσεις της πίεσης προκαλούν παλμικές κινήσεις σε μια μεμβράνη στο εσωτερικό του, που ονομάζεται τύμπανο. Οι παλμικές κινήσεις του τυμπάνου, μέσα από κάποιο περίπλοκο ανατομικό σχηματισμό, διεγείρουν μια σειρά από ακουστικά νεύρα και προκαλούν στον εγκέφαλο το αίσθημα της ακοής.

Όμως δεν μπορούμε να ακούμε κάθε ήχο που παράγει κάθε παλλόμενο σώμα. Για να συμβεί αυτό, πρέπει το πλήθος των παλμικών κινήσεων σε ένα δευτερόλεπτο να είναι μεταξύ 20 και 20.000 ή, όπως αλλιώς λέμε, η συχνότητα των δονήσεων να είναι μεταξύ 20 Hz (Χερτζ) και 20 kHz (κιλοχέρτζ).

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι για να υπάρξει ήχος, πρέπει να υπάρχει και ελαστικό μέσο για τη διάδοσή του. Αυτό εύκολα το διαπιστώνουμε, αν καλύψουμε το ηλεκτρικό κουδούνι του παραπάνω παραδείγματος με αεροστεγές κάλυμμα και αφαιρέσουμε τον αέρα. Τότε παρόλο που το κουδούνι θα χτυπά, ο ήχος δε θα ακούγεται (σχήμα 1-3).

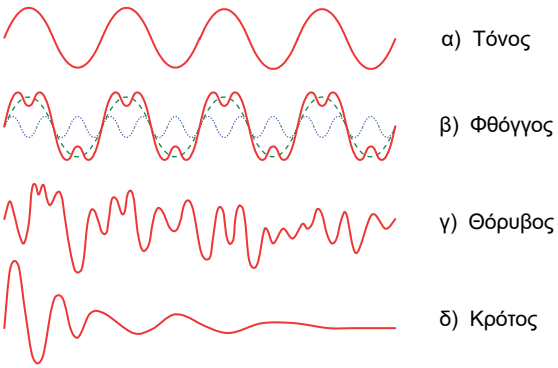
Φαίνεται λοιπόν ότι ο ήχος διαδίδεται μόνο μέσα σε υλικά σώματα. Κυριότερο μέσο μετάδοσής του είναι ο αέρας. Εξίσου καλά όμως, ίσως και καλύτερα, ο ήχος διαδίδεται και μέσα σε υγρά και στερεά σώματα. Αυτές όμως οι περιπτώσεις δεν ενδιαφέρουν το συγκεκριμένο μάθημα.

1.1.2 Απλοί και σύνθετοι ήχοι

Οι ήχοι τους οποίους ακούμε δεν προκαλούν πάντοτε την ίδια εντύπωση. Οι ήχοι διακρίνονται σε τόνους, *φθόγγους, θορύβους* και *κρότους*. Τη μορφή όλων αυτών μπορούμε εύκολα να την απεικονίσουμε, χρησιμοποιώντας ένα μικρόφωνο συνδεδεμένο με έναν παλμογράφο.

Οι τόνοι είναι η απλούστερη μορφή ήχων. Παράγονται μόνον από ορισμένα εργαστηριακά όργανα (π.χ. διαπασών ή γεννήτριες σημάτων) και στο άκουσμά τους θυμίζουν τα σφυρίγματα. Προέρχονται από την *αρμονική ταλάντωση* των υλικών μέσων και γι' αυτό η μορφή τους στον παλμογράφο θυμίζει τη μαθηματική συνάρτηση *ημίτονο.*

Οι φθόγγοι είναι ήχοι περισσότερο περίπλοκοι. Παράγονται από τα συνηθισμένα μουσικά όργανα και αντιστοιχούν σε ταλαντώσεις οι οποίες δεν είναι απλές αρμονικές. Το άκουσμά τους είναι συνήθως ευχάριστο. Οι φθόγγοι μπορούν να αναλυθούν σε αθροίσματα απλών τόνων, οι συχνότητες των οποίων είναι όλες ακέραια πολλαπλάσια μιας βασικής και ονομάζονται *αρμονικές*.



Σχήμα 1-4.
Απλοί και σύνθετοι ήχοι.

Οι θόρυβοι είναι ήχοι που αντιστοιχούν σε ακανόνιστα κύματα και δεν παρουσιάζουν καμιά περιοδικότητα. Το άκουσμά τους προκαλεί δυσάρεστη εντύπωση.

Οι κρότοι τέλος αντιστοιχούν σε ισχυρές και παροδικές δονήσεις του αέρα, όπως, για παράδειγμα, συμβαίνει κατά τις εκπυρσοκροτήσεις όπλων.

Απ' όλα τα παραπάνω είδη οι τόνοι ονομάζονται απλοί ήχοι, ενώ όλοι οι υπόλοιποι ονομάζονται σύνθετοι ήχοι. Οι μορφές τους απεικονίζονται στο σχήμα 1-4. Παρατηρήστε ότι ο φθόγγος του σχήματος προκύπτει ως άθροισμα δύο τόνων, εκ των οποίων ο δεύτερος έχει συχνότητα τριπλάσια από τον πρώτο.

1.1.3 Χαρακτηριστικά του ήχου

Τα χαρακτηριστικά ενός ήχου διακρίνονται σε αντικειμενικά και υποκειμενικά. Αντικειμενικά ονομάζονται εκείνα που ανιχνεύονται από επιστημονικά μετρητικά όργανα, ενώ τα υποκειμενικά καθορίζονται από τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τον ήχο με το αισθητήριο της ακοής. Για κάθε αντικειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου υπάρχει και το αντίστοιχο υποκειμενικό.

Τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

α) ***Η ένταση.*** Είναι η μηχανική ισχύς του ήχου, η οποία διέρχεται από μια επιφάνεια που τη διασχίζει ο ήχος και εκφράζεται σε Watt/m^2. Η ένταση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πλάτους της ταλάντωσης των μορίων του υλικού, μέσα στο οποίο διαδίδεται ο ήχος.

β) ***Η συχνότητα.*** Είναι το πλήθος των ταλαντώσεων που εκτελούν τα μόρια του υλικού μέσα σε ένα δευτερόλεπτο. Η συχνότητα εκφράζεται σε Hz (Χερτζ).

γ) ***Το φασματικό περιεχόμενο.*** Εκφράζει το πλήθος και τη σχετική ένταση των απλών ήχων που απαρτίζουν ένα σύνθετο ήχο.

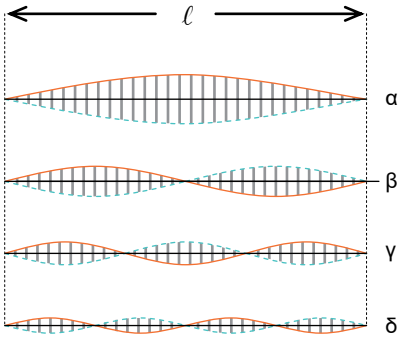
Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

α) ***Η ακουστότητα.*** Είναι το γνώρισμα το οποίο μας επιτρέπει να χαρακτηρίσουμε έναν ήχο ισχυρό ή αδύναμο. Η ακουστότητα εξαρτάται κυρίως από την ένταση, αλλά και από τη συχνότητα του ήχου. Με σταθερή την ένταση, ήχοι που έχουν χαμηλή ή υψηλή συχνότητα (π.χ. 100 Hz ή 10.000 Hz) ακούγονται με μικρότερη ακουστότητα απ' ό,τι ήχοι με ενδιάμεση συχνότητα (π.χ. 1.000 Hz).

β) ***Το ύψος.*** Είναι το γνώρισμα το οποίο μας επιτρέπει να χαρακτηρίσουμε έναν ήχο οξύ ή βαρύ. Το ύψος εξαρτάται από τη συχνότητα, αλλά δευτερευόντως επηρεάζεται και από την ένταση του ήχου. Έχει παρατηρηθεί ότι ήχοι ίδιας συχνότητας ακούγονται λιγότερο οξείς, όσο μεγαλώνει η έντασή τους.

γ) ***Η χροιά.*** Είναι το γνώρισμα το οποίο μας επιτρέπει να ξεχωρίζουμε μεταξύ τους δύο ήχους με το ίδιο ύψος και ακουστότητα, οι οποίοι όμως παράγονται από διαφορετικές ηχητικές πηγές. Η χροιά εξαρτάται από το φασματικό περιεχόμενο του ήχου, αλλά επηρεάζεται και από την έντασή του.

1.2 Ακουστικά σήματα και παραγωγή τους



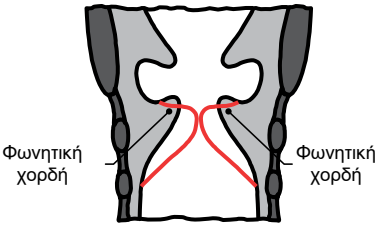
***Σχήμα* 1-5.**
Στάσιμα κύματα πάνω σε χορδή.

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, οι διάφοροι ήχοι παράγονται από τις παλμικές κινήσεις των υλικών σωμάτων. Τα σώματα που παράγουν ήχους ονομάζονται ηχογόνες πηγές. Ειδικά για την παραγωγή φθόγγων, οι ηχογόνες πηγές χωρίζονται σε *χορδές, ηχητικούς σωλήνες, ράβδους, μεμβράνες* και *πλάκες*. Όλα αυτά τα σώματα πάλλονται προκειμένου να παράγουν ήχο. Ειδικά στους ηχητικούς σωλήνες αυτό που πάλλεται είναι ο αέρας που υπάρχει μέσα στο σωλήνα. Οι παλμικές κινήσεις που παράγουν ήχο έχουν ποικίλες μορφές. Για παράδειγμα, όταν πάλλεται μια χορδή, επειδή τα άκρα της είναι πάντοτε ακίνητα, σχηματίζονται κατά μήκος της τα λεγόμενα στάσιμα κύματα. Στο σχήμα 1-5 φαίνονται τέσσερις διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να πάλλεται μία χορδή. Όταν η χορδή πάλλεται με τον τρόπο (α), παράγει έναν απλό ήχο με τη χαμηλότερη δυνατή συχνότητα, που ονομάζεται βασική ή θεμελιώδης. Με τους τρόπους (β), (γ) και (δ) παράγει ήχους που έχουν αντίστοιχα συχνότητα διπλάσια, τριπλάσια και τετραπλάσια της βασικής. Οι

συχνότητες αυτές ονομάζονται *αρμονικές* της βασικής. Σε ένα μουσικό όργανο μια χορδή πάλλεται έτσι, ώστε να παράγει συγχρόνως τη βασική συχνότητα και τις αρμονικές της. Οι ήχοι αυτοί συνδυαζόμενοι παράγουν ένα φθόγγο, όπως αυτός που φαίνεται στο σχήμα 1-4 β.

1.2.1 Η ανθρώπινη φωνή

Το όργανο που διαθέτει ο άνθρωπος για την παραγωγή φωνής βρίσκεται στο ανώτερο μέρος του λάρυγγα και είναι οι *φωνητικές χορδές*. Αυτές είναι δύο πτυχές του τοιχώματος του λάρυγγα, οι οποίες κατά την ομιλία τεντώνονται από ειδικούς μύες και λειτουργούν ως ηχητικές μεμβράνες με μια λεπτή σχισμή μεταξύ τους. Ο αέρας της εκπνοής θέτει σε παλμική κίνηση τις φωνητικές χορδές, οι οποίες προκαλούν αναταράξεις στη στήλη του αέρα που υπάρχει μέσα στο λαιμό μας, παράγοντας έτσι ήχο.



Σχήμα 1-6.
Τα όργανα της ανθρώπινης φωνής

Στο σχήμα 1-6 φαίνονται οι φωνητικές χορδές στη θέση ηρεμίας και με κόκκινη γραμμή στη θέση ομιλίας.

Η θεμελιώδης συχνότητα του ήχου της φωνής εξαρτάται κυρίως από τις διαστάσεις των φωνητικών χορδών. Τα παιδιά και οι γυναίκες, που έχουν μικρότερες φωνητικές χορδές από τους άνδρες, παράγουν οξύτερες φωνές. Το τέντωμα των φωνητικών χορδών και η πίεση του εκπνεόμενου αέρα επηρεάζουν επίσης το ύψος της φωνής.

1.3 Ηλεκτρακουστικές διατάξεις

Στην προηγούμενη παράγραφο γνωρίσαμε πώς παράγονται διάφοροι «φυσικοί» ήχοι από την παλμική κίνηση σωμάτων, όπως οι χορδές, οι μεμβράνες, ο ανθρώπινος λάρυγγας κλπ. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτού του τρόπου παραγωγής ήχου είναι το γεγονός ότι η διέγερση των σωμάτων που τον παράγουν γίνεται με μηχανικό τρόπο, δηλαδή με χτύπημα, με φύσημα αέρα κλπ. Ωστόσο, την ειδικότητα του ηλεκτρονικού ενδιαφέρει περισσότερο όχι η παραγωγή, αλλά η αναπαραγωγή των ήχων.

Λέγοντας αναπαραγωγή των ήχων εννοούμε τη διαδικασία με την οποία παράγουμε «αντίγραφα» φυσικών ήχων, που έχουμε προηγουμένως καταγράψει με κάποια από τις υπάρχουσες μεθόδους καταγραφής και αποθήκευσης ήχων.

Τόσο η εγγραφή όσο και η αναπαραγωγή των ήχων σήμερα γίνονται αποκλειστικά με ηλεκτρονικά μέσα. Για την εγγραφή χρησιμοποιούμε κυρίως μαγνητικές

μεθόδους (εγγραφή με μαγνητόφωνα), ενώ η αποθήκευση των καταγραμμένων ήχων μπορεί να γίνει είτε σε μαγνητικά μέσα (π.χ. μαγνητοταινίες) είτε σε οπτικά μέσα (π.χ. δίσκοι CD) είτε σε μηχανικά μέσα (π.χ. δίσκοι βυνιλίου). Όλες αυτές οι μέθοδοι προϋποθέτουν ότι τα ηχητικά σήματα θα μετατραπούν σε ηλεκτρικά. Αυτό γίνεται με κατάλληλες συσκευές, που ονομάζονται μικρόφωνα. Το σύνολο των μεθόδων λήψης και καταγραφής των ήχων ονομάζεται *ηχοληψία.*

Για να αναπαραχθούν οι καταγραμμένοι ήχοι, μετατρέπονται και πάλι σε ηλεκτρικά σήματα. Αυτά τα ηλεκτρικά σήματα ενισχύονται με ηλεκτρονικούς ενισχυτές και οδηγούνται σε συσκευές που μετατρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα σε ήχο. Οι συσκευές αυτές ονομάζονται μεγάφωνα, τα οποία, για να λειτουργούν καλύτερα, είναι προσαρμοσμένα σε διατάξεις, που ονομάζονται *ηχεία.*

Συνδεμένες μεταξύ τους οι παραπάνω συσκευές απαρτίζουν μια πλήρη ηλεκτρακουστική αλυσίδα. Όλες αυτές οι συσκευές είναι διπλές, για να μπορούν να επεξεργάζονται ξεχωριστά τους ήχους που απευθύνονται στο δεξί και στο αριστερό αυτί μας. Περισσότερο ή λιγότερο πλήρεις τέτοιες διατάξεις διατίθενται για επαγγελματική ή οικιακή χρήση και συνήθως τις ονομάζουμε *στερεοφωνικά συστήματα.*

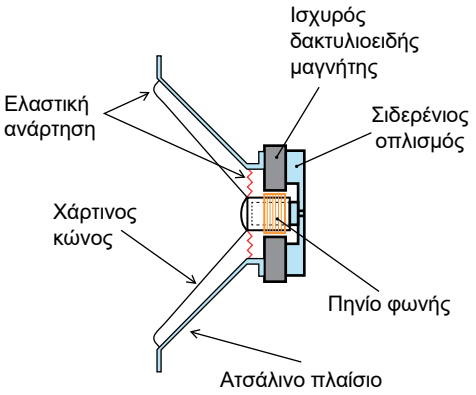
Σκοπός των στερεοφωνικών συστημάτων είναι να μας προσφέρουν τη δυνατότητα του ηχητικού προσανατολισμού, ώστε να μπορούμε να εντοπίζουμε χοντρικά τη θέση των μουσικών οργάνων της ορχήστρας, της οποίας τον ήχο αναπαράγουμε, και να σχηματίζουμε καλύτερα την εντύπωση της ζωντανής ακρόασης. Νεότερες έρευνες απέδειξαν ότι αυτό το επιτυγχάνουμε πολύ καλύτερα, αν αναπαράγουμε και ήχους που προέρχονται από αντανακλάσεις στους τοίχους της αίθουσας όπου παίζει η πραγματική ορχήστρα. Για να γίνει αυτό, χρειαζόμαστε συστήματα περισσότερο περίπλοκα από τα στερεοφωνικά, τα οποία χρησιμοποιούν συνήθως πέντε ηχεία. Αυτά ονομάζονται συστήματα περιβάλλοντος ήχου και κυκλοφορούν συνήθως με το εμπορικό όνομα Ντόλμπι Σαράουντ (Dolby Surround). Εξυπακούεται ότι τέτοια συστήματα απαιτούν ειδικές τεχνικές ηχοληψίας.

1.3.1 Ηχεία

Τα ηχεία είναι ο τελευταίος κρίκος της ηλεκτρακουστικής αλυσίδας. Είναι οι συσκευές που μετατρέπουν ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό σήμα σε ήχο. Ένα ηχείο αποτελείται από δύο συνεργαζόμενα τμήματα, τα *μεγάφωνα* και την *καμπίνα* (το κουτί) του ηχείου.

Τα μεγάφωνα είναι οι συσκευές απ' όπου πηγάζει ο ήχος του ηχείου. Όταν τα μεγάφωνα τροφοδοτούνται με ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα ή μια μεταβαλλόμενη ηλεκτρική τάση, θέτουν μια μάζα αέρα σε κίνηση ανάλογη προς τις μεταβολές της τάσης ή του ρεύματος και παράγουν έτσι ήχο. Για να το κατα-

φέρουν αυτό, σχεδόν όλα τα μεγάφωνα διαθέτουν μια μεμβράνη ικανή να κινηθεί λόγω των μεταβολών του ηλεκτρικού σήματος. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτή η κίνηση καθορίζει και τον τύπο του μεγαφώνου.



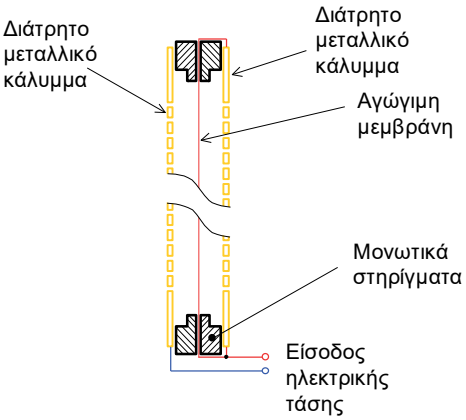
Σχήμα 1-7.
Δυναμικό μεγάφωνο

Ουσιαστικά τρεις τύποι μεγαφώνων βρίσκονται σε χρήση σήμερα, τα *δυναμικά* μεγάφωνα, τα *ηλεκτροστατικά* μεγάφωνα και τα *πιεζοηλεκτρικά* μεγάφωνα. Για να κινήσουν τη μεμβράνη τους, τα πρώτα χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, τα δεύτερα χρησιμοποιούν ηλεκτροστατικές δυνάμεις, ενώ τα τελευταία βασίζονται στο φαινόμενο της ηλεκτροσυστολής. Κάποιοι άλλοι τύποι μεγαφώνων έχουν εντελώς περιθωριακή παρουσία στην αγορά (όπως, για παράδειγμα, τα μεγάφωνα πλάσματος, τα οποία δεν χρησιμοποιούν μεμβράνη, αλλά μέσω μιας διαρκούς ηλεκτρικής εκκένωσης αυξομειώνουν απ' ευθείας την πίεση του αέρα στο εσωτερικό τους).

Τα δυναμικά μεγάφωνα χρησιμοποιούνται στη συντριπτική πλειονότητα των εφαρμογών. Η δομή ενός δυναμικού μεγαφώνου φαίνεται στο σχήμα 1-7.

Το δυναμικό μεγάφωνο διαθέτει μια κωνική μεμβράνη από κολλαρισμένο χαρτί ή από σκληρό και ελαφρύ πλαστικό. Στην κορυφή του κώνου είναι προσαρμοσμένο ένα πηνίο, το οποίο ονομάζεται πηνίο φωνής και μπορεί να μετακινείται στο διάκενο που σχηματίζει ένας ισχυρός δακτυλιοειδής μαγνήτης. Αν διοχετεύσουμε εναλλασσόμενο ρεύμα στο πηνίο, τότε στις σπείρες του εξασκούνται δυνάμεις Λαπλάς (Laplace), που αναγκάζουν ολόκληρο τον κώνο να κινηθεί μπρος – πίσω κατά μήκος του διάκενου. Λόγω της μεγάλης επιφάνειας του κώνου μπορούν να μετακινηθούν μεγάλες μάζες αέρα, με αποτέλεσμα να έχουμε δυνατό ήχο. Μειονέκτημα του δυναμικού μεγαφώνου είναι η αδυναμία του να αναπαράγει ικανοποιητικά όλες τις συχνότητες του ακουστικού φάσματος. Μεγάφωνα με μεγάλους κώνους αναπαράγουν σωστά τους χαμηλούς ηχητικούς τόνους (μπάσα), ενώ παραμορφώνουν τους υψηλούς (πρίμα). Αντίθετα, τα μεγάφωνα με μικρούς κώνους αναπαράγουν σωστά τους υψηλούς τόνους, ενώ δεν μπορούν να αναπαράγουν τους χαμηλούς. Τα μεγάφωνα που προορίζονται για τα μπάσα τα ονομάζουμε γούφερ (woofer), ενώ τα μεγάφωνα υψηλών συχνοτήτων τα ονομάζουμε τουίτερ (tweeter).

Το ηλεκτροστατικό μεγάφωνο διαθέτει μια επίπεδη μεμβράνη από λεπτό και αγώγιμο πλαστικό, τεντωμένη ανάμεσα σε μονωτικά στηρίγματα. Η δομή αυτού του μεγαφώνου θυμίζει τον επίπεδο πυκνωτή και φαίνεται στο σχήμα 1-8.



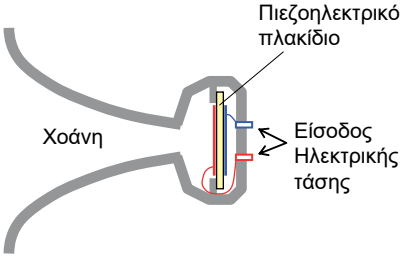
Σχήμα 1-8.
Ηλεκτροστατικό μεγάφωνο

Οι οπλισμοί του πυκνωτή είναι διάτρητες μεταλλικές πλάκες, για να μπορεί ο ήχος να περνά από μέσα τους. Στο χώρο μεταξύ των μεταλλικών πλακών είναι τεντωμένη η λεπτή αγώγιμη πλαστική μεμβράνη, η οποία βρίσκεται σε ηλεκτρική επαφή με την πίσω πλάκα.

Αν εφαρμόσουμε μια ηλεκτρική τάση (τάση διέγερσης) μεταξύ των δύο πλακών, αναπτύσσονται ηλεκτροστατικές δυνάμεις πάνω στη μεμβράνη, με αποτέλεσμα να απωθείται από την πίσω πλάκα και να έλκεται από την εμπρόσθια. Αν η τάση είναι μεταβαλλόμενη, προκαλεί παλμικές κινήσεις στη μεμβράνη, η οποία έτσι παράγει ήχο. Μειονέκτημα των ηλεκτροστατικών μεγαφώνων είναι το ότι δεν μπορούν να αναπαράγουν ικανοποιητικά τους πιο χαμηλούς ηχητικούς τόνους, όπως επίσης το γεγονός ότι, για να λειτουργήσουν, χρειάζονται πολύ υψηλή τάση διέγερσης (μερικές χιλιάδες βολτ), που πρέπει να εξασφαλιστεί με ειδική ηλεκτρική τροφοδοσία. Αυτό περιορίζει τη χρήση τους μόνο σε μερικά πολύ ακριβά ηχεία. Γι' αυτό τα ηλεκτροστατικά μεγάφωνα δεν είναι πολύ διαδεδομένα.

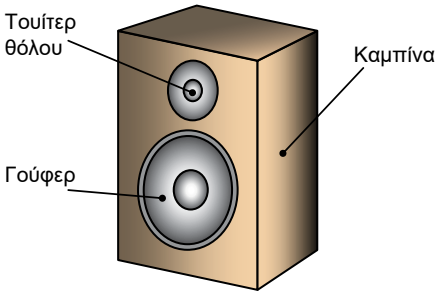
Η δομή ενός πιεζοηλεκτρικού μεγαφώνου φαίνεται στο σχήμα 1-9. Στη θέση της μεμβράνης αυτό το μεγάφωνο διαθέτει ένα δισκοειδές πιεζοηλεκτρικό πλακίδιο κατασκευασμένο συνήθως από κάποιο κεραμικό υλικό (οξείδια μετάλλων ψημένα σε φούρνο). Το μεγαλύτερο μέρος του μεγαφώνου το αποτελεί μια χοάνη, συνήθως κατασκευασμένη από πλαστικό, που σκοπό έχει να ενισχύει τον αδύναμο ήχο που παράγει το πλακίδιο.

Το πιεζοηλεκτρικό πλακίδιο έχει τις δύο του όψεις επιμεταλλωμένες. Όταν σ' αυτές τις επιφάνειες επιβάλουμε ηλεκτρική τάση, τότε, λόγω του φαινομένου της ηλεκτροσυστολής που εμφανίζεται στα πιεζοηλεκτρικά υλικά, το πλακίδιο κάμπτεται απειροελάχιστα. Αν η τάση είναι εναλλασσόμενη, το πλακίδιο εκτελεί παλμικές κινήσεις και παράγει ήχο. Επειδή όμως το πλάτος αυτών των κινήσεων είναι πολύ μικρό, το πιεζοηλεκτρικό μεγάφωνο είναι κατάλληλο για αναπαραγωγή μόνον των υψηλότερων ακουστικών συχνοτήτων και γι' αυτό χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τουίτερ. Το πιεζοηλε-



Σχήμα 1-9.
Πιεζοηλεκτρικό μεγάφωνο

κτρικό μεγάφωνο χρησιμοποιείται κυρίως σε επαγγελματικά ηχεία, λόγω της μεγάλης μηχανικής αντοχής και του μικρού του βάρους.



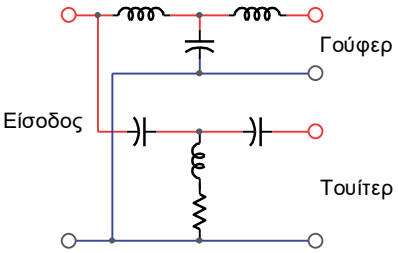
Σχήμα 1-10.
Ηχείο δύο δρόμων

Οι καμπίνες των ηχείων είναι κουτιά κατασκευασμένα κυρίως από ξύλο. Ο κύριος σκοπός της ύπαρξής τους είναι να ελέγχουν την πίσω ηχητική ακτινοβολία των μεγαφώνων. Όταν η μεμβράνη ενός μεγαφώνου κινείται προς τα εμπρός, παράγει πύκνωμα του αέρα στο εμπρόσθιο μέρος του και αραίωμα του αέρα στο πίσω. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η μεμβράνη κινείται προς τα πίσω. Αν το μεγάφωνο βρίσκεται ελεύθερο στο χώρο, τα αραιώματα εξουδετερώνουν εν μέρει τα πυκνώματα, με αποτέλεσμα να εξασθενεί σημαντικά ο ήχος του μεγαφώνου. Αυτό συμβαίνει κυρίως στις χαμηλές ακουστικές συχνότητες και γι' αυτό οι καμπίνες σχεδιάζονται για τις ανάγκες των γούφερ και μόνο. Η καμπίνα του ηχείου ελέγχει αυτό το πίσω ηχητικό κύμα είτε απορροφώντας το είτε χρησιμοποιώντας το για να ενισχύσει το μπροστινό κύμα. Τα ηχεία της πρώτης κατηγορίας είναι κλειστά, ενώ τα ηχεία της δεύτερης κατηγορίας είναι ανοικτά.

Επίσης, η καμπίνα εξουδετερώνει το φαινόμενο του συντονισμού των μεγαφώνων. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, κάθε μεγάφωνο πάλλεται με μέγιστο πλάτος σε κάποια συχνότητα, παράγοντας για τη συχνότητα αυτή δυνατότερο ήχο. Η εξουδετέρωση του συντονισμού γίνεται με κατάλληλη εκλογή των διαστάσεων της καμπίνας και σωστή χρήση απορροφητικού υλικού στο εσωτερικό της.

Πρακτικά ένα ηχείο αποτελείται από ένα συνήθως ορθογώνιο κουτί, στη μία όψη του οποίου μέσα από κατάλληλα ανοίγματα είναι προσαρμοσμένα ένα ή περισσότερα μεγάφωνα. Επειδή, όπως είδαμε, ένα μόνο μεγάφωνο δεν μπορεί να αναπαράγει ικανοποιητικά όλες τις συχνότητες των ήχων που συλλαμβάνει το αυτί μας, συνήθως τα μεγάφωνα είναι δύο, ένα γούφερ για τις χαμηλές συχνότητες και ένα τουίτερ για τις υψηλές. Αν υπάρχει και τρίτο, αυτό έχει διαστάσεις ενδιάμεσες των δύο, αναπαράγει τις μεσαίες ακουστικές συχνότητες και ονομάζεται μεγάφωνο μεσαίων ή μιντ-ρέιντζ (mid-range). Σπανιότερα συναντώνται ηχεία με τέσσερα μεγάφωνα.

Για να τροφοδοτείται κάθε μεγάφωνο του ηχείου με σήματα κατάλληλης συχνότητας για τη λειτουργία του, υπάρχουν στο εσωτερικό του κυκλώματα, τα οποία διαχωρίζουν αυτά τα σήματα ανάλογα με τη συχνότητά τους. Το σύνολο αυτών των κυκλωμάτων το ονομάζουμε ***κρος-όβερ*** (cross-over). Το πλήθος των περιοχών στις οποίες το κρος-όβερ χωρίζει τις συχνότητες των ρευμάτων καθορίζει και τον αριθμό των δρόμων του ηχείου. Έτσι υπάρχουν ηχεία δύο δρόμων, ηχεία τριών



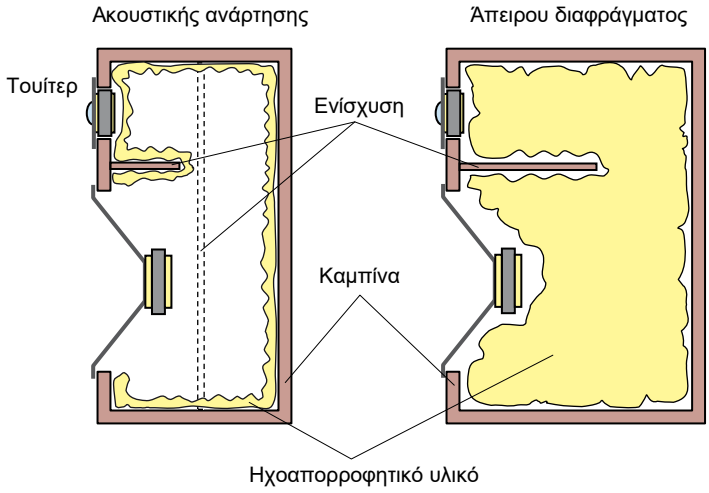
Σχήμα 1-11.
Διάγραμμα κυκλώματος ενός κρος-όβερ

δρόμων και μερικές φορές και ηχεία τεσσάρων δρόμων. Σε κάθε δρόμο αντιστοιχεί κατά κανόνα ένα μεγάφωνο, μερικές φορές όμως και δύο, ειδικά για την περιοχή των μπάσων. Γι' αυτό ο αριθμός των δρόμων δε συμπίπτει πάντοτε με το πλήθος των μεγαφώνων που βλέπουμε σε ένα ηχείο.

Το κύκλωμα ενός κρος-όβερ αποτελείται από φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων, φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων και φίλτρα διέλευσης ζώνης συχνοτήτων. Όλα τους είναι κατασκευασμένα με ένα συνδυασμό πηνίων, πυκνωτών και αντιστάσεων. Στο σχήμα 1-11 φαίνεται το κύκλωμα ενός τυπικού κρος-όβερ δύο δρόμων.

Βασική προϋπόθεση για την καλή λειτουργία ενός ηχείου είναι να μην πάλλονται τα τοιχώματα της καμπίνας, εξαιτίας των ήχων που παράγουν τα μεγάφωνα. Για να εξασφαλιστεί αυτό, τα τοιχώματα κατασκευάζονται με κατάλληλες νευρώσεις και ενισχύσεις. Συχνά αποτελούνται από αλλεπάλληλα στρώματα διαφόρων υλικών, για να έχουν μεγάλη ακαμψία.

Τα ηχεία κατατάσσονται, ανάλογα με τη σχεδίασή τους, σε κλειστά και ανοικτά. Τα ανοικτά ηχεία έχουν υψηλότερη απόδοση από τα κλειστά, δηλαδή με την ίδια ηλεκτρική ισχύ παράγουν δυνατότερο ήχο, όμως τα κλειστά ηχεία έχουν ευκολότερη σχεδίαση και κατασκευή.

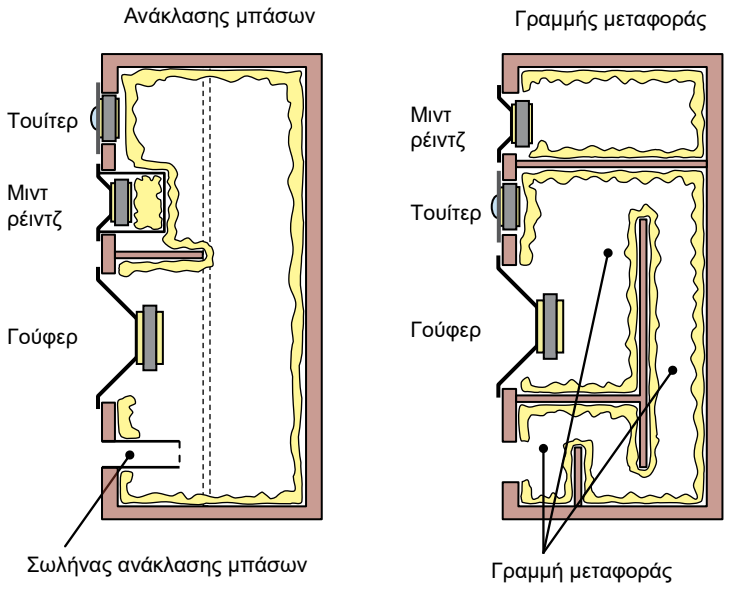


Σχήμα 1-12. *Ηχεία κλειστού τύπου*

Τα κλειστά ηχεία χωρίζονται σε ηχεία ακουστικής ανάρτησης και σε ηχεία άπειρου διαφράγματος (σχήμα 1-12). Τα πρώτα χρησιμοποιούν τον αέρα του κλειστού κουτιού ως ελατήριο, επιτυγχάνοντας έτσι μικρόν όγκο κατασκευής, ενώ τα δεύτερα απλά απορροφούν την ηχητική ενέργεια του πίσω ηχητικού κύματος. Γι' αυτό το λόγο είναι γεμισμένα με ηχοαπορροφητικό υλικό (συχνά υαλοβάμβακα) και έχουν κατά κανόνα μεγάλο όγκο.

Τα ηχεία ακουστικής ανάρτησης χρησιμοποιούν και αυτά ηχοαπορροφητικό υλικό, αλλά μόνο σε μια λεπτή στρώση στα εσωτερικά τους τοιχώματα, που σκοπό έχει να ελέγχει τα στάσιμα κύματα ήχου στο εσωτερικό της καμπίνας.

Τα ανοικτά ηχεία χωρίζονται σε ηχεία ανάκλασης μπάσων και σε ηχεία γραμμής μεταφοράς (σχήμα 1-13). Τα πρώτα αντιστρέφουν τα αραιώματα και τα πυκνώματα του πίσω μέρους του μεγαφώνου χαμηλών συχνοτήτων (τα κάνουν πυκνώματα και αραιώματα), μέσω ενός σωλήνα συντονισμένου στη συχνότητα συντονισμού αυτού του μεγαφώνου. Τα δεύτερα επιτυγχάνουν το ίδιο πράγμα, αναγκάζοντας το πίσω ηχητικό κύμα να περάσει μέσα από μια διαδρομή μεγάλου μήκους αναδιπλωμένη στο εσωτερικό του ηχείου. Η διαδρομή αυτή ορίζεται από ένα σωλήνα που σχηματίζεται στο εσωτερικό της καμπίνας από κατάλληλα τοποθετημένα ξύλινα διαφράγματα.



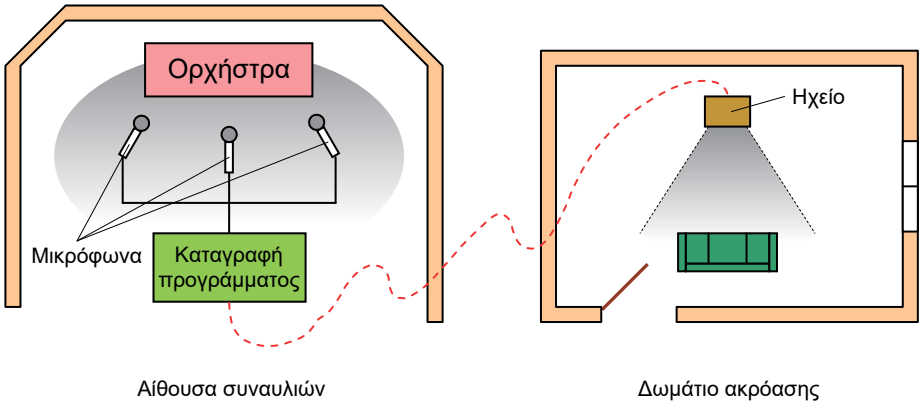
Σχήμα 1-13. *Ηχεία ανοικτού τύπου*

Εκτός από τους τύπους μεγαφώνων και ηχείων που περιγράφηκαν παραπάνω, υπάρχουν και πολλοί άλλοι τύποι που προορίζονται για ειδικές εφαρμογές, όπως τα μεγάφωνα-κόρνα, τα ηχεία ηχοστήλες κλπ. Η περιγραφή όλων αυτών ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτού του βιβλίου.

1.3.2 Συστήματα Μονό - Στέρεο

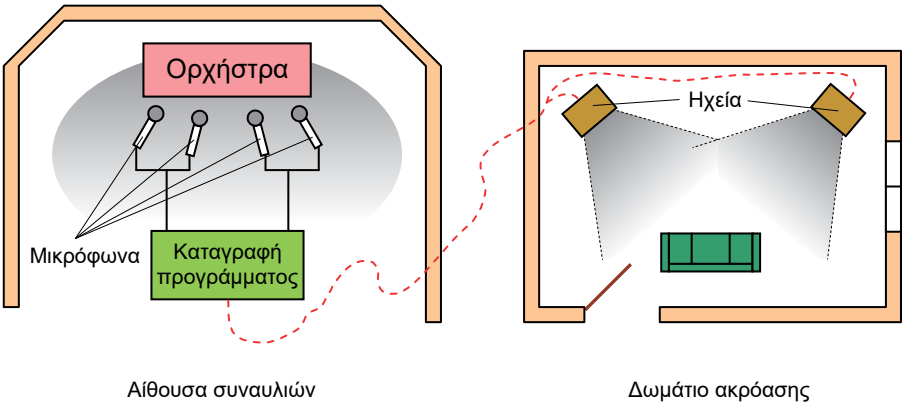
Στα πρώτα βήματα των συστημάτων αναπαραγωγής ήχου, όλοι οι ήχοι ενός προγράμματος είχαν από κοινού την ίδια επεξεργασία. Ένα ή περισσότερα μικρόφωνα συλλάμβαναν όλους τους ήχους, μια συσκευή τους κατέγραφε όλους μαζί στο ίδιο μέσο καταγραφής και τέλος η αναπαραγωγή όλων γινόταν από ένα μόνο ηχείο. Τεχνικοί και οικονομικοί λόγοι υπαγόρευαν αυτή τη διαδικασία, η οποία ξεκίνησε από την εποχή των γραμμοφώνων με χωνί και ήταν απόλυτα προσαρμοσμένη στις δυνατότητες των πρώτων ραδιοφώνων μεσαίων και μακρών κυμάτων.

Η μέθοδος αυτή αναπαρήγαγε ένα ηχητικό πρόγραμμα πολύ φτωχότερο σε ποιότητα και ρεαλισμό σε σχέση με τη ζωντανή ακρόαση του ίδιου προγράμματος απ' ευθείας από την ορχήστρα. Από πειράματα που έγιναν στη δεκαετία του '30 διαπιστώθηκε ότι μια από τις κύριες αιτίες γι' αυτό ήταν η κατάργηση της δυνατότητας του ηχητικού προσανατολισμού, που μας προσφέρει η ακοή από τα δύο αυτιά μας. Επειδή όλοι οι ήχοι προέκυπταν από το ίδιο σημείο (το ένα και μόνο ηχείο), ο ακροατής αδυνατούσε να εντοπίσει τη διαφορά στη θέση των διάφορων πηγών (μουσικών οργάνων) του προγράμματος, πράγμα το οποίο εύκολα κατόρθωνε στη ζωντανή ακρόαση και έτσι αποκόμιζε την εντύπωση ενός ποιοτικά πολύ φτωχού ακροάματος.



Σχήμα 1-14. *Μονοφωνική καταγραφή και αναπαραγωγή ήχου*

Η λύση δόθηκε με τη στερεοφωνική ακρόαση. Όλα τα συστήματα καταγραφής και αναπαραγωγής των ηχητικών προγραμμάτων έγιναν διπλά. Δύο μικρόφωνα ή συνηθέστερα δύο ομάδες μικροφώνων χρησιμοποιούνται, για να καταγράψουν το ίδιο ηχητικό πρόγραμμα από διαφορετικές θέσεις. Οι δύο αυτές καταγραφές, που περιέχουν ελαφρά διαφορετικό ηχητικό περιεχόμενο, αποθηκεύονται σε δύο ξεχωριστά «κανάλια» ήχου, τα οποία ονομάζονται αριστερό και δεξί κανάλι (L και R αντίστοιχα), (σχήμα 1-15).



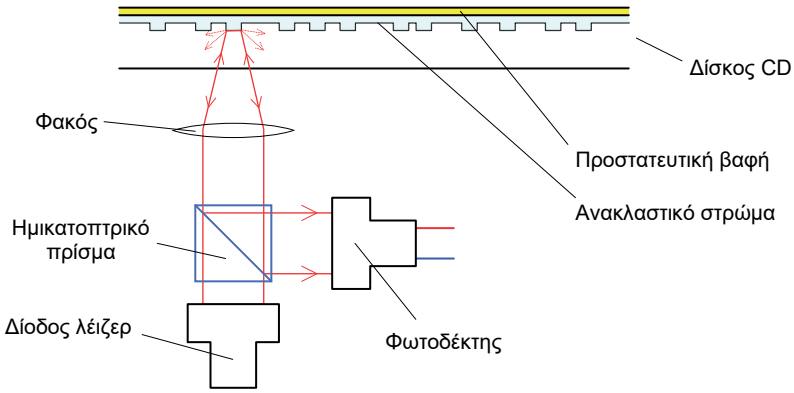
Σχήμα 1-15. *Στερεοφωνική καταγραφή και αναπαραγωγή ήχου*

Κατά την αναπαραγωγή του στερεοφωνικού προγράμματος τα δύο ηχεία εκπέμπουν τους ελαφρά διαφορετικούς ήχους που έχει συλλάβει η κάθε ομάδα μικροφώνων. Αν η τοποθέτηση των ηχείων είναι σωστή, κάθε αυτί του ακροατή συλλαμβάνει εκείνους τους ήχους που θα άκουγε, αν ο ίδιος βρισκόταν μπροστά στην ορχήστρα και μεταξύ των θέσεων των μικροφώνων. Με τον τρόπο αυτό ο ακροατής αποκτά ηχητικό προσανατολισμό και αποκομίζει την εντύπωση της διάταξης των οργάνων της ορχήστρας στο χώρο. Έτσι η ακρόαση γίνεται πολύ πιο ρεαλιστική.

Τα συστήματα αυτά ονομάστηκαν στερεοφωνικά, κατ' αντιστοιχία προς τα στερεοσκοπικά συστήματα τρισδιάστατης όρασης. Όταν τα στερεοφωνικά συστήματα καθιερώθηκαν κατά τη δεκαετία του '60, τα παλαιότερα συστήματα ονομάστηκαν μονοφωνικά. Σήμερα τα ονομάζουμε συστήματα μονό-στέρεο.

Η διάδοση των συστημάτων στέρεο είναι πλέον ευρύτατη. Σ' αυτό βοήθησε πολύ η εφαρμογή μεθόδων μαζικής παραγωγής στη βιομηχανία των καταναλωτικών ηλεκτρονικών και η χρήση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, που μείωσαν πάρα πολύ το κόστος απόκτησης των στερεοφωνικών συσκευών. Αυτές εμφανίζονται πλέον σε πολλές μορφές και μεγέθη, από τα φορητά και τα ολοκληρωμένα μικροσυστήματα (πολλές συσκευές μικρού μεγέθους στο ίδιο κουτί), μέχρι τα μεγάλα διακριτά σύνολα μεγάλου κόστους και υψηλών προδιαγραφών.

Βασικός φορέας διανομής μουσικού προγράμματος σήμερα είναι ο δίσκος CD (Compact Disk ή συμπαγής δίσκος). Η καταγραφή του ήχου στο CD γίνεται με ψηφιακές μεθόδους και έχει τη μορφή μικροσκοπικών εξογκωμάτων πάνω σε μια κατοπτρική επιφάνεια. Μια ακτίνα λέιζερ που ανακλάται επάνω της διαβάζει την καταγραμμένη πληροφορία, η οποία μετά από επεξεργασία εμφανίζεται με τη μορφή του γνωστού ηλεκτρικού σήματος (σχήμα 1-16).



Σχήμα 1-16. *Σύστημα ανάγνωσης δίσκου CD*

Η ηχητική πληροφορία δεν είναι καταγραμμένη με συνεχή τρόπο, αλλά διακεκομμένα, περίπου 44 χιλιάδες φορές το δευτερόλεπτο για κάθε κανάλι και είναι κωδικοποιημένη με τη μορφή 16-ψήφιων αριθμών του δυαδικού συστήματος. (Αυτοί οι αριθμοί έχουν ψηφία μόνο το 0 και το 1). Η επεξεργασία που προαναφέραμε αφορά την αποκωδικοποίηση και τη μετατροπή αυτών των αριθμών σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό σήμα, που, όταν ενισχυθεί και οδηγηθεί σε μεγάφωνα, παράγει ήχο.

Τις συσκευές ανάγνωσης CD τις ανταγωνίζονται και άλλες συσκευές ψηφιακής αποθήκευσης του ηχητικού σήματος, όπως το Mini Disk, το μαγνητόφωνο DAT και το μαγνητόφωνο DCC. Αυτές χρησιμοποιούν μαγνητικό μέσο αποθήκευσης και έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να ξαναγράφονται από το χρήστη. Η εμφάνιση όμως του CD που επιτρέπει και εγγραφή ήχου (CD recordable) τους έχει αφαιρέσει σημαντικό μέρος από αυτό το πλεονέκτημα.

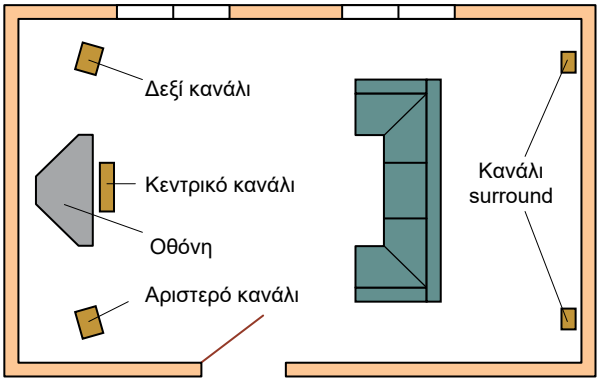
1.3.3 Περιφερειακός (surround) ήχος

Με την εξέλιξη των μεθόδων ηχοληψίας έγινε φανερό ότι το κλασσικό στερεοφωνικό σχήμα καταγραφής και αναπαραγωγής ήχου του σχήματος 1-15 δεν ήταν αρκετό. Διαπιστώθηκε ότι, από το σύνολο της ηχητικής ενέργειας που παράγει μια ορχήστρα σε ένα χώρο συναυλιών, λιγότερο από το 30% φτάνει απ' ευθείας στα αυτιά του ακροατή. Το υπόλοιπο φτάνει μετά από ανακλάσεις του ήχου στους τοίχους και την οροφή της αίθουσας. Αυτός ο ήχος που φαίνεται να «τυλίγει» τον ακροατή ονομάστηκε περιβάλλων ήχος και είναι σε μεγάλο βαθμό υπαίτιος για τον ειδικό χαρακτήρα που έχει η ζωντανή ακρόαση μιας συναυλίας. Η καταγραφή του περιβάλλοντος ήχου μπορεί να γίνει εύκολα με πρόσθετες ομάδες μικροφώνων που συλλαμβάνουν τους ανακλώμενους ήχους, αλλά η αναπαραγωγή τους από

τα δύο ηχεία του στερεοφωνικού συγκροτήματος παρουσιάζει πρόβλημα. Τα ηχεία αυτά προκαλούν ανακλάσεις στους τοίχους του δωματίου ακρόασης, οι ανακλάσεις όμως αυτές είναι πολύ διαφορετικές από τις ανακλάσεις στους τοίχους μιας αίθουσας συναυλιών, κυρίως γιατί το δωμάτιο έχει πολύ μικρότερες διαστάσεις.

Το ίδιο χρονικό διάστημα η κινηματογραφική βιομηχανία αντιμετώπιζε ένα ανάλογο πρόβλημα. Για να αυξήσει τη δραματικότητα των έργων της και να αποσπάσει θεατές από την τηλεόραση, χρειαζόταν ήχους που να περιβάλλουν το θεατή μέσα στην αίθουσα προβολής και να του υποβάλλουν εντονότερα την κινηματογραφική δράση. Η λύση που δόθηκε με τη χρησιμοποίηση τεσσάρων καναλιών ήχου: τα γνωστά δεξί και αριστερό των συστημάτων stereo, ένα κεντρικό για τους διαλόγους και ένα κανάλι περιβάλλοντος ήχου, που αναπαράγεται από πολλά μεγάφωνα πίσω από το θεατή. Με μια τεχνική κωδικοποίησης, που βασίζεται στις διαφορές φάσης μεταξύ των σημάτων, οι ήχοι του κεντρικού και του περιβάλλοντος καναλιού προστίθενται στους ήχους του δεξιού και του αριστερού καναλιού. Με τον τρόπο αυτό το πρόγραμμα μπορεί να αναπαραχθεί με απλή στερεοφωνική μορφή και από ένα κοινό σύστημα stereo, το οποίο, αν διαθέτει και τον κατάλληλο αποκωδικοποιητή, μπορεί να λειτουργήσει σαν πλήρες σύστημα περιβάλλοντος ήχου.

Το παραπάνω πλεονέκτημα βοήθησε πολύ τη διάδοση αυτού του συστήματος. Στη διάρκεια της δεκαετίας του ’90 πέρασε και στα καταναλωτικά ηλεκτρονικά με τη μορφή του «οικιακού κινηματογράφου». Ονομάζεται Dolby Surround – ντόλμπυ σαράουντ (Dolby Stereo στην κινηματογραφική του έκδοση) από το όνομα της εταιρείας που το ανέπτυξε.



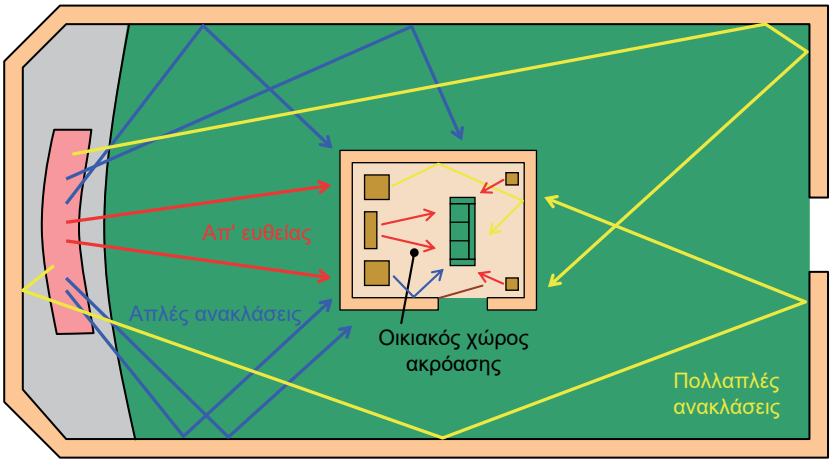
Σχήμα 1-17. *Σύστημα «οικιακού κινηματογράφου»*

Οι συσκευές Dolby Surround διαθέτουν σήμερα και την ένδειξη prologic (προλότζικ), που υποδηλώνει ότι διαθέτουν ενεργό (με δυνατότητες επεξεργασίας) αποκωδικοποιητή, κατάλληλο να βελτιώνει το διαχωρισμό των ήχων μεταξύ των καναλιών.

Το σύστημα του οικιακού κινηματογράφου διαθέτει πέντε ηχεία, τα δύο του γνωστού συστήματος stereo, ένα για το κεντρικό κανάλι και δύο για το κανάλι περιβάλλοντος ήχου (surround), τοποθετημένα πίσω από τη θέση ακρόασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-17. Το ηχείο του κεντρικού καναλιού και ιδιαίτερα τα ηχεία του καναλιού περιβάλλοντος ήχου δε χρειάζεται να έχουν το μέγεθος των άλλων ηχείων, γιατί το πρόγραμμα που αναπαράγουν είναι πολύ λιγότερο απαιτητικό. Το ίδιο και ο ενισχυτής του καναλιού surround, ο οποίος μπορεί να είναι μικρής ισχύος.

Νεότερες εξελίξεις στην τεχνολογία των συσκευών περιβάλλοντος ήχου έχουν σχεδόν εξαλείψει και τις τελευταίες διαφορές ανάμεσα στον οικιακό ήχο και στον ήχο της αίθουσας συναυλιών. Όπως προαναφέραμε, οι ανακλάσεις του ήχου στους τοίχους μιας μεγάλης αίθουσας διαφέρουν από τις ανακλάσεις στους τοίχους των δωματίων μας, γιατί στην πρώτη περίπτωση καθυστερούν να φτάσουν στα αυτιά μας πολύ περισσότερο απ' ό,τι στη δεύτερη.

Με τη διάδοση των ψηφιακών επεξεργαστών σήματος (DSP – Digital Signal Processors) είναι πλέον δυνατή η εισαγωγή τεχνητής καθυστέρησης στην αναπαραγωγή του απ' ευθείας ή του περιβάλλοντος ήχου (εφ' όσον αυτή δεν έχει ενσωματωθεί κατά τη φάση της εγγραφής) έτσι, ώστε το μικρό δωμάτιο να αποκτά ακουστική παρόμοια με αυτή που έχει μια μεγάλη αίθουσα συναυλίας. Επιπλέον μπορούμε να ρυθμίζουμε κατά βούληση αυτή την καθυστέρηση, έτσι ώστε να δίνουμε διάφορες ακουστικές «διαστάσεις» στο χώρο ακρόασής μας.



Σχήμα 1-18. *Ήχοι σε αίθουσα συναυλιών σε σχέση με τον οικιακό χώρο ακρόασης*

1.3.4 Ηχοληψία

Ηχοληψία ονομάζεται η διαδικασία συλλογής των ήχων με τη βοήθεια μικροφώνων. Η ηχοληψία μπορεί να αφορά ήχους απλούς, όπως μια ομιλία, έως σύνθετους, όπως το πρόγραμμα μιας συμφωνικής ορχήστρας. Η ηχοληψία είναι το προαπαιτούμενο στάδιο για όλα τα συστήματα αναπαραγωγής ήχου, που γνωρίσαμε παραπάνω. Βασικό εργαλείο της είναι το μικρόφωνο. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία μικροφώνων για την ικανοποίηση κάθε ιδιαίτερης απαίτησης συλλογής του ήχου. Όλα αυτά τα μικρόφωνα έχουν δομές και αρχές λειτουργίας ανάλογες με αυτές των μεγαφώνων, που γνωρίσαμε στην παράγραφο 1.3.1. Τα μικρόφωνα κατατάσσονται ανάλογα με το φυσικό νόμο, στον οποίο στηρίζεται η λειτουργία τους, σε:

α) δυναμικά μικρόφωνα

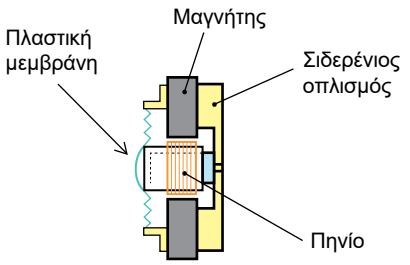
β) πυκνωτικά μικρόφωνα

γ) πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα κλπ.

Η λεπτομερής τους παρουσίαση ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτού του βιβλίου και έτσι θα περιοριστούμε σε μια απλή περιγραφή.

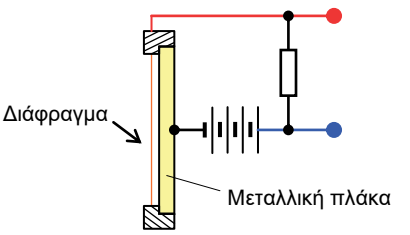
Το **δυναμικό μικρόφωνο** θυμίζει δυναμικό μεγάφωνο σε μικρογραφία, από το οποίο λείπει ο κώνος (σχήμα 1-19). Ανήκει στα μικρόφωνα σταθερής ταχύτητας, γιατί η τάση εξόδου του είναι ανάλογη προς την ταχύτητα μεταβολής της ηχητικής πίεσης.

Στο δυναμικό μικρόφωνο τα ηχητικά κύματα πέφτουν στη μεμβράνη και θέτουν σε κίνηση το πηνίο μέσα στο διάκενο του δακτυλιοειδούς μαγνήτη, αναπτύσσοντας στα άκρα του τάσεις εξ επαγωγής. Το μικρόφωνο αυτό συνδυάζει καλή πιστότητα στη μετατροπή των ήχων, ικανοποιητική ευαισθησία στους ασθενικούς ήχους και καλή μηχανική αντοχή. Είναι μικρόφωνο γενικής χρήσης και το περισσότερο διαδεδομένο απ' όλα τα άλλα.



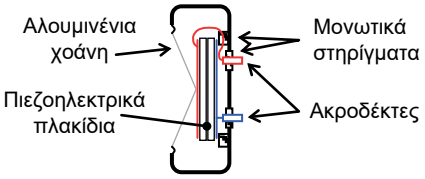
Σχήμα 1-19.
Δυναμικό μικρόφωνο

Το **πυκνωτικό μικρόφωνο** είναι το αντίστοιχο του ηλεκτροστατικού μεγαφώνου (σχήμα 1-20). Ανήκει στα μικρόφωνα σταθερού πλάτους, γιατί η τάση εξόδου του είναι ανάλογη προς το πλάτος της μεταβολής της ηχητικής πίεσης.



Σχήμα 1-20.
Πυκνωτικό μικρόφωνο

Στο μικρόφωνο αυτό ένα λεπτό αγώγιμο διάφραγμα τεντωμένο μπροστά από μια μεταλλική πλάκα σχηματίζει μαζί της έναν πυκνωτή. Τα ηχητικά κύματα θέτουν σε κίνηση το διάφραγμα και αλλάζουν τη χωρητικότητα του πυκνωτή. Αυτό προκαλεί τη διέλευση ρεύματος μέσα από την αντίσταση R και την ανάπτυξη τάσης στα άκρα της, που είναι η τάση εξόδου του μικροφώνου. Τα πυκνωτικά μικρόφωνα παρουσιάζουν άριστη πιστότητα, αλλά έχουν μικρή ευαισθησία, απαιτούν τάση τροφοδοσίας για να λειτουργήσουν και δεν έχουν καλή μηχανική αντοχή. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται για ηχοληψίες σε εσωτερικούς χώρους, κυρίως σε στούντιο.



Σχήμα *1-21*.
Πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο

Το πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο είναι το αντίστοιχο του πιεζοηλεκτρικού μεγαφώνου (σχήμα 1-21). Ανήκει και αυτό στα μικρόφωνα σταθερού πλάτους. Στο πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο μια λεπτή αλουμινένια χοάνη ακουμπά σε ένα ζεύγος πιεζοηλεκτρικών πλακιδίων. Τα ηχητικά κύματα κινούν τη χοάνη και κάνουν τα πλακίδια να κάμπτονται. Λόγω των μικροσκοπικών κάμψεων, εμφανίζονται πιεζοηλεκτρικές τάσεις στα άκρα των πλακιδίων, οι οποίες αποτελούν το σήμα εξόδου του μικροφώνου. Τα πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα έχουν μεγάλη ευαισθησία και μικρό κόστος, και γι' αυτό χρησιμοποιούνται σε φθηνά μαγνητόφωνα, σε συσκευές μέτρησης ήχου κλπ.

Ο εξοπλισμός που είναι απαραίτητος για μια ηχοληψία περιλαμβάνει μια σειρά από κατάλληλα μικρόφωνα, διάφορα μήκη θωρακισμένων (μπλενταρισμένων) καλωδίων για τη σύνδεση των μικροφώνων, μία κονσόλα μίξης για τη σύνθεση των σημάτων πολλών μικροφώνων σε ένα ή περισσότερα κανάλια ήχου και τέλος ένα τουλάχιστον μαγνητόφωνο, για την καταγραφή του αποτελέσματος της ηχοληψίας.

Βασικά προβλήματα κατά την ηχογράφηση με ένα ή περισσότερα μικρόφωνα είναι ο έλεγχος της στάθμης του σήματος, ο θόρυβος του περιβάλλοντος και η ακουστική του χώρου.

Ο έλεγχος της στάθμης του σήματος έχει καθοριστική σημασία για την επιτυχία μιας ηχοληψίας. Αν η στάθμη του σήματος είναι χαμηλή, τότε υπερισχύει κατά την αναπαραγωγή ο θόρυβος. Αν η στάθμη είναι υψηλή, τότε προκαλείται παραμόρφωση. Η ρύθμισή της μπορεί να υποβοηθηθεί από κάποιες συσκευές, που ονομάζονται «συμπιεστές ακουστικού σήματος».

Ο θόρυβος του περιβάλλοντος λείπει μόνο από τα ειδικά στούντιο ηχοληψίας. Τα στούντιο αυτά είναι ηχητικά μονωμένα και επενδυμένα με απορροφητικό υλικό, ώστε να μην εισέρχονται εξωτερικοί ήχοι και να προκαλούνται ηχητικές ανακλάσεις στο εσωτερικό τους.

Η ακουστική των χώρων τέλος αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη πρόκληση της ηχοληψίας. Ανακλάσεις και αντηχήσεις σε αίθουσες που παρουσιάζουν μεγάλες

λείες επιφάνειες (τοίχους, πατώματα, οροφές κλπ.) μπορεί να είναι εξαιρετικά επιζήμιες. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται να τοποθετούνται κατάλληλες ηχοαπορροφητικές επιφάνειες, όπως κουρτίνες, μαξιλάρια, αφρώδη υλικά κλπ., για την εξομάλυνση των ηχητικών ανωμαλιών του χώρου. Από την άλλη μεριά όμως, η τέλεια εξάλειψη των ακουστικών ιδιαιτεροτήτων του χώρου είναι εξίσου επιζήμια, γιατί αφαιρεί όλον το «χαρακτήρα» της αίθουσας από την ηχογράφηση.

Η κατάσταση είναι ακόμη πιο περίπλοκη, όταν πρόκειται να γίνει ηχοληψία εκτεταμένης πηγής ήχων, όπως είναι, για παράδειγμα, μια πολυμελής ορχήστρα. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζονται γενικά δύο μέθοδοι. Η πρώτη ονομάζεται πολυμικροφωνικό σύστημα και η δεύτερη σύστημα δύο μικροφώνων.

Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο, μπροστά σε κάθε όργανο (ή ομάδα οργάνων) της ορχήστρας τοποθετείται από ένα μικρόφωνο.

Σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο, η ηχοληψία βασίζεται σε δύο μικρόφωνα υψηλής ποιότητας, τα οποία τοποθετούνται μαζί μπροστά από την ορχήστρα και στο μέσον της, υπό γωνία 90° το ένα ως προς το άλλο. Τα μικρόφωνα αυτά ονομάζονται κεντρικά ή κύρια και οι έξοδοί τους οδηγούνται απ' ευθείας στο δεξί και το αριστερό κανάλι της εγγραφής. Συνήθως όμως χρησιμοποιείται μια συνδυασμένη μέθοδος, όπου μια ομάδα άλλων μικροφώνων τοποθετούνται περιφερειακά και καταγράφουν το πεδίο του περιβάλλοντος ήχου. Οι έξοδοι των μικροφώνων της δεύτερης ομάδας αναμιγνύονται με τις εξόδους των κεντρικών μικροφώνων σε αναλογία που καθορίζει ο ηχολήπτης.

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

- Ο ήχος παράγεται από τις παλμικές κινήσεις των σωμάτων και διαδίδεται στον αέρα με τη μορφή κυμάτων πίεσης. Για τη διάδοσή του απαιτείται ένα ελαστικό υλικό μέσο. Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον αέρα είναι 340 m/s.

- Ακουστοί γίνονται ήχοι που έχουν συχνότητες μεταξύ 20 και 20.000 Hz και διακρίνονται σε τόνους, φθόγγους, θορύβους και κρότους. Οι τόνοι ονομάζονται και απλοί ήχοι, ενώ οι υπόλοιποι ονομάζονται σύνθετοι ήχοι. Όλοι οι σύνθετοι ήχοι μπορούν να προκύψουν από συνδυασμούς απλών τόνων.

- Τα χαρακτηριστικά των ήχων που αντιλαμβανόμαστε ονομάζονται υποκειμενικά. Αυτά είναι η ακουστότητα, το ύψος και η χροιά. Και τα τρία αντιστοιχούν στα αντικειμενικά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να μετρηθούν με επιστημονικά όργανα και είναι η ένταση, η συχνότητα και το φασματικό περιεχόμενο αντιστοίχως.

- Τα σώματα που παράγουν ήχους χωρίζονται σε χορδές, ηχητικούς σωλήνες, ράβδους, μεμβράνες και πλάκες. Όλα αυτά παράγουν σύνθετους ήχους (φθόγγους). Το μόνο σώμα που παράγει τόνους είναι το διαπασών.

- Η ανθρώπινη φωνή παράγεται από τις φωνητικές χορδές, οι οποίες πάλλονται εξαιτίας του αέρα που εκπνέουμε. Οι ήχοι που παράγουν διαμορφώνονται στη στοματική κοιλότητα και παίρνουν την κατάλληλη χροιά.

• Η αναπαραγωγή των ηλεκτρονικά καταγραμμένων ήχων γίνεται με ηχεία. Τα ηχεία είναι κουτιά, στα οποία προσαρμόζονται ένα ή περισσότερα μεγάφωνα.

• Υπάρχουν μεγάφωνα δυναμικά, ηλεκτροστατικά, πιεζοηλεκτρικά κ.α. Τα συνηθέστερα είναι τα δυναμικά. Ανάλογα με το μέγεθός τους, χωρίζονται σε γούφερ (μεγάλα) για την αναπαραγωγή των χαμηλών συχνοτήτων, μιντ-ρέιντζ για τις μεσαίες συχνότητες και τουίτερ (μικρά) για τις υψηλές. Τα κουτιά των ηχείων χρειάζονται για τα γούφερ.

• Για πιστότερη αναπαραγωγή των ήχων χρησιμοποιούμε συστήματα stereo. Τα συστήματα αυτά καταγράφουν κατά την ηχοληψία και αναπαράγουν αργότερα από δύο κανάλια ήχους ελαφρά διαφορετικούς, που μας προσφέρουν ηχητικό προσανατολισμό και την εντύπωση της διάταξης των ηχητικών πηγών στο χώρο.

• Για ακόμη ρεαλιστικότερες ακροάσεις, καταγράφονται και ήχοι που περιβάλλουν τον ακροατή κατά την ακρόαση ενός «ζωντανού» (όχι ηχογραφημένου) ηχητικού προγράμματος. Οι ήχοι αυτοί κωδικοποιούνται στα δύο κανάλια του συστήματος. Αναπαράγονται από ειδικούς αποκωδικοποιητές και δίνουν τέσσερα κανάλια ήχου, το δεξί, το αριστερό, το κεντρικό και το πίσω. Τα συστήματα που λειτουργούν μ' αυτόν τον τρόπο ονομάζονται συστήματα περιβάλλοντος ήχου.

• Για να καταγραφούν ήχοι προς αναπαραγωγή, πρέπει να περάσουν από τη διαδικασία της ηχοληψίας. Η ηχοληψία γίνεται με μικρόφωνα. Υπάρχουν πολλοί τύποι μικροφώνων, κατάλληλοι να καλύψουν τις ανάγκες της ηχοληψίας. Μεταξύ αυτών συνηθέστερα είναι τα δυναμικά και τα πυκνωτικά μικρόφωνα.

• Οι διαδικασίες της ηχοληψίας μπορεί να είναι ιδιαίτερα περίπλοκες και απαιτούν καλές τεχνικές γνώσεις, εμπειρία και αρκετές φορές ταλέντο από το άτομο που θα τις φέρει σε πέρας.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Σε ποια είδη διακρίνουμε τους ήχους και ποια είναι τα γνωρίσματα του κάθε είδους ήχων;
2. Ποια είναι τα υποκειμενικά και ποια τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά των ήχων; Τι εκφράζει το καθένα από αυτά;
3. Σε τι διαφέρει ένα μεγάφωνο από ένα ηχείο;
4. Ποιο σκοπό εξυπηρετούν τα μεγάφωνα που υπάρχουν στα ηχεία;
5. Γιατί μπορούν τα μεγάφωνα να παράγουν ήχους μεγάλης έντασης;
6. Ποιο σκοπό εξυπηρετούν οι καμπίνες των μεγαφώνων;
7. Γιατί συνήθως υπάρχουν περισσότερα από ένα μεγάφωνα στα ηχεία;

8. Ποιο σκοπό εξυπηρετούν τα κρος-όβερ στα ηχεία;
9. Σε ποιους τύπους κατατάσσονται τα ηχεία ανάλογα με τη σχεδίασή τους και ποια είναι τα πλεονεκτήματα κάθε τύπου;
10. Σε ποιες κατηγορίες χωρίζονται τα κλειστά και τα ανοικτά ηχεία και πώς λειτουργούν τα ηχεία κάθε κατηγορίας;
11. Πώς λειτουργεί το στερεοφωνικό σύστημα ακρόασης κατά την εγγραφή και την αναπαραγωγή των μουσικών προγραμμάτων;
12. Πόσα κανάλια ήχου διαθέτει το σύστημα Dolby Surround, πόσα ηχεία χρησιμοποιεί και ποιους ήχους αναπαράγει κάθε κανάλι;
13. Ποια είναι τα βασικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπίσουμε σε μια ηχοληψία;



Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται τα χαρακτηριστικά του φωτός και των χρωμάτων και εκθέτει τις βασικές έννοιες στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία της τηλεόρασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΤΗΛΕΟΠΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

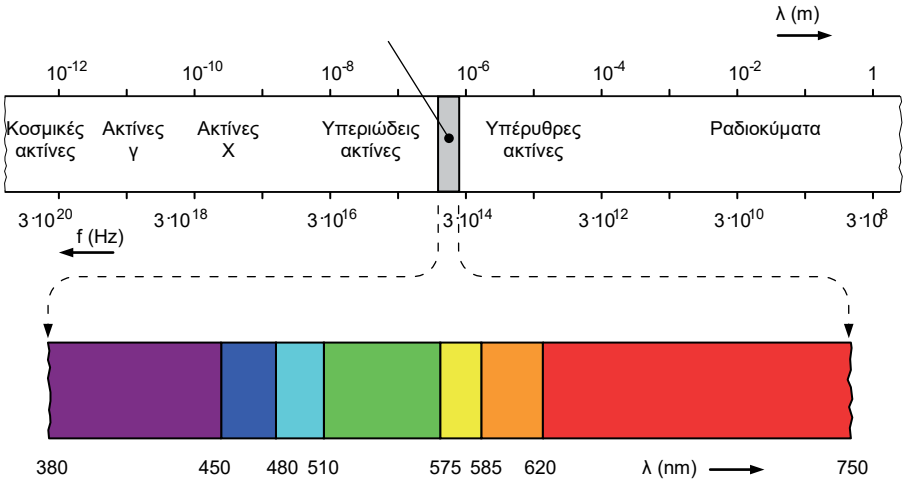
Αναμφίβολα η τηλεόραση είναι μια από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις στο χώρο της μαζικής ενημέρωσης και ψυχαγωγίας. Η δύναμη αυτού του μέσου βασίζεται στο συνδυασμό ήχου και εικόνας, η οποία επειδή απευθύνεται στις κυριότερες αισθήσεις του ανθρώπου, είναι τόσο μεγάλη, ώστε έθεσε νέα πρότυπα κοινωνικής συμπεριφοράς. Η τηλεόραση όμως αποτέλεσε πρόκληση και για τον τεχνολογικό τομέα, αφού για την πραγματοποίησή της απαιτήθηκαν συνδυασμένες γνώσεις από τους τομείς της οπτικής, της φυσιολογίας, του ηλεκτρισμού και των ηλεκτρονικών και αξιοποιήθηκαν εμπειρίες προερχόμενες από το χώρο της φωτογραφίας, του κινηματογράφου και του ραδιοφώνου.

Τηλεόραση σημαίνει όραση από μακριά. Η έννοια της τηλεόρασης είναι συνδεδεμένη με την έννοια της εκπομπής σημάτων, τα οποία λαμβάνονται από κάποιο τηλεοπτικό δέκτη και προκαλούν την αναπαραγωγή ενός τηλεοπτικού προγράμματος. Τα σήματα αυτά είναι αρκετά περίπλοκα και τα χαρακτηρίζουμε με τον γενικό όρο ***τηλεοπτικό σήμα.*** Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε σε γενικές γραμμές αυτό το τηλεοπτικό σήμα.

Η τηλεόραση αναπτύχθηκε στη δεκαετία του ’30, αλλά η διάδοσή της έγινε δυνατή μετά από το 2° παγκόσμιο πόλεμο. Στην αρχική της μορφή η τηλεοπτική εικόνα ήταν μονόχρωμη, κατά τα μέσα όμως της δεκαετίας του ’60 άρχισε να διαδίδεται η έγχρωμη τηλεόραση. Ταυτόχρονα το τηλεοπτικό σήμα απέκτησε πρόσθετα χαρακτηριστικά, για να καλύψει την ανάγκη εκπομπής πληροφοριών και για το χρώμα της εικόνας, τέτοια ώστε να επιτρέπουν και τη λειτουργία των παλιών ασπρόμαυρων τηλεοράσεων. Για να καταλάβουμε αυτά τα χαρακτηριστικά, πρέπει να ξεκινήσουμε από την πηγή της πληροφορίας που σχηματίζει μια εικόνα, δηλαδή το φως.

2.1 Το φως και οι ιδιότητές του

Το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως τα γνωστά μας ραδιοκύματα που χρησιμοποιούμε στις τηλεπικοινωνίες. Η μόνη του διαφορά από αυτά είναι η πολύ μεγαλύτερη συχνότητά του, τουλάχιστον 10.000 φορές μεγαλύτερη από την υψηλότερη συχνότητα ραδιοκυμάτων που χρησιμοποιούμε. Το ορατό φως αντιπροσωπεύει μόνον ένα μικρό τμήμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που υπάρχουν στη φύση. Τέτοια κύματα με συχνότητες μεταξύ 400 και 800 τρισεκατομμυρίων Χερτζ ($400 \cdot 10^{12}$ - $800 \cdot 10^{12}$ Hz) ή μήκη κύματος μεταξύ 750 και 375 εκατομμυριοστών του χιλιοστού του μέτρου ($750 \cdot 10^{-9}$ - $375 \cdot 10^{-9}$ m) δημιουργούν στο μάτι την εντύπωση του φωτός. Τα διαφορετικά μήκη κύματος (ή οι διαφορετικές συχνότητες) του φωτός σχετίζονται με το χρώμα που αντιλαμβανόμαστε. Έτσι, στα μεγαλύτερα μήκη κύματος αντιστοιχεί το κόκκινο και στα μικρότερα μήκη κύματος το ιώδες (μοβ) χρώμα. Φως με μήκος κύματος μεγαλύτερο απ' αυτό του κόκκινου χρώματος είναι αόρατο και ονομάζεται υπέρυθρο φως. Φως με μήκος κύματος μικρότερο απ' αυτό του ιώδους χρώματος ονομάζεται υπεριώδες και είναι επίσης αόρατο.

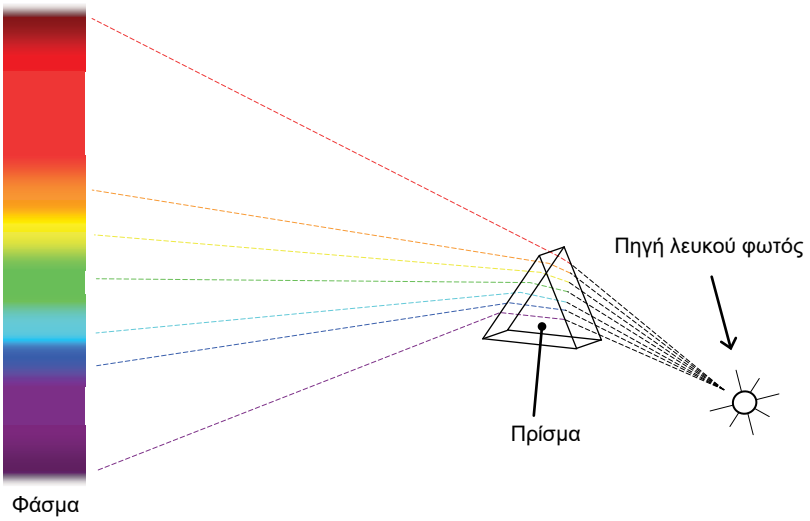


Σχήμα 2-1. Φάσμα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Τα χρώματα του ορατού φωτός μπορούμε να τα δούμε με τη βοήθεια ενός γυάλινου πρίσματος, επαναλαμβάνοντας το πείραμα του Νιούτον (σχήμα 2-2). Μια ακτίνα ηλιακού φωτός αναλύεται σε πλήθος άλλων έγχρωμων ακτίνων. Αν και κατά συνθήκη θεωρούμε ότι αυτά τα χρώματα είναι επτά, στην πραγματικότητα είναι άπειρα. Ένα εξασκημένο μάτι μπορεί να διακρίνει μέχρι και 200 αποχρώσεις ανάμεσα σε δύο διαδοχικά σαφώς καθορισμένα χρώματα.

Καθένα από τα χρώματα που προκύπτουν μ' αυτόν τον τρόπο, ονομάζεται ***καθαρό φασματικό χρώμα.*** Αν με τη βοήθεια κάποιου φίλτρου απομονώσουμε και πάρουμε ένα από αυτά τα χρώματα (ή μια μικρή ομάδα πολύ γειτονικών στο

φάσμα χρωμάτων), το φως που θα προκύψει απ' αυτό ονομάζεται ***μονοχρωματικό φως.*** Αν με τη βοήθεια ενός άλλου πρίσματος συγκεντρώσουμε όλα τα χρώματα του φάσματος που παράγει ένα πρίσμα, θα πάρουμε και πάλι λευκό φως. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει ότι το λευκό φως είναι κατάλληλο μείγμα πολλών χρωμάτων.



Σχήμα 2-2. *Ανάλυση λευκού φωτός με πρίσμα.*

2.1.1 Τα χαρακτηριστικά του φωτός

Για το χαρακτηρισμό των φωτεινών φαινομένων, χρησιμοποιούνται ορισμένα φωτομετρικά μεγέθη. Άλλα από αυτά περιγράφουν το ίδιο το φωτεινό κύμα και άλλα τις φωτεινές ιδιότητες της πηγής, από την οποία αυτό προέρχεται. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η φωτεινή ροή και η ένταση του φωτός, ενώ στη δεύτερη ανήκουν η λαμπρότητα και η φωτεινότητα. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό περιγράφει τη διαφοροποίηση στις φωτεινές ιδιότητες ενός αντικειμένου και ονομάζεται αντίθεση. Λεπτομερέστερα τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- ***Φωτεινή ροή*** (Φ) ονομάζεται η ενέργεια που μεταφέρεται από ένα φωτεινό κύμα σε χρόνο ενός δευτερολέπτου, είναι, δηλαδή, η ισχύς της οπτικής ακτινοβολίας. Η φωτεινή ροή μετρείται σε *λούμεν* (lumen ή Lm).
- ***Ένταση του φωτός*** (I) μιας φωτεινής πηγής ονομάζεται η φωτεινή ροή που ακτινοβολείται μέσα σε στερεή γωνία Ω ίση με ένα στερεακτίνιο. Είναι:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \qquad (2.1)$$

Μονάδα μέτρησης της έντασης του φωτός είναι η *καντέλα*, δηλαδή το κερί (candela ή Cd). 1Cd= 1Lm/sterad.

• ***Λαμπρότητα*** (B) μιας φωτεινής πηγής ονομάζεται η ένταση του φωτός που ακτινοβολείται από επιφάνεια S ενός τετραγωνικού μέτρου της πηγής. Είναι:

$$B = \frac{I}{S} \qquad (2.2)$$

Μονάδα μέτρησης της λαμπρότητας είναι το *νιτ* (nit ή Nt). $1Nt = 1Cd/m^2$. Η λαμπρότητα είναι μέγεθος που χαρακτηρίζει τις πρωτογενείς φωτεινές πηγές, αυτές, δηλαδή, που παράγουν από μόνες τους τη φωτεινή ενέργεια που εκπέμπουν (πχ. ήλιος, λαμπτήρες κλπ.)

• ***Φωτεινότητα*** (E) ονομάζεται η φωτεινή ροή που πέφτει κάθετα σε φωτιζόμενη επιφάνεια ίση με ένα τετραγωνικό μέτρο. Είναι:

$$E = \frac{\Phi}{S} \qquad (2.3)$$

Μονάδα μέτρησης της φωτεινότητας είναι το *λουξ* (lux ή Lx). $1Lx = 1Lm/m^2$. Η φωτεινότητα είναι μέγεθος που χαρακτηρίζει τις δευτερογενείς φωτεινές πηγές, αυτές, δηλαδή, που αντανακλούν τη φωτεινή ενέργεια που εκπέμπουν άλλες πηγές (πχ. οθόνες κινηματογράφου)

• ***Αντίθεση*** (K) ονομάζεται ο λόγος της λαμπρότητας του πιο λαμπρού στοιχείου ενός αντικειμένου προς τη λαμπρότητα του λιγότερο λαμπρού. Είναι:

$$K = \frac{B_{max}}{B_{min}} \qquad (2.4)$$

Η αντίθεση ονομάζεται και κοντράστ. Είναι μέγεθος χωρίς μονάδες και συνήθως εκφράζεται επί τοις εκατό. Οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0 και 100.

2.1.2 Τα χαρακτηριστικά του χρώματος.

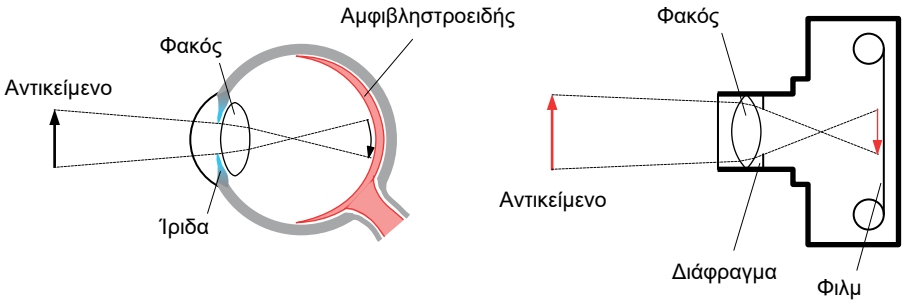
Τα αντικείμενα που διεγείρουν την όρασή μας έχουν διάφορες οπτικές ιδιότητες ως προς το αίσθημα που προκαλούν, γιατί οι ακτίνες που φτάνουν στα μάτια μας διαφέρουν τόσο στην ισχύ όσο και στη φασματική τους σύνθεση. Διαφορές στην ισχύ μας δίνουν την εντύπωση των διαφορών στη λαμπρότητα ή τη φωτεινότητα των αντικειμένων και χαρακτηρίζονται από τη φωτεινή αντίθεση (κοντράστ). Διαφορές στο φασματικό περιεχόμενο μας δίνουν την εντύπωση διαφορών στο χρώμα και χαρακτηρίζονται από τη χρωματική αντίθεση. Έτσι, για κάθε ορατή ακτινοβολία έχουμε την αίσθηση της λαμπρότητας ή της φωτεινότητας και την αίσθηση του χρώματος, το οποίο χαρακτηρίζεται από την απόχρωση και τον κορεσμό του.

Τα χαρακτηριστικά ενός χρώματος είναι λοιπόν η ***φωτεινότητα*** (ή λαμπρότητα), η ***απόχρωση*** και ο ***κορεσμός.*** Η φωτεινότητα εξαρτάται από την ισχύ των φωτεινών ακτίνων που φτάνουν στο μάτι μας, η απόχρωση εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και ο κορεσμός καθορίζεται από το ποσοστό ανά-

μιξης του καθαρού (φασματικού) χρώματος με το λευκό φως. Ο κορεσμός δίνει, δηλαδή, το βαθμό καθαρότητας ενός χρώματος. Για παράδειγμα, ένα φωτεινό ροζ χρώμα έχει μεγάλη φωτεινότητα, κόκκινη απόχρωση και μικρό κορεσμό, γιατί το ροζ είναι αποτέλεσμα ανάμιξης κόκκινου και λευκού.

2.1.3 Φως και όραση

Το αισθητήριο όργανο της όρασης είναι το μάτι. Ο άνθρωπος διαθέτει δύο μάτια, που κοιτάζουν προς την ίδια κατεύθυνση από ελαφρά διαφορετικές θέσεις, για να εξασφαλίζει τη στερεοσκοπική όραση και την καλύτερη αντίληψη της απόστασης των αντικειμένων. Η δομή του ματιού θυμίζει τη φωτογραφική μηχανή (σχήμα 2-3).



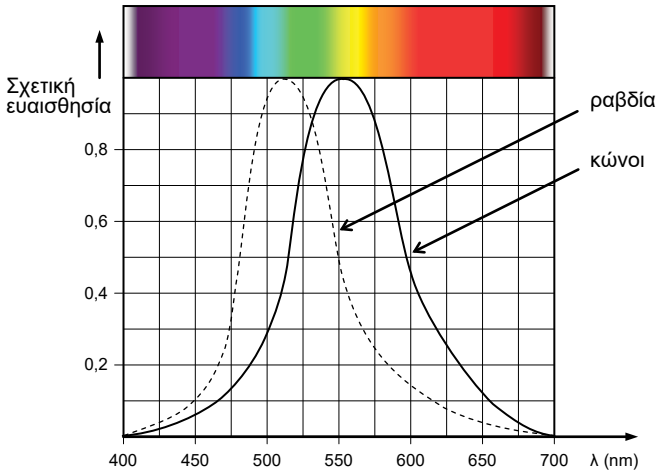
Σχήμα 2-3. *Δομές ματιού – φωτογραφικής κάμερας*

Στο εμπρός μέρος του βολβού υπάρχει ο κρυσταλλοειδής φακός, ο οποίος έχει τον ίδιο ρόλο με το φακό της φωτογραφικής μηχανής. Με τη μεταβολή του πάχους του ο κρυσταλλοειδής φακός εστιάζει το είδωλο ενός αντικειμένου πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα, ο οποίος έχει ρόλο ανάλογο με αυτόν του φιλμ. Η ποσότητα του φωτός που θα μπει στο μάτι ρυθμίζεται από το άνοιγμα της ίριδας, η οποία ονομάζεται κόρη και η λειτουργία της είναι ανάλογη με αυτή του διαφράγματος της φωτογραφικής μηχανής.

Πάνω στον αμφιβληστροειδή απλώνεται ένα πλήθος από φωτοευαίσθητα κύτταρα, τα οποία επικοινωνούν με τις απολήξεις του οπτικού νεύρου και ονομάζονται ραβδία και κώνοι. Υπάρχουν περίπου 130 εκατομμύρια ραβδία και 7 εκατομμύρια κώνοι. Όταν τα κύτταρα αυτά δεχτούν φως, στέλνουν νευρικούς παλμούς στον εγκέφαλο, ο οποίος αποκομίζει έτσι την εντύπωση της όρασης. Τα ραβδία αντιδρούν μόνο στην ένταση του φωτός, ενώ οι κώνοι είναι ευαίσθητοι και στο χρώμα. Επειδή οι κώνοι είναι λιγότεροι από τα ραβδία και έχουν μερικές χιλιάδες φορές μικρότερη ευαισθησία στο φως, το μάτι μας χάνει την ικανότητα

να βλέπει χρώματα, όταν μειωθεί αρκετά ο φωτισμός του περιβάλλοντος και τα βλέπει όλα γκρίζα.

Παρόλο που οι κώνοι είναι ευαίσθητοι στο χρώμα, η ευαισθησία τους δεν είναι ίδια σε όλα τα χρώματα του φάσματος, όπως φαίνεται στην καμπύλη σχετικής ευαισθησίας του σχήματος 2-4.



Σχήμα 2-4. *Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας ραβδίων και κώνων του ματιού*

Μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία των κώνων στην περιοχή μεταξύ του κίτρινου και του πράσινου. Στο πορτοκαλί και το γαλανό η ευαισθησία πέφτει στο μισό του μέγιστου και στα όρια του κόκκινου και του ιώδους η ευαισθησία μηδενίζεται. Ανάλογη συμπεριφορά έχουν και τα ραβδία, μόνο που το δικό τους μέγιστο ευαισθησίας είναι μετατοπισμένο στην περιοχή μεταξύ του πράσινου και του γαλανού.

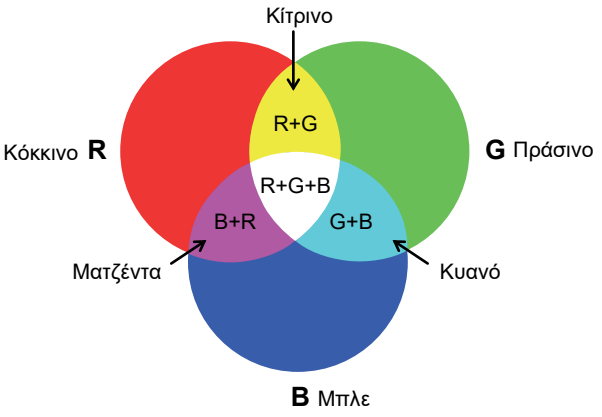
Λεπτομερέστερες παρατηρήσεις οδήγησαν στη διατύπωση της θεωρίας ότι υπάρχουν όχι ένα, αλλά τρία διαφορετικά είδη κώνων. Το πρώτο είδος διεγείρεται από φως με χρώμα μονάχα γύρω από την περιοχή του κόκκινου, το δεύτερο από φως με χρώμα μονάχα γύρω από την περιοχή του πράσινου και το τρίτο από φως με χρώμα μονάχα γύρω από την περιοχή του γαλανού. Το γεγονός αυτό ονομάζεται τριχρωμική όραση και έχει μεγάλη σημασία για τη συνθετική αναπαραγωγή των χρωμάτων, όπως την εφαρμόζουμε στην τηλεόραση, αλλά και στις έγχρωμες εκτυπώσεις.

2.2 Πρωτεύοντα και χρώματα και συνδυασμός τους για την παραγωγή των υπολοίπων χρωμάτων

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι δυνατό να παράγουμε λευκό χρώμα με τη σύνθεση όλων των καθαρών φασματικών χρωμάτων. Η θεωρία όμως της τριχρωμικής όρασης υποδεικνύει ότι δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούμε όλα τα χρώματα του φάσματος, αφού το μάτι μας ανταποκρίνεται μόνο σε τρία από αυτά. Αρκεί λοιπόν να επιλέξουμε τρία χρώματα από το ορατό φάσμα, να τα αναμίξουμε με κατάλληλες μεταξύ τους αναλογίες και να πάρουμε το λευκό φως. Πιο κατάλληλα έχουν αποδειχτεί το κόκκινο, το πράσινο και το βαθύ μπλε. Το γεγονός ότι χονδρικά συμπίπτουν με το μέγιστο της ευαισθησίας των τριών τύπων κώνων στο μάτι μας δεν είναι τυχαίο.

Τα χρώματα αυτά ονομάζονται ***πρωτεύοντα***, κύρια ή βασικά ***προσθετικά*** χρώματα. Ο προσδιορισμός προσθετικά προκύπτει από το γεγονός ότι η μέθοδος ανάμιξής τους γίνεται με πρόσθεση των ακτινοβολιών. Τη λειτουργία της πρόσθεσης μπορούμε εύκολα να τη διαπιστώσουμε, αν κατευθύνουμε τις δέσμες τριών προβολέων εφοδιασμένων με έγχρωμα φίλτρα, που παράγουν μονοχρωματικό κόκκινο, πράσινο και μπλε φως αντιστοίχως, πάνω σε μια λευκή οθόνη, έτσι ώστε εν μέρει να αλληλεπικαλύπτονται. Στα σημεία επικάλυψης των δεσμών ανά δύο θα δούμε να παράγονται νέα χρώματα. Για παράδειγμα, από την πρόσθεση του κόκκινου και του πράσινου παράγεται κίτρινο, από την πρόσθεση του πράσινου και του μπλε παράγεται κυανό, ενώ από την πρόσθεση του μπλε και του κόκκινου παράγεται πορφυροϊώδες (ματζέντα ή φούξια). Στα σημεία όπου προσπίπτουν και οι τρεις δέσμες μαζί παράγεται λευκό φως (σχήμα 2-5).

Με αλλαγή της σχετικής έντασης των τριών βασικών χρωμάτων στο διπλανό σχήμα μπορούμε να πάρουμε όλα τα χρώματα του φάσματος. Για παράδειγμα, αν αυξήσουμε την ένταση του κόκκινου φωτός, τότε το κίτρινο του σχήματος θα γίνει πορτοκαλί, το λευκό θα γίνει ροζ κλπ. Αυτό το σύστημα παραγωγής χρωμάτων ονομάζεται ***προσθετικό σύστημα*** ή σύστημα **RGB**, από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων Red – Green – Blue, που είναι τα ονόματα των τριών βασικών χρωμάτων που χρησιμοποιεί.



Σχήμα 2-5.
Μίξη των πρωτευόντων προσθετικών χρωμάτων.

Πρέπει να τονιστεί ότι τα νέα χρώματα που παράγονται από τη μίξη των πρωτευόντων χρωμάτων δεν είναι καθαρά φασματικά χρώματα. Το κίτρινο, για παράδειγμα, του σχήματος 2-5 δεν έχει καμιά σχέση με το κίτρινο του φάσματος που παράγεται από την ανάλυση του φωτός με ένα πρίσμα. Το κίτρινο του φάσματος είναι μια ακτινοβολία με μήκος κύματος περίπου 570 nm, ενώ το κίτρινο της προσθετικής μίξης είναι δύο ακτινοβολίες με μήκη κύματος 510 και 630 nm, τις οποίες ο εγκέφαλος αντιλαμβάνεται ως μια ακτινοβολία με μήκος κύματος ίσο με το μέσο όρο των δύο. Το γεγονός αυτό όμως δεν ενοχλεί καθόλου το σκοπό μας, που είναι η παραγωγή όλων των χρωμάτων από τρία μόνο βασικά.

Η προσθετική μίξη χρωμάτων χρησιμοποιείται, όταν οι φωτεινές πηγές είναι πρωτογενείς, δηλαδή παράγουν το δικό τους έγχρωμο φως, όπως συμβαίνει στις οθόνες των τηλεοράσεων και των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Όταν οι πηγές είναι δευτερογενείς, παράγουν χρώμα με αφαίρεση ακτινοβολιών από το λευκό φως. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ένα άλλο σύστημα μίξης χρωμάτων που ονομάζεται ***αφαιρετικό*** και χρησιμοποιεί για κύρια χρώματα τα Κυανό – Ματζέντα – Κίτρινο (CMY). Με χρήση αυτού του συστήματος δημιουργούνται, για παράδειγμα, οι έγχρωμες εκτυπώσεις.

2.2.1 Χρωματομετρία - χρωμικές συντεταγμένες

Με τη μελέτη των προβλημάτων της μίξης και της σύνθεσης των διάφορων χρωμάτων ασχολείται η ***χρωματομετρία.*** Η χρωματομετρία στηρίζεται σε μια σειρά νόμων, οι οποίοι ουσιαστικά είναι παρατηρήσεις πάνω στην αντίληψη των χρωμάτων από το ανθρώπινο μάτι. Ο βασικότερος από αυτούς τους νόμους περιγράφηκε παραπάνω και ορίζει ότι με καθορισμένη μίξη των τριών βασικών χρωμάτων μπορούμε να πάρουμε όλα τα υπόλοιπα χρώματα, ακόμη και το λευκό.

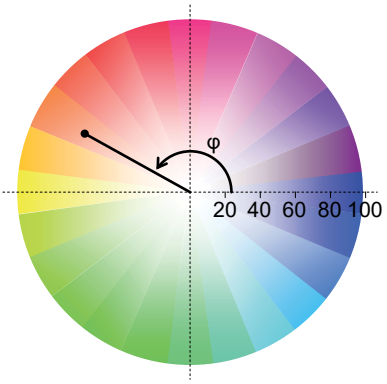
Τις αναλογίες των βασικών χρωμάτων για την παραγωγή του επιθυμητού χρώματος τις καθορίζουν τρεις συντελεστές, που ονομάζονται ***τριχρωμικοί συντελεστές***. Με τη χρήση αυτών των συντελεστών έχουμε, για παράδειγμα, στην περίπτωση της προσθετικής μίξης των χρωμάτων:

$$\textbf{Χρώμα} = \textbf{rR+ gG+ bB} \qquad (2.5)$$

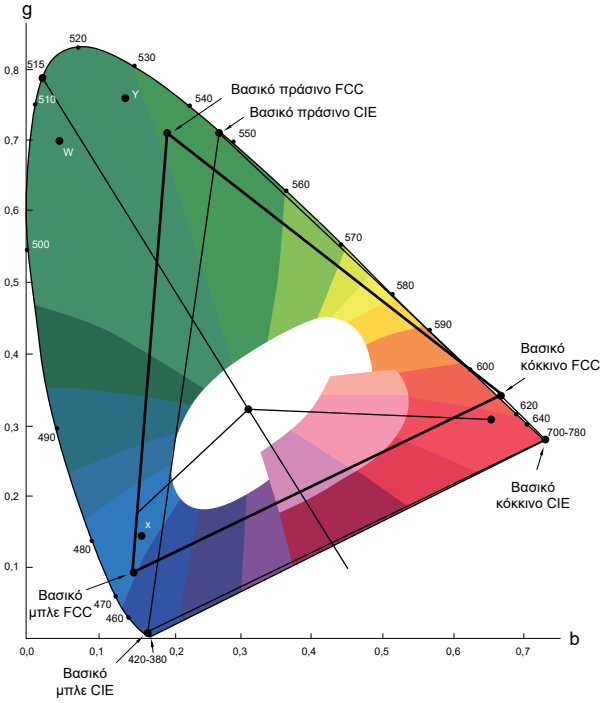
Οι τριχρωμικοί συντελεστές καθορίζουν μόνον την απόχρωση και τον κορεσμό του μείγματος των χρωμάτων. Η φωτεινότητα του μείγματος εξαρτάται από τη φωτεινότητα των βασικών χρωμάτων και είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο πιο έντονα είναι αυτά τα χρώματα.

Το άθροισμα των τριχρωμικών συντελεστών ενός χρώματος είναι πάντοτε ίσο με το 1 (r+g+b= 1). Αυτό μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε μόνον τους δύο συντελεστές και να υπολογίζουμε τον τρίτο με αφαίρεση από τη μονάδα (π.χ. g=1-r-b).

Εφόσον δύο από τους τρεις συντελεστές είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, μπορούμε να απεικονίσουμε τους συνδυασμούς τους πάνω σε ένα σχεδιάγραμμα στο επίπεδο. Ένα τέτοιο σχεδιάγραμμα είναι ο χρωμικός κύκλος ή κύκλος του Νιούτον (σχήμα 2-6). Ο κύκλος αυτός απεικονίζει στην περιφέρειά του όλα τα χρώματα του φάσματος με κορεσμό 100%. Προς το εσωτερικό του κύκλου ο κορεσμός μειώνεται και στο κέντρο γίνεται 0%, δηλαδή εκεί έχουμε πάντα λευκό χρώμα. Έτσι, η απόσταση από το κέντρο ενός χρώματος πάνω στον κύκλο καθορίζει τον κορεσμό του και η γωνία που σχηματίζει η ακτίνα του με την αρχή των αξόνων καθορίζει την απόχρωσή του. Για παράδειγμα, το πορτοκαλί χρώμα που σημειώνεται με κουκίδα στο σχήμα 2-8 έχει απόχρωση 150° και κορεσμό 70%.



Σχήμα 2-6.
Χρωμικός κύκλος ή κύκλος του Νιούτον



Σχήμα 2-7. *Διάγραμμα χρωμικότητας*

Ανάλογες πληροφορίες δίνει και το διάγραμμα χρωμικότητας που φαίνεται στο σχήμα 2-7. Εδώ η απεικόνιση των χρωμάτων γίνεται σε ορθογώνιους άξονες βαθμολογημένους σε τιμές των τριχρωμικών συντελεστών του μπλε (b) και του πράσινου (g). Το επίμηκες σχήμα του διαγράμματος δηλώνει ότι το ανθρώπινο μάτι μπορεί να ξεχωρίσει περισσότερες αποχρώσεις του πράσινου, απ' ότι των άλλων χρωμάτων. Στο σχήμα σημειώνονται και οι χρωμικές συντεταγμένες των βασικών χρωμάτων RGB σύμφωνα με δύο Αμερικανικά πρότυπα (FCC και CIE).

Ας σημειωθεί ότι στο χρωμικό κύκλο και στο διάγραμμα χρωμικότητας τα αντικρυστά χρώματα (μπλε και κίτρινο, κυανό και κόκκινο κλπ) είναι συμπληρωματικά, δηλαδή η μίξη τους δίνει πάντοτε λευκό.

2.3 Η έννοια της φωτεινότητας και της χρωμικότητας

Όπως είδαμε στην παράγραφο 2.1.2, τα χαρακτηριστικά ενός χρώματος είναι η φωτεινότητα, η απόχρωση και ο κορεσμός του. Η απόχρωση και ο κορεσμός, που μπορούν να απεικονιστούν στο χρωμικό κύκλο, καθορίζουν ένα νέο χρωματομετρικό μέγεθος, το οποίο ονομάζεται ***χρωμικότητα.*** Είναι λοιπόν:

$$\textbf{Χρωμικότητα = Απόχρωση + Κορεσμός} \qquad (2.6)$$

Από αυτό προκύπτει ότι:

$$\textbf{Χρώμα = Φωτεινότητα + Χρωμικότητα} \qquad (2.7)$$

και

$$\textbf{Χρωμικότητα = Χρώμα - Φωτεινότητα}, \qquad (2.8)$$

δηλαδή η χρωμικότητα είναι το μέγεθος που πρέπει να προστεθεί στη φωτεινότητα, για να πάρουμε το χρώμα.

Το γεγονός αυτό έχει πολύ μεγάλη σημασία για τη λειτουργία της έγχρωμης τηλεόρασης. Η έγχρωμη τηλεόραση βασίστηκε στην ασπρόμαυρη τηλεόραση και από την αρχή λειτούργησε παράλληλα μ' αυτήν. Οι δέκτες και των δύο τύπων λαμβάνουν το ίδιο τηλεοπτικό πρόγραμμα, το οποίο περιέχει τις πληροφορίες των χρωμάτων με τη μορφή σημάτων φωτεινότητας και χρωμικότητας. Οι ασπρόμαυροι δέκτες χρησιμοποιούν μόνον τα σήματα φωτεινότητας και απ' αυτά αναπαράγουν ασπρόμαυρη εικόνα, ενώ οι έγχρωμοι δέκτες χρησιμοποιούν τα σήματα φωτεινότητας και χρωμικότητας και απ' αυτά αναπαράγουν εικόνα με χρώμα.

Όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο, οι έγχρωμες τηλεοπτικές κάμερες αναλύουν τις εικόνες στα τρία βασικά χρώματα, κόκκινο, πράσινο και μπλε. Κατάλληλα κυκλώματα συνδυάζουν τα σήματα αυτών των χρωμάτων, για να παραχθεί το σήμα της φωτεινότητας, που ονομάζεται σήμα Y. Η παραγωγή του γίνεται

με μίξη των τριών σημάτων, σύμφωνα με τη σχέση (2.5), λαμβάνοντας για τους τριχρωμικούς συντελεστές τις τιμές r=0,30 g=0,59 και b=0,11, γιατί διαπιστώθηκε ότι το μονόχρωμο σήμα προκύπτει με βάση αυτούς τους συντελεστές, που αποδίδουν την αίσθηση της φωτεινότητας που δημιουργεί το καθένα από τα βασικά χρώματα.

Δηλαδή: **Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B** (2.9)

Η επιλογή που επικράτησε για τα σήματα χρωμικότητας που χρησιμοποιούνται στην τηλεοπτική εκπομπή και επεξεργασία, προκύπτει με βάση τη σχέση (2.8). Το σήμα φωτεινότητας αφαιρείται από τα σήματα των χρωμάτων R, G, B και έχουμε:

Χρωμικότητα κόκκινου = Κόκκινο – Φωτεινότατα = (R – Y)
Χρωμικότητα πράσινου = Πράσινο – Φωτεινότητα = (G – Y)
Χρωμικότητα μπλε = Μπλε – Φωτεινότητα = (B – Y)

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.9) μπορούμε να κάνουμε τις αφαιρέσεις και να υπολογίσουμε τις χρωμικότητες των τριών βασικών χρωμάτων. Είναι:

R–Y = R – (0,30R + 0,59G + 0,11B) = **0,70R – 0,59G – 0,11B**
G–Y = G – (0,30R + 0,59G + 0,11B) = **-0,30R + 0,41G – 0,11B** (2.10)
B–Y = B – (0,30R + 0,59G + 0,11B) = **-0,30R – 0,59G – 0,89B**

Επειδή, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, οι τριχρωμικοί συντελεστές ενός χρώματος δεν είναι όλοι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, αλλά έχουν πάντοτε άθροισμα ίσο με το 1, προκύπτει ότι και οι χρωμικότητες των τριών βασικών χρωμάτων που σχηματίζουν αυτό το χρώμα δεν είναι όλες ανεξάρτητες μεταξύ τους, αλλά έχουν πάντοτε άθροισμα ίσο με το 0.

Πράγματι, αν στην ισότητα 0,30 + 0,59 + 0,11 = 1 πολλαπλασιάσουμε το πρώτο και το δεύτερο μέλος με το σήμα φωτεινότητας, θα έχουμε:

0,30Y + 0,59Y + 0,11Y = Y (2.11)

Αφαιρώντας κατά μέλη τη (2.11) από τη (2.9) έχουμε :

0,30R	**+**	**0,59G**	**+**	**0,11B**	**= Y**		
- (0,30Y	**+**	**0,59Y**	**+**	**0,11Y**	**= Y**		
0,30(R-Y)	**+**	**0,59(G-Y)**	**+**	**0,11(B-Y)**	**= 0**		(2.12)

Αυτό σημαίνει ότι δε χρειάζεται να στέλνουμε σε ένα έγχρωμο δέκτη και τις τρεις χρωμικότητες των βασικών χρωμάτων. Αρκεί να στείλουμε μόνο τις δύο. Διαλέγουμε και στέλνουμε τις χρωμικότητες του κόκκινου και του μπλε γιατί,

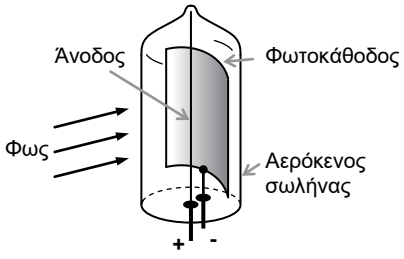
όπως φαίνεται από τις σχέσεις (2.10), αυτές έχουν τους μεγαλύτερους κατ' απόλυτη τιμή συντελεστές, δηλαδή έχουν τα πιο ισχυρά σήματα. Η χρωμικότητα του πράσινου υπολογίζεται επιτόπου στο δέκτη με τη βοήθεια της σχέσης (2.12), ως εξής:

$$0{,}59(G\text{-}Y) = -0{,}30(R\text{-}Y) - 0{,}11\ (B\text{-}Y)$$
$$\Rightarrow \mathbf{G\text{-}Y= -0{,}51\ (R\text{-}Y) - 0{,}19(B\text{-}Y)}$$

Έτσι, όχι μόνο στην εκπομπή αλλά, αν θέλουμε, και στην επεξεργασία και αποθήκευση του τηλεοπτικού σήματος, μας αρκούν τρία σήματα, ένα της φωτεινότητας και δύο της χρωμικότητας.

2.4 Μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρικό σήμα

Όπως μας είναι ήδη γνωστό, η τηλεόραση είναι ένα σύστημα που μεταδίδει εικόνες από μεγάλη απόσταση. Για να γίνει αυτό, πρέπει οι εικόνες να μετατραπούν σε ηλεκτρικά σήματα. Τα συστατικά μιας εικόνας προέρχονται από τις αυξομειώσεις της έντασης του φωτός και της αναλογίας των χρωμάτων στα διάφορα σημεία της. Γι' αυτό η μετατροπή της σε ηλεκτρικό σήμα απαιτεί διατάξεις που μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρισμό. Υπάρχουν πολλές τέτοιες διατάξεις, όπως το φωτοκύτταρο, η φωτοαντίσταση, η φωτοδίοδος, το φωτοτρανζίστορ κλπ. Από αυτές το φωτοκύτταρο σε διάφορες παραλλαγές χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα συστήματα τηλεόρασης, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η φωτοδίοδος και το φωτοτρανζίστορ.

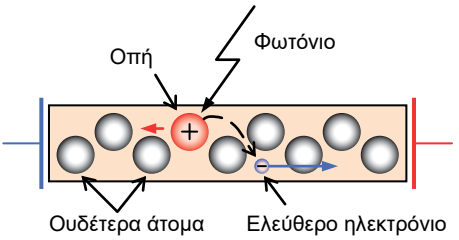


Σχήμα 2-8.
Σχηματική παράσταση φωτοκύτταρου

Το φωτοκύτταρο βασίζει τη λειτουργία του στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Όταν φωτεινή ακτινοβολία με κατάλληλο μήκος κύματος πέσει πάνω στην επιφάνεια ενός μετάλλου, τότε από το μέταλλο εκπέμπονται ηλεκτρόνια, τα οποία ονομάζονται φωτοηλεκτρόνια. Το πλήθος των φωτοηλεκτρονίων είναι ανάλογο προς την ένταση του φωτός. Για να ανιχνεύσει αυτή την ένταση, το φωτοκύτταρο έχει τη δομή του σχήματος 2-8.

Μέσα σε αερόκενο γυάλινο σωλήνα υπάρχει μια κοίλη μεταλλική πλάκα καλυμμένη με υλικό που εκπέμπει εύκολα φωτοηλεκτρόνια. Η πλάκα ονομάζεται φωτοκάθοδος και συνδέεται με τον αρνητικό πόλο μιας πηγής συνεχούς ρεύματος. Ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται σε ένα λεπτό σύρμα τεντωμένο μπροστά από το μέσο της φωτοκαθόδου, το οποίο ονομάζεται άνοδος. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η φωτοκάθοδος συλλέγονται από την άνοδο και καταλήγουν στην πηγή. Η πηγή αναπληρώνει όσα ηλεκτρόνια φεύγουν από την κάθοδο και έτσι η ένταση του

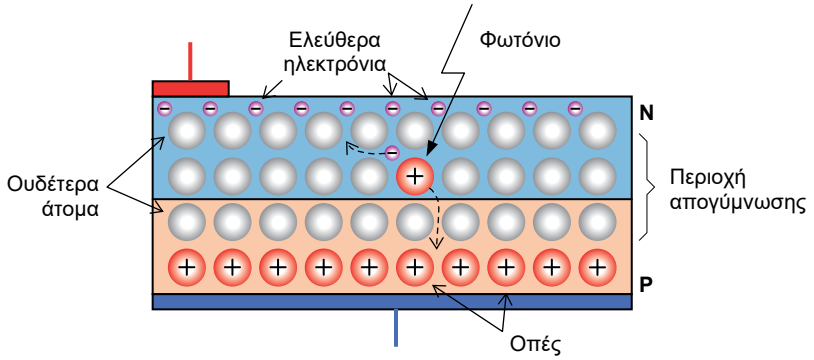
ρεύματος σ' αυτό το κλειστό κύκλωμα είναι ανάλογη προς την ένταση του φωτός που πέφτει στη φωτοκάθοδο.



Σχήμα 2-9.
Φωτοαγωγιμότητα σε φωτοαντίσταση

Η λειτουργία της φωτοαντίστασης στηρίζεται στο φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας που εκδηλώνουν οι ημιαγωγοί. Ένα τεμάχιο καθαρού ημιαγωγού στο σκοτάδι και σε κανονική θερμοκρασία έχει αρκετά υψηλή αντίσταση, από ένα έως μερικές δεκάδες ΜΩ, ανάλογα με το μέγεθός του. Όταν επάνω του πέσει φωτεινή ακτινοβολία με κατάλληλο μήκος κύματος, κάθε φωτόνιό της προκαλεί δημιουργία ενός ζεύγους ελεύθερου ηλεκτρονίου και οπής. Αυτά τα ηλεκτρόνια και οι οπές προκαλούν μεγάλη αύξηση στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού, η οποία είναι ανάλογη προς το πλήθος των φωτονίων, δηλαδή ανάλογη προς την ένταση της ακτινοβολίας. Αν η φωτοαντίσταση συνδέεται σε σειρά με κάποιο ηλεκτρικό κύκλωμα, η ένταση του ρεύματος που τη διαρρέει είναι ανάλογη προς την ένταση του φωτός που την προσβάλει (σχήμα 2-9).

Στην περίπτωση της φωτοδιόδου το φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας εκδηλώνεται ακόμη πιο έντονα. Η φωτοδίοδος είναι μια επαφή P-N που μπορεί να εκτεθεί στο φως, γιατί βρίσκεται μέσα σε διαφανές περίβλημα. Η επαφή πολώνεται ανάστροφα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι οπές και τα ηλεκτρόνια που πλεονάζουν στα τμήματα P και N αντιστοίχως, έλκονται από τους ετερώνυμους πόλους της πηγής και απομακρύνονται μεταξύ τους, αφήνοντας γύρω από την επαφή μια περιοχή άδεια από φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος, που ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης (σχήμα 2-10).



Σχήμα 2-10. *Φωτοαγωγιμότητα σε φωτοδίοδο*

Για το λόγο αυτό η αντίσταση της ανάστροφα πολωμένης φωτοδιόδου στο σκοτάδι είναι τεράστια, έως και εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση μιας φωτοαντίστασης στις ίδιες συνθήκες. Αν τώρα ένα φωτόνιο ακτινο-

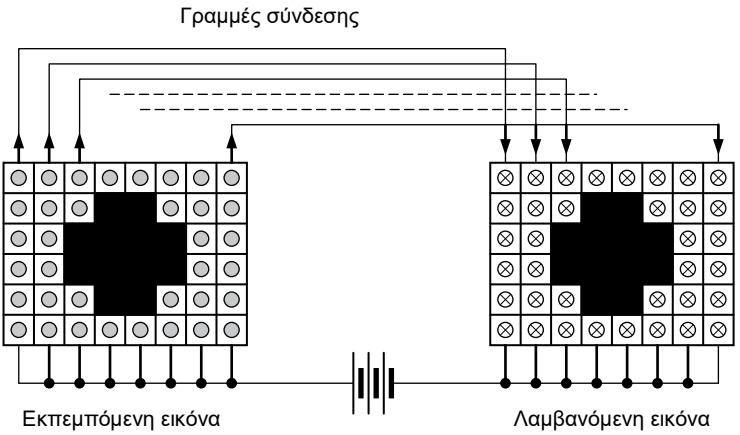
βολίας με κατάλληλο μήκος κύματος πέσει σε κάποιο άτομο της περιοχής απογύμνωσης, θα προκαλέσει τη γέννηση ενός ηλεκτρονίου και μιας οπής, τα οποία λόγω του ηλεκτρικού πεδίου της πόλωσης θα κινηθούν προς αντίθετες κατευθύνσεις, παράγοντας ρεύμα που ονομάζεται φωτόρευμα. Η ένταση του φωτορεύματος είναι ανάλογη προς την ένταση της ακτινοβολίας. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ πιο ευαίσθητη και πολύ πιο γρήγορη απ' ό,τι σε μια φωτοαντίσταση, γιατί υποβοηθείται από τη δράση της ανάστροφης πόλωσης της επαφής. Για το λόγο αυτό οι φωτοδίοδοι είναι καλύτερης ποιότητας ανιχνευτές φωτός απ' ό,τι οι φωτοαντιστάσεις.

Ανάλογη λειτουργία με αυτή της φωτοδιόδου έχει και το φωτοτρανζίστορ. Εδώ οι επαφές P-N είναι δύο, αλλά η δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίου-οπής από φωτόνια γίνεται μόνο στην ανάστροφα πολωμένη επαφή βάσης-συλλέκτη. Το φωτόρευμα ενισχύεται από την ενισχυτική δράση του τρανζίστορ και γι' αυτό ένα φωτοτρανζίστορ είναι πολύ πιο ευαίσθητος δέκτης φωτός απ' ό,τι μια φωτοδίοδος. Το ρεύμα του όμως δεν είναι τέλεια ανάλογο προς την ένταση του φωτός και γι' αυτό χρησιμοποιείται λιγότερο συχνά, τουλάχιστον στην τηλεόραση.

2.4.1 Ηλεκτρική μεταβίβαση της εικόνας

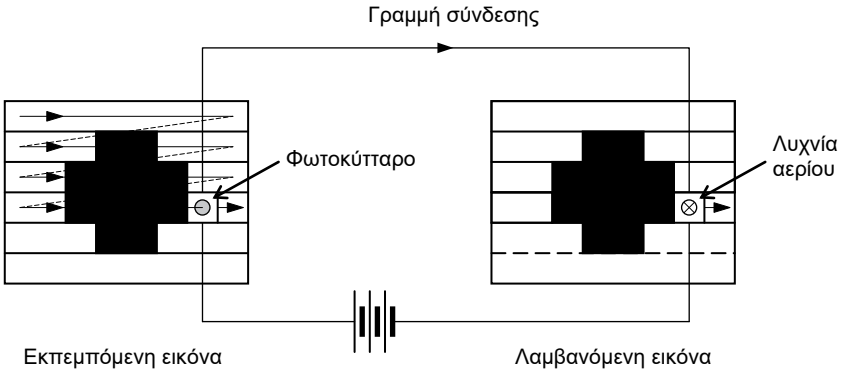
Τα πρώτα πειράματα ηλεκτρικής μετάδοσης εικόνας έγιναν στα τέλη του 19ου αιώνα, όταν οι επιστήμονες προσπάθησαν να μιμηθούν τη λειτουργία του ανθρώπινου ματιού. Ένα σύστημα φακών προέβαλλε μια εικόνα πάνω σε επιφάνεια καλυμμένη από ένα αρκετά μεγάλο αριθμό φωτοκυττάρων, αντίστοιχων με τα φωτοευαίσθητα στοιχεία του αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού. Ένα πλήθος αγωγών αντίστοιχων με τα οπτικά νεύρα συνέδεε ένα προς ένα τα φωτοκύτταρα με λυχνίες αερίου, όπως αυτές των δοκιμαστικών κατσαβιδιών των ηλεκτρολόγων. Οι λυχνίες αυτές ήταν τοποθετημένες πάνω σε μια επιφάνεια προορισμένη για την αναπαραγωγή της εικόνας. Η έκθεση των φωτοκυττάρων στις φωτεινές ακτίνες της εικόνας προκαλούσε τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο μέσω των αγωγών έκανε τις λυχνίες στις αντίστοιχες θέσεις να φωτοβολούν με ανάλογη ένταση. Με τον τρόπο αυτό προέκυπτε μια χονδροειδής αναπαραγωγή του εκπεμπόμενου ειδώλου. Η διαίρεση της εικόνας σε στοιχειώδη τμήματα στηρίζεται στην αδυναμία του ανθρώπινου ματιού να ξεχωρίζει λεπτομέρειες από κάποια απόσταση και χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα στη σύγχρονη τηλεόραση. Παρόλα αυτά, το παραπάνω σύστημα απέτυχε στην πράξη λόγω του μεγάλου αριθμού των απαιτούμενων αγωγών.

Σε αντίθεση με τον ήχο που το παραγόμενο σήμα έχει μια χρονική σειρά, στην εικόνα όλα τα στοιχεία μιας σκηνής παρουσιάζονται ταυτόχρονα για εικονοληψία. Όπως είδαμε παραπάνω, η σύγχρονη μετάδοση των σημάτων δεν είναι πρακτι-



Σχήμα 2-11. *Διαίρεση της εικόνας και μεταφορά των τμημάτων με ξεχωριστούς αγωγούς*

κή και αυτό δημιούργησε την ανάγκη επινόησης μιας μεθόδου ικανής να δώσει στο σήμα διαδοχική μορφή. Για το σκοπό αυτό προτάθηκε πολύ σύντομα η λύση της ***σάρωσης*** της εικόνας. Στα πρώτα συστήματα σάρωσης ένα φωτοκύτταρο διατρέχει σημείο προς σημείο και γραμμή προς γραμμή όλα τα τμήματα της εικόνας, κατά τον ίδιο τρόπο που εμείς διαβάζουμε τις αράδες ενός βιβλίου. Το φως το οποίο ανιχνεύεται σε κάθε θέση προκαλεί ηλεκτρικό ρεύμα, που μεταβιβάζεται μέσα από έναν αγωγό σε μια λυχνία αερίου. Η λυχνία εκτελεί ταυτόχρονα την ίδια κίνηση πάνω στην επιφάνεια λήψης, όπως αυτή που εκτελεί το φωτοκύτταρο (σχήμα 2-12). Αν η σάρωση γίνεται αρκετά γρήγορα, ο παρατηρητής δεν αντιλαμβάνεται την κίνηση της λυχνίας και βλέπει μια πλήρη εικόνα. Αυτό συμβαίνει, γιατί το μάτι διατηρεί τη φωτεινή εντύπωση για χρόνο περίπου ίσο με 0,1 του δευτερολέπτου μετά την παύση του φωτεινού ερεθίσματος. Αυτή η αδράνεια του ματιού ονομάζεται ***μεταίσθημα.***



Σχήμα 2-12. *Σάρωση της εικόνας και μεταφορά των τμημάτων της με ένα αγωγό*

Η ταυτόχρονη κίνηση του στοιχείου ανίχνευσης φωτός στη διάταξη εκπομπής της εικόνας και της πηγής φωτός στη διάταξη λήψης ονομάζεται στην τηλεόραση συγχρονισμός. Οι βασικές αρχές της ανάλυσης της εικόνας, της σάρωσης και του συγχρονισμού που διατυπώθηκαν το 19ο αιώνα αποτελούν τη βάση και της σύγχρονης τηλεοπτικής τεχνικής. Όλες οι κατοπινές ανακαλύψεις στον τομέα της τηλεόρασης είχαν σκοπό την τελειοποίηση των τεχνικών μέσων για την εφαρμογή αυτών των βασικών αρχών.

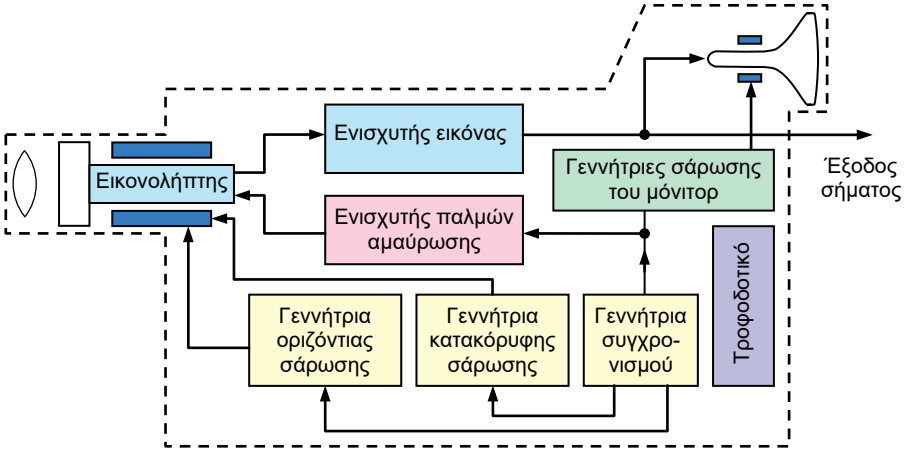
Στα πρώτα βήματα της τηλεόρασης οι κινήσεις της σάρωσης γινόταν με μηχανικά μέσα, με τη βοήθεια ενός μηχανισμού που ονομάζεται «δίσκος του Νίπκοφ» (Paul Nipkow, Γερμανία 1884). Ένα σύστημα μηχανικής τηλεόρασης βασισμένο στο δίσκο του Νίπκοφ αναπτύχθηκε από τον Τζον Μπερντ (John Baird, Αγγλία 1926) και χρησιμοποιήθηκε από το BBC στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του ’30. Η μηχανική τηλεόραση όμως ξεπεράστηκε πολύ γρήγορα από την ηλεκτρονική τηλεόραση, που εμφανίστηκε το 1928 χάρη στην εφεύρεση της πρώτης ηλεκτρονικής κάμερας από τον Ρωσοαμερικανό καθηγητή Βλαντιμίρ Ζορίκιν (Vladimir Zworykin), ο οποίος ήταν διευθυντής στα εργαστήρια της εταιρείας RCA. Στην αρχική έκδοση αυτής της κάμερας μια δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει μια φωτοευαίσθητη επιφάνεια, πάνω στην οποία προβάλλονται οι φωτεινές ακτίνες της εικόνας. Από τη σάρωση προκύπτει ηλεκτρικό σήμα με πλάτος ανάλογο της φωτεινότητας του σημείου της που ανιχνεύεται εκείνη τη στιγμή. Στο δέκτη μια ανάλογη δέσμη ηλεκτρονίων δίνει πάνω σε μια οθόνη την ίδια φωτεινότητα, όταν την ίδια χρονική στιγμή περνά από το ακριβώς αντίστοιχο σημείο. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλα σήματα συγχρονισμού.

Σήμερα η τηλεόραση είναι εξ ολοκλήρου ηλεκτρονική. Οι αρχές της ανάλυσης της εικόνας, της σάρωσης και του συγχρονισμού ενσωματώνονται σε ειδικές διατάξεις που υπάρχουν μέσα στην τηλεοπτική κάμερα και προκαλούν ηλεκτρικά σήματα, τα οποία αξιοποιούνται από τους τηλεοπτικούς δέκτες για την παραγωγή ποιοτικής τηλεοπτικής εικόνας. Τα σήματα αυτά απαρτίζουν το λεγόμενο σύνθετο τηλεοπτικό σήμα, που θα το εξετάσουμε σε επόμενη παράγραφο.

2.4.2 Η τηλεοπτική κάμερα

Η τηλεοπτική κάμερα είναι η συσκευή όπου γίνεται η μετατροπή της φωτεινής εικόνας σε ηλεκτρικό σήμα και η παραγωγή του ολοκληρωμένου τηλεοπτικού σήματος. Η κλασσική κάμερα περιλαμβάνει μια σειρά από επιμέρους διατάξεις, όπως έναν εικονολήπτη τύπου λυχνίας, τις γεννήτριες σάρωσης για την εξασφάλιση της οριζόντιας και κατακόρυφης σάρωσης της ηλεκτρικής εικόνας, τις γεννήτριες συγχρονισμού, και μια σειρά από ενισχυτές για το σήμα εικόνας και άλλα βοηθητικά σήματα. Αρκετά συχνά επίσης η κάμερα περιλαμβάνει και μια διάταξη παρακολούθησης της εικόνας (μόνιτορ) μέσα από μια μικροσκοπική οθόνη. Το μόνιτορ απαιτεί τις δικές του διατάξεις ενίσχυσης και σάρωσης. Για όλα τα παραπάνω τμήματα

υπάρχουν κατάλληλες τροφοδοτικές διατάξεις, που παρέχουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία όλης της συσκευής (σχήμα 2-13).



