



ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη και κατασκευή ραδιοφωνικού πομπού συχνοτικής
διαμόρφωσης (FM)»**



Σπουδαστής: **Μανίκης Κωνσταντίνος**

Επιβλέπων Καθηγητής : **Καραδελόγλου Πρόδρομος**

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Σύντομα ιστορικά στοιχεία	5
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες	5
1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ	8
1.1 Τα ηλεκτρικά σήματα	8
1.2 Διάκριση σημάτων	8
1.3 Ανάλυση σημάτων	11
2. ΦΙΛΤΡΑ	13
3. ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ	14
4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ	16
4.1 Ορισμός ηλεκτρομαγνητικού κύματος	16
4.2 Μετάδοση και διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος	17
4.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	18
5. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ	19
5.1 Ορισμός διαμόρφωσης	19
5.2 Γενικά περί διαμορφώσεων AM-FM	20
5.3 Διαμόρφωση AM	22
5.4 Διαμόρφωση FM	22
5.5 Σύγκριση AM-FM	23
6. ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΖΩΝΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ FM	23
6.1 Τυπικό κύκλωμα ραδιοφωνικού πομπού	23
6.2 Γενικά περί εκπομπής σήματος	24

6.2.1 Ταλαντωτές και δημιουργία φέροντος σήματος	24
6.2.2 Ταλαντωτής Colpitts – Αναλυτική λειτουργία	26
6.3 Διαδικασία ραδιοφωνικής εκπομπής FM	27
7. ΚΕΡΑΙΕΣ	29
7.1 Τι είναι κεραία	29
7.2 Είδη κεραιών	29
7.3 Διασπορά σήματος	31
7.4 Μήκος κεραίας	31
7.5 Παρεμβολές σήματος	32
7.6 Μοντέλα διάδοσης	32
7.7 Βασικά χαρακτηριστικά κεραιών	33
7.7.1 Βέλτιστη περιοχή συχνοτήτων	33
7.7.2 Πόλωση	33
7.7.3 Κατευθυντικότητα και κέρδος κεραίας	34
8. ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ – ΛΟΓΟΣ ΣΤΑΣΙΜΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ (SWR)	36
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	37
A. Εξήγηση λειτουργίας του κυκλώματος	38
B. Προσομοίωση κυκλώματος στο Multisim	39
Γ. Πειραματικές μετρήσεις και βελτιώσεις	41
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	49
Παράρτημα	51
Βιβλιογραφία	60

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται θεωρητική μελέτη και στη συνέχεια υλοποίηση κυκλώματος πομπού FM.

Κάνοντας μια ιστορική αναδρομή, φαίνεται η ιστορική σημασία του ραδιοφώνου στην ανθρώπινη επικοινωνία και ειδικά της διαμόρφωσης συχνότητας στην εξέλιξη της ραδιοφωνίας. Στη συνέχεια εξηγείται η λειτουργία του κυκλώματος και προσομοιάζεται για την επιβεβαίωση της λειτουργίας της σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια του προγράμματος Multisim.

Το κύκλωμα χωρίζεται σε δύο κυρίως βαθμίδες, όπου στην πρώτη έχουμε την ενίσχυση του σήματος εισόδου και στη δεύτερη τη διαμόρφωση συχνότητας αυτού με τη βοήθεια κυκλώματος ταλαντωτή LC και οδήγηση σε κεραία για τη δημιουργία και απελευθέρωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Ακολουθεί η αναφορά στην υλοποίηση του κυκλώματος και ο έλεγχος λειτουργίας που έγιναν στο εργαστήριο.

Σύντομα ιστορικά στοιχεία

Η ανάγκη των ανθρώπων για ασύρματη επικοινωνία από απόσταση έδωσε το έναυσμα στους επιστήμονες της εποχής, πριν περίπου 116 χρόνια, να ασχοληθούν περαιτέρω με την εξέλιξη του μέχρι τότε τηλέγραφου. Πατέρας του ραδιοφώνου θεωρείται ο Γουλιέλμος Μαρκόνι ο οποίος κατάφερε τη μετάδοση σημάτων Μορς μέσω ερτζιανών σημάτων σε απόσταση 3 χιλιομέτρων. Όμως την έννοια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπου στηρίζεται η λειτουργία του ραδιοφώνου, την ανακάλυψε ο Μάξγουελ το 1865 με συνεχιστή του τον Χερτζ (1886-89) ο οποίος κατάφερε να αποδείξει ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να ανακλαστούν, να υποστούν συμβολή αλλά και πόλωση, όπως και τα κύματα φωτός.

Ο πρώτος που βγήκε στον 'αέρα' του ραδιοφώνου ήταν ο Frank Conrad στην Αμερική, ο οποίος με αυτή του την κίνηση απέκτησε φανατικό ραδιοφωνικό κοινό. Η εκπομπή του αργότερα αγοράστηκε από μία εταιρία για να δημιουργηθεί τελικά ο ραδιοφωνικός σταθμός K.D.K.A. που εκπέμπει μέχρι και σήμερα. Κάπου στο 1926 ξεκινά η πώληση ενός φθηνού και εύχρηστου ραδιοφωνικού δέκτη προκαλώντας ραγδαία αύξηση των ακροατών. Το ραδιόφωνο έτσι εξαπλώθηκε τόσο στην Αμερική όσο και στην Ευρώπη. Στην Ελλάδα η ιδέα του ραδιοφώνου ξεκινά το 1925 στη Θεσσαλονίκη με υποκινητή το Χρήστο Τσιγκιρίδη.

Το ραδιόφωνο λοιπόν εδραιώθηκε στη ζωή των ανθρώπων παίζοντας πρωταρχικό ρόλο σε περιόδους πολέμου και γενικότερα σε μεγάλα κοινωνικά, πολιτικά αλλά και πολιτισμικά γεγονότα.

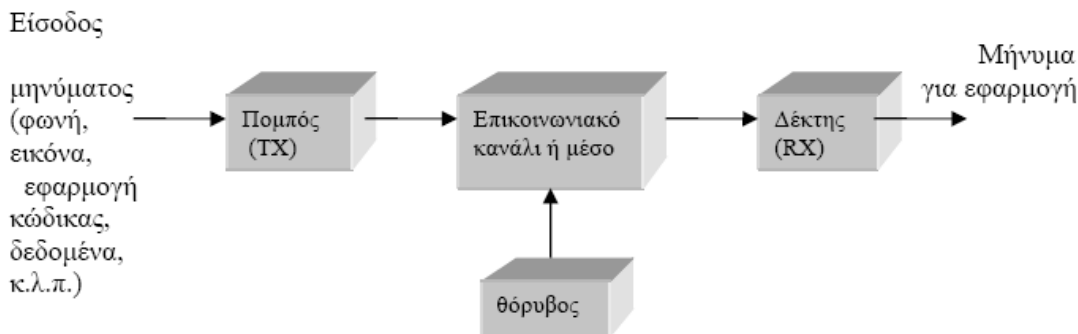
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες

Με τον όρο *τηλεπικοινωνίες* χαρακτηρίζουμε την ανταλλαγή δεδομένων με οποιονδήποτε τρόπο και ανεξάρτητα από το μήκος της απόστασης. Μία τηλεπικοινωνία μπορεί να πραγματοποιηθεί ασύρματα, ενσύρματα, ηλεκτρικά, ηλεκτρομαγνητικά, οπτικά, δορυφορικά κ.ά., μεταξύ τουλάχιστον δύο ανταποκριτών. Η ανάγκη λοιπόν του ανθρώπου για επικοινωνία καλύφθηκε από την έννοια της τηλεπικοινωνίας. Η ανάγκη αυτή συμπεριλαμβάνει διάφορα είδη πληροφοριών τα βασικότερα των οποίων είναι:

- Οι ακουστικές πληροφορίες δηλαδή ακουστικά και ηχητικά μηνύματα.
- Τα δεδομένα που ανταλλάσσονται μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων.
- Οι οπτικές πληροφορίες (video).

Όλα τα ηλεκτρονικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα έχουν τη βασική μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 1. Βασικά μέρη τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Στην πλειονότητα των συστημάτων, το μήνυμα (που παράγεται από έναν άνθρωπο) εισέρχεται στον πομπό με τη μορφή ηλεκτρικού σήματος, ο οποίος μεταδίδει το μήνυμα στο κανάλι επικοινωνίας. Το μήνυμα λαμβάνεται από το δέκτη και αναμεταδίδεται σε έναν άλλο άνθρωπο. Κατά τη μετάδοση στο κανάλι επικοινωνίας προστίθεται θόρυβος στο μήνυμα. Θόρυβος είναι ο γενικός όρος που χρησιμοποιείται για οποιαδήποτε παρεμβολή που υποβαθμίζει τη μεταδιδόμενη πληροφορία. Ας εξετάσουμε ξεχωριστά το καθένα από αυτά τα βασικά μέρη.

Ο πομπός είναι ένα σύνολο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σχεδιασμένων να μετατρέπουν την πληροφορία με τρόπο ώστε να μπορεί να μεταδοθεί σε ένα συγκεκριμένο μέσο επικοινωνίας.

Μπορεί να είναι τόσο απλός όσο ένα μικρόφωνο ή τόσο σύνθετος όσο ένας μικροκυματικός ραδιοπομπός.

Το κανάλι επικοινωνίας είναι το μέσο με το οποίο το ηλεκτρονικό σήμα διαβιβάζεται από ένα τόπο σε έναν άλλο. Μπορεί να είναι ένα ζεύγος συρμάτων που μεταφέρουν ένα σήμα, ένα καλώδιο οπτικής ίνας ή ένας ατμοσφαιρικός δίαυλος ραδιοκυμάτων. Παράλληλα με τη μεταφορά του σήματος της πληροφορίας, το μέσο προκαλεί εξασθένησή της με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει στο δέκτη εξασθενημένο. Γι' αυτό απαιτείται σημαντική ενίσχυση του σήματος στο δέκτη, άλλα και στον πομπό για πετυχημένη επικοινωνία.

Ο δέκτης είναι ένα σύνολο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, το οποίο δέχεται το μεταδιδόμενο σήμα από το κανάλι και το μετατρέπει σε μια μορφή κατανοητή από ανθρώπους. Μπορεί να είναι ένα απλό ακουστικό ή ένας σύνθετος ηλεκτρονικός δέκτης.

Ο θόρυβος είναι τυχαία ανεπιθύμητη ενέργεια στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα μέσω του μέσου μετάδοσης και παρεμβάλλεται στο μεταδιδόμενο μήνυμα. Ο θόρυβος προέρχεται από την ατμόσφαιρα (π.χ. από τα φώτα που παράγουν στατικό ηλεκτρισμό), από το διάστημα που τα αστρικά σώματα εκπέμπουν διάφορα είδη ακτινοβολίας τα οποία δημιουργούν παρεμβολές στις επικοινωνίες κλπ. Επίσης, υπάρχουν οι βιομηχανικές ηλεκτρικές παρεμβολές, καθώς και παρεμβολές από τα συστήματα ηλεκτρικής ανάφλεξης των αυτοκινήτων, τους ηλεκτροκινητήρες και τις λάμπες φθορισμού. Γενικά, πολλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα δημιουργούν θόρυβο εσωτερικά λόγω της θερμικής διέγερσης των ατόμων. Αν και τέτοια σήματα θορύβου είναι χαμηλής στάθμης, μπορούν συχνά να παρεμβάλλουν σημαντικά στα εξαιρετικά χαμηλής στάθμης σήματα που εμφανίζονται πολύ εξασθενημένα στο δέκτη μετά τη μετάδοσή τους σε μακρινές αποστάσεις. Σε μερικές περιπτώσεις, ο θόρυβος εξαλείφει εντελώς το μήνυμα, ενώ άλλες φορές μέρος του μηνύματος χανεται ή ανακτάται ατελώς. Ο θόρυβος είναι ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα στις επικοινωνίες. Ωστόσο υπάρχουν τρόποι αντιμετώπισής του.

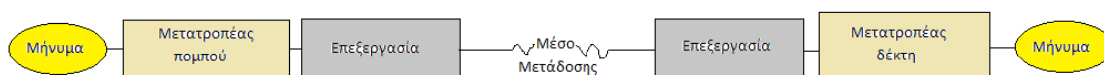
Σε μία απλή επικοινωνία τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης είναι προσδιορισμένος, όπως για παράδειγμα στην τηλεφωνία. Σε μία πιο σύνθετη επικοινωνία, ενώ ο πομπός είναι προσδιορισμένος ο δέκτης ή οι δέκτες είναι αόριστοι όπως για παράδειγμα στη ραδιοφωνία ή την τηλεόραση.

Επίσης, υπάρχει διάκριση για τον τύπο της επικοινωνίας που εφαρμόζεται κάθε φορά. Η επικοινωνία μπορεί να είναι μονόδρομη, μιλάμε δηλαδή για έναν πομπό και ένα ή και περισσότερους δέκτες. Μπορεί όμως να είναι και αμφίδρομη. Στην περίπτωση αυτή ο πομπός μπορεί να λειτουργεί και σα δέκτης ταυτόχρονα, ενώ ο δέκτης μπορεί να λειτουργεί και σαν πομπός, αντίστοιχα. Παράδειγμα μιας αμφίδρομης επικοινωνίας είναι η ενσύρματη ή η κινητή τηλεφωνία.

Το μέσον που διαλέγουμε κάθε φορά για την επίτευξη μιας επικοινωνίας ποικίλλει. Σε μία ενσύρματη επικοινωνία βασικό μέσο είναι το καλώδιο μέσω του οποίου μεταφέρεται η πληροφορία σε μορφή ρεύματος. Αντίστοιχα, σε μία ασύρματη επικοινωνία η πληροφορία μας θα σταλεί μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπως στη ραδιοφωνία ή τα ραντάρ. Υπάρχει και η μετάδοση πληροφορίας μέσω οπτικών μέσων όπου το μήνυμα μεταφέρεται με φως μέσω ενός γυάλινου αγωγού. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν μεγάλα δίκτυα επικοινωνίας που συνδυάζουν όλους τους παραπάνω τρόπους μετάδοσης πληροφορίας που αναφέραμε.

1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

Ως *σήμα* είναι δυνατό να ορίσουμε την πληροφορία που μεταδίδεται από κάποιο μέσο και παραλαμβάνει ο οποιοσδήποτε δέκτης ύστερα από μία συγκεκριμένη επεξεργασία που υπέστη ανάλογα με το είδος της επικοινωνίας και του μέσου μέσω του οποίου μεταδίδεται. Το σήμα ξεκινά από τον πομπό αφού επεξεργαστεί κατάλληλα, μεταφέρεται μέσω καλωδίου ή ασύρματα και καταλήγει στο δέκτη. Ο δέκτης με τη σειρά του κατέχει κάποιο σύστημα λήψης, μέσα στο οποίο το σήμα θα υποστεί μία εκ νέου επεξεργασία ώστε να λάβει τελικά ο δέκτης το αρχικό σήμα που εξέπεμψε ο πομπός. Ο δέκτης αναγνωρίζει το σήμα – πληροφορία μέσω κάποιας συσκευής που μπορεί να είναι ένα μεγάφωνο, αν πρόκειται για ηχητικό σήμα είτε μια οθόνη αν πρόκειται για εικόνα ή βίντεο.



1.1.α Απεικόνιση αποστολής μηνύματος από τον πομπό στο δέκτη

1.1 Τα ηλεκτρικά σήματα

Το ηλεκτρικό σήμα είναι ένα ηλεκτρικό μέγεθος που λαμβάνει ο δέκτης μετά την επεξεργασία του και αντιπροσωπεύει το αρχικό μήνυμα του πομπού. Είναι ένα μεταβαλλόμενο μέγεθος που συμβολίζεται πάντα σε συνάρτηση με το χρόνο:

- $V(t)$: μεταβαλλόμενη τάση
- $I(t)$: μεταβαλλόμενο ρεύμα
- $f(t)$: συμβολισμός σήματος

Εάν επιθυμούμε να έχουμε μία ακριβή απεικόνιση του σήματος είναι αναγκαία η χρήση ενός παλμογράφου. Στην ένδειξη του παλμογράφου παρατηρούμε ότι το σήμα εναλλάσσεται σε θετικές και αρνητικές τιμές. Αυτό έχει να κάνει με τις υπερπίεσεις ή υποπίεσεις που δέχεται το σήμα από τον πομπό.

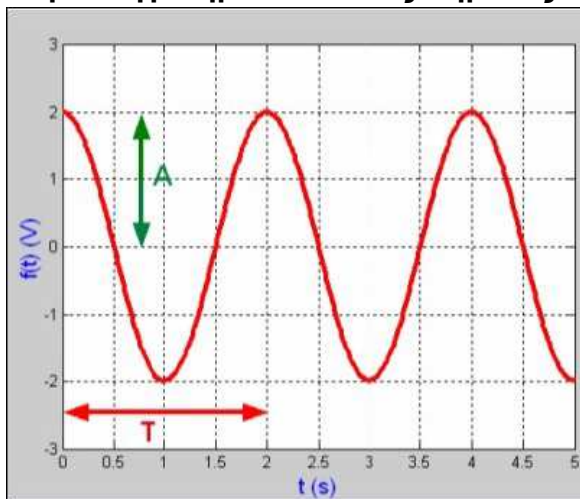
Δύο βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών σημάτων είναι το πλάτος και η συχνότητα. Το πλάτος έχει να κάνει με την ένταση ή αλλιώς την ισχύ των ηλεκτρικών σημάτων και μας διευκολύνει στο να κατατάσσουμε τα σήματα σε ισχυρότερα ή ασθενέστερα. Η συχνότητα δείχνει την ταχύτητα των σημάτων στο χρόνο, τις εναλλαγές της τιμής των σημάτων κάθε χρονική στιγμή και το κατά πόσο είναι απότομα ή όχι.

1.2 Διάκριση σημάτων

Μια πρώτη, γενική, διάκριση των σημάτων είναι σε αναλογικά και ψηφιακά. Αναλογικά είναι τα σήματα, τα οποία μεταδίδονται συνεχώς από μία πηγή. Μπορεί να προέρχονται από μικρόφωνο, κεφαλή μαγνητοφώνου ή ηλεκτροφώνου (πικάπ) ή οποιαδήποτε άλλη ηλεκτροακουστική συσκευή. Προκειμένου για τη ραδιοφωνία αυτά ονομάζονται ακουστικά σήματα και οι συχνότητές μπορεί να είναι από 16 - 20000 Hz (ακουστικές συχνότητες). Είναι σήματα ομιλίας με συχνότητες 400 Hz - 4 kHz και μουσικής με συχνότητες 20 Hz μέχρι 20 kHz. Ψηφιακά είναι τα σήματα που παίρνουν διακριτές και όχι συνεχείς τιμές. Δε θα μας πασχολήσουν στην εργασία αυτή.

Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι η περιοδικότητα του σήματος. Γενικά, τα σήματα διακρίνονται σε περιοδικά και μη περιοδικά. Ως περιοδικό ορίζεται το σήμα που επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η μαθηματική παράσταση ενός περιοδικού σήματος είναι $f(t)=f(t+nT)$. Δηλαδή, ένα σήμα θεωρείται περιοδικό όταν ισχύει η παραπάνω εξίσωση για κάθε χρόνο t και κάθε ακέραιο αριθμό n . Ένα περιοδικό σήμα μπορεί να διακριθεί σε ημιτονοειδές ή σε τετραγωνικό σήμα. Το ημιτονοειδές σήμα αναπαριστά σήμα αναλογικών συστημάτων, ενώ το τετραγωνικό συνήθως αναπαριστά σήμα ψηφιακών συστημάτων.

Παράδειγμα ημιτονοειδούς σήματος



Ισχύει $f(t)=A\cos(2\pi ft+\varphi)$ όπου

A: πλάτος (amplitude)

f : συχνότητα (frequency)

φ : φάση (phase)

T ($f=1/T$): περίοδος (period)

Παράμετροι σήματος:

Τιμή κορυφής ή κορυφοτιμή (peak value, V_p)

Τιμή από κορυφή σε κορυφή ή διακορυφοτιμή (peak to peak value, V_{pp})

Απόκλιση (DC offset)

Μέση τιμή (average value, V_{avg})

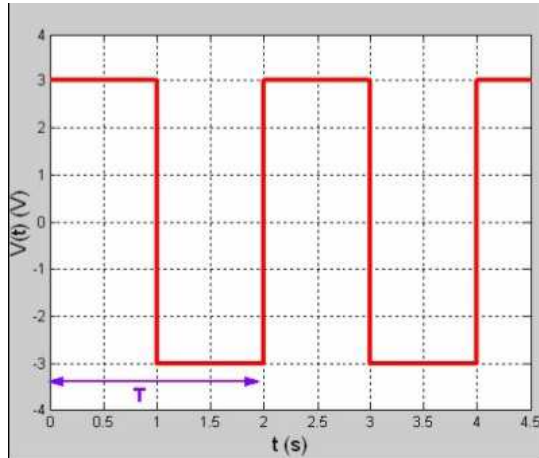
Ενεργός τιμή (root mean square value, rms, V_{rms})

Περίοδος (period, T)

Συχνότητα (frequency, f)

Φάση (phase, φ)

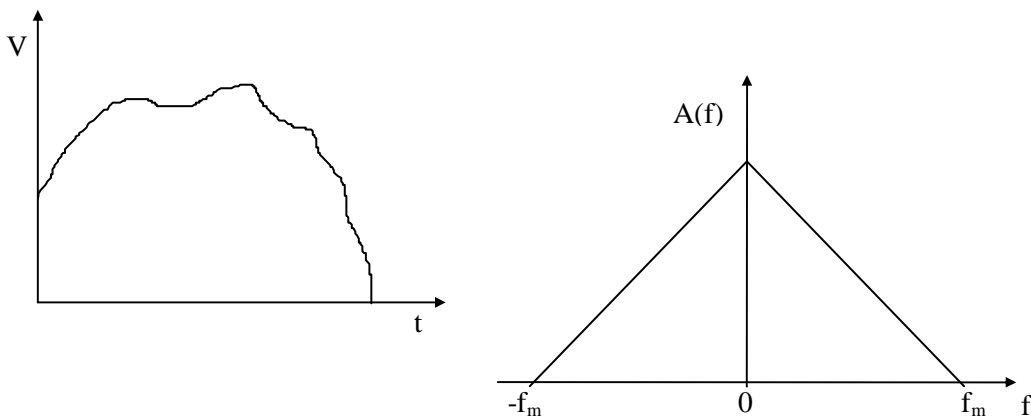
Παράδειγμα τετραγωνικού σήματος



Το σήμα μεταβάλλεται από τη μέγιστή του τιμή στην ελάχιστη σε χρόνο μηδέν (ιδανική περίπτωση). Σε αυτό το παράδειγμα η εξίσωση του σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$v(t) = \begin{cases} 3 & \text{για } 0 < t < T/2 \\ -3 & \text{για } T/2 < t < T \end{cases}$$

Παρακάτω φαίνεται η αναπαράσταση ενός αναλογικού μη περιοδικού σήματος στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων. Στο πεδίο των συχνοτήτων βλέπουμε την εμφάνιση πολλών συχνοτήτων με μεγαλύτερη συχνότητα την f_m .

