ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕ ΘΕΜΑ:

Μελέτη Διαμόρφωσης και Αποδιαμόρφωσης Συχνότητας FM. Υλοποίηση Κυκλωμάτων Διαμόρφωσης-Αποδιαμόρφωσης.

Από τον Κουμπαράκο Πραξιτέλη
και την Μπαΐλη Αναστασία

Εισηγητής: ΛΙΓΟΨΥΧΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Χανιά Φεβρουάριος 2004

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός του κεφαλαίου:

1. Να αναγνωρίσουμε τα τέσσερα κύρια τμήματα ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και να γνωρίζουμε τι κάνει το καθένα.
2. Να ορίσουμε τη διαμόρφωση και τη σπουδαιότητα της.

1.1 Η σημασία των τηλεπικοινωνιών.

Αρχικά , ξεκινώντας την εργασία μας , οφείλουμε να κάνουμε , μια αναφορά στην τεράστια σημασία των επικοινωνιών. Ένας από τους ορισμούς που μπορεί να δοθεί στη λέξη επικοινωνία είναι , ότι αποτελεί τη βασική επεξεργασία ανταλλαγής πληροφοριών.
Οι άνθρωποι έχοντας την ανάγκη να εκφράσουν και να εκφρασθούν, επικοινωνούσαν και επικοινωνούν με οποιοδήποτε μέσο ήταν εφικτό σε κάθε εποχή. Είναι γνωστό ότι η ανθρώπινη επικοινωνία πήρε μια δραματική στροφή στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα , όταν ανακαλύφθηκε ο ηλεκτρισμός και οι πολλαπλές εφαρμογές του. Έτσι η ανταλλαγή πληροφοριών πήρε μια τεράστια ώθηση, στο παρακάτω Σχ.1.1 μπορούμε να δούμε τη χρονική σειρά σημαντικών ορόσημων στην εξέλιξη των ανθρώπινων επικοινωνιών.

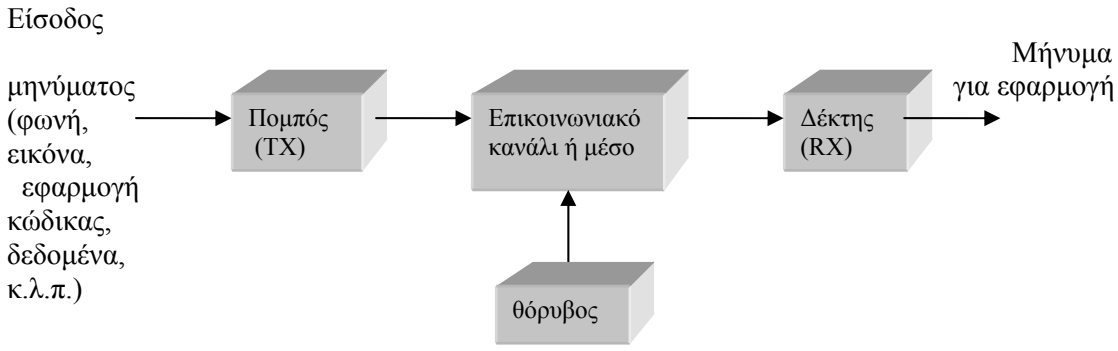
1440	Ο Gutenberg εφευρίσκει την τυπογραφία
1844	Ο Morse κατοχυρώνει τον τηλέγραφο
1866	Η πρώτη πετυχημένη χρήση ενός υπερατλαντικού τηλεγραφικού καλωδίου
1876	Ο Bell εφευρίσκει και κατοχυρώνει το τηλέφωνο
1879	Ο Eastman εμφανίζει φωτογραφικό φιλμ
1887	Ο Hertz ανακαλύπτει τα ραδιοκύματα
1895	Ο Marconi επιδεικνύει την ασύρματη τηλεγραφία
1901	Ο Marconi πραγματοποιεί την πρώτη υπερατλαντική ραδιο-μετάδοση
1903	Ανακαλύφθηκε η "λυχνία" Fleming
1906	Ο De Forest εφευρίσκει την τρίοδο λυχνία κενού και την πρώτη ραδιοτηλεφωνική εκπομπή
1923	Εφευρίσκεται η τηλεόραση
1931	Ανακαλύπτεται η ραδιοαστρονομία
1940-45	Τελειοποιείται το ραντάρ και βοηθά τη νίκη του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου
1948	Εφευρίσκεται το transistor
1954	Αρχίζουν οι εκπομπές της έγχρωμης τηλεόρασης
1959	Εφευρίσκεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα
1962	Ο πρώτος επικοινωνιακός δορυφόρος

Σχήμα 1.1

Σήμερα, σημαντικό τμήμα στη ζωή μας, όπως είναι το ραδιόφωνο και η τηλεόραση έχουν αυξήσει την ικανότητά μας να μοιραζόμαστε την πληροφορία. Είναι δύσκολο να φανταστούμε, πως θα ήταν η ζωή μας, χωρίς τη βοήθεια των διαφόρων μέσων τηλεπικοινωνιών. Με την απουσία τους θα διαπιστώναμε, πόσο δύσκολο θα ήταν να εκμεταλλευτούμε τη διαθέσιμη πληροφορία τη στιγμή, που τη χρειαζόμαστε.

1.2 Τα στοιχεία ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Όλα τα ηλεκτρονικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα έχουν τη βασική μορφή που φαίνεται στο Σχ.1.2



Σχήμα 1.2Βασικά στοιχεία οποιουδήποτε τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Στα περισσότερα συστήματα, ένας άνθρωπος παράγει ένα μήνυμα το οποίο εισέρχεται στον πομπό, ο οποίος κατόπιν μεταδίδει το μήνυμα στο κανάλι επικοινωνίας. Το μήνυμα λαμβάνεται από το δέκτη και αναμεταδίδεται σ' έναν άλλο άνθρωπο. Στην πορεία προστίθεται θόρυβος στο μήνυμα στο κανάλι επικοινωνίας. Θόρυβος είναι ο γενικός όρος που ισχύει για οποιαδήποτε παρεμβολή που υποβαθμίζει την μεταδιδόμενη πληροφορία. Ας δούμε ξεχωριστά το καθένα απ' αυτά τα βασικά στοιχεία.

Ο ***πομπός*** είναι ένα σύνολο ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και κυκλωμάτων σχεδιασμένων να μετατρέπουν την πληροφορία για μετάδοση σ' ένα συγκεκριμένο μέσο επικοινωνίας. Μπορεί να είναι τόσο απλό όσο ένα μικρόφωνο ή τόσο σύνθετος όσο ένας μικροκυματικός ραδιο-πομπός.

Το ***κανάλι επικοινωνίας*** είναι το μέσο με το οποίο το ηλεκτρονικό σήμα διαβιβάζεται από το ένα τόπο στον άλλον. Μπορεί να είναι ένα ζεύγος συρμάτων που μεταφέρουν ένα σήμα φωνής από ένα μικρόφωνο σ' ένα σύστημα εγγραφής. Μπορεί επίσης να είναι ένα καλώδιο οπτικής ίνας, που μεταφέρει το μήνυμα ή μπορεί να είναι Radio. Radio είναι ο ευρύς

γενικός όρος που ισχύει για οποιοδήποτε τύπο ασύρματης επικοινωνίας από ένα σημείο σ' ένα άλλο.
Αν και το μέσο βοηθά τη μετάδοση της πληροφορίας παράλληλα την εξασθενεί με αποτέλεσμα το σήμα που φθάνει στο δέκτη να έχει μικρότερο πλάτος. Γι' αυτό απαιτείται σημαντική ενίσχυση του σήματος στον πομπό και στο δέκτη για πετυχημένη επικοινωνία.

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

Ο ***θόρυβος*** είναι τυχαία, ανεπιθύμητη ηλεκτρική ενέργεια στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα δια του επικοινωνιακού 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 όπου ο ήλιος και άλλα άστρα εκπέμπουν διάφορα είδη ακτινοβολίας τα οποία δημιουργούν παρεμβολές στις επικοινωνίες. Επίσης, έχουμε και βιομηχανικές ηλεκτρικές παρεμβολές. Τα συστήματα ηλεκτρικής ανάφλεξης των αυτοκινήτων, οι ηλεκτροκινητήρες, οι λάμπες φθορισμού και άλλοι τύποι εξοπλισμού δημιουργούν σήματα τα οποία μπορούν επίσης να παρεμβάλλουν στη μετάδοση του μηνύματος.
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 μετάδοση τους σε μια μακρινή απόσταση. Σε μερικές περιπτώσεις, ο θόρυβος εξαλείφει εντελώς το μήνυμα. Άλλες φορές, απλώς προκαλεί παρεμβολή, που σημαίνει ότι μέρος του μηνύματος χάνεται εντελώς ή ανακτάται ατελώς.
Ο θόρυβος είναι ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα επικοινωνιών. Τις περισσότερες φορές δε μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς. Ωστόσο υπάρχουν τρόποι αντιμετώπισης του.

1.3 Τρόποι και διαχωρισμός των Τηλεπικοινωνιών

Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνονται οι ηλεκτρονικές επικοινωνίες:

A. Μεταδόσεις μιας κατεύθυνσης (SIMPLEX), όπως είναι οι εκπομπές ραδιοφώνου ή δύο κατευθύνσεων (FULL-DUPLEX), όπως όταν οι άνθρωποι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω τηλεφώνου

B. Αναλογική ή ψηφιακή εκπομπή σημάτων. Όπως καταλαβαίνουμε εξαρτάται από τη μορφή των εκπεμπόμενων σημάτων. Υπάρχουν δύο τύποι σημάτων: αναλογικά και ψηφιακά. Ένα αναλογικό σήμα είναι μια συνεχής μεταβαλλόμενη τάση ή ρεύμα. Για παράδειγμα ένα ημιτονικό κύμα τόνου, οι τάσεις φωνής και εικόνας αποτελούν αναλογικά σήματα.
   Ο άλλος τύπος εκπεμπόμενου σήματος υπόκειται στην ευρεία γενική κατηγορία του ψηφιακού. Οι πρώτοι τύποι ενσύρματης και ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιούσαν έναν τύπο on/off ψηφιακού κώδικα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στους υπολογιστές είναι γνωστό ότι είναι ψηφιακά. Ο πιο συνηθισμένος ψηφιακός κώδικας που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες είναι ο ASCII (American Standard Code for Information).

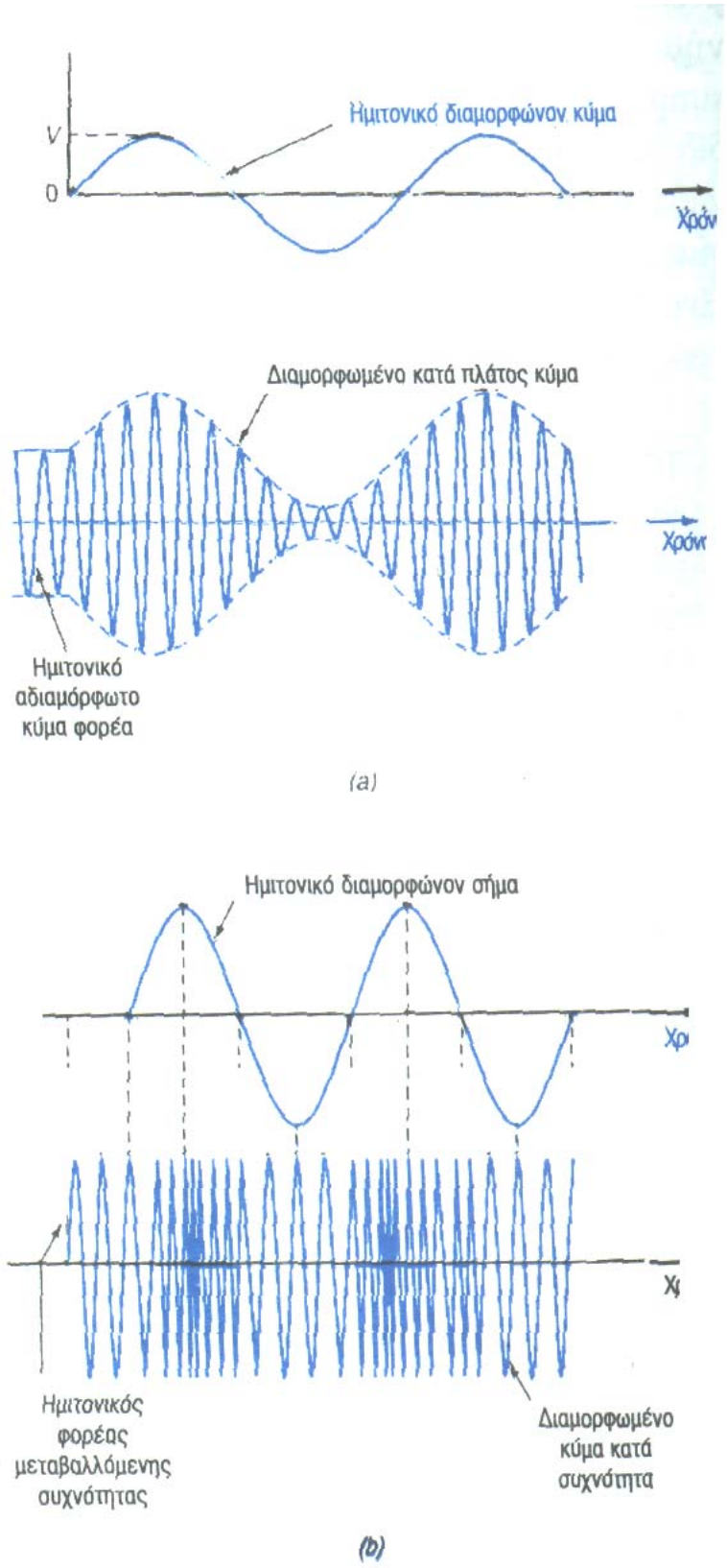
C. Σήματα βασικής ζώνης ή διαμορφωμένα άσχετα με το αν τα πρωτότυπα σήματα πληροφορίας είναι αναλογικά ή ψηφιακά. Σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, τα σήματα πληροφορίας μπορεί να μεταδίδονται στο κανάλι μετάδοσης, όπως είναι ή διαμορφώνοντας ένα φορέα. Θέτοντας τα αρχικά σήματα φωνής, εικόνας ή ψηφιακής μορφής στο μέσο μετάδοσης έχουμε μετάδοση βασικής ζώνης. Π.χ. στα συστήματα τηλεφώνου, η φωνή εισέρχεται στα σύρματα όπως είναι και μεταδίδεται σε κάποια απόσταση ως το δέκτη. Ακόμη στα δίκτυα υπολογιστών, τα ψηφιακά σήματα εφαρμόζονται κατευθείαν σε ομοαξονικά καλώδια για μετάδοση σε άλλον υπολογιστή.
   Από την άλλη μεριά, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, όπου τα σήματα βασικής ζώνης είναι μη συμβατά με τα μέσα μετάδοσης, παράδειγμα, τα σήματα φωνής δεν μπορούν να μεταδοθούν απ' ευθείας ασύρματα, αν και θεωρητικά αυτό είναι δυνατό. Στην πραγματικότητα είναι χωρίς πρακτική αξία, έτσι για την εκπομπή αυτών των σημάτων χρησιμοποιούνται οι ***τεχνικές διαμόρφωσης***.

Και σ' αυτό το σημείο, πρέπει να εξηγήσουμε τι εννοούμε, όταν λέμε διαμόρφωση, για να γίνει αντιληπτή και όσο περισσότερο κατανοητή η μελέτη μας και η υλοποίηση της.
Διαμόρφωση, λοιπόν, είναι η επεξεργασία κατά την οποία ένα σήμα βασικής ζώνης φωνής, εικόνας ή ψηφιακό τροποποιεί ένα άλλο υψηλότερης-συχνότητας σήμα που καλείται φορέας. Η πληροφορία που πρόκειται να σταλεί τοποθετείται πάνω στο φορέα. Οι δύο πιο συνηθισμένοι μέθοδοι διαμόρφωσης είναι:

- Η διαμόρφωση πλάτους AM (Amplitude Modulation) και

- Η διαμόρφωση συχνότητας FM (Frequency Modulation), η οποία μας απασχόλησε στην εργασία μας και γι' αυτό θα αναφερθούμε σ' αυτήν εκτενέστερα παρακάτω.

Περιληπτικά, να πούμε ότι στην AM, το σήμα βασικής ζώνης μεταβάλλει το πλάτος του φορέα υψηλότερης-συχνότητας όπως φαίνεται στο Σχ.1.3(α), ενώ στην FM, το σήμα βασικής ζώνης μεταβάλλει τη συχνότητα του φορέα όπως φαίνεται στο σχήμα Σχ.1.3(b)



Σχήμα 1.3 Τύποι διαμόρφωσης.(α) Διαμόρφωση πλάτους και (b) Διαμόρφωση συχνότητας

Το υψηλότερης-συχνότητας σήμα του φορέα είναι πιο συμβατό με το μέσο μετάδοσης και διαδίδεται μέσω αυτού με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Ακολούθως στο δέκτη ο φορέας αποδιαμορφώνεται για να εξάγουμε το αρχικό σήμα βασικής ζώνης και το εκπεμπόμενο μήνυμα. Η διαδικασία της ***αποδιαμόρφωσης*** λέγεται και αλλιώς ανίχνευση ή φώραση.

1.4 Οι εφαρμογές των τηλεπικοινωνιών και η προσφορά τους στον άνθρωπο.

Σκοπός μας σ' αυτήν την παράγραφο είναι να συνοψίσουμε όλα τα είδη των τηλεπικοινωνιών, όχι μόνο για να δείξουμε το πλάτος του πεδίου τους, αλλά επίσης την τεράστια σπουδαιότητα τους. Το Σχ.1.4 περιέχει όλες τις εφαρμογές των τηλεπικοινωνιών σε μια λίστα που θα μας βοηθήσει να φρεσκάρουμε τη μνήμη μας ή πιθανό να ανακαλύψουμε μερικές νέες εφαρμογές που ίσως δε γνωρίζουμε.