Σχήμα 2-13. *Μπλοκ – διάγραμμα τηλεοπτικής κάμερας*

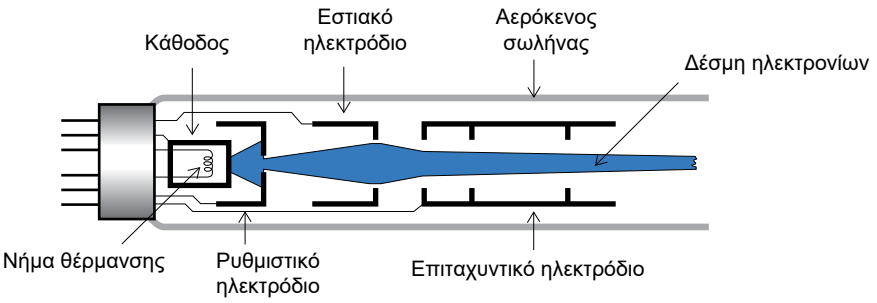
Οι νεότερες κάμερες διαφέρουν ελαφρά από αυτή που περιγράφηκε παραπάνω. Αντί του εικονολήπτη τύπου λυχνίας διαθέτουν εικονολήπτη τύπου ολοκληρωμένου κυκλώματος και στη θέση των γεννητριών σάρωσης έχουν γεννήτριες τετραγωνικών παλμών, για να υποστηρίζουν τη λειτουργία του εικονολήπτη. Επιπλέον το μόνιτορ έχει συνήθως οθόνη υγρών κρυστάλλων, που και αυτή δεν απαιτεί γεννήτριες σάρωσης.

Αν η κάμερα είναι έγχρωμη, η δομή της είναι κάπως πιο περίπλοκη. Συνήθως υπάρχουν τρεις διατάξεις εικονοληψίας για την ανίχνευση των τριών βασικών χρωμάτων. Η παραγωγή του σήματος φωτεινότητας γίνεται σε ένα κύκλωμα σύνθεσης των εξόδων των τριών βασικών χρωμάτων, σύμφωνα με τη σχέση (2-9) της παραγράφου 2.3. Ορισμένες κάμερες εντούτοις, αντί γι' αυτό, διαθέτουν και τέταρτο εικονολήπτη, αποκλειστικά για την ανίχνευση του σήματος φωτεινότητας. Σε άλλες πάλι πιο φτηνές κατασκευές υπάρχει ένας μόνο εικονολήπτης με κατάλληλα φίλτρα για την ανίχνευση και των τριών χρωμάτων ή ένας για τα τρία χρώματα και άλλος ένας για τη φωτεινότητα. Έτσι, μπορούμε να συναντήσουμε έγχρωμες κάμερες με ένα, δύο, τρεις ή και τέσσερις εικονολήπτες.

Στις επόμενες παραγράφους δίνουμε μια σύντομη περιγραφή των διατάξεων εικονοληψίας και των διαδικασιών σάρωσης και συγχρονισμού στις κάμερες.

2.4.3 Το ηλεκτρονικό πυροβόλο

Βασική διάταξη για την εξασφάλιση της σάρωσης της εικόνας σε μια τηλεοπτική κάμερα αποτελεί το ηλεκτρονικό πυροβόλο. Το ηλεκτρονικό πυροβόλο παράγει μια κατευθυνόμενη και ισχυρά εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων. Η τομή ενός ηλεκτρονικού πυροβόλου φαίνεται στο σχήμα 2-14:

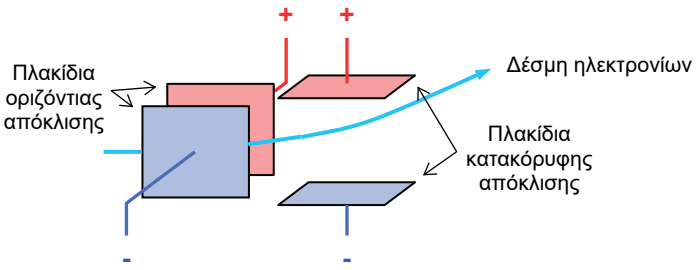


Σχήμα 2-14. *Τομή ηλεκτρονικού πυροβόλου*

Το πυροβόλο αποτελείται από μια σειρά κυλινδρικών σωληνοειδών ηλεκτροδίων, τα οποία είναι κατασκευασμένα από νικέλιο και στηρίζονται στο εσωτερικό ενός γυάλινου αερόκενου σωλήνα με τη βοήθεια μονωτικών υποστηριγμάτων από ειδικό σκληρό γυαλί. Στο εσωτερικό της καθόδου υπάρχει σύρμα από ειδικό μέταλλο (βολφράμιο ή μολυβδένιο), το οποίο, όταν διαρρέεται από ρεύμα, θερμαίνεται και θερμαίνει το μέταλλο της καθόδου μέχρι περίπου τους 400°C. Υπό την επίδραση αυτής της υψηλής θερμοκρασίας, η κάθοδος εκπέμπει ηλεκτρόνια, βάσει του φαινομένου της ***θερμοϊονικής εκπομπής.*** Για ενίσχυση αυτού του φαινομένου η κάθοδος είναι επικαλυμμένη με οξείδια ειδικών μετάλλων (π.χ. οξείδιο του Θορίου). Τα ηλεκτρόνια της καθόδου αποτελούν την πρώτη ύλη για τη δημιουργία της δέσμης των ηλεκτρονίων.

Για να λειτουργήσει το ηλεκτρονικό πυροβόλο, πρέπει το ρυθμιστικό ηλεκτρόδιο να έχει αρνητικότερη τάση από την κάθοδο (κατά περίπου 20 ως 40 Volt), το εστιακό ηλεκτρόδιο αρκετά θετικότερη τάση (περίπου 200 ως 300 Volt) και τέλος το επιταχυντικό ηλεκτρόδιο πολύ θετικότερη τάση (500 ως 1000 Volt). Υπό την επίδραση αυτών των τάσεων σχηματίζονται δύο ηλεκτρονικοί φακοί μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ο πρώτος μεταξύ καθόδου και ρυθμιστικού ηλεκτροδίου είναι αποκλίνων και ο δεύτερος μεταξύ εστιακού και επιταχυντικού ηλεκτροδίου είναι συγκλίνων. Η ρύθμιση της τάσης του εστιακού ηλεκτροδίου αλλάζει την ισχύ σύγκλισης του δεύτερου φακού, επιτρέποντας έτσι την εστίαση της δέσμης των ηλεκτρονίων στο επιθυμητό σημείο. Η ρύθμιση της εστίασης μπορεί να γίνει και με τη βοήθεια πηνίων τοποθετημένων έξω από το γυάλινο σωλήνα, αλλά γενικά αυτό αποφεύγεται, γιατί απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

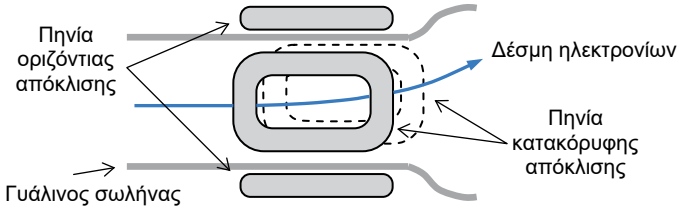
Για τις ανάγκες της σάρωσης η ηλεκτρονική δέσμη πρέπει να μετακινείται. Αυτό επιτυγχάνεται με τα συστήματα απόκλισης της δέσμης. Ένα σύστημα απόκλισης μπορεί να είναι είτε ηλεκτροστατικό είτε ηλεκτρομαγνητικό.



Σχήμα 2-15. *Σύστημα ηλεκτροστατικής απόκλισης*

Στην πρώτη περίπτωση, δύο ζεύγη από μεταλλικά πλακίδια, που σχηματίζουν πυκνωτές, τοποθετούνται μέσα στο γυάλινο σωλήνα παράλληλα προς την πορεία των ηλεκτρονίων και κάθετα μεταξύ τους. Τα ηλεκτρόνια περνούν ανάμεσά τους και στα πλακίδια εφαρμόζονται τάσεις, ώστε τα ηλεκτρόνια να έλκονται από τους θετικούς οπλισμούς και να απωθούνται από τους αρνητικούς, για να αποκλίνουν από την ευθύγραμμη πορεία τους. Η απόκλιση είναι ανάλογη προς την εφαρμοζόμενη τάση (σχήμα 2-15).

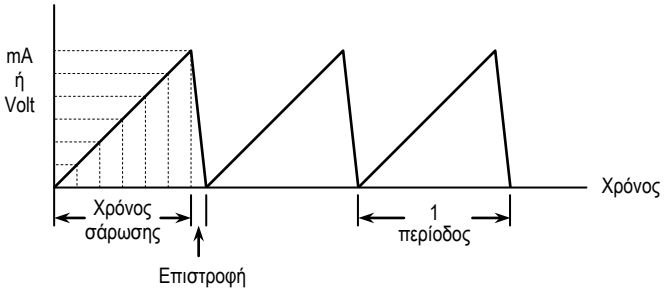
Στη δεύτερη περίπτωση, δύο ζεύγη από πηνία κάθετα μεταξύ τους τοποθετούνται έξω από το γυάλινο αερόκενο σωλήνα που περιέχει το ηλεκτρονικό πυροβόλο (σχήμα 2-16). Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν τα πηνία αναπτύσσει δυνάμεις πάνω στα ηλεκτρόνια της δέσμης, εκτρέποντάς τα από την ευθύγραμμη πορεία τους. Η απόκλιση που δημιουργείται είναι ανάλογη προς την ένταση του ρεύματος που κυκλοφορεί στα πηνία.



Σχήμα 2-16. *Σύστημα ηλεκτρομαγνητικής απόκλισης*

2.4.4 Σάρωση

Στις παλιές τηλεοπτικές κάμερες και σχεδόν σε όλους τους τηλεοπτικούς δέκτες η σάρωση της εικόνας γίνεται με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής δέσμης. Για την εξασφάλιση των κατάλληλων κινήσεων της δέσμης, η ηλεκτρική τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στα πλακίδια ηλεκτροστατικής απόκλισης ή το ηλεκτρικό ρεύμα που πρέπει να διοχετευτεί στα πηνία ηλεκτρομαγνητικής απόκλισης πρέπει να έχουν πριονωτή μορφή (σχήμα 2-17). Αυτές οι πριονωτές κυματομορφές παράγονται από ειδικά κυκλώματα, που ονομάζονται ***γεννήτριες σάρωσης***.



Σχήμα 2-17. *Πριονωτή κυματομορφή σάρωσης*

Η βαθμιαία άνοδος του ηλεκτρικού σήματος αναγκάζει την ηλεκτρονική δέσμη να κινηθεί με σταθερή ταχύτητα από το ένα άκρο της εικόνας στο άλλο. Στο τέλος της διαδρομής της, που συμπίπτει με την κορύφωση της κυματομορφής, το ηλεκτρικό σήμα μειώνεται απότομα και η δέσμη επιστρέφει ταχύτατα στο αρχικό άκρο. Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για τη σάρωση και την επιστροφή της δέσμης ονομάζεται περίοδος σάρωσης. Ο χρόνος επιστροφής είναι μικρός, περίπου το 5 ως 10% της περιόδου σάρωσης. Επειδή κατά την επιστροφή της η δέσμη δεν πρέπει να σαρώνει την εικόνα, η εκπομπή των ηλεκτρονίων κατά το διάστημα αυτό αποκόπτεται από το ηλεκτρονικό πυροβόλο με τη βοήθεια ενός κατάλληλου παλμού, που ονομάζεται ***παλμός αμαύρωσης***.

Για τη σάρωση ολόκληρης της εικόνας, η ηλεκτρονική δέσμη πρέπει να εκτελεί ταυτόχρονα δύο κινήσεις, μία οριζόντια, από αριστερά προς τα δεξιά της εικόνας, και μία κάθετη, από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη ονομάζεται οριζόντια σάρωση και η δεύτερη κατακόρυφη σάρωση. Το είδος των κυματομορφών που απαιτούνται για τις δύο αυτές σαρώσεις είναι ίδιο, αλλά διαφέρει η περίοδός τους. Δεδομένου ότι το Ευρωπαϊκό πρότυπο τηλεόρασης CCIR, που χρησιμοποιείται και στη χώρα μας, προβλέπει ότι η εικόνα αναλύεται σε 625 οριζόντιες γραμμές σάρωσης, βγαίνει το συμπέρασμα ότι, στο χρόνο που χρειάζεται να σαρωθεί η εικόνα μια φορά από πάνω προς τα κάτω, πρέπει να σαρωθεί 625 φορές από αριστερά προς τα δεξιά, ή αλλιώς η περίοδος οριζόντιας σάρωσης πρέπει να είναι 625 φορές πιο μικρή από την περίοδο κατακόρυφης σάρωσης. Όλα αυτά,

σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο, πρέπει να επαναλαμβάνονται 25 φορές το δευτερόλεπτο, δηλαδή μέσα σε ένα δευτερόλεπτο η εικόνα πρέπει να σαρώνεται 25 φορές με 625 γραμμές κάθε φορά.

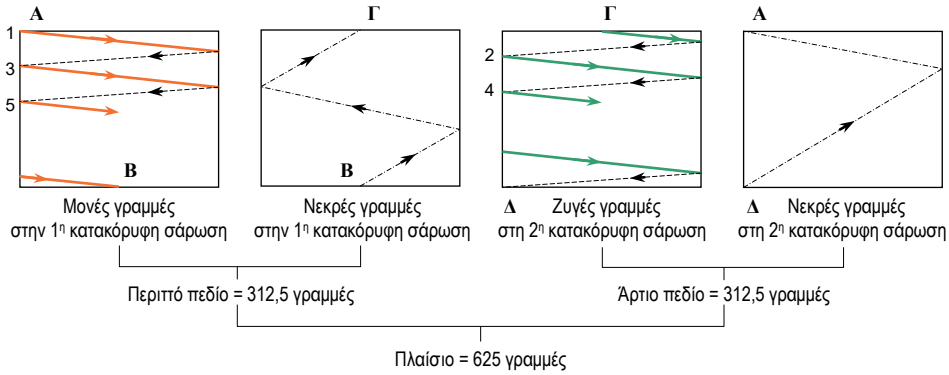
Η συνδυασμένη επίδραση των κυματομορφών της οριζόντιας και της κατακόρυφης σάρωσης πάνω στην ηλεκτρονική δέσμη έχει αποτέλεσμα η δέσμη, όσο χρόνο κινείται από αριστερά προς τα δεξιά, να κινείται ελάχιστα και προς τα κάτω. Όταν επιστρέφει στο αριστερό άκρο, επαναλαμβάνει την ίδια κίνηση αρχίζοντας από ελαφρά χαμηλότερη θέση. Με τον τρόπο αυτό η σάρωση δημιουργεί ένα γεωμετρικό σχήμα από παράλληλες γραμμές με ελαφρά κλίση προς τα κάτω δεξιά, το οποίο ονομάζεται ***ράστερ***. Οι μεταβολές της φωτεινότητας των διάφορων σημείων του ράστερ σχηματίζουν μια εικόνα, η οποία ονομάζεται ***πλαίσιο***. Όπως είδαμε, το πρότυπο CCIR προβλέπει 25 πλαίσια το δευτερόλεπτο. Έτσι έχουμε:

Συχνότητα πλαισίων	**=**	**25 Hz**		
Περίοδος πλαισίων	**=**	**1/25**	**=**	**40 msec**
Συχνότητα γραμμών	**=**	**25 × 625**	**=**	**15.625 Hz**
Περίοδος γραμμών	**=**	**1/15625**	**=**	**64 μsec**

Η εκλογή της συχνότητας των 25 πλαισίων το δευτερόλεπτο είναι συμβατική και σκοπεύει στην οικονομικότερη εκμετάλλευση της ζώνης ραδιοσυχνοτήτων που διατίθεται για τις ασύρματες τηλεοπτικές εκπομπές. Παρατηρήθηκε ότι αρκούν 25 εικόνες το δευτερόλεπτο, για να φαίνεται ομαλή η κίνηση των αντικειμένων στις κινούμενες σκηνές του τηλεοπτικού προγράμματος, όμως το μάτι μας αντιλαμβάνεται το τρεμοσβήσιμο στη γενική φωτεινότητα της εικόνας. Για να εξαφανιστεί το τρεμοσβήσιμο, χρειαζόμαστε τουλάχιστο 40 και στην πράξη 50 εικόνες το δευτερόλεπτο. Με 50 όμως εικόνες το δευτερόλεπτο η ποσότητα της μεταδιδόμενης πληροφορίας γίνεται τόσο μεγάλη, ώστε δεν θα χωρούσαν αρκετά κανάλια τηλεόρασης στις διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων εκπομπής. Για να παρακαμφθεί αυτό το πρόβλημα, εφαρμόζεται ένα τέχνασμα, που ονομάζεται ***ενδιάμεση σάρωση***.

Η συχνότητα της κατακόρυφης σάρωσης διπλασιάζεται και γίνεται 50 Hz. Αυτό αναγκάζει την ηλεκτρονική δέσμη να μη σαρώνει τις οριζόντιες γραμμές διαδοχικά, αλλά μία παρά μία. Αρχικά σαρώνονται μόνον οι μονές γραμμές, $1^{η}$, $3^{η}$, $5^{η}$ κλπ. Όταν ολοκληρωθεί αυτός ο κύκλος σάρωσης, η ηλεκτρονική δέσμη επιστρέφει γρήγορα στην κορυφή της εικόνας και σαρώνει τις ζυγές γραμμές, $2^{η}$, $4^{η}$, $6^{η}$ κλπ, μέχρι το τέλος.

Με την ενδιάμεση σάρωση η εικόνα αναβοσβήνει 50 φορές το δευτερόλεπτο και το τρεμοσβήσιμο εξαλείφεται. Επειδή κάθε πλαίσιο «χωρίζεται» στα δύο, μεταδίδονται 50 μισές, δηλαδή και πάλι 25 πλήρεις εικόνες το δευτερόλεπτο. Έτσι δεν αυξάνεται η ποσότητα των μεταδιδόμενων πληροφοριών.



Σχήμα 2-18. *Διάφορα στάδια της ενδιάμεσης σάρωσης*

Τα διάφορα στάδια της ενδιάμεσης σάρωσης περιγράφονται στο σχήμα 2-18. Το ηλεκτρονικό πυροβόλο ξεκινά από το σημείο Α και η δέσμη αρχίζει να σαρώνει την πρώτη γραμμή της εικόνας, κινούμενη με σταθερή ταχύτητα προς τα δεξιά, εξαιτίας της οριζόντιας σάρωσης, και ελαφρά προς τα κάτω, εξαιτίας της κατακόρυφης σάρωσης. Στο δεξιό άκρο του πλαισίου η δέσμη επιστρέφει γρήγορα πίσω, στο σημείο έναρξης της τρίτης γραμμής, παραλείποντας τη δεύτερη. Η κλίση του ίχνους επιστροφής (διακεκομμένη γραμμή) είναι πολύ μικρότερη από την κλίση του ίχνους σάρωσης, γιατί η επιστροφή είναι πολύ γρηγορότερη. Κατά τη διάρκεια της επιστροφής η δέσμη αποκόπτεται με τη βοήθεια ενός ***παλμού αμαύρωσης γραμμών*** που εφαρμόζεται στο ηλεκτρονικό πυροβόλο. Με τον ίδιο τρόπο σαρώνονται όλες οι μονές γραμμές του ράστερ, με εξαίρεση την 625η γραμμή, η οποία σαρώνεται μέχρι το μέσο της (σημείο Β). Όλες αυτές οι γραμμές απαρτίζουν το πρώτο «μισό» του πλαισίου, το οποίο ονομάζεται ***περιττό*** (δηλαδή μονό) ***πεδίο***.

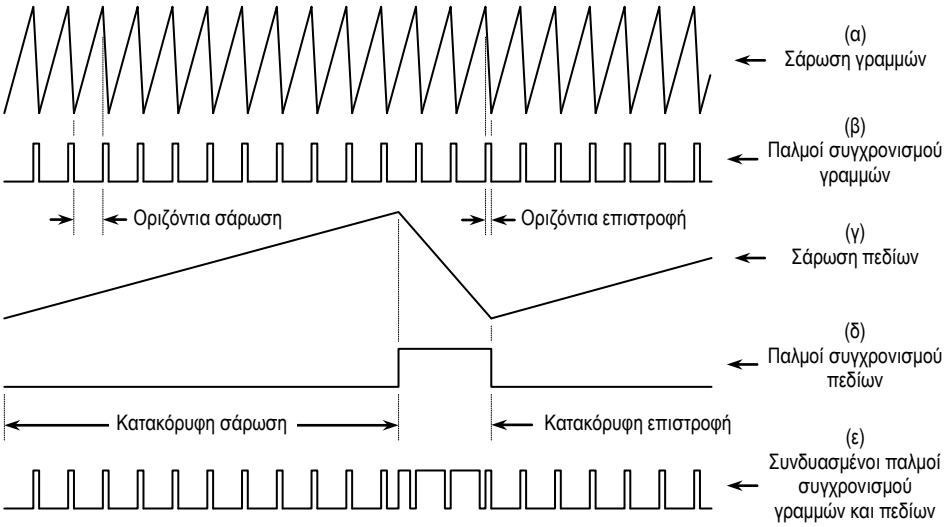
Στο σημείο Β ολοκληρώνεται η κατακόρυφη σάρωση του περιττού πεδίου και η δέσμη επιστρέφει στο πάνω μέρος της οθόνης. Ο χρόνος επιστροφής είναι αρκετά μεγάλος και η δέσμη προλαβαίνει να κάνει μερικές οριζόντιες σαρώσεις, μέχρι να φτάσει στο σημείο Γ. Οι σαρώσεις όμως αυτές δεν ανιχνεύουν την εικόνα, γιατί κατά τη διάρκεια της κατακόρυφης επιστροφής της η δέσμη αποκόπτεται με τη βοήθεια ενός ***παλμού αμαύρωσης πεδίων*** και έτσι οι γραμμές αυτές είναι «νεκρές» (ανενεργές). Παρατηρήστε ότι η κλίση του κατακόρυφου ίχνους επιστροφής είναι αρκετά μεγάλη, γιατί η δέσμη επιστρέφοντας κινείται πολύ ταχύτερα.

Με αφετηρία το σημείο Γ η δέσμη ολοκληρώνει τη σάρωση του δεύτερου μισού της 625ης γραμμής. Όταν επιστρέφει στο αριστερό άκρο του πλαισίου, ξεκινά, αρχίζοντας από τη 2η γραμμή, να σαρώνει μεταξύ των μονών γραμμών, για να παράγει τις ζυγές γραμμές του ράστερ, που είχαν παραλειφθεί στην προηγούμενη σάρωση. Οι γραμμές αυτές απαρτίζουν το ***άρτιο*** (ζυγό) ***πεδίο***. Η τελευταία

ζυγή γραμμή είναι η 624η. Η επιστροφή της δέσμης μετά τη σάρωση αυτής της γραμμής στο σημείο Δ συμπίπτει με την ολοκλήρωση της κατακόρυφης σάρωσης του άρτιου πεδίου. Μετά από αυτό η δέσμη επιστρέφει στο σημείο Α, εκτελώντας μερικές ανενεργές οριζόντιες σαρώσεις, όπως και κατά τη διαδρομή της από το Β στο Γ. Κατόπιν ο κύκλος των σαρώσεων επαναλαμβάνεται.

2.4.5 Συγχρονισμός

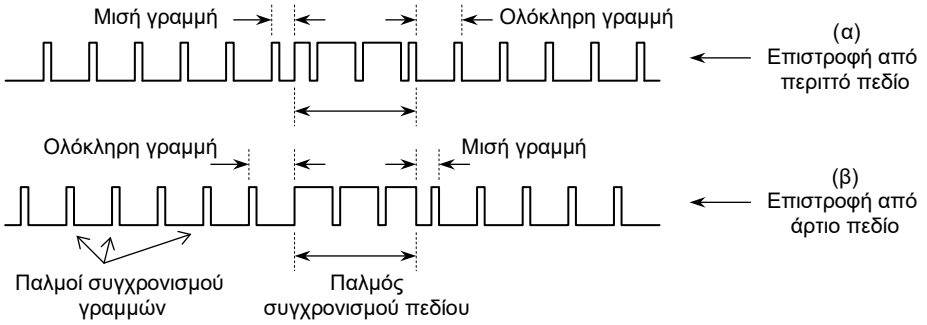
Για να αναπαράγεται μια τηλεοπτική εικόνα σταθερή και σωστά τοποθετημένη στην οθόνη, πρέπει οι κινήσεις της σάρωσης να ξεκινούν την ίδια ακριβώς στιγμή και να εξελίσσονται με την ίδια ακριβώς ταχύτητα στην κάμερα και στον τηλεοπτικό δέκτη. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται ***συγχρονισμός*** και, για να μπορέσει να εξασφαλιστεί, εκπέμπουμε μαζί με το τηλεοπτικό σήμα μια σειρά παλμών, οι οποίοι ονομάζονται ***παλμοί συγχρονισμού***. Οι παλμοί συγχρονισμού επιδρούν στις γεννήτριες σάρωσης τόσο της κάμερας όσο και του τηλεοπτικού δέκτη και συγχρονίζουν την παραγωγή των πριονωτών κυματομορφών τους. Εκπέμπονται κατά τη διάρκεια των επιστροφών της δέσμης σάρωσης, όταν το σήμα εικόνας αποκόπτεται από τους παλμούς αμαύρωσης. Υπάρχουν ***παλμοί συγχρονισμού γραμμών***, που επιδρούν στις γεννήτριες οριζόντιας σάρωσης, και ***παλμοί συγχρονισμού πεδίων***, που επιδρούν στις γεννήτριες κατακόρυφης σάρωσης. Οι παλμοί αυτοί συμπίπτουν με το καθοδικό τμήμα των πριονωτών κυματομορφών. Στην πραγματικότητα η άφιξη των συγχρονιστικών παλμών αναγκάζει τις γεννήτριες σάρωσης να μειώσουν απότομα το πλάτος του σήματός τους, ξεκινώντας μια νέα σάρωση από την αρχή.



Σχήμα 2-19. *Παλμοί σάρωσης και συγχρονισμού γραμμών και πεδίων*

Οι παλμοί συγχρονισμού γραμμών και πεδίων έχουν ίδιο πλάτος, αλλά μεγάλη διαφορά στη διάρκεια. Οι παλμοί πεδίων διαρκούν περίπου 15 φορές περισσότερο από τους παλμούς γραμμών. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό γίνεται η διάκριση μεταξύ τους στον τηλεοπτικό δέκτη. Αυτό είναι αναγκαίο, γιατί οι παλμοί αυτοί δε μεταδίδονται στο δέκτη ανεξάρτητα, αλλά μαζί, δηλαδή οι παλμοί γραμμών «πάνω» στους παλμούς πεδίων. Για να μην καλύπτονται οι παλμοί γραμμών από τους μεγάλης διάρκειας παλμούς πεδίων και χάνεται ο οριζόντιος συγχρονισμός κατά την κατακόρυφη επιστροφή της δέσμης, οι παλμοί γραμμών αποτυπώνονται πάνω στους παλμούς πεδίων με τη μορφή εσοχών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-19(ε). Το γεγονός αυτό δεν εμποδίζει τη δράση των παλμών συγχρονισμού πεδίων πάνω στη γεννήτρια κατακόρυφης σάρωσης του δέκτη.

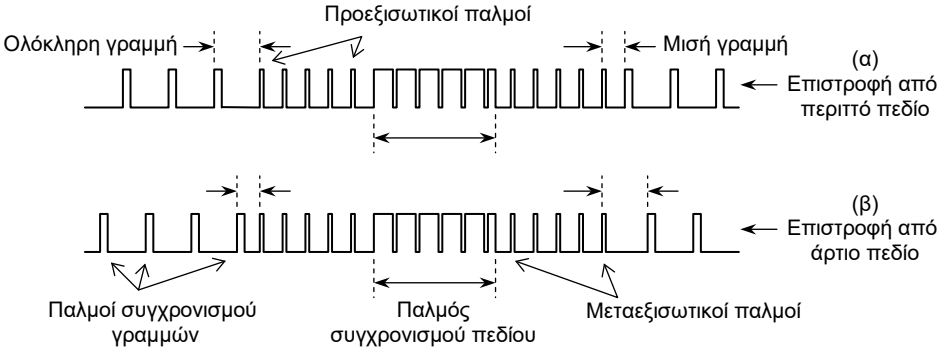
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η μορφή της σύνθετης παλμοσειράς του σχήματος 2-19(ε) δεν είναι αρκετή, για να εξασφαλίσει τη σωστή λειτουργία της ενδιάμεσης σάρωσης στο δέκτη. Αν προσέξουμε καλύτερα το σχήμα 2-18, θα διαπιστώσουμε ότι η σάρωση των περιττών πεδίων ξεκινά από ολόκληρη γραμμή και τελειώνει με μισή γραμμή, ενώ η σάρωση των άρτιων πεδίων ξεκινά από μισή γραμμή και τελειώνει με ολόκληρη. Αυτό έχει αποτέλεσμα η σύνθετη παλμοσειρά συγχρονισμού να διαφέρει ελαφρά, ανάλογα με το αν ο παλμός συγχρονισμού πεδίων σχετίζεται με κατακόρυφη επιστροφή από σάρωση άρτιου, ή περιττού πεδίου (σχήμα 2-20 α, β).



Σχήμα 2-20. *Συγχρονιστικά σήματα για περιττά (α) και άρτια (β) πεδία*

Η διαφορά στη χρονική απόσταση μεταξύ του παλμού συγχρονισμού πεδίων και του τελευταίου, πριν από αυτόν, παλμού συγχρονισμού γραμμών στις δύο αυτές περιπτώσεις δημιουργεί κάποιο πρόβλημα στη σάρωση του δέκτη. Συγκεκριμένα, δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια η στιγμή έναρξης της κατακόρυφης επιστροφής. Αυτό κάνει τις ζυγές γραμμές να μη σαρώνονται ακριβώς ανάμεσα στις μονές, αλλά μάλλον να πέφτουν επάνω τους.

Για να αποφύγουμε αυτό το φαινόμενο, που υποβιβάζει την ποιότητα της εικόνας, τοποθετούμε πέντε νέους παλμούς πριν και πέντε μετά τον παλμό συγχρονισμού πεδίων. Αυτοί οι παλμοί έχουν μισή διάρκεια και διπλάσια συχνότητα από τους κανονικούς παλμούς συγχρονισμού γραμμών. Οι ίδιοι παλμοί συνεχίζονται σαν εσοχές στην οροφή του παλμού συγχρονισμού πεδίων. Οι παλμοί που τοποθετούνται πριν από τον παλμό συγχρονισμού πεδίων, ονομάζονται ***προεξισωτικοί παλμοί*** και εκείνοι που τοποθετούνται μετά τον παλμό συγχρονισμού πεδίων ονομάζονται ***μεταξισωτικοί παλμοί***. Η δράση τους έχει αποτέλεσμα να μεταφέρεται η ανισότητα μεταξύ του χρόνου σάρωσης των μισών και των ολόκληρων γραμμών μακριά από τον παλμό συγχρονισμού πεδίων, ώστε αυτός να μην επηρεάζεται. Χάρη στην ειδική μορφή των κυκλωμάτων συγχρονισμού στον τηλεοπτικό δέκτη, η ύπαρξη των εξισωτικών παλμών δεν επηρεάζει τον οριζόντιο συγχρονισμό (σχήμα 2-21).



Σχήμα 2-21. *Συγχρονιστικά σήματα με εξισωτικούς παλμούς*

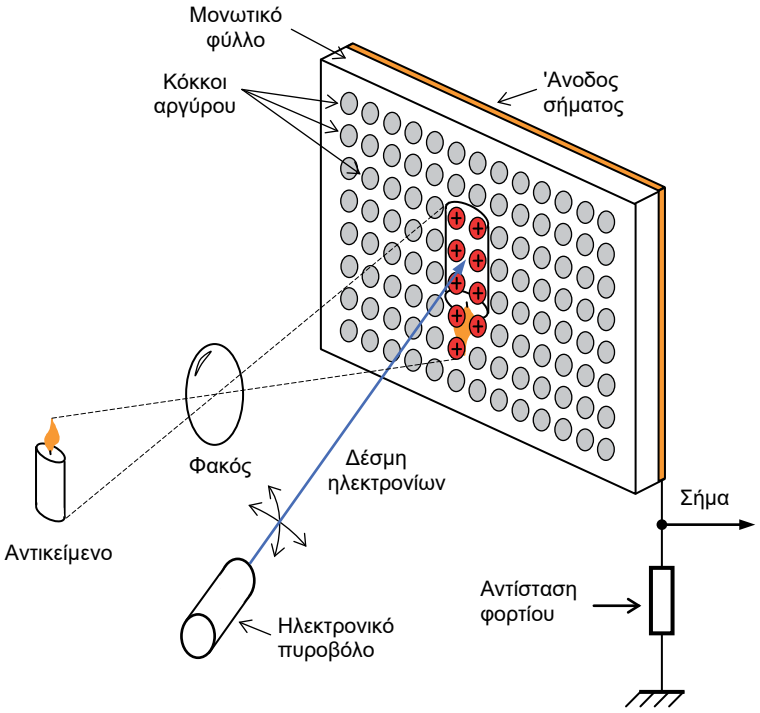
2.4.6 Διατάξεις εικονοληψίας

Πρωταρχική μορφή ηλεκτρονικού εικονολήπτη αποτελεί το εικονοσκόπιο του Ζορίκιν, το οποίο, αν και δεν χρησιμοποιείται πλέον σήμερα, αποτελεί ένα καλό μοντέλο για την κατανόηση της λειτουργίας άλλων παρόμοιων συσκευών.

Το ***εικονοσκόπιο*** στηρίζει τη λειτουργία του στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στο εσωτερικό του εικονοσκοπίου μέσα σε αερόκενο χώρο υπάρχει μια λεπτή μονωτική πλάκα. Η μια όψη της πλάκας είναι καλυμμένη από πολυάριθμους κόκκους αργύρου, ηλεκτρικά μονωμένους μεταξύ τους, και ονομάζεται ***μωσαϊκό***. Οι κόκκοι είναι καλυμμένοι από ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του καισίου, γιατί το υλικό αυτό εμφανίζει έντονα το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Η άλλη όψη της πλάκας είναι επιστρωμένη με ένα αγώγιμο φύλλο, που ονομάζεται άνοδος σήματος. Στην άνοδο σήματος συνδέεται μια αντίσταση φορτίου και από τα άκρα της λαμβάνεται η έξοδος του σήματος. Με τον τρόπο αυτό οι κόκκοι του μωσαϊκού μέσα στο

περιβάλλον του εικονοσκοπίου λειτουργούν σαν πολυάριθμα φωτοκύτταρα με τις ανόδους τους συνδεδεμένες παράλληλα.

Ένα οπτικό σύστημα προβάλλει το φωτεινό είδωλο πάνω στο μωσαϊκό. Οι κόκκοι που φωτίζονται εκπέμπουν φωτοηλεκτρόνια και φορτίζονται με θετικό φορτίο, ανάλογο προς την ένταση του φωτός που πέφτει στον καθένα τους. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται πάνω στην επιφάνεια του μωσαϊκού ένα ηλεκτρικό αντίγραφο του ορατού ειδώλου. Κάθε κόκκος αργύρου σχηματίζει μαζί με την άνοδο σήματος ένα στοιχειώδη πυκνωτή, ο οποίος έχει φορτίο ανάλογο προς την ένταση του φωτός που τον προσβάλλει.

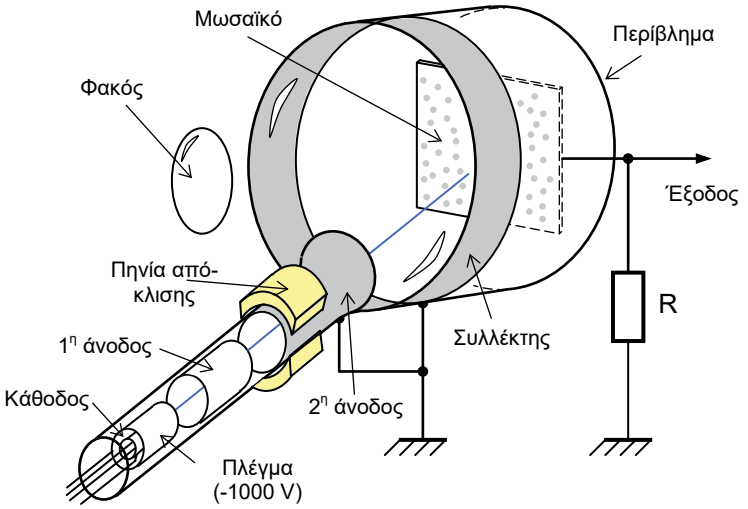


Σχήμα 2-22. *Σχηματική διάταξη εικονοσκοπίου.*

Η ανίχνευση του φορτίου αυτών των πυκνωτών γίνεται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού πυροβόλου, το οποίο εκπέμπει μια λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων. Μέσω ενός συστήματος απόκλισης, η δέσμη σαρώνει όλη την επιφάνεια του μωσαϊκού. Όταν τα ηλεκτρόνια πέφτουν πάνω σε κάποιο κόκκο, ο στοιχειώδης πυκνωτής εκφορτίζεται. Μέσα από την άνοδο σήματος το ρεύμα εκφόρτισης οδηγείται στην αντίσταση φορτίου και καταλήγει στη γείωση, αναπτύσσοντας στα άκρα της αντίστασης την τάση εξόδου του εικονοσκοπίου (σχήμα 2-22).

Το εικονοσκόπιο ως σύνολο αποτελείται από ένα γυάλινο αερόκενο κυλινδρικό περίβλημα, στο εσωτερικό του οποίου υπάρχει η πλάκα με το μωσαϊκό. Μπροστά

και λοξά προς τα κάτω του περιβλήματος είναι προσαρμοσμένο το ηλεκτρονικό πυροβόλο με τα συστήματα εστίασης και απόκλισης της ηλεκτρονικής δέσμης. Το εμπρόσθιο τοίχωμα του περιβλήματος είναι διαφανές, για να επιτρέπει την προβολή του ειδώλου πάνω στο μωσαϊκό, και το εσωτερικό του είναι επιμεταλλωμένο, για να συλλέγει τα δευτερογενή ηλεκτρόνια που παράγονται, όταν η ηλεκτρονική δέσμη χτυπά με ορμή πάνω στο μωσαϊκό. Η επιμετάλλωση αυτή ονομάζεται συλλέκτης και συνδέεται με τη γείωση της συσκευής (σχήμα 2-23).

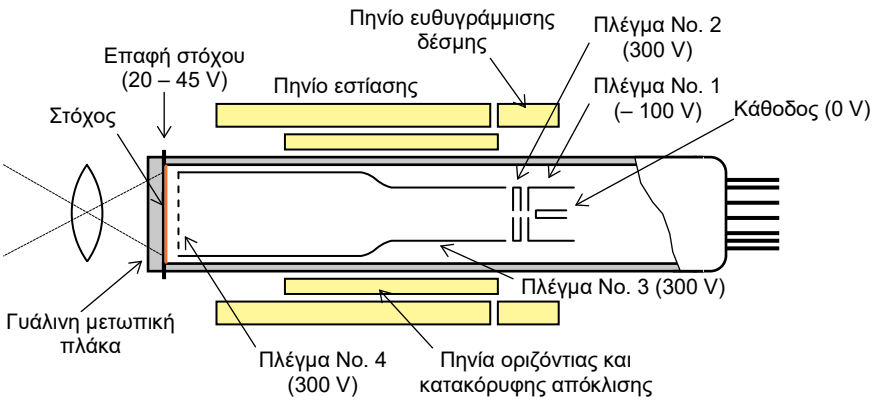


Σχήμα 2-23. *Δομή ενός εικονοσκοπίου*

Η λειτουργία του εικονοσκοπίου είναι αρκετά ατελής. Κατ' αρχάς η ευαισθησία του είναι πολύ μικρή και αυτό έχει αποτέλεσμα την αδυναμία του να καταγράφει εικόνες με χαμηλό φωτισμό. Επιπλέον η εικόνα που παράγει έχει γεωμετρικές παραμορφώσεις, εξαιτίας της λοξής τοποθέτησης του ηλεκτρονικού πυροβόλου ως προς το μωσαϊκό. Τέλος σημαντικό πρόβλημα προκαλούν τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, που, παρά την ύπαρξη του συλλέκτη, κατά ένα ποσοστό επιστρέφουν στο μωσαϊκό και προκαλούν την εμφάνιση μαύρων κηλίδων στην εικόνα. Για την εξάλειψη αυτών των μειονεκτημάτων, κατασκευάστηκαν το υπερεικονοσκόπιο, η λυχνία όρθικον και η υπερόρθικον. Το υπερεικονοσκόπιο έχει αυξημένη ευαισθησία, η όρθικον δεν προκαλεί παραμορφώσεις της εικόνας και η υπερόρθικον συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο άλλων. Οι κάμερες που βασίζονται σ' αυτή τη λυχνία έχουν άριστη ευαισθησία και ποιότητα αναπαραγωγής εικόνας. Είναι όμως δύσκολες στο χειρισμό, απαιτούν πολύπλοκη τροφοδοσία και έχουν μεγάλο όγκο. Για το λόγο αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί μονάχα για εσωτερικές λήψεις σε στούντιο. Μια νέα γενιά λυχνιών στηριγμένων στο φαινόμενο

της φωτοαγωγιμότητας έδωσε τη δυνατότητα κατασκευής καμερών οι οποίες ήταν οι πρώτες ουσιαστικά φορητές και μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες εφαρμογές, εκτός από την εμπορική τηλεόραση (συστήματα ασφάλειας, επιτήρησης χώρων κλπ.). Το φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας εμφανίζεται σε ορισμένα σώματα (κυρίως στους ημιαγωγούς) και έχει αποτέλεσμα τη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης του σώματος, όταν επάνω του πέφτει φως. Στο φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας βασίζουν τη λειτουργία τους και οι φωτοαντιστάσεις. Τέτοιες λυχνίες είναι οι βίντικον και οι πλούμπικον καθώς και οι διάφορες παραλλαγές τους (σάτικον, ρέτζιστρον, λουμίνικον, κόντουκτρον, λέντικον, χάλνικον κλπ.). Παρακάτω περιγράφουμε τη λυχνία βίντικον, που είναι χαρακτηριστικός εκπρόσωπος της λειτουργίας αυτών των συσκευών.

Η λυχνία ***βίντικον*** έχει μόνο μια φωτοευαίσθητη πλάκα για στόχο και ένα ηλεκτρονικό πυροβόλο (σχήμα 2-24).

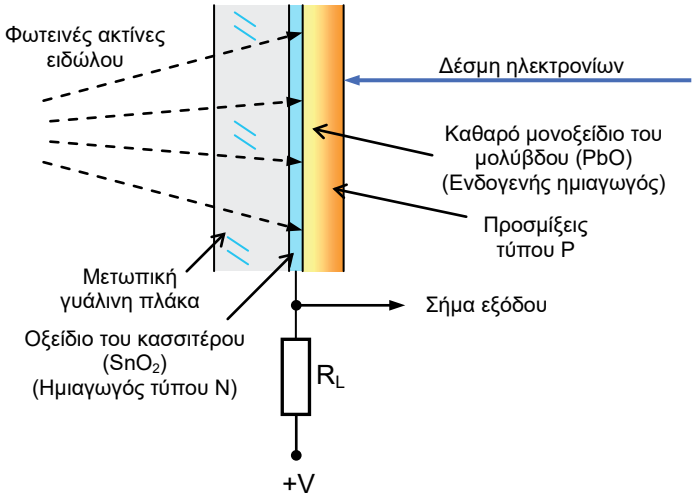


Σχήμα 2-24. *Λυχνία βίντικον*

Το μετωπικό γυάλινο κάλυμμα της βίντικον είναι εσωτερικά επιστρωμένο με διαφανή αγώγιμη επικάλυψη. Πάνω σ' αυτήν την επικάλυψη είναι επιστρωμένο το φωτοευαίσθητο υλικό του στόχου, που είναι ημιαγωγός βασισμένος στο σελήνιο ή το αντιμόνιο. Μια δέσμη ηλεκτρονίων ξεκινά από την κάθοδο και σαρώνει την επιφάνεια του στόχου. Τα ηλεκτρόνια κλείνουν κύκλωμα μέσα από τη μάζα του φωτοευαίσθητου υλικού και εξέρχονται από τον ακροδέκτη της επαφής του στόχου, που αποτελεί την άνοδο σήματος της λυχνίας. Το φωτεινό είδωλο εστιάζεται πάνω στο στόχο. Στα σημεία που φωτίζονται η αντίσταση του φωτοευαίσθητου υλικού μειώνεται, από 20 ΜΩ περίπου (σκοτάδι), μέχρι και 2 ΜΩ (έντονο φως). Ως αποτέλεσμα, η ένταση της ηλεκτρονικής δέσμης αυξομειώνεται, ανάλογα με την αντίσταση που συναντά στα σημεία επαφής της με το στόχο, και παράγει στα άκρα μιας αντίστασης φορτίου το σήμα εξόδου της βίντικον.

Η λυχνία βίντικον είναι μικρή, ελαφριά και εύκολη στη χρήση, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι ο στόχος της δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε γρήγορες μεταβολές του φωτός. Κινούμενα φωτεινά σημεία καταγραμμένα από κάμερες με βίντικον αφήνουν στην πορεία τους φωτεινά «ίχνη». Το ίδιο συμβαίνει με όλες τις παραλλαγές της βίντικον, που διαθέτουν στόχο υψηλής αντίστασης (π.χ. σάτικον, ρέτζιστρον κλπ). Για την εξάλειψη αυτού του μειονεκτήματος, κατασκευάστηκαν λυχνίες με στόχους μικρής αντίστασης, όπως η πλούμπικον και οι παραλλαγές της.

Η ***πλούμπικον*** έχει παρόμοια δομή με τη βίντικον. Η μόνη της διαφορά βρίσκεται στο στόχο, ο οποίος έχει πιο περίπλοκη δομή απ' αυτόν της βίντικον (σχήμα 2-25).



Σχήμα 2-25. *Διάγραμμα του στόχου της πλούμπικον*

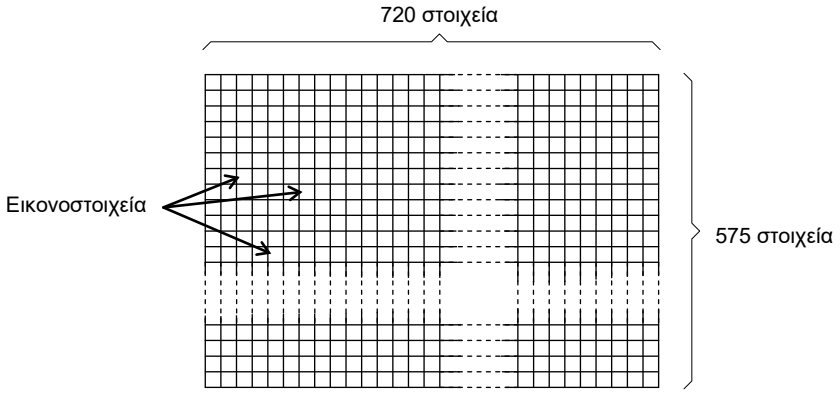
Στην πλούμπικον ο στόχος αποτελείται από τρία στρώματα ημιαγωγικού υλικού. Από αυτά το πρώτο είναι διαφανές και τύπου N, το επόμενο είναι ενδογενής (I) ημιαγωγός και το τρίτο έχει δεχθεί προσμίξεις, για να σχηματίσει ημιαγωγό τύπου P. Αυτά τα στρώματα σχηματίζουν μια δίοδο P-I-N, που πολώνεται ανάστροφα από την τάση τροφοδοσίας του στόχου.

Το φωτεινό είδωλο μέσα από τη διαφανή επίστρωση δημιουργεί ηλεκτρόνια και οπές στον ημιαγωγό, που συγκεντρώνονται στις περιοχές N και P αντιστοίχως. Αυτό δημιουργεί ένα πλήθος από φορτισμένους στοιχειώδεις πυκνωτές στα σημεία όπου πέφτουν οι φωτεινές ακτίνες, οι οποίοι έχουν το θετικό τους φορτίο προς την πλευρά σάρωσης του στόχου. Όταν η δέσμη σάρωσης προσπέσει πάνω στα φορτισμένα σημεία, απελευθερώνει αρκετά ηλεκτρόνια, για να εκφορτίσει τον κάθε στοιχειώδη πυκνωτή. Το ρεύμα της δέσμης σάρωσης μέσα από την εξωτερική αντίσταση φορτίου R_L δημιουργεί το σήμα εξόδου της πλούμπικον.

Η λυχνία πλούμπικον έχει πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία από τη βίντικον και ταχύτατη ανταπόκριση στις μεταβολές του φωτός. Η λυχνία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί πολύ σε έγχρωμες κάμερες, λόγω της απλότητάς της και της σωστής ανταπόκρισής της στα τρία βασικά χρώματα. Όπως όμως όλες οι λυχνίες, απαιτεί υψηλές τάσεις για τη λειτουργία του ηλεκτρονικού πυροβόλου και ένα αρκετά ογκώδες, βαρύ και ενεργοβόρο σύστημα πηνίων, για την εστίαση και την απόκλιση της ηλεκτρονικής δέσμης. Αυτό δυσχεραίνει πάρα πολύ τη χρήση της, όπως και κάθε άλλης λυχνίας εικονοληψίας σε φορητές κάμερες. Οριστική λύση σ' αυτό το πρόβλημα δόθηκε μονάχα κατά τη δεκαετία του '80 με την ανάπτυξη των συσκευών σύζευξης φορτίου ή CCD (Σι-Σι-Ντι).

Τα αρχικά ***CCD*** προέρχονται από τις λέξεις Charge Coupled Device, που σημαίνουν συσκευή σύζευξης φορτίου. Το CCD είναι ένας πλήρης φωτοηλεκτρικός μετατροπέας δομημένος πάνω σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα.

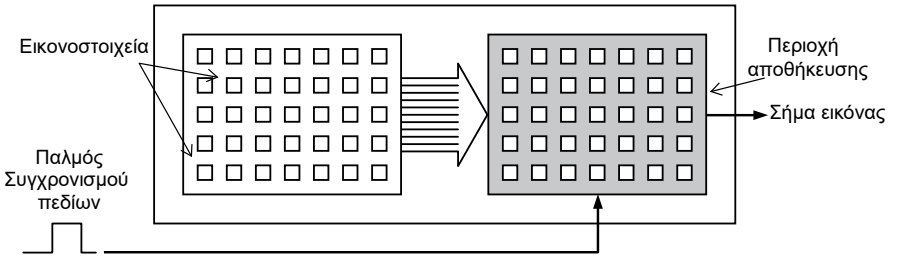
Το CCD διαθέτει φωτοευαίσθητα στοιχεία διατεταγμένα σε σειρές και στήλες, που ονομάζονται εικονοστοιχεία ή πίξελς (pixels). Ένα τυπικό πλήθος εικονοστοιχείων σε ένα μέτριο CCD είναι 575 στοιχεία διατεταγμένα σε γραμμές επί 720 στοιχεία διατεταγμένα σε στήλες (σχήμα 2-26). Όσο μεγαλύτεροι είναι αυτοί οι αριθμοί τόσο λεπτομερέστερα καταγράφει το CCD την εικόνα. Κάθε εικονοστοιχείο αποτελείται από μία φωτοδίοδο ή από ένα φωτοευαίσθητο τρανζίστορ MOS. Η πρόσπτωση φωτός πάνω στις φωτοευαίσθητες επαφές παράγει φορτία με διεργασία αναλογική, όπου μεγαλύτερη φωτεινότητα δημιουργεί περισσότερο φορτίο. Η συλλογή όμως αυτών των φορτίων και η διοχέτευσή τους για την παραγωγή του σήματος εξόδου είναι διαδικασία ψηφιακή. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι μετατροπής αυτών των φορτίων σε τάσεις:



Σχήμα 2-26. *Διάταξη εικονοστοιχείων ενός CCD*

Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, τα φορτία που συγκεντρώνονται στα εικονοστοιχεία κατά το χρόνο που διαρκεί η σάρωση ενός πεδίου, μεταφέρονται κατά τη διάρκεια του κατακόρυφου παλμού συγχρονισμού με τη βοήθεια ηλεκτρονικών

διακοπτών σε μια περιοχή αποθήκευσης. Η περιοχή αυτή αποτελείται από τρανζίστορ MOS ισάριθμα με αυτά του CCD, αλλά καλυμμένα, για να μην τα προσβάλλει το φως. Την ώρα που εξελίσσεται η έκθεση του επόμενου πεδίου, τα φορτία αυτά αποδεσμεύονται γραμμή - γραμμή και δημιουργούν ένα συνεχόμενο σήμα εικόνας, που προέρχεται από το προηγούμενο πεδίο. Αυτά τα CCD ονομάζονται ***CCD μεταφοράς πλαισίων*** (Frame Transfer CCD) και η δομή τους φαίνεται στο σχήμα 2-27.

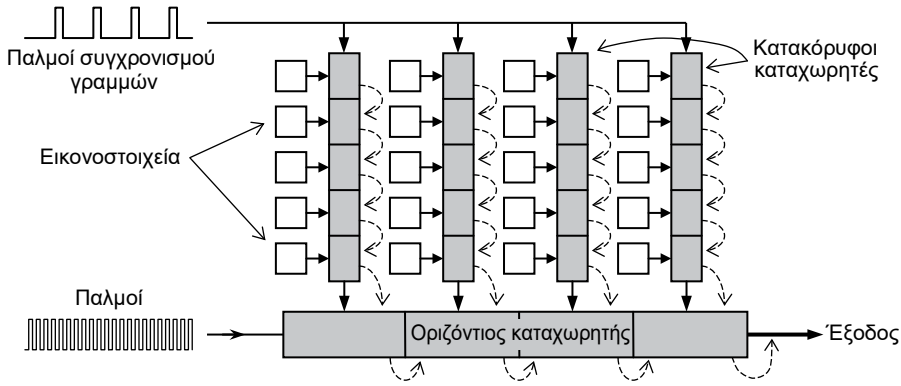


Σχήμα 2-27. *CCD μεταφοράς πλαισίων*

Σύμφωνα με το δεύτερο τρόπο, όταν έλθει ένας παλμός συγχρονισμού πεδίων, τα φορτία των εικονοστοιχείων μεταφέρονται σε μια σειρά από περιοχές αποθήκευσης οργανωμένες σε στήλες, που ονομάζονται ***κατακόρυφοι καταχωρητές.*** Με κάθε παλμό συγχρονισμού γραμμών που έρχεται στη συνέχεια, τα φορτία όλων μαζί των κατακόρυφων καταχωρητών ολισθαίνουν παράλληλα μία-μία θέση προς τα κάτω, μέσα σε ένα ***οριζόντιο καταχωρητή***. Από εκεί, στο χρόνο που μεσολαβεί ανάμεσα στην άφιξη δύο διαδοχικών παλμών συγχρονισμού γραμμών, μια κατάλληλη σειρά παλμών αδειάζει τον οριζόντιο καταχωρητή, ωθώντας τα περιεχόμενά του διαδοχικά προς την έξοδο.

Ο τρόπος με τον οποίο ολισθαίνουν τα φορτία μέσα στους καταχωρητές θυμίζει τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρονται οι κουβάδες από χέρι σε χέρι, όταν μια ομάδα ανθρώπων προσπαθεί να σβήσει μια φωτιά. Αυτά τα CCD ονομάζονται ***CCD μεταφοράς με ενδιάμεσες γραμμές*** (InterlineTransfer CCD). Η δομή τους φαίνεται στο σχήμα 2-28.

Επειδή τα CCD είναι διατάξεις βασισμένες εξ ολοκλήρου σε ημιαγωγούς, απαιτούν μόνο λίγα volt τάσης τροφοδοσίας, για να λειτουργήσουν. Αυτό, σε συνδυασμό με το μικρό βάρος και τις περιορισμένες τους διαστάσεις, τα κάνει ιδανικά για τοποθέτηση σε φορητές συσκευές. Στα πρώτα CCD ο περιορισμένος αριθμός των εικονοστοιχείων και το σχετικά μεγάλο πλήθος ελαττωματικών εικονοστοιχείων ανά ολοκληρωμένο περιόρισαν τη χρήση τους στις ερασιτεχνικές κάμερες. Με την πρόοδο της τεχνολογίας ξεπεράστηκαν οι παραπάνω κατασκευαστικές αδυναμίες και βελτιώθηκε μια σειρά χαρακτηριστικών που αρχικά ήταν προβληματικά. Αυτό βελτίωσε την ποιότητα της παραγόμενης εικόνας και έτσι σήμερα και οι επαγγελματικές κάμερες κατασκευάζονται αποκλειστικά με CCD.



Σχήμα 2-28. *CCD μεταφοράς με ενδιάμεσες γραμμές*

2.4.7 Η έγχρωμη τηλεοπτική κάμερα

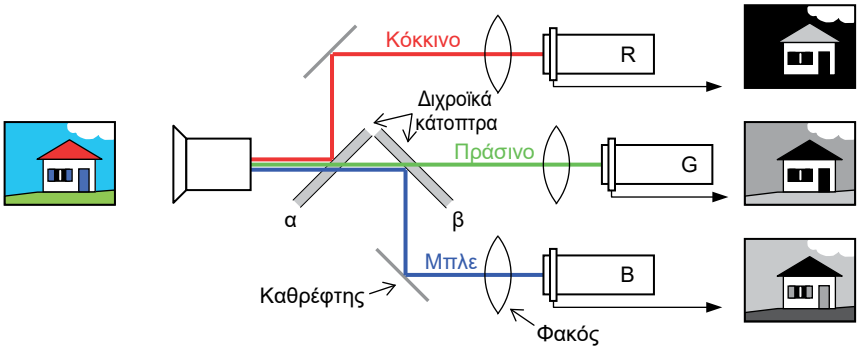
Για να είναι μια κάμερα σε θέση να καταγράψει έγχρωμη εικόνα, θα πρέπει να διαθέτει κάποια διάταξη που θα διαχωρίζει το φως στα τρία βασικά προσθετικά χρώματα, το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε ή RGB. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Ανεξάρτητα πάντως από τη μέθοδο διαχωρισμού, οι πληροφορίες RGB περνάνε από επεξεργασία και κωδικοποίηση. Αυτό γιατί, όπως είδαμε, στην έγχρωμη τηλεόραση δεν μεταδίδονται οι πληροφορίες για το χρώμα, αλλά οι πληροφορίες για τη χρωμικότητα με τη μορφή σημάτων που εκφράζουν τη διαφορά χρωμάτων και φωτεινότητας. Μάλιστα από τις χρωμικότητες των τριών βασικών χρωμάτων δε μεταδίδεται η χρωμικότητα του πράσινου, γιατί μπορεί να υπολογιστεί από τις χρωμικότητες των άλλων δύο.

Για το διαχωρισμό της εικόνας στα τρία χρώματα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε τρεις διαφορετικοί εικονολήπτες είτε μόνον ένας. Το σήμα φωτεινότητας που απαιτείται στην έγχρωμη τηλεόραση προκύπτει είτε από συνδυασμό των RGB μεταξύ τους (όπως είδαμε στην παράγραφο 2.3) είτε με τη βοήθεια ενός άλλου ξεχωριστού εικονολήπτη. Μερικά συστήματα διαχωρισμού των τριών βασικών χρωμάτων παρουσιάζονται παρακάτω.

- ***Το σύστημα διαχωρισμού με διχροϊκά κάτοπτρα*** χρησιμοποιεί ειδικά ημιδιαφανή καθρεφτάκια, τα οποία έχουν την ιδιότητα να αντανακλούν τις ακτίνες του φωτός που έχει ορισμένο χρώμα, ενώ επιτρέπουν στις ακτίνες των υπολοίπων χρωμάτων να περάσουν σχεδόν ανεπηρέαστες. Χρησιμοποιούνται δύο τέτοια κάτοπτρα, από τα οποία το ένα αντανακλά το κόκκινο και το άλλο αντανακλά το μπλε.

Στο σχήμα 2-29 βλέπουμε τα διχροϊκά κάτοπτρα α και β. Οι ανακλώμενες κόκκινες και μπλε ακτίνες αλλάζουν ακόμη μια φορά πορεία με τη βοήθεια απλών καθρεφτών και οι φωτεινές τους δέσμες οδηγούνται μαζί με τη δέσμη του πρά-

σινου σε τρεις λυχνίες εικονοληψίας. Η σάρωση των τριών στόχων των λυχνιών παράγει τις τρεις τάσεις εξόδου RGB.



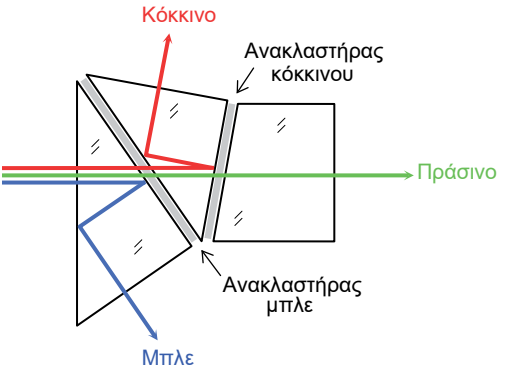
Σχήμα 2-29. *Διαχωριστής RGB με διχροϊκά κάτοπτρα*

Οι τρεις φωτεινές δέσμες RGB πρέπει να εστιάζονται ταυτόχρονα πάνω στους στόχους των τριών εικονοληπτών. Ας σημειωθεί ότι οι εικονολήπτες παράγουν «ασπρόμαυρες» εικόνες, που αντιστοιχούν στις μεταβολές φωτεινότητας της εικόνας, όπως αυτές φαίνονται μέσα από τα έγχρωμα φίλτρα. Παρατηρήστε ότι ο γαλάζιος ουρανός και το πράσινο γρασίδι φαίνονται μαύρα για τον εικονολήπτη του κόκκινου, ενώ η κόκκινη στέγη και το πράσινο γρασίδι φαίνονται μαύρα για τον εικονολήπτη του μπλε. Ο γαλανός ουρανός φαίνεται γκρίζος στην εικόνα του πράσινου και του μπλε, γιατί το γαλάζιο είναι μείγμα πράσινου και μπλε. Ταυτόχρονα το λευκό σύννεφο φαίνεται λευκό και στις τρεις εικόνες, αφού το λευκό περιέχει και τα τρία χρώματα.

● ***Το σύστημα διαχωρισμού με πρισματικά κάτοπτρα*** έχει καλύτερη ποιότητα εικόνας από το προηγούμενο. Εδώ τα διχροϊκά κάτοπτρα τοποθετούνται ανάμεσα σε οπτικά πρίσματα και, επειδή δεν υπάρχουν κενά, περιορίζονται οι φωτεινές απώλειες από ανεπιθύμητες αντανακλάσεις (σχήμα 2-30).

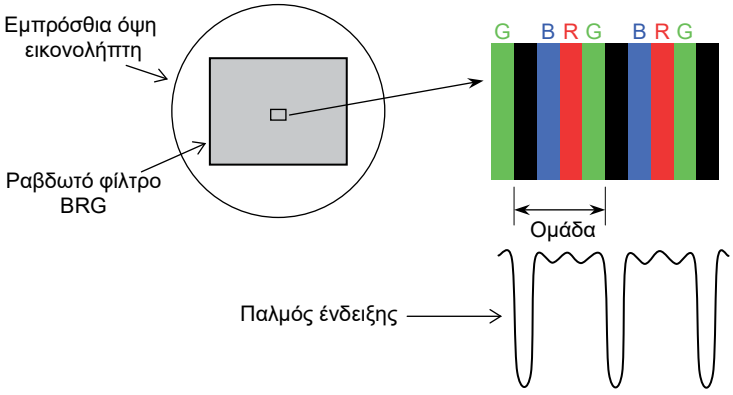
Κατά τα άλλα ο διαχωριστής με πρίσματα δε διαφέρει σε τίποτε από το διαχωριστή με διχροϊκά κάτοπτρα. Το μικρό του όμως μέγεθος και η συμπαγής κατασκευή του το κάνουν κατάλληλο για τοποθέτηση σε κάμερες με CCD.

Τα δύο παραπάνω συστήματα χρησιμοποιούν τρεις εικονολήπτες και χρησιμοποιούνται σχεδόν σε



Σχήμα 2-30.
Διαχωριστής RGB με οπτικά πρισματικά κάτοπτρα

όλες τις επαγγελματικές κάμερες. Οι περισσότερες όμως ερασιτεχνικές κάμερες για λόγους μείωσης του κόστους έχουν ένα μόνον εικονολήπτη, συνήθως ένα CCD. Στις κάμερες αυτές ο διαχωρισμός των χρωμάτων γίνεται με συνδυασμούς έγχρωμων φίλτρων, όπως, για παράδειγμα, στο σύστημα διαχωρισμού με ***ραβδωτό φίλτρο RGB***. Στο σύστημα αυτό τοποθετείται μπροστά από τον εικονολήπτη ένα διαφανές φίλτρο με κάθετες ραβδώσεις των τριών βασικών χρωμάτων σε ομάδες. Κάθε ομάδα χωρίζεται από τη διπλανή της με μια κάθετη μαύρη ράβδωση. Το πλάτος όλων των ραβδώσεων είναι ίδιο. Κατά τη σάρωση χρειάζονται περίπου 616 δισεκατομμυριοστά του δευτερολέπτου (616 nsec) για τη διερεύνηση μιας ομάδας. Επομένως για κάθε ράβδωση χρειάζεται χρόνος 614/4 = 154 nsec. Η μαύρη ράβδωση τοποθετείται ως σημείο αναφοράς και είναι ένδειξη αλλαγής ομάδας, για τον εύκολο διαχωρισμό των χρωματικών πληροφοριών (σχήμα 2-31).



Σχήμα 2-31. *Διαχωριστής RGB με ραβδωτό φίλτρο*

Ο παλμός που προκύπτει από τη μαύρη λωρίδα ονομάζεται παλμός ένδειξης και χρησιμοποιείται για να ανοιγοκλείνει διαδοχικά ανά 154 nsec τρία ηλεκτρονικά κυκλώματα, που συνδέουν την έξοδο του CCD μια φορά στην έξοδο του μπλε, κατόπιν στην έξοδο του κόκκινου και τέλος στην έξοδο του πράσινου και μετά πάλι από την αρχή. Τα τρία σήματα R, G, B περνούν κατόπιν από τις επεξεργασίες κωδικοποίησης που εφαρμόζονται σε όλες τις κάμερες.

Παραλλαγές αυτού του συστήματος είναι το σύστημα διαχωρισμού με ***ραβδωτό φίλτρο GCW*** (πράσινο-κυανό-λευκό) και το σύστημα διαχωρισμού με ***φίλτρα διασταυρούμενων ραβδώσεων CY*** (κυανό-κίτρινο), τα οποία λειτουργούν με ανάλογο τρόπο.

Από τα παραπάνω, είναι φανερό ότι η χρωματική ευκρίνεια της εικόνας που προέρχεται από κάμερα με ένα εικονολήπτη είναι τουλάχιστον τρεις φορές χειρότερη από τη χρωματική ευκρίνεια μιας κάμερας με τρεις εικονολήπτες. Το γεγονός όμως αυτό δε δημιουργεί μεγάλη υποβάθμιση στην ποιότητα της εικόνας, γιατί όπως είδαμε στην παράγραφο 2.1.3, το ανθρώπινο μάτι είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητο στο χρώμα απ' ό,τι στη φωτεινότητα των αντικειμένων.

2.4.8 Παραγωγή συνθετικής εικόνας

Σύμφωνα με όσα έχουμε γνωρίσει ως τώρα, η τηλεόραση στηρίζεται στη μετατροπή των στοιχείων μιας εικόνας σε μια σειρά από ηλεκτρικά σήματα, που γίνεται με τη βοήθεια της τηλεοπτικής κάμερας. Τα σήματα αυτά οδηγούνται στους τηλεοπτικούς δέκτες, οι οποίοι τα χρησιμοποιούν για να αναπαράγουν την εικόνα. Με τη γρήγορη προβολή πολλών ελαφρά διαφορετικών μεταξύ τους εικόνων παράγεται η εντύπωση της κινούμενης εικόνας.

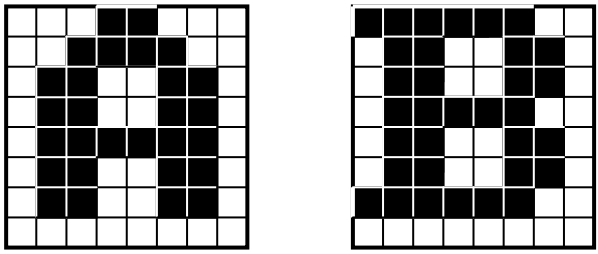
Η ηλεκτρονική τεχνολογία έχει παράγει πλούσια συλλογή από γεννήτριες ηλεκτρικών σημάτων. Είναι λοιπόν δυνατό να αντικαταστήσουμε το σήμα εικόνας της κάμερας με σήματα τέτοιων γεννητριών και να παράγουμε μια συνθετική εικόνα. Άλλωστε, ακόμη και στο σήμα μιας «φυσικής» εικόνας από κάμερα, ένα μεγάλο μέρος του (αυτό που αφορά τους παλμούς αμαύρωσης και συγχρονισμού) προέρχεται από γεννήτριες.

Συνθετικές εικόνες χρησιμοποιούνται από πολύ παλιά στην τηλεόραση, για να βοηθούν στον έλεγχο και τη ρύθμιση των δεκτών. Παράγονται από συσκευές που ονομάζονται ***γεννήτριες πρότυπων σημάτων*** ή συνηθέστερα «μπαρογεννήτριες». Οι γεννήτριες αυτές εμφανίζουν στην οθόνη του τηλεοπτικού δέκτη μια σειρά από τυποποιημένα σχήματα, όπως κατακόρυφες λωρίδες (μπάρες), κύκλους, διασταυρούμενες γραμμές κλπ. Συνήθως όμως, όταν μιλούμε για συνθετικές εικόνες, κυρίως εννοούμε τις κινούμενες ή ακίνητες εικόνες, που παράγονται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και, γι' αυτό, αυτές θα εξετάσουμε παρακάτω.

Η απλούστερη διαδικασία παραγωγής εικόνας στην οθόνη ενός υπολογιστή είναι η εμφάνιση γραμμάτων και αριθμών, όταν, όπως λέμε, έχουμε λειτουργία σε «ρυθμό χαρακτήρων». Κάπως πιο περίπλοκα είναι τα πράγματα όταν έχουμε λειτουργία σε «ρυθμό γραφικών» όπου, εκτός από σύμβολα γραμμάτων και αριθμών, μπορούν να εμφανίζονται στην οθόνη και οποιαδήποτε άλλα σχήματα. Σε κάθε περίπτωση πάντως η οθόνη χωρίζεται σε ένα πλήθος εικονοστοιχείων, που είναι τοποθετημένα σε στήλες και σειρές, όπως είδαμε να γίνεται στο CCD. Για παράδειγμα, μια συνηθισμένη οθόνη υπολογιστή έχει 600 εικονοστοιχεία κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (όσα και οι ορατές γραμμές σάρωσης) και 800 κατά την οριζόντια, για να τηρείται ο λόγος των διαστάσεων των πλευρών 4/3. Αυτό μας δίνει 600 × 800 = 480.000 εικονοστοιχεία συνολικά.

Για καθένα από αυτά τα εικονοστοιχεία (pixels) υπάρχει μια θέση φυλαγμένη σε μια ειδική περιοχή της μνήμης του υπολογιστή, που ονομάζεται ***μνήμη εικόνας*** (screen buffer). Ένα ειδικό ψηφιακό κύκλωμα, που ονομάζεται ***ελεγκτής οθόνης***, λαμβάνει τα δεδομένα για τα σχήματα που πρόκειται να απεικονιστούν, τα μετατρέπει σε δυαδικά ψηφία 0 και 1 και τα τοποθετεί κατάλληλα στις διάφορες θέσεις της μνήμης εικόνας. Στη συνέχεια, κάποιο άλλο κύκλωμα σαρώνει όλες αυτές τις θέσεις, διαβάζει τα δυαδικά ψηφία και τα μετατρέπει σε κατάλληλες ηλεκτρικές τάσεις, που αποτελούν το σήμα εικόνας για την οθόνη. Το κύκλωμα αυτό

ονομάζεται ***μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό*** (digital to analog converter ή DAC). Τοίδιο κύκλωμα φροντίζει και για την παραγωγή των απαραίτητων παλμών αμαύρωσης και συγχρονισμού. Για καλύτερη κατανόηση των ανωτέρω, ας δούμε πώς σχηματίζονται στην οθόνη του υπολογιστή τα δύο πρώτα κεφαλαία γράμματα της αλφαβήτου με τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 2-32.



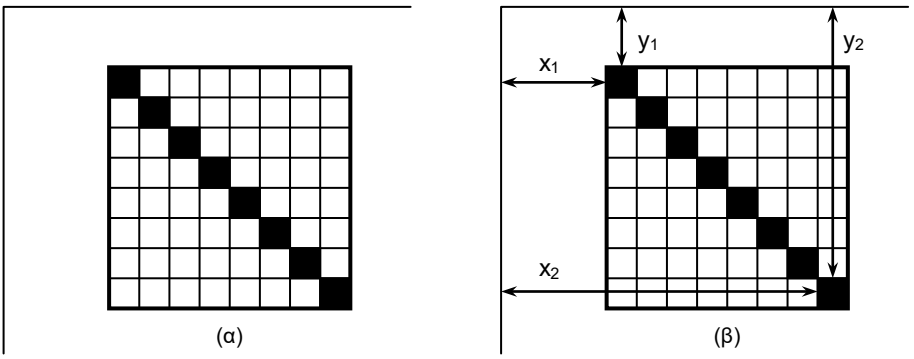
Σχήμα 2-32. *Αλφαβητικοί χαρακτήρες στην οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή*

Από την κεντρική μονάδα του υπολογιστή στέλνονται στον ελεγκτή εικόνας δύο κωδικοί αριθμοί που αντιστοιχούν σ' αυτά τα γράμματα. Αυτοί οι κωδικοί είναι ο αριθμός 65 για το Α και ο αριθμός 66 για το Β. Με τη βοήθεια ενός κυκλώματος, που ονομάζεται γεννήτρια χαρακτήρων, οι κωδικοί αυτοί μετατρέπονται σε ένα σύνολο 8 × 8 = 64 δυαδικών ψηφίων ο καθένας, τα οποία ο ελεγκτής τοποθετεί σε κατάλληλες θέσεις της μνήμης εικόνας. Όταν ο DAC σαρώσει αυτή τη μνήμη, όπου βρίσκει δυαδικό 1 ανάβει το αντίστοιχο εικονοστοιχείο στην οθόνη, ενώ όπου βρίσκει 0 το αφήνει σβηστό. Το αποτέλεσμα είναι να εμφανίζονται τα γράμματα Α, Β φωτεινά πάνω σε σκοτεινή οθόνη.

Όταν η εικόνα παράγεται σε ρυθμό γραφικών, η κεντρική μονάδα στέλνει έτοιμα τα δυαδικά ψηφία, που θα τοποθετηθούν στις διάφορες θέσεις της μνήμης εικόνας. Αυτά τα δυαδικά ψηφία είτε τα διαβάζει από κάποια μνήμη είτε τα δημιουργεί μόνη της με υπολογισμούς βάσει μαθηματικών τύπων. Για παράδειγμα, πριν σταλεί στον ελεγκτή εικόνας η γραμμή του σχήματος 2-37, πρέπει είτε να διαβαστούν τα 64 ψηφία που την αποτελούν είτε πρώτα να υπολογιστούν, με βάση τις αποστάσεις της αρχής (y_1-x_1) και του τέλους της (y_2-x_2) από την επάνω και την αριστερή πλευρά της οθόνης.

Στην πρώτη περίπτωση τα γραφικά ονομάζονται ψηφιογραφικά (σχήμα 2-33 α), ενώ στη δεύτερη περίπτωση ονομάζονται διανυσματικά (σχήμα 2-33 β). Τα διανυσματικά γραφικά είναι πολύ πιο ευέλικτα στο χειρισμό τους από τον υπολογιστή, γιατί μπορούμε να τα μεγαλώσουμε, να τα μικρύνουμε, να τα περιστρέψουμε κλπ., χωρίς να παραμορφώνεται το σχήμα τους. Βασικά αντικείμενα με τα οποία σχεδιάζουμε διανυσματικά γραφικά είναι η ευθεία και η καμπύλη γραμμή, ο κύκλος και η έλλειψη, το παραλληλόγραμμο και τα διάφορα πολύγωνα και ορισμένα άλλα. Όλων το σχήμα και η θέση εκφράζονται με τη βοήθεια μαθηματικών τύπων και όλα μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους για τη δημιουργία πιο περίπλοκων

σχημάτων. Τα διανυσματικά γραφικά αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία κινούμενων συνθετικών εικόνων. Όλα τα σχήματα σ' αυτό το κεφάλαιο είναι διανυσματικά γραφικά.



Σχήμα 2-33. *Ψηφιογραφικά (α) και διανυσματικά (β) γραφικά*

Αν επιθυμούμε τα γραφικά μας να είναι έγχρωμα, θα πρέπει να τοποθετήσουμε περισσότερα από ένα δυαδικά ψηφία σε κάθε θέση της μνήμης εικόνας. Αν, για παράδειγμα, έχουμε δύο τέτοια ψηφία σε κάθε θέση, οι δυνατοί συνδυασμοί τους είναι 2×2 = 4 (00, 01, 10, 11). Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να έχουμε εικόνες με τέσσερα χρώματα. Οι σημερινοί ελεγκτές οθόνης και οι μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό υποστηρίζουν πλέον όλοι μέχρι και 24 δυαδικά ψηφία (24 bit) σε κάθε θέση της μνήμης εικόνας. Αυτό δίνει 2^{24}= 16.772.216 διαφορετικά χρώματα, που είναι πολύ κοντά στο όριο του πλήθους των χρωμάτων που μπορεί να διακρίνει το ανθρώπινο μάτι.

Όπως είδαμε, πριν εμφανιστεί μια συνθετική εικόνα στην οθόνη, πρέπει να «σχεδιαστεί» από τον ελεγκτή στη μνήμη εικόνας, βάσει των στοιχείων που παρέχει η κεντρική μονάδα του υπολογιστή. Όταν το πλήθος των θέσεων και των ψηφίων σε κάθε θέση αυτής της μνήμης είναι μεγάλο, οι απαραίτητοι υπολογισμοί για το «σχεδιασμό» των διανυσματικών γραφικών είναι βαρύ έργο για την κεντρική μονάδα. Για το λόγο αυτό έχουν εμφανιστεί ειδικά κυκλώματα, που ονομάζονται ***επιταχυντές γραφικών***.Τα κυκλώματα αυτά αναλαμβάνουν τους υπολογισμούς των γραφικών από την κεντρική μονάδα, όποτε διαπιστώσουν ότι χρειάζεται κάτι τέτοιο, και την αφήνουν ελεύθερη να εκτελεί τις υπόλοιπες λειτουργίες της ανεπηρέαστη. Λόγω της ειδικής τους σχεδίασης, αυτοί οι επιταχυντές κάνουν πολύ γρήγορα τη δουλειά τους και γι' αυτό η ύπαρξή τους είναι βασική προϋπόθεση για την παραγωγή κινούμενης συνθετικής εικόνας.

Στην προσπάθεια να γίνει η συνθετική εικόνα όσο το δυνατό περισσότερο αληθοφανής, μεγάλο ρόλο παίζουν τα λεγόμενα ***τρισδιάστατα*** ή ***3D γραφικά*** (3 Dimension). Τα τρισδιάστατα γραφικά είναι μια προσπάθεια να παραχθεί πάνω στις δύο διαστάσεις της οθόνης η ψευδαίσθηση της τρίτης διάστασης ή του «βάθους»

των αντικειμένων. Για την παραγωγή των τρισδιάστατων γραφικών ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

● Τα αντικείμενα, όσο πολύπλοκα και αν είναι, αναλύονται σε ένα πλήθος απλών πολυγωνικών σχημάτων, συνήθως τριγώνων ή τετραπλεύρων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ***ψηφιδοποίηση***. Οι συντεταγμένες των κορυφών αυτών των πολυγώνων (δηλαδή, οι αποστάσεις τους από την πάνω και την αριστερή πλευρά της οθόνης) αποθηκεύονται σε ένα χώρο της μνήμης, που ονομάζεται ***βάση δεδομένων αντικειμένων***.

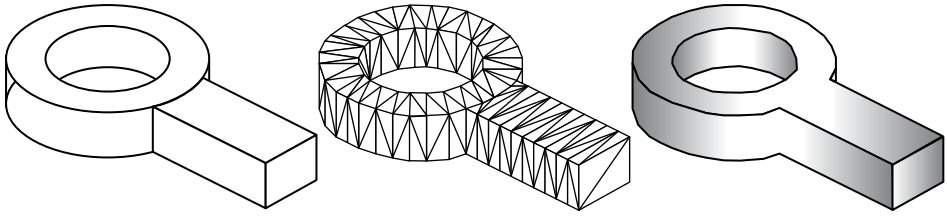
● Υπολογίζονται οι γραμμές των πολυγώνων που κρύβονται πίσω από άλλα πολύγωνα και αφαιρούνται από το σχήμα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ***αποθήκευση-Z*** (Z-buffering).

● Οι ορατές επιφάνειες του αντικειμένου καλύπτονται με ψηφιογραφικό γέμισμα, για να φαίνεται συμπαγές το αντικείμενο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ***χαρτογράφηση υφής*** (texture mapping).

● Υπολογίζεται η επίδραση των φωτεινών πηγών, των σκιάσεων και των αντανακλάσεων στο συγκεκριμένο, αλλά και στα γειτονικά αντικείμενα και προσαρμόζεται ανάλογα το γέμισμα των πολυγώνων.

● Τέλος εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές εξομάλυνσης για τη βελτίωση της όψης του αντικειμένου.

Στο σήμα 2-34 απεικονίζονται ορισμένα από τα παραπάνω στάδια για τη σχεδίαση ενός υποθετικού μηχανολογικού εξαρτήματος.



(α) Προσχέδιο

(β) Ψηφιδοποίηση – αποθήκευση-Z

(γ) Χαρτογράφηση υφής

Σχήμα 2-34. *Στάδια τρισδιάστατης επεξεργασίας αντικειμένου*

Παρατηρήστε ότι για τη σχεδίαση αυτού του μάλλον απλού σχήματος απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός τριγώνων, πράγμα που σημαίνει μεγάλο πλήθος στοιχείων στη βάση δεδομένων του αντικειμένου. Αν θελήσουμε να μετακινήσουμε το αντικείμενο, θα πρέπει πρώτα να γίνουν υπολογισμοί, που περιλαμβάνουν τριγωνομετρικούς μετασχηματισμούς για καθένα από αυτά τα σημεία, και κατόπιν να ολοκληρωθούν όλα τα υπόλοιπα στάδια της σχεδίασης. Για να είναι αληθοφανής η κίνηση του αντικειμένου, όλα αυτά πρέπει να επαναλαμβάνονται τουλάχιστον είκοσι και κατά προτίμηση τριάντα φορές το δευτερόλεπτο, δηλαδή να έχουμε 30 πλαίσια το δευτερόλεπτο (FPS–fields per second).

Η απαιτούμενη υπολογιστική εργασία είναι πολύ μεγάλη. Γι' αυτό τα τρισδιάστατα γραφικά έγιναν προσιτά στο ευρύ κοινό μονάχα πρόσφατα με την ανάπτυξη φτηνών και πολύ ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων. Ακόμη και έτσι όμως, η ύπαρξη ενός ειδικού επιταχυντή τρισδιάστατων γραφικών είναι απαραίτητη στο υπολογιστικό σύστημα. Ο επιταχυντής αυτός περιέχει κυκλώματα ειδικά σχεδιασμένα για την ταχύτατη διεκπεραίωση των υπολογισμών που απαιτούνται στα στάδια της τρισδιάστατης σχεδίασης και είναι ο μόνος που μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητική ποιότητα κίνησης στην εικόνα.

Η συνθετική εικόνα με ή χωρίς τρισδιάστατα γραφικά έχει ευρύτατο πεδίο εφαρμογών. Στις απλούστερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται για σχεδιασμό αντικειμένων στη βιομηχανική έρευνα και παραγωγή. Σε ένα ανώτερο επίπεδο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της λειτουργίας μηχανών, εγκαταστάσεων ή άλλων γενικότερων συστημάτων, μέσω μιας διεργασίας που ονομάζεται ***εικονική πραγματικότητα***. Περισσότερο διαδεδομένη όμως εφαρμογή σήμερα αποτελούν τα κάθε λογής παιχνίδια υπολογιστών και οι εξομοιωτές για ψυχαγωγική χρήση. Οι εφαρμογές μάλιστα αυτές είναι οι πιο απαιτητικές και οι ταχύτερα εξελισσόμενες στο χώρο της συνθετικής εικόνας.

2.5 Δομή του σύνθετου τηλεοπτικού σήματος

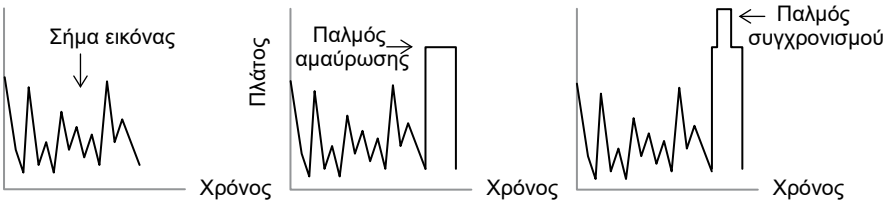
Η λέξη σύνθετο στον παραπάνω τίτλο σημαίνει ότι το τηλεοπτικό σήμα αποτελείται από συνδυασμό διάφορων ξεχωριστών σημάτων. Αυτά τα σήματα τα συναντήσαμε σε προηγούμενες παραγράφους και είναι τα εξής (σχήμα 2-39):

(α) ***Το σήμα του εικονολήπτη*** με τις πληροφορίες φωτεινότητας και χρωμικότητας των διάφορων σημείων της εικόνας. Η μορφή αυτού του σήματος σε μια μεταβαλλόμενη εικόνα είναι περίπου τυχαία, αλλά το πλάτος του κυμαίνεται πάντοτε μεταξύ του 10% και του 75% του τελικού πλάτους του σύνθετου τηλεοπτικού σήματος. Το 10% αντιστοιχεί στα απολύτως λευκά και το 75% στα εντελώς μαύρα σημεία της εικόνας.

(β) ***Οι παλμοί αμαύρωσης***, που κάνουν αόρατες τις γραμμές επιστροφής των σαρώσεων. Οι παλμοί αυτοί έχουν καθορισμένη μορφή και θέση μέσα στο σύνθετο τηλεοπτικό σήμα. Οι παλμοί αμαύρωσης ξεκινούν λίγο πριν την έναρξη κάθε επιστροφής της δέσμης σάρωσης και διαρκούν έως λίγο μετά την αρχή της επόμενης σάρωσης. Υπάρχουν παλμοί αμαύρωσης γραμμών που καλύπτουν τις οριζόντιες επιστροφές της δέσμης και παλμοί αμαύρωσης πεδίων που καλύπτουν τις κατακόρυφες επιστροφές. Το πλάτος των παλμών αμαύρωσης είναι πάντοτε το ίδιο, ίσο με το 75% του τελικού πλάτους του σύνθετου τηλεοπτικού σήματος, δηλαδή ίσο με το σήμα μιας εντελώς μαύρης εικόνας.

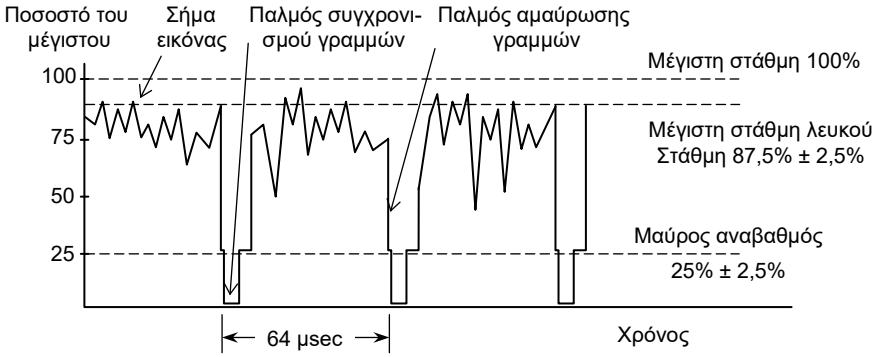
(γ) ***Οι παλμοί συγχρονισμού***, που συγχρονίζουν τη σάρωση στην κάμερα και στο δέκτη. Οι παλμοί αυτοί έχουν ειδική θέση μέσα στο τηλεοπτικό σήμα, γιατί τοποθετούνται πάντοτε στην οροφή των παλμών αμαύρωσης. Υψώνονται μέχρι

το 100% του πλάτους του τελικού σήματος και γι' αυτό αντιπροσωπεύουν σήμα «πιο μαύρο από το μαύρο». Το γεγονός αυτό βοηθάει τα κυκλώματα του δέκτη να τους ξεχωρίζουν εύκολα από το υπόλοιπο τηλεοπτικό σήμα.



Σχήμα 2-35. *Τα τρία συστατικά του σύνθετου τηλεοπτικού σήματος*

Στο σχήμα 2-35 φαίνονται τα συστατικά του σύνθετου τηλεοπτικού σήματος. Το σήμα αυτό είναι σχεδιασμένο με θετική πολικότητα, γιατί έτσι γίνεται ευκολότερα κατανοητή η δομή του. Στην τηλεοπτική τεχνική όμως χρησιμοποιείται η αρνητική πολικότητα. Βάσει αυτής οι συγχρονιστικοί παλμοί έχουν πλάτος κάτω του 25% του σύνθετου τηλεοπτικού σήματος, ενώ το σήμα εικόνας κυμαίνεται μεταξύ του 25% και του 90% περίπου. Στο σχήμα 2-36 φαίνεται το σύνθετο σήμα τριών διαδοχικών γραμμών σάρωσης με αρνητική πολικότητα και σημειώνονται τα χαρακτηριστικά του.

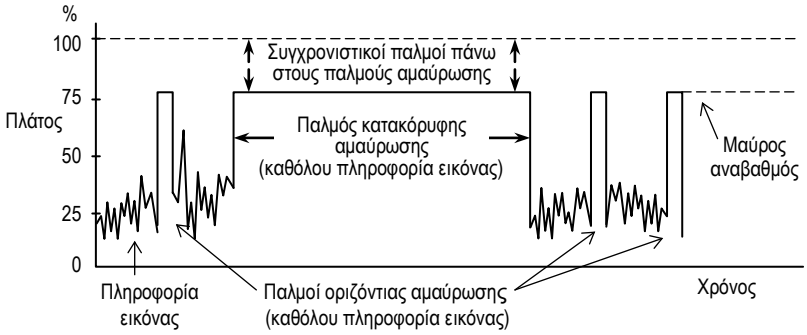


Σχήμα 2-36. *Σύνθετο τηλεοπτικό σήμα με αρνητική πολικότητα*

Το σήμα εικόνας στο αριστερό άκρο του σχήματος αντιστοιχεί στη σάρωση μιας περίπου λευκής έως αχνής γκρίζας γραμμής της εικόνας. Η σάρωση καταλήγει στον πρώτο παλμό αμαύρωσης, που αποκόπτει τη δέσμη σάρωσης και οδηγεί το σήμα εικόνας στο μαύρο. Κατά τη διάρκεια του παλμού αμαύρωσης δεν εκπέ-

μπονται πληροφορίες εικόνας. Ο παλμός αμαύρωσης προετοιμάζει την επιστροφή της δέσμης, η οποία αρχίζει ταυτόχρονα με την εμφάνιση της αριστερής ακμής του παλμού συγχρονισμού. Η αμαύρωση εξακολουθεί και μετά το τέλος του παλμού συγχρονισμού, έτσι ώστε να καλύπτεται ένα μικρό κομμάτι από την αρχή της σάρωσης της επόμενης γραμμής. Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών αμαύρωσης γραμμών ή δύο διαδοχικών παλμών συγχρονισμού γραμμών είναι 64 μsec. Αυτό, όπως είδαμε και αλλού, σημαίνει ότι η συχνότητα των παραπάνω παλμών είναι 15.625 Hz. Η διάρκεια των παλμών αμαύρωσης γραμμών είναι ίση με το 16% ως 18% της διάρκειας της οριζόντιας σάρωσης.

Μετά τη σάρωση όλων των γραμμών ενός πεδίου, ακολουθεί ένας παλμός αμαύρωσης πεδίων, που απεικονίζεται με θετική πολικότητα στο σχήμα 2-37.

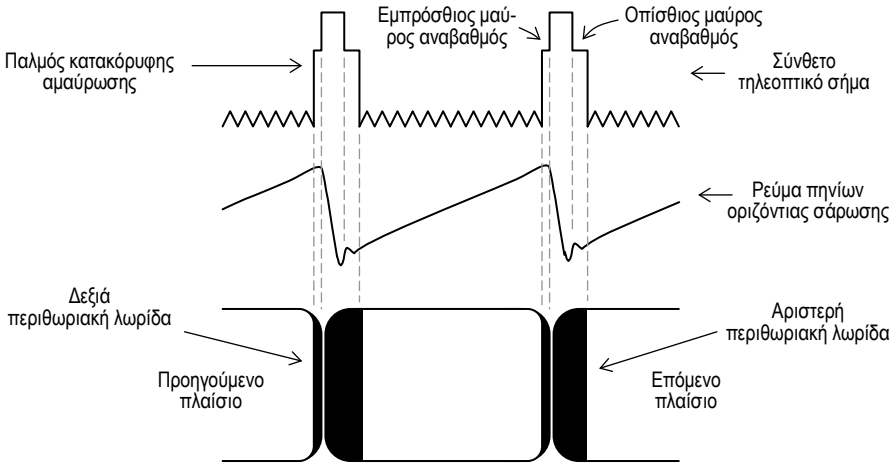


Σχήμα 2-37. *Παλμοί οριζόντιας και κατακόρυφης αμαύρωσης*

Κάθε παλμός αμαύρωσης πεδίων αποκόπτει τη δέσμη σάρωσης κατά την κατακόρυφη επιστροφή της. Οι παλμοί αμαύρωσης πεδίων έχουν μεγάλη διάρκεια και καλύπτουν περίπου 20 γραμμές οριζόντιας σάρωσης ο καθένας. Στην οροφή τους τοποθετούνται οι παλμοί συγχρονισμού πεδίων. Όπως και στους παλμούς αμαύρωσης γραμμών, έτσι και εδώ η αμαύρωση αρχίζει πριν από την έναρξη της επιστροφής της δέσμης, που συμπίπτει με την έναρξη του παλμού κατακόρυφου συγχρονισμού και τελειώνει πολύ μετά, έτσι ώστε να καλύπτονται πολλές από τις πρώτες και λίγες από τις τελευταίες οριζόντιες γραμμές κάθε πεδίου.

Ο λόγος που οι παλμοί αμαύρωσης διαρκούν περισσότερο από τους παλμούς συγχρονισμού, έχει σχέση με τη μορφή των ρευμάτων σάρωσης που διοχετεύονται στα πηνία απόκλισης των ηλεκτρονικών πυροβόλων (σχήμα 2-38).

Τα πηνία είναι εξαρτήματα που δεν επιτρέπουν απότομες μεταβολές στο ρεύμα που τα διαρρέει. Τέτοιες μεταβολές συμβαίνουν στις κορυφές του πριονωτού ρεύματος σάρωσης και σ' αυτά τα σημεία τα πηνία αντιδρούν παράγοντας ταλαντώσεις. Αυτές οι ταλαντώσεις καταστρέφουν την ομαλή σάρωση και προκαλούν παραμορφώσεις στα άκρα της εικόνας. Επεκτείνοντας τους παλμούς αμαύρωσης πριν και μετά τους παλμούς συγχρονισμού, καλύπτουμε τις παραμορφώσεις με μαύρες



Σχήμα 2-38. *Συσχέτιση παλμών αμαύρωσης και ρεύματος οριζόντιας σάρωσης*

λωρίδες. Οι μαύρες λωρίδες δεν φαίνονται στον τηλεοπτικό δέκτη, γιατί ρυθμίζοντας τις διαστάσεις της εικόνας, τις σπρώχνουμε έξω από τα όρια της οθόνης.

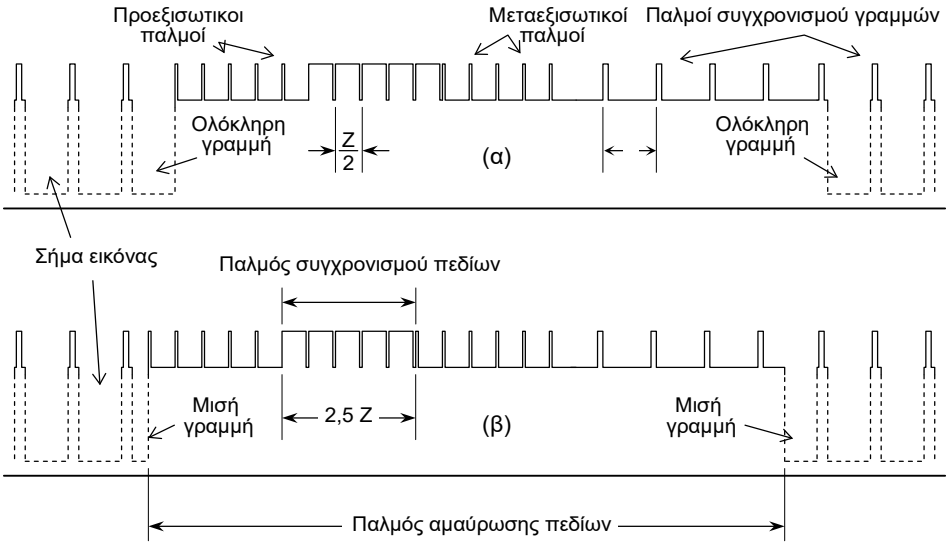
Οι ταλαντώσεις είναι πιο έντονες στο κάτω μέρος της πριονωτής κυματομορφής. Για το λόγο αυτό ο παλμός συγχρονισμού δεν είναι τοποθετημένος στο μέσο του παλμού αμαύρωσης, αλλά βρίσκεται πιο κοντά προς την αρχή του. Έτσι η δεξιά περιθωριακή λωρίδα που προκαλείται λίγο πριν την έναρξη των οριζόντιων επιστροφών της δέσμης είναι πιο στενή από την αριστερή. Η διάρκεια του παλμού συγχρονισμού γραμμών λαμβάνεται περίπου ίση με το μισό της διάρκειας του παλμού αμαύρωσης, αλλά αυτό δεν αποτελεί αυστηρή προδιαγραφή. Η έκκεντρη τοποθέτηση του παλμού συγχρονισμού γραμμών σε σχέση με τον παλμό αμαύρωσης δημιουργεί δύο άνισα «πλατώματα» δεξιά και αριστερά του παλμού συγχρονισμού, που ονομάζονται ***οπίσθιος μαύρος αναβαθμός*** και ***εμπρόσθιος μαύρος αναβαθμός***, αντιστοίχως.

Ανάλογη πρόβλεψη υπάρχει και για τους παλμούς αμαύρωσης και συγχρονισμού πεδίων. Και εδώ οι παλμοί συγχρονισμού τοποθετούνται πάνω στους παλμούς αμαύρωσης. Η θέση των παλμών συγχρονισμού πρέπει να είναι τέτοια, ώστε στο τέλος του περιττού πεδίου η σάρωση να διακόπτεται στο μέσο της τελευταίας γραμμής, ενώ στο τέλος του άρτιου πεδίου στο τέρμα της τελευταίας γραμμής. Οι παλμοί συγχρονισμού πεδίων τοποθετούνται 2,5 οριζόντιες γραμμές μετά την έναρξη του παλμού αμαύρωσης πεδίων. Η διάρκειά τους είναι επίσης 2,5 γραμμές. Καθ' όλη τη διάρκεια του παλμού οριζόντιας αμαύρωσης, αλλά και κατά τη διάρκεια του παλμού συγχρονισμού πεδίων, πρέπει να εμφανίζονται και οι παλμοί συγχρονισμού γραμμών. Αυτό είναι απαραίτητο, γιατί δεν πρέπει να χάνεται ο οριζόντιος συγχρονισμός, όσο η δέσμη επιστρέφει κατακόρυφα. Γι' αυτό πάνω στους παλμούς αμαύρωσης πεδίων τοποθετούνται, εκτός από τους παλμούς συγχρονισμού πεδίων, και παλμοί συγχρονισμού γραμμών. Οι τελευταίοι μάλιστα εμφανίζονται,

όπως είδαμε στην παράγραφο 2.4.5, σαν εσοχές κατά τη διάρκεια των παλμών συγχρονισμού πεδίων.

Αφού με όλα τα παραπάνω έχουμε γνωρίσει τα χαρακτηριστικά των επιμέρους σημάτων του σύνθετου τηλεοπτικού σήματος, μπορούμε πλέον να αναπαραστήσουμε τη μορφή του. Αυτή φαίνεται στο σχήμα 2-39 όπου απεικονίζονται με θετική πολικότητα τα σήματα γύρω από τις χρονικές στιγμές κατακόρυφης επιστροφής, μετά από άρτιο και περιττό πεδίο. Τα σημεία αυτά είναι τα πιο χαρακτηριστικά στο σύνθετο τηλεοπτικό σήμα.

Παρατηρήστε πώς οι παλμοί συγχρονισμού πεδίων και γραμμών συνυπάρχουν πάνω στους παλμούς αμαύρωσης πεδίων. Το σήμα εικόνας απεικονίζεται με γκρίζα σκίαση μεταξύ των παλμών συγχρονισμού γραμμών. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για ευκολία, οι παλμοί αμαύρωσης πεδίων δεν απεικονίζονται με τη σωστή τους διάρκεια. Μια προσεκτική παρατήρηση δείχνει ότι οι παλμοί αμαύρωσης φαίνεται να έχουν διάρκεια δώδεκα οριζόντιων γραμμών, ενώ, όπως είπαμε, στην πραγματικότητα διαρκούν περίπου είκοσι γραμμές.



Σχήμα 2-39. *Το σύνθετο τηλεοπτικό σήμα (α) για άρτια πεδία, (β) για περιττά πεδία*

Σήματα, σαν κι' αυτά του σχήματος 2-39, παράγει οποιαδήποτε τηλεοπτική κάμερα. Το πλάτος τους είναι τυποποιημένο και ίσο με 1 Volt από κορυφή σε κορυφή. Αν τα σήματα αυτά εφαρμοστούν στα κατάλληλα σημεία των κυκλωμάτων ενός τηλεοπτικού δέκτη, θα εμφανιστεί στην οθόνη η εικόνα που καταγράφει η κάμερα που τα παρήγαγε. Προκειμένου όμως αυτά τα σήματα να αποσταλούν με ασύρματη εκπομπή σε απομακρυσμένους δέκτες, θα πρέπει να ενισχυθούν και να περάσουν από τη διαδικασία της διαμόρφωσης μέσα από ένα πομπό τηλεόρασης. Το πώς γίνεται αυτό θα το γνωρίσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

• Το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως τα ραδιοκύματα, αλλά με πολύ υψηλότερη συχνότητα. Η συχνότητα των κυμάνσεων καθορίζει το χρώμα του φωτός.

• Το λευκό φως είναι ένα μείγμα άπειρων χρωμάτων. Πολύ χονδρικά το διακρίνουμε σε επτά διαφορετικά χρώματα. Αυτά ονομάζονται χρώματα του φάσματος.

• Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν το φως είναι η φωτεινή ροή, η ένταση, η φωτεινότητα, η λαμπρότητα και η αντίθεση.

• Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα χρώμα είναι η φωτεινότητα, η απόχρωση και ο κορεσμός.

• Το μάτι μας είναι πιο ευαίσθητο στην αντίληψη της φωτεινότητας, παρά στην αντίληψη του χρώματος. Αντιλαμβανόμαστε τρία βασικά χρώματα, το κόκκινο, το πράσινο και το γαλανό. Η ευαισθησία του ματιού στο πράσινο είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στα υπόλοιπα χρώματα.

• Μπορούμε να παράγουμε οποιοδήποτε χρώμα αναμιγνύοντας τρία βασικά χρώματα. Αν τα χρώματα προέρχονται από αυτόνομες φωτεινές πηγές, αναμιγνύουμε κόκκινο, πράσινο και μπλε (προσθετική μίξη). Αν τα χρώματα προέρχονται από αντανάκλαση του λευκού φωτός, αναμιγνύουμε κυανό, ματζέντα και κίτρινο (αφαιρετική μίξη).

• Τους νόμους μίξης των χρωμάτων τους μελετά η χρωματομετρία. Ο βασικός νόμος της χρωματομετρίας ορίζει ότι αναμιγνύοντας κατάλληλα τα τρία βασικά χρώματα παίρνουμε κάθε άλλο χρώμα, ακόμη και το λευκό.

• Η χρωμικότητα ενός χρώματος είναι το άθροισμα της απόχρωσης και του κορεσμού του. Στην έγχρωμη τηλεόραση εκπέμπουμε σήματα για τις χρωμικότητες των χρωμάτων, που μαζί με το σήμα της φωτεινότητας σχηματίζουν τα χρώματα στην οθόνη.

• Το φως μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα με τη βοήθεια διατάξεων, όπως είναι τα φωτοκύτταρα, οι φωτοαντιστάσεις, οι φωτοδίοδοι και τα φωτοτρανζίστορ. Τα φωτοκύτταρα είναι ηλεκτρονικές λυχνίες κενού. Τα υπόλοιπα είναι ημιαγωγοί. Οι παλιές κάμερες τύπου λυχνίας στηρίζονται στις ιδιότητες των φωτοκυττάρων, ενώ οι νεότερες στηρίζονται στις ιδιότητες των φωτοαντιστάσεων και των φωτοδιόδων.

• Για την ηλεκτρική μεταφορά μιας εικόνας χρησιμοποιούνται οι αρχές της σάρωσης και του συγχρονισμού. Για το σχηματισμό της εικόνας εκμεταλλευόμαστε την αδράνεια του ανθρώπινου ματιού και με ένα γρήγορα κινούμενο φωτεινό σημείο δημιουργούμε την εντύπωση μιας πλήρους εικόνας.

• Η συσκευή που μετατρέπει μια εικόνα σε ηλεκτρικό σήμα ονομάζεται τηλεοπτική κάμερα. Στην κάμερα παράγονται, αλλά και χρησιμοποιούνται τα σήματα σάρωσης και συγχρονισμού.

• Η σάρωση γίνεται κυρίως με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού πυροβόλου. Αυτό παράγει μια δέσμη ηλεκτρονίων, που μπορεί να κινηθεί με τη βοήθεια συστημάτων απόκλισης. Οι κινήσεις της δέσμης δημιουργούν τη σάρωση.

• Η σάρωση διακρίνεται σε οριζόντια και κατακόρυφη. Προκαλείται από την εφαρμογή πριονωτών σημάτων στα συστήματα απόκλισης. Η σάρωση παράγει ένα σύνολο παράλληλων γραμμών στην οθόνη, που ονομάζεται ράστερ. Στην τηλεόραση εφαρμόζεται για τεχνικούς λόγους μια μορφή σάρωσης που ονομάζεται ενδιάμεση σάρωση. Σαρώνονται πρώτα οι μονές γραμμές του ράστερ και κατόπιν οι ζυγές.

• Ο συγχρονισμός κατά τη σάρωση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια παλμών συγχρονισμού, που στέλνονται μαζί με το σήμα εικόνας. Υπάρχουν παλμοί για τον οριζόντιο και παλμοί για τον κατακόρυφο συγχρονισμό. Αυτοί διαφέρουν μεταξύ τους στη διάρκεια και ξεχωρίζουν εύκολα από το υπόλοιπο τηλεοπτικό σήμα.

• Για να παράγει το σήμα εικόνας, η κάμερα διαθέτει διάταξη εικονοληψίας. Παλιότερη διάταξη εικονοληψίας είναι το εικονοσκόπιο και νεότερη το CCD.

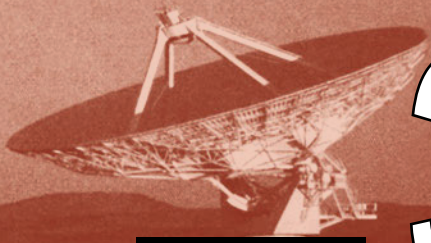
• Στην έγχρωμη κάμερα υπάρχει εικονολήπτης για τα τρία βασικά χρώματα. Αυτός είναι είτε τριπλός (ένας εικονολήπτης για κάθε χρώμα) είτε μονός, που λειτουργεί με την προσθήκη κατάλληλων φίλτρων και διατάξεων.

• Εκτός από τη φυσική εικόνα που παράγουν οι κάμερες, υπάρχει και η συνθετική εικόνα, που παράγεται από υπολογιστές. Βάση της συνθετικής εικόνας αποτελούν τα διανυσματικά γραφικά. Αυτά αποτελούνται από απλά γεωμετρικά σχήματα, που σχεδιάζονται αυτόματα στην οθόνη βάσει των μαθηματικών τύπων ορισμού τους. Χρειάζονται ισχυρά υπολογιστικά συστήματα για τη δημιουργία τέτοιων κινούμενων εικόνων.

• Το σήμα που ευθύνεται για την αναπαραγωγή της εικόνας σε μια τηλεοπτική οθόνη ονομάζεται σύνθετο τηλεοπτικό σήμα. Αυτό αποτελείται από το σήμα εικόνας, τους παλμούς αμαύρωσης και τους παλμούς συγχρονισμού. Οι παλμοί συγχρονισμού βρίσκονται πάνω στους παλμούς αμαύρωσης. Χάρη στην κατάλληλη μορφή και θέση αυτών των σημάτων, είναι εύκολος ο διαχωρισμός μεταξύ τους.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Γιατί το ανθρώπινο μάτι είναι λιγότερο ευαίσθητο στο χρώμα και περισσότερο ευαίσθητο στη φωτεινότητα των αντικειμένων;
2. Ποια είναι τα τρία χαρακτηριστικά ενός χρώματος;
3. Πότε χρησιμοποιούμε το προσθετικό και πότε το αφαιρετικό σύστημα παραγωγής χρωμάτων;
4. Ποια είναι τα βασικά χρώματα που χρησιμοποιούνται στο προσθετικό και στο αφαιρετικό σύστημα παραγωγής χρωμάτων;
5. Γιατί στην έγχρωμη τηλεόραση εκπέμπουμε τα σήματα χρωμικότητας των χρωμάτων και όχι τα ίδια τα σήματα των χρωμάτων;
6. Γιατί στην έγχρωμη τηλεόραση εκπέμπουμε τα σήματα χρωμικότητας μόνο του κόκκινου και του μπλε και δεν εκπέμπουμε και το σήμα χρωμικότητας του πράσινου;
7. Τι ονομάζεται μεταίσθημα στην όραση;
8. Ποια στοιχεία περιλαμβάνει μια τηλεοπτική κάμερα;
9. Πώς λειτουργεί ένα ηλεκτρονικό πυροβόλο;
10. Γιατί χρειάζεται πριονωτή κυματομορφή κατά τη σάρωση με ηλεκτρονικό πυροβόλο;
11. Γιατί χρειάζεται να γίνεται κατακόρυφη σάρωση ταυτόχρονα με την οριζόντια σάρωση των γραμμών;
12. Περιγράψτε τη διαδικασία της ενδιάμεσης σάρωσης. Πώς εξαλείφεται το τρεμοσβήσιμο της εικόνας με τη μέθοδο αυτή;
13. Γιατί οι γραμμές που σαρώνονται κατά τη διάρκεια της κατακόρυφης σάρωσης της εικόνας είναι πολύ πιο πυκνές από τις «νεκρές» γραμμές που σαρώνονται κατά τη διάρκεια της κατακόρυφης επιστροφής της δέσμης;
14. Τι ονομάζεται συγχρονισμός στην τηλεόραση και πώς εξασφαλίζεται;
15. Ποιες διαφορές έχει η εικονοληπτική διάταξη CCD από τις υπόλοιπες εικονοληπτικές διατάξεις τύπου λυχνίας;
16. Σε τι πλεονεκτεί μια έγχρωμη κάμερα με τρία CCD σε σχέση με μια έγχρωμη κάμερα με ένα CCD;
17. Σε τι διαφέρουν τα ψηφιογραφικά από τα διανυσματικά γραφικά;
18. Ποια είναι τα μέρη που απαρτίζουν το σύνθετο τηλεοπτικό σήμα;
19. Ποιο σκοπό εξυπηρετούν οι παλμοί αμαύρωσης και γιατί έχουν μεγαλύτερη διάρκεια από τους παλμούς συγχρονισμού;



Στο κεφάλαιο αυτό θα γνωρίσουμε τα ηλεκτρομαγνητικά ή ραδιοηλεκτρικά κύματα και τις ιδιότητές τους. Θα δούμε πώς με τη διαμόρφωση αυτών των κυμάτων μεταφέρουμε πληροφορίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΥΜΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες

Ο όρος τηλεπικοινωνίες αναφέρεται στο σύνολο των μέσων και των απαραίτητων τεχνικών, για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ δύο ή περισσότερων ανταποκριτών σε οποιαδήποτε απόσταση με υψηλή πιστότητα και αξιοπιστία.

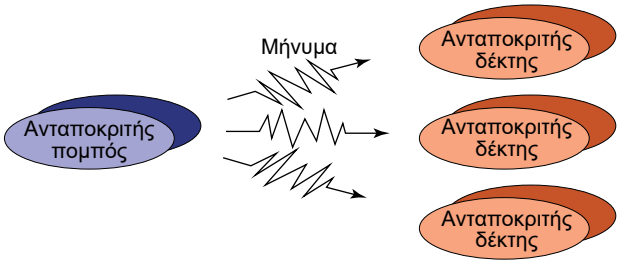
Με άλλα λόγια οι τηλεπικοινωνίες είναι το εργαλείο ή τα εργαλεία, που ικανοποιούν τη ζωτική ανάγκη του ανθρώπου για επικοινωνία. Αυτή η ανάγκη είναι τόσο παλιά όσο και ο άνθρωπος.

Παλιότερα περιοριζόταν σε ανταλλαγή φωνητικών μηνυμάτων. Σήμερα συνεχώς διευρύνεται και οι προς ανταλλαγή πληροφορίες ποικίλουν στη φύση και το χαρακτήρα τους. Περιοριζόμενοι στις βασικότερες πρέπει να αναφέρουμε:

- Τις ακουστικές πληροφορίες, τα φωνητικά ή γενικότερα τα ηχητικά μηνύματα.
- Τις οπτικές εικόνες ή γενικότερα τα οπτικά (Video) μηνύματα.
- Τα σήματα δεδομένων μεταξύ υπολογιστών ή μεταξύ αυτόματων μηχανών κ.α.

Ο τρόπος που εκδηλώνεται η ανάγκη για επικοινωνία επίσης ποικίλλει.

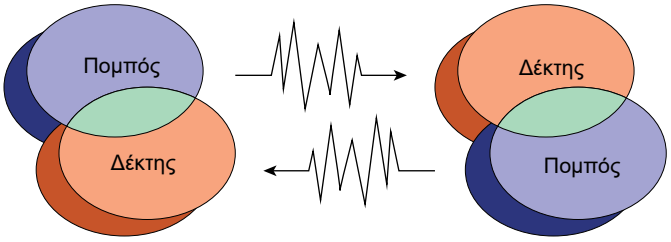
Για να κατανοήσουμε καλύτερα τα πράγματα, ας αναφερθούμε στο σχήμα 3.1.1. Αυτόν που στέλνει ένα μήνυμα, μιά πληροφορία, τον αποκαλούμε «πομπό». Αυτόν που λαμβάνει το μήνυμα, τον αποδέκτη, δηλαδή, τον αποκαλούμε απλά «δέκτη». Στο σχήμα αυτό οι όροι πομπός και δέκτης αναφέρονται στους ανταποκριτές χρήστες, οι οποίοι διαθέτουν κάποιο ηλεκτρονικό σύστημα, για να μπορούν να στείλουν ή να πάρουν ένα μήνυμα.



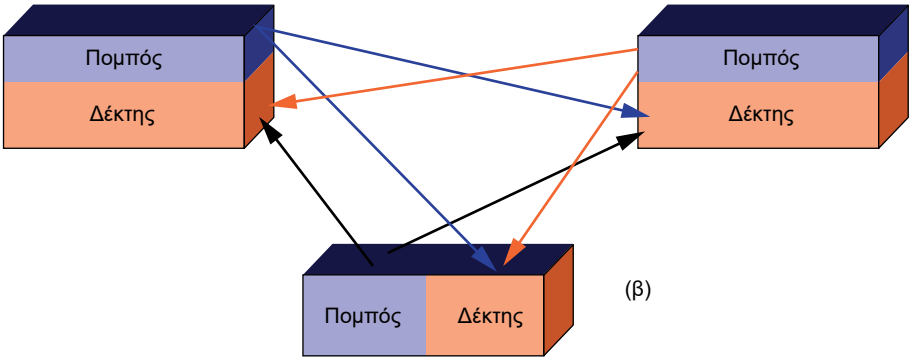
Σχήμα 3.1.1: *Σ' ένα σύστημα επικοινωνίας υπάρχει πομπός και δέκτης*

Σε ένα απλό ή σύνθετο σύστημα επικοινωνίας, σαν αυτό του σχήματος, ο ανταποκριτής πομπός είναι πάντοτε προσδιορισμένος, αντίθετα ο ανταποκριτής δέκτης μπορεί να είναι προσδιορισμένος, όπως στην τηλεφωνία, ή αόριστος, όπως στη ραδιοφωνία ή την τηλεόραση.

Στο σχήμα 3.1.1 απεικονίζεται ένα μονόδρομο σύστημα επικοινωνίας. Δηλαδή, κάποιος αποστέλλει μηνύματα και κάποιος ή κάποιοι απλώς λαμβάνουν τα μηνύματα αυτά. Παραδείγματα τέτοιου συστήματος αποτελούν η ραδιοφωνία, η τηλεόραση κ.λ.π. Υπάρχουν τηλεπικοινωνιακά συστήματα που επιτρέπουν αμφίδρομη (και προς τις δύο κατευθύνσεις) επικοινωνία μεταξύ των χρηστών. Καθένας είναι συγχρόνως και πομπός και δέκτης, όπως στην κλασική ενσύρματη τηλεφωνία, τη ραδιοτηλεφωνία ή την κινητή τηλεφωνία. Ένα τέτοιο σύστημα με δύο ανταποκριτές απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.2α. Γενικεύοντας έχουμε αμφίδρομα συστήματα επικοινωνιών για περισσότερους χρήστες. Σε αυτήν την περίπτωση μιλάμε για δίκτυο επικοινωνιών. Στο σχήμα 3.1.2.β απεικονίζεται ένα τέτοιο απλό δίκτυο με τρεις ανταποκριτές.



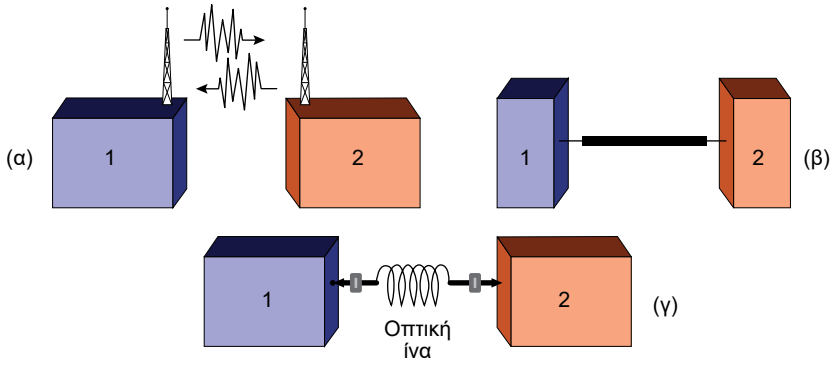
(α)



Σχήμα 3.1.2: *(α) Αμφίδρομο σύστημα επικοινωνίας (β) Απλό δίκτυο επικοινωνίας*

Σημειώσαμε νωρίτερα ότι οι πληροφορίες που θέλουμε να στείλουμε μακριά με ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα ποικίλλουν. Μπορεί να είναι ακουστικά μηνύματα όπως ομιλία, μουσική. Μπορεί να είναι μια φωτογραφία, μια εικόνα, ένα κείμενο κ.λ.π. Μπορεί να είναι σήματα απλών εντολών, όπως η εντολή για την αυτόματη εκκίνηση μιας μηχανής, ενός κινητήρα, το άνοιγμα ή το κλείσιμο ενός ρελαί κ.α.

Το μέσον που χρησιμοποιούμε για να στείλουμε αυτές τις πληροφορίες επίσης ποικίλλει και μπορούμε να διαλέξουμε πολλούς τρόπους. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε **ενσύρματη μετάδοση**, δηλαδή καλώδιο. Ως παράδειγμα αναφέρουμε την απλή τηλεφωνία που γνωρίζουμε όλοι μας όπου το ηχητικό σήμα μετατρέπεται σε ρεύμα και διατρέχει το καλώδιο. Μπορούμε να επιλέξουμε **ασύρματη μετάδοση**, δηλαδή να χρησιμοποιήσουμε, όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο, ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Πάλι ως παράδειγμα αναφέρουμε τη ραδιοφωνία, την τηλεόραση, το ραντάρ (radar), που είναι μάλιστα μονόδρομα συστήματα. Αμφίδρομο σύστημα ασύρματης επικοινωνίας είναι η κινητή τηλεφωνία, η οποία στις μέρες μας έχει τεράστια ανάπτυξη. Σήμερα προσφέρονται επίσης οι **οπτικές επικοινωνίες**, όπου τα μηνύματα που θέλουμε να στείλουμε μετατρέπονται σε φως, που στη συνέχεια παγιδεύεται και μεταδίδεται σε ειδικό γυάλινο καλώδιο, το οποίο ονομάζεται οπτική ίνα (σχήμα 3.1.3γ).



Σχήμα 3.1.3 *: Διάφορα συστήματα μετάδοσης (α) Ασύρματη μετάδοση (β) Ενσύρματη μετάδοση (γ) Μετάδοση με οπτική ίνα*

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς των διάφορων χωρών, για συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων, ενώ σιγά σιγά η χρήση τους επεκτείνεται και σε εφαρμογές τοπικών δικτύων.

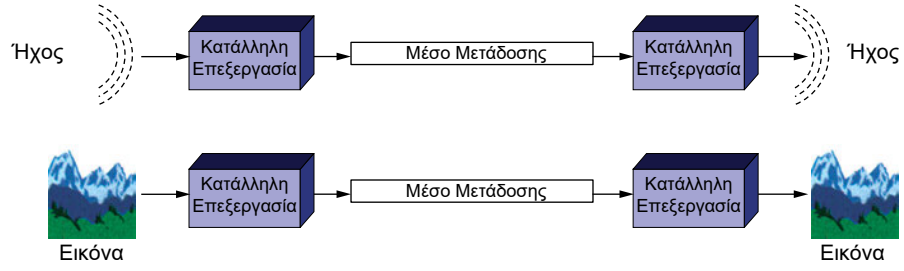
Πρέπει τέλος να σημειώσουμε ότι υπάρχουν μεγάλα δίκτυα επικοινωνιών, που αποτελούν συνδυασμό όλων των παραπάνω τρόπων μετάδοσης.

Συμπερασματικά πρέπει να πούμε ότι, με βάση τις ανάγκες επικοινωνίας και ψυχαγωγίας του σύγχρονου ανθρώπου και του τρόπου αξιοποίησης των μέσων και μεθόδων που διατίθενται, υπάρχει μεγάλη ποικιλία συστημάτων επικοινωνίας που εξυπηρετούν διαφορετικές εφαρμογές. Αναφέρουμε συνοπτικά τα εξής:

Ραδιοφωνία, Τηλεόραση, Τηλεφωνία, Τηλεγραφία (για την αποστολή κειμένων), Τηλεομοιοτυπία (Fax), Modems για επικοινωνία υπολογιστών, Ραδιοτηλεφωνία, Ραντάρ, Δορυφορικά συστήματα εκπομπής και λήψης, Οπτικές ίνες.

Αυτά τα συστήματα διαφέρουν στη φύση των διακινούμενων πληροφοριών και στα χαρακτηριστικά του μέσου με το οποίο γίνεται η επικοινωνία. Διαφέρουν επίσης στον κατευθυντικό ή όχι χαρακτήρα των πληροφοριών. Για παράδειγμα, στη ραδιοφωνία έχουμε ασύρματη ζεύξη, οι πληροφορίες είναι ακουστικά σήματα και απευθύνονται σε πολλούς και ανώνυμους ακροατές. Στην περίπτωση της ραδιοτηλεφωνίας το μήνυμα απευθύνεται σε συγκεκριμένο ανταποκριτή, με τον οποίο θέλουμε να επικοινωνήσουμε. Αυτές οι τρεις διαφορές – χαρακτηριστικά καθορίζουν το σωστό σχεδιασμό κάθε τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σχολιάσουμε κάτι σημαντικό. Αυτά που ονομάσαμε μηνύματα ή πληροφορίες, δηλαδή την ομιλία, τη μουσική, την εικόνα, είναι φυσικές διεργασίες, οι οποίες δεν έχουν αρχικά σχέση με την ηλεκτρονική και τις τηλεπικοινωνίες. Στα κεφάλαια (1) και (2) τις εξετάσαμε αναλυτικά καθώς και τον τρόπο παραγωγής τους. Ο ήχος είναι αυξομειώσεις της πίεσης του αέρα που διεγείρουν το όργανο της ακοής. Το οπτικό σήμα είναι αυξομειώσεις της έντασης του φωτός που διεγείρουν το όργανο της όρασης. Είναι προφανές ότι αυτά τα αρχικά φυσικά δεδομένα πρέπει να προετοιμαστούν κατάλληλα, για να σταλούν μακριά με κάποια μεθοδολογία, με κάποιο τηλεπικοινωνιακό σύστημα.



Σχήμα 3.1.4: *Προετοιμασία του μηνύματος πριν την αποστολή*

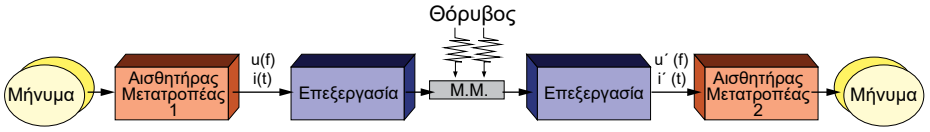
Με την προετοιμασία των πληροφοριών θα ασχοληθούμε αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.

3.2 Σήματα και συστήματα

Σημειώσαμε στην προηγούμενη παράγραφο ότι τα αρχικά φυσικά δεδομένα (ήχος, εικόνα) που έχει ανάγκη ο άνθρωπος για επικοινωνία δεν είναι διεργασίες που ανήκουν στο χώρο της ηλεκτρονικής, αλλά προέρχονται από άλλους τομείς της φυσικής. Από την άλλη πλευρά, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα και συστήματα με τα οποία δημιουργείται ένα σύνθετο τηλεπικοινωνιακό σύστημα επεξεργάζονται μόνον ηλεκτρικές τάσεις και ηλεκτρικά ρεύματα.

Είναι λοιπόν απαραίτητο αρχικά σε οποιοδήποτε απλό ή σύνθετο σύστημα να γίνει η μετατροπή του φυσικού μεγέθους της πληροφορίας σε ηλεκτρική τάση ή ρεύμα. Το μικρόφωνο, το οποίο γνωρίσαμε στο πρώτο κεφάλαιο, αναλαμβάνει αυτόν τον ρόλο στην περίπτωση του ήχου. Το φωτοκύτταρο της κάμερας, το οποίο γνωρίσαμε στο δεύτερο κεφάλαιο, μετατρέπει τις αυξομειώσεις του φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα για τα οπτικά σήματα.

Το μικρόφωνο ή το φωτοκύτταρο που κάνουν αυτήν τη μετατροπή απεικονίζονται στο σχήμα 3.2.1 στην αρχή με την ονομασία «αισθητήρας μετατροπέας 1». Το ηλεκτρικό μέγεθος στην έξοδο του αισθητήρα αντιπροσωπεύει πιστά το μέγεθος της εισόδου. Θα το αποκαλούμε στη συνέχεια **«ηλεκτρικό βασικό σήμα»** ή απλούστερα **«βασικό σήμα» ή «απλώς σήμα»**. Είναι προφανές ότι αυτό το βασικό σήμα πρέπει να υποστεί στην συνέχεια επεξεργασία, για να προετοιμαστεί κατάλληλα και «να ταξιδέψει» στο μέσο μετάδοσης, έως τον ανταποκριτή αποδέκτη.