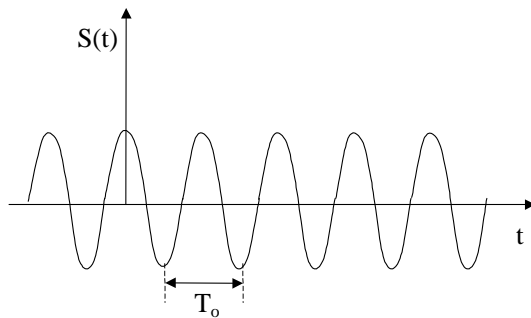


Σχ 1.3.1.α Αναλογικό σήμα στο χρόνο

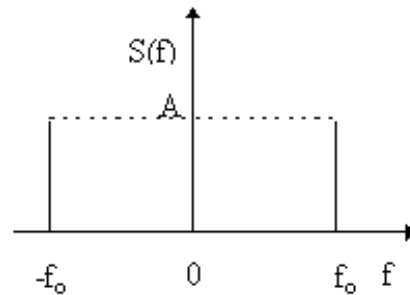
Σχ 1.3.1.β Φάσμα αναλογικού σήματος

Αν το σήμα είναι περιοδικό με περίοδο T_0 , τότε παρουσιάζει μία μόνο συχνότητα $f_0 = \frac{1}{T_0}$ στο πεδίο των συχνοτήτων.

Παρακάτω φαίνεται ένα περιοδικό ημιτονικό σήμα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων .



Σχ 1.3.2.α Πεδίο χρόνου



Σχ 1.3.2.β Πεδίο συχνοτήτων

1.3 Ανάλυση σημάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην έννοια του φάσματος. Ως **φάσμα** ορίζεται το σύνολο των συχνοτήτων όλων των ημιτονικών σημάτων με συγκεκριμένα πλάτη που πρέπει να προστεθούν ώστε να μας δώσουν το αρχικό σήμα. Ο λόγος που ορίστηκε η έννοια του φάσματος είναι για γίνει ευκολότερος ο τρόπος υπολογισμού της συμπεριφοράς ενός συστήματος. Σκοπός ήταν να μπορεί να αναλυθεί οποιοδήποτε σήμα σε ένα σύνολο από ημιτονικά σήματα. Αυτό γιατί ένα ημιτονικό σήμα διατηρεί τη μορφή του, κάτι που δεν ισχύει για οποιοδήποτε άλλο είδος σήματος. Η ανάλυση του σήματος κατά αυτόν τον τρόπο ονομάζεται ανάλυση Fourier. Σύμφωνα με τον όρο **σειρές Fourier**, κάθε σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί με μεταβλητή κάθε φορά τη συχνότητα. Αυτό αφορά τα περιοδικά σήματα. Για τα μη περιοδικά σήματα εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier.

Ορισμός σειρών Fourier

Εάν μια συνάρτηση f ορίζεται σε όλο το \mathbb{R} και υπάρχει αριθμός $\lambda > 0$ τέτοιος ώστε να ισχύει:
 $f(x) = f(x + \lambda)$, $x \in \mathbb{R}$

Τότε η συνάρτηση καλείται περιοδική, ο δε ελάχιστος αριθμός λ για τον οποίο ισχύει η παραπάνω σχέση καλείται αρχική περίοδος της f .

Παράδειγμα

Οι συναρτήσεις $\sin x$, $\cos x$ είναι περιοδικές με περίοδο 2π , ενώ οι συναρτήσεις $\sin \lambda x$, $\cos \lambda x$ με $\lambda > 0$, είναι περιοδικές με περίοδο $2\pi/\lambda$. Αν μια συνάρτηση f είναι περιοδική με περίοδο λ , τότε το γράφημα της f σε ένα οποιοδήποτε διάστημα $[a+n\lambda, a+(n+1)\lambda]$, προκύπτει από το γράφημά της στο διάστημα $[a, a+\lambda]$ με παράλληλη μετατόπισή της στον άξονα των x , κατά λ μονάδες μήκους (επαναλαμβάνεται δηλαδή το ίδιο γράφημα). Π.χ. ένα γράφημα περιοδικής συνάρτησης είναι και το παρακάτω:

Αν η f ορίζεται στο διάστημα $(-\lambda, \lambda)$ και εκτός του $(-\lambda, \lambda)$ είναι περιοδική με περίοδο 2λ , οι αριθμοί

$$a_0 = \frac{1}{2\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} f(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} f(x) \cos \frac{n\pi x}{\lambda} dx \quad \text{με } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\beta_n = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} f(x) \sin \frac{n\pi x}{\lambda} dx \quad \text{με } n = 1, 2, 3, \dots$$

καλούνται **συντελεστές Fourier** μιας συνάρτησης f .

Η σειρά συναρτήσεων

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left(a_n \cos nx + \beta_n \sin nx \right)$$

καλείται **σειρά Fourier** της συνάρτησης f .

Ορισμός μετασχηματισμού Fourier

Στην περίπτωση μιας μη περιοδικής συνάρτησης σε συνεχή χρόνο, ο μετασχηματισμός Fourier της είναι μια συνάρτηση της συχνότητας και περιέχει άπειρο εύρος συχνοτήτων. Για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier αλλά και για την αντιστροφή του στο πεδίο του χρόνου, απαιτείται η μαθηματική πράξη της ολοκλήρωσης

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x) e^{2\pi i x t} dx,$$

όπου

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x t} dx.$$

2. ΦΙΛΤΡΑ

Προκειμένου να κατανοήσουμε την έννοια και το ρόλο των φίλτρων σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα θα πρέπει πρώτα να καταλάβουμε την έννοια του όρου εύρος ζώνης. Ως *εύρος ζώνης* (Bandwidth) ορίζεται η διαφορά της μεγαλύτερης συχνότητας ενός φάσματος συχνοτήτων, μείον τη μικρότερη συχνότητα του φάσματος αυτού. Η μαθηματική παράσταση του εύρους ζώνης είναι:

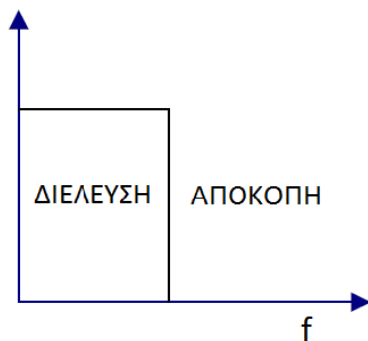
$$BW = f_{\max} - f_{\min}$$

Πιο πρακτικά, όταν μιλάμε για εύρος ζώνης ουσιαστικά αναφερόμαστε στην περιοχή εκείνη του φάσματος συχνοτήτων μέσω της οποίας το σήμα περνά αναλλοίωτο από την είσοδο του πομπού στην έξοδο του δέκτη.

Τα φίλτρα εφαρμόζονται στην περίπτωση όπου επιθυμούμε να μην περάσει αναλλοίωτο ένα σήμα αλλά να υποστεί συγκεκριμένες αλλαγές στη φασματική του ζώνη. Επομένως το σήμα ξεκινάει διαφορετικό από την πηγή από ότι καταλήγει στο δέκτη. Υπάρχουν τέσσερα είδη φίλτρων ανάλογα με τις 'περικοπές' που επιθυμούμε κάθε φορά στις συχνότητες του σήματος.

A. Χαμηλοπερατό ή χαμηλοδιαβατό φίλτρο (Low Pass Filter)

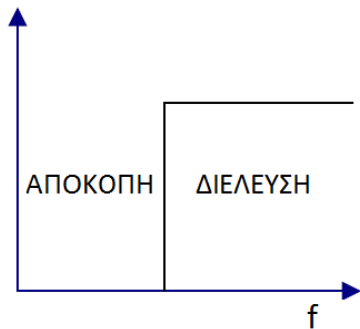
Πρόκειται για φίλτρο το οποίο επιτρέπει να διέλθουν μόνο οι χαμηλές συχνότητες ενός σήματος.



2.α Γραφική παράσταση χαμηλοπερατού φίλτρου

B. Υψηλοπερατό ή υψηλοδιαβατό φίλτρο (High Pass Filter)

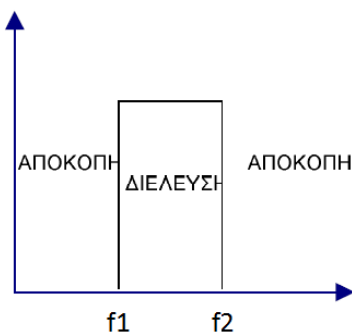
Είναι το φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση μόνο των υψηλών συχνοτήτων ενός σήματος.



2.β Γραφική παράσταση υψηλοπερατού φίλτρου

Γ. Ζωνοπερατό φίλτρο (Band Pass Filter)

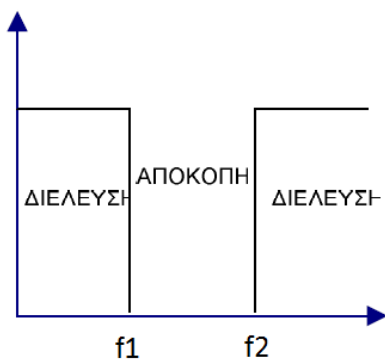
Φίλτρο στο οποίο επιτρέπεται η διέλευση συγκεκριμένου πεδίου μεσαίων συχνοτήτων.



2.γ Γραφική παράσταση ζωνοπερατού φίλτρου

Δ. Ζωνοαπαγορευτικό φίλτρο (Band Stop Filter)

Πρόκειται για φίλτρο που απαγορεύει τη διέλευση συγκεκριμένου μεσαίου τμήματος συχνοτήτων.



2.δ Γραφική παράσταση ζωνοαπαγορευτικού φίλτρου

Για να προσεγγίσουμε το εύρος ζώνης λειτουργίας ενός φίλτρου έχει οριστεί ότι τα όρια της ζώνης είναι ουσιαστικά οι συχνότητες, όπου η ισχύς του σήματος κατά την έξοδο μειώνεται κατά 3dB. Δηλαδή, μειώνεται κατά το διπλάσιο του αρχικού σήματος. Αυτές οι συχνότητες αποκαλούνται **συχνότητες αποκοπής**.

3. ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν βασικές γνώσεις για τις ενισχυτικές διατάξεις (κυρίως ακουστικών συχνοτήτων), οι οποίες θα μας χρειαστούν στη μελέτη και ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων στη συνέχεια. Τα κύρια χαρακτηριστικά των ενισχυτών που προορίζονται για την ενίσχυση των ακουστικών σημάτων είναι τα παρακάτω :

1) Η απολαβή. Για τους ενισχυτές τάσης ορίζεται ο συντελεστής ενίσχυσης ως το πηλίκο της τάσης εξόδου του ενισχυτή προς την τάση εισόδου του, δηλαδή :

$$A_v = \frac{U_{εξ}}{U_{εισ}}$$

Για τους ενισχυτές ισχύος, ο συντελεστής ενίσχυσης ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου, δηλαδή :

$$A_w = \frac{P_{εξ}}{P_{εισ}}$$

Στην πράξη χρησιμοποιείται ο λογάριθμος του συντελεστή ενίσχυσης πολλαπλασιασμένος επί 20 (για τάση) ή επί 10 (για ισχύ) και το αποτέλεσμα ονομάζεται **απολαβή G (Gain)** ή **ενίσχυση ή κέρδος** της ενισχυτικής διάταξης. Η απολαβή εκφράζεται σε ντεσιμπέλς (decibels, dB) και είναι:

$$G = 20 \log A_v \quad (\text{dB}) \quad \text{για τάση}$$

$$G = 10 \log A_w \quad (\text{dB}) \quad \text{για ισχύ}$$

Οι τελευταίες εκφράσεις δικαιολογούνται από το γεγονός ότι τα όργανα της ακοής ερεθίζονται ανάλογα με το λογάριθμο της ισχύος του ήχου που τα διεγείρει .

Όταν η ενισχυτική διάταξη αποτελείται από πολλές βαθμίδες στη σειρά, τότε ο συντελεστής ενίσχυσης και η απολαβή δίνονται :

$$A_{ολ} = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n$$

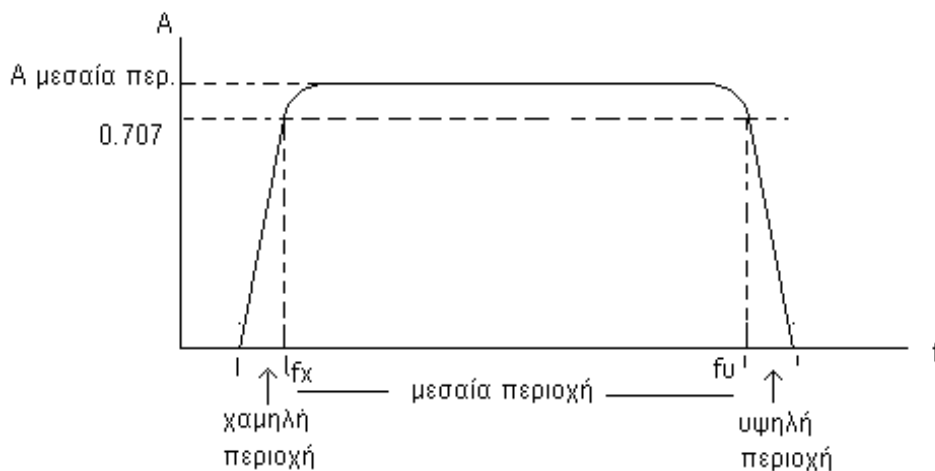
$$G_{ολ} = G_1 + G_2 + \dots + G_n \quad (\text{dB})$$

2) Η καμπύλη απόκρισης. Συνήθως, επιθυμούμε η κυματομορφή εξόδου να είναι ίδια με την κυματομορφή στην είσοδο του ενισχυτή, ώστε η παραμόρφωση του σήματος να είναι αμελητέα.

Το σήμα εισόδου του ενισχυτή συνήθως αποτελείται από πολλές συχνότητες κατανεμημένες σε μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων. Για να έχουμε μια κυματομορφή χωρίς παραμόρφωση πρέπει να ενισχύσουμε ομοιόμορφα όλες τις συχνότητες. Εάν δε γίνει αυτό, τότε έχουμε στον ενισχυτή παραμόρφωση συχνότητας και μη πιστή αναπαραγωγή του σήματος εισόδου στην έξοδο. Εάν απεικονίσουμε τη λειτουργία ενός ενισχυτή σαν ενίσχυση σε συνάρτηση με τη συχνότητα κάτω

από ιδανικές συνθήκες, ένας ενισχυτής θα πρέπει να έχει μια καμπύλη που εμφανίζεται σαν μια οριζόντια ευθεία γραμμή σε όλη την επιθυμητή περιοχή συχνοτήτων. Η συμπεριφορά αυτή του ενισχυτή ως προς τη συχνότητα, σε σχέση βέβαια πάντα με την απολαβή του σε όλη την ακουστική περιοχή συχνοτήτων, ονομάζεται απόκριση.

Ο συντελεστής ενίσχυσης A δίνεται για όλη την ακουστική περιοχή συχνοτήτων από μια καμπύλη που ονομάζεται καμπύλη απόκρισης του ενισχυτή. Στο Σχ. 3.1 παρουσιάζεται η μορφή της καμπύλης απόκρισης.



Σχ. 3.1 Καμπύλη απόκρισης ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων

Η περιοχή μεταξύ των συχνοτήτων f_u και f_x για τις οποίες η ενίσχυση είναι ομοιόμορφη ονομάζεται μεσαία περιοχή συχνοτήτων. Δεξιά και αριστερά των συχνοτήτων f_u και f_x εκτείνονται η χαμηλή και η υψηλή περιοχή συχνοτήτων, για τις οποίες η ενίσχυση έχει πέσει στα 70.7% της συνολικής ενίσχυσης της μεσαίας περιοχής.

Η διαφορά αυτών των δύο συχνοτήτων ονομάζεται και εύρος ζώνης $BW = f_u - f_x$.

Οι συχνότητες f_u και f_x ονομάζονται συχνότητες αποκοπής ή συχνότητες ορίου ζώνης ή συχνότητες ημισείας ισχύος ή σημεία $-3dB$.

Στις οριακές αυτές τιμές των συχνοτήτων f_u και f_x η απολαβή γίνεται:

$$20 \log (0.707) = -20 \log (1.414) = -3dB.$$

Δηλαδή έχουμε μείωση της απολαβής κατά 3dB σε σχέση με τη μέγιστη απολαβή.

4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

4.1 Ορισμός ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι μια μορφή ενέργειας που προκύπτει από το συνδυασμό ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, που είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσής τους. Σύμφωνα με τη φυσική, κάθε ηλεκτρικό κύκλωμα όταν διαρρέεται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα ακτινοβολεί ένα ποσοστό της ενέργειας που δέχεται σε μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η ταχύτητα διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος υπολογίζεται από τον τύπο:

$$c' = c/\sqrt{\epsilon}$$

όπου ϵ η διηλεκτρική σταθερά του υλικού μέσω του οποίου μεταφέρεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Στο κενό η ταχύτητα διάδοσης του είναι $c = 300.000\text{km/sec} = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$.

Το πιο σημαντικό μέγεθος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι το μήκος κύματος (λ).

Ως **μήκος κύματος** ορίζεται η απόσταση που διανύει ένα κύμα σε χρονικό διάστημα περιόδου T του ηλεκτρικού σήματος από το οποίο ξεκίνησε. Ισχύει:

$$\lambda = c \cdot T, \quad (f = 1/T)$$

4.2 Μετάδοση και διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά τη μετάβασή τους από την κεραία πομπού στην κεραία του δέκτη ακολουθούν δύο δρόμους. Ένα μέρος από αυτά διαδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας της γης και ονομάζεται κύμα εδάφους και ένα άλλο μέρος εκπέμπεται υπό γωνία ως προς την επιφάνεια της γης. Ανακλάται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και ονομάζεται κύμα χώρου. Η απόσταση διάδοσης του κύματος εδάφους εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους (π.χ. υγρό έδαφος σημαίνει μεγαλύτερη απόσταση διάδοσης) και από τη συχνότητα του κύματος (π.χ. μεγαλύτερη συχνότητα σημαίνει μικρότερη απόσταση διάδοσης, γιατί αυξάνει η απορρόφηση). Οι ραδιοσυνδέσεις σε πολύ μεγάλες αποστάσεις γίνονται με τα κύματα χώρου και κυρίως στα βραχέα. Τα κύματα αυτά ανακλώνται στην ιονόσφαιρα και επιστρέφουν στη γη, εφ' όσον η συχνότητά τους είναι τέτοια, ώστε να γίνεται η ανάκλαση.

Μεταξύ του σημείου που το κύμα εδάφους μηδενίζεται και του σημείου που εμφανίζεται το κύμα χώρου μεσολαβεί μία περιοχή στην οποία η λήψη είναι αδύνατη και ονομάζεται ζώνη σιγής ή νεκρή ζώνη.

Πολλές φορές φθάνει στο δέκτη και κύμα εδάφους και κύμα χώρου και επειδή τα κύματα αυτά διανύουν διαφορετικές αποστάσεις είναι δυνατόν να εμφανίζονται είτε συμφασικά μεταξύ τους οπότε προστείνονται είτε με διαφορά φάσης 180° οπότε αφαιρούνται. Έτσι παρατηρούμε αυξομειώσεις του σήματος κατά τη λήψη. Οι αυξομειώσεις αυτές ονομάζονται διαλείψεις.

Η διάδοση των μακρών κυμάτων γίνεται αποκλειστικά με κύματα εδάφους γιατί τα κύματα χώρου απορροφώνται από την ιονόσφαιρα. Η απορρόφησή τους από τη γη είναι πολύ μικρή για αυτό διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις.

Τα μεσαία κύματα διαδίδονται και με κύματα εδάφους, αλλά και με κύματα χώρου. Τα κύματα χώρου όμως την ημέρα απορροφώνται από το πρώτο στρώμα της ιονόσφαιρας, ενώ τη νύχτα επειδή εξαφανίζεται αυτό το στρώμα διαδίδονται με κύματα χώρου και η απόσταση διάδοσης είναι μεγάλη. Τα βραχέα κύματα διαδίδονται βασικά με κύματα χώρου γιατί τα κύματα εδάφους έχουν μεγάλη απορρόφηση. Τα υπερβραχέα κύματα δεν ανακλώνται από την ιονόσφαιρα, αλλά τη διαπερνούν και χάνονται στο διάστημα. Επίσης, τα κύματα εδάφους έχουν μεγάλη απορρόφηση από τη γη, δηλαδή τα κύματα αυτά δεν πάνε σε μεγάλες αποστάσεις και η ραδιοσύνδεση επιτυγχάνεται μόνο με οπτική επαφή της κεραίας πομπού με την κεραία του δέκτη.