1. **AM και FM ραδιο-εκπομπές**
2. **TV εκπομπές**
3. **Καλωδιακή τηλεόραση**
4. **Τηλεομοιοτυπία: Η μετάδοση τυπωμένης εικόνας μέσω τηλεφωνικών γραμμών (fax)**
5. **Ασύρματος τηλεχειρισμός**
6. **Υπηρεσίες τηλεειδοποίησης: Ένα ράδιο-σύστημα για τηλεειδοποίηση ατόμων, συνήθως σε σύνδεση με την εργασία τους (βομβητές)**
7. **Υπηρεσίες πλοήγησης και εύρεσης-πορείας**
8. **Τηλεμετρία**
9. **Ραδιο-αστρονομία: Ραδιοσήματα και υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπονται από όλα τα ουράνια σώματα. Χρησιμοποιώντας μεγάλες κατευθυντικές κεραίες και ευαίσθητους δέκτες υψηλού κέρδους, τα σήματα αυτά μπορούν να συλλέγουν και να χρησιμοποιηθούν για χαρτογράφηση των θέσεων των άστρων και μελέτη του σύμπαντος.**
10. **Επιτήρηση: Σημαίνει διακριτική παρακολούθηση ή «κατασκόπευση». Ηλεκτρονικές τεχνικές χρησιμοποιούνται ευρέως από αστυνομικές δυνάμεις, στρατό κ.λ.π. για συγκέντρωση πληροφοριών με σκοπό να κερδηθεί κάποιο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα**
11. **Τηλεκείμενο και Δεδομένα-σε-Οθόνη**
12. **Υπηρεσίες μουσικής: Η εκπομπή συνεχούς μουσικού υπόβαθρου για ιατρεία, καταστήματα, ανελκυστήρες, κλπ, από τοπικούς FM ραδιοσταθμούς σε ειδικούς υψηλής-συχνότητας υποφορείς που δε μπορούν να ληφθούν από συμβατικούς FM δέκτες**
13. **Τηλέφωνα**
14. **Ασύρματη επικοινωνία δύο κατευθύνσεων**
15. **Ραντάρ: Μια ειδική μορφή επικοινωνιών που κάνει χρήση ανακλώμενων μικροκυματικών σημάτων για εντοπισμό πλοίων, αεροπλάνων και πυραύλων και για προσδιορισμό της απόστασης , της κατεύθυνσης και της ταχυτητάς τους**
16. **Sonar: Ηχητικός εντοπιστής. Υποθαλάσσιες επικοινωνίες κατά τις οποίες σήματα βασικής ζώνης στις ακουστικές συχνότητες χρησιμοποιούν το νερό σα μέσο μετάδοσης. Τα υποβρύχια χρησιμοποιούν sonar για ανίχνευση της παρουσίας εχθρικών υποβρυχίων.**
17. **Ραδιο-ερασιτεχνία**
18. **Ασύρματη επικοινωνία πολιτών**
19. **Επικοινωνίες δεδομένων**
20. **Τοπικά δίκτυα (LANS): Οι ενσύρματες ή ασύρματες διασυνδέσεις μεταξύ προσωπικών υπολογιστών μέσα σε ένα γραφείο ή κτίριο με σκοπό το διαμοιρασμό όγκου της αποθήκευσης, των περιφερειακών και των δεδομένων.**

Σχήμα 1.4

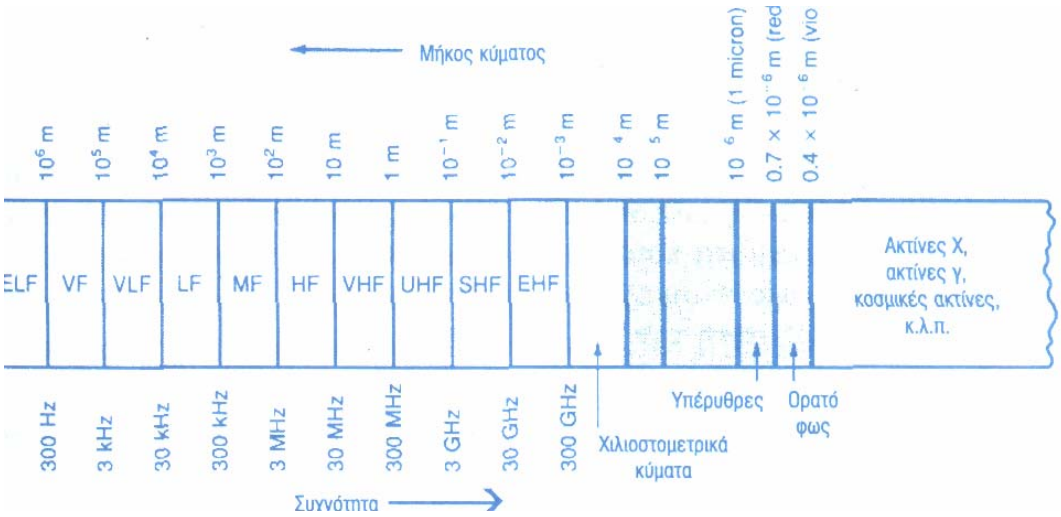
1.5 Αναφορά σε χρήσιμες έννοιες για τις τηλεπικοινωνίες.

Από τα προηγούμενα, έχουμε συμπεράνει ότι η πληροφορία για να μεταδοθεί μετατρέπεται σε ηλεκτρονικά σήματα, που ακτινοβολούνται στο χώρο. Αυτά τα σήματα αποτελούνται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, τα οποία μεταδίδονται μέσω του ελεύθερου χώρου σε μακρινές αποστάσεις. Τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα, αναφέρονται επίσης σαν ***κύματα ράδιο-συχνοτήτων (RF)*** .

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ταλαντώνονται, δηλαδή τα πλάτη του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου μεταβάλλονται με έναν συγκεκριμένο ρυθμό, ημιτονοειδώς. Συνεπώς οι εντάσεις των πεδίων μεταβάλλονται μεταξύ θετικού και αρνητικού μεγίστου σε ένα ορισμένο αριθμό ανά δευτερόλεπτο. Η συχνότητά τους μετριέται σε κύκλους /δευτερόλεπτο (c/s) ή hertz (Hz). Οι ταλαντώσεις αυτές, μπορεί να γίνονται με πολύ χαμηλή συχνότητα ή με εξαιρετικά υψηλή συχνότητα. Αυτή η συνολική περιοχή συχνοτήτων αναφέρεται σαν το ***ηλεκτρομαγνητικό φάσμα*** . Στο κατώτερο άκρο περιλαμβάνει σήματα, όπως αυτά των γραμμών ισχύος (ΔΕΗ) στη συχνότητα των 50 Hz και τα ακουστικά (audio) σήματα. Οι συχνότητες της μεσαίας περιοχής είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες ράδιο-συχνότητες για επικοινωνίες δύο-κατευθύνσεων, τηλεόραση και άλλες εφαρμογές. Εμάς αυτή η περιοχή μας ενδιαφέρει, για τη μελέτη μας και την εφαρμογή όπως θα δούμε παρακάτω. Στο ανώτερο άκρο του φάσματος είναι η υπέρυθρη και ορατή ακτινοβολία. Το Σχ.1.5 δείχνει το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Δίνονται η συχνότητα και το μήκος κύματος. Η σχέση μεταξύ συχνότητας f και μήκους λ είναι:

$$\lambda=300/f$$

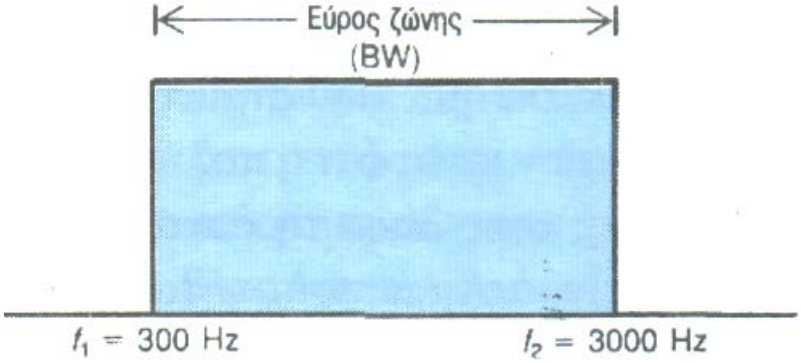
λ σε m και f σε MHz.



Σχήμα 1.5 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες

Μια άλλη βασική έννοια είναι το ***εύρος ζώνης (BW-Bandwidth)*** . Εύρος ζώνης, λοιπόν, είναι το τμήμα του ηλεκτρονικού φάσματος που καταλαμβάνεται από ένα σήμα. Είναι επίσης η περιοχή συχνοτήτων, στην οποία ένα σήμα πληροφορίας, μεταδίδεται ή λειτουργεί ένας δέκτης ή άλλο ηλεκτρονικό κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα, εύρος ζώνης (BW) είναι η διαφορά μεταξύ άνω και κάτω ορίων συχνότητας του σήματος ή της περιοχής λειτουργίας του ηλεκτρονικού κυκλώματος. Το Σχ.1.6 δείχνει το εύρος ζώνης της περιοχής συχνοτήτων της φωνής από 300 έως 3000 Hz. Η ανώτερη συχνότητα είναι η f_2 και η κατώτερη συχνότητα είναι η f_1. Το εύρος ζώνης είναι

$$BW= f_2- f_1=3400-300=3100 \text{ Hz}$$



Σχήμα 1.6 Εύρος ζώνης συχνοτήτων της φωνής

Όταν η πληροφορία διαμορφώνει ένα φορέα κάπου στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα το σήμα που προκύπτει καταλαμβάνει ένα μικρό τμήμα του φάσματος γύρω από τη συχνότητα του φορέα, δηλαδή η επεξεργασία της διαμόρφωσης δημιουργεί άλλα σήματα, που καλούνται ***πλευρικές ζώνες (sidebands)*** , σε συχνότητες, πάνω και κάτω από τη συχνότητα του φορέα κατά ένα ποσό ίσο με τη διαμορφώνουσα συχνότητα. Αν η συχνότητα του φορέα είναι 1000 KHz και η διαμορφώνουσα συχνότητα είναι 5 KHz , τότε οι πλευρικές ζώνες θα παραχθούν στα 1000-5=995 KHz και στα 1000+5=1005 KHz. Με άλλα λόγια, η επεξεργασία της διαμόρφωσης, δημιουργεί άλλα σήματα, τα οποία καταλαμβάνουν φασματικό χώρο. Η περιοχή συχνοτήτων που περιέχει την πληροφορία καλείται εύρος ζώνης. Ο όρος εύρος ζώνης (channel bandwidth) χρησιμοποιείται για να περιγράφει την περιοχή συχνοτήτων που απαιτείται για να μεταδοθεί η επιθυμητή πληροφορία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

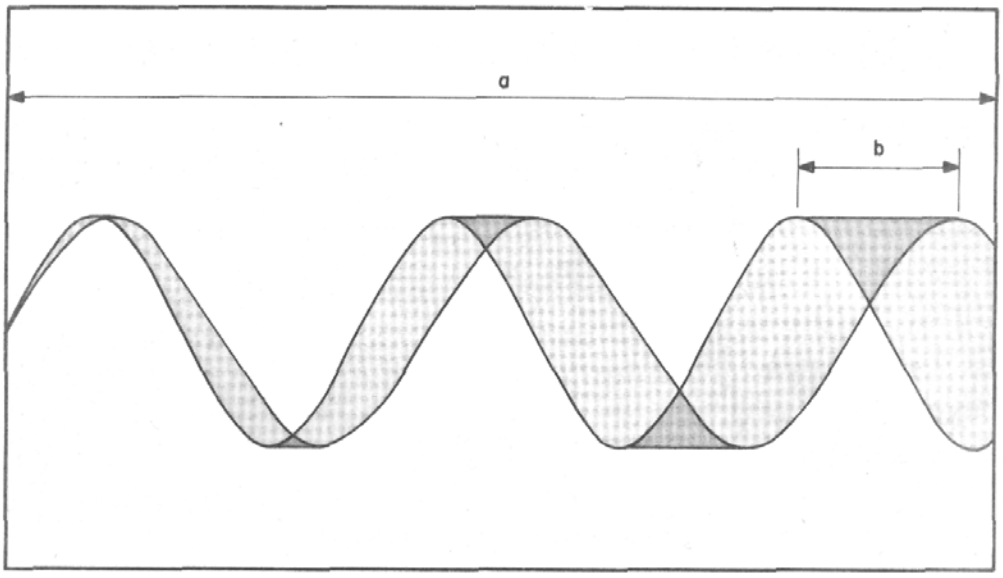
Διαμόρφωση συχνότητας FM

Σκοπός του κεφαλαίου:

1. Να ορίσουμε και να εξηγήσουμε τη διαμόρφωση της συχνότητας FM.
2. Να υπολογίσουμε το δείκτη διαμόρφωσης όταν δίνονται η μέγιστη απόκλιση και η μέγιστη συχνότητα διαμορφώσεως.
3. Να ορίσουμε την προέμφαση και την αποέμφαση.
4. Σύγκριση FM και AM.

2.1 Βασικές αρχές της διαμόρφωσης συχνότητας

Στην FM, το πλάτος του φορέα παραμένει σταθερό, ενώ η συχνότητα του φορέα μεταβάλλεται από το διαμορφώνον σήμα. Καθώς το πλάτος του σήματος πληροφορίας μεταβάλλεται, η συχνότητα του φορέα ολισθαίνει ανάλογα. Καθώς το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος αυξάνεται, η συχνότητα του φορέα ελαττώνεται. Μπορεί να γίνει και το αντίθετο. Ένα ελαττούμενο διαμορφώνον σήμα θα αυξάνει τη συχνότητα του φορέα πάνω από την κεντρική της τιμή, ενώ ένα αυξανόμενο διαμορφώνον σήμα θα ελαττώνει τη συχνότητα του φορέα κάτω από την κεντρική της τιμή. Καθώς το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος μεταβάλλεται, η συχνότητα του φορέα μεταβάλλεται πάνω και κάτω από την κανονική του κεντρική του συχνότητα που έχει όταν είναι αδιαμόρφωτος. Το πόσο της μεταβολής της συχνότητας του φορέα που παράγεται από το διαμορφώνον σήμα είναι γνωστό σαν ***απόκλιση συχνότητας***. Η μέγιστη απόκλιση συχνότητας συμβαίνει στο μέγιστο πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος.
Ένας τρόπος να μετρήσουμε την απόκλιση συχνότητας σ' ένα διαμορφωμένο σήμα είναι ο παρακάτω: μόλις ο παλμογράφος που απεικονίζει το διαμορφωμένο σήμα μας αποκτήσει έναν ολοκληρωμένο αριθμό περιόδων σ' όλη την οθόνη του, μετρούμε τα εξής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1 Μέτρηση της απόκλισης συχνότητας FM σήματος

Η απόκλιση συχνότητας δίνεται λοιπόν από το τύπο:

$$\frac{b}{a}\%$$

Η συχνότητα του διαμορφώνοντος σήματος καθορίζει πόσες φορές ανα δευτερόλεπτο η συχνότητα του φορέα αποκλίνει πάνω και κάτω από την ονομαστική του κεντρική συχνότητα . Αν το διαμορφώνον σήμα είναι ένα ημιτονικό κύμα 100 MHz , τότε η συχνότητα του φορέα θα ολισθαίνει πάνω και κάτω από την κεντρική συχνότητα 100 φορές ανά δευτερόλεπτο. Αυτό καλείται ***ρυθμός απόκλισης συχνότητας***.

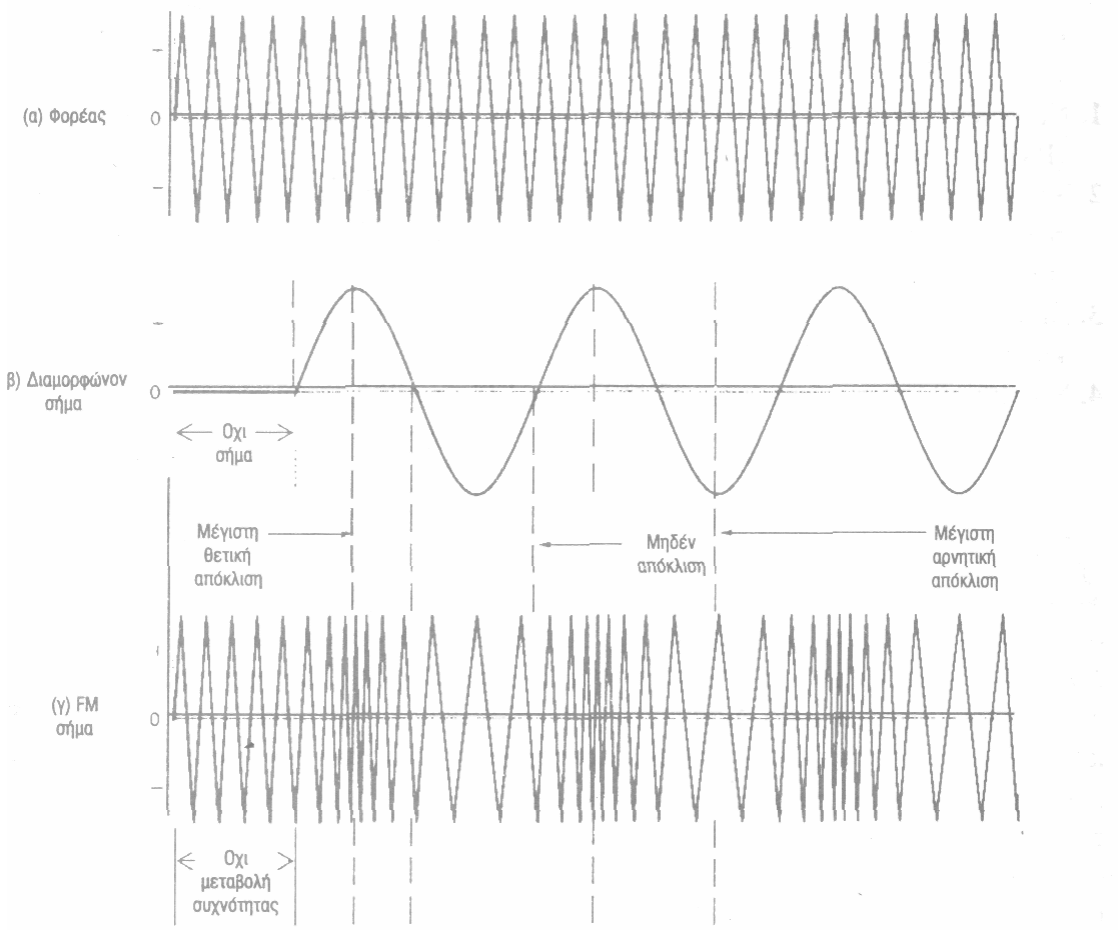
Ένα σήμα FM απεικονίζεται στο σχήμα 2.2(γ). Κανονικά ο φορέας [σχ2.2(α)] είναι ένα ημιτονικό κύμα, αλλά φαίνεται σαν ένα τριγωνικό κύμα εδώ για λόγους ευκολίας της απεικόνισης. Όταν δεν υπάρχει διαμορφώνον σήμα, η συχνότητα του φορέα είναι ένα ημιτονικό κύμα σταθερού πλάτους στην κανονική του κεντρική συχνότητα.