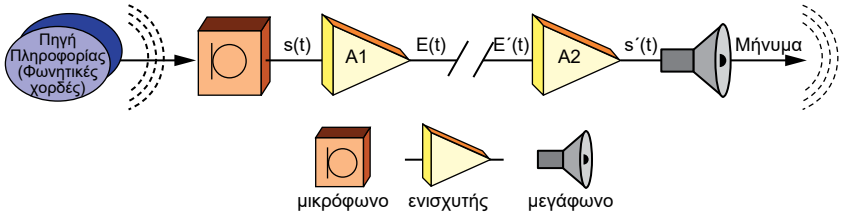
Σχήμα 3.2.1: *Μετατροπή και επεξεργασία του μηνύματος*

Ο αποδέκτης του σήματος διαθέτει το σύστημα λήψης του σήματος, που ενδεχομένως απαιτεί νέα επεξεργασία, ώστε στην έξοδο να δώσει την ηλεκτρική τάση ή το ρεύμα που αντιπροσωπεύει το αρχικό μήνυμα. Στο τελικό στάδιο σε αυτή την αλυσίδα ο «αισθητήρας μετατροπέας 2» εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία σε σχέση με τον μετατροπέα 1, δηλαδή διαγειρόμενος από το αντίστοιχο ηλεκτρικό μέγεθος αποδίδει στην έξοδο το αρχικό δεδομένο, που τελικά είναι αυτό που περιμένει και κατανοεί ο χρήστης. Αυτός ο μετατροπέας είναι το μεγάφωνο ή το ακουστικό (κεφάλαιο 1) στην περίπτωση ηχητικών σημάτων και η φωτοευαίσθητη επιφάνεια της οθόνης στην περίπτωση οπτικού (τηλεοπτικού) σήματος (κεφάλαιο 2). Πράγματι ο χρήστης – άνθρωπος δεν κατανοεί τα ρεύματα ή τις ηλεκτρικές τάσεις. Θέλει να ακούσει τον ήχο, να δει την εικόνα.

Για να κατανοήσουμε πλήρως τη λειτουργία του σχήματος 3.2.1 και την ανάγκη επεξεργασίας του σήματος στον πομπό και το δέκτη, θα αναφερθούμε σε

απλά παραδείγματα που, σε συνδυασμό με την καθημερινή μας εμπειρία, θα μας διευκολύνουν.

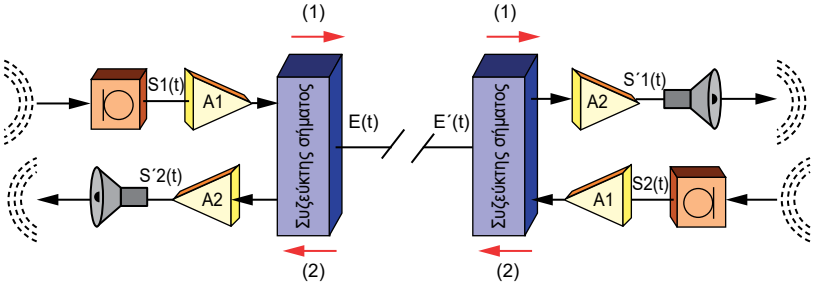
***Παράδειγμα 1:** Ας υποθέσουμε ότι το σύστημα του σχήματος 3.2.1 αφορά την φωνητική επικοινωνία δύο ανταποκριτών μέσω καλωδίου (ενσύρματα) και προς μια κατεύθυνση (μονόδρομη). Πηγή πληροφορίας είναι οι φωνητικές χορδές. Στην έξοδο του μικροφώνου το σήμα είναι συνήθως ασθενές. Πρέπει λοιπόν να ενισχυθεί, ώστε με αρχικά μεγάλη ισχύ να ταξιδέψει στο καλώδιο. Η επεξεργασία του σήματος σε αυτήν την απλή περίπτωση είναι η ενίσχυση του. Στο καλώδιο το σήμα, λόγω μετατροπής μέρους της ενέργειας του σε θερμική (φαινόμενο Joule), χάνει την ισχύ του, αποσβήνεται και γίνεται ασθενέστερο τόσο όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του καλωδίου.*



***Σχήμα 3.2.2:** Στην μονόδρομη ενσύρματη ζεύξη αρκεί η απλή ενίσχυση του σήματος*

Στη λήψη το σήμα πρέπει να ενισχυθεί. Η επεξεργασία του, δηλαδή, είναι πάλι η απλή ενίσχυση, ώστε να είναι ικανό να διεγείρει το μεγάφωνο ή το ακουστικό.

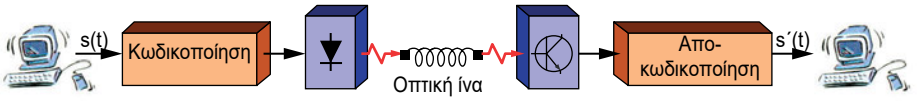
***Παράδειγμα 2:** Υποθέτουμε ότι το σύστημα 3.2.1 αναφέρεται στην αμφίδρομη φωνητική επικοινωνία ενσύρματα δύο ανταποκριτών, δηλαδή αφορά την αποστολή και λήψη μηνύματος προς τις δύο κατευθύνσεις με μέσο το ίδιο καλώδιο, όπως στην περίπτωση μιας τηλεφωνικής σύνδεσης. Στο σχήμα 3.2.3 φαίνεται κατ' αρχάς ότι τα στάδια επεξεργασίας είναι διπλά και περιλαμβάνουν ενίσχυση του σήματος προς τις δύο κατευθύνσεις και βεβαίως τους απαραίτητους μετατροπείς, μικρόφωνο και μεγάφωνο, στους δύο ανταποκριτές.*



***Σχήμα 3.2.3:** Περίπτωση αμφίδρομης ενσύρματης επικοινωνίας*

Το στάδιο που εμφανίζεται στο σχήμα με τον όρο «συζεύκτης σήματος» έχει ως ρόλο να προσανατολίσει τη ροή του σήματος προς την κατάλληλη φορά. Το σήμα (1) πρέπει να κατευθυνθεί προς τη φορά του αντίστοιχου βέλους, το σήμα (2) προς την αντίστοιχη δική του. Ο συζεύκτης σήματος, που τον συναντούμε σε κάθε τηλεφωνική συσκευή, κατασκευάζεται με πολλούς τρόπους. Συνήθως είναι ένας διαφορικός μετασχηματιστής, που επιτρέπει να ακούμε στο τηλέφωνο το σήμα του συνομιλητή μας και όχι τη δική μας φωνή. Τη δική μας φωνή την ακούει ο συνομιλητής μας. Να λοιπόν που σε ένα συνθετότερο σύστημα απαιτείται διαδικασία και επεξεργασία του σήματος πιο πολύπλοκη.

Παράδειγμα 3: Το σύστημα 3.2.1 αφορά τη μονόδρομη αποστολή δεδομένων από υπολογιστή με καλώδιο οπτικής ίνας. Όπως είναι γνωστό, τα δεδομένα στην έξοδο ενός υπολογιστή είναι μια αλληλουχία των ψηφίων '0' και '1' (παράδειγμα 00111001), που αντιπροσωπεύουν τα σύμβολα του αλφαβήτου και τα σημεία στίξεως. Γνωρίζουμε επίσης ότι το '0' υλοποιείται με τάση 0 Volt, και το '1' με τάση 5 Volt. Για να στείλουμε ένα τέτοιο μήνυμα μέσω οπτικής ίνας, είναι ανάγκη αυτά τα σύμβολα να μετατραπούν με κάποια ειδική διάταξη (δίοδο ή laser) σε φως και να ταξιδέψουν μέσω της οπτικής ίνας (σχήμα 3.2.4).



Σχήμα 3.2.4: *Σε ζεύξη με οπτική ίνα το μήνυμα μετατρέπεται σε φως*

Είναι προφανές επίσης ότι το φως που θα φτάσει στον οπτικό δέκτη πρέπει με άλλη αντίστροφη διάταξη (φωτοδίοδο, φωτοτρανζίστορ) να μετατραπεί πάλι σε τάση, ώστε ο υπολογιστής να το αντιστοιχίσει σε σύμβολα '0' και '1'.

Παράδειγμα 4: Ας υποθέσουμε ότι το σύστημα 3.2.1 αφορά τη ραδιοφωνία και την αποστολή μηνυμάτων ομιλίας και μουσικής ασύρματα με ηλεκτρομαγνητικό κύμα σε έναν ή περισσότερους ανταποκριτές – ακροατές.

Ας εξετάσουμε χωρίς πολλές λεπτομέρειες την απαραίτητη βασική επεξεργασία που απαιτείται από την πλευρά του πομπού. Οι ηχητικές πηγές συνήθως είναι περισσότερες από μια, φωνή, μουσική, κ.λ.π. Στην έξοδο του ή των



Σχήμα 3.2.5: *Επεξεργασία του σήματος για ασύρματη ζεύξη. Το σήμα θα μετατραπεί σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα*

μικροφώνων απαιτείται ενίσχυση των σημάτων και στη συνέχεια ομαδοποίηση τους με τρόπο που να μην αλλοιώνονται τα αρχικά σήματα. Επόμενο στάδιο είναι η μετατροπή τους σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μια διαδικασία που υποψιαζόμαστε ότι είναι σαφώς πιο πολύπλοκη από αυτή των προηγούμενων παραδειγμάτων και την οποία θα εξετάσουμε σε επόμενη παράγραφο.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδιδόμενο στο χώρο αποσβήνεται γρήγορα. Γι' αυτό πρέπει να ενισχυθεί πολύ, πριν ταξιδέψει στο χώρο, ώστε να μπορέσει να έχει μεγάλη εμβέλεια και να φτάσει μακριά. Ο δέκτης από την άλλη πλευρά πρέπει να είναι κατάλληλος ώστε να συλλάβει το σήμα που διαδιδόμενο εξασθένησε. Να απορρίψει ανεπιθύμητα σήματα και θόρυβο που μάζεψε το σήμα στην πορεία του και, αφού το ενισχύσει, με αντίστροφη διαδικασία να αποδώσει τα αρχικά σήματα. Αυτά πρέπει ενδεχομένως να ενισχυθούν, για να διεγείρουν το ή τα μεγάφωνα, μέσω των οποίων θα ακροαστούμε τα μηνύματα και θα απολαύσουμε τη μουσική.

Με τα προηγούμενα παραδείγματα δείξαμε ότι είναι ανάγκη στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα πρώτα να επεξεργαζόμαστε κατάλληλα τα σήματα με ειδικά κυκλώματα και στη συνέχεια να στέλνονται στον αποδέκτη τους με το διαθέσιμο μέσο, το οποίο ονομάζουμε **τηλεπικοινωνιακό δίαυλο ή κανάλι**.

Ο αποδέκτης είναι υποχρεωμένος επίσης με κατάλληλα κυκλώματα να επεξεργάζεται τα λαμβανόμενα σήματα (συνήθως με αντίστροφη διαδικασία) και να τα μετατρέπει σε ωφέλιμο μήνυμα.

3.3 Τα ηλεκτρικά σήματα

3.3.1 Ορισμός του σήματος

Τονίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο ότι το βασικό ηλεκτρικό σήμα είναι το ηλεκτρικό μέγεθος που έχουμε στην έξοδο του αισθητήρα μετατροπέα και αντιπροσωπεύει το αρχικό φυσικό μέγεθος της πληροφορίας.



Σχήμα 3.3.1: *Σήματα στην έξοδο του αισθητήρα*

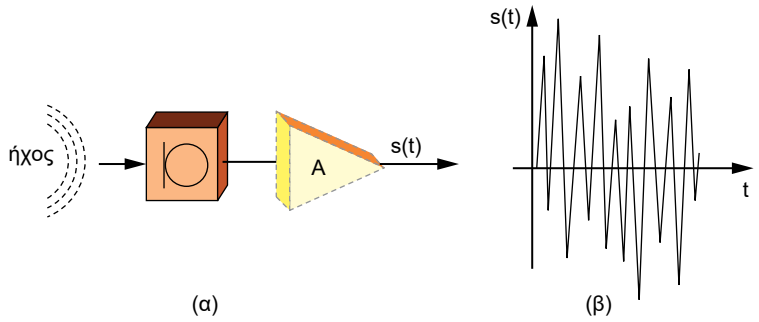
Παραδείγματα, που αναφέρθηκαν και σε άλλες περιπτώσεις, είναι το ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο του μικροφώνου (σχήμα 3.3.1α) ή του φωτοκυττάρου της κάμερας (σχήμα 3.3.1β). Είναι μεταβαλλόμενα μεγέθη και γι' αυτό τα συμβολίζουμε ως συνάρτηση του χρόνου με τον εξής τρόπο:

v(t) : μεταβαλλόμενη τάση

i(t) : μεταβαλλόμενο ρεύμα

s(t): γενικός συμβολισμός ενός βασικού σήματος.

Οι χρονικές μεταβολές του σήματος είναι ίδιες με αυτές του αρχικού μεγέθους, για παράδειγμα του αρχικού ήχου. Την ακριβή εικόνα του σήματος μπορούμε να την παρατηρήσουμε με το εργαστηριακό όργανο που λέγεται παλμογράφος, του οποίου τη χρήση γνωρίζουμε από τα εργαστηριακά μας μαθήματα. Έτσι, αν οι μεταβολές πίεσης του αέρα στην είσοδο του μικροφώνου ακολουθούν τη μορφή της γραφικής παράστασης 3.3.2α, συνδέοντας τον παλμογράφο στην έξοδο του μικροφώνου (ή του ενισχυτή που ακολουθεί) θα παρατηρήσουμε τη μορφή του σήματος που βλέπουμε στην εικόνα 3.3.2β.



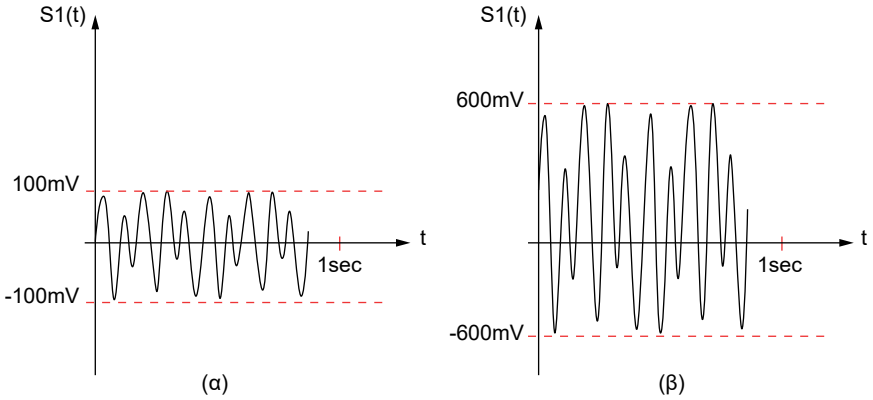
Σχήμα 3.3.2: *Εικόνα σήματος στην έξοδο του μικροφώνου*

Το γεγονός ότι σχεδιάζουμε το σήμα με θετικές και αρνητικές τιμές δηλώνει ότι το ρεύμα στην έξοδο του μικροφώνου μπορεί να έχει θετική ή αρνητική φορά, όπως το αντίστοιχο ηχητικό κύμα δημιουργεί υπερπιέσεις ή υποπιέσεις στη μεμβράνη του μικροφώνου (κεφάλαιο 1). Το ίδιο θα συνέβαινε, αν μιλούσαμε για το ρεύμα ή την τάση στην έξοδο του φωτοκυττάρου. Ένα τέτοιο σήμα, που παρουσιάζει συνεχείς μεταβολές στο χρόνο, το ονομάζουμε αναλογικό σήμα σε αντίθεση με τα παλμικά ή ψηφιακά σήματα που παρουσιάζουν ασυνέχειες.

Τα ηλεκτρικά σήματα γενικά χαρακτηρίζονται:

● **Από την ισχύ τους ή απλούστερα την έντασή τους.** Είναι το μέγεθος που επιτρέπει να συγκρίνουμε και να εκτιμήσουμε αν ένα σήμα είναι ισχυρότερο ή ασθενέστερο από ένα άλλο αντίστοιχο σήμα. Στα σύνθετα σήματα που έχουν τυχαία μορφή ο ακριβής υπολογισμός της ισχύος δεν είναι πάντοτε εύκολη υπόθεση.

● **Από το ρυθμό** με τον οποίο εξελίσσονται στο χρόνο (γρήγορα ή αργά, απότομα ή λιγότερο απότομα, έχουμε πολλές ή λίγες αλλαγές της τιμής του σήματος στη μονάδα του χρόνου;). Ο ακριβής προσδιορισμός των ρυθμών μεταβολής ενός σήματος επίσης δεν είναι πάντοτε εύκολη υπόθεση. Στον παλμογράφο απλώς μπορούμε να συγκρίνουμε αυτούς τους ρυθμούς μεταξύ δύο σημάτων (σχήμα 3.3.3).



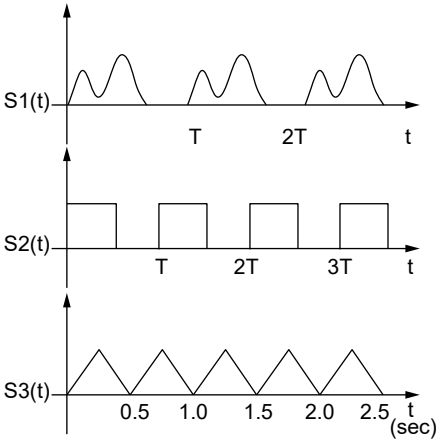
Σχήμα 3.3.3: *Το σήμα (β) παρουσιάζει γρηγορότερους ρυθμούς μεταβολών από το (α) και έχει μεγαλύτερη ένταση*

3.3.2 Διάκριση των σημάτων

Για να διευκολύνουμε τη μελέτη των σημάτων στην ηλεκτρονική και ιδιαίτερα στις τηλεπικοινωνίες, τα διακρίνουμε σε:

- Περιοδικά σήματα και
- μη περιοδικά σήματα.

Περιοδικό σήμα: Ένα σήμα το αποκαλούμε περιοδικό, όταν επαναλαμβάνεται στο χρόνο (σχήμα 3.3.4), δηλαδή παίρνει μετά από συγκεκριμένο χρόνο τις ίδιες τιμές.



Σχήμα 3.3.4: *Περιοδικά σήματα*

Αυτός ο συγκεκριμένος χρόνος ονομάζεται **περίοδος** και συμβολίζεται T.
Δηλαδή, s(t) = s(t+nT), όπου n ακέραιος αριθμός
Στο παράδειγμα του σχήματος η περίοδος του σήματος είναι

T = 0,5 sec = 500 msec.

Το αντίστροφο της περιόδου ενός περιοδικού σήματος ονομάζεται συχνότητα, συμβολίζεται F(ή f) και μετριέται σε Ερτζ (Hertz= sec^{-1}: Hz).

Για το παράδειγμα μας ισχύει:

$$F= 1/T = 1/(5 \cdot 10^{-1}) = 2\ sec^{-1} = 2\ Hz.$$

Η συχνότητα εκφράζει το ρυθμό επανάληψης του σήματος στη μονάδα του χρόνου που είναι το sec.

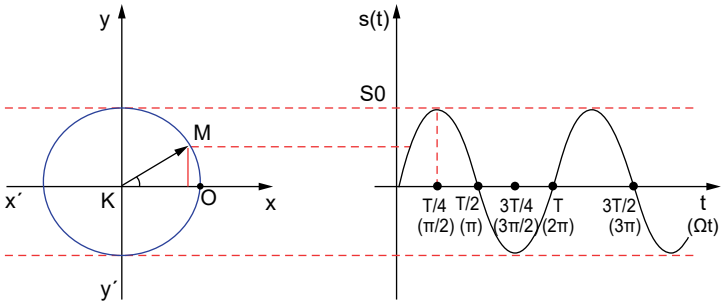
Εφαρμογή 1: Ένα περιοδικό σήμα έχει περίοδο 1,5 μs. Να προσδιοριστεί η συχνότητα του.

Λύση: $F= 1/1,5 \cdot 10^{-6} = 0,66 \cdot 10^{6} Hz = 660kHz$

Εφαρμογή 2: Η συχνότητα ενός περιοδικού σήματος είναι 18 kHz. Να προσδιοριστεί η περίοδος του σήματος.

Λύση: $T = 1/F = 1/18 \cdot 10^{3} = 55,5 \cdot 10^{-6}\ sec = 55,5\ \mu s$

Το απλούστερο περιοδικό σήμα είναι το **ημιτονικό σήμα**, που το έχουμε γνωρίσει και από τα μαθήματα ηλεκτρονικής και ηλεκτροτεχνίας. Είναι το βασικότερο σήμα στις τηλεπικοινωνίες και το χρησιμοποιούμε πάντοτε σαν σήμα αναφοράς, για να περιγράψουμε και να χαρακτηρίσουμε όλα τα άλλα ηλεκτρικά σήματα. Η εικόνα του ημιτονικού σήματος στον παλμογράφο είναι αυτή του σχήματος 3.3.5.



Σχήμα 3.3.5: *Ημιτονικό σήμα. Αντιστοίχιση των τιμών του στον τριγωνομετρικό κύκλο*

Υπενθυμίζουμε ότι το ημιτονικό σήμα ονομάζεται έτσι, διότι οι τιμές που παίρνει σε μια περίοδο T αντιστοιχούν στις τιμές του ημιτόνου της γωνίας που σχηματίζεται στον τριγωνομετρικό κύκλο, όταν ένα κινητό, ξεκινώντας από το σημείο O, κινείται για να διαγράψει πλήρη κύκλο στο χρόνο μιας περιόδου με σταθερή γωνιακή ταχύτητα.

Η πλήρης γωνία του τριγωνομετρικού κύκλου είναι 2π.

Άρα, η γωνιακή ταχύτητα είναι:

$$\Omega = 2\pi/T = 2\pi \cdot F$$

όπου F η συχνότητα του σήματος, που ορίσαμε προηγούμενα.

Στην ηλεκτρονική και τις τηλεπικοινωνίες για το μέγεθος Ω δεν χρησιμοποιούμε τον όρο γωνιακή ταχύτητα, αλλά **κυκλική συχνότητα**.

Είναι προφανές ότι τη χρονική στιγμή t η σχηματιζόμενη γωνία Φ = ΟΚΜ (σχήμα 3.3.5) είναι:

$$\Phi = \Omega \cdot t = (2\pi/T) \cdot t = (2\pi \cdot F) \cdot t.$$

Έτσι η έκφραση του ημιτονικού σήματος είναι:

$$s(t) = S_o \cdot \sin(\Omega t) = S_o \cdot \sin(2\pi F t) \quad (1)$$

Το S_o είναι η μέγιστη τιμή του σήματος και την ονομάζουμε πλάτος του σήματος. Υπενθυμίζουμε ότι η ισχύς του ημιτονικού σήματος που αποδίδεται σε ωμική αντίσταση R δίνεται από τη σχέση:

$$P = S_o^2 / 2R \quad (2)$$

Η έκφραση (1) του ημιτονικού σήματος προϋποθέτει ότι το σήμα μας, όταν αρχίσαμε να το μετράμε, δηλαδή όταν t= 0, ήταν s(t) = 0.

Πράγματι Ωt = 0, άρα $s(t) = S_o \cdot \sin 0 = 0$.

Αν όμως το σήμα, όταν αρχίσαμε τη μέτρησή του, δεν ήταν μηδέν, αλλά είχε τιμή διάφορη του μηδενός, θα είμαστε υποχρεωμένοι να γράψουμε:

$$s(t) = S_o \cdot \sin(\Omega \cdot t + \varphi_o) \quad (3)$$

Πράγματι, για t = 0 το σήμα μας έχει τιμή $s(t) = S_o \cdot \sin\varphi_o$.

Το μέγεθος φ_o ονομάζεται αρχική φάση του σήματος.

Παράδειγμα ημιτονικού σήματος είναι αυτό που έχουμε στην έξοδο του μικροφώνου, όταν διεγείρουμε το μικρόφωνο με τον ήχο του διαπασών. Ημιτονικό είναι επίσης το σήμα που έχουμε στην έξοδο μιας εργαστηριακής γεννήτριας ημιτονικών σημάτων, που την ρυθμίζουμε σε συγκεκριμένη συχνότητα.

Θα τελειώσουμε τη γνωριμία μας με το ημιτονικό σήμα με μια σημαντική παρατήρηση. Αναφέραμε προηγουμένως ότι το ημιτονικό σήμα είναι το πιο απλό σήμα και ότι χρησιμοποιείται σαν σήμα αναφοράς για τη μελέτη της ηλεκτρονικής και των τηλεπικοινωνιών. Αυτό συμβαίνει διότι το ημιτονικό σήμα χαρακτηρίζεται λειτουργικά από μια βασική ιδιότητα: Όταν μια ημιτονική τάση ή ρεύμα διεγείρει ένα κύκλωμα, τότε παντού στο κύκλωμα, σε οποιοδήποτε κλάδο του, αποκαθίσταται ημιτονική τάση ή ρεύμα. Με απλά λόγια το ημιτονικό σήμα διατηρεί σε οποιοδήποτε σύστημα, απλό ή σύνθετο, τη μορφή και τη συχνότητα του. Το μόνο που αλλάζει είναι το πλάτος του (S_o) και η φάση του (φ_o). Αποδεικνύεται έτσι ότι η ανάλυση και ο υπολογισμός ή ο προσδιορισμός του κυκλώματος είναι εύκολος. Την αλήθεια αυτής της παρατήρησης μπορούμε εύκολα να την επαληθεύσουμε πειραματικά στο εργαστήριο με την βοήθεια του παλμογράφου.

Εφαρμογή 3: Να δοθεί η έκφραση ενός ημιτονικού σήματος συχνότητας 25 kHz και πλάτους 10 V.

Λύση: $s(t) = 10\sin(2\pi \cdot 25 \cdot 10^3 t)$

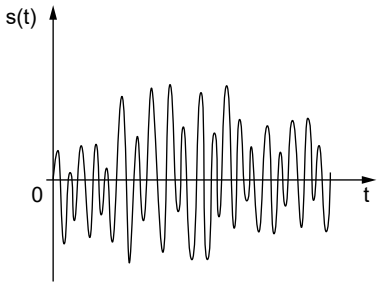
Εφαρμογή 4: Να υπολογιστεί η ισχύς ημιτονικής τάσης, σε αντίσταση R= 50Ω, όταν το πλάτος του σήματος είναι 20 Volt.

Λύση: $P = S_o^2/2R = 20^2/2 \cdot 50 = 4$ Watt

Μη περιοδικά σήματα: Τα τυχαία σήματα που δεν παρουσιάζουν επαναληπτικότητα ονομάζονται μη περιοδικά σήματα (σχήμα 3.3.6). Για παράδειγμα η ομιλία μας είναι μη περιοδικό σήμα.

Το σήμα που θα προκύψει στην έξοδο του φωτοκυττάρου από την σάρωση μιας εικόνας με την κάμερα είναι μη περιοδικό σήμα.

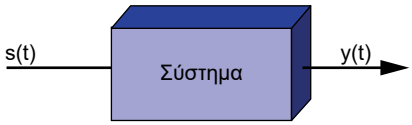
Τα περισσότερα ηλεκτρικά σήματα στη φύση είναι μη περιοδικά σήματα.



Σχήμα *3.3.6:* *Μη περιοδικό σήμα*

3.4 Ανάλυση των σημάτων

Η παρατήρηση για τη συμπεριφορά του ημιτονικού σήματος σε ένα κύκλωμα, ότι, δηλαδή, διατηρεί τη μορφή του, δεν ισχύει για κανένα άλλο σήμα οποιασδήποτε μορφής. Ο υπολογισμός μάλιστα της απόκρισης y(t), όταν ένα τυχαίο σήμα s(t) οδηγηθεί για επεξεργασία στην είσοδο του συστήματος, είναι πάρα πολύ δύσκολο πρόβλημα (σχήμα 3.4.1).

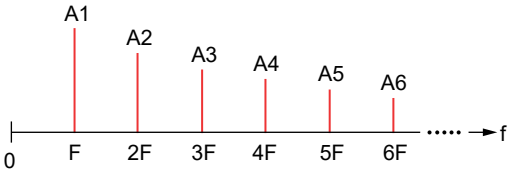


Σχήμα 3.4.1: *Το σήμα y(t) είναι το αποτέλεσμα στην έξοδο του συστήματος και εξαρτάται από το σήμα εισόδου s(t)*

Έτσι λοιπόν οι τηλεπικοινωνιακοί μηχανικοί αναζήτησαν μια μέθοδο, ώστε να αναλύουν το οποιοδήποτε σήμα σε ένα σύνολο από ημιτονικά σήματα, για τα οποία ο υπολογισμός της συμπεριφοράς του συστήματος είναι πολύ πιο εύκολο πρόβλημα. Πράγματι, αυτή η ανάλυση είναι δυνατή και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ανάλυση Φουριέ (Fourier), προς τιμή του Γάλλου μηχανικού, που πρότεινε την μέθοδο. Σε αυτό το βιβλίο δεν θα μας απασχολήσει η ανάλυση Fourier. Την αναφέρουμε όμως, γιατί μας οδηγεί στη σημαντικότερη έννοια που χρησιμοποιούμε στις τηλεπικοινωνίες, στην **έννοια του φάσματος**.

Φάσμα ενός σήματος είναι το σύνολο των συχνοτήτων των ημιτονικών σημάτων με συγκεκριμένα πλάτη που πρέπει να προστεθούν, ώστε να δώσουν ως αποτέλεσμα το αρχικό σήμα.

Αποδεικνύεται ότι οποιοδήποτε περιοδικό μη ημιτονικό σήμα περιόδου Τ έχει φάσμα που αποτελείται από άπειρες συχνότητες, οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας F = 1/T του σήματος. Δηλαδή, το σήμα s(t) ισοδυναμεί με το άθροισμα ημιτονικών σημάτων που καθένα έχει συχνότητα πολλαπλάσια της F. Οι συχνότητες αυτές λέγονται αρμονικές συχνότητες και το φάσμα λέγεται διακριτό φάσμα (σχήμα 3.4.2).



Σχήμα 3.4.2: *Διακριτό φάσμα περιοδικού σήματος*

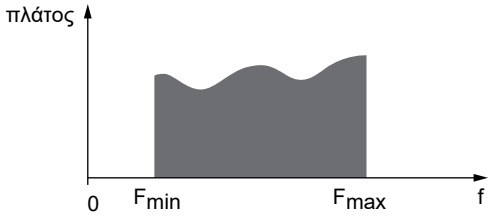
Γράφουμε:

$$\mathbf{s(t) = A_1 \cdot \sin(\Omega t + \varphi_1) + A_2 \cdot \sin(2\Omega t + \varphi_2) + A_3 \cdot \sin(3\Omega t + \varphi_3) + ...} \quad (4)$$

όπου τα διάφορα ημιτονικά σήματα εμφανίζονται με διαφορετικές φάσεις.

Παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση των ήχων (φθόγγων) των περισσότερων μουσικών οργάνων.

Οποιοδήποτε μη περιοδικό σήμα έχει φάσμα που αποτελείται από άπειρο αριθμό ημιτονικών σημάτων, των οποίων οι συχνότητες είναι τυχαίες, δεν έχουν σχέση μεταξύ τους και περιλαμβάνονται μεταξύ δύο ακραίων συχνοτήτων F_{min} (ελάχιστη) και F_{max} (μέγιστη), οι οποίες εξαρτώνται από τη φύση του σήματος (σχήμα 3.4.3)



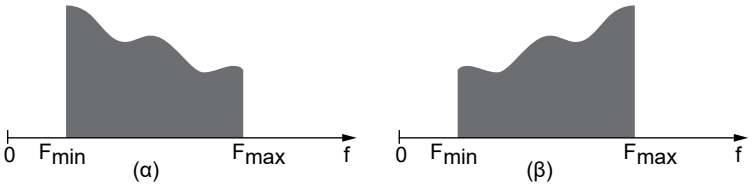
Σχήμα 3.4.3: *Συνεχές φάσμα τυχαίου σήματος. Περιορίζεται μεταξύ δύο ακραίων συχνοτήτων Fmin και Fmax. Η κατανομή του πλάτους είναι τυχαία*

Παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση των ηχητικών σημάτων, των οποίων οι συχνότητες ανήκουν στην ζώνη:

(F_{min} = 20Hz έως F_{max} = 20000 Hz)

Στην περίπτωση αυτή είναι σωστότερο να μιλάμε για **«φασματική ζώνη»** του σήματος.

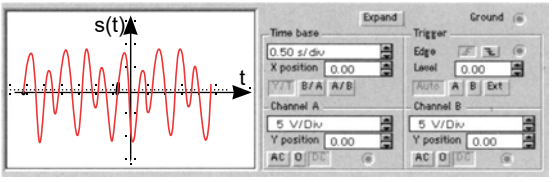
Τα πλάτη (ένταση) των ημιτονικών σημάτων που αθροίζονται δεν είναι τα ίδια. Αυτά καθορίζουν την ακουστική ποιότητα του σήματος, δηλαδή τη χροιά του ήχου, στην οποία αναφερθήκαμε στο πρώτο κεφάλαιο. Έτσι, εντελώς απλοϊκά στο σχήμα 3.4.4 αποδίδεται το φάσμα μιας ανδρικής (α) και μιας γυναικείας φωνής (β). Στην περίπτωση της ανδρικής φωνής στις χαμηλότερες συχνότητες αντιστοιχούν μεγαλύτερα πλάτη, που προσδίδουν βαρύτονη χροιά. Στην περίπτωση του γυναικείου φάσματος οι υψηλότερες συχνότητες είναι ενισχυμένες και δίνουν υψίτονη χροιά.



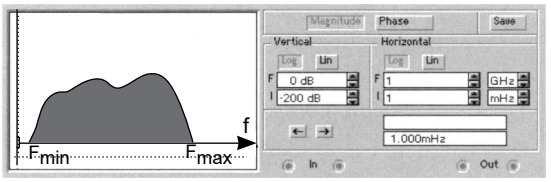
Σχήμα 3.4.4: *Διαφορές χροιάς στα φάσματα. (α) Βαρύτονη χροιά (β) Υψίτονη χροιά*

Τη φασματική εικόνα ενός σήματος μπορούμε να την παρατηρήσουμε και να τη μελετήσουμε στο εργαστήριο με ένα ακριβό εργαστηριακό όργανο, που το ονομάζουμε **«αναλυτή φάσματος»** (spectrum analyser).

Συμπερασματικά, ο παλμογράφος, που επιτρέπει τη χρονική παρατήρηση και μελέτη ενός σήματος, και ο αναλυτής φάσματος, που επιτρέπει την παρατήρηση και τη μελέτη του φάσματος του σήματος, είναι τα δύο βασικά όργανα που πρέπει να υπάρχουν σε κάθε σοβαρό εργαστήριο τηλεπικοινωνιών. Ένα σήμα το γνωρίζουμε πλήρως, όταν ξέρουμε και τη χρονική και τη φασματική του συμπεριφορά (σχήμα 3.4.5).



(α)



(β)

Σχήμα 3.4.5 *Χρονική και φασματική εικόνα του σήματος. Την πρώτη την βλέπουμε στον παλμογράφο. Τη δεύτερη στον αναλυτή φάσματος*

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι η έννοια του φάσματος ή της φασματικής ζώνης ενός σήματος είναι από τις σημαντικότερες έννοιες στην ηλεκτρονική και τις τηλεπικοινωνίες. Έμμεσα το φάσμα ενός σήματος είναι αυτό που στις προηγούμενες παραγράφους ονομάσαμε «μήνυμα» ή «πληροφορία». **Όσο πιο πλούσιο ή φτωχό σε συχνότητες είναι το φάσμα ενός σήματος τόσο μεγαλύτερη ή μικρότερη είναι η «ποσότητα της πληροφορίας» που περιέχει το σήμα.**

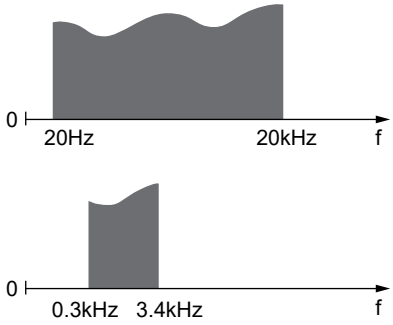
Παράδειγμα 1: Μουσικό ακουστικό φάσμα. Το ακουστικό φάσμα ενός μουσικού σήματος είναι στη ζώνη από 20 Hz έως 20 kHz.

Προέρχεται από την πλήρη ανάπτυξη ορχήστρας και περιλαμβάνει όλες τις συχνότητες που μπορούν να διεγείρουν το ανθρώπινο όργανο της ακοής. Η συχνότητα των 20 kHz θεωρείται σε κάθε περίπτωση το ανώτατο όριο του ακουστικού φάσματος. Είναι το άκουσμα του συνδυασμού όλων αυτών των συχνοτήτων, που επιτρέπει να απολαύσουμε μουσική ποιότητας (σχήμα 3.4.6α).

Παράδειγμα 2: Φάσμα Video. Το οπτικό φάσμα ή φάσμα Video στην έξοδο του φωτοκυττάρου της κάμερας καταλαμβάνει την ευρεία ζώνη από 0 Hz έως 5 MHz. Δηλαδή, το σήμα Video περιλαμβάνει και χαμηλές συχνότητες, έως το συνεχές (το συνεχές σήμα έχει συχνότητα 0 Hz).

Παράδειγμα 3: Ανθρώπινη ομιλία. Πειράματα έχουν δείξει ότι η φασματική ζώνη της ανθρώπινης ομιλίας εκτείνεται από 20 Hz έως 12 ή 15 kHz.

Παράδειγμα 4: Τηλεφωνική φασματική ζώνη. Έχει αποδειχθεί ότι το ουσιαστικότερο τμήμα του φάσματος της ανθρώπινης ομιλίας είναι από 300 Hz έως 3400 Hz. Είναι το τμήμα του φάσματος που περιέχει τα βασικά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν, αν κάποιος το ακούσει από μακριά, να καταλάβει ποιος ομιλεί. Είναι ακριβώς η ζώνη που διεθνώς έχει καθοριστεί, για να αποστέλλεται μέσω των τηλεφωνικών γραμμών. Γι' αυτό ονομάζεται και τηλεφωνικό φάσμα (σχήμα 3.4.6β).



Σχήμα 3.4.6: *(α) Το μουσικό φάσμα. (β) Το τηλεφωνικό φάσμα*

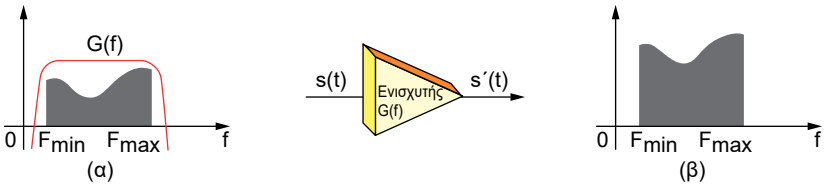
Χωρίς βαθύτερη ανάλυση αντιλαμβανόμαστε ότι το σήμα Video είναι το πιο πλούσιο σε πληροφορία, το μουσικό σήμα πιο πλούσιο από την ανθρώπινη ομιλία, ενώ φτωχότερο από τα προηγούμενα είναι το τηλεφωνικό φάσμα.

Πρέπει επίσης να τονίσουμε ότι όσο πλουσιότερο (ευρύτερο) είναι το φάσμα ενός σήματος τόσο δυσκολότερα μπορεί να σταλεί μέσω τηλεπικοινωνιακού συστήματος γιατί απαιτεί σύστημα συνθετότερο και ακριβότερο. Να γιατί στο τηλεφωνικό δίκτυο, για παράδειγμα, δώσαμε από άποψη φάσματος την ελάχιστη απαραίτητη, φτωχότερη λύση.

3.5 Εύρος ζώνης λειτουργίας. Φίλτρα

Ας θεωρήσουμε ένα σήμα s(t), που έχει φασματική ζώνη από F_{min}, F_{max}.

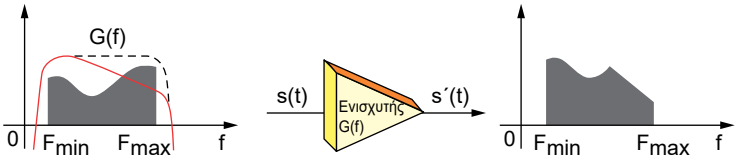
Αν αυτό το σήμα θέλουμε να το επεξεργαστούμε, για παράδειγμα να το ενισχύσουμε χωρίς να αλλοιώσουμε το φασματικό του περιεχόμενο (την ζώνη συχνοτήτων του), πρέπει ο ενισχυτής που θα χρησιμοποιήσουμε να ενισχύσει με τον ίδιο τρόπο όλες τις φασματικές ακτίνες του. Με απλούστερα λόγια, πρέπει ο ενισχυτής να σεβαστεί όλο το φάσμα του σήματος. Έμμεσα, δηλαδή, ορίζουμε τη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του ενισχυτή, που πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή οριακά ίση με τη φασματική ζώνη του σήματος (σχήμα 3.5.1).



Σχήμα 3.5.1: *Το εύρος λειτουργίας του ενισχυτή (σημειώνεται με κόκκινο) απαιτείται να είναι μεγαλύτερο από την φασματική ζώνη του σήματος (α).*
(β) Τα φάσματα στην είσοδο και στην έξοδο του ενισχυτή, αντίστοιχα

Τη ζώνη λειτουργίας την ονομάζουμε συχνά και **«εύρος ζώνης»** (**Bandwith**– μπάντγουηθ, στην αγγλική γλώσσα).

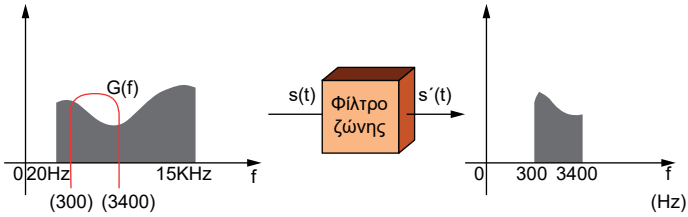
Στην περίπτωση που ο ενισχυτής δεν μπορεί να εργαστεί σε όλες τις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν, το σήμα στην έξοδο θα είναι φτωχότερο και αλλοιωμένο (σχήμα 3.5.2).



Σχήμα 3.5.2: *Αν ο ενισχυτής δε «σέβεται» όλη τη φασματική ζώνη του σήματος, στην έξοδο, το σήμα είναι αλλοιωμένο, έχει παραμόρφωση.*

Υπάρχουν περιπτώσεις που θέλουμε να αλλοιώσουμε ή να αλλάξουμε την αρχική φασματική ζώνη ενός σήματος; Βεβαίως υπάρχουν. Υπάρχουν όμως και τα κατάλληλα κυκλώματα που μπορούμε να κατασκευάσουμε και να χρησιμοποιήσουμε, για να πετύχουμε αυτόν το στόχο. Είναι τα **«φίλτρα»**, γνωστά από άλλο μάθημα, τα οποία χρησιμοποιούνται πάρα πολύ στις τηλεπικοινωνίες. Εδώ με κάποια παραδείγματα θα εστιάσουμε στην λειτουργική συμπεριφορά τους.

Στο σχήμα 3.5.3 που ακολουθεί χρησιμοποιούμε ένα φίλτρο, για να περιορίσουμε τη ζώνη του φάσματος της ομιλίας και να δημιουργήσουμε το τηλεφωνικό σήμα.

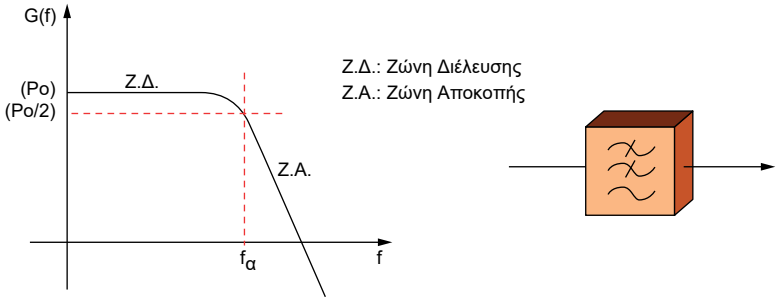


Σχήμα 3.5.3: *Δημιουργία του τηλεφωνικού σήματος με κατάλληλο φίλτρο*

Το φίλτρο σχεδιάστηκε, ώστε να επιτρέπει επιλεκτικά τη διέλευση ενός μόνο (μεσαίου) τμήματος της ζώνης του αρχικού σήματος. Από αυτή την άποψη είναι φίλτρο διέλευσης ζώνης. Βέβαια το σήμα στην έξοδο είναι διαφορετικό από αυτό της εισόδου.

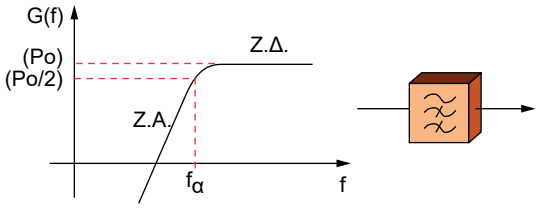
Γενικά, ανάλογα με το τμήμα του φάσματος που επιλέγει ένα φίλτρο, τα διακρίνουμε σε:

• **Χαμηλοδιαβατό ή χαμηλοπερατό φίλτρο.** Είναι αυτό που επιλεκτικά αφήνει να διέλθει το χαμηλό τμήμα συχνοτήτων. Η λειτουργία του και το σύμβολό του φαίνονται στο σχήμα 3.5.4. του.



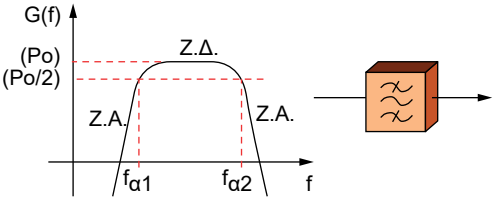
Σχήμα 3.5.4: *Ζώνη διέλευσης και σύμβολο του χαμηλοπερατού φίλτρου*

• **Υψηλοδιαβατό ή υψηλοπερατό φίλτρο.** Είναι αυτό που επιλεκτικά αφήνει τη διέλευση του υψηλού τμήματος των συχνοτήτων. Η λειτουργία και το σύμβολό του φαίνονται στο σχήμα 3.5.5.



Σχήμα 3.5.5: *Ζώνη διέλευσης και σύμβολο υψηλοπερατού φίλτρου*

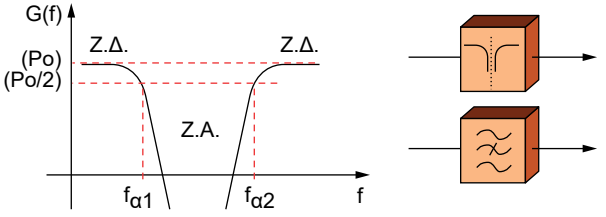
• **Φίλτρο διέλευσης ζώνης.** Είναι αυτό που επιτρέπει τη διέλευση συγκεκριμένου μεσαίου τμήματος του φάσματος.



Σχήμα 3.5.6: *Λειτουργία και σύμβολο φίλτρου διέλευσης ζώνης*

Η λειτουργία και το σύμβολό του φαίνονται στο σχήμα 3.5.6.

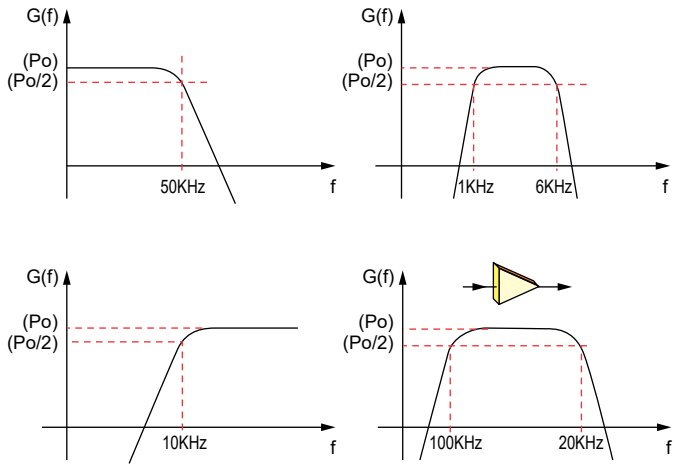
• **Φίλτρο απόρριψης ζώνης.** Είναι αυτό που δεν αφήνει να διέλθει συγκεκριμένο μεσαίο τμήμα του φάσματος ενός σήματος. Η λειτουργία και το σύμβολό του φαίνονται στο σχήμα 3.5.7.



Σχήμα 3.5.7: *Λειτουργία και σύμβολα φίλτρου απόρριψης ζώνης*

Για να μπορούμε να εκτιμήσουμε το εύρος ζώνης λειτουργίας ενός φίλτρου, ενός ενισχυτή και γενικότερα ενός συστήματος έχουμε όλοι αποδεχτεί ότι τα όρια της ζώνης είναι οι συχνότητες στις οποίες η ισχύς του σήματος στην έξοδο υποβιβάζεται κατά 3 dB, δηλαδή διαιρείται δια δύο, σε σχέση με την ισχύ που έχει

το σήμα στις συχνότητες λειτουργίας. Αυτά τα όρια ονομάζονται **«συχνότητες αποκοπής»** (σχήμα 3.5.8).



Σχήμα 3.5.8: *Διάφορα φίλτρα. Ορισμός των συχνοτήτων αποκοπής*

Εφαρμογή: Στα παραδείγματα του σχήματος 3.5.8 οι συχνότητες αποκοπής είναι:

- Για το χαμηλοπερατό φίλτρο $f_α$ = 500 Hz.

- Για το φίλτρο ζώνης $f_{α1}$ = 1000 Hz, $f_{α2}$ = 6000 Hz.

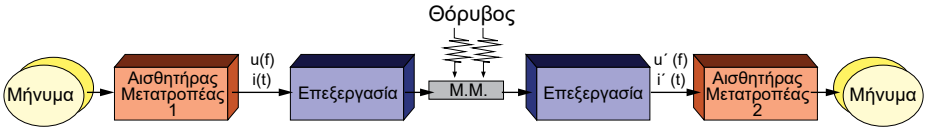
- Για το υψηλοδιαβατό $f_α$ = 10 kHz.

- Τα όρια της ζώνης λειτουργίας του ενισχυτή είναι f_1 = 100 Hz, f_2 = 20 kHz.

Στις τηλεπικοινωνίες η έννοια του εύρους ζώνης λειτουργίας αφορά όλα τα συστήματα και υποσυστήματα τόσο του πομπού, όσο και του δέκτη. Αφορά επίσης και το μέσο διάδοσης είτε αυτό είναι καλώδιο είτε οπτική ίνα είτε το κενό. Για παράδειγμα, ένα καλώδιο, λόγω των παρασιτικών χωρητικοτήτων (πυκνωτών) και των παρασιτικών πηνίων που το συνοδεύουν, συμπεριφέρεται ως φίλτρο και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά οποιουδήποτε σήματος. Το τηλεφωνικό δισύρματο καλώδιο αποδεικνύεται στην πράξη καλό για το τηλεφωνικό σήμα, που η φασματική του ζώνη είναι μικρή. Δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ίδιο καλώδιο για το σήμα της τηλεόρασης, που έχει πολύ ευρύτερο φάσμα. Στο σπίτι μας διαπιστώνουμε ότι το καλώδιο της τηλεόρασης είναι διαφορετικό. Είναι κυλινδρικό, με κεντρικό αγωγό και θωράκιση και πολύ ακριβότερο από το προηγούμενο. Το καλώδιο αυτό είναι ειδικής κατασκευής και προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης λειτουργίας (bandwith).

3.6 Η ανάγκη της διαμόρφωσης

Αφού στις προηγούμενες παραγράφους μάθαμε για τα σήματα και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, ας επανέλθουμε στο γενικό σχήμα ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος (σχήμα 3.6.1), που δόθηκε και στην παράγραφο 3.2.



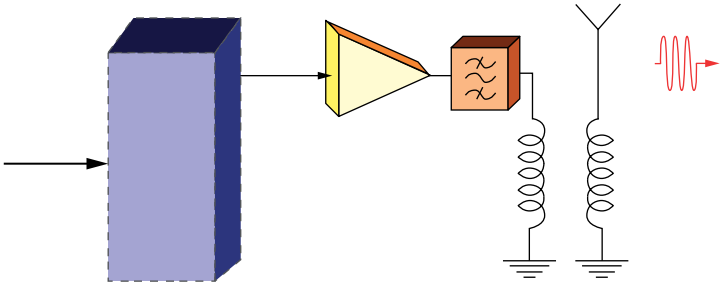
Σχήμα 3.6.1: *Δομικό διάγραμμα τηλεπικοινωνιακού συστήματος*

Το πρόβλημα που τίθεται είναι να στείλουμε το βασικό σήμα – που αντιπροσωπεύει ένα φυσικό μήνυμα – μακριά σε κάποιο δέκτη χρησιμοποιώντας κάποιο μέσο επικοινωνίας. Ας θυμηθούμε επίσης ότι τα βασικότερα σήματα είναι τα:
ακουστικά με φασματική ζώνη (20 Hz, 20 kHz).
σήματα Video με φασματική ζώνη (0 Hz, 5 MHz).

Αν η εφαρμογή μας περιορίζεται σε μια απλή ενσύρματη επικοινωνία, σαν αυτή των σχημάτων 3.2.2 ή 3.2.3, η διαδικασία είναι απλή και το βασικό σήμα ενισχυμένο στέλνεται απ' ευθείας μέσω της γραμμής. Σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για **μετάδοση βασικής (φασματικής) ζώνης**. Παράδειγμα το τηλέφωνο. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις και για μετάδοση μακρινών αποστάσεων τα πράγματα δεν είναι απλά.

Ας θεωρήσουμε στη συνέχεια μια περίπτωση ασύρματης επικοινωνίας για ακουστικά σήματα, για παράδειγμα τη ραδιοφωνία.

Στο τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας του σήματος πρέπει το σήμα, αφού ενισχυθεί πολύ, να μετατραπεί στη συνέχεια σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που θα διαδοθεί στο χώρο με την ταχύτητα του φωτός. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα θα το γνωρίσουμε καλύτερα στην επόμενη παράγραφο. Μπορούμε όμως να δανειστούμε κάποιες γνώσεις από την ηλεκτροτεχνία και την φυσική.



Σχήμα 3.6.2: *Δημιουργία ηλεκτρομαγνητικού κύματος*

Η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα (ηλεκτρικό + μαγνητικό πεδίο) γίνεται μέσω πηνίων (επαγωγή), ενώ στο τελικό στάδιο αυτό το πηνίο παίρνει τη μορφή κεραίας που ακτινοβολεί την ενέργεια στον χώρο (σχήμα 3.6.2).

Αποδεικνύεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα f ενός σήματος τόσο ευκολότερα η ενέργειά του ακτινοβολείται στον κενό χώρο. Δηλαδή, πιο εύκολα ακτινοβολείται και διαδίδεται σήμα με συχνότητα 1 MHz από ό,τι σήμα συχνότητας 1 kHz ή 500 Hz.

Αποδεικνύεται επίσης ότι, για να ακτινοβοληθεί επιτυχώς ένα σήμα, απαιτείται το μήκος της κεραίας να είναι ανάλογο προς το μήκος κύματος του σήματος. Το μήκος κύματος θα το ορίσουμε στην επόμενη παράγραφο και θα δούμε ότι δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = c \cdot T = c/f,$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός, T η περίοδος και f η συχνότητα.

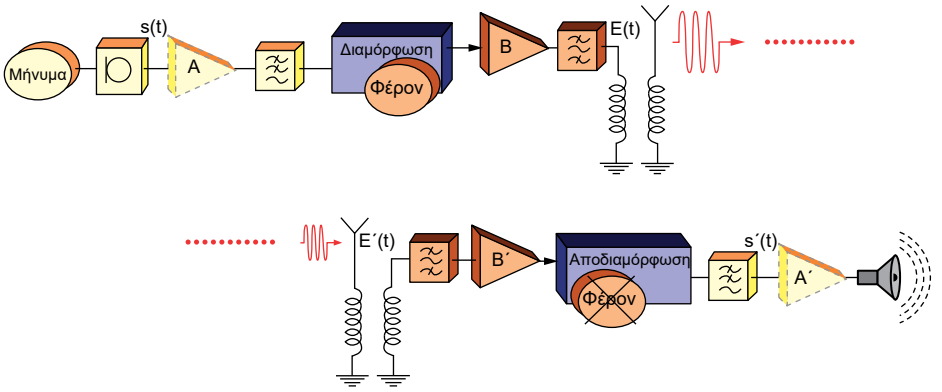
Αν υπολογίσουμε το μήκος κύματος ενός σήματος 1 kHz, θα βρούμε 300 km. Αν υπολογίσουμε το μήκος κύματος ενός σήματος 1 MHz, θα βρούμε 300 m. Αντίστοιχα, το μήκος κύματος σήματος συχνότητας 10 MHz είναι 30 m. Εύκολα λοιπόν από τις προηγούμενες παρατηρήσεις καταλαβαίνουμε ότι πιο εύκολα κατασκευάζουμε κεραία για σήμα 10 MHz από ό,τι για σήμα 1 MHz ή 1 kHz. Θα ήταν ίσως πρακτικά αδύνατο να κατασκευάσουμε κεραία 300 km.

Οδηγούμαστε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι φαίνεται τουλάχιστον άστοχο να προσπαθήσουμε να μετατρέψουμε απ' ευθείας το ακουστικό σήμα (20 Hz, 20-kHz) σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, για να διαδοθεί στον χώρο. Θα απαιτούσε δυσπροσάρμοστη θεόρατη κεραία.

Ας κάνουμε στο σημείο αυτό μια ακόμα σημαντική υπόθεση και παρατήρηση. Ας θεωρήσουμε προς στιγμήν ότι ξεπερνούμε τη δυσκολία κατασκευής της κεραίας για το σύστημα μας. Επιχειρούμε λοιπόν να ενισχύσουμε σημαντικά το ακουστικό σήμα και να φτιάξουμε ραδιοφωνικό σταθμό εκπέμποντας απ' ευθείας στις συχνότητες του σήματος μας. Δημιουργήσαμε ένα τεράστιο πρόβλημα. Κανείς άλλος δεν μπορεί να φτιάξει δεύτερο ίδιο σύστημα με το δικό μας, στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Αν επιχειρούσε ένα δεύτερο σύστημα να εκπέμψει με τον ίδιο τρόπο, τα σήματα θα «ταξίδευαν» μαζί στο χώρο. Άρα θα αναμιγνύονταν, καθώς είναι στις ίδιες συχνότητες, και το αποτέλεσμα θα ήταν τραγικό και για τα δύο. Κανένας δέκτης δε θα μπορούσε να συλλάβει, να διαχωρίσει εκ νέου και να ακροαστεί τα αρχικά διακριτά σήματα. Από αυτό το φανταστικό πείραμα προκύπτει ότι δεν θα μπορούσαν να συνυπάρξουν περισσότερα από ένα ασύρματα συστήματα.

Πρέπει λοιπόν κάτι να κάνουμε, πριν το σήμα εισέλθει στο μέσο μετάδοσης. Πρέπει να του δώσουμε όλα εκείνα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά, που θα του επιτρέψουν να ταξιδέψει εύκολα και να προστατευθεί από την επίθεση άλλων ίδιων με αυτό σημάτων, που ενδεχομένως υπάρχουν στον ίδιο χώρο. Μόνον έτσι θα διατηρήσει την φυσιογνωμία του και ο δέκτης θα μπορέσει να το διαχωρίσει και να το επεξεργαστεί, ώστε να δώσει στην έξοδο το μήνυμα στον τελικό παραλήπτη.

Όλη αυτή η διαδικασία ονομάζεται **«διαδικασία διαμόρφωσης του σήματος»**, που θα εξετάσουμε λεπτομερώς σε επόμενη παράγραφο. Κατά κανόνα καταφεύγουμε στο εξής τέχνασμα: Το βασικό μας σήμα (δηλαδή, το σήμα της πληροφορίας) θα το «φορτώσουμε» με κάποιο τρόπο πάνω σε ένα άλλο σήμα πολύ υψηλότερης συχνότητας, που μεταδίδεται ευκολότερα, για να το μεταφέρει στο κανάλι μετάδοσης (σχήμα 3.6.3), έως την είσοδο του δέκτη. Λόγω του ρόλου του το σήμα υψηλής συχνότητας θα το ονομάσουμε «φέρον σήμα ή κύμα» ή απλούστερα ακόμη **«φέρον»**.



Σχήμα 3.6.3: Για την μετάδοση του σήματος απαιτείται διαμόρφωση. Στον δέκτη η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται αποδιαμόρφωση.

Το βασικό σήμα ονομάζεται «διαμορφώνον σήμα» ή **«σήμα διαμόρφωσης»**.

Υποψιαζόμαστε ότι στο δέκτη θα πρέπει να γίνει η ανάποδη διαδικασία, για να «ξεφορτώσει» το ωφέλιμο σήμα από το φέρον υψηλής συχνότητας. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **«αποδιαμόρφωση»**. Είμαστε πλέον ικανοί στο σημείο αυτό να συμπληρώσουμε το σχήμα με τα στάδια διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης του σήματος και να καταλήξουμε στο σχήμα 3.6.3.

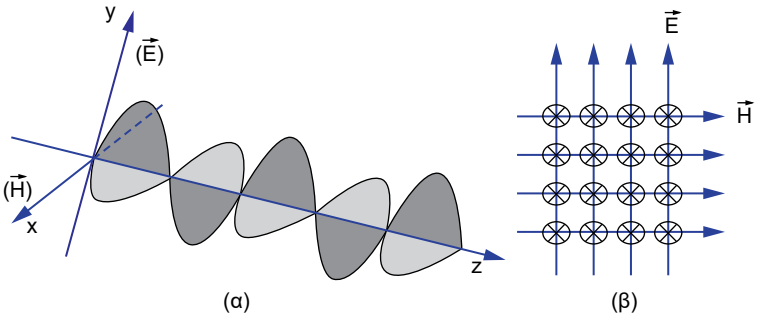
3.7 Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα

3.7.1 Ορισμός του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Στις τηλεπικοινωνίες, ιδιαίτερα στις ραδιοεπικοινωνίες (ασύρματες ζεύξεις), χρησιμοποιούνται **ηλεκτρομαγνητικά κύματα.**

Τι είναι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα; Η φυσική αποδεικνύει ότι κάθε ηλεκτρικό κύκλωμα που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα ακτινοβολεί μια ποσότητα της χορηγούμενης ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι μια μορφή ενέργειας συνδυασμένου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, που είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης τους, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.7.1 (α), (β) που ακολουθούν.



Σχήμα 3.7.1: *(α) Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. (β) Οι άξονες των διανυσμάτων Ε και Η και της διάδοσης του κύματος.*

Στο σχήμα (3.7.1α) φαίνεται ο συνδυασμός των κάθετων πεδίων (ηλεκτρικό πεδίο Ε και μαγνητικό πεδίο Η), που εμφανίζονται ως ημιτονικά σήματα. Στο σχήμα (3.7.1β) απλοποιημένα σημειώνονται οι διευθύνσεις των διανυσμάτων έντασης των δύο πεδίων και, κάθετα προς το χαρτί του βιβλίου, η διεύθυνση διάδοσης.

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό είναι η ταχύτητα διάδοσης του φωτός, το οποίο και αυτό είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

$$\mathbf{c = 300.000\ km/sec = 3 \cdot 10^8 m/sec}$$

Αν η διάδοση δε γίνεται στο κενό, αλλά σε άλλο μέσο, για παράδειγμα, σε υγρό, σε γυαλί ή σε κάποιο καλώδιο, η ταχύτητα είναι διαφορετική και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c' = c / \sqrt{\varepsilon} \qquad (6)$$

όπου ε η διηλεκτρική σταθερά του υλικού.

Βασικό χαρακτηριστικό μέγεθος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, είναι το **«μήκος κύματος»**, που συνήθως συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα λ.

Μήκος κύματος είναι η απόσταση που διανύει διαδιδόμενο το κύμα στο χρονικό διάστημα της περιόδου Τ του ηλεκτρικού σήματος από το οποίο προήλθε. Δηλαδή:

$$\mathbf{\lambda = c \cdot T} \qquad (7)$$

Αν, αντί για την περίοδο, χρησιμοποιήσουμε την συχνότητα f, έχουμε:

Καθώς f = 1/T, τότε λ = c/f

Εφαρμογή 1: Να υπολογιστεί το μήκος κύματος, όταν η συχνότητα του είναι f = 40 MHz

Λύση: $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8/4 \cdot 10^7 = 0,75 \cdot 10m = 7,5\ m$

Εφαρμογή 2: Να υπολογιστεί η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε μέσον που παρουσιάζει σχετική διηλεκτρική σταθερά ε = 2,25.

Λύση: $c' = c / \sqrt{\varepsilon} = 3 \cdot 10^8 / \sqrt{2,25} = 3 \cdot 10^8 / 1,5 = 2 \cdot 10^8$ m / sec

3.7.2 Ισχύς και πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο του κύματος, πάντοτε κάθετα μεταξύ τους, έχουν την ίδια φάση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7.1.

Το επίπεδο του ηλεκτρικού πεδίου ορίζει την κατεύθυνση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, η οποία ονομάζεται «πόλωση» του κύματος. Όταν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι κατακόρυφο, λέμε ότι το κύμα είναι κατακόρυφα πολωμένο. Αν το ίδιο επίπεδο είναι οριζόντιο, λέμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι οριζόντια πολωμένο. Όταν το επίπεδο αυτό αλλάζει συνεχώς, δηλαδή περιστρέφεται, τότε έχουμε κυκλική πόλωση του κύματος. Η πόλωση του κύματος σχετίζεται με τον προσανατολισμό της κεραίας που το ακτινοβολεί. Όταν η κεραία είναι κατακόρυφη, δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό κύμα κατακόρυφα πολωμένο. Όταν η κεραία είναι οριζόντια, δημιουργεί οριζόντια πολωμένο κύμα.

Αποδεικνύεται ότι οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου (Ε) και του μαγνητικού πεδίου (Η) ενός κύματος δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Όταν πρόκειται για διάδοση στο κενό, συνδέονται με τη σχέση:

$$\mathbf{E/H = 120\pi = 377\Omega} \qquad (8)$$

Υπενθυμίζουμε ότι το μέγεθος Ε, τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, εκφράζεται σε Volt/m. Το μέγεθος Η, ένταση του μαγνητικού πεδίου, εκφράζεται αντίστοιχα σε A/m.

Έτσι, εύκολα διαπιστώνουμε ότι το μέγεθος Ε/Η εκφράζεται σε Ω και δηλώνει την ισοδύναμη αντίσταση του κενού.

Σε κάποια απόσταση από την πηγή δημιουργίας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (π.χ. την κεραία εκπομπής) η ηλεκτρομαγνητική ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας, που την αποκαλούμε **πυκνότητα ισχύος**, όταν Ε και Η είναι οι τιμές των πεδίων σε αυτή την περιοχή, δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{\rho = E \cdot H} \qquad (9)$$

και μετριέται σε (V/m) . (A/m) = Watt/m^2

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως θεώρημα του Poynting (Πούτινγκ), προς τιμή αυτού που την διατύπωσε.

Αντικαθιστώντας, βρίσκουμε ότι:

$$\mathbf{\rho = E^2/120\pi} \qquad (10)$$

Εφαρμογή 3: Σε συγκεκριμένο σημείο μετρούμε ένταση του μαγνητικού πεδίου ηλεκτρομαγνητικού κύματος Η = 1,5 A/m. Να προσδιοριστεί στο συγκεκριμένο σημείο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου Ε.

Λύση: *Ε = 377(Ω) . Η = 377(Ω) . 1,5(A/m) = 565,5 V/m*

Εφαρμογή 4: Για τις τιμές του προηγούμενου παραδείγματος, να προσδιοριστεί στο ίδιο σημείο η πυκνότητα ισχύος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Λύση: *Από την σχέση (9), αντικαθιστώντας βρίσκουμε : ρ = 848,25 W/m^2*

3.7.3 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Στην φυσική αποδεικνύεται, ότι η ακτινοβολούμενη ενέργεια στο χώρο είναι σημαντική, όταν οι διαστάσεις των κυκλωμάτων, και ιδιαίτερα της κεραίας που ακτινοβολεί, είναι ίδιου μεγέθους με το μήκος κύματος. Αυτό το σχολιάσαμε και σε προηγούμενη παράγραφο. Τα χρησιμοποιούμενα λοιπόν επαγωγικά κυκλώματα και οι κεραίες είναι μικρότερες στις υψηλότερες συχνότητες.

Η μελέτη της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν είναι εύκολο πρόβλημα. Στο κενό, χωρίς εμπόδια, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται σφαιρικά και η ισχύς του αποσβήνεται αντιστρόφως ανάλογα προς το τετράγωνο της απόστασης. Δηλαδή, κάθε φορά που διπλασιάζεται η απόσταση από την πηγή (κεραία), το ηλεκτρομαγνητικό κύμα γίνεται τέσσερες φορές ασθενέστερο.

Όταν υπάρχουν εμπόδια, η συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος θυμίζει αυτήν του φωτός. Υπόκειται σε ανακλάσεις, απορροφήσεις, δημιουργεί σκιάσεις έντονες ή λιγότερο έντονες κ.λ.π. Η φυσική και η ραδιοηλεκτρολογία μελετά λεπτομερώς τα φαινόμενα που εξαρτώνται πάρα πολύ από τη συχνότητα ή το μήκος κύματος. Για να διευκολυνθεί η μελέτη της συμπεριφοράς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, οι επιστήμονες έχουν διαιρέσει το **«ηλεκτρομαγνητικό φάσμα»** – όπως συνήθως το ονομάζουμε – σε ζώνες, ανάλογα με τη συχνότητα του κύματος. Αυτές εκτείνονται από τις μικρές συχνότητες, έως το φως και τις ακτίνες Χ, που χρησιμοποιούνται στην ιατρική για τις ακτινογραφίες και φαίνονται στον πίνακα Α, που ακολουθεί:

Ζώνη συχνοτήτων	Ονοματολογία	Συμβολισμός
100 Hz - 3 kHz	Άκρως Χαμηλές Συχνότητες	ELF
3 kHz - 30 kHz	Υπέρμακρα	VLF
30 kHz - 300 kHz	Μακρά	LF
300kHz - 3 MHz	Μεσαία	MF
3MHz - 30MHz	Βραχέα	HF
30 MHz - 300MHz	Υπερβραχέα	VHF
300MHz - 3 GHz	Δεκατομετρικά Μικροκύματα	UHF
3 GHz - 30GHz	Εκατοστομετρικά Μικροκύματα	SHF
30 GHz - 300GHz	Χιλιοστομετρικά Μικροκύματα	EHF
300GHz - 10^{14}	Υπέρυθρες ακτίνες	IR
10^{14} - 10^{16}	Ορατό φως	
10^{16} - 10^{18}	Υπεριώδεις ακτίνες	UV
10^{18} -	Ακτίνες Χ	X

Πίνακας Α: *Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και ονοματολογία*

➢ Στις ραδιοεπικοινωνίες σήμερα χρησιμοποιούνται περισσότερο οι συχνότητες από 100 kHz έως και 60 GHz (1 GHz = 10^9Hz). Όσο αναπτύσσεται η τεχνο-

λογία, γίνεται προσπάθεια να εκμεταλλευτούμε συχνότητες ακόμα υψηλότερες, έως και 300 GHz.

Στις οπτικές επικοινωνίες, όπου το μέσο μετάδοσης είναι ειδικό γυάλινο καλώδιο, δηλαδή η οπτική ίνα, αξιοποιείται το υπέρυθρο (IR) και το ορατό φάσμα του φωτός.

Στον πίνακα Β δίνονται αναλυτικά οι ζώνες που χρησιμοποιούνται στις ραδιοεπικοινωνίες με την ονομασία τους και τις συχνότητες που αντιστοιχούν.

Συμβολισμός	Συχνότητες
LF	30 - 300 kHz
MF	300 - 3000 kHz
HF	3 - 30 MHz
VHF	30 - 300 MHz
UHF	300 - 1000 MHz
L	1 - 2 GHz
S	2 - 4 GHz
C	4 - 8 GHz
X	8 - 12 GHz
Ku	12 - 18 GHz
K	18 - 27 GHz
Ka	27 - 40 GHz

Πίνακας Β: *Οι ζώνες στις ραδιοεπικοινωνίες (κατά IEEE*)*

(* IEEE: International Electrical Electronic Engineering)

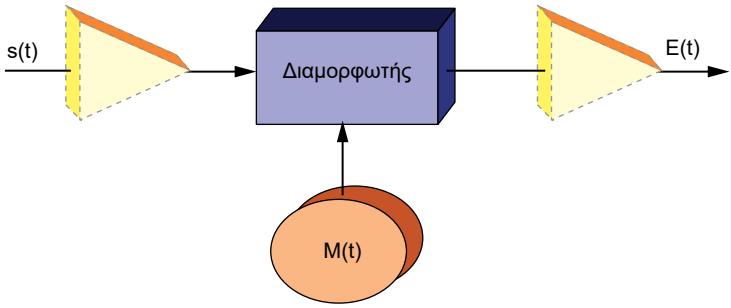
3.8 Διαμορφώσεις

3.8.1 Γενικά περί διαμορφώσεων

Στην παράγραφο 3.6 είδαμε ότι το βασικό σήμα που αντιπροσωπεύει την πληροφορία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι απ' ευθείας μεταδόσιμο. Αυτό τεκμηριώθηκε με διάφορα παραδείγματα.

Για τη μετάδοση ενός βασικού σήματος, καταφεύγουμε στην αξιοποίηση (χρήση) ενός σήματος πολύ μεγαλύτερης συχνότητας, που παίζει το ρόλο του μεταφορέα, γι' αυτό το ονομάζουμε και φέρον σήμα. Σε κάποιο από τα χαρακτηριστικά μεγέθη του φέροντος (πλάτος, συχνότητα, φάση) θα απεικονίσουμε το βασικό σήμα. Το φέρον επιλέγεται με χαρακτηριστικά που το προσαρμόζουν στο κανάλι μετάδοσης και στη συγκεκριμένη εφαρμογή που θέλουμε να κάνουμε.

Αυτή τη διαδικασία την ονομάζουμε διαμόρφωση και γενικά περιγράφεται στο σχήμα 3.8.1.



Σχήμα 3.8.1: *Γενικά η διαδικασία της διαμόρφωσης*

Το κεφάλαιο των διαμορφώσεων είναι πολύ μεγάλο. Διακρίνουμε πολλές μεθοδολογίες, που εξαρτώνται από τη μορφή που έχει το βασικό σήμα s(t) και την επιλογή που κάνουμε για το φέρον, για το οποίο στην συνέχεια θα χρησιμοποιούμε πάντα το συμβολισμό M(t). Συνοπτικά αναφέρουμε:

- Αναλογικές διαμορφώσεις: Όταν το s(t) είναι αναλογικό σήμα και το φέρον M(t) είναι ημιτονικό σήμα.

- Παλμικές διαμορφώσεις: Όταν το s(t) είναι αναλογικό και το φέρον M(t) είναι παλμικό σήμα υψηλής συχνότητας.

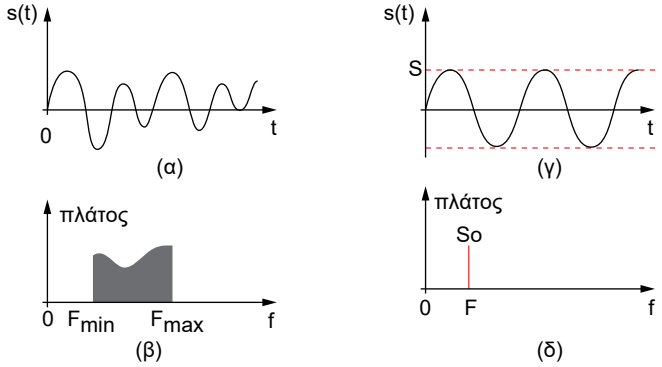
- Ψηφιακές διαμορφώσεις: Όταν το s(t) είναι ψηφιακό (π.χ. προέρχεται από υπολογιστή).

Αυτή η κατάταξη είναι ενδεικτική και εξειδικεύεται περαιτέρω. Εδώ θα μας απασχολήσουν οι αναλογικές διαμορφώσεις. Στο ένατο κεφάλαιο του βιβλίου θα γίνει εισαγωγή στις παλμικές και ψηφιακές διαμορφώσεις, που με την ανάπτυξη της τεχνολογίας κερδίζουν συνεχώς έδαφος.

3.8.2 Αναλογικές διαμορφώσεις

Για να διευκολυνθούμε στην ανάλυση, ας ξαναπροσδιορίσουμε το πρόβλημα.

➢ Διαθέτουμε προς αποστολή το βασικό σήμα s(t), το οποίο χαρακτηρίζεται από τις χρονικές του μεταβολές (παρατήρηση στον παλμογράφο, σχήμα 3.8.2α) και τη φασματική του ζώνη από F_{min} έως F_{max} (παρατήρηση στον αναλυτή φάσματος, σχήμα 3.8.2β). Καθώς τις περισσότερες φορές η συχνότητα Fmin έχει μικρή τιμή, την θεωρούμε για απλοποίηση μηδενική. Στα σχήματα 3.8.2(γ) και (δ) δίνονται οι ίδιες εικόνες, όταν το σήμα s(t) είναι ημίτονο, προερχόμενο από μια εργαστηριακή γεννήτρια.



Σχήμα 3.8.2: *Παλμογραφική και φασματική εικόνα ενός σήματος. (α,β) Τυχαίου σήματος. (γ,δ) Ημιτονικού σήματος*

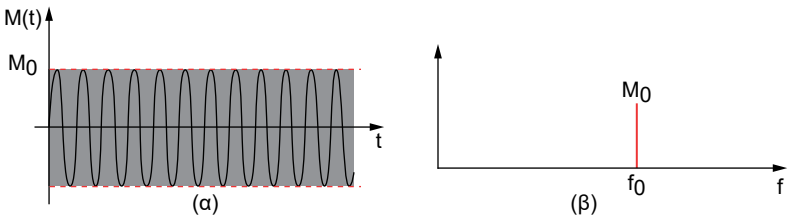
Θα χρησιμοποιήσουμε φέρον M(t) ημιτονικό, συχνότητας f_o, που ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\mathbf{f_o > F_{max}}$$

$$\mathbf{M(t) = M_o \cdot \sin(\omega_o \cdot t + \varphi_o) = M_o \cdot \sin(2\pi f_o t + \varphi_o),} \qquad (11)$$

όπου M_o το πλάτος, ω_o η κυκλική συχνότητα, f_o η συχνότητα και φ_o η αρχική φάση του σήματος.

Στα σχήματα 3.8.3 (α) και (β) δίνονται η παλμογραφική εικόνα και η φασματική ακτίνα του φέροντος.



Σχήμα 3.8.3: *Παλμογραφική εικόνα και φασματική εικόνα του αδιαμόρφωτου φέροντος M(t)*

Στη συνέχεια, σε όλο το βιβλίο, το **M(t)** θα το αποκαλούμε απλά **φέρον**. Το **s(t)** θα το αποκαλούμε **διαμορφώνον σήμα ή σήμα διαμόρφωσης**. Επίσης πάντα η συχνότητα του φέροντος θα συμβολίζεται με μικρό f. Η συχνότητα ή οι συχνότητες του διαμορφώνοντος σήματος με μεγάλο F.

Το σήμα που προκύπτει από τη διαμόρφωση θα το συμβολίζουμε πάντα **E(t)** και θα το αποκαλούμε **διαμορφωμένο φέρον**.

3.8.2.1 Διαμορφώσεις πλάτους

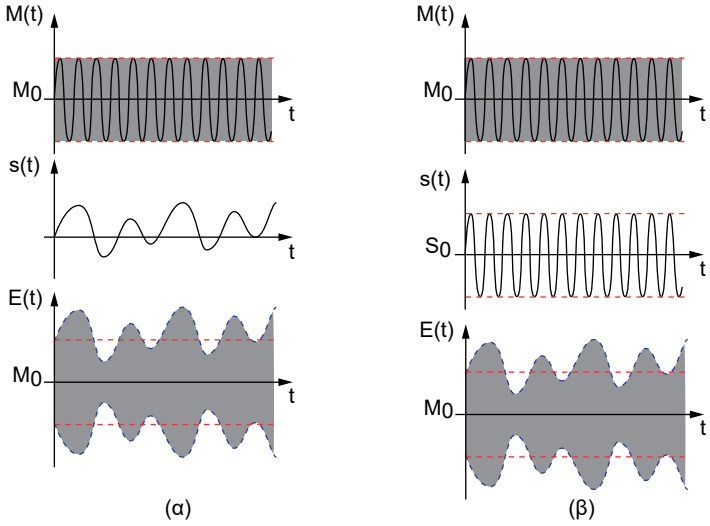
Α) Διαμόρφωση πλάτους ΑΜ με φέρον

Στην διαμόρφωση πλάτους το βασικό σήμα s(t) απεικονίζεται (επηρεάζει) στο πλάτος του σήματος M(t). Δηλαδή:

$$\mathbf{E(t) = [M_o + s(t)]\cdot sin(\omega_o.t)} \qquad (12)$$

Θεωρήσαμε ότι φ_o=0, δηλαδή M(t)=0 με την έναρξη της παρατήρησης (t = 0).

Στην έξοδο του διαμορφωτή το διαμορφωμένο φέρον E(t) έχει τη μορφή του σχήματος 3.8.4. Το (α) αναφέρεται στην περίπτωση που το s(t) είναι τυχαίο. Το (β) αναφέρεται στην περίπτωση που το s(t) είναι ημιτονικό.

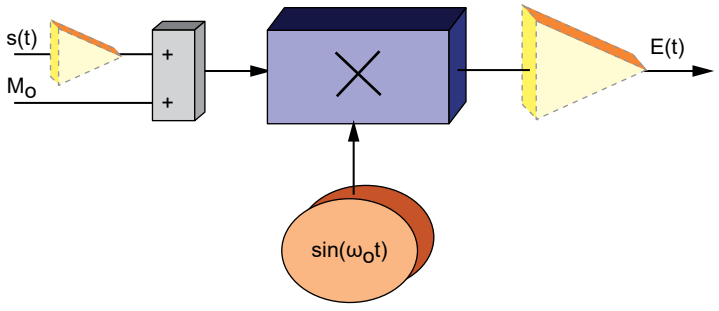


Σχήμα 3.8.4: Παλμογραφικές εικόνες σήματος διαμορφωμένου κατά πλάτος. (α) Με τυχαίο σήμα. (β) Με ημιτονικό σήμα διαμόρφωσης.

Από το σχήμα προκύπτει ότι πρέπει πάντοτε:

$$\mathbf{|s(t)| < M_o \text{ ή } S_o < M_o} \qquad (13)$$

Ένα απλό κύκλωμα διαμόρφωσης ΑΜ χωρίς σχολιασμούς δίνεται στο σχήμα 3.8.5



Σχήμα 3.8.5: Δομικό διάγραμμα διαμορφωτή ΑΜ

Για να έχουμε πλήρη γνώση του τι συνέβη με τη διαδικασία της διαμόρφωσης, πρέπει να αναζητήσουμε τη φασματική ζώνη του σήματος που προέκυψε. Δηλαδή, να αναζητήσουμε τι θα δούμε στην οθόνη του αναλυτή φάσματος, όταν συνδεθεί στην είσοδό του το διαμορφωμένο φέρον E(t). Αυτό είναι απαραίτητο, γιατί πρέπει να μεριμνήσουμε, ώστε το φάσμα που προέκυψε να μην αλλοιωθεί καθόλου στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Πρέπει να φτάσει στο δέκτη διατηρώντας πλήρως τη φυσιογνωμία του, ώστε με την αντίστροφη διαδικασία, την αποδιαμόρφωση, να αναζητήσουμε πάλι το αρχικό σήμα s(t).

Για να προσδιορίσουμε τη φασματική ζώνη, πρέπει να αναλύσουμε τη σχέση (12). Για να διευκολυνθούμε, ας θεωρήσουμε την απλή περίπτωση όπου το s(t) είναι ημιτονικό:

$$\mathbf{s(t) = S_o \cdot \sin(\Omega t) = S_o \cdot \sin(2\pi F t)}$$

Έτσι έχουμε:

$E(t) = [M_o + S_o \sin(\Omega t)] \cdot \sin(\omega_o t) = M_o[1 + m\sin(\Omega t)] \cdot \sin(\omega_o t)$,

όπου $m = S_o / M_o$. Το μέγεθος m, που είναι μικρότερο από τη μονάδα είναι καθαρός αριθμός και ονομάζεται ποσοστό διαμόρφωσης. Μετριέται συνήθως ως ποσοστό επί τοις εκατό (%).

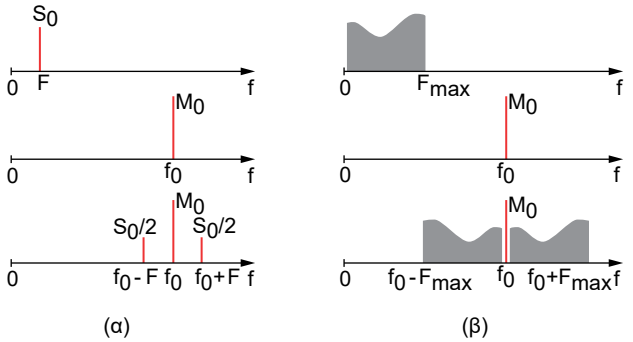
Επίσης:

$$\mathbf{E(t) = [M_o + S_o \sin(\Omega t)] \cdot \sin(\omega_o t) = M_o \sin(\omega_o t) + S_o \sin(\Omega t) \cdot \sin(\omega_o t) =}$$
$$\mathbf{= M_o \sin(\omega_o t) + (S_o/2)\cos[(\omega_o - \Omega)t] - (S_o/2)\cos[(\omega_o + \Omega)t]} \quad (14)$$

Δηλαδή, το διαμορφωμένο φέρον που προέκυψε αποτελείται (ισοδυναμεί) από τρεις φασματικές ακτίνες στις συχνότητες:

$$\mathbf{f_o,\ f_o - F \text{ και } f_o + F.}$$

Η πρώτη ακτίνα είναι η φασματική ακτίνα του φέροντος. Οι δύο άλλες ονομάζονται πλευρικές φασματικές ακτίνες και καταλαμβάνουν θέσεις συμμετρικές γύρω από την κεντρική συχνότητα f_o (σχήμα 3.8.6α). Στην περίπτωση που το s(t) είναι τυχαίο σήμα με φασματική ζώνη σαν αυτή του σχήματος 3.8.3γ, η φασματική ζώνη του διαμορφωμένου φέροντος εκτείνεται από f_o - Fmax έως f_o + Fmax, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.6β.



Σχήμα 3.8.6: *Τα φάσματα των σημάτων πριν και μετά την διαμόρφωση.*

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι με τη διαδικασία της διαμόρφωσης πλάτους (Amplitude Modulation: AM) το χαμηλό φάσμα του βασικού σήματος μεταφέρθηκε και κατέλαβε διπλάσια ζώνη συμμετρικά γύρω από τη συχνότητα του φέροντος.

Στη ραδιοφωνία με διαμόρφωση πλάτους διεθνώς έχει υιοθετηθεί για τα ακουστικά σήματα διαμόρφωσης ο περιορισμός:

$$\mathbf{F_{max} = 5\ kHz.}$$

Η ζώνη συχνοτήτων AM εκτείνεται από 560 kHz έως 1600 kHz (γνωστή ως μεσαία κύματα).

Εφαρμογή 1: Ένα βασικό σήμα της μορφής $s(t) = 10\sin(2\pi 10^3 t)$ διαμορφώνει φέρον $M(t) = 15\sin(2\pi 10^6 t)$. Να προσδιοριστεί το ποσοστό διαμόρφωσης και το φάσμα που προκύπτει (Οι συχνότητες δίνονται σε Hz, τα πλάτη σε Volt).

Λύση: *α) $m = S_o/M_o = 10/15 = 2/3 = 0{,}66$ ή 66%.*

β) Το φάσμα περιλαμβάνει δύο φασματικές ακτίνες στις συχνότητες 106-103 Hz = 999 kHz και $10^6 + 10^3$ Hz = 1001 kHz. Έχουν πλάτος $S_o/2 = 5$Volt.

Εφαρμογή 2: Ένα βασικό σήμα της μορφής $s(t) = 10\sin(2\pi 10^3 t) + 8\sin(2\pi 4.10^3 t)$ διαμορφώνει κατά πλάτος ένα φέρον $M(t) = 10\cos(2\pi 10^6 t)$. Να σχεδιαστεί το φάσμα.

Λύση: *Το σήμα s(t) περιέχει δύο φασματικές ακτίνες στις συχνότητες 1 kHz(με πλάτος 10V) και 4 kHz (με πλάτος 8 V). Η φασματική ακτίνα του φέροντος είναι στη συχνότητα 1 MHz και έχει πλάτος 10V.*

Με τη διαμόρφωση προκύπτουν συνολικά τέσσερις φασματικές ακτίνες. Δύο στις συμμετρικές συχνότητες 999 kHz και 1001 kHz με πλάτος 5 V και δύο στις συμμετρικές συχνότητες 996 kHz και 1004 kHz με πλάτος 4 Volt.

Η ισχύς του διαμορφωμένου φέροντος είναι το άθροισμα των ισχύων όλων των φασματικών ακτίνων του, δηλαδή:

$$\mathbf{P_{o\lambda} = P_1 + P_2 + P_0,}$$

όπου $P_o = M_o^2/2R_L$, η ισχύς της φασματικής ακτίνας του αδιαμόρφωτου φέροντος, υπολογισμένη με αντίσταση φόρτου R_L,

$P_1 = P_2 = (S_o/2)^2/2R_L = S_o^2/8R_L = m^2M_o^2/8R_L$, η ισχύς της κάθε πλευρικής φασματικής ακτίνας.

Η ολική ισχύς λοιπόν είναι:

$$\mathbf{P_{o\lambda} = (M_o^2/2R_L) \cdot (1 + m^2/2)} \qquad (15)$$

Καθώς η πληροφορία βρίσκεται στις δύο πλάγιες ζώνες, εύκολα καταλαβαίνουμε ότι για τη λήψη παρουσιάζει ενδιαφέρον η ολική ισχύς των δύο πλευρικών φασματικών ακτίνων. Από αυτή την άποψη η πραγματικά ωφέλιμη ισχύς του διαμορφωμένου σήματος είναι:

$$\mathbf{P_{\omega\varphi} = P_1 + P_2 = S_o^2/4R_L = m^2M_o^2/4R_L} \qquad (16)$$

Το λόγο της ωφέλιμης ισχύος ως προς την ολική ισχύ τον ονομάζουμε αποτελεσματικότητα της διαμόρφωσης D:

$$D = P_{\omega\varphi}/P_{o\lambda} = m^2/m^2+2 \quad (17)$$

Τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα την έχουμε, όταν m = 1, δηλαδή έχουμε διαμόρφωση 100%. Τότε:

$$D = 1/3$$

Διαπιστώνεται, δηλαδή, ότι με τη διαδικασία της διαμόρφωσης πλάτους έχουμε σπατάλη ισχύος, διότι μόνο το 1/3 της ολικής ισχύος είναι ωφέλιμη. Στην πράξη είναι ακόμα μικρότερη, γιατί δε χρησιμοποιούμε ποτέ ποσοστό διαμόρφωσης 100%, επειδή δημιουργεί παραμόρφωση του σήματος στο δέκτη. Οι συνήθεις τιμές του m κυμαίνονται από 0,75 (75%) έως 0,90 (90%).

Εφαρμογή 3: Να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότητα D μιας διαμόρφωσης ΑΜ, όταν το ποσοστό διαμόρφωσης είναι 70%.

Λύση: *m = 0,7, άρα D = m^2/m^2+2 = 0,197 ή 19,7%*

Εφαρμογή 4: Η ολική ισχύς ενός σήματος διαμορφωμένου κατά πλάτος με ποσοστό 80% είναι 200 Watt. Να προσδιοριστεί η ωφέλιμη ισχύς και η ισχύς κάθε πλάγιας ζώνης.

Λύση: *m=0,80, άρα D= 0,24.*

Επίσης D= $P_{\omega\varphi}/P_{o\lambda}$, $P_{\omega\varphi} = D \cdot P_{o\lambda}$ = 48 Watt.

Κάθε πλάγια ζώνη έχει ισχύ 48/2 = 24 Watt.

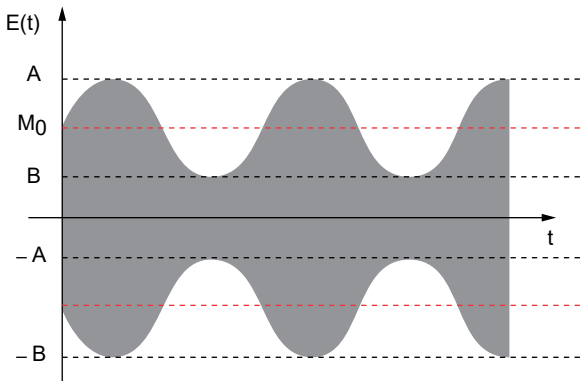
Μέτρηση του ποσοστού διαμόρφωσης στον παλμογράφο:

Παρατηρώντας το διαμορφωμένο σήμα στον παλμογράφο (σχήμα 3.8.7) μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε πειραματικά το ποσοστό διαμόρφωσης. Πράγματι έχουμε :

$A = M_o + S_o = M_o(1+m)$

$B = M_o - S_o = M_o(1-m)$

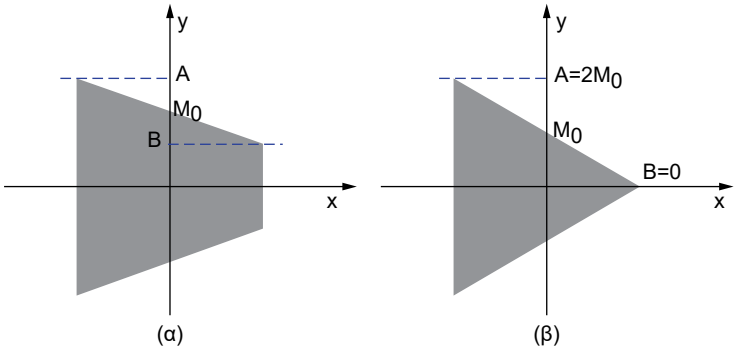
Άρα, $A/B = (1+m)/(1-m)$ από όπου $m= (A-B)/(A+B)$



Σχήμα 3.8.7: *Προσδιορισμός του ποσοστού διαμόρφωσης στον παλμογράφο*

Μετρώντας, δηλαδή, τη μέγιστη (Α) και την ελάχιστη τιμή (Β), υπολογίζουμε το ποσοστό διαμόρφωσης.

Αν έχουμε παλμογράφο που επιτρέπει παρατήρηση X-Y, τότε στέλνοντας το διαμορφωμένο φέρον E(t) στην είσοδο Y και το σήμα s(t) στην είσοδο X παρατηρούμε εικόνες σαν αυτές του σχήματος 3.8.8.



Σχήμα 3.8.8: *Διαγράμματα τραπεζίου (α) Για τυχαίο ποσοστό διαμόρφωσης. (β) Για ποσοστό διαμόρφωσης 100%*

Αυτές οι εικόνες, γνωστές σαν εικόνες τραπεζίου, επιτρέπουν εύκολη μέτρηση του ποσοστού διαμόρφωσης. Το σχήμα (α) αντιστοιχεί σε τυχαίο ποσοστό διαμόρφωσης. Το σχήμα (β) αντιστοιχεί σε ποσοστό 100%.

Εφαρμογή 5: Στον παλμογράφο στην εικόνα διαμορφωμένου ΑΜ φέροντος μετρούμε μέγιστη τάση 100V και ελάχιστη 25 V. Να προσδιοριστεί το ποσοστό διαμόρφωσης του φέροντος. Να προσδιοριστούν επίσης τα πλάτη του σήματος διαμόρφωσης και του αδιαμόρφωτου φέροντος, καθώς και η ολική ισχύς του σήματος.

Λύση: *m = (A-B)/(A+B) = (100-25)/(100+25) = 0,6 ή 60%.*

Επίσης $A = M_o+S_o$ *και* $B = M_o-S_o$ *από όπου* $M_o = A+B/2 = 62,5$ *Volt*

και $$S_o = A-B/2 = 37,5 \text{ Volt.}$$

Β) Διαμόρφωση πλάτους διπλής και απλής ζώνης χωρίς φέρον

Πιο πάνω είδαμε ότι στην κλασική διαμόρφωση ΑΜ η ωφέλιμη ισχύς είναι:

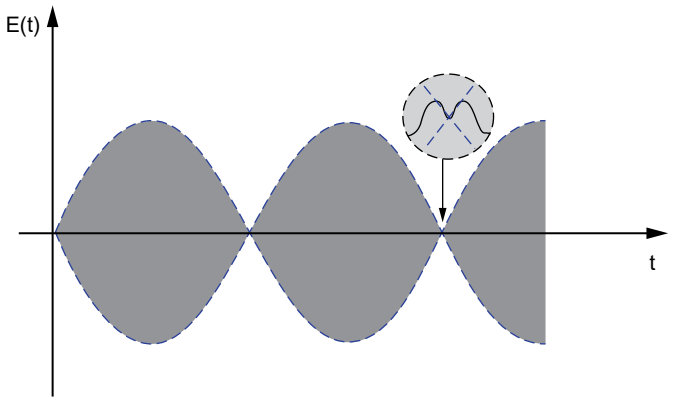
$$P_{ωφ} \leq P_{ολ}/3$$

Αυτή η παρατήρηση μας οδηγεί στη σκέψη μήπως με μια άλλη διαδικασία διαμόρφωσης πλάτους θα μπορούσαμε να έχουμε όλη την ισχύ του διαμορφωμένου σήματος ωφέλιμη.

Πράγματι, αν στην σχέση (12) δεν υπήρχε το M_o, τότε:

$$E(t) = s(t) \cdot \sin(\omega_o t) \qquad (18)$$

Δηλαδή, το σήμα διαμόρφωσης s(t) μόνο του παίζει το ρόλο του πλάτους του φέροντος σήματος. Η εικόνα του σήματος στον παλμογράφο δίνεται στο σχήμα 3.8.9.



Σχήμα 3.8.9: *Διαμόρφωση διπλής ζώνης χωρίς φέρον*

Εύκολα διαπιστώνουμε ότι στο φάσμα δεν υπάρχει φασματική συνιστώσα του φέροντος και ότι έχουμε δύο πλευρικές ζώνες.

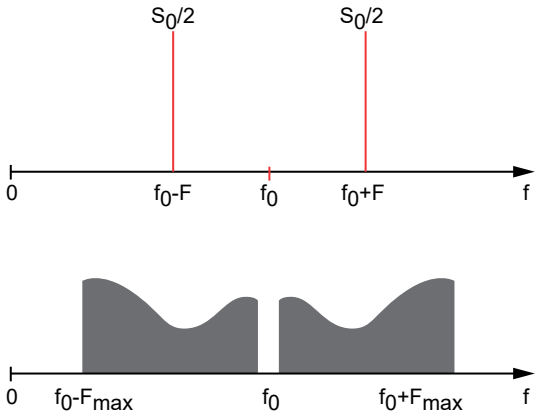
$E(t) = s(t) \cdot \sin(\omega_o t) = [S_o \sin(\Omega t)] \cdot [\sin(\omega_o t)] =$

$$\mathbf{= (S_o/2) \cdot \cos[(\omega_o - \Omega)t] - (S_o/2) \cdot \cos[(\omega_0 + \Omega)t]} \qquad (19)$$

Γενικεύοντας, στην περίπτωση που το φάσμα είναι τυχαίο, η φασματική εικόνα είναι αυτή του σχήματος 3.8.10. Πρόκειται για διαμόρφωση διπλής ζώνης χωρίς φέρον, γνωστή με τον όρο **DSBsc (Double Side Band, supressed carrier)**

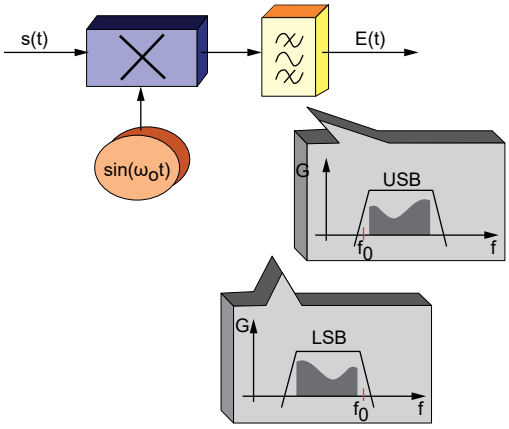
Η ισχύς του σήματος είναι όλη ωφέλιμη, δηλαδή:

$P_{ολ} = P_{ωφ}$. Άρα D = 1



Σχήμα 3.8.10: *Φάσμα διαμόρφωσης DSBsc*

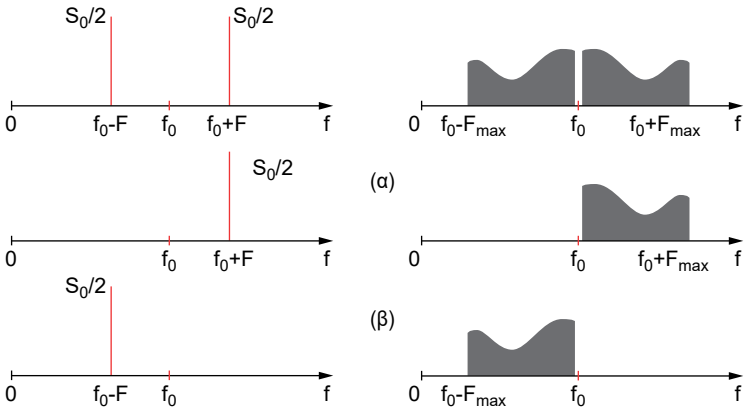
Στο σημείο αυτό και, αφού λύσαμε το πρόβλημα της σπατάλης που είχαμε στην ισχύ, ας κάνουμε μια ακόμα παρατήρηση. Οι δύο πλευρικές φασματικές ζώνες, που προήλθαν από το σήμα διαμόρφωσης, περιέχουν την ίδια πληροφορία. Θα μπορούσαμε λοιπόν να επιλέξουμε και να εκπέμψουμε μόνον τη μια από τις δύο, την πάνω ή την κάτω (σχήμα 3.8.11).



Σχήμα 3.8.11: *Επιλογή της μιας από τις δύο πλάγιες ζώνες*

Έτσι γίνεται οικονομία και στο φάσμα. Είναι η διαμόρφωση απλής ζώνης χωρίς φέρον ή **SSBsc (Single Side Band, supressed carrier)**, ή όπως την αποκαλούμε απλά, SSB. Ειδικότερα για την πάνω ζώνη χρησιμοποιείται ο όρος USB (Upper Side Band), ενώ για την κάτω χρησιμοποιείται ο όρος LSB (Lower Side Band).

Αυτό σημαίνει ότι στη ζώνη που καταλαμβάνει μια εκπομπή με διαμόρφωση ΑΜ τώρα μπορούν να υπάρξουν δύο εκπομπές SSB (σχήμα 3.8.12).



Σχήμα 3.8.12: *Φάσμα διαμόρφωσης SSB. (α) USB (β) LSB.*

Στην περίπτωση της SSB διαμόρφωσης επίσης ισχύει:

$$\mathbf{P_{\omega\varphi} = P_{o\lambda}}$$

Έχει ενδιαφέρον να επανέλθουμε για λίγο στον υπολογισμό των ισχύων και να συγκρίνουμε τις περιπτώσεις των διαμορφώσεων AM και SSBsc.

Στην AM είδαμε ότι η μεγίστη τιμή της τάσης είναι:

$$\mathbf{M_o+S_o= M_o(1 +m) \leq 2S_o \text{ και}}$$

η μεγίστη ωφέλιμη ισχύς: $P_{\omega\varphi} = S_o2/4R_L$.

Αν στην διαμόρφωση SSB ενισχύσουμε το διαμορφωμένο σήμα έως την τιμή 2So, τότε η ισχύς της είναι:

$$\mathbf{P_{\omega\varphi} = P_{o\lambda} = (2S_o)^2/2R_L=2S_o^2/R_L}$$

Συγκρίνοντας τις ισχύες, έχοντας ως σημείο αναφοράς το ίδιο πλάτος σήματος, βλέπουμε ότι:

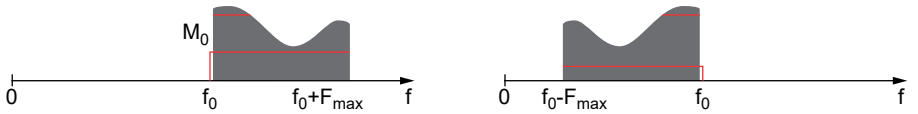
$$\mathbf{P_{\omega\varphi}(SSB) = 8 \,.\, P_{\omega\varphi}(AM)} \qquad (20)$$

Η ίδια σχέση σε dB εκφράζεται:

$$\mathbf{P_{\omega\varphi}(SSB) = 10log[8.P_{\omega\varphi}(AM)] = 10log8 + 10logP_{\omega\varphi}(AM) =}$$

$$\mathbf{= 10logP_{\omega\varphi}(AM) + 9\ db} \qquad (21)$$

Είναι άμεσα λοιπόν κατανοητό ότι η διαμόρφωση SSB είναι πολύ πιο αποτελεσματική από την AM. Αυτός είναι ο λόγος που η διαμόρφωση SSB χρησιμοποιείται πολύ στη ραδιοτηλεφωνία των βραχέων κυμάτων για μακρινές ζεύξεις, που απαιτούν μεγάλη ισχύ σήματος. Βεβαίως, όπως θα δούμε, στη λήψη του σήματος τα πράγματα έχουν δυσκολέψει πολύ. Στο δέκτη πρέπει να ξαναδημιουργήσουμε τοπικά τη φασματική συνιστώσα του φέροντος, αφού είναι απαραίτητη για την αποδιαμόρφωση του σήματος. Υπάρχει τέτοια διαδικασία, αναγέννησης του φέροντος, αλλά με τίμημα την πολυπλοκότητα του δέκτη. Ακριβώς, για να διευκολυνθεί η διαδικασία της αποδιαμόρφωσης, σε πολλές εφαρμογές υιοθετείται εκπομπή SSB, αλλά με το φέρον να μη λείπει εντελώς από το φάσμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.13.



Σχήμα 3.8.13: *Φάσμα διαμόρφωσης SSB με μερικώς κατασταλμένο το φέρον*

Στη ραδιοφωνία των μεσαίων (AM) δε χρησιμοποιείται η διαμόρφωση SSB, γιατί οι δέκτες πρέπει να είναι απλοί και φθηνοί.

Εφαρμογή 6: Η ολική ισχύς φέροντος διαμορφωμένου με SSBsc είναι 250 Watt. Να προσδιοριστεί η ωφέλιμη ισχύς του σήματος.

Λύση: *Όλη η ισχύς είναι ωφέλιμη, άρα 250 Watts*

Εφαρμογή 7: Η ζώνη των μεσαίων εκτείνεται από 531 kHz έως 1602 kHz. Με τον περιορισμό της φασματικής ζώνης των ακουστικών σημάτων έως 4,5 kHz, να προσδιοριστεί ο αριθμός των ραδιοφωνικών εκπομπών με ΑΜ διαμόρφωση που μπορούν να συνυπάρξουν στην παραπάνω ζώνη. Να προσδιοριστεί επίσης πόσες θα ήταν αυτές οι εκπομπές, αν είχε υιοθετηθεί διαμόρφωση SSBsc.

Λύση: *Το εύρος φάσματος στην ΑΜ είναι $2F_{max}$= 9 kHz. Άρα, N= (1602 – 531) / 9=119 ανεξάρτητοι ραδιοφωνικοί σταθμοί. Στην SSB το εύρος φάσματος είναι το μισό, άρα θα μπορούσαν να υπάρξουν 2. 104 = 208 ραδιοφωνικοί σταθμοί.*

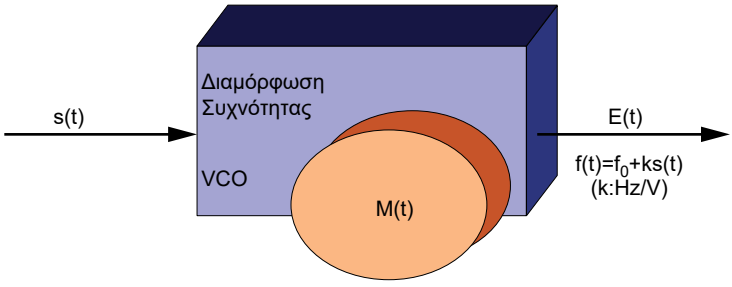
3.8.2.2 Διαμόρφωση συχνότητας (FM)

Η δεύτερη πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία στις αναλογικές διαμορφώσεις είναι **η διαμόρφωση συχνότητας** ή σε συντομογραφία FM, από τον αγγλικό όρο Frequency Modulation. Όπως υποδηλώνει και το όνομα, στην περίπτωση αυτή το σήμα της πληροφορίας s(t) αποτυπώνεται στη συχνότητα του φέροντος, το οποίο έχει σταθερό πλάτος.

Στη διαμόρφωση συχνότητας η βασική σχέση που περιγράφει τη διαδικασία είναι:

$$\mathbf{f(t) = f_o + k.s(t),} \qquad (22)$$

όπου f(t) η στιγμιαία συχνότητα του φέροντος.



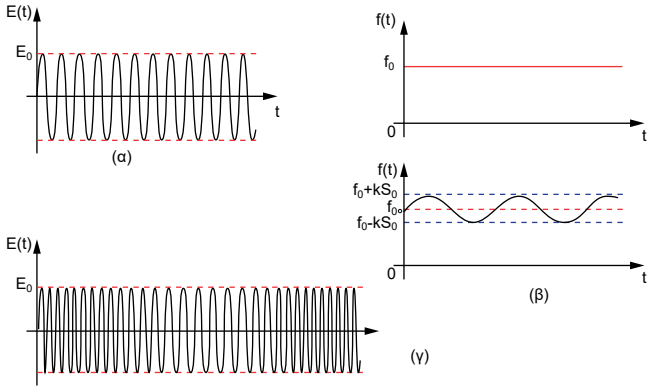
Σχήμα 3.8.14: *Διαδικασία διαμόρφωσης συχνότητας*

Αν στην είσοδο του διαμορφωτή (σχήμα 3.8.14) δεν εφαρμόσουμε σήμα s(t), τότε η συχνότητα του φέροντος είναι σταθερή fo και η εικόνα του στον παλμογράφο είναι αυτή που βλέπουμε στο σχήμα 3.8.15α.

Δηλαδή: $E(t) = M(t) = E_o.\sin(\omega_o t)$

Όταν όμως εφαρμόσουμε το σήμα s(t), τότε η συχνότητα του φέροντος μεταβάλλεται γύρω από την κεντρική συχνότητα fo στο ρυθμό του διαμορφώνοντος σήματος. Στο σχήμα 3.8.15β φαίνεται αυτή η μεταβολή, σε περίπτωση που το s(t) είναι ημιτονικό. Στο σχήμα 3.8.15γ δίνεται η μορφή που παίρνει το διαμορφωμένο φέρον E(t).

$$\mathbf{Έτσι, όταν\ s(t) = S_o\sin(\Omega t),\ τότε(t) = f_o + k.S_o.\sin(\Omega t)} \qquad (23)$$



Σχήμα 3.8.15: *Το φέρον (α) Χωρίς διαμόρφωση. (β) Η μεταβαλλόμενη συχνότητα. (γ) Το φέρον με διαμόρφωση συχνότητας*

Ο συντελεστής k χαρακτηρίζει το διαμορφωτή και τον τρόπο κατασκευής του, που θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Η συχνότητα f(t) μετριέται σε Hz, το σήμα s(t) μετριέται σε Volt. Είναι προφανές ότι ο συντελεστής k εκφράζει επίσης την κλίση του διαμορφωτή και μετριέται σε Hz/Volt ή συνήθως σε kHz/Volt.

Μετασχηματίζοντας τη σχέση (23) γράφουμε:

$$\mathbf{f(t) = f_o + \Delta f_{max}.sin(\Omega t)} \qquad (24)$$

Το μέγεθος Δfmax καλείται μέγιστη απόκλιση συχνότητας. Εκφράζει τη μέγιστη απομάκρυνση της συχνότητας προς τη μια ή την άλλη κατεύθυνση (όταν το ημίτονο πάρει τις τιμές 1 ή -1) από την κεντρική της τιμή fo και εξαρτάται από την ένταση (πλάτος) του βασικού σήματος So.

Αποδεικνύεται σε αυτή την περίπτωση ότι:

$$\mathbf{E(t) = E_o.sin[\omega_o t-(\Delta f_{max}/F).cos(\Omega t)] =}$$
$$\mathbf{= E_o.sin[\omega_o t-m_f.cos(\Omega t)]} \qquad (25)$$

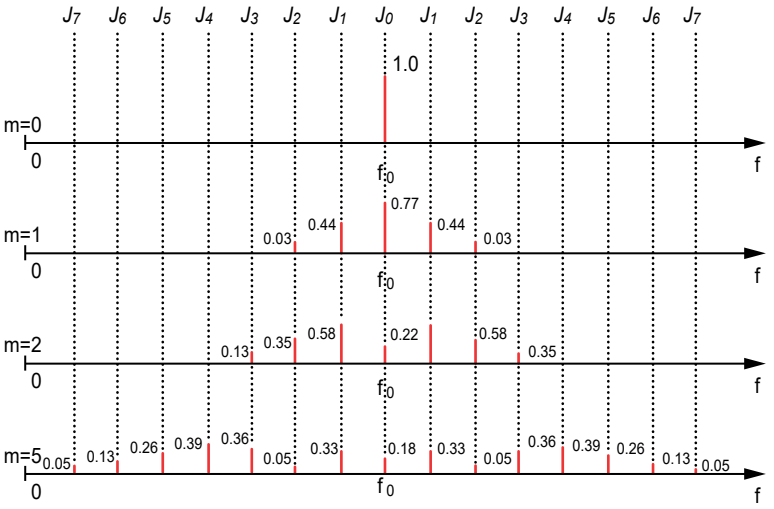
Ο λόγος $m_f = \Delta f_{max}/F = k.S_o/F$ ονομάζεται δείκτης διαμόρφωσης και είναι η βασική παράμετρος που χαρακτηρίζει μια διαμόρφωση FM.

Για να υπολογίσουμε τη φασματική ζώνη ενός φέροντος διαμορφωμένου κατά συχνότητα, πρέπει, όπως και στη διαμόρφωση πλάτους, να αναλύσουμε τη σχέση που δίνει το E(t). Η μαθηματική ανάλυση είναι σχετικά δύσκολη και δε θα μας απασχολήσει αναλυτικά. Θα περιοριστούμε μόνο στην εικόνα του φάσματος.

Η εικόνα του φάσματος, που βλέπουμε στον αναλυτή φάσματος, όταν στην είσοδο του στείλουμε το διαμορφωμένο E(t), περιέχει πολλές φασματικές ακτίνες. Κάνοντας το πείραμα για διαφορετικές τιμές του δείκτη διαμόρφωσης m, διαπιστώνουμε ότι ο αριθμός των φασματικών ακτίνων εξαρτάται από το m. Οι εμφανιζόμενες πλευρικές φασματικές ακτίνες καταλαμβάνουν ανά δύο συμμετρικές θέσεις ως προς τη συχνότητα του αδιαμόρφωτου φέροντος fo:

$$\mathbf{f_o+n.F \text{ και } f_o-n.F \text{ (n ακέραιος).}}$$

Στο σχήμα 3.8.16 απεικονίζεται η εικόνα του φάσματος για τιμές m_f = 1, m_f=2 και m_f=5. Οι αριθμοί που σημειώνονται δίνουν το ποσοστό του πλάτους της φασματικής ακτίνας ως προς την ακτίνα του αδιαμόρφωτου φέροντος E_o (όταν mf=0).



Σχήμα 3.8.16: *Το φάσμα στην FM για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης. (α) m_f = 1, (β) m_f =2, (γ) m_f = 5.*

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται επίσης η κατανομή των ποσοστών για διάφορες τιμές του m, ώστε, αν θέλουμε, να σχεδιάσουμε το φάσμα ή να το επιβεβαιώσουμε στον αναλυτή φάσματος.

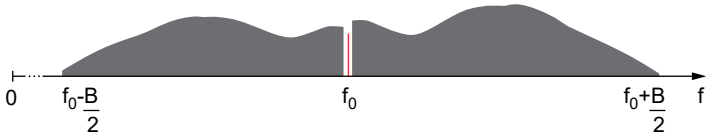
m	J_o	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9
0	1									
0,25	0,98	0,12								
0,50	0,94	0,24	0,03							
1,00	0,77	0,44	0,03							
1,5	0,51	0,26	0,23	0,01						
2,0	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03					
2,5	0,05	0,5	0,45	0,22	0,07	0,02				
3,0	0,26	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01			
4,0	0,40	0,07	0,36	0,43	0,28	0,13	0,05	0,02		
5,0	0,18	0,33	0,05	0,36	0,39	0,26	0,13	0,05	0,02	
9,0	0,09	0,24	0,14	0,18	0,27	0,06	0,20	0,33	0,30	0,21

Πίνακας κατανομής ποσοστού στις φασματικές ακτίνες (Συντελεστές Bessel)

Το συνολικό εύρος της φασματικής ζώνης (Bandwith) ενός FM σήματος δίνεται από τη σχέση του Κάρσον (Carson):

$$B = 2(\Delta f_{max} + F) = 2(m_f.F + F) = 2F.(mf+1) \quad (26)$$

Γενικεύοντας, όταν το σήμα s(t) δεν είναι ημιτονικό, αλλά τυχαίο με φάσμα (-Fmin, Fmax) (σχήμα 3.8.2), οι πλευρικές ζώνες αλληλοκαλύπτονται και το φάσμα δε διατηρεί πλήρως τη συμμετρία του (σχήμα 3.8.17).



Σχήμα 3.8.17: *Συνεχές φάσμα στην FM, όταν το σήμα διαμόρφωσης είναι τυχαίο.*

Το συνολικό εύρος ζώνης υπολογίζεται πάλι από τη σχέση του Carson, που διατυπώνεται για τη μέγιστη συχνότητα διαμόρφωσης Fmax του σήματος s(t):

$$B = 2(\Delta f_{max} + F_{max}) = 2F_{max}(m_f + 1),\ m_f = \Delta f_{max}/F_{max}$$

Συμπερασματικά, όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο δείκτης διαμόρφωσης τόσο μεγαλύτερο είναι το φασματικό εύρος του σήματος. Αποδεικνύεται μάλιστα ότι το μεγάλο φασματικό εύρος προστατεύει το σήμα από το θόρυβο και τις κάθε είδους παρενοχλήσεις στο κανάλι μετάδοσης. Έτσι, όπου έχουμε υψηλές απαιτήσεις καθαρότητας του σήματος, υιοθετούμε μεγάλο m_f ($m_f > 1$), όπως στη ραδιοφωνία, και μιλάμε για διαμόρφωση συχνότητας μεγάλου εύρους. Όπου αυτές οι απαιτήσεις είναι μικρότερες, όπως στη ραδιοτηλεφωνία, υιοθετούμε μικρό m_f ($m_f \leq 1$) και μιλάμε για διαμόρφωση FM στενού εύρους (NBFM: Narrow Band Frequency Modulation).

Στη ραδιοφωνία FM διεθνώς έχουν καθιερωθεί οι τιμές:

$$F_{max} = 15 \text{ kHz}$$
$$\Delta f_{max} = 75 \text{ kHz}$$

Άρα $m_f = 5$

Έτσι, B = 2(75 + 15) = 180 kHz

Για να υπάρχει ένα μικρό περιθώριο και να μην επικαλύπτονται ο ένας ραδιοφωνικός σταθμός από τον άλλο, οι συχνότητες (κεντρικές), που χορηγούνται με νόμο που πρέπει να τηρείται και να εφαρμόζεται αυστηρά, τοποθετούνται σε αποστάση τουλάχιστον 200 kHz και πλέον ο ένας από τον άλλο.

Η φασματική ζώνη της FM διαμόρφωσης είναι πολύ πλατύτερη από την αντίστοιχη της AM. Γι' αυτό και για να μπορέσουν να συνυπάρξουν σε δεδομένη ζώνη συχνοτήτων πολλοί ραδιοφωνικοί σταθμοί, αναγκαζόμαστε να χρησιμοποιούμε πολύ μεγαλύτερες συχνότητες. Η ζώνη της ραδιοφωνίας FM είναι διεθνώς από 88 MHz έως 108 MHz.

Η ισχύς του φέροντος πριν και μετά την αποδιαμόρφωση είναι η ίδια, γιατί το πλάτος του σήματος παραμένει σταθερό:

$$P_{o\lambda} = E_o^2/2R_L$$

Ο διαμορφωτής, δηλαδή, σε αντίθεση με την περίπτωση της ΑΜ, δε χορηγεί πρόσθετη ισχύ στο φέρον. Απλώς με τη διαμόρφωση η ισχύς κατανέμεται σε όλη τη φασματική ζώνη που προκύπτει. Ο δέκτης, για να αποδιαμορφώσει το διαμορφωμένο φέρον, πρέπει να λάβει όλη τη φασματική ζώνη του σήματος.

Εφαρμογή 8: Το φάσμα ενός ακουστικού σήματος εκτείνεται από 100 Hz έως 8 kHz. Ο δείκτης διαμόρφωσης m_f που αντιστοιχεί στη μεγίστη συχνότητα είναι 3. Να προσδιοριστεί το εύρος της φασματικής ζώνης μετά τη διαμόρφωση FM.

Λύση: *Από τον τύπο του Carson υπολογίζουμε:*

$B = 2 \cdot 8 \cdot (3 + 1)\ kHz = 64\ kHz.$

Εφαρμογή 9: Φέρον συχνότητας f_0= 90 MHz διαμορφώνεται κατά συχνότητα από σήμα $s(t) = 2\sin(2\pi 5.10^3 t)$ (V). Ο διαμορφωτής παρουσιάζει κλίση k= 15 kHz/Volt. Να προσδιοριστεί η μέγιστη απόκλιση συχνότητας και ο δείκτης διαμόρφωσης mf. Να προσδιοριστούν επίσης το εύρος του φάσματος και ο αριθμός των φασματικών ακτίνων στο φάσμα του διαμορφωμένου φέροντος.

Λύση: *α) $\Delta f_{max} = k.S_o = 15.2 = 30\ kHz$*

β) $m_f = 30.\ 10^3/5.10^3 = 6$

γ) $B = 2.5.\ 10^3.\ (6 + 1) = 70\ kHz$

δ) Ο αριθμός των πλευρικών φασματικών ακτίνων είναι:

$N = B/F = 2(m^f + 1) = 12$. Αν συνυπολογίσουμε και τη φασματική ακτίνα του φέροντος, έχουμε σύνολο 13.

Εφαρμογή 10: Πόσοι ραδιοφωνικοί σταθμοί FM μπορούν να υπάρξουν στη ζώνη συχνοτήτων από 88 έως 108 MHz στην ίδια γεωγραφικά περιοχή;

Λύση: *Θεωρώντας ότι η απόσταση μεταξύ των ραδιοφωνικών σταθμών είναι 200 kHz, τότε έχουμε:*

$N = (108 – 88)\ MHz / 0{,}2\ MHz = 100.$

3.8.3 Σύγκριση των διαμορφώσεων ΑΜ και FM

Εξετάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους τις διαμορφώσεις ΑΜ (και τα παράγωγά της) και FM. Γνωρίσαμε το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης και με τη χρονική εικόνα του τελικού φέροντος, αλλά και με τη φασματική του εικόνα. Με παραδείγματα τεκμηριώσαμε τις βασικές ιδιότητες των σημάτων και των διάφορων μεγεθών που υπεισέρχονται στη μελέτη αυτών των διαδικασιών. Είμαστε σε θέση τώρα να κάνουμε κάποιες συγκρίσεις με βάση αυτά τα αποτελέσματα:

α) Η ισχύς του πομπού στη διαδικασία ΑΜ (και SSB) δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το ποσοστό διαμόρφωσης m ή το πλάτος του σήματος διαμόρφωσης s(t). Στην FM διαμόρφωση η ισχύς εκπομπής είναι σταθερή. Αυτό σημαίνει ευκολία στην κατασκευή του πομπού. Στην FM δεν απαιτείται ενίσχυση ισχύος του s(t).

β) Στη διαμόρφωση ΑΜ η ισχύς της φασματικής συνιστώσας του φέροντος, που δεν είναι ωφέλιμη ισχύς, αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της ολική ισχύος του σήματος. Είναι πάντοτε πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ των πλευρικών ζωνών, που είναι η ωφέλιμη. Έχουμε, δηλαδή, σπατάλη ισχύος. Στη διαμόρφωση FM η αρχική ισχύς κατανέμεται σε όλο το φάσμα και η ισχύς της φασματικής συνιστώσας του φέροντος είναι ένα μέρος της ολικής ισχύος. Έχουμε λοιπόν καλύτερη αξιοποίηση της ισχύος στην FM από ό,τι στην ΑΜ.

γ) Στην περίπτωση της ΑΜ είμαστε υποχρεωμένοι, αν ενισχύσουμε το σήμα μετά τη διαμόρφωση, να χρησιμοποιήσουμε ενισχυτές που δεν εισάγουν παραμόρφωση, γιατί η πληροφορία μας βρίσκεται στις μεταβολές του πλάτους του σήματος. Αντίθετα στην FM, αν υπάρξει παραμόρφωση, δεν είναι καταστροφική, γιατί η πληροφορία μας βρίσκεται στη συχνότητα του φέροντος. Μπορούμε λοιπόν στην FM να χρησιμοποιήσουμε ως τελικό στάδιο ενισχυτή τάξης C, που έχει μεγάλη απόδοση.

δ) Μειονέκτημα στην FM μπορεί να θεωρηθεί το γεγονός ότι το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου φέροντος είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο εύρος της ΑΜ. Όμως όσον αφορά το θόρυβο, λόγω ακριβώς αυτού του μεγάλου εύρους, η FM παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα. Αποδεικνύεται ότι για τις συνήθεις τιμές του mf στην ραδιοφωνία, αυτό το πλεονέκτημα φτάνει σχεδόν 18 dB. Δηλαδή, ο λόγος «σήμα/θόρυβο» στην FM είναι 64 φορές καλύτερος σε σύγκριση με το λόγο «σήμα/θόρυβο» στην ΑΜ(18 dB= 10log64).

Γι' αυτό η FM διαμόρφωση και εκπομπή προσφέρεται, για να απολαύσουμε μουσική πολύ πιο καλής ποιότητας από ό,τι στην ΑΜ.

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

● Τηλεπικοινωνίες είναι το σύνολο των μέσων και των τεχνικών που επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ δύο ή περισσότερων ανταποκριτών σε οποιαδήποτε απόσταση, με υψηλή πιστότητα και αξιοπιστία.

● Οι πληροφορίες που απαιτούνται για την επικοινωνία είναι ακουστικές, οπτικές, σήματα δεδομένων από υπολογιστές κ.λ.π.

● Πάντοτε σε ένα σύστημα επικοινωνίας διακρίνουμε τον πομπό και το δέκτη. Ο πομπός είναι πάντοτε προσδιορισμένος. Ο δέκτης ή οι δέκτες μπορεί να είναι προσδιορισμένοι (τηλεφωνία) ή αόριστοι (ραδιοφωνία, τηλεόραση).

● Το μέσον επικοινωνίας ποικίλλει. Μπορεί να έχουμε ενσύρματη επικοινωνία, ασύρματη επικοινωνία μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή οπτική ίνα (φως).

● Τα αρχικά μηνύματα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα με κατάλληλους αισθητήρες (μικρόφωνο, φωτοκύτταρο). Υπάρχουν και οι αντίστροφοι αισθητήρες που, διεγειρόμενοι από το αντίστοιχο ηλεκτρικό μέγεθος, αποδίδουν πάλι τα φυσικά μηνύματα (μεγάφωνο, οθόνη).

● Τα ηλεκτρικά σήματα που αντιπροσωπεύουν (μηνύματα) πληροφορίες τα ονομάζουμε βασικά σήματα ή απλά σήματα.

● Τα σήματα χαρακτηρίζονται από την έντασή (ισχύ) τους και το φάσμα τους (φασματικό περιεχόμενο).

● Το απλούστερο σήμα, που στις τηλεπικοινωνίες το θεωρούμε σήμα αναφοράς και το χρησιμοποιούμε για να χαρακτηρίσουμε οποιοδήποτε άλλο σήμα ή σύστημα, είναι το ημιτονικό σήμα.

● Φάσμα ενός σήματος είναι το σύνολο των συχνοτήτων των ημιτονικών σημάτων, που, αν αθροιστούν, δίνουν ως αποτέλεσμα το αρχικό σήμα.

● Η έννοια του φάσματος είναι από τις σημαντικότερες στις τηλεπικοινωνίες.