4.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα επινοήθηκε από τους επιστήμονες για να διευκολυνθεί η μελέτη της συμπεριφοράς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτό το φάσμα το χώρισαν σε τμήματα ανάλογα με τη συχνότητα του κάθε κύματος. Το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιείται για τη διάδοση των ραδιοκυμάτων βρίσκεται μεταξύ των συχνοτήτων 10kHz και 100GHz με μήκη κύματος από 30000 km μέχρι 1mm. Οι συχνότητες που ενδιαφέρουν για τη διάδοση σήματος ραδιοφωνίας είναι οι πολύ υψηλές συχνότητες VHF (Very High Frequency) 30-300MHz και οι εξαιρετικά υψηλές συχνότητες UHF (Ultra High Frequency) 300-3000MHz. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνία FM (88-108MHz) ανήκουν στη ζώνη συχνοτήτων VHF. Στη διάδοση σημάτων σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους το σήμα φτάνει από το σταθμό εκπομπής στην κεραία του δέκτη. Οι αποστάσεις που μπορεί να καλύψει το σήμα μπορούν να φτάσουν σε απόσταση ακόμα και εκατοντάδων ή και χιλιάδων χιλιομέτρων, ανάλογα με τη διαδρομή που θα ακολουθήσει το σήμα. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί πως κατά τη μετάδοση σήματος από κάποιον πομπό όταν η απόστασή του διπλασιάζεται από την πηγή το κύμα γίνεται τέσσερις φορές ασθενέστερο.

Ως ραδιοφωνικό φάσμα ορίζεται το άθροισμα των συχνοτήτων, των μεταδιδόμενων ημιτονικών σημάτων με συγκεκριμένα πλάτη, το οποίο μας δίνει το αρχικό σήμα.

$$s(t) = A_1 \sin(\Omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\Omega t + \varphi_2) + A_3 \sin(3\Omega t + \varphi_3) + \dots$$

Όπως φαίνεται στην παραπάνω παράσταση, η φάση είναι διαφορετική κάθε φορά. Το πλάτος του κάθε ημιτονικού σήματος προσδιορίζει την ακουστική ποιότητα του σήματος. 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.

Ζώνη συχνοτήτων	Όνομα	Σύμβολο
100Hz-3kHz	Άκρως χαμηλές συχνότητες	ELF

3kHz-30kHz	Υπέρμακρα	VLF
30kHz-300kHz	Μακρά	LF
300kHz-3MHz	Μεσαία	MF
3MHz-30MHz	Βραχεία	HF
30MHz-300MHz	Υπερβραχεία	VHF
300MHz-3GHz	Δεκατομετρικά Μικροκύματα	UHF
3GHz-30GHz	Εκατοστομετρικά Μικροκύματα	SHF
30GHz-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 X	X

Πίνακας: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

5. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

5.1 Ορισμός διαμόρφωσης

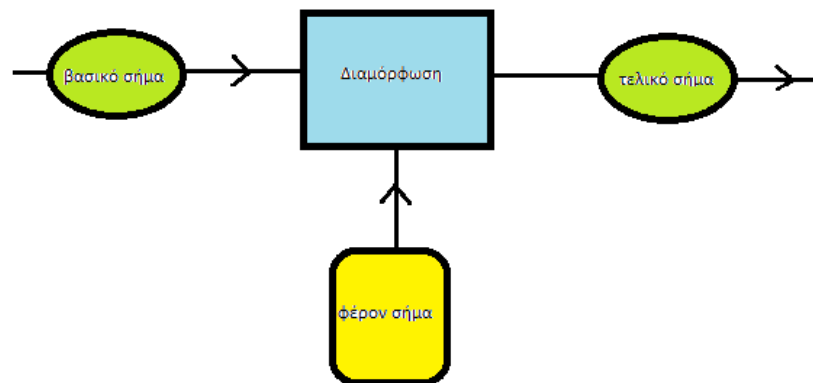
Για να πετύχουμε τη μετάδοση οποιουδήποτε σήματος είναι αναγκαία η χρήση ενός επιπλέον υψίσυχνου σήματος, που ονομάζεται φέρον. Η διαδικασία της μεταφοράς του βασικού μας σήματος σε συνδυασμό με το φέρον ονομάζεται *διαμόρφωση* του σήματος. Η επιλογή του φέροντος γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά του βασικού σήματος. Τα βασικά αυτά χαρακτηριστικά είναι το πλάτος, η συχνότητα και η φάση.

Ο λόγος χρήσης του φέροντος σήματος είναι για να επιτευχθεί καλύτερη ποιοτικά εκπομπή σήματος. Στην περίπτωση που δε χρησιμοποιούνταν αυτά τα υψηλόσυχνα σήματα θα υπήρχε πρόβλημα παρεμβολών από τον ένα ραδιοφωνικό σταθμό στον άλλον. Μία ακόμη χρησιμότητα των φερόντων είναι η μικρότερη ευαισθησία που παρουσιάζεται στα υψηλόσυχνα σήματα από ότι στα χαμηλόσυχνα. Τέλος, εάν η μετάδοση του σήματος γινόταν με χαμηλή συχνότητα οι κεραίες εκπομπής θα έπρεπε να έχουν τεράστια μεγέθη σύμφωνα πάντα με τον τύπο $c=\lambda*f$, όπου λ το

μήκος κύματος εκπομπής. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το γεωμετρικό πλάτος των κεραιών εκπομπής είναι $\lambda/2$ ή $\lambda/4$. Η συχνότητα του φέροντος σήματος είναι ανάλογη με τις διακυμάνσεις του πλάτους ενός σήματος. Όσο αυξάνεται το πλάτος τόσο αυξάνεται και η συχνότητα του φέροντος και αντίστροφα.

Ανάλογα με το βασικό και το φέρον σήμα, η διαμόρφωση χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες.

- Την αναλογική διαμόρφωση, όπου το βασικό σήμα είναι αναλογικό και το φέρον ένα ημιτονικό σήμα.
- Την παλμική διαμόρφωση, όπου το βασικό σήμα είναι αναλογικό και το φέρον ένα παλμικό υψίσυχο σήμα.
- Την ψηφιακή διαμόρφωση, με το βασικό σήμα να είναι ψηφιακό.



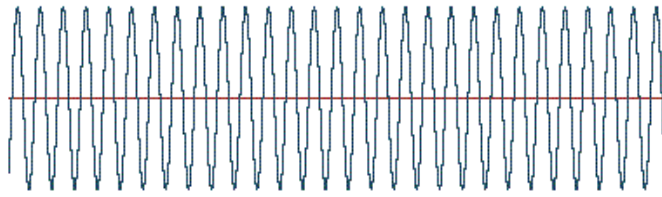
5.1. Διαδικασία διαμόρφωσης σήματος

Εμείς θα ασχοληθούμε με την αναλογική διαμόρφωση. Θα αναφερθούν οι τρόποι διαμόρφωσης και τα χαρακτηριστικά τους. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στη διαμόρφωση κατά συχνότητα η οποία είναι και το κύριο θέμα της εργασίας αυτής.

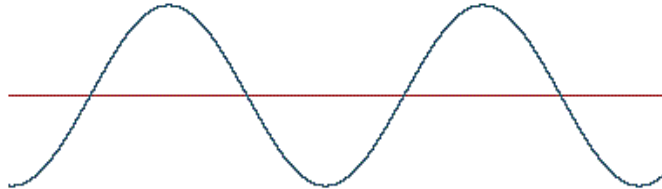
5.2 Γενικά περί διαμορφώσεων AM – FM

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε δύο είδη αναλογικής διαμόρφωσης. Αυτά είναι η διαμόρφωση κατά πλάτος ή Amplitude modulation (AM) και η διαμόρφωση κατά συχνότητα ή Frequency modulation (FM). Στο μεν σήμα με διαμόρφωση κατά πλάτος η τιμή της συχνότητας παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται το πλάτος, ενώ στο δε σήμα με διαμόρφωση κατά συχνότητα, το πλάτος του σήματος παραμένει σταθερό και μεταβάλλεται η συχνότητα.

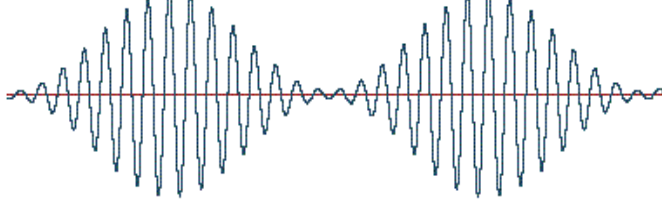
Ημιτονοειδές διαμορφώνον σήμα



Φέρον σήμα

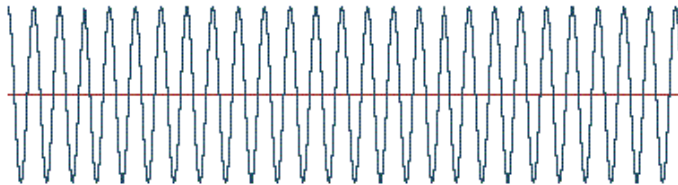


Διαμορφωμένο σήμα

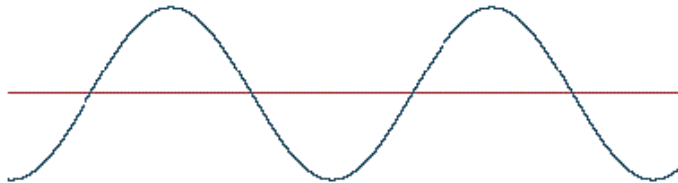


5.2.α Γραφική παράσταση διαμόρφωσης AM

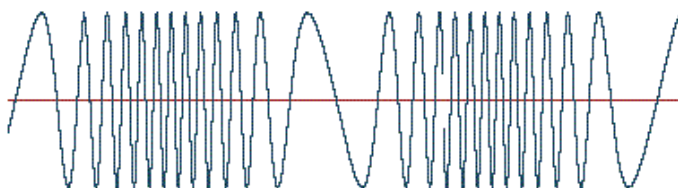
Ημιτονοειδές διαμορφώνον σήμα



Φέρον σήμα



Διαμορφωμένο σήμα



5.2.β Γραφική παράσταση διαμόρφωσης FM

5.3 Διαμόρφωση AM

Το εύρος συχνοτήτων στη διαμόρφωση AM είναι από 531kHz έως 1602kHz. Στη διαμόρφωση κατά πλάτος το σήμα δίδεται από τη σχέση:

$$y=[A+B\eta\mu(2\pi ft)]\sigma\upsilon\nu(2\pi Ft)$$

όπου f η συχνότητα της πληροφορίας, F η συχνότητα του φέροντος, A το πλάτος του φέροντος και B το πλάτος του ακουστικού σήματος. Το πλάτος του φέροντος σήματος μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή του ακουστικού σήματος.

Σε έναν πομπό AM, η πληροφορία που εκπέμπουμε (ήχος), μετατρέπεται σε τάση. Η τάση αυτή ενισχύεται και χρησιμοποιείται για τη μεταβολή του φέροντος σήματος. Η ισχύς προστίθεται στο φέρον κατά τη διαδικασία της διαμόρφωσης ανάλογα με τη μεταβολή της τάσης. Κατά τη διαμόρφωση, το σήμα χωρίζεται σε τρεις ξεχωριστές συχνότητες που μεταδίδονται. Αυτές είναι η αρχική συχνότητα του φέροντος, μία χαμηλότερης ισχύος πλευρική ζώνη συχνοτήτων (LSB) κάτω από την φέρουσα και μία ανώτερη πλευρική ζώνη συχνοτήτων (USB) πάνω από την φέρουσα. Ουσιαστικά, αυτές οι πλευρικές ζώνες παίζουν το ρόλο ενός 'ειδώλου' η μία στην άλλη και περιέχουν την ίδια πληροφορία. Όταν το σήμα ληφθεί από έναν δέκτη AM οι συχνότητες συνδυάζονται ώστε να ακουστεί το αρχικό μήνυμα. Το εύρος συχνοτήτων που καταλαμβάνει η κάθε πλευρική ζώνη είναι τόσο περισσότερο όσο υψηλή είναι η ακουστική συχνότητα που μεταδίδεται. Για παράδειγμα, αν η ακουστική συχνότητα είναι της τάξεως των 5kHz τότε ο χώρος που καταλαμβάνει ένα σήμα AM θα είναι 10kHz. Όσον αφορά το φέρον σήμα, αυτό καταλαμβάνει μηδαμινό εύρος συχνότητας και θεωρείται αμελητέο.

5.4 Διαμόρφωση FM

Η επικρατέστερη εκπομπή ραδιοφωνικού σήματος είναι με διαμόρφωση συχνότητας, FM. Το πεδίο συχνοτήτων κυμαίνεται μεταξύ 87,5-108 MHz. Ένα σήμα στη διαμόρφωση FM αναπαριστάται από την εξίσωση:

$$y=A\eta\mu[(2\pi Ft)K\sigma\upsilon\nu(2\pi ft)]$$

όπου F και A η συχνότητα και το πλάτος του φέροντος αντίστοιχα, f η συχνότητα του σήματος πληροφορίας και K ένας συντελεστής της FM διαμόρφωσης.

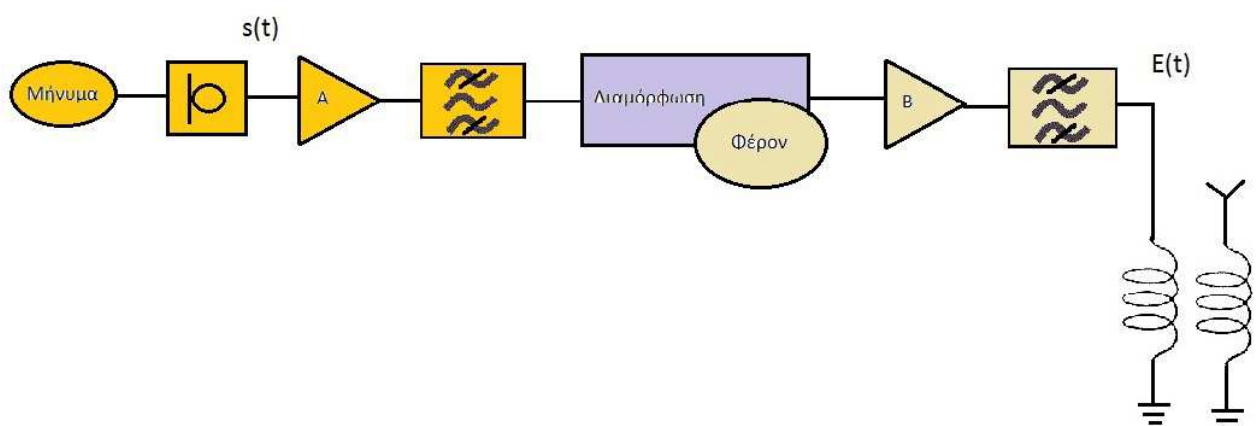
Στη FM διαμόρφωση υπάρχει μία επικαλούμενη κεντρική συχνότητα η οποία είναι η μη διαμορφωμένη συχνότητα του σήματος. Όταν ένα σήμα FM εκπεμφθεί, τότε η φέρουσα συχνότητα ταλαντώνεται πάνω και κάτω της κεντρικής συχνότητας. Το κατά πόσο θα ταλαντωθεί πάνω ή κάτω ονομάζεται απόκλιση. Σε ένα διάστημα συχνότητας 150kHz ένας ραδιοφωνικός σταθμός FM έχει απόκλιση 75kHz.

5.5 Σύγκριση AM – FM

Ένα AM σήμα έχει το πλεονέκτημα του να μπορεί να παραχθεί εύκολα σε μία συσκευή AM πομπού και να ληφθεί από δέκτες απλούς χωρίς ιδιαίτερα περίπλοκα χαρακτηριστικά. Επίσης, μπορεί εύκολα να συντονιστεί σε συνηθισμένους δέκτες. Το βασικότερο μειονέκτημα στη διαμόρφωση AM είναι η σπατάλη ενέργειας που πραγματοποιείται. Τα δύο τρίτα της ισχύος ενός AM σήματος συσσωρεύεται στο φέρον σήμα, το οποίο δεν περιλαμβάνει καμία πληροφορία. Οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων εκμεταλλεύονται το ένα τρίτο της ισχύος, ενώ περιέχουν την ίδια ακριβώς πληροφορία. Δηλαδή, μόλις το ένα έκτο της συνολικής ισχύος του AM πομπού χρησιμοποιείται με πιο χρήσιμο και παραγωγικό σκοπό. Η AM διαμόρφωση είναι αρκετά πιο επιρρεπής στον ηλεκτρονικό θόρυβο από ότι η διαμόρφωση FM. Από την άλλη μεριά, το AM σήμα υπερτερεί στις χαμηλές συχνότητες και για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται ακόμα σε ζώνες μακρών και μεσαίων κυμάτων. Η ακουστική ποιότητα του σήματος και η πλήρης απουσία θορύβου είναι τα κύρια χαρακτηριστικά που ορίζουν τη διαμόρφωση FM επικρατέστερη από την AM. Επίσης, ως πλεονέκτημα της διαμόρφωσης FM θεωρείται και η δυνατότητα της αυτόματης ρύθμισης. Αυτή η δυνατότητα έχει ως αποτέλεσμα ένα καθαρό σήμα στην έξοδο του δέκτη. Αυτό γιατί, έστω κι αν φθάσουν δύο σήματα στο δέκτη η διαμόρφωση FM έχει τη δυνατότητα να κρατά αυτό με την ισχυρότερη ένταση. Βασικότερο ίσως μειονέκτημα της FM διαμόρφωσης είναι το εύρος συχνότητας που απαιτεί, καθώς η απόκλιση από τον έναν ραδιοφωνικό σταθμό στον άλλον είναι μεγάλη. Αυτή η απόκλιση έχει βέβαια σαν αποτέλεσμα την καθαρότερη λήψη σήματος στον δέκτη.

6. ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΖΩΝΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ FM

6.1 Τυπικό κύκλωμα ραδιοφωνικού πομπού



6.1.α Ραδιοφωνικός πομπός

6.2 Γενικά περί εκπομπής σήματος

Ένας ραδιοφωνικός αλλά και γενικότερα ένας οποιοσδήποτε πομπός έχει τη μορφή του σχήματος 6.1.α. Χωρίζουμε το σχεδιάγραμμα σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος επεξεργάζεται το βασικό σήμα. Εκεί υπάρχει ο αισθητήρας μετατροπής του μηνύματος σε ηλεκτρικό σήμα (συνήθως ένα μικρόφωνο), ο ενισχυτής ο οποίος ενισχύει το σήμα κάθε φορά με κατάλληλο πλάτος και ισχύ, ώστε να διαμορφωθεί το φέρον. Επίσης, φίλτρα κατάλληλα, ώστε να τίθενται όρια της φασματικής ζώνης του σήματος. Το δεύτερο μέρος είναι εκείνο της διαμόρφωσης. Εκεί πραγματοποιείται οποιοδήποτε είδος διαμόρφωσης έχουμε επιλέξει. Το τρίτο μέρος αφορά την επεξεργασία του φέροντος σήματος. Εκεί υπάρχει η γεννήτρια του φέροντος ή αλλιώς ο ταλαντωτής, ακολουθεί η διαμόρφωση του φέροντος και τέλος η ενίσχυση του διαμορφωμένου φέροντος. Έτσι το φέρον καταλήγει στο μέσο διάδοσης με αρκετά μεγάλη ισχύ.

Το φέρον σήμα δημιουργείται με τέτοιο τρόπο ανάλογα με το αν ο πομπός θα λειτουργήσει σε μία μόνο συχνότητα φέροντος ή αν θα λειτουργήσει με κύκλωμα σύνθεσης συχνότητας. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται χρήση απλού αρμονικού ταλαντωτή. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται το αποκαλούμενο κύκλωμα κλειδώματος φάσης ή αλλιώς PLL (Phase Loop Locked). Η χρήση του PLL γίνεται εφ' όσον επιθυμούμε να επέμβουμε στον προγραμματισμό της κεντρικής συχνότητας του φέροντος.

Αφού λοιπόν δημιουργηθεί και διαμορφωθεί το φέρον σήμα όπως αναφέραμε και παραπάνω θα πρέπει να ενισχυθεί. Η ενίσχυση επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός επιλεκτικού ενισχυτή υψηλών συχνοτήτων. Μετά τη διαμόρφωση λοιπόν η κεντρική συχνότητα εκπομπής καταλαμβάνεται από το φάσμα του σήματος. Έτσι το εύρος της φασματικής ζώνης που προκύπτει είναι διαφορετικό από το εύρος του πρωταρχικού σήματος. Ο ενισχυτής εξόδου θα πρέπει να ενισχύσει με ομοιογένεια όλες τις φασματικές συνιστώσες του φέροντος. Πολλές φορές παρατηρείται ένα φαινόμενο στην κεραία εκπομπής ως προς τη συχνότητα εκπομπής. Η συχνότητα αυτή δεν είναι η ίδια που χρησιμοποιήθηκε στο στάδιο της διαμόρφωσης. Για αυτό το λόγο, πριν τον τελικό ενισχυτή ισχύος γίνεται η μετάθεση της συχνότητας, ώστε να μην αλλοιωθεί η φασματική φυσιογνωμία του σήματος.

Η τροφοδοσία μίας διάταξης του σχήματος 6.1.α γίνεται με μία πηγή τροφοδοσίας σταθερής τάσης.