Το διαμορφώνον σήμα πληροφορίας [σχ2.2(β)] είναι ένα χαμηλόσυχνο ημιτονικό κύμα. Όταν το ημιτονικό κύμα αυξάνεται προς τα θετικά, η συχνότητα του φορέα αυξάνεται ανάλογα. Η μεγαλύτερη συχνότητα συμβαίνει στο θετικό μέγιστο πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος. Καθώς το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος ελαττώνεται, η συχνότητα του φορέα έχει μηδέν πλάτος, ο φορέας θα βρίσκεται στο σημείο της κεντρικής του συχνότητας.

Τώρα όταν το διαμορφώνον σήμα πηγαίνει προς τα αρνητικά, η συχνότητα του φορέα θα ελαττώνεται. Η συχνότητα του φορέα θα συνεχίζει να ελαττώνεται έως ότου το πλάτος του διαμορφώνοντος

σήματος φθάσει τη μέγιστη αρνητική του τιμή. Κατόπιν, καθώς το διαμορφώνον σήμα αυξάνεται προς το μηδέν, η συχνότητα θα αυξάνεται πάλι. Να σημειώσουμε στο σχ2.2 (γ) πως το ημιτονικό κύμα του φορέα φαίνεται πρώτα να "συμπιέζεται" και κατόπιν να "απλώνεται" από το διαμορφώνον σήμα.

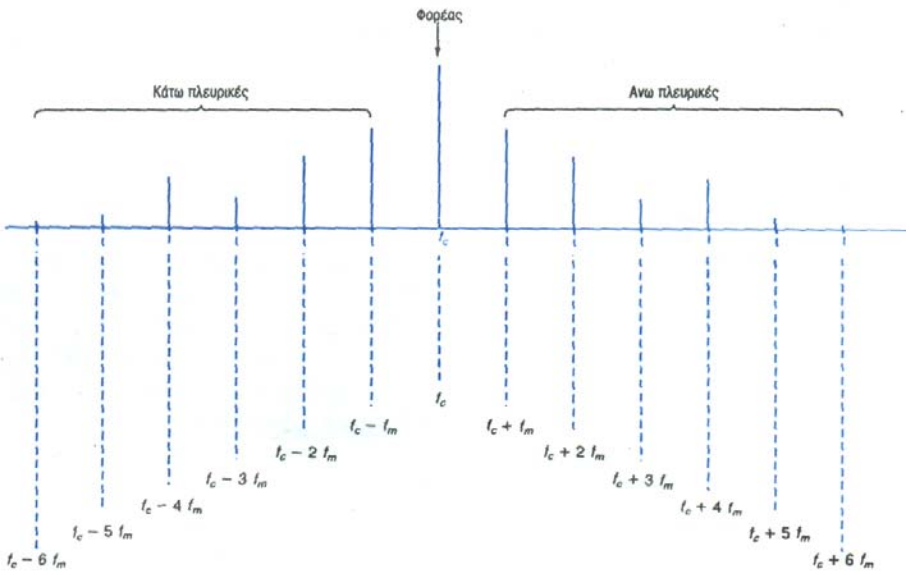
Υποθέτουμε μια συχνότητα φορέα 50 MHz. Αν το μέγιστο πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος προκαλεί μια μέγιστη ολίσθηση συχνότητας 200 KHz, η συχνότητα του φορέα θα αποκλίνει προς τα πάνω μέχρι τα 50.2 MHz και προς τα κάτω μέχρι τα 49.8 MHz. Η συνολική απόκλιση συχνότητας είναι 50.2-49.8=0.4 MHz. Στην πράξη, ωστόσο, η απόκλιση συχνότητας εκφράζεται σαν το ποσό ολίσθησης της συχνότητας του φορέα πάνω ή κάτω από την κεντρική συχνότητα. Συνεπώς, η απόκλιση συχνότητας στο παραπάνω παράδειγμα λέμε ότι είναι ±200 KHz. Αυτό σημαίνει ότι το διαμορφώνον σήμα μεταβάλλει το φορέα πάνω και κάτω από την κεντρική του συχνότητα κατά 200 KHz. Η συχνότητα του διαμορφώνοντος σήματος προσδιορίζει το ρυθμό απόκλισης συχνότητας αλλά δεν επηρεάζει το ποσό της απόκλισης που είναι αυστηρά μια συνάρτηση του πλάτους του διαμορφώνοντος σήματος.



Σχήμα 2.2 Σήματα με διαμόρφωση συχνότητας. Ο φορέας παρίσταται σαν ένα τριγωνικό κύμα για λόγους απλότητας, αλλά στην πράξη είναι ένα ημιτονικό κύμα.

2.2 Πλευρικές ζώνες και ο δείκτης διαμόρφωσης

Οποιαδήποτε επεξεργασία διαμόρφωσης παράγει πλευρικές ζώνες. Στην FM λοιπόν παράγονται άνω (άθροισμα) και κάτω (διαφορά) πλευρικές συχνότητες. Επιπλέον, παράγονται επίσης ένας θεωρητικά άπειρος αριθμός ζευγών άνω και κάτω πλευρικών ζωνών. Το αποτέλεσμα είναι το φάσμα ενός FM σήματος να είναι συνήθως ευρύτερο ένα ισοδύναμο AM σήμα. Μπορεί να δημιουργηθεί ένα ειδικό σήμα στενής ζώνης FM του οποίου το εύρος ζώνης να είναι ελαφρά μόνο ευρύτερο από εκείνο ενός AM σήματος.
Το Σχ.2.3 εικονίζει ένα παράδειγμα του φάσματος ενός τυπικού σήματος FM που παράγεται διαμορφώνοντας ένα φορέα με ένα ημιτονικό κύμα μιας συχνότητας. Σημειώστε ότι οι πλευρικές ζώνες απέχουν από το φορέα f_c και μεταξύ τους κατά μια συχνότητα ίση με τη διαμορφώνουσα συχνότητα f_m .Αν η διαμορφώνουσα συχνότητα είναι 500 Hz το πρώτο ζεύγος των πλευρικών είναι πάνω και κάτω από το φορέα 500 Hz. Το δεύτερο ζεύγος των πλευρικών είναι πάνω και κάτω από το φορέα 2*500Hz=1000Hz ή 1 KHz, κ.ο.κ. Να σημειώσουμε επίσης ότι τα πλάτη των πλευρικών διαφέρουν. Αν κάθε πλευρική υποτίθεται ότι είναι ένα ημιτονικό κύμα με μια συχνότητα και πλάτος όπως σημειώνεται στο Σχ.2.3 και όλα αυτά τα ημιτονικά κύματα προστεθούν, τότε θα δημιουργούνταν το σήμα FM που τα παρήγαγε.



Σχήμα 2.3 Φάσμα συχνοτήτων ενός FM σήματος

-Δείκτης διαμόρφωσης-

Καθώς το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος μεταβάλλεται, θα μεταβάλλεται και η απόκλιση συχνότητας. Ο αριθμός των πλευρικών που παράγονται, το πλάτος του και η απόσταση μεταξύ τους εξαρτώνται από την απόκλιση της συχνότητας και τη διαμορφώνουσα συχνότητα. Να θυμηθούμε ότι ένα σήμα FM έχει σταθερό πλάτος. Αν αυτό το σήμα FM είναι ένα άθροισμα των πλευρικών συχνοτήτων, τότε τα πλάτη των πλευρικών πρέπει να μεταβάλλονται ανάλογα με την απόκλιση συχνότητας και τη διαμορφώνουσα συχνότητα αν το άθροισμα τους παράγει ένα σταθερού πλάτους σήμα FM.
Αν και η FM επεξεργασία παράγει έναν άπειρο αριθμό άνω και κάτω πλευρικών, μόνο εκείνες με τα μεγαλύτερα πλάτη είναι σημαντικές ως προς την πληροφορία. Τυπικά οποιαδήποτε πλευρική της οποίας το πλάτος είναι μικρότερο από 1% του αδιαμόρφωτου φορέα θεωρείται μη σημαντική. Άρα το εύρος ζώνης ενός σήματος FM στενεύει.
Από τα παραπάνω, μπορούμε να εισάγουμε μια άλλη έννοια πολύ σημαντική τον ***δείκτη διαμόρφωσης (β)*** , όπου είναι ο λόγος της απόκλισης της συχνότητας προς τη διαμορφώνουσα συχνότητα

$$\beta = \Delta f / f_m$$

όπου Δf: είναι η απόκλιση της συχνότητας και
f_m: είναι η διαμορφώνουσα συχνότητα

Για παράδειγμα, υποθέτουμε ότι η μέγιστη απόκλιση συχνότητας του φορέα είναι ±25 KHz ενώ η μέγιστη διαμορφώνουσα συχνότητα είναι 10 KHz. Ο δείκτης διαμόρφωσης, επομένως είναι:

$$\beta=25/10=2.5$$

Στις τυπικές εκπομπές FM, η μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση συχνότητας είναι 75 KHz, ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη διαμορφώνουσα συχνότητα είναι 15 KHz.

Άρα $\beta=75/15=5$

Οποτεδήποτε η μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση συχνότητας και η μέγιστη επιτρεπτή διαμορφώνουσα συχνότητα χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του δείκτη διαμόρφωσης, ο β είναι γνωστός σαν ***λόγος απόκλισης*** .

Η γνώση του δείκτη διαμόρφωσης επιτρέπει τον υπολογισμό του αριθμού και των πλατών των σημαντικών πλευρικών. Αυτό γίνεται μέσω μιας πολύπλοκης μαθηματικής επεξεργασίας με τη βοήθεια των συναρτήσεων Bessel, όπου θα προσπαθήσουμε, να το αποδώσουμε όσο πιο απλά γίνεται.

Το να κάνουμε φασματική μελέτη ενός σήματος FM διαμορφωμένου από ένα τυχαίο σήμα μηνύματος είναι αρκετά πολύπλοκη, αν όμως το σήμα που διαμορφώνει είναι ημιτονικό, η μελέτη αυτή είναι σχετικά εύκολη, ενώ παράλληλα μπορούμε να γενικεύσουμε τα συμπερασματά μας.

Η μαθηματική έκφραση ενός διαμορφωμένου με ένα τόνο σήματος FM δίνεται από την εξής σχέση:

$$\mathbf{V_{FM}(t) = V_c\, \sigma\upsilon\nu\, [\omega_c t + \beta\eta\mu\, \omega_m t]} \qquad (2.1)$$

Χρησιμοποιώντας την τριγωνομετρική ταυτότητα του αθροίσματος συνημιτόνου: συν(α+β)=συνασυνβ-ημαημβ η προηγούμενη σχέση (2.1) γίνεται:

$$\mathbf{V_{FM}(t) = V_c\, [\, \sigma\upsilon\nu\omega_c t * \sigma\upsilon\nu(\beta\eta\mu\omega_m t) - \eta\mu\omega_c t\eta\mu(\beta\eta\mu\omega_m t)]} \qquad (2.2)$$

Το δεύτερο μέλος της εξίσωσης (2.2) μπορεί να παρασταθεί με μια σειρά FOURIER, η οποία μας επιτρέπει να εκφράσουμε το σήμα FM ως εξής:

$$\mathbf{V_{FM}(t) = V_c\, \{j_0(\beta)\, \sigma\upsilon\nu\omega_c t - j_1(\beta)\, [\sigma\upsilon\nu(\omega_c-\omega_m)t - \sigma\upsilon\nu(\omega_c+\omega_m)t] +}$$

$$\mathbf{+ j_2(\beta)\, [\sigma\upsilon\nu(\omega_c-2\omega_m)t + \sigma\upsilon\nu(\omega_c+2\omega_m)t] -}$$

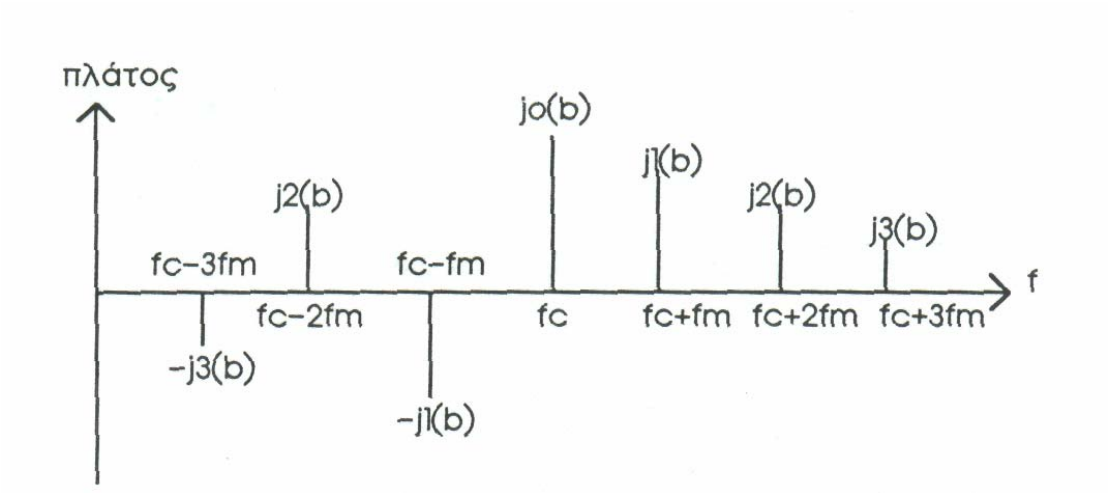
$$\mathbf{- j_3(\beta)\, [\sigma\upsilon\nu(\omega_c-3\omega_m)t - \sigma\upsilon\nu(\omega_c+3\omega_m)t \ldots\}} \qquad (2.3)$$

όπου $j_0(\beta)$, $j_1(\beta)$, $j_2(\beta)$, …κ.λ.π. είναι σταθερές των οποίων η τιμή εξαρτάται μόνον από το β και είναι γνωστές ως συναρτήσεις Bessel του πρώτου είδους. Οι τιμές των συναρτήσεων αυτών βρίσκονται εύκολα από σχετικούς πίνακες ή από ανάλογα διαγράμματα. Στον πίνακα 2.1 φαίνονται μερικές τιμές των συναρτήσεων Bessel.

n \ β	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	.7652	.2239	−.2601	−.3971	−.1776	.1506	.3001	.1717	−.09033	−.2459
1	.4401	.5767	.3391	−.06604	−.3276	−.2767	−.001653	.2346	.2453	.04347
2	.1149	.3528	.4861	.3641	.04657	−.2429	−.3014	−.1130	.1448	.2546
3	.01956	.1289	.3091	.4302	.3648	.1148	−.1676	−.2911	−.1809	.05838
4	.002477	.03400	.1320	.2811	.3812	.3576	.1578	−.1054	−.2655	−.2196
5		.007040	.04303	.1321	.2611	.3621	.3479	.1858	−.05504	−.2341
6		.001202	.01139	.04909	.1310	.2458	.3392	.3376	.2043	−.01445
7			.002547	.01518	.05338	.1296	.2336	.3206	.3275	.2167
8				.004029	.01841	.05653	.1280	.2235	.3051	.3179
9					.005520	.02117	.05892	.1263	.2149	.2919
10					.001408	.006964	.02354	.06077	.1247	.2075
11						.002048	.008335	.02560	.06222	.1231
12							.002656	.009624	.02739	.06337
13								.003275	.01083	.02897
14								.001019	.003895	.01198
15									.001286	.004508
16										.001567

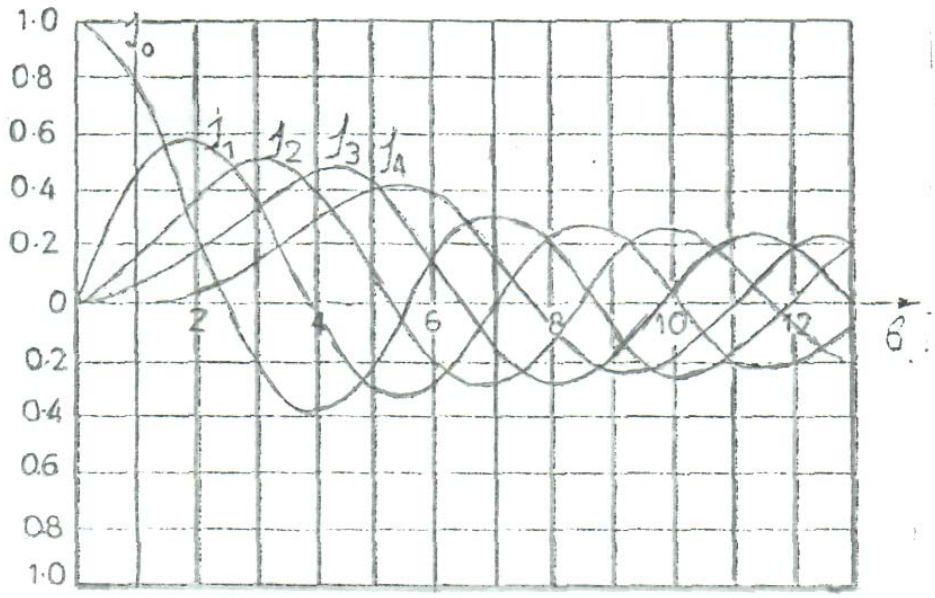
Πίνακας 2.1 Ένας πίνακας που δείχνει τα πλάτη του φορέα και των πλευρικών ζωνών για διαφορετικούς δείκτες διαμόρφωσης των FM σημάτων. Βασίζεται στις συναρτήσεις Bessel.