● Πλήρη γνώση ενός σήματος έχουμε, όταν γνωρίζουμε και την χρονική του εξέλιξη (παρατήρηση στον παλμογράφο) και το φασματικό του περιεχόμενο.

● Έμμεσα από την έννοια του φάσματος ορίζεται το εύρος λειτουργίας (-Banbwith) των ηλεκτρονικών συστημάτων. Πρόκειται για τη ζώνη συχνοτήτων μέσα στην οποία το σύστημα επιτρέπει σε ένα σήμα που του επιβάλλεται στην είσοδο να διέλθει χωρίς αλλοίωση του φασματικού του περιεχομένου.

● Στους ενισχυτές και τα φίλτρα το εύρος ζώνης οριοθετείται από τις ακραίες συχνότητες, στις οποίες το ημιτονικό σήμα διερχόμενο από μέσα χάνει στην έξοδο το μισό της ισχύος του.

● Στα απλά ενσύρματα συστήματα μπορούμε να αντιμετωπίσουμε τη μετάδοση απ' ευθείας ενός βασικού σήματος. Μιλούμε τότε για μετάδοση βασικής ζώνης. Στις περισσότερες περιπτώσεις των τηλεπικοινωνιών, με βασικό παράδειγμα τις ασύρματες επικοινωνίες, απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία του σήματος, γνωστή με το όνομα διαμόρφωση.

● Με τη διαδικασία της διαμόρφωσης ‘φορτώνουμε’ ουσιαστικά το προς μετάδοση βασικό σήμα σε κάποιο από τα χαρακτηριστικά (πλάτος, συχνότητα) ενός άλλου σήματος, πολύ υψηλότερης συχνότητας, που το ονομάζουμε φέρον σήμα. Το φέρον επιλέγεται, ώστε να έχει καλή προσαρμογή στο κανάλι μετάδοσης.

● Στις αναλογικές επικοινωνίες το φέρον είναι ημιτονικό σήμα.

● Δύο βασικά είδη διαμόρφωσης συναντούμε στις αναλογικές επικοινωνίες, τις διαμορφώσεις πλάτους (AM με φέρον και SSBsc) και τη διαμόρφωση συχνότητας (FM).

● Στις διαμορφώσεις πλάτους το βασικό σήμα απεικονίζεται στο πλάτος του φέροντος. Στη διαμόρφωση συχνότητας απεικονίζεται στη συχνότητα του φέροντος.

● Οι διάφορες διαμορφώσεις παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες τόσο στη χρονική εμφάνιση του σήματος όσο και στην φασματική ζώνη του σήματος που προκύπτει.

● Στη διαμόρφωση συχνότητας γίνεται καλύτερη αξιοποίηση της ισχύος του πομπού. Το φάσμα όμως στην FM είναι πολύ ευρύτερο από ό,τι στην AM.

● Στην ασύρματη επικοινωνία το μέσο μετάδοσης είναι το κενό όπου διαδίδονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα (ραδιοεπικοινωνία). Το διαμορφωμένο φέρον μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

● Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι συνδυασμός ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, κάθετα μεταξύ τους και κάθετα προς την διεύθυνση μετάδοσης.

● Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο φάσμα στις ραδιοεπικοινωνίες εκτείνεται από τη συχνότητα των 100 kHz (LF) έως τη συχνότητα 60 GHz (μικροκύματα).

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Να αναφερθούν κάποια είδη πληροφοριών που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία.
2. Να δοθεί ο ορισμός του όρου Τηλεπικοινωνίες.
3. Να αναφερθούν διάφορα συστήματα μετάδοσης.
4. Τι ονομάζεται βασικό σήμα στις Τηλεπικοινωνίες;
5. Πότε χρησιμοποιείται ο παλμογράφος και πότε ο αναλυτής φάσματος στο εργαστήριο;
6. Να δοθεί ο ορισμός του περιοδικού σήματος. Να σχεδιαστεί ένα περιοδικό σήμα.
7. Πότε χρησιμοποιούνται τα φίλτρα;
8. Να δοθεί το φάσμα του τηλεφωνικού σήματος.
9. Ποια διαδικασία ονομάζεται διαμόρφωση;
10. Να δοθεί ο ορισμός του φέροντος σήματος.
11. Να δοθεί ο ορισμός του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.
12. Τι ονομάζεται μήκος κύματος;
13. Να δοθεί η ζώνη συχνοτήτων των βραχέων κυμάτων.
14. Τι είναι η διαμόρφωση AM;
15. Τι είναι η διαμόρφωση SSBsc;
16. Τι είναι η διαμόρφωση FM;
17. Να δοθεί η σχέση του Carson στην διαμόρφωση συχνότητας.
18. Τι είδους ενισχυτής ισχύος πρέπει να χρησιμοποιηθεί στην έξοδο πομπού με διαμόρφωση AM;
19. Τι είδους ενισχυτής ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από διαμόρφωση FM;
20. Να δοθούν τα χαρακτηριστικά και οι τιμές της διαμόρφωσης FM στην ραδιοφωνία.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Ένα περιοδικό σήμα έχει περίοδο 0,5 μs. Να προσδιοριστεί η συχνότητα του.

2. Η συχνότητα ενός περιοδικού σήματος είναι 60 kHz. Να προσδιοριστεί η περίοδος του σήματος.

3. Να δοθεί η έκφραση ενός ημιτονικού σήματος συχνότητας 100 kHz και πλάτους 20 V.

4. Να υπολογιστεί η ισχύς ημιτονικής τάσης, σε αντίσταση R= 50Ω, όταν το πλάτος του σήματος είναι 15 Volt.

5. Να σχεδιαστεί η απόκριση:

Του χαμηλοπερατού φίλτρου με $f_α$ = 2500 Hz.

Του φίλτρου ζώνης με $f_{α1}$ = 2000 Hz, $f_{α2}$ = 15000 Hz.

Του υψηλοδιαβατού φίλτρου με fα = 7 kHz.

6. Να υπολογιστεί το μήκος κύματος, όταν η συχνότητα του κύματος είναι f = 150 MHz.

7. Να υπολογιστεί η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε μέσον που παρουσιάζει σχετική διηλεκτρική σταθερά ε = 2,5.

8. Σε συγκεκριμένο σημείο μετρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου ηλεκτρομαγνητικού κύματος H = 1,2 A/m. Να προσδιοριστεί στο συγκεκριμένο σημείο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E.

9. Για τις τιμές του προηγούμενου προβλήματος, να προσδιοριστεί στο ίδιο σημείο η πυκνότητα ισχύος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

10. Ένα βασικό σήμα της μορφής $s(t. = 10\sin(2\pi.4.10^3t)$ διαμορφώνει φέρον $M(t. = 25\sin(2\pi10^6t)$. Να προσδιοριστεί το ποσοστό διαμόρφωσης και το φάσμα που προκύπτει (Οι συχνότητες δίνονται σε Hz, τα πλάτη σε Volt).

11. Ένα βασικό σήμα της μορφής $s(t) = 12\sin(2\pi10^3t) + 6\sin(2\pi4.10^3t$. διαμορφώνει κατά πλάτος ένα φέρον $M(t) = 15\cos(2\pi10^6t)$. Να σχεδιαστεί το φάσμα.

12. Να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότητα D μιας διαμόρφωσης AM, όταν το ποσοστό διαμόρφωσης είναι 90%.

13. Η ολική ισχύς ενός σήματος διαμορφωμένου κατά πλάτος με ποσοστό 60% είναι 150 Watt. Να προσδιοριστεί η ωφέλιμη ισχύς και η ισχύς κάθε πλάγιας ζώνης.

14. Στον παλμογράφο, στην εικόνα διαμορφωμένου ΑΜ φέροντος μετρούμε μέγιστη τάση 120 V και ελάχιστη 40 V. Να προσδιοριστεί το ποσοστό διαμόρφωσης του φέροντος. Να προσδιοριστούν επίσης τα πλάτη του σήματος διαμόρφωσης και του αδιαμόρφωτου φέροντος, καθώς και η ολική ισχύς του σήματος.

15. Η ολική ισχύς φέροντος διαμορφωμένου με SSBsc είναι 100 Watt. Να προσδιοριστεί η ωφέλιμη ισχύς του σήματος.

16. Το φάσμα ενός ακουστικού σήματος εκτείνεται από 500 Hz έως 6 kHz. Ο δείκτης διαμόρφωσης mf που αντιστοιχεί στη μέγιστη συχνότητα είναι 4. Να προσδιοριστεί το εύρος της φασματικής ζώνης μετά τη διαμόρφωση FM.

17. Φέρον συχνότητας fo = 100 MHz διαμορφώνεται κατά συχνότητα από σήμα $s(t) = 3\sin(2\pi 5.10^3 t)$ (V). Ο διαμορφωτής παρουσιάζει κλίση k= 10 kHz/Volt. Να προσδιοριστεί η μέγιστη απόκλιση συχνότητας και ο δείκτης διαμόρφωσης mf. Να προσδιοριστούν επίσης το εύρος του φάσματος και ο αριθμός των φασματικών ακτίνων στο φάσμα του διαμορφωμένου φέροντος.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι ενσύρματες και οι ασύρματες τεχνικές μετάδοσης πληροφορίας. Θα γνωρίσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους καθώς και το πού χρησιμοποιείται κάθε είδος.



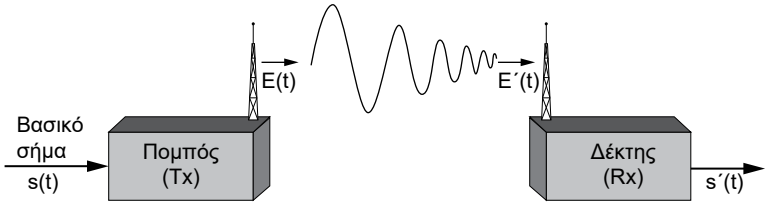
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

4.1 Ασύρματες τεχνικές. Φαινόμενα διάδοσης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο γνωρίσαμε την έννοια και τα βασικά χαρακτηριστικά του **ηλεκτρομαγνητικού κύματος**.

Στις **ραδιοεπικοινωνίες** το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελεί το μέσο μεταφοράς της πληροφορίας, που εκπέμπεται, ακτινοβολείται στο χώρο από την κεραία. Πολλές φορές το ηλεκτρομαγνητικό κύμα το ονομάζουμε **ραδιοκύμα**.

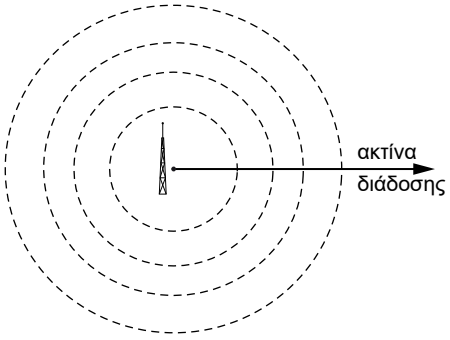


Σχήμα 4.1.1: Γενικό διάγραμμα Ραδιοεπικοινωνίας

Η κεραία λήψης στο δέκτη πρέπει να δεχτεί ένα μικρό ποσοστό ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, ώστε, αφού το ενισχύσει και το επεξεργαστεί κατάλληλα, να αποδώσει στην έξοδο του δέκτη το ωφέλιμο βασικό σήμα, δηλαδή την πληροφορία.

Η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο χώρο και η πλήρης μαθηματική μελέτη του φαινομένου είναι από τα δυσκολότερα κεφάλαια της φυσικής και της ραδιοηλεκτρολογίας.

Κεραίες υπάρχουν πολλών ειδών και θα εξεταστούν σε επόμενο κεφάλαιο. Αν θεωρήσουμε μια κεραία εκπομπής ως σημειακή πηγή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (μπορούμε να κάνουμε αυτή την υπόθεση σε αποστάσεις μακρινές από την κεραία), όταν δεν υπάρχουν εμπόδια, το κύμα διαδίδεται σφαιρικά όπως, τα κυκλικά κύματα της θάλασσας που παράγονται, όταν ρίξουμε ένα λιθαράκι στην επιφάνειά της.



Σχήμα 4.1.2: *Σφαιρική διάδοση του κύματος*

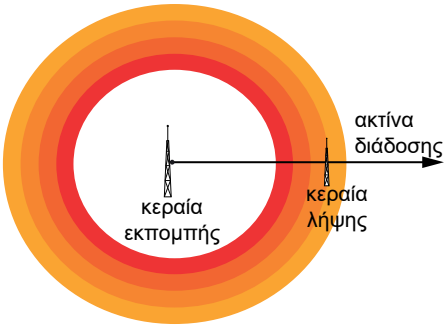
Η όλη συμπεριφορά του κύματος θυμίζει τη συμπεριφορά του φωτός. Δηλαδή όταν συναντάει εμπόδια, ενδεχομένως ανακλάται ή άλλοτε υπόκειται σε διάθλαση, όταν αλλάζει η πυκνότητα ή τα χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης, απορροφάται από διάφορα υλικά και εξασθενίζει δημιουργώντας μικρές ή μεγάλες σκιάσεις (έχουμε δηλαδή απόσβεση της ισχύος του) κλπ.

Η συνολική μελέτη αυτής της συμπεριφοράς είναι πολύ δύσκολη. Στους υπολογισμούς πρέπει να λάβουμε υπόψη πολλές παραμέτρους, όπως, για παράδειγμα, ποια εμπόδια ελαττώνουν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ποια υλικά το απορροφούν ελαττώνοντας την ισχύ του, ποιους δρόμους ακολουθεί στην πορεία του, και παράγοντες, όπως ποια είναι η μορφολογία και η αγωγιμότητα του εδάφους, αν μιλούμε για διάδοση στην ξηρά ή τη θάλασσα, τις μετεωρολογικές συνθήκες κ.α.

Αποδεικνύεται ότι βασικό μέγεθος που καθορίζει ουσιαστικά τη συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι η συχνότητα του (f) και το μήκος κύματός του λ. Αυτός είναι ο λόγος που οι επιστήμονες διαχώρισαν και κατέταξαν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε φασματικές ζώνες με ιδιαίτερη ονομασία, ώστε να διευκολυνθεί η μελέτη της συμπεριφοράς τους. Με τη γνώση της συμπεριφοράς των κυμάτων προκύπτουν οι κανόνες αξιοποίησής τους στις τηλεπικοινωνίες και οι εφαρμογές τους.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται και θεωρητικά μοντέλα διάδοσης, αλλά και σημαντικά πειραματικά αποτελέσματα, με τα οποία μπορούμε να προβλέψουμε μιά σωστή **ραδιοζεύξη** (επικοινωνία) μεταξύ πομπού και δέκτη.

Επανερχόμαστε στην σφαιρική, χωρίς εμπόδια, διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η κεραία εκπομπής θεωρείται σημειακή πηγή της εκπεμπόμενης ενέργειας, που εκπέμπει σφαιρικά και ομοιόμορφα, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 4.1.3: *Υπολογισμός της απόσβεσης του κύματος*

Σε απόσταση R από την κεραία εκπομπής η **ισχύς ανά μονάδα επιφανείας** είναι:

$$\rho = P_\varepsilon / S,$$

όπου P_ε η ισχύς εκπομπής στην κεραία σε Watt (Βατ),

$S = 4\pi R^2$ η επιφάνεια της σφαίρας ακτίνας R σε m^2 ή km^2.

Άρα: $$\rho = P_\varepsilon / 4\pi R^2 \quad (1)$$

Το μέγεθος ρ μετριέται σε Watt/ m^2 ή Watt/ km^2

Συνδυάζοντας το αποτέλεσμα με τη σχέση $\rho = E^2/120\pi$, που γνωρίσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος, τότε:

$$P_\varepsilon / 4\pi R^2 = E^2 / 120\pi$$

Τελικά το **ηλεκτρικό πεδίο E** που δημιουργείται σε απόσταση R από την κεραία και μετριέται σε Volt/m υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = \left(\sqrt{30 P_\varepsilon}\right) / R \quad (2)$$

Αποδεικνύεται επίσης ότι μια κεραία λήψης (όμοια με αυτή της εκπομπής) που βρίσκεται σε απόσταση R από την κεραία εκπομπής λαμβάνει μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας του κύματος, που δίνεται από την σχέση:

$$P_\lambda = (\lambda^2 / 4\pi) \cdot \rho = (\lambda^2 \cdot P_\varepsilon) / (4\pi \cdot R)^2 = (c^2 \cdot P_\varepsilon) / (4\pi \cdot f \cdot R)^2$$

Για να υπολογίσουμε τις **απώλειες του κύματος** στον ελεύθερο χώρο κατά τη διάδοσή του από την κεραία εκπομπής στην κεραία λήψης σε dB, έχουμε:

$$\alpha = 10 \log(P_\varepsilon / P_\lambda)$$

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε:

$$\alpha = (20\log R) + (20\log f) + 32{,}5 \qquad (3)$$

όπου R η απόσταση εκφρασμένη σε km,

f η συχνότητα εκφρασμένη σε MHz. Η σταθερά 32,5 προκύπτει μέσω του λογαρίθμου από τις μονάδες που χρησιμοποιήσαμε (km και MHz).

Υπογραμμίζεται ότι η παραπάνω σχέση ισχύει για διάδοση στον ελεύθερο χώρο χωρίς κανένα εμπόδιο, δηλαδή όταν οι κεραίες είναι τοποθετημένες πολύ ψηλά και έχουν οπτική επαφή μεταξύ τους.

Εφαρμογή 1: Η ισχύς εκπομπής μιας κεραίας που ακτινοβολεί σφαιρικά είναι 1000 W. Να προσδιοριστεί η ισχύς ανά μονάδα επιφανείας του σήματος σε απόσταση R= 100 km από την κεραία.

Λύση: *Από τη σχέση* $\rho = P_\varepsilon / 4\pi R^2$ *αντικαθιστώντας σε W και m λαμβάνουμε* $\rho = 80 \cdot 10^{-10} W/m^2$

Εφαρμογή 2: Να υπολογιστεί για τις ίδιες τιμές ισχύος και απόστασης από την κεραία το ηλεκτρικό πεδίο Ε.

Λύση: *Από τη σχέση (2) αντικαθιστώντας βρίσκουμε:*

$E = 1{,}73 \cdot 10^{-3}$ Volt/m= 1,73 mV/m

Εφαρμογή 3: Να υπολογιστούν σε dB οι απώλειες ραδιοκύματος από την κεραία εκπομπής έως την κεραία λήψης, όταν η συχνότητά του είναι f= 10 MHz και η απόσταση των κεραιών περίπου 40 km.

Λύση: *Αντικαθιστώντας στη σχέση (3) βρίσκουμε:*

$\alpha = 20\log 40 + 20\log 10 + 32{,}5 = 84{,}5$ *dB*

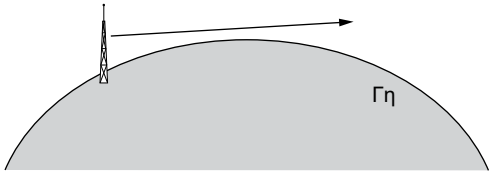
4.2 Τρόποι Διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

4.2.1 Γενικά

Στην πράξη κατά τη διάδοση του ραδιοκύματος παρεμβάλλονται εμπόδια. Ένα από τα συνηθέστερα είναι η ίδια η καμπυλότητα της γης. Στα επόμενα σχήματα και για διευκόλυνση στην κατανόηση των φαινομένων της διάδοσης συμβολίζουμε το διαδιδόμενο κύμα μόνο με την ακτίνα διάδοσής του.

Δύο βασικούς τρόπους εξετάζουμε για τη διάδοση των κυμάτων, οι οποίοι φαίνονται απλοποιημένα στα σχήματα 4.2.1 και 4.2.2.

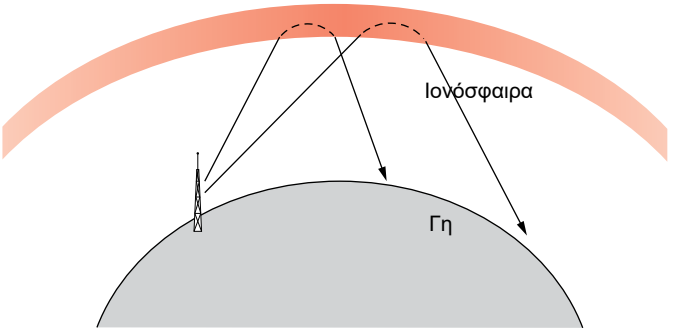
Ο πρώτος τρόπος αφορά την κυματική διάδοση, υποθέτοντας ότι το κύμα δεν απομακρύνεται πολύ από την επιφάνεια του εδάφους της γης.



Σχήμα 4.2.1: *Κύμα εδάφους*

Ο δεύτερος τρόπος αφορά την κυματική διάδοση, που στηρίζεται στην υπόθεση ότι το κύμα απομακρυνόμενο από την επιφάνεια του εδάφους ξαναεπιστρέφει σε αυτό, αφού υποστεί ανάκλαση (σκέδαση) στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, που ονομάζονται **«ιονόσφαιρα»** λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας ιονισμένων ατόμων, δηλαδή ηλεκτρικών φορτίων.

Η φυσική προβλέπει ότι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, όταν βρεθεί σε ατμόσφαιρα ηλεκτρικών φορτίων, υφίσταται εξασθένηση, η ακτίνα διάδοσής του διαθλάται (κάμπτεται) και κάτω από ορισμένες συνθήκες ανακλάται πάλι προς τη γη (αλλάζει πορεία).

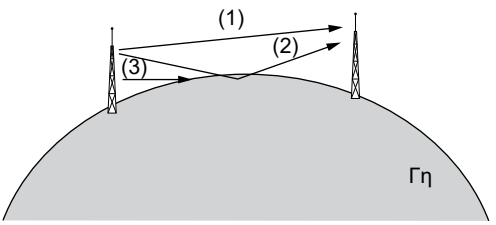


Σχήμα 4.2.2: *Ιονοσφαιρικό κύμα*

4.2.2 Κύματα εδάφους

Στην περίπτωση των **κυμάτων εδάφους** η ζεύξη κεραίας εκπομπής και κεραίας λήψης επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους:

- Με το **απ' ευθείας κύμα**, του οποίου η ακτίνα διάδοσης δεν εμποδίζεται από την καμπυλότητα της γης (1). Αυτή η κυματική ακτίνα μοιάζει να διαδίδεται στο κενό χωρίς εμπόδια. Επηρεάζεται μόνο από την απόσταση και τη διάχυση μέσα στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 4.2.3: *Συνιστώσες του κύματος εδάφους*

- **Κύμα από ανάκλαση στο έδαφος** (2).

Η διαδρομή αυτής της κυματικής ακτίνας προς την κεραία λήψης είναι σαφώς μεγαλύτερη. Στην κεραία λήψης έχουμε τη συμβολή των κυματικών ακτίνων του

άμεσου και του από ανάκλαση στο έδαφος σήματος. Καθώς το κύμα είναι διανυσματικό μέγεθος, η συμβολή είναι διανυσματική, με αποτέλεσμα την αύξηση ή ελάττωση της έντασης του σήματος ανάλογα με την σχετική διαφορά των δύο δρόμων (διαφορά φάσης των κυμάτων)

● Σημαντικό αποδεικνύεται **το κύμα επιφανείας** (3). Πρόκειται για μέρος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται σχεδόν εφαπτομενικά με το έδαφος. Το κύμα αυτό είναι σημαντικό, ιδιαίτερα όταν το έδαφος είναι αγώγιμο, και ακολουθεί την καμπυλότητα της γης. Εξασφαλίζει ζεύξη μεταξύ κεραιών όπου το απ' ευθείας κύμα δεν μπορεί να φτάσει λόγω εμποδίων.

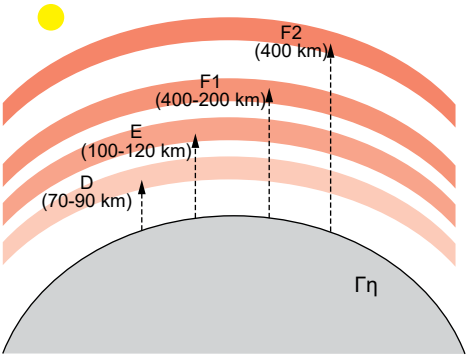
Τα πειράματα έχουν δείξει ότι η διάδοση των κυμάτων εδάφους εξαρτάται σημαντικά από τη συχνότητα και η ολική απόσταση κάλυψης εξαρτάται από τη μορφολογία και την αγωγιμότητα του εδάφους. Πράγματι, με μετρήσεις διαπιστώνεται ότι οι αποστάσεις ραδιοζεύξεων με κύματα εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερες στην επιφάνεια της θάλασσας (το νερό έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα) απ' ό,τι στην ξηρά.

Αλλες πειραματικές διαπιστώσεις είναι ότι όσο μικρότερη είναι η συχνότητα f του κύματος εδάφους (μεγαλύτερο μήκος κύματος) τόσο μικρότερη εξασθένηση υφίσταται λόγω απορρόφησης ενέργειας από το έδαφος και έχει καλύτερη συμπεριφορά προσαρμογής στη μορφολογία του εδάφους. Συμπερασματικά, αναφέρουμε ότι η διάδοση κυμάτων εδάφους με τους τρεις τρόπους, σε μεγάλες αποστάσεις απαιτεί μεγάλη σχετικά ισχύ εκπομπής.

4.2.3 Κύματα χώρου ή Ιονοσφαιρικά κύματα

Κύματα χώρου ή ιονοσφαιρικά κύματα είναι εκείνα, των οποίων οι κυματικές ακτίνες, αφού απομακρυνθούν από το έδαφος, ανακλώνται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (την ιονόσφαιρα) και επιστρέφουν, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2.2, προς τη γη. Αυτά τα κύματα επιτρέπουν κάλυψη μεγάλων αποστάσεων.

Η ιονόσφαιρα περιλαμβάνει τα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας που καταλαμβάνουν ύψη από 70 km από την επιφάνεια της γης έως και 400 km. Το όνομά της η ιονόσφαιρα το οφείλει στο γεγονός ότι αποτελείται από πολύ αγώγιμα ατμοσφαιρικά στρώματα λόγω της μεγάλης πυκνότητας «ιόντων» (φορτισμένων σωματιδίων) που περιέχουν. Τα φορτία αυτά οφείλονται στον ιονισμό των ατόμων από την ηλιακή ενέργεια.



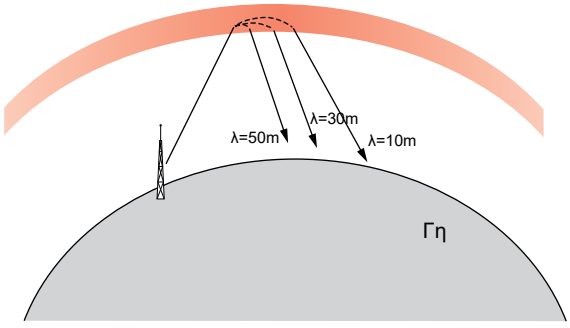
Σχήμα 4.2.4: *Τα στρώματα της ιονόσφαιρας*

Τα στρώματα της ιονόσφαιρας με τα σχετικά ύψη τους φαίνονται στο σχήμα 4.2.4.

Τα υψηλότερα στρώματα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ιονισμού. Το ύψος και το πάχος κάθε στρώματος επηρεάζονται σημαντικά από την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που τα ιονίζει. Γι' αυτό παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές μεταξύ ημέρας και νύχτας, (τη νύχτα εξασθενούν), ανάλογα με τις εποχές του έτους, χειμώνα, καλοκαίρι κλπ. Εξαρτώνται επίσης από τις ηλιακές μεταβολές (ηλιακές κηλίδες, καταιγίδες) και επηρεάζονται από μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της γης.

Είναι προφανές ότι οι μεταβολές αυτές των στρωμάτων της ιονόσφαιρας επηρεάζουν με τη σειρά τους σημαντικά το φαινόμενο της ανάκλασης των ραδιοκυμάτων σ' αυτά.

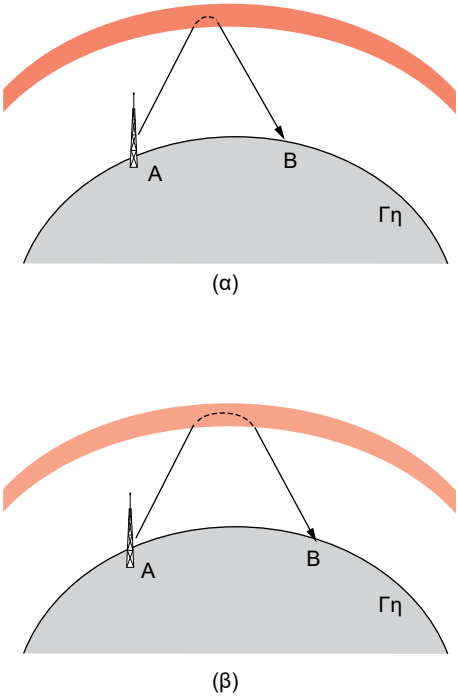
Καθώς το ηλεκτρομαγνητικό κύμα εισέρχεται στην ιονόσφαιρα, η ακτίνα διάδοσής του κυρτώνει (διαθλάται) όλο και περισσότερο όσο η πυκνότητα ιονισμού του στρώματος μεγαλώνει και κάτω από ορισμένες συνθήκες η κύρτωση της κυματικής ακτίνας είναι τέτοια, που τελικά το ραδιοκύμα επιστρέφει προς τη γη. Οι μελέτες και τα πειράματα έχουν δείξει ότι το φαινόμενο διευκολύνεται όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ιονισμού του στρώματος και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος λ (μικρότερη συχνότητα).



Σχήμα 4.2.5: *Επίδραση του μήκους κύματος στην ανάκλαση*

Αυτά τα συμπεράσματα επιβεβαιώνονται στο σχήμα 4.2.5.

Στα σχήματα 4.2.6 (α) και (β) σημειώνεται η διαφορά που υπάρχει μεταξύ ημέρας και νύχτας αντίστοιχα, όταν η πυκνότητα ιονισμού (λόγω έλλειψης ηλιακής ενέργειας) είναι μικρότερη.

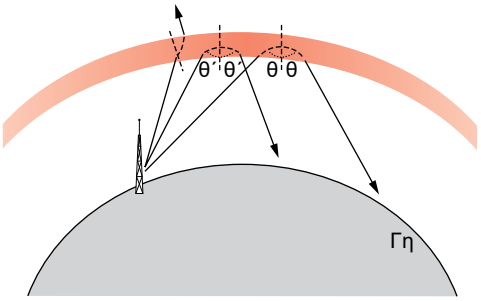


Σχήμα 4.2.6: *Επίδραση της πυκνότητας ιονισμού στην ανάκλαση*

Με αντίστροφο συλλογισμό καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ανάκλαση ραδιοκυμάτων μεγαλύτερης συχνότητας απαιτεί μεγαλύτερη πυκνότητα ιονισμού. Στα ανώτερα στρώματα της ιονόσφαιρας ανακλώνται ραδιοκύματα υψηλότερων συχνοτήτων. Στα κατώτερα στρώματα ανακλώνται οι χαμηλότερες συχνότητες.

Αν το ραδιοκύμα δεν υποστεί ανάκλαση στην ιονόσφαιρα, διέρχεται από αυτήν και καθώς αποσβήνεται χάνεται προς το άπειρο.

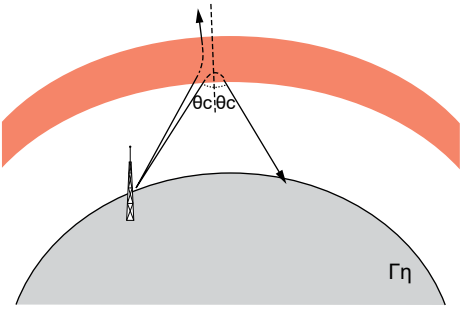
Η γωνία πρόσπτωσης θ της κυματικής ακτίνας (σχήμα 4.2.7) επίσης επηρεάζει το φαινόμενο της ανάκλασης. Αποδεικνύεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσπτωσης, τόσο διευκολύνεται το φαινόμενο.



Σχήμα 4.2.7: *Επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στην ανάκλαση*

Για δεδομένη πυκνότητα ιονισμού ως οριακή συχνότητα f_c, που χαρακτηρίζει το αντίστοιχο ιονοσφαιρικό στρώμα, θεωρείται η μέγιστη συχνότητα κύματος που προσπίπτοντας κάθετα στην ιονόσφαιρα μπορεί να ανακλαστεί. Αν η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος είναι μεγαλύτερη από την οριακή, το κύμα δεν ανακλάται, αλλά προσπερνά το αντίστοιχο στρώμα.

Ο συνδυασμός της συχνότητας του κύματος και της γωνίας πρόσπτωσης θ της ακτίνας οδηγούν στον ορισμό της μέγιστης χρήσιμης συχνότητας και της ελάχιστης οριακής απόστασης κάλυψης. Για δεδομένη συχνότητα εκπομπής, όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη από μια οριακή γωνία θ_c το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δεν ανακλάται και χάνεται (σχήμα 4.2.8).



Σχήμα 4.2.8: *Οριακή γωνία ανάκλασης και οριακή απόσταση ζεύξης*

Με αντίστοιχο συλλογισμό, όταν μας ενδιαφέρει η ζεύξη μεταξύ δύο σημείων Α και Β (Α: κεραία εκπομπής, Β: κεραία λήψης), τότε δεδομένης της απόστασης ΑΒ υπάρχει μια μέγιστη συχνότητα MUF που μπορεί να χρησιμοποιηθεί **(MUF: Maximum Usable Frequency)** και πέρα από την οποία δεν μπορούμε να πετύχουμε ραδιοεπικοινωνία σε μικρότερη απόσταση.

Δηλαδή: **f<MUF** (4)

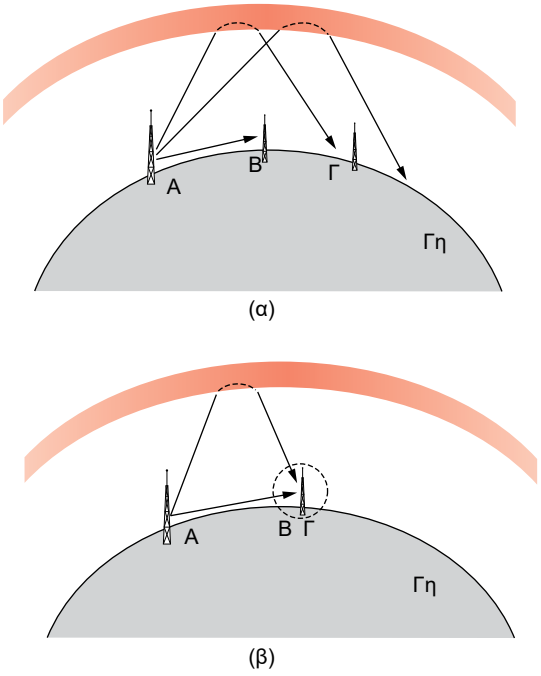
Η απόσταση που αντιστοιχεί στην τιμή της συχνότητας MUF ονομάζεται ελάχιστη οριακή απόσταση ζεύξης. Κυματικές ακτίνες, άρα κάλυψη, συναντούμε μακρύτερα από αυτή την απόσταση.

Το ραδιοκύμα κατά την διαδρομή του στα ιονοσφαιρικά στρώματα υφίσταται σημαντική εξασθένηση. Η εξασθένηση είναι μεγαλύτερη, όταν ο ιονισμός των στρωμάτων είναι μεγαλύτερος (για παράδειγμα, την ημέρα) και όσο η συχνότητα του κύματος είναι μικρότερη. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στον ορισμό της ελάχιστης συχνότητας εκπομπής **(LUF: Lowest Usable Frequency)** που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την εκπομπή, ώστε το κύμα να μην απορροφηθεί (αποσβεστεί) τελείως από την ιονόσφαιρα.

Μια ραδιοζεύξη με ιονοσφαιρικό κύμα είναι λοιπόν δυνατή για συχνότητες εκπομπής μεταξύ των τιμών LUF και MUF.

Οι διεθνείς οργανισμοί ραδιοεπικοινωνιών προσδιορίζουν και ανακοινώνουν τις τιμές των συχνοτήτων LUF και MUF με βάση τα ιονοσφαιρικά δεδομένα που επικρατούν κάθε φορά και που, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, έχουν σημαντική εξάρτηση από την ώρα, την εποχή, την ηλιακή δραστηριότητα και άλλους παράγοντες. Όσο και να φαίνεται περίεργο, κάτω από ορισμένες ιονοσφαιρικές συνθήκες συμβαίνει η προσδιοριζόμενη συχνότητα LUF να είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα MUF. Σ' αυτή την περίπτωση η συνθήκη (4) δεν μπορεί να ικανοποιηθεί και η ραδιοζεύξη με ιονοσφαιρικά κύματα είναι εντελώς αδύνατη.

Συμπερασματικά, συγκεντρώνοντας στο σχήμα 4.2.9 τα φαινόμενα διάδοσης του κύματος εδάφους και του ιονοσφαιρικού κύματος ή κύματος χώρου οδηγούμαστε σε δύο σημαντικές παρατηρήσεις:



Σχήμα 4.2.9: *Συνδυασμός κάλυψης από κύμα εδάφους και ιονοσφαιρικό κύμα*

Αν η ελάχιστη οριακή απόσταση πέρα από την οποία έχουμε κάλυψη με ιονοσφαιρικό κύμα είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη κάλυψη από το κύμα εδάφους, τότε υπάρχει **«μια ζώνη σιγής»** όπου δεν φτάνει το εκπεμπόμενο από τον πομπό σήμα (σχήμα 4.2.9α). Είναι πράγματι σύνηθες το φαινόμενο ένας πομπός ραδιοεπικοινωνίας να λαμβάνεται πολύ μακριά και να μην υπάρχει καθόλου λήψη σε ενδιάμεσες θέσεις.

● Αν η ελάχιστη οριακή απόσταση της ιονοσφαιρικής ζεύξης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την απόσταση κάλυψης του κύματος εδάφους (σχήμα 4.2.9β), τότε στην κεραία λήψης έχουμε τη συμβολή των δύο κυμάτων που ακολούθησαν διαφορετικούς δρόμους. Επειδή, όπως σημειώσαμε και με άλλη ευκαιρία, η συμβολή είναι διανυσματική, το αποτέλεσμα εξαρτάται από τη σχετική φάση των δύο σημάτων. Μπορεί να είναι αθροιστικό (εντονότερο σήμα) ή αφαιρετικό (ελαττωμένο σήμα). Είναι το φαινόμενο των **«διαλείψεων του σήματος (Fading)»**. Οι διαλείψεις δεν είναι σταθερό φαινόμενο, αλλά εξελίσσεται συνεχώς. Εξαρτάται από τους δρόμους των σημάτων, την κατάσταση της ιονόσφαιρας, από δευτερογενείς ενδεχομένως ανακλάσεις του κύματος σε εμπόδια, από τις μετεωρολογικές συνθήκες κ.α.

Εφαρμογή 1: Έχει ανακοινωθεί από την αρμόδια υπηρεσία ότι οι συχνότητες MUF και LUF είναι 22 MHz και 12 MHz αντίστοιχα. Ποια ή ποιες από τις παρακάτω συχνότητες μπορούμε να επιλέξουμε για ραδιοζεύξη με ιονοσφαιρικό κύμα.

(10 MHz, 8 MHz, 16 MHz, 25 MHz, 19 MHz)

Λύση: *Μπορούμε να επιλέξουμε τις 16 MHz και 19 MHz, που επαληθεύουν τη σχέση (4)*

Εφαρμογή 2: Κύμα συχνότητας f_1=20 MHz ή f_2=28 MHz ανακλάται ευκολότερα στην ιονόσφαιρα; Υποθέτουμε ότι και οι δύο συχνότητες ικανοποιούν τη συνθήκη (4).

Λύση: *Το κύμα με συχνότητα 20 MHz (μεγαλύτερο μήκος κύματος).*

4.3 Επίδραση της συχνότητας στη διάδοση

4.3.1 Γενικά

Αναφέρθηκε ήδη ότι ο τρόπος διάδοσης των ραδιοκυμάτων εξαρτάται σημαντικά από τη συχνότητα (f). Αυτό δικαιολογεί περαιτέρω διερεύνηση και λεπτομερέστερο σχολιασμό της συμπεριφοράς τους ανά ζώνη συχνοτήτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

4.3.2 Διάδοση των υπερμακρών (VLF) κυμάτων

Για τα υπερμακρά κύματα με συχνότητες από 10 kHz έως 30kHz (δηλαδή με μήκη κύματος από 30 km έως 10 km) το μήκος των χρησιμοποιούμενων κεραιών είναι πολύ μεγάλο. Η χρήση και η αξιοποίηση αυτών των συχνοτήτων στη ραδιοεπικοινωνία περιορίζεται σε ειδικές εφαρμογές ραδιοτηλεγραφίας μικρής ταχύτητας.

Το κύμα εδάφους σ' αυτές τις συχνότητες έχει μικρές απώλειες και διαδιδόμενο φτάνει σε αποστάσεις έως και 1000 km. Οι επιδόσεις του είναι καλύτερες πάνω από τη θάλασσα και παρουσιάζει κάποια διεισδυτικότητα στο νερό. Για τούτο αξιοποιείται σε επικοινωνία με υποβρύχια. Σε αποστάσεις μεγαλύτερες έχουμε κάλυψη μέσω του ιονοσφαιρικού κύματος που ανακλάται στα κατώτερα στρώματα της ιονόσφαιρας και γι' αυτό δεν έχει μεγάλη απόσβεση.

4.3.3 Διάδοση των μακρών (LF) κυμάτων

Έχουν συχνότητες 30 kHz έως 300 kHz και μήκη κύματος από 10 km έως 1 km. Η συμπεριφορά τους στη διάδοση είναι κατώτερη των προηγουμένων. Ο τερματικός εξοπλισμός (πηνία, κεραίες) όμως είναι μικρότερος, βολικότερος και φτηνότερος. Το κύμα εδάφους εξασθενεί συντομότερα όσο αυξάνεται η συχνότητα, παρά το γεγονός ότι παρουσιάζει προσαρμοστικότητα στη μορφολογία του εδάφους. Το ιονοσφαιρικό κύμα έχει απώλειες και παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές μεταξύ ημέρας και νύχτας. Ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της ημέρας οι ραδιοζεύξεις μεγάλων αποστάσεων δεν είναι αξιόπιστες.

Οι χρησιμοποιούμενες συνήθως κεραίες σ' αυτές τις συχνότητες έχουν οριζόντια κατευθυντικότητα. Αυτή η ζώνη συχνοτήτων αξιοποιείται περισσότερο σε στρατιωτικές εφαρμογές για επικοινωνία με πλοία.

4.3.4 Διάδοση των Μεσαίων κυμάτων (MF)

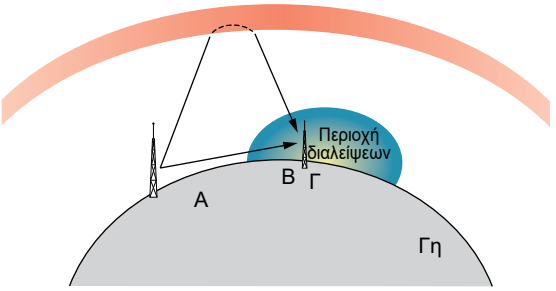
Πρόκειται για τη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 300 kHz έως 3000 kHz, με αντίστοιχα μήκη κύματος από 1 km έως 100m.

Στη ζώνη αυτή περιλαμβάνεται το τμήμα του φάσματος που χρησιμοποιείται στην κλασική ραδιοφωνία με διαμόρφωση πλάτους (AM) 531 kHz έως 1602-kHz (πολλοί αποκαλούν μόνο αυτό το τμήμα της ραδιοφωνίας μεσαία κύματα). Περιλαμβάνεται επίσης η ζώνη 1700 kHz έως 3000kHz, που χρησιμοποιείται για ραδιοεπικοινωνίες με διαμόρφωση πλάτους απλής ζώνης SSB για στρατιωτικές εφαρμογές.

Το κύμα εδάφους σ' αυτές τις συχνότητες φτάνει έως μερικές εκατοντάδες km. Αποσβήνεται περισσότερο όσο η συχνότητά του είναι μεγαλύτερη και η αγωγιμότητα του εδάφους μικραίνει. Η ζώνη που καλύπτεται από το κύμα εδάφους ονομάζεται **πρώτη ζώνη κάλυψης.**

Το κύμα χώρου την ημέρα δεν υπάρχει καθόλου λόγω πλήρους ουσιαστικά εξασθένησής του στα κατώτερα στρώματα της ιονόσφαιρας (ζώνη D). Τη νύχτα, καθώς η επίδραση της ζώνης D ελαττώνεται, εμφανίζεται το κύμα χώρου που διευρύνει την κάλυψη σχηματίζοντας τη **δεύτερη ζώνη κάλυψης** σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Γι' αυτό τον λόγο, την νύχτα ο δέκτης του ραδιοφώνου μας στη ζώνη των μεσαίων ΑΜ λαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος εκπομπών που δεν λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Αξίζει να επισημανθεί ένα ακόμη ιδιαίτερο φαινόμενο που εμφανίζεται στις συχνότητες αυτές. Η οριακή απόσταση του κύματος χώρου (υπενθυμίζεται ότι πρόκειται για την απόσταση από την οποία αρχίζει η κάλυψη από το ιονοσφαιρικό κύμα) είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την απόσταση κάλυψης του κύματος εδάφους (σχήμα 4.3.1). Ιδιαίτερα τις απογευματινές και πρώτες βραδινές ώρες, πριν το ιονοσφαιρικό κύμα γίνει πολύ ισχυρό, οι δύο ζώνες κάλυψης εφάπτονται και η συμβολή των κυμάτων, που ακολούθησαν διαφορετικούς δρόμους, δημιουργεί έντονες διακυμάνσεις του πεδίου, με αποτέλεσμα να έχουμε διαλείψεις (fading) ή παραμορφώσεις του σήματος στα όρια.



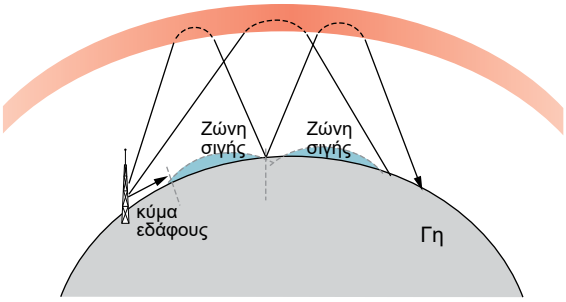
Σχήμα 4.3.1: *Συμβολή κυμάτων, φαινόμενο διάλειψης*

Έντονα προβλήματα διαλείψεων στις μεσαίες συχνότητες εμφανίζονται και στις μεγάλες αποστάσεις όπου επικρατεί πλήρως το ιονοσφαιρικό κύμα. Οι διαλείψεις αυτές οφείλονται στη συμβολή κυματικών ακτίνων, που ακολούθησαν διαφορετικές πορείες.

4.3.5 Διάδοση των Βραχέων κυμάτων (HF)

Πρόκειται για τα κύματα με συχνότητες, οι οποίες καλύπτουν τη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 3 MHz έως 30 MHz. Τα αντίστοιχα μήκη κύματος είναι από 100 m έως 10m. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως βραχέα κύματα ή δεκαμετρικά κύματα, λόγω ακριβώς της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος.

Τα βραχέα κύματα απορροφούνται έντονα από το έδαφος. Γι' αυτό το κύμα εδάφους αποσβήνεται γρήγορα και δεν έχει μεγάλη κάλυψη. Φτάνει με τις καλύτερες συνθήκες μόνο σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα, ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί μεγάλη ισχύς εκπομπής. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει στην περίπτωση των βραχέων το κύμα χώρου, που επιτρέπει καλύψεις σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, χιλιάδων χιλιομέτρων. Αυτός είναι ο λόγος που τα βραχέα επικράτησαν για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων.



Σχήμα 4.3.2: *Πολλαπλές ανακλάσεις βραχέων κυμάτων*

Στο σχήμα 4.3.2 φαίνεται η ιονοσφαιρική διάδοση των κυμάτων αυτών, τα οποία υπόκεινται άνετα σε διαδοχικές ανακλάσεις στο έδαφος και την ιονόσφαιρα αυξάνοντας την ακτίνα κάλυψης. Η ιονοσφαιρική διάδοση σ' αυτή την ζώνη συχνοτήτων μελετήθηκε λεπτομερώς από τους επιστήμονες. Όλες οι παρατηρήσεις που έγιναν στην παράγραφο 4.2.3 προέρχονται από πειράματα που έγιναν στην περιοχή των βραχέων κυμάτων και οδήγησαν στους ορισμούς της μέγιστης και ελάχιστης χρησιμοποιήσιμης συχνότητας (MUF και LUF) για να έχουμε επιτυχή ραδιοζεύξη.

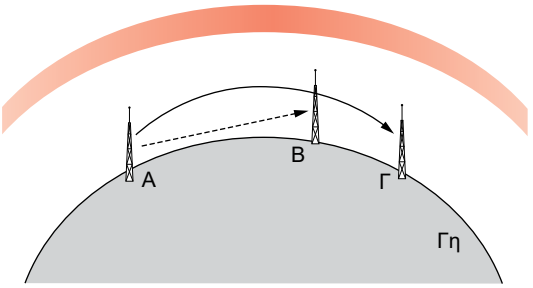
Οι παρατηρήσεις που έγιναν σε σχέση με τα σχήματα 4.2.5 και 4.2.6 ότι δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο μεγαλύτερη πυκνότητα της ιονόσφαιρας απαιτείται για να έχουμε ραδιοκάλυψη από ιονοσφαιρικό κύμα, δικαιολογεί κατά τη διάρκεια της ημέρας τη χρήση ραδιοκυμάτων με μικρότερο μήκος κύματος από ό,τι τη νύχτα. Αυτή η διαπίστωση οδήγησε τους ραδιοηλεκτρολόγους να ονομάζουν **τα μήκη κύματος από 100m έως 50m κύματα νύχτας** και **τα μήκη κύματος από 50m έως 10m κύματα ημέρας**. Ένα απλό πείραμα, που μπορεί να κάνει ο καθένας εύκολα σαρώνοντας με τη βελόνα του ραδιοφώνου του τη ζώνη των βραχέων κυμάτων την ημέρα ή τις βραδινές ώρες, αποδεικνύει την αλήθεια όλων των παραπάνω παρατηρήσεων.

Οι πολλαπλές ανακλάσεις των βραχέων κυμάτων δημιουργούν, όπως διαπιστώνεται και στο σχήμα 4.3.2, πολλαπλές ζώνες σιγής.

Τα βραχέα κύματα χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται ευρύτατα για ραδιοεπικοινωνία σε μακρινές αποστάσεις. Αξιοποιήθηκαν και αξιοποιούνται και σε εμπορικές και σε στρατιωτικές εφαρμογές. Κάποιες ζώνες παραχωρήθηκαν στο πλατύ κοινό για ραδιοτηλεφωνία (Citizen Band, που καθιερώθηκε με το όνομα CB - γύρω στους 27 MHz). Χρησιμοποιούνται είτε με διαμόρφωση πλάτους AM, είτε απλής ζώνης SSBsc, είτε με διαμόρφωση FM ή ΦΜ. Σήμερα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τις ραδιοεπικοινωνίες στα βραχέα κύματα τις συναγωνίζονται οι ραδιοεπικοινωνίες σε μεγαλύτερες συχνότητες.

4.3.6 Διάδοση υπερβραχέων κυμάτων

Αναφέρονται στη φασματική ζώνη 30 MHz έως 300MHz με αντίστοιχα μήκη κύματος λ από 10m έως 1m, από όπου αντλούν και την ονομασία τους μετρικά κύματα. Οι πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι οι συχνότητες πάνω από τα 30 MHz σπάνια και σε ιδιαίτερες περιπτώσεις ανακλώνται από την ιονόσφαιρα. Η ραδιοκάλυψη εξασφαλίζεται μόνο από το κύμα εδάφους και περιορίζεται ουσιαστικά σε αποστάσεις που υπάρχει οπτική επαφή των κεραιών ή λίγο μεγαλύτερη. Διευκολύνεται από τις διαθλάσεις στις οποίες υπόκεινται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αυτών των συχνοτήτων στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, την τροπόσφαιρα. Οι διαθλάσεις αυτές δημιουργούν ελαφρά κύρτωση στην ακτίνα διάδοσης του κύματος και επιτρέπουν στο κύμα να φτάσει σε απόσταση μεγαλύτερη από αυτή του οπτικού ορίζοντα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.3.



Σχήμα 4.3.3: *Ορισμός του ραδιοηλεκτρικού ορίζοντα*

Η μεγίστη απόσταση κάλυψης, **που ονομάζεται ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας του κύματος**, εμπειρικά, αλλά με ικανοποιητική ακρίβεια, υπολογίζεται σε μέτρα από τη σχέση:

$$D = 4120 \cdot \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right) \qquad (5)$$

όπου h_1 και h_2 τα ύψη των κεραιών σε μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας.

Οι μεταβολές στην τροπόσφαιρα από τις κλιματολογικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα τη διάδοση των υπερβραχέων κυμάτων.

Η ζώνη αυτή χρησιμοποιείται σήμερα πάρα πολύ και σ' αυτή έχουμε τη ραδιοφωνία FM (88 MHz έως 108 MHz), εκπομπές τηλεόρασης και πολλές εφαρμογές ραδιοτηλεφωνίας. Κάποιες άλλες ιδιαίτερες ζώνες δίνονται στους ραδιοερασιτέχνες για πειραματισμούς και ιδιωτική επικοινωνία (παράδειγμα 142 – 144 MHz).

4.3.7 Διάδοση των μικροκυμάτων

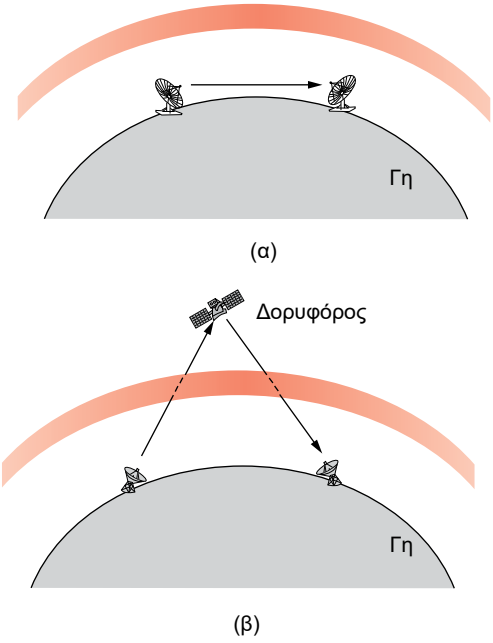
Με το γενικό όρο μικροκύματα ομαδοποιείται το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με συχνότητες πέραν των 300 MHz και με μήκη κύματος μικρότερα του 1 m.

Συγκεκριμένα:

- Τα δεκατομετρικά κύματα από 300 MHz έως 3 GHz.
- Τα εκατοστομετρικά κύματα από 3GHz έως 30 GHz.
- Τα χιλιοστομετρικά κύματα από 30 GHz έως 300 GHz.

Οι συνθήκες διάδοσης είναι ακριβώς οι ίδιες μ' αυτές των υπερβραχέων, με έμφαση στο γεγονός ότι λόγω των μικρών μηκών κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις ραδιοζεύξεις λίαν κατευθυντικές κεραίες ανάλογων διαστάσεων. Λόγω της κατευθυντικότητας των κεραιών δεν απαιτούνται μεγάλες ισχύες εκπομπής (σχήμα 4.3.4α).

Η ιδιαίτερη αξιοποίηση αυτών των κυμάτων, που λόγω της υψηλής συχνότητας επιτρέπουν διαμορφώσεις μεγάλου εύρους με τεράστιο όγκο πληροφορίας, ανοίγει νέο κεφάλαιο στις τηλεπικοινωνίες.



Σχήμα 4.3.4: *Ραδιοζεύξεις με μικροκύματα*
α) Με οπτική επαφή κεραιών β) Μέσω δορυφόρου

Πράγματι, καθώς τα κύματα αυτά διαπερνούν εύκολα τα στρώματα της ιονόσφαιρας, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις **δορυφορικές επικοινωνίες**. Η εκπομπή και η λήψη των σημάτων γίνεται με κατοπτρικές κεραίες υψηλής κατευθυντικότητας που βλέπουν το δορυφόρο (παράγραφος 4.4.4).

Εφαρμογή: Σε ραδιοζεύξη υπερβραχέων κυμάτων τα ύψη των κεραιών εκπομπής και λήψης είναι αντίστοιχα 400 m και 200 m. Να εκτιμηθεί το μήκος του ραδιηλεκτρικού ορίζοντα.

Λύση: *Από τη σχέση (5) υπολογίζουμε σε μέτρα:*

$$D = 140656\ m = 140{,}656\ km$$

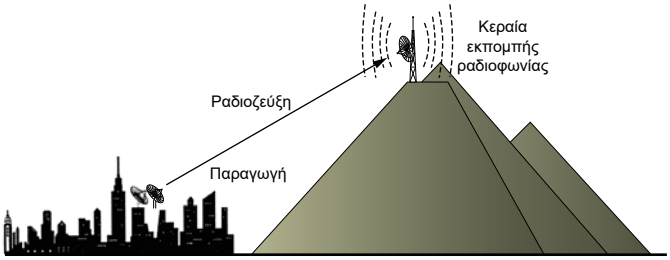
4.4 Τύποι ραδιοζεύξεων

Τα φαινόμενα της διάδοσης και οι ιδιαιτερότητες των ραδιοκυμάτων καθορίζουν, ανάλογα με την περίπτωση, τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιήσουμε και τον τρόπο αξιοποίησης του.

Ας δούμε τις βασικότερες εφαρμογές.

4.4.1 Εφαρμογές ραδιοφωνίας

Στις εφαρμογές της ραδιοφωνίας το σήμα απευθύνεται σε πολλούς δέκτες, οι οποίοι ως προς το σύστημα εκπομπής έχουν τυχαία θέση. Πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιηθεί μεγάλη ισχύς εκπομπής του φέροντος, για να εξασφαλίζει μεγάλη εμβέλεια και επιπλέον η κάλυψη του χώρου να είναι σφαιρική. Αυτό ισχύει τόσο για τις ραδιοφωνικές εκπομπές στα μεσαία όσο και στην FM ραδιοφωνία, που είναι στη ζώνη των υπερβραχέων. Ιδιαίτερα στην τελευταία περίπτωση, καθώς απαιτείται οπτική επαφή των κεραιών πομπού και δέκτη, η κεραία εκπομπής πρέπει να τοποθετηθεί σε υψόμετρο, σε κάποιο βουνό, λόφο ή ψηλό πύργο, ώστε ο οπτικός ορίζοντας να είναι μεγάλος. Το ίδιο ισχύει, με μεγαλύτερη έμφαση, για τις εκπομπές της τηλεόρασης, που πραγματοποιούνται στις ζώνες των VHF και στις ζώνες των UHF κυμάτων.



Σχήμα 4.4.1: *Στη ραδιοφωνία απαιτείται σφαιρική κάλυψη και μεγάλη εμβέλεια. Οι κεραίες τοποθετούνται ψηλά.*

Αν ο χώρος παραγωγής του προγράμματος (studio) δε βρίσκεται στον ίδιο χώρο με την κεραία εκπομπής, το σήμα μεταφέρεται στην κεραία είτε με ομοαξονικό καλώδιο (αν η απόσταση είναι μικρή) είτε με μικροκυματική κατευθυντική ραδιοζεύξη, όπως αποδίδεται στο σχήμα 4.4.1.

4.4.2 Εφαρμογές ραδιοτηλεφωνίας

Πρόκειται για επικοινωνία μεταξύ συγκεκριμένων ανταποκριτών, που πραγματοποιούνται στη ζώνη των υπερβραχέων (VHF) και δεκατομετρικών κυμάτων (-UHF). Εδώ οι ιδιαιτερότητες είναι πολλές. Κάθε ανταποκριτής συμμετέχει σε κάποιο δίκτυο ραδιοτηλεφωνίας, διαθέτει τη δική του μικρή συσκευή εκπομπής και λήψης τον «πομποδέκτη» με μικρή κεραία που μέσω κατάλληλης διάταξης (συζεύκτη) χρησιμοποιείται και για την εκπομπή και για τη λήψη των σημάτων. Στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε το δικαίωμα να χρησιμοποιήσουμε μεγάλη ισχύ εκπομπής, διότι στον ίδιο χώρο, στην ίδια πόλη, στην ίδια περιοχή πρέπει να συνυπάρξουν πολλά συστήματα, πολλά ραδιοδίκτυα, όμοια με το δικό μας, που θα εξυπηρετήσουν πολλούς χρήστες. Οι κανόνες λοιπόν χρήσης των συχνοτήτων (των διαθέσιμων διαύλων) και εκμετάλλευσης τέτοιων δικτύων είναι πολύ αυστηροί. Καθορίζονται από τους διεθνείς τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς και εξειδικεύονται από τις αρμόδιες υπηρεσίες κάθε κράτους με μεγάλη αυστηρότητα. Οι χρησιμοποιούμενοι πομποδέκτες υπακούουν σε ακριβείς και προκαθορισμένες προδιαγραφές και ελέγχονται αυστηρά απο τις αρμόδιες αρχές. Η ισχύς εκπομπής τους είναι περιορισμένη και δεν πρέπει σε καμμία περίπτωση να ξεπεράσει συγκεκριμένη τιμή.

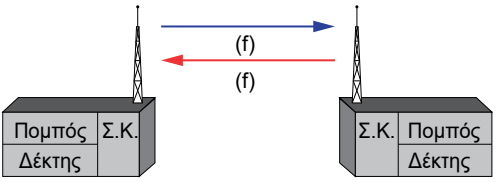
Παράδειγμα: Ενδεχομένως το δίκτυο ραδιοτηλεφωνίας του πυροσβεστικού σώματος διαθέτει τη συχνότητα εκπομπής 170,125 MHz. Το αντίστοιχο ραδιοδίκτυο μιας άλλης υπηρεσίας είναι στη συχνότητα 170,150 MHz. Το ραδιοδίκτυο μιας τρίτης υπηρεσίας είναι στη συχνότητα εκπομπής 170,100 MHz. Καθένας, δηλαδή, διαθέτει μια ζώνη 25 KHz όπου πρέπει να χωρέσει το φάσμα της δικής του εκπομπής, του διαμορφωμένου φέροντος, που είδαμε στο τρίτο κεφάλαιο. Μέγιστη ισχύς εκπομπής του κάθε πομποδέκτη για όλους είναι τα 25 Watt.

Επισημάνθηκε ότι σ' αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, για να έχουμε σωστή επικοινωνία, απαιτείται οπτική επαφή των κεραιών εκπομπής και λήψης. Προκύπτει ότι η εμβέλεια κάλυψης των συστημάτων αυτών είναι σχετικά μικρή, ιδιαίτερα σε περιοχές με πολλά φυσικά εμπόδια λόγω μορφολογίας εδάφους, εντός πόλεων, εντός κτιρίων κ.λ.π.

Στη ραδιοτηλεφωνία χρησιμοποιούμε τρεις τρόπους επικοινωνίας:

- **Την απλή (SIMPLEX) επικοινωνία:**

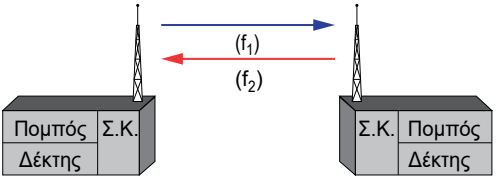
Οι δύο ανταποκριτές διαθέτουν πομποδέκτη (πομπό και δέκτη) με τον περιορισμό, όταν εκπέμπει ο ένας, ο άλλος λαμβάνει και αντίστροφα (σχήμα 4.4.2). Και οι δύο χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα συχνότητα εκπομπής και λήψης.



Σχήμα 4.4.2: *Μοντέλο simplex ραδιοεπικοινωνίας*

• Επικοινωνία πλήρως αμφίδρομη (FULL DUPLEX)

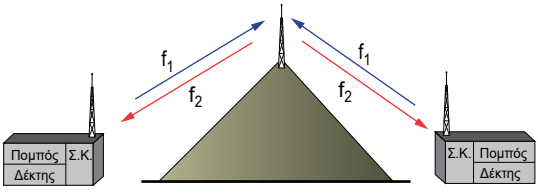
Στους ανταποκριτές που βρίσκονται σε επικοινωνία παρέχεται η δυνατότητα να εκπέμπουν και να λαμβάνουν στον πομποδέκτη τους ταυτόχρονα (ταυτόχρονη ομιλία και ακρόαση). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται δύο φέρουσες συχνότητες, f_1 και f_2. Η συχνότητα εκπομπής του ενός είναι συχνότητα λήψης για τον άλλο, όπως αποδίδεται στο σχήμα 4.4.3.



Σχήμα 4.4.3: *Μοντέλο full duplex ραδιοεπικοινωνίας*

• Ημιαμφίδρομη ζεύξη με αναμεταδότη (SEMI DUPLEX)

Για να αυξήσουμε την εμβέλεια του συστήματος ραδιοτηλεφωνίας, χρησιμοποιείται αναμεταδότης που τοποθετείται σε υψηλό σημείο, ώστε να εξασφαλίζεται μέσω αυτού η ραδιοεπαφή των απλών συσκευών. Ο αναμεταδότης (repeater) συνδυάζει δέκτη και πομπό (σχήμα 4.4.4) και, καθώς η κεραία του είναι ψηλά, δημιουργεί μεγάλο ραδιοορίζοντα.

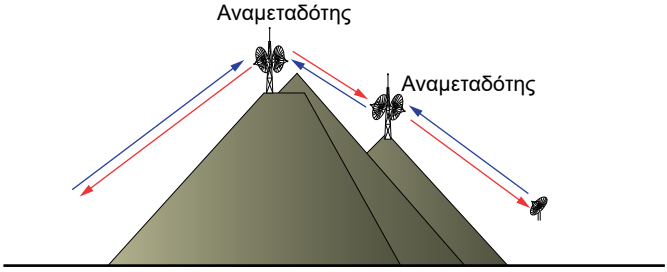


Σχήμα 4.4.4: *Ραδιοεπικοινωνία μέσω αναμεταδότη*

Κάθε τερματικός πομποδέκτης (του χρήστη) επικοινωνεί με κάποιον άλλο μέσω του αναμεταδότη ο οποίος, αφού λάβει ένα σήμα, το επανεκπέμπει. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η ζεύξη απαιτεί την χρήση δύο τουλάχιστον συχνοτήτων, f_1 και f_2. Οι συσκευές των χρηστών εκπέμπουν φέρον στη μία συχνότητα (παράδειγμα, την f) και λαμβάνουν στην άλλη συχνότητα (f). Αντίθετα ο αναμεταδότης έχει συχνότητα λήψης την (f_1) και συχνότητα εκπομπής την (f).

4.4.3 Μικροκυματικές ραδιοζεύξεις

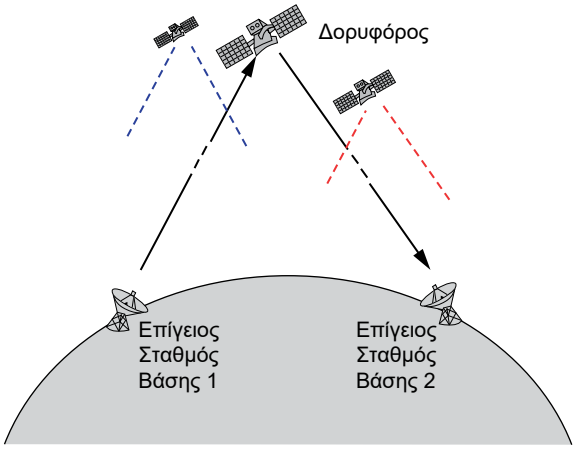
Επειδή στην περίπτωση των μικροκυματικών ζεύξεων είναι απαραίτητη η οπτική επαφή των κεραιών, η εμβέλεια των συστημάτων είναι περιορισμένη. Γι' αυτό χρησιμοποιείται συχνά η τεχνική της πολλαπλής αναμετάδοσης του σήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.5. Οι μικροκυματικές ζεύξεις (γνωστές και με τον όρο **Radio Link**) χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς, και όχι μόνο, με ευρύ φάσμα διαμόρφωσης για ζεύξεις λίαν κατευθυντικές **«σημείου» προς «σημείο»** (point to point) **ή «πολλαπλών σημείων»** (point to multipoint) με μικρή ισχύ εκπομπής.



Σχήμα 4.4.5: Μικροκυματικές ζεύξεις με πολλαπλή αναμετάδοση

4.4.4 Δορυφορικές ζεύξεις

Οι δορυφορικές ζεύξεις είναι μικροκυματικές ζεύξεις «σημείου» προς «σημείο» ή «πολλαπλών σημείων» όπου ο αναμεταδότης έχει τοποθετηθεί πάνω σε δορυφόρο σε τροχιά γύρω από τη γη.



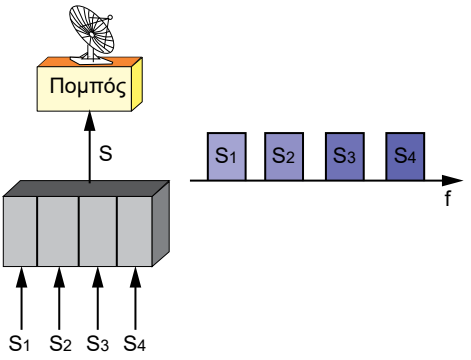
Σχήμα 4.4.6: Δορυφορικές ζεύξεις

Μια πλήρης ζεύξη μέσω δορυφόρου απαιτεί ένα φέρον κύμα για ζεύξη από το σταθμό εκπομπής εδάφους προς το δορυφόρο, του οποίου η συχνότητα ονομάζεται **ανερχόμενη (up link frequency)**, και ένα φέρον για ζεύξη από το δορυφόρο προς το σταθμό εδάφους, του οποίου η συχνότητα ονομάζεται κατερχόμενη **(down link frequency)** (σχήμα 4.4.6).

Στις δορυφορικές επικοινωνίες, λόγω χρήσης κατευθυντικών κατοπτρικών κεραιών (παραβολικές κεραίες) η απαιτούμενη ισχύς είναι γενικά μικρή, έως μερικά Watt. Σ' ένα δορυφόρο τοποθετούνται συνήθως πολλοί αναμεταδότες, για να εξυπηρετηθούν πολλές ανεξάρτητες ραδιοζεύξεις.

Η χρήση των δορυφόρων σήμερα γενικεύεται και αξιοποιούνται για ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές εκπομπές, για ραδιοτηλεφωνία και για την κινητή τηλεφωνία.

Στους σταθμούς εδάφους τις περισσότερες φορές **με την τεχνική της πολυπλεξίας** ομαδοποιούνται τα σήματα που προέρχονται από περισσότερους χρήστες ή από περισσότερες της μιας εφαρμογές. Αυτό γίνεται, για να μην απαιτείται για κάθε εφαρμογή ανεξάρτητη δορυφορική ζεύξη. Για παράδειγμα, δύο τηλεοπτικοί σταθμοί ομαδοποιούν τα σήματα δύο ανεξάρτητων εκπομπών και χρησιμοποιούν για τη ζεύξη κοινό αναμεταδότη στον ίδιο δορυφόρο. Στην κινητή τηλεφωνία ομαδοποιούνται για δορυφορική ζεύξη από τη μία ήπειρο στην άλλη τα σήματα χιλιάδων χρηστών. Η τεχνική της πολυπλεξίας γίνεται με τρόπο που επιτρέπει πάλι το διαχωρισμό των σημάτων στη λήψη, ώστε να δρομολογηθούν προς τους τελικούς χρήστες. Στο σχήμα 4.4.7 φαίνεται η τεχνική της φασματικής πολυπλεξίας όπου περισσότερα από ένα σήματα ομαδοποιούνται, με τρόπο που οι φασματικές τους ζώνες να μην αλληλοκαλύπτονται. Στη λήψη με κατάλληλα φίλτρα θα διαχωριστούν πάλι και θα δρομολογηθούν σε ανεξάρτητους χρήστες.



Σχήμα 4.4.7: *Επίγειος δορυφορικός σταθμός με πολυπλεξία*

Υπάρχουν **δορυφόροι υψηλής ή χαμηλής τροχιάς** (MEO, LEO), ανάλογα με το ύψος που βρίσκονται, ενώ αυτοί των οποίων η κίνηση (περιστροφή) είναι σύγχρονη με την κίνηση της γης ονομάζονται **γεωστατικοί δορυφόροι**. Η τροχιά τους είναι πάνω από τον ισημερινό σε ακτίνα περίπου 36.000 km και φαίνονται ακίνητοι από οποιοδήποτε σημείο της γης.

4.5 Γραμμές μεταφοράς. Ομοαξονικό καλώδιο

Συνήθως σ' ένα σύστημα εκπομπής η κεραία δε βρίσκεται πολύ κοντά στο τελικό στάδιο ενίσχυσης του σήματος. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μεταφέρεται προς την κεραία με ειδικά καλώδια υψηλών συχνοτήτων, που λόγω του ρόλου τους τα ονομάζουμε **«γραμμές μεταφοράς»**.

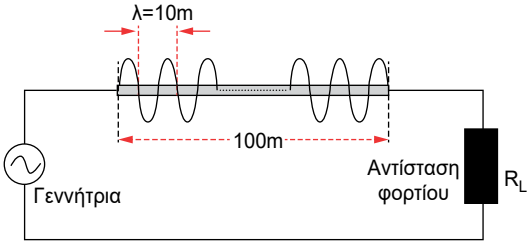
Υπάρχουν πολλοί παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη των γραμμών μεταφοράς και δεν χρησιμοποιείται ο ίδιος τύπος καλωδίου σε όλες τις εφαρμογές.

Για διευκόλυνση πρέπει να γίνουν κάποιες επισημάνσεις. Όταν χρησιμοποιούμε στον ηλεκτρισμό ένα οποιοδήποτε καλώδιο και το τροφοδοτούμε με συνεχή ή εναλλασσόμενη ημιτονική τάση χαμηλής συχνότητας, π.χ 50 Hz, το μήκος κύματος του σήματος είναι:

$$\lambda = (3 \cdot 10^8 m/sec)/50\ Hz = 6 \cdot 10^7 m = 6000\ km.$$

Για τον υπολογισμό του ρεύματος σ' ένα τμήμα καλωδίου, του οποίου το μήκος είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος του σήματος που διέρχεται από το καλώδιο, θεωρούμε ότι το ρεύμα σ' όλο το μήκος του καλωδίου έχει την ίδια τιμή, που υπολογίζεται από το νόμο του Ωμ. Δηλαδή, το καλώδιο χαρακτηρίζεται από την Ωμική του αντίσταση R ή την ειδική του αντίσταση ανά μονάδα μήκους. Οι υπολογισμοί τάσης και ρεύματος είναι απλοί.

Αντίθετα, για σήματα (ρεύματα) υψηλών συχνοτήτων, τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά. Ας πάρουμε ένα ακόμα παράδειγμα με συχνότητα σήματος f= 30 MHz. Στην περίπτωση αυτή το μήκος κύματος είναι μόλις 10 m. Αν το καλώδιο που διαθέτουμε για να τροφοδοτήσουμε την αντίσταση φόρτου R_L του σχήματος 4.5.1 είναι 100 m, το ρεύμα ή η τάση που θα μετρήσουμε σε διαφορετικά σημεία του καλωδίου δεν έχουν την ίδια τιμή, αλλά αυτή εξαρτάται από το σημείο στο οποίο θα γίνει η μέτρηση.

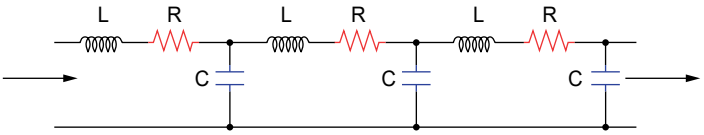


Σχήμα 4.5.1: *Ρεύμα υψηλών συχνοτήτων σε γραμμή μεταφοράς*

Φαίνεται λοιπόν ότι στην περίπτωση αυτή η συμπεριφορά του καλωδίου δεν περιγράφεται πλέον μόνο από το νόμο του Ωμ. Σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες έχουμε την εμφάνιση και άλλων φαινομένων (για παράδειγμα, το επι-

δερμικό φαινόμενο όπου το ρεύμα δεν διατρέχει ομοιόμορφα όλη τη διατομή του αγωγού, αλλά μόνο την εξωτερική επιφάνειά του) και το πρόβλημα της μεταφοράς της ενέργειας εμφανίζεται ακόμα πιο πολύπλοκο. Με άλλα λόγια, το καλώδιο στις υψηλές συχνότητες δε χαρακτηρίζεται μόνο από την Ωμική του αντίσταση.

Αποδεικνύεται ότι η συμπεριφορά μιας γραμμής μεταφοράς περιγράφεται καλύτερα, αν θεωρήσουμε ότι η γραμμή αποτελείται από μια αλληλουχία πηνίων, αντιστάσεων και πυκνωτών, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.2.



Σχήμα 4.5.2: *Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένα στοιχεία*

Οι τιμές των στοιχείων R, L και C, που δίνονται ανά μονάδα μήκους και όχι για το σύνολο της γραμμής (γι' αυτό λέγονται και **κατανεμημένα στοιχεία**), εξαρτώνται από τον τρόπο κατασκευής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καλωδίου.

Οι αντιστάσεις R είναι υπεύθυνες για το γεγονός (που διαπιστώνεται πειραματικά) ότι το σήμα, καθώς διαδίδεται δια μέσου της γραμμής, εξασθενίζει αφού μέρος της ενέργειάς του μετατρέπεται σε θερμότητα. **Η εξασθένηση (α) του σήματος** μετριέται σε dB/km.

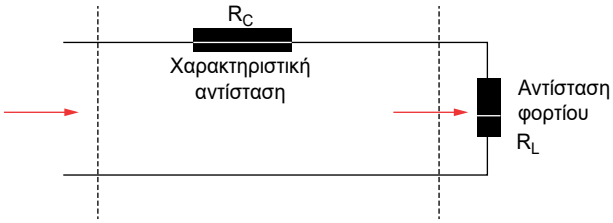
Ο συνδυασμός του πηνίου με τον πυκνωτή σχηματίζει ένα χαμηλοδιαβατό φίλτρο. Έτσι η γραμμή μεταφοράς συμπεριφέρεται ως μια αλληλουχία από χαμηλοδιαβατά φίλτρα που, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, περιορίζουν τη **ζώνη διέλευσης** (το εύρος ζώνης, Bandwith) της γραμμής μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι, ανάλογα με τις συχνότητες στις οποίες θέλουμε να εργαστούμε, πρέπει να επιλέξουμε την κατάλληλη γραμμή μεταφοράς.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μιας γραμμής μεταφοράς είναι αυτό που ονομάζουμε **«χαρακτηριστική αντίσταση»**. Η τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης δίνεται από τη σχέση

$$R_c = L/C$$

και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής μεταφοράς. Η φυσική σημασία της χαρακτηριστικής αντίστασης είναι πολύ σημαντική. Για να έχουμε τη μέγιστη μεταφορά ισχύος από τον ενισχυτή εξόδου του πομπού προς το φόρτο, δηλαδή την κεραία, πρέπει η ισοδύναμη αντίσταση της κεραίας να ισούται με την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή πρέπει:

$$R_L = R_C.$$

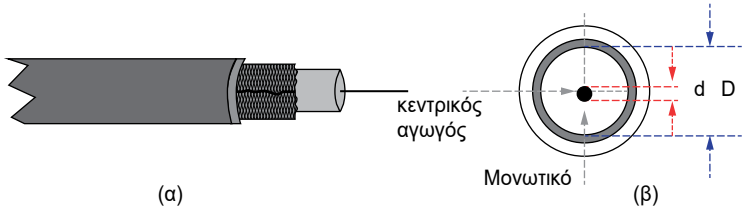


Σχήμα 4.5.3: Η γραμμή μεταφοράς χαρακτηρίζεται από το μέγεθος R_c. Ιδανική συνθήκη μεταφοράς ενέργειας: R_L=R_C

Στις συχνότητες έως και 1 GHz χρησιμοποιούνται συνήθως δύο είδη γραμμών μεταφοράς, το ομοαξονικό καλώδιο και η συμμετρική γραμμή δύο αγωγών.

• Το ομοαξονικό καλώδιο

Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη γραμμή μεταφοράς είναι το ομοαξονικό καλώδιο. Η κυλινδρική μορφή του και η διατομή του φαίνονται στο σχήμα 4.5.4.



Σχήμα 4.5.4: *Μορφή (α) και διατομή (β) ομοαξονικού καλωδίου*

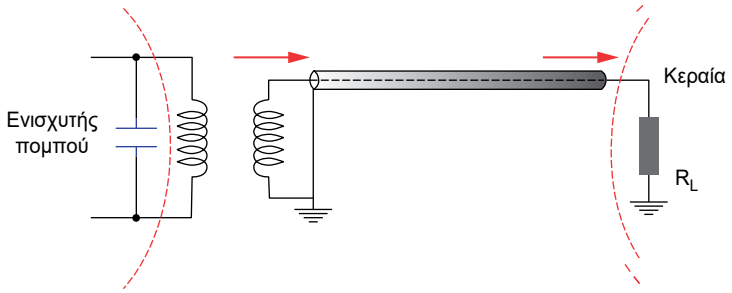
Αποτελείται από κεντρικό αγωγό διαμέτρου d, ο οποίος περιβάλλεται από ένα στρώμα μονωτικού (πολυαιθυλένιο ή τεφλόν), ενώ ο δεύτερος αγωγός κυλινδρικής μορφής περιβάλλει το σύνολο. Εξωτερικά υπάρχει για προφύλαξη νέο στρώμα ανθεκτικού πλαστικού.

Αν η εσωτερική διάμετρος του εξωτερικού αγωγού είναι D, αποδεικνύεται ότι η χαρακτηριστική αντίσταση του ομοαξονικού καλωδίου δίνεται από τη σχέση

$$R_C = \left(138 / \sqrt{(\varepsilon)} \cdot \log(D / d)\right), \qquad (6)$$

όπου ε η σχετική διηλεκτρική σταθερά του μονωτή. Είναι περίπου 0,66 για μονωτή από πολυαιθυλένιο και 0.70 για μονωτή από τεφλόν.

Το ομοαξονικό καλώδιο ονομάζεται και ασύμμετρη γραμμή μεταφοράς, διότι τροφοδοτείται από τον ενισχυτή εξόδου με ασύμμετρο μετασχηματιστή (ένας ακροδέκτης στη γείωση), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.5.



Σχήμα 4.5.5: *Μεταφορά ενέργειας προς την κεραία με ομοαξονικό καλώδιο*

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνεται ενδεικτικά ο τύπος καλωδίου με το αντίστοιχο εύρος ζώνης που προσφέρει, την τιμή της χαρακτηριστικής του αντίστασης και τις βασικές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποείται.

Τύπος	Z_c	Συχνότητα	Απόσβεση	Εφαρμογές
RG–59/U	73Ω	100MHz 400MHz	10,0db/100m 21,0db/100m	TV,HF
RG–11/U	75Ω	100MHz 400MHz	7,5db/100m 16,0db/100m	VHF
RG–214/U	50Ω	100MHz 400MHz 900MHz	6,0db/100m 14,0db/100m 23,5db/100m	SatTV,UHF
RG–58/U	53,5Ω	100MHz	16,0db/100m	HF,CB

Πίνακας ομοαξονικών καλωδίων

Να αναφέρουμε τέλος ότι η ταχύτητα του κύματος στο ομοαξονικό καλώδιο δίνεται από τη σχέση

$$c' = c / \sqrt{\varepsilon}\,, \qquad (7)$$

όπου c η ταχύτητα του κύματος στο κενό ($c=3\cdot10^8$m/sec).

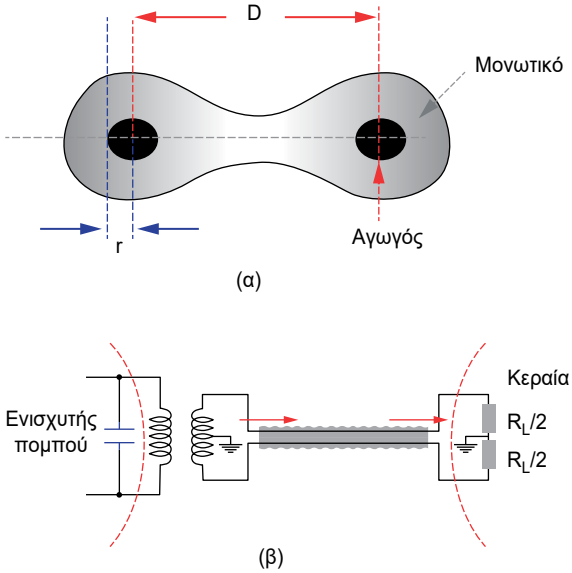
- **Συμμετρική γραμμή μεταφοράς**

Αποτελείται από δύο παράλληλους αγωγούς, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.6α, που περιβάλλονται από μονωτικό υλικό. Με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σχήματος, η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής δίνεται από τη σχέση

$$R_C = \left(276 / \sqrt{\varepsilon}\right) \cdot \log\left(D / r\right), \qquad (8)$$

όπου ε η σχετική διηλεκτρική σταθερά του μονωτή.

Συνήθως: R_c= 300 Ω.



Σχήμα 4.5.6: *(α) Διατομή γραμμής μεταφοράς παράλληλων αγωγών. (β) Συμμετρική μεταφορά ενέργειας προς την κεραία*

Η γραμμή αυτού του είδους τροφοδοτείται από τον ενισχυτή ισχύος συμμετρικά (διπλός μετασχηματιστής) και τροφοδοτεί (συμμετρικά) το ισοδύναμο κύκλωμα της κεραίας (σχήμα 4.5.6β).

Εφαρμογή 1: Να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική αντίσταση ενός ομοαξονικού καλωδίου, όταν D= 3mm, d= 1,5 mm και ε = 0,70.

Λύση: *Αντικαθιστώντας στη σχέση (6) τις τιμές έχουμε:*

$$Z_C = \left(138 / \sqrt{0,7}\right)\log\left(3 / 1,5\right) = 50\,\Omega$$

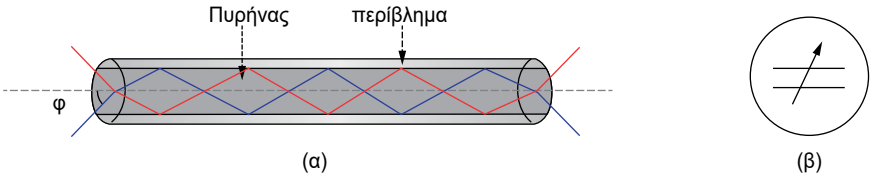
Εφαρμογή 2: Για ομοαξονικό καλώδιο γνωρίζουμε ότι ο συντελεστής απόσβεσης α είναι 6 dB ανά 100 m καλωδίου. Να προσδιοριστεί η ολική απόσβεση, όταν το μήκος του καλωδίου είναι 260 m.

Λύση: α= 6 *db/100m= 0,06 dB/m*

Άρα, $A_{ολ}$ *= (0,06 dB/m)·250m= 15 dB*

4.6 Οπτικές ζεύξεις. Οπτική ίνα

Στις οπτικές επικοινωνίες η πληροφορία, αφού κωδικοποιηθεί, μεταδίδεται με μέσο μετάδοσης το υπέρυθρο ή ορατό φως. Το φως παγιδεύεται σε ειδικό γυάλινο καλώδιο - κυματοδηγό, την οπτική ίνα, και διαδίδεται σ' αυτό μέσω διαδοχικών ανακλάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.1 (α.)



Σχήμα 4.6.1: *α) Μηχανισμός παγίδευσης του φωτός στην οπτική ίνα, β) Σύμβολο της οπτικής ίνας*

Η οπτική ίνα αποτελείται από κεντρικό γυάλινο ή πλαστικό λεπτό κύλινδρο (πυρήνα) με δείκτη διάθλασης του φωτός n_1, που περιβάλλεται από άλλο γυάλινο κύλινδρο (περίβλημα) με δείκτη διάθλασης n_2. Στο σχήμα 4.6.1 (β) δίνεται το σύμβολο της οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία.

Η μελέτη του φαινομένου της διάδοσης απαιτεί:

$$\mathbf{n_2 < n_1}$$

Το φως στην οπτική διαδίδεται με ταχύτητα:

$$\mathbf{c' = c / n_1} \qquad (9)$$

(c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, $3 \cdot 10^8$m/sec).

Αποδεικνύεται επίσης ότι το φως, για να παγιδευτεί στην οπτική ίνα, πρέπει να εισέλθει σ' αυτή με γωνία μικρότερη από μια οριακή γωνία $\varphi_{ορ}$, που προσδιορίζεται από τη σχέση:

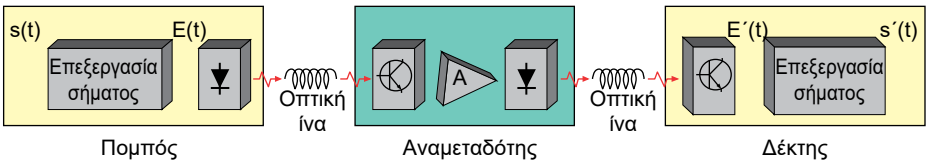
$$\mathbf{\varphi < \varphi_{ορ},}$$

όπου

$$\sin\varphi_{ορ} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \text{ ή } \varphi_{ορ} = \arcsin\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \qquad (10)$$

Το μέγεθος $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ είναι χαρακτηριστικό μέγεθος της οπτικής ίνας και καλείται **«αριθμητικό άνοιγμα της ίνας»** (Numerical Aperture). Είναι καθαρός αριθμός και συνήθως το δίνει στα τεχνικά χαρακτηριστικά ο ίδιος ο κατασκευαστής της ίνας.

Μια πλήρης ζεύξη με οπτική ίνα φαίνεται στο σχήμα 4.6.2 όπου διακρίνουμε τον οπτικό πομπό (δίοδο ή λέϊζερ/laser), τον οπτικό δέκτη (φωτοδίοδο ή φωτοτρανζίστορ) και τον οπτικό αναμεταδότη που τοποθετείται ανάμεσα σε μεγάλα μήκη οπτικής ίνας, για να ξαναενισχύει το σήμα.



Σχήμα 4.6.2: *Ζεύξη με οπτική ίνα μέσω αναμεταδότη*

Ο οπτικός πομπός χαρακτηρίζεται από την απόδοση η. Ισχύει

$$\mathbf{P_\varphi = \eta \cdot I,} \qquad (11)$$

όπου Pφ η εκπεμπόμενη φωτεινή ισχύς σε mW, όταν διεγείρεται από ρεύμα I (σε mA). Η απόδοση *η* μετριέται σε mW/mA.

Αντίστοιχα, **ο οπτικός δέκτης** υπακούει στη σχέση:

$$\mathbf{I = \sigma \cdot P_{\varphi}} \qquad (12)$$

Δηλαδή, όταν η φωτεινή ισχύς που δέχεται είναι P_{φ} (σε mW), τότε στην έξοδο θα δώσει ρεύμα I (σε mA). Το μέγεθος σ ονομάζεται συντελεστής απόκρισης και μετριέται σε mA/mW.

Ως πλεονεκτήματα των οπτικών ινών σε σχέση με άλλους τρόπους μετάδοσης πρέπει να αναφέρουμε:

- Τη μικρή απόσβεση α του σήματος (σε dB/km) που παρουσιάζουν (μόλις μερικά dB/km).
- Την ευρεία ζώνη διέλευσης (Bandwith) που διαθέτουν (εκατοντάδες MHz).
- Την ηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική προστασία που προσφέρουν. Η οπτική ίνα δεν έχει μεταλλικούς αγωγούς που επηρεάζονται από κεραυνούς, βιομηχανικά παράσιτα, κλπ.

Έτσι, το σήμα έχει μεγάλη αντοχή στους θορύβους και τις παρεμβολές.

- Έχουμε ασφάλεια στην επικοινωνία και προστασία του σήματος από υποκλοπές.

Για όλους αυτούς τους λόγους οι οπτικές ίνες αξιοποιούνται σήμερα σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μεγάλων αποστάσεων και σε διηπειρωτικές ζεύξεις. Χρησιμοποιούνται ακόμη και υποθαλάσσια καλώδια πολλών οπτικών ινών.

Εφαρμογή 1: Σε οπτική ίνα γνωρίζουμε ότι $n_1 = 1,5$ και $n_2 = 1,47$. Να προσδιοριστεί η ταχύτητα του φωτός στην ίνα και η μέγιστη γωνία εισόδου του φωτός, ώστε να έχουμε παγίδευση και διάδοση.

Λύση: *Από τη σχέση (9) προσδιορίζουμε:*

$c' = 3 \cdot 10^8/1,5 = 2 \cdot 10^8 m/sec$

Από τη σχέση (10) επίσης υπολογίζουμε ότι:

$\sin\varphi_{o\rho} = 0,3$ *άρα* $\varphi_{o\rho} = 17,36°$

Εφαρμογή 2: Δίοδος διαρρέεται από ρεύμα I=40 mA. Να προσδιοριστεί η φωτεινή ισχύς που εκπέμπει, όταν η απόδοση η = 0,1 mW/mA. Αυτή η φωτεινή ισχύς διοχετεύεται στην είσοδο οπτικής ίνας που παρουσιάζει απώλειες 2 dB/km. Να προσδιοριστεί στην έξοδο της ίνας η φωτεινή ισχύς που απομένει, όταν το μήκος της ίνας είναι 2,5 km.

Λύση: *Από τη σχέση (11) αμέσως υπολογίζουμε:*

$P_{\varphi} = 0.1 \cdot 40 = 4$ *mW*

Από τον τύπο $x = 10\log(4mW/1mW)$ *υπολογίζουμε την ισχύ σε dBm:*

$x = 6$ *dBm.*

Η οπτική ίνα παρουσιάζει συνολικά απώλειες: $2,5 \cdot 2 = 5$ *dB.*

Άρα, στην έξοδο της ίνας έχουν απομείνει:

$P_{\varepsilon\xi} = 6 - 5 = 1$*dBm.*

Από τη σχέση 1 *dBm* $= 10\log(P_{\varepsilon\xi})$ *υπολογίζουμε την* $P_{\varepsilon\xi}$ *σε mW.*

Έτσι, έχουμε: $P_{\varepsilon\xi} = 10^{0,1} = 1,26$ *mW.*

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

• Οι ραδιοεπικοινωνίες βασίζονται στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

• Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χωρίς εμπόδιο διαδίδονται σφαιρικά.

• Με εμπόδια η συμπεριφορά τους θυμίζει αυτήν του φωτός. Υπόκεινται σε ανακλάσεις, διαθλάσεις, δημιουργούν σκιάσεις κλπ.

• Εξετάζουμε πολλούς τρόπους διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος: Τα κύματα εδάφους, όταν οι κυματικές ακτίνες δεν απομακρύνονται από το έδαφος. Τα κύματα χώρου ή ιονοσφαιρικά κύματα που, απομακρυνόμενα από το έδαφος, ξαναεπιστρέφουν σ' αυτό ύστερα από ανάκλαση στα στρώματα της ιονόσφαιρας.

• Οι μηχανισμοί διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι πολύπλοκοι. Εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα τους. Για να διευκολυνθεί αυτή η μελέτη, χωρίζουμε το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σε περιοχές συχνοτήτων, που λίγο πολύ έχουν την ίδια συμπεριφορά.

• Η μέγιστη κάλυψη που προσφέρουν τα κύματα εδάφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αγωγιμότητα του εδάφους.

• Τα φαινόμενα της ανάκλασης των κυμάτων στην ιονόσφαιρα εξαρτώνται από την πυκνότητα ιονισμού των στρωμάτων της ιονόσφαιρας. Αυτό δικαιολογεί τις διαφορές που παρουσιάζονται στη διάδοση των ιονοσφαιρικών κυμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας ή της νύχτας.

• Τα βραχέα κύματα με συχνότητα από 3 – 30 MHz με αλλεπάλληλες ανακλάσεις στην ιονόσφαιρα και το έδαφος ταξιδεύουν πολύ μακριά και προσφέρουν κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται πολύ για μακρινές ζεύξεις.

• Τα υπερβραχέα και μικροκυματικά κύματα απορροφούνται από την ιονόσφαιρα. Έτσι, η κάλυψη προσφέρεται μόνο από τα κύματα εδάφους και ουσιαστικά απαιτείται οπτική (ραδιοοπτική) επαφή των κεραιών εκπομπής και λήψης.

• Ακριβώς γι' αυτό τον λόγο οι κεραίες τοποθετούνται συνήθως ψηλά και, όπου απαιτείται, χρησιμοποιούνται αναμεταδότες του σήματος που επίσης τοποθετούνται σε ψηλά σημεία (βουνά).

• Ανάλογα με την εφαρμογή, τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα παρουσιάζουν ιδιομορφίες. Αυτές οι ιδιομορφίες επηρεάζουν την εκλογή του εξοπλισμού και της εγκατάστασης του.

• Στη ραδιοφωνία οι κεραίες είναι σφαιρικής κάλυψης (πανκατευθυντικές).

• Στη ραδιοτηλεφωνία διακρίνουμε πολλούς τρόπους επικοινωνίας: SIMPLEX, FULL-DUPLEX και SEMI-DUPLEX μέσω αναμεταδότη.

• Οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι ραδιοζεύξεις με μικροκύματα, με τον αναμεταδότη τοποθετημένο σε δορυφόρο που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τη γη. Προσφέρει μεγάλο ραδιοορίζοντα και οι ζεύξεις δεν απαιτούν μεγάλη ισχύ.

• Σε μικρές αποστάσεις η ζεύξη και η μεταφορά της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στην κεραία γίνεται με ειδικά καλώδια, που ονομάζονται γραμμές μεταφοράς.

● Οι γραμμές μεταφοράς έχουν αυστηρά ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

● Γραμμές μεταφοράς υπάρχουν πολλών ειδών. Πιο συνηθισμένη είναι το ομοαξονικό καλώδιο.

● Μια ειδικής ποιότητας και χαρακτηριστικών γραμμή μεταφοράς είναι το οπτικό καλώδιο ή οπτική ίνα.

● Η ζεύξη με οπτική ίνα βασίζεται στη μεταφορά των πληροφοριών με φως, ορατό ή υπέρυθρο, που με συγκεκριμένες συνθήκες παγιδεύεται στην ίνα.

● Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων (διότι έχουν μικρή απόσβεση) και για μεταφορά μεγάλου όγκου πληροφορίας (διότι προσφέρουν μεγάλο εύρος ζώνης).

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Πότε έχουμε σφαιρική διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος;
2. Να δοθεί η έκφραση της ισχύος του κύματος ανά μονάδα επιφανείας.
3. Να δοθεί η έκφραση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται σε απόσταση R από την κεραία εκπομπής, όταν η ισχύς εκπομπής είναι $P_ε$.
4. Να δοθεί η σχέση απωλειών, ως συνάρτηση της απόστασης των κεραιών εκπομπής και λήψης και της συχνότητας του φέροντος κύματος.
5. Ποια στρώματα της ατμόσφαιρας ονομάζονται ιονόσφαιρα;
6. Τι ονομάζουμε κύματα εδάφους και σε τι διακρίνονται;
7. Τι ονομάζουμε κύματα χώρου ή ιονοσφαιρικά κύματα;
8. Πώς εξαρτάται η ανάκλαση ενός ραδιοκύματος στην ιονόσφαιρα από την πυκνότητα ιονισμού της ιονόσφαιρας και το μήκος κύματος;
9. Τι ονομάζουμε συχνότητα MUF και τι συχνότητα LUF;
10. Πότε και για ποιες συχνότητες έχουμε ιονοσφαιρική ραδιοζεύξη;
11. Τι είναι το φαινόμενο των διαλείψεων και πώς ονομάζεται διεθνώς;
12. Τι ονομάζουμε ζώνες σιγής;
13. Το κύμα εδάφους δημιουργεί μεγαλύτερη κάλυψη στις συχνότητες VLF, LF ή MF;
14. Τι ονομάζεται στα μεσαία πρώτη και δεύτερη ζώνη κάλυψης;
15. Να δοθεί απλό σχέδιο που να φαίνεται η διάδοση των βραχέων ραδιοκυμάτων και πάνω σ' αυτό να σχολιαστούν οι πολλαπλές ζώνες σιγής.
16. Ποια μήκη κύματος βραχέων ραδιοκυμάτων προσφέρονται για χρήση την ημέρα και ποια τη νύχτα;
17. Με ποιο μηχανισμό διαδίδονται τα υπερβραχέα κύματα και τα μικροκύματα;
18. Τι ονομάζεται ραδιοορίζοντας;
19. Να σημειωθεί η σχέση προσδιορισμού του ραδιοορίζοντα για την περίπτωση των υπερβραχέων (VHF) κυμάτων.
20. Να αναφερθούν οι διάφορες ζώνες συχνοτήτων των μικροκυμάτων.
21. Να αναφερθεί σε ποιον τομέα των τηλεπικοινωνιών αξιοποιούνται τα μικροκύματα.

22. Τι τρόπους επικοινωνίας έχουμε στη ραδιοτηλεφωνία;
23. Να δοθούν οι ορισμοί και τα διαγράμματα για Simplex, Full Duplex και Semi duplex επικοινωνία.
24. Γιατί χρησιμοποιούνται οι αναμεταδότες στις ραδιοεπικοινωνίες;
25. Να δοθεί το διάγραμμα μιας δορυφορικής ζεύξης. Ποιες συχνότητες ονομάζονται ανερχόμενη και κατερχόμενη;
26. Τι είναι η τεχνική της φασματικής πολυπλεξίας και πού χρησιμοποιείται;
27. Τι ονομάζεται γραμμή μεταφοράς; Σε τι διαφοροποιείται η γραμμή μεταφοράς από ένα απλό καλώδιο που χρησιμοποιούμε στις χαμηλές συχνότητες;
28. Τι ονομάζεται χαρακτηριστική αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς;
29. Τι είναι το ομοαξονικό καλώδιο; Πώς υπολογίζεται η χαρακτηριστική του αντίσταση;
30. Γιατί το ομοαξονικό καλώδιο το ονομάζουμε ασύμμετρη γραμμή μεταφοράς;
31. Να αναφερθούν διάφοροι τύποι ομοαξονικών καλωδίων και οι ζώνες συχνοτήτων που τα χρησιμοποιούμε.
32. Τι είναι η συμμετρική γραμμή μεταφοράς με παράλληλους αγωγούς; Να δοθεί η χαρακτηριστική της αντίσταση.
33. Τι είναι η οπτική ίνα;
34. Να αναφερθούν τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών σε σχέση με άλλους τρόπους μετάδοσης.
35. Πώς υπολογίζεται η ταχύτητα του φωτός στην οπτική ίνα;
36. Να σχολιαστεί ο τρόπος παγίδευσης και διάδοσης του φωτός στην οπτική ίνα. Τι ονομάζεται αριθμητικό άνοιγμα της οπτικής ίνας;
37. Να αναφερθούν βασικές εφαρμογές των οπτικών ινών.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. *Η ισχύς εκπομπής μιας κεραίας που ακτινοβολεί σφαιρικά είναι 1600 W. Να προσδιοριστεί η ισχύς ανά μονάδα επιφανείας του σήματος σε απόσταση R= 200 km από την κεραία.*

2. *Να υπολογιστεί το ηλεκτρικό πεδίο E για τις ίδιες τιμές ισχύος και απόστασης από την κεραία.*

3. *Να υπολογιστούν σε dB οι απώλειες ραδιοκύματος από την κεραία εκπομπής έως την κεραία λήψης, όταν η συχνότητα του είναι f = 20 MHz και η απόσταση των κεραιών περίπου 60 km.*

4. *Έχει ανακοινωθεί από την αρμόδια υπηρεσία ότι οι συχνότητες MUF και LUF είναι 20 MHz και 14 MHz αντίστοιχα. Ποια ή ποιες από τις παρακάτω συχνότητες μπορούμε να επιλέξουμε για ραδιοζεύξη με ιονοσφαιρικό κύμα;*
   10 MHz, 7 MHz, 15 MHz, 25 MHz, 18,5 MHz.

5. *Κύμα συχνότητας 18 MHz ή 24 MHz ανακλάται ευκολότερα στην ιονόσφαιρα; Υποθέτουμε ότι και οι δύο συχνότητες βρίσκονται μεταξύ των ορίων LUF και MUF.*

6. *Σε ραδιοζεύξη υπερβραχέων κυμάτων τα ύψη των κεραιών εκπομπής και λήψης είναι αντίστοιχα 200 m και 180 m. Να εκτιμηθεί το μήκος του ραδιοηλεκτρικού ορίζοντα.*

7. *Να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική αντίσταση ενός ομοαξονικού καλωδίου, όταν D= 3,5mm, d=1,75 mm και ε =0,70.*

8. *Για ομοαξονικό καλώδιο γνωρίζουμε ότι ο συντελεστής απόσβεσης α είναι 9 dB ανά 200 m καλωδίου. Να προσδιοριστεί η ολική απόσβεση, όταν το μήκος του καλωδίου είναι 450 m.*

9. *Σε οπτική ίνα γνωρίζουμε ότι n_1 = 1,5 και n_2 = 1,45. Να προσδιοριστεί η ταχύτητα του φωτός στην ίνα και η μέγιστη γωνία εισόδου του φωτός, ώστε να έχουμε παγίδευση και διάδοση.*

10. *Δίοδος διαρρέεται από ρεύμα I=60 mA. Να προσδιοριστεί η φωτεινή ισχύς που εκπέμπει, όταν η απόδοση η = 0,12 mW/mA. Αυτή η φωτεινή ισχύς διοχετεύεται στην είσοδο οπτικής ίνας, που παρουσιάζει απώλειες 4 dB/km. Να προσδιοριστεί στην έξοδο της ίνας η φωτεινή ισχύς που απομένει, όταν το μήκος της ίνας είναι 2 km.*

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων εκπομπής ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών σημάτων με ενσύρματες ή ασύρματες μεθόδους, επίγειες ή δορυφορικές.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

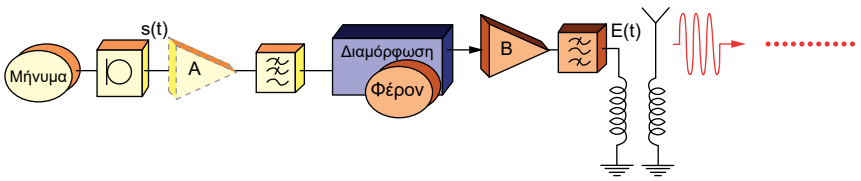
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΡΑΔΙΟ / ΤΗΛΕΟΠΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

5.1 Γενικά περί συστημάτων εκπομπής

Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάσαμε λεπτομερώς τις βασικές διαδικασίες που υπεισέρχονται στην αλυσίδα μετάδοσης ενός σήματος, τόσο από την πλευρά του πομπού, όσο και από την πλευρά του δέκτη. Γνωρίσαμε τη διαδικασία της διαμόρφωσης και εξάγαμε συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των σημάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό θα μας απασχολήσει η πλήρης σύνθεση του συστήματος εκπομπής. Θα εξετάσουμε τις παραμέτρους εκείνες που επιβάλλουν τη χρησιμοποίηση της μιας ή της άλλης διάταξης, ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Με βάση το γενικό δομικό διάγραμμα ενός πομπού, όπως προέκυψε στο τρίτο κεφάλαιο (σχήμα 5.1.1), η διαδικασία της διαμόρφωσης οριοθετεί δύο λειτουργικά τμήματα.



Σχήμα 5.1.1: *Γενικό διάγραμμα πομπού*

Το ένα τμήμα αφορά την επεξεργασία του βασικού σήματος, που χαρακτηρίζεται από το φασματικό του περιεχόμενο και περιλαμβάνει:

● Τον αισθητήρα μετατροπής της πληροφορίας σε ηλεκτρικό σήμα.

● Την ενίσχυση του σήματος, που πραγματοποιείται σ' ένα ή περισσότερα ενισχυτικά στάδια, ώστε το σήμα με κατάλληλο πλάτος και ισχύ να διαμορφώσει το φέρον.

● Τη χρήση κατάλληλων φίλτρων, τα οποία οριοθετούν την απαραίτητη φασματική ζώνη του σήματος, ανάλογα με την εφαρμογή. Για παράδειγμα, στην ΑΜ ραδιοφωνία το σήμα περιορίζεται από μερικά Hz έως 5 kHz. Στη ραδιοτηλεφωνία περιορίζεται από 300 Hz έως 3400 Hz.

Οι χρησιμοποιούμενες διατάξεις διαμορφωτών διαφοροποιούνται με βάση το είδος της διαμόρφωσης που έχουμε επιλέξει.

Το δεύτερο τμήμα περιλαμβάνει τη γεννήτρια (ταλαντωτή) του φέροντος σήματος υψηλής συχνότητας, τη διαμόρφωσή του και την ενίσχυση του διαμορφωμένου φέροντος, ώστε με μεγάλη ισχύ να οδεύσει προς το μέσο μετάδοσης.

Η δημιουργία του φέροντος σήματος M(t) επιτυγχάνεται με πολλούς τρόπους. Χρησιμοποιούμε απλό αρμονικό ταλαντωτή, όταν ο πομπός προορίζεται να λειτουργήσει σε μία και μοναδική συχνότητα φέροντος, ή κύκλωμα σύνθεσης συχνότητας, (synthesizer) όταν επιθυμούμε να έχουμε δυνατότητα προγραμματισμού της κεντρικής συχνότητας (f_o) του φέροντος. Τα κυκλώματα σύνθεσης συχνότητας είναι γνωστά και με το όνομα «κυκλώματα κλειδώματος φάσης» ή με τον αγγλικό όρο PLL (Phase Loop Locked).

Το διαμορφωμένο φέρον στη συνέχεια πρέπει να ενισχυθεί σημαντικά. Αυτό γίνεται στο στάδιο (ή στα στάδια) Β του σχήματος που είναι επιλεκτικός ενισχυτής υψηλών συχνοτήτων. Πράγματι, μετά τη διαμόρφωση το φάσμα του σήματος καταλαμβάνει τη ζώνη γύρω από την κεντρική συχνότητα εκπομπής f_o και το εύρος της φασματικής ζώνης που προκύπτει διαφέρει από αυτό του βασικού σήματος. Ο ενισχυτής εξόδου πρέπει να ενισχύσει ομοιόμορφα **όλες τις φασματικές ακτίνες του φέροντος**. Στην περίπτωση της ΑΜ πολλές φορές το τελικό στάδιο ενίσχυσης το συναντούμε με διπλό ρόλο: του διαμορφωτή και του ενισχυτή ισχύος.

Πολλές φορές η τελική συχνότητα εκπομπής στην κεραία δεν είναι η συχνότητα του ταλαντωτή που χρησιμοποιήθηκε στο στάδιο της διαμόρφωσης. Αυτή η αλλαγή της συχνότητας, που από πρώτη άποψη δεν είναι απαραίτητη, έχει να κάνει με τις συνολικές ποιοτικές επιδόσεις του συστήματος εκπομπής. Γύρω από την κεραία εκπομπής έχουμε συνήθως πολύ μεγάλη ισχύ ηλεκτρομαγνητικού σήματος, που επηρεάζει όλο τον εξοπλισμό, δημιουργώντας αναδράσεις στα χαμηλής ισχύος ευαίσθητα τμήματα του εξοπλισμού, όπως είναι ο ταλαντωτής και ο διαμορφωτής. Έτσι, πριν τον τελικό ενισχυτή ισχύος, αλλάζουμε (με συγκεκριμένη διαδικασία) την τελική συχνότητα εκπομπής. Αυτή η αλλαγή (μετάθεση) συχνότητας δεν πρέπει να αλλοιώσει τη φασματική φυσιογνωμία του σήματος (σημειώνεται στο σχήμα (5.1.1) με διακεκομμένη γραμμή).

Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία των διατάξεων του πομπού χορηγείται από την πηγή τροφοδοσίας σταθεροποιημένης τάσης.

Το γενικό δομικό διάγραμμα εξειδικεύεται και διαφοροποιείται με την εκάστοτε εφαρμογή, όπως ανάλογα με το αν πρόκειται για πομπό ΑΜ ή FM ή για εφαρμογή ραδιοφωνίας ή τηλεόρασης. Η περίπτωση της τηλεόρασης, ιδιαίτερα της έγχρωμης, παρουσιάζει ιδιαιτερότητες και γι' αυτό θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά.

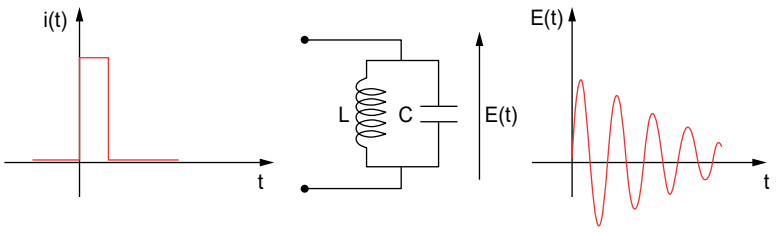
5.2 Γένεση του φέροντος σήματος – Ταλαντωτές

Το φέρον σήμα υψηλής συχνότητας (f_o) δημιουργείται τοπικά στον πομπό από κύκλωμα **αρμονικού (ημιτονικού) ταλαντωτή.** Οι αρμονικοί ταλαντωτές στις ραδιοεπικοινωνίες είναι δομημένοι με συντονιζόμενα κυκλώματα L-C και τους συναντούμε με πολλές παραλλαγές. Η πλήρης μελέτη των ταλαντωτών έγινε στο μάθημα της ηλεκτρονικής και δε θα μας απασχολήσει εδώ. Θα περιοριστούμε σε μια σύντομη παρουσίαση των κυκλωμάτων και θα ορίσουμε τα βασικά μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους που ενδιαφέρουν το σχεδιαστή ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

Η αρχή λειτουργίας των ταλαντωτών L-C στηρίζεται στην αυτοταλάντωση, την οποία υφίσταται ένα συντονιζόμενο κύκλωμα L-C, όταν διεγερθεί από ρεύμα (σχήμα 5.2.1). Η αυτοταλάντωση εμφανίζεται σε συχνότητα:

$$f_0 = 1/\left(2\pi\sqrt{LC}\right) \qquad (1)$$

και υφίσταται απόσβεση, λόγω των ωμικών απωλειών του κυκλώματος (ωμική αντίσταση της επαγωγής).



Σχήμα 5.2.1: *Η αυτοταλάντωση ενός κυκλώματος L-C*

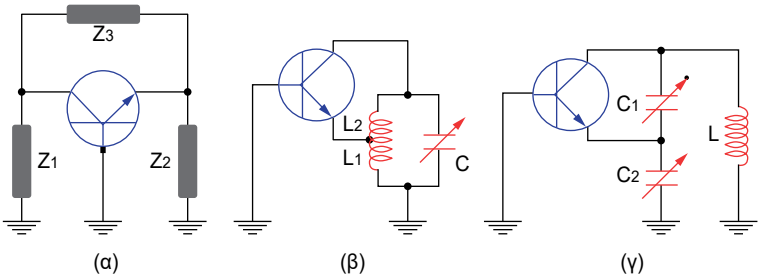
Η απόσβεση χαρακτηρίζει έμμεσα την ποιότητα του κυκλώματος, που εκφράζεται από το συντελεστή ποιότητας

$$\mathbf{Q = (2\pi f_o L)/r,} \qquad (2)$$

όπου r η ωμική αντίσταση της επαγωγής.

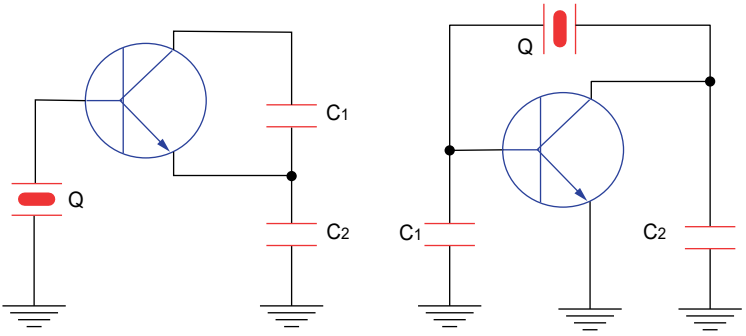
Αν με κάποιο τρόπο το κύκλωμα επανατροφοδοτείται συνεχώς με ενέργεια, αντισταθμίζονται οι απώλειες και δημιουργούνται ταλαντώσεις που συντηρούνται (δεν υφίστανται απόσβεση). Το αποτέλεσμα αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενισχυτή με τρανζίστορ. Το τρανζίστορ ενισχύει μέρος της ενέργειας του κυκλώματος L-C και το ανατροφοδοτεί (θετική ανάδραση) σε κάθε κύκλο λειτουργίας του.

Έχουν προταθεί πολλά κυκλώματα ταλαντωτών, που διαφοροποιούνται στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η ανάδραση και η επανατροφοδότηση του κυκλώματος L-C. Όλα υπακούουν στη δομή του σχήματος 5.2.2 και είναι γνωστά με το όνομα αυτού που τα μελέτησε. Τα συναντούμε σε παραλλαγές κοινού εκπομπού, κοινής βάσης ή κοινού συλλέκτη. Ενδεικτικά και χωρίς σχόλια στο σχήμα δίνονται οι δομές των ταλαντωτών Hartley και Colpitts από όπου, για διευκόλυνση της αναγνώρισης των στοιχείων που προκαλούν την ταλάντωση, έχουν αφαιρεθεί από τα κυκλώματα οι αντιστάσεις πόλωσης των τρανζίστορς.



Σχήμα 5.2.2: *α) Βασική δομή ενός ταλαντωτή. β) Ταλαντωτής Hartley, γ) Ταλαντωτής Colpitts*

Παραλλαγή των κυκλωμάτων L-C είναι τα κυκλώματα με **κρύσταλλο** (quartz: SiO_2). Στους ταλαντωτές αυτούς μέρος του συντονιζόμενου κυκλώματος έχει αντικατασταθεί από τον κρύσταλλο. Ο κρύσταλλος ισοδυναμεί με αυτοταλαντούμενο κύκλωμα υψηλής ποιότητας (μεγάλο Q) και επιβάλλει στον ταλαντωτή τη συχνότητα αυτοταλάντωσής του (η οποία εξαρτάται από τις γεωμετρικές διαστάσεις του), προσδίδοντας έτσι μεγάλη σταθερότητα στη συχνότητα λειτουργίας. Τα κυκλώματα με κρύσταλλο παρουσιάζουν επίσης μεγάλη ποικιλία και μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τον κρύσταλλο είτε σε παράλληλο συντονισμό είτε σε συντονισμό σειράς είτε σε συντονισμό στη συχνότητα κάποιας αρμονικής του (overtone). Στο σχήμα 5.2.3 δίνονται απλοποιημένα κυκλώματα ταλαντωτών με κρύσταλλο.



Σχήμα 5.2.3: *Ταλαντωτές με κρύσταλλο*

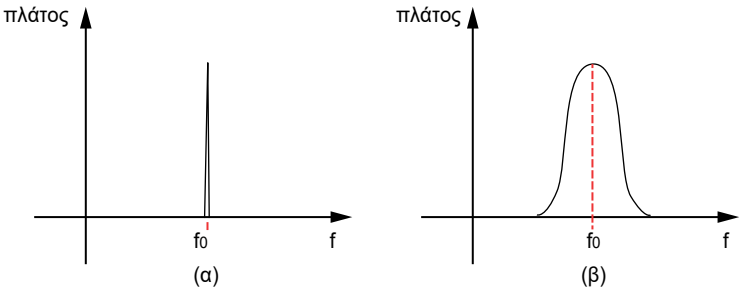
Ανεξάρτητα από τον τρόπο σχεδίασης του, ο αρμονικός ταλαντωτής χαρακτηρίζεται από τέσσερα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά:

● Τη συχνότητα λειτουργίας του (f_o).

Είναι η συχνότητα του ημιτονικού σήματος στην έξοδο του ταλαντωτή.

● Την ακρίβεια της συχνότητάς του, δηλαδή από το αν η συχνότητα λειτουργίας του επηρεάζεται από εξωτερικούς μη ελεγχόμενους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η τάση τροφοδοσίας κλπ. Ιδανικός ταλαντωτής είναι αυτός που η συχνότητα του (f_o), η οποία προσδιορίστηκε από τα στοιχεία L-C ή τον κρύσταλλο, μένει σταθερή. Στην πράξη οι εξωτερικοί παράγοντες επηρεάζουν τη συχνότητα κατά Δf. Ο λόγος $\Delta f/f_o$ ονομάζεται σχετική ακρίβεια ή σχετική σταθερότητα, της συχνότητας και εκφράζει την ποιότητα του ταλαντωτή. Δεν έχει διαστάσεις ή μετριέται σε ποσοστό επί τοις εκατό. Πέρα από τη μεγάλη σταθερότητα που απαιτούμε στους ταλαντωτές, έχει μεγάλη σημασία να μην υποβαθμίζεται η ποιότητά τους λόγω γήρανσης των εξαρτημάτων, όσο ο χρόνος λειτουργίας τους αυξάνεται.

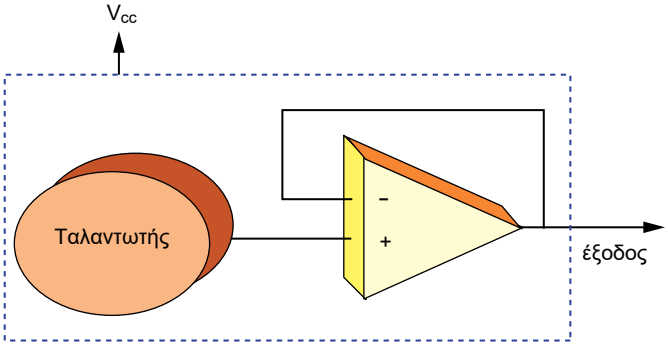
● Τη φασματική καθαρότητα του σήματος που δίνουν. Ο ιδανικός αρμονικός ταλαντωτής με απόλυτα ημιτονική έξοδο χαρακτηρίζεται από φάσμα σαν αυτό του σχήματος 5.2.4α. Στην πράξη το φάσμα ενός ταλαντωτή μοιάζει περισσότερο με αυτό του σχήματος 5.2.4β. Δηλαδή, ο ταλαντωτής λόγω θορύβου δε δίνει τέλειο ημιτονικό σήμα, αλλά ένα συνθετότερο, με φασματικές συνιστώσες μέσα σε μια μικρή περιοχή γύρω από την ονομαστική του συχνότητα f_o. Ενδεχομένως, λόγω παραμορφώσεων του σήματος στην έξοδο του ταλαντωτή να εμφανίζονται και κάποιες αρμονικές συχνότητες.



Σχήμα 5.2.4: *α) Φάσμα ιδανικού αρμονικού ταλαντωτή. β) Πραγματικό φάσμα*

● Τη σταθερότητα του πλάτους του σήματος. Το πλάτος του σήματος του ταλαντωτή πρέπει να διατηρείται σταθερό και να μην εξαρτάται από εξωτερικές παραμέτρους, όπως αλλοιώσεις της τάσης τροφοδοσίας, βιομηχανικούς θορύβους, θερμοκρασία, γήρανση των εξαρτημάτων κλπ. Αυτό επιβάλλει προσεκτική μελέτη του κυκλώματος του ταλαντωτή και μια σειρά προφυλάξεις στην κατασκευή του,

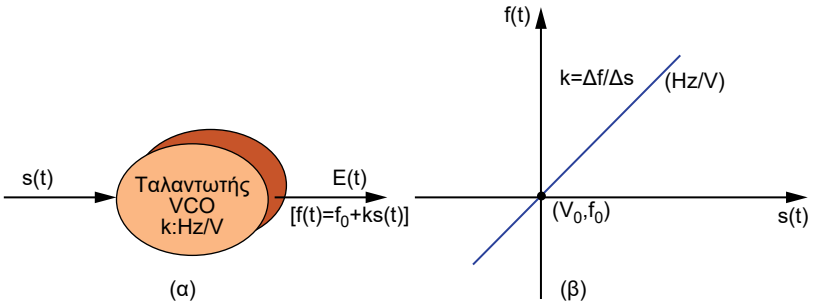
όπως αυστηρή επιλογή των εξαρτημάτων, σταθερή κατασκευή, ώστε να αποφεύγονται μηχανικές δονήσεις του κυκλώματος που αλλοιώνουν τις τιμές των στοιχείων L και C, αυστηρή σταθεροποίηση της τάσης τροφοδοσίας, θερμική απομόνωση του κυκλώματος (σε ακριβείς επαγγελματικές κατασκευές ο ταλαντωτής τοποθετείται σε περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας), θωράκιση για προστασία από βιομηχανικά και ηλεκτρομαγνητικά παράσιτα (τοποθετείται σε μεταλλικό κουτί). Σημαντικό είναι επίσης η τάση εξόδου του ταλαντωτή να μην επηρεάζεται από το ρεύμα που θα πρέπει να δώσει στο στάδιο (φόρτος) που ακολουθεί. Γι' αυτό το λόγο η σωστή αξιοποίηση του ταλαντωτή επιβάλλει τη χρησιμοποίηση στην έξοδο του κυκλώματος ακολούθου τάσης (ενισχυτή με κέρδος τάσης 1), που έχει άπειρη αντίσταση εισόδου και ζητάει μηδαμινό ρεύμα από τον ταλαντωτή (σχήμα 5.2.5).



Σχήμα 5.2.5: *Ταλαντωτής με κύκλωμα εξόδου ακόλουθο τάσης*

Η επιλογή του κυκλώματος του ταλαντωτή που θα χρησιμοποιηθεί είναι από τις βασικότερες φροντίδες στη σχεδίαση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Η ποιότητα και οι επιδόσεις όλου του συστήματος εξαρτώνται ουσιαστικά από την ποιότητα και τις επιδόσεις του ταλαντωτή του φέροντος σήματος.

Για παράδειγμα, αν η συχνότητα λειτουργίας είναι μία και μοναδική, υιοθετείται κύκλωμα ταλαντωτή με κρύσταλλο, που προσφέρει ευκολία και σταθερότητα. Αν ο ταλαντωτής πρέπει να είναι ρυθμιζόμενης συχνότητας με σχετικά μικρά όρια ρύθμισης, πρέπει να χρησιμοποιηθεί κύκλωμα L-C με ρυθμιζόμενη τιμή των στοιχείων (για παράδειγμα, μεταβλητός πυκνωτής C ή μεταβλητό πηνίο με φερρίτη). Η ύπαρξη μεταβλητών στοιχείων στο κύκλωμα L-C μεταφράζεται σε έλλειψη σταθερότητας του κυκλώματος και ευπάθεια σε δονήσεις, διαστολές και συστολές λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών κ.α. Οι ρυθμιζόμενοι μηχανικά ταλαντωτές σήμερα τείνουν να αντικατασταθούν από τους **ταλαντωτές, που η συχνότητα λειτουργίας τους ελέγχεται από ηλεκτρική τάση** και φέρουν το όνομα VCO (Voltage Controlled Oscillators), (σχήμα 5.2.6).

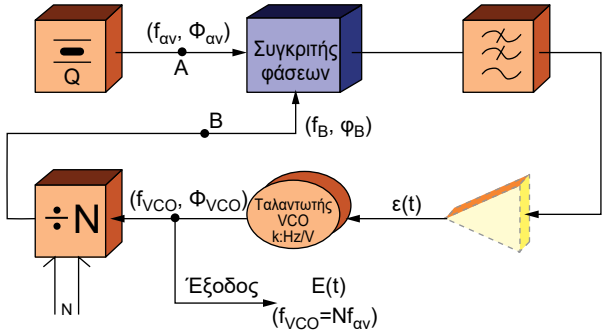


Σχήμα 5.2.6: *α) Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση (VCO). β) Η χαρακτηριστική λειτουργίας του.*

Ο ταλαντωτής VCO χαρακτηρίζεται από τη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του, τη γραμμικότητα και την κλίση k (Hz/V) της χαρακτηριστικής του f= f(s(t)) (όπου η τάση s(t) αντιπροσωπεύει το ωφέλιμο σήμα, σχήμα 5.2.6β).

Ταλαντωτές VCO μπορούμε να σχεδιάσουμε με πολλούς τρόπους. Τους χρησιμοποιούμε ως διαμορφωτές συχνότητας (παράγραφος 5.3.3), ελέγχοντας τη λειτουργία τους με το βασικό σήμα s(t).

Η εμφάνιση των ταλαντωτών VCO έφερε πραγματική επανάσταση με τις διατάξεις σύνθεσης συχνότητας. Μια τέτοια διάταξη δίνεται στο σχήμα 5.2.7. Πρόκειται ουσιαστικά για διάταξη αυτόματου ελέγχου (σύγκρισης) της φάσης του VCO η οποία είναι διαιρεμένη με τον αριθμό N με τη φάση ενός σήματος αναφοράς που προέρχεται από τοπικό ταλαντωτή αναφοράς με κρύσταλλο (Q) μεγάλης ακρίβειας.