6.2.1 Ταλαντωτές και δημιουργία φέροντος σήματος

Η δημιουργία ενός φέροντος σήματος οφείλεται στη λειτουργία ενός ταλαντωτή. Ο ταλαντωτής είναι ένα ημιτονικό κύκλωμα δομημένο με συντονιζόμενα κυκλώματα L – C. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές των κυκλωμάτων L – C.

Όταν ένα κύκλωμα L-C διεγείρεται από ρεύμα υφίσταται αυτοταλάντωση η οποία έχει συχνότητα:

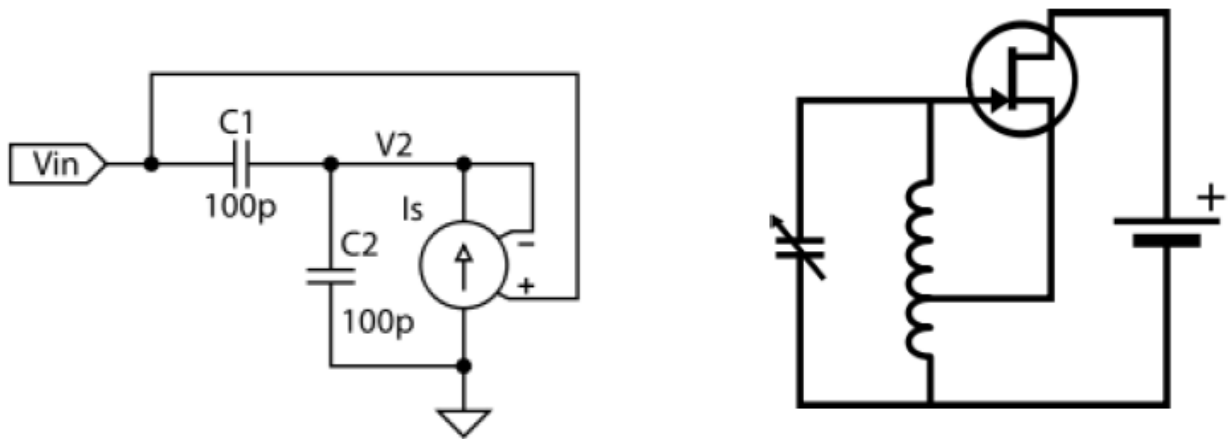
$$f_0 = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$$

Υπάρχει ένα ποσοστό απόσβεσης λόγω των ωμικών απωλειών του κυκλώματος. Η απόσβεση αυτή χαρακτηρίζει την ποιότητα του κυκλώματος. Η ποιότητα αυτή συμβολίζεται με το συντελεστή ποιότητας:

$$Q=(2\pi f_0L)/r$$

Όπου r είναι η ωμική αντίσταση της επαγωγής.

Για να μη δημιουργείται απόσβεση στο κύκλωμα είναι απαραίτητη η συνεχής επανατροφοδότησή του με ενέργεια, η οποία ισοσταθμίζει τις απώλειες και δημιουργεί σταθερές ταλαντώσεις. Για να επιτευχθεί η απώλεια των αποσβέσεων γίνεται χρήση ενός ενισχυτή με τρανζίστορ. Ουσιαστικά, το τρανζίστορ ενισχύει μέρος της επανατροφοδοτούμενης ενέργειας του κυκλώματος και το ανατροφοδοτεί ανά κάθε κύκλο λειτουργίας του. Υπάρχουν πολλά είδη ταλαντωτών όπως για παράδειγμα ο ταλαντωτής Colpitts και ο ταλαντωτής Hartley (βλ. αντίστοιχα σχήματα παρακάτω).



Μία παραλλαγή των ταλαντωτών είναι με χρήση κυκλωμάτων που περιλαμβάνουν κρύσταλλο. Ένα κομμάτι του συντονιζόμενου κυκλώματος αντικαθιστάται από κρύσταλλο. Ο κρύσταλλος αυτός έχει ως αποτέλεσμα την αρκετά μεγάλη σταθερότητα της συχνότητας λειτουργίας του ταλαντωτή. Αυτό συμβαίνει, γιατί ο κρύσταλλος αποτελεί στην ουσία ένα αυτοταλαντούμενο κύκλωμα με υψηλό συντελεστή ποιότητας Q και επιβάλλεται στον ταλαντωτή η συχνότητα αυτοταλάντωσής του.

Ένας ταλαντωτής χαρακτηρίζεται από τέσσερα βασικά λειτουργικά του χαρακτηριστικά. Αυτά είναι:

- A) Η συχνότητα λειτουργίας του ή αλλιώς η συχνότητα του σήματος στην έξοδο του ταλαντωτή.
- B) Η ακρίβεια της συχνότητάς του ή το κατά πόσο επηρεάζεται η συχνότητα από εξωγενείς παράγοντες όπως π.χ. η θερμοκρασία.
- Γ) Η φασματική καθαρότητα του σήματος που δίνει. Είναι η καθαρότητα του σήματος στην έξοδο ενός ταλαντωτή εάν λάβουμε υπ' όψιν το θόρυβο.
- Δ) Η σταθερότητα του πλάτους του σήματος. Είναι βασική η σταθερότητα του πλάτους του σήματος στην έξοδο του ταλαντωτή ανεξάρτητα από παράγοντες, όπως οι διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας, η θερμοκρασία, η φθορά των εξαρτημάτων κλπ.

Στην εργασία αυτή το κύκλωμα ταλαντωτή που θα χρησιμοποιηθεί είναι ένας ταλαντωτής Colpitts, για αυτό παρακάτω αναφέρουμε αναλυτικά τη λειτουργία του ταλαντωτή Colpitts.

6.2.2 Ταλαντωτής Colpitts – Αναλυτική λειτουργία

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο ταλαντωτής ή **οδηγός βαθμίδα** είναι το κύκλωμα που ουσιαστικά παράγει το φέρον σήμα. Η σταθερότητα της συχνότητας εκπομπής ενός πομπού εξαρτάται αποκλειστικά από τις συνθήκες λειτουργίας του ταλαντωτή του. Για την εξασφάλιση, όσο το δυνατό, σταθερής συχνότητας, ο ταλαντωτής σχεδιάζεται να παρέχει χαμηλή ισχύ. Η ισχύς αυξάνεται με ενισχυτικές βαθμίδες, που ακολουθούν τον ταλαντωτή.

Ένα τέτοιο κύκλωμα παραγωγής υψηλής συχνότητας είναι το κύκλωμα του ταλαντωτή Colpitts. Χρησιμοποιεί σαν κυμαινόμενο κύκλωμα (κύκλωμα δεξαμενής) ένα πηνίο με δύο πυκνωτές σχ.6.2. Ενδεικτικά τα υλικά και η τροφοδοσία του κυκλώματος του Σχ.6.2 θα μπορούσαν να έχουν τις εξής τιμές:

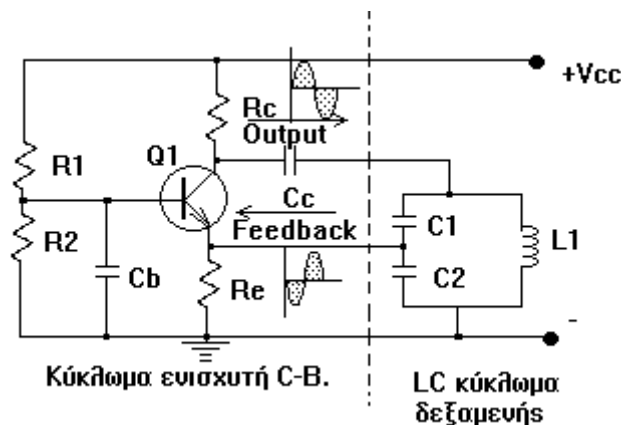
Τροφοδοτικό 9V DC , 1 mA

R1=180K, R2= 47K, R3=150K, R4=39K

C1=0.01μf C2=C3=0.22μf C4=100pf C5=5000pf C6 =100 pF ,

L1=10mH

Tr=Q1=2N2219A



Σχ.6.2 Κύκλωμα ταλαντωτή Colpitts

Το κύκλωμα του ταλαντωτή αποτελείται από δύο μέρη, τον ενισχυτή σε συνδεσμολογία κοινής βάσης και το κύκλωμα δεξαμενής. Το Q1 τρανζίστορ συνδέεται σαν ενισχυτής κοινής βάσης. Ο πυκνωτής Cb γειώνει τη βάση για σήματα AC. Η πόλωση της βάσης και η σταθερότητα της πόλωσης γίνεται μέσω του διαιρέτη τάσης που αποτελείται από τις αντιστάσεις R1// R2 , από την τάση του τροφοδοτικού Vcc και την αντίσταση εκπομπού Re.

Οι δύο πυκνωτές C1 και C2 αποτελούν την ολική χωρητικότητα του κυκλώματος δεξαμενής LC. Συνδέονται έτσι ώστε ο C1 είναι στο κύκλωμα του συλλέκτη και ο C2 είναι στο κύκλωμα του εκπομπού. Η τάση AC του κυκλώματος δεξαμενής (LC) που παράγεται από το ρεύμα που κυκλοφορεί στο συντονισμό, διαιρείται μεταξύ των δύο πυκνωτών. Το μέρος της τάσης που αναπτύσσεται στον C2 επανατροφοδοτείται στην είσοδο του Q1, στον εκπομπό. Το ενισχυμένο σήμα που προκύπτει στο συλλέκτη επαναφέρεται στο κύκλωμα δεξαμενής με τον πυκνωτή σύζευξης C_C.

Η ανάδραση είναι σε φάση με την τάση εκπομπού λόγω του κυκλώματος κοινής βάσης. Οι ταλαντώσεις συντηρούνται στη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος δεξαμενής. Ο πυκνωτής C_C φράζει το DC ρεύμα από το κύκλωμα δεξαμενής LC. Η συχνότητα συντονισμού μπορεί να μεταβληθεί με μεταβαλλόμενους τους C1, C2, L1.

6.3 Διαδικασία ραδιοφωνικής εκπομπής FM

Για την επίτευξη της εκπομπής του ραδιοφωνικού σήματος χρειάζονται κάποια βασικά όργανα. Ένας αναλυτής φάσματος, ένας ακουστικός αναλυτής, ένας αποδιαμορφωτής FM, ένας μετρητής ισχύς πεδίου και ισχύος RF, ένας παλμογράφος, ένα πολύμετρο και τέλος, ένας ενισχυτής προγράμματος. Μία τυπική ισχύς εκπομπής είναι 10W-100kW. Όλα τα παραπάνω όργανα καθώς και η ισχύς εκπομπής αφορούν την επαγγελματική εκπομπή ραδιοφωνικού σήματος σε οποιονδήποτε ραδιοφωνικό σταθμό. Στο πρακτικό κομμάτι της εργασίας θα υπάρχουν απλούστερα όργανα και μικρότερη ισχύς.

Παλιότερα η εκπομπή του ραδιοφωνικού σήματος ήταν αποκλειστικά μονοφωνική. Αργότερα, στις αρχές της δεκαετίας του 1960 εισήχθη η εκπομπή με στερεοφωνικό ήχο. Για να επιτευχθεί η στερεοφωνική εκπομπή δημιουργήθηκε το σύστημα Zenith-GE pilot-tone multiplex system. Το σύστημα αυτό λειτουργεί ώστε να υπάρχει συμβατότητα σε μονοφωνικούς δέκτες και να μη χρειάζεται η αντικατάστασή τους. Η συμβατή αυτή τεχνική ήταν αναγκαία πριν εγκριθεί η χρήση της στερεοφωνικής εκπομπής σήματος FM. Γρήγορα παρατηρήθηκε ότι το σήμα A+B από δύο μικρόφωνα δίνει ένα διαβατό μονοφωνικό σήμα. Οπότε μεταδίδοντας το σήμα A+B οι μονοφωνικοί δέκτες δε χάνουν κάποιο κομμάτι της πληροφορίας. Οι στερεοφωνικοί δέκτες όμως πρέπει με κάποιο τρόπο να αναπαράγουν τα σήματα A και B από το A+B. Η λύση στο πρόβλημα αυτό ήταν και η μετάδοση του σήματος A-B, πολυπλέκοντάς το στο κύριο φέρον και χρησιμοποιώντας το για να διαμορφωθεί ένα υποφέρον στα 38kHz. Η μέθοδος διαμόρφωσης που επιλέχθηκε, είναι η διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης με καταπιεσμένο φέρον (Double-Sideband Suppressed Carrier DSBSC). Αφού και το ακουστικό εύρος είναι 15kHz, η κάτω πλευρική ζώνη του σήματος A-B είναι μεταξύ 23-38kHz. Τοποθετείται ακόμα ένα φέρον (pilot carrier) στα 19kHz, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η ανάκτηση του σήματος A-B με τη σωστή φάση. Η συμβατότητα μεταξύ μονοφωνικών και στερεοφωνικών δεκτών ήταν καλή, επειδή το φέρον στα 19kHz και η κάτω πλευρική ζώνη του σήματος A-B μεταξύ 23-38kHz είναι πολύ υψηλές ακουστικές συχνότητες για τον άνθρωπο και δεν τις αντιλαμβάνεται και οι περισσότεροι μονοφωνικοί δέκτες και ηχεία δεν τις αναπαράγουν ακουστικά.

Οι σύγχρονοι σταθμοί ραδιοφώνου FM υποβάλλουν σε επεξεργασία το σήμα πριν το μεταδώσουν. Αρχικά, ένας ενισχυτής ρυθμίζει τα επίπεδα των σημάτων από το αριστερό και το δεξί κανάλι στην απαιτούμενη ένταση. Στο στάδιο αυτό συνήθως περιλαμβάνεται και κάποια μορφή αυτόματου ελέγχου των επιπέδων του σήματος και συμπίεσης. Ο στερεοφωνικός κωδικοποιητής μετατρέπει τα σήματα από το δεξί (R) και το αριστερό (L) κανάλι στα $(L+R)/2$, $(L-R)/2$. Τα πολυπλέκει με ένα συγχρονισμένο σήμα στα 19 kHz.

Μπορούν επίσης να πολυπλεχθούν στο τελικό σήμα και σήματα RDS (Radio Data System) και SCA (Subsidiary Communications Authorisation channels). Ο διαμορφωτής υπερθέτει το σήμα στη συχνότητα του φέροντος. Στη συνέχεια συγχρονίζει το σήμα με ενδεικτικές συχνότητες από μία σταθεροποιημένη πηγή. Τα στάδια αυτά συνθέτουν το διεγέρτη του πομπού FM. Τέλος, ενισχύεται το ασθενές σήμα από την έξοδο του διεγέρτη στο ισχυρό σήμα που τροφοδοτεί την κεραία του πομπού. Τα σχετικά πλάτη των διαφόρων συνιστωσών του πολυπλεγμένου στερεοφωνικού σήματος (τα οποία ανταποκρίνονται στη μέγιστη απόκλιση συχνότητας) είναι:

- Σήμα $(L+R)/2$: μέγιστη τιμή 90% (όταν τα σήματα L, R είναι ίσα και με ίδια φάση)
- Σήμα $(L-R)/2$: μέγιστη τιμή του αθροίσματος των πλατών των δύο πλευρικών ζωνών 90% (όταν τα L, R είναι ίσα και με αντίθετες φάσεις)
- Φέρον στα 19kHz: 8-10%
- Συμπιεσμένο υποφέρον στα 38kHz: μέγιστο υπόλοιπο πλάτους 1%

Η σχετική φάση του πιλοτικού σήματος και του υποφέροντος είναι τέτοια ώστε όταν ο πομπός διαμορφώνεται από ένα πολυπλεγμένο σήμα στο οποίο το L είναι θετικό και το $R=-L$, το σήμα τέμνει τον άξονα του χρόνου με θετική κλίση κάθε φορά που το πιλοτικό σήμα έχει στιγμιαία τιμή μηδέν. Η ανοχή φάσης του πιλοτικού σήματος δεν πρέπει να ξεπερνάει τις $\pm 3^\circ$ από την κατάσταση που αναφέρθηκε. Επίσης, θετική τιμή του πολυπλεγμένου σήματος αντιστοιχεί σε θετική απόκλιση συχνότητας του κυρίως φέροντος.

Στην περίπτωση που εκτός από το μονοφωνικό ή το στερεοφωνικό πρόγραμμα μεταδίδονται και σήματα συμπληρωματικής πληροφορίας πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες. Η εισαγωγή συμπληρωματικών σημάτων στο σήμα βασικής ζώνης πρέπει να επιτρέπουν συμβατότητα με τους υπάρχοντες δέκτες και δεν πρέπει να επηρεάζουν την ποιότητα λήψης του κυρίως ακουστικού σήματος. Τα συμπληρωματικά αυτά σήματα έχουν μέγιστο σχετικό πλάτος 10% της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής του σήματος βασικής ζώνης. Η συχνότητα τέτοιων συμπληρωματικών υποφερόντων πρέπει να είναι μεταξύ 15-23kHz ή 53-76kHz. Δεν πρέπει σε καμία περίπτωση η μέγιστη απόκλιση του κυρίως φέροντος από το συνολικό βασικό σήμα να ξεπερνά τα ± 75 kHz.

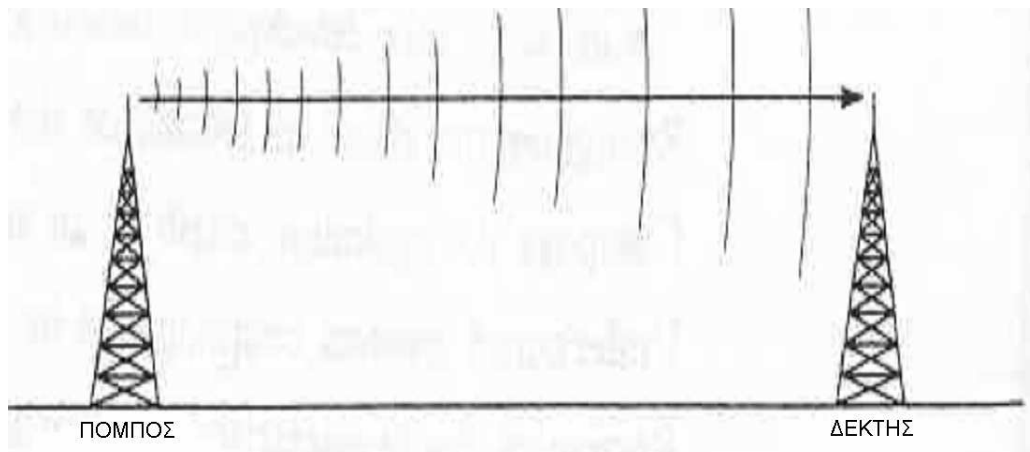
Ο τυχαίος θόρυβος σε ένα σύστημα FM δεν έχει ομοιόμορφη κατανομή, με το φαινόμενο ο θόρυβος να εμφανίζεται κυρίως στις υψηλότερες συχνότητες. Αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί, σε περιορισμένο βαθμό, ενισχύοντας τις υψηλές συχνότητες πριν τη μετάδοση και μειώνοντας τις αντίστοιχες στο δέκτη. Έτσι μειώνεται και ο θόρυβος στις υψηλές συχνότητες. Οι διαδικασίες αυτές της ενίσχυσης και της εξασθένησης συγκεκριμένων συχνοτήτων είναι γνωστές ως προ-έμφαση και από-έμφαση αντίστοιχα. Το ποσοστό της προ-έμφασης και από-έμφασης που χρησιμοποιείται, καθορίζεται από τη σταθερά χρόνου ενός απλού κυκλώματος φίλτρου RC. Στον περισσότερο κόσμο, αυτή η σταθερά είναι 50μs με την εξαίρεση της Βόρειας Αμερικής όπου είναι 75μs. Χρησιμοποιώντας λάθος προ-έμφαση θα είχε συνέπειες στην απόκριση συχνότητας της

λήψης. Το ποσοστό της προ-έμφασης που εφαρμόζεται περιορίζεται από το γεγονός ότι πολλά σύγχρονα είδη μουσικής περιέχουν μεγάλο ποσοστό ενέργειας στις υψηλές συχνότητες (σε αντίθεση με τα είδη μουσικής που επικρατούσαν όταν δημιουργήθηκε η ραδιοφωνία FM), άρα και η διαδικασία αυτή θα προκαλούσε υπερβολική απόκλιση στο φέρον του σήματος.

7. ΚΕΡΑΙΕΣ

7.1 Τι είναι κεραία

Η κεραία, με απλά λόγια, αποτελεί μια μεταλλική κατασκευή η οποία έχει ως κύρια λειτουργία της τη μετατροπή των υψίσυχων τάσεων ή ρευμάτων σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περίπτωση που η κεραία χρησιμοποιείται ως πομπός. Την αντίστροφη λειτουργία εκτελεί στην περίπτωση που η κεραία μας είναι δέκτης. Η κεραία μπορεί να εκτελεί και τις δυο λειτουργίες και έτσι να είναι ταυτόχρονα πομπός και δέκτης. Ένα παράδειγμα εκπομπής και λήψης ηλεκτρομαγνητικού κύματος από κεραίες φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα.



7.2 Είδη κεραιών

Τα είδη των κεραιών, όσον αφορά την κατευθυντικότητά τους, γενικά είναι τρία και παρουσιάζονται πιο κάτω:

- α) κατευθυντικές κεραιές
- β) πολυκατευθυντικές κεραιές
- γ) ημικατευθυντικές κεραιές

Στην κατευθυντική κεραία το χαρακτηριστικό πρότυπο εκπομπής της είναι έντονα ενισχυμένο προς μια κατεύθυνση. Κεραιές αυτού του τύπου είναι τα πιάτα και η κεραία με πλέγμα (Grid). Παράδειγμα μιας κεραιάς με πλέγμα φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Μια πολυκατευθυντική κεραία εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις. Τέτοια κεραία είναι η πανκατευθυντική κεραία (omni) η οποία παρουσιάζεται σχηματικά πιο κάτω.