Εξετάζοντας τη σχέση (2.3) βλέπουμε ότι το φάσμα FM συγκροτείται από μια συνιστώσα φέροντος και από άπειρες πλευρικές συνιστώσες στις συχνότητες $f_c \pm nf_m$.
Η απόσταση μεταξύ δύο οποιονδήποτε διαδοχικών συνιστωσών είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του σήματος που διαμορφώνει, όπως διαπιστώνεται εύκολα από το σχήμα 2.4 που παριστάνεται ένα τυπικό φάσμα FM.



Σχήμα 2.4 Φάσμα ενός σήματος διαμορφωμένου από ημιτονικό σήμα

Γενικά δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε, πώς να κάνουμε τον υπολογισμό αυτό, καθώς οι συναρτήσεις Bessel έχουν υπολογισθεί και ταξινομηθεί για μια ευρεία περιοχή δεικτών διαμόρφωσης, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 2.1. Η αριστερή στήλη δίνει το δείκτη διαμόρφωσης, οι υπόλοιπες στήλες δίνουν τα σχετικά πλάτη του φορέα και των διαφόρων ζευγών των πλευρικών. Οποιαδήποτε πλευρική με ένα σχετικό πλάτος φορέα μικρότερο από 1% (0.01) έχει παραλειφθεί.
Παρατηρώντας, επίσης τον πίνακα 2.1, βλέπουμε ότι μερικά από τα πλάτη του φορέα και των πλευρικών έχουν αρνητικό πρόσημο. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα που αντιπροσωπεύεται από αυτό το πλάτος είναι απλώς ολισθημένο σε φάση κατά 180° (αναστροφή φάσης).
Με τη βοήθεια του παρακάτω σχ2.5 και του προηγούμενου πίνακα 2.1, μπορούμε να εξάγουμε κάποιες σημαντικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το φάσμα ενός σήματος FM , που προκύπτουν από τις πέντε πρώτες συναρτήσεις Bessel.

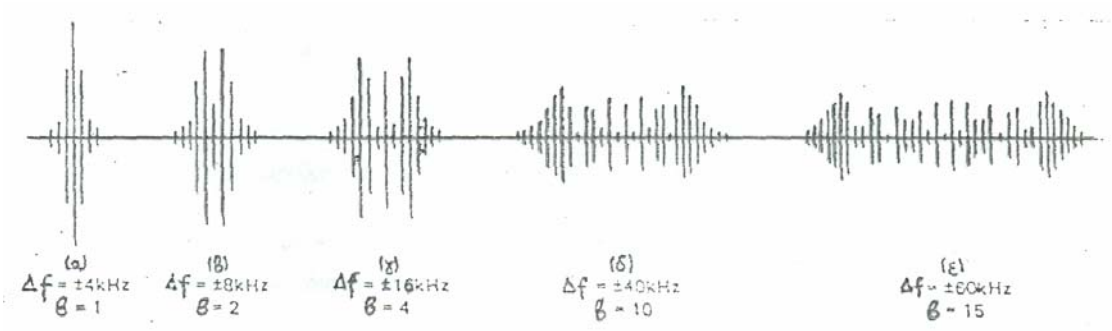


Σχήμα 2.5 Συναρτήσεις Bessel

1. Το σχετικό πλάτος της φέρουσας $J_0(\beta)$ μεταβάλλεται με το δείκτη διαμόρφωσης ή αλλιώς εξαρτάται από το σήμα που διαμορφώνει, αντίθετα με ότι συμβαίνει στη διαμόρφωση AM ,όπου το πλάτος της φέρουσας συνιστώσας δεν εξαρτάται από το σήμα του μηνύματος.
2. Ο αριθμός των φασματικών συνιστωσών με υπολογίσιμο σχετικό πλάτος είναι μια συνάρτηση του β. Όταν β»1 υπάρχουν πολλές πλευρικές συνιστώσες που συγκροτούν ένα φάσμα τελείως διαφορετικό από ότι της διαμόρφωσης AM. Όταν όμως β«1, μόνο οι j_0 και j_1, είναι αξιόλογες και τι φάσμα θα αποτελείται από τη φέρουσα και δύο πλευρικές συνιστώσες όπως ακριβώς και στη διαμόρφωση AM, μόνο που η κάτω πλευρική είναι αντεστραμμένη.

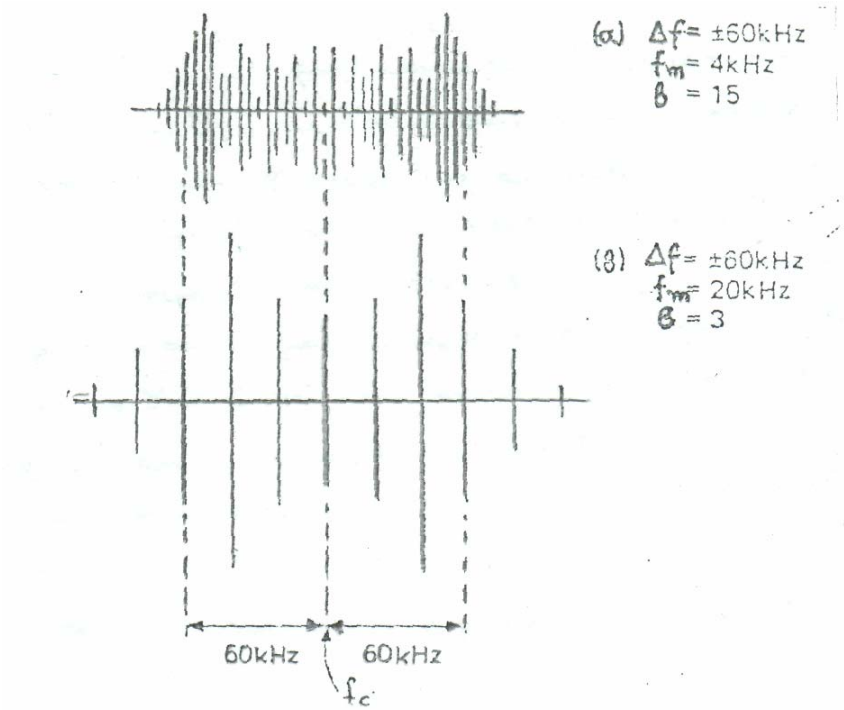
-Επιπλέον συμπεράσματα που μπορούμε να διεξάγουμε-

Ο δείκτης διαμόρφωσης β στην FM μπορεί να αλλάζει μεταβάλλοντας, είτε τη μέγιστη απόκλιση συχνότητας, είτε τη συχνότητα του σήματος που διαμορφώνει. Αν κρατήσουμε σταθερή τη συχνότητα f_m λ.χ. με 4 KHz και μεταβάλλουμε το δείκτη διαμόρφωσης μεταβάλλοντας μόνο την απόκλιση παίρνουμε φάσματα του σχ. 2.6



Σχήμα 2.6 Μεταβολή φάσματος FM για διάφορες τιμές του β, f_m=σταθερό

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνουμε το β αυξάνει το εύρος ζώνης του φάσματος και αυτό γιατί η απόσταση των συνιστωσών παραμένει σταθερή (f_m σταθερό), ενώ αυξάνει το πλήθος τους. Στα πρακτικά συστήματα η Δf κρατείται συνήθως σταθερή, οπότε το β μειώνεται καθώς αυξάνει η συχνότητα του μηνύματος. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα χαμηλών συχνοτήτων παράγουν διαμορφωμένα κύματα με περισσότερες αξιόλογες φασματικές συνιστώσες από ότι τα σήματα υψηλότερων συχνοτήτων, όπως φαίνεται στο σχ 2.7



Σχήμα 2.7 Μεταβολή του φάσματος FM για διάφορες τιμές του β, Δf=σταθερό

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις τα αντίστοιχα φάσματα έχουν το ίδιο εύρος.

-Εύρος ζώνης των σημάτων FM-

Είδαμε ότι γενικά, το φάσμα ενός σήματος FM έχει άπειρες πλευρικές συνιστώσες, ώστε το εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης ενός τέτοιου διαμορφωμένου σήματος φαίνεται ότι πρέπει να είναι άπειρο σε έκταση. Ευτυχώς όμως που τα πράγματα στην πράξη δεν συμβαίνουν ακριβώς έτσι.

Πραγματικά, έχει διαπιστωθεί ότι για οποιαδήποτε τιμή του δείκτη διαμόρφωσης ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό της ισχύος του FM είναι συγκεντρωμένο σε μια πεπερασμένη περιοχή του φάσματος. Έτσι αν περιορίσουμε το εύρος εκπομπής στα όρια της περιοχής αυτής αναμένουμε ότι η παραμόρφωση του σήματος απόδιαμόρφωσης να βρίσκεται μέσα σε ανεκτά όρια. Πειραματικά δεδομένα στην κατεύθυνση αυτή δείχνουν ότι η παραμόρφωση του σήματος είναι πραγματικά αμελητέα αν καθορίσουμε το εύρος εκπομπής έτσι ώστε να περιλαμβάνει τουλάχιστον το 98% της ισχύος του σήματος FM.

Μπορούμε να αποδείξουμε ότι η μέση ισχύς του FM είναι ίση με:

$$\mathbf{P_{FM}=\tfrac{1}{2}(j_0^2+2\sum j_n^2)=\tfrac{1}{2}} \qquad (2.4)$$

Στη περίπτωση που το πλάτος του φέροντος είναι ίσο με τη μονάδα. Η σχέση (2.4) μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε για κάθε β το πλήθος των j_n ώστε να ικανοποιείται ο προηγούμενος εμπειρικός κανόνας. Αν λ.χ. β=2 τότε η ισχύς που περιλαμβάνεται στους όρους n=0,1,2 και 3 είναι με βάση τη σχέση (2.4):

$$\mathbf{P=\tfrac{1}{2}j_0^2(2)+j_1^2(2)+j_2^2(2)+j_3^2(2)} \qquad (2.5)$$

Και με αντικατάσταση των τιμών $j_n(2)$ από τον πίνακα 2.1 έχουμε :

$$\mathbf{P\approx 0.5} \qquad (2.6)$$

Το άθροισμα 0.5 είναι το 99.6% της ισχύος του σήματος FM που είναι ίσο με το ½. Οι υπογραμμισμένες τιμές του πίνακα 2.1 δείχνουν για κάθε τιμή β τις τιμές του n για τις οποίες $P_{FM}\geq 0.98$. Να σημειώσουμε ότι οι υπογραμμισμένες αυτές τιμές εμφανίζονται αμέσως μετά την τιμή:

$$\mathbf{n=\beta+1} \qquad (2.7)$$

Έτσι αν γνωρίζουμε το δείκτη διαμόρφωσης μπορούμε να προσδιορίσουμε το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου σήματος ως εξής:

$$BW \approx (f_c+nf_m)-(f_c-nf_m)=2nf_m=2(\beta+1)f_m \qquad (2.8)$$

Στην περίπτωση που η διαμόρφωση του φέροντος γίνεται από ένα σήμα περιορισμένης ζώνης συχνοτήτων f_x τότε στη θέση του β στην εξίσωση (2.8) πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το λόγο απόκλισης οπότε έχουμε:

$$BW=2(\Delta f+f_x) \qquad (2.9)$$

Όπου Δf είναι η μέγιστη απόκλιση συχνότητας. Δηλαδή με λόγια το εύρος ζώνης του FM είναι ίσο με το διπλάσιο του αθροίσματος του εύρους ζώνης του σήματος που διαμορφώνει και της μέγιστης απόκλισης συχνότητας. Ο κανόνας αυτός για το εύρος ζώνης είναι γνωστός ως κανόνας του Carson και έχει βρεθεί ότι, αν ένα σύστημα έχει αυτό το εύρος ζώνης (κανόνας του Carson), τότε θα διέρχεται αρκετή ισχύς από τις πλευρικές ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης ευκρίνεια του σήματος πληροφορίας.
Η προσεγγιστική εξίσωση (2.8) για το εύρος ζώνης των σημάτων FM, την οποία προσδιορίσαμε με βάση τις υπογραμμισμένες τιμές του πίνακα 2.1 ισχύει εξ'ίσου καλά και για τις τιμές του β πολύ μικρότερες της μονάδας που δεν περιλαμβάνονται σε αυτό τον πίνακα. Πράγματι για β«1 μόνο οι συναρτήσεις j0 και j1 είναι σημαντικές όπως διαπιστώνεται εύκολα από το σχ 2.5 οπότε η εξίσωση 2.3 του FM σήματος γράφεται:

$$V_{FM}= V_C\{J_0(\beta)\text{συν}\omega_c t-j_1(\beta)[\text{συν}(\omega_c-\omega_m)t-\text{συν}\,(\omega_c+\omega_m)t]\} \qquad (2.10)$$

Το εύρος ζώνης όμως του FM το οποίο ορίζεται από τη προηγούμενη εξίσωση είναι ακριβώς εκείνο που προκύπτει από την εμπειρική σχέση (2.8) με β«1 (BW=2f m). Τέτοια σήματα FM για τα οποία β«1 λέγονται ***στενής ζώνης (NBFM:narrow band FM)*** και το εύρος ζώνης τους είναι το ίδιο με το εύρος ζώνης του σήματος DSB.
Μια δεύτερη κατηγορία σημάτων FM που λέγονται ***ευρείας ζώνης (WBFM:wide band FM)*** αντιστοιχούν σε τιμές β»1 που το εύρος ζώνης τους είναι περίπου 2Δf όπως προκύπτει από τη σχέση (2.8).
Το NBFM σε αντίθεση με το WBFM δεν παρουσιάζει σοβαρά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα συστήματα γραμμικής διαμόρφωσης που έχουν το ίδιο με αυτό εύρος ζώνης. Γι'αυτό και δε χρησιμοποιείται συνήθως για μετάδοση. Χρησιμοποιείται όμως ως ενδιάμεσο στάδιο παραγωγής σημάτων WBFM.
Το ακουστικό σήμα στις τηλεοπτικές εκπομπές εκπέμπεται με FM. Η μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση είναι 25KHz, και η μέγιστη διαμορφώνουσα συχνότητα είναι 15 KHz. Αυτό παράγει ένα λόγο απόκλισης:

$$\delta = 25/15=1.6666$$

Στις τυπικές κινητές ραδιοεπικοινωνίες δύο κατευθύνσεων χρησιμοποιώντας FM, μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση είναι συνήθως 5 KHz. Η ανώτερη διαμορφώνουσα συχνότητα είναι συνήθως μέχρι 2.5 KHz που είναι αρκετά υψηλή συχνότητα για εκπομπή καταληπτής φωνής. Αυτό παράγει ένα λόγο απόκλισης:

$$\delta = 5/2.5=2$$

Η μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σ' ένα λόγο με την πραγματική απόκλιση φορέα για να παραχθεί ένα % ποσοστό διαμόρφωσης FM. Υπενθυμίζεται ότι στις ραδιοφωνικές εκπομπές FM η μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση είναι 75 KHz. Αν το διαμορφώνον σήμα παράγει μια μέγιστη απόκλιση μόνο 60 KHz, τότε το % ποσοστό διαμόρφωσης είναι:

FM% διαμόρφωση =

$$= \frac{\text{πραγματική απόκλιση φορέα}}{\text{μέγιστη απόκλιση φορέα}} \times 100$$

$$= \frac{60}{75} \times 100 = 80\%$$

Όταν είναι καθορισμένες οι μέγιστες αποκλίσεις, είναι σημαντικό ότι η % διαμόρφωση κρατείται μικρότερη από 100%. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι οι FM σταθμοί λειτουργούν σε προκαθορισμένα κανάλια συχνοτήτων, που είναι δίπλα σε κανάλια άλλων σταθμών. Αν η απόκλιση επιτρέπεται να ξεπεράσει τη μέγιστη τιμή της, ένας μεγαλύτερος αριθμός ζευγών πλευρικών ζωνών θα παραχθεί και το εύρος ζώνης του σήματος μπορεί να υπερβεί την κανονική του τιμή. Αυτό μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητη παρεμβολή γειτονικών καναλιών.

2.3 Η FM σε σύγκριση με την AM

Γενικά, η FM θεωρείται ανώτερη από την AM. Αν και τα δύο σήματα διαμόρφωσης είναι κατάλληλα για μετάδοση πληροφορίας από ένα τόπο σ' έναν άλλο και έχουν ισοδύναμη πιστότητα και ευκρίνεια, η FM τυπικά προσφέρει μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την AM. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της FM συγκρινόμενη με την AM φαίνονται συγκεντρωμένα στον πίνακα του σχ. 2.8. Ας δούμε το καθένα από αυτά με περισσότερες λεπτομέρειες.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Καλύτερη συμπεριφορά στο θόρυβο	1. Ανάγκη περισσότερου φασματικού χώρου
2. Απόρριψη των παρεμβαλλόμενων σημάτων λόγω του «φαινομένου σύλληψης»	2. Πιο σύνθετα και ακριβά κυκλώματα
3. Καλύτερη απόδοση πομπού	

Σχήμα 2.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της FM σε σύγκριση με την AM

1. Το κύριο πλεονέκτημα της FM ως προς την AM είναι η καλή συμπεριφορά της στο θόρυβο. Θόρυβος είναι η παρεμβολή σ' ένα σήμα που δημιουργείται από αστραπές, κινητήρες, συστήματα ανάφλεξης αυτοκινήτων και οποιαδήποτε μεταγωγή σε γραμμές ισχύος που παράγει φαινόμενα μετάβασης. Ο θόρυβος αυτού του είδους είναι τυπικά στενές ακίδες τάσης με πολύ υψηλόσυχνο περιεχόμενο. Προστίθενται σ' ένα σήμα και παρεμβάλλουν με αυτό. Αν τα σήματα θορύβου είναι αρκετά ισχυρά, μπορούν να επικαλύψουν εντελώς το σήμα πληροφορίας.
Ο θόρυβος είναι ουσιαστικά διακυμάνσεις πλάτους. Ένα σήμα FM, από την άλλη μεριά, έχει ένα σταθερό πλάτος φορέα. Λόγω αυτού, οι FM δέκτες περιέχουν κυκλώματα περιοριστών που εσκεμμένα περιορίζουν το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος. Οποιεσδήποτε διακυμάνσεις πλάτους του σήματος FM ουσιαστικά «ψαλιδίζονται». Αυτό δεν επηρεάζει το πληροφοριακό περιεχόμενο του σήματος FM εφόσον αυτό περιέχεται αποκλειστικά μέσα στις μεταβολές συχνότητας του φορέα. Λόγω της λειτουργίας του ψαλιδισμού των κυκλωμάτων περιορισμού, ο θόρυβος εξαλείφεται σχεδόν τελείως.