Σχήμα 5.2.7: *Δομικό διάγραμμα συνθέτη συχνοτήτων (PLL)*

Χωρίς να μας απασχολεί ιδιαίτερα η μαθηματική ανάλυση του **κυκλώματος κλειστού βρόχου (PLL: Phase Locked Loop)**, αποδεικνύεται ότι, από τη σύγκριση των φάσεων των σημάτων A (αναφοράς) και B (έξοδος του VCO), προκύπτει τάση σφάλματος ε(t) στην είσοδο του VCO, που τείνει να εξισώσει τις συχνότητες $f_{αν}$ και f_{vco}/N, ώστε

$$\mathbf{f_{αν} = f_{vco}/N},$$

απ' όπου:

$$\mathbf{f_{vco} = N \cdot f_{αν}} \qquad (3)$$

Με άλλα λόγια, στην έξοδο του ταλαντωτή VCO το σήμα έχει συχνότητα $f_{vco} = f_o$, η οποία είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας του ταλαντωτή αναφοράς. Διαθέτουμε, δηλαδή, ένα σύστημα προγραμματισμού της συχνότητας του φέροντος με κατάλληλη επιλογή του αριθμού N και βήμα (step) προγραμματισμού $f_{αν}$. Οι διαιρέτες αυτού του είδους είναι κατάλληλα ψηφιακά κυκλώματα. Σήμερα εξάλλου βρίσκουμε στο εμπόριο κυκλώματα PLL και ως ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Εφαρμογή 1: Σ' ένα κύκλωμα ταλαντωτή με στοιχεία L,C δίνονται: L = 2 μH και C= 40 pF. Να προσδιοριστεί η συχνότητα ταλάντωσης.

Λύση: $f_0 = 1/\left(2\pi\sqrt{LC}\right) = 17,8 \cdot 10^6$ MHz

Εφαρμογή 2: Ένας ταλαντωτής VCO με γραμμική συμπεριφορά έχει κλίση 100 kHz/V. Όταν στην είσοδο του η τάση είναι 2V, η συχνότητα του σήματος εξόδου είναι f = 2 MHz. Να προσδιοριστεί η συχνότητα του σήματος στην έξοδο, όταν η τάση στην είσοδο είναι διαδοχικά 1,7 V και 2,5 V.

Λύση: *Αφού ο VCO είναι γραμμικός, τότε η μεταβολή της συχνότητας του σήματος στην έξοδο είναι ευθέως ανάλογη προς τις μεταβολές της τάσης στην είσοδο. Έτσι:*

Για τάση 1,7 V έχουμε:

$f' = 2\ MHz - 0,3\ V \cdot 0,1\ MHz/V = 1,97\ MHz.$

Αντίστοιχα, για τάση εισόδου 2,5 V έχουμε:

$f'' = 2 + 0,5 \cdot 0,1 = 2,05\ MHz.$

Εφαρμογή 3: Σ' ένα συνθέτη συχνοτήτων, όπως αυτόν του σχήματος 5.2.7, το βήμα σύνθεσης είναι 100 kHz και ο διαιρέτης N παίρνει τιμές από N_1= 10 έως N_2=20. Να προσδιοριστούν οι συχνότητες του σήματος στην έξοδο του VCO. Επίσης, αν ο VCO είναι γραμμικός και η κλίση του είναι 250kHz/V να προσδιοριστούν τα όρια μεταβολής της τάσης ελέγχου στην είσοδό του.

Λύση: $f_1 = N_1 \cdot f_{αν} = 1\ MHz$

$f_2 = N_2 \cdot f_{αν} = 2MHz$

Η μεταβολή της τάσης εισόδου του VCO που αντιστοιχεί σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων είναι: $V_2 - V_1 = (f_2 - f_1) / k =$

$= (1\ MHz) / (0,25\ MHz/V) = 4V$

5.3 Διαμορφωτές

Διαμορφωτής (modulator) είναι η διάταξη (το κύκλωμα) με την οποία υλοποιείται η διαδικασία μιας συγκεκριμένης διαμόρφωσης.

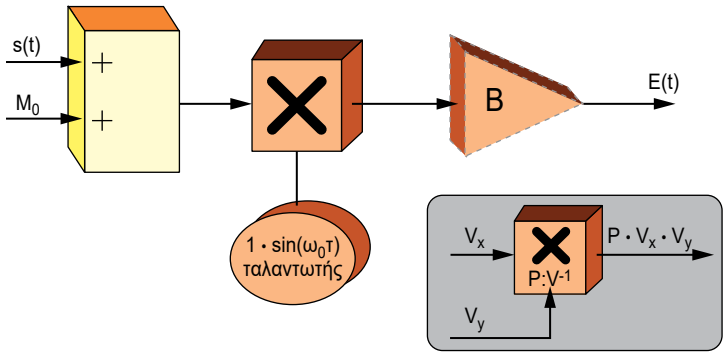
5.3.1 Διαμορφωτές πλάτους ΑΜ με φέρον

Τα χρησιμοποιούμενα στην πράξη κυκλώματα διαμόρφωσης ΑΜ είναι πολλά. Μπορούμε να τα κατατάξουμε σε δύο κατηγορίες:

- Κυκλώματα γραμμικά, που ουσιαστικά υλοποιούν τη διαδικασία της διαμόρφωσης ακριβώς όπως τη γνωρίσαμε στο τρίτο κεφάλαιο.
- Κυκλώματα μη γραμμικά. Εδώ η διαμόρφωση επιτυγχάνεται από την παραμόρφωση που εισάγει μια δίοδος ή ένα τρανζίστορ που εργάζεται σε τάξη C (διακοπτόμενο κύκλωμα), όταν διαρρέεται από ρεύμα.

Α) Κυκλώματα γραμμικά

Το απλούστερο κύκλωμα διαμόρφωσης είναι αυτό του σχήματος 5.3.1.



Σχήμα 5.3.1: Απλό γραμμικό κύκλωμα διαμόρφωσης (ΑΜ)

Εύκολα επιβεβαιώνουμε ότι:

$$\mathbf{E(t) = [M_o + s(t)] \cdot \sin(\omega_o t)} \qquad (4)$$

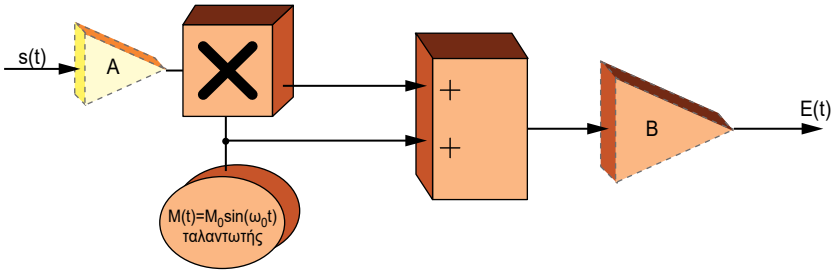
Ο πολλαπλασιαστής δίνει στην έξοδο πάντοτε ως αποτέλεσμα το γινόμενο των τάσεων στις δύο εισόδους, δηλαδή:

$$\mathbf{V_{\varepsilon\xi} = p \cdot V_x \cdot V_y}$$

Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού p μετριέται σε V^{-1} και χαρακτηρίζει τον πολλαπλασιαστή. Στο σχήμα θεωρήσαμε $p=1\ V^{-1}$.

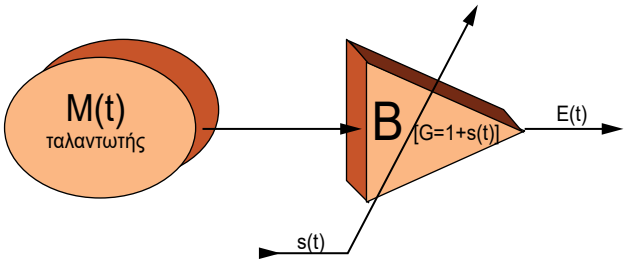
Σήμερα υπάρχουν ολοκληρωμένα κυκλώματα που λειτουργούν έως μερικά MHz και υλοποιούν απ' ευθείας τη διαδικασία του σχήματος 5.3.1 (παράδειγμα το MC 1495, MC 1496 της Motorola κ.α.). Μια ειδική περίπτωση πολλαπλασιαστή είναι ο ισοσταθμισμένος διαμορφωτής δακτυλίου, που εξετάζεται σε επόμενη παράγραφο.

Παραλλαγή της προηγούμενης διάταξης είναι η διάταξη του σχήματος 5.3.2. Εύκολα επαληθεύεται ότι έχουμε διαμόρφωση ΑΜ.



Σχήμα 5.3.2: *Διάταξη διαμόρφωσης (ΑΜ)*

Ένα τρίτο κύκλωμα γραμμικού διαμορφωτή ΑΜ δίνεται στο σχήμα 5.3.3. Εδώ το κέρδος του ενισχυτή είναι μεταβλητό και ελέγχεται από το σήμα διαμόρφωσης s(t).



Σχήμα 5.3.3: *Ενισχυτής με ελεγχόμενο κέρδος ως διαμορφωτής ΑΜ*

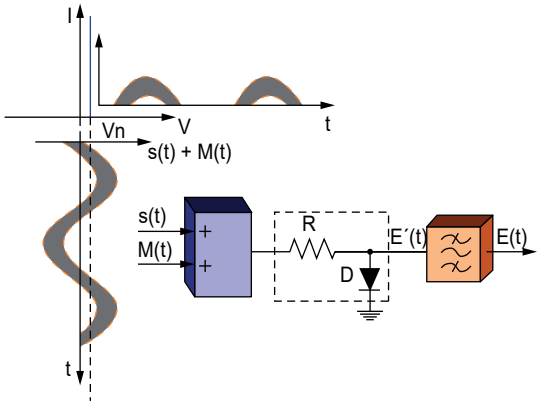
Αν υποθέσουμε ότι το κέρδος του ενισχυτή δίνεται από την σχέση

$$\mathbf{G = 1 + s(t)} \qquad (5)$$

στην έξοδο έχουμε το φέρον διαμορφωμένο κατά πλάτος.

Β) Μη γραμμικοί διαμορφωτές ΑΜ

Στο σχήμα 5.3.4 αποδίδεται ένας διαμορφωτής πλάτους με δίοδο, που λειτουργεί με διακοπτόμενο ρεύμα.



Σχήμα 5.3.4: *Μη γραμμικός διαμορφωτής ΑΜ με δίοδο*

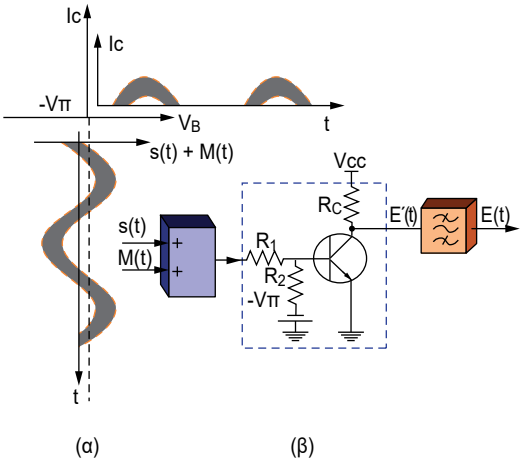
Στην δίοδο εφαρμόζεται το άθροισμα του βασικού σήματος και του φέροντος που προέρχεται από τον ταλαντωτή:

$$V(t) = s(t) + M(t)$$

Το περιοδικό διακοπτόμενο ρεύμα που προκαλείται στη δίοδο έχει πλούσιο φασματικό περιεχόμενο, που μπορούμε να το προσδιορίσουμε μαθηματικά (ανάλυση Fourier). Αποδεικνύεται ότι σ' αυτό το φασματικό περιεχόμενο υπάρχουν οι συμμετρικές φασματικές ακτίνες που συναντούμε στη διαμόρφωση ΑΜ (δηλαδή f_o, f_o+ F και f_o- F). Αν με κατάλληλο φίλτρο επιλέξουμε το συγκεκριμένο τμήμα του φάσματος, στην έξοδο θα πάρουμε το διαμορφωμένο φέρον, όπως σημειώνεται στο σχήμα.

Το κύκλωμα αυτό χαρακτηρίζεται από την απλότητά του και την ευκολία κατασκευής. Η τεχνολογία σήμερα κατασκευάζει διόδους που εργάζονται σε πολύ υψηλές συχνότητες (δίοδοι Sottkey) και τις χρησιμοποιούμε, για να φτιάξουμε διαμορφωτές πλάτους σε ζώνες συχνοτήτων όπου τα γραμμικά κυκλώματα που μελετήθηκαν δεν μπορούν να εργαστούν.

Περίπου στη φιλοσοφία του προηγούμενου κυκλώματος στηρίζεται και το επόμενο κύκλωμα, του σχήματος 5.3.5.



Σχήμα 5.3.5: *Ενισχυτής τάξης λειτουργίας C στο ρόλο μη γραμμικού διαμορφωτή πλάτους*

Πρόκειται για ενισχυτή υψηλών συχνοτήτων σε τάξη λειτουργίας C.

Στους ενισχυτές τάξης C το τρανζίστορ είναι πολωμένο αρνητικά και άγει μόνο στις θετικές κορυφές του σήματος εισόδου (σχήμα 5.3.5α).

Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου ενισχυτή, όπως γνωρίζουμε από τα μαθήματα της ηλεκτρονικής, είναι η μεγάλη απόδοση ισχύος ($\eta = P_{εξ}/ P_{τροφ}$) που έχει και φτάνει έως και 80 %.

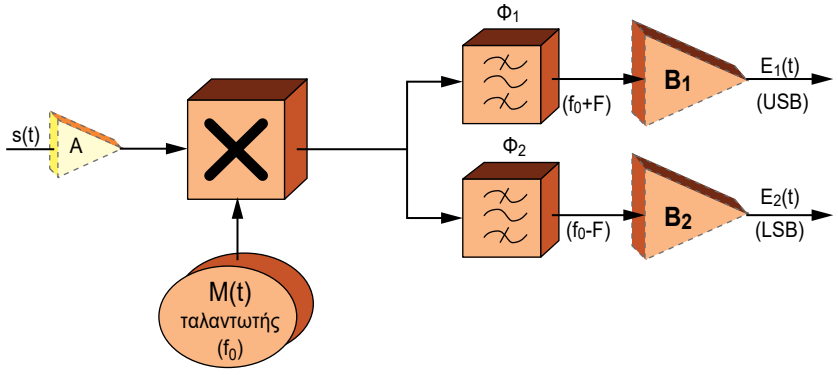
Η απόκριση του κυκλώματος εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας του V_{cc}.

Στην περίπτωση που σε σειρά με την τάση τροφοδοσίας ενός τέτοιου ενισχυτή προστεθεί μέσω μετασχηματιστή το σήμα διαμόρφωσης s(t), η απόκριση του κυκλώματος ελέγχεται από το s(t) και αποδίδεται στο σχήμα 5.3.5β. Το φίλτρο εξόδου L-C αποκαθιστά πλήρως την ημιτονική κυματομορφή του φέροντος που είναι διαμορφωμένο κατά πλάτος.

Η αξιοποίηση αυτού του κυκλώματος συνδυάζει τη διαμόρφωση με το τελικό στάδιο ενίσχυσης και χρησιμοποιείται συχνά. Πρέπει να σημειώσουμε με έμφαση ότι, αν μετά τη διαμόρφωση του φέροντος κατά πλάτος ακολουθήσει στάδιο ενίσχυσης του διαμορφωμένου σήματος, πρέπει να είναι γραμμικός ενισχυτής τάξης Α, που δεν εισάγει παραμορφώσεις πλάτους (διότι θα επηρέαζαν την πληροφορία) και σέβεται πλήρως το φάσμα του διαμορφωμένου φέροντος.

5.3.2 Διαμορφωτές απλής ζώνης χωρίς φέρον (SSBsc)

Η απλούστερη διάταξη για την υλοποίηση διαμόρφωσης SSB είναι αυτή του σχήματος 5.3.6. Στηρίζεται στη δημιουργία, μέσω του πολλαπλασιαστή σήματος DSBsc και στη συνέχεια στην επιλογή της πάνω ή της κάτω φασματικής ζώνης με κατάλληλο φίλτρο.



Σχήμα 5.3.6: *Διαμορφωτής SSBsc με φίλτρο ζώνης*

Αυτή η διαδικασία που εμφανίζεται εύκολη στη σύλληψή της παρουσιάζει σημαντική δυσκολία στην επιλογή και την κατασκευή του φίλτρου εξόδου. Πράγματι, αν λάβουμε υπόψη ότι σε κάθε περίπτωση ισχύει $F_{max} << f_o$, απαιτείται η χρησιμοποίηση φίλτρου που χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλο συντελεστή ποιότητας Q (μεγάλη επιλεκτικότητα).

Ισχύει

$$\mathbf{Q = f_c / (f_{\alpha 1} - f_{\alpha 2}) = f_c / B_{\varphi},} \qquad (6)$$

όπου f_c η κεντρική συχνότητα διέλευσης του φίλτρου και $B_\varphi = f_{\alpha 1} - f_{\alpha 2}$ το εύρος ζώνης λειτουργίας του (κεφάλαιο 3).

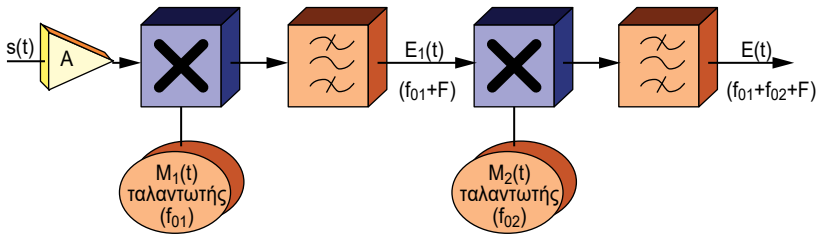
Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε:

$$Q = [(f_o + f_o + F_{max}) / 2] / F_{max} = (f_o / F_{max}) + ½ \text{ ή } Q \approx f_o / F_{max} \quad (7)$$

Για παράδειγμα, αν η συχνότητα φέροντος είναι 5 MHz και η φασματική ζώνη του διαμορφώνοντος σήματος από F_{min}=20 Hz έως F_{max}=5 kHz, τότε απαιτείται Q=1000, δηλαδή φίλτρο που κατασκευάζεται δύσκολα.

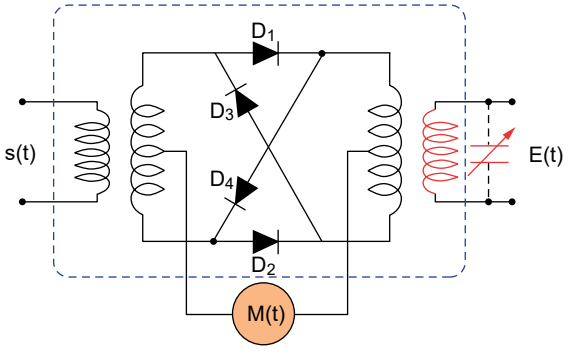
Τη δυσκολία αυτή την αποφεύγουμε, αν επιχειρήσουμε τη SSB διαμόρφωση σε δύο ή περισσότερα διαδοχικά στάδια, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.7. Χρησιμοποιώντας δύο ταλαντωτές με συχνότητες f_{o1} = 0,4 MHz και f_{o2}= 4,6 MHz, έτσι ώστε f_{o1}+ f_{o2}= f_o= 5 MHz, που τους διαμορφώνουμε κατά SSBsc με διάταξη ταυτόσημη με την προηγούμενη, καταλήγουμε στο ίδιο φασματικό αποτέλεσμα.

Όμως τα φίλτρα ζώνης που απαιτούνται έχουν συντελεστή ποιότητας αντίστοιχα $Q_1 \approx 100$ και $Q_2 \approx 10$, άρα είναι λιγότερο επιλεκτικά και κατασκευάζονται ευκολότερα.



Σχήμα 5.3.7: *Διαμορφωτής SSBsc με διαδοχικές αλλαγές συχνότητας*

Σ' αυτού του είδους τις εφαρμογές στο ρόλο του πολλαπλασιαστή συχνά συναντούμε τον ισοσταθμισμένο διαμορφωτή. Πρόκειται για το κύκλωμα που έχουμε στο σχήμα 5.3.8. Η διάταξη των τεσσάρων διόδων θυμίζει δακτύλιο. Η αγωγή των διόδων ελέγχεται από το σήμα του ταλαντωτή του φέροντος M(t), όπως το συναντήσαμε στη διαμόρφωση AM στην προηγούμενη παράγραφο (σχήμα 5.3.4).



Σχήμα 5.3.8: *Κύκλωμα ισοσταθμισμένου διαμορφωτή (με διόδους). Συμπεριφέρεται ως ιδανικός πολλαπλασιαστής.*

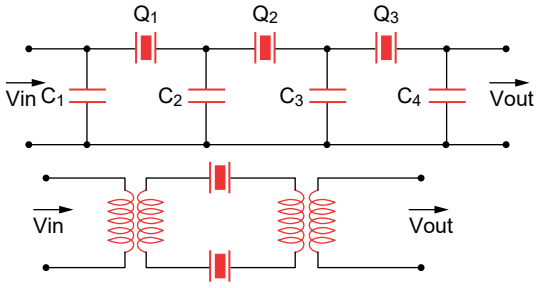
Στις θετικές ημιπεριόδους του σήματος M(t) άγουν οι δίοδοι D_1 και D_2. Στις αρνητικές ημιπεριόδους άγουν οι δίοδοι D_3 και D_4. Το κύκλωμα είναι εντελώς συμμετρικό, γι' αυτό και ονομάζεται ισοσταθμισμένος διαμορφωτής ή διαμορφωτής δακτυλίου.

Στην έξοδο του κυκλώματος όπου με το πηνίο L και τη χωρητικότητα C σχηματίζεται επιλεκτικό φίλτρο έχουμε:

$$\mathbf{E(t) = s(t) \cdot M(t)} \qquad (8)$$

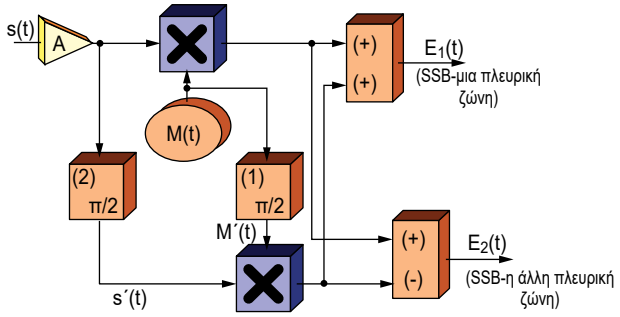
Διερευνώντας τη λειτουργία του διαμορφωτή δακτυλίου διαπιστώνουμε ότι, όταν ένα από τα δύο σήματα s(t) ή M(t) δεν εφαρμοστεί στην αντίστοιχη είσοδο, το αποτέλεσμα στην έξοδο είναι μηδενικό.

Στη θέση των φίλτρων (σχήματα 5.3.6, 5.3.7) χρησιμοποιούνται κρυσταλλικά φίλτρα μεγάλου βαθμού, που εξασφαλίζουν υψηλή επιλεκτικότητα και σταθερότητα συχνότητας. Τέτοια φίλτρα, που φαίνονται στο σχήμα 5.3.9, αποτελούνται από διαδοχικά στάδια με κρυστάλλους (quartz) και υπάρχουν πολλών ειδών. Είναι φίλτρα ειδικής κατασκευής και ο ακριβής υπολογισμός τους και η ρύθμισή τους απαιτεί ειδικά και ακριβά όργανα.



Σχήμα 5.3.9: *Δομές κρυσταλλικών φίλτρων*

Μια άλλη μέθοδος δημιουργίας διαμόρφωσης SSBsc είναι με τη διάταξη του σχήματος 5.3.10, όπου χρησιμοποιούνται δύο κυκλώματα ολίσθησης φάσης κατά (π/2) τόσο του βασικού σήματος όσο και του σήματος του ταλαντωτή της φέρουσας συχνότητας.



Σχήμα 5.3.10: *Διαμορφωτής SSBsc με ολισθητές φάσης κατά π/2.*

Θεωρώντας ότι

$$\mathbf{s(t) = S_o sin(\Omega t)\ και\ M(t) = M_o sin(\omega_o t),}\ \text{τότε}$$

$$\mathbf{s'(t) = -S_o cos(\Omega t)\ και\ M'(t) = -M_o cos(\omega_o t)}$$

Άρα, στις αντίστοιχες εξόδους του αθροιστή και του αφαιρέτη έχουμε:

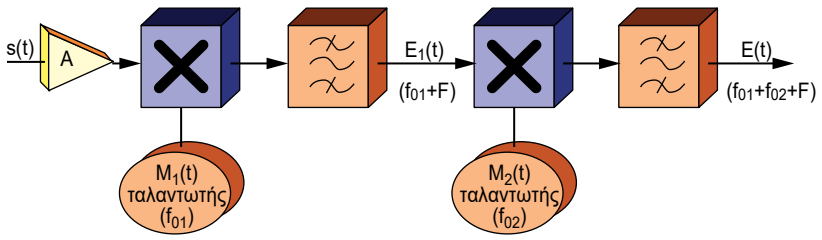
$$\mathbf{E_1(t) = E_o cos[(\omega_o - \Omega)t](LSB)} \quad (9)$$

και

$$\mathbf{E_2(t) = E_o cos[(\omega_o + \Omega)t]\ (USB)} \quad (10)$$

Στη διάταξη αυτή η δυσκολία στην κατασκευή βρίσκεται στον ολισθητή φάσης του βασικού σήματος s(t). Είναι γνωστό από τα μαθήματα ηλεκτρονικής και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ότι είναι πολύ εύκολη η κατασκευή κυκλώματος ολίσθησης της φάσης για συγκεκριμένη συχνότητα f. Έτσι, ο ολισθητής (1) του σχήματος δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία ούτε στον υπολογισμό ούτε στην κατασκευή του κυκλώματος. Αντίθετα, ο ολισθητής (2) πρέπει να δώσει σταθερή ολίσθηση φάσης π/2 για όλες τις συχνότητες του βασικού σήματος. Το κύκλωμα είναι σαφώς πιο πολύπλοκο στη σχεδίαση και στην κατασκευή του. Οποιαδήποτε απόκλιση στην ολίσθηση φάσης από την τιμή (π/2) οδηγεί σε μερική απόρριψη της ανεπιθύμητης πλευρικής ζώνης.

Στο σχήμα 5.3.11 δίνεται το πλήρες διάγραμμα πομπού SSBsc με δύο στάδια μετάθεσης της συχνότητας.

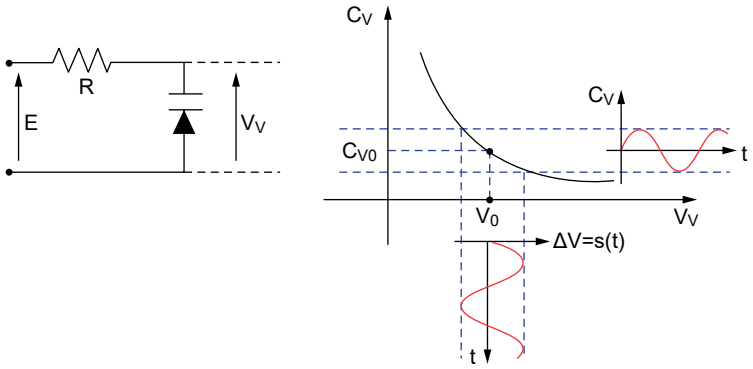


Σχήμα 5.3.11: *Πλήρες δομικό διάγραμμα πομπού SSBsc.*

5.3.3 Διαμορφωτές συχνότητας

Στη διαμόρφωση FM ο διαμορφωτής ταυτίζεται με τον ταλαντωτή που παράγει τη φέρουσα συχνότητα. Συνήθως σε ένα ταλαντωτή L-C ο πυκνωτής C, που η τιμή του προσδιορίζει την συχνότητα ταλάντωσης, αντικαθίσταται μερικώς από ένα νέο στοιχείο, γνωστό ως **δίοδος μεταβλητής χωρητικότητας** ή δίοδος Varicap. Πρόκειται για δίοδο ειδικής τεχνολογίας που, όταν είναι ανάστροφα

πολωμένη (σχήμα 5.3.12), συμπεριφέρεται ως χωρητικότητα (πυκνωτής) και η τιμή της εξαρτάται από την τιμή της τάσης πόλωσης.



Σχήμα 5.3.12: *Συμπεριφορά διόδου Varicap μεταβλητής χωρητικότητας.*

Έτσι, αν αλλάξουμε την ανάστροφη τάση πόλωσης της διόδου εφαρμόζοντάς της αθροιστικά το βασικό σήμα s(t), η χωρητικότητά της μεταβάλλεται στο ρυθμό του σήματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η συχνότητα του ταλαντωτή μεταβάλλεται στον ίδιο ρυθμό. Έχουμε, δηλαδή, διαμόρφωση συχνότητας και ο διαμορφωτής FM είναι ουσιαστικά ένας ταλαντωτής VCO (παράγραφος 5.2).

Όταν δεν υπάρχει σήμα s(t), ο ταλαντωτής έχει σταθερή συχνότητα, που προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$f_0 = 1/\left(2\pi\sqrt{L \cdot C_0}\right), \qquad (11)$$

με $C_o = C_\pi + C_{vo}$, C_π η χωρητικότητα του πυκνωτή και C_{vo} η χωρητικότητα της διόδου Varicap για τη σταθερή τάση πόλωσης (σχήμα 5.3.13).

Όταν εφαρμόζεται το σήμα διαμόρφωσης s(t) και προκαλείται μεταβολή της χωρητικότητας της Varicap ΔC, αποδεικνύεται ότι η προκαλούμενη μεταβολή συχνότητας Δf είναι:

$$\mathbf{\Delta f = f_o \cdot \Delta C / 2C_o} \qquad (12)$$

Από το σχήμα 5.3.12 και την απόκριση της Varicap ισχύει

$$\mathbf{\Delta C = \alpha \cdot \Delta V = \alpha \cdot s(t),} \qquad (13)$$

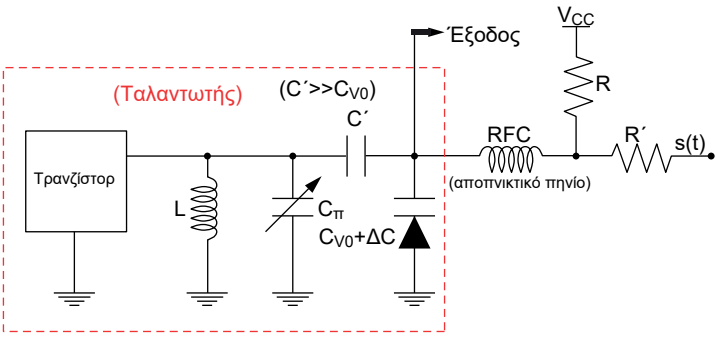
όπου α η κλίση της χαρακτηριστικής της Varicap σε pF/Volt.

Όταν $s(t) = S_o \sin(\Omega t)$, προκύπτει ότι $\Delta C_{max} = \alpha \cdot S_o$. Αντικαθιστώντας στην προηγούμενη σχέση έχουμε:

$$\mathbf{\Delta f_{max} = (f_o \cdot \alpha / 2C_o) \cdot S_o} \qquad (14)$$

Ο όρος μέσα στην παρένθεση έχει μονάδες Hz/V και αντιπροσωπεύει την κλίση του διαμορφωτή (ταλαντωτή VCO), της οποίας ο ορισμός δόθηκε, όταν μελετήσαμε τη διαμόρφωση FM στο τρίτο κεφάλαιο.

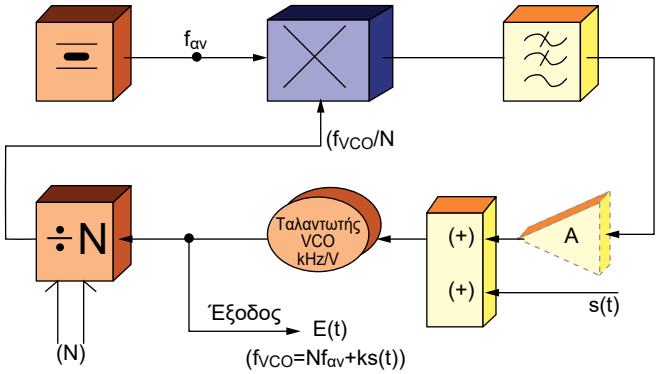
Η πλήρης διάταξη του VCO με στοιχεία L-C και Varicap εμφανίζεται στο σχήμα 5.3.13. Το στοιχείο που σημειώνεται στο σχήμα με τον όρο RFC είναι αποπνικτικό πηνίο και προφυλάσσει τα κυκλώματα χαμηλής συχνότητας από την επίδραση της υψηλής συχνότητας του ταλαντωτή. Ο πυκνωτής C΄με τιμή $C' >> C_v$ δεν υπεισέρχεται στον υπολογισμό της συχνότητας ταλάντωσης. Αν δεν υπήρχε ο πυκνωτής C΄, η τάση πόλωσης του Varicap θα γειωνόταν μέσω του πηνίου L.



Σχήμα 5.3.13: *Ταλαντωτής VCO με δίοδο Varicap.*

Αυτού του είδους τον ταλαντωτή με Varicap τον συναντούμε στους περισσότερους πομπούς FM για συχνότητες από 50 MHz και πάνω. Σε συχνότητες χαμηλότερες, έως και μερικά MHz, συναντούμε σήμερα και άλλους τύπους VCO με διαφορετική δομή που παράγουν ημιτονική ή τετραγωνική κυματομορφή (παλμικό σήμα). Στο εμπόριο κυκλοφορεί μια σειρά τέτοιων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων VCO (για παράδειγμα, CD4046, NE 566 κ.α.).

Στην παράγραφο 5.2 τονίστηκε ότι ένα σοβαρό μειονέκτημα των ταλαντωτών VCO, όπου δε χρησιμοποιείται κρύσταλλος, είναι η σχετικά μικρή σταθερότητα στη συχνότητα. Είναι διατάξεις ευπαθείς στις αλλαγές θερμοκρασίας, στις διαφοροποιήσεις της τάσης πόλωσης, στον θόρυβο κλπ. Γι' αυτό τις περισσότερες φορές θα τους εκμεταλλευτούμε με βρόχο φάσης (PLL).



Σχήμα 5.3.14: *Βρόχος PLL σε δομή διαμορφωτή συχνότητας.*

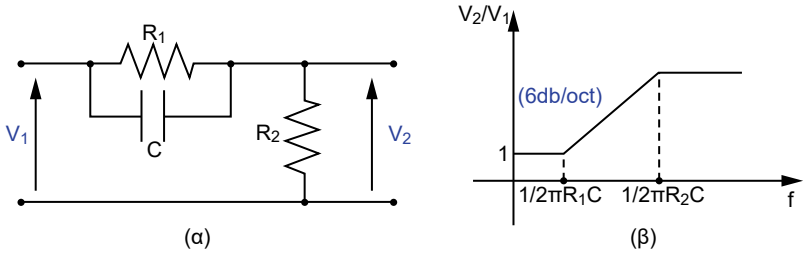
Στο σχήμα 5.3.14 φαίνεται ο βρόχος PLL με ενσωματωμένο ένα στάδιο προσθέτη, που επιτρέπει τη διαμόρφωση συχνότητας του VCO. Αν δεν εφαρμόζεται σήμα διαμόρφωσης s(t), τότε η τάση σφάλματος ε(t) απλά σταθεροποιεί τη συχνότητα του VCO στην τιμή:

$$\mathbf{f_o = N \cdot f_\alpha} \qquad (15)$$

Όταν εφαρμόζουμε σήμα διαμόρφωσης s(t), τότε η συχνότητα του VCO δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{f(t) = f_o + k \cdot s(t) = N \cdot f_\alpha + k \cdot s(t)} \qquad (16)$$

Φίλτρο προέμφασης: Οι πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι στο ακουστικό φάσμα οι υψηλές συχνότητες εμφανίζονται συνήθως με μικρό πλάτος. Ένα μουσικό όργανο, για παράδειγμα, όταν ηχεί, παράγει το βασικό ήχο και ήχους σε υψηλότερες αρμονικές με μικρότερο πλάτος. Η μοναδικότητα εξάλλου του ήχου του οργάνου είναι ακριβώς η σύνθεση αυτών των αρμονικών. Τα σήματα μικρού πλάτους και μεγαλύτερης συχνότητας δίνουν μικρό δείκτη διαμόρφωσης (σχέση 25, κεφ. 3) και κατά τη μετάδοση ενδεχομένως επισκιάζονται από το θόρυβο, που είναι ενοχλητικότερος στις υψηλές συχνότητες του ακουστικού φάσματος. Για να ξεπεράσουμε αυτό το πρόβλημα, στη ραδιοφωνία FM το σήμα διαμόρφωσης, πριν εφαρμοστεί στο διαμορφωτή/ταλαντωτή διέρχεται από κατάλληλο δικτύωμα (υψηλοπερατό φίλτρο) και υφίσταται ενίσχυση των υψηλότερων συχνοτήτων του φάσματος. Αυτή η διεργασία περιγράφεται στην γραφική παράσταση του σχήματος 5.3.15α,β και είναι γνωστή με τον όρο προέμφαση (pro-emphasis).



Σχήμα 5.3.15: *Φίλτρο προέμφασης στη διαμόρφωση FM.*

Διεθνώς τα όρια αυτής της διεργασίας έχουν οριοθετηθεί στις συχνότητες F_1= 2,1 kHz και 30 kHz (το πάνω όριο των 30 kHz είναι εκτός ακουστικού φάσματος) και η κλίση ενίσχυσης είναι 6 dB/οκτάβα (Οκτάβα = διπλασιασμός της συχνότητας. Τα 6 dB αντιστοιχούν σε διπλασιασμό της τάσης του σήματος). Το χρησιμοποιούμενο δικτύωμα φαίνεται στο σχήμα 5.3.15α,β.

Αποδεικνύεται ότι:

$$\mathbf{F_1 = 1/2\pi R_1 \cdot C \text{ και } F_2 = 1/2\pi R_2 \cdot C} \qquad (17)$$

Συχνά στην τεχνική βιβλιογραφία, αντί για τον ορισμό της προέμφασης μέσω των συχνοτήτων, δίνεται ο ορισμός μέσω της σταθεράς χρόνου του κυκλώματος R-C, που αντιστοιχεί στην κάτω συχνότητα F_1=2,1 kHz:

$$\tau = R_1 \cdot = 1/2\pi F_1 = 1/(2 \cdot 3{,}14 \cdot 2{,}1 \cdot 10^3) = 75\ \mu s$$

Δηλαδή, στη ραδιοφωνία FM η προέμφαση είναι 75 μs.

Στην πλευρά του δέκτη ένα χαμηλοπερατό φίλτρο (φίλτρο αποέμφασης) αποκαθιστά την αρχική φυσιογνωμία του σήματος. Η διαδικασία προέμφασης/ αποέμφασης συνεισφέρει σημαντικά στην καλυτέρευση του λόγου σήματος / θόρυβο στην FM.

Εφαρμογή 1: Στο κύκλωμα διαμόρφωσης ΑΜ του σχήματος 5.3.2 δίνονται: $M(t) = 10\sin(\omega_o t)$,

$s(t) = 8\cos(\Omega t)$ και ο συντελεστής του πολλαπλασιαστή $k=0{,}1\ V^{-1}$. Να προσδιοριστεί η έκφραση του διαμορφωμένου φέροντος και το ποσοστό διαμόρφωσης που προκύπτει. Δίνονται επίσης f_o = 1,5 MHz και F= 5 kHz. Να προσδιοριστεί το εύρος της φασματικής ζώνης του διαμορφωμένου φέροντος.

Λύση: *Από το σχήμα έχουμε:*

$E(t) = M(t) + k \cdot s(t) \cdot M(t) =$

$= 10[1 + 0{,}8\cos(\Omega t)] \cdot \sin(\omega_o t)$.

Το ποσοστό διαμόρφωσης είναι m= 80%.

Το εύρος της φασματικής ζώνης είναι:

$(f_o - F, f_o + F)$ *δηλαδή 1,495 MHz έως 1,505 MHz.*

Εφαρμογή 2: Σε διαμόρφωση SSB η τελική συχνότητα φέρουσας πρέπει να είναι 4 MHz. Ο διαμορφωτής που θα χρησιμοποιηθεί είναι με φίλτρα ζώνης που διαθέτουν Q<10. Το φάσμα του σήματος διαμόρφωσης εκτείνεται από 100 Hz έως 4 kHz. Να παρουσιαστεί το δομικό διάγραμμα του διαμορφωτή. Πόσα στάδια μετάθεσης συχνότητας περιλαμβάνει;

Λύση: *Θα χρησιμοποιηθεί διαμορφωτής SSB, σαν αυτός του σχήματος 5.3.7, αλλά με τρία στάδια μετάθεσης της συχνότητας. Οι ταλαντωτές που θα χρησιμοποιηθούν διαδοχικά έχουν συχνότητα*

f_{o1}= 40 kHz, f_{o2}= 360 kHz *και* f_{o3} = 3,6 MHz ($f_{o1} + f_{o2} + f_{o3} = f_o$ = 4 MHz).

Εφαρμογή 3: Σ' ένα ταλαντωτή με Varicap η συχνότητα ταλάντωσης είναι f_o= 100 MHz, όταν η συνολική χωρητικότητα του ταλαντούμενου κυκλώματος L-C είναι C_o= 70 pF. Να προσδιοριστεί το απαιτούμενο ΔC_{max} που πρέπει να προκληθεί στο Varicap από το σήμα διαμόρφωσης, ώστε η απόκλιση συχνότητας να είναι Δf_{max}= 75 kHz. Αν η κλίση του Varicap είναι α = 0,1 pF/V, να προσδιοριστεί το πλάτος του σήματος διαμόρφωσης.

Λύση: $\Delta f_{max} = (f_o \cdot \Delta C_{max})/2C_o$ *άρα* ΔC_{max}=

$= 2(\Delta f_{max}/f_o) \cdot C_o = 0{,}105$ pF.

Επίσης, $\Delta C_{max} = \alpha \cdot s_o$, *άρα* s_o= 1,05 V.

Εφαρμογή 4: Σ' ένα συνθέτη συχνοτήτων, όπως αυτόν του σχήματος 5.2.7, το βήμα σύνθεσης είναι 100 kHz και ο διαιρέτης N παίρνει τιμές από N_1= 880 έως N_2=1080. Να προσδιοριστούν οι συχνότητες του σήματος στην έξοδο του VCO. Επίσης, αν ο VCO είναι γραμμικός και η κλίση του είναι 2,5 MHz/V, να προσδιοριστούν τα όρια μεταβολής της τάσης ελέγχου στην είσοδό του.

Λύση: $f_1 = N_1 \cdot f_{αν} = 88$ MHz

$f_2 = N_2 \cdot f_{αν} = 108$ MHz

Η μεταβολή της τάσης εισόδου του VCO που αντιστοιχεί σ' αυτή τη ζώνη συχνοτήτων είναι: $V_2 - V_1 = (f_2 - f_1) / k =$

$= (20\ MHz) / (2{,}5\ MHz/V) = 8V$

5.4 Ειδικοί τύποι διαμορφώσεων

5.4.1 Στερεοφωνική διαμόρφωση

Η στερεοφωνική διαμόρφωση ή, όπως συνηθέστερα αποκαλείται, **διαμόρφωση Stereo** αφορά τη διαμόρφωση συχνότητας ενός φέροντος από δύο ανεξάρτητες πηγές ακουστικού σήματος.

Στη συνέχεια συμβολίζουμε α(t) και δ(t) τα δύο ακουστικά σήματα, ως απλή υπενθύμιση ότι οι δύο πηγές (στην εφαρμογή της ραδιοφωνίας) είναι το αριστερό και δεξιό κανάλι ενός στερεοφωνικού ενισχυτή, μιας ορχήστρας (σχήμα 3.2.5) κλπ.

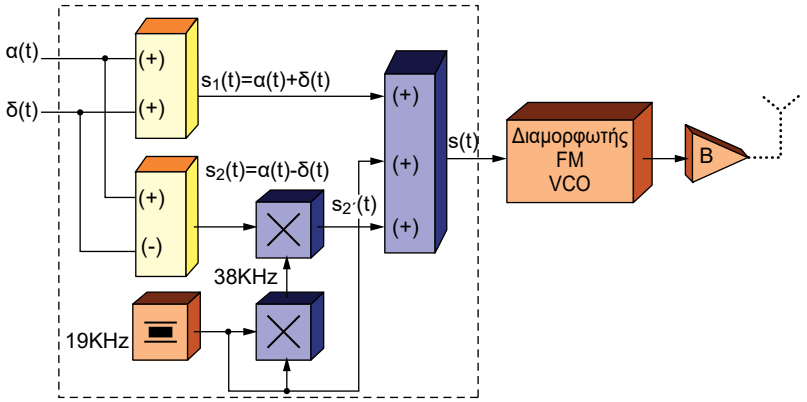
Τα δύο ακουστικά σήματα καταλαμβάνουν την ίδια φασματική ζώνη από μερικά Hz έως 15 kHz. Πρέπει λοιπόν να προετοιμαστούν κατάλληλα και να μεταδοθούν με τρόπο, που ο στερεοφωνικός δέκτης FM να καταφέρει να τα διαχωρίσει εκ νέου με κατάληξη δύο ανεξάρτητες εξόδους, προς το αριστερό και το δεξιό ηχείο αντίστοιχα.

Από την άλλη πλευρά πρέπει να εξασφαλιστεί η συμβατότητα μιας στερεοφωνικής εκπομπής με τον απλό μονοφωνικό δέκτη, ο οποίος στη μοναδική έξοδο που διαθέτει πρέπει να μπορεί να αποδώσει μια σύνθεση πληροφορίας και από τις δύο πηγές.

Η διάταξη που υιοθετήθηκε γι' αυτή τη διεργασία φαίνεται στο σχήμα 5.4.1. Αρχικά γίνεται μίξη των δύο σημάτων α(t) και δ(t) και δημιουργούνται δύο νέα σήματα:

$$\mathbf{s_1(t) = α(t) + δ(t)\ και\ s_2(t) = α(t) - δ(t)} \qquad (18)$$

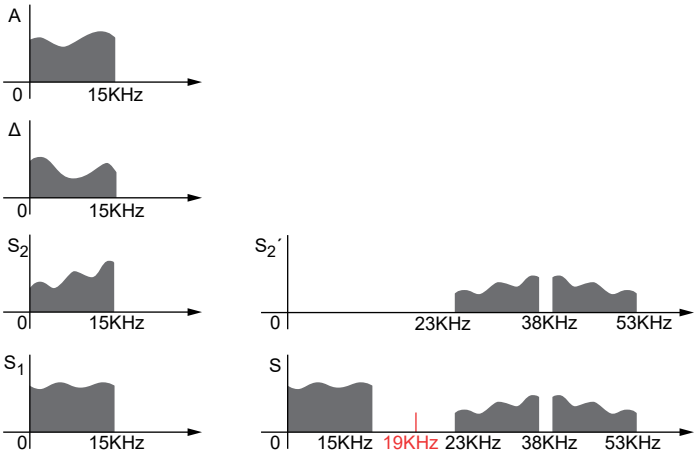
Οι φασματικές ζώνες των δύο νέων σημάτων είναι ίδιες με αυτές των αρχικών. Με διαμόρφωση DSBsc ενός υποφέροντος σήματος 38 kHz μετατοπίζεται η φασματική ζώνη του $s_2(t)$ και προκύπτει σήμα $s_2'(t)$ (σχήμα 5.4.1, 5.4.2).



Σχήμα 5.4.1: *Διαμορφωτής στερεοφωνικού σήματος.*

Το αποτέλεσμα $s(t) = s_1(t) + s_2'(t)$ στην έξοδο του προσθετή είναι το σήμα διαμόρφωσης, το οποίο θα διαμορφώσει κατά συχνότητα το τελικό φέρον. Η φασματική φυσιογνωμία όλων των σημάτων διαδοχικά αποδίδεται στο σχήμα 5.4.2.

Για να διευκολυνθεί η διαδικασία αποδιαμόρφωσης και επαναπροσδιορισμού των αρχικών σημάτων α(t) και δ(t) στο δέκτη, στο φάσμα του σήματος s(t) ενσωματώνεται και φασματική ακτίνα 19 kHz (από την οποία δημιουργήθηκε υψώνοντας στο τετράγωνο το υποφέρον των 38 kHz). Στο δέκτη η συχνότητα 19 kHz θα χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για την αναγέννηση του υποφέροντος των 38 kHz, που είναι απαραίτητο για την αποδιαμόρφωση DSB. Η διάταξη αυτή ονομάζεται στερεοφωνικός κωδικοποιητής ή απλά κωδικοποιητής stereo.

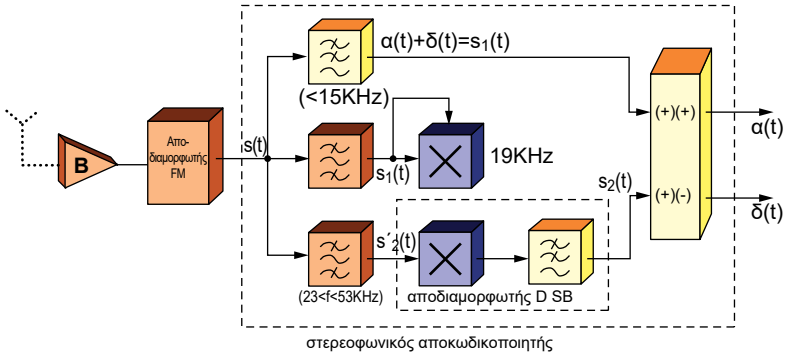


Σχήμα 5.4.2: *Διαδοχικά η φασματική επεξεργασία και το τελικό φάσμα στην έξοδο του στερεοφωνικού κωδικοποιητή.*

Στη λήψη μετά την αποδιαμόρφωση FM του φέροντος με κατάλληλα φίλτρα ζώνης θα διαχωριστούν τα σήματα $s_1(t)$ και $s_2'(t)$ (σχήμα 5.4.3). Το $s_2'(t)$ θα υπο-

στεί αποδιαμόρφωση DSB από όπου θα προκύψει το σήμα $s_2(t)$. Στη συνέχεια προσθέτοντας και αφαιρώντας τα σήματα $s_1(t)$ και $s_2(t)$, θα προκύψουν τα αρχικά σήματα α(t) και δ(t). Το τμήμα του δέκτη μέσα στη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 5.4.3 ονομάζεται αποκωδικοποιητής stereo.

Σήμερα τις διατάξεις του στερεοφωνικού κωδικοποιητή και αποκωδικοποιητή τις συναντούμε και υπό μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Σχήμα 5.4.3: *Αποκωδικοποίηση στερεοφωνικού σήματος.*

Από το σχήμα διαπιστώνεται αμέσως ότι ένας απλός μονοφωνικός δέκτης ο οποίος δε διαθέτει στερεοφωνικό αποκωδικοποιητή αποδίδει στην έξοδο μόνο το σήμα $s_1(t) = a(t) + δ(t)$, δηλαδή το προσθετικό αποτέλεσμα της μίξης της αριστερής και δεξιάς πηγής.

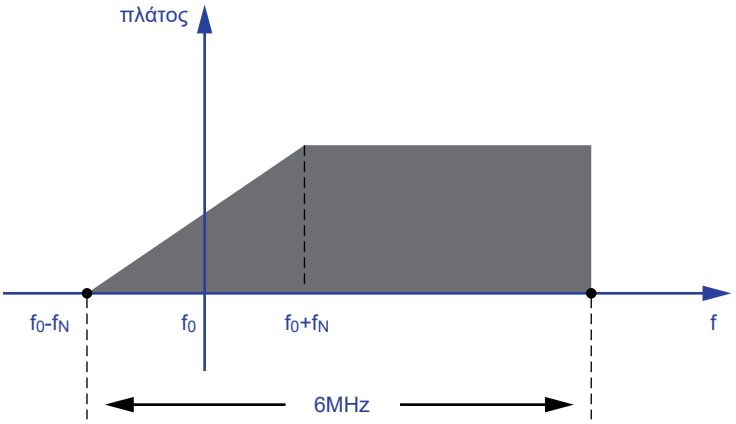
Η φασματική ζώνη του σήματος που προέκυψε στην έξοδο του στερεοφωνικού κωδικοποιητή, όπως φαίνεται και στο σχήμα, είναι: (20 Hz- 53 kHz).

Άρα από τον τύπο του Carson προκύπτει ότι το φασματικό εύρος μιας στερεοφωνικής εκπομπής FM είναι:

$$\mathbf{B = 2 \cdot (53 + 75) = 256\ kHz}$$

5.4.2 Διαμόρφωση υποβαθμισμένης πλευρικής ζώνης (VSB)

Η διαμόρφωση υποβαθμισμένης πλευρικής ζώνης, γνωστότερη με τον αγγλικό όρο **VSB (Vestigial Side Band modulation)**, θεωρείται παράγωγη της κλασικής διαμόρφωσης AM με φέρον. Η φασματική φυσιογνωμία της διαμόρφωσης VSB αποδίδεται στο σχήμα 5.4.4. Εφαρμόζεται στην περίπτωση που το σήμα διαμόρφωσης s(t) έχει ευρύ φάσμα που εκτείνεται από 0 Hz έως και μερικά MHz. Είναι η περίπτωση του φάσματος Video ή τηλεοπτικού φάσματος από 0 Hz έως 5 MHz με βάση τις θεσμοθετημένες διεθνώς προδιαγραφές. Διαμόρφωση AM θα απαιτούσε μεγάλο εύρος ζώνης (διπλάσιο, δηλαδή 10 MHz). Από την άλλη πλευρά είναι ουσιαστικά αδύνατη η αξιοποίηση διαμόρφωσης SSBsc.



Σχήμα 5.4.4: *Φάσμα στη διαμόρφωση VSB. Το φάσμα της εικόνας στην περίπτωση μονόχρωμης τηλεόρασης περιορίζεται σε 6 MHz.*

Πράγματι, καθώς η συχνότητα του φέροντος είναι πολύ μεγάλη και οι πλευρικές ζώνες εφάπτονται μεταξύ τους, ο διαχωρισμός τους με φίλτρα είναι πρακτικά αδύνατος. Υιοθετήθηκε λοιπόν για τα τηλεοπτικά σήματα η διαμόρφωση VSB όπου το φασματικό αποτέλεσμα είναι η επιλογή της πάνω πλευρικής ζώνης και υποβαθμισμένου τμήματος της κάτω πλευρικής. Το φάσμα αυτό εξασφαλίζεται με ειδικό φίλτρο, σαν αυτό του σχήματος, γνωστού με το όνομα φίλτρο Νίκουιστ (Niquist). Παρατηρώντας το σχήμα διαπιστώνουμε ότι για τις συχνότητες $f>f_o+ F_N$ έχουμε ουσιαστικά διαμόρφωση SSB. Για τις συχνότητες $f_o- F_N<f<f_o+ F_N$ η διαμόρφωση είναι διπλής ζώνης με άνισες πλευρικές, των οποίων το άθροισμα είναι σταθερό. Με τη διαμόρφωση VSB εξασφαλίζεται ότι το διαμορφωμένο φέρον στην εφαρμογή της τηλεόρασης περιορίζεται σε φασματική ζώνη εύρους περίπου 6 MHz, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.4.

Στο τηλεοπτικό φάσμα θα επανέλθουμε σε επόμενη παράγραφο.

Και στην περίπτωση της VSB, όπως και στην SSB, η διαμόρφωση πραγματοποιείται αρχικά με χαμηλή φέρουσα συχνότητα και ακολουθούν διαδοχικά ένα ή δύο στάδια μετάθεσης συχνότητας, έως να προκύψει η τελική φέρουσα.

Εφαρμογή 1: Σ' ένα στερεοφωνικό κωδικοποιητή οι συχνότητες της αριστερής και δεξιάς ηχητικής πηγής είναι αντίστοιχα $F_α$= 2 kHz, $F_δ$ =4 kHz.

Να προσδιοριστούν όλες οι φασματικές συνιστώσες στην έξοδο του κωδικοποιητή.

Λύση: *Από το δομικό διάγραμμα του κωδικοποιητή προκύπτει:*

Συχνότητες σήματος s_1: 2 kHz, 4 kHz.

Συχνότητες σήματος s_2: 2 kHz, 4 kHz.

Συχνότητες σήματος DSBsc (s'_2): 34, 36, 40, 42 kHz.

Σύνολο συχνοτήτων: 2, 4, 19, 34, 36, 40, 42 kHz.

Εφαρμογή 2: Να αποδειχθεί ότι, όταν ένα ημιτονικό σήμα πολλαπλασιαστεί με τον εαυτό του, προκύπτει σήμα στη διπλάσια συχνότητα.

Λύση: *Πράγματι, αν* $s(t) = S_o \sin(\omega t)$ *και ο συντελεστής του πολλαπλασιαστή* $k = 1\ V^{-1}$ *τότε έχουμε:*

$s'(t) = S_o^2 \sin^2(\omega t) = (S_o^2/2)[1 + \cos(2\omega t)] = (S_o^2/2) + (S_o^2/2)\cos(2\omega t)$.

Αν με πυκνωτή στην έξοδο του πολλαπλασιαστή αποκοπεί η συνεχής συνιστώσα, τότε παραμένει μόνον το ημιτονικό σήμα στη διπλάσια συχνότητα.

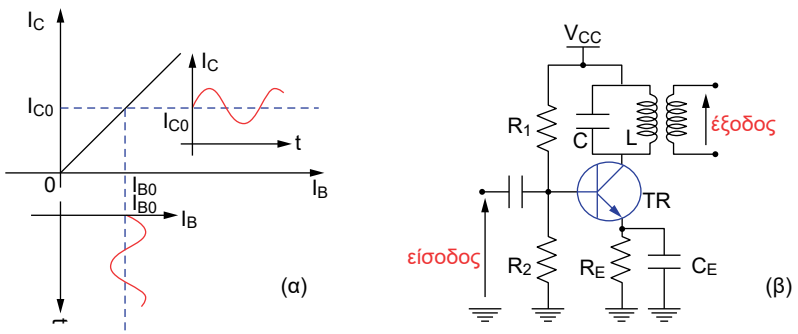
5.5 Ενισχυτές ισχύος Υψηλών Συχνοτήτων

Το είδος του ενισχυτή υψηλών συχνοτήτων (RF) (ραδιοσυχνοτήτων, RF: Radio Frequencies) που χρησιμοποιείται ως τελικό στάδιο, εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης και την ισχύ που πρέπει να έχουμε στην έξοδο.

Στην περίπτωση των διαμορφώσεων πλάτους, απαιτείται γραμμικός ενισχυτής (linear amplifier). Στο γραμμικό ενισχυτή το σήμα εξόδου είναι ενισχυμένο, αλλά πιστό αντίγραφο του σήματος εισόδου. Έτσι, δεν αλλοιώνεται η περιβάλλουσα του σήματος που μεταφέρει την πληροφορία. Οι γραμμικοί ενισχυτές σχεδιάζονται είτε με ένα τρανζίστορ σε τάξη λειτουργίας A είτε με δομή push-pull με δύο τρανζίστορς σε τάξη λειτουργίας B ή AB. **Στη διαμόρφωση συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μη γραμμικός ενισχυτής σε τάξη λειτουργίας C** που έχει μεγαλύτερη απόδοση ισχύος. Για τη μέγιστη μεταφορά ισχύος στην αντίσταση φόρτου (κεραία), απαιτείται προσαρμογή (matching) με την αντίσταση εξόδου του ενισχυτή (εξίσωση των ωμικών αντιστάσεων).

5.5.1 Γραμμικοί ενισχυτές

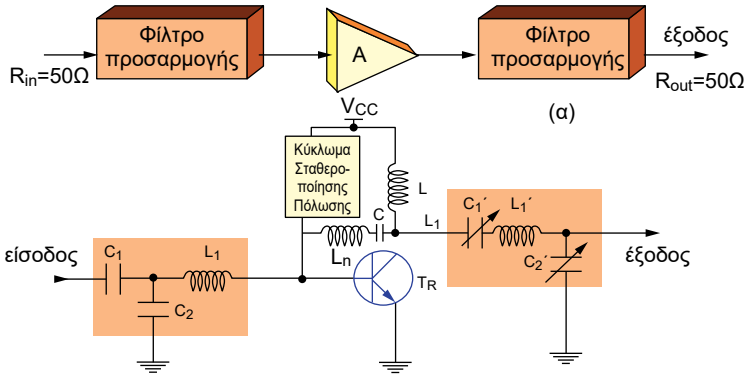
Σε τάξη λειτουργίας A το τρανζίστορ είναι πολωμένο στη γραμμική περιοχή λειτουργίας του και άγει συνεχώς σε όλη την περίοδο ημιτονικής διέγερσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.1 α. Ακόμα, όταν δεν υπάρχει σήμα στην είσοδο το τρανζίστορ, άγει έχοντας σημαντική κατανάλωση ισχύος. Οι ενισχυτές τάξης A δεν έχουν μεγάλη απόδοση ($\eta = P_{\varepsilon\xi}/P_{\tau\rho}$) και χρησιμοποιούνται περισσότερο ως προενισχυτές (Buffer amplifiers) ή ως ενισχυτές χαμηλής σχετικά ισχύος.



Σχήμα 5.5.1: *α) Πόλωση τρανζίστορ σε τάξη λειτουργίας A.*
β) Απλό στάδιο γραμμικού ενισχυτή.

Στο σχήμα 5.5.1β δίνεται ένα απλό στάδιο ενισχυτή (RF) τάξης Α. Η πόλωση του τρανζίστορ επιτυγχάνεται με τη γέφυρα των αντιστάσεων R_1 και R_2 χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις για τη θερμική σταθεροποίηση της λειτουργίας του κυκλώματος. Στο κύκλωμα εξόδου (συλλέκτη) συναντούμε το συντονιζόμενο στη συχνότητα λειτουργίας f_o κύκλωμα L-C. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται ως προενισχυτής ή ενισχυτής ισχύος έως μερικά Watt. Ο φόρτος συνδέεται επαγωγικά με μετασχηματιστή.

Ενισχυτής τάξης Α μεγαλύτερης ισχύος δίνεται στο σχήμα 5.5.2. Ο ενισχυτής είναι προσαρμοσμένος στην είσοδο και την έξοδο με αντιστάσεις εισόδου και εξόδου των 50 Ω.

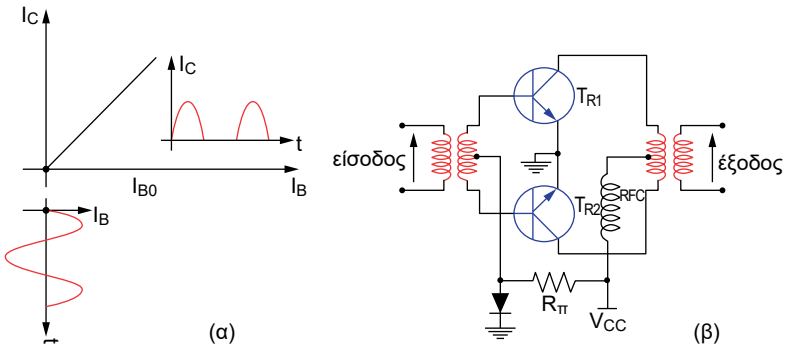


Σχήμα 5.5.2: *Γραμμικός ενισχυτής ισχύος τάξης Α με κυκλώματα προσαρμογής στην είσοδο και την έξοδο.*

Η προσαρμογή επιτυγχάνεται με συντονιζόμενα L-C φίλτρα ζώνης τύπου Τ ή Π, όπως φαίνεται στο σχήμα, τα οποία ως εκ τούτου σχεδιάζονται για συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας. Στην πόλωση του τρανζίστορ οι απαιτήσεις θερμικής σταθερότητας είναι αυστηρότερες. Χρησιμοποιείται κύκλωμα με σταθεροποίηση του ρεύματος ηρεμίας. Η απόδοση των ενισχυτών τάξης Α είναι μικρότερη του 30%. Τα προσφερόμενα σήμερα τρανζίστορς ισχύος φτάνουν έως μερικές δεκάδες Watts. Για μεγαλύτερες ισχύες χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα τρανζίστορς, τα οποία συνδέονται παράλληλα.

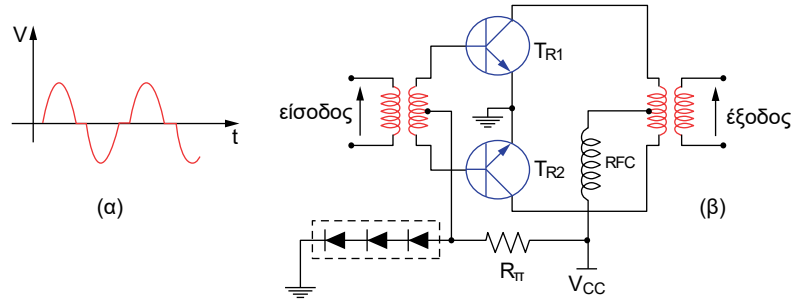
Η κατασκευή ενός ενισχυτή ισχύος RF απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Βασικό πρόβλημα αποτελεί η εμφάνιση αυτοταλάντωσης. Συμβαίνει, όταν ένα μικρό ποσοστό από το ισχυρό σήμα εξόδου μέσω παρασιτικών στοιχείων (παρασιτικές χωρητικότητες) επιστρέφει προς την είσοδο του ενισχυτή και δημιουργεί ανεπιθύμητες παρασιτικές ταλαντώσεις. Το φαινόμενο, τις περισσότερες φορές, οφείλεται στην παρασιτική χωρητικότητα βάσης – συλλέκτη (C_{BC}), που σε μια σωστή κατασκευή ο σχεδιαστής πρέπει με κατάλληλο κύκλωμα να την εξουδετερώσει (neutralisation). Υπάρχουν πολλές λύσεις. Μια απ' αυτές φαίνεται στο σχήμα 5.5.2 και αφορά την τοποθέτηση πηνίου εξουδετέρωσης μεταξύ της βάσης και του συλλέκτη του τρανζίστορ.

Διάταξη push-pull με τα τρανζίστορς TR_1 και TR_2 σε τάξη λειτουργίας Β δίνεται στο σχήμα 5.5.3β. Σε τάξη λειτουργίας Β το τρανζίστορ έχει μηδενικό ρεύμα ηρεμίας και άγει μόνο κατά τη θετική ημιπερίοδο της ημιτονικής διέγερσης (αγωγή 180°, σχήμα 5.5.3α). Στη δομή push-pull τα τρανζίστορς άγουν συμπληρωματικά και στην έξοδο μέσω του μετασχηματιστή αποκαθίσταται η πλήρης φυσιογνωμία του ημιτονικού σήματος.



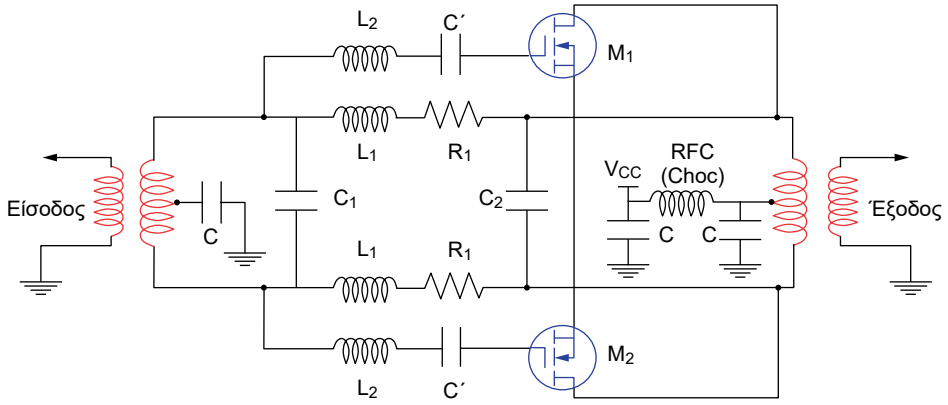
Σχήμα 5.5.3: *α) Πόλωση τρανζίστορ σε τάξη λειτουργίας Β.*
β) Διάταξη ενισχυτή push-pull.

Μερικές φορές στα ασθενή ρεύματα, όταν η χαρακτηριστική των τρανζίστορς δεν είναι γραμμική, αντί πόλωσης Β χρησιμοποιείται πόλωση ΑΒ (δηλαδή τα τρανζίστορς πολώνονται, ώστε να έχουν μικρό ρεύμα ηρεμίας και αγωγή για γωνία μεγαλύτερη των 180°). Αποφεύγεται έτσι η παραμόρφωση διασταύρωσης, που εμφανίζεται στις εναλλαγές των ημιπεριόδων (σχήμα 5.5.4α).



Σχήμα 5.5.4: *α) Παραμόρφωση διασταύρωσης στις εναλλαγές των ημιπεριόδων.*
β) Διάταξη push-pull με τρανζίστορς με πόλωση ΑΒ.

Στην είσοδο και την έξοδο του ενισχυτή χρησιμοποιούνται τοροειδείς μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων (μετασχηματιστές με κυκλικό οπλισμό από φερρίτη), οι οποίοι εξασφαλίζουν και την προσαρμογή με τις αντιστάσεις εισόδου και φόρτου. Το γεγονός ότι δεν υπάρχουν συντονιζόμενα κυκλώματα είναι σημαντικό, διότι ο ενισχυτής εργάζεται σε ευρεία ζώνη συχνοτήτων. Η διάταξη push-pull χρησιμοποιείται για την κατασκευή γραμμικών ενισχυτών στη ζώνη 1 – 30 MHz για σήματα AM και SSB. Αντί διπολικών τρανζίστορς, χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα και τρανζίστορς πεδίου (MOSFETs) μεγάλης ισχύος. Στο σχήμα 5.5.5 δίνεται ένας τέτοιος ενισχυτής.

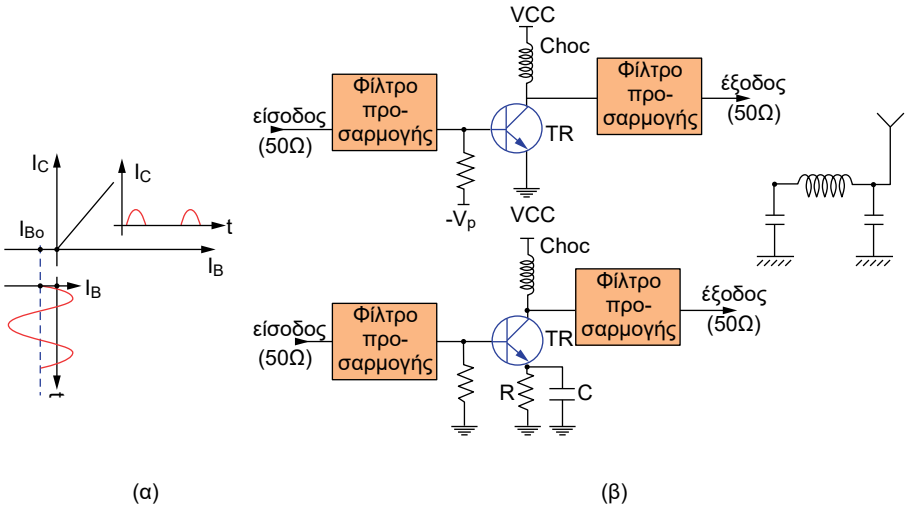


Σχήμα 5.5.5: *Κύκλωμα ενισχυτή ισχύος σε διάταξη push-pull με τρανζίστορς πεδίου.*

Η απόδοση των ενισχυτών push-pull θεωρητικά ανέρχεται στο 78%. Στην πράξη είναι περίπου 60%.

5.5.2 Ενισχυτής ισχύος (RF) τάξης λειτουργίας C

Στον ενισχυτή τάξης λειτουργίας C η γωνία αγωγής του τρανζίστορ είναι μικρότερη από 180°. Το τρανζίστορ σε ημιτονική διέγερση άγει μόνο στις κορυφές των θετικών ημιπεριόδων (σχήμα 5.5.6α). Στο σχήμα 5.5.6β είναι σχεδιασμένος ένας ενισχυτής τάξης C με δύο παραλλαγές. Η αρνητική πόλωση του τρανζίστορ επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση εξωτερικής πηγής είτε με κύκλωμα αυτοπόλωσης R-C, που τοποθετείται στον εκπομπό του τρανζίστορ. Όταν το τρανζίστορ άγει, ο πυκνωτής φορτίζεται. Όταν το τρανζίστορ δεν άγει ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης R. Σε συνεχή λειτουργία εμφανίζεται στον εκπομπό του τρανζίστορ ένα θετικό δυναμικό, που η ακριβής τιμή του εξαρτάται από την σταθερά εκφόρτισης του πυκνωτή (RC) και ισοδυναμεί με την ανάστροφη πόλωσή του.



Σχήμα 5.5.6: *α) Πόλωση τρανζίστορ σε τάξη λειτουργίας C.*
β) Μη γραμμικός ενισχυτής ισχύος σε τάξη λειτουργίας C.

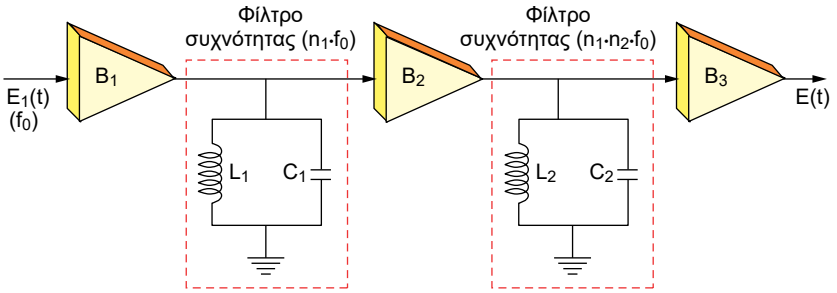
Στην έξοδο του ενισχυτή υπάρχει πάντοτε συντονιζόμενο κύκλωμα L-C στη συχνότητα λειτουργίας f_o (φίλτρο προσαρμογής), που αποκαθιστά τη φυσιογνωμία του ημιτονικού φέροντος με πλάτος περίπου ίσο με την τάση τροφοδοσίας, απορρίπτοντας τις υψηλές αρμονικές που εμφανίζονται λόγω της μη συνεχούς λειτουργίας του τρανζίστορ. Το παράλληλο συντονιζόμενο κύκλωμα μπορεί να αντικατασταθεί από συντονιζόμενο φίλτρο ζώνης στην έξοδο, υπολογισμένο να προσφέρει προσαρμογή μεταξύ της αντίστασης εξόδου του ενισχυτή και της αντίστασης φόρτου.

Σε κάθε περίπτωση το φίλτρο εξόδου τόσο στους γραμμικούς ενισχυτές όσο και στους ενισχυτές τάξης C πρέπει να διαθέτει το απαραίτητο εύρος ζώνης που απαιτείται, ώστε όλο το φάσμα του διαμορφωμένου φέροντος να διέρχεται χωρίς υποβιβασμό. Δηλαδή, πάντοτε πρέπει να ισχύει:

«Εύρος ζώνης ενισχυτή (RF)» > «Εύρος φασματικής ζώνης του διαμορφωμένου φέροντος».

Οι ενισχυτές τάξης C έχουν υψηλή απόδοση, που φτάνει έως και 80%.

Άλλη αξιοσημείωτη εφαρμογή των ενισχυτών τάξης C είναι η χρησιμοποίησή τους ως διατάξεων πολλαπλασιασμού της συχνότητας. Πράγματι, αν το επιλεκτικό κύκλωμα στην έξοδο του ενισχυτή έχει συχνότητα συντονισμού πολλαπλάσια της συχνότητας (f_o) του σήματος εισόδου, ενισχύει την αντίστοιχη αρμονική του απορρίπτοντας τις υπόλοιπες. Έτσι, στην έξοδο του αντίστοιχου σταδίου έχουμε φέρον συχνότητας $2f_o$, $3f_o$, $4f_o$ κ.λ.π. (σχήμα 5.5.7).



Σχήμα 5.5.7: *Μη γραμμικός ενισχυτής τάξης λειτουργίας C ως στάδιο πολλαπλασιασμού συχνότητας.*

Εφαρμογή 1: Η ολική ισχύς στην έξοδο πομπού ΑΜ είναι 160 W. Το ποσοστό διαμόρφωσης του σήματος είναι 80%. Να υπολογιστεί η αποτελεσματικότητα ισχύος D και η ωφέλιμη ισχύς στην έξοδο. Επίσης, αν η απόδοση του συστήματος ($\eta = P_{\varepsilon\xi} / P_{\tau\rho}$) είναι της τάξης του 30 % και η τάση τροφοδοσίας είναι $V_{cc} = 60$ V, να προσδιοριστεί το ρεύμα κατανάλωσης.

Λύση: *$D = m^2 / 2 + m^2 = 0,24$.*
Άρα, $P_{\omega\varphi} = 0,24 \cdot 160 = 38,4$ W.
Επίσης $P_{\tau\rho} = P_{o\lambda} / \eta = 533,33$ W.
Άρα, $I_{cc} = 533,33/60 = 8,88$ A.

Εφαρμογή 2: Να προσδιοριστεί το εύρος λειτουργίας του ενισχυτή εξόδου πομπού FM, όταν στη διαμόρφωση FM ισχύει $\Delta f_{max} = 50$ kHz και $F_{max} = 10$ kHz.

Λύση: *Η φασματική ζώνη του σήματος μετά τη διαμόρφωση είναι, με βάση τον τύπο του Carson: B = 2(50 + 10) = 120 kHz. Άρα, απαιτείται το εύρος λειτουργίας του ενισχυτή εξόδου να είναι > 120 kHz γύρω από την κεντρική συχνότητα λειτουργίας του.*

5.6 Τηλεοπτικοί πομποί

Η τηλεόραση αποτελεί σήμερα το πιο δημοφιλές μέσο επικοινωνίας (μονόδρομης), ενημέρωσης και ψυχαγωγίας. Η ανάπτυξή της είναι ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Περάσαμε γρήγορα από τη μονόχρωμη (ασπρόμαυρη) τηλεοπτική εκπομπή στην έγχρωμη τηλεόραση, ενώ οι νέες τεχνολογίες υπόσχονται νέες τηλεοπτικές υπηρεσίες και προγράμματα, που φαίνεται ότι θα εφαρμοστούν πολύ γρήγορα. Τέτοιες υπηρεσίες είναι η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας με πολύ καλύτερη ποιότητα εικόνας, η αμφίδρομη (interactive) τηλεόραση, όπου από το σπίτι κάθε ιδιώτης θα έχει δυνατότητες επικοινωνίας με την αίθουσα παραγωγής του προγράμματος, οι ολοκληρωμένες υπηρεσίες όπου η ίδια συσκευή θα είναι υπολογιστής, δέκτης τηλεόρασης, τερματικό δικτύου κ.α.

Στις επόμενες παραγράφους θα μας απασχολήσει η δομή του πομπού μονόχρωμου ή έγχρωμου τηλεοπτικού σήματος.

5.6.1 Τηλεοπτικός πομπός μονόχρωμου σήματος

Ως μονόχρωμο τηλεοπτικό πομπό ορίζουμε το σύστημα εκπομπής εικόνων (σήματος Video) που περιορίζονται σε αποχρώσεις του γκρίζου, με όρια από το απόλυτο λευκό έως το μαύρο. Δηλαδή, **η βασική πληροφορία είναι η φωτεινότητα (luminance)** και όχι το χρώμα μιας εικόνας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γνωρίσαμε πολλές λεπτομέρειες για την όραση, τη φυσιολογία του αισθητηρίου της όρασης, που είναι ο τελικός δέκτης ενός οπτικού σήματος, και τις παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή και την αποστολή μιας εικόνας. Επίσης πολλές φορές αναφερθήκαμε στα σήματα Video και στο φασματικό τους περιεχόμενο χωρίς πολλές εξηγήσεις.

Για να απομυθοποιήσουμε το σήμα Video, θα εξετάσουμε τα Ευρωπαϊκά πρότυπα λειτουργίας του, όπως έχουν προσδιοριστεί από τους διεθνείς οργανισμούς τηλεπικοινωνιών:

- Ο αριθμός των γραμμών σάρωσης μιας εικόνας κατά τη μετατροπή της σε ηλεκτρικό σήμα είναι 625 γραμμές ανά εικόνα.
- Ο αριθμός των ολοκληρωμένων εικόνων (πλήρων πεδίων) ανά μονάδα χρόνου είναι 25 εικόνες ανά δευτερόλεπτο (sec) (ή 50 ημιεικόνων ανά sec).

Προκύπτει ότι η συχνότητα σάρωσης των γραμμών ανά δευτερόλεπτο είναι:

$N_{γρ} = 625 \cdot 25 = 15625$ γραμμές/sec

Αν θεωρήσουμε ότι μια γραμμή που σαρώνεται αποτελείται από κ διαφορετικά σημεία και λάβουμε υπόψη τις διαστάσεις της οθόνης, που έχουν λόγο πλάτους/ύψος περίπου 4/3 πρέπει να δεχτούμε ότι:

$κ = 625 \cdot 4/3 = 833$ σημεία ανά γραμμή.

Το σύνολο των σημείων που σαρώνονται ανά δευτερόλεπτο, ώστε η φωτεινότητά τους να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα είναι:

$N_σ = 15625 \cdot 833 \approx 13.000.000$ σημεία/sec

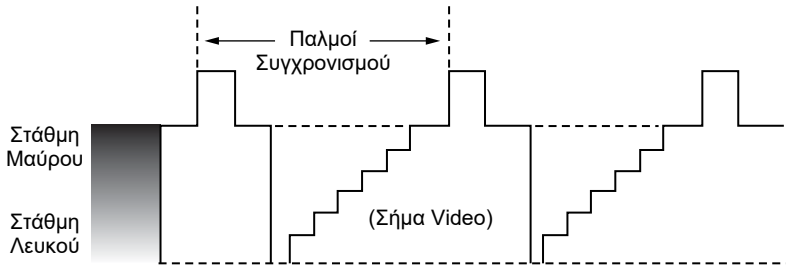
Είναι άμεσα κατανοητό ότι ο ρυθμός μεταβολών (περιόδων) του ηλεκτρικού σήματος που θα προκύψει έχει άμεση σχέση με τον αριθμό των σημείων που σαρώνονται (σχήμα 5.6.1). Υποθέτοντας ότι για δύο διαδοχικά σημεία αρκεί μια περίοδος, προκύπτει ότι η μέγιστη φασματική συχνότητα ενός τηλεοπτικού σήματος είναι:

$$\mathbf{F_{max} = 6.500.000\ Hz = 6,5\ MHz.}$$

Αυτή η συχνότητα αναφέρεται ως ανώτατο πάνω όριο των σημάτων Video. Είναι προφανές ότι η συχνότητα των 0 Hz αντιστοιχεί στην περίπτωση που όλη η εικόνα είναι ομοιόμορφα μονόχρωμη (ίδιο χρώμα σε όλα τα σημεία), οπότε το βασικό ηλεκτρικό σήμα s(t) που προκύπτει από τη σάρωση έχει σταθερή τιμή, δηλαδή είναι συνεχές.

Το πείραμα έχει δείξει ότι οι υψηλότερες συχνότητες του φάσματος αντιστοιχούν σε λεπτομέρειες της εικόνας που, αν λείψουν, δεν αλλοιώνουν ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά της εικόνας. Έτσι, οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί στην Ευρώπη επιβάλλουν τον περιορισμό του φάσματος Video με τη χρήση φίλτρων μέχρι τη συχνότητα $F_{max} = 5$ MHz.

Η χρονική εικόνα του σήματος Video, έτσι όπως προκύπτει από τη σάρωση, μαζί με τους παλμούς συγχρονισμού, εμφανίζεται στο σχήμα 5.6.1.



Σχήμα 5.6.1: *Η εικόνα του σήματος Video με τους παλμούς συγχρονισμού στον παλμογράφο.*

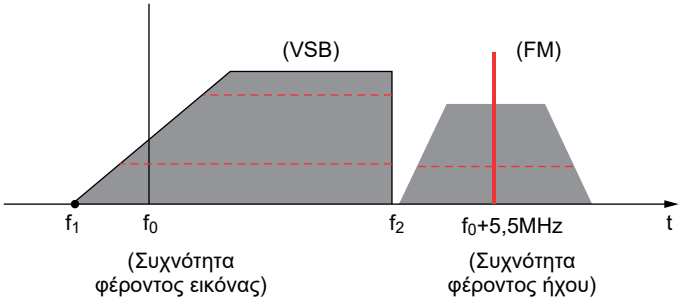
Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται, για τους λόγους που σχολιάστηκαν στην αντίστοιχη παράγραφο (παρ. 5.4.2), είναι η VSB. Έχει υιοθετηθεί η λεγόμενη αρνητική διαμόρφωση του φέροντος, στην οποία δηλαδή τα υψηλά ποσοστά διαμόρφωσης αντιστοιχούν σε μικρή φωτεινότητα (μαύρο), ενώ τα χαμηλά ποσοστά αντιστοιχούν σε υψηλή φωτεινότητα. Οι παλμοί συγχρονισμού αντιστοιχούν σε διαμόρφωση 100 %.

Η χρησιμοποίηση αυτής της αντιστοίχισης παρουσιάζει δύο βασικά πλεονεκτήματα:

- Ενδεχομένως έντονα παράσιτα, που εκδηλώνονται συνήθως υπό μορφή παλμών, προκαλούν μαύρες ατέλειες (στίγματα) στην εικόνα, οι οποίες είναι λιγότερο ενοχλητικές από ό,τι αντίστοιχες έντονα φωτεινές ανωμαλίες.
- Ενδεχομένως μη γραμμικές παραμορφώσεις (κορεσμός) δεν επηρεάζουν το πραγματικό σήμα της πληροφορίας που έχει χαμηλή στάθμη.

Το φάσμα Video του τηλεοπτικού σήματος μετά τη διαμόρφωση είναι αυτό του σχήματος 5.4.4. Με βάση τις προδιαγραφές CCIR καλύπτει φασματική ζώνη με εύρος περίπου 6 MHz.

Στις τηλεοπτικές εκπομπές δεν έχουμε μόνο το σήμα της εικόνας, αλλά και το ακουστικό. Το ακουστικό σήμα διαμορφώνει κατά συχνότητα (FM) ένα δεύτερο φέρον, του οποίου η συχνότητα είναι κατά 5,5 MHz μεγαλύτερη από τη φέρουσα συχνότητα της εικόνας. Στο σχήμα 5.6.2 δίνεται το πλήρες φάσμα μιας τηλεοπτικής μονόχρωμης εκπομπής μαζί με το φάσμα του ήχου.



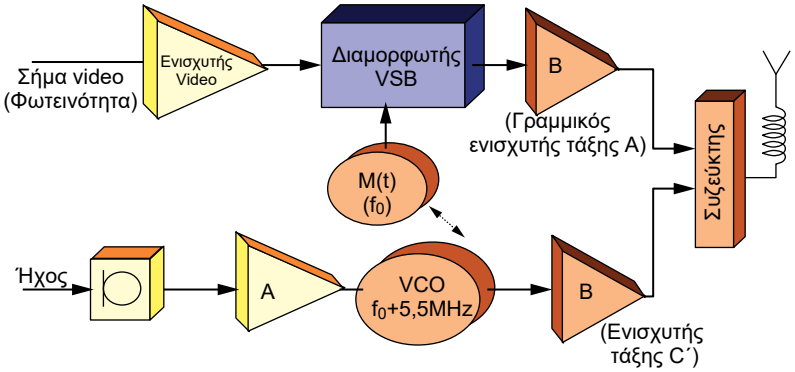
Σχήμα 5.6.2: *Πλήρες φάσμα τηλεοπτικής μονόχρωμης εκπομπής (φάσμα εικόνας και ήχου).*

Στη διαμόρφωση συχνότητας για το ακουστικό σήμα χρησιμοποιείται μέγιστη απόκλιση συχνότητας Δf_{max} = 50 kHz και προέμφαση με σταθερά χρόνου 50 μs. Το εύρος ζώνης που προκύπτει με το νόμο του Carson είναι:

B = 2(50 + 15) = 130 kHz.

Οι παραπάνω τιμές παρουσιάζουν κάποιες αποκλίσεις από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τα πρότυπα που καθεμιά υιοθέτησε. Οι πίνακες με τις ακριβείς προδιαγραφές καθεμιάς περιέχονται σε εξειδικευμένη τεχνική βιβλιογραφία.

Το γενικό διάγραμμα ενός πομπού μονόχρωμης τηλεόρασης δίνεται στο σχήμα 5.6.3.



Σχήμα 5.6.3: *Διάγραμμα πομπού μονόχρωμης (ασπρόμαυρης) τηλεόρασης.*

Για την εκπομπή του τηλεοπτικού σήματος χρησιμοποιούνται δύο ανεξάρτητοι δρόμοι, ένας για την εκπομπή του σήματος Video και ένας για την εκπομπή του ακουστικού σήματος. Τα δύο ανεξάρτητα τμήματα συγκλίνουν μέσω συζεύκτη ισχύος (Diplexer) στην κοινή κεραία εκπομπής.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι το τελευταίο στάδιο ισχύος για την εικόνα είναι γραμμικός ενισχυτής (διότι έχουμε διαμόρφωση πλάτους-VSB), ενώ από την

πλευρά του ήχου (λόγω της FM διαμόρφωσης) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενισχυτής τάξης C. Ο τελευταίος λειτουργεί περίπου με το 20% της ισχύος του ενισχυτή της εικόνας.

Σύμφωνα με το πρότυπο της CCIR, ονομαστική συχνότητα εκπομπής ενός τηλεοπτικού σταθμού θεωρείται η συχνότητα φέροντος της εικόνας. Με βάση αυτή τη συχνότητα έχουν καθοριστεί τα κανάλια εκπομπής των σταθμών τηλεόρασης που κατανέμονται σε περιοχές και εκτείνονται στις ζώνες των κυμάτων VHF και UHF. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται το όνομα, η ζώνη και οι συχνότητες των διαύλων της τηλεόρασης. Στις ζώνες I και III η απόσταση μεταξύ διαδοχικών διαύλων είναι 7 MHz. Στις ζώνες IV και V η αντίστοιχη απόσταση έχει καθοριστεί σε 8 MHz.

Περιοχή	Δίαυλος	Ζώνη	Φέρουσα	Φέρουσα
		(MHz)	Εικ. (MHz)	Ήχου (MHz)
I VHF	2	47-54	48,25	53,75
	3	54-61	55,25	60,75
	4	61-68	62,25	67,65
III VHF	5	174-181	175,25	180,75
	6	181-188	182,25	187,75
	7	188-195	189,25	194,75
	8	195-202	196,25	201,75
	9	202-209	203,25	208,75
	10	209-216	210,25	215,75
	11	216-223	217,25	222,75
	12	223-230	224,25	229,75
IV UHF	21	470-478	471,25	476,75
	22	478-486	479,25	484,75
	23	486-494	487,25	492,25
	..	.....	.....	.....
	..	.....	.....	.....
	..	.....	.....	.....
	37	598-606	599.25	604,75
V UHF	38	606-614	607,25	612,75
	39	614-622	615,25	620,75
	..	.....	.....	.....
	..	.....	.....	.....
	69	854-862	855,25	860,75

Πίνακας κατανομής διαύλων τηλεοπτικών εκπομπών κατά CCIR

5.6.2 Τηλεοπτικός πομπός έγχρωμης εικόνας

Στην περίπτωση της έγχρωμης τηλεόρασης, εκτός από την πληροφορία της φωτεινότητας, ενδιαφέρουν και τα χρώματα της εικόνας ή, όπως ορίστηκαν αυστηρότερα στο δεύτερο κεφάλαιο, **οι πληροφορίες της χρωμικότητας** (**-chrominance:** η απόχρωση και ο κορεσμός).

Με την εμφάνιση της έγχρωμης τηλεόρασης, που ήταν ο φυσιολογικός απόγονος της ασπρόμαυρης, έπρεπε να ικανοποιηθούν τρεις προϋποθέσεις:

- Μια έγχρωμη εκπομπή τηλεόρασης να λαμβάνεται και από μονόχρωμο (ασπρόμαυρο) δέκτη (σε διαφορετική περίπτωση, όλοι έπρεπε αμέσως να αντικαταστήσουν το δέκτη τους).
- Ένας έγχρωμος δέκτης να μπορεί να λαμβάνει ικανοποιητικά σε «άσπρο-μαύρο» μια μονόχρωμη εκπομπή.
- Το συνολικό εύρος της φασματικής ζώνης να παραμείνει το ίδιο για την έγχρωμη ή την ασπρόμαυρη εκπομπή, ώστε να μη χρειάζεται επαναπροσδιορισμός των διατιθέμενων καναλιών τηλεοπτικών εκπομπών.

Για να ικανοποιηθούν οι πιο πάνω απαιτήσεις προηγήθηκαν εμπεριστατωμένες μελέτες της χρωματομετρίας, για να εκτιμηθούν ποσοτικά οι διαφορές μιας έγχρωμης από μια απλή εικόνα.

Σύμφωνα με τη βασική σχέση της χρωματομετρίας, έχουμε:

$$\textbf{Χρώμα} = \textbf{Φωτεινότητα (Y)} + \textbf{Χρωμικότητα (C)} \qquad (19)$$

Οι μελέτες και τα πειράματα στόχευσαν και κατάφεραν να ορίσουν και τα δυο μεγέθη, φωτεινότητα και χρωμικότητα, ως σύνθεση τριών βασικών χρωμάτων αναφοράς, το κόκκινο (R), το πράσινο (G), και το μπλε (B). Τα τρία αυτά χρώματα αποτελούν για την έγχρωμη τηλεόραση τις πρωτογενείς βασικές πληροφορίες. Σε αυτή τη σύλληψη στηρίχτηκε και η ανάπτυξη της έγχρωμης κάμερας και η ανασύνθεση των χρωμάτων στην οθόνη της τηλεόρασης.

Η φωτεινότητα αποδείχτηκε ότι σχετίζεται με τις αρχικές πληροφορίες R, G και B ως εξής:

$$\mathbf{Y = 0{,}30R + 0{,}59G + 0{,}11B} \qquad (20)$$

Υπάρχουν ειδικά κυκλώματα (κωδικοποιητές) που συνθέτουν την πληροφορία της φωτεινότητας. Σ' αυτή την πληροφορία μόνο αρκείται ο απλός μονόχρωμος δέκτης.

Αν στην εφαρμογή της έγχρωμης τηλεόρασης έπρεπε να μεταδώσουμε ως πληροφορίες τα τρία ανεξάρτητα σήματα, που αντιπροσωπεύουν τα τρία βασικά χρώματα στην έξοδο της κάμερας (R, G, B), τότε κατά προσέγγιση ο όγκος της πληροφορίας θα ήταν τριπλάσιος, το εύρος ζώνης πολύ μεγαλύτερο και δε θα ικανοποιούνταν ούτε η τρίτη προϋπόθεση συμβατότητας ούτε και η πρώτη. Δεν υιοθετήθηκε λοιπόν αυτή η μεθοδολογία.

Η πρώτη συνθήκη συμβατότητας, που αναφέρθηκε πιο πάνω, ικανοποιήθηκε με την ανεξάρτητη μετάδοση της πληροφορίας της φωτεινότητας και της χρωμικότητας, όπως ορίζει η σχέση.

Οι πληροφορίες της χρωμικότητας που πρέπει να σταλούν αφορούν τις χρωμικότητες των τριών βασικών χρωμάτων που, με βάση τις προηγούμενες σχέσεις, είναι:

$$C_R = R - Y = 0{,}70R - 0{,}59G - 0{,}11B \quad (21)$$
$$C_G = G - Y = -0{,}30R + 0{,}41G - 0{,}11B$$
$$C_B = B - Y = -0{,}30R - 0{,}59G + 0{,}89B$$

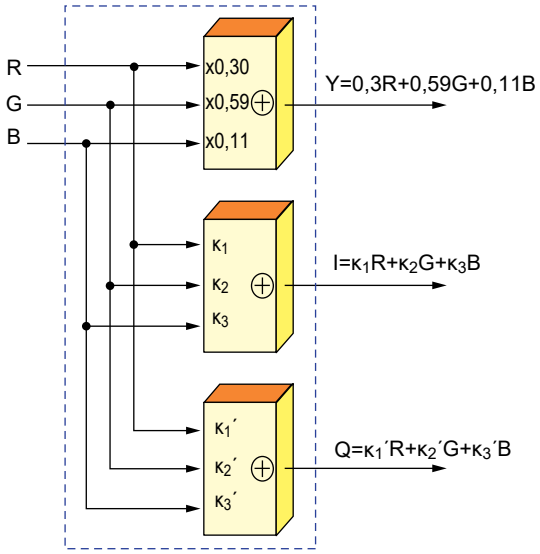
Είναι αρκετό να σταλούν οι δύο μόνο από τις τρεις. Ο έγχρωμος δέκτης ουσιαστικά, λαμβάνοντας την πληροφορία της φωτεινότητας και δύο πληροφορίες χρωμικότητας, έχει να εκτελέσει μια μαθηματική επεξεργασία (να λύσει το σύστημα των τριών εξισώσεων με τους τρεις αγνώστους) και να αναπαράγει τα τρία σήματα R, G και B, που πάνω στην οθόνη συνθέτουν ξανά το τελικό χρώμα.

Στα τρία μεγάλα συστήματα έγχρωμης τηλεόρασης NTSC, PAL και SECAM η πληροφορία (Y) της φωτεινότητας διαμορφώνει το φέρον με διαμόρφωση VSB, όπως και στην περίπτωση της ασπρόμαυρης τηλεόρασης.

Αντίθετα, τα συστήματα αυτά διαφοροποιούνται στη διαδικασία μετάδοσης των πληροφοριών της χρωμικότητας. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στην προσπάθεια να προσαρμοστούν οι πληροφορίες καλύτερα στο μέσο μετάδοσης, με το μικρότερο εύρος φασματικής ζώνης και με το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στη λήψη. Στα δεδομένα της έγχρωμης εικόνας ελήφθησαν υπόψη οι ιδιότητες αντίληψης και η ευαισθησία του αισθητηρίου της όρασης, όπως:

- Η διακριτική ικανότητα του ματιού στις διαφοροποιήσεις των χρωμάτων είναι σαφώς μικρότερη από τη διακριτική ικανότητα της φωτεινότητας (του άσπρου-μαύρου). Έτσι οι πληροφορίες χρωμικότητας μπορούν να μεταδοθούν με λιγότερες λεπτομέρειες από ό,τι της φωτεινότητας. Άρα ο όγκος πληροφορίας είναι μικρότερος, δηλαδή έχουμε μικρότερο εύρος ζώνης.
- Η διακριτική ικανότητα του ματιού στη χρωμικότητα εξαρτάται από το χρώμα και είναι μεγαλύτερη στα λεγόμενα συμπληρωματικά χρώματα (πορτοκαλί-ανοιχτόχρωμο μπλε).
- Η ευαισθησία του ματιού επίσης εξαρτάται από το χρώμα και είναι μέγιστη στο κίτρινο.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις προσεγγίστηκαν διαφορετικές λύσεις. Έτσι, δε μεταδίδονται οι αμιγείς πληροφορίες χρωμικότητας, αλλά δύο παράγωγα σήματα (I) και (Q), που αντιπροσωπεύουν τις χρωμικότητες του κόκκινου και του μπλε, αφού πολλαπλασιαστούν (για λόγους που δε θα αναφερθούν εδώ) με διορθωτικούς συντελεστές διαφορετικούς για κάθε σύστημα.



Σχήμα 5.6.4: *Δημιουργία των σημάτων φωτεινότητας και χρωμικότητας στην έγχρωμη τηλεόραση.*

Η φασματική ζώνη των σημάτων (I) και (Q) είναι μικρή και με συγκεκριμένη μεθοδολογία τοποθετείται στο εσωτερικό της φασματικής ζώνης του σήματος της φωτεινότητας (Y), ώστε το συνολικό εύρος ζώνης του φάσματος μένει το ίδιο.

Α) Το σύστημα έγχρωμης τηλεόρασης NTSC

Η κωδικοποίηση των προς μετάδοση πληροφοριών φωτεινότητας και χρωμικότητας στο σύστημα NTSC (National Television Systems Committee), που αναπτύχθηκε στην Αμερική, γίνεται με βάση τις σχέσεις:

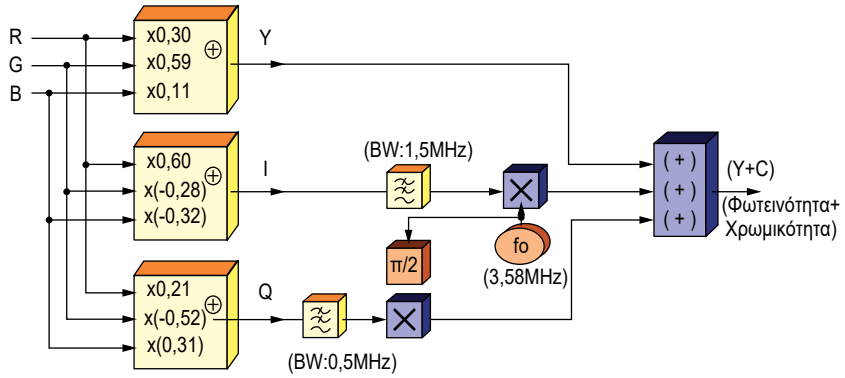
$$Y = 0{,}30R + 0{,}59G + 0{,}11B \quad (22)$$
$$I = 0{,}74(R-Y) - 0{,}27(B-Y) = 0{,}60R - 0{,}28G - 0{,}32B$$
$$Q = 0{,}48(R-Y) + 0{,}41\,(B-Y) = 0{,}21\,R - 0{,}52G + 0{,}31B$$

Το πρόσημο – δηλώνει ότι το αντίστοιχο σήμα αναστρέφεται, πριν τον συνδυασμό.

Στο συγκεκριμένο σύστημα, που διαφοροποιείται από τα υπόλοιπα, διότι χρησιμοποιεί 525 γραμμές σάρωσης (αντί 625) και συχνότητα 30 εικόνων /sec, υιοθετήθηκαν για τη μετάδοση οι εξής τιμές:

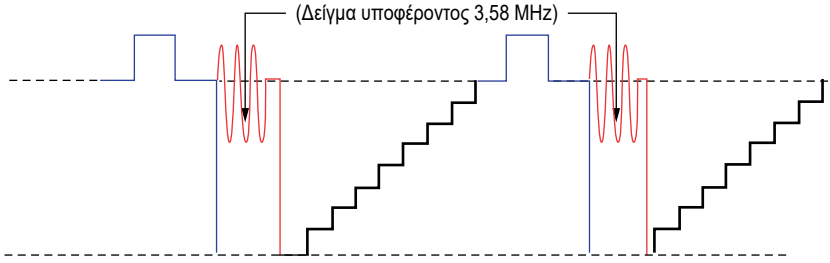
- Φασματική ζώνη σήματος φωτεινότητας (Y): 4,2 MHz
- Φασματική ζώνη σήματος (I): 1,4 MHz.
- Φασματική ζώνη σήματος (Q): 0,55 MHz.

Ο κωδικοποιητής NTSC δίνεται στο σχήμα 5.6.5. Οι πληροφορίες I και Q διαμορφώνουν ανεξάρτητα δύο ορθογώνια υποφέροντα (διαφέρουν π/2) με συχνότητα 3,58 MHz και με διαμόρφωση διπλής ζώνης χωρίς φέρον (DSBsc).



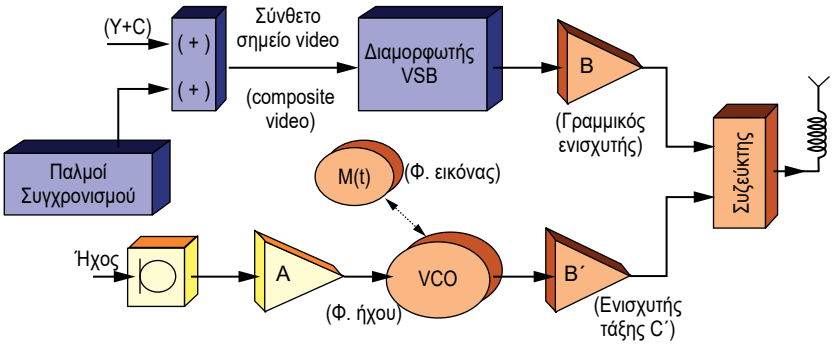
Σχήμα 5.6.5: *Κωδικοποιητής NTSC.*

Στη συνέχεια συνδυάζονται με το σήμα φωτεινότητας (Y) και διαμορφώνουν το τελικό φέρον της εκπομπής. Για να διευκολυνθεί η αποδιαμόρφωση DSB των σημάτων χρωμικότητας στο δέκτη, αμέσως μετά τους παλμούς συγχρονισμού αποστέλλεται δείγμα του υποφέροντος (μερικοί περίοδοι), που θα αξιοποιηθεί στο δέκτη για να συγχρονίσει τον τοπικό ταλαντωτή στο στάδιο της αποδιαμόρφωσης (σχήμα 5.6.6).



Σχήμα 5.6.6: *Το σήμα Video με ενσωματωμένο δείγμα του υποφέροντος των σημάτων χρωμικότητας.*

Το γενικό διάγραμμα ενός τηλεοπτικού πομπού NTSC δίνεται στο σχήμα 5.6.7.



Σχήμα 5.6.7: *Γενικό διάγραμμα τηλεοπτικού πομπού NTSC.*

Β) Σύστημα έγχρωμης τηλεόρασης PAL

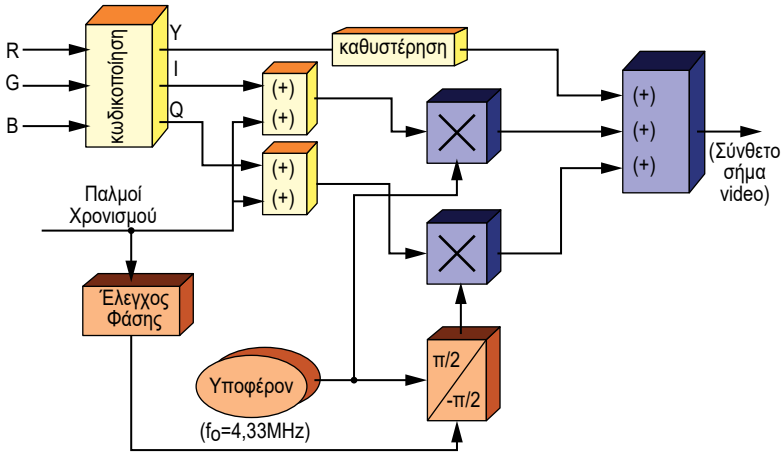
Στο σύστημα PAL (Phase Alternation Line : εναλλασσόμενη φάση ανά γραμμή) η κωδικοποίηση των πληροφοριών γίνεται με βάση τις σχέσεις:

$$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B \quad (23)$$
$$I = 0,877(R-Y) = 0,61R – 0,52G – 0,10B$$
$$Q = 0,493(B-Y) = - 0,15R – 0,29G – 0,44B$$

Το φασματικό εύρος που χρησιμοποιείται για τα σήματα είναι:
- Για το σήμα (Y): 5 MHz
- Για το σήμα (I) : 1,3 MHz (Αναφέρεται και σαν σήμα V)
- Για το σήμα (Q): 1,3 MHz (Αναφέρεται και σαν σήμα U).

Το σύστημα PAL δε διαφέρει ουσιαστικά από το NTSC παρά μόνο σε δύο σημεία: Η συχνότητα του υποφέροντος της χρωμικότητας είναι 4,433 MHz (πολλαπλάσια της συχνότητας σάρωσης των γραμμών). Επίσης χρησιμοποιεί για τα δύο σήματα της χρωμικότητας δύο ορθογωνικές διαμορφώσεις DSBsc, με τη διαφορά ότι για διαδοχικές γραμμές σάρωσης η φάση αντιστρέφεται από π/2 σε –π/2. Αποδεικνύεται λοιπόν ότι το σύστημα PAL είναι λιγότερο ευαίσθητο σε παραμορφώσεις της φάσης.

Ο κωδικοποιητής και διαμορφωτής του υποφέροντος δίνεται στο σχήμα 5.6.8. Η καθυστέρηση φάσης την οποία υφίσταται το σήμα της φωτεινότητας αντισταθμίζει την καθυστέρηση φάσεων των άλλων σημάτων, που υπόκεινται σε πιο πολύπλοκη επεξεργασία.



Σχήμα 5.6.8: *Κωδικοποιητής PAL.*

Στο σήμα ενσωματώνεται μετά τους παλμούς συγχρονισμού μικρό δείγμα του υποφέροντος, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση (σχήμα 5.6.6), για να διευκολυνθεί ο συγχρονισμός του δέκτη και η αποδιαμόρφωση των σημάτων.

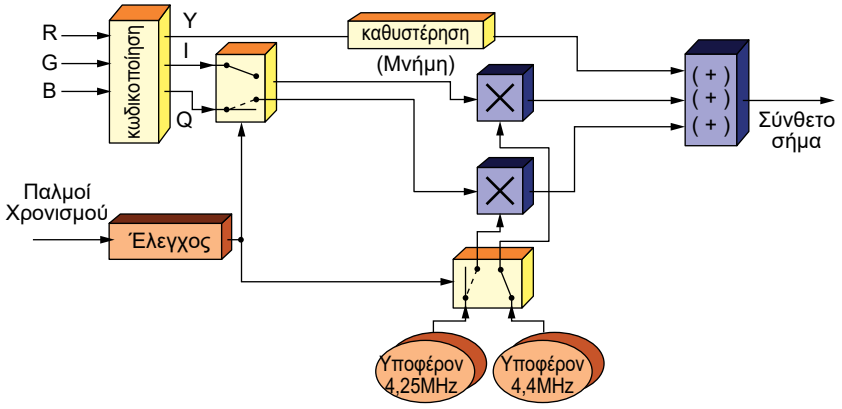
Γ) Σύστημα έγχρωμης τηλεόρασης SECAM

Για τη φωτεινότητα και στο σύστημα SECAM (Sequential Color at Memory) χρησιμοποιείται η ίδια σχέση. Τα παράγωγα σήματα της χρωμικότητας υπολογίζονται ως εξής:

$$I = -1,902(R-Y) = -1,33R + 1,12G + 0,21B \quad (24)$$
$$Q = 1,505(B-Y) = -0,45R - 0,89G - 1,34B$$

Το σύστημα SECAM, που υιοθετήθηκε από πολλές χώρες της Ευρώπης, τη χώρα μας και τις περισσότερες ανατολικές χώρες, διαφέρει από τα προηγούμενα δύο στον τρόπο μετάδοσης των πληροφοριών χρωμικότητας. Τα σήματα (I) και (Q) (που αναφέρονται και σαν σήματα D_R, D_B) εναλλάσσονται για κάθε γραμμή σάρωσης και διαμορφώνουν κατά συχνότητα (FM) διαφορετικές υποφέρουσες συχνότητες. Επιπλέον χρησιμοποιούνται οι συχνότητες 4,25 MHz και 4,4 MHz.

Στη λήψη τα σήματα χρωμικότητας υποβάλλονται σε καθυστέρηση μιας γραμμής (64 μs) και επανασυνδυάζονται, για να αποδώσουν τελικά την εικόνα. Ο κωδικοποιητής SECAM φαίνεται στο σχήμα 5.6.9.



Σχήμα 5.6.9: *Κωδικοποιητής SECAM.*

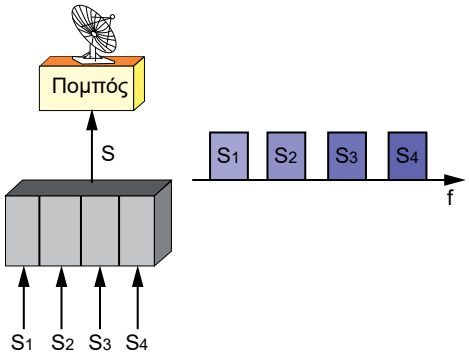
Η ακριβής και αντικειμενική σύγκριση των τριών συστημάτων έγχρωμης τηλεόρασης δεν είναι εύκολη ούτε από τεχνική αλλά ούτε και από οικονομική πλευρά. Υπάρχουν και στα τρία πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

5.7 *Δορυφορικές εκπομπές τηλεόρασης*

Σήμερα, με την έκρηξη των επικοινωνιών, χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα δορυφορικές εκπομπές τηλεόρασης. Το κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού για λήψη δορυφορικών προγραμμάτων έχει πέσει σημαντικά τα τελευταία χρόνια και κυκλοφορούν ευρέως στην αγορά.

Οι δορυφόροι, που αναφέρθηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο, εξυπηρετούν την αναγκαιότητα της μεγάλης εμβέλειας και χρησιμοποιούνται για ζεύξεις μακρινών αποστάσεων. Στο δορυφόρο τοποθετείται αναμεταδότης του τηλεοπτικού σήματος.

Για την οικονομικότερη και πιο συμφέρουσα αξιοποίηση των δορυφόρων, ομαδοποιούνται με την **τεχνική της πολυπλεξίας** περισσότερα του ενός τηλεοπτικά κανάλια τα οποία, διατηρώντας τη φασματική ανεξαρτησία τους (σχήμα 5.7.1), διαμορφώνουν συνήθως κατά συχνότητα ένα φέρον πολύ μεγαλύτερης συχνότητας (Up link- ανερχόμενη συχνότητα).



Σχήμα 5.7.1: *Δορυφορική τηλεόραση. Χρησιμοποιείται η πολυπλεξία πολλών τηλεοπτικών εκπομπών.*

Ο αναμεταδότης επανεκπέμπει το ομαδοποιημένο πακέτο των τηλεοπτικών εκπομπών σε άλλη συχνότητα προς τους επίγειους δορυφορικούς δέκτες (down link- κατερχόμενη συχνότητα).

Στο δορυφορικό δέκτη το σήμα κατ' αρχάς υφίσταται μίξη με το σήμα ενός τοπικού ταλαντωτή υψηλών προδιαγραφών (μεγάλη σταθερότητα συχνότητας, χαμηλό θόρυβο), έτσι η συχνότητά του υποβιβάζεται στη ζώνη VHF ή UHF και λαμβάνεται από τον κλασικό τηλεοπτικό δέκτη.

Για δορυφορικές τηλεοπτικές εκπομπές σήμερα έχουν χορηγηθεί από τους διεθνείς οργανισμούς τηλεπικοινωνιών διάφορες ζώνες συχνοτήτων και είναι καθορισμένος αυστηρά ο αριθμός των καναλιών που ομαδοποιούνται (πολυπλέκονται) καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Ενδεικτικά αναφέρουμε:

- Ζώνη C (6/4 GHz):

5,925 - 6,425 GHz ανερχόμενες συχνότητες
3,700 - 4,200 GHz κατερχόμενες συχνότητες

- Ζώνη 8/7 GHz:

7,700 - 8,395 GHz ανερχόμενες συχνότητες
7,250 - 7,745 GHz κατερχόμενες συχνότητες

- Ζώνη Ku (14/12 GHz):

14,000 - 14,800 GHz ανερχόμενες συχνότητες
Ku1: 10,950 - 11,700 GHz κατερχόμενες συχνότητες
Ku3: 11,700 - 12,500 GHz κατερχόμενες συχνότητες
Ku5: 12,500 - 12,750 GHz κατερχόμενες συχνότητες
Κ.λ.π.

Όλες οι δορυφορικές εκπομπές, το όνομα και τα χαρακτηριστικά του δορυφόρου, οι συχνότητες και τα χαρακτηριστικά των εκπομπών είναι καταγραμμένα σε ειδική τεχνική βιβλιογραφία.

Τα περισσότερα δορυφορικά προγράμματα τηλεόρασης σήμερα κωδικοποιούνται σε SECAM ή PAL. Φαίνεται λίγο - λίγο να γενικεύεται η χρήση της ψηφιακής κωδικοποίησης D2MAC. Στο σύστημα D2MAC ο ήχος μεταδίδεται ψηφιακά, ενώ οι πληροφορίες φωτεινότητας και χρωμικότητας μεταδίδονται με χρονική πολυπλεξία (TDM: Time Division Multiplexing).

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

- Το φέρον σήμα δημιουργείται στον πομπό από τον ταλαντωτή.
- Η λειτουργία των ταλαντωτών στηρίζεται στην αυτοταλάντωση κυκλωμάτων L-C
- Η χρησιμοποίηση κρυστάλλου (quartz) προσδίδει στον ταλαντωτή μεγάλη σταθερότητα στη συχνότητα. Ειδική κατηγορία ταλαντωτών, που η συχνότητα λειτουργίας τους ελέγχεται από τάση, ονομάζονται VCO (Voltage Controlled Oscillators).
- Με τη βοήθεια VCO σχεδιάζουμε βρόχο φάσης (PLL) για αυτόματο έλεγχο και σταθεροποίηση της συχνότητας και κατασκευάζουμε προγραμματιζόμενους συνθέτες συχνοτήτων.
- Στην AM διαμόρφωση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ταλαντωτή σταθερής συχνότητας με κρύσταλλο. Στη διαμόρφωση συχνότητας χρησιμοποιούμε VCO.
- Διαμορφωτές είναι οι διατάξεις που επιτρέπουν τη διαμόρφωση του φέροντος από το βασικό σήμα. Διαμορφωτές πλάτους και διαμορφωτές SSBsc υπάρχουν πολλών ειδών.
- Στη διαμόρφωση FM ο ταλαντωτής VCO είναι συγχρόνως και διαμορφωτής.
- Το στάδιο ισχύος, μετά τη διαμόρφωση AM και SSBsc, πρέπει οπωσδήποτε να είναι γραμμικός ενισχυτής τάξης A η δομής push-pull.
- Στη διαμόρφωση FM συνήθως το τελικό στάδιο είναι ενισχυτής ισχύος σε τάξη λειτουργίας C. Ο ενισχυτής τάξης C χαρακτηρίζεται από μεγάλη απόδοση ισχύος.
- Στερεοφωνικός κωδικοποιητής ονομάζεται η διάταξη που επιτρέπει δύο ανεξάρτητες ηχητικές πηγές (αριστερή και δεξιά) να διαμορφώσουν κατά συχνότητα το ίδιο φέρον, με τρόπο που στη λήψη οι δύο πηγές να ανεξαρτητοποιηθούν εκ νέου και να καταλήξουν σε δύο ανεξάρτητες εξόδους. Η αντίστοιχη διάταξη στην πλευρά του δέκτη ονομάζεται στερεοφωνικός αποκωδικοποιητής.
- Η διαμόρφωση VSB είναι διαμόρφωση πλάτους με μερικώς κατασταλμένη την κάτω πλευρική ζώνη. Χρησιμοποιείται στην τηλεόραση για τη διαμόρφωση του φέροντος από το σήμα της εικόνας.
- Στη μονόχρωμη τηλεόραση η πληροφορία Video αναφέρεται μόνο στη φωτεινότητα της εικόνας (άσπρο – μαύρο). Το εύρος της φασματικής ζώνης είναι καθορισμένο στα 5 MHz.

● Στην έχρωμη τηλεόραση η πληροφορία αποτελεί συνδυασμό της πληροφορίας της φωτεινότητας και της χρωμικότητας. Η πληροφορία της φωτεινότητας στέλνεται με τρόπο που να εξασφαλίζει τη συμβατότητα μονόχρωμης εκπομπής με έγχρωμο δέκτη και τη συμβατότητα της έγχρωμης εκπομπής με μονόχρωμο δέκτη.

● Ο τρόπος που κωδικοποιούνται τα σήματα χρωμικότητας διαφοροποιεί τα συστήματα έγχρωμης τηλεόρασης που επικράτησαν (NTSC, PAL και SECAM).

● Στις δορυφορικές εκπομπές τηλεόρασης χρησιμοποιείται η τεχνική της πολυπλεξίας. Πρόκειται για ομαδοποίηση πολλών τηλεοπτικών εκπομπών σε ένα φέρον σε μικροκυματικές συχνότητες. Στο δορυφόρο τοποθετείται αναμεταδότης που επανεκπέμπει τα σήματα προς τους δορυφορικούς δέκτες.

● Ο δορυφορικός δέκτης επεξεργάζεται τα σήματα που λαμβάνει και τα καθιστά συμβατά με τον κλασικό τηλεοπτικό δέκτη.

● Στις δορυφορικές εκπομπές χρησιμοποιείται κωδικοποίηση SECAM, PAL και D2MAC. Η κωδικοποίηση D2MAC είναι ψηφιακή και γενικεύεται σταδιακά η χρήση της.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Να σχεδιαστεί και να σχολιαστεί το γενικό ενός πομπού ΑΜ.
2. Τι είναι ο αρμονικός ταλαντωτής; Να αναφερθούν βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του.
3. Ποιος ταλαντωτής ονομάζεται VCO; Από τι χαρακτηρίζεται ένας ταλαντωτής VCO;
4. Να σχεδιαστεί ένας βρόχος φάσης. Να σχολιαστούν τα διάφορα στάδια που υπάρχουν.
5. Τι είναι ο προγραμματιζόμενος συνθέτης (synthesizer) συχνοτήτων;
6. Ποιο στάδιο ονομάζουμε διαμορφωτή;
7. Να αναφερθούν κυκλώματα που χρησιμοποιούνται ως διαμορφωτές πλάτους.
8. Να αναφερθούν κυκλώματα που χρησιμοποιούνται ως διαμορφωτές SSBsc.
9. Να σχεδιαστεί ένας διαμορφωτής SSBsc όπου αξιοποιούνται ολισθητές φάσης κατά π/2.
10. Ποια διάταξη αξιοποιείται ως διαμορφωτής FM;
11. Τι είναι δίοδος μεταβλητής χωρητικότητας και πού χρησιμοποιείται;
12. Ποια διεργασία ονομάζεται προέμφαση και γιατί χρησιμοποιείται;
13. Ποια διεργασία ονομάζεται αποέμφαση;
14. Να σχεδιαστεί το φίλτρο προέμφασης που χρησιμοποιείται στη ραδιοφωνία FM.
15. Τι στάδιο ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από διαμόρφωση ΑΜ; Να σχολιαστεί η απάντηση.
16. Τι στάδιο ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από διαμόρφωση SSB; Να σχολιαστεί η απάντηση.
17. Τι στάδιο ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενίσχυση του φέροντος στην περίπτωση διαμόρφωσης FM; Να σχολιαστεί η απάντηση.
18. Να σχολιαστεί πώς ένας ενισχυτής σε τάξη λειτουργίας C μπορεί να αξιοποιηθεί ως στάδιο πολλαπλασιασμού συχνότητας.
19. Να σχεδιαστεί το δομικό διάγραμμα του στερεοφωνικού κωδικοποιητή. Να σχολιαστεί η λειτουργία του.

20. Να σχεδιαστεί το δομικό διάγραμμα του στερεοφωνικού αποκωδικοποιητή. Να σχολιαστεί η λειτουργία του.
21. Τι ονομάζουμε διαμόρφωση VSB; Να σχολιαστεί γιατί και πού χρησιμοποιείται;
22. Στη μονόχρωμη ασπρόμαυρη τηλεόραση ποια είναι η βασική πληροφορία που πρέπει να μεταδοθεί;
23. Να σχεδιαστεί το πλήρες φάσμα μιας μονόχρωμης τηλεοπτικής εκπομπής.
24. Στην έγχρωμη τηλεόραση ποιες πληροφορίες ενδιαφέρουν και πρέπει να μεταδοθούν;
25. Πώς εξασφαλίζεται η συμβατότητα μιας έγχρωμης εκπομπής τηλεόρασης με το μονόχρωμο δέκτη;
26. Να αναφερθούν τα διάφορα συστήματα έγχρωμης τηλεόρασης.
27. Σε τι διαφοροποιούνται τα διάφορα συστήματα έγχρωμης τηλεόρασης;
28. Πώς κατανέμονται με βάση τις προδιαγραφές CCIR οι τηλεοπτικοί δίαυλοι;
29. Να δοθεί το γενικό διάγραμμα μιας δορυφορικής τηλεοπτικής εκπομπής.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Σ' ένα κύκλωμα ταλαντωτή με στοιχεία L, C δίνονται: L= 1 μH και ο πυκνωτής C μεταβάλλεται από 25 pF έως 60 pF. Να προσδιοριστεί η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του ταλαντωτή.

2. Ένας ταλαντωτής VCO με γραμμική συμπεριφορά έχει κλίση 50 kHz/V. Όταν στην είσοδό του η τάση είναι 5 V, η συχνότητα του σήματος εξόδου είναι f = 3 MHz. Να προσδιοριστεί η συχνότητα του σήματος στην έξοδο, όταν η τάση στην είσοδο είναι διαδοχικά 2,5 V και 7,5 V.

3. Σ' ένα συνθέτη συχνοτήτων, όπως αυτόν του σχήματος 5.2.7, το βήμα σύνθεσης είναι 150 kHz και ο διαιρέτης N παίρνει τιμές από N_1 = 10 έως N_2 = 40. Να προσδιοριστούν οι συχνότητες του σήματος στην έξοδο του VCO. Επίσης, αν ο VCO είναι γραμμικός και η κλίση του είναι 200 kHz/V, να προσδιοριστούν τα όρια μεταβολής της τάσης ελέγχου στην είσοδό του.

4. Στο κύκλωμα διαμόρφωσης AM του σχήματος 5.3.2 δίνονται: $M(t) = 20\cos(\omega_o t)$, $s(t) = 10\cos(\Omega t)$ και ο συντελεστής του πολλαπλασιαστή $k=0,1\ V^{-1}$. Να προσδιοριστεί η έκφραση του διαμορφωμένου φέροντος και το ποσοστό διαμόρφωσης που προκύπτει. Δίνονται επίσης f_o = 1 MHz και F= 10 kHz. Να προσδιοριστεί το εύρος της φασματικής ζώνης του διαμορφωμένου φέροντος.

5. Σε διαμόρφωση SSB η τελική συχνότητα φέρουσας πρέπει να είναι 5 MHz. Ο διαμορφωτής που θα χρησιμοποιηθεί είναι με φίλτρα ζώνης που διαθέτουν Q<10. Το φάσμα του σήματος διαμόρφωσης εκτείνεται από 300 Hz έως 5 kHz. Να σχεδιαστεί το δομικό διάγραμμα του διαμορφωτή. Πόσα στάδια αλλαγής συχνότητας περιλαμβάνει.

6. Σ' έναν ταλαντωτή με Varicap η κεντρική συχνότητα ταλάντωσης είναι f_o = 80 MHz, όταν η συνολική χωρητικότητα του ταλαντούμενου κυκλώματος L, C είναι C_o = 40 pF. Να προσδιοριστεί το απαιτούμενο ΔC_{max} που πρέπει να προκληθεί στο Varicap από το σήμα διαμόρφωσης, ώστε η απόκλιση συχνότητας να είναι Δf_{max} = 80 kHz. Αν η κλίση του Varicap είναι α = 0,10 pF/V, να προσδιοριστεί το πλάτος του σήματος διαμόρφωσης.

7. Σ' ένα συνθέτη συχνοτήτων, όπως αυτόν του σχήματος 5.2.7, το βήμα σύνθεσης είναι 200 kHz. Να δοθεί η έκφραση της συχνότητας του VCO. Αν ο διαιρέτης N παίρνει τιμές από N_1 = 440 έως N_2 = 540, να προσδιοριστούν οι ακραίες συχνότητες του σήματος στην έξοδο του VCO. Επίσης, αν ο VCO είναι γραμμικός και η κλίση του είναι 2 MHz/V, να προσδιοριστούν τα όρια μεταβολής της τάσης ελέγχου στην είσοδό του.

8. Σ' ένα στερεοφωνικό κωδικοποιητή η αριστερή και δεξιά ηχητική πηγή περιέχουν φασματικές συνιστώσες στις συχνότητες ($F_{α1}$ = 1 kHz, $F_{α2}$ = 5 kHz) και ($F_{δ1}$ = 2 kHz, $F_{δ2}$ = 7 kHz).
Να προσδιοριστούν όλες οι φασματικές συνιστώσες στην έξοδο του κωδικοποιητή.

9. Η ολική ισχύς στην έξοδο πομπού ΑΜ είναι 400 W. Το ποσοστό διαμόρφωσης του σήματος είναι 85%. Να υπολογιστεί η αποτελεσματικότητα ισχύος D και η ωφέλιμη ισχύς στην έξοδο. Επίσης, αν η απόδοση του συστήματος ($η = P_{εξ} / P_{τρ}$) είναι της τάξης του 25 % και η συνεχής τάση τροφοδοσίας είναι V_{cc} = 80 V, να προσδιοριστεί το συνεχές ρεύμα κατανάλωσης I_{cc}. Αν το σύστημα τροφοδοτείται από το δίκτυο των 220 V, να προσδιοριστεί η ασφάλεια προστασίας του συστήματος.

10. Να προσδιοριστεί το εύρος λειτουργίας του ενισχυτή εξόδου πομπού FM, όταν στη διαμόρφωση FM ισχύει $Δf_{max}$ = 75 kHz και F_{max} = 15 kHz.