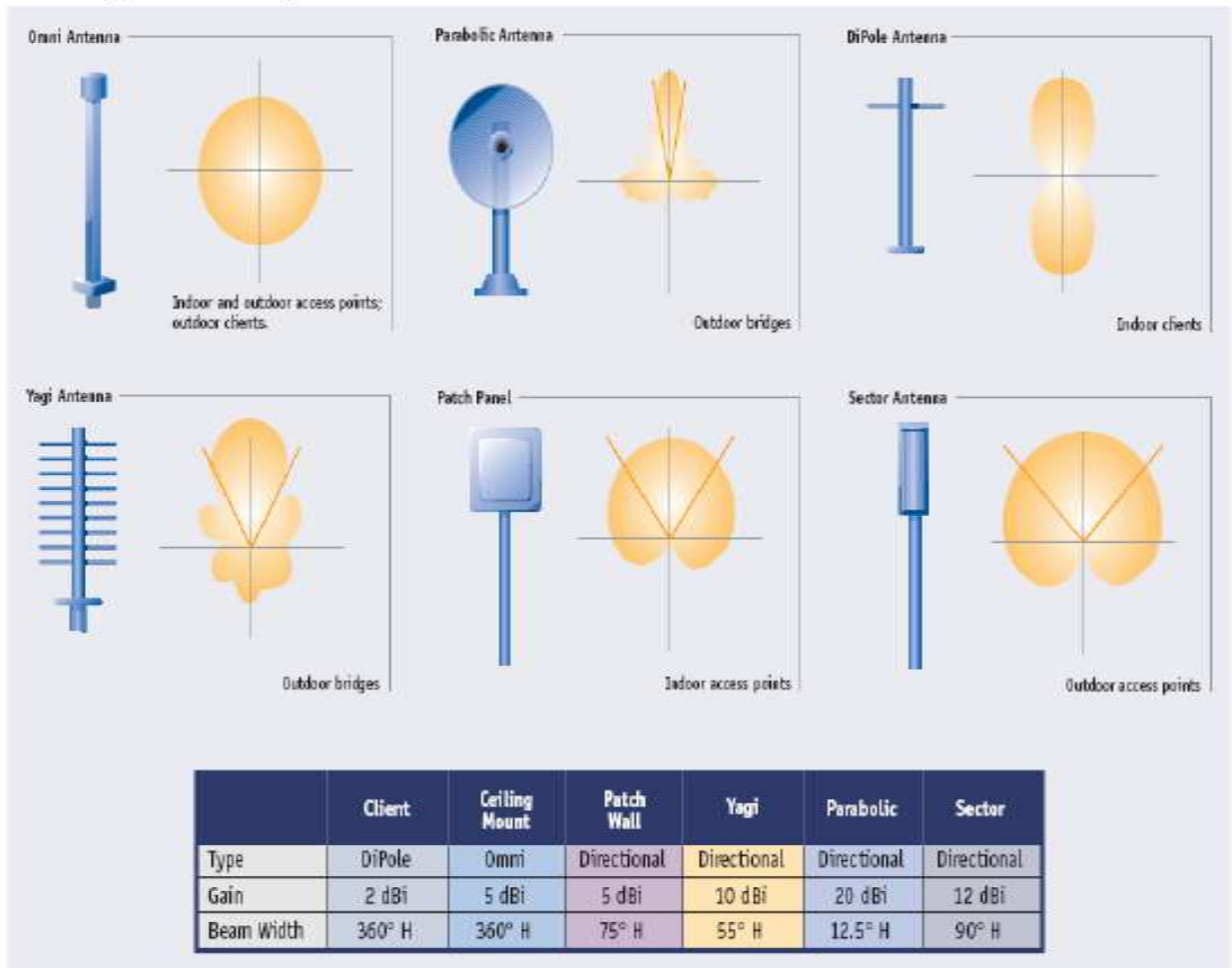
Οι ημικατευθυντικές κεραίες είναι μια ενδιάμεση κατηγορία των προηγούμενων. Αυτή η κατηγορία κεραιών εκπέμπει με γωνία οριζόντιας κάλυψης από 50 έως 180 μοίρες. Σαν παράδειγμα για αυτού του τύπου κεραίες βλέπουμε παρακάτω την τομεακή (sector).



7.3 Διασπορά σήματος

Με τον όρο διασπορά σήματος μιας κεραίας εννοούμε με απλά λόγια το ποσοστό κατανομής του σήματος στο χώρο. Η διασπορά σήματος εξαρτάται από το είδος της κεραίας, παραδείγματα βρίσκονται στο πιο κάτω σχέδιο. Η διασπορά του σήματος μπορεί με άλλα λόγια να εκφραστεί και με τον όρο κατευθυντικότητα της κεραίας. Περισσότερα για την κατευθυντικότητα της κεραίας θα παρουσιαστούν παρακάτω στη σχετική παράγραφο.

Antenna types and radiation patterns



7.4 Μήκος κεραίας

Το μήκος μιας κεραίας (l) μπορούμε να το υπολογίσουμε με τη βοήθεια των πιο κάτω τύπων:

$$c = \lambda \cdot f \quad \text{ή} \quad \lambda = c / f$$

Μήκος κεραίας: $l = \text{vel} / f$

όπου $\text{vel} = c \cdot \sqrt{f}$

c: ταχύτητα φωτός

λ : μήκος κύματος

f: συχνότητα

Vf: velocity factor

7.5 Παρεμβολές σήματος

Υπάρχουν κάποια μεγάλα αντικείμενα τα οποία βρίσκονται μεταξύ της κεραίας του πομπού και του δέκτη. Αυτά τα αντικείμενα δημιουργούν κάποιες παρεμβολές στο ηλεκτρομαγνητικό μας κύμα με αποτέλεσμα να έχουμε κάποιες απώλειες. Μερικά υλικά που πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν είναι: ξύλο, χαρτί, τοίχοι, μετασχηματιστές, φούρνοι μικροκυμάτων, λάμπες φθορίου.

7.6 Μοντέλα διάδοσης

Για τη διάδοση σημάτων χρησιμοποιούνται κάποιοι μηχανισμοί διάδοσης όπως ανάκλαση, περίθλαση και σκέδαση.

Ανάκλαση: Ανάκλαση έχουμε στις εξής περιπτώσεις:

- Πρόσπτωση του κύματος σε αντικείμενα μεγάλα σε σχέση με το μήκος κύματος λ
- Μερική ανάκλαση σε επιφάνειες που διαχωρίζουν περιοχές με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά
- Σε τέλειο αγωγό όλη η ποσότητα της προσπίπτουσας ενέργειας ανακλάται
→ Πιθανά αποτελέσματα που μπορεί να έχουμε είναι απόσβεση σήματος και αλλαγή φάσης.

Περίθλαση: Περίθλαση έχουμε στις εξής περιπτώσεις:

- Πρόσπτωση του κύματος σε αντικείμενα με ακμές (της τάξης του λ) που βρίσκονται ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη
- Σύμφωνα με την αρχή του Huygen όλα τα σημεία του σφαιρικού μετώπου του κύματος μπορούν να θεωρηθούν ως δευτερεύουσες σημειακές πηγές
- Κάμψη του κύματος και διάδοσή του ακόμη και στις περιοχές «σκιάς» του αντικειμένου.
- Στις υψηλές συχνότητες υπάρχει εξάρτηση του φαινομένου από: τη γεωμετρία του αντικειμένου, το πλάτος και τη φάση του προσπίπτοντος κύματος, το είδος πόλωσης.

Σκέδαση: Σκέδαση έχουμε στις εξής περιπτώσεις:

- Πρόσπτωση του κύματος σε αντικείμενα (ή επιφάνειες με προεξοχές) με διαστάσεις μικρότερες από το λ

- Ο αριθμός των αντικειμένων ή/και προεξοχών ανά μονάδα όγκου πρέπει να είναι αρκούντως μεγάλος.
- Για να θεωρείται ανώμαλη η επιφάνεια πρέπει $(\min(h)/\max(h)) > hc$

Όπου: $hc = \lambda / (8 \sin\theta_i)$ το κρίσιμο ύψος προεξοχής

και θ_i η γωνία πρόσπτωσης

Υπάρχουν μοντέλα διάδοσης τα οποία λαμβάνουν υπ' όψιν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του ακανόνιστου εδάφους και άλλων εμποδίων που πιθανώς να υπάρχουν στη διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη, έτσι ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατό καλύτερη διάδοση του σήματος.

Μοντέλα διάδοσης:

1) Μοντέλο Okumura: Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ισχύος του σήματος σε αστικές περιοχές. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα σύνολο καμπυλών με τις οποίες είναι δυνατή η εκτίμηση της ενδιάμεσης απόσβεσης σε σχέση με τον ελεύθερο χώρο.

2) Μοντέλο Hata: Είναι η εμπειρική αλγεβρική έκφραση της απώλειας μιας διαδρομής η οποία παρέχεται γραφικά από το μοντέλο Okumura. Το μοντέλο αυτό είναι αρκετά ευέλικτο επειδή επιτρέπει τη χρήση εξισώσεων αντί γραφικών παραστάσεων.

7.7 Βασικά χαρακτηριστικά κεραιών

7.7.1 Βέλτιστη περιοχή συχνοτήτων

Κάθε κεραία έχει μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων στην οποία λειτουργεί βέλτιστα. Αυτό σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη περιοχή η κεραία λειτουργεί σαν **αποτελεσματικός ακτινοβολητής**. Αν χρησιμοποιήσουμε την κεραία εκτός αυτής της μάντας, το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος του πομπού θα **ανακλάται** πίσω προς τον πομπό και δεν θα ακτινοβολείται, ενώ αντίστοιχα και στη λήψη η κεραία δεν θα λειτουργεί βέλτιστα.

Συνήθως ορίζεται μια κεντρική συχνότητα και μια απόκλιση γύρω από αυτή ή ορίζεται ένα εύρος συχνοτήτων που θα κινηθούμε (π.χ. 2400MHz ως 2500MHz ή 2450MHz±50MHz). Σε κάθε περίπτωση το εύρος αυτό δια την κεντρική συχνότητα δεν μπορεί να είναι μεγάλο (π.χ. 10%), δηλαδή η κεραία είναι μια συσκευή περιορισμένης ζώνης (υπάρχουν βέβαια και ειδικές κατασκευές που επιτυγχάνουν λειτουργία σε μεγάλη περιοχή συχνοτήτων).

7.7.2 Πόλωση

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της κεραίας είναι σε ποια πόλωση εκπέμπει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα και οι κατηγορίες πόλωσης βρίσκονται πιο κάτω:

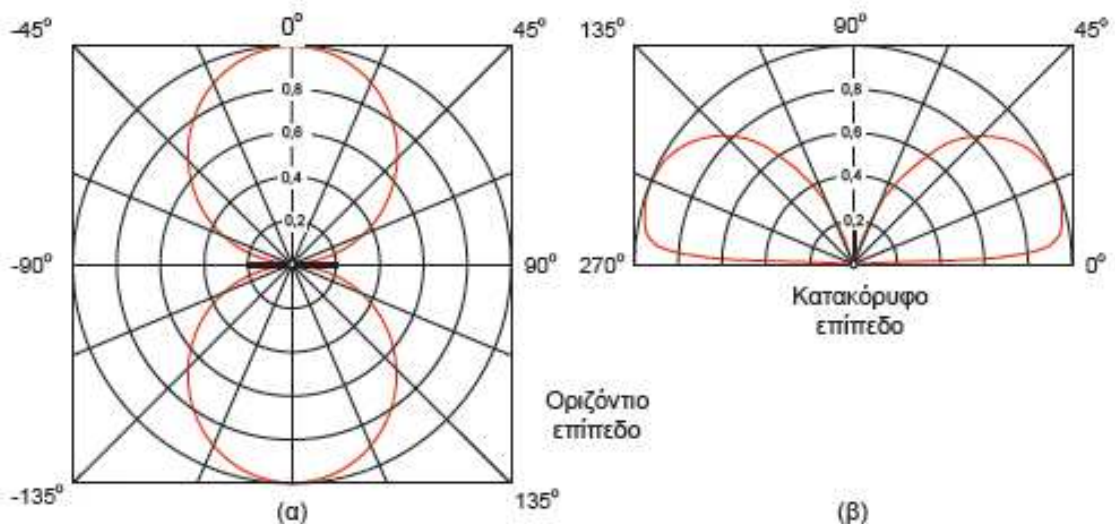
- 1) Κάθετη πόλωση: Το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετο.

- 2) Οριζόντια πόλωση: Το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι οριζόντιο.
- 3) Κυκλική πόλωση: Υπάρχει και κάθετο και οριζόντιο διάνυσμα και μάλιστα είναι ίσα τα δυο διανύσματα (δε χρησιμοποιείται πολύ)
- 4) Ελλειπτική πόλωση: Υπάρχει και κάθετο και οριζόντιο διάνυσμα τα οποία είναι άνισα. (δεν χρησιμοποιείται πολύ)

7.7.3 Κατευθυντικότητα και κέρδος κεραίας

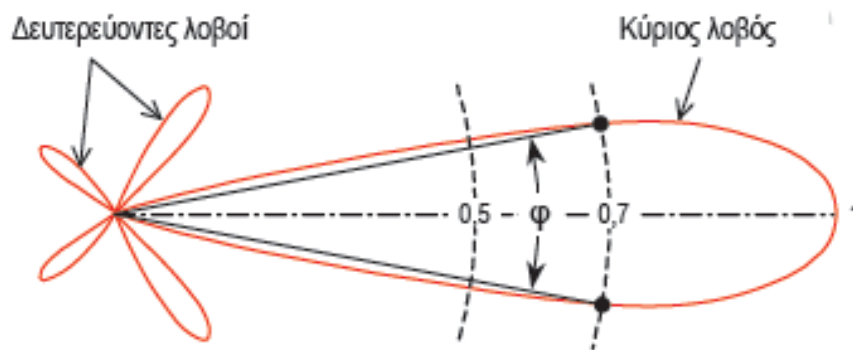
Καμιά πραγματική κεραία δεν εκπέμπει τα ηλεκτρομαγνητικά της κύματα ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου. Η ένταση της ακτινοβολίας προς ορισμένες κατευθύνσεις είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με άλλες. Αυτό δε θεωρείται μειονέκτημα, αλλά μάλλον πλεονέκτημα. Δε θέλουμε, για παράδειγμα, η κέραια ενός ραδιοσταθμού να ακτινοβολεί προς τα πάνω, αφού εκεί δεν υπάρχουν ακροατές του σταθμού. Οι κατευθυντικές ιδιοτητες 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 παρακάτω σχήμα φαίνονται τα διαγράμματα κατευθυντικότητας μιας οριζόντιας κεραίας $\lambda/2$ στο οριζόντιο επίπεδο και μιας κατακόρυφης κεραίας $\lambda/4$ στο κατακόρυφο επίπεδο. Λόγω του τρόπου κατανομής της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, η κεραία $\lambda/2$ ονομάζεται διπλοκατευθύντικη, ενώ η $\lambda/4$ πανκατευθύντικη.



Διάγραμμα κατευθυντικότητας κεραίας $\lambda/2$ (α) και κεραίας $\lambda/4$ (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 πως κατανέμεται η ακτινοβολία της κεραίας σ' ένα επίπεδο. Σε κάθε κεραία υπάρχει μια κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Ο λοβός που αντιστοιχεί σε αυτή ονομάζεται κύριος λοβός. Η ένταση της ακτινοβολίας προς την κατεύθυνση του μεγίστου παίρνει στο διάγραμμα τιμή ίση με 1 και όλες οι υπόλοιπες εντάσεις αντιστοιχούν σε αναλόγως μικρότερα νούμερα. Το διάγραμμα κατευθυντικότητας μιας τέτοιας κεραίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το άνοιγμα του κύριου λοβού σρίσκεται από τη γωνία φ , της οποίας οι πλευρές περνούν από τα σημεία που η ένταση του πεδίου είναι ίση με το 0,7 της μέγιστης τιμής.



Διάγραμμα κατευθυντικότητας τυχαίας κεραίας

Ο συντελεστής κατευθυντικότητας D μας δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη ισχύ, απο 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 και όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο πιο κατευθυντική είναι η κεραία.

Το κέρδος G της κεραίας δείχνει ότι και ο συντελεστής κατευθυντικότητας, αλλά αφού λάβουμε υπ' όψιν και το βαθμό απόδοσης η της κεραίας. Ισχύει $G = D \cdot \eta$.

Το κέρδος συνήθως το εκφράζουμε σε dB, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται: $G = 10 \log(D \cdot \eta)$ dB. Υπάρχουν κεραίες με κέρδος 20, 30 ή και 60 dB, δηλαδή εκπέμπουν προς ορισμένη κατεύθυνση 100, 1000 ή και 1000000 φορές εντονότερα, από όσο θα εξέπεμπε, αν τροφοδοτούνταν με την ίδια ισχύ, μια υποθετική κεραία χωρίς κέρδος.

8. ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ–ΛΟΓΟΣ ΣΤΑΣΙΜΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ (SWR)

Ο όρος SWR (standing wave ratio – λόγος στασίμων κυμάτων) χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες για να αποδώσει το λόγο του πλάτους ενός στασίμου κύματος σε κοιλιά (μέγιστο) προς το πλάτος του σε δεσμό (ελάχιστο), σε μια ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς. Για παράδειγμα μια τιμή 1.2:1 για τον SWR σημαίνει ότι το μέγιστο πλάτος του στάσιμου κύματος είναι 1.2 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ελάχιστο πλάτος του.

Ο λόγος SWR χρησιμοποιείται ουσιαστικά σε συντελεστής απόδοσης μιας γραμμής μεταφοράς ή ενός καλωδίου RF. Το πρόβλημα στις γραμμές μεταφοράς είναι ότι η διαφορά εμπέδησης σε ένα καλώδιο δημιουργεί ανάκλαση του ραδιοκύματος πίσω προς την πηγή του, εμποδίζοντας το σύνολο της ενέργειας (ή της ισχύος) να φτάσει στο δέκτη. Μια ιδανική γραμμή μεταφοράς θα είχε SWR με τιμή 1:1, πράγμα που σημαίνει ότι όλη η ισχύς από τον πομπό θα φτάσει στο δέκτη. Είναι λοιπόν, η συμβολή του ανακλώμενου με το απευθείας ραδιοκύμα που δημιουργεί το στάσιμο κύμα. Τα προβλήματα που μπορούν να δημιουργήσουν τα στάσιμα κύματα στην ηλεκτρομαγνητική εκπομπή είναι μείωση της απόδοσης του πομπού, παραμόρφωση του εκπεμπόμενου σήματος μέχρι και καταστροφή του πομπού. Ο λόγος SWR σε μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να μετρηθεί με ένα ειδικό όργανο που λέγεται **μετρητής SWR** ή αλλιώς **γέφυρα στασίμων** και φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.

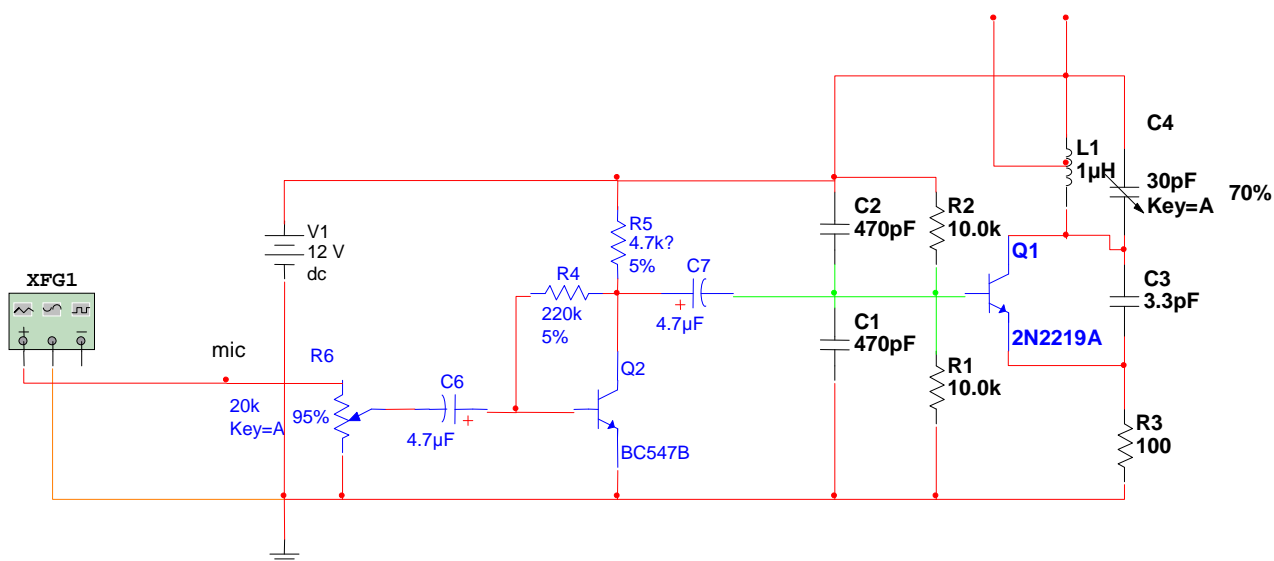


Γέφυρα στασίμων ή μετρητής SWR

Η χρήση του παραπάνω μετρητή γίνεται συνδέοντας τον πομπό στην είσοδο Tx και την κεραία στην είσοδο ANT. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τον πομπό μπορούμε να πετύχουμε τη μέγιστη ισχύ του πομπού μας και το μικρότερο δυνατό λόγο SWR. Για ικανοποιητική απόδοση ο λόγος SWR δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 1,5:1.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το κύκλωμα πομπού (το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα) που υλοποιήθηκε στην πτυχιακή αυτή είναι ένα κλασικό και πολύ απλό κύκλωμα πομπού με δύο τρανζίστορ από τα οποία το ένα χρησιμοποιείται σαν ενισχυτής χαμηλών (ακουστικών) συχνοτήτων και ενισχύει το σήμα που παίρνει από το μικρόφωνο και το άλλο χρησιμοποιείται σαν ταλαντωτής και βαθμίδα εξόδου. Η ισχύς του πομπού είναι ανάλογη με την τάση τροφοδοσίας. Η τροφοδοσία του πομπού μπορεί να είναι από 6Vdc ως και 30 Vdc αποδίδοντας από 0.5W ως 2 W αντίστοιχα. Το μικρόφωνο μπορεί να είναι πυκνωτικό (συνήθως electret αν πρόκειται για φθηνή υλοποίηση) ή και δυναμικό .