2 Ένα άλλο κύριο πλεονέκτημα της FM είναι ότι τα σήματα παρεμβολής της ίδιας συχνότητας ουσιαστικά εξαλείφονται. Λόγω των περιοριστών που βρίσκονται στους δέκτες FM, ένα περίεργο φαινόμενο λαμβάνει χώρα δύο ή περισσότερα σήματα FM εμφανίζονται ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα. Αν το σήμα του ενός είναι πάνω από το διπλάσιο του πλάτους του άλλου, το ισχυρότερο σήμα θα «συλλάβει» το κανάλι και θα εξαλείψει εντελώς το ασθενέστερο παρεμβάλλον σήμα. Αυτό είναι γνωστό ως ***φαινόμενο σύλληψης*** στην FM. Όταν δύο AM σήματα καταλαμβάνουν την ίδια συχνότητα, θα ακούγονται και τα δύο σήματα γενικά και άσχετα από τις ισχείς τους. Όταν ένα σήμα AM είναι σημαντικά ισχυρότερο από το άλλο, φυσιολογικά το ισχυρότερο σήμα θα είναι καταληπτό, όμως, αν και το ασθενέστερο σήμα δε θα είναι καταληπτό, θα ακούγεται ακόμη στο υπόβαθρο. Όταν οι ισχείς των AM σημάτων είναι περίπου ίδιες, θα παρεμβάλλουν μεταξύ τους με

αποτέλεσμα να μην ακούγεται καθαρά κανένα από τα δύο. Στην FM το φαινόμενο σύλληψης επιτρέπει την υπερίσχυση του ισχυρότερου σήματος ενώ εξαλείφεται το ασθενέστερο. Ωστόσο, όταν οι ισχύεις των δύο FM σημάτων είναι περίπου ίδιες, το φαινόμενο σύλληψης θα έχει σαν αποτέλεσμα τα σήματα να υπερισχύσουν εναλλακτικά επάνω στη συχνότητα. Για κάποιο χρόνο το ένα σήμα θα είναι ισχυρότερο από το άλλο και θα καταλαμβάνει το κανάλι. Για κάποιο άλλο χρόνο οι ισχείς των σημάτων θα αναστρέφονται και το άλλο σήμα θα καταλαμβάνει το κανάλι. Όταν ακούμε FM ραδιόφωνο στο αυτοκίνητό μας ενώ οδηγούμε στην εθνική οδό. Μπορεί να ακούμε έναν ισχυρό σταθμό σε μια συγκεκριμένη συχνότητα αλλά καθώς οδηγούμε απομακρυνόμαστε από αυτό το σταθμό. Σε κάποιο σημείο, μπορεί να αρχίσουμε να λαμβάνουμε το σήμα από έναν άλλο σταθμό στην ίδια συχνότητα. Όταν τα δύο σήματα έχουν περίπου το ίδιο πλάτος, θα ακούμε πότε τον ένα σταθμό και πότε τον άλλο να υπερισχύει καθώς τα πλάτη των σημάτων μεταβάλλονται ενώ οδηγούμε. Ωστόσο σε κάποιο σημείο το ισχυρότερο σήμα θα υπερισχύει οριστικά. Από τη στιγμή όμως που το ισχυρό σήμα υπερισχύει το ασθενέστερο δεν ακούγεται καθόλου στο κανάλι.
Παρά το γεγονός ότι η FM έχει καλύτερη συμπεριφορά στο θόρυβο, ο θόρυβος ακόμη παρεμβάλλει σ' ένα σήμα FM. Αυτό ισχύει για υψηλόσυχνες συνιστώσες στο διαμορφώνον σήμα. Ο θόρυβος περιέχει ένα αξιοσημείωτο αριθμό αρμονικών και άλλων υψηλόσυχνων συνιστωσών, οι οποίες μπορούν μερικές φορές να έχουν μεγαλύτερο πλάτος από το υψηλόσυχνο περιεχόμενο του διαμορφώνοντος σήματος. Αυτό προκαλεί έναν τύπο συχνοτικής παραμόρφωσης που μπορεί να κάνει το σήμα μη καταληπτό.
Το περιεχόμενο ενός διαμορφώνοντος σήματος, ειδικά της φωνής, είναι στις χαμηλότερες συχνότητες. Στα επικοινωνιακά συστήματα φωνής, το εύρος ζώνης του διαμορφώνοντος σήματος εσκεμμένα περιορίζεται σ' ένα μέγιστο περίπου 3 KHz. Η φωνή εξακολουθεί να είναι κατανοητήπαρά τους περιορισμούς στο εύρος ζώνης. Τελικά τα τηλέφωνα λειτουργούν μέχρι τα 3 KHz και δίνουν καλή ποιότητα φωνής.

Ωστόσο, η μουσική θα παραμορφώνονταν σοβαρά από ένα τέτοιο στενό εύρος ζώνης επειδή περιέχει υψηλόσυχνες συνιστώσες αναγκαίες για υψηλή πιστότητα.

Για να ξεπερασθεί αυτό το πρόβλημα, τα περισσότερα FM συστήματα χρησιμοποιούν μια τεχνική γνωστή σαν ***προ-έμφαση*** που βοηθά στην αντιστάθμιση της παρεμβολής του υψηλόσυχνου θορύβου. Στον πομπό, το διαμορφώνον σήμα διέρχεται ενός απλού κυκλώματος το οποίο ενισχύει τις υψηλόσυχνες συνιστώσες περισσότερο από τις χαμηλόσυχνες

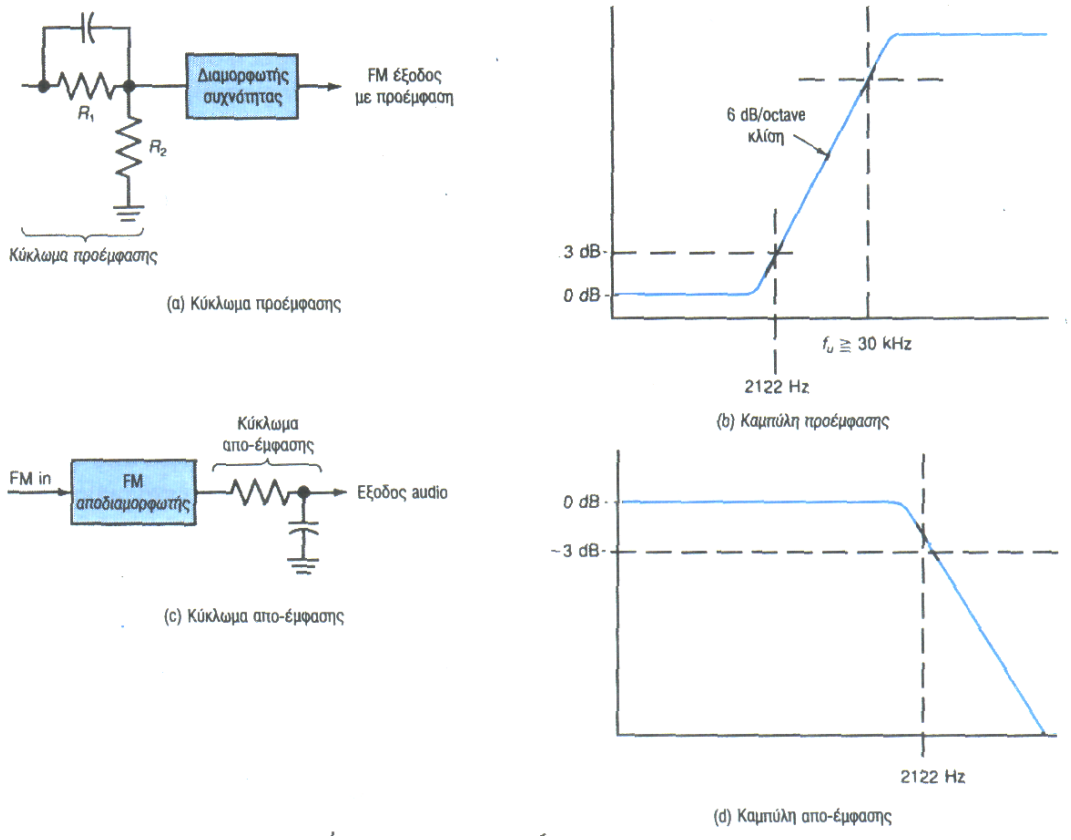
συνιστώσες. Η πιο απλή μορφή ενός τέτοιου κυκλώματος είναι ένα απλό υψηλοπερατό φίλτρο που φαίνεται στο σχ 2.9(α). Οι προδιαγραφές υπαγορεύουν μια σταθερα χρόνου t ίση με 75μs όπου $t=R_1C$. Ένα τέτοιο κύκλωμα έχει μια συχνότητα αποκοπής fco ίση με 2122 Hz. Αυτό σημαίνει ότι συχνότητες μεγαλύτερες από 2122 Hz θα εμπλουτίζονται γραμμικά. Το πλάτος εξόδου αυξάνεται με τη συχνότητα με ένα ρυθμό 6dB ανά οκτάβα. Η καμπύλη προ-έμφασης φαίνεται στο σχ 2.9(b). Αυτό το κύκλωμα προ-έμφασης αυξάνει το ενεργειακό περιεχόμενο των σημάτων υψηλότερων συχνοτήτων έτσι ώστε να τα τείνουν να γίνουν ισχυρότερες από τις υψηλόσυχνες συνιστώσες του θορύβου. Αυτό βελτιώνει το λόγο σήματος προς θόρυβο και αυξάνει την ευκρίνεια και την πιστότητα.

Το κύκλωμα προ-έμφασης έχει επίσης μια άνω οριακή συχνότητα fu όπου η ενίσχυση του σήματος σταματά [σχ 2.9(b)]. Αυτή η άνω οριακή συχνότητα υπολογίζεται από την έκφραση:

$$fu = R_1 + \frac{R_2}{2\pi R_1 R_2 C}$$

Συνήθως τίθεται σε μια πολύ μεγάλη τιμή πέραν της ακουστικής περιοχής. Μια fu μεγαλύτερη από 300 KHz είναι τυπική.

Για να επιστρέψει η συχνοτική απόκριση στην κανονική της στάθμη, χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα από-έμφασης στο δέκτη. Αυτό είναι ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με μια σταθερά χρόνου 75μs σχ 2.9(c) Έχει μια συχνότητα αποκοπής 2122 Hz και προκαλεί στα σήματα πάνω απ' αυτή τη συχνότητα μια εξασθένηση με ρυθμό 6 dB ανά οκτάβα. Η καμπύλη απόκρισης φαίνεται στο σχ 2.9(d).



Σχήμα 2.9 Προέμφαση και αποέμφαση

Το αποτέλεσμα είναι, η προ-έμφαση στον πομπό να αντισταθμίζεται ακριβώς από το κύκλωμα της από-έμφασης στο δέκτη, παρέχοντας μια κανονική συχνοτική απόκριση. Το συνδυασμένο αποτέλεσμα της προ-έμφασης και από-έμφασης είναι η αύξηση των υψηλόσυχνων συνιστωσών κατά της διάρκειας της εκπομπής έτσι ώστε να γίνονται ισχυρότερες και να μη καλύπτονται από το θόρυβο.

3. Ένα άλλο πλεονέκτημα της FM ως προς την AM είναι η απόδοση μετάδοσης. Υπενθυμίζουμε ότι για να διατηρηθεί η AM πληροφορία πρέπει να χρησιμοποιούνται γραμμικοί ενισχυτές.
Ένα σήμα FM έχει σταθερό πλάτος και επομένως, δεν είναι απαραίτητη η χρήση γραμμικών ενισχυτών για αύξηση της στάθμης ισχύος του. Πράγματι, τα σήματα FM παράγονται πάντα σε μια χαμηλότερη στάθμη και κατόπιν ενισχύονται με μια σειρά ενισχυτών C τάξης για αύξηση της ισχύος τους. Το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερη χρήση της διαθέσιμης ισχύος επειδή οι ενισχυτές C τάξης είναι πολύ πιο αποδοτικοί.

Αν και τα πλεονεκτήματα της FM είναι περισσότερα από τα μειονεκτηματά της, αυτά τα μειονεκτήματα μπορούν να είναι κρίσιμα σε κάποιες εφαρμογές. ***Ίσως το μεγαλύτερο μειονέκτημα της FM είναι ότι απλώς χρησιμοποιεί τόσο πολύ φασματικό χώρο***. Το εύρος ζώνης ενός σήματος FM είναι σημαντικά μεγαλύτερο από ενός AM σήματος που εκπέμπει την ίδια πληροφορία. Εφόσον η FM καταλαμβάνει ένα τόσο μεγάλο εύρος ζώνης, τυπικά χρησιμοποιείται στις πολύ υψηλές συχνότητες, σπάνια χρησιμοποιείται σε επικοινωνίες με συχνότητες κάτω των 30 MHz. Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή επικοινωνίας είναι πιο περιορισμένη.
Το άλλο κύριο μειονέκτημα της FM είναι ότι τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση είναι πολύ πιο σύνθετα από εκείνα της AM. Τυπικά τα κυκλώματα είναι πιο κρίσιμα και πιο δύσκολα στη σχεδίαση και προσαρμογή από τα απλά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση πλάτους. Αυτό επίσης κάνει το κόστος των FM κυκλωμάτων μεγαλύτερο των AM. Τα πλεονεκτήματα συνήθως αντισταθμίζουν το μεγάλο κόστος και την πολυπλοκότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Κυκλώματα διαμόρφωσης-αποδιαμόρφωσης συχνότητας.

3.1 Εισαγωγικά

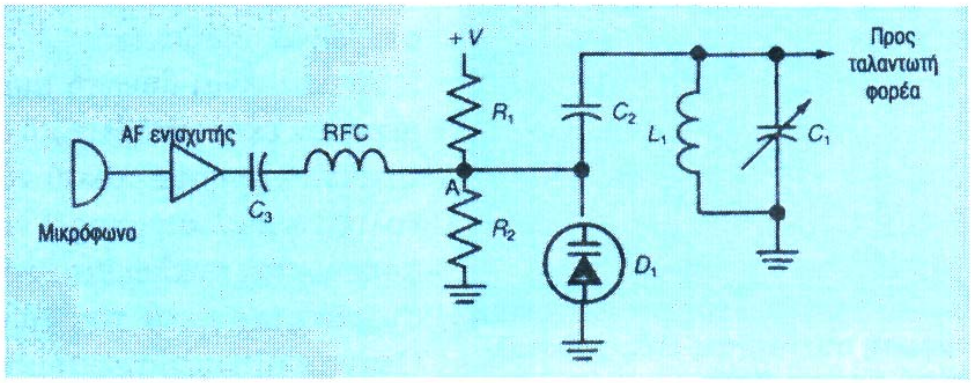
Μια τεράστια ποικιλία κυκλωμάτων έχουν επινοηθεί για παραγωγή FM και PM σημάτων. Υπάρχουν κυκλώματα άμεσης FM και κυκλώματα που παράγουν έμμεσα με PM τεχνικές. Τα κυκλώματα άμεσης FM, είναι αυτά που θα μελετήσουμε εκτενέστερα παρακάτω, κάνουν χρήση τεχνικών για πραγματική μεταβολή της συχνότητας του φορέα του ταλαντωτή σύμφωνα με το διαμορφώνον σήμα. Οι PM τεχνικές χρησιμοποιούν έναν ολισθητή φάσης μετά τον ταλαντωτή φορέα. Σ' αυτό το κεφάλαιο, θα μελετήσουμε τα πιο συνηθισμένα κυκλώματα FM και τα οποία χρησιμοποιήσαμε στην κατασκευή της εργαστηριακής μας άσκησης. Τα κυκλώματα των αποδιαμορφωτών συχνότητας δε, μετατρέπουν το FM σήμα ξανά στο αρχικό διαμορφώνον σήμα. Έχουν επινοηθεί δεκάδες διαφορετικών κυκλωμάτων. Τα πιο δημοφιλή και χρησιμοποιούμενα κυκλώματα αποδιαμορφωτών θα μελετήσουμε αναλυτικά. Έμφαση θα δώσουμε στον αποδιαμορφωτή PLL(phase-locked-loop) που παρέχει την καλύτερη συνολικά αποδιαμόρφωση συχνότητας.