Σ' αυτό το κεφάλαιο εξηγούνται οι έννοιες των γραμμών μεταφοράς και των κεραιών και περιγράφονται πρακτικές μορφές κεραιών για εκπομπή και λήψη ραδιοκυμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Για να πραγματοποιηθούν οι ασύρματες επικοινωνίες που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, πρέπει η ισχύς εξόδου του πομπού να μεταφερθεί σε κάποια κατάλληλη διάταξη, από την οποία θα ακτινοβοληθεί στο χώρο σαν ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Ταυτόχρονα, μια παρόμοια διάταξη θα πρέπει να συλλάβει αυτό το ηλεκτρομαγνητικό κύμα και να το μεταφέρει με μορφή ηλεκτρικού σήματος στην είσοδο ενός δέκτη όπου θα υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία, για να μετατραπεί σε ωφέλιμο σήμα.

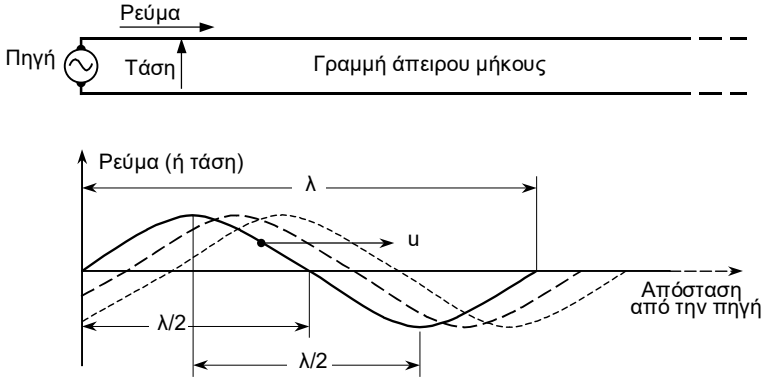
Οι διατάξεις που ακτινοβολούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο χώρο ή συλλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα από το χώρο ονομάζονται κεραίες. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος από τους πομπούς στις **κεραίες** ή από τις κεραίες στους δέκτες ονομάζονται **γραμμές μεταφοράς**. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα περιγράψουμε τα βασικά στοιχεία αυτών των διατάξεων.

6.1 Γραμμές μεταφοράς

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4, οι γραμμές μεταφοράς είναι συστήματα αγωγών που μεταφέρουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μεταξύ των κεραιών και των πομπών ή των δεκτών στους οποίους αυτές συνδέονται. Γνωρίσαμε δύο τύπους γραμμών μεταφοράς, τη συμμετρική και την ασύμμετρη ή ομοαξονική. Δεχτήκαμε ότι κάθε γραμμή μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από πλήθος πυκνωτές, πηνία και αντιστάσεις κατανεμημένα σε όλο της το μήκος. Η δράση των αντιστάσεων έχει αποτέλεσμα την απώλεια ενός μέρους της μεταφερόμενης ενέργειας, ενώ η δράση των υπόλοιπων στοιχείων περιορίζει τη μέγιστη συχνότητα του ρεύματος που μπορεί να περάσει μέσα από τη γραμμή. Τα κατανεμημένα στοιχεία καθορίζουν επίσης και τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Αυτή η αντίσταση, όπως είδαμε, εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της γραμμής και θα ήταν η αντίσταση που θα προέβαλλε η γραμμή στη διέλευση του υψίσυχνου ρεύματος, αν είχε άπειρο μήκος.

6.1.1 Τρέχοντα κύματα

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια γραμμή άπειρου μήκους, η οποία τροφοδοτείται στο ένα άκρο της από μια πηγή εναλλασσόμενης ημιτονικής τάσης υψηλής συχνότητας. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4, το ρεύμα και η τάση έχουν σε μια ορισμένη στιγμή διαφορετικές τιμές από θέση σε θέση πάνω στη γραμμή. Αν με κάποιο καταγραφικό όργανο μπορούσαμε να εξετάσουμε τις τιμές του ρεύματος εκείνη τη στιγμή (τα ίδια ισχύουν και για τις τιμές της τάσης), θα βλέπαμε ότι το ρεύμα έχει κατανομή πάνω στη γραμμή όμοια με την έντονα σχεδιασμένη ημιτονική καμπύλη στο σχήμα 6-1.



Σχήμα 6-1: *Κύματα ρεύματος (ή τάσης) κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς*

Σε επόμενες χρονικές στιγμές η ίδια καμπύλη θα μετατοπιστεί μακρύτερα από την πηγή και οι κατανομές του ρεύματος θα αντιστοιχούν στις διακεκομμένες καμπύλες. Παρατηρούμε ότι σε μια ορισμένη στιγμή το ρεύμα κατανέμεται ημιτονικά

πάνω στη γραμμή. Επίσης, σε μια ορισμένη θέση της γραμμής το ρεύμα που περνάει από εκεί μεταβάλλεται ημιτονικά με την πάροδο του χρόνου. Μια τέτοια μεταβολή στο χώρο και το χρόνο ονομάζεται κύμα. Επειδή το ρεύμα και η τάση σχηματίζουν κύματα που μετακινούνται πάνω στη γραμμή, τα ονομάζουμε **τρέχοντα κύματα**.

Η ταχύτητα **u** με την οποία μετακινούνται τα τρέχοντα κύματα πάνω στη γραμμή εξαρτάται από το είδος του μονωτικού υλικού μεταξύ των συρμάτων. Αν στη θέση του μονωτικού υπάρχει το κενό, η ταχύτητα είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός (300.000 km/sec). Σε κάθε άλλη περίπτωση η ταχύτητα είναι από 5 ως 20% μικρότερη.

Εκτός από την ταχύτητα διάδοσης, ένα κύμα έχει και ορισμένο μήκος κύματος λ. Το μήκος κύματος είναι η απόσταση μεταξύ δύο όμοιων μηδενισμών ή μεταξύ δύο διαδοχικών μεγίστων της τιμής του ρεύματος ή της τάσης. Το μήκος κύματος συνδέεται με την ταχύτητα **u** του κύματος και τη συχνότητα **f** του ρεύματος της πηγής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda = \frac{u}{f} \qquad (6.1)$$

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για μια γραμμή που έχει άπειρο μήκος και καθόλου απώλειες. Όταν η γραμμή δεν έχει άπειρο μήκος, τα πράγματα αλλάζουν σημαντικά, εκτός και αν στο άλλο άκρο της γραμμής συνδέεται μια αντίσταση φορτίου καθαρά ωμική και ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Τότε η τάση και το ρεύμα συμπεριφέρονται με τον τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω και η γραμμή λειτουργεί σαν να έχει άπειρο μήκος.

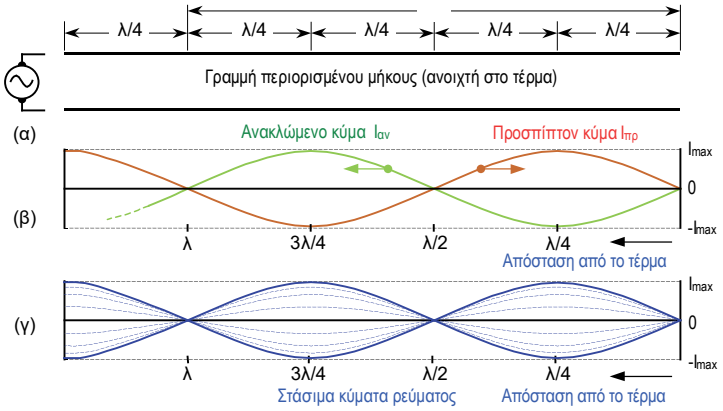
6.1.2 Στάσιμα κύματα

Ας υποθέσουμε τώρα ότι έχουμε μια γραμμή μεταφοράς που δεν έχει άπειρο μήκος και στο τέρμα της δε συνδέεται αντίσταση φορτίου. Όταν μια τέτοια γραμμή συνδεθεί σε μια πηγή που παράγει εναλλασσόμενη τάση με πλάτος V, κατά τη στιγμή της σύνδεσης η πηγή «αισθάνεται» στα άκρα της μια αντίσταση ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση R_c της γραμμής. Αρχίζει λοιπόν να κινεί ένα ρεύμα με πλάτος $I_{πρ}$, που υπολογίζεται από τη σχέση: $\mathbf{I_{πρ} = V/R_C}$.

Το ρεύμα αυτό προχωρεί σαν κύμα προς το τέρμα της γραμμής με ταχύτητα διάδοσης **u**, χωρίς αρχικά να «γνωρίζει» τι φορτίο θα συναντήσει εκεί. Το κύμα αυτό ονομάζεται **προσπίπτον κύμα ρεύματος** και, παρ' όλο που η ταχύτητα u είναι πολύ μεγάλη, το κύμα φτάνει στο φορτίο μετά από κάποιο μικρό χρονικό διάστημα, που ονομάζεται χρόνος καθυστέρησης. Ο χρόνος καθυστέρησης προκαλεί αλλαγή στη φάση του ρεύματος. Τα ίδια συμβαίνουν και στο κύμα τάσης, που διαδίδεται ταυτόχρονα με το ρεύμα. Όταν το προσπίπτον κύμα ρεύματος φτάσει στο τέρμα της γραμμής, συναντά μια άπειρη αντίσταση, αφού εκεί δεν υπάρχει συνδεδεμένο κανένα φορτίο. Μέσα από άπειρη αντίσταση δεν μπορεί να κυκλοφορήσει ρεύμα.

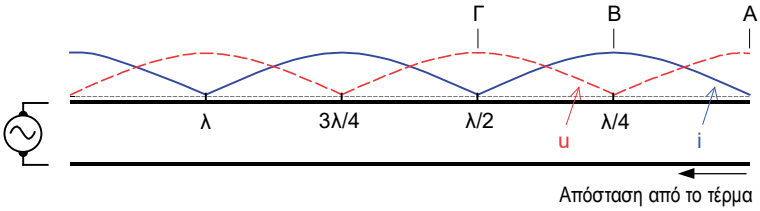
Στο τέρμα της γραμμής λοιπόν η τιμή του ρεύματος είναι μηδέν και το προσπίπτον κύμα αναγκάζεται να επιστρέψει πίσω στην πηγή. Το κύμα που επιστρέφει ονομάζεται **ανακλώμενο κύμα** και έχει πλάτος $I_{αν}$ ίσο με το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος. Τα δύο κύματα συνδυάζονται, με αποτέλεσμα να έχουμε σε άλλα σημεία αύξηση και σε άλλα σημεία εξασθένηση του συνολικού πλάτους.

Όταν το ανακλώμενο κύμα φτάσει στην πηγή, η κατάσταση αυτή παγιώνεται. Τότε έχουμε ταυτόχρονη μεταβολή του ρεύματος (και της τάσης) με διάφορα πλάτη στα διάφορα σημεία της γραμμής, όπως φαίνεται στο σχήμα 6-2(γ), αλλά καμιά κίνηση κύματος δεν παρατηρείται. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται στάσιμο κύμα. Τα σημεία όπου το πλάτος της κύμανσης είναι μέγιστο ονομάζονται **κοιλίες**, ενώ τα σημεία όπου το πλάτος είναι μηδενικό ονομάζονται **δεσμοί**. Οι κατανομές πλάτους επαναλαμβάνονται κατά διαστήματα ίσα με λ/2. Αυτό αποτελεί γενική ιδιότητα των γραμμών μεταφοράς.



Σχήμα 6-2: *Ανάκλαση και στάσιμα κύματα ρεύματος σε ανοιχτή γραμμή*

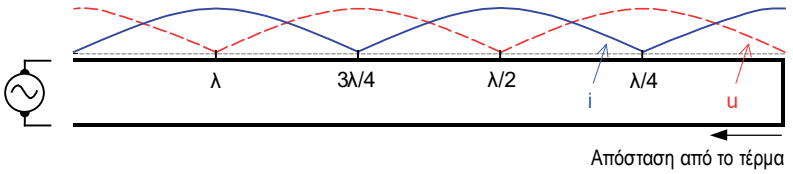
Όπως υπάρχουν στάσιμα κύματα ρεύματος, έτσι υπάρχουν και στάσιμα κύματα τάσης. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι στο ανοιχτό τέρμα της γραμμής εκδηλώνεται πάντοτε κοιλία τάσης. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού είναι γνωστό ότι σε οποιοδήποτε ανοιχτό κύκλωμα η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση στους πόλους της πηγής. Έτσι, υπάρχει διαφορά φάσης ίση με λ/4 ή 90° μεταξύ των στάσιμων κυμάτων ρεύματος και τάσης σε μια ανοιχτή γραμμή.



Σχήμα 6-3: *Πλάτη στάσιμων κυμάτων τάσης και ρεύματος σε ανοιχτή γραμμή*

Στο σχήμα 6-3 φαίνονται τα πλάτη (και όχι οι στιγμιαίες τιμές) των στάσιμων κυμάτων ρεύματος και τάσης κατά μήκος μιας ανοιχτής γραμμής. Συγκρίνετε αυτό το σχήμα με το σχήμα 6-2(γ), για να κατανοήσετε τη διαφορά στην απεικόνιση.

Ανάλογα φαινόμενα ισχύουν και όταν η γραμμή δεν είναι ανοιχτή στο τέρμα της, αλλά βραχυκυκλωμένη. Λόγω του βραχυκυκλώματος, στο τέρμα της γραμμής η τάση είναι πάντα μηδέν και το ρεύμα μέγιστο. Με μηδενική τάση όμως η ενέργεια που δίνει η πηγή στη γραμμή δεν μπορεί να καταναλωθεί και έτσι πρέπει να επιστρέψει πίσω. Αναπτύσσονται λοιπόν και πάλι στάσιμα κύματα ρεύματος και τάσης κατά μήκος της γραμμής, που όμως εμφανίζουν κοιλία ρεύματος και δεσμό τάσης στο τέρμα. Η μορφή αυτών των στάσιμων κυμάτων φαίνεται στο σχήμα 6-4. Παρατηρήστε ότι υπάρχει και πάλι η διαφορά φάσης των 90° μεταξύ της τάσης και του ρεύματος.



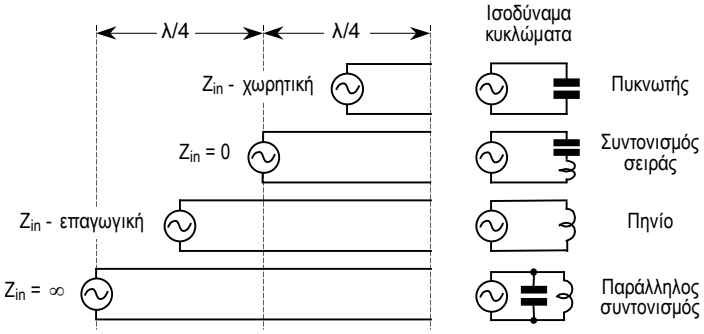
Σχήμα 6-4: *Πλάτη στάσιμων κυμάτων τάσης και ρεύματος σε βραχυκυκλωμένη γραμμή*

6.1.3 Συντονισμένες γραμμές

Ας παρατηρήσουμε και πάλι το σχήμα 6-3. Στη θέση Β, που απέχει απόσταση λ/4 από το ανοιχτό τέρμα της γραμμής, το πλάτος της τάσης (διακεκομμένη γραμμή) είναι μηδέν, ενώ το πλάτος του ρεύματος (συνεχής γραμμή) είναι μέγιστο. Η αντίσταση σ' αυτό το σημείο, που ως γνωστόν προκύπτει από τη σχέση R=U/I, είναι μηδέν. Αν η πηγή ήταν συνδεδεμένη στη θέση Β, θα αντιμετώπιζε βραχυκύκλωμα στα άκρα της, άσχετα με το γεγονός ότι η γραμμή είναι ανοιχτή. Αυτό βέβαια συμβαίνει σε μια ιδανική γραμμή, που δεν έχει απώλειες. Σε πραγματική γραμμή η αντίσταση στη θέση Β είναι πολύ μικρή, αλλά όχι μηδενική. Αντίθετα στο σημείο Γ, που απέχει απόσταση λ/2 από το τέρμα της γραμμής, το πλάτος της τάσης είναι μέγιστο, ενώ το πλάτος του ρεύματος είναι μηδέν. Η αντίσταση σ' αυτό το σημείο προκύπτει ότι είναι άπειρη (ή πάρα πολύ μεγάλη, αν η γραμμή είναι πραγματική).

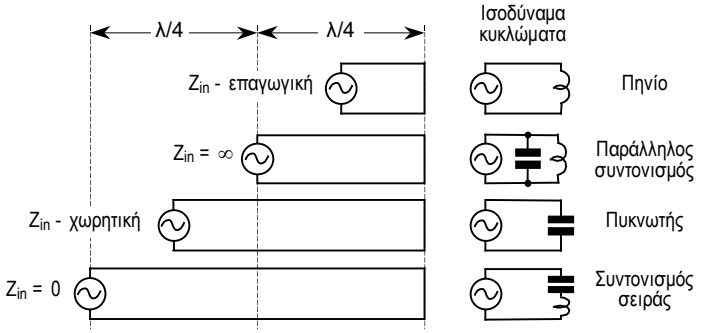
Μεταξύ του σημείου Β και του Α η αντίσταση αυξάνει όσο η απόσταση από το τέρμα μικραίνει. Επειδή στο τμήμα αυτό το ρεύμα προηγείται της τάσης κατά 90°, η γραμμή συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής, με χωρητικότητα που μικραίνει όσο το μήκος της μικραίνει. Μεταξύ του σημείου Β και του Γ η αντίσταση και πάλι αυξάνει όσο η απόσταση από το τέρμα μεγαλώνει. Επειδή όμως στο τμήμα αυτό η τάση προηγείται του ρεύματος κατά 90°, η γραμμή συμπεριφέρεται σαν πηνίο, με αυτεπαγωγή που μεγαλώνει όσο το μήκος της μεγαλώνει.

Όλα αυτά θυμίζουν το φαινόμενο του συντονισμού σε κυκλώματα με πηνίο και πυκνωτή. Σε ανοιχτή γραμμή, όταν το μήκος είναι λ/4 (ή περιττό, δηλαδή μονό πολλαπλάσιο του λ/4), η αντίσταση είναι ελάχιστη και η γραμμή συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα LC σειράς σε συντονισμό. Όταν το μήκος είναι λ/2 (ή πολλαπλάσιο του λ/2), η αντίσταση είναι μέγιστη και η γραμμή συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα LC παραλληλίας σε συντονισμό. Με μήκος μεταξύ λ/4 και 0, η ανοιχτή γραμμή συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής, ενώ με μήκος μεταξύ λ/4 και λ/2, συμπεριφέρεται σαν πηνίο (σχήμα 6-5). Αυτό μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα κομμάτι τέτοιας γραμμής σε ρόλο ενός πυκνωτή ή ενός πηνίου, του οποίου η χωρητικότητα ή η αυτεπαγωγή ρυθμίζονται, μεταβάλλοντας κατάλληλα το μήκος της γραμμής. Αυτό το κάνουμε συχνά στις πολύ υψηλές συχνότητες όπου οι συνηθισμένοι πυκνωτές και τα πηνία δε λειτουργούν ικανοποιητικά.



Σχήμα 6-5: *Ανοιχτές γραμμές και τα ισοδύναμα κυκλώματά τους*

Ανάλογα φαινόμενα ισχύουν και για την περίπτωση που η γραμμή είναι βραχυκυκλωμένη στο τέρμα της. Μόνο που τώρα τα πράγματα είναι αντίθετα απ' ό,τι προηγουμένως, επειδή, όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 6-4, στο τέρμα της γραμμής η τάση είναι μηδέν και το ρεύμα μέγιστο. Έτσι, μια βραχυκυκλωμένη γραμμή με μήκος λ/4 ή περιττό πολλαπλάσιο του λ/4 παρουσιάζει άπειρη (πάρα πολύ μεγάλη) αντίσταση εισόδου και συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα LC παραλληλίας σε συντονισμό. Όταν το μήκος της είναι λ/2 ή πολλαπλάσιο του λ/2 τότε η αντίσταση εισόδου της είναι μηδενική (πολύ μικρή) και η γραμμή συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα LC σειράς σε συντονισμό. Όταν έχει μήκος μικρότερο του λ/4, η βραχυκυκλωμένη γραμμή συμπεριφέρεται σαν πηνίο με αυτεπαγωγή, που μικραίνει όσο μικραίνει το μήκος της, ενώ, όταν έχει μήκος μεταξύ λ/4 και λ/2, συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής, του οποίου η χωρητικότητα μεγαλώνει όσο μεγαλώνει το μήκος (σχήμα 6-6).



Σχήμα 6-6: *Βραχυκυκλωμένες γραμμές και τα ισοδύναμα κυκλώματά τους*

Όλα τα παραπάνω μπορούν να συμβούν είτε όταν κρατάμε σταθερή τη συχνότητα της πηγής και μεταβάλλουμε το μήκος της γραμμής είτε όταν κρατάμε σταθερό το μήκος της γραμμής και μεταβάλλουμε τη συχνότητα. Πράγματι, όπως είδαμε στην αρχή (σχέση 6.1), το μήκος κύματος λ εξαρτάται από τη συχνότητα f της πηγής. Μεταβάλλοντας τη συχνότητα, ένα δοσμένο μήκος γραμμής μπορεί να αντιστοιχεί σε τμήμα λ/4 ή λ/2 ή οποιοδήποτε άλλο κλάσμα ή και πολλαπλάσιο του λ. Με τη μεταβολή της συχνότητας η αντίσταση εισόδου της γραμμής αλλάζει και, όταν η συχνότητα γίνει τέτοια, ώστε το κομμάτι της γραμμής να αντιστοιχεί ακριβώς σε τμήμα λ/4, έχουμε συντονισμό.

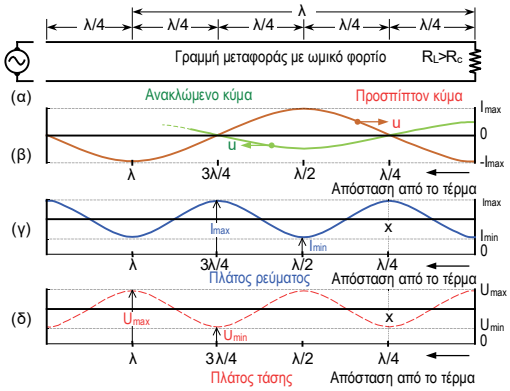
Ανοικτά ή βραχυκυκλωμένα τμήματα γραμμών με μήκος λ/4 χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σαν συντονισμένα κυκλώματα στις πολύ υψηλές συχνότητες. Η συμπεριφορά τους είναι πολύ καλύτερη από τη συμπεριφορά των συνηθισμένων κυκλωμάτων LC και συχνά αποτελούν το μόνο τρόπο να κατασκευαστεί κύκλωμα συντονισμού, γιατί, όπως είπαμε, στις πολύ υψηλές συχνότητες δεν είναι εύκολη η κατασκευή κατάλληλων πηνίων και πυκνωτών.

6.1.4 Γραμμές με ωμικό φορτίο

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση μιας γραμμής, στο τέρμα της οποίας είναι συνδεδεμένο ένα ωμικό φορτίο. Όπως είπαμε, όταν το φορτίο έχει τιμή ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, η γραμμή συμπεριφέρεται σαν να είχε άπειρο μήκος και από μέσα της περνούν μόνο τρέχοντα κύματα.

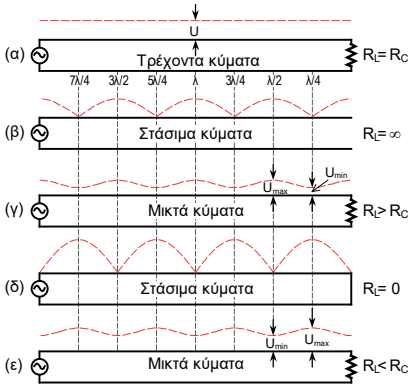
Όταν το ωμικό φορτίο δεν έχει τιμή ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, τότε δεν μπορεί να απορροφήσει όλη την ενέργεια που έρχεται από την πηγή και ένα μέρος της το αντανακλά πίσω. Υπάρχουν λοιπόν προσπίπτοντα και ανακλώμενα κύματα πάνω στη γραμμή, που συνδυάζονται και προκαλούν αλλού ενισχύσεις και αλλού εξασθενήσεις της τάσης και του ρεύματος, όπως είδαμε να γίνεται και στο σχήμα 6-2. Εδώ όμως υπάρχει μια διαφορά. Επειδή μόνο ένα μέρος του κύματος ανακλάται, το ανακλώμενο κύμα έχει μικρότερο πλάτος από το προσπίπτον. Έτσι, όταν τα δύο κύματα συνδυάζονται, στα σημεία εξασθένησης

δεν έχουμε μηδενισμό του πλάτους, αλλά απλώς μια ελάχιστη τιμή (σχήμα 6-7). Κατά μήκος της γραμμής υπάρχει ένας συνδυασμός από στάσιμα και τρέχοντα κύματα, που ονομάζονται **μικτά κύματα**.



Σχήμα 6-7: *Κατανομή πλατών ρεύματος και τάσης σε γραμμή με ωμικό φορτίο*

Αν η αντίσταση φορτίου R_L είναι μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική αντίσταση R_C της γραμμής, τότε στο τέρμα της γραμμής εμφανίζεται μέγιστο τάσης και ελάχιστο ρεύματος, όπως στο σχήμα 6-7. Αν η αντίσταση φορτίου είναι μικρότερη από τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, τότε στο τέρμα της γραμμής εμφανίζεται μέγιστο ρεύματος και ελάχιστο τάσης. Τέλος, αν η αντίσταση φορτίου είναι ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, τότε δεν υπάρχουν στη γραμμή μέγιστα και ελάχιστα, αλλά σε όλα τα σημεία της τα τρέχοντα κύματα έχουν σταθερό πλάτος. Μια συνοπτική απεικόνιση των κατανομών τάσης για διάφορες τιμές φορτίου φαίνεται στο σχήμα 6-8. Οι κατανομές ρεύματος είναι παρόμοιες, αλλά μετατοπισμένες κατά λ/4.



Σχήμα 6-8: *Κατανομές τάσης κατά μήκος γραμμής με διάφορες αντιστάσεις φορτίου*

Αν η αντίσταση φορτίου, εκτός από καθαρά ωμικό έχει και χωρητικό ή επαγωγικό μέρος, τότε οπωσδήποτε ένα μέρος της ενέργειας του κύματος επιστρέφει στην πηγή και έτσι εμφανίζονται μικτά κύματα στη γραμμή μεταφοράς. Αν πάλι η αντίσταση φορτίου είναι καθαρά επαγωγική ή χωρητική, επειδή αυτές οι αντιστάσεις δεν καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, όλη η ενέργεια της πηγής επιστρέφει πίσω. Σ' αυτή την περίπτωση έχουμε πάντοτε δημιουργία στάσιμων κυμάτων στη γραμμή.

Η εμφάνιση στάσιμων ή μικτών κυμάτων πάνω σε μια γραμμή μεταφοράς είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη κατάσταση, γιατί σημαίνει ότι ένα μέρος ή και όλη η ισχύς της πηγής δεν αποδίδεται στο φορτίο, αλλά επιστρέφει πίσω. Μπορούμε να διορθώσουμε αυτή την κατάσταση λαμβάνοντας μέτρα, που θα εξετάσουμε στην επόμενη παράγραφο. Προηγουμένως όμως θα πρέπει να διαπιστώσουμε την ύπαρξη του προβλήματος και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε κάποιο μέγεθος, που ονομάζεται λόγος στάσιμων κυμάτων (standing wave ratio ή SWR). Ο λόγος στάσιμων κυμάτων ορίζεται από τη σχέση:

$$SWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{U_{max}}{U_{min}}, \qquad (6.2)$$

όπου U_{max}, U_{min}, I_{max} και I_{min} είναι οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές τάσης και ρεύματος, κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, όπως φαίνονται στο σχήμα 6-10.

Για τη μέτρηση του SWR υπάρχουν ειδικά όργανα, που ονομάζονται **γέφυρες στάσιμων κυμάτων**. Οι γέφυρες στάσιμων κυμάτων συνδέονται μεταξύ της πηγής και της γραμμής μεταφοράς και απεικονίζουν το λόγο στάσιμων κυμάτων απ' ευθείας πάνω σε μια κλίμακα μέτρησης. Η ιδανική και μικρότερη τιμή του SWR είναι ίση με 1. Η τιμή αυτή εμφανίζεται σε γραμμές όπου δεν υπάρχει ανακλώμενο κύμα, όπως στο σχήμα 6-11 (α), οπότε τα μέγιστα και τα ελάχιστα έχουν το ίδιο πλάτος. Η μεγαλύτερη τιμή του SWR είναι ίση με άπειρο και εμφανίζεται στις ανοιχτές και τις βραχυκυκλωμένες γραμμές όπου τα ελάχιστα του πλάτους είναι ίσα με το μηδέν (σχήμα 6-8(β) και 6-8(δ)). Όταν SWR = 1.5, η ανακλώμενη ισχύς είναι περίπου το 4% της προσπίπτουσας. Για SWR < 2, το ποσοστό αυτό είναι λιγότερο από 10%. Για μεγαλύτερες τιμές του SWR, το ποσοστό της ανακλώμενης ισχύος αυξάνεται δραματικά. Στην πράξη τιμές του SWR μεταξύ 1.5 και 1.2 θεωρούνται πολύ καλές έως άριστες.

6.1.5 Προσαρμογή

Προσαρμογή ονομάζεται η εξασφάλιση των συνθηκών που επιτρέπουν τη μεταφορά της μέγιστης δυνατής ισχύος από μια πηγή σ' ένα φορτίο. Στην περίπτωση των γραμμών μεταφοράς η τέλεια προσαρμογή επιτυγχάνεται μόνο, όταν ταυτόχρονα η αντίσταση εξόδου της πηγής είναι ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής και η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής είναι ίση με την αντίσταση φορτίου.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας προσαρμογής είναι τα εξής:

● Το φορτίο τροφοδοτείται με τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει η πηγή.

● Η μεταφορά της μέγιστης δυνατής ισχύος επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από το μήκος της γραμμής και από τη συχνότητα.

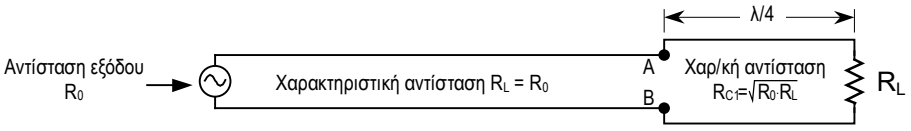
● Οι απώλειες ισχύος και ο κίνδυνος καταστροφής του μονωτικού της γραμμής από τοπικές ανυψώσεις της τάσης μειώνονται στο ελάχιστο δυνατό.

Η τέλεια όμως προσαρμογή δεν είναι πάντοτε δυνατή. Πολλές φορές είμαστε υποχρεωμένοι να χρησιμοποιήσουμε μια πηγή με αντίσταση εξόδου διαφορετική από την αντίσταση φορτίου και τότε οι δύο αυτές αντιστάσεις δεν μπορούν να είναι ταυτόχρονα ίσες με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Το μόνο που μπορούμε να κάνουμε σ' αυτή την περίπτωση είναι να εφαρμόσουμε μια μέση λύση, που ονομάζεται μερική προσαρμογή.

Στηριζόμαστε σε μια ιδιότητα των γραμμών μεταφοράς, που μπορούμε να τη δούμε στο σχήμα 6-7. Στο τέρμα της γραμμής το ρεύμα είναι μικρό και η τάση μεγάλη. Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση εκεί είναι μεγάλη. Αντίθετα, στο σημείο x- που απέχει λ/4 από το τέρμα, το ρεύμα είναι μεγάλο και η τάση μικρή, δηλαδή η αντίσταση εκεί είναι μικρή. Αυτό σημαίνει ότι ένα τμήμα γραμμής μεταφοράς με μικτά κύματα κατά μήκος της μπορεί να λειτουργήσει σαν μετασχηματιστής και να μετασχηματίσει μια τιμή αντίστασης σε μια άλλη.

Αν θέλουμε να προσαρμόσουμε μια πηγή με αντίσταση εξόδου R_o σε φορτίο με αντίσταση R_L διαφορετική της R_o, συνδέουμε στα άκρα του φορτίου ένα κομμάτι γραμμής μεταφοράς με μήκος λ/4 και χαρακτηριστική αντίσταση:

Την υπόλοιπη απόσταση μέχρι την πηγή την καλύπτουμε με γραμμή μεταφοράς, που έχει χαρακτηριστική αντίσταση ίδια με την αντίσταση εξόδου της πηγής (σχήμα 6-9).



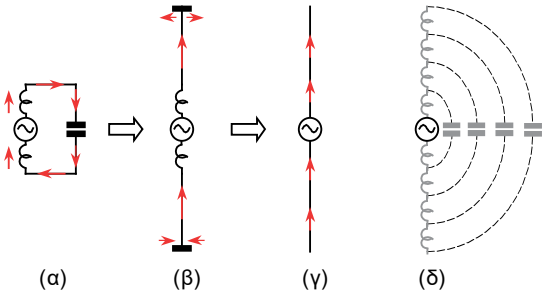
Σχήμα 6-9: *Μερική προσαρμογή με τμήμα γραμμής λ/4*

Το τμήμα λ/4 μετασχηματίζει την αντίσταση RL και την εμφανίζει στα σημεία A, B ίση με την R_o. Έτσι, σε όλο το μήκος της γραμμής από την πηγή μέχρι τα A, B η προσαρμογή είναι τέλεια και δεν υπάρχουν στάσιμα κύματα. Μεταξύ των A, B και του φορτίου δεν υπάρχει προσαρμογή και εμφανίζονται μικτά κύματα. Αυτό όμως δεν μπορούμε να το αποφύγουμε και επιπλέον δεν μας ενοχλεί πολύ, γιατί το κομμάτι αυτό έχει συνήθως μικρό μήκος.

6.2 Η έννοια της κεραίας

Στην εισαγωγή του κεφαλαίου είδαμε ότι οι κεραίες είναι διατάξεις αποτελούμενες από συστήματα αγωγών, που εκπέμπουν ή συλλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Για την εκπομπή οι κεραίες συνδέονται στην έξοδο ενός πομπού, ενώ για τη λήψη συνδέονται στην είσοδο ενός δέκτη. Μια κεραία εκπομπής μπορεί εξίσου καλά να εργαστεί και ως κεραία λήψης, και αντίστροφα. Μάλιστα αυτή η κεραία θα διατηρεί τις ίδιες ιδιότητες (π.χ. προτίμηση προς ορισμένη κατεύθυνση εκπομπής – λήψης) και στους δύο ρόλους. Για το λόγο αυτό, όταν εξετάζουμε κεραίες, συνήθως περιοριζόμαστε στις κεραίες εκπομπής, αφού η μελέτη τους καλύπτει και τις κεραίες λήψης. Στην πράξη όμως οι κεραίες εκπομπής έχουν συνήθως διαφορετική μορφή από τις κεραίες λήψης, γιατί σχεδιάζονται για να ικανοποιούν διαφορετικές απαιτήσεις.

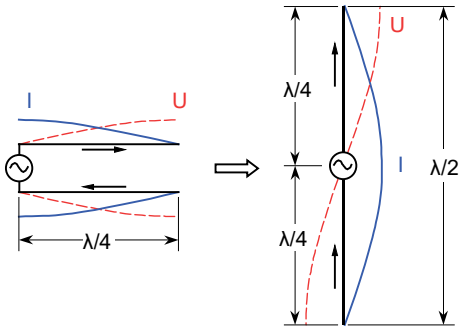
Μια κεραία σε λειτουργία μπορεί να θεωρηθεί κύκλωμα συντονισμού με πηνίο – πυκνωτή σε σειρά, όπως αυτό του σχήματος 6-10(α). Επειδή ένα τέτοιο κύκλωμα έχει μικρές διαστάσεις, δεν είναι δυνατό να ακτινοβολήσει ικανοποιητικά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ρεύματα που κυκλοφορούν στις πλευρές του βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, έτσι ώστε οι επιδράσεις τους αλληλοεξουδετερώνονται.



Σχήμα 6-10: *Σχέση μεταξύ κεραίας και κυκλώματος συντονισμού*

Απομακρύνοντας τις πλάκες του πυκνωτή, τα ρεύματα απομακρύνονται μεταξύ τους και αρχίζουν να ρέουν προς την ίδια κατεύθυνση. Ένα τέτοιο κύκλωμα, όπως του σχήματος 6-10(β), ακτινοβολεί, αλλά και πάλι όχι ικανοποιητικά, αφού τα ρεύματα στις πλάκες του πυκνωτή εξακολουθούν να έχουν αντίθετες κατευθύνσεις. Αν όμως καταργήσουμε τις πλάκες και αντικαταστήσουμε το πηνίο με ευθύγραμμο αγωγό, όπως στο 6-10(γ), τα ρεύματα γίνονται παντού ομόρροπα και το κύκλωμα μετατρέπεται σε κεραία που εκπέμπει κανονικά. Η αρχική χωρητικότητα και αυτεπαγωγή εξακολουθούν να υπάρχουν κατανεμημένες κατά μήκος της κεραίας (σχήμα 6-10(δ)).

Στο σημείο αυτό πρέπει να λάβουμε υπ' όψη ότι οι κεραίες συνδέονται στις εξόδους των πομπών με τη βοήθεια γραμμών μεταφοράς και να θυμηθούμε ότι ένα κομμάτι γραμμής μεταφοράς με μήκος λ/4 και ανοιχτό στο τέρμα του, συμπεριφέρεται σαν ένα συντονιζόμενο κύκλωμα σειράς, όπως αυτό του σχήματος 6-10(α). Αν λοιπόν πάρουμε μια γραμμή μεταφοράς και σε μήκος λ/4 από το άκρο της απομακρύνουμε τους αγωγούς μεταξύ τους, θα έχουμε μια κανονική κεραία.



Σχήμα 6-11: *Κεραία λ/2 και η προέλευσή της*

Η κεραία του σχήματος 6-11 είναι μια κεραία λ/2 που ονομάζεται και δίπολο. Οι κατανομές της τάσης και του ρεύματος κατά μήκος αυτής της κεραίας θυμίζουν τη γραμμή λ/4 με ανοιχτό τέρμα. Στο μέσο της κεραίας όπου συνδέεται η πηγή τροφοδοσίας, εμφανίζεται κοιλία ρεύματος, ενώ στα άκρα της κεραίας εμφανίζονται κοιλίες τάσης. Τα ρεύματα και οι τάσεις δημιουργούν γύρω από την κεραία ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

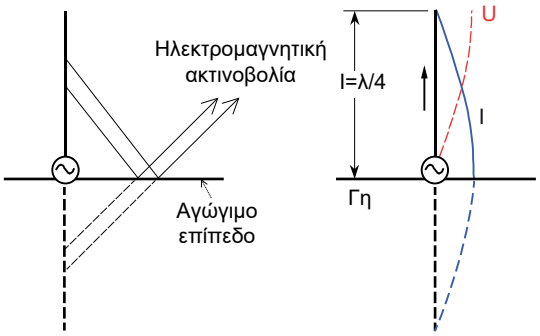
Πολύ κοντά στην κεραία το πεδίο είναι στενά συνδεδεμένο μαζί της και το μεγαλύτερο μέρος του απλώς πηγαινοέρχεται μεταξύ της κεραίας και του γύρω χώρου, χωρίς να ακτινοβολείται μακρύτερα. Το κοντινό αυτό πεδίο ονομάζεται **πεδίο επαγωγής** και έχει το χαρακτηριστικό ότι εξασθενεί γρήγορα με την απόσταση, έτσι ώστε σε μερικά μήκη κύματος μακρύτερα από την κεραία, πρακτικά εξαφανίζεται. Ένα μέρος όμως από την ενέργεια του κοντινού πεδίου αποσπάται από την κεραία και δεν επιστρέφει πίσω σ' αυτή. Αυτό το μέρος ενέργειας απομακρύνεται με την ταχύτητα του φωτός και διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Σε περιοχές λοιπόν μακριά από την κεραία υπάρχει μόνο αυτό το πεδίο, που ονομάζεται **πεδίο ακτινοβολίας** και έχει το χαρακτηριστικό ότι δεν εξασθενεί σημαντικά με την απόσταση. Οι ασύρματες συνδέσεις μεταξύ των κεραιών εκπομπής και των μακρινών κεραιών λήψης γίνονται με τη βοήθεια του πεδίου ακτινοβολίας.

6.2.1 Τύποι κεραιών εκπομπής

Οι κεραίες μπορούν να χωριστούν σε **συντονισμένες** και **ασυντόνιστες.** Οι συντονισμένες κεραίες έχουν μήκος που είναι προσαρμοσμένο στη συχνότητα του ρεύματος της πηγής και δεν μπορούν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά σε διαφορετικές απ' αυτή συχνότητες. Αντίθετα, οι ασυντόνιστες κεραίες μπορούν να λειτουργήσουν εξίσου καλά σε πολύ διαφορετικές μεταξύ τους συχνότητες. Οι κεραίες όμως αυτές έχουν συνήθως μεγάλο μήκος και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους δεν είναι απολύτως σταθερά, γιατί μεταβάλλονται εύκολα από τις επιδράσεις του γύρω χώρου. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιούνται σχετικά σπάνια.

Οι συντονισμένες κεραίες χρησιμοποιούνται πολύ συχνά. Και αυτές με τη σειρά τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις **συμμετρικές** και τις **ασύμμετρες.** Οι συμμετρικές κεραίες προέρχονται από άνοιγμα γραμμών λ/4, έχουν, δηλαδή, γεωμετρικό μήκος l=λ/2. Αυτές, όπως είδαμε, ονομάζονται **δίπολα** ή κεραίες **Χερτζ**. Μια τέτοια συμμετρική κεραία είναι αυτή του σχήματος 6-14. Αντίθετα οι ασύμμετρες κεραίες έχουν το μισό μήκος από τις συμμετρικές, γιατί τους λείπει το ένα από τα δύο τμήματα λ/4, που απαρτίζουν το δίπολο. Οι κεραίες αυτές βασίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο του ηλεκτρικού ειδώλου. Το ηλεκτρικό είδωλο σχηματίζεται με τη βοήθεια ενός αγώγιμου επιπέδου, το οποίο τοποθετείται κάθετα στον άξονα της κεραίας κοντά στη θέση του σημείου τροφοδοσίας της. Το επίπεδο αυτό λειτουργεί σαν καθρέφτης για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και έτσι το πεδίο της ασύμμετρης κεραίας παραμένει ίδιο με αυτό της συμμετρικής. Οι κεραίες αυτού του τύπου ονομάζονται κεραίες λ/4 ή κεραίες **Μαρκόνι.** Το ρόλο του αγώγιμου επιπέδου μπορεί να τον παίζει το έδαφος ή μια κατάλληλη μεταλλική κατασκευή (σχήμα 6-12).



Σχήμα 6-12: *Κεραία λ/4*

Ο συντονισμός των παραπάνω κεραιών στη συχνότητα εκπομπής f γίνεται με ρύθμιση του μήκους τους, βάσει της σχέσης (6.1). Έτσι έχουμε:

Κεραία Χερτζ: $$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{u}{2f} \qquad (6.3).$$

Κεραία Μαρκόνι: $$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{u}{4f} \qquad (6.4)$$

Όταν χρησιμοποιούμε αυτούς τους τύπους, θα πρέπει να θυμόμαστε ότι η ταχύτητα u αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ρεύματος στην κεραία, που είναι μικρότερη κατά 5 ως 10% από την ταχύτητα του φωτός. Στην πράξη παίρνουμε **u = 285.000.000 μέτρα το δευτερόλεπτο** και βγάζουμε το μήκος της κεραίας σε μέτρα.

6.2.2 Χαρακτηριστικά κεραιών

Για κάθε κεραία υπάρχουν μια σειρά από μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία της και την καταλληλότητά της για κάθε περίπτωση χρήσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα εξής:

1. Η ιδιοσυχνότητα f_o.

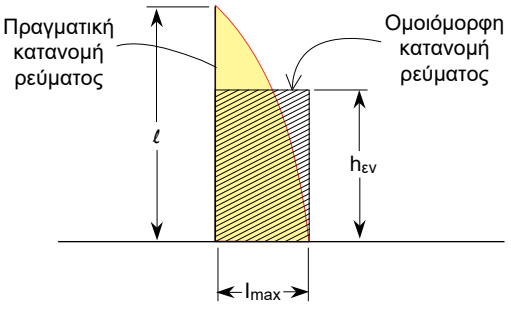
Η ιδιοσυχνότητα είναι η συχνότητα στην οποία συντονίζεται μια κεραία με δοσμένο μήκος. Όπως είδαμε, μια κεραία συμπεριφέρεται σαν συντονισμένο κύκλωμα LC και η συχνότητα συντονισμού της μπορεί να υπολογιστεί βάσει των τιμών της κατανεμημένης χωρητικότητας και αυτεπαγωγής της. Επειδή όμως αυτά τα μεγέθη δεν είναι γνωστά, καταφεύγουμε στις σχέσεις (6.3) και (6.4), που τις λύνουμε ως προς f και υπολογίζουμε την ιδιοσυχνότητα, βάσει του μήκους l. Έτσι έχουμε:

Κεραία Χερτζ: $$f_0 = \frac{u}{2 \cdot l} \qquad (6.5).$$

Κεραία Μαρκόνι: $$f_0 = \frac{u}{4 \cdot l} \qquad (6.6)$$

2. Το ενεργό ύψος $h_{εν}$.

Οι κεραίες δεν ακτινοβολούν εξίσου ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά κύματα απ' όλα τα σημεία τους. Κοντά στο σημείο τροφοδοσίας η ένταση του ρεύματος είναι μεγάλη και απ' αυτό εκπέμπονται και τα πιο ισχυρά κύματα. Στα άκρα όπου το ρεύμα μηδενίζεται η εκπομπή είναι μηδενική. Αν η κατανομή του ρεύματος κατά μήκος της κεραίας ήταν ομοιόμορφη, τότε θα είχαμε το ίδιο ισχυρή εκπομπή με μικρότερο ύψος κεραίας. Αυτό το μικρότερο ύψος ονομάζεται ενεργό ή ηλεκτρικό ύψος και είναι περίπου το 60% του γεωμετρικού ύψους l.



Σχήμα 6-13: *Γεωμετρικό (l) και ενεργό (h) ύψος κεραίας*

3. Οι αντιστάσεις εισόδου και ακτινοβολίας.

Η κεραία αντιπροσωπεύει μια αντίσταση φορτίου για την πηγή που την τροφοδοτεί. Εφόσον η κεραία ακτινοβολεί, αφαιρεί κάποιο ποσό ενέργειας από την πηγή. Αυτό το ποσό ενέργειας θεωρείται ότι καταναλώνεται πάνω σε μια ισοδύναμη ωμική αντίσταση, που ονομάζεται **αντίσταση ακτινοβολίας (R_r)**. Εκτός από την ενέργεια που ακτινοβολείται, κάποιο επιπλέον ποσό ενέργειας καταναλώνεται στην κεραία χωρίς να ακτινοβοληθεί. Το ποσό αυτό μετατρέπεται σε θερμότητα στις διάφορες αντιστάσεις των αγωγών ή χάνεται σε διαρροές λόγω των κακών μονώσεων. Αυτό το ποσό ενέργειας λέμε ότι καταναλώνεται πάνω στην **αντίσταση απωλειών ($R_α$)**. Το άθροισμα αυτών των δύο αντιστάσεων ονομάζεται **αντίσταση εισόδου (R_{in})** της κεραίας. Μια κεραία λ/2 έχει αντίσταση ακτινοβολίας περίπου 73 Ω και αντίσταση απωλειών περίπου 7 Ω. Έτσι η αντίσταση εισόδου της είναι 73 + 7=80 Ω. Μια κεραία λ/4 έχει ακριβώς τις μισές τιμές αυτών των αντιστάσεων. Έτσι:

$$R_{in} = R_r + R_α = 73 + 7 = 80\ Ω \qquad \text{(για κεραία λ/2)}$$

$$R_{in} = R_r + R_α = 36{,}5 + 3{,}5 = 40\ Ω \qquad \text{(για κεραία λ/4)}$$

4. Ο βαθμός απόδοσης.

Εφόσον από την ισχύ που έρχεται στην κεραία ένα μέρος χάνεται στην αντίσταση απωλειών, καταλαβαίνουμε ότι η ισχύς P_r που ακτινοβολεί η κεραία είναι μικρότερη από την ισχύ P_{in} που δίνει η πηγή στην κεραία. Ονομάζουμε βαθμό απόδοσης **n** της κεραίας το πηλίκο:

$$n = \frac{P_r}{P_α} = \frac{R_r}{R_r + R_α}$$

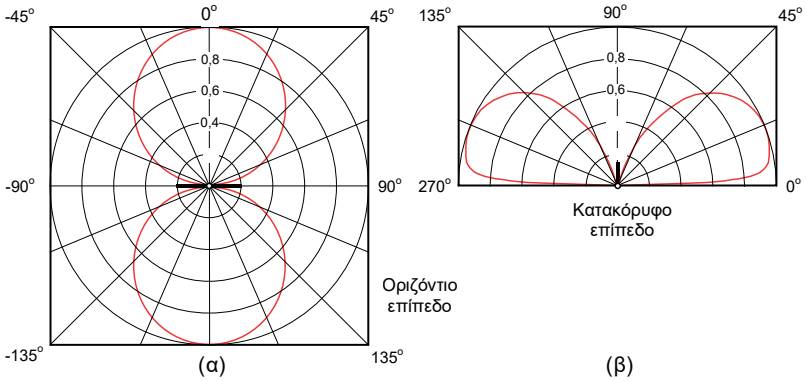
Βλέπουμε ότι ο βαθμός απόδοσης βελτιώνεται όσο μικρότερη γίνεται η αντίσταση απωλειών $R_α$ της κεραίας. Η αντίσταση αυτή μπορεί να μειωθεί κάνοντας καλύτερες τις μονώσεις της κεραίας και φροντίζοντας να είναι καλή η αγωγιμότητα του (φυσικού ή τεχνητού) εδάφους στην περίπτωση των ασύμμετρων κεραιών.

5. Η κατευθυντικότητα και το κέρδος.

Καμιά πραγματική κεραία δεν εκπέμπει τα ηλεκτρομαγνητικά της κύματα ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου. Η ένταση της ακτινοβολίας προς ορισμένες κατευθύνσεις είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με άλλες. Αυτό δε θεωρείται μειονέκτημα, αλλά μάλλον πλεονέκτημα. Δε θέλουμε, για παράδειγμα, η κεραία ενός ραδιοσταθμού να ακτινοβολεί προς τα επάνω, γιατί προς αυτή την κατεύθυνση δεν υπάρχουν ακροατές του σταθμού. Οι κατευθυντικές ιδιότητες των κεραιών περιγράφονται από το διάγραμμα κατευθυντικότητας, το συντελεστή κατευθυντικότητας και το κέρδος.

Το διάγραμμα κατευθυντικότητας είναι μια γραφική παράσταση που μας δίνει την ένταση της ακτινοβολίας της κεραίας προς διάφορες κατευθύνσεις πάνω σε ένα επίπεδο και για σημεία που απέχουν εξίσου από την κεραία. Υπάρχουν

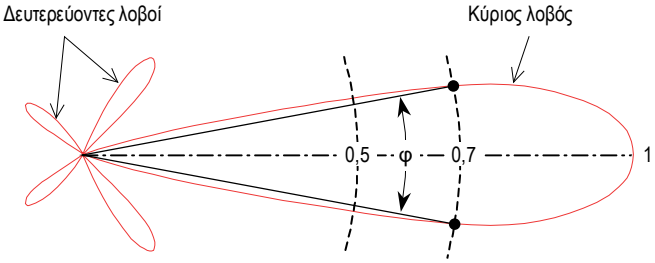
διαγράμματα για το οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο. Αυτά τα διαγράμματα μπορούν να χαραχθούν μετά από αναλυτικούς υπολογισμούς ή να προκύψουν από μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου γύρω από την κεραία. Στο σχήμα 6-14 φαίνονται τα διαγράμματα κατευθυντικότητας μιας οριζόντιας κεραίας λ/2 στο οριζόντιο επίπεδο και μιας κατακόρυφης κεραίας λ/4 στο κατακόρυφο επίπεδο. Λόγω του τρόπου κατανομής της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, η κεραία λ/2 ονομάζεται διπλοκατευθυντική, ενώ η λ/4 πανκατευθυντική.



Σχήμα 6-14: *Διάγραμμα κατευθυντικότητας κεραίας λ/2 (α) και κεραίας λ/4 (β)*

Η κεραία θεωρείται ότι είναι τοποθετημένη στο κέντρο του διαγράμματος. Στα διαγράμματα διακρίνονται κλειστές καμπύλες – περιοχές, που ονομάζονται λοβοί. Οι λοβοί μπορούν να μας δώσουν μια εικόνα για το πώς κατανέμεται η ακτινοβολία της κεραίας σ' ένα επίπεδο. Για να φανταστούμε την κατανομή της ακτινοβολίας στο χώρο, πρέπει να θεωρήσουμε ότι το διάγραμμα περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της κεραίας.

Σε κάθε κεραία υπάρχει μια κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Ο λοβός που αντιστοιχεί σ' αυτή ονομάζεται κύριος λοβός. Η ένταση της ακτινοβολίας προς την κατεύθυνση του μέγιστου παίρνει στο διάγραμμα τιμή ίση με 1 και όλες οι υπόλοιπες εντάσεις αντιστοιχούν σε αναλόγως μικρότερα νούμερα. Υπάρχουν κεραίες που εκπέμπουν το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος του πομπού προς μια κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό μεγαλώνουμε την ένταση του πεδίου στο σημείο που μας ενδιαφέρει να γίνεται η λήψη, χωρίς να χρειαστεί να αυξηθεί η ισχύς του πομπού. Οι κεραίες αυτές ονομάζονται υψηλής κατευθυντικότητας. Τέτοιες κεραίες χρησιμοποιεί, για παράδειγμα, η ΕΡΤ, όταν κάνει εκπομπές στα βραχέα κύματα για τους ξενιτεμένους Έλληνες. Αυτές οι κεραίες εκπέμπουν άλλες ώρες της ημέρας προς την Αμερική, άλλες προς την Αυστραλία κλπ. Το διάγραμμα κατευθυντικότητας μιας τέτοιας κεραίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το άνοιγμα του κύριου λοβού βρίσκεται από τη γωνία φ, της οποίας οι πλευρές περνούν από τα σημεία όπου η ένταση του πεδίου είναι ίση με το 0,7 του μέγιστου (σχήμα 6-15).



Σχήμα 6-15: *Διάγραμμα κατευθυντικότητας κεραίας*

Ο συντελεστής κατευθυντικότητας **D** μας δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη ισχύ, απ' όση ισχύ δίνουμε στην κεραία που μελετούμε, θα έπρεπε να δώσουμε σε μια κεραία που εκπέμπει ομοιόμορφα στο γύρω χώρο, ώστε με την πρώτη κεραία να έχουμε προς την κατεύθυνση του κύριου λοβού της δεύτερης την ίδια ένταση πεδίου. Ο συντελεστής **D** είναι καθαρός αριθμός (χωρίς μονάδες) και όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο υψηλότερης κατευθυντικότητας είναι η κεραία.

Τέλος το κέρδος **G** της κεραίας δείχνει ό,τι και ο συντελεστής κατευθυντικότητας, αλλά αφού λάβουμε υπόψη και το βαθμό απόδοσης **n** της κεραίας. Είναι:

$$G = D \cdot n.$$

Το κέρδος συνήθως το εκφράζουμε σε ντεσιμπέλ, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται: **G = 10log(D · n) db**. Υπάρχουν κεραίες που έχουν κέρδος 20, 30 ή και 60 db, δηλαδή εκπέμπουν προς ορισμένη κατεύθυνση 100, 1.000 ή και 1.000.000 φορές εντονότερα, απ' όσο θα εξέπεμπε, αν τροφοδοτούνταν με την ίδια ισχύ, μια υποθετική κεραία χωρίς κέρδος.

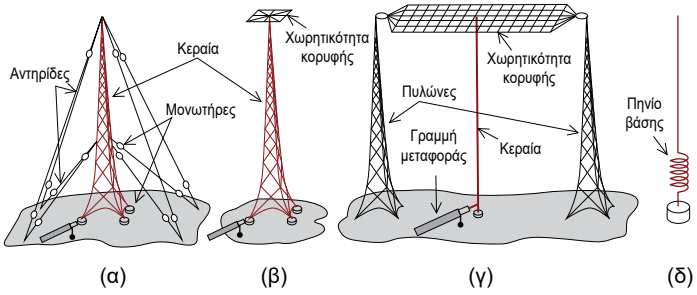
6.2.3 Τύποι κεραιών εκπομπής

Υπάρχουν διάφορες μορφές κεραιών εκπομπής, ανάλογα με τη συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, την ισχύ του πομπού και την επιθυμητή κατευθυντικότητα. Αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται κεραίες Μαρκόνι (λ/4) σε διάφορες μορφές, λόγω των εξής πλεονεκτημάτων που διαθέτουν:

- Για ορισμένη συχνότητα εκπομπής έχουν το μισό μήκος από τις κεραίες δίπολα (Χερτζ). Αυτό τις κάνει κατάλληλες για χρήση στα μεσαία κύματα όπου το μήκος κύματος είναι μεγάλο. Για παράδειγμα, μια κεραία λ/4 που εκπέμπει στα 900 kHz έχει ύψος περίπου 80 μέτρα.
- Οι κεραίες λ/4 εκπέμπουν ομοιόμορφα γύρω τους κατά το οριζόντιο επίπεδο και δεν εκπέμπουν καθόλου προς τα επάνω. Αυτό τις κάνει κατάλληλες για χρήση, στις περιπτώσεις που οι δέκτες βρίσκονται ολόγυρα και στο ίδιο επίπεδο με τον πομπό όπως επίσης και στις περιπτώσεις που έχουμε κινητές μονάδες εκπομπής – λήψης (π.χ. πυροσβεστικά οχήματα).

Στις χαμηλότερες συχνότητες εκπομπής (π.χ. στα μεσαία ή στα μακρά κύματα) οι κεραίες λ/4, λόγω του μεγάλου μήκους τους, έχουν τη μορφή ιστού με

κατάλληλη δομή και υποστήριξη από αντηρίδες, ώστε να αντέχουν στη δύναμη του ανέμου. Συχνά τοποθετείται στην κορυφή της κεραίας ένα σύστημα από αγωγούς με μορφή σχάρας. Αυτό ενεργεί σαν οπλισμός πυκνωτή και αναγκάζει το ρεύμα να συσσωρεύεται στην κορυφή της κεραίας. Έτσι προκαλείται αύξηση του ηλεκτρικού σε σχέση με το πραγματικό μήκος της κεραίας και μπορούμε να μειώσουμε το ύψος της. Το ίδιο μπορούμε να πετύχουμε τοποθετώντας ένα πηνίο στη βάση της κεραίας. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε μικρού μεγέθους κινητές κεραίες λ/4 (σχήμα 6-16).

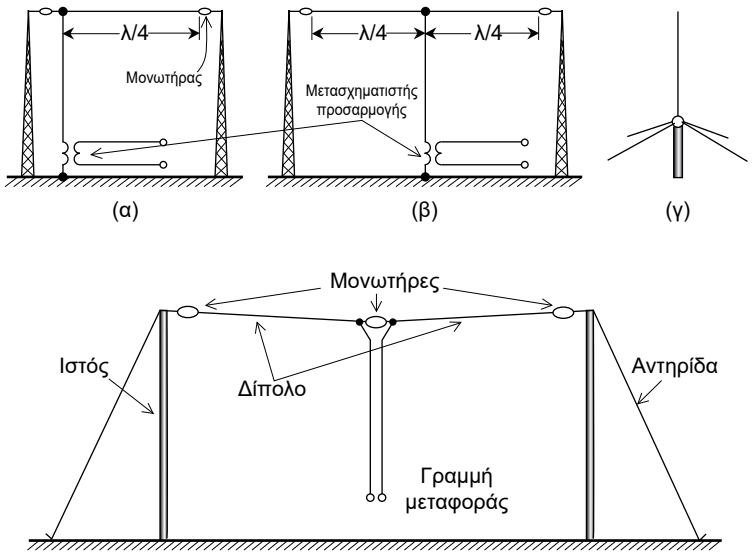


Σχήμα 6-16: *Μορφές κεραιών λ/4*

Για την καλή λειτουργία μιας κεραίας λ/4, θα πρέπει το έδαφος πάνω στο οποίο στηρίζεται να έχει πολύ καλή αγωγιμότητα. Συνήθως τέτοιες κεραίες τοποθετούνται σε παραθαλάσσιες περιοχές ή εκτάσεις με υγρό έδαφος. Σε περίπτωση που το έδαφος είναι ξηρό ή πετρώδες, ενισχύεται η αγωγιμότητά του με την παράχωση σε μικρό βάθος χάλκινων αγωγών μήκους τουλάχιστον λ/4, οι οποίοι ξεκινούν ακτινωτά από το σημείο γείωσης της γραμμής μεταφοράς, κάτω από την κεραία.

Στα βραχέα ή υπερβραχέα κύματα οι κεραίες λ/4 έχουν μικρότερο μήκος και αρκετά απλούστερη μορφή. Πολύ συχνά χρησιμοποιείται ο τύπος του σχήματος 6-16(δ), κυρίως σε οχήματα. Στην περίπτωση αυτή η οροφή του οχήματος παίζει το ρόλο του αγώγιμου επιπέδου. Αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται επίσης και οι κεραίες τύπου Τ και Γ όπως επίσης και η κεραία Ground Plane (γκράουντ πλέιν). Οι κεραίες Τ και Γ είναι απλοποιημένες μορφές της κεραίας του σχήματος 6-16(γ), ενώ η κεραία Ground Plane προέρχεται από τον τύπο 6-16(α).

Στις κεραίες Τ και Γ το οριζόντιο τμήμα λειτουργεί ως χωρητικότητα κορυφής και εκπομπή γίνεται μόνο από το κατακόρυφο τμήμα. Στην κεραία Ground Plane το φυσικό έδαφος έχει αντικατασταθεί από τρεις ή τέσσερις ακτινωτούς αγωγούς μήκους λ/4, μονωμένους από το κατακόρυφο τμήμα, που ονομάζονται τεχνητό έδαφος. Η κλίση αυτών των αγωγών προς τα κάτω καθορίζει και την αντίσταση εισόδου της κεραίας, που σχεδόν πάντα είναι 50 Ω. Η κεραία Ground Plane τοποθετείται εύκολα σε υπερυψωμένες θέσεις και η απολαβή της είναι περίπου 1,5 db (σχήμα 6-17γ).



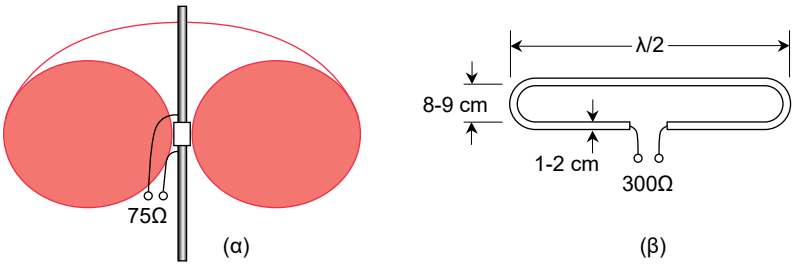
Σχήμα 6-17: *Κεραίες τύπου Γ (α), Τ (β), και Ground Plane (γ)*
Οριζόντια κεραία δίπολο (δ)

Στα βραχέα κύματα πολύ συχνά χρησιμοποιούνται και οι οριζόντιες κεραίες δίπολα (λ/2). Λόγω του διαγράμματος κατευθυντικότητάς τους, αυτές οι κεραίες τοποθετούνται κάθετα προς την επιθυμητή διεύθυνση εκπομπής. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργούν προέρχεται από το συνδυασμό δύο κυμάτων, αυτού που εκπέμπεται άμεσα από την κεραία και αυτού που αντανακλάται στο έδαφος κάτω από αυτή. Έτσι το ύψος του δίπολου πάνω από τη γη έχει μεγάλη σημασία. Συνήθως αυτές οι κεραίες τοποθετούνται σε ύψος μεταξύ λ/2 και λ/4 πάνω από το έδαφος.

Η κεραία του σχήματος 6-17δ κατασκευάζεται εύκολα από απλά υλικά και γι' αυτό χρησιμοποιείται πολύ από τους ραδιοερασιτέχνες. Η αντίσταση εισόδου της είναι 75 Ω και έτσι τροφοδοτείται με ομοαξονική γραμμή της ίδιας χαρακτηριστικής αντίστασης. Η απολαβή της είναι περίπου 1,2 db.

Αν οι οριζόντιοι αγωγοί αποτελούνται από σχετικά λεπτό σύρμα, η κεραία συντονίζεται σε μια μόνο συχνότητα, η οποία προκύπτει από τη σχέση (6.3). Όσο όμως αυξάνουμε το πάχος των αγωγών τόσο περισσότερο ικανή γίνεται η κεραία να εκπέμψει και σε άλλες γειτονικές συχνότητες.

Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται το εύρος ζώνης της, κάτι που σε πολλές περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα επιθυμητό. Έτσι, στα υπερβραχέα κύματα, όπου το μήκος του δίπολου είναι μικρό, οι οριζόντιοι αγωγοί κατασκευάζονται από σωλήνα αλουμινίου και δεν απαιτείται στήριγμα στα άκρα τους. Τέτοιες κεραίες τοποθετούνται συνήθως κατακόρυφα, για καλύτερη εκμετάλλευση του διαγράμματος κατευθυντικότητάς τους (σχήμα 6-18).

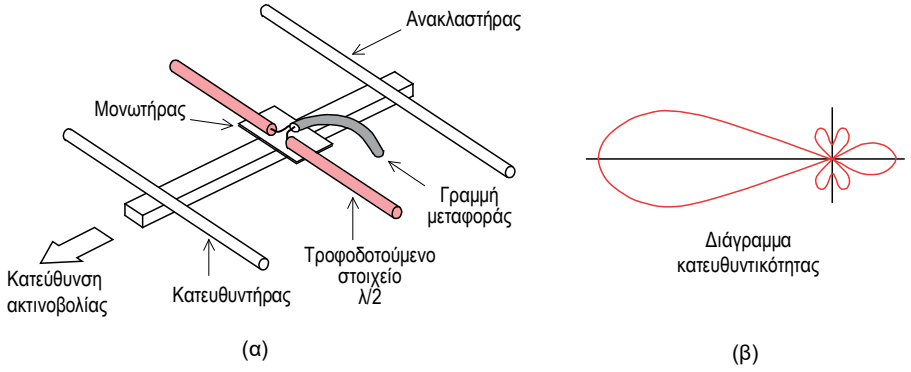


Σχήμα 6-18: *(α) Κατακόρυφη κεραία – δίπολο με διάγραμμα κατευθυντικότητας και (β) αναδιπλωμένο δίπολο*

Το μικρό μήκος της κεραίας που χρησιμοποιείται σ' αυτές τις υψηλές συχνότητες επιτρέπει την κατασκευή ενός άλλου τύπου δίπολου, που ονομάζεται αναδιπλωμένο δίπολο και φαίνεται στο σχήμα 6-18(β). Το αναδιπλωμένο δίπολο έχει όμοια χαρακτηριστικά εκπομπής με το απλό δίπολο, αλλά διαφέρει στην αντίσταση εισόδου, η οποία είναι 240 ως 300 Ω. Το αναδιπλωμένο δίπολο συχνά χρησιμοποιείται σαν κεραία λήψης στην τηλεόραση.

Το μικρό μήκος κύματος λ στα υπερβραχέα κύματα επιτρέπει να κατασκευαστούν πολύπλοκες κεραίες αποτελούμενες από συστοιχίες πολλών τμημάτων, που ονομάζονται **στοιχειοκεραίες**. Αυτές οι κεραίες παρουσιάζουν υψηλό κέρδος και κατευθυντικότητα. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων στοιχειοκεραιών, οι **παρασιτικές συστοιχίες** και οι **τροφοδοτούμενες συστοιχίες**.

Μια παρασιτική συστοιχία αποτελείται από μια βασική κεραία συνδεδεμένη στη γραμμή μεταφοράς, που ονομάζεται τροφοδοτούμενο στοιχείο, και έναν ή περισσότερους αγωγούς που δεν συνδέονται στη γραμμή μεταφοράς και ονομάζονται παρασιτικά στοιχεία. Τα παρασιτικά στοιχεία έχουν ελαφρά διαφορετικό μήκος από το τροφοδοτούμενο στοιχείο. Τυπικό παράδειγμα μιας παρασιτικής συστοιχίας αποτελεί η κεραία Γιάγκι (Yagi), που ονομάζεται έτσι προς τιμή του Ιάπωνα ερευνητή που την επινόησε (σχήμα 6-19).

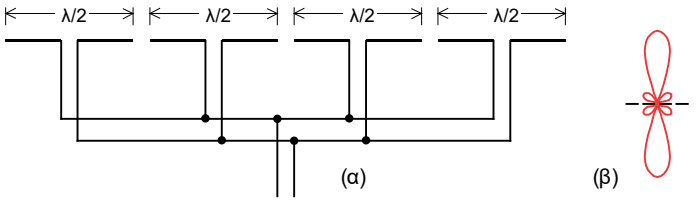


Σχήμα 6-19: *Κεραία Yagi (α) και διάγραμμα κατευθυντικότητας (β) της κεραίας*

Στην κεραία Yagi το ένα παρασιτικό στοιχείο είναι περίπου 5% μακρύτερο από το βασικό δίπολο και ονομάζεται ανακλαστήρας. Το άλλο παρασιτικό στοιχείο είναι περίπου 5% κοντύτερο από το δίπολο και ονομάζεται κατευθυντήρας. Ο ανακλαστήρας απέχει από το δίπολο απόσταση 0,15 – 0,25λ, ενώ ο κατευθυντήρας απόσταση 0,1 – 0,2λ. Μέρος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που εκπέμπεται από το δίπολο αντανακλάται από τα παρασιτικά στοιχεία και συνδυάζεται με το αρχικό κύμα, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη ενίσχυση της ακτινοβολίας προς την πλευρά του κατευθυντήρα και μεγάλη εξασθένηση προς την πλευρά του ανακλαστήρα. Έτσι η κεραία Yagi είναι μια κεραία μονοκατευθυντική. Με τη μορφή του σχήματος 6-19(α) έχει απολαβή περίπου 8 db. Μπορούν να προστεθούν μέχρι και 20 κατευθυντήρες στην κεραία, οπότε η απολαβή της μπορεί να φτάσει και τα 17 db.

Ο άλλος τύπος στοιχειοκεραίας είναι η τροφοδοτούμενη συστοιχία. Αυτή είναι μια κεραία που έχει δύο ή περισσότερα δίπολα, τα οποία είναι όλα συνδεδεμένα με τη γραμμή τροφοδοσίας και διευθετούνται έτσι, ώστε να παρέχουν κατευθυντικότητα και κέρδος. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι τροφοδοτούμενων συστοιχιών, η **συγγραμική,** η **μετωπική** και η **ακροπυροδοτική**.

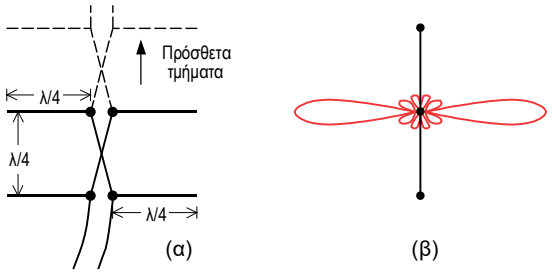
Η συγγραμική κεραία αποτελείται από δύο ή περισσότερα δίπολα, τοποθετημένα, όπως στο σχήμα 6-20. Τα μήκη των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τα δίπολα είναι υπολογισμένα έτσι, ώστε η ενέργεια του πομπού να φτάνει σε όλα τους με την ίδια φάση. Έτσι τα κύματα που παράγονται από κάθε δίπολο προστίθενται σε αυτά των άλλων και παράγουν μια εστιασμένη δέσμη. Η συγγραμική κεραία εξακολουθεί να είναι διπλοκατευθυντική, αλλά το διάγραμμα ακτινοβολίας της είναι πολύ πιο στενό από το διάγραμμα του απλού δίπολου, παρέχοντας μεγαλύτερη κατευθυντικότητα και κέρδος. Συνήθως τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση, για να μπορεί να εκπέμπει ολόγυρα στο οριζόντιο επίπεδο σαν μια παγκατευθυντική κεραία με κέρδος.



Σχήμα 6-20: *Συγγραμική κεραία (α) και διάγραμμα κατευθυντικότητας (β)*

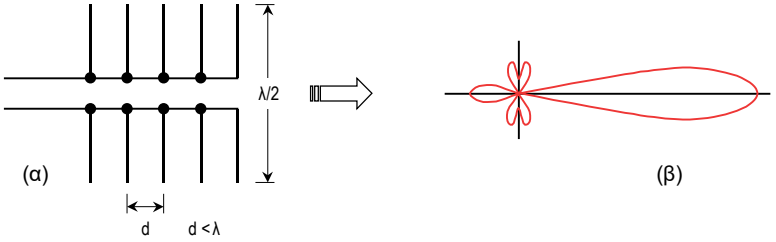
Η μετωπική κεραία αποτελείται από δίπολα λ/2 συνδεδεμένα όπως στο σχήμα 6-21. Μπορούν να συνδυαστούν δύο ή περισσότερα στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους και με τη γραμμή μεταφοράς. Η γραμμή διασταυρώνεται από δίπολο σε δίπολο, για να μπορεί να τροφοδοτεί τα στοιχεία με σήμα σωστής φάσης για τη λειτουργία της κεραίας. Η μετωπική κεραία δεν ακτινοβολεί κατά μήκος του

άξονα των στοιχείων, όπως μια κεραία Yagi, αλλά μετωπικά, δηλαδή κάθετα στο επίπεδο της συστοιχίας. Είναι μια κεραία διπλοκατευθυντική με υψηλό κέρδος και κατευθυντικότητα. Συχνά συνδυάζεται με μια μεταλλική ανακλαστική επιφάνεια παράλληλη και σε απόσταση λ/4 από το επίπεδό της. Με τον τρόπο αυτό μετατρέπεται σε μονοκατευθυντική κεραία.



Σχήμα 6-21: *Μετωπική κεραία (α) και διάγραμμα κατευθυντικότητας (β)*

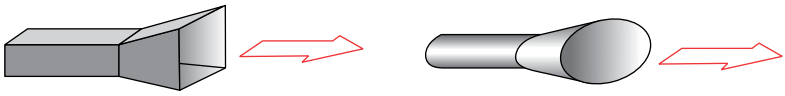
Η ακροπυροδοτική κεραία αποτελείται από ένα σύνολο δίπολων λ/2 συνδεδεμένων μεταξύ τους όπως στο σχήμα 6-22. Η απόσταση d μεταξύ των στοιχείων είναι μικρό κλάσμα του μήκους κύματος λ. Με κατάλληλη εκλογή του αριθμού των στοιχείων και της απόστασης d προκύπτει μια μονοκατευθυντική κεραία υψηλής κατευθυντικότητας και απολαβής, που ακτινοβολεί όπως μια κεραία Yagi.



Σχήμα 6-22: *Ακροπυροδοτική κεραία (α) και διάγραμμα κατευθυντικότητας (β)*

Σε ακόμη υψηλότερες συχνότητες, της περιοχής των μικροκυμάτων, το μήκος κύματος γίνεται τόσο μικρό, ώστε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αρχίζουν να συμπεριφέρονται σαν ακτίνες φωτός. Έτσι, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ανάκλαση των κυμάτων πάνω σε σχετικά μικρές μεταλλικές επιφάνειες, για να πετύχουμε με απλά μέσα εξαιρετικά μεγάλη κατευθυντικότητα και απολαβή από τις κεραίες.

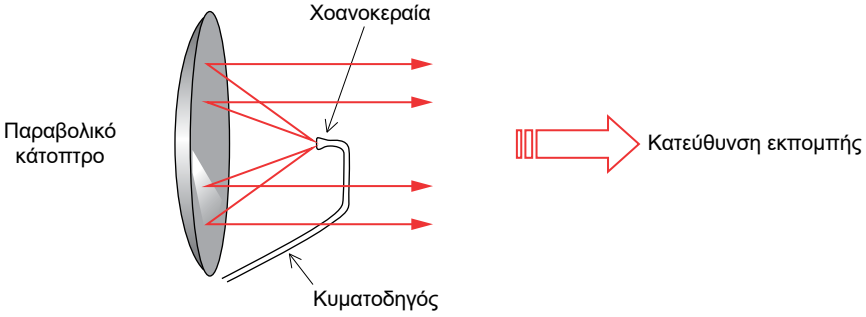
Ο πιο συνηθισμένος τύπος βασικής κεραίας μικροκυμάτων είναι η χοανοκεραία. Αυτή δεν είναι τίποτε άλλο παρά μια διεύρυνση της άκρης του κυματοδηγού που χρησιμοποιείται αντί της ομοαξονικής γραμμής μεταφοράς σ' αυτές τις συχνότητες (σχήμα 6-23).



(α) (β)

Σχήμα 6-23: *Παραλληλόγραμμη (α) και κωνική (β) χοανοκεραία*

Οι χοανοκεραίες συνδυάζονται σχεδόν πάντα με κοίλες μεταλλικές παραβολικές επιφάνειες, που ονομάζονται παραβολικά κάτοπτρα. Οι κεραίες που προκύπτουν συχνά ονομάζονται και παραβολικές κεραίες. Οι χοανοκεραίες τοποθετούνται μπροστά από το κέντρο των κατόπτρων έτσι, ώστε η κωνική δέσμη ακτινοβολίας που εκπέμπουν να μετατρέπεται μετά την ανάκλασή της σε παράλληλη. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται πολύ υψηλό κέρδος (30 – 60 db) και εξαιρετικά στενή δέσμη εκπομπής, όπως η δέσμη του φωτός ενός προβολέα (σχήμα 6-24).



Σχήμα 6-24: *Παραβολική κεραία μικροκυμάτων*

6.3 Ακτινοβολούμενη ισχύς και ένταση πεδίου

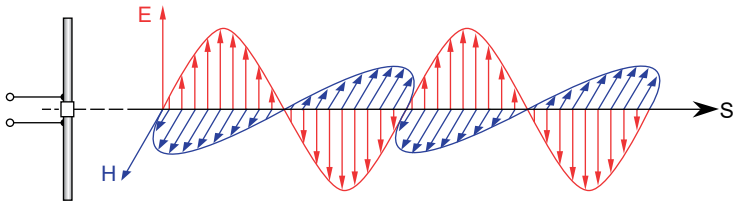
Όπως είδαμε όταν εξετάσαμε τα χαρακτηριστικά των κεραιών, από το σύνολο της ισχύος που προσφέρει ο πομπός ένα μόνο μέρος εκπέμπεται, γιατί το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα από την αντίσταση απωλειών της κεραίας. Το ποσό της ισχύος P_r που θα εκπεμφθεί καθορίζεται από την ισχύ εξόδου του πομπού και το συντελεστή απόδοσης της κεραίας. Η ισχύς αυτή εκφράζεται σε Watt και μπορεί να υπολογιστεί εύκολα, αν μετρήσουμε την ενεργό τιμή I_m της έντασης του ρεύματος στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας όπου, ως γνωστόν, υπάρχει κοιλία ρεύματος. Είναι:

$P_r = 73 \cdot I^2_m$ για κεραία λ/2 και

$P_r = 36 \cdot I^2_m$ για κεραία λ/4

Είδαμε επίσης ότι οι περισσότερες κεραίες έχουν κάποιας μορφής κατευθυντικότητα και παρουσιάζουν κέρδος. Αυτό τις επιτρέπει να εκπέμπουν προς την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας, σαν να ήταν κεραίες που τροφοδοτούνται με μεγαλύτερη ισχύ. Για να χαρακτηρίσουμε αυτή την ιδιότητα, χρησιμοποιούμε το γινόμενο της ακτινοβολούμενης ισχύος επί το κέρδος της κεραίας, που ονομάζεται **Ενεργός Ακτινοβολούμενη Ισχύς** (ERP – Effective Radiated Power).

Η ισχύς που ακτινοβολεί η κεραία εκπέμπεται, ως γνωστόν, με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ηλεκτρικές και μαγνητικές διαταραχές στο χώρο γύρω από την κεραία. Αυτό σημαίνει ότι, εξαιτίας μιας κεραίας που εκπέμπει, εξασκούνται δυνάμεις στα ηλεκτρόνια των αγωγών που υπάρχουν εκεί γύρω. Από το μέγεθος και την κατεύθυνση αυτών των δυνάμεων προκύπτει η έννοια της έντασης **E** του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας, η οποία έχει μέτρο ανάλογο προς τις δυνάμεις που αναπτύσσει στα ηλεκτρόνια και κατεύθυνση ίδια με τις δυνάμεις. Η κατεύθυνση αυτή είναι παράλληλη προς τους αγωγούς λ/4 που αποτελούν την κεραία και καθορίζει την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η πόλωση του κύματος είναι ίδια με την πόλωση της κεραίας. Για παράδειγμα, η κεραία και το κύμα στο σχήμα 6-25 έχουν κατακόρυφη πόλωση.



Σχήμα 6-25: *Ένταση ηλεκτρικού (E) και μαγνητικού (H) πεδίου σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα*

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αλλάζει διαρκώς φορά, γιατί είναι εναλλασσόμενο πεδίο. Μαζί με το ηλεκτρικό πεδίο υπάρχει και μαγνητικό, του οποίου η ένταση **H** είναι πάντα κάθετη προς την ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου. Για να χαρακτηρίσουμε όμως το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, χρησιμοποιούμε σχεδόν πάντα την ένταση E, επειδή αυτό το μέγεθος μπορούμε να το μετρήσουμε ευκολότερα. Το E μετράται σε Volt ανά μέτρο και το H σε Ampere ανά μέτρο.

6.4 Λήψη επίγειου και δορυφορικού σήματος

Στις ασύρματες επικοινωνίες ισχύει μια γενική αρχή: Για καλύτερα αποτελέσματα η κεραία λήψης πρέπει να είναι ίδια με την κεραία εκπομπής. Η αρχή αυτή εφαρμόζεται σταθερά, όταν οι συνδέσεις είναι «ένα προς ένα», όπως, για παράδειγμα, μεταξύ δύο πομποδεκτών CB, αλλά δεν είναι εφαρμόσιμη ούτε απαραίτητη, στην περίπτωση λήψης προγραμμάτων που εκπέμπονται από ισχυρούς πομπούς για πολλούς δέκτες. Οι κεραίες λήψης σ' αυτές τις περιπτώσεις μπορεί, ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, να είναι από εξαιρετικά απλές, έως αρκετά σύνθετες, αλλά σε καμιά περίπτωση δε συγκρίνονται με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα των κεραιών εκπομπής. Όσο για τους δέκτες που χρειάζονται για να πραγματοποιηθεί η λήψη, η λεπτομερής εξέτασή τους θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια.

Στους δέκτες ραδιοφώνου για λήψη μακρών, μεσαίων ή βραχέων κυμάτων χρησιμοποιείται πολύ συχνά η **μαγνητική κεραία**.



Σχήμα 6-26: *Μαγνητική κεραία*

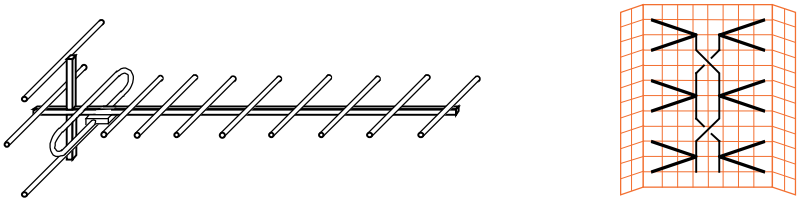
Η μαγνητική κεραία αποτελείται από ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από μια ράβδο φερρίτη με μήκος 10 – 30 cm και διάμετρο περίπου 1 cm. Ο φερρίτης είναι ένα κεραμικό υλικό που έχει πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Μπορεί έτσι να συγκεντρώνει από το γύρω χώρο και να διοχετεύει μέσα από το πηνίο τις μαγνητικές γραμμές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και να παράγει στα άκρα των σπειρών του ένα σχετικά ισχυρό σήμα λήψης. Η μαγνητική κεραία είναι κατευθυντική και λειτουργεί καλύτερα, όταν προσανατολίζεται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Λόγω του μικρού της μεγέθους συνήθως τοποθετείται στο εσωτερικό των δεκτών.

Στους φορητούς ραδιοφωνικούς δέκτες AM και FM επίσης συχνά χρησιμοποιείται και η τηλεσκοπική κεραία. Αυτή στην ουσία δεν είναι τίποτε άλλο από ένα απλό κομμάτι αγωγού, που λειτουργεί σαν ασυντόνιστη κεραία τυχαίου μήκους. Η ικανοποιητική λειτουργία της οφείλεται μόνο στο ότι η ένταση του πεδίου στο χώρο που λειτουργούν οι περισσότεροι δέκτες είναι πολύ μεγάλη.

Για τη λήψη των υπερβραχέων κυμάτων, ιδιαίτερα αν αυτή γίνεται από ποιοτικούς δέκτες FM ή δέκτες τηλεόρασης, χρειάζεται συνήθως κάτι καλύτερο από τις απλές κεραίες, που είδαμε παραπάνω. Έτσι, οι επιτραπέζιοι δέκτες FM διαθέτουν ειδική είσοδο όπου συνδέεται η γραμμή μεταφοράς που οδηγεί σε εξωτερική κεραία. Αυτή είναι είτε μια κεραία Ground Plane είτε μια κεραία δίπολο τοποθετημένη κάθετα πάνω σε ιστό. Ανάλογες κεραίες χρησιμοποιούμε και για υψηλών απαιτήσεων λήψη βραχέων κυμάτων.

Από τις κεραίες τηλεόρασης απαιτούμε επιπλέον και κάποια κατευθυντικότητα. Ο λόγος είναι ότι, αν η τηλεόραση, εκτός από το σήμα του πομπού, συλλαμβάνει και

αντανακλάσεις του ίδιου σήματος από διάφορα φυσικά εμπόδια, εμφανίζει στην οθόνη της πολλαπλές εικόνες («είδωλα»). Αυτό συμβαίνει, διότι τα ανακλώμενα κύματα έχουν διανύσει περισσότερο δρόμο και φτάνουν στην κεραία λίγο αργότερα από τα απ' ευθείας κύματα, δίνοντας εικόνες ελαφρά μετατοπισμένες ως προς την αρχική. Για την εξασφάλιση κατευθυντικότητας χρησιμοποιείται συνήθως η κεραία Yagi με αναδιπλωμένο δίπολο και πολλούς κατευθυντήρες, έτσι ώστε το κέρδος της να είναι 13 – 17 db. Επειδή όμως αυτή η κεραία έχει σχετικά περιορισμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων και δε λαμβάνει ικανοποιητικά όλα τα τηλεοπτικά κανάλια, χρησιμοποιείται πολλές φορές στη θέση της μια παραλλαγή της μετωπικής κεραίας με συρμάτινο πλέγμα για ανακλαστήρα. Τα δίπολα αυτής της κεραίας έχουν διχαλωτή μορφή για αύξηση του εύρους ζώνης των συχνοτήτων λειτουργίας της (σχήμα 6-27).

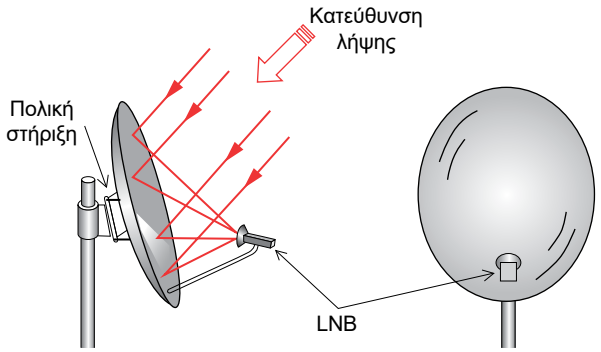


Σχήμα 6-27: *Κεραίες τηλεόρασης: (a) Yagi και (β) μετωπική*

Τέλος για τη λήψη του δορυφορικού σήματος έχουμε πολύ υψηλές απαιτήσεις τόσο από την κεραία όσο και από τις υπόλοιπες συσκευές του δορυφορικού δέκτη. Κατ' αρχάς το σήμα που δεχόμαστε από το δορυφόρο είναι εξαιρετικά ασθενές. Οι δορυφόροι DBS (Direct Broadcasting Satellites), των οποίων το σήμα λαμβάνουμε με οικιακούς δορυφορικούς δέκτες, έχουν πομπούς, των οποίων η ισχύς ακτινοβολίας δεν ξεπερνά τα 50 Watt και εκπέμπουν από απόσταση 36.000 χιλιομέτρων. Για να λάβουμε τέτοια σήματα, χρειαζόμαστε κεραίες εξαιρετικά υψηλού κέρδους, οι οποίες αναγκαστικά έχουν πολύ στενή δέσμη λήψης. Αυτό μας υποχρεώνει να «σκοπεύουμε» το δορυφόρο πολύ προσεκτικά, πράγμα που είναι δυνατό, γιατί οι δορυφόροι DBS περιστρέφονται γύρω από τη γη με την ίδια γωνιακή ταχύτητα που η γη περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της και έτσι εμφανίζονται ακίνητοι στο ίδιο πάντα σημείο του ουρανού.

Για να ικανοποιηθούν όλες αυτές οι ανάγκες, χρησιμοποιούμε τις γνωστές μας παραβολικές κεραίες με κάποιες μικρές τροποποιήσεις. Κατ' αρχάς η χοανοκεραία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν τοποθετείται στο κέντρο του κάτοπτρου, αλλά έκκεντρα. Εξαιτίας αυτού, το κάτοπτρο παίρνει ελλειψοειδές αντί για κυκλικό σχήμα και το βάθος της κοιλότητάς του μικραίνει. Έτσι, μπορεί να τοποθετείται περισσότερο κάθετα προς την επιφάνεια της γης, για να μην επιτρέπει στο χιόνι και το νερό της βροχής να συσσωρεύονται μέσα του και να επιδεινώνουν τη λήψη. Έπειτα, δε χρησιμοποιείται κυματοδηγός, αλλά το πρώτο στάδιο του δορυφορικού δέκτη είναι τοποθετημένο κατευθείαν μετά τη χοανοκεραία μέσα σε μια μονάδα που ονομάζε-

ται **LNB** (Low Noise Block-down converter), δηλαδή **Μετατροπέας Χαμηλού Θορύβου**. Τέλος, υπάρχει ένα σύστημα περιστροφής της κεραίας που μας επιτρέπει να στοχεύσουμε οποιονδήποτε δορυφόρο στο επίπεδο του ισημερινού, γιατί εκεί βρίσκονται όλοι οι δορυφόροι DBS. Το σύστημα αυτό ονομάζεται **πολική στήριξη**, γιατί ο άξονάς του είναι παράλληλος με τον άξονα της γης (σχήμα 6-28).



Σχήμα 6-28: *Κεραία δορυφορικής λήψης*

Μέσα στη μονάδα LNB υπάρχει μια διάταξη επιλογής της πόλωσης του λαμβανόμενου κύματος, ένας ενισχυτής κατασκευασμένος με ειδικά τρανζίστορ πολύ χαμηλού θορύβου και ένας μετατροπέας συχνότητας. Ο μετατροπέας αυτός υποβιβάζει τη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος από τα 11 GHz, που εκπέμπει ο δορυφόρος, σε 1 GHz. Το σήμα του 1 GHz οδηγείται με ομοαξονικό καλώδιο σε μια συσκευή που ονομάζεται **IDU** (In-Door Unit), δηλαδή εσωτερική μονάδα. Στη συσκευή αυτή γίνεται επιπλέον ενίσχυση του σήματος όπως επίσης και η επιλογή του επιθυμητού δορυφορικού προγράμματος. Η εσωτερική μονάδα συνδέεται με ένα κοινό τηλεοπτικό δέκτη, προκειμένου να παρακολουθήσουμε τηλεοπτικό δορυφορικό πρόγραμμα ή με ένα ειδικό ψηφιακό ραδιοφωνικό δέκτη, προκειμένου να κάνουμε ακρόαση δορυφορικού ραδιοφωνικού προγράμματος.

Η μονάδα IDU συχνά συμπληρώνεται και με μια μονάδα τηλεχειρισμού της δορυφορικής κεραίας. Πίσω από το κάτοπτρο, στη θέση της πολικής στήριξης, τοποθετείται ένας μηχανισμός που ονομάζεται **ενεργοποιητής** (actuator). Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει τη μετακίνηση της κεραίας, ώστε να μπορεί να στοχεύσει οποιονδήποτε δορυφόρο. Οι διάφορες θέσεις της κεραίας αποθηκεύονται στη μνήμη του τηλεχειρισμού, έτσι ώστε, όταν επιλέγουμε κάποιο πρόγραμμα που το εκπέμπει διαφορετικός δορυφόρος απ' αυτόν που προηγουμένως παρακολουθούσαμε, η κεραία να περιστρέφεται αυτόματα προς τη θέση του νέου δορυφόρου.

Το μέγεθος του απαιτούμενου παραβολικού κατόπτρου εξαρτάται από την ένταση του δορυφορικού σήματος στο σημείο λήψης και από τη στάθμη του ηλεκτρονικού θορύβου που εισάγει στο σήμα το LNB. Στη χώρα μας παραβολικά κάτοπτρα με διάμετρο μεταξύ 0,8 και 1,2 μέτρα προσφέρουν ικανοποιητική λήψη στις περισσότερες περιπτώσεις.

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

• Στα συστήματα εκπομπής – λήψης γραμμή μεταφοράς ονομάζεται ένα ζεύγος αγωγών που μεταφέρει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα υψηλής συχνότητας.

• Πάνω σε μια γραμμή μεταφοράς που τερματίζεται σε φορτίο ίσο με τη χαρακτηριστική της αντίσταση κινούνται κύματα ρεύματος και τάσης. Τα κύματα αυτά ονομάζονται τρέχοντα κύματα.

• Αν η γραμμή μεταφοράς είναι ανοιχτή ή βραχυκυκλωμένη στο τέρμα, τα κύματα ανακλώνται και επιστρέφουν πίσω. Συνδυάζονται με τα προσπίπτοντα και δημιουργούν στάσιμα κύματα.

• Η ανοιχτή γραμμή λ/4 ή η βραχυκυκλωμένη γραμμή λ/2 συμπεριφέρονται σαν κύκλωμα συντονισμού σειράς. Η βραχυκυκλωμένη γραμμή λ/4 ή η ανοιχτή γραμμή λ/2 συμπεριφέρονται σαν κύκλωμα παράλληλου συντονισμού.

• Ανοιχτή γραμμή μικρότερη από λ/4 ή βραχυκυκλωμένη γραμμή μεταξύ λ/4 και λ/2 συμπεριφέρονται σαν πυκνωτές. Βραχυκυκλωμένη γραμμή μικρότερη από λ/4 ή ανοιχτή γραμμή μεταξύ λ/4 και λ/2 συμπεριφέρονται σαν πηνία.

• Αν η γραμμή τερματίζεται σε αντίσταση διαφορετική από τη χαρακτηριστική της αντίσταση, εμφανίζονται μαζί επάνω της τρέχοντα και στάσιμα κύματα. Αυτά λέγονται μικτά κύματα.

• Την κατάσταση των κυμάτων πάνω στη γραμμή τη χαρακτηρίζουμε με το λόγο στάσιμων κυμάτων SWR. Αν SWR=1, έχουμε τρέχοντα κύματα. Αν SWR→∞, έχουμε στάσιμα κύματα. Με ενδιάμεσες τιμές έχουμε μικτά κύματα. Ο λόγος στάσιμων κυμάτων θέλουμε να είναι όσο το δυνατό μικρότερος.

• Για ελάχιστο SWR χρειάζεται προσαρμογή, δηλαδή εξίσωση των αντιστάσεων της πηγής, της γραμμής μεταφοράς και του φορτίου. Αν δεν μπορούμε να το πετύχουμε, καταφεύγουμε στη μερική προσαρμογή.

• Οι κεραίες είναι αγωγοί που εκπέμπουν ή συλλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μελετούμε τις κεραίες εκπομπής, γιατί η θεωρία τους είναι ίδια και για τις κεραίες λήψης, αλλά στην πράξη οι μορφές τους είναι πιο περίπλοκες.

• Υπάρχουν κεραίες ασυντόνιστες και συντονισμένες. Οι ασυντόνιστες έχουν μήκος πολλών λ. Οι συντονισμένες έχουν μήκος λ/2 ή λ/4. Οι λ/2 λέγονται κεραίες Χερτζ και είναι συμμετρικές, ενώ οι λ/4 λέγονται κεραίες Μαρκόνι και είναι ασύμμετρες.

• Η κεραία χαρακτηρίζεται από την ιδιοσυχνότητα, το ενεργό ύψος, τις αντιστάσεις εισόδου και ακτινοβολίας, το βαθμό απόδοσης, την κατευθυντικότητα και το κέρδος.

• Στα μακρά και μεσαία κύματα όπου το λ είναι μεγάλο χρησιμοποιούμε κεραίες εκπομπής λ/4 και μειώνουμε το μήκος τους με χωρητικότητα κορυφής ή αυτεπαγωγή βάσης.

● Στα βραχέα κύματα χρησιμοποιούμε κεραίες λ/4, κυρίως για κινητούς πομπούς, και κεραίες λ/2 για σταθερές εγκαταστάσεις.

● Στα υπερβραχέα κύματα όπου το λ είναι μικρό χρησιμοποιούμε σύνολα από κεραίες λ/2, που ονομάζονται στοιχειοκεραίες. Αυτό το κάνουμε για αύξηση του κέρδους και της κατευθυντικότητας

● Στα μικροκύματα χρησιμοποιούμε κεραίες λ/2 και χοανοκεραίες σε συνδυασμό με μεταλλικούς ανακλαστήρες για μεγάλο κέρδος και κατευθυντικότητα.

● Για λήψη μακρών, μεσαίων ή και βραχέων κυμάτων χρησιμοποιείται η μαγνητική κεραία με φερρίτη. Για απλή λήψη βραχέων και υπερβραχέων κυμάτων χρησιμοποιείται πτυσσόμενη τηλεσκοπική κεραία τυχαίου μήκους.

● Για υψηλών απαιτήσεων λήψη υπερβραχέων κυμάτων χρησιμοποιούνται κεραίες λ/4 και λ/2 αναρτημένες σε ιστούς ή στοιχειοκεραίες υψηλής κατευθυντικότητας.

● Για λήψη δορυφορικών προγραμμάτων χρησιμοποιείται παραβολική κεραία. Ο δορυφορικός δέκτης περιλαμβάνει τη μονάδα LNB πάνω στο κάτοπτρο και την εσωτερική μονάδα IDU. Πολλές φορές υπάρχει και σύστημα τηλεχειρισμού των κινήσεων της κεραίας, που ελέγχεται από τη θέση της εσωτερικής μονάδας.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Σε ποιες περιπτώσεις δημιουργούνται στάσιμα κύματα σε μια γραμμή μεταφοράς και γιατί;
2. Ποια είναι η μέγιστη και ποια η ελάχιστη τιμή του λόγου στάσιμων κυμάτων; Γιατί θέλουμε να έχουμε όσο το δυνατό μικρότερο SWR;
3. Τι ονομάζεται προσαρμογή και πώς επιτυγχάνεται στην περίπτωση των γραμμών μεταφοράς;
4. Γιατί μια κεραία ισοδυναμεί με συντονιζόμενο κύκλωμα L-C σειράς;
5. Πώς λειτουργεί μια κεραία λ/4; Να υπολογιστεί το μήκος της όταν λειτουργεί στη συχνότητα των 100 MHz.
6. Σε ποια συχνότητα συντονίζεται μια κεραία Χερτζ που έχει μήκος 28,5 μέτρα;
7. Ποια είναι τα χαρακτηριστικά των κεραιών;
8. Γιατί μια κεραία που παρουσιάζει κατευθυντικότητα έχει και κέρδος;
9. Ποια πλεονεκτήματα έχουν οι κεραίες λ/4;
10. Τι επιτυγχάνουμε με την αύξηση της χωρητικότητας κορυφής μιας κεραίας λ/4;
11. Πώς μπορούμε με μια κεραία λ/2 να εκπέμπουμε ομοιόμορφα ολόγυρά της κατά το οριζόντιο επίπεδο;
12. Γιατί κατασκευάζονται εύκολα οι στοιχειοκεραίες στα υπερβραχέα κύματα και όχι στα μακρά ή μεσαία κύματα;
13. Πώς είναι κατασκευασμένη και πώς λειτουργεί η κεραία Yagi;
14. Πώς εξασφαλίζουν οι παραβολικές κεραίες υψηλή κατευθυντικότητα;
15. Τι ονομάζεται ενεργός ακτινοβολούμενη ισχύς και σε τι διαφέρει από την ακτινοβολούμενη ισχύ;
16. Πώς θα καταλάβουμε αν μια κεραία είναι οριζόντια ή κατακόρυφα πολωμένη;
17. Πώς πρέπει να στραφεί μια μαγνητική κεραία για να κάνει καλύτερη λήψη του ραδιοφωνικού σήματος;
18. Γιατί πλεονεκτούν οι μετωπικές κεραίες από τις κεραίες Yagi όσον αφορά τη χρήση τους για λήψη τηλεοπτικού προγράμματος;
19. Ποια είναι η λειτουργία της μονάδας LNB σε ένα δορυφορικό σύστημα λήψης;

Στο κεφάλαιο αυτό θα γνωρίσουμε τον τρόπο λειτουργίας των ραδιοφωνικών δεκτών. Θα δούμε πώς επεξεργάζονται τα διαμορφωμένα σήματα, για να αναπαράγουν την ακουστική πληροφορία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΚΟΙ ΔΕΚΤΕΣ

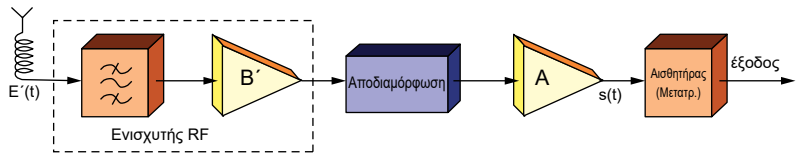
7.7 Γενικά χαρακτηριστικά ραδιοφωνικού δέκτη

7.1.1 Εισαγωγή

Ο δέκτης δέχεται ένα μικρό ποσοστό της ηλεκτρομαγνητικής (ραδιοηλεκτρικής) ενέργειας του πομπού μαζί με πολλά άγνωστα σήματα, μικρότερης ή μεγαλύτερης ισχύος και πολύ θόρυβο. Ο ρόλος του είναι να ενισχύει επιλεκτικά και να επεξεργάζεται μόνο το ωφέλιμο φέρον, ώστε να αποδίδει στην έξοδο την πληροφορία.

Κατά τη σχεδίαση και την κατασκευή του δέκτη πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες καθώς και οι παράμετροι που επηρεάζουν τις επιδόσεις του. Γενικά, επειδή ο δέκτης επεξεργάζεται σήματα μικρής ισχύος, απαιτεί πιο ευαίσθητα κυκλώματα από τον πομπό.

Ένα συνοπτικό διάγραμμα απλού δέκτη φαίνεται στο σχήμα 7.1.1 και περιλαμβάνει:



Σχήμα 7.1.1: *Απλός δέκτης άμεσης ενίσχυσης*

● Την κεραία και το φίλτρο εισόδου, που αποτελούν ουσιαστικά το στάδιο προσαρμογής του δέκτη στον ηλεκτρομαγνητικό φορέα.

● Τον επιλεκτικό ενισχυτή υψηλών συχνοτήτων (Β΄) ο οποίος ενισχύει το ασθενές φέρον σήμα Ε΄(t) που φτάνει στην είσοδο του δέκτη.

● Τον αποδιαμορφωτή, που προορίζεται να αποδιαμορφώνει το φέρον και να αποκαθιστά το βασικό σήμα s(t).

● Τον ενισχυτή χαμηλών συχνοτήτων (Α) του βασικού σήματος.

● Τον αισθητήρα / μετατροπέα (μεγάφωνο) που αποδίδει τελικά το αρχικό μήνυμα στον τελικό αποδέκτη.

Οι επιδόσεις του δέκτη χαρακτηρίζονται από:

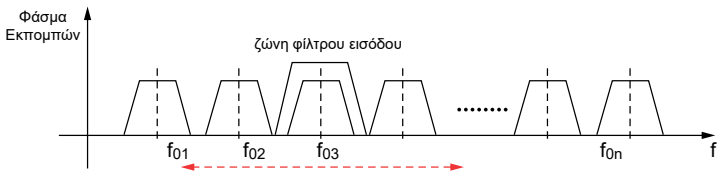
● **Τη σταθερότητα (stability):** Χαρακτηρίζει την ικανότητα του δέκτη να διατηρεί την αρχική του ρύθμιση και το συντονισμό του σε ορισμένη συχνότητα. Σε δεδομένη συχνότητα μετριέται σε Hz ή kHz απόκλισης από την αρχική του ρύθμιση (αρχικό συντονισμό).

● **Την ευαισθησία (sensibility):** Πρόκειται για την ελάχιστη τιμή του σήματος εισόδου Ε(t) στο δέκτη, ώστε το ωφέλιμο σήμα s(t) στην έξοδο να είναι καθαρό. Η καθαρότητα του σήματος εκτιμάται έμμεσα από το πόσο ισχυρότερο είναι το ωφέλιμο σήμα από το θόρυβο στην έξοδο του δέκτη. Αυτό εκφράζεται ποσοτικά από το λόγο της ισχύος (S) του ωφέλιμου σήματος προς την ισχύ του ανεπιθύμητου θορύβου (N) που εμφανίζεται στην έξοδο. Μετριέται σε μV σήματος στην είσοδο. Συνήθως ο λόγος ισχύων S/N δίνεται σε dB.

● **Την πιστότητα (fidelity):** Χαρακτηρίζει την ικανότητα του δέκτη να αποδίδει στην έξοδο το σήμα της πληροφορίας χωρίς παραμορφώσεις.

● **Την επιλεκτικότητα (selectivity):** Χαρακτηρίζει την ιδιότητα του δέκτη, αφού συντονιστεί, να επιλέγει, να ενισχύει και να αποδιαμορφώνει το επιθυμητό φέρον και να μην επηρεάζεται από άλλες εκπομπές, ιδιαίτερα αυτές που λαμβάνουν χώρα στα γειτονικά κανάλια. Η επιλεκτικότητα εξαρτάται σημαντικά από τη σταθερότητα και την ποιότητα των φίλτρων εισόδου και των φίλτρων του σταδίου ενδιάμεσης συχνότητας, που θα μελετηθεί σε επόμενη παράγραφο.

Στο σχήμα 7.1.2 απεικονίζονται τα φάσματα διαδοχικών ραδιοφωνικών εκπομπών που λαμβάνουν χώρα σε δεδομένη ζώνη συχνοτήτων και με κόκκινη γραμμή σημειώνεται η ζώνη διέλευσης του φίλτρου εισόδου και του επιλεκτικού ενισχυτή υψηλών συχνοτήτων (RF), που ρυθμίζονται είτε με χέρι είτε αυτόματα, για να επιλέξουν τη μία ή την άλλη εκπομπή.



Σχήμα 7.1.2: *Δίαυλοι εκπομπής και συντονισμός του δέκτη*

Η επιλεκτικότητα ορίζεται από την ελάχιστη απόσταση συχνοτήτων όπου ο δέκτης μπορεί να διακρίνει ανεξάρτητες εκπομπές. Μετριέται σε Hz ή kHz. Η επιλεκτικότητα χαρακτηρίζεται επίσης από το πόσο τα φίλτρα εισόδου απορρίπτουν τα ενοχλητικότερα σήματα, που είναι οι γειτονικοί δίαυλοι (adjacent channel rejection).

● **Τη γραμμικότητα (linearity):** Χαρακτηρίζει την ικανότητα του δέκτη να συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο για ασθενή και ισχυρά σήματα στην είσοδό του.

● **Την έλλειψη παρασιτικών εκπομπών:** Αφορά τη μη εκπομπή παρασιτικών ραδιοσημάτων (μικροεκπομπών) από τα ίδια τα κυκλώματα του δέκτη. Τέτοιες παρασιτικές εκπομπές, έστω και ασθενούς ισχύος, οι οποίες προέρχονται συνήθως από τοπικούς ταλαντωτές στο δέκτη επηρεάζουν ενδεχομένως τη λειτουργία άλλων γειτονικών συσκευών με δυσάρεστα αποτελέσματα.

Παράδειγμα: Σταθερότητα συντονισμού: 5 kHz
Επιλεκτικότητα λήψης : 10 kHz
Απόρριψη γειτονικών διαύλων: > 70 dB
Ευαισθησία δέκτη: 5 μV για S/N = 14 dB
Παρασιτικές εκπομπές: < -60 dB.

7.1.2 Απλός ραδιοφωνικός δέκτης άμεσης ενίσχυσης

Διερευνώντας τα προηγούμενα χαρακτηριστικά εύκολα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο απλός δέκτης του σχήματος 7.1.1, που ονομάζεται δέκτης άμεσης ενίσχυσης ή ομόδυνος δέκτης, δεν έχει μεγάλη πρακτική αξία. Μια τέτοια απλή συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εργαστηριακούς σκοπούς, όμως οι επιδόσεις της δεν είναι ικανοποιητικές. Ένα, δύο απλά παραδείγματα είναι πειστικά.

Ας θεωρήσουμε ένα ραδιοφωνικό δέκτη μεσαίων που λειτουργεί στη ζώνη 531 kHz έως 1602 kHz και λαμβάνει εκπομπές με διαμόρφωση πλάτους. Κάθε ραδιοφωνική εκπομπή καταλαμβάνει ζώνη περίπου 10 kHz (ακριβώς 9 kHz) από τη μια και την άλλη πλευρά της φέρουσας. Απαιτείται λοιπόν η δυνατότητα συντονισμού των σταδίων εισόδου (ρύθμιση των φίλτρων L-C και του επιλεκτικού ενισχυτή) σε όλες τις συχνότητες της συγκεκριμένης ζώνης με εύρος ζώνης διέλευσης 10 kHz. Η συμπεριφορά του δέκτη χαρακτηρίζεται από συντελεστή ποιότητας Q μη σταθερής τιμής. Πράγματι:

$$\mathbf{Q_{min} = 531 / 10 = 53 \text{ και}}$$
$$\mathbf{Q_{max} = 1602 / 10 = 160.}$$

Ένα τέτοιο φίλτρο με μεταβλητό συντελεστή ποιότητας δεν κατασκευάζεται εύκολα. Από την άλλη πλευρά, αν χρησιμοποιηθεί φίλτρο σταθερού συντελεστή ποιότητας, τότε στις υψηλότερες συχνότητες της ζώνης αντικειμενικά η ζώνη διέλευσης του δέκτη είναι μεγαλύτερη. Αυτό σημαίνει ότι η επιλεκτικότητα του δέκτη δεν είναι σταθερή για όλη την ζώνη λειτουργίας του και αυτό δεν είναι ανεκτό.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα του απλού δέκτη του σχήματος 7.1.1 είναι η γραμμικότητά του, που έμμεσα χαρακτηρίζει τη δυναμική εισόδου. Αν το φέρον σήμα στην είσοδο του δέκτη παρουσιάζει διακυμάνσεις (μεταβολές) έντασης είναι

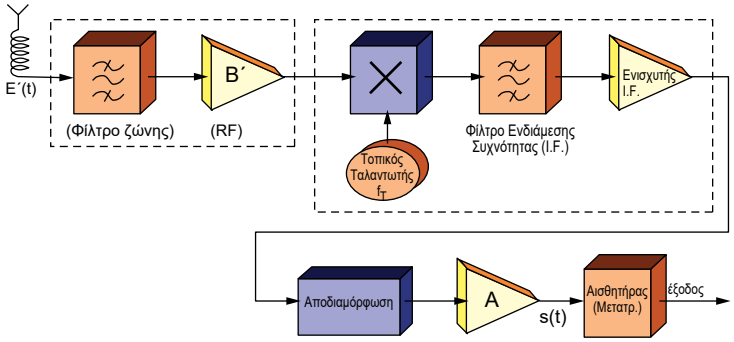
προφανές ότι στην έξοδο το σήμα s(t) παρουσιάζει αντίστοιχες μεταβολές, πολύ δυσάρεστες στην ακρόαση. Για παράδειγμα, σκεφτείτε, όταν ακούμε ραδιόφωνο στο αυτοκίνητο ενώ κινούμαστε, ανάλογα με το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης στην είσοδο του, να έχουμε ανεπιθύμητες αυξομειώσεις του ακουστικού σήματος στο μεγάφωνο. Σε κάποιες περιπτώσεις πολύ ισχυρού φέροντος στην είσοδο ενδεχομένως δημιουργηθεί κορεσμός του σήματος σε κάποιο στάδιο ενίσχυσης και τελικά να εμφανιστούν παραμορφώσεις στην έξοδο.

Η σταθεροποίηση του σήματος στην έξοδο απαιτεί να προικιστεί ο δέκτης με διάταξη αυτόματης ρύθμισης του κέρδους των σταδίων ενίσχυσης, ώστε, πριν την αποδιαμόρφωση, να έχουμε πάντοτε το ίδιο πλάτος σήματος, ανεξάρτητα από την ένταση του φέροντος σήματος στην είσοδο. Μπορούν να αναφερθούν και άλλα παραδείγματα, που τεκμηριώνουν ότι ο ραδιοφωνικός δέκτης του σχήματος 7.1.1 δεν ανταποκρίνεται σε υψηλές απαιτήσεις ποιότητας και λειτουργίας.

7.2 Υπερετερόδυνος δέκτης

7.2.1 Γενικό διάγραμμα υπερετερόδυνου δέκτη

Το πρόβλημα της επιλεκτικότητας και του συντονισμού του δέκτη αντιμετωπίζεται με τη γενική δομή, που φαίνεται στο σχήμα 7.2.1.



Σχήμα 7.2.1: Υπερετερόδυνος δέκτης

Το φίλτρο εισόδου και ο επιλεκτικός ενισχυτής (RF) έχουν ζώνη διέλευσης ολόκληρη τη ραδιοφωνική ζώνη που καλύπτει ο δέκτης (δηλαδή, για τη ραδιοφωνία AM από 531 – 1602 kHz, για τη ραδιοφωνία FM από 88 – 108 MHz). Έτσι, το φίλτρο εισόδου από φίλτρο επιλογής καναλιού μετατρέπεται σε φίλτρο προεπιλογής ζώνης. Είναι προφανές ότι και πιο εύκολα κατασκευάζεται και δεν απαιτεί ευαίσθητες ρυθμίσεις, όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Στη συνέχεια το σήμα υφίσταται μετάθεση συχνότητας. Η μετάθεση συχνότητας επιτυγχάνεται με πολλαπλασιασμό του φέροντος σήματος με το σήμα ενός τοπικού ταλαντωτή που έχει συχνότητα (f_T) και στη συνέχεια με τη διεύλευση του σήματος που προκύπτει από φίλτρο ζώνης σταθερής συχνότητας (f_I). Το φίλτρο αυτό έχει εύρος ζώνης όσο το φασματικό εύρος του διαμορφωμένου σήματος και προσδιορίζει την επιλεκτικότητα του δέκτη.

Η διαδικασία της μετάθεσης αφήνει αναλλοίωτη τη φυσιογνωμία του σήματος, ανεξάρτητα από το αν έχουμε διαμόρφωση πλάτους ή διαμόρφωση συχνότητας.

Πράγματι, στην περίπτωση της διαμόρφωσης πλάτους έχουμε το φέρον που δίνεται από την σχέση:

$$E(t) = [E_o + s(t)]\cos(\omega_o t)$$

Το σήμα του τοπικού ταλαντωτή συχνότητας f_T είναι:

$$M(t) = M_o\cos(\omega_T t)$$

(στη συνέχεια, για απλούστευση, θα θεωρήσουμε $M_o = 1$ V).

Στην έξοδο του φίλτρου προκύπτει σήμα διαμορφωμένο κατά πλάτος (δεν αλλοιώθηκε η φυσιογνωμία του), αλλά σε νέα συχνότητα φέροντος (f_I).

$$E(t) = [E_o + s(t)]\cos(\omega_I t) \quad (1)$$

Το ίδιο επαληθεύεται και για την περίπτηση της FM.

Καθώς το φίλτρο (IF) είναι σταθερό, η διαδικασία του συντονισμού του δέκτη σε συγκεκριμένη συχνότητα φέροντος (f_o) είναι απλά η ρύθμιση της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή σε τιμή (f_T) τέτοια, ώστε:

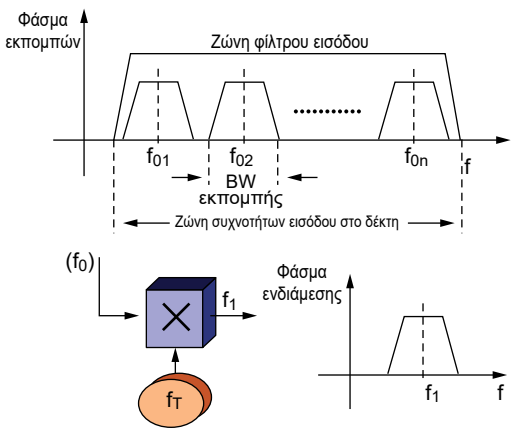
$$f_I = f_T - f_o \text{ ή } f_o = f_T - f_I \quad (2)$$

Η συχνότητα (f_I) ονομάζεται ενδιάμεση συχνότητα του δέκτη και συμβολίζεται I.F. (Intermediary Frequency). Όλο το στάδιο της μετάθεσης της συχνότητας ονομάζεται **στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας**.

Από την έξοδο του φίλτρου ενδιάμεσης συχνότητας η συχνότητα (f_I), που είναι αρκετά μικρότερη από την αρχική (f_o), παίζει το ρόλο του φέροντος σήματος έως το στάδιο της αποδιαμόρφωσης.

Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική από την άποψη ότι απλοποιεί τη σχεδίαση του σταδίου αποδιαμόρφωσης, του οποίου η λειτουργία έχει αποδεσμευτεί από την τιμή της συχνότητας (f_o) του φέροντος που λαμβάνει ο δέκτης. Με άλλα λόγια, ο αποδιαμορφωτής βλέπει πάντοτε στην είσοδό του φέρον σε συχνότητα (f_I).

Συμπερασματικά, η διαδικασία της μετάθεσης της συχνότητας στο δέκτη, γνωστή με τον όρο «ετεροδύνωση», ουσιαστικά αντικατέστησε όλα τα μεταβλητά στοιχεία και τις λεπτές ρυθμίσεις συντονισμού του απλού δέκτη με τη ρύθμιση της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή. Τα πλεονεκτήματα είναι προφανή.



Σχήμα 7.2.2: *Αποτέλεσμα της μετάθεσης της συχνότητας*

7.2.2 Επιλογή της ενδιάμεσης συχνότητας του υπερετερόδυνου δέκτη

Ας υποθέσουμε ένα δέκτη με στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας (f_I). Όταν ο τοπικός ταλαντωτής είναι ρυθμισμένος σε συχνότητα (f_T), ο δέκτης είναι συντονισμένος να λάβει επιθυμητό φέρον σήμα E(t) συχνότητας (f_o), για την οποία ισχύει:

$$\mathbf{f_I = f_T - f_o} \text{ ή } \mathbf{f_o = f_T - f_I} \qquad (3)$$

Με αυτή τη ρύθμιση του τοπικού ταλαντωτή μια δεύτερη συχνότητα (f_o') αποδεικνύεται ενοχλητική. Πρόκειται για τη συχνότητα ενός άλλου φέροντος που, αν εμφανιστεί στην είσοδο του δέκτη ταυτόχρονα με το επιθυμητό φέρον και συνδυαστεί με τη συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή, δίνει

$$\mathbf{f_I = f_o' - f_T} \text{ ή } \mathbf{f_o' = f_I + f_T,} \qquad (4)$$

οπότε εκλαμβάνεται από το δέκτη επίσης ως δεύτερο ωφέλιμο σήμα.

Η συχνότητα (f_o') ονομάζεται συχνότητα «είδωλο» ή συχνότητα «εικόνα» και απέχει από την ωφέλιμη συχνότητα λήψης $2f_I$. Πράγματι, από τις προηγούμενες σχέσεις:

$$\mathbf{2f_I = f_o' - f_o} \text{ ή } \mathbf{f_o' = f_o + 2f_I} \qquad (5)$$

Η ταυτόχρονη λήψη δύο φερόντων με διαφορετικές συχνότητες αποτελεί βασικό πρόβλημα για τον υπερετερόδυνο δέκτη. Έτσι, η επιλογή της ενδιάμεσης συχνότητας λειτουργίας στη σχεδίαση του δέκτη υπόκειται σε κανόνες που εμφανίζονται αντιφατικοί.

Αν επιλεγεί σχετικά μεγάλη ενδιάμεση συχνότητα, η ωφέλιμη φέρουσα συχνότητα f_o και η συχνότητα είδωλο f_o' απέχουν πολύ και εύκολα η τελευταία περιορίζεται εύκολα και σημαντικά με το φίλτρο εισόδου. Βέβαια στην περίπτωση αυτή το φίλτρο και τα στάδια ενίσχυσης της ενδιάμεσης συχνότητας είναι πιο ευαίσθητα στην κατασκευή και τη ρύθμισή τους, ιδιαίτερα, όταν το φασματικό εύρος κάθε διαύλου είναι μικρό (άρα, απαιτείται υψηλή επιλεκτικότητα) και ο συντελεστής ποιότητας είναι μεγάλος. Έτσι, ο στόχος της μετάθεσης συχνότητας, ώστε στην συνέχεια να γίνει πιο εύκολα η περαιτέρω επεξεργασία του σήματος, δεν επιτυγχάνεται πλήρως. Η τελική επιλογή της τιμής της ενδιάμεσης συχνότητας στο δέκτη γίνεται σε συνδυασμό με το ολικό φασματικό εύρος της ζώνης, στην οποία προορίζεται να λειτουργήσει ο δέκτης.

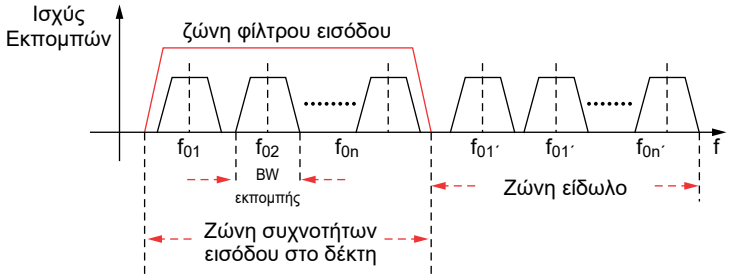
Στο σχήμα 7.2.3 αποδίδεται το συνολικό εύρος ζώνης ενός δέκτη που περιλαμβάνει N διαφορετικά κανάλια εκπομπής και εκτείνεται από f_{omin} έως f_{omax}. Έτσι, η φασματική ζώνη είδωλο εκτείνεται από:

$$\mathbf{[f'_{omin}, f'_{omax}] = [\, f_{omin} + 2f_I, f_{omax} + 2f_I \,]} \qquad (6)$$

Το φίλτρο εισόδου, δεν απαιτεί συντονισμό και αγκαλιάζει όλο το φασματικό εύρος που πρέπει να λαμβάνει ο δέκτης, δηλαδή (f_{omin}, f_{omax}). Η ζώνη - είδωλο δεν ενοχλεί το δέκτη, όταν η τιμή της ενδιάμεσης συχνότητας έχει επιλεγεί έτσι, ώστε:

$$f'_{omin} > f_{omax}$$

$$f_{omin} + 2f_I > f_{omax} \text{ ή } f_I > (f_{omax} - f_{omin}) / 2 \quad (7)$$

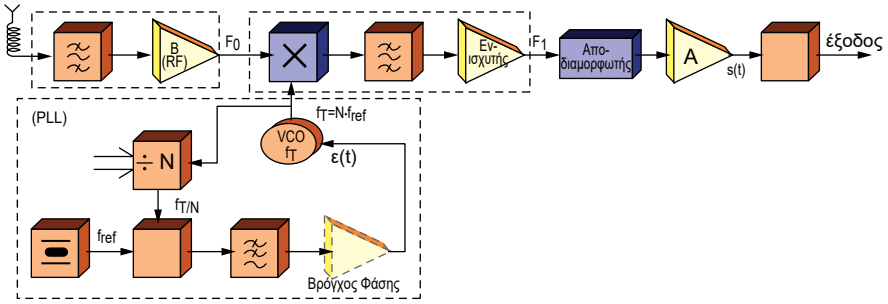


Σχήμα 7.2.3: *Ζώνη λειτουργίας του δέκτη και ζώνη - είδωλο*

Αν μείνουμε πιστοί στην προηγούμενη συνθήκη και αν το φίλτρο εισόδου είναι ιδανικό, έχουμε πλήρη απόρριψη της ζώνης - ειδώλου. Στην πράξη το φίλτρο εισόδου δεν είναι ιδανικό. Έτσι έχουμε μερική απόσβεση της ζώνης - ειδώλου και ορίζουμε το ποσοστό απόσβεσής της.

Με αυτές τις προϋποθέσεις, μεταβάλλοντας τη συχνότητα f_T του τοπικού ταλαντωτή από $f_{Tmin} = f_{omin} + f_I$ έως $f_{Tmax} = f_{omax} + f_I$, ο δέκτης λαμβάνει τα Ν διαφορετικά κανάλια που εκπέμπονται στη συγκεκριμένη ραδιοφωνική ζώνη.

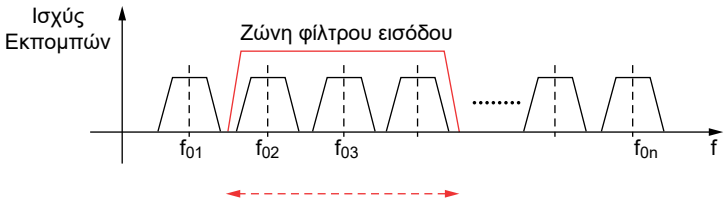
Η ρύθμιση της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή απαιτεί ακρίβεια. Γι' αυτό στους σύγχρονους δέκτες ο τοπικός ταλαντωτής έχει αντικατασταθεί από συνθέτη συχνοτήτων (PLL) όπου ο προσδιορισμός της συχνότητας γίνεται ψηφιακά. Το βήμα προγραμματισμού (συχνότητα αναφοράς) είναι το ίδιο που χρησιμοποιείται στον πομπό για τον προγραμματισμό των συχνοτήτων εκπομπής (σχήμα 7.2.4).



Σχήμα 7.2.4: *Το στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας με συνθέτη συχνοτήτων*

Αυτή η διάταξη του δέκτη είναι ικανοποιητική, διότι ουσιαστικά δεν υπάρχουν στον δέκτη, λεπτές και ευαίσθητες ρυθμίσεις. Μάλιστα, αν ο συνθέτης συχνοτήτων του τοπικού ταλαντωτή διαθέτει σύστημα συνεχούς σάρωσης όλης της ζώνης, τότε ο δέκτης αναζητά αυτόματα κάποιο σταθμό εκπομπής, χωρίς ο χειριστής να ασχοληθεί καθόλου με το συντονισμό του δέκτη.

Πρέπει να επισημανθεί ότι στην είσοδο του δέκτη υπάρχει ένα μίγμα σημάτων, που προέρχονται από την ταυτόχρονη εκπομπή πλήθους ραδιοφωνικών σημάτων στην ζώνη λήψης του δέκτη, καθώς επίσης και ανεξέλεγκτος θόρυβος από άλλα παρασιτικά σήματα, όπως βιομηχανικά παράσιτα, σήματα ισχυρών εκπομπών από άλλα ραδιοσυστήματα, κοσμικός θόρυβος κλπ. Το αθροιστικό αποτέλεσμα αυτών των σημάτων παρουσιάζει μεταβαλλόμενη ένταση (ισχύ) και μέσω του φίλτρου εισόδου εφαρμόζεται στον ενισχυτή υψηλών συχνοτήτων και στη συνέχεια στο στάδιο ετεροδύνωσης (μίκτη). Το γεγονός αυτό επιβάλλει στα δύο αυτά στάδια αυστηρές απαιτήσεις γραμμικής συμπεριφοράς και ευρείας δυναμικής για τα σήματα εισόδου (σ' αυτό συνεισφέρει και η διάταξη αυτόματου ελέγχου του κέρδους, που αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο). Πρακτικά, για να περιοριστεί το πρόβλημα αυτό, υιοθετείται η χρήση ρυθμιζόμενου φίλτρου εισόδου μικρότερης ζώνης διέλευσης (σε σχέση με ολόκληρη τη ζώνη λειτουργίας του δέκτη). Έτσι, το ισοδύναμο εύρος λειτουργίας του δέκτη για δεδομένο συντονισμό περιορίζεται σε μικρό αριθμό (3 έως 4) διαδοχικών καναλιών, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2.5.