Κύκλωμα πομπού FM χαμηλής ισχύος σχεδιασμένο στο Multisim

Τιμές εξαρτημάτων

R1, R2 = 10K

R3 = 100Ω

R4 = 220 K

R5 = 4,7K

R6 = 22K (POTENSIOMETER)

TR1: BC547

TR2: 2N2219

C1, C2 = 470pF

$C3=3,3\mu\text{F}$

$C4=6 - 45 \text{ pF trimmer}$

$C6, C7 = 4,7\mu\text{F}$

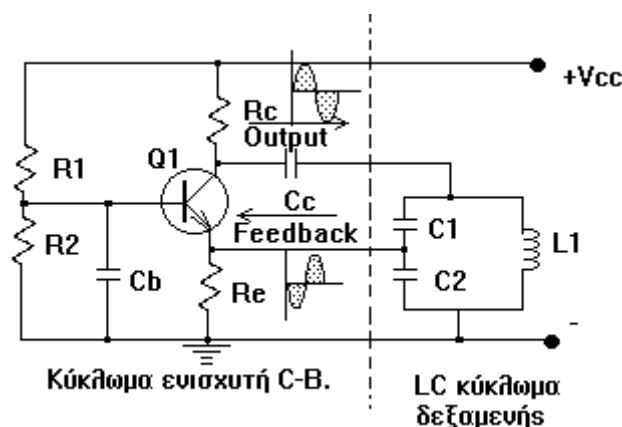
A. Εξήγηση λειτουργίας του κυκλώματος

Το σήμα του μικροφώνου περνάει στη βάση του BC547 μέσω του ηλεκτρολυτικού πυκνωτή $C6=4.7\mu\text{F}$ και ενισχύεται. Η τάση τροφοδοσίας φιλτράρεται από τον $C6$ (για τις χαμηλές συχνότητες). Αν θέλουμε μπορούμε να προσθέσουμε και ένα πυκνωτή 100 nF μεταξύ τροφοδοσίας και γείωσης για να φιλτράρουμε τις υψηλές συχνότητες.

Η διαμόρφωση κατά συχνότητα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του ταλαντωτή Colpitts ο οποίος αποτελείται από το τρανζίστορ 2N2219, τον πυκνωτή ανασύζευξης $C3$ και το κύκλωμα συντονισμού, δηλαδή του πηνίου $L1$ και του μεταβλητού πυκνωτή $C4$. Το κύκλωμα συντονισμού ταλαντώνεται σε συχνότητες από $88\text{MHz}-108\text{MHz}$ ανάλογα με την τιμή του μεταβλητού πυκνωτή $C4$. Οι πυκνωτές $C1$ και $C2$ χρησιμεύουν για να γειώνουν τη βάση του τρανζίστορ για σήματα σε σχέση με τη ραδιοσυχνότητα. Οι αντιστάσεις $R1$ και $R2$ χρησιμοποιούνται για να πολώνουν το τρανζίστορ ώστε να γίνει αγωγίμο.

Η αντίσταση $R3$ παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο. Κατ' αρχήν περιορίζει το ρεύμα του τρανζίστορ σε μια ασφαλή για το τρανζίστορ τιμή. Δεύτερον, μαζί με τον πυκνωτή $C3$ ξεκινούν και διατηρούν την ταλάντωση. Η συνδεσμολογία αυτή του τρανζίστορ $Q1$ είναι κοινής βάσης. Στη συνδεσμολογία αυτή πρέπει το σήμα εισόδου και εξόδου να είναι συμφασικά. Η είσοδος του τρανζίστορ $Q1$ είναι η επαφή του εκπομπού. Το σήμα εισόδου τροφοδοτείται στον εκπομπό μέσω του πυκνωτή ανατροφοδότησης $C3$ από το συλλέκτη στην είσοδο.

Πιο αναλυτικά, η βαθμίδα εξόδου είναι ένας ταλαντωτής Colpitts της μορφής που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Κύκλωμα ταλαντωτή Colpitts

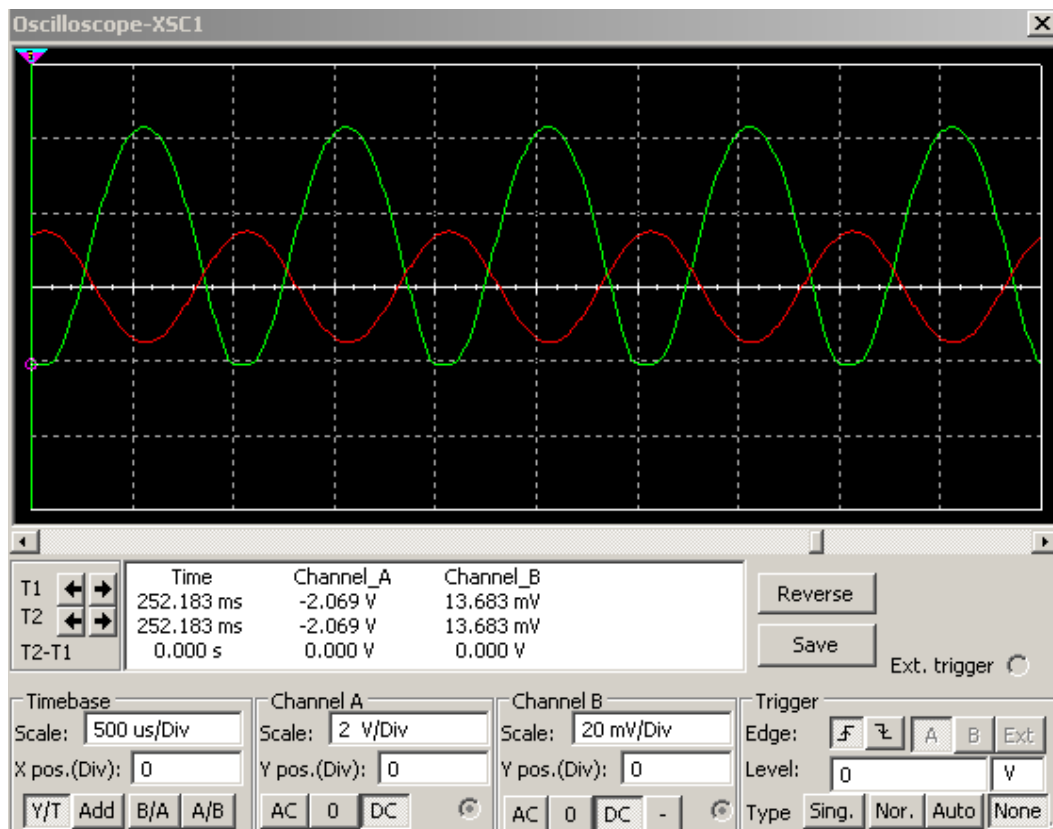
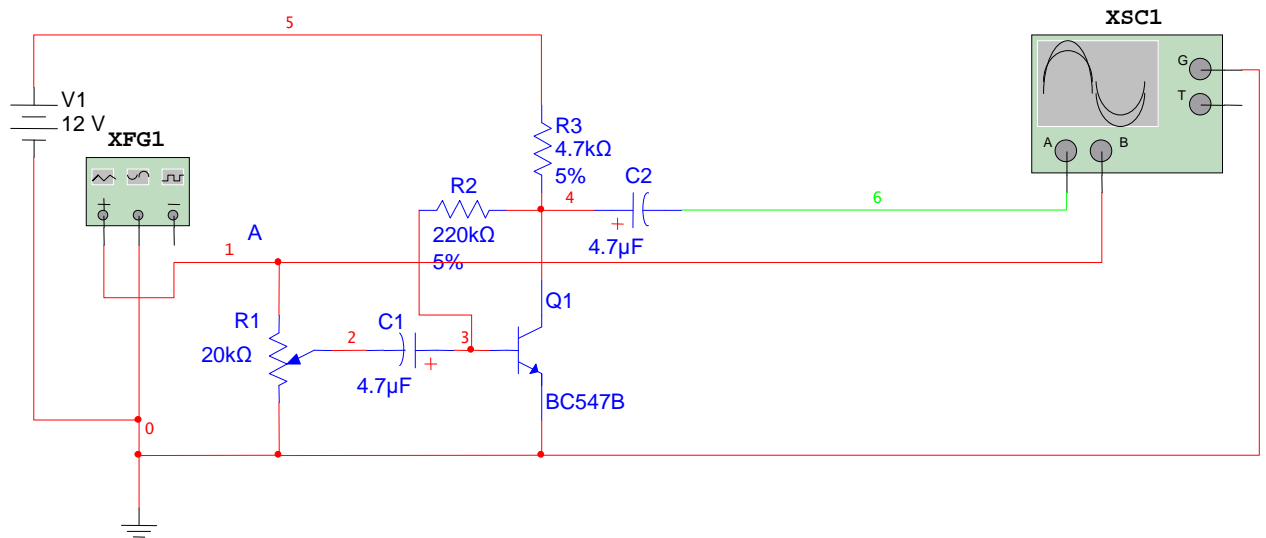
Το κύκλωμα του ταλαντωτή αποτελείται από δύο μέρη, τον ενισχυτή σε συνδεσμολογία κοινής βάσης και το κύκλωμα δεξαμενής. Το Q1 τρανζίστορ συνδέεται σαν ενισχυτής κοινής βάσης. Ο πυκνωτής C_b γειώνει τη βάση για σήματα AC. Η πόλωση της βάσης και η σταθερότητα της πόλωσης γίνεται μέσω του διαιρέτη τάσης που αποτελείται από τις αντιστάσεις $R1// R2$, από την τάση του τροφοδοτικού V_{cc} και την αντίσταση εκπομπού R_e .

Οι δύο πυκνωτές $C1$ και $C2$ αποτελούν την ολική χωρητικότητα του κυκλώματος δεξαμενής LC. Συνδέονται έτσι ώστε ο $C1$ είναι στο κύκλωμα του συλλέκτη και ο $C2$ είναι στο κύκλωμα του εκπομπού. Η τάση AC του κυκλώματος δεξαμενής (LC) που παράγεται από το ρεύμα που κυκλοφορεί στο συντονισμό, διαιρείται μεταξύ των δύο πυκνωτών. Το μέρος της τάσης που αναπτύσσεται στον $C2$ επανατροφοδοτείται στην είσοδο του Q1, στον εκπομπό. Το ενισχυμένο σήμα που προκύπτει στο συλλέκτη επαναφέρεται στο κύκλωμα δεξαμενής με τον πυκνωτή σύζευξης C_c .

Η ανάδραση είναι σε φάση με την τάση εκπομπού λόγω του κυκλώματος κοινής βάσης. Οι ταλαντώσεις συντηρούνται στη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος δεξαμενής. Ο πυκνωτής C_c φράζει το DC ρεύμα από το κύκλωμα δεξαμενής LC. Η συχνότητα συντονισμού μπορεί να μεταβληθεί με μεταβαλλόμενους τους $C1, C2, L1$.

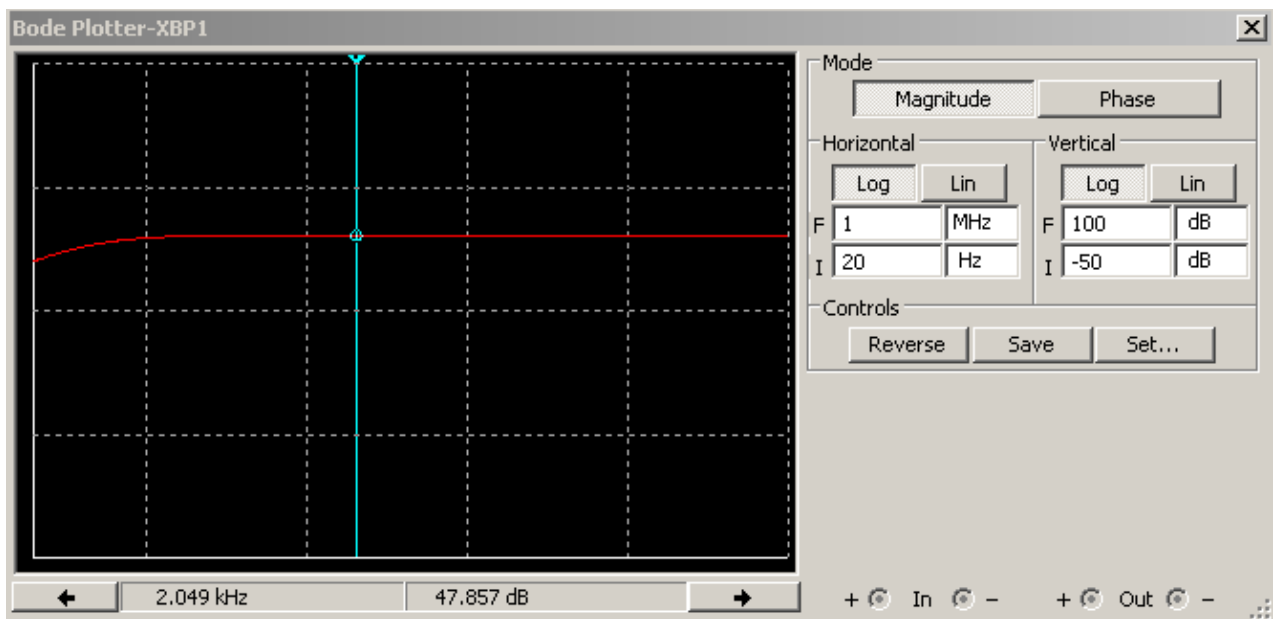
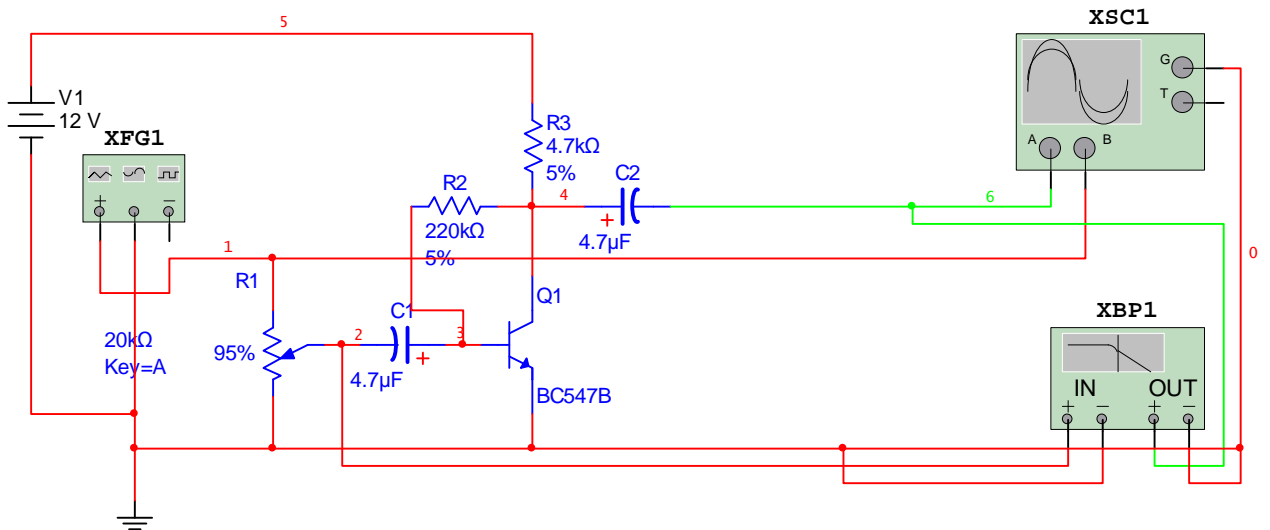
B. Προσομοίωση κυκλώματος στο Multisim

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την πρώτη βαθμίδα του κυκλώματος σχεδιασμένη στο multisim. Πρόκειται για έναν ενισχυτή χαμηλών (ακουστικών) συχνοτήτων ο οποίος θα ενισχύσει το σήμα του μικροφώνου. Ουσιαστικά είναι μια σχετικά απλή συνδεσμολογία ενισχυτή κοινού εκπομπού. Το μικρόφωνο συνδέεται μεταξύ του σημείου A και της γείωσης. Αντί για μικρόφωνο στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια συχνοτήτων (XFG1) την οποία συνδέσαμε στην είσοδο του κυκλώματος (σημείο A). Η μεταβλητή αντίσταση $R1$ στην είσοδο ρυθμίζει το ποσοστό του σήματος που θα περάσει στο κύκλωμα. Ο πυκνωτής $C1$ χρησιμεύει για να κόψει οποιαδήποτε DC συνιστώσα του σήματος εισόδου.



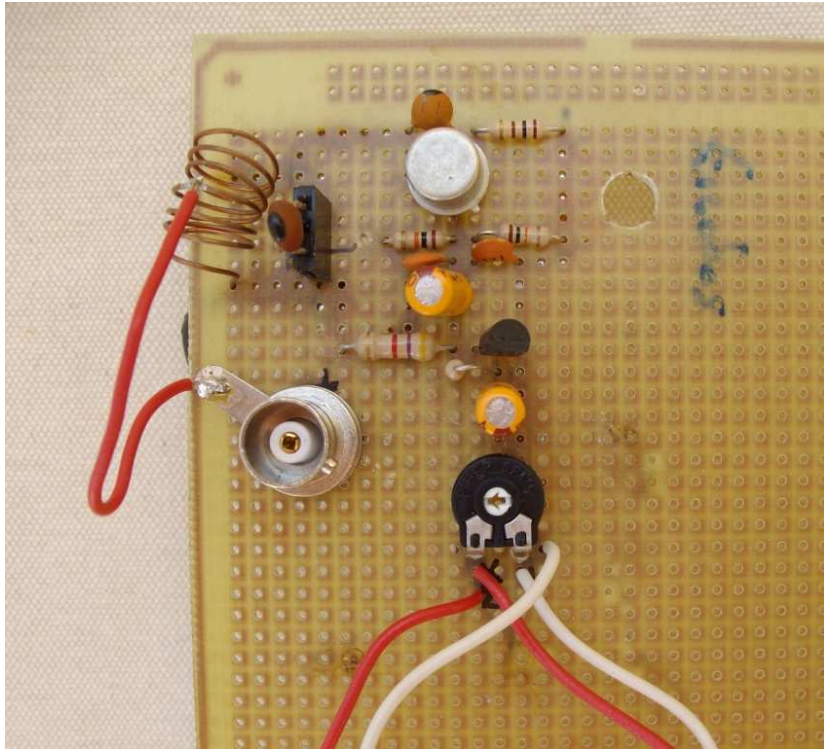
Στον παλμογράφο του multisim βλέπουμε πως για ημιτονικό σήμα εισόδου 1KHz με πλάτος 30 mV(p-p) παίρνουμε επίσης ημιτονικό σήμα εξόδου 6,5 V(p-p) με διαφορά φάσης 180°. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο μιας και η συνδεσμολογία κοινού εκπομπού μπορεί και δίνει μεγάλες απολαβές τάσης και φυσικά προκαλεί μεταξύ εισόδου και εξόδου διαφορά φάσης 180°. Εχουμε λοιπόν μια απολαβή $A_v = 6,5 \text{ V(p-p)}/30 \text{ mV(p-p)} = 216,6$ η οποία αν μετατραπεί σε dB θα γίνει $A(\text{dB}) = 20\log(A_v) = 47,7 \text{ dB}$.

Αν τώρα συνδέσουμε ένα Bode Plotter στο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, μπορούμε να δούμε το διάγραμμα Bode, δηλαδή τη συχνοτική απόκριση του ενισχυτή μας όπως μας τη δίνει το Multisim. Η συχνοτική απόκριση όπως φαίνεται είναι επίπεδη (flat) για όλες τις ακουστικές συχνότητες και η ενίσχυση έχει την τιμή $A(\text{dB}) = 47,8 \text{ dB}$ που είναι σχεδόν ίδια με αυτή που υπολογίσαμε θεωρητικά προηγουμένως.



Γ. Πειραματικές μετρήσεις και βελτιώσεις

Κατ' αρχήν να σημειώσουμε ότι το κύκλωμα κατασκευάστηκε σε διάτρητη πλακέτα για μεγαλύτερη ευκολία στην κατασκευή, αλλά και στη διαδικασία των μετρήσεων και τη διόρθωση ή αντικατάσταση κάποιου εξαρτήματος αν χρειαστεί. Το κύκλωμα που κατασκευάσαμε φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Να σημειώσουμε επίσης ότι για τη σύνδεση της κεραίας χρησιμοποιήσαμε βύσμα τύπου BNC στο οποίο μπορούμε να συνδέσουμε ό,τι κεραία θέλουμε.



Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε στα προβλήματα που παρουσιάστηκαν από τη στιγμή που ολοκληρώθηκε η συναρμολόγηση του κυκλώματος του πομπού και τέθηκε σε λειτουργία για την εκπομπή σήματος FM. Για τη λήψη του σήματος χρησιμοποιήσαμε έναν απλό ραδιόφωνικό δέκτη του εμπορίου. Αρχικά, πρέπει να πούμε ότι η κεραία που χρησιμοποιήσαμε στον πομπό μας είναι μια απλή κεραία δίπολο του εμπορίου, η οποία φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Η τροφοδοσία του πομπού έγινε σε πρώτη φάση με το τροφοδοτικό του εργαστηρίου και η τάση τροφοδοσίας ήταν 12V.