3.2 Διαμορφωτές συχνότητας

Η βασική ιδέα της FM είναι η μεταβολή της συχνότητας του φορέα σύμφωνα με το διαμορφώνον σήμα. Ο φορέας δημιουργείται είτε από ένα κύκλωμα LC, το οποίο και θα μας απασχολήσει ή από ένα κύκλωμα κρυσταλλικού ταλαντωτή. Το ζητούμενο κατόπιν είναι να βρεθεί ένας τρόπος μεταβολής της συχνότητας της ταλάντωσης.
Σ' έναν ταλαντωτή LC, η συχνότητα του φορέα καθορίζεται από τις τιμές της αυτεπαγωγής και της χωρητικότητας σ' ένα συντονισμένο κύκλωμα. Η συχνότητα του φορέα, συνεπώς, μπορεί να αλλάξει μεταβάλλοντας είτε την αυτεπαγωγή ή τη χωρητικότητα. Η ιδέα είναι να βρεθεί ένα κύκλωμα ή ένα εξάρτημα που να μετατρέπει μια διαμορφώνουσα συχνότητα σε μια αντίστοιχη μεταβολή χωρητικότητας ή αυτεπαγωγής
Όταν δημιουργείται ο φορέας από ένα κρυσταλλικό ταλαντωτή, η συχνότητα καθορίζεται από τον κρύσταλλο. Ωστόσο, υπενθυμίζουμε ότι το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κρυστάλλου είναι ένα κύκλωμα LCR σειράς ή και παράλληλου συντονισμού. Συνδέοντας ένα εξωτερικό πυκνωτή

στον κρύσταλλο, μπορούν να ληφθούν μικρές μεταβολές συχνότητας λειτουργίας. Το ζητούμενο πάλι είναι η εύρεση ενός κυκλώματος ή εξαρτήματος του οποίου η χωρητικότητα θα μεταβάλλεται ανάλογα με το διαμορφώνον σήμα.
Το εξάρτημα που χρησιμοποιείται πιο συχνά σ' αυτή την εφαρμογή και που χρησιμοποιήσαμε και εμείς στην δική μας εφαρμογή είναι μια ***varactor ή VVC(Voltage-Variable Capacitor)***. Είναι επίσης γνωστή σαν ***δίοδος μεταβλητής χωρητικότητας*** ή ***varicap***. Το εξάρτημα αυτό είναι βασικά μια ημιαγωγική δίοδος επαφής που λειτουργεί σ' ένα ρυθμό ανάστροφης πόλωσης.
Αν στη δίοδο εφαρμοσθεί μια ορθή πόλωση αυτή θα άγει. Το εξωτερικό δυναμικό αναγκάζει, όπως είναι γνωστό από την ηλεκτρονική φυσική, τις οπές και τα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς την επαφή όπου συνδυάζονται και προκαλούν ένα συνεχές ρεύμα στο εσωτερικό της διόδου καθώς και εξωτερικά.
Αν εφαρμοσθεί στη δίοδο μια εξωτερική ανάστροφη πόλωση δε θα ρέει ρεύμα. Η πόλωση αυξάνει το πλάτος του στρώματος απογύμνωσης. Όσο πιο μεγάλη είναι η ανάστροφη πόλωση, τόσο πιο ευρύ είναι το στρώμα απογύμνωσης και τόσο πιο μικρή η πιθανότητα ροής ρεύματος.
Μια δίοδος με ανάστροφα πολωμένη επαφή εμφανίζεται σαν ένας μικρός πυκνωτής. Τα υλικά τύπου P και N ενεργούν όπως οι δύο πλάκες του πυκνωτή, ενώ η περιοχή απογύμνωσης ενεργεί όπως το διηλεκτρικό. Το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης καθορίζει το πλάτος του διηλεκτρικού και επομένως την τιμή της χωρητικότητας. Έτσι ανάλογα αν είναι υψηλη ή χαμηλή η ανάστροφη πόλωση που εφαρμόζεται στη δίοδο, θα είναι μικρή ή μεγάλη η τιμή της χωρητικότητας. Ωστόσο, οι varactor έχουν σχεδιασθεί ώστε να βελτιστοποιούν αυτό το χαρακτηριστικό. Αυτές οι δίοδοι της χωρητικότητας να είναι όσο το πιο δυνατό ευρείες και γραμμικές.
Οι πυκνωτές μεταβλητής-τάσης κατασκευάζονται με μια ευρεία περιοχή τιμών χωρητικότητας. Οι περισσότερες μονάδες έχουν μια ονομαστική χωρητικότητα στην περιοχή 1 ως 200 p F.

Το παρακάτω σχήμα 3.1 μας δείχνει το βασικό κύκλωμα ενός διαμορφωτή με varactor, το οποίο θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε καλύτερα τη λειτουργία του δικού μας κυκλώματος διαμόρφωσης, που κατασκευάσαμε διαπιστώνοντας ότι δεν υπάρχουν και πολύ μεγάλες διαφορές μεταξύ τους.

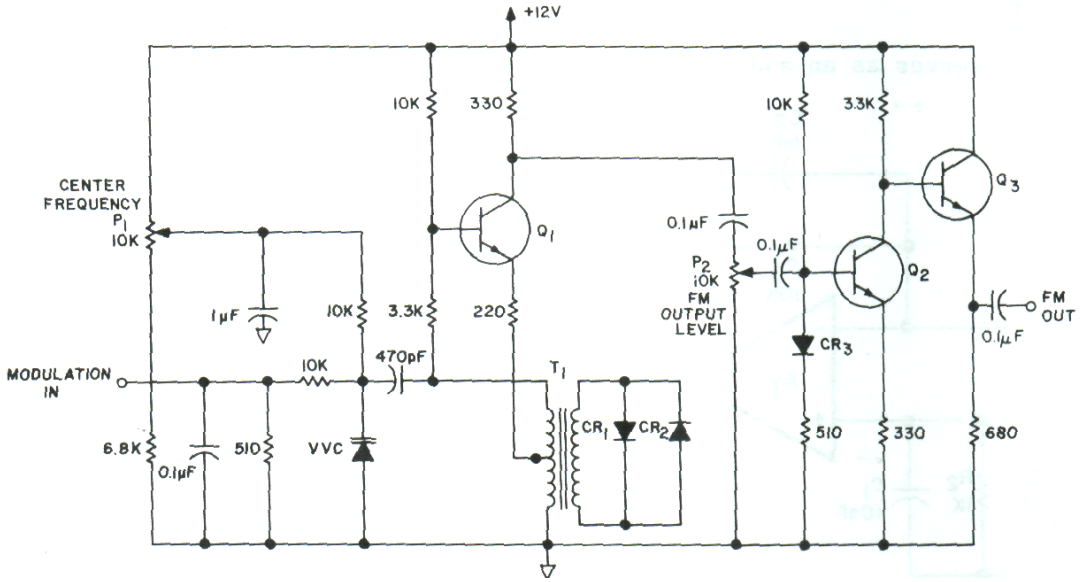


Σχήμα 3.1 Διαμόρφωση συχνότητας με μια VVC

Τα στοιχεία L_1 και C_1 αντιπροσωπεύουν το συντονισμένο κύκλωμα του ταλαντωτή της φέρουσας. Η δίοδος varactor D_1 συνδέεται σε σειρά με τον πυκνωτή C_2 στα άκρα του συντονισμένου κυκλώματος. Η τιμή του C_2 γίνεται πολύ μεγάλη στη συχνότητα λειτουργίας έτσι ώστε η αντίδραση της να είναι πολύ μικρή. Το αποτέλεσμα είναι, όταν ο C_2 συνδέεται σε σειρά με τη χαμηλότερη χωρητικότητα της D_1, ουσιαστικά να φαίνεται η D_1 συνδεδεμένη απ' ευθείας στα άκρα του συντονισμένου κυκλώματος. Η ολική χωρητικότητα του κυκλώματος είναι τότε η χωρητικότητα της D_1 παράλληλα με την C_1. Αυτή καθορίζει την κεντρική συχνότητα του φορέα.
Η χωρητικότητα της D_1, φυσικά ρυθμίζεται από δύο παράγοντες: μια σταθερή dc πόλωση και το διαμορφώνον σήμα. Όπως φαίνεται στο σχήμα η πόλωση στην D_1 τίθεται από το διαιρέτη τάσης που αποτελείται από τις R_1 και R_2. Συνήθως είτε η R 1 ή R 2 είναι μεταβλητή έτσι ώστε η κεντρική συχνότητα του φορέα να προσαρμόζεται μέσα σε μια στενή περιοχή. Το διαμορφώνον σήμα εφαρμόζεται μέσω του RFC. Ο C_3 είναι ένας πυκνωτής φραγμού που κρατά την dc πόλωση έξω από τα κυκλώματα του διαμορφώνοντος σήματος. Το RFC είναι ένα τσοκ ραδιοσυχνοτήτων του οποίου η αντίδραση είναι υψηλή στη συχνότητα του φορέα ώστε να εισέρχεται στα κυκλώματα του διαμορφώνοντος σήματος.
Το διαμορφώνον σήμα που εξάγεται από το μικρόφωνο ενισχύεται και εφαρμόζεται στο διαμορφωτή. Καθώς μεταβάλλεται το σήμα, προστίθεται και αφαιρείται από την τάση σταθερής πόλωσης. Άρα η ενεργός τάση που εμφανίζεται στην D_1 προκαλεί μεταβολή της χωρητικότητας της. Αυτή, στη συνέχεια, παράγει μια απόκλιση της συχνότητας του φορέα. Ένα θετικό σήμα στο σημείο Α προστίθεται στην ανάστροφη πόλωση, ελαττώνοντας τη χωρητικότητα και αυξάνοντας τη συχνότητα του φορέα. Ένα αρνητικό σήμα στο σημείο Α αφαιρείται από

την πόλωση αυξάνοντας τη χωρητικότητα και ελαττώνοντας τη συχνότητα του φορέα.
Το κύριο πρόβλημα με το κύκλωμα αυτό, είναι ότι οι περισσότεροι ταλαντωτές LC δεν είναι αρκετά σταθεροί ώστε να δίνουν ένα σήμα φορέα. Παρά την ποιότητα των εξαρτημάτων και την εξαιρετικότητα της σχεδίασης η συχνότητα του ταλαντωτή LC θα έχει διακυμάνσεις λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών, των μεταβολών τάσης στο κύκλωμα και άλλων παραγόντων.

Ύστερα από την αναφορά που κάναμε για το τυπικό κύκλωμα διαμόρφωσης με δίοδο varicap, ακολουθεί το κύκλωμα διαμόρφωσης FM με δίοδο varicap σχήμα 3.2 ή αλλιώς LOCAL OSCILLATOR που κατασκευάσαμε για τη εργαστηριακή μας άσκηση.



Σχήμα 3.2 Local Oscillator, Schematic Diagram

Παρατηρώντας το κύκλωμα βλέπουμε ότι τα 12 Volt μέσω του ποτενσιομέτρου P_1 περνούν στη VVC όπου και την πολώνουν ανάστροφα. Εισάγοντας το διαμορφωμένο σήμα (MODULATION IN) αλλάζει η σταθερή πόλωση της Varicap και όπως αναφέραμε παραπάνω αλλαγή της σταθερής τάσης της Varicap σημαίνει και αλλαγή της χωρητικότητάς της. Με αποτέλεσμα να αλλάζει και η κεντρική συχνότητα στην οποία θα ταλαντώνεται ο ταλαντωτής. Η αντίσταση 6.8K και ο πυκνωτής 0.1 μf είναι ένα RC φίλτρο , το οποίο κόβει τις υψηλές. Η αντίσταση 510 Ω χρησιμοποιείται σαν αντίσταση εισόδου.

Ο τύπος του ταλαντωτή που χρησιμοποιείται σ' αυτό το κύκλωμα είναι γνωστός και ως Hartley Oscillator, ο οποίος αποτελείται από το transistor Q_1 και το transformer T_1. Οι δίοδοι CR_1 και CR_2 δρουν ως ψαλιδιστές. Το ποτενσιόμετρο P2 ρυθμίζει την FM έξοδο. Ακολούθως υπάρχει μια buffer amplifier, η οποί αποτελείται από το Q2 που δουλεύει ως ενισχυτής ενώ το Q3 ως απομονωτής.

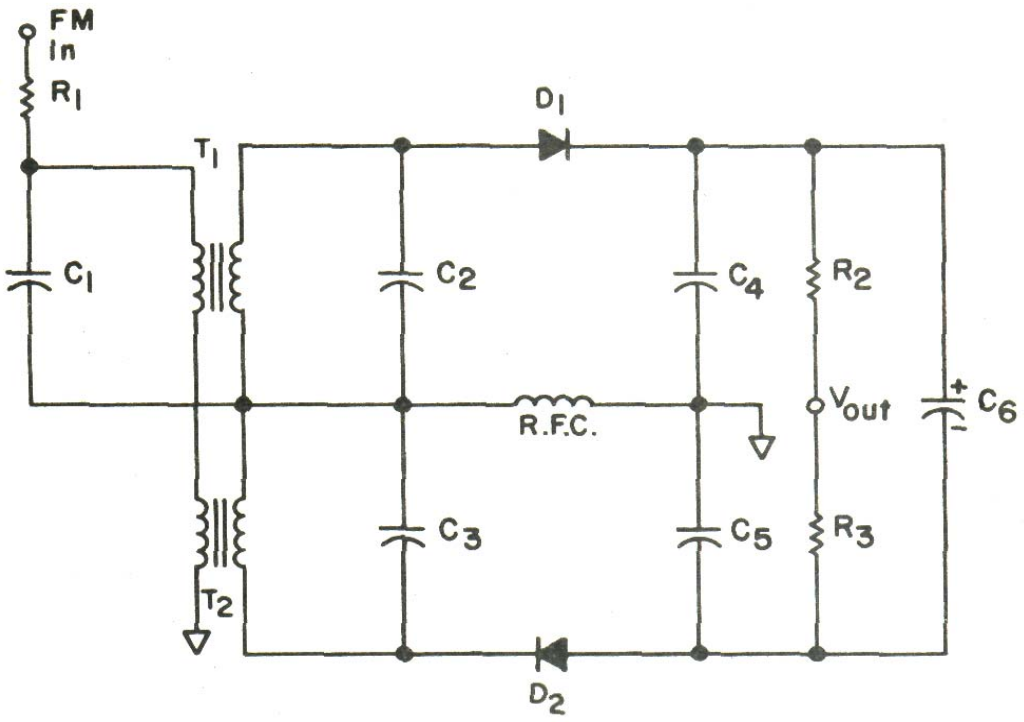
Πρέπει να αναφέρουμε, πως φυσικά υπάρχουν και άλλοι τύποι διαμόρφωσης συχνότητας όπως η ***διαμόρφωση συχνότητας ενός κρυσταλλικού ταλαντωτή με μια VVC***. Οι κρυσταλλικοί ταλαντωτές όχι μόνο παρέχουν μια υψηλή ακριβή συχνότητα φορέα, αλλά επίσης η σταθεροτητά τους στη συχνότητα είναι ανώτερη μέσα σε μια ευρεία περιοχή θερμοκρασιών.
Ένας άλλος διαμορφωτής είναι ο ***διαμορφωτής αντίδρασης***. Είναι ένα από τα καλύτερα FM κυκλώματα επειδή έχει τη δυνατότητα παραγωγής συχνοτικής απόκλισης μέσα σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων. Είναι επίσης πολύ γραμμικός που σημαίνει ότι η παραμόρφωση είναι ελάχιστη.
Τέλος μπορούμε να έχουμε ***διαμόρφωση συχνότητας με ένα IC VCO***.

3.3 Αποδιαμορφωτές συχνότητας

Υπάρχουν κυριολεκτικά δεκάδες κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται για αποδιαμόρφωση ή ανίχνευση FM και PM σημάτων. Ένας από τους πιο ευρύτατα χρησιμοποιημένους αποδιαμορφωτές συχνότητας είναι ο πασίγνωστος ***διευκρινιστής Foster-Seely***, καθώς επίσης και ο ***ανιχνευτής λόγου*** για τον οποίο θα αναφερθούμε παρακάτω εκτενέστερα, αφού είναι ένας από τους τρόπους που κάνουμε φώραση στην εργαστηριακή μας άσκηση. Ακόμη, θα μελετήσουμε την αποδιαμόρφωση FM με τη βοήθεια του ***ανιχνευτή γινομένου*** και το ***βρόχο κλειδωμένης- φάσης (phase-locked loop)***.

-Ανιχνευτής λόγου-
-Ratio detector-

Ένας από τους αποδιαμορφωτές που χρησιμοποιούνται πολύ είναι ο ανιχνευτής λόγου. Είναι παρόμοιος σε εμφάνιση με τον διευκρινιστή αλλά έχει μερικές σημαντικές διαφορές. Το σχήμα 3.3 μας δείχνει το κύκλωμα του ανιχνευτή λόγου, το οποίο είναι και αυτό που χρησιμοποιήσαμε στην κατασκευή μας.



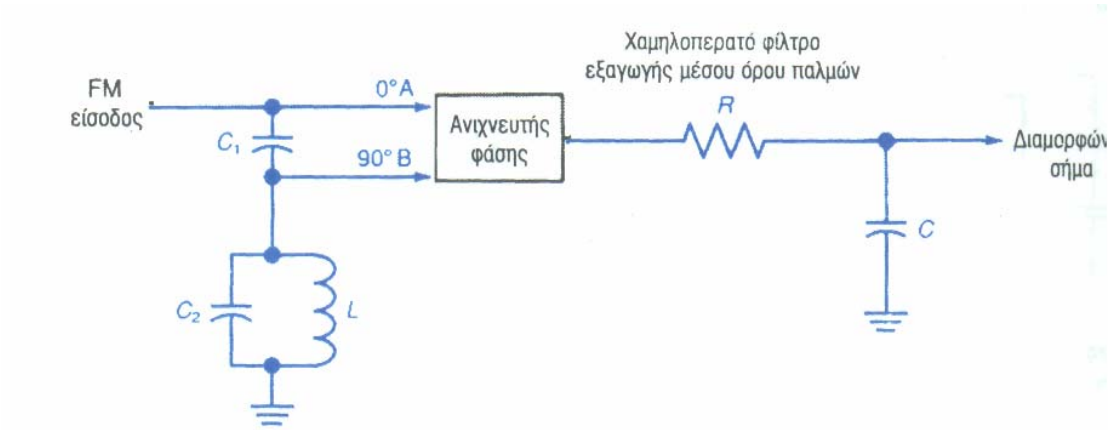
Σχήμα 3.3 Ανιχνευτής λόγου

Παρατηρώντας το σχήμα 3.3 βλέπουμε ότι το FM σήμα εφαρμόζεται στον RF μετασχηματιστή T_1 με κεντρική επαφή στο δευτερεύον. Το FM σήμα διέρχεται επίσης μέσω του πυκνωτή C_3 και εφαρμόζεται στα άκρα του RFC. Το κύκλωμα χρησιμοποιεί δύο διόδους, αλλά πρέπει να σημειώσουμε ότι η φορά της D_2 είναι αντίθετη με την D_1. Σ' αυτό το κύκλωμα γίνεται χρήση ενός πολύ μεγάλου πυκνωτή C_6 συνδεδεμένου στα άκρα της εξόδου. Οι αντιστάσεις- φορτία R_2 και R_3 είναι ίσες και η έξοδος λαμβάνεται στο μέσο της κοινής τους σύνδεσης Vout . Οι πυκνωτές C_4 και C_5 και οι αντιστάσεις R_2 και R_3 σχηματίζουν ένα

κύκλωμα γέφυρας. Η τάση στα άκρα των πυκνωτών C_4 και C_5 είναι η τάση εισόδου της γέφυρας.
Χωρίς διαμόρφωση η τάση που εφαρμόζεται στην D_1 είναι ίδια με την τάση που εφαρμόζεται στην D_2 . Επομένως, οι πυκνωτές C_4 και C_5 φορτίζουν στην ίδια τάση. Εφόσον ο C_6 συνδέεται στα άκρα των δύο πυκνωτών, θα φορτιστεί με το άθροισμα των τάσεων τους. Επειδή ο C_6 είναι ένας πολύ μεγάλος πυκνωτής , συνήθως τανταλίου ή ηλεκτρολυτικός, χρειάζεται χρόνο μερικών περιόδων του σήματος εισόδου για να φορτιστεί πλήρως. Ωστόσο άπαξ και φορτιστεί διατηρεί μια σχετικά σταθερή τάση. Εφόσον οι R_2 και R_3 είναι ίσες, οι πτώσεις τάσης τους θα είναι ίσες καθώς επίσης και οι πτώσεις τάσης στα άκρα των C_4 και C_5 θα είναι ίσες. Το κύκλωμα γέφυρας συνεπώς ισοσταθμίζεται.
Υποθέτουμε ότι στην κεντρική συχνότητα του φορέα οι πτώσεις τάσης στα άκρα των C_4 και C_5 είναι 2 V η καθεμιά. Αυτό σημαίνει ότι ο C_6 είναι φορτισμένος στα 4 V. Τότε οι τάσεις στα άκρα των R_2 και R_3 είναι 2 V η καθεμιά.
Όταν η συχνότητα του σήματος εισόδου είναι υψηλότερη της φέρουσας , τότε επί της R_2 θα είναι $V_2=V'+\Delta V$ και η τάση επί της R_3 θα είναι $V_3=V'-\Delta V$. Η τάση στον πυκνωτή C_6 παραμένει σταθερή δηλαδή $2V'$, αλλά η μεταβολή της V_3 είναι $-\Delta V$ και πρέπει να είναι ίση με το διαμορφώνον σήμα. Η τάση που παίρνουμε από το σημείο Vout μπορεί να θεωρηθεί ως έξοδος του φωρατή. Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι η τάση του πυκνωτή C_6 παραμένει σταθερή για αλλαγές στη συχνότητα του σήματος εισόδου.
Το βασικό πλεονέκτημα του ανιχνευτή λόγου είναι ότι παραμένει ουσιαστικά ανεπηρέαστος στο θόρυβο και στις διακυμάνσεις πλάτους λόγω της πολύ μεγάλης τιμής του πυκνωτή C_6. Εφόσον αυτός ο πυκνωτής χρειάζεται πολύ χρόνο για φόρτιση ή εκφόρτιση, οι παλμοί θορύβου βραχείας διάρκειας ή οι ελάχιστες διακυμάνσεις πλάτους εξομάλυνσης πλήρως. Ωστόσο, η μέση dc τάση στα άκρα του C_6 είναι ίδια με το μέσο πλάτος σήματος. Αυτή η τάση, συνεπώς , μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου του κέρδους.