Σχήμα *7.2.5:* *Ρύθμιση φίλτρου ετερόδυνου δέκτη*

Στην περίπτωση αυτή η ρύθμιση του φίλτρου εισόδου είναι συζευγμένη με τη ρύθμιση της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή (ή του συνθέτη) του σταδίου ετεροδύνωσης και επιτυγχάνεται με την ίδια διάταξη ελέγχου. Για παράδειγμα, στο φίλτρο εισόδου οι μεταβλητοί πυκνωτές έχουν αντικατασταθεί από διόδους μεταβλητής χωρητικότητας (Varicap) και ελέγχονται ουσιαστικά από την τάση ε(t) που ελέγχει και τον ταλαντωτή VCO του μίκτη στο βρόχο PLL.

Ο μηχανισμός λήψης συγκεκριμένης συχνότητας εκπομπής (καναλιού) παραμένει ο ίδιος. Η συχνότητα λήψης είναι αυτή για την οποία ισχύει: $f_o = f_τ - f_I$. Τα άμεσα διαδοχικά κανάλια που βρίσκονται από τη μία και από την άλλη πλευρά με συχνότητες αντίστοιχα $f_o - (BW)$ και $f_o + (BW)$ (όπου BW – Bandwith, το καταχωρισμένο εύρος ζώνης της κάθε εκπομπής) μετά τη μετάθεση συχνότητας που υφίστανται έχουν συχνότητες αντίστοιχα $f_I - (BW)$ και $f_I + (BW)$ και απορρίπτονται από το φίλτρο ενδιάμεσων συχνοτήτων.

Το φίλτρο ενδιάμεσης συχνότητας έχει σταθερή συχνότητα λειτουργίας και σταθερή ζώνη διέλευσης ίση με το φάσμα του φέροντος (BW), που πρέπει να περάσει χωρίς παραμόρφωση. Δηλαδή, το φίλτρο έχει συντελεστή ποιότητας:

$$\mathbf{Q_I = f_I / (BW)} \qquad (8)$$

Ο αντίστοιχος συντελεστής ποιότητας του φίλτρου RF σ' ένα απλό δέκτη, χωρίς στάδιο ενδιάμεσων συχνοτήτων, είναι:

$$\mathbf{Q_{RF} = f_o / (BW)} \qquad (9)$$

Καθώς ισχύει $Q_{RF} > Q_l$, προκύπτει ότι το φίλτρο ενδιάμεσης συχνότητας κατασκευάζεται σαφώς πιο εύκολα. Πάντως οι αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας και σταθερότητας των φίλτρων I.F. οδηγούν στην επιλογή και αξιοποίηση κρυσταλλικών φίλτρων υψηλού βαθμού.

Εφαρμογή 1: Η χρησιμοποιούμενη ραδιοφωνική ζώνη των μεσαίων με διαμόρφωση ΑΜ εκτείνεται περίπου από 600 έως 1500 kHz. Να προσδιοριστεί η ελάχιστη συχνότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεσο στάδιο σε συσκευές ραδιοφώνου, που προορίζονται να λειτουργήσουν σ' αυτή τη ζώνη.

Λύση: *Για να μην υπάρχει πρόβλημα με τις συχνότητες – είδωλο, πρέπει* $2f_l > 1500 – 600 = 900$ *kHz. Άρα,* $f_l > 450$ *kHz.*

Στην πράξη έχει υιοθετηθεί ενδιάμεση συχνότητα 455 kHz.

Εφαρμογή 2: Στη ραδιοφωνία FM η ζώνη συχνοτήτων είναι από 88 έως 108 MHz. Τι ενδιάμεση συχνότητα πρέπει να επιλέξουμε;

Λύση: *Πρέπει* $2f_l > 108 – 88 = 20$ *MHz. Άρα,* $f_l > 10$ *MHz.*

Στην πράξη στα ραδιόφωνα FM έχει υιοθετηθεί ενδιάμεση συχνότητα 10,7 MHz.

Εφαρμογή 3: Σε δέκτη που προορίζεται να λειτουργεί στη ζώνη από 1 MHz έως 2,5 MHz κάθε ανεξάρτητος δίαυλος έχει εύρος ζώνης 10 kHz. Να προσδιοριστεί η ενδιάμεση συχνότητα που πρέπει να έχει ο δέκτης. Επίσης, να προσδιοριστούν οι συχνότητες λειτουργίας του τοπικού ταλαντωτή και ο συντελεστής ποιότητας του φίλτρου ενδιάμεσης.

Λύση: $f_l > (2500 – 1000)/2 = 750$ *kHz.*

Ας θεωρήσουμε ότι επιλέγεται $f_l = 800$ *kHz.*

Ο τοπικός ταλαντωτής πρέπει να λειτουργεί από $1000 + 800 = 1800$ *kHz έως* $2500 + 800 = 3300$ *kHz.*

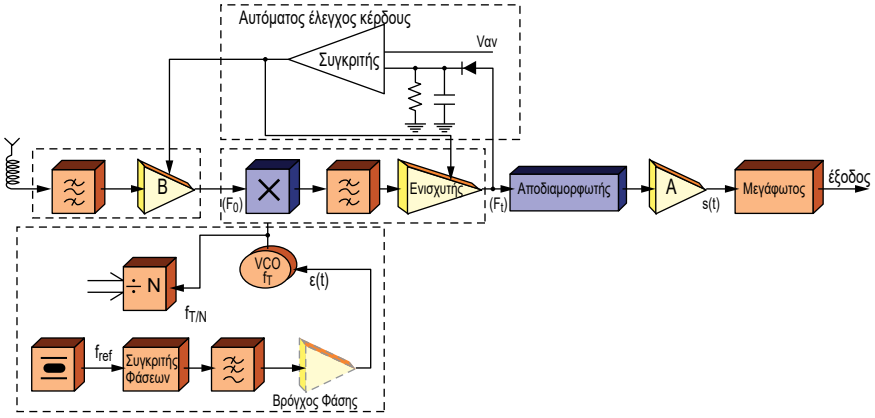
Το φίλτρο ενδιάμεσης για να εξασφαλίζει την απαιτούμενη επιλεκτικότητα πρέπει να έχει συντελεστή ποιότητας $Q = 800/10 = 80$.

7.3 Αυτόματος Έλεγχος Κέρδους του δέκτη

Στην έξοδο του φίλτρου ενδιάμεσης συχνότητας η στάθμη του διαμορφωμένου φέροντος (που είναι πλέον στη συχνότητα f_l) είναι κατά κανόνα ανεπαρκής, για να οδηγήσει τον αποδιαμορφωτή που ακολουθεί. Πριν το σήμα σταλεί στον αποδιαμορφωτή, ενισχύεται από τον ενισχυτή I.F. (ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας) που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα στάδια ενίσχυσης. Επίσης, όπως

τονίστηκε σε προηγούμενη παράγραφο πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι, ανεξάρτητα από τον τύπο εκπομπής, το είδος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, το είδος του δέκτη και των χρησιμοποιούμενων κεραιών, η ισχύς του σήματος στην είσοδο παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές. Αυτές οι μεταβολές οφείλονται στην απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη ή ακριβέστερα στην απόσταση των κεραιών εκπομπής και λήψης, σε φαινόμενα διαλείψεων, απόσβεσης του φέροντος λόγω εμποδίων κ.α. Μπορεί μάλιστα να ξεπεράσουν τα 100 dB. Είναι λοιπόν προφανές ότι, αν δε ληφθεί μέριμνα να αντισταθμίζονται αυτές οι μεγάλες διακυμάνσεις του σήματος μέσα στο δέκτη, εκτός από το δυσάρεστο συναίσθημα κατά την ακρόαση, σε κάποιες ακραίες περιπτώσεις εμφανίζεται παραμόρφωση του σήματος λόγω κορεσμού και σε κάποιες άλλες το ασθενές σήμα είναι πνιγμένο στο θόρυβο (λόγος S/N, ισχύος σήματος/θόρυβο, κατώτερος κάποιας συγκεκριμένης αποδεκτής τιμής).

Για την αποφυγή αυτών των δυσάρεστων αποτελεσμάτων υιοθετείται η χρήση ενισχυτικών σταδίων RF και IF ελεγχόμενου κέρδους. Η διάταξη που παίζει αυτόν το ρόλο ονομάζεται διάταξη αυτόματου ελέγχου του κέρδους (AGC: Automatic Gain Control) και φαίνεται στο σχήμα 7.3.1.



Σχήμα 7.3.1: *Ετερόδυνος δέκτης με διάταξη AGC*

Το σήμα στην έξοδο του ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας ανορθώνεται και μετατρέπεται σε συνεχή τάση, που αντιπροσωπεύει την ένταση του πεδίου στην είσοδο του δέκτη (δημιουργείται δηλαδή ένα είδος πεδιομέτρου). Στην συνέχεια συγκρίνεται με μια προκαθορισμένη τιμή που λαμβάνεται ως αναφορά στάθμης. Ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης, το στάδιο AGC ελέγχει με αρνητική ανάδραση την ενίσχυση όλων των σταδίων RF και IF του δέκτη.

7.4 Δέκτης με δύο στάδια ετεροδύνωσης

7.4.1 Παρασιτική απόκριση του δέκτη

Ένα από τα βασικά προβλήματα στους δέκτες που λειτουργούν με μεγάλο εύρος συχνοτήτων είναι τα φαινόμενα της παρασιτικής απόκρισης. Συμβαίνει πολλές φορές, όταν έντονα φέροντα σήματα φτάνουν στην είσοδο του δέκτη, τα στάδια εισόδου και ενδεχομένως και τα στάδια των ενδιάμεσων συχνοτήτων να λειτουργούν σε κορεσμό, δηλαδή να λειτουργούν σε μη γραμμική περιοχή (ιδιαίτερα όταν ο δέκτης δε διαθέτει διάταξη AGC). Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργούνται λόγω παραμορφώσεων διάφοροι συνδυασμοί συχνοτήτων μεταξύ των φερουσών, που προκύπτουν από τη συμβολή φερόντων σημάτων, ή συνδυασμοί των φερουσών και της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή (f_T).

Αν θεωρήσουμε δύο φέροντα σε συχνότητες f_1 και f_2, οι συνδυασμοί αυτοί στην είσοδο του δέκτη αποδεικνύεται ότι είναι της μορφής:

$$\mathbf{N_1 f_1 + N_2 f_2,}$$

όπου N_1 και N_2 ακέραιοι θετικοί ή αρνητικοί αριθμοί.

Αν αυτοί οι συνδυασμοί συχνοτήτων δώσουν αποτέλεσμα που βρίσκεται μέσα στη ζώνη λειτουργίας του δέκτη, είναι προφανές ότι ο δέκτης το αντιλαμβάνεται ως ένα υπαρκτό και αληθινό φέρον. Αν ο δέκτης συντονιστεί σ' αυτή την εικονική συχνότητα, προφανώς στην έξοδο της αποδιαμόρφωσης εμφανίζονται παρασιτικά σήματα που, αν η συχνότητά τους είναι τέτοια που να καταφέρουν να διέλθουν όλα τα στάδια χαμηλών συχνοτήτων και να ενισχυθούν από τον ενισχυτή εξόδου, δημιουργούν δυσάρεστα για την ακρόαση αποτελέσματα.

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό με τον όρο παρεμβολή (interferences) φερόντων σημάτων.

Αποδεικνύεται ότι οι ενοχλητικότεροι συνδυασμοί συχνοτήτων για τις παρεμβολές είναι τα παράγωγα τάξης 3, δηλαδή οι συνδυασμοί συχνοτήτων που αντιστοιχούν στη σχέση:

$| N_1 | + | N_2 | = 3$ και N_1, N_2 έχουν αντίθετο πρόσημο.

Δηλαδή συνδυασμοί, όπως:

$$\mathbf{2f_1 - f_2 \text{ και } 2f_2 - f_1.}$$

Η παραπάνω παρατήρηση τεκμηριώνεται με απλά παραδείγματα. Ας θεωρήσουμε ότι ένας δέκτης με ζώνη λειτουργίας από 88 MHz έως 108 MHz δέχεται στην είσοδό του δύο έντονα φέροντα σήματα με συχνότητες f_1 = 95 MHz και 96 MHz. Αν (λόγω έλλειψης γραμμικότητας στη συμπεριφορά του δέκτη) εμφανιστούν παράγωγα συχνοτήτων τάξης 3, με βάση τις προηγούμενες σχέσεις έχουμε:

$$\mathbf{2f_1 - f_2 = 2 \cdot 95 - 96 = 94 \text{ MHz}}$$
$$\mathbf{2f_2 - f_1 = 2 \cdot 96 - 95 = 97 \text{ MHz}}$$

Οι δύο αυτές εικονικές συχνότητες βρίσκονται μέσα στη ζώνη λειτουργίας του δέκτη. Ο δέκτης, αν συντονιστεί κατάλληλα, θα τις εκλάβει ως πραγματικό φέρον και θα επεξεργαστεί το παρασιτικό κύμα κανονικά έως και την αποδιαμόρφωσή του. Από την άλλη πλευρά, αν υπάρχει πραγματική εκπομπή σήματος στη συχνότητα των 97 ή 94 MHz, είναι προφανές ότι παρενοχλείται.

Εξίσου ενοχλητικό με το προηγούμενο πρόβλημα είναι και η ενδοδιαμόρφωση (intermodulation) λόγω μη γραμμικής συμπεριφοράς του σταδίου ετεροδύνωσης. Αφορά τη συμβολή ισχυρού φέροντος σήματος (f) με το σήμα του τοπικού ταλαντωτή (f_T). Αποδεικνύεται ότι σ' αυτή την περίπτωση δημιουργούνται παράγωγα σήματα σε συνδυασμούς συχνοτήτων της μορφής:

$Mf + Nf_T$, όπου M, N ακέραιοι θετικοί ή αρνητικοί.

Αν οι προκύπτουσες τιμές ικανοποιούν τη συνθήκη

$$\mathbf{Mf + Nf_T = \pm f_I} \qquad (10)$$

(οι τιμές M = 1 και N = 1 αντιστοιχούν στην περίπτωση κανονικής λήψης συχνότητας $f = f_T - f_I$ και της συχνότητας ειδώλου $f' = f_T + f_I$) και διέλθουν από το φίλτρο ενδιάμεσης συχνότητας και την αποδιαμόρφωση, δημιουργούν ενοχλητικά παρασιτικά σήματα στην έξοδο.

Μετασχηματίζοντας την προηγούμενη σχέση, προκύπτουν οι ανεπιθύμητες συχνότητες που εκλαμβάνει ο δέκτης ως φέροντα σήματα:

$$\mathbf{f_1 = (Nf_T - f_I) / M \text{ και } f_2 = (Nf_T + f_I) / M} \qquad (11)$$

Είναι εύκολο να διαπιστώσουμε διερευνώντας ότι ενοχλητικότερες είναι οι παρασιτικές συχνότητες που αντιστοιχούν σε N = M, δηλαδή οι συχνότητες της μορφής:

$$\mathbf{f = f_T \pm f_I / M} \qquad (12)$$

Για παράδειγμα:

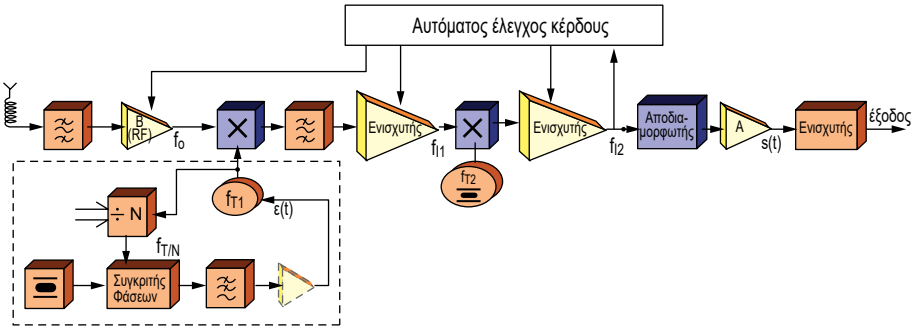
Αν M = 2, τότε $f = f_T - f_I/2 = (f_o + f_I) - f_I/2 = f_o + f_I/2$,

όπου f_o η συχνότητα φέροντος, στην οποία έχει συντονιστεί ο δέκτης. Η ανεπιθύμητη παρασιτική συχνότητα f είναι πολύ κοντά στην ωφέλιμη (f_o) και δεν μπορεί να εξαλειφθεί εύκολα με φίλτρο.

7.4.2 Δέκτης με δύο στάδια ετεροδύνωσης (μετάθεσης συχνότητας)

Η χρησιμοποίηση δύο σταδίων μετάθεσης συχνότητας στο δέκτη δίνει λύση στα διάφορα προβλήματα που δημιουργεί το μοναδικό στάδιο ετεροδύνωσης. Είδαμε ότι όσο μικρότερη είναι η ενδιάμεση συχνότητα που χρησιμοποιείται στον δέκτη τόσο πιο εύκολη είναι η κατασκευή των σταδίων ενδιάμεσης συχνότητας (φίλτρου και ενισχυτών) που έμμεσα, μέσω του συντελεστή ποιότητας $Q = f_I/(BW)$, ορίζουν την επιλεκτικότητα του δέκτη. Από την άλλη πλευρά όσο μεγαλύτερη τιμή ενδιάμεσης συχνότητας επιλέγεται τόσο πιο εύκολα απορρίπτεται η ενοχλητική συχνότητα είδωλο.

Η αντίφαση αυτή καταργείται, αν υιοθετηθεί η χρήση δύο σταδίων ενδιάμεσης συχνότητας, f_{I1}, f_{I2} με $f_{I1} > f_{I2}$, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.4.1. Το πρώτο στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας f_{I1} διευκολύνει την απόρριψη της συχνότητας είδωλο, ενώ το δεύτερο κάνει την επιλογή του καναλιού ακρόασης.



Σχήμα 7.4.1: *Δέκτης με δύο στάδια ετεροδύνωσης*

Στο πρώτο στάδιο ετεροδύνωσης αξιοποιείται συνθέτης συχνοτήτων PLL που συντονίζει το δέκτη στην επιθυμητή συχνότητα $f_{T1} = f_o + f_{I1}$. Στη συνέχεια η συχνότητα f_{I1} μετατίθεται στην δεύτερη ενδιάμεση με τη βοήθεια του δεύτερου σταθερού τοπικού ταλαντωτή, που μπορεί να έχει συχνότητα $f_{T2} = f_{I1} + f_{I2}$ ή $f_{T2} = f_{I1} - f_{I2}$. Σ' αυτή την περίπτωση ο αποδιαμορφωτής εκλαμβάνει ως διαμορφωμένο φέρον το σήμα που προκύπτει από το δεύτερο στάδιο ετεροδύνωσης.

Εφαρμογή: Ας υποθέσουμε, για παράδειγμα, ότι ένας δέκτης που προορίζεται να λάβει ανεξάρτητα κανάλια εκπομπής σε συχνότητες πάνω από 200 MHz με εύρος ζώνης BW= 5 kHz διαθέτει δύο στάδια ενδιάμεσων συχνοτήτων, με συχνότητες αντίστοιχα f_{I1} = 21,4 MHz και f_{I2} = 455 kHz. Με βάση προηγούμενη συνθήκη, για να έχουμε απόρριψη των συχνοτήτων εικόνας, είναι προφανές, καθώς $2f_{I1}$ = 42,8 MHz, ότι η ζώνη λειτουργίας του δέκτη μπορεί να είναι έως και 40 MHz, με την προϋπόθεση ότι ο τοπικός ταλαντωτής ρυθμίζεται από 221,4 MHz έως 261,4 MHz.

Ο δεύτερος τοπικός ταλαντωτής μπορεί να έχει συχνότητα f_{I2} = 21,4 + 0.455 = 21,855 MHz ή f_{I2} = 21,4 – 0,455 = 20,945 MHz. Ο απαιτούμενος συντελεστής ποιότητας του φίλτρου της δεύτερης ενδιάμεσης είναι Q_{I2} = 455/5 = 91.

Αν ο δέκτης διαθέτει μόνο ένα στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας στους 21,4 MHz, τότε μπορεί να διατηρήσει την προηγούμενη ζώνη εισόδου των 40 MHz. Όμως η επιλεκτικότητα των 5 kHz εξασφαλίζεται μόνο, αν το φίλτρο ενδιάμεσης συχνότητας κατασκευαστεί με συντελεστή ποιότητας Q_I = 21400/5 = 4280 (!!), πράγμα πολύ δύσκολο.

Αν ο δέκτης διέθετε μόνο ένα στάδιο ενδιάμεσων συχνοτήτων στη συχνότητα 455 kHz είναι προφανές ότι για να μην υπάρχει ενόχληση από τις συχνότητες – ειδώλου, τα φίλτρα εισόδου πρέπει να περιορίσουν τη ζώνη λειτουργίας του δέκτη σε τιμή μικρότερη του $2f_I$, δηλαδή μικρότερη των 900 kHz. Σ' αυτή την περίπτωση απαιτούνται άκρως επιλεκτικά φίλτρα εισόδου με συντελεστή ποιότητας Q_{RF} = 200/0,9 = 220.

7.5 Αποδιαμορφώσεις πλάτους

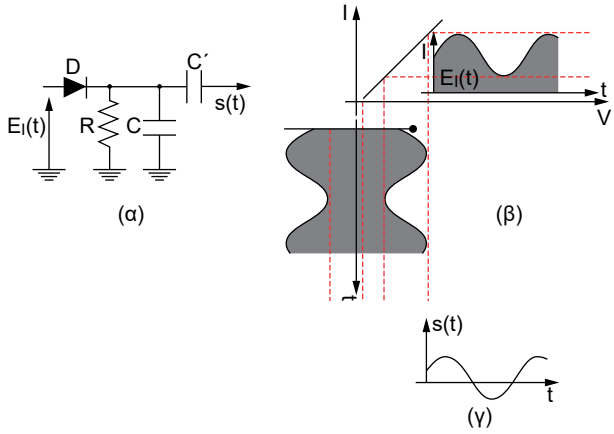
7.5.1 Εισαγωγή

Η αποδιαμόρφωση είναι η αντίστροφη πράξη της διαμόρφωσης. Στην έξοδο του αποδιαμορφωτή πρέπει να ανακτήσουμε το βασικό σήμα s(t), που αντιπροσωπεύει τη βασική πληροφορία. Απ' αυτή την άποψη δίκαια μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το στάδιο της αποδιαμόρφωσης αποτελεί την καρδιά του δέκτη.

Στην είσοδο του αποδιαμορφωτή φτάνει το διαμορφωμένο φέρον E(t), αν ο δέκτης δε διαθέτει στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας, ή το διαμορφωμένο σήμα ενδιάμεσης συχνότητας, αν πρόκειται για ετερόδυνο δέκτη. Για κάθε μεθοδολογία διαμόρφωσης υπάρχει η αντίστοιχη διαδικασία αποδιαμόρφωσης του σήματος. Συνηθίζεται την αποδιαμόρφωση πλάτους να την ονομάζουμε «φώραση» και αντίστοιχα τον αποδιαμορφωτή «φωρατή», ενώ την αποδιαμόρφωση συχνότητας «διευκρίνηση συχνότητας» και τον αποδιαμορφωτή «διευκρινιστή συχνοτήτων».

7.5.2 Αποδιαμόρφωση ή φώραση αναπτύγματος

Στην κλασική διαμόρφωση πλάτους το βασικό σήμα s(t) είναι το πλάτος (το ανάπτυγμα) του φέροντος σήματος. Στο ρόλο του αποδιαμορφωτή συναντούμε μια απλή δίοδο συνδυασμένη με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο R-C (πυκνωτή και αντίσταση).



Σχήμα 7.5.1: Φωρατής αναπτύγματος και η λειτουργία του

Η διάταξη και η λειτουργία της φαίνονται στο σχήμα 7.5.1. Η δίοδος άγει μόνο κατά τις θετικές ημιπεριόδους του σήματος (ανόρθωση), ενώ το χαμηλοπερατό φίλτρο έχει συχνότητα αποκοπής:

$$f_\alpha = 1/2\pi RC$$

Αν η συχνότητα αποκοπής ($f_α$) έχει τιμή που επαληθεύει την ανισότητα:

$$\mathbf{F<<f_α<<f_I} \qquad (13)$$

(η ίδια σχέση αν δεν υπάρχει ετεροδύνωση γίνεται $F \ll f_α \ll f_o$)
στην έξοδο διέρχεται μόνο το σήμα χαμηλής συχνότητας (δηλαδή το βασικό σήμα s(t)), ενώ η ενδιάμεση συχνότητα f_I (ή η φέρουσα f_o) απορρίπτεται. Πολλές φορές η προηγούμενη σχέση εκφράζεται μέσω της σταθεράς χρόνου RC του φίλτρου. Πράγματι:

$$\mathbf{F<<1/2πRC<<f_I \text{ ή } 1/2πF<<RC<<1/2πf_I.} \qquad (14)$$

Τελικά, αντιστρέφοντας:

$$\mathbf{1/ω_I<<RC<<1/Ω}$$

Στην περίπτωση που το βασικό σήμα δεν είναι μονοχρωματικό σήμα (δηλαδή σήμα μιας συχνότητας) αλλά έχει συχνότητες F_{min}, F_{max} σε όλες τις προηγούμενες σχέσεις αντί του F χρησιμοποιείται η μέγιστη συχνότητα F_{max}.

Πράγματι:

$$\mathbf{F_{min}<<F_{max}<<f_α<<f_I} \qquad (15)$$

Με αναλυτικότερη μελέτη του φωρατή αναπτύγματος D-R-C (δίοδος - αντίσταση - πυκνωτής) αποδεικνύεται ότι, αν m είναι το ποσοστό διαμόρφωσης πλάτους που χρησιμοποιήθηκε στον πομπό, ο φωρατής δεν εισάγει παραμόρφωση, όταν ισχύει:

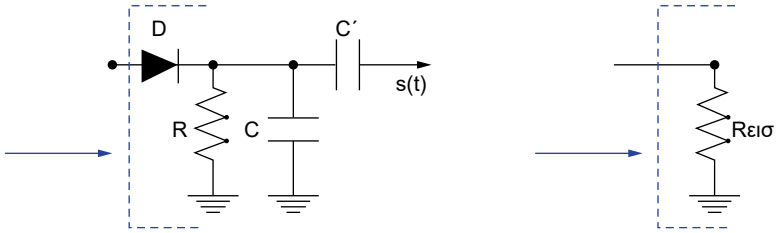
$$\mathbf{m \le 1/ [1 + (2πRC)^2]^{1/2}.} \qquad (16)$$

Από πρακτική άποψη η προηγούμενη σχέση υποδηλώνει ότι δεν μπορούμε να έχουμε m = 1, δηλαδή ποσοστό διαμόρφωσης 100%.

Ουσιαστικά οι σχέσεις (15) και (16) προσδιορίζουν τις τιμές που πρέπει να επιλέξει ο σχεδιαστής του κυκλώματος για την αντίσταση και τον πυκνωτή, ώστε να έχει σωστή φώραση του σήματος.

Μια τρίτη βασική παρατήρηση για τη λειτουργία του κυκλώματος αφορά την ισοδύναμη αντίσταση εισόδου του φωρατή. Αποδεικνύεται ότι (σχήμα 7.5.2):

$$\mathbf{R_{εισ} \approx R/2} \qquad (17)$$



Σχήμα 7.5.2: *Ισοδύναμη αντίσταση εισόδου του φωρατή αναπτύγματος*

Αυτή η σχέση είναι εξίσου σημαντική όσο και οι προηγούμενες. Προσδιορίζει έμμεσα την επιλογή της τιμής της αντίστασης R, η οποία πρέπει να είναι του ιδίου μεγέθους με την αντίσταση εξόδου του ενισχυτή που προηγείται, για να υπάρχει σωστή προσαρμογή και μέγιστη μεταφορά ισχύος από τον ενισχυτή στο στάδιο αποδιαμόρφωσης.

Ο αποδιαμορφωτής D-R-C χαρακτηρίζεται τέλος από την απόδοση του η, που ορίζεται ως εξής:

$$\eta = s_o / E_{oI},$$

όπου s_o το πλάτος της τάσης στην έξοδο του αποδιαμορφωτή και E_{oI} το πλάτος του σήματος στην είσοδό του.

Θεωρητικά, αν η τάση κατωφλιού της διόδου και η ισοδύναμη αντίσταση της (r_d) είναι μηδέν, η απόδοση είναι η = 1.

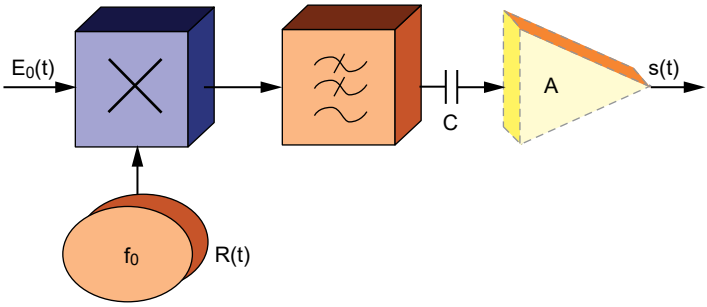
Εφαρμογή: Σε ραδιοφωνικό δέκτη ΑΜ με στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας f_I = 455 kHz να υπολογιστούν τα στοιχεία του φωρατή αναπτύγματος. Το εύρος ζώνης κάθε ραδιοφωνικού διαύλου είναι 10 kHz. Ο ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας που προηγείται του φωρατή παρουσιάζει αντίσταση εξόδου 1 kΩ.

Λύση: *Το εύρος ζώνης διαύλου στην ΑΜ είναι $2F_{max}$, όπου F_{max} η μέγιστη συχνότητα του σήματος διαμόρφωσης. Άρα, F_{max} = 5 kHz. Πρέπει ο φωρατής να ικανοποιεί τη συνθήκη:*

$(1/2\pi 455.10^3) < RC < (1/2\pi 5.10^3)$. Επίσης η σωστή προσαρμογή του φωρατή στον ενισχυτή που προηγείται επιτυγχάνεται, όταν $R/2 = R_{εξ}$, δηλαδή R = 2 kΩ. Λύνοντας την ανισότητα προσδιορίζουμε την τιμή του πυκνωτή.

7.5.3 Σύγχρονη ή σύμφωνη φώραση

Ο σύχρονος ή σύμφωνος αποδιαμορφωτής ή φωρατής φαίνεται στο σχήμα 7.5.3.



Σχήμα 7.5.3: *Αρχή του σύμφωνου ή σύγχρονου φωρατή*

Το διαμορφωμένο σήμα πολλαπλασιάζεται με το σήμα ενός τοπικού ταλαντωτή της ίδιας συχνότητας και φάσης με το φέρον σήμα (σύγχρονο ή σύμφωνο σήμα). Αν πρόκειται για απλό δέκτη, χωρίς στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας, ο τοπικός ταλαντωτής συγχρονίζεται με το αρχικό φέρον συχνότητας f_o. Αν ο δέκτης

διαθέτει στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας ο τοπικός ταλαντωτής του φωρατή συγχρονίζεται με την ενδιάμεση συχνότητα.

Πράγματι, θεωρώντας το σήμα E(t) διαμορφωμένο κατά πλάτος, έχουμε διαδοχικά:

$$E(t) = [E_o + s(t)] \cdot \cos(\omega_o t)$$

$$R(t) = 1 \cdot \cos(\omega_o t).$$

Στην έξοδο του πολλαπλασιαστή έχουμε:

$$V_1(t) = [E_o + s(t)] \cos^2(\omega_o t) = E_o \cos^2(\omega_o t) + s(t) \cos^2(\omega_o t) =$$

$$E_o/2 + s(t)/2 + (E_o/2)\cos(2\omega_o t) + [s(t)/2] \cos(2\omega_o t).$$

Στην έξοδο του φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων φτάνει μόνο το ωφέλιμο σήμα $s(t)/_2$, ενώ ο πυκνωτής C αποκόπτει τη συνεχή συνιστώσα της τάσης $E_o/2$.

Δηλαδή: $$V_{\varepsilon\xi} = s(t)/_2 \qquad (18)$$

Εύκολα διαπιστώνεται ότι η έλλειψη τέλειου συγχρονισμού συχνότητας και φάσης του τοπικού ταλαντωτή με το φέρον σήμα δημιουργεί προβλήματα στη φώραση του σήματος που πρέπει να διερευνηθούν.

Ας θεωρήσουμε ότι ο τοπικός ταλαντωτής R(t) διαφέρει και στη συχνότητα και στη φάση από το φέρον, δηλαδή:

$$R(t) = 1 \cdot \cos[\omega_r t + \Delta\varphi].$$

Τότε:

$$V_1(t) = [E_o + s(t)]\cos(\omega_o t) \cdot \cos[\omega_r t + \Delta\varphi).$$

Αναπτύσσοντας βρίσκουμε:

$$V_1(t) = (½)[E_o + s(t)]\cos[(\omega_o + \omega_r)t + \Delta\varphi] +$$

$$+ (½)[E_o + s(t)]\cos[(\omega_r - \omega_o)t + \Delta\varphi].$$

Το χαμηλοπερατό φίλτρο εξόδου απορρίπτει τον πρώτο όρο της προηγούμενης σχέσης, διότι αντιστοιχεί σε σήμα υψηλής συχνότητας. Αν η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου είναι

$$f_\alpha > f_r - f_o,$$

στην έξοδο εμφανίζεται ο δεύτερος όρος του προηγούμενου αθροίσματος

$$V_{\varepsilon\xi} = (½)[E_o + s(t)]\cos[(\omega_r - \omega_o)t + \Delta\varphi], \qquad (19)$$

που βέβαια δεν είναι το ωφέλιμο σήμα s(t).

Διερευνώντας διαπιστώνουμε:

- Αν $\omega_r = \omega_o$, δηλαδή έχουμε μόνο συγχρονισμό συχνότητας,

τότε:

$$V_{\varepsilon\xi} = (1/2)s(t)\cos\Delta\varphi.$$

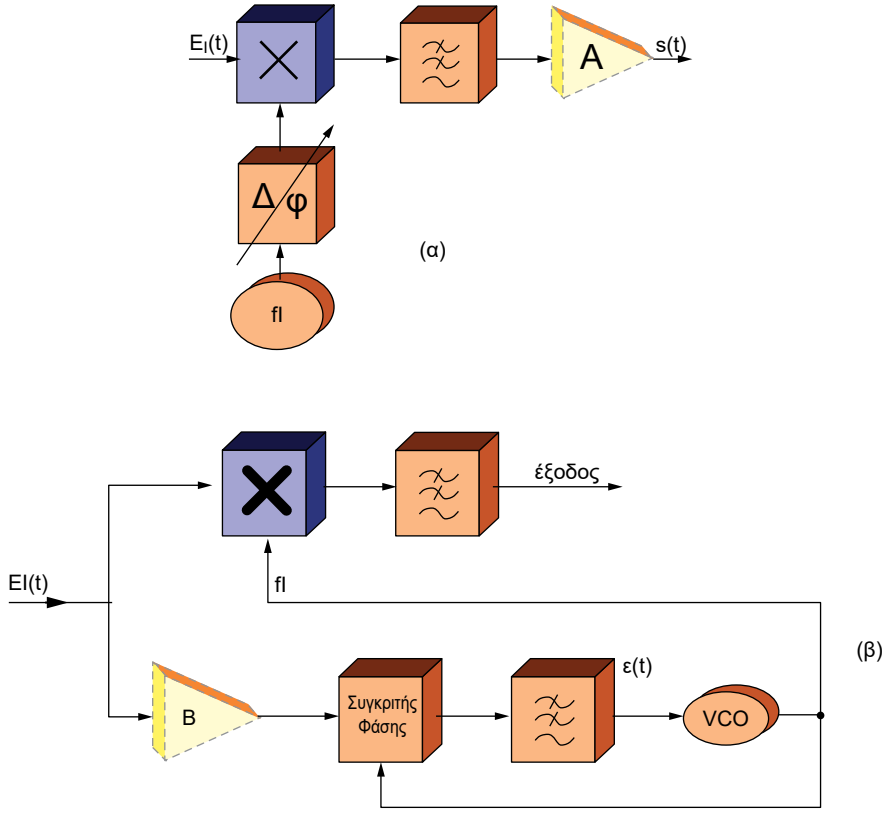
Αν η παράμετρος Δφ είναι σταθερή, τότε στην έξοδο έχουμε το ωφέλιμο σήμα s(t) με συντελεστή απόδοσης:

$$\eta = (1/2)\cos\Delta\varphi < 1.$$

- Αν $\omega_r = \omega_o$ και Δφ = 0, επαληθεύουμε το αποτέλεσμα που είχαμε στη σχέση (18).

Πράγματι, ο συγχρονισμός συχνότητας και φάσης είναι η καλύτερη συνθήκη αποδιαμόρφωσης του σήματος.

Για να επιτευχθεί συγχρονισμός, χρησιμοποιείται ολισθητής ρυθμιζόμενης φάσης (σχήμα 7.5.4.α) ή (αντί απλού ταλαντωτή) χρησιμοποιείται VCO με βρόχο φάσης (PLL), που συγχρονίζεται κατά συχνότητα με το φέρον και σταθεροποιεί τη διαφορά φάσης Δφ μεταξύ του φέροντος και του VCO (σχήμα 7.5.4β).



Σχήμα 7.5.4: *Χρήση ολισθητή για τη διόρθωση φάσης (α). Χρήση βρόχου φάσης για το συγχρονισμό του φωρατή (β).*

7.5.4 Αποδιαμόρφωση σημάτων DSBsc και SSBsc

Στην περίπτωση σημάτων διπλής και απλής πλευρικής ζώνης χωρίς φέρον (DSBsc και SSBsc), ως αποδιαμορφωτής αξιοποιείται πάλι το κύκλωμα του σύγχρονου φωρατή.

Πράγματι, στην περίπτωση DSBsc έχουμε:

$$\mathbf{E(t) = s(t)\cos(\omega_o t)}$$

$$\mathbf{R(t) = \cos(\omega_o t).}$$

Εύκολα καταλήγουμε ότι $V_{εξ} = s(t)/2$,
δηλαδή έχουμε αποδιαμόρφωση. Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται ο πυκνωτής C στη σειρά, διότι δεν υπάρχει συνεχής συνιστώσα τάσης στην έξοδο.

Στην περίπτωση της απλής πλευρικής ζώνης SSBsc, έχουμε:

$$\mathbf{E(t) = E_o\cos(\omega_o + \Omega)t \text{ για την πάνω πλευρική (USB) και}}$$

$$\mathbf{E(t) = E_o\cos(\omega_o - \Omega)t \text{ για την κάτω πλευρική (LSB).}}$$

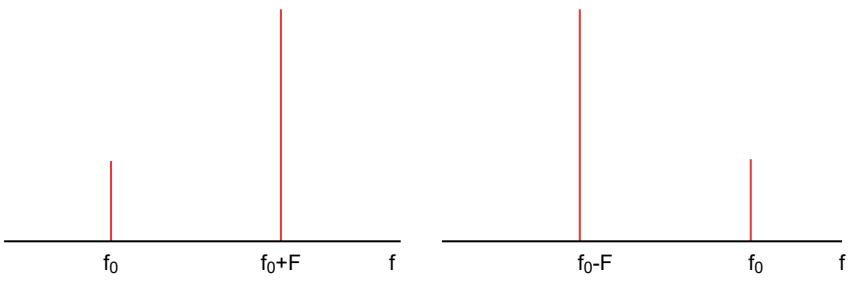
Παρατηρώντας, για παράδειγμα, μόνο την περίπτωση διαμόρφωσης USB έχουμε:

$$\mathbf{V_1(t) = [E_o\cos(\omega_o + \Omega)t]\cos(\omega_o t) =}$$

$$\mathbf{= (E_o/2)\cos(2\omega_o + \Omega)t + (E_o/2)\cos(\Omega t).}$$

Άρα: $$\mathbf{V_{εξ} = (E_o/2)\cos(\Omega t) = s(t)} \quad (20)$$

Στην περίπτωση που $\omega_r \neq \omega_o$, δεν έχουμε σωστή αποδιαμόρφωση του σήματος. Για την επίτευξη συγχρονισμού, πρέπει να χρησιμοποιηθεί διάταξη με PLL, όπως αυτή του σχήματος 7.5.4. Συνήθως κατά την εκπομπή SSB αποστέλλεται στο φάσμα του σήματος μικρή συνιστώσα του φέροντος, που δεν επιβαρύνει ουσιαστικά τη συνολική ισχύ του συστήματος εκπομπής, αλλά με μοναδικό ρόλο να αποτελέσει την αναφορά συχνότητας και να συγχρονίσει το βρόχο φάσης. Στην περίπτωση αυτή (το φάσμα αποδίδεται στο σχήμα 7.5.5) μιλούμε για διαμόρφωση SSB με μερικώς κατασταλμένο φέρον.



Σχήμα 7.5.5: *USB και LSB με μερικώς κατασταλμένο φέρον*

7.6 Αποδιαμόρφωση ή διευκρίνιση συχνότητας

7.6.1 Διευκρινιστής με φίλτρο

Αποδιαμόρφωση συχνότητας ή διευκρίνηση συχνότητας, όπως συνήθως αποκαλείται, είναι η διαδικασία εξαγωγής της πληροφορίας από φέρον σήμα διαμορφωμένο κατά συχνότητα.

Στη διαμόρφωση FM, ως γνωστόν, η πληροφορία επηρεάζει αποκλειστικά τη συχνότητα του φέροντος, με βάση τη γραμμική σχέση:

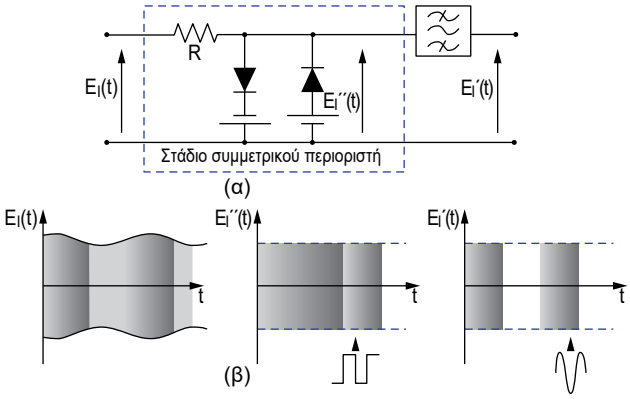
$$\mathbf{f(t) = f_o + \Delta f(t) = f_o + k \cdot s(t).}$$

Αυτό πραγματοποιείται με ταλαντωτή VCO.

Ο διευκρινιστής συχνότητας αντίστροφα μετατρέπει τις μεταβολές συχνότητας του φέροντος σε μεταβολές τάσης και πρέπει να είναι γραμμικός (σχήμα 7.6.2(α)) Η κλίση της χαρακτηριστικής του

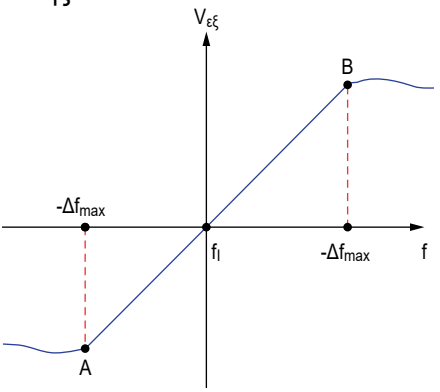
$$\mathbf{k' = \Delta V/\Delta f \text{ δίνεται σε V/Hz.}} \qquad (21)$$

Το πλάτος του σήματος στη διαμόρφωση FM δεν επηρεάζεται από την πληροφορία και παραμένει σταθερό. Αυτή η παρατήρηση δίνει τη δυνατότητα να προηγηθεί του σταδίου αποδιαμόρφωσης του σήματος ένας συμμετρικός περιοριστής (ψαλιδιστής) (σχήμα 7.6.1), που ψαλιδίζοντας τις κορυφές του φέροντος το απαλλάσει από παρασιτικές κυματώσεις και παρασιτικές αλλοιώσεις, που τυχόν προήλθαν από θόρυβο, βιομηχανικά παράσιτα κλπ. Αυτή η διαδικασία συνεισφέρει στην καλύτερη ποιότητα του δέκτη FM απαλλάσσοντας τον αποδιαμορφωτή από τις παρασιτικές διακυμάνσεις του σήματος και αυξάνει τελικά το λόγο σήματος προς θόρυβο στην έξοδο. Στην έξοδο του ψαλιδιστή το μεσοπερατό φίλτρο L-C αποκαθιστά την ημιτονική φυσιογνωμία του ψαλιδισμένου φέροντος.

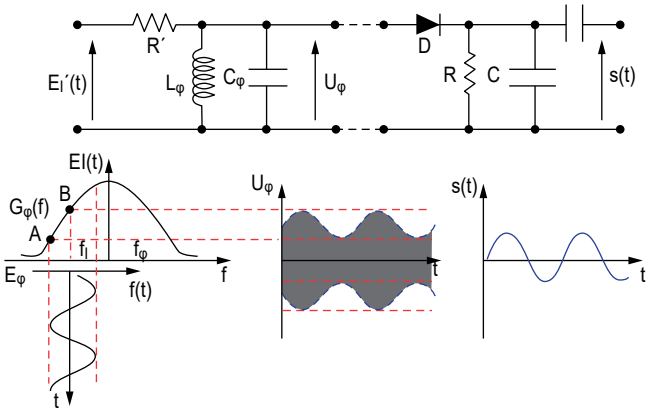


Σχήμα 7.6.1: Συμμετρικός περιοριστής και η λειτουργία του

Ως απλός διευκρινιστής συχνότητας αξιοποιείται ένα απλό επιλεκτικό φίλτρο, σαν αυτό του σχήματος 7.6.2.β. Η απόκριση του φίλτρου επιλέγεται έτσι, ώστε η κεντρική συχνότητα του φέροντος να βρίσκεται περίπου στο μέσο του ανοδικού ή καθοδικού τμήματος της χαρακτηριστικής του.



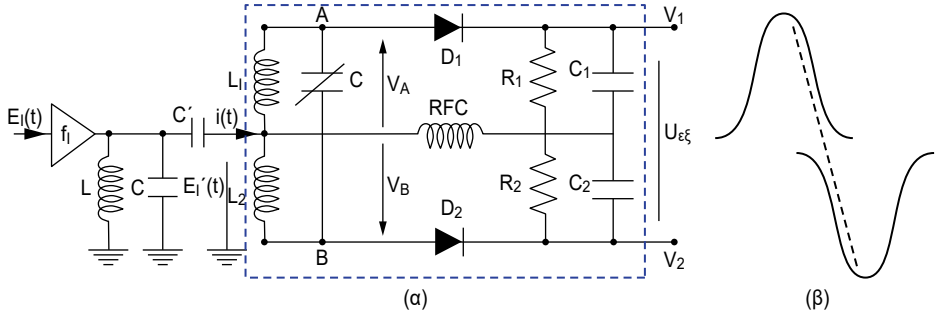
Σχήμα 7.6.2α: *Απόκριση ενός διευκρινιστή συχνότητας*



Σχήμα 7.6.2β: *Διευκρινιστής με απλό φίλτρο*

Είναι προφανές ότι με τέτοια διάταξη το φέρον σήμα, του οποίου η συχνότητα παρουσιάζει μεταβολές γύρω από την κεντρική του συχνότητα, μετά την διέλευση από το φίλτρο είναι διαμορφωμένο και κατά πλάτος, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο σχήμα. Στη συνέχεια προσφέρεται ένας απλός φωρατής αναπτύγματος (πλάτους) D – R – C, που μελετήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο για να έχουμε αποδιαμόρφωση.

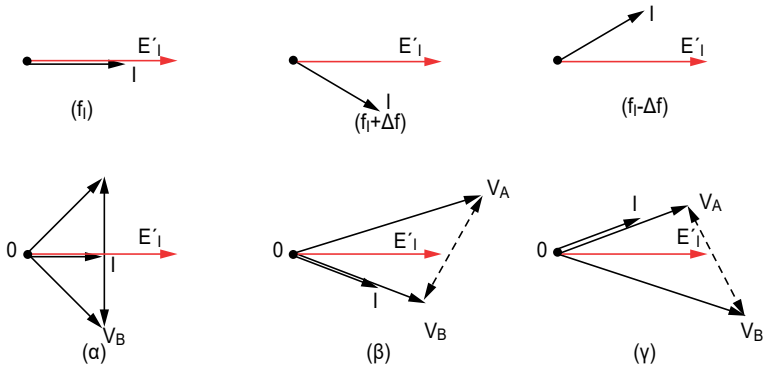
Η σχετικά απλή διάταξη του σχήματος με ένα φίλτρο παρουσιάζει ένα βασικό μειονέκτημα. Η χαρακτηριστική απόκριση του φίλτρου δεν είναι γραμμική, με αποτέλεσμα όταν οι μεταβολές συχνότητας είναι μεγάλες, να εμφανίζονται στην έξοδο παραμορφώσεις του σήματος. Έτσι, η χρήση της διάταξης περιορίζεται σε περιπτώσεις διαμόρφωσης FM με μικρή απόκλιση συχνότητας Δf_{max}, όπου το τμήμα AB της χαρακτηριστικής μπορεί να θεωρηθεί γραμμικό (σχήμα 7.6.2β). Το μειονέκτημα αυτό διορθώνεται από συνθετότερες διατάξεις, όπως αυτή του σχήματος 7.6.3(α) όπου αξιοποιούνται δύο φίλτρα και δύο φωρατές αναπτύγματος.



Σχήμα 7.6.3: *(α) Διευκρινιστής Fooster-Seeley*
(β) Χαρακτηριστική απόκρισης

Τα δύο φίλτρα που είναι δομημένα με τον ίδιο πυκνωτή C (φίλτρο L_1-C και L_2-C) λειτουργούν με διαφορά φάσης π, έτσι όπως ο συνδυασμός τους απεικονίζεται στη γραφική παράσταση του σχήματος 7.6.3 (β) και η μη γραμμικότητα του ενός αντισταθμίζεται από τη μη γραμμικότητα του άλλου. Η χαρακτηριστική του αποδιαμορφωτή εκτείνεται σε ευρύτερη, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6.3 (β), περιοχή. Το ωφέλιμο σήμα είναι η διαφορά των σημάτων V_1 και V_2 που προκύπτουν στις εξόδους των δύο φωρατών αναπτύγματος.

Στο σχήμα 7.6.4 απεικονίζεται διανυσματικά η λειτουργία του αποδιαμορφωτή, που είναι γνωστός με το όνομα διευκρινιστής Fooster – Seeley. Ο συνδυασμός των φίλτρων L_1-L_2-C αποτελεί συντονισμένο κύκλωμα στην κεντρική συχνότητα του φέροντος (f_o).



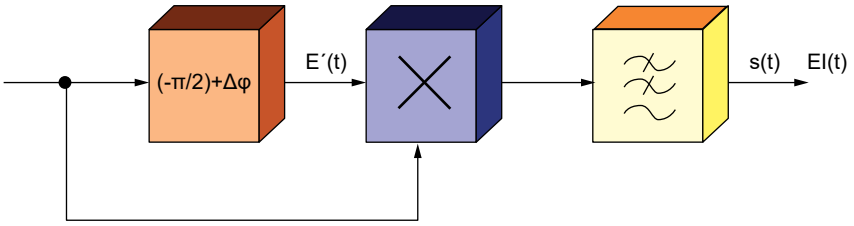
Σχήμα 7.6.4: *Διανυσματική εξήγηση της λειτουργίας του Fooster - Seeley*

Γι' αυτή τη συχνότητα τα διανύσματα τάσης και ρεύματος είναι συμφασικά και οι τάσεις εξόδου αντιπροσωπεύονται από διανύσματα κάθετα στο ρεύμα και αντίθετα μεταξύ τους. Αποτέλεσμα, οι τάσεις V_1 και V_2 είναι ίσες και τελικά το σήμα

εξόδου s(t) = $V_1 – V_2$ = 0. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση τα διανύσματα ρεύματος και τάσης παρουσιάζουν διαφορά φάσης απ' όπου προκύπτουν τα διανυσματικά διαγράμματα 7.6.4 (β) και (γ). Οι μεταβολές συχνότητας απεικονίζονται στη διαφορά των τάσεων V_1 και V_2. Η τάση στην έξοδο είναι ανάλογη προς τις μεταβολές της συχνότητας.

7.6.2 Άλλα κυκλώματα αποδιαμόρφωσης

Μια παραλλαγή του κυκλώματος σύγχρονης φώρασης, που μελετήθηκε στις αποδιαμορφώσεις πλάτους, μπορεί να αξιοποιηθεί για αποδιαμόρφωση σημάτων διαμορφωμένων κατά συχνότητα. Στην περίπτωση του σχήματος 7.6.5 το φέρον FM πολλαπλασιάζεται με τον εαυτό του, αφού υποστεί ολίσθηση φάσης (-π/2). Η ολίσθηση φάσης (-π/2) αντιστοιχεί στην κεντρική συχνότητα φέροντος.



Σχήμα 7.6.5: *Αποδιαμόρφωση FM με παραλλαγή του σύγχρονου φωρατή*

Καθώς η συχνότητα μεταβάλλεται, η στιγμιαία ολίσθηση φάσης μεταβάλλεται επίσης και είναι:

-π/2 + Δφ (σημειώνεται στο σχήμα).

Αν υποθέσουμε ότι η διαφοροποίηση της φάσης Δφ είναι ανάλογη προς τις μεταβολές συχνότητας και υπακούει στη σχέση

$$\Delta\varphi = \lambda[f(t) - f_o] \ (\lambda = \text{rad/Hz}), \qquad (22)$$

τότε

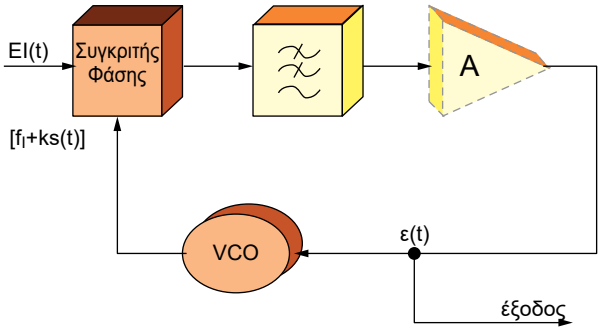
$$\Delta\varphi = \lambda . k . s(t).$$

Αν θέσουμε $E(t) = E_o\cos[\Phi(t)]$, τότε $E'(t) = -E_o\sin[\Phi(t) - \Delta\varphi]$.

Εκτελώντας τις πράξεις βρίσκουμε στην έξοδο:

$$V_{\varepsilon\xi} = \sin\Delta\varphi \approx \Delta\varphi = \lambda \cdot k \cdot s(t). \qquad (23)$$

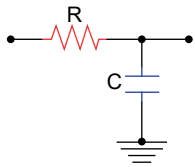
Ο βρόχος φάσης PLL, χρησιμοποιείται ευρύτατα για αποδιαμόρφωση FM. Το γενικό διάγραμμα του αποδιαμορφωτή φαίνεται στο σχήμα 7.6.6. Η συχνότητα του σήματος εισόδου συγκρίνεται με τη συχνότητα του VCO, που είναι υπολογισμένος με κεντρική συχνότητα ίδια με του φέροντος. Η τάση ελέγχου του VCO, που προσπαθεί να τον συγχρονίσει στη συχνότητα του σήματος εισόδου αντιπροσωπεύει τις μεταβολές της συχνότητας του, δηλαδή το ωφέλιμο σήμα s(t).



Σχήμα 7.6.6: *Αποδιαμόρφωση FM με PLL*

Μετά την αποδιαμόρφωση το ωφέλιμο σήμα s(t) θα υποστεί αποέμφαση, δηλαδή την αντίστροφη διαδικασία της έμφασης, στην οποία υποβλήθηκε στον πομπό. Ειδικό χαμηλοδιαβατό φίλτρο (σχήμα 7.6.7) αποκαθιστά τη φασματική φυσιογνωμία του σήματος, πριν την τελική του ενίσχυση από τους ενισχυτές χαμηλών συχνοτήτων.

Σήμερα για τα σήματα ΑΜ και FM υπάρχουν ολοκληρωμένα κυκλώματα που ενσωματώνουν τα στάδια ενίσχυσης ενδιάμεσης συχνότητας και αποδιαμόρφωσης.



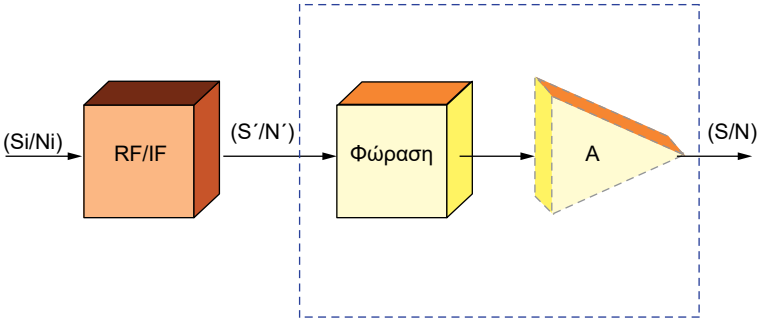
Σχήμα 7.6.7: *Φίλτρο αποέμφασης στην FM*

7.7 Θόρυβος και ευαισθησία στο δέκτη

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του δέκτη είναι η ευαισθησία του. Ορίζεται ως η ελάχιστη ένταση του σήματος στην είσοδο του δέκτη, ώστε στην έξοδο ο λόγος ισχύος του ωφέλιμου σήματος (συμβολίζεται S) προς την ισχύ του θορύβου (συμβολίζεται N), δηλαδή ο λόγος S/N να έχει δεδομένη τιμή. Το πρόβλημα που τίθεται είναι ο προσδιορισμός της μαθηματικής σχέσης που συνδέει την ένταση του φέροντος σήματος στην είσοδο του δέκτη με το λόγο S/N στην έξοδο.

Η μοντελοποίηση του θορύβου είναι από τα δυσκολότερα κεφάλαια της ηλεκτρονικής και η αναλυτική μελέτη του προβλήματος ξεφεύγει από το πλαίσιο αυτού του βιβλίου. Περιοριζόμαστε σε γενικά ποσοτικά συμπεράσματα, από όπου όμως βγαίνουν σημαντικές παρατηρήσεις.

Για να απλοποιηθεί η μελέτη της συμπεριφοράς του δέκτη ως προς τον θόρυβο, θεωρούμε ότι ο δέκτης αποτελείται ουσιαστικά από δύο τμήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.7.1. Το ένα τμήμα περιλαμβάνει όλα τα στάδια, πριν την αποδιαμόρφωση (στάδια RF και IF), ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει την αποδιαμόρφωση και το τμήμα ενίσχυσης χαμηλών συχνοτήτων.



Σχήμα 7.7.1: *Μελέτη του θορύβου στο δέκτη*

Ορίζουμε:

- (S/N) : το λόγο ισχύος του ωφέλιμου βασικού σήματος προς τον θόρυβο στην έξοδο του δέκτη.

- (S´/N´) : το λόγο ισχύος σήματος προς θόρυβο στην είσοδο του αποδιαμορφωτή. Το μέγεθος S´ αναφέρεται στο σήμα που προέκυψε από τη διαδικασία ενίσχυσης και ετεροδύνωσης, ενώ ο θόρυβος N´ είναι αθροιστικά ο θόρυβος εισόδου επιβαρυμένος από το θερμοδυναμικό θόρυβο των κυκλωμάτων του δέκτη.

- (S_i / N_i) το λόγο ισχύος του φέροντος σήματος προς το θόρυβο στην είσοδο του δέκτη.

Στην είσοδο του δέκτη ο θόρυβος θεωρείται με σταθερή πυκνότητα ισχύος σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Ονομάζεται λευκός θόρυβος και η ισχύς του δίνεται από τη σχέση:

$N_i = kTB$, (24)

όπου k η σταθερά Boltzman ($k=1,38\cdot10^{-23} J \cdot K^{-1}$), T η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε βαθμούς Kelvin (K) και B (Hz) το εύρος ζώνης του φέροντος (εύρος ζώνης του σταδίου ενδιάμεσων συχνοτήτων).

Η συμπεριφορά του δέκτη στο πρώτο τμήμα του σχήματος 7.7.1 περιγράφεται από το συντελεστή θορύβου G_R του δέκτη και είτε δίνεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη είτε μετριέται πειραματικά. Ορίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{(S_i/N_i) = G_R \cdot (S´/N´)} \quad (25)$$

Η σχέση που συνδέει τους λόγους (S´/N´) και (S/N) στην είσοδο και στην έξοδο αντίστοιχα του αποδιαμορφωτή εξαρτάται από τον τύπο της διαμόρφωσης. Υποθέτοντας ότι ισχύει S´ >> N´, δηλαδή ότι το σήμα είναι ισχυρότερο από το θόρυβο (τουλάχιστον δέκα φορές), αποδεικνύεται ότι:

- Στη διαμόρφωση πλάτους:

$$\mathbf{(S/N) = m^2 \cdot (S´/N´),} \quad (26)$$

όπου m το ποσοστό διαμόρφωσης.

Αν m=1, τότε

$$(S/N) = (S'/N').$$

- Στη διαμόρφωση συχνότητας:

$$(S/N) = 3m^2(m + 1)](S'/N'), \quad (27)$$

όπου m ο δείκτης διαμόρφωσης.

Αν m>>1, τότε:

$$(S/N) = [3m^3 \cdot (S'/N').$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (26) και (27) με τις σχέσεις (24) και (25), έχουμε:

Για την ΑΜ:

$$S_i = (1/m^2)kTBG_R(S/N) = 2kTF_{max} \cdot G_R \cdot (1/m^2)\,(S/N) \quad (28)$$

(διότι $B = 2F_{max}$)

Αν $m = 1\ (100\%)$, τότε: $S_i = 2kTF_{max} \cdot G_R \cdot (S/N)$ (29)

Για την FM:

$$S_i = kTBG_R\,[1/3m^2(m+1)](S/N) = 2kTF_{max} \cdot G_R \cdot (1/3m^2) \cdot (S/N) \quad (30)$$

(διότι $B = 2F_{max}(m + 1)$)

Οι τελευταίες σχέσεις συνδέουν την ισχύ που πρέπει να έχει το φέρον σήμα στην είσοδο του δέκτη με τον επιθυμητό λόγο σήματος προς θόρυβο στην έξοδο.

Αν θέλουμε οι προηγούμενες σχέσεις να αναφέρονται όχι στην ισχύ, αλλά στην ενεργό τιμή του σήματος εισόδου (θεωρώντας την κεραία ως γεννήτρια), πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι:

$S_i = E^2/4R_i$, όπου R_i η ισοδύναμη αντίσταση εισόδου του δέκτη, που συνήθως λαμβάνεται 50 Ω (προσαρμογή με την κεραία).

Εφαρμογή: Σε δέκτη ΑΜ δίνονται $F_R = 6$, αντίσταση εισόδου $R = 50\ \Omega$, $F_{max} = 3$ kHz και ποσοστό διαμόρφωσης 60%. Ο επιθυμητός λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο είναι S/N = 400 (ή 26 dB), και η θερμοκρασία περιβάλλοντος 23 C° (ή 273 + 23 = 296 K). Να υπολογιστεί η ενεργός τιμή του σήματος στην είσοδο του δέκτη.

Λύση: *Από τις προηγούμενες σχέσεις εύκολα απορρέει ότι:*

$$E = (1/m)\sqrt{8kTRG_{TR}} \cdot F_{max}\,(S/N)$$

Αντικαθιστώντας, βρίσκουμε $E = 5{,}5\ \mu V$.

7.8 Σύγκριση AM και FM ως προς το θόρυβο

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (29) και (30), εύκολα διαπιστώνουμε ότι για το ίδιο σήμα S_i στην είσοδο του δέκτη ισχύει:

$$(S/N)_{FM} = 3m^2 \cdot (S/N)_{AM}. \quad (31)$$

Αν m>1, τότε: $(S/N)_{FM} > (S/N)_{AM}$

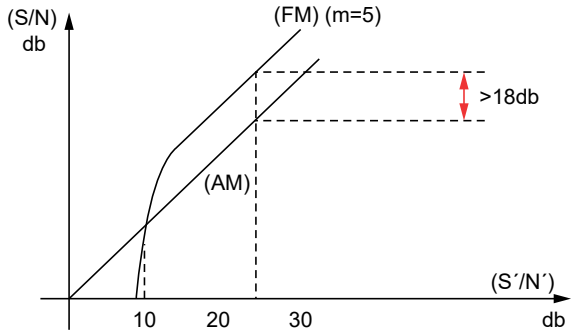
Η διαμόρφωση FM παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στο θόρυβο. Στην περίπτωση της ραδιοφωνίας FM, m ≥ 5, άρα:

$$(S/N)_{FM} = 3 \cdot 5^2 \cdot (S/N)_{AM} \text{ ή } (S/N)_{FM} = 75 \cdot (S/N)_{AM} \quad (32)$$

ή εκφραζόμενοι σε dB:

$$(S/N)_{FM} = (S/N)_{AM} + 18{,}8 \text{ dB}.$$

Το πλεονέκτημα της FM είναι σημαντικό. Τα συμπεράσματα αυτά, που ισχύουν με την προϋπόθεση ότι το σήμα στην είσοδο του αποδιαμορφωτή είναι μεγαλύτερο από το θόρυβο (S΄ >> N΄),
απεικονίζονται στη γραφική παράσταση του σχήματος 7.8.1.



Σχήμα 7.8.1: Σύγκριση AM και FM ως προς το θόρυβο

Για μικρές τιμές του λόγου S΄/ N΄ (<10), το πλεονέκτημα της FM παύει να ισχύει. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό στους τηλεπικοινωνιακούς ως «φαινόμενο κατωφλίου».

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

• Ρόλος του δέκτη είναι να επεξεργάζεται το φέρον σήμα που λαμβάνει και να αποδίδει στην έξοδο την πληροφορία.

• Βασικά χαρακτηριστικά του δέκτη είναι η σταθερότητα συντονισμού, η ευαισθησία, η επιλεκτικότητα, η πιστότητα και η γραμμικότητα του.

• Υπάρχουν απλοί δέκτες, που ονομάζονται δέκτες άμεσης ενίσχυσης και περιλαμβάνουν το στάδιο ενίσχυσης RF, το στάδιο αποδιαμόρφωσης και το στάδιο ενίσχυσης χαμηλών συχνοτήτων.

Υπερετερόδυνο δέκτη ονομάζουμε το δέκτη που περιλαμβάνει στάδιο μετάθεσης της συχνότητας του φέροντος (στάδιο ετεροδύνωσης). Η μετάθεση της συχνότητας δεν αλλοιώνει τη φυσιογνωμία του φέροντος.

• Η μετάθεση συχνότητας δίνει πολλά, πλεονεκτήματα στο δέκτη. Αυξάνει την επιλεκτικότητα του και καταργεί ουσιαστικά τη χρήση επιλεκτικών φίλτρων εισόδου.

• Η επιλογή της ενδιάμεσης συχνότητας εξαρτάται από το επιθυμητό εύρος λειτουργίας του δέκτη και την απαιτούμενη επιλεκτικότητα.

• Η χρήση διάταξης αυτόματου ελέγχου του κέρδους (AGC) προφυλάσσει το δέκτη από κορεσμό και φαινόμενα ενδοδιαμορφώσεων. Επίσης η ισχύς του ωφέλιμου σήματος στην έξοδο δεν εξαρτάται από τις διακυμάνσεις του σήματος στην είσοδο του δέκτη.

• Πολλές φορές χρησιμοποιούνται δύο στάδια ετεροδύνωσης στο δέκτη.

• Αποδιαμόρφωση του σήματος ονομάζεται η διαδικασία εξαγωγής της πληροφορίας από το φέρον. Στην περίπτωση που έχουμε ετεροδύνωση στο δέκτη, το φέρον που φτάνει στον αποδιαμορφωτή έχει συχνότητα την ενδιάμεση συχνότητα του δέκτη.

• Το είδος της διάταξης αποδιαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης.

• Για αποδιαμόρφωση AM μπορούν να χρησιμοποιηθούν ο φωρατής αναπτύγματος και ο σύγχρονος φωρατής.

• Στην περίπτωση σημάτων με διαμόρφωση DSBsc και SSBsc, χρησιμοποιείται για αποδιαμόρφωση η διάταξη του σύγχρονου φωρατή.

• Στην αποδιαμόρφωση συχνότητας, που ονομάζεται και διευκρίνιση συχνότητας, αξιοποιούνται πολλές διατάξεις. Βασικότερες είναι η διάταξη απλού φίλτρου, η διάταξη διπλού φίλτρου (Fooster Selley), ο βρόχος φάσης και παραλλαγή του κυκλώματος σύγχρονου φωρατή.

• Η ποιότητα του σήματος στην έξοδο του δέκτη χαρακτηρίζεται από το λόγο ισχύων του ωφέλιμου σήματος προς το θόρυβο που επιβαρύνει το σήμα.

• Με δείκτη διαμόρφωσης m > =5, που χρησιμοποιείται στη ραδιοφωνία FM, αποδεικνύεται ότι το σήμα έχει πολύ καλύτερη αντοχή στο θόρυβο σε σχέση με την AM.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Ποιος είναι ο ρόλος του δέκτη στις επικοινωνίες.
2. Να αναφερθούν τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός ραδιοφωνικού δέκτη.
3. Να σχεδιαστεί το γενικό διάγραμμα ενός απλού δέκτη.
4. Να αναφερθούν διάφορα μειονεκτήματα του απλού άμεσης ενίσχυσης δέκτη.
5. Να σχεδιαστεί το γενικό διάγραμμα ενός υπερετερόδυνου δέκτη.
6. Ποιος είναι ο ρόλος της διάταξης AGC στο δέκτη.
7. Να αναφερθούν τα πλεονεκτήματα του υπερετερόδυνου δέκτη.
8. Με παραδείγματα να εξηγηθεί ο τρόπος επιλογής της ενδιάμεσης συχνότητας του δέκτη.
9. Για ποιο λόγο χρησιμοποιείται πολλές φορές και δεύτερο στάδιο ετεροδύνωσης στους δέκτες. Να τεκμηριωθεί με παραδείγματα.
10. Τι είναι ο φωρατής αναπτύγματος. Να δοθεί το σχήμα.
11. Να δοθούν οι σχέσεις με τις οποίες υπολογίζονται τα στοιχεία του φωρατή D-R-C.
12. Να σχεδιαστεί και να εξηγηθεί η λειτουργία του σύγχρονου φωρατή.
13. Τι είναι και πού χρησιμοποιείται στην FM ο συμμετρικός περιοριστής.
14. Να δοθεί και να σχολιαστεί απλή διάταξη αποδιαμόρφωσης FM.
15. Να σχολιαστεί η αποδιαμόρφωση συχνότητας με βρόχο PLL.
16. Τι είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο;
17. Να δοθούν οι σχέσεις που συνδέουν την ισχύ του σήματος εισόδου με το λόγο ισχύων σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του δέκτη για τις περιπτώσεις AM και FM.
18. Ποια διαμόρφωση έχει καλύτερα αποτελέσματα στο θέμα του θορύβου.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Μια ραδιοφωνική ζώνη με διαμόρφωση ΑΜ εκτείνεται από 3 MHz έως 4,2 MHz. Να προσδιοριστεί η ελάχιστη συχνότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεσο στάδιο σε συσκευές ραδιοφώνου που προορίζονται να λειτουργήσουν σ' αυτή την ζώνη.

2. Στη ραδιοφωνία FM η ζώνη συχνοτήτων είναι από 88 έως 108 MHz. Η ενδιάμεση συχνότητα που χρησιμοποιείται είναι 10,7 MHz. Να προσδιοριστεί η ζώνη λειτουργίας του τοπικού ταλαντωτή και ο συντελεστής ποιότητας του φίλτρου ενδιάμεσων συχνοτήτων.

3. Σε δέκτη που προορίζεται να λειτουργεί στη ζώνη από 1 MHz 1800 MHz κάθε ανεξάρτητος δίαυλος έχει εύρος ζώνης 8 kHz. Να επιλεγεί κατάλληλη ενδιάμεση συχνότητα για το δέκτη. Επίσης, να προσδιοριστούν οι συχνότητες λειτουργίας του τοπικού ταλαντωτή και ο συντελεστής ποιότητας του φίλτρου ενδιάμεσης.

4. Ας υποθέσουμε ότι ένας δέκτης, που προορίζεται να λάβει ανεξάρτητα κανάλια εκπομπής σε συχνότητες πάνω από 150 MHz, με εύρος ζώνης BW = 4 kHz, διαθέτει δύο στάδια ενδιάμεσων συχνοτήτων με συχνότητες αντίστοιχα f_{I1} = 21,4 MHz και f_{I2} = 455 kHz. Να προσδιοριστούν οι συχνότητες λειτουργίας του πρώτου ταλαντωτή και το εύρος λειτουργίας του δέκτη. Επίσης, να προσδιοριστεί η συχνότητα του δεύτερου τοπικού ταλαντωτή και ο συντελεστής ποιότητας του φίλτρου δεύτερης ενδιάμεσης συχνότητας.

Αν ο δέκτης διέθετε μόνο ένα στάδιο ενδιάμεσων συχνοτήτων στη συχνότητα 6 MHz, να προσδιοριστεί και πάλι το εύρος λειτουργίας του δέκτη και ο συντελεστής ποιότητας του απαιτούμενου φίλτρου ενδιάμεσης συχνότητας.

5. Σε ραδιοφωνικό δέκτη ΑΜ με στάδιο ενδιάμεσης συχνότητας f_I = 455 kHz να υπολογιστούν τα στοιχεία του φωρατή αναπτύγματος. Η μέγιστη συχνότητα του βασικού σήματος είναι 4,5 kHz. Ο ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας που προηγείται του φωρατή παρουσιάζει αντίσταση εξόδου 1,5 kΩ.

6. Σε δέκτη FM δίνονται F_R = 6, αντίσταση εισόδου R = 50 Ω, F_{max} =15 kHz και δείκτης διαμόρφωσης 5. Ο επιθυμητός λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο είναι S/N = 200 (ή 23 dB). Η θερμοκρασία περιβάλλοντος 23 C°. Να υπολογιστεί η απαιτούμενη ενεργός τιμή του σήματος στην είσοδο του δέκτη.



Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η λειτουργία του τηλεοπτικού δέκτη και περιγράφονται οι διάφοροι τύποι οθόνης που τον συνοδεύουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΤΗΛΕΟΠΤΙΚΟΙ ΔΕΚΤΕΣ

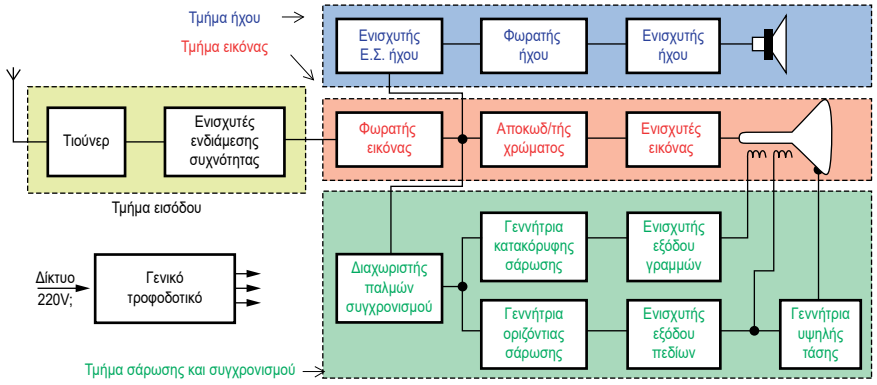
Τηλεοπτικοί δέκτες ονομάζονται οι συσκευές με τις οποίες κάνουμε λήψη και αναπαραγωγή τηλεοπτικών προγραμμάτων. Τα τηλεοπτικά προγράμματα περιέχουν εικόνες και ήχους, και γι' αυτό οι τηλεοπτικοί δέκτες διαθέτουν ξεχωριστά τμήματα αναπαραγωγής εικόνας και ήχου.

Οι τηλεοπτικοί δέκτες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους ασπρόμαυρους και τους έγχρωμους. Οι πρώτοι αναπαράγουν μονόχρωμες εικόνες, ενώ οι δεύτεροι πολύχρωμες. Οι έγχρωμοι δέκτες αποτελούν εξέλιξη των ασπρόμαυρων και είναι συμβατοί μ' αυτούς. Αυτό σημαίνει ότι ένας ασπρόμαυρος δέκτης μπορεί να αναπαράγει έγχρωμο τηλεοπτικό πρόγραμμα σε μονόχρωμη μορφή και ένας έγχρωμος δέκτης μπορεί να αναπαράγει ασπρόμαυρο πρόγραμμα σαν να ήταν ασπρόμαυρος. Για την εξασφάλιση της συμβατότητας, ένα μεγάλο μέρος από τα κυκλώματα των τηλεοπτικών δεκτών είναι κοινό στους δύο τύπους. Για το λόγο αυτό συνήθως εξετάζουμε πρώτα τους ασπρόμαυρους δέκτες και κατόπιν μελετούμε τα πρόσθετα κυκλώματα που απαιτούνται για να λειτουργήσουν οι δέκτες ως έγχρωμοι.

8.1 Δομικό διάγραμμα τηλεοπτικού δέκτη

Οι τηλεοπτικοί δέκτες είναι, χωρίς καμιά εξαίρεση, δέκτες υπερετερόδυνοι. Μονάχα αυτός ο τύπος δέκτη είναι σε θέση να εξασφαλίσει τον απαιτούμενο συνδυασμό υψηλής ευαισθησίας και επιλεκτικότητας, που είναι απαραίτητος για τη σωστή αναπαραγωγή του τηλεοπτικού προγράμματος. Τα κυκλώματα εισόδου του τηλεοπτικού δέκτη και συγκεκριμένα ο ενισχυτής υψηλής συχνότητας, ο μείκτης και ο τοπικός ταλαντωτής είναι κλεισμένα μέσα σε μεταλλικό περίβλημα και αποτελούν ιδιαίτερη μονάδα, που ονομάζεται συντονιστής ή τιούνερ (tuner). Το μεταλλικό περίβλημα παρέχει ηλεκτρική θωράκιση στο συντονιστή και εξασφαλίζει μεγάλη σταθερότητα συντονισμού στην επιθυμητή συχνότητα λήψης. Τα κυκλώματα που περιλαμβάνονται στο συντονιστή είναι παρόμοια μ' εκείνα οποιουδήποτε άλλου υπερετερόδυνου δέκτη. Επειδή τα εξετάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δεν θα τα περιγράψουμε ξανά.

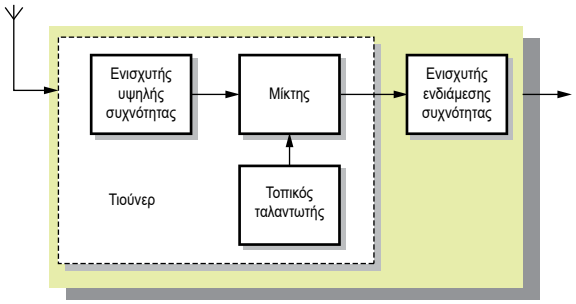
Το απλοποιημένο δομικό διάγραμμα ενός τηλεοπτικού δέκτη φαίνεται στο σχήμα 8-1. Παρατηρήστε ότι ο δέκτης χωρίζεται σε σαφώς καθορισμένα τμήματα εισόδου, σάρωσης και συγχρονισμού εικόνας και ήχου. Όλα τα τμήματα τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γενικής τροφοδοτικής διάταξης. Λεπτομερέστερη περιγραφή αυτών των τμημάτων δίνεται παρακάτω.



Σχήμα 8-1: *Απλοποιημένο δομικό– διάγραμμα τηλεοπτικού δέκτη*

8.1.1 Το τμήμα εισόδου του δέκτη

Το τμήμα εισόδου του τηλεοπτικού δέκτη περιλαμβάνει τα στάδια που φαίνονται στο σχήμα 8-2.



Σχήμα 8-2: *Δομικό – διάγραμμα τμήματος εισόδου τηλεοπτικού δέκτη*

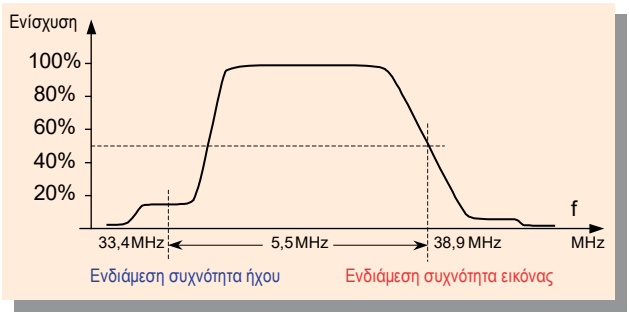
Αυτά τα στάδια έχουν παρόμοια λειτουργία με τα στάδια εισόδου των ραδιοφωνικών δεκτών που εξετάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σ' ένα τηλεοπτικό δέκτη όμως υπάρχουν ιδιομορφίες, οι οποίες οφείλονται στους εξής λόγους:

- Η συχνότητα λήψης των τηλεοπτικών προγραμμάτων είναι κατά κανόνα υψηλότερη απ' αυτή των ραδιοφωνικών.
- Όλοι οι τηλεοπτικοί δέκτες είναι πλέον τηλεχειριζόμενοι και ο συντονισμός τους στην επιθυμητή συχνότητα δε γίνεται με μηχανικά μέσα.
- Οι μεταδιδόμενες πληροφορίες ανά δευτερόλεπτο για την αναπαραγωγή κινούμενης τηλεοπτικής εικόνας είναι πολύ περισσότερες απ' ό,τι για την αναπαραγωγή ήχου.

Για τους λόγους αυτούς, τα κυκλώματα εισόδου του τηλεοπτικού δέκτη έχουν δυσκολότερη σχεδίαση και κατασκευή απ' ό,τι του ραδιοφωνικού. Ο συντονισμός του τιούνερ γίνεται με τη χρήση διόδων μεταβλητής χωρητικότητας (βάρικαπ) και το εύρος ζώνης συχνοτήτων των κυκλωμάτων εισόδου είναι πολύ μεγαλύτερο απ' ό,τι σ' ένα ραδιοφωνικό δέκτη.

Ειδικά ο ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας έχει ιδιόμορφη καμπύλη απόκρισης συχνοτήτων, για να μπορεί να επεξεργάζεται ταυτόχρονα τα σήματα εικόνας και τα σήματα ήχου, που αποτελούν το σήμα εκπομπής ενός τηλεοπτικού προγράμματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εικόνα και ο ήχος εκπέμπονται από δύο διαφορετικούς πομπούς για κάθε τηλεοπτικό πρόγραμμα και έχουν φέρουσες συχνότητες που διαφέρουν ελαφρά μεταξύ τους (η φέρουσα ήχου είναι κατά 5,5 MHz μεγαλύτερη από τη φέρουσα εικόνας στο πρότυπο CCIR, που χρησιμοποιούμε και στη χώρα μας). Έτσι, η καμπύλη απόκρισης του ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας του τηλεοπτικού δέκτη έχει τη μορφή του σχήματος 8-3. Παρατηρήστε

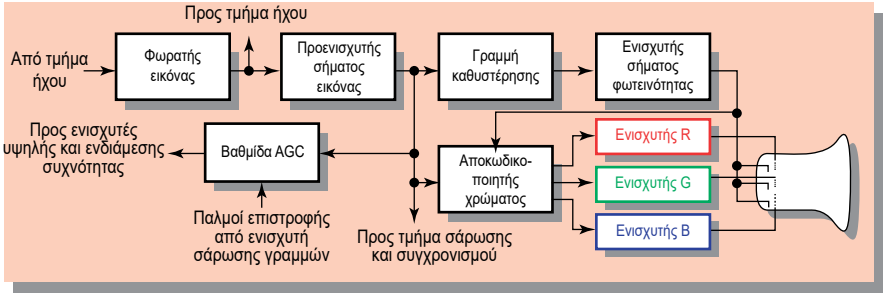
ότι το σήμα ήχου ενισχύεται πολύ λιγότερο από το σήμα εικόνας. Έτσι, το σήμα ήχου δεν επηρεάζει την αναπαραγωγή της εικόνας. Η ενδιάμεση συχνότητα ήχου είναι μικρότερη από την ενδιάμεση συχνότητα εικόνας, γιατί η διαδικασία της μείξης στον υπερετερόδυνο δέκτη αντιστρέφει τη σειρά των συχνοτήτων.



Σχήμα 8-3: *Απόκριση ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας τηλεοπτικού δέκτη*

8.1.2 Το τμήμα εικόνας του δέκτη

Το τμήμα εικόνας του τηλεοπτικού δέκτη χωρίζεται στο τμήμα φωτεινότητας και στο τμήμα χρωμικότητας και περιλαμβάνει τα στάδια του φωρατή εικόνας, του αποκωδικοποιητή χρώματος, των ενισχυτών εικόνας και της βαθμίδας αυτόματου ελέγχου της απολαβής (AGC). Το δομικό – διάγραμμα αυτού του τμήματος φαίνεται στο σχήμα 8-4.



Σχήμα 8-4: *Μπλοκ – διάγραμμα τμήματος εικόνας*

Στις τηλεοπτικές εκπομπές το σήμα εικόνας διαμορφώνει τη φέρουσα συχνότητα εικόνας κατά πλάτος. Έτσι, ο φωρατής εικόνας είναι ένας κοινός φωρατής με δίοδο, όπως αυτός που είδαμε ότι υπάρχει στους ραδιοφωνικούς δέκτες ΑΜ. Το κύκλωμα αυτό, εκτός από φώραση, πραγματοποιεί και μείξη των ενδιάμεσων συχνοτήτων εικόνας και ήχου που έρχονται από το τμήμα εισόδου. Η διαδικασία της μείξης παράγει τη διαφορά των δύο συχνοτήτων, η οποία, όπως είδαμε, είναι 5,5 MHz. Η συχνότητα αυτή ονομάζεται ***υπενδιάμεση συχνότητα ήχου*** (ΥΣΗ)

και οδηγείται στο τμήμα ήχου για περαιτέρω επεξεργασία. Το αποδιαμορφωμένο σήμα εικόνας οδηγείται σ' ένα προενισχυτή, όπου ενισχύεται, για να αποκτήσει πλάτος κατάλληλο για τη λειτουργία των επόμενων σταδίων.

Από την έξοδο του προενισχυτή το σήμα εικόνας οδηγείται στα εξής διαφορετικά κυκλώματα:

1. Στο τμήμα σάρωσης και συγχρονισμού. Εκεί διαχωρίζονται από το σήμα εικόνας και αξιοποιούνται οι παλμοί συγχρονισμού γραμμών και πεδίων, που εξετάσαμε στο κεφάλαιο 2.

2. Στη βαθμίδα AGC. Εκεί ανιχνεύεται το πλάτος των παλμών συγχρονισμού που, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, αντιστοιχεί στο 100% του πλάτους του σήματος εικόνας. Έτσι, προκύπτει ένα σήμα διόρθωσης της ενίσχυσης των σταδίων εισόδου του δέκτη. Όταν το λαμβανόμενο σήμα έχει μεγάλο πλάτος, η ενίσχυση μειώνεται, ενώ όταν έχει μικρό πλάτος, η ενίσχυση αυξάνεται. Η βαθμίδα AGC ενεργοποιείται από τους παλμούς επιστροφής γραμμών, οι οποίοι συμπίπτουν με τους παλμούς συγχρονισμού γραμμών.

3. Στον αποκωδικοποιητή χρώματος. Εκεί οι πληροφορίες χρωμικότητας του κόκκινου και του μπλε διαχωρίζονται από το υπόλοιπο σήμα εικόνας και αποκωδικοποιούνται, για να δώσουν τις χρωμοδιαφορές του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε (R-Y, G-Y, B-Y). Οι χρωμοδιαφορές ενισχύονται από τους τρεις ενισχυτές χρώματος και εφαρμόζονται στην έγχρωμη οθόνη. Εδώ με τη βοήθεια του σήματος φωτεινότητας παράγονται οι συνδυασμοί των τριών βασικών χρωμάτων που σχηματίζουν την έγχρωμη εικόνα.

4. Στον ενισχυτή φωτεινότητας. Εκεί διαχωρίζονται και ενισχύονται οι πληροφορίες φωτεινότητας του σύνθετου τηλεοπτικού σήματος. Κατόπιν εφαρμόζονται στην έγχρωμη οθόνη όπου μαζί με τις τρεις χρωμοδιαφορές σχηματίζουν τα τρία βασικά χρώματα της εικόνας. Παρατηρήστε ότι το σήμα εφαρμόζεται στον ενισχυτή φωτεινότητας μέσω μιας γραμμής καθυστέρησης. Η καθυστέρηση που εισάγει είναι ίση με την καθυστέρηση την οποία υφίσταται το σήμα που περνά από τον αποκωδικοποιητή χρώματος. Αυτό γίνεται για να φτάνουν ταυτόχρονα στην έγχρωμη οθόνη τα σήματα φωτεινότητας και χρωμικότητας, ώστε η αναπαραγωγή των χρωμάτων να είναι σωστή.

Ο αποκωδικοποιητής χρώματος είναι ένα κύκλωμα που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και γι' αυτό αξίζει να το σχολιάσουμε λίγο περισσότερο. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, η έγχρωμη τηλεόραση προέκυψε από εξέλιξη της ασπρόμαυρης και, για λόγους συμβατότητας μεταξύ των δύο, τα σήματα χρωμικότητας που απαιτούνται για την αναπαραγωγή των χρωμάτων «στριμώχτηκαν» μέσα στην ίδια περιοχή συχνοτήτων, που προηγουμένως καταλάμβαναν μόνο τα σήματα φωτεινότητας. Αυτό έγινε με τη βοήθεια πρόσθετων φερουσών συχνοτήτων, οι οποίες διαμορφώνονται από τα σήματα χρωμικότητας και βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ της φέρουσας συχνότητας εικόνας και της φέρουσας συχνότητας ήχου του τηλεοπτικού πομπού. Αυτές οι πρόσθετες φέρουσες συχνότητες ονομάζονται ***χρωμοφέρουσες***.

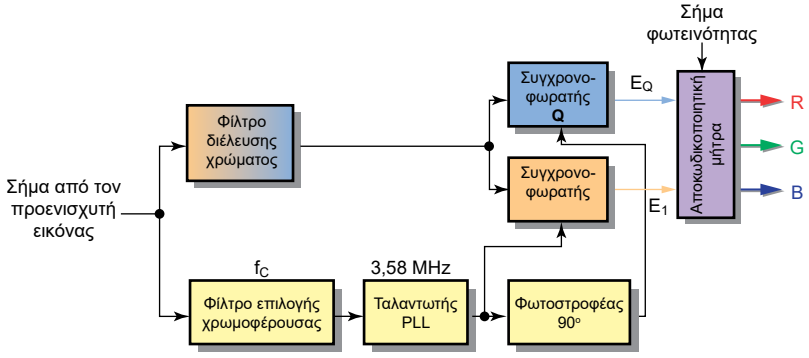
Η ακριβής τιμή και ο τρόπος διαμόρφωσης των χρωμοφερουσών δεν έγινε ποτέ παγκοσμίως αποδεκτό πρότυπο, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σήμερα σε χρήση τρία συστήματα κωδικοποίησης – αποκωδικοποίησης του τηλεοπτικού χρώματος. Αυτά είναι το Αμερικανικό NTSC, το Γερμανικό PAL και το Γαλλικό SECAM.

● Το **NTSC** (National Television System Committee – εθνική επιτροπή συστημάτων τηλεόρασης) χρησιμοποιεί δύο χρωμοφέρουσες που έχουν την ίδια συχνότητα – 3,58 MHz μεγαλύτερη από τη φέρουσα συχνότητα εικόνας, αλλά διαφέρουν μεταξύ τους σταθερά κατά 90° στη φάση. Οι χρωμοφέρουσες αυτές διαμορφώνονται με μια μέθοδο διαμόρφωσης πλάτους, που ονομάζεται ***ισοσταθμισμένη διαμόρφωση***.

● Το **PAL** (Phase Alternation by Line – εναλλαγή φάσης ανά γραμμή) χρησιμοποιεί επίσης δύο χρωμοφέρουσες που έχουν την ίδια συχνότητα – 4,43 MHz μεγαλύτερη από τη φέρουσα συχνότητα εικόνας, αλλά η φάση της δεύτερης μετατοπίζεται ως προς την πρώτη από +90° σε –90° και αντίστροφα, κάθε φορά που αρχίζει μια νέα γραμμή σάρωσης της εικόνας. Οι χρωμοφέρουσες αυτές διαμορφώνονται όπως και στο NTSC.

● Το **SECAM** (SEquentiel Couleur Á Mémoire – διαδοχικό χρώμα στη μνήμη) χρησιμοποιεί και αυτό δύο χρωμοφέρουσες, που έχουν όμως διαφορετικές συχνότητες – 4,406 και 4,25 MHz περισσότερο από τη φέρουσα συχνότητα εικόνας – και δεν εκπέμπονται ταυτόχρονα, αλλά διαδοχικά, η μια μετά την άλλη, σε κάθε νέα γραμμή σάρωσης της εικόνας. Οι χρωμοφέρουσες αυτές διαμορφώνονται με διαμόρφωση συχνότητας.

Το σύστημα NTSC είναι το παλιότερο από τα τρία. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί μια επεξεργασμένη μορφή των χρωμοδιαφορών (R-Y) και (B-Y), που ονομάζονται σήματα ***I*** και ***Q*** αντίστοιχα. Το δομικό – διάγραμμα του αποκωδικοποιητή NTSC φαίνεται στο σχήμα 8-5.

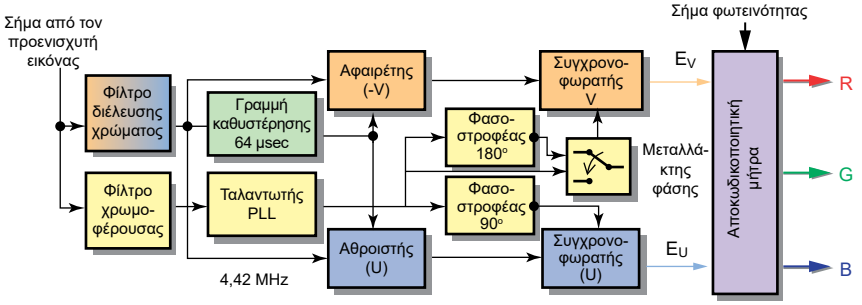


Σχήμα 8-5: *Δομικό – διάγραμμα αποκωδικοποιητή NTSC*

Ο αποκωδικοποιητής λειτουργεί ως εξής: Το σήμα που έρχεται από τον προενισχυτή εικόνας εφαρμόζεται σε δύο φίλτρα. Το φίλτρο χρώματος απομονώνει τα σήματα των χρωμοδιαφορών από τα σήματα φωτεινότητας. Το φίλτρο επιλογής της χρωμοφέρουσας απομονώνει τη συχνότητα των 3,58 MHz που έχουν οι χρω-

μοφέρουσες του NTSC. Επειδή αυτό το σήμα δεν εκπέμπεται διαρκώς, αλλά κατά διακεκομμένα δείγματα, το αναπαράγει ένας ειδικός ταλαντωτής PLL έτσι, ώστε να έχει την ίδια συχνότητα και φάση με τη χρωμοφέρουσα που χρησιμοποιήθηκε στον τηλεοπτικό πομπό. Κατόπιν περνά από ένα φασοστροφέα 90° και έτσι προκύπτουν δύο παραλλαγές του, οι οποίες έχουν την ίδια συχνότητα αλλά διαφέρουν μεταξύ τους κατά 90°. Αυτές οι δύο χρωμοφέρουσες εφαρμόζονται στους συγχρονοφωρατές I και Q. Τα κυκλώματα αυτά αποδιαμορφώνουν μόνο εκείνα τα σήματα που έχουν την ίδια συχνότητα και φάση με τις αντίστοιχες χρωμοφέρουσες. Τα αποδιαμορφωμένα σήματα E_I και E_Q εφαρμόζονται κατόπιν μαζί με το σήμα φωτεινότητας σε μια αποκωδικοποιητική μήτρα. Εκεί προσθαφαιρούνται μεταξύ τους κατάλληλα και δίνουν τα σήματα των τριών βασικών χρωμάτων R, G και B.

Το σύστημα PAL μοιάζει πολύ με το NTSC. Αναπτύχθηκε, για να διορθώσει ένα ελάττωμα που εμφανίζει το NTSC στην αναπαραγωγή των χρωμάτων, όταν μεταβληθεί κατά την εκπομπή η φάση των δειγμάτων της χρωμοφέρουσας 3,58 MHz. Όπως είδαμε, η φάση της μιας χρωμοφέρουσας στο PAL μεταβάλλεται από γραμμή σε γραμμή κατά 180° (από +90° σε –90°). Ο αποκωδικοποιητής PAL συγκρίνει τις φάσεις των διαμορφωμένων χρωμοδιαφορών μεταξύ των διαδοχικών γραμμών και, αν διαπιστώνει κάποια απόκλιση από το κανονικό, τη διορθώνει. Το PAL χρησιμοποιεί και αυτό μια επεξεργασμένη μορφή των χρωμοδιαφορών (R-Y) και (B-Y) που ονομάζονται σήματα ***V*** και ***U*** αντίστοιχα. Το δομικό – διάγραμμα του αποκωδικοποιητή PAL φαίνεται στο σχήμα 8-6.

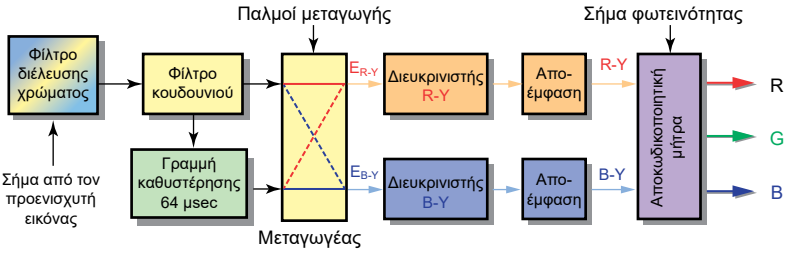


Σχήμα 8-6: *Δομικό – διάγραμμα αποκωδικοποιητή PAL*

Για να μπορέσει ο αποκωδικοποιητής PAL να συγκρίνει τις φάσεις των χρωμοδιαφορών σε διαδοχικές γραμμές της εικόνας, αποθηκεύει κάθε προηγούμενη γραμμή μέσα σε μια γραμμή καθυστέρησης 64 μsec. Στη συνέχεια προσθέτει και αφαιρεί τα σήματα των δύο γραμμών. Επειδή η χρωμοδιαφορά V έχει φάση που αλλάζει από γραμμή σε γραμμή κατά 180°, ενώ η χρωμοδιαφορά U διατηρεί τη φάση της σταθερή, η πρόσθεση των δύο γραμμών καταργεί το σήμα V, ενώ η αφαίρεσή τους καταργεί το U. Εκτός από αυτό, η προσθαφαίρεση διορθώνει και οποιαδήποτε μικρή ολίσθηση έχει συμβεί στη φάση των σημάτων κατά τη διαδικασία της εκπομπής. Τα υπόλοιπα τμήματα του διαγράμματος είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα του αποκω-

δικοποιητή NTSC. Οι φασοστροφείς 90° και 180° μαζί με το μεταλλάκτη φάσης ανά γραμμή χρησιμοποιούνται, για να δέχονται οι συγχρονοφωρατές V και U τις χρωμοφέρουσες με την κατάλληλη φάση για τη λειτουργία τους.

Το σύστημα SECAM είναι εντελώς διαφορετικό από τα προηγούμενα. Το δομικό – διάγραμμα του αποκωδικοποιητή SECAM φαίνεται στο σχήμα 8-7.

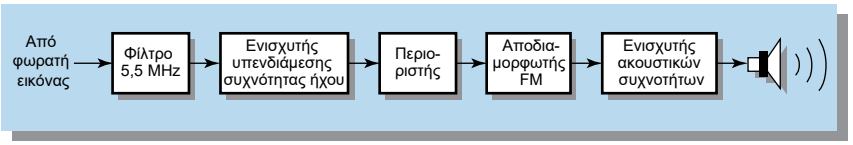


Σχήμα 8-7: *Δομικό – διάγραμμα αποκωδικοποιητή SECAM*

Στο SECAM οι χρωμοφέρουσες είναι διαμορφωμένες κατά συχνότητα και μπορούν να αποδιαμορφωθούν με απλά μέσα. Έτσι, δεν υπάρχουν οι γεννήτριες PLL, οι φασοστροφείς κλπ. που συναντάμε στα άλλα συστήματα και μαζί τους λείπουν και τα προβλήματα που προκαλούνται από τα σφάλματα στη φάση. Το σήμα εικόνας, αφού περάσει από το φίλτρο διέλευσης χρώματος, οδηγείται στο φίλτρο κουδουνιού όπου ενισχύονται επιλεκτικά οι χρωμοφέρουσες. Επειδή στο SECAM οι δυο χρωμοφέρουσες εκπέμπονται διαδοχικά, αποθηκεύονται τα σήματα χρώματος κάθε προηγούμενης γραμμής σάρωσης σε μια γραμμή καθυστέρησης 64 μsec. Κατόπιν, ένας ηλεκτρονικός μεταγωγέας φροντίζει για τη διοχέτευση των σωστών σημάτων χρώματος στους κατάλληλους αποδιαμορφωτές. Όταν η τρέχουσα γραμμή περιέχει τη χρωμοφέρουσα του κόκκινου και η προηγούμενη τη χρωμοφέρουσα του μπλε, ο μεταγωγέας συνδέει τις εισόδους με τις εξόδους του μέσω της ευθείας διαδρομής. Όταν η τρέχουσα γραμμή περιέχει τη χρωμοφέρουσα του μπλε και η προηγούμενη τη χρωμοφέρουσα του κόκκινου, ο μεταγωγέας συνδέει τις εισόδους με τις εξόδους του μέσω της διασταυρωμένης διαδρομής. Έτσι, στο διευκρινιστή του κόκκινου πηγαίνουν πάντα οι χρωμοφέρουσες του κόκκινου και στο διευκρινιστή του μπλε πάντα οι χρωμοφέρουσες του μπλε. Τα κυκλώματα αποέμφασης είναι μέρος των κυκλωμάτων αποδιαμόρφωσης συχνότητας και χρησιμοποιούνται για να επαναφέρουν στη σωστή στάθμη τις υψηλότερες συχνότητες των σημάτων χρωμοδιαφοράς.

8.1.3 Το τμήμα ήχου του δέκτη

Το τμήμα ήχου του τηλεοπτικού δέκτη είναι ουσιαστικά ένας τροποποιημένος δέκτης FM, γιατί τα σήματα ήχου των τηλεοπτικών προγραμμάτων εκπέμπονται με διαμόρφωση συχνότητας. Περιλαμβάνει τα στάδια που φαίνονται στο σχήμα 8-8.

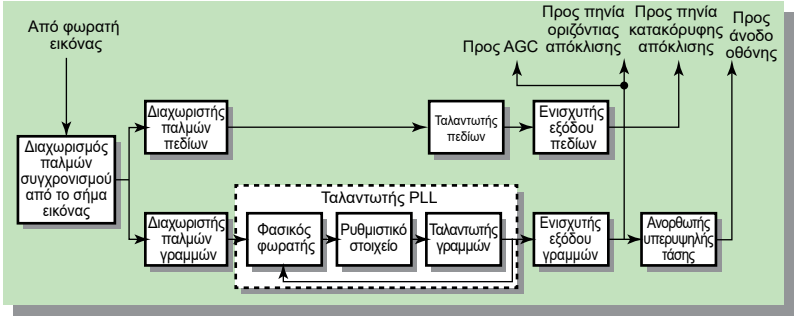


Σχήμα 8-8: Δομικό – διάγραμμα τμήματος ήχου του τηλεοπτικού δέκτη.

Το σήμα από το φωρατή εικόνας περιέχει, όπως είδαμε, τα προϊόντα μείξης των ενδιάμεσων συχνοτήτων εικόνας και ήχου, μεταξύ των οποίων είναι και το σήμα της διαφοράς των συχνοτήτων τους 5,5 MHz. Η συχνότητα αυτή απομονώνεται με τη βοήθεια ενός φίλτρου και ονομάζεται υπενδιάμεση συχνότητα ήχου. Κατόπιν, ενισχύεται από τον ενισχυτή υπενδιάμεσης συχνότητας ήχου και οδηγείται στον περιοριστή. Εκεί αποκόπτονται οι μεταβολές πλάτους, που οφείλονται στην επίδραση του σήματος εικόνας, και διατηρούνται μόνο οι μεταβολές συχνότητας. Στη συνέχεια, το σήμα οδηγείται στον αποδιαμορφωτή FM όπου αναπαράγεται το σήμα ήχου του τηλεοπτικού προγράμματος. Το σήμα αυτό ενισχύεται από τον ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων και οδηγείται στο μεγάφωνο. Αν ο δέκτης είναι στερεοφωνικός, αμέσως μετά τον αποδιαμορφωτή FM υπάρχει ένας αποκωδικοποιητής FM Stereo, που ακολουθείται από δύο ενισχυτές ακουστικών συχνοτήτων και δύο μεγάφωνα.

8.1.4 Το τμήμα σάρωσης και συγχρονισμού του δέκτη

Το τμήμα σάρωσης και συγχρονισμού συνεργάζεται στενά με το τμήμα εικόνας του δέκτη, για να παράγει σταθερές και σωστά τοποθετημένες εικόνες στην οθόνη της συσκευής. Περιλαμβάνει τα στάδια που φαίνονται στο σχήμα 8-9.



Σχήμα 8-9: Δομικό – διάγραμμα τμήματος σάρωσης και συγχρονισμού

Το σήμα από το φωρατή εικόνας εφαρμόζεται σ' ένα κύκλωμα που διαχωρίζει τους παλμούς συγχρονισμού από το υπόλοιπο τηλεοπτικό σήμα. Ο διαχωρισμός βασίζεται στο ότι οι παλμοί συγχρονισμού έχουν μεγαλύτερο πλάτος από κάθε άλλο συστατικό του τηλεοπτικού σήματος. Κατόπιν, οι παλμοί διαχωρίζονται μεταξύ τους σε παλμούς συγχρονισμού γραμμών και παλμούς συγχρονισμού

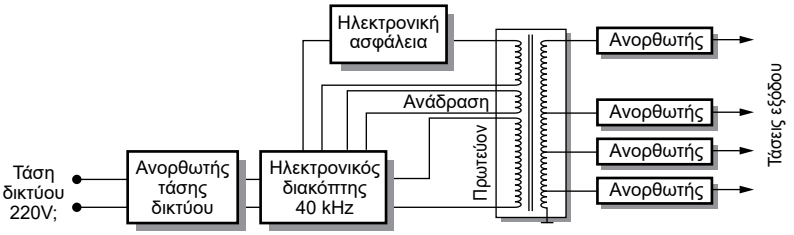
πεδίων με κριτήριο τη διαφορά τους στη διάρκεια. Οι παλμοί συγχρονισμού πεδίων οδηγούνται στον ταλαντωτή πεδίων όπου διεγείρουν την παραγωγή της πριονωτής τάσης κατακόρυφης σάρωσης. Η άφιξη κάθε παλμού προκαλεί την παραγωγή μιας νέας περιόδου της τάσης. Η τάση αυτή ενισχύεται από τον ενισχυτή εξόδου πεδίων, ο οποίος τροφοδοτεί με ρεύμα πριονωτής μορφής τα πηνία οριζόντιας απόκλισης που βρίσκονται τοποθετημένα στο «λαιμό» της λυχνίας οθόνης.

Οι παλμοί συγχρονισμού γραμμών, αντίθετα, εφαρμόζονται πρώτα σ' ένα φασικό φωρατή όπου συγκρίνεται η συχνότητα και η φάση τους με τη συχνότητα και τη φάση της πριονωτής τάσης οριζόντιας σάρωσης από την έξοδο του ταλαντωτή γραμμών. Οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ τους διορθώνεται αυτόματα από το ρυθμιστικό στοιχείο. Αυτό είναι απαραίτητο, γιατί η οριζόντια σάρωση είναι πολύ ευαίσθητη σε κάθε μορφής παράσιτα, που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν το συγχρονισμό και να καταστρέψουν την αναπαραγωγή της εικόνας. Η δράση των παραπάνω κυκλωμάτων, τα οποία αποτελούν ένα ταλαντωτή PLL παρόμοιο με αυτόν που υπάρχει στους αποκωδικοποιητές NTSC και PAL, απομακρύνει αυτό το ενδεχόμενο.

Στη συνέχεια η τάση οριζόντιας σάρωσης εφαρμόζεται στον ενισχυτή εξόδου γραμμών, ο οποίος παράγει ρεύμα πριονωτής μορφής για τα πηνία οριζόντιας σάρωσης. Ένα μέρος αυτού του ρεύματος ανορθώνεται και πολλαπλασιάζεται κατάλληλα, ώστε να παράγει συνεχή τάση μεγέθους 20 – 25 kV. Η τάση αυτή είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της λυχνίας οθόνης. Το κύκλωμα που την παράγει ονομάζεται ανορθωτής υπερυψηλής τάσης και αξιοποιεί το μέρος του ρεύματος σάρωσης που προκαλεί την οριζόντια επιστροφή της δέσμης. Το μέρος αυτό αποτελεί τους λεγόμενους παλμούς επιστροφής. Οι ίδιοι παλμοί, όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο, χρησιμοποιούνται, για να ανοιγοκλείνουν το κύκλωμα παραγωγής της τάσης AGC.

8.1.5 Το τροφοδοτικό του δέκτη

Οι σύγχρονοι τηλεοπτικοί δέκτες περιέχουν όλοι ηλεκτρονικές διατάξεις τροφοδοσίας. Τα κλασικά τροφοδοτικά δε χρησιμοποιούνται πλέον, γιατί είναι βαριά, ογκώδη και αντιοικονομικά. Το τροφοδοτικό ενός σύγχρονου δέκτη περιλαμβάνει τα στάδια που φαίνονται στο σχήμα 8-10.



Σχήμα 8-10: *Δομικό – διάγραμμα τροφοδοτικού ενός τηλεοπτικού δέκτη*

Η τάση δικτύου των 220 Volt ανορθώνεται και οδηγείται σ' έναν ταλαντωτή, ο οποίος παράγει ορθογώνιους παλμούς με συχνότητα περίπου 40 kHz και τροφοδοτεί με ρεύμα το πρωτεύον ενός μετασχηματιστή. Με τέτοια συχνότητα λειτουργίας ο μετασχηματιστής και οι ανορθωτές που ακολουθούν μπορούν να κατασκευαστούν με μικρό όγκο, βάρος και κόστος. Ένα από τα δευτερεύοντα τυλίγματα του μετασχηματιστή παρέχει ανάδραση στο ταλαντωτή και τροποποιεί το λόγο διάρκειας προς παύση των παλμών, για να διατηρούνται σταθερές οι τάσεις εξόδου του τροφοδοτικού. Σ' ένα άλλο τύλιγμα συνδέεται ηλεκτρονική ασφάλεια, η οποία αναστέλλει τη λειτουργία του ταλαντωτή (άρα και ολόκληρου του τροφοδοτικού), αν ξεπεραστούν τα όρια τάσης και ρεύματος στις εξόδους. Ένα τυπικό τροφοδοτικό παρέχει πολλές τάσεις εξόδου, γιατί οι περισσότεροι τηλεοπτικοί δέκτες απαιτούν πολλές διαφορετικές τάσεις τροφοδοσίας για να λειτουργήσουν.

8.2 Η οθόνη του τηλεοπτικού δέκτη

Οθόνη ονομάζουμε την επιφάνεια πάνω στην οποία παρακολουθούμε την τηλεοπτική εικόνα. Η λέξη οθόνη σημαίνει ύφασμα και είναι δανεισμένη από τον κινηματογράφο. Παρ' όλο που η οθόνη της τηλεόρασης δεν έχει καμιά σχέση με ύφασμα, έχει επικρατήσει να ονομάζεται έτσι και θα χρησιμοποιούμε αυτό το όνομα σε όλο το υπόλοιπο κεφάλαιο.

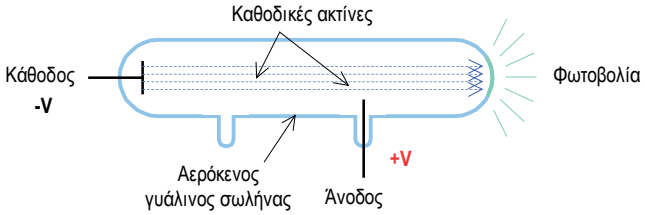
Σχεδόν όλες οι οθόνες των τηλεοράσεων είναι πλέον έγχρωμες. Ασπρόμαυρα προγράμματα δεν παράγονται πια και έτσι μπορούμε να συναντήσουμε μονόχρωμες οθόνες μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε μικροσκοπικούς φορητούς δέκτες, σε τηλεοράσεις συστημάτων ασφαλείας κλειστού κυκλώματος ή σε δέκτες άνω της εικοσαετίας παλιούς, που τυχόν έχουν απομείνει ακόμη σε χρήση. Επειδή οι έγχρωμες οθόνες είναι πρωτογενείς πηγές παραγωγής φωτός, λειτουργούν, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, βάσει του προσθετικού συστήματος μείξης των χρωμάτων.

Στη σημερινή κατάσταση της τεχνολογίας (2000) η συντριπτική πλειονότητα των οθονών τηλεόρασης στηρίζει τη λειτουργία της στη λυχνία καθοδικών ακτίνων. Ανταγωνιστικές τεχνολογίες, όπως οι οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD) και οι οθόνες πλάσματος, υπάρχουν εδώ και αρκετά χρόνια, αλλά δεν έχουν καταφέρει να διαδοθούν αρκετά στο χώρο της τηλεόρασης. Εν τούτοις υπόσχονται πολλά στο μέλλον και γι' αυτό θα περιγράψουμε με συντομία τις αντίστοιχες οθόνες στο τέλος αυτού του κεφαλαίου.

8.2.1 Ο καθοδικός σωλήνας

Ο καθοδικός σωλήνας είναι γνωστός ήδη από τον προηγούμενο αιώνα. Αποτελείται από ένα κλειστό γυάλινο σωλήνα, μέσα από τον οποίο έχει αφαιρεθεί

σχεδόν όλος ο αέρας. Στο ένα άκρο του σωλήνα υπάρχει μεταλλικό ηλεκτρόδιο, το οποίο συνδέεται με τον αρνητικό πόλο μιας ηλεκτρικής πηγής υψηλής τάσης, που ονομάζεται ***κάθοδος***. Ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται σε ένα ηλεκτρόδιο στο πλάι του σωλήνα, που ονομάζεται ***άνοδος***. Η κατασκευή αυτή ονομάζεται και λυχνία καθοδικών ακτίνων (σχήμα 8-11).



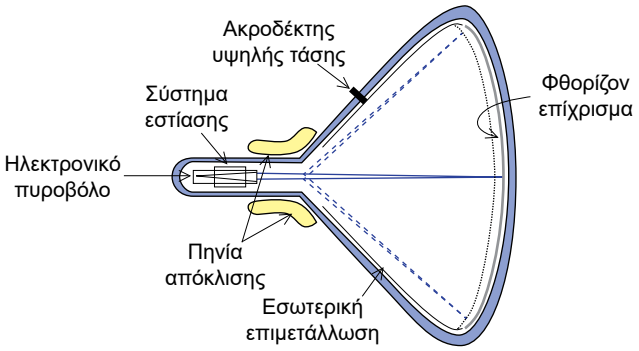
Σχήμα 8-11: *Καθοδικός σωλήνας*

Κατά τη λειτουργία του σωλήνα εκπέμπονται αόρατες ακτίνες, οι οποίες ξεκινούν κάθετα από την κάθοδο και διαδίδονται ευθύγραμμα, ανεξάρτητα από τη θέση της ανόδου. Όταν αυτές οι ακτίνες πέφτουν στο απέναντι γυάλινο τοίχωμα, το κάνουν να φωτοβολεί μ' ένα αχνό γαλαζοπράσινο φως. Εδώ και πολλά χρόνια είναι γνωστό ότι οι καθοδικές ακτίνες είναι ηλεκτρόνια που κινούνται με πολύ μεγάλες ταχύτητες, οι οποίες φτάνουν μέχρι και το 30% της ταχύτητας του φωτός. Η ενέργεια που μεταφέρουν προκαλεί διάφορα φυσικά και χημικά φαινόμενα στα σώματα πάνω στα οποία προσκρούουν, μεταξύ των οποίων είναι, κατά περιπτώσεις, και η εκπομπή φωτοβολίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ***φθορισμός***.

Τις παραπάνω ιδιότητες τις εκμεταλλευόμαστε για τη λειτουργία των οθονών καθοδικών ακτίνων, οι οποίες ονομάζονται και λυχνίες CRT από τα αρχικά των λέξεων Cathode Ray Tube (σωλήνας καθοδικών ακτίνων).

8.2.2 Η λυχνία καθοδικών ακτίνων (CRT)

Η λυχνία CRT είναι ένας τροποποιημένος καθοδικός σωλήνας. Στη θέση της απλής καθόδου υπάρχει ένα ηλεκτρονικό πυροβόλο, ίδιο με αυτό που γνωρίσαμε στο κεφάλαιο 2, το οποίο εκπέμπει μια λεπτή και ισχυρά εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων. Το γυάλινο τοίχωμα απέναντι από την κάθοδο είναι εσωτερικά επιχρισμένο με ειδική ουσία, η οποία εμφανίζει έντονα το φαινόμενο του φθορισμού. Ο ίδιος ο καθοδικός σωλήνας έχει χοανοειδή μορφή, για να προσφέρει μεγάλη επιφάνεια απεικόνισης. Η μορφή μιας λυχνίας CRT φαίνεται στο σχήμα 8-12.



Σχήμα 8-12: *Λυχνία καθοδικού σωλήνα (CRT)*

Η λυχνία περιλαμβάνει:

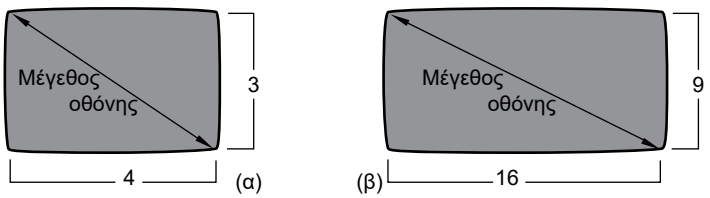
1. Το **ηλεκτρονικό πυροβόλο**, που παράγει την ηλεκτρονική δέσμη.

2. Το **σύστημα εστίασης**, που εξασφαλίζει την εστίαση της δέσμης πάνω στο φθορίζον επίχρισμα. Η εστίαση γίνεται, όπως είδαμε, με τη βοήθεια ηλεκτροστατικών φακών.

3. Το **σύστημα απόκλισης**, που μεταβάλλει τη διεύθυνση της ηλεκτρονικής δέσμης, ώστε να προσπίπτει στα διάφορα σημεία του φθορίζοντος επιχρίσματος. Το σύστημα αυτό είναι ηλεκτρομαγνητικό και χρησιμοποιεί εξωτερικά πηνία τοποθετημένα γύρω από το ηλεκτρονικό πυροβόλο. Μ' αυτά τα πηνία μπορούμε να πετύχουμε γωνία απόκλισης της δέσμης μέχρι και ±55°, που απαιτούν οι σύγχρονες οθόνες.

4. Το **φθορίζον επίχρισμα**, που μετατρέπει την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων σε φωτεινή ακτινοβολία. Το επίχρισμα αυτό ονομάζεται φώσφορος, αν και δεν έχει καμιά σχέση με το ομώνυμο χημικό στοιχείο.

Το εσωτερικό του κωνικού τμήματος της λυχνίας είναι επιμεταλλωμένο και συνδέεται σε μια πολύ υψηλή θετική τάση (περίπου 25.000 Volt), έτσι ώστε να μπορεί να συλλέγει τα ηλεκτρόνια της ηλεκτρονικής δέσμης. Η επιφάνεια απεικόνισης έχει καμπυλοειδή παραλληλόγραμμη μορφή και λόγο διαστάσεων πλευρών 4:3 ή 16:9. Οι λυχνίες της δεύτερης κατηγορίας ονομάζονται ***«ευρείας οθόνης»*** (σχήμα 8-13).



Σχήμα 8-13: *Οθόνη 4:3 (α) και 16:9 (β)*

Οι οθόνες CRT κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη. Το μέγεθος μετράται σε ίντσες πάνω στη διαγώνιο της οθόνης και μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως και 35 περίπου ίντσες. Στο σχήμα 8-14 φαίνονται διάφοροι τύποι λυχνιών CRT.



Σχήμα 8-14: *Οθόνες CRT*

Οι σύγχρονες λυχνίες CRT έχουν μεγάλες γωνίες απόκλισης της δέσμης και, ιδιαίτερα οι έγχρωμες, λειτουργούν με πολύ υψηλές τάσεις. Για να αντεπεξέλθει το σύστημα απόκλισης στις απαιτήσεις αυτών των λυχνιών, τα πηνία απόκλισης έχουν ειδική μορφή. Τυλίγονται έτσι, ώστε να περιβάλλουν το «λαιμό» και τη βάση του κωνικού τμήματος της λυχνίας. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων πηνίων, ο σελλοειδής (σχήμα 8-15 α) και ο τοροειδής (σχήμα 8-15 β).



(α)

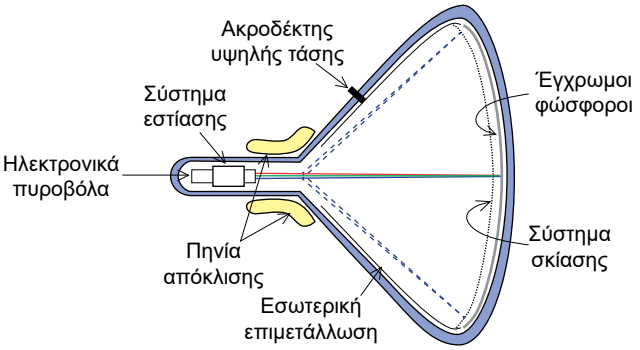


(β)

Σχήμα 8-15: *Πηνία απόκλισης λυχνιών CRT*

8.2.3 Η έγχρωμη λυχνία CRT

Για αναπαραγωγή έγχρωμης εικόνας πρέπει η οθόνη να είναι σε θέση να παράγει από κάθε σημείο της τα τρία βασικά χρώματα, κόκκινο, πράσινο και μπλε, της προσθετικής μείξης χρωμάτων. Για το λόγο αυτό το φθορίζον επίχρισμα αποτελείται από τρεις διαφορετικές φθορίζουσες ουσίες, που ονομάζονται ***έγχρωμοι φώσφοροι***.



Σχήμα 8-16: *Έγχρωμη λυχνία CRT*

Στις περισσότερες έγχρωμες λυχνίες CRT εκπέμπονται τρεις ηλεκτρονικές δέσμες, μια για κάθε είδος φωσφόρου. Επιπλέον, 1–1,5 cm μπροστά από την εσωτερική επιφάνεια της οθόνης υπάρχει ένα σύστημα σκίασης, που επιτρέπει σε κάθε δέσμη να διεγείρει μόνο τους φωσφόρους του κατάλληλου χρώματος. Στο σχήμα 8-16 φαίνεται η εσωτερική δομή μιας έγχρωμης λυχνίας CRT.

Ανάλογα με τον αριθμό των ηλεκτρονικών τους πυροβόλων, οι έγχρωμες λυχνίες CRT μπορούν να διακριθούν σε λυχνίες μ' ένα ή με τρία πυροβόλα. Οι λυχνίες μ' ένα πυροβόλο μπορεί να εκπέμπουν τρεις διαφορετικές ηλεκτρονικές δέσμες ή μία μόνο δέσμη, η οποία διαμορφώνεται κατάλληλα, ώστε να μπορεί να διεγείρει ξεχωριστά τους τρεις φωσφόρους. Έτσι υπάρχουν:

- Λυχνίες **τριδεσμικές με τρία πυροβόλα**, που χωρίζονται σε:
- Λυχνίες με **πυροβόλα δέλτα** (Delta) και
- λυχνίες με **πυροβόλα ευθυγραμμισμένα** (in line).
- Λυχνίες **τριδεσμικές με ένα πυροβόλο**.
- Λυχνίες **μονοδεσμικές με ένα πυροβόλο**.

Ανάλογα με τον τρόπο σκίασης των ηλεκτρονικών δεσμών, οι λυχνίες καθοδικού σωλήνα διακρίνονται σε:

- Λυχνίες με **μάσκα σκιάς**.
- Λυχνίες με **σχισμές σκιάς**.
- Λυχνίες με **πλέγμα σκιάς**.

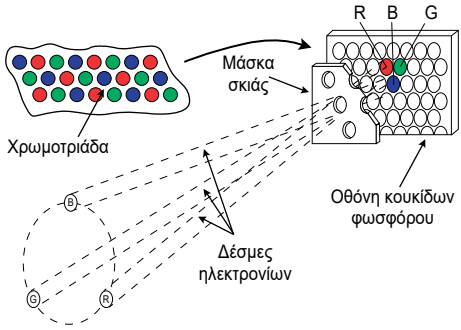
Τέλος, ανάλογα με την τοποθέτηση των έγχρωμων φωσφόρων στην οθόνη, οι λυχνίες καθοδικού σωλήνα διακρίνονται σε:

- Λυχνίες με **μωσαϊκή οθόνη**.
- Λυχνίες με **φθορίζουσες λωρίδες**.

Οι λυχνίες με μωσαϊκή οθόνη έχουν πάντα μάσκα σκιάς και είναι τριδεσμικές με τρία πυροβόλα σε διάταξη δέλτα. Είναι ο παλιότερος τύπος έγχρωμων λυχνιών CRT και σήμερα χρησιμοποιούνται μόνο στις οθόνες των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι λυχνίες με ευθυγραμμισμένα πυροβόλα ή με ένα πυροβόλο έχουν σχισμές σκιάς ή πλέγμα σκιάς και η οθόνη τους είναι πάντοτε με φθορίζουσες

λωρίδες. Οι τριδεσμικές μ' ένα πυροβόλο και πλέγμα σκιάς ονομάζονται ***τρίνιτρον*** (trinitron), ενώ οι μονοδεσμικές μ' ένα πυροβόλο και πλέγμα σκιάς ονομάζονται ***χρώματρον*** (chromatron).

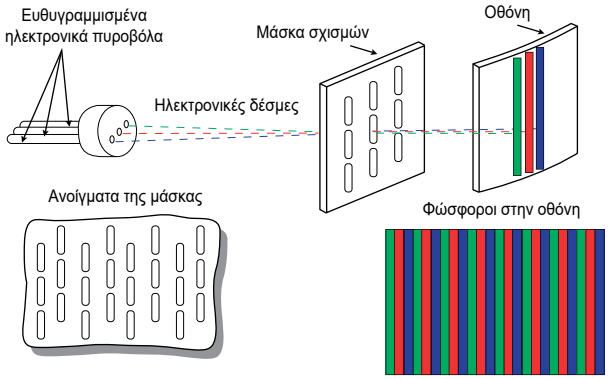
Οι λυχνίες με πυροβόλα σε διάταξη δέλτα έχουν τα πυροβόλα τοποθετημένα στις κορυφές ισόπλευρου τριγώνου, του οποίου το επίπεδο είναι κάθετο στον άξονα της λυχνίας. Τα πυροβόλα έχουν μικρή κλίση προς τα μέσα, έτσι ώστε οι δέσμες τους να συγκλίνουν σ' ένα σημείο πάνω στο επίπεδο της μάσκας σκιάς. Οι έγχρωμοι φώσφοροι τοποθετούνται πάνω στην οθόνη σε κόκκους κατά τριάδες παρόμοιας διάταξης, που ονομάζονται ***χρωμοτριάδες***. Η μάσκα είναι ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο με τρύπες που βρίσκονται μπροστά από το κέντρο κάθε χρωμοτριάδας. Καθώς οι ηλεκτρονικές δέσμες σαρώνουν την οθόνη, περνούν από τις τρύπες της μάσκας και προσβάλλουν η κάθε μια τον κατάλληλο κόκκο φωσφόρου, χωρίς να μπορούν να επηρεάσουν τους γειτονικούς. Η δράση της μάσκας σε λυχνία με πυροβόλα σε διάταξη δέλτα φαίνεται στο σχήμα 8-17.



Σχήμα 8-17: *Δομή λυχνίας CRT με πυροβόλα δέλτα και μάσκα σκιάς*

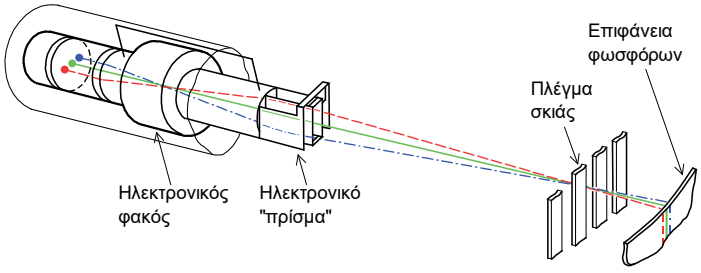
Οι λυχνίες CRT με πυροβόλα σε διάταξη δέλτα εξασφαλίζουν άριστη ποιότητα εικόνας, αλλά απαιτούν πολλές ρυθμίσεις, για να πετύχουν σύμπτωση των τριών χρωμάτων σε όλα τα σημεία της οθόνης. Επιπλέον η μάσκα ελαττώνει τη φωτεινότητα της εικόνας, γιατί απορροφά ένα μεγάλο μέρος από το πλήθος των ηλεκτρονίων που εκπέμπουν τα ηλεκτρονικά πυροβόλα.