Πριν οποιαδήποτε δοκιμή του πομπού μας είναι απαραίτητο να κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις στο κύκλωμα του πομπού με σκοπό να πάρουμε την μέγιστη δυνατή ισχύ από αυτόν και να ελαχιστοποιήσουμε τα στάσιμα κύματα, τα οποία όπως ειπώθηκε και στη θεωρητική εισαγωγή μπορούν να προκαλέσουν καταστροφικά αποτελέσματα στον πομπό μας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε έναν μετρητή SWR, ο οποίος φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Συνδέσαμε την έξοδο του πομπού μας στην είσοδο Tx του μετρητή και την κεραία στην θέση ANT του μετρητή. Κατόπιν θέσαμε σε λειτουργία τον πομπό και πειραματιστήκαμε με το trimmer C3 και με τη θέση της κεραίας, μέχρι να πάρουμε τη μέγιστη ισχύ στην οθόνη με την ένδειξη POWER METER και την μέγιστη επιτρεπτή ένδειξη λόγου SWR 1.5:1 στην οθόνη SWR METER. Η τιμή της μέγιστης ισχύος που πετύχαμε με το trimmer περίπου στη μέση και την κεραία στο 1.5 μέτρο από το έδαφος είναι $P_{max} = 1,2 \text{ W}$.

Όσον αφορά τον έλεγχο του κατά πόσο πράγματι εκπέμπει ο πομπός μας και γενικά η λειτουργία του και τα προβλήματα της περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω. Η πρώτη δοκιμή κατέληξε σε αποτυχία καθώς το τρανζίστορ της ταλάντωσης (2N2219) «κάηκε» μέσα σε πολύ λίγο χρόνο. Το «κάψιμο» του τρανζίστορ, αφού ελέγξαμε το κύκλωμα για τυχόν λάθος συνδεσμολογία και βεβαιωθήκαμε ότι είναι όλα εντάξει, οφείλεται σε υπερθέρμανσή του λόγω της ταλάντωσης. Τοποθετήσαμε λοιπόν ένα άλλο τρανζίστορ αυτή τη φορά με μία ψύκτρα τύπου αστεράκι για καλύτερη απαγωγή της θερμότητας. Η ψύκτρα που χρησιμοποιήσαμε (φαίνεται στη διπλανή φωτογραφία) έχει 2cm υψος και για να την προσαρμόσουμε την ανοίξαμε ελαφρα μ'ένα κατσαβίδι ώστε να περάσει στο κέλυφος του τρανζίστορ.



Έχοντας βάλει την ψύκτρα στο 2N2219 ξανακάναμε δοκιμή. Αυτή τη φορά το τρανζίστορ δούλεψε κανονικά χωρίς να αναπτύξει μεγάλη θερμοκρασία. Κατά τη λειτουργία του κυκλώματος παρατηρήσαμε ότι η αντίσταση R3 ανέβαζε πολύ μεγάλη θερμοκρασία. Αυτό βέβαια, είναι φυσιολογικό αφού η R3 βοηθά στο ξεκίνημα και τη διατήρηση της ταλάντωσης του κυκλώματος ταλάντωσης. Το πρόβλημα της υπερθέρμανσης μπορεί να λυθεί αν χρησιμοποιήσουμε μια

αντίσταση μεγαλύτερης ισχύος. Για παράδειγμα μια αντίσταση 1 W ή και 2 W θα έλυνε το πρόβλημα. Το μειονέκτημα όμως από τη χρήση αντίστασης μεγαλύτερης ισχύος είναι ότι αυξάνει το μέγεθος της κατασκευής, μεγαλώνουν οι επιφάνειες, άρα αυξάνουν οι παρασιτικές χωρητικότητες και χειροτερεύει η όλη συμπεριφορά του πομπού. Μια άλλη λύση είναι να αλλάξουμε την αντίσταση 100 Ω/0,5 W με μια 470 Ω/0,5 W ή ακόμη με 1KΩ /0,5 W. Βέβαια αυτή η αλλαγή θα επιφέρει δραστική ελάττωση στην ισχύ εκπομπής, αλλά θα κερδίσουμε σε ποιότητα στο σήμα.

Χωρίς να κάνουμε αλλαγή, προχωρήσαμε στη δοκιμή του πομπού. Σαν σήμα στην είσοδο, βάλαμε σε πρώτη φάση μια ηχητική πηγή πολύ κοντά στο μικρόφωνο και προσπαθήσαμε με το ραδιοφωνικό δέκτη (ο οποίος βρισκόταν σε αρκετά μεγάλη απόσταση – περίπου 10μ.) να «πιάσουμε» το σήμα του πομπού μας. Η δοκιμή πέτυχε όμως είχαμε 2 σημαντικά προβλήματα

- 1) το σήμα «τσουλούσε», δηλαδή η συχνότητα εκπομπής μας δεν ήταν σταθερή
- 2) υπήρχε ένας αρκετά έντονος βόμβος στο σήμα που ακούγαμε στο δέκτη.

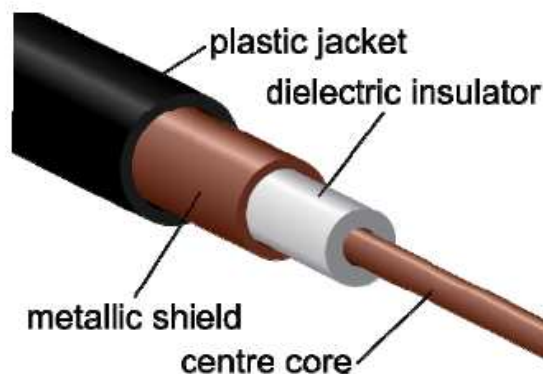
Για να λύσουμε τα προβλήματα αυτά ανατρέξαμε στη βιβλιογραφία καθώς και σε πηγές από το διαδίκτυο με σχετικά θέματα.

Όσον αφορά το θέμα του βόμβου, το πρόβλημα λύθηκε σε μεγάλο βαθμό με 2 απλές λύσεις.

- A. Τοποθέτηση του πομπού μέσα σε μεταλλικό κουτί στο σασί του οποίου συνδέθηκε με βίδες η γείωση του κυκλώματός μας. Η τοποθέτηση του κυκλώματος σε μεταλλικό κουτί όπως είναι γνωστό θωρακίζει το κύκλωμα σε σχέση με τις διάφορες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες. Για την κατασκευή του κουτιού καταφύγαμε σε μια πολύ απλή και φθηνή λύση. Επενδύσαμε ένα χάρτινο κουτί με αλουμινόχαρτο, αφήνοντας οπές για το βύσμα BNC της κεραίας, το μικρόφωνο και τα καλώδια τροφοδοσίας. Το κουτί φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



B. Αντικατάσταση των καλωδίων τροφοδοσίας και του καλωδίου του μικροφώνου με ομοαξονικά θωρακισμένα καλώδια.



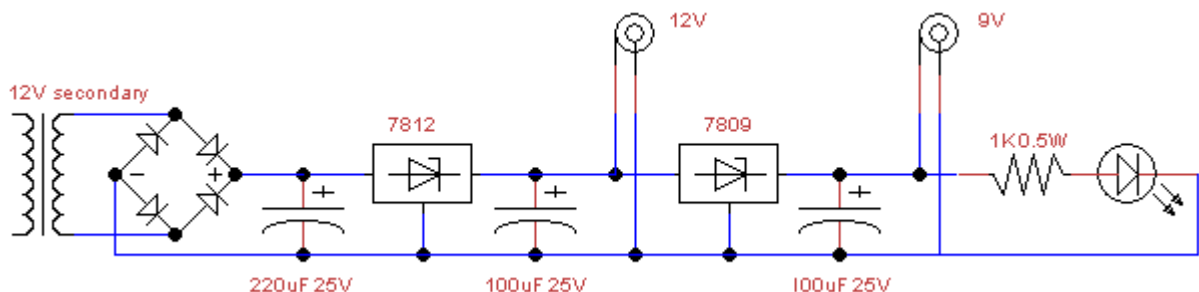
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των θωρακισμένων καλωδίων, που τα καθιστούν ιδανικά στην περίπτωση μας, αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

- Ο εξωτερικός αγωγός ο οποίος συνήθως είναι γειωμένος θωρακίζει τον εσωτερικό αγωγό από ηλεκτρικά πεδία. Είναι σα να βρίσκεται ο εσωτερικός αγωγός σε κοιλότητα στο εσωτερικό της αγωγίσιμης θωράκισης.
- Σε στοιχείο κυκλώματος, το ομοαξονικό καλώδιο έχει χωρητικότητα μεταξύ των δύο ομοαξονικών αγωγών ίση με περίπου 30pF ανά m μήκους καλωδίου.
- Πρακτικά σε όλες τις εφαρμογές του ομοαξονικού καλωδίου, το ρεύμα στον εξωτερικό αγωγό είναι αντίθετο από αυτό του εσωτερικού άρα, σύμφωνα με το νόμο του Ampere, το

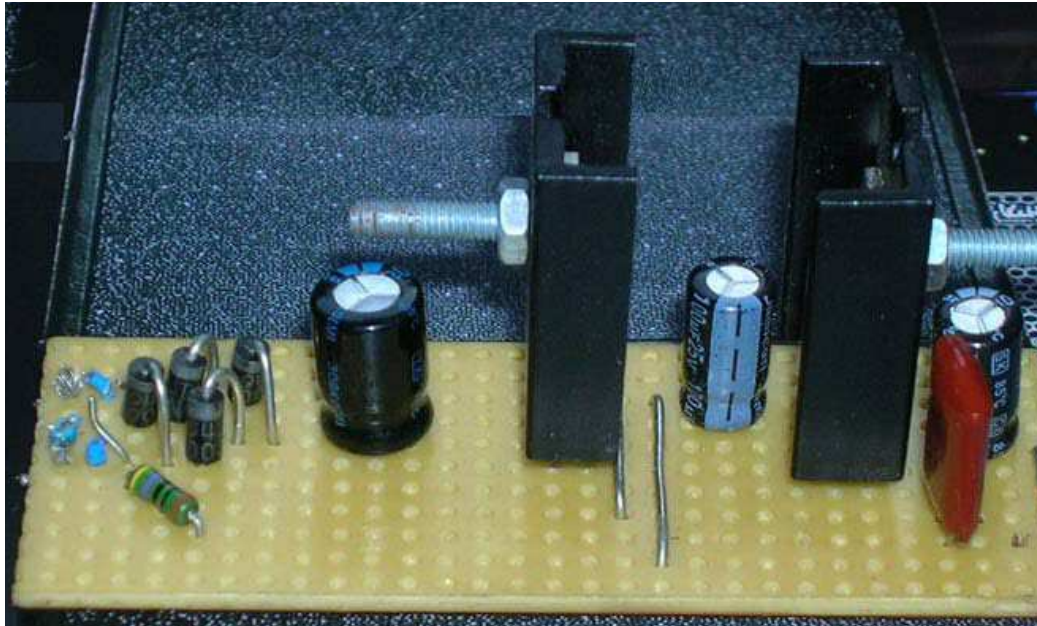
μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν τα ρεύματα αυτά έξω από το καλώδιο είναι μηδέν. Σα συνέπεια του γεγονότος αυτού, εναλλασσόμενα ρεύματα στο ομοαξονικό δε δημιουργούν (παρασιτικές) ΗΕΔ από επαγωγή σε άλλα κυκλώματα έξω από τη θωράκιση. Επίσης, εφ' όσον οι άξονες συμμετρίας των δύο αγωγών ταυτίζονται, δε δημιουργείται βρόχος με μη-μηδενικό εμβαδόν μεταξύ τους οπότε αποφεύγονται εντελώς (παρασιτικές) ΗΕΔ από επαγωγή στο κύκλωμα του καλωδίου ακόμα και αν αυτό βρίσκεται μέσα σε χρόνο-μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία.

Ας περάσουμε στο δεύτερο πρόβλημα μας: το θέμα του «τσουλήματος» της συχνότητας. Το θέμα αυτό παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία στην αντιμετώπισή του, διότι εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Οι παράγοντες που εντοπίσαμε είναι οι εξής:

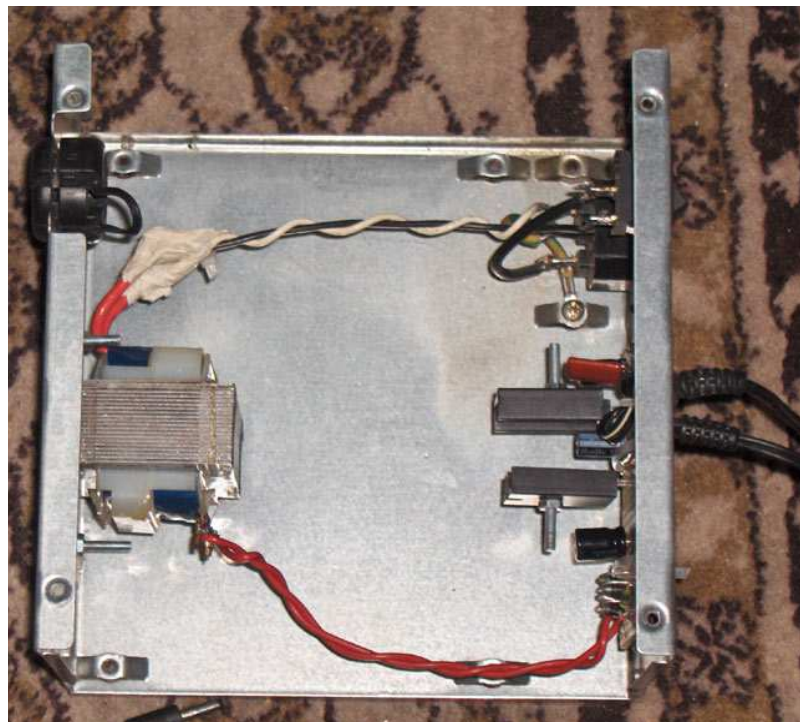
- Αλλαγή της θερμοκρασίας του τρανζίστορ 2N2219 κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Όσο αλλάζει η θερμοκρασία του τρανζίστορ τόσο «τσουλάει» η συχνότητα εκπομπής μας, πράγμα φυσιολογικό στο συγκεκριμένο κύκλωμα, αφού το 2N2219 παίζει το βασικό ρόλο του ταλαντωτή αλλά και του ενισχυτή. Το πρόβλημα αυτό περιορίζεται με την κατάλληλη επιλογή ψύκτρας, η οποία θα πρέπει να μπορεί να απάγει αποτελεσματικά τη θερμότητα που αναπτύσσεται στο τρανζίστορ.
- Διακύμανση της τάσης τροφοδοσίας η οποία προκαλεί επίσης «τσούλημα» της συχνότητας εκπομπής μας. Το πρόβλημα αυτό εντοπίστηκε, όταν αντί για τροφοδοτικό χρησιμοποιήσαμε μπαταρία 9V, η οποία δεν ήταν καινούργια. Μετά από λίγη ώρα λειτουργίας παρουσιάστηκε πρόβλημα τσουλήματος. Μετρήσαμε τότε την τάση της μπαταρίας και βρήκαμε ότι είχε πέσει λίγο στα 8,6 V. Γενικά όσο περνούσε η ώρα και έπεφτε η τάση της μπαταρίας τόσο άλλαζε η συχνότητα εκπομπής. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τη χρησιμοποίηση τροφοδοσίας με σταθερή τιμή. Μια πολύ καλή λύση είναι λοιπόν η κατασκευή ενός τροφοδοτικού το οποίο θα παρέχει σταθερή τάση. Ένα τέτοιο τροφοδοτικό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το τροφοδοτικό βασίζεται στα ολοκληρωμένα LM7812 και LM7809 τα οποία δίνουν στην έξοδό τους σταθεροποιημένη τάση 12V και 9V αντίστοιχα. Επιλέξαμε να κατασκευάσουμε ένα τροφοδοτικό με 2 εξόδους για να έχουμε τη δυνατότητα να δίνουμε στο κύκλωμα μας 2 διαφορετικές τιμές τροφοδοσίας με σκοπό τον πειραματισμό.



Η κατασκευή του κυκλώματος έγινε σε διάτρητη πλακέτα για ευκολία. Το κύκλωμα σταθεροποίησης χωρίς το μετασχηματιστή φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Όπως φαίνεται στη φωτογραφία χρησιμοποιήθηκαν 2 ψύκτρες για τα ολοκληρωμένα οι οποίες βιδώθηκαν με βίδες πάνω τους, αφού αυτά ανεβάζουν υψηλή θερμοκρασία κατά τη λειτουργία τους. Σαν κουτί για το τροφοδοτικό μας χρησιμοποιήσαμε ένα μεταλλικό κουτί από παλιό τροφοδοτικό υπολογιστή, στο οποίο τοποθετήσαμε το μετασχηματιστή και την πλακέτα με το κύκλωμα. Ο μετασχηματιστής προέρχεται από ένα χαλασμένο παιχνίδι (αυτοκίνητο) και έχει στο δευτερεύον 12V(ac)@800mA. Η συνδεσμολογία και το κουτί φαίνονται στην παρακάτω φωτογραφία.



Στα δεξιά της παραπάνω φωτογραφίας φαίνονται τα δύο θωρακισμένα καλώδια στα οποία παίρνουμε 9 και 12 V αντίστοιχα. Η λειτουργία του πομπού με τη χρήση του παραπάνω τροφοδοτικού ήταν αρκετά σταθερή χωρίς ιδιαίτερα «τσουλήματα» στη συχνότητα εκπομπής.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή σκοπός μας ήταν η ανάπτυξη όλων των βασικών θεμάτων που αφορούν την εκπομπή ραδιοφωνικού σήματος FM. Έγινε αναφορά σε βασικές έννοιες και ορισμούς, ώστε να είναι κατανοητή από τον αναγνώστη όλη η διαδικασία, βήμα προς βήμα ώστε να επιτευχθεί μία αποστολή μηνύματος – πληροφορίας από έναν πομπό σε ένα δέκτη. Επίσης, ο αναγνώστης έχει τη δυνατότητα να ενημερωθεί για ολόκληρη τη διαδικασία κατασκευής του πρακτικού κομματιού της εργασίας. Περιγράφονται τα επιμέρους κομμάτια της κατασκευής, καθώς επίσης και όλη η διαδικασία συναρμολόγησης και συντονισμού. Φυσικά δε θα μπορούσε να λείπει και το κομμάτι της αντιμετώπισης προβλημάτων κατά την κατασκευή και λειτουργία του κυκλώματος.

Σε γενικές γραμμές, ενώ η κατασκευή πομπού FM φαίνεται απλή εκ πρώτης όψης αυτό δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Οι παράγοντες που πρέπει να λάβει υπ' όψιν του κανείς για να μπορέσει να θέσει σε λειτουργία εκπομπής το κύκλωμα είναι πολλοί και τα εμπόδια που προκύπτουν είναι πολλές φορές απρόσμενα - όπως είδαμε και παραπάνω στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Αξίζει να αναφερθούμε περιληπτικά στα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν καθώς και στους τρόπους επίλυσης αυτών.

Πρώτο και πολύ σημαντικό πρόβλημα ήταν ότι κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του πομπού η συχνότητα εκπομπής μας δεν ήταν σταθερή. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα έπρεπε να εντοπιστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτό το «τσούλημα» της συχνότητα εκπομπής. Οι παράγοντες που εντοπίσαμε είναι οι εξής:

- Αλλαγή της θερμοκρασίας του τρανζίστορ 2N2219 κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Όσο αλλάζει η θερμοκρασία του τρανζίστορ τόσο «τσουλάει» η συχνότητα εκπομπής μας, πράγμα φυσιολογικό στο συγκεκριμένο κύκλωμα αφού το 2N2219 παίζει το βασικό ρόλο του ταλαντωτή αλλά και του ενισχυτή. Το πρόβλημα αυτό περιορίζεται με την κατάλληλη επιλογή ψύκτρας η οποία θα πρέπει να μπορεί να απάγει αποτελεσματικά τη θερμότητα που αναπτύσσεται στο τρανζίστορ.
- Διακύμανση της τάσης τροφοδοσίας η οποία προκαλεί επίσης «τσούλημα» της συχνότητας εκπομπής μας. Το πρόβλημα αυτό εντοπίστηκε, όταν αντί για τροφοδοτικό χρησιμοποιήσαμε μπαταρία 9V, της οποίας όσο η τάση έπεφτε λόγω παλαιότητας παρουσιαζόταν πρόβλημα τσουλήματος της συχνότητας εκπομπής. Η λύση που επιλέξαμε ήταν η κατασκευή ενός τροφοδοτικού το οποίο θα παρέχει σταθερή τάση. Το τροφοδοτικό που κατασκευάσαμε βασίζεται στα ολοκληρωμένα LM7812 και LM7809 τα οποία δίνουν στην έξοδο τους σταθεροποιημένη τάση 12V και 9V αντίστοιχα. Επιλέξαμε να κατασκευάσουμε ένα τροφοδοτικό με 2 εξόδους για να έχουμε τη δυνατότητα να δίνουμε στο κύκλωμα μας 2 διαφορετικές τιμές τροφοδοσίας με σκοπό τον πειραματισμό.

Το άλλο σοβαρό πρόβλημα που χρειάστηκε να αντιμετωπίσουμε είναι ότι υπήρχε ένας αρκετά έντονος βόμβος στο σήμα που ακούγαμε στο δέκτη τον οποίο έπρεπε να περιορίσουμε. Ο βόμβος, πιθανολογήθηκε ότι οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε εξωγενείς ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές οπότε και λύθηκε σε μεγάλο βαθμό με δύο απλές λύσεις.