-Φωρατής Γινομένου-
-Product Detector-

Ένας άλλος δημοφιλής αποδιαμορφωτής συχνότητας ο ***φωρατής γινομένου*** ή αλλιώς μπορούμε να τον βρούμε και με την ονομασία του ***ορθογώνιου ανιχνευτή***. Η βασική του εφαρμογή είναι στην TV audio αποδιαμόρφωση, αν και χρησιμοποιείται επίσης σε μερικά FM ράδιο-συστήματα. Οι περισσότεροι IC αποδιαμορφωτές συχνότητας είναι αυτού του τύπου.
Ο όρος ***ορθογώνιος*** (quadrature) αναφέρεται σε μια ολίσθηση φάσης 90º μεταξύ δύο σημάτων. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής χρησιμοποιεί ένα κύκλωμα ολίσθησης φάσης για παραγωγή μιας ολίσθησης φάσης 90º στη συχνότητα του αδιαμόρφωτου φορέα. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη διάταξη ολίσθησης φάσης φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4

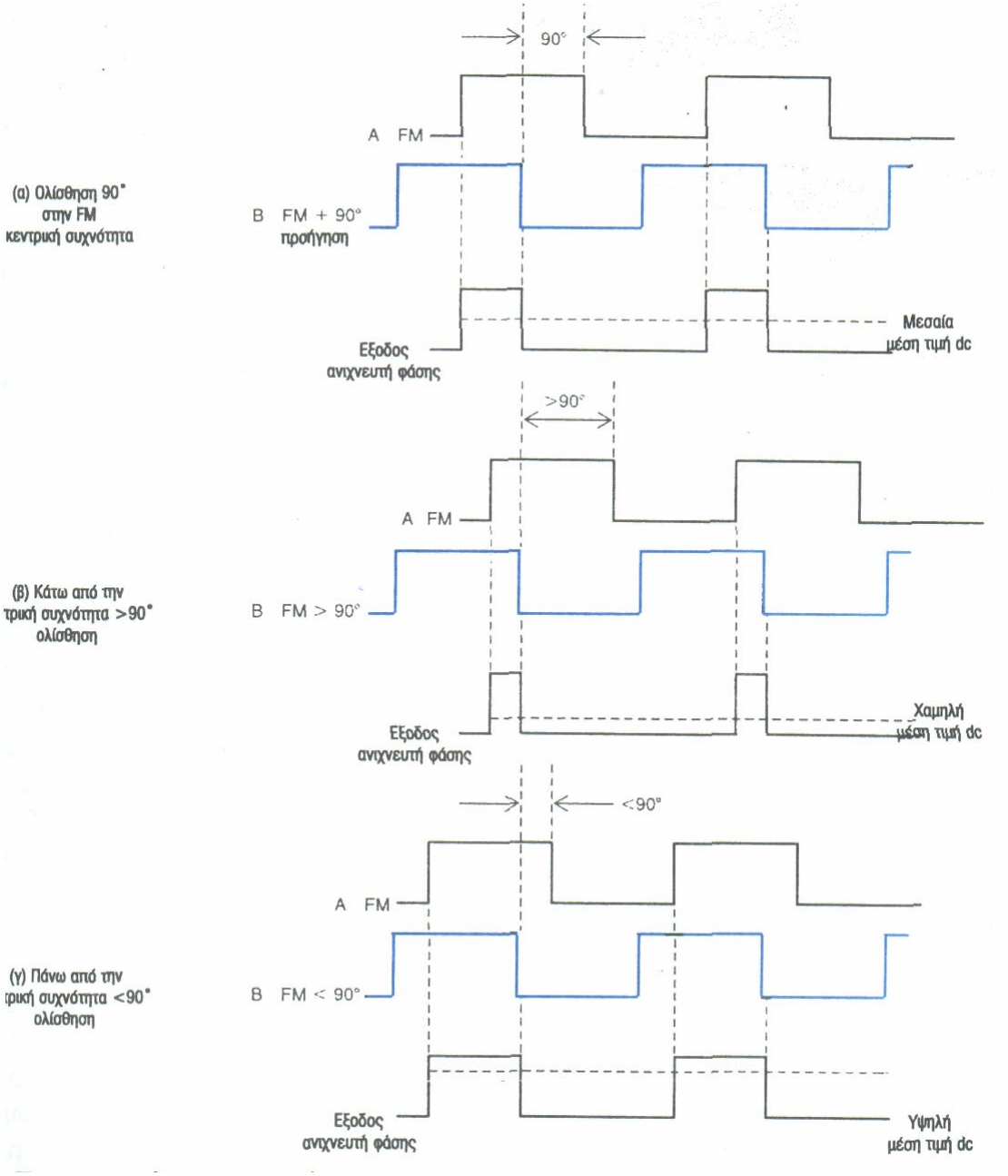
Το FM σήμα εφαρμόζεται μέσω ενός πολύ μικρού πυκνωτή C_1 στο παράλληλα συντονισμένο κύκλωμα που ρυθμίζεται να συντονίζει στην κεντρική συχνότητα του φορέα. Το συντονισμένο κύκλωμα εμφανίζει μια πολύ υψηλή τιμή ωμικής αντίστασης στο συντονισμό. Ο μικρός πυκνωτής έχει μια πολύ υψηλή αντίδραση σε σύγκριση με τη σύνθετη αντίσταση του συντονισμένου κυκλώματος. Η έξοδος στα άκρα του κυκλώματος συντονισμού τότε στη συχνότητα φορέα είναι πολύ κοντά στις 90º προπορεία φάσης ως προς την είσοδο. Τώρα, όταν έχουμε FM σήμα, η συχνότητα φορέα θα αποκλίνει επάνω και κάτω από τη συχνότητα συντονισμού του συντονισμένου κυκλώματος. Το αποτέλεσμα θα είναι μια αύξηση ή ελάττωση του ποσού ολίσθησης φάσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου.

Τα δύο ορθογώνια σήματα οδηγούνται κατόπιν σ' ένα κύκλωμα ανιχνευτή φάσης. Ο ανιχνευτής φάσης δεν είναι τίποτε άλλο από ένα κύκλωμα του οποίου η έξοδος είναι μια συνάρτηση του ποσού της ολίσθησης φάσης μεταξύ των δύο σημάτων εισόδου. Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος ανιχνευτής φάσης είναι ένας ισοσταθμισμένος διαμορφωτής που χρησιμοποιεί διαφορικούς ενισχυτές.
Εδώ σ' αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε λίγα λόγια για τον ***ισοσταθμισμένο διαμορφωτή***. Ένας ισοσταθμισμένος διαμορφωτής παράγει ένα σήμα DSB, οι είσοδοι του είναι ο φορέας και ένα διαμορφώνον σήμα και η έξοδος του είναι οι άνω και κάτω πλευρικές ζώνες. Ο ισοσταθμισμένος διαμορφωτής συμπιέζει το φορέα, αφήνοντας μόνο το άθροισμα και τη διαφορά των συχνοτήτων στην έξοδο. Η έξοδος ενός ισοσταθμισμένου διαμορφωτή μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω με φίλτρα ή με κυκλώματα ολίσθησης φάσης για εξάλειψη μιας από τις πλευρικές, παράγοντας έτσι ένα SSB σήμα.

Η έξοδος λοιπόν του ανιχνευτή φάσης είναι μια σειρά παλμών των οποίων το εύρος μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσό ολίσθησης φάσης μεταξύ των δύο σημάτων. Για αναπαραγωγή του αρχικού διαμορφώνοντος σήματος εξάγεται ο μέσος όρος αυτών των σημάτων σε ένα RC χαμηλοπερατό φίλτρο.
Συνήθως τα ημιτονικά σήματα FM εισόδου στον ανιχνευτή φάσης βρίσκονται σε μια υψηλή στάθμη. Συνεπώς θα οδηγούν τους διαφορικούς ενισχυτές στον ανιχνευτή φάσης στην αποκοπή και στον κόρο. Τα διαφορικά transistors θα ενεργούν σαν διακόπτες και επομένως η έξοδος θα είναι σαν μια σειρά παλμών. Δε χρειάζεται περιοριστής αν το σήμα εισόδου είναι αρκετά μεγάλο. Η διάρκεια του παλμού εξόδου καθορίζεται από το ποσό της ολίσθησης φάσης. Μπορούμε να δούμε τον ανιχνευτή φάσης απλώς σαν μια AND πύλη της οποίας η έξοδος είναι "on" μόνο όταν οι δύο παλμοί εισόδου είναι "on" και είναι "off" αν είτε μια ή και οι δύο είσοδοι είναι "off".

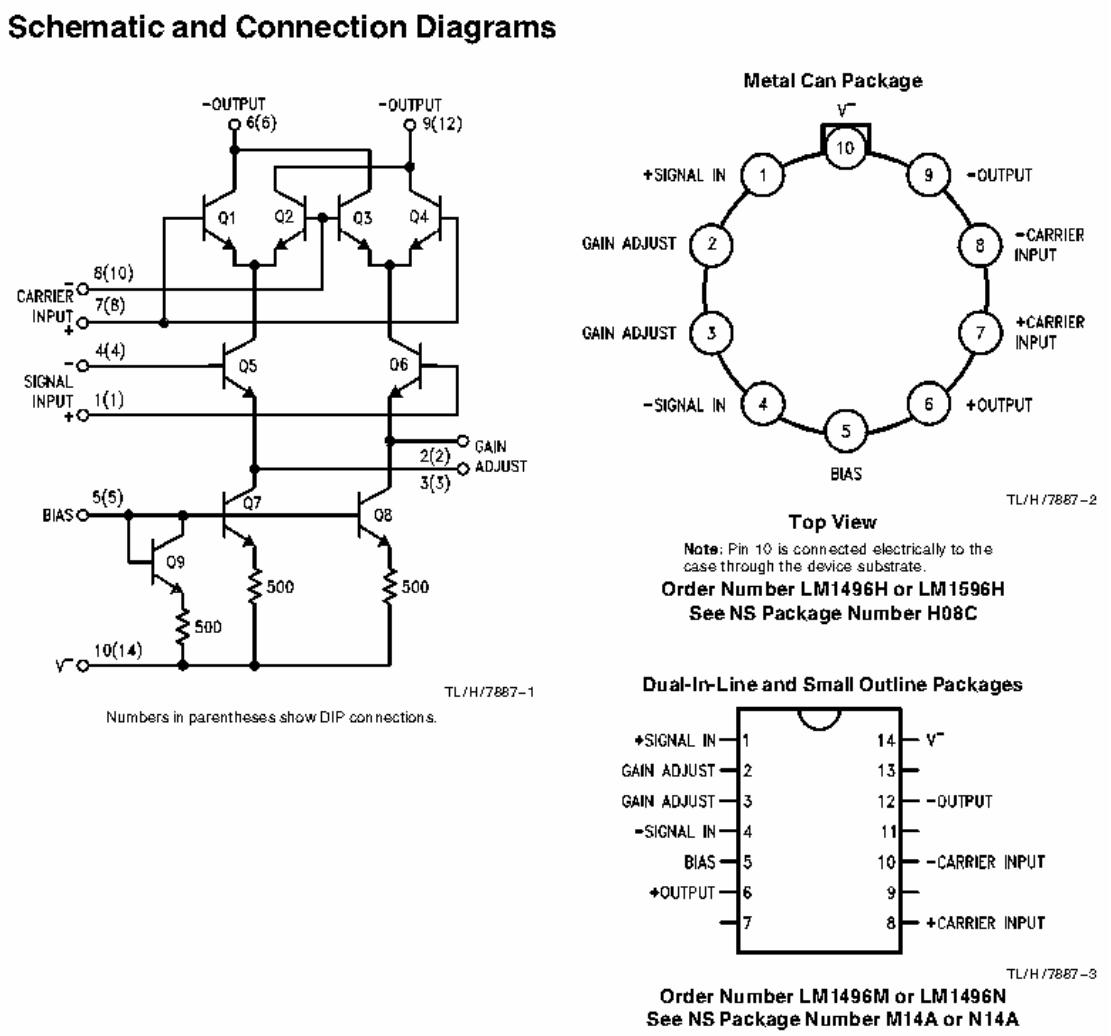
Το σχήμα 3.6 δείχνει τις τυπικές κυματομορφές ενός φωρατή γινομένου. Όταν δεν υπάρχει διαμόρφωση, τα δύο σήματα εισόδου έχουν διαφορά φάσης 90° ακριβώς και, επομένως, παρέχουν ένα εύρος παλμού εξόδου όπως δείχνεται. Όταν η συχνότητα αυξάνεται, το ποσό της ολίσθησης φάσης ελαττώνεται, και συνεπώς το εύρος του παλμού εξόδου θα είναι μεγαλύτερο. Οι ευρύτεροι παλμοί κατόπιν εξαγωγής του μέσου όρου τους με ένα φίλτρο RC παράγουν μια μεγαλύτερη κατά μέσο όρο τάση εξόδου. Αυτό, φυσικά, αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο πλάτος που απαιτείται για παραγωγή της υψηλότερης συχνότητας φορέα.
Όταν η συχνότητα του FM σήματος ελαττώνεται, υπάρχει περισσότερη ολίσθηση φάσης και, σαν αποτέλεσμα, οι παλμοί εξόδου θα είναι

στενότεροι. Όταν εξαχθεί ο μέσος όρος, οι στενότεροι παλμοί θα παράγουν μια μικρότερη κατά μέσο όρο τάση εξόδου, αντιστοιχώντας έτσι στο αρχικό μικρότερο διαμορφώνον σήμα.



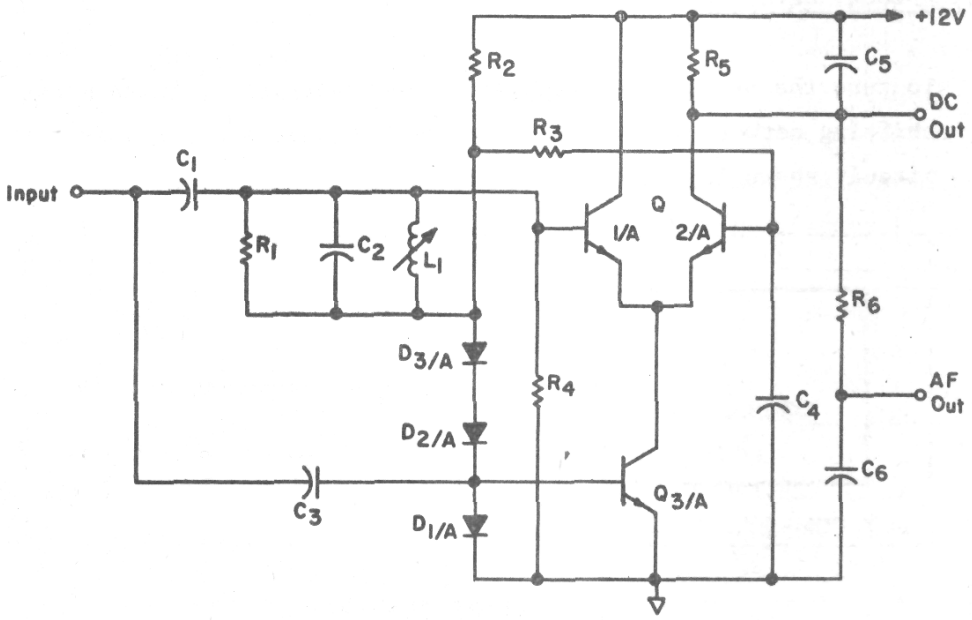
Σχήμα 3.6 Κυματομορφές του φωρατή γινομένου

Ένα τυπικό κύκλωμα ισοσταθμισμένου διαμορφωτή είναι το ολοκληρωμένο IC LM1496/1596 σχήμα 3.7



Σχήμα 3.7 Το σχηματικό του LM 1496/1596

Επίσης ένα άλλο παρόμοιο κύκλωμα φωρατής γινομένου είναι το παρακάτω σχήμα 3.8

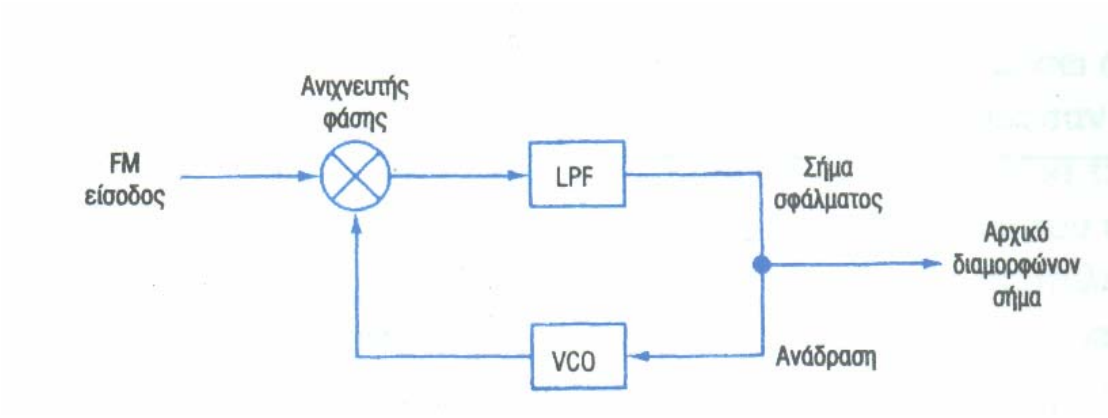


Σχήμα 3.8 Κύκλωμα φωρατή γινομένου

Στο αριστερό μέρος του κυκλώματος διακρίνουμε τη διάταξη του μετατοπιστή φάσης (phase shifter) , το οποίο το αναλύσαμε προηγουμένως και μας κάνει διαφορά 90º. Στη συνέχεια ακολουθεί ένα κύκλωμα γινομένου, του οποίου η λειτουργία πετυχαίνεται με το IC LM 371. Ουσιαστικά το ολοκληρωμένο αυτό δέχεται τα δύο σήματα που έχουν διαφορά φάσης 90º, τα πολλαπλασιάζει με αποτέλεσμα στην έξοδο AF out να παίρνουμε το αποδιαμορφωμένο σήμα μας δηλαδή τη πληροφορία μας.

- PLL- ή
- Βρόγχος Κλειδωμένης Φάσης-

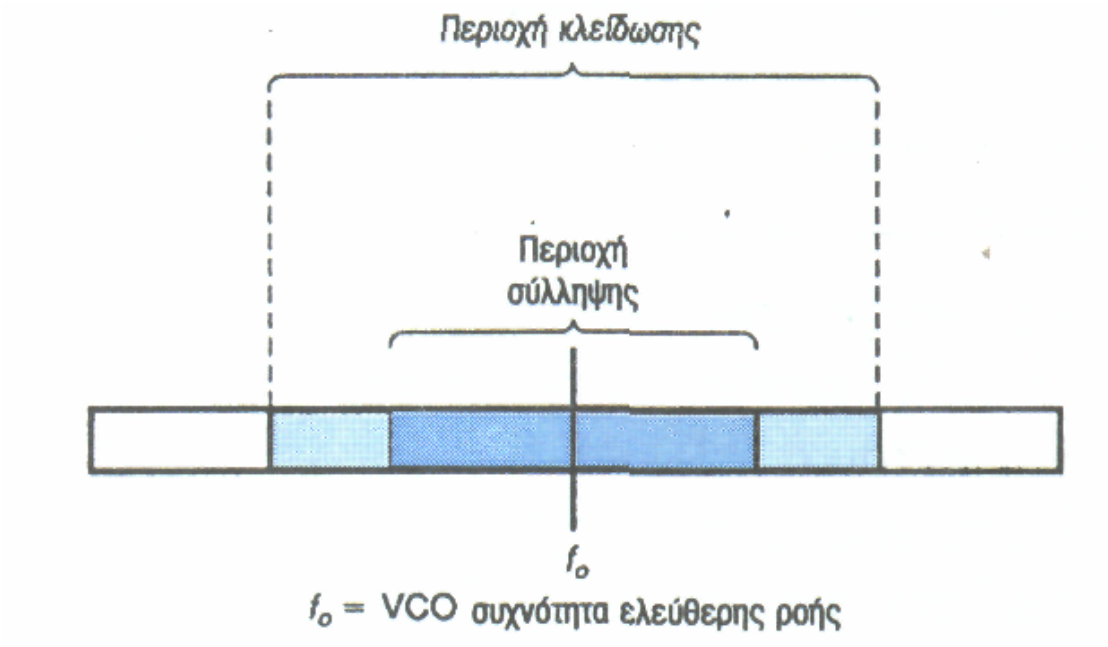
Ο καλύτερος αποδιαμορφωτής συχνότητας είναι ο βρόγχος κλειδωμένης φάσης (PLL), που είναι ένα κύκλωμα ελέγχου με ανάδραση συχνότητας. Χρησιμοποιείται όχι μόνο στην αποδιαμόρφωση συχνότητας αλλά επίσης σε συνθέτες συχνοτήτων και σε διάφορες εφαρμογές φιλτραρίσματος και ανίχνευσης σημάτων.
Όλοι οι PLLs έχουν τρία βασικά στοιχεία όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.9. Α) Χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής φάσης ή ένας μίκτης για σύγκριση του σήματος εισόδου ή αναφοράς με την έξοδο VCO. Β) Η συχνότητα VCO μεταβάλλεται από την dc τάση εξόδου ενός χαμηλοπερατού φίλτρου. Γ) Αυτή η dc τάση ελέγχου παράγεται από το χαμηλοπερατό φίλτρο χρησιμοποιώντας την έξοδο του ανιχνευτή φάσης.



Σχήμα 3.9 Τα στοιχεία ενός PLL

Η κύρια δουλειά του ανιχνευτή φάσης είναι να συγκρίνει τα δύο σήματα εισόδου και να παράγει ένα σήμα εξόδου που κατόπιν φιλτραρίσματος θα ελέγχει το VCO. Αν υπάρχει διαφορά φάσης ή συχνότητας μεταξύ των δύο σημάτων εισόδου και του VCO, η έξοδος του ανιχνευτή φάσης θα μεταβάλλεται ανάλογα. Η έξοδος του φίλτρου θα ρυθμίζει τη συχνότητα VCO σε μια προσπάθεια να διορθώνει τις μεταβολές της αρχικής συχνότητας. Αυτή η dc τάση καλείται ***σήμα σφάλματος*** και είναι επίσης η ανάδραση σ'αυτό το κύκλωμα.
Για να εξετάσουμε τη λειτουργία του PLL, υποθέτουμε αρχικά ότι δεν εφαρμόζεται σήμα εισόδου. Τότε οι έξοδοι του ανιχνευτή φάσης και του χαμηλοπερατού φίλτρου είναι μηδέν, και ο VCO λειτουργεί σε μια ***συχνότητα ελεύθερης-ροής*** .Αυτή είναι η κανονική συχνότητα

λειτουργίας του VCO όπως καθορίζεται από τα εσωτερικά του στοιχεία καθορισμού συχνότητας.
Τώρα υποθέτουμε ότι εφαρμόζεται ένα σήμα εισόδου κοντά στη συχνότητα του VCO. Ο ανιχνευτής φάσης θα συγκρίνει την VCO συχνότητα με τη συχνότητα εισόδου και θα δώσει μια τάση εξόδου ανάλογη με τη διαφορά της συχνότητας. Η προκύπτουσα dc τάση εφαρμόζεται στο VCO. Αυτή η dc τάση ενεργεί έτσι ώστε να αναγκάζει την VCO συχνότητα να κινηθεί προς μια κατεύθυνση που να μειώνει την dc τάση σφάλματος. Η τάση σφάλματος αναγκάζει την VCO συχνότητα να αλλάζει προς την κατεύθυνση που ελαττώνει το ποσό της συχνοτικής διαφοράς μεταξύ του VCO και της εισόδου. Σε κάποιο σημείο, η τάση σφάλματος θα αναγκάσει την VCO συχνότητα να γίνει ίση με τη συχνότητα εισόδου. Όταν συμβεί αυτό, λέμε ότι το PLL είναι "κλειδωμένο". Αν και οι συχνότητες εισόδου και VCO είναι ίσες, θα υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ αυτών που παράγει την dc τάση εξόδου που αναγκάζει το VCO να παράγει τη συχνότητα που θα κρατά το κύκλωμα κλειδωμένο.
Οποιαδήποτε μεταβολή στη συχνότητα εισόδου θα ρυθμισθεί με μια μεταβολή της VCO συχνότητας, έτσι ώστε το κύκλωμα να παραμένει κλειδωμένο.
Ο VCO σ'ένα PLL, έχει τη δυνατότητα παρακολούθησης της συχνότητας εισόδου μέσα σε μια ευρεία περιοχή. Η περιοχή συχνοτήτων όπου το PLL θα παρακολουθεί το σήμα εισόδου και θα παραμένει κλειδωμένο είναι γνωστή σαν ***περιοχή κλείδωσης***. Η περιοχή κλείδωσης είναι συνήθως μια ζώνη συχνοτήτων πάνω και κάτω από τη συχνότητα ελεύθερης ροής του VCO. Αν η συχνότητα του σήματος εισόδου είναι εκτός της περιοχής κλείδωσης, το PLL δε θα κλειδωθεί. Όταν συμβαίνει αυτό η VCO συχνότητα εξόδου "πηδά" στη συχνότητα ελεύθερης-ροής του.
Αν μια συχνότητα εισόδου εντός της περιοχής κλείδωσης εφαρμοσθεί στο PLL, το κύκλωμα αμέσως θα προσαρμοστεί και θα παραμείνει σε μια κλειδωμένη κατάσταση. Ο ανιχνευτής φάσης θα καθορίζει τη διαφορά φάσης μεταξύ της VCO συχνότητας ελεύθερης-ροής και των συχνοτήτων εισόδου και θα δημιουργούν το σήμα σφάλματος που θα αναγκάζει το VCO εξισώνεται με τη συχνότητα εισόδου. Από τη στιγμή που το σήμα εισόδου συλληφθεί, το PLL παραμένει κλειδωμένο και θα παρακολουθεί οποιεσδήποτε μεταβολές στο σήμα εισόδου όσο χρόνο αυτό παραμένει στην περιοχή κλείδωσης.
Η περιοχή συχνοτήτων στις οποίες το PLL "συλλαμβάνει" ένα σήμα εισόδου είναι γνωστή σαν ***περιοχή σύλληψης*** . Είναι πολύ στενότερη από την περιοχή κλείδωσης, αλλά γενικά είναι κεντραρισμένη γύρω από τη συχνότητα ελεύθερης-ροής του VCO όπως στην περιοχή κλείδωσης σχήμα 3.10.



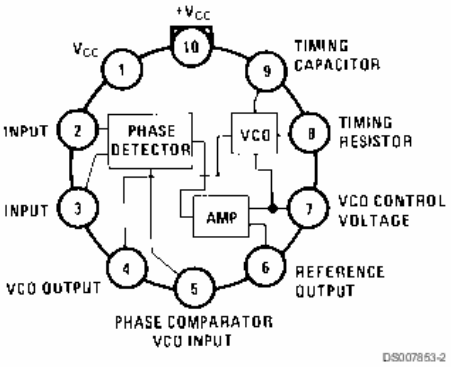
Σχήμα 3.10 Περιοχές σύλληψης και κλείδωσης ενός PLL

Το χαρακτηριστικό ενός PLL να "λαμβάνει" σήματα σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων το κάνει να ενεργεί σα ζωνοπερατό φίλτρο. Βρόχοι κλειδωμένοι-σε-φάση συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπυ θέλουμε να διέρχονται σήματα μόνο σε μια συγκεκριμένη περιοχή και να απορρίπτονται σήματα εκτός αυτής της περιοχής. Το PLL είναι πολύ αποτελεσματικό στην εξάλειψη του θορύβου και των παρεμβολών σ' ένα σήμα.
Εφόσον το PLL αποκρίνεται σε μεταβολές της συχνότητας εισόδου, είναι κατανοητό γιατί πρέπει να είναι ακριβώς ίδια με το σήμα εισόδου αν το PLL πρέπει να παραμείνει κλειδωμένο, και το σήμα σφάλματος πρέπει να είναι ίδιο με το αρχικό διαμορφώνον σήμα της εισόδου FM. Η συχνότητα αποκοπής του χαμηλοπερατού φίλτρου είναι καθορισμένη έτσι ώστε να διέρχεται το αρχικό διαμορφώνον σήμα. Το PLL είναι ο καλύτερος αποδιαμορφωτής συχνότητας σε χρήση λόγω των χαρακτηριστικών που περιγράψαμε προηγουμένως. Η ικανότητα του να παρέχει επιλεκτικότητα και φιλτράρισμα συχνότητας του δίνει ένα λόγο σήμα-προς-θόρυβο ανώτερο από οποιοδήποτε άλλο τύπο FM ανιχνευτή. Η γραμμικότητα του VCO εξασφαλίζει μια υψηλά ακριβή αναπαραγωγή του αρχικού διαμορφώνοντος σήματος. Αν και τα PLLs είναι πολύπλοκα, είναι εύκολα στην εφαρμογή επειδή βρίσκονται εύκολα σε IC μορφή χαμηλού κόστους.

Ένα από τα ολοκληρωμένα που χρησιμοποιείται σαν βρόγχο κλειδωμένης φάσης είναι το ολοκληρωμένο IC LM565 PLL όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Εδώ το PLL τροφοδοτείται από μονή τροφοδοσία γι' αυτό και οι αντιστάσεις R102 και R103 χρησιμοποιούνται σαν διαιρέτης τάσης, έτσι ώστε να ρίχνουν τη τάση στη μισή της τιμή. Περίπου 6.5 Volts εμφανίζονται στην ένωση της R102 και της R103 όταν το κύκλωμα δουλεύει σωστά. Ο πυκνωτής C102 είναι ένας πυκνωτής απόζευξής, που κόβει τις χαμηλές συχνότητες και οι αντιστάσεις R104 και R105 χρησιμεύουν στο να απομονώνουν τις δυο εισόδους του ανιχνευτή φάσης.
Ο VCO του LM565 που βρίσκεται στο ποδαράκι 7 περιέχει δύο συνιστώσες. Μία συνιστώσα είναι μία DC τάση σχετική με το μέσο όρο της συχνότητας που φτάνει στο PLL από το διαμορφωτή FM και η άλλη συνιστώσα είναι το AC σήμα, που είναι η πραγματικά αποδιαμορφωμένη πληροφορία μας. Αυτό το AC σήμα ανέρχεται γιατί το PLL έχει τη δυνατότητα να αυτοδιορθώνεται, καθώς ο πομπός αποκλίνει πάνω ή κάτω από τη συχνότητα, το PLL προσπαθεί να αναγκάσει το VCO να ακολουθήσει ακριβώς αυτή τη συχνότητα ακριβώς όπως ποικίλει ο δικός του έλεγχος τάσης. Επιπλέον ο έλεγχος τάσης είναι μια αντιγραφή του γνήσιου σήματος πληροφορίας.

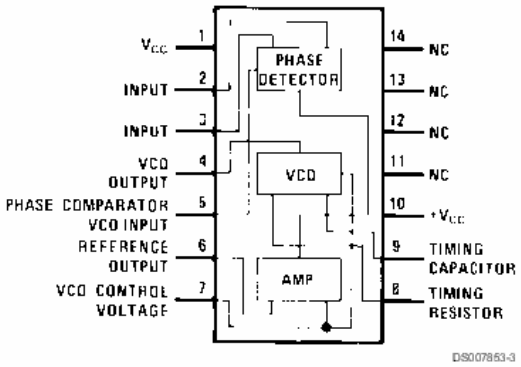
Connection Diagrams

Metal Can Package

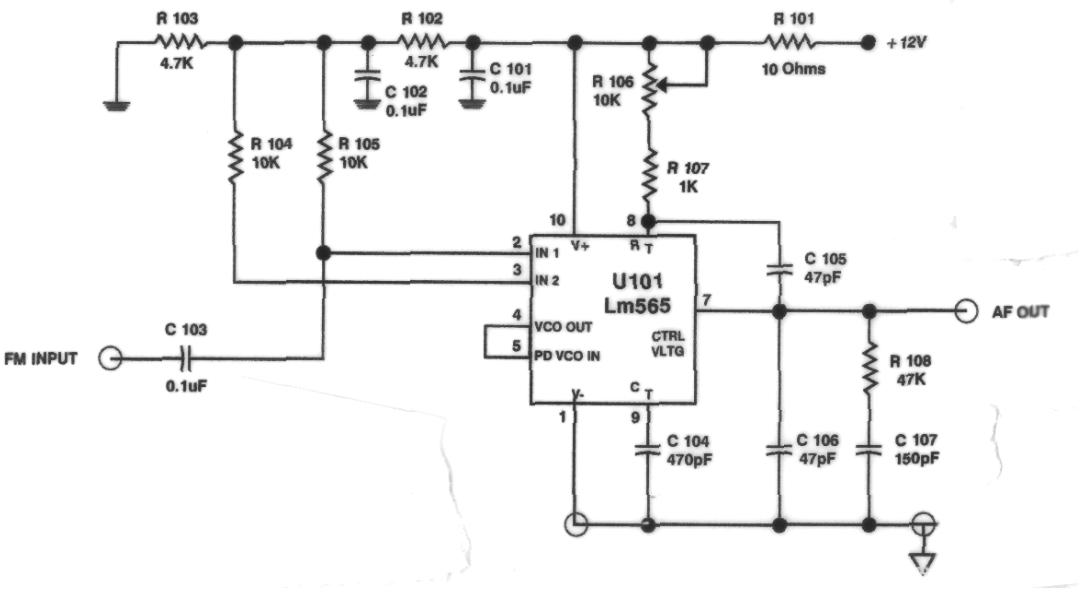


Order Number LM565H
See NS Package Number H10C

Dual