Για τη μείωση των απαραίτητων ρυθμίσεων, κατασκευάστηκαν λυχνίες με ευθυγραμμισμένα πυροβόλα. Αυτές έχουν τα ηλεκτρονικά πυροβόλα τοποθετημένα σε οριζόντια ευθύγραμμη διάταξη και μάσκα σκιάς με κατακόρυφες σχισμές. Οι έγχρωμοι φώσφοροι τοποθετούνται στην οθόνη έτσι, ώστε να σχηματίζουν κατακόρυφες φθορίζουσες λωρίδες. Οι περισσότερες λυχνίες CRT που βρίσκονται σε χρήση σήμερα ανήκουν σ' αυτό τον τύπο. Η δομή μιας τέτοιας λυχνίας φαίνεται στο σχήμα 8-18.



Σχήμα 8-18: *Δομή λυχνίας CRT με ευθυγραμμισμένα πυροβόλα και σχισμές σκιάς*

Για την αύξηση της φωτεινότητας της οθόνης, κατασκευάστηκαν οι λυχνίες τρίνιτρον. Αυτές, αντί για μάσκα σκιάς, διαθέτουν ένα πλέγμα από κατακόρυφους μεταλλικούς αγωγούς, που χάρη στα μεγάλα του ανοίγματα απορροφά πολύ λιγότερο τα ηλεκτρόνια των ηλεκτρονικών πυροβόλων απ' ό,τι η μάσκα. Επιπλέον οι λυχνίες τρίνιτρον διαθέτουν μόνο ένα ηλεκτρονικό πυροβόλο, το οποίο παράγει τρεις δέσμες. Αυτές οι δέσμες συγκλίνουν και εστιάζονται με τη βοήθεια ενός εσωτερικού συστήματος, το οποίο αποτελείται από δύο ηλεκτρονικούς φακούς μεγάλης διαμέτρου και από τρία ηλεκτρονικά πρίσματα. Το σύστημα αυτό απαιτεί ακόμη λιγότερες ρυθμίσεις σύγκλισης και εστίασης των ηλεκτρονικών δεσμών απ' όσες απαιτούν οι λυχνίες με τρία ευθυγραμμισμένα πυροβόλα. Οι φώσφοροι στις λυχνίες τρίνιτρον έχουν την ίδια κατακόρυφη διάταξη σε λωρίδες που έχουν και στις λυχνίες με σχισμές σκιάς. Η εσωτερική δομή μιας λυχνίας τρίνιτρον φαίνεται στο σχήμα 8-19.

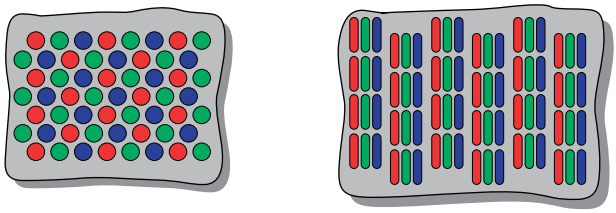


Σχήμα 8-19: *Εσωτερική δομή λυχνίας τρίνιτρον*

Παρόμοια δομή με τις τρίνιτρον έχουν και οι λυχνίες χρώματρον. Και εδώ υπάρχει ένα ηλεκτρονικό πυροβόλο, το οποίο όμως εκπέμπει μία ηλεκτρονική δέσμη. Εφαρμόζοντας κατάλληλη τάση σ' ένα πλέγμα στο εσωτερικό του πυροβόλου

η δέσμη, καθώς σαρώνει, μετατοπίζεται έτσι, ώστε να διεγείρει διαδοχικά τον κόκκινο, τον πράσινο και τον μπλε φώσφορο.

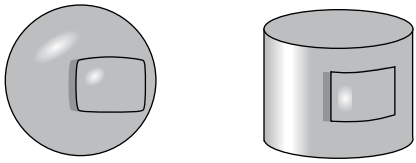
Έχει παρατηρηθεί ότι το φως που πέφτει πάνω στην εξωτερική επιφάνεια της οθόνης αντανακλάται από το υλικό των έγχρωμων φωσφόρων και προκαλεί μείωση της αντίθεσης (κοντράστ) της εικόνας. Για να το αποφύγουν αυτό, ορισμένοι κατασκευαστές περιβάλλουν το υλικό των φωσφόρων με σκουρόχρωμη βαφή. Έτσι το εξωτερικό φως απορροφάται και η αντίθεση αυξάνεται. Οι οθόνες αυτού του τύπου ονομάζονται μπλακ μάτριξ (black matrix, σχήμα 8-20).



Σχήμα 8-20: *Φώσφοροι σε οθόνες μπλακ μάτριξ*

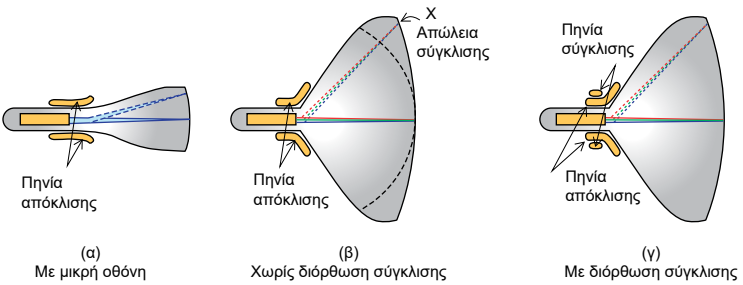
8.2.4 Η επίπεδη οθόνη CRT

Αν παρατηρήσουμε τα σχήματα 8-12 ή 8-16, θα δούμε ότι οι ηλεκτρονικές δέσμες αποκλίνουν, περιστρεφόμενες γύρω από ένα σημείο που βρίσκεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ των πηνίων απόκλισης. Για να διατηρείται η εστίαση των δεσμών, πρέπει όλα τα σημεία της οθόνης να απέχουν εξίσου απ' αυτό το κέντρο περιστροφής. Για το λόγο αυτό, οι οθόνες των λυχνιών CRT κατασκευάζονται έτσι, ώστε να αποτελούν τμήματα επιφάνειας σφαίρας. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι οθόνες των λυχνιών τρίνιτρον, οι οποίες είναι τμήματα επιφάνειας κυλίνδρου (σχήμα 8-21 α, β).



Σχήμα 8-21: *Προέλευση κοινής οθόνης CRT (α) και οθόνης τρίνιτρον (β)*

Όσο οι οθόνες είναι μικρές, αυτό δε δημιουργεί κανένα πρόβλημα. Στις μεγάλες όμως οθόνες, για να διατηρηθεί μικρό το μήκος της λυχνίας, πρέπει η οθόνη να γίνει υπερβολικά καμπυλωτή (σχήμα 8-22 β με διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 8-22: *Λυχνίες CRT με επίπεδες οθόνες*

Οθόνες με τέτοια καμπυλότητα δυσκολεύουν πολύ την παρατήρηση. Η σύγχρονη τάση είναι να κατασκευάζονται όσο το δυνατό περισσότερο επίπεδες οθόνες, οι οποίες, εκτός των άλλων, προκαλούν και λιγότερες αντανακλάσεις των φωτεινών πηγών του γύρω χώρου. Έτσι, έχουμε οθόνες με πολύ μικρότερη καμπυλότητα απ' όση υπαγορεύει το μήκος της λυχνίας. Αυτές όμως εμφανίζουν απώλεια της εστίασης και της σύγκλισης των ηλεκτρονικών δεσμών στα σημεία που βρίσκονται μακριά από το κέντρο τους (σχήμα 8-22 β, σημείο X) καθώς και διάφορες γεωμετρικές παραμορφώσεις της εικόνας. Όλα αυτά αντιμετωπίζονται με τροποποίηση της μορφής των ρευμάτων σάρωσης και με προσθήκη επιπλέον πηνίων στο σύστημα απόκλισης, τα οποία τροφοδοτούνται από ειδικά κυκλώματα διόρθωσης της σύγκλισης (σχήμα 8-22 γ).

Πρέπει ακόμη να τονιστεί ότι οι λυχνίες με επίπεδη οθόνη χρειάζονται ιδιαίτερα γερή κατασκευή, γιατί η έλλειψη καμπυλότητας δεν τις βοηθάει να αντιμετωπίσουν τις τεράστιες εξωτερικές δυνάμεις που προκαλούνται από την ατμοσφαιρική πίεση.

Παρ' όλα τα παραπάνω προβλήματα, σήμερα κατασκευάζονται αρκετές λυχνίες CRT με εντελώς επίπεδη οθόνη. Όλες τους όμως έχουν το εξής μειονέκτημα: Όταν τις παρατηρούμε από μικρή απόσταση, τα αντικείμενα που απεικονίζονται δίνουν την εντύπωση ότι καμπυλώνουν προς τα μέσα.

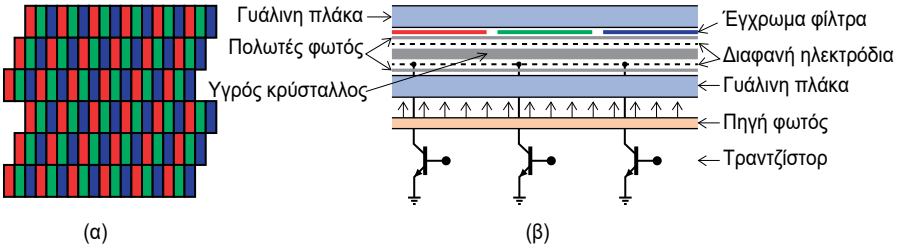
8.2.5 Άλλες επίπεδες οθόνες

Όπως είδαμε στην παράγραφο 8-2, επικρατέστερη εναλλακτική τεχνολογία απέναντι στις λυχνίες CRT αποτελούν οι οθόνες υγρών κρυστάλλων και οι οθόνες πλάσματος. Λόγω του τρόπου κατασκευής τους, αυτές οι οθόνες είναι εντελώς επίπεδες.

Οι ***οθόνες υγρών κρυστάλλων*** ή οθόνες LCD (ελ–σι–ντι, από το Liquid Crystal Display) βασίζουν τη λειτουργία τους σε ορισμένες υγρές χημικές ενώσεις, οι οποίες αλλάζουν οπτικές ιδιότητες, ανάλογα με το αν βρίσκονται ή δε βρίσκονται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Αυτές οι ουσίες τοποθετούνται με μορφή λεπτού στρώματος ανάμεσα σε διαφανή ηλεκτρόδια και με τη συνεργασία άλλων οπτικών συστημάτων

(πολωτών του φωτός, έγχρωμων φίλτρων κλπ.) φαίνονται διαφανείς ή αδιαφανείς, ανάλογα με το αν στα ηλεκτρόδια εφαρμόζεται ή δεν εφαρμόζεται τάση. Οι οθόνες φωτίζονται από πίσω με τη βοήθεια μιας επιφανειακής πηγής φωτός.

Οι οθόνες LCD χωρίζονται σε εικονοστοιχεία (pixels) τοποθετημένα σε σειρές και στήλες. Στις έγχρωμες οθόνες κάθε εικονοστοιχείο αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες διατάξεις υγρών κρυστάλλων, μπροστά σε κάθε μια από τις οποίες υπάρχει έγχρωμο φίλτρο μ' ένα από τα τρία βασικά χρώματα. Η ηλεκτρική τάση εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια κάθε διάταξης μέσω ενός τρανζίστορ που λειτουργεί σαν διακόπτης. Έτσι, αν η οθόνη έχει 500.000 εικονοστοιχεία, υπάρχουν συνολικά 1.500.000 τρανζίστορ, καθένα από τα οποία λειτουργεί ανεξάρτητα από τα άλλα. Η διάταξη και η δομή των εικονοστοιχείων μιας οθόνης LCD φαίνεται στο σχήμα 8-23.



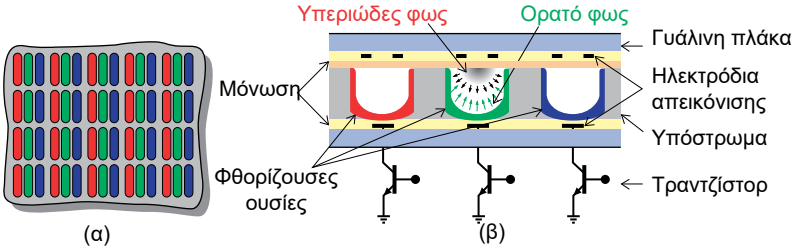
Σχήμα 8-23: *Εικονοστοιχεία οθόνης LCD (α) και δομή ενός εικονοστοιχείου (β)*

Όταν διεγείρεται κάποιο τρανζίστορ, ο υγρός κρύσταλλος πάνω από το αντίστοιχο ηλεκτρόδιο γίνεται διαφανής και το φως της πηγής διέρχεται και χρωματίζεται από το έγχρωμο φίλτρο. Η ένταση του φωτός μπορεί να ρυθμιστεί κάνοντας το τρανζίστορ να αναβοσβήνει με υψηλή συχνότητα και διαφορετικό λόγο διάρκειας του ανάμματος προς το σβήσιμο.

Οι οθόνες LCD χαρακτηρίζονται από τις γεωμετρικά τέλειες απεικονίσεις τους, αλλά η φωτεινότητά τους είναι αρκετά μικρότερη απ' αυτή των οθονών CRT. Από τον τρόπο λειτουργίας τους γίνεται φανερό ότι αυτές οι οθόνες είναι ψηφιακές συσκευές. Για να λειτουργήσουν με το αναλογικό τηλεοπτικό σήμα, χρειάζονται ένα μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό. Το γεγονός αυτό, αλλά και η μεγάλη δυσκολία κατασκευής τους, κρατούν το κόστος τους υψηλά. Έτσι οι οθόνες LCD τοποθετούνται κυρίως σε φορητούς υπολογιστές, επειδή έχουν μικρό πάχος και βάρος και χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος. Εν τούτοις έχουν κατασκευαστεί και οθόνες τηλεοράσεων LCD μεγέθους έως και 40 ιντσών με τεράστιο προς το παρόν κόστος.

Οι οθόνες πλάσματος βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας με τις λάμπες φθορισμού ή τα φώτα νέον. Μια οθόνη πλάσματος αποτελείται από περίπου ένα εκατομμύριο μικροσκοπικές λυχνίες φθορισμού τοποθετημένες πάνω σ' ένα υπόστρωμα. Οι λυχνίες αυτές είναι οργανωμένες σε τριάδες, αποτελούμενες από

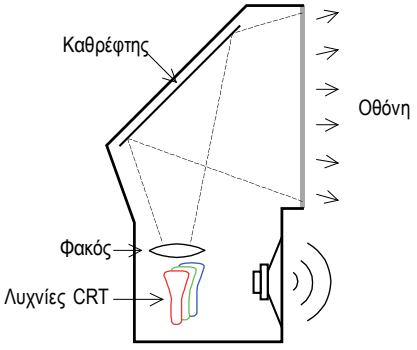
τα τρία βασικά χρώματα. Το φως που εκπέμπεται από κάθε λυχνία ελέγχεται από το τηλεοπτικό σήμα, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται απ' όλες μαζί τις λυχνίες μια πλήρης τηλεοπτική εικόνα. Ο έλεγχος της εκπομπής φωτός γίνεται με τρανζίστορ, ακριβώς όπως στις οθόνες LCD (σχήμα 8-24).



Σχήμα 8-24: *Εικονοστοιχεία οθόνης πλάσματος (α) και δομή ενός εικονοστοιχείου (β)*

Επειδή οι οθόνες πλάσματος μπορούν να παραχθούν σε μεγάλα μεγέθη με μικρό πάχος, αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον ως οθόνες τηλεόρασης για τοποθέτηση στον τοίχο. Η φωτεινότητά τους είναι μεγαλύτερη από των οθονών LCD, αλλά σαφώς μικρότερη από των οθονών CRT. Προς το παρόν οι οθόνες πλάσματος παραμένουν πολύ ακριβές.

Στην κατηγορία των επίπεδων οθονών μπορούν να ενταχθούν και οι οθόνες οπίσθιας προβολής. Αυτές περιέχουν τρεις μικρές μονόχρωμες λυχνίες CRT (5 ή 6 ιντσών) υψηλής φωτεινότητας, που αναπαράγουν την ίδια εικόνα σε κόκκινο, πράσινο και μπλε χρώμα αντίστοιχα. Με τη βοήθεια κατάλληλων φακών και ενός καθρέφτη οι λυχνίες προβάλλουν τις εικόνες τους σε σύμπτωση στο πίσω μέρος μιας επίπεδης οθόνης από θαμπόγυαλο. Με τον τρόπο αυτό παράγεται μια μεγάλη εικόνα σε οθόνη που έχει μέγεθος συνήθως μεταξύ 45 και 50 ιντσών (σχήμα 8-25). Οι οθόνες οπίσθιας προβολής χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές «οικιακού κινηματογράφου».





Σχήμα 8-25: *Οθόνη οπίσθιας προβολής*

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

● Οι έγχρωμοι και οι ασπρόμαυροι τηλεοπτικοί δέκτες είναι συμβατοί μεταξύ τους. Καθένας μπορεί να αναπαράγει τα σήματα που προορίζονται για τον άλλο. Για το λόγο αυτό ένα μεγάλο μέρος από τα κυκλώματά τους είναι κοινό στους δύο τύπους.

● Οι τηλεοπτικοί δέκτες είναι υπερετερόδυνοι. Περιλαμβάνουν τμήμα εισόδου, σάρωσης και συγχρονισμού, εικόνας και ήχου.

● Το τμήμα εισόδου περιλαμβάνει ενισχυτή υψηλής συχνότητας, μείκτη, τοπικό ταλαντωτή και ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας. Η καμπύλη απόκρισης του ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας είναι ιδιόμορφη, για να μπορεί να επεξεργάζεται κατάλληλα τα σήματα εικόνας και ήχου.

● Το τμήμα εικόνας του τηλεοπτικού δέκτη χωρίζεται στο τμήμα φωτεινότητας και στο τμήμα χρωμικότητας και περιλαμβάνει τα στάδια του φωρατή εικόνας, του αποκωδικοποιητή χρώματος, των ενισχυτών εικόνας και της βαθμίδας αυτόματου ελέγχου της απολαβής (AGC).

● Ο αποκωδικοποιητής χρώματος αξιοποιεί τα ειδικά σήματα που υπάρχουν στο έγχρωμο τηλεοπτικό πρόγραμμα, για να παράγει έγχρωμη εικόνα. Τα σήματα αυτά εκπέμπονται κωδικοποιημένα, για να μην επηρεάζουν τη λειτουργία των ασπρόμαυρων τηλεοπτικών δεκτών.

● Υπάρχουν τρία συστήματα κωδικοποίησης - αποκωδικοποίησης χρώματος. Το Αμερικανικό NTSC, το Γερμανικό PAL και το Γαλλικό SECAM. Αυτά διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο διαμόρφωσης - αποδιαμόρφωσης της πληροφορίας χρώματος, στο πλήθος και την τιμή των χρωμοφερουσών συχνοτήτων.

● Ο ήχος του τηλεοπτικού προγράμματος μεταδίδεται με διαμόρφωση FM πάνω σε μια φέρουσα συχνότητα, που ονομάζεται «υπενδιάμεση συχνότητα ήχου». Έτσι, το τμήμα ήχου είναι ένας τροποποιημένος δέκτης FM.

● Το τμήμα σάρωσης και συγχρονισμού του δέκτη αξιοποιεί τους παλμούς συγχρονισμού που υπάρχουν στο σύνθετο τηλεοπτικό σήμα, για να διεγείρει τις γεννήτριες οριζόντιας και κατακόρυφης σάρωσης. Ο ενισχυτής οριζόντιας σάρωσης χρησιμοποιείται και για την παραγωγή της υπερυψηλής τάσης που χρειάζεται για τη λειτουργία της οθόνης.

● Το τροφοδοτικό του δέκτη είναι ηλεκτρονικό και προσφέρει οικονομία στην κατασκευή και ενσωματωμένο κύκλωμα ηλεκτρονικής ασφάλειας.

● Η συντριπτική πλειονότητα των τηλεοπτικών δεκτών χρησιμοποιεί για οθόνη τη λυχνία καθοδικών ακτίνων (CRT). Αυτή περιλαμβάνει ένα ηλεκτρονικό πυροβόλο, μια φθορίζουσα επικάλυψη, ένα σύστημα εστίασης και ένα σύστημα απόκλισης της ηλεκτρονικής δέσμης.

● Οι έγχρωμες οθόνες CRT έχουν κατά κανόνα τρεις ηλεκτρονικές δέσμες, που προέρχονται από τρία (ή ένα) ηλεκτρονικά πυροβόλα, και φθορίζουσα επικάλυψη οργανωμένη σε τριάδες διαφορετικών «φωσφόρων», που εκπέμπουν κόκκινο, πράσινο και μπλε φως.

● Η οργάνωση των ηλεκτρονικών πυροβόλων και των έγχρωμων φωσφόρων στην οθόνη δίνει διάφορους τύπους λυχνιών CRT. Απ' αυτούς ο πιο διαδεδομένος τύπος έχει ευθυγραμμισμένα ηλεκτρονικά πυροβόλα και τριάδες φωσφόρων σε κατακόρυφες λωρίδες.

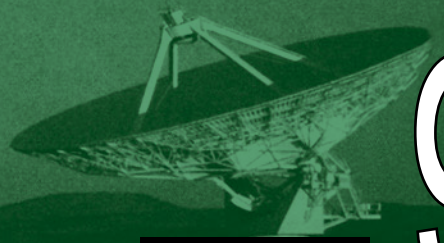
● Οι οθόνες CRT κανονικά έχουν σφαιρική επιφάνεια. Για να βελτιωθεί η άνεση της παρατήρησης, οι οθόνες κατασκευάζονται περισσότερο επίπεδες. Αυτές απαιτούν ειδικά συστήματα διόρθωσης των παραμορφώσεων της εικόνας που προκαλούν.

● Για την κατασκευή εντελώς επίπεδων οθονών χρησιμοποιούνται και οι τεχνολογίες υγρών κρυστάλλων και πλάσματος. Αυτές δίνουν οθόνες με ελάχιστο πάχος και εικόνα χωρίς καθόλου γεωμετρικές παραμορφώσεις, αλλά με πολύ μεγάλο, προς το παρόν, κόστος.

● Οι οθόνες οπίσθιας προβολής είναι και αυτές εντελώς επίπεδες. Χρησιμοποιούν μικρές λυχνίες CRT, των οποίων προβάλλουν την εικόνα στο πίσω μέρος μιας μεγάλης οθόνης από θαμπόγυαλο.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Τι σημαίνει ότι οι έγχρωμοι κι οι ασπρόμαυροι τηλεοπτικοί δέκτες είναι συμβατοί μεταξύ τους;
2. Τι μορφή έχει και τι περιλαμβάνει το τιούνερ ενός τηλεοπτικού δέκτη;
3. Ποιο είναι το απλοποιημένο δομικό – διάγραμμα ενός τηλεοπτικού δέκτη;
4. Ποια μορφή έχει η καμπύλη απόκρισης του ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας του τηλεοπτικού δέκτη και για ποιο λόγο είναι έτσι;
5. Ποια είναι η λειτουργία της βαθμίδας AGC στον τηλεοπτικό δέκτη;
6. Ποια είναι η λειτουργία του ενισχυτή φωτεινότητας και ποιος είναι ο ρόλος της γραμμής καθυστέρησης που τοποθετείται στην είσοδό του;
7. Τι ονομάζουμε χρωμοφέρουσες συχνότητες και ποιος είναι ο ρόλος τους;
8. Ποια συστήματα κωδικοποίησης του τηλεοπτικού χρώματος υπάρχουν παγκοσμίως; Πόσες χρωμοφέρουσες και ποιο τύπο διαμόρφωσης χρησιμοποιεί το κάθε σύστημα;
9. Πώς λειτουργεί ο αποκωδικοποιητής NTSC;
10. Πώς λειτουργεί ο αποκωδικοποιητής PAL;
11. Πώς λειτουργεί ο αποκωδικοποιητής SECAM;
12. Τι ονομάζεται υπενδιάμεση συχνότητα ήχου και πώς λειτουργεί το τμήμα ήχου του τηλεοπτικού δέκτη;
13. Πώς αξιοποιούνται οι παλμοί συγχρονισμού γραμμών του τηλεοπτικού σήματος; Πώς επηρεάζουν την παραγωγή υπερυψηλής τάσης και τη λειτουργία του AGC;
14. Πώς λειτουργεί το ηλεκτρονικό τροφοδοτικό του τηλεοπτικού δέκτη;
15. Ποια στοιχεία περιλαμβάνει μια λυχνία CRT και ποιο σκοπό εξυπηρετεί το καθένα;
16. Σε ποιους τύπους διακρίνονται οι έγχρωμες οθόνες CRT;
17. Ποιο σκοπό εξυπηρετούν η μάσκα, το πλέγμα και οι σχισμές σκιάς;
18. Ποια προβλήματα δημιουργεί η απεικόνιση πάνω στις επίπεδες οθόνες λυχνιών CRT και πώς τα αντιμετωπίζουμε;
19. Πώς λειτουργούν οι οθόνες υγρών κρυστάλλων;
20. Πώς λειτουργούν οι οθόνες πλάσματος;
21. Πώς λειτουργούν οι οθόνες οπίσθιας προβολής;



Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τεχνικές διαμόρφωσης ψηφιακών σημάτων και γίνεται αναφορά στην ψηφιακή τηλεόραση και τις υπηρεσίες που προσφέρει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

9.1 Ψηφιακές τεχνικές μετάδοσης

9.1.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκαν οι αναλογικές τεχνικές μετάδοσης πληροφοριών. Σ' αυτές το βασικό σήμα στην έξοδο του μικροφώνου ή της κάμερας είναι αναλογικό (συνεχής συνάρτηση) και αντιπροσωπεύει το φυσικό δεδομένο, τον ήχο ή την εικόνα. Μελετήθηκαν επίσης αναλυτικά οι διαδικασίες διαμόρφωσης πλάτους και συχνότητας.

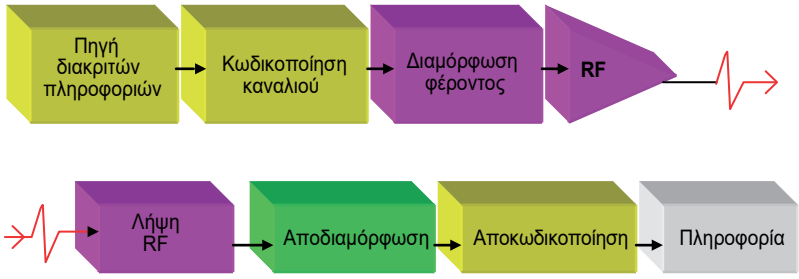
Η ανάπτυξη της ψηφιακής τεχνολογίας, των ψηφιακών συστημάτων και των υπολογιστών έδωσαν τα τελευταία χρόνια ώθηση στην ανάπτυξη των **ψηφιακών τεχνικών μετάδοσης**, που κερδίζουν συνεχώς έδαφος στις εφαρμογές των τηλεπικοινωνιών. Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρήσουμε μια εισαγωγή στις τεχνικές των ψηφιακών επικοινωνιών και θα γνωρίσουμε βασικές εφαρμογές τους.

Στις ψηφιακές επικοινωνίες η μετάδοση αφορά διακριτά σήματα, που συνήθως ονομάζονται σύμβολα. Η πληροφορία είναι συνδυασμός αυτών των συμβόλων που μεταδίδονται διαδοχικά με τρόπο που ο δέκτης μπορεί και αναπαράγει

την πληροφορία. Το σύνολο των διακριτών συμβόλων αποτελούν για το ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα την πηγή της πληροφορίας (σε αντίθεση με το αναλογικό φυσικό δεδομένο στα αναλογικά συστήματα πληροφοριών).

Για παράδειγμα, το σύνολο των γραμμάτων του αλφαβήτου και το σύνολο των σημείων στίξης που αρκούν για τη διατύπωση και τη μετάδοση του γραπτού λόγου (κειμένου) αποτελούν διακριτή πηγή πληροφορίας, σε αντίθεση με τη συνεχή (αναλογική) πηγή φυσικών δεδομένων, που είναι ο προφορικός λόγος.

Στο σχήμα 9.1.1 δίνεται το γενικό διάγραμμα ενός ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Το πρώτο στάδιο αντιπροσωπεύει την πηγή των διακριτών συμβόλων ή καταστάσεων.

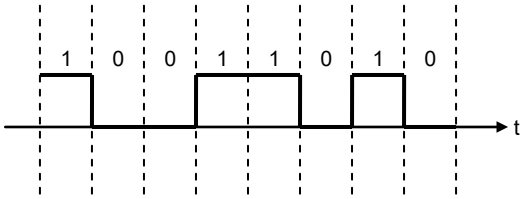


Σχήμα 9.1.1: *Γενικό διάγραμμα ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος*

Από την άλλη πλευρά τα ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα (λογικά κυκλώματα) διαχειρίζονται και επεξεργάζονται **ψηφιακά δυαδικά στοιχεία (bits) '0' ή '1'** δύο καταστάσεων. Στο σχήμα 9.1.2 παρουσιάζεται ένα απλό δυαδικό σήμα από διαδοχικά στοιχεία '0' και '1', που εναλλάσσονται χωρίς νεκρό χρόνο μεταξύ τους (σήμα NRZ: Non Return Zero).

Είναι λοιπόν απαραίτητο τα διακριτά σύμβολα της πηγής να υποστούν ψηφιακή κωδικοποίηση, έτσι ώστε να αντιπροσωπευθούν στη συνέχεια από ένα συγκεκριμένο αριθμό (ομάδα) ψηφιακών δυαδικών στοιχείων (παλμών, bits) τα οποία, είτε απ' ευθείας είτε, αφού διαμορφώσουν ένα φέρον σήμα, θα μετά-ταξιδέψουν στο κανάλι μετάδοσης. Είναι ο ρόλος του δεύτερου σταδίου, που στο γενικό διάγραμμα του σχήματος 9.1.1 σημειώνεται με την ένδειξη κωδικοποιητής καναλιού.

Για παράδειγμα, είναι γνωστός από τα μαθήματα ψηφιακών ηλεκτρονικών **ο κώδικας ASCII (8 bits)** που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίση όλων των γραμμάτων του αλφαβήτου, των αριθμών 0-9, των σημείων στίξης και διάφορων βοηθητικών λειτουργιών διαχείρισης του πληκτρολογίου ηλεκτρονικού υπολογιστή για τη γραφή κειμένου.



Σχήμα 9.1.2: *Μορφή ψηφιακού σήματος δύο καταστάσεων (NRZ)*

Στο δέκτη υπάρχει η αντίστροφη διαδικασία. Λήψη της κωδικοποιημένης πληροφορίας, αποκατάστασης των συμβόλων και σύνθεσης της πληροφορίας. Ο τρόπος κωδικοποίησης της πληροφορίας είναι από τις βασικότερες διεργασίες σ' ένα ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Η κωδικοποίηση γίνεται με τρόπο που να επιτρέπει την ανίχνευση ενδεχόμενων λαθών στην αποκωδικοποίηση του σήματος. Επιπλέον στο κωδικοποιημένο σήμα ενσωματώνονται οι βοηθητικές πληροφορίες χρονισμού των κυκλωμάτων του δέκτη, ώστε να καταφέρει να αποκωδικοποιεί σωστά την πληροφορία (π.χ. ρολόι χρονισμού ή παλμοί έναρξης-start και τέλους-stop του κωδικοποιημένου συμβόλου).

Η πηγή διακριτών συμβόλων χαρακτηρίζεται από το σύνολο των συμβόλων που περιλαμβάνει. Θεωρώντας Κ το σύνολο των διαφορετικών καταστάσεων (συμβόλων) μιας πηγής, **ως ποσότητα επιλογής (decision content)** της πηγής ορίζουμε τη δυνατότητα που έχει να βρεθεί σε μια από αυτές τις καταστάσεις. Ποσοτικά η απόφαση επιλογής εκφράζεται από τη σχέση

$$\mathbf{D = \log_2 K} \qquad (1)$$

(όπου $\log_2$ K είναι ο λογάριθμος του Κ με βάση το 2)
και εκφράζει έμμεσα τον αριθμό των δυαδικών συμβόλων '0' και '1' που απαιτούνται για την κωδικοποίηση της κάθε κατάστασης (bits/σύμβολο).

Εφαρμογή: Όταν Κ = 2, τότε D = 1. Δηλαδή απαιτείται μόνο ένα δυαδικό σύμβολο για να κωδικοποιηθούν οι δυο καταστάσεις της πηγής. Παράδειγμα αποτελεί η επιλογή «άσπρου», «μαύρου»: Το άσπρο κωδικοποιείται από το δυαδικό '0'. Το μαύρο από το δυαδικό '1'.

Αν Κ = 4, τότε D = 2. Δηλαδή, απαιτούνται δύο δυαδικά σύμβολα για την κωδικοποίηση τεσσάρων συμβόλων της πηγής. Παράδειγμα, για σύνολο τεσσάρων σύμβολων Α, Β, Γ και Δ μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κωδικοποίηση αντίστοιχα (00), (01), (10), (11).

Για Κ = 8, D = 3, δηλαδή απαιτούνται 3 bits για την κωδικοποίηση κ.λ.π.

Αντίστροφα σκεπτόμενοι με D = 8 (δηλαδή 8 bits) μπορούν να κωδικοποιηθούν $K = 2^8 = 256$ ανεξάρτητα σύμβολα μιας πηγής.

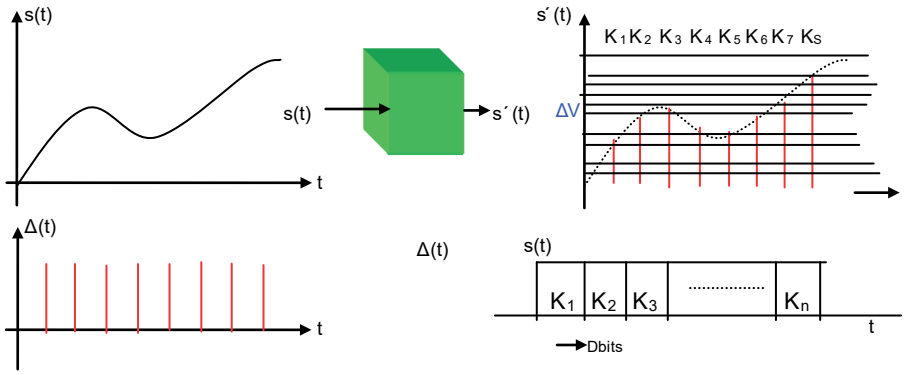
Τα ψηφιακά δυαδικά σύμβολα μεταδίδονται στο κανάλι μετάδοσης. Δύο πρακτικές μπορούν να ακολουθηθούν:

• **Μετάδοση βασικής ζώνης.** Στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι να στέλνονται απ' ευθείας τα ψηφιακά δυαδικά στοιχεία της κωδικοποιημένης πληροφορίας (ομάδες των D bits) μαζί με τα απαραίτητα σήματα χρονισμού.

• **Με διαμόρφωση φέροντος.** Η κωδικοποιημένη πληροφορία διαμορφώνει ένα χαρακτηριστικό ημιτονικού φέροντος, δηλαδή το πλάτος, τη συχνότητα ή τη φάση. Πρόκειται για τις ψηφιακές διαμορφώσεις αναλογικού φέροντος. Η διαμόρφωση μπορεί να γίνει ανά σύμβολο, οπότε κάθε σύμβολο αντιστοιχίζεται σε συγκεκριμένη διακριτή τιμή (από Κ διαφορετικές τιμές) πλάτους συχνότητας ή φάσης του φέροντος ή ανά bit πληροφορίας. Οπότε έχουμε τις δυαδικές (binary) διαμορφώσεις όπου δύο διακριτές τιμές του πλάτους της συχνότητας ή της φάσης του φέροντος σήματος αντιπροσωπεύουν τα δυαδικά στοιχεία '0' ή '1 ='. Κάποιες μεθοδολογίες αυτών των διαμορφώσεων θα εξεταστούν στις επόμενες παραγράφους.

9.1.2 Δειγματοληψία και ψηφιοποίηση αναλογικού σήματος

Στην περίπτωση που θέλουμε με ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα να μεταδώσουμε αναλογικά σήματα, π.χ. φωνή ή εικόνα, προηγείται η διαδικασία μετατροπής του αναλογικού σήματος σε διακριτό σήμα, το οποίο στη συνέχεια κωδικοποιείται με ψηφιακά δυαδικά σύμβολα. Η διαδικασία αυτή, γνωστή με τον όρο **«δειγματοληψία του σήματος»**, περιγράφεται στο σχήμα 9.1.3.



Σχήμα 9.1.3: *Διαδικασία δειγματοληψίας σήματος και μετάδοσης της πληροφορίας*

Το αναλογικό σήμα αντικαθίσταται από ένα σύνολο διακριτών δειγμάτων που λαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, αφού το σήμα πολλαπλασιάζεται με ένα παλμικό σήμα Δ(t) που ελέγχει το διακόπτη του σχήματος. Αν η συχνότητα του παλμικού σήματος Δ(t), που ονομάζεται **«συχνότητα δειγματοληψίας»**, ικανοποιεί τη συνθήκη

$$f_{\Delta} \geq 2F_{max} \qquad (2)$$

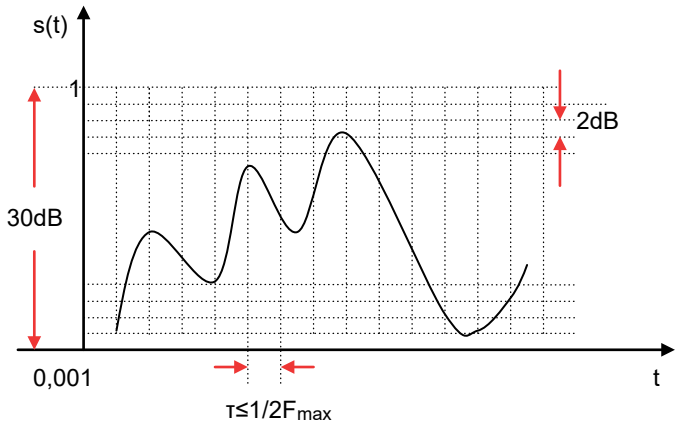
(όπου F_{max} η μεγίστη συχνότητα του αρχικού βασικού σήματος s(t)), αποδεικνύεται ότι το σήμα s΄(t) που προκύπτει απ' αυτή τη διαδικασία περιέχει την ίδια ποσότητα πληροφορίας με το αρχικό σήμα και μπορεί να το αντιπροσωπεύσει στην περαιτέρω διαδικασία μετάδοσης. Για παράδειγμα, στην τηλεφωνία, όπου F_{max} = 3400 Hz, επιλέγεται συχνότητα δειγματοληψίας $f_Δ \approx 7$ kHz.

Ο ελάχιστος αριθμός των δειγμάτων (διακριτών καταστάσεων ή συμβόλων) ανά μονάδα του χρόνου είναι:

$$\mathbf{Rs = R_Δ = f_Δ = 2F_{max}} \qquad (3)$$

Τα δείγματα του σήματος λαμβάνονται με διακριτές στάθμες πλάτους (κβαντοποιείται η τιμή τους με την επιθυμητή ακρίβεια ΔV). Έτσι αποτελούν πλέον την πηγή των διακριτών καταστάσεων (συμβόλων) και κωδικοποιούνται μ' ένα σύνολο από D bits. Αυτή η κωδικοποίηση, γνωστή με τον όρο PCM (Pulse Code Modulation), αποτελεί την προς μετάδοση ψηφιακή πληροφορία.

Ας εξετάσουμε πάλι το παράδειγμα τηλεφωνικού σήματος ομιλίας. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι η δυναμική ενός ακουστικού σήματος είναι της τάξης των 30 dB. Δηλαδή, ο λόγος του πιο δυνατού ήχου (μέγιστο κατώφλι) προς τον ελάχιστο ψίθυρο που μπορεί να γίνει αντιληπτός (κάτω κατώφλι) είναι 1000/1. Το πείραμα επίσης έχει επιβεβαιώσει ότι η ευαισθησία του ανθρώπινου αισθητηρίου της ακοής είναι της τάξης των 2 dB (δηλαδή, διαφοροποιήσεις ήχων μικρότερες των 2 dB δε γίνονται αντιληπτές). Αυτό σημαίνει ότι στην προσπάθεια μας να μετατρέψουμε το αναλογικό σήμα του ήχου σε πηγή διακριτών πληροφοριών μπορούμε να κβαντοποιήσουμε τις διάφορες στάθμες με ακρίβεια (βήμα) 2dB (σχήμα 9.1.4).



Σχήμα 9.1.4: *Δειγματοληψία και κβαντοποίηση σήματος ήχου*

Δημιουργούνται έτσι:

K = 30/2 = 15 διακριτές καταστάσεις, για την κωδικοποίηση των οποίων απαιτούνται:

$$\mathbf{D = \log_2 K = \log_2 15 \approx 4 \text{ bits (/δείγμα).}}$$

Το γινόμενο του αριθμού των διακριτών δειγμάτων ανά μονάδα χρόνου (R_s: Symbol Rate) με το πλήθος των απαιτούμενων bits ανά δείγμα δίνει το διαθέσιμο προς μετάδοση πλήθος bits ανά μονάδα χρόνου (ρυθμός bits: Bit Rate). Στο προηγούμενο παράδειγμα, με συχνότητα δειγματοληψίας f_Δ = 7 kHz έχουμε:

$$\mathbf{R = 7 \cdot 10^3 \cdot 4 = 28000\ bits/sec.}$$

9.1.3 Χαρακτηριστικά μιας ψηφιακής μετάδοσης

Αυτό που χαρακτηρίζει μια ψηφιακή μετάδοση είναι η ταχύτητα μετάδοσης των συμβόλων **R_s (symbol rate)** και μετριέται σε Bd (Baud = σύμβολα/sec). Αν η διάρκεια εμφάνισης κάθε συμβόλου είναι T_s, τότε $R_s = 1/T_s$.

Αν **R ο ρυθμός μετάδοσης (bit rate)** της ποσότητας απόφασης επιλογής, που μετριέται σε bits/sec, προφανώς ισχύει:

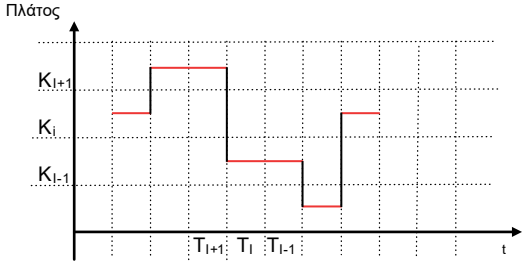
$$\mathbf{R = R_s log_2 K.} \qquad (4)$$

Για K = 2, προφανώς $R = R_s$.

Βασικό πρόβλημα στις ψηφιακές επικοινωνίες είναι ο υπολογισμός του απαιτούμενου φασματικού εύρους καναλιού για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης δυαδικών στοιχείων (‘0’,‘1’) R (bit rate). Ο ρυθμός R (σε bits/sec) ενδιαφέρει το χρήστη και επιδιώκεται για δεδομένο φασματικό εύρος του σήματος να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος.

Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης συμβόλων R_s είναι συνδεδεμένος με τη φυσική ταχύτητα μετάδοσης των σημάτων στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι, δηλαδή με τη μέγιστη φυσική ταχύτητα εναλλαγής κάποιου χαρακτηριστικού του φέροντος σήματος (διακριτική ικανότητα χρόνου του καναλιού) μεταξύ K διακριτών τιμών (διακριτική ικανότητα καταστάσεων του καναλιού).

Στο σχήμα 9.1.5 οι διαφορετικές καταστάσεις αναφέρονται στο πλάτος του σήματος.



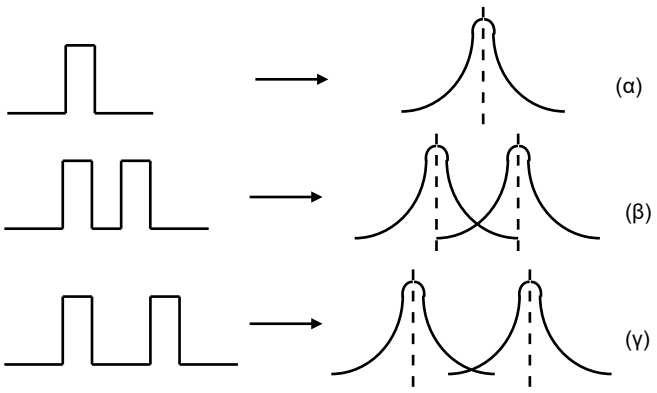
Σχήμα 9.1.5: *Διακριτική ικανότητα χρόνου και πλάτους ψηφιακού καναλιού*

Τελικά ένα ψηφιακό κανάλι μετάδοσης χαρακτηρίζεται από δύο βασικές παραμέτρους:

- Τη μέγιστη δυνατή τιμή του ρυθμού εναλλαγής συμβόλων R_s.
- Τη δυνατότητα που παρέχει, ώστε να μπορούν να διαφοροποιηθούν κατά τη μετάδοση Κ κωδικοποιημένα διαφορετικά σύμβολα (διακριτική ικανότητα καταστάσεων).

Αποδεικνύεται **(κριτήριο Niquist)** ότι σε κανάλι με φασματικό εύρος ζώνης Β ο μέγιστος ρυθμός συμβόλων δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{R_{smax} = 2B} \qquad (5)$$

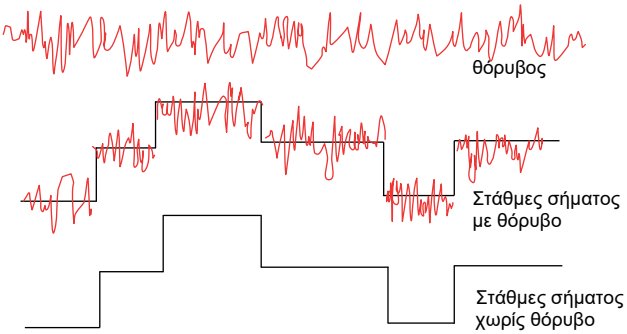


Σχήμα 9.1.6: *Παραμόρφωση (διαπλάτυνση) παλμών λόγω περιορισμού της φασματικής τους ζώνης.*

Ο περιορισμός αυτός (που δε θα τον αποδείξουμε) προέρχεται από το γεγονός ότι τα σήματα που παρουσιάζουν ασυνέχειες (δηλαδή, τα παλμικά σήματα) έχουν άπειρο εύρος φάσματος και, όταν διέρχονται από το οποιοδήποτε σύστημα (με περιορισμένη ζώνη διέλευσης Β), υφίστανται παραμορφώσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.1.6. Συγκεκριμένα, υφίστανται διαπλάτυνση, με αποτέλεσμα, αν ο ρυθμός μετάδοσης τους είναι μεγάλος, τα σύμβολα να αλληλοκαλύπτονται σε μεγάλο βαθμό (αλληλοπαρενοχλούνται: **interference symbol**) και ο δέκτης δεν μπορεί να τα αποκωδικοποιήσει ως ανεξάρτητα διαδοχικά σήματα.

Όσον αφορά το μέγιστο αριθμό των διακριτών καταστάσεων που εξασφαλίζει το κανάλι (διακριτική ικανότητα καταστάσεων) παρουσία θορύβου, αποδεικνύεται **(θεώρημα Shannon)** ότι:

$$\mathbf{K_{max} = (1+S/N)^{1/2},} \qquad (6)$$



Σχήμα 9.1.7: *Περιορισμός της διακριτικής ικανότητας του καναλιού λόγω θορύβου.*

όπου S/N ο λόγος ισχύος του ωφέλιμου σήματος (S) προς την ισχύ του θορύβου (N). Στην περίπτωση αυτή ο περιορισμός προέρχεται από την ασάφεια που δημιουργεί ο θόρυβος στις διακριτές στάθμες του σήματος, όπως φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 9.1.7.

Έτσι, ο μέγιστος αριθμός των bits ανά κατάσταση είναι:

$$D_{max} = \log_2 K_{max} = \log_2(1+S/N)^{1/2} = (½)\log_2(1+S/N) \quad (7)$$

Από τις σχέσεις (5) και (7) εύκολα απορρέει ότι ο μέγιστος ρυθμός R_{max} σε bits/sec σε τηλεπικοινωνιακό κανάλι με τα πιο πάνω χαρακτηριστικά είναι:

$$R_{max} = B\log_2(1+S/N). \quad (8)$$

Το μέγεθος R_{max} καλείται **χωρητικότητα του ψηφιακού καναλιού**.

Στην πράξη τα τηλεπικοινωνιακά κανάλια υστερούν σε επιδόσεις. Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις θεωρούμε ότι:

$$R_s = 1{,}25B \text{ (ή } B = 0{,}8R_s). \quad (9)$$

Εφαρμογή 1: Το φασματικό εύρος ζώνης ψηφιακού διαύλου είναι B = 20 kHz και ο λόγος ισχύος σήματος προς θόρυβο είναι S/N= 15 dB. Να υπολογιστεί η χωρητικότητα του διαύλου, δηλαδή ο μέγιστος θεωρητικός ρυθμός ροής δυαδικών στοιχείων σε bits/sec.

Λύση: *Αφού S/N = 15 db, έχουμε 15 = 10log(S/N), άρα S/N = 31,62.*

Έτσι, $C = B\log_2(1+31{,}62) = 20 \cdot 10^3 \cdot \log_2(32{,}62) = 100.575$ bits/sec.

Εφαρμογή 2: Αναφερόμενοι στο παράδειγμα του ηχητικού σήματος του σχήματος 9.1.4 να προσδιοριστεί ο ανεκτός λόγος ισχύος σήματος προς θόρυβο (S/N) στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι, ώστε ο δέκτης να μπορεί να διακρίνει τις 15 διαφορετικές στάθμες σήματος.

Λύση: *Πρέπει $(1+S/N)^{1/2} \geq 15$, άρα $S/N \geq 224$, απ' όπου $S/N \geq 10\log 224$ (dB), δηλαδή $S/N \geq 23{,}5$ dB.*

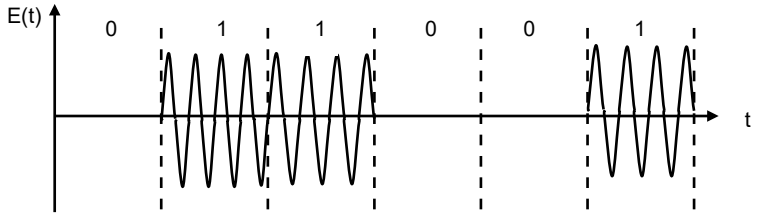
9.2 Ψηφιακές διαμορφώσεις αναλογικού φέροντος

Στις ψηφιακές διαμορφώσεις αναλογικού φέροντος το φέρον είναι ημιτονικό σήμα M(t) και το σήμα διαμόρφωσης είναι ψηφιακή πληροφορία δυαδική (δύο καταστάσεων '0', '1') ή K-αδική (K διαφορετικών καταστάσεων, που αντιπροσωπεύονται από ομάδες – κώδικες των $\log_2 K$ bits). Κάποια παράμετρος (το πλάτος, η συχνότητα ή η φάση) του διαμορφωμένου φέροντος E(t) μεταβάλλεται στο ρυθμό της πληροφορίας.

9.2.1 Διαμόρφωση ASK ή OOK

Πρόκειται για διαμόρφωση πλάτους **(Amplitude Shift Keying)**.

Οι K διακριτές καταστάσεις της πληροφορίας αντιπροσωπεύονται από διαφορετικές τιμές πλάτους του φέροντος σήματος. Στην περίπτωση που K=2 (δυαδικές καταστάσεις) έχουμε την διαμόρφωση **OOK (On-Off Keying)**, που φαίνεται στη γραφική παράσταση του σχήματος 9.2.1.



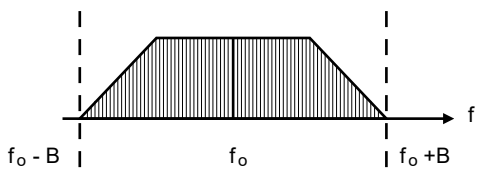
Σχήμα 9.2.1: Διαμόρφωση OOK

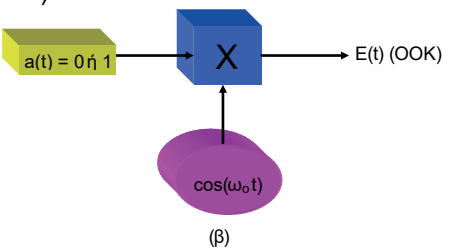
Το διαμορφωμένο σήμα E(t) δίνεται από την έκφραση:

$$\mathbf{E(t) = a(t) \cdot \cos(\omega_o t),} \qquad (10)$$

με a(t) = 0 ή 1.

Η σχέση θυμίζει την πολλαπλασιαστική διαμόρφωση DSB, που γνωρίσαμε στις αναλογικές διαμορφώσεις. Το φάσμα περιλαμβάνει θεωρητικά δύο πλάγιες ζώνες άπειρου εύρους (ένα καθαρό δυαδικό σήμα έχει άπειρο φασματικό εύρος) και φασματική συνιστώσα του φέροντος που οφείλεται στη συνεχή συνιστώσα του διαμορφώνοντος σήματος (σχήμα 9.9.2α).





Σχήμα 9.2.2: (α) Φάσμα σήματος OOK *(β) Γενικό διάγραμμα διαμορφωτή OOK*

Στην πράξη, αν R_s (= R) ο επιθυμητός ρυθμός εναλλαγής της πληροφορίας σε bits/sec, B η φασματική ζώνη του ψηφιακού σήματος, τότε: B = 0,8 R

Το εύρος του φάσματος μετά τη διαμόρφωση είναι:

$$\mathbf{B_{o\lambda} = 2B = 2 \cdot 0{,}8R = 1{,}6R} \qquad (11)$$

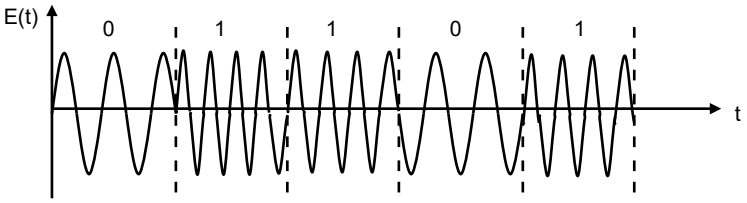
Το γενικό διάγραμμα διαμορφωτή ΟΟΚ φαίνεται στο σχήμα 9.2.2β.

9.2.2 Διαμόρφωση FSK δύο καταστάσεων

Πρόκειται για διαμόρφωση συχνότητας **(Frequency Shift Keying)** όπου η συχνότητα του φέροντος για τις δύο δυαδικές καταστάσεις '0' και '1' παίρνει δύο διακριτές διαφορετικές τιμές:

Για στάθμη '0' : $f = f_o - \Delta f$

Για στάθμη '1' : $f = f_o + \Delta f$



Σχήμα 9.2.3: *Διαμόρφωση FSK*

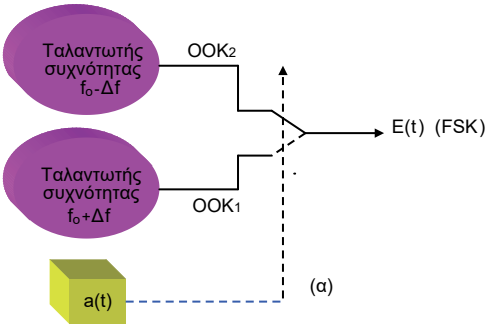
Η χρονική εικόνα του σήματος φαίνεται στο σχήμα 9.2.3 και η μαθηματική έκφραση δίνεται από τη σχέση:

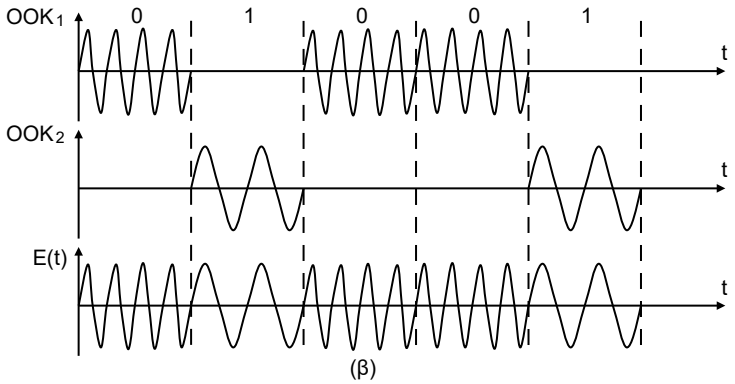
$$\mathbf{E(t) = E_o \cos\{ 2\pi f_o t + 2\pi [a(t)\Delta f] t \},} \qquad (12)$$

όπου a(t) = 1 ή –1.

Η FSK αντιστοιχεί στη διαμόρφωση FM.

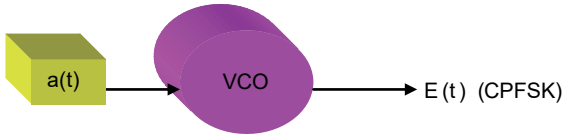
Ο γενικός τελεστής διαμόρφωσης FSK φαίνεται στο σχήμα 9.2.4α. Το σήμα FSK προκύπτει από το συνδυασμό δύο ανεξάρτητων ταλαντωτών με συχνότητες $f_o - \Delta f$ και $f_o + \Delta f$ διαμορφωμένων με ΟΟΚ. Ο μηχανισμός δημιουργίας του FSK σήματος φαίνεται στο σχήμα 9.2.4β και δικαιολογεί την ύπαρξη ενδεχομένως ασυνεχειών στη φάση του σήματος κατά την εναλλαγή των καταστάσεων (σχήμα 9.2.3).





Σχήμα 9.2.4: *(α) Γενικό διάγραμμα διαμορφωτή FSK. (β) Μηχανισμός δημιουργίας του σήματος FSK*

Στην πράξη τις περισσότερες φορές η διαμόρφωση FSK πραγματοποιείται με την αξιοποίηση ενός VCO, που ελέγχεται από το σήμα a(t), όπως φαίνεται στο σχήμα 9.2.5. Στην περίπτωση αυτή, καθώς δε δικαιολογούνται ασυνέχειες των φάσεων του σήματος, μιλούμε για διαμόρφωση CPFSK **(Continuous Phase Frequency Shift Keying):**



Σχήμα 9.2.5: *Διαμορφωτής με VCO (CPFSK)*

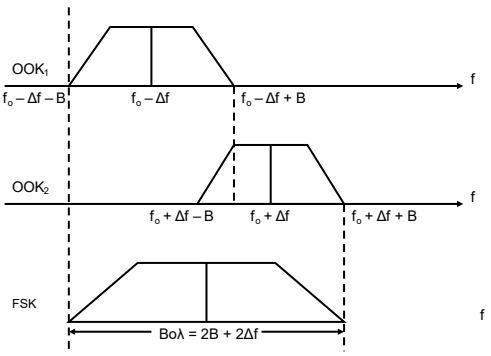
Από τον τρόπο σύνθεσης του σήματος FSK (σχήμα 9.2.4) μπορεί να εκτιμηθεί εύκολα το φάσμα και το εύρος της φασματικής ζώνης. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 9.2.6, απ' όπου φαίνεται ότι μετά τη διαμόρφωση έχουμε:

$$B_{o\lambda} = 2B + 2\Delta f \qquad (13)$$

$$B = 0{,}8R_s \ (R_s = R \ \sigma\varepsilon \ \text{bits/sec})$$

Η σχέση αυτή θυμίζει τη σχέση του Carson στις αναλογικές διαμορφώσεις.

Στην περίπτωση της CPFSK ο ακριβής υπολογισμός του φάσματος είναι δυσκολότερος. Το εύρος φάσματος εξαρτάται από τις παραμέτρους Δf και R, ενώ η ακριβής φασματική εικόνα εξαρτάται από το λόγο Δf/R.



Σχήμα 9.2.6: *Το φάσμα στη διαμόρφωση FSK*

9.2.3 Διαμόρφωση PSK

Στη διαμόρφωση PSK **(Phase Shift Keying)** οι K διακριτές καταστάσεις της πληροφορίας επηρεάζουν την αρχική φάση του φέροντος σήματος.

Η μαθηματική έκφραση του διαμορφωμένου φέροντος δίνεται από τη σχέση:

$$E(t) = E_o\cos[\omega_o t + \varphi_o + a(t).\ 2\pi/K], \qquad (14)$$

όπου $a(t) \in \{0,1,2,...K-1\}$ και φ_o η αρχική φάση του σήματος

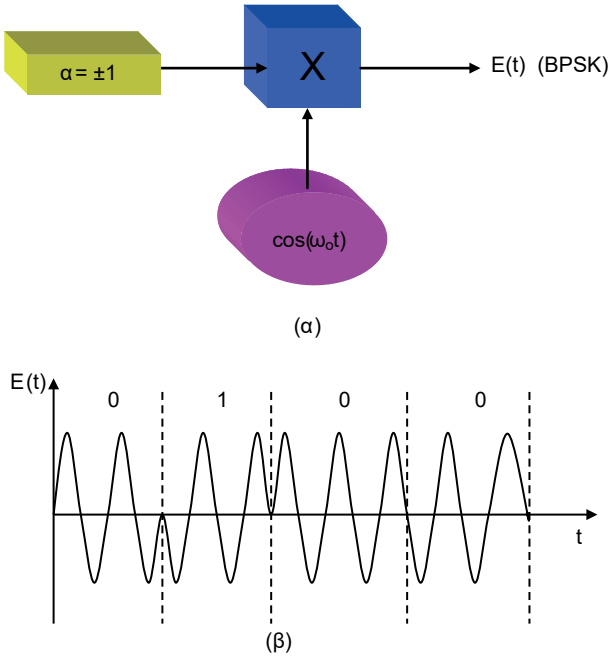
Διαμόρφωση BPSK: Στην περίπτωση που K = 2, (η διαμόρφωση αναφέρεται ως BPSK **(Binary Phase Shift Keying)** και a(t) = 0 ή 1. Άρα:

$$E(t) = E_o\cos[\omega_o t + a(t)\pi\ ] = \pm\ E_o\cos(\omega_o t) \qquad (15)$$

Η BPSK μπορεί να θεωρηθεί ως διαμόρφωση DSBsc (κεφάλαιο 3) με σήμα διαμόρφωσης α = ±1. Ο γενικός τελεστής διαμόρφωσης BPSK δίνεται στο σχήμα 9.2.7α και η χρονική εικόνα του σήματος αποδίδεται στο σχήμα 9.2.7β.

Η φασματική εικόνα είναι η ίδια με την περίπτωση της OOK, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση της BPSK δεν υπάρχει φασματική συνιστώσα του φέροντος (στη συχνότητα f_o).

Διαμόρφωση QPSK: Στην περίπτωση που K = 4, η διαμόρφωση PSK αναφέρεται ως QPSK (**Quadrature Phase Shift Keying).**



Σχήμα 9.2.7: *(α) Διάγραμμα διαμορφωτή BPSK*
(β) Εικόνα του σήματος BPSK

Πρόκειται για διαμόρφωση φάσης τεσσάρων διακριτών καταστάσεων που αντιστοιχούν (όπως φαίνεται στον πίνακα του σχήματος 9.2.9) σε πληροφορία που κωδικοποιείται από ένα ζευγάρι δυαδικών στοιχείων: '00', '01', '10', '11'.

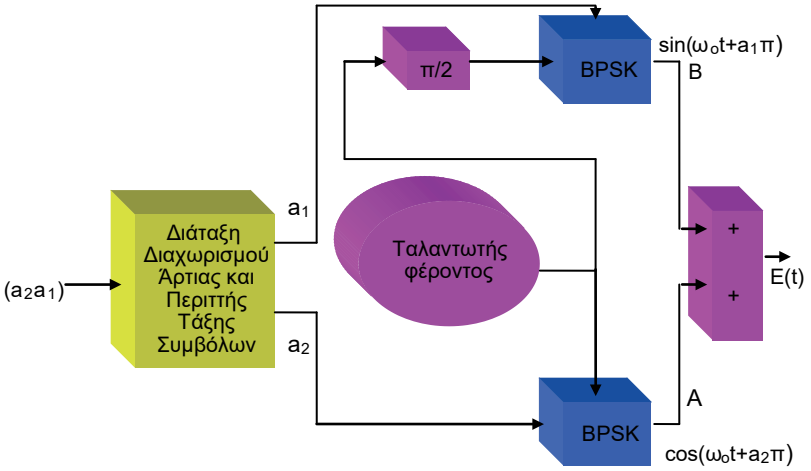
Στο σχήμα 9.2.8 δίνεται το γενικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή QPSK, που αποτελείται από δύο διαμορφωτές BPSK οι οποίοι εργάζονται με ορθογώνια φέροντα (παρουσιάζουν διαφορά φάσης π/2).

Τα σήματα των δύο διαμορφωτών αθροίζονται στην έξοδο. Το διανυσματικό αποτέλεσμα (διαμόρφωση QPSK) εμφανίζεται στο σχήμα 9.2.9.

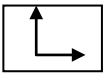
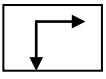
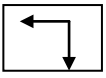
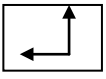
Η μαθηματική έκφραση του διαμορφωμένου σήματος που προκύπτει είναι:

$$\mathbf{E(t) = E_o cos(\omega_o t + \pi/4 + a\pi/2),} \qquad (16)$$

όπου a = 0,1,2,3.



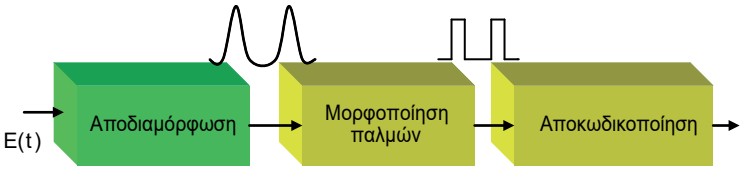
Σχήμα 9.2.8: Γενικό διάγραμμα διαμορφωτή QPSK.

a_2 a_1	Σημείο A	Σημείο B	Διαν. Αποτέλεσμα
0 0	$\cos(\omega_o t)$	$\sin(\omega_o t)$	
0 1	$\cos(\omega_o t)$	$\sin(\omega_o t+\pi)$	
1 1	$\cos(\omega_o t+\pi)$	$\sin(\omega_o t+\pi)$	
1 0	$\cos(\omega_o t+\pi)$	$\sin(\omega_o t+\pi)$	

Σχήμα 9.2.9: Σύνθεση του σήματος QPSK

Η αποδιαμόρφωση των σημάτων OOK, FSK και PSK στο δέκτη γίνεται με τη χρήση σύμφωνου (σύγχρονου) αποδιαμορφωτή.

Στην έξοδο του αποδιαμορφωτή συνήθως οι παλμοί (η ψηφιακή πληροφορία) εμφανίζονται παραμορφωμένοι, λόγω του περιορισμού που υπέστη το φάσμα τους στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Γι' αυτό πάντοτε μετά την αποδιαμόρφωση ακολουθεί στάδιο επαναμορφοποίησης των παλμών (σχήμα 9.2.10).



Σχήμα 9.2.10: *Μορφοποίηση των παλμών μετά την αποδιαμόρφωση*

Υπάρχουν πολλά είδη ψηφιακών διαμορφώσεων ημιτονικού φέροντος που δε θα μελετηθούν εδώ. Η σύγκριση των διαφόρων μεθοδολογιών δεν είναι πάντοτε εύκολη υπόθεση. Το ζητούμενο στις ψηφιακές τηλεπικοινωνίες είναι να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερος ρυθμός πληροφορίας ανά μονάδα χρόνου (μεγάλος όγκος πληροφορίας), με το μικρότερο δυνατό εύρος φάσματος και τη μικρότερη ισχύ φέροντος σήματος. Για τούτο βασική παράμετρος που χαρακτηρίζει τις ψηφιακές διαμορφώσεις και δίνει ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ τους είναι η **φασματική αποτελεσματικότητα *η***. Ορίζεται από τη σχέση:

$$\eta = R/B_{ολ}, \qquad (17)$$

όπου R ο ρυθμός μετάδοσης (το bit rate σε bits/sec) και $B_{ολ}$ η ολική φασματική ζώνη στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι.

Το μέγεθος *η* εξαρτάται από τον τρόπο κωδικοποίησης του ψηφιακού σήματος και το είδος της διαμόρφωσης που θα επιλεγεί. Μετριέται σε bits/sec/Hz.

Με βάση τα παραπάνω, είναι προφανές ότι η διαμόρφωση PSK είναι πιο αποτελεσματική από την FSK και την OOK. Διερευνώντας τις τρεις διαμορφώσεις OOK, FSK και PSK σχετικά με τις επιδόσεις τους στο θόρυβο αποδεικνύεται ότι η διαμόρφωση PSK είναι καλύτερη. Για το ίδιο ποσοστό σφάλματος δυαδικών στοιχείων στην έξοδο (bit error rate) η PSK απαιτεί μισή ισχύ σήματος στην είσοδο του δέκτη. Η αναλυτική μελέτη των επιδόσεων των ψηφιακών διαμορφώσεων σε σχέση με το θόρυβο ξεφεύγει από το πλαίσιο αυτού του μαθήματος.

Εφαρμογή 1: Σε διαμόρφωση OOK η ολική φασματική ζώνη του φέροντος δεν πρέπει να ξεπεράσει τα 100 kHz. Να προσδιοριστεί ο μέγιστος ρυθμός δυαδικών συμβόλων σε bits/sec που μπορούμε να έχουμε.

Λύση: *Στην περίπτωση της OOK ισχύει: $B_{ολ}$ = 1,6R, όπου R ο ρυθμός bits/sec. Έτσι, R = 100000/1,6 = 62500 bits/sec.*

Εφαρμογή 2: Σε δεδομένη εφαρμογή με διαμόρφωση FSK χρησιμοποιούνται ταλαντωτές με συχνότητες f_1 = 1800 Hz (που αντιπροσωπεύει το δυαδικό στοιχείο'1') και f_2 = 1200 Hz (που αντιπροσωπεύει το δυαδικό στοιχείο '0'). Ο ρυθμός μετάδοσης στο κανάλι είναι 1200 bauds. Να προσδιοριστεί το φασματικό εύρος του σήματος στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι.

Λύση: *Αναφερόμενοι στο σχήμα 9.2.6 ισχύει: $B_{ολ} = 2B + 2\Delta f$.*

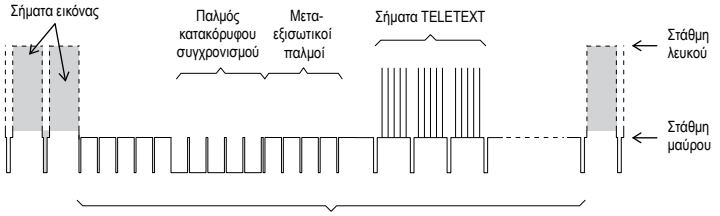
$B = 0,8R_s = 0,8R = 0,8 \cdot 1200 = 960$ Hz και $2\Delta f = f_1 - f_2 = 600$ Hz.

Άρα, $B_{ολ} = 2 \cdot 960 + 600 = 2520$ Hz.

9.3 TELETEXT - ΤΗΛΕΚΕΙΜΕΝΟ

Το TELETEXT (τελετέξτ ή τηλεκείμενο) είναι ένα σύστημα μετάδοσης πληροφοριών, με το οποίο διάφορα στοιχεία μπορούν να διαβιβαστούν μέσω των τηλεοπτικών σημάτων σε κοινούς δέκτες τηλεόρασης. Οι δέκτες πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με ειδικό ηλεκτρονικό κύκλωμα που αποκωδικοποιεί τα σήματα του τελετέξτ και εμφανίζει τα στοιχεία στην οθόνη με μορφή γραμμάτων, αριθμών ή γραφικών συμβόλων. Το σύστημα αυτό είναι μονόδρομο, δηλαδή δεν προσφέρει δυνατότητα αποστολής στοιχείων ή ερωτημάτων στην υπηρεσία εκπομπής και επιτρέπει μόνο να επιλέξουμε από το σύνολο των εκπεμπόμενων πληροφοριών αυτές που επιθυμούμε. Είναι σύστημα συμβατό τόσο με το έγχρωμο όσο και με το ασπρόμαυρο τηλεοπτικό σήμα. Η κωδικοποίηση γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μην παρενοχλεί το κανονικό τηλεοπτικό πρόγραμμα και έτσι δεν χρειάζονται νέες συχνότητες εκπομπής γι' αυτή την υπηρεσία. Με το τελετέξτ εκπέμπονται πληροφορίες γενικού ενδιαφέροντος, όπως μετεωρολογικές προγνώσεις, δρομολόγια μέσων συγκοινωνίας, προγράμματα τηλεοπτικών σταθμών, εμπορικές πληροφορίες, σύντομες ειδήσεις κλπ.

Για τη μετάδοση των δεδομένων το τελετέξτ αξιοποιεί τους κατακόρυφους παλμούς αμαύρωσης. Οι πληροφορίες που εκπέμπονται κωδικοποιημένες μαζί με το πρόγραμμα του σταθμού, τοποθετούνται στο χώρο των παλμών αμαύρωσης μετά τους μεταεξισωτικούς παλμούς και πριν την αρχή σάρωσης του επόμενου πεδίου. Οποιοσδήποτε τηλεοπτικός δέκτης περιέχει τον κατάλληλο αποκωδικοποιητή μπορεί να απεικονίσει τις πληροφορίες. Ο αποκωδικοποιητής μπορεί είτε να προστεθεί εκ των υστέρων, είτε να υπάρχει ενσωματωμένος στο δέκτη από το εργοστάσιο κατασκευής του.



Σχήμα 9-3.1: *Σήματα TELETEXT μέσα στο σύνθετο τηλεοπτικό σήμα (αρνητικής πολικότητας)*

Τα γράμματα, οι αριθμοί και τα σύμβολα που αποτελούν τις ηλεκτρονικές σελίδες του τελετέξτ κωδικοποιούνται στο δυαδικό σύστημα με τον κώδικα ASCII και τοποθετούνται μεταξύ των παλμών συγχρονισμού γραμμών που, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, υπάρχουν «πάνω» σε κάθε παλμό αμαύρωσης πεδίων. Η στάθμη των σημάτων αντιστοιχεί στο 75% της διαφοράς μεταξύ των επιπέδων λευκού και μαύρου του τηλεοπτικού σήματος (σχήμα 9-1).

Το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών παλμών συγχρονισμού γραμμών είναι 52 μsec. Στο διάστημα αυτό τοποθετούνται 360 δυαδικά ψηφία. Για να υπολογίσουμε τη μέγιστη συχνότητα στην οποία αντιστοιχεί αυτό το σήμα, σκεφτόμαστε ως εξής:

Ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής των σημάτων εμφανίζεται, αν τα δεδομένα αποτελούνται από διαδοχικά ψηφία μηδέν και ένα. Κάθε τέτοιο ζευγάρι ψηφίων αντιστοιχεί σε μια περίοδο τετραγωνικού παλμού και έτσι έχουμε 180 περιόδους σε χρονικό διάστημα 52 μsec. Αυτό αντιστοιχεί σε συχνότητα $180:52 \cdot 10^{-6} = 3{,}46$ MHz. Η συχνότητα αυτή καλύπτεται από το εύρος ζώνης των 5 MHz του τηλεοπτικού σήματος, αλλά, επειδή προέρχεται από τετραγωνικούς παλμούς, έχει ισχυρές αρμονικές, που φτάνουν μέχρι τα 40 MHz. Για την αποκοπή αυτών των αρμονικών, το σήμα τελετέξτ διέρχεται από κατάλληλο χαμηλοπερατό φίλτρο.

Από τα 360 ψηφία τα 40 πρώτα χρησιμοποιούνται για συγχρονισμό του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, τα 16 πρώτα ψηφία συγχρονίζουν τη γεννήτρια ωρολογιακών παλμών που υπάρχει στον αποκωδικοποιητή του δέκτη, τα επόμενα 8 ρυθμίζουν τον αποκωδικοποιητή για λήψη άρτιου ή περιττού πεδίου και τα υπόλοιπα 16 μεταφέρουν την πληροφορία για το σημείο στο οποίο θα εμφανιστεί πάνω στην οθόνη κάθε σειρά κειμένου. Τα 320 ψηφία που απομένουν μεταφέρουν τις πληροφορίες που ενδιαφέρουν το χρήστη. Επειδή κάθε χαρακτήρας σχηματίζεται από 8 ψηφία (7 ψηφία του κώδικα ASCII και ένα ψηφίο ισοτιμίας για έλεγχο της ορθότητας λήψης του χαρακτήρα), συμπεραίνουμε ότι σε κάθε γραμμή κειμένου χωρούν 40 χαρακτήρες.

Κάθε σελίδα αποτελείται από 24 γραμμές με 40 χαρακτήρες η καθεμιά. Δεδομένου ότι υπάρχουν 12 γραμμές στη διάρκεια ενός παλμού αμαύρωσης πεδίου ύστερα από τους μεταξισωτικούς παλμούς, καταλαβαίνουμε ότι απαιτούνται δύο πεδία, δηλαδή ένα πλαίσιο, για το σχηματισμό μιας πλήρους σελίδας. Αυτό σημαίνει ότι στο ευρωπαϊκό τηλεοπτικό σύστημα η εκπομπή μιας σελίδας διαρκεί 1/25 του δευτερολέπτου. Περίπου 50-60 τέτοιες σελίδες απαρτίζουν ένα «περιοδικό» (magazine). Η αποστολή κάθε σελίδας γίνεται ανά μισό δευτερόλεπτο και όλο το περιοδικό εκπέμπεται σε περίπου μισό λεπτό. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης χρειάζεται να περιμένει, αφού καλέσει μια σελίδα, το πολύ μισό λεπτό. Η καθυστέρηση μπορεί να είναι μεγαλύτερη, αν το περιοδικό περιέχει περισσότερες σελίδες. Συνήθως, κάθε σταθμός αποστέλλει με το σήμα του αρκετά περιοδικά που περιέχουν πληροφορίες για διάφορα θέματα.

Σε κάθε περιοδικό και σελίδα ο σταθμός προσαρτά έναν υποκώδικα. Αυτός βοηθά στη χρονική κωδικοποίηση των σελίδων και στην επέκταση των δυνατοτή-

των πρόσβασης σε πολλές ξεχωριστές σελίδες για κάθε περιοδικό. Ο χειρισμός του συστήματος γίνεται από το τηλεχειριστήριο του δέκτη. Με τη βοήθειά του ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει ή να τερματίσει την υπηρεσία, να επιλέξει και να καλέσει την επιθυμητή σελίδα πληκτρολογώντας τον αριθμό της από τον πίνακα περιεχομένων της κεντρικής σελίδας της υπηρεσίας, να αναμείξει την κανονική τηλεοπτική εικόνα με το κείμενο, να μεγεθύνει τους χαρακτήρες κλπ. Στο σχήμα 9-3.2 φαίνεται η κεντρική σελίδα τελετέξτ ενός αγγλικού τηλεοπτικού σταθμού.



Σχήμα 9-3.2: *Κεντρική σελίδα περιεχομένων σταθμού με τελετέξτ*

Ο αποκωδικοποιητής που υπάρχει στους εφοδιασμένους με τελετέξτ δέκτες χρησιμοποιεί τους λαμβανόμενους ASCII κώδικες, για να οδηγήσει μια γεννήτρια χαρακτήρων. Η γεννήτρια παράγει τα γράμματα, τους αριθμούς και τα άλλα σύμβολα που εμφανίζονται στην οθόνη, με τον τρόπο που γνωρίσαμε στο κεφάλαιο 2 για την παραγωγή συνθετικής εικόνας. Στο σημείο αυτό εμφανίζεται το κυριότερο πρόβλημα του τελετέξτ στην Ελλάδα και σε άλλες χώρες που δε χρησιμοποιούν λατινικό αλφάβητο. Με τα 7 bit του κώδικα ASCII μπορούν να οριστούν 128 διαφορετικοί χαρακτήρες. Σ' αυτούς περιλαμβάνονται 33 χαρακτήρες ελέγχου, 10 αριθμητικά ψηφία, 52 κεφαλαίοι και πεζοί (δηλαδή μικροί) λατινικοί χαρακτήρες και 33 σημεία στίξης και χαρακτήρες για απλά γραφικά (block graphics). Στο σύνολο αυτό δεν υπάρχει χώρος για χαρακτήρες άλλων γλωσσών.

Στην Ελλάδα δεν υπάρχει προς το παρόν ενιαία αντιμετώπιση του προβλήματος. Οι κρατικοί τηλεοπτικοί σταθμοί εκπέμπουν κανονικό ελληνικό τηλεκείμενο και πρέπει να αλλάξουμε τη μνήμη ROM της γεννήτριας χαρακτήρων του αποκωδικοποιητή μας, για να μπορούμε να το διαβάζουμε. Αν δεν το κάνουμε, βλέπουμε κείμενα με ακατάληπτους λατινικούς χαρακτήρες. Οι υπόλοιποι σταθμοί εκπέμπουν σελίδες με ελληνικό κείμενο, αλλά γραμμένο με κεφαλαίους λατινικούς χαρακτήρες. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί επεμβάσεις στο

κύκλωμα του αποκωδικοποιητή και προσφέρει κείμενο που διαβάζεται σχετικά εύκολα. Δεν πρόκειται όμως για καθαρά «ελληνικό» κείμενο.

Η υπηρεσία τελετέξτ έχει αρκετά μεγαλύτερη δυναμικότητα απ' αυτή που χρησιμοποιούμε. Ενώ, όπως είδαμε, μπορεί να αποστείλει μέχρι 25 σελίδες το δευτερόλεπτο, στέλνει μόνο δύο. Μπορεί λοιπόν να χρησιμοποιηθεί και για άλλες χρήσεις, από τις οποίες μερικές ήδη ξεκίνησαν, ενώ άλλες προβλέπονται στο μέλλον. Έτσι, για παράδειγμα, μέσω τελετέξτ μεταδίδονται από το 1999 τα θέματα των πανελλαδικών εξετάσεων στα εξεταστικά κέντρα, όπως επίσης με τον ίδιο τρόπο μεταδίδονται πληροφορίες χρηματοοικονομικής φύσης, (τιμές μετοχών κλπ.) οι οποίες αξιοποιούνται από προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών διαχείρισης χαρτοφυλακίου. Για τις υπηρεσίες αυτές απαιτούνται ειδικοί αποκωδικοποιητές συνδεδεμένοι με προσωπικούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Γενικά πάντως, η συνεργασία του τελετέξτ με την πληροφορική υπόσχεται να προσφέρει εντυπωσιακές δυνατότητες στο μέλλον.

9.4 Τηλεόραση 16:9 και τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας

Από τις πρώτες ημέρες του κινηματογράφου έγινε αντιληπτό ότι οι θεατές που κάθονταν στο μεσαίο και εμπρόσθιο τμήμα της αίθουσας απολάμβαναν εντονότερα την κινηματογραφική δράση. Αυτό συνέβαινε, γιατί από τις θέσεις αυτές η εικόνα κάλυπτε επιφάνεια μεγαλύτερη από το οπτικό πεδίο του θεατή. Για καλύτερη εκμετάλλευση του φαινομένου οι ταινίες απόκτησαν σύντομα μεγαλύτερο πλάτος και καθιερώθηκαν νέες φόρμες εικόνας, με αποτέλεσμα οι περισσότερες κινηματογραφικές εικόνες να έχουν πλέον πλάτος κατά 85% μεγαλύτερο από το ύψος. (Οι σημερινές ταινίες σινεμασκόπ έχουν πλάτος 235% του ύψους.)

Η τηλεόραση προσπάθησε να ακολουθήσει αυτές τις εξελίξεις, χωρίς μεγάλη αρχικά επιτυχία. Η τεχνολογία των μέσων της δεκαετίας του '50 κατόρθωσε να διαπλατύνει τις οθόνες από λόγο πλευρών 5:4 που είχαν αρχικά σε 4:3, αλλά όχι παραπάνω. Επιπλέον, για να καλυφθεί όλο το οπτικό πεδίο ενός θεατή, αυτός θα έπρεπε να παρακολουθεί την οθόνη από απόσταση όχι μεγαλύτερη από το διπλάσιο του ύψους της. Από τόσο κοντά όμως ξεχωρίζουν οι 625 (ή 525) γραμμές σάρωσης και γίνεται αντιληπτή η περιορισμένη ευκρίνεια της εικόνας.

Για τη βελτίωση της ποιότητας τηλεθέασης έγινε αντιληπτό ότι θα έπρεπε να αυξηθεί το πλήθος των γραμμών σάρωσης και να μεγαλώσει περισσότερο το πλάτος της τηλεοπτικής οθόνης. Αυτό σήμαινε αποδοχή ενός νέου τηλεοπτικού προτύπου, πράγμα που αποτέλεσε το μεγαλύτερο ανασταλτικό παράγοντα στην καθιέρωση της νέας τεχνολογίας.

Οι πρώτες προσπάθειες για τη δημιουργία του νέου πρότυπου που ονομάστηκε «τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας» (HDTV, από το High Definition TeleVision) άρχισαν στην Ιαπωνία στα τέλη της δεκαετίας του '60. Πολύ σύντομα ακολούθησε

και η Ευρώπη με ένα βελτιωμένο σύστημα 625 γραμμών, ενώ η Αμερική καθυστέρησε αρκετά. Παρ' όλα αυτά, η καθυστέρηση της πρόσφερε εν τέλει ένα σημαντικό τεχνολογικό πλεονέκτημα, γιατί επέτρεψε να υιοθετηθεί ένα σύστημα αμιγώς ψηφιακό, σε αντίθεση με το ιαπωνικό και το ευρωπαϊκό, τα οποία ήταν αναλογικά. Σε κάθε περίπτωση πάντως η προσκόλληση στα παλιά πρότυπα αποδείχτηκε πολύ ισχυρή. Έτσι, στην Ιαπωνία οι πρώτες εκπομπές τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας άρχισαν μόλις το 1989, ενώ το ευρωπαϊκό σύστημα εγκαταλείφθηκε οριστικά το 1993. Το αμερικανικό σύστημα τέθηκε για πρώτη φορά σε εφαρμογή το καλοκαίρι του 1999.

Το ιαπωνικό σύστημα HDTV, που ονομάζεται NHK Hi-Vision, χρησιμοποιεί 1125 γραμμές σάρωσης, λόγο πλευρών εικόνας 16:9, ενδιάμεση σάρωση 60 πεδίων το δευτερόλεπτο (30 άρτια, τριάντα περιττά) και ξεχωριστή εκπομπή σημάτων φωτεινότητας και χρωμικότητας, με εύρος ζώνης 20 MHz για τη φωτεινότητα και 10 MHz για τη χρωμικότητα. Το μεγάλο εύρος ζώνης κάνει σχεδόν αδύνατη τη χρήση του στα επίγεια κανάλια ασύρματης εκπομπής, τα οποία είναι ήδη ασφυκτικά κατειλημμένα και από άλλες υπηρεσίες. Γι' αυτό διαδόθηκε μια παραλλαγή του συστήματος για εκπομπή από δορυφόρους άμεσης εκπομπής (DBS), που ονομάζεται σύστημα MUSE. (Multiple sUb-nyquist Sampling and Encoding, πολλαπλή υποδειγματοληψία Nyquist και κωδικοποίηση). Στο σύστημα αυτό γίνεται ψηφιακή επεξεργασία των σημάτων, με σκοπό τη συμπίεση του εύρους ζώνης του οπτικού σήματος στα 8 περίπου MHz. Η συμπίεση γίνεται με δειγματοληψία του αρχικού σήματος που ακολουθείται από υποδειγματοληψία 3:1. Αυτό σημαίνει ότι από κάθε τρεις κουκίδες μιας εικόνας εκπέμπεται μόνο η μία. Έτσι, απαιτούνται τρεις διαδοχικές σαρώσεις της ίδιας γραμμής, για να εμφανιστούν και οι τρεις κουκίδες κάθε τριάδας στην οθόνη. Με τον τρόπο αυτό τα στατικά τμήματα της εικόνας αναπαράγονται με την πλήρη ευκρίνεια του συστήματος. Στα κινούμενα όμως μέρη εμφανίζεται μετατόπιση των κουκίδων από τις αρχικές τους θέσεις, η οποία προκαλεί ένα είδος «μουτζουρώματος» που ελαττώνει την ευκρίνεια περίπου στο μισό. Αυτό συνήθως περνά απαρατήρητο, εκτός από την περίπτωση που ολόκληρη η σκηνή μετακινείται πλάγια (πχ., όταν μετατοπίζεται η κάμερα), οπότε η εικόνα χειροτερεύει αισθητά.

Το ευρωπαϊκό σύστημα ονομάστηκε MAC (Multiplexed Analog Components, πολυπλεγμένες αναλογικές συνιστώσες). Θα χρησιμοποιούσε 625 γραμμές σάρωσης, λόγο πλευρών εικόνας 16:9, ενδιάμεση σάρωση 50 πεδίων το δευτερόλεπτο και δυνατότητα ταυτόχρονης υποστήριξης των συστημάτων PAL και SECAM. Το σύστημα MAC σχεδιάστηκε για εκπομπές από δορυφόρους DBS και για δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης. Στο σύστημα αυτό «πακέτα» σημάτων ήχου και δεδομένων χρωμικότητας και φωτεινότητας θα εκπέμπονταν διαδοχικά κατά τη διάρκεια κάθε οριζόντιας γραμμής σάρωσης. Οι χρωμοδιαφορές του κόκκινου και του μπλε δε θα εκπέμπονταν μαζί, αλλά διαδοχικά σε κάθε επόμενη γραμμή σάρωσης, όπως στο σύστημα SECAM. Οι πληροφορίες της φωτεινότητας θα διαρκούσαν διπλάσιο χρόνο από αυτές της χρωμικότητας, γιατί, όπως ξέρουμε,

η όρασή μας είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητη στο χρώμα απ' ό,τι στη φωτεινότητα των εικόνων. Οι πληροφορίες αυτές θα αποθηκεύονταν σε τρία ξεχωριστά τμήματα μιας ψηφιακής μνήμης στο δέκτη απ' όπου θα ανακτώνταν με τη σωστή σειρά, θα μετατρέπονταν σε αναλογικά σήματα και θα τροφοδοτούσαν τα κατάλληλα κυκλώματα του δέκτη.

Το σύστημα MAC (και οι παραλλαγές του B-MAC και D2-MAC) αποδείχτηκε χαμηλής ποιότητας και γι' αυτό εγκαταλείφθηκε με την προοπτική να χρησιμοποιηθεί το αμερικανικό σύστημα ή κάποιο αντίγραφό του.

Το αμερικανικό σύστημα προέκυψε από τον ανταγωνισμό τουλάχιστο 14 διαφορετικών συστημάτων, που σύντομα κατέληξαν σε τέσσερα. Μεταξύ αυτών δημιουργήθηκε συμμαχία, με σκοπό την ενσωμάτωση των καλύτερων στοιχείων τους σε ένα μόνο σύστημα, το οποίο, όπως είδαμε, είναι εξ ολοκλήρου ψηφιακό. Για τον περιορισμό του εύρους ζώνης συχνοτήτων των σημάτων επιλέχτηκαν τεχνικές συμπίεσης ψηφιακών δεδομένων, γνωστές και δοκιμασμένες από τη βιομηχανία ηλεκτρονικών υπολογιστών. Κάτω από την πίεση των εταιρειών αυτού του χώρου εγκαταλείφθηκε το αρχικό πρότυπο των 1125 γραμμών και 60 πεδίων ανά δευτερόλεπτο και υιοθετήθηκε ένα «ανοιχτό» πρότυπο, με μόνους περιορισμούς να μη χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα εκατομμύριο εικονοστοιχεία για κάθε πλαίσιο και να μην υπερβαίνει, μετά τη συμπίεση, το εύρος ζώνης του ψηφιακού σήματος αυτό μιας συνηθισμένης εκπομπής του συστήματος NTSC.

Με τον τρόπο αυτό κάθε σταθμός εκπομπής και κάθε πιθανός θεατής μπορεί να επιλέξει την ευκρίνεια εικόνας και το είδος των υπηρεσιών που θα χρησιμοποιήσει. Για παράδειγμα, στο κανάλι που εκπέμπεται ένα πρόγραμμα υψηλής ευκρίνειας μπορούν με τις ίδιες τεχνικές συμπίεσης να εκπεμφθούν τέσσερα κανάλια κοινής ευκρίνειας. Γι' αυτό το αμερικανικό σύστημα, αντί να ονομάζεται HDTV, επικράτησε να ονομάζεται DTV (Digital TV, ψηφιακή τηλεόραση).

Τα πρότυπα απεικονίσεων που υποστηρίζονται μεταξύ άλλων είναι τα εξής:

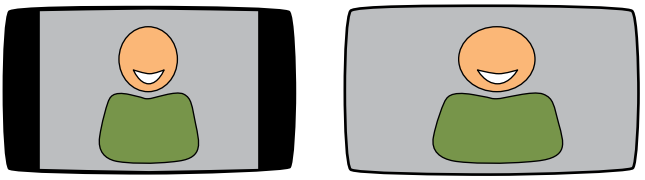
- 480p – 640 × 480 εικονοστοιχεία, προοδευτική σάρωση (4:3)
- 720p – 1280 × 720 εικονοστοιχεία, προοδευτική σάρωση (16:9)
- 1080i – 1920 × 1080 εικονοστοιχεία, ενδιάμεση σάρωση (16:9)

Για συμπίεση του ψηφιακού σήματος χρησιμοποιείται το σύστημα MPEG-2.

Η τωρινή τιμή των συσκευών DTV είναι πολύ υψηλή, αλλά αναμένεται να μειωθεί, όταν αυξηθεί η παραγωγή τους. Σύμφωνα με κυβερνητική οδηγία, θα πρέπει να έχει ολοκληρωθεί η ψηφιοποίηση του τηλεοπτικού συστήματος στην Αμερική μέχρι το τέλος του 2006. Τη χρονιά εκείνη θα ακυρωθούν όλες οι άδειες εκμετάλλευσης για το φάσμα των συχνοτήτων της αναλογικής τηλεόρασης και το φάσμα αυτό θα δημοπρατηθεί για άλλες χρήσεις. Προς το παρόν κυκλοφορεί στην (αμερικανική) αγορά μεγάλη ποικιλία από συσκευές που αποκωδικοποιούν το ψηφιακό σήμα και το μετατρέπουν σε αναλογικό, για να το απεικονίσουν οι κοινές τηλεοράσεις. Αυτή όμως η απεικόνιση δεν έχει την ποιότητα της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας.

Αναμένοντας την καθιέρωση ενός πρότυπου τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας

κατασκευάστηκαν αρκετοί τηλεοπτικοί δέκτες με οθόνη 16:9, ιδίως στην Ευρώπη όπου, μέχρι την εγκατάλειψη του συστήματος MAC, είχαν γίνει πολύ μεγάλες επενδύσεις προς αυτή την κατεύθυνση. Αυτοί οι δέκτες ονομάζονται «τηλεοράσεις ευρείας οθόνης» και προς το παρόν υποστηρίζονται από μια παραλλαγή του συστήματος PAL, που ονομάζεται PAL PLUS (PAL+) και εκπέμπει τηλεοπτική εικόνα με λόγο πλευρών 16:9. Στη χώρα μας υπάρχουν ήδη τηλεοπτικοί σταθμοί που εκπέμπουν μέρος του προγράμματός τους σε PAL+. Με το PAL+ απεικονίζονται καλύτερα οι κινηματογραφικές ταινίες (όχι οι σινεμασκόπ), των οποίων τα καρέ έχουν λόγο πλευρών σχεδόν ίσο με 16:9. Όταν δέκτες ευρείας οθόνης λαμβάνουν κοινό σήμα 4:3, εμφανίζουν σκοτεινές λωρίδες στις δύο κατακόρυφες πλευρές της εικόνας. Για να αποφύγουν αυτό το δυσάρεστο φαινόμενο, διαθέτουν σύστημα που, αν ενεργοποιηθεί, τροποποιεί την οριζόντια σάρωση της οθόνης, έτσι ώστε η εικόνα να καλύψει όλη τη διάστασή της. Με τον τρόπο όμως αυτό εμφανίζονται γεωμετρικές παραμορφώσεις στην απεικόνιση (σχήμα 9-4.1).



Σχήμα 9.4.1: *Απεικονίσεις εικόνας 4:3 σε οθόνη 16:9*

Ανάλογο πρόβλημα προκύπτει και όταν σήμα PAL+ απεικονίζεται σε οθόνη 4:3. Τότε εμφανίζονται δύο οριζόντιες μαύρες λωρίδες στο πάνω και κάτω μέρος της εικόνας. Οι κοινοί δέκτες 4:3 δε διαθέτουν σύστημα τροποποίησης της κατακόρυφης σάρωσης και έτσι αυτή η κατάσταση δε μπορεί να διορθωθεί. Τα ίδια φαινόμενα εμφανίζονται και στην τηλεόραση DTV, όταν η οθόνη του δέκτη δεν έχει τον ίδιο λόγο πλευρών με την εκπεμπόμενη τηλεοπτική εικόνα. Εδώ όμως το σύστημα διαθέτει αρκετή «ευφυία» και μπορεί να προσαρμόζει αυτόματα τη μορφή και τη θέση της εικόνας στην οθόνη, ώστε να προκύπτει η καλύτερη δυνατή απεικόνιση.

9.5 Συμπίεση ψηφιακών δεδομένων

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, το πρότυπο της ψηφιακής τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη συμπίεση των ψηφιακών δεδομένων. Αυτή η συμπίεση αποτελεί τεχνολογία που προήλθε από το χώρο των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γιατί στηρίζεται σε υπολογιστικές μεθόδους. Η συμπίεση των ψηφιακών δεδομένων αρχικά αναπτύχθηκε για να λύσει το πρόβλημα της αποθήκευσης μεγάλου όγκου δεδομένων, αλλά κατόπιν χρησιμοποιήθηκε κυρίως για να διευκολύνει τη μετάδοση ψηφιακών πληροφοριών μεταξύ υπολογιστών. Χωρίς αυτή τη συμπίεση δεν θα ήταν, για παράδειγμα, δυνατή η σημερινή διάδοση του internet.

Όλα τα ψηφιακά δεδομένα μπορούν να υποστούν συμπίεση, αλλά εκείνα που τη χρειάζονται περισσότερο είναι τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε εικόνες και ήχους. Για παράδειγμα, μια ψηφιακή εικόνα μεγέθους 640 × 480 εικονοστοιχείων και 24 bit πληροφορίας χρώματος για κάθε εικονοστοιχείο έχει μέγεθος 7.372.800 bit, δηλαδή 900 kB. Μεγαλύτερες διαστάσεις εικόνας συνεπάγονται και μεγαλύτερα αρχεία. Παρομοίως, ένα δευτερόλεπτο ψηφιακού ήχου ποιότητας CD (2 κανάλια, 44.100 δείγματα το κάθε κανάλι, 16 bit το κάθε δείγμα) έχει μέγεθος 1.411.200 bit, δηλαδή 172 kB. Ένα τρίλεπτο τραγούδι με τέτοιο ψηφιακό ήχο έχει μέγεθος 30 MB.

Είναι φανερό ότι, για να περιορίσουμε το μέγεθος αυτών των αρχείων, πρέπει να τα συμπιέσουμε. Η συμπίεση στηρίζεται σε μια σειρά υπολογιστικών μεθόδων, από τις οποίες προκύπτει μια ομάδα δεδομένων, η οποία με τη σειρά της περιγράφει μια άλλη μεγαλύτερη ομάδα δεδομένων. Για να χρησιμοποιήσουμε τα συμπιεσμένα δεδομένα, πρέπει να ακολουθήσουμε την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή να τα «αποσυμπιέσουμε».

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων συμπίεσης δεδομένων, οι απωλεστικές και οι μη απωλεστικές. Με την πρώτη κατηγορία τα δεδομένα που παίρνουμε μετά την αποσυμπίεση δεν είναι ίδια με αυτά που είχαμε πριν τη συμπίεση. Αυτές τις μεθόδους τις χρησιμοποιούμε μόνο για συμπίεση αρχείων εικόνας και ήχου. Με τη δεύτερη κατηγορία τα δεδομένα παραμένουν ίδια πριν και μετά και γι' αυτό αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε τύπο δεδομένων. Μη απωλεστικές συμπιέσεις είναι οι RLE (αρ-ελ-ι), η LZW (ελ-ζετ-ντάμπλιγιου) και η Huffman (χάφμαν). Απωλεστικές συμπιέσεις είναι η JPEG (τζέι-πεγκ) που χρησιμοποιείται για αρχεία ακίνητης εικόνας, η MPEG (εμ-πεγκ) για αρχεία κινούμενης εικόνας (βίντεο) και η MP-3 (εμ-πι-τρία) για αρχεία ήχου.

Οι μη απωλεστικές μέθοδοι στηρίζονται όλες στον εντοπισμό σειρών από επαναλαμβανόμενα ψηφιακά δεδομένα, τα οποία το πρόγραμμα συμπίεσης αντικαθιστά με κάποιο «δείκτη». Η διαδικασία μπορεί να επεκτείνεται σε πολλαπλά επίπεδα και στο τέλος επισυνάπτεται στο συμπιεσμένο αρχείο ένας πίνακας, στον οποίο δηλώνονται οι αντιστοιχίες των δεικτών με τα δεδομένα που αντικαθιστούν. Βάσει αυτών των δεικτών το πρόγραμμα αποσυμπίεσης αναδημιουργεί τα αρχικά δεδομένα. Για παράδειγμα, από τη φράση **«Νάτος ο κ. Καπάτος νάτος γεμάτος και φορτσάτος»** ένα πρόγραμμα μη απωλεστικής συμπίεσης θα αντικαθιστούσε τους χαρακτήρες **«άτος»** με κάποιο άλλο σύμβολο (πχ. το **#**) και θα προέκυπτε το **«Ν#ο κ. Καπ#ν#γεμ#και φορτσ#»**. Η αρχική φράση έχει 47 χαρακτήρες, ενώ η συμπιεσμένη 27. Αυτό αντιστοιχεί σε λόγο συμπίεσης 1,7:1.

Η μέθοδος RLE χρησιμοποιείται μόνο για συμπίεση αρχείων εικόνων, κυρίως μονόχρωμων σχεδίων, όπου έχει και τα καλύτερα αποτελέσματα. Οι μέθοδοι LZW και Huffman είναι γενικής χρήσης.

Αν και οι μη απωλεστικές μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα της ακριβούς ανάκτησης των δεδομένων μετά την αποσυμπίεση, συνήθως δεν επιτυγχάνουν λόγους συμπίεσης καλύτερους από 2:1 (50%). Στα αρχεία εικόνας και ήχου επιθυμούμε όμως λόγους συμπίεσης 10:1 ή καλύτερους. Για να πετύχουμε τέτοια

αποτελέσματα, πρέπει να απορρίψουμε κάποια από τα αρχικά δεδομένα. Αυτό συνεπάγεται υποβάθμιση της ποιότητας των εικόνων και των ήχων που θα προκύψουν, η οποία όμως, ως ένα σημείο, δεν γίνεται αντιληπτή, εξαιτίας ορισμένων ιδιομορφιών στον τρόπο που λειτουργεί η όραση και η ακοή μας. Η επιτυχία κάθε μεθόδου εξαρτάται από το πόσο καλά εκμεταλλεύεται αυτές τις ιδιομορφίες, για να προσφέρει τον καλύτερο συμβιβασμό ποιότητας και συμπίεσης.

Η μέθοδος JPEG (Joint Photographic Experts Group) λειτουργεί μετατρέποντας αρχικά τις RGB πληροφορίες των εικονοστοιχείων της εικόνας σε πληροφορίες φωτεινότητας και χρωμικότητας του κόκκινου και του μπλε (YC_rC_b). Εκμεταλλευόμενη τη μειωμένη ευαισθησία της όρασης στα χρώματα, η μέθοδος χρησιμοποιεί υποδειγματοληψία και ελαττώνει τις πληροφορίες για τις χρωμικότητες στο μισό ή το ένα τέταρτο του αρχικού (μορφές 4:2:2 ή 4:2:0). Με τον τρόπο αυτό προκύπτει μια πρώτη συμπίεση των δεδομένων. Στη συνέχεια, η εικόνα χωρίζεται σε τμήματα μεγέθους 8x8 εικονοστοιχείων. Σε κάθε τέτοιο τμήμα εφαρμόζονται πολύπλοκοι μαθηματικοί μετασχηματισμοί και προκύπτουν 64 νούμερα που περιγράφουν τη φωτεινότητα και τη χρωμικότητα του κάθε εικονοστοιχείου της ομάδας. Οι μικρότεροι απ' αυτούς τους αριθμούς στρογγυλοποιούνται στο μηδέν. Όσο περισσότεροι αριθμοί μηδενιστούν τόσο μεγαλύτερη συμπίεση θα πετύχουμε και τόσο χειρότερη θα είναι η ποιότητα της τελικής εικόνας. Επειδή τα πολλά μηδενικά σχηματίζουν επαναλαμβανόμενες ομάδες, εφαρμόζεται στο τέλος και συμπίεση Huffman, η οποία δίνει το τελικό μικρό μέγεθος στα συμπιεσμένα αρχεία.

Με τη μέθοδο JPEG μπορούμε να πετύχουμε συμπίεση έως και 10:1, χωρίς αισθητή υποβάθμιση της ποιότητας της εικόνας. Με μεγαλύτερους λόγους συμπίεσης αρχίζουν να γίνονται εμφανή τα τμήματα 8x8, κυρίως στα σημεία όπου υπάρχουν απαλοί χρωματικοί τόνοι. Στο σχήμα 9.5.1 φαίνεται το παράδειγμα μιας εικόνας με συμπίεση 6:1 και 16:1, όπου μπορεί να παρατηρηθεί αυτό το φαινόμενο.

Η συμπίεση MPEG (Motion Pictures Experts Group) και οι εκδοχές της MPEG-1, MPEG-2 καθώς και η επερχόμενη MPEG-4 στηρίζονται στη μέθοδο JPEG, για να συμπιέσουν κινούμενη εικόνα, δηλαδή ψηφιακό βίντεο. Το MPEG βασίζεται στην παρατήρηση ότι η κινούμενη εικόνα αποτελείται από διαδοχικές ακίνητες εικόνες



(α) Χωρίς συμπίεση | (β) Με συμπίεση 6:1 | (γ) Με συμπίεση 16:1

Σχήμα 9.5.1: *Εικόνες συμπιεσμένες κατά JPEG*

(πλαίσια) που διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Έτσι, δεν είναι απαραίτητο να αποθηκεύονται ή να αποστέλλονται όλα τα δεδομένα κάθε επόμενου πλαισίου, αλλά μονάχα εκείνα που έχουν μεταβληθεί. Τα δεδομένα αυτά απαρτίζουν τα προβλεπτικά πλαίσια (P-Frames). Βέβαια, ανά τακτικά χρονικά διαστήματα στέλνονται και πλήρεις εικόνες, συμπιεσμένες κατά JPEG, για να καλύψουν τις ριζικές αλλαγές των σκηνών. Αυτές οι πλήρεις εικόνες ονομάζονται πλαίσια αναφοράς (I-Frames). Τέλος, για να καλυφθεί και η περίπτωση όπου τα κινούμενα αντικείμενα στην εικόνα αποκαλύπτουν άλλα αντικείμενα κρυμμένα πίσω τους, υπάρχουν από την έκδοση MPEG-2 και μετά τα προβλεπτικά πλαίσια διπλής κατεύθυνσης (B-Frames). Σ' αυτά περιέχονται οι πληροφορίες των διαφορών όχι μόνο από το προηγούμενο πλαίσιο, αλλά και από το επόμενο.

Τα παραπάνω πλαίσια διαδέχονται το ένα το άλλο σε μια σειρά της μορφής I B B P B B P...κλπ. Τα πλαίσια αναφοράς εμφανίζονται τουλάχιστο μια φορά το δευτερόλεπτο. Αν στην ταινία υπάρχει έντονη δράση, τα πλαίσια αναφοράς εμφανίζονται συχνότερα, για να καλύψουν τις απότομες αλλαγές των πλάνων και γι' αυτό ο ρυθμός ροής των δεδομένων στην κωδικοποίηση MPEG δεν είναι σταθερός. Η μέθοδος πάντως προβλέπει ένα ανώτατο όριο σ' αυτό το ρυθμό, για να εξασφαλίσει ότι η κωδικοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (πχ. ψηφιακές κάμερες).

Η μέθοδος MPEG είναι πολύ απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ, αλλά ταυτόχρονα είναι πολύ αποδοτική στη συμπίεση. Υπολογίζεται, για παράδειγμα, ότι, ενώ ο λόγος συμπίεσης στα πλαίσια I είναι 7:1, στα πλαίσια P ανεβαίνει στο 20:1, ενώ στα πλαίσια B μπορεί να φτάσει και το 50:1. Η προδιαγραφή MPEG-2 περιλαμβάνει, εκτός από τα παραπάνω, και πρόβλεψη για συμπίεση πέντε καναλιών ήχου που συνοδεύουν την εικόνα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολυγλωσσικές εφαρμογές, για αναπαραγωγή περιβάλλοντος ήχου κλπ.

Η συμπίεση MP-3 (MPEG Audio layer 3) για τα ηχητικά δεδομένα βασίζεται στην παρατήρηση ότι η ακοή μας δεν μπορεί να αντιληφθεί έναν ήχο που έχει γειτονική συχνότητα μ' έναν άλλον ισχυρότερο ήχο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «ηχητική σκίαση», γιατί ο δεύτερος ήχος «καλύπτει» τον πρώτο. Η ηχητική σκίαση είναι εντονότερη όσο πιο κοντά βρίσκονται οι συχνότητες των δύο ήχων και όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στην έντασή τους.

Τα προγράμματα συμπίεσης MP-3 λαμβάνουν τα ψηφιακά δεδομένα για το πλάτος του ακουστικού σήματος στις διάφορες χρονικές στιγμές και με περίπλοκους μαθηματικούς μετασχηματισμούς υπολογίζουν το πλάτος του ακουστικού σήματος στις διάφορες συχνότητες (ανάλυση φάσματος). Στη συνέχεια, χωρίζουν το ακουστικό φάσμα σε 576 διαφορετικές περιοχές και εντοπίζουν μέσα σε κάθε περιοχή το πιο ισχυρό σήμα. Τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε όλα τα άλλα σήματα απαλείφονται, γιατί, εφόσον σκιάζονται από το πιο ισχυρό, δε γίνονται ακουστά. Σ' αυτά που απομένουν εφαρμόζεται συμπίεση Huffman, για ακόμη μεγαλύτερη ελάττωση του αρχικού όγκου των δεδομένων.

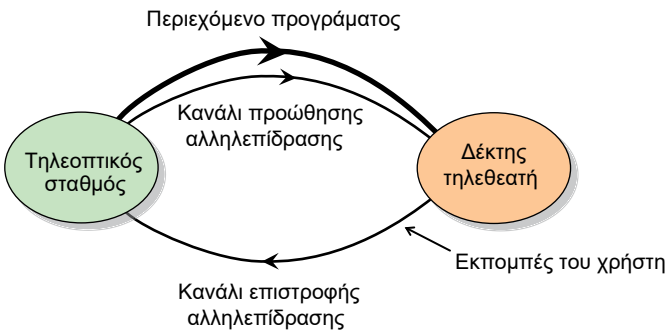
Η συμπίεση MP-3 είναι ιδιαίτερα απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ, αλλά η

αναπαραγωγή (αποσυμπίεση) των αρχείων ήχου που παράγει είναι εύκολη. Αρχεία συμπιεσμένα κατά MP-3 φτάνουν λόγους συμπίεσης 20:1, χωρίς μεγάλη υποβάθμιση της ποιότητας του ήχου. Με το σύστημα MP-3 λειτουργεί εδώ και αρκετά χρόνια το Mini-Disk της Sony, ενώ ήδη κυκλοφορούν φορητές συσκευές που αναπαράγουν αρχεία M-3 αποθηκευμένα στη μνήμη τους, ακριβώς λόγω του μικρού μεγέθους αυτών των αρχείων.

9.6 Η τηλεόραση ως μέσο αμφίδρομης επικοινωνίας

Η τηλεόραση, με τη μορφή που οι περισσότεροι από εμάς γνωρίζουμε, είναι ένα μονόδρομο μέσο επικοινωνίας. Από τη στιγμή που θα συντονιστεί σε κάποιο τηλεοπτικό σταθμό, αναπαράγει σταθερά τη ροή του προγράμματός του, χωρίς δυνατότητα άλλης επέμβασης του θεατή σ' αυτό, πέρα από την αλλαγή του σταθμού. Το γεγονός αυτό κρίνεται αρνητικά από τους περισσότερους τηλεθεατές και προκαλεί αρκετά σχόλια σε βάρος της τηλεόρασης και των φορέων της.

Έχοντας αυτό υπ' όψη οι εταιρείες και οι οργανισμοί που δραστηριοποιούνται στο χώρο της τηλεόρασης προσπάθησαν σε αρκετές χώρες να προσφέρουν στους τηλεθεατές τη δυνατότητα να επεμβαίνουν στο πρόγραμμα που παρακολουθούν στις οθόνες τους και όχι απλώς να το επιλέγουν. Οι μέθοδοι και οι τεχνικές που προτείνονται για την πραγματοποίηση αυτού του σκοπού αναφέρονται γενικά ως «αμφίδρομη τηλεόραση». Το βασικό μοντέλο της αμφίδρομης τηλεόρασης περιγράφεται στο σχήμα 9.6.1.



Σχήμα 9.6.1: *Μοντέλο αμφίδρομης τηλεόρασης*

Το «περιεχόμενο προγράμματος» και το «κανάλι προώθησης αλληλεπίδρασης» υπάρχουν και στα κλασσικά συστήματα τηλεόρασης. Το πρώτο αναφέρεται στη ροή του κοινού τηλεοπτικού προγράμματος, ενώ το δεύτερο υπάρχει εγκαταστημένο εδώ και αρκετά χρόνια με τη μορφή του τηλεκείμενου (teletext).

Για να γίνει όμως η τηλεόραση αμφίδρομη, απαιτείται και το κανάλι επιστροφής της αλληλεπίδρασης. Μέσα απ' αυτό ο τηλεθεατής, αντιδρώντας στο περιεχόμενο του προγράμματος ή σε ερεθίσματα προερχόμενα από το κανάλι προώθησης αλληλεπίδρασης, στέλνει με τη βοήθεια κατάλληλου χειριστηρίου τις εντολές του στον τηλεοπτικό σταθμό και διαμορφώνει το περιεχόμενο του προγράμματος κατά τις επιθυμίες του.

Η εξασφάλιση του καναλιού επιστροφής αντιπροσωπεύει ένα αρκετά μεγάλο πρόβλημα για την αμφίδρομη τηλεόραση. Προτείνονται δύο βασικές υλοποιήσεις:

- Ασύρματη εκπομπή στην περιοχή των UHF, μέσω της υπάρχουσας κεραίας του δέκτη προς τοπικούς δέκτες συγκέντρωσης των εκπομπών επιστροφής ή μέσω ενός κυψελοειδούς συστήματος επικοινωνίας παρόμοιου με αυτό των κινητών τηλεφώνων.
- Καλωδιακή σύνδεση μέσα από συστήματα καλωδιακής τηλεόρασης ή μέσω των κοινών ή ISDN τηλεφωνικών συνδέσεων.

Κάθε λύση έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή βασίζεται στην προϋπάρχουσα υποδομή. Εδώ φαίνεται ότι οι τηλεφωνικές συνδέσεις κερδίζουν το προβάδισμα, γιατί βρίσκονται εγκαταστημένες ουσιαστικά σε κάθε σπίτι, ακόμη και σε περιοχές που δε διαθέτουν προηγμένες τηλεοπτικές υπηρεσίες.

Η αμφίδρομη τηλεόραση είναι μια υπηρεσία συνδρομητική, που μπορεί να προσφέρει στους πελάτες της πλήθος από δυνατότητες, άγνωστες στην κοινή τηλεόραση. Έτσι, για παράδειγμα, οι συνδρομητές μπορούν να συμμετέχουν σε τηλεπαιχνίδια, να υποβάλλουν ερωτήσεις σε συνεντεύξεις, να συμμετέχουν σε ψηφοφορίες, να κάνουν τηλεαγορές και κυρίως να παραγγέλνουν τις τηλεοπτικές ταινίες που επιθυμούν να παρακολουθήσουν. Αυτή η τελευταία υπηρεσία της αμφίδρομης τηλεόρασης ονομάζεται «Video On Demand» (VOD, βίντεο κατά παραγγελία) και διαφημίζεται ως το πλέον ελκυστικό χαρακτηριστικό της.

Με την εμφάνιση της ψηφιακής τηλεόρασης νέες εφαρμογές προβλέπονται για τις αμφίδρομες υπηρεσίες. Έτσι, η τηλεόραση θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο περιήγησης στο διαδίκτυο (internet) και ως πύλη για τη μεταφορά («κατέβασμα») προϊόντων λογισμικού. Η απαιτούμενη για όλα αυτά τεχνολογία βρίσκεται όμως ακόμη υπό εξέλιξη.

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

● Σ' ένα ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα η προς μετάδοση πληροφορία είναι πάντοτε διακριτά σύμβολα. Το πλήθος των διακριτών συμβόλων αποτελεί το 'αλφάβητο' της ψηφιακής πληροφορίας.

● Τα διακριτά σύμβολα κωδικοποιούνται κατάλληλα πριν αποσταλούν στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Η κωδικοποίηση γίνεται με τη χρήση ενός συνόλου δυαδικών συμβόλων ('0' ή '1'), που ονομάζονται bits. Το πλήθος των δυαδικών συμβόλων που απαιτούνται για την κωδικοποίηση εξαρτάται από τον αριθμό των διακριτών καταστάσεων της ψηφιακής πληροφορίας και ονομάζεται ποσότητα απόφασης επιλογής (decision content).

● Πριν τη μετάδοση αναλογικών σημάτων ήχου και εικόνας με ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα απαιτείται η διαδικασία της δειγματοληψίας και κωδικοποίησης του σήματος. Πρόκειται για τη διαδικασία που επιτρέπει να αντικαταστήσουμε το αρχικό βασικό αναλογικό σήμα, χωρίς να χάσουμε πληροφορία μ' ένα νέο ψηφιακό σήμα που προσφέρεται για μετάδοση με ψηφιακό σύστημα.

● Ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι περιορισμένης φασματικής ζώνης θέτει πάντοτε περιορισμούς στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης συμβόλων που επιτρέπει να έχουμε ανά μονάδα χρόνου. Αυτοί οι περιορισμοί καθορίζονται από τα κριτήρια Nyquist και Shannon. Εξαρτώνται από το διαθέσιμο φασματικό εύρος B και τη σχέση ισχύων ωφέλιμου σήματος προς θόρυβο (S/N).

● Η μετάδοση ψηφιακών συμβόλων στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι απαιτεί τη διαμόρφωση κάποιου φέροντος σήματος. Χρησιμοποιούνται πολλά είδη διαμόρφωσης, διαμόρφωση πλάτους, συχνότητας και φάσης (πρόκειται για ψηφιακές διαμορφώσεις ημιτονικού φέροντος).

● Οι ψηφιακές διαμορφώσεις ημιτονικού φέροντος πραγματοποιούνται με απλά δυαδικά σύμβολα '0' ή '1' (δύο στάθμες, OOK, FSK, BPSK) ή με κωδικοποιημένη πληροφορία από περισσότερα bits (K στάθμες, QPSK, QAM κ.λ.π.).

● Συγκρίνοντας τις διαμορφώσεις OOK, FSK και PSK, η τελευταία παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις στο φάσμα και ως προς τη σχέση σήματος προς θόρυβο.

● Το τηλεκείμενο (teletext) είναι ένα σύστημα που εκπέμπει πληροφορίες μαζί με το τηλεοπτικό σήμα. Οι πληροφορίες μπορούν να εμφανιστούν στην οθόνη των τηλεοπτικών δεκτών που διαθέτουν τον κατάλληλο αποκωδικοποιητή.

● Οι πληροφορίες εκπέμπονται κατά τη διάρκεια των κατακόρυφων παλμών αμαύρωσης. Είναι δυαδικοί παλμοί που κωδικοποιούν με τον κώδικα ASCII σύμβολα, αριθμούς και γράμματα της αλφαβήτου. Όταν αποκωδικοποιηθούν στο δέκτη, απεικονίζουν κείμενα και απλά σχέδια στην οθόνη.

● Η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV) χρησιμοποιεί ευρύτερη οθόνη και περισσότερες γραμμές σάρωσης από την κοινή τηλεόραση. Υπάρχουν σε λειτουργία

● Για ελάττωση της ποσότητας των μεταδιδόμενων ψηφιακών πληροφοριών χρησιμοποιούμε μεθόδους συμπίεσης ψηφιακών δεδομένων. Υπάρχουν απωλεστικές και μη απωλεστικές μέθοδοι.

● Για συμπίεση ψηφιακών πληροφοριών εικόνας και ήχου χρησιμοποιούμε απωλεστικές μεθόδους συμπίεσης. Επικρατέστερες είναι η JPEG για συμπίεση αρχείων ακίνητων εικόνων, η MPEG για συμπίεση αρχείων κινούμενων εικόνων (βίντεο) και η MP-3 για συμπίεση αρχείων ήχου.

● Η αμφίδρομη τηλεόραση επιτρέπει στους τηλεθεατές να επεμβαίνουν στο πρόγραμμα που παρακολουθούν. Για να μπορεί να γίνει αυτό, πρέπει να υπάρχει τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ κάθε τηλεθεατή και του τηλεοπτικού σταθμού που αυτός παρακολουθεί. Αυτή η σύνδεση μπορεί να είναι είτε ενσύρματη είτε ασύρματη.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΕΞΕΤΑΣΗΣ

1. Να σχεδιαστεί το γενικό διάγραμμα ενός ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος.
2. Πώς ορίζεται η πηγή διακριτών πληροφοριών.
3. Να σχεδιαστεί η χρονική εικόνα ενός απλού ψηφιακού σήματος (NRZ).
4. Να περιγραφεί σχηματικά η διαδικασία της δειγματοληψίας και κωδικοποίησης ενός αναλογικού σήματος.
5. Να δοθούν τα κριτήρια Nyquist και Shannon που περιορίζουν το ρυθμό μετάδοσης σ' ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι.
6. Να δοθεί ο ορισμός της ψηφιακής διαμόρφωσης αναλογικού (ημιτονικού) φέροντος.
7. Να εξηγηθεί τι είναι η διαμόρφωση OOK και να δοθεί το εύρος φάσματος.
8. Να εξηγηθεί η διαμόρφωση FSK και να προσδιοριστεί το εύρος φάσματος.
9. Να δοθεί το γενικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή BPSK και το φάσμα του διαμορφωμένου σήματος.
10. Να δοθεί ο ορισμός της διαμόρφωσης QPSK.
11. Τι είδους αποδιαμόρφωση χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις OOK, FSK και PSK.
12. Γιατί μετά την αποδιαμόρφωση χρησιμοποιείται στάδιο επαναμορφοποίησης (αποκατάστασης) των δυαδικών σημάτων (παλμών).
13. Τι είναι το τηλεκείμενο (teletext);
14. Ποια πλεονεκτήματα προσφέρει η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας σε σχέση με την κοινή τηλεόραση;
15. Ποια είναι τα δύο συστήματα τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας που υπάρχουν σε λειτουργία και ποια είναι τα χαρακτηριστικά τους;
16. Τι ονομάζουμε συμπίεση ψηφιακών δεδομένων και γιατί τη χρησιμοποιούμε;
17. Σε τι διαφέρουν οι απωλεστικές και οι μη απωλεστικές μέθοδοι συμπίεσης δεδομένων μεταξύ τους;
18. Πώς λειτουργεί η μέθοδος συμπίεσης δεδομένων JPEG;
19. Πώς λειτουργεί η μέθοδος συμπίεσης δεδομένων MPEG;
20. Πώς λειτουργεί η μέθοδος συμπίεσης δεδομένων MP-3;
21. Τι ονομάζουμε αμφίδρομη τηλεόραση; Να σχεδιαστεί το βασικό μοντέλο της.
22. Πώς εξασφαλίζεται η λειτουργία της αμφίδρομης τηλεόρασης;

— ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ —

1. Αλκίνοου Ε. Μάζη: *ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ* Εκδόσεις «ΕΣΤΙΑ», 1968
2. Γ. Παπανικολάου: *ΗΛΕΚΤΡΑΚΟΥΣΤΙΚΗ* University Studio Press 1985
3. *Dolby Surround Σύστημα Περιβάλλοντος Ήχου:* Περ. ΕΛΕΚΤΟΡ (Ελληνική έκδοση) Τεύχος 150 Φεβρουάριος 1995, σελ. 56
4. Bernard Grob: *BASIC TELEVISION* Mc Graw-Hill. 1964
5. Simon Haykin: Συστήματα Επικοινωνίας. Μετάφραση Ε. Συκάς, Μ. Θεολόγου. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1995.
6. Taub / Schilling: Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα, McGraw-Hill Inc.(Μετάφραση εκδόσεις Δ. Τζιόλα), 1991.
7. J.G.Remy / J. Cueugniet / C. Siben: SYSTEMES DE RADIOCOMMUNICATIONS AVEC LES MOBILES. Εκδόσεις Eurolles, Paris, 1988.
8. Αθ. Νασιόπουλου: Βασικές Συναρτήσεις Ηλεκτρονικής. Κυκλώματα και Γραμμικά Συστήματα. Εκδόσεις Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα, 1997.
9. P. G. Fontolliet: SYSTEMES DE TELECOMMUNICATIONS. Εκδόσεις Dunod, Paris, 1983.
10. Αθ. Νασιόπουλου: Τηλεπικοινωνίες, ΤΕΙ Αθηνών.
11. Howard Bierman & Marvin Bierman: *COLOR TELEVISION Principles and Serviceing* HAYDEN BOOK COMPANY, 1973
12. Χρήστου Ε. Παπακίτσου: *ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ* Ίδρυμα Ευγενίδου, 1991
13. Κώστα Κάππα: *ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΣΠΡΟΜΑΥΡΗΣ ΚΑΙ ΕΓΧΡΩΜΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ* Εκδόσεις Σταμούλη, 1994
14. Δ. Τζιόλα: *ΕΓΧΡΩΜΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ ΘΕΩΡΙΑ – ΒΛΑΒΕΣ – ΕΠΙΣΚΕΥΗ* Εκδόσεις Τζιόλα, 1996
15. Γεωργίου Οδ. Βουδούρη: *ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΑ* (ραδιοεπικοινωνία) Ίδρυμα Ευγενίδου, 1999
16. Louis E. Frenzel: *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ* Εκδόσεις Τζιόλα, 1999
17. Χρήστου Ε. Παπακίτσου: *ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΑ (ραδιοεπικοι*νωνία) Ίδρυμα Ευγενίδου, 1999
18. Mothersole Peter: *BROADCAST DATA SYSTEMS: TELETEXT AND VIDEOTEXT* Butterworths, 1990
19. K. Blair Benson & Donald G. Fink: *HDTV ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ ΥΨΗΛΗΣ ΕΥΚΡΙΝΕΙΑΣ* ΕκδόσειςΤζιόλα, 1993
20. E. J. Wilson: *INTRODUCTORY SCENARIOS FOR INTERACTIVE TELEVISION* http://www.ebu.ch./ptrev home.html

21. *Επίπεδες οθόνες*. Περ. ΕΛΕΚΤΟΡ (Ελληνική έκδοση) τεύχος 193 Σεπτέμβριος 1998, σελ 38

22. *Ψηφιακή φωτογραφία.* Περ. ΕΛΕΚΤΟΡ (Ελληνική έκδοση) τεύχος 195 Νοέμβριος 1999, σελ 23

23. *MP3 ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ...ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ.* Περ. RAM τεύχος 127 Ιούλιος – Αύγουστος 1999, σελ 116

24. *ΨΗΦΙΑΚΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ – ΑΝΤΕΠΙΘΕΣΗ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ.* Περ. RAM τεύχος 118 Οκτώβριος 1998, σελ 70

25. Χρ. Τόμπρα: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ. ΠΕΡ. RAM τεύχος 114 Μάιος 1998, σελ 200

26. RECOMMENDED PRACTICES FOR A BASELINE DIGITAL TELEVISION APPLIANCE http://www.howstuffworks.com/hdtv.htm

Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του νόμου 1129 της 15/21 Μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946,108, Α').

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας και Θρησκευμάτων / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.

Κωδικός βιβλίου: 0-24-0322
ISBN 978-960-06-3066-4