- Τοποθέτηση του πομπού μέσα σε μεταλλικό κουτί στο σασί του οποίου συνδέθηκε με βίδες η γείωση του κυκλώματος μας. Η τοποθέτηση του κυκλώματος σε μεταλλικό κουτί όπως είναι γνωστό θωρακίζει το κύκλωμα σε σχέση με τις διάφορες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες. Για την κατασκευή του κουτιού καταφύγαμε σε μια πολύ απλή και φθηνή λύση επενδύοντας ένα χάρτινο κουτί με αλουμινόχαρτο,
- Αντικατάσταση των καλωδίων τροφοδοσίας και του καλωδίου του μικροφώνου με ομοαξονικά θωρακισμένα καλώδια.

Συμπερασματικά ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που καταλήξαμε είναι ότι για την πρακτική χρήση ενός πομπού FM σε πραγματικές συνθήκες είναι απαραίτητο το κύκλωμα του πομπού να κλειστεί σε μεταλλικό κουτί και να γειωθεί στο σασί του κουτιού, ενώ επίσης και το τροφοδοτικό πρέπει απαραίτητως να βρίσκεται σε κλειστό μεταλλικό κουτί. Η σύνδεση δε, των δυο κουτιών πρέπει να γίνει με θωρακισμένα καλώδια.

Μια καλή ιδέα για μελλοντική βελτίωση του παραπάνω πομπού της εργασίας μας θα είναι να προστεθούν κι άλλα στάδια RF στο κύκλωμα αυξάνοντας έτσι την ισχύ εκπομπής και πετυχαίνοντας μεγαλύτερη εμβέλεια. Για παράδειγμα προσθέτοντας 2 ακόμη στάδια RF μπορούμε να πετύχουμε μέχρι και ισχύ εκπομπής ίση με 4 W.

Παράρτημα

Στο παράρτημα αυτό παραθέτονται τα ακριβή χαρακτηριστικά των τρανζίστορ που χρησιμοποιήσαμε στο κύκλωμα.

BC546 THRU BC549				
Small Signal Transistors (NPN)				
		FEATURES		
<small>Dimensions in inches and (millimeters)</small>		<ul style="list-style-type: none"> • NPN Silicon Epitaxial Planar Transistors • These transistors are subdivided into three groups A, B and C according to their current gain. The type BC546 is available in groups A and B, however, the types BC547 and BC548 can be supplied in all three groups. The BC549 is a low-noise type and available in groups B and C. As complementary types, the PNP transistors BC556 ... BC559 are recommended. • On special request, these transistors are also manufactured in the pin configuration TO-18. 		
		MECHANICAL DATA		
		Case: TO-92 Plastic Package Weight: approx. 0.18 g		
MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS				
<small>Values at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified</small>				
Collector-Base Voltage	BC546 BC547 BC548, BC549	V_{CB0}	80 50 30	V V V
Collector-Emitter Voltage	BC546 BC547 BC548, BC549	V_{CE0}	80 50 30	V V V
Collector-Emitter Voltage	BC546 BC547 BC548, BC549	V_{CE0}	65 45 30	V V V
Emitter-Base Voltage	BC546, BC547 BC548, BC549	V_{EB0}	6 5	V V
Collector Current		I_C	100	mA
Peak Collector Current		I_{CM}	200	mA
Peak Base Current		I_{BM}	200	mA
Peak Emitter Current		$-I_{EM}$	200	mA
Power Dissipation at $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$		P_{tot}	500 ⁽¹⁾	mW
Junction Temperature		T_J	150	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range		T_S	-65 to +150	$^{\circ}\text{C}$
⁽¹⁾ Valid provided that leads are kept at ambient temperature at a distance of 2 mm from case				

BC546 THRU BC549

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
h-Parameters at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 2\text{ mA}$, $f = 1\text{ kHz}$, Small Signal Current Gain					
Current Gain Group	A	h_{fe}	220	—	—
	B	h_{fe}	330	—	—
	C	h_{fe}	600	—	—
Input Impedance	A	h_{ie}	1.6	2.7	4.5
	B	h_{ie}	3.2	4.5	8.5
	C	h_{ie}	6	8.7	15
Output Admittance	A	h_{oe}	—	18	30
	B	h_{oe}	—	30	60
	C	h_{oe}	—	60	110
Reverse Voltage Transfer Ratio	A	h_{re}	—	$1.5 \cdot 10^{-4}$	—
	B	h_{re}	—	$2 \cdot 10^{-4}$	—
	C	h_{re}	—	$3 \cdot 10^{-4}$	—
DC Current Gain					
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 10\mu\text{A}$					
Current Gain Group	A	h_{FE}	90	—	—
	B	h_{FE}	150	—	—
	C	h_{FE}	270	—	—
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 2\text{ mA}$					
Current Gain Group	A	h_{FE}	110	180	220
	B	h_{FE}	200	290	450
	C	h_{FE}	420	500	800
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 100\text{ mA}$					
Current Gain Group	A	h_{FE}	—	120	—
	B	h_{FE}	—	200	—
	C	h_{FE}	—	400	—
Thermal Resistance Junction to Ambient Air	$R_{\theta JA}$	—	—	250 ¹⁾	K/W
Collector Saturation Voltage					
at $I_C = 10\text{ mA}$, $I_B = 0.5\text{ mA}$					
	V_{CEsat}	—	80	200	mV
at $I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 5\text{ mA}$					
	V_{CEsat}	—	200	600	mV
Base Saturation Voltage					
at $I_C = 10\text{ mA}$, $I_B = 0.5\text{ mA}$					
	V_{BEsat}	—	700	—	mV
at $I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 5\text{ mA}$					
	V_{BEsat}	—	900	—	mV
Base-Emitter Voltage					
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 2\text{ mA}$					
	V_{BE}	580	660	700	mV
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$					
	V_{BE}	—	—	720	mV
Collector-Emitter Cutoff Current					
at $V_{CE} = 80\text{ V}$					
BC546	I_{CES}	—	0.2	15	nA
at $V_{CE} = 50\text{ V}$					
BC547	I_{CES}	—	0.2	15	nA
at $V_{CE} = 30\text{ V}$					
BC548, BC549	I_{CES}	—	0.2	15	nA
at $V_{CE} = 80\text{ V}$, $T_J = 125\text{ }^\circ\text{C}$					
BC546	I_{CES}	—	—	4	μA
at $V_{CE} = 50\text{ V}$, $T_J = 125\text{ }^\circ\text{C}$					
BC547	I_{CES}	—	—	4	μA

¹⁾ Valid provided that leads are kept at ambient temperature at a distance of 2 mm from case

BC546 THRU BC549

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

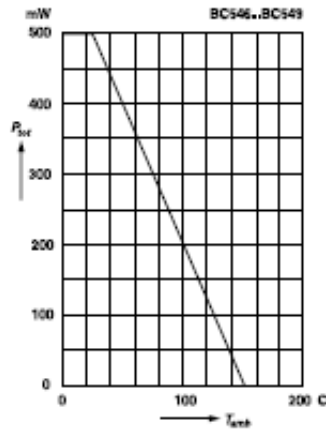
Ratings at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified

	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
at $V_{CE} = 30\text{ V}$, $T_J = 125\text{ °C}$ BC546, BC549	I_{CES}	–	–	4 4	μA μA
Gain-Bandwidth Product at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$, $f = 100\text{ MHz}$	f_T	–	300	–	MHz
Collector-Base Capacitance at $V_{CB} = 10\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_{CB0}	–	3.5	6	pF
Emitter-Base Capacitance at $V_{EB} = 0.5\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_{EB0}	–	9	–	pF
Noise Figure at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 200\text{ }\mu\text{A}$, $R_G = 2\text{ k}\Omega$, $f = 1\text{ kHz}$, $\Delta f = 200\text{ Hz}$ BC546, BC547	F	–	2	10	dB
BC548	F	–	1.2	4	dB
BC549	F	–	1.4	4	dB
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 200\text{ }\mu\text{A}$, $R_G = 2\text{ k}\Omega$, $f = 30\dots 15000\text{ Hz}$ BC549	F	–	1.4	4	dB

RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES BC546 THRU BC549

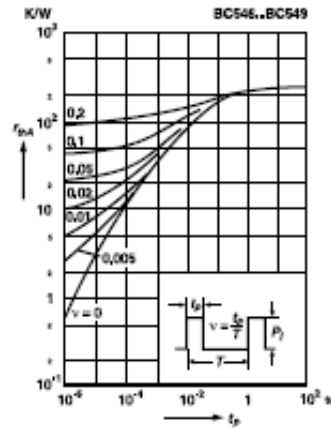
Admissible power dissipation versus temperature

Valid provided that leads are kept at ambient temperature at a distance of 2 mm from case



Pulse thermal resistance versus pulse duration

Valid provided that leads are kept at ambient temperature at a distance of 2 mm from case



NPN switching transistors

2N2219; 2N2219A

FEATURES

- High current (max. 800 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

APPLICATIONS

- High-speed switching
- DC and VHF/UHF amplification, for 2N2219 only.

DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-39 metal package.
PNP complement: 2N2905 and 2N2905A.

PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case

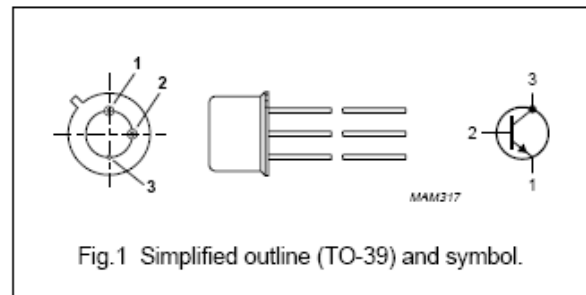


Fig. 1 Simplified outline (TO-39) and symbol.

QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{CBO}	collector-base voltage 2N2219 2N2219A	open emitter	–	60	V
			–	75	V
V_{CEO}	collector-emitter voltage 2N2219 2N2219A	open base	–	30	V
			–	40	V
I_C	collector current (DC)		–	800	mA
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$	–	800	mW
h_{FE}	DC current gain	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	75	–	
f_T	transition frequency 2N2219 2N2219A	$I_C = 20\text{ mA}; V_{CE} = 20\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	250	–	MHz
			300	–	MHz
t_{off}	turn-off time	$I_{Con} = 150\text{ mA}; I_{Bon} = 15\text{ mA}; I_{Boff} = -15\text{ mA}$	–	250	ns

NPN switching transistors

2N2219; 2N2219A

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V _{CBO}	collector-base voltage 2N2219 2N2219A	open emitter	–	60	V
			–	75	V
V _{CEO}	collector-emitter voltage 2N2219 2N2219A	open base	–	30	V
		open base; I _C ≤ 500 mA	–	40	V
V _{EBO}	emitter-base voltage 2N2219 2N2219A	open collector	–	5	V
			–	6	V
I _C	collector current (DC)		–	800	mA
I _{CM}	peak collector current		–	800	mA
I _{BM}	peak base current		–	200	mA
P _{tot}	total power dissipation	T _{amb} ≤ 25 °C	–	800	mW
		T _{case} ≤ 25 °C	–	3	W
T _{stg}	storage temperature		–65	+150	°C
T _j	junction temperature		–	200	°C
T _{amb}	operating ambient temperature		–65	+150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
R _{th j-a}	thermal resistance from junction to ambient	in free air	190	K/W
R _{th j-c}	thermal resistance from junction to case		50	K/W

NPN switching transistors

2N2219; 2N2219A

CHARACTERISTICS

 $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
I_{CBO}	collector cut-off current 2N2219	$I_E = 0; V_{CB} = 50\text{ V}$	–	10	nA
		$I_E = 0; V_{CB} = 50\text{ V}; T_{amb} = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–	10	μA
I_{CBO}	collector cut-off current 2N2219A	$I_E = 0; V_{CB} = 60\text{ V}$	–	10	nA
		$I_E = 0; V_{CB} = 60\text{ V}; T_{amb} = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–	10	μA
I_{EBO}	emitter cut-off current	$I_C = 0; V_{EB} = 3\text{ V}$	–	10	nA
h_{FE}	DC current gain	$I_C = 0.1\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	35	–	
h_{FE}	DC current gain	$I_C = 1\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	50	–	
h_{FE}	DC current gain	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	75	–	
h_{FE}	DC current gain 2N2219A	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}; T_{amb} = -55\text{ }^\circ\text{C}$	35	–	
h_{FE}	DC current gain	$I_C = 150\text{ mA}; V_{CE} = 1\text{ V}; \text{note 1}$	50	–	
h_{FE}	DC current gain	$I_C = 150\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}; \text{note 1}$	100	300	
h_{FE}	DC current gain 2N2219 2N2219A	$I_C = 500\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}; \text{note 1}$	30	–	
			40	–	
V_{CEsat}	collector-emitter saturation voltage 2N2219 2N2219A	$I_C = 150\text{ mA}; I_B = 15\text{ mA}; \text{note 1}$	–	400	mV
			–	300	mV
V_{CEsat}	collector-emitter saturation voltage 2N2219 2N2219A	$I_C = 500\text{ mA}; I_B = 50\text{ mA}; \text{note 1}$	–	1.6	V
			–	1	V
V_{BEsat}	base-emitter saturation voltage 2N2219 2N2219A	$I_C = 150\text{ mA}; I_B = 15\text{ mA}; \text{note 1}$	–	1.3	V
			0.6	1.2	V
V_{BEsat}	base-emitter saturation voltage 2N2219 2N2219A	$I_C = 500\text{ mA}; I_B = 50\text{ mA}; \text{note 1}$	–	2.6	V
			–	2	V
C_c	collector capacitance	$I_E = I_e = 0; V_{CB} = 10\text{ V}$	–	8	pF
C_e	emitter capacitance 2N2219A	$I_C = I_c = 0; V_{EB} = 500\text{ mV}$	–	25	pF
f_T	transition frequency 2N2219 2N2219A	$I_C = 20\text{ mA}; V_{CE} = 20\text{ V}; f = 100\text{ MHz};$	250	–	MHz
			300	–	MHz
F	noise figure 2N2219A	$I_C = 0.2\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}; R_S = 2\text{ k}\Omega;$ $f = 1\text{ kHz}; B = 200\text{ Hz}$	–	4	dB

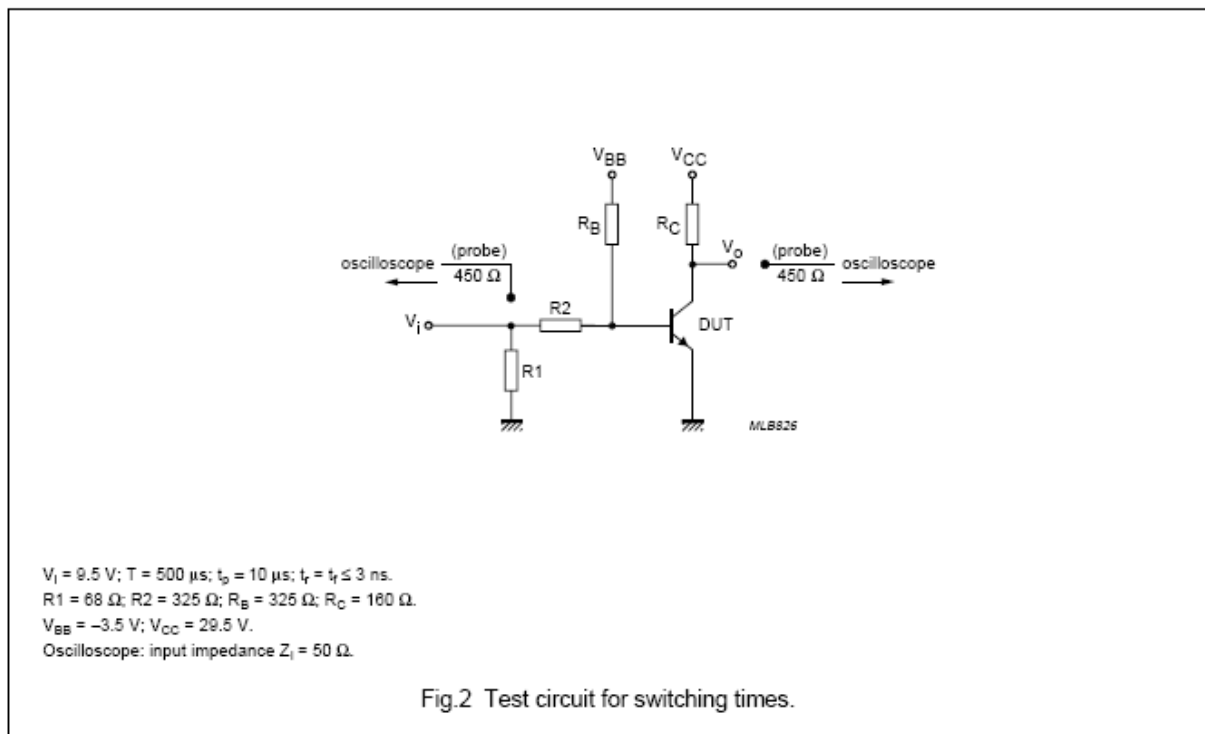
NPN switching transistors

2N2219; 2N2219A

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
Switching times (between 10% and 90% levels) for type 2N2219A; see Fig.2					
t_{on}	turn-on time	$I_{Con} = 150 \text{ mA}; I_{Bon} = 15 \text{ mA};$ $I_{Boff} = -15 \text{ mA}$	–	35	ns
t_d	delay time		–	15	ns
t_r	rise time		–	20	ns
t_{off}	turn-off time		–	250	ns
t_s	storage time		–	200	ns
t_f	fall time		–	60	ns

Note

1. Pulse test: $t_p \leq 300 \mu\text{s}; \delta \leq 0.02$.



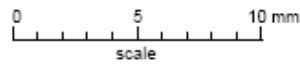
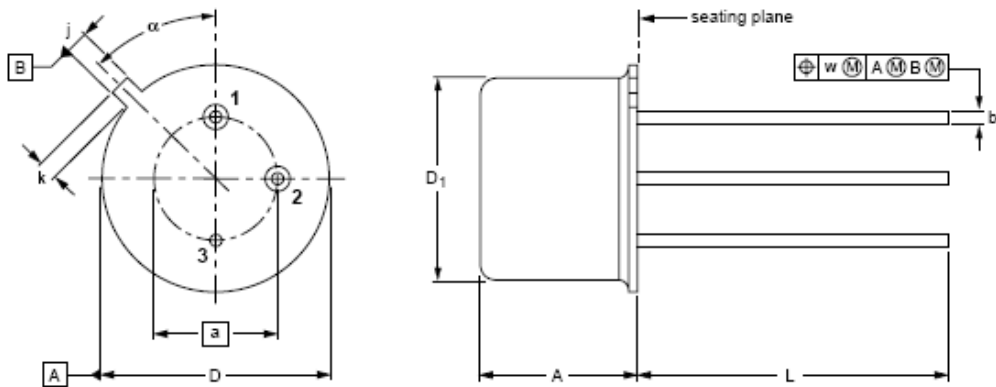
NPN switching transistors

2N2219; 2N2219A

PACKAGE OUTLINE

Metal-can cylindrical single-ended package; 3 leads

SOT5/11



DIMENSIONS (mm are the original dimensions)

UNIT	A	a	b	D	D ₁	j	k	L	w	α
mm	6.60 6.35	5.08	0.48 0.41	9.39 9.08	8.33 8.18	0.85 0.75	0.95 0.75	14.2 12.7	0.2	45°

OUTLINE VERSION	REFERENCES				EUROPEAN PROJECTION	ISSUE DATE
	IEC	JEDEC	EIAJ			
SOT5/11		TO-39				97-04-11

NPN switching transistors

2N2219; 2N2219A

DEFINITIONS

Data sheet status	
Objective specification	This data sheet contains target or goal specifications for product development.
Preliminary specification	This data sheet contains preliminary data; supplementary data may be published later.
Product specification	This data sheet contains final product specifications.
Limiting values	
Limiting values given are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the Characteristics sections of the specification is not implied. Exposure to limiting values for extended periods may affect device reliability.	
Application information	
Where application information is given, it is advisory and does not form part of the specification.	

LIFE SUPPORT APPLICATIONS

These products are not designed for use in life support appliances, devices, or systems where malfunction of these products can reasonably be expected to result in personal injury. Philips customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips for any damages resulting from such improper use or sale.

Βιβλιογραφία

1. Theodore S. Rappaport, *Ασύρματες Επικοινωνίες*, Αθήνα, Μ. Γκιούρδας, 2009
2. John G. Proakis & Masoud Salehi, *Συστήματα Τηλεπικοινωνιών*, Αθήνα, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2002
3. Γ. Παρίκος, *Ραδιοφωνία*, Αθήνα, Ίων, 1996
4. Σταμάτη Σ. Κουρή, *Στοιχεία Θεωρίας Κεραιών και Διαδόσεως Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων*, Θεσσαλονίκη, Ζήτη, 1996
5. <http://el.wikipedia.org/wiki>, 25 Σεπτεμβρίου 2011
6. <http://www.pi-schools.gr/lessons/tee/electronic/biblia.php>, 12 Αυγούστου 2011
7. http://charon.phys.uoa.gr/moag/admin/pdf_files/Telecom_Labs.pdf, 5 Οκτωβρίου 2011
8. http://speakerproject.com/images/ebook_dsp_gr/dsp6_2009_chap3.pdf, 5 Οκτωβρίου 2011
9. <http://users.sch.gr/kalpsos/FILES/LESSONS/SEL/PER%203-4.pdf>, 21 Ιουνίου 2011
10. <http://www.arnos.gr/>, 11 Ιουνίου 2011
11. <http://ph102.edu.physics.uoc.gr/web3/images/stories/CoaxialCableNew.pdf>
12. <http://www.pci-card.com/2n2219a.pdf>
13. http://www.radiotechnika.hu/images/BC546_50.pdf
14. <http://www.electronics-lab.com/projects/rf/001/fm3.gif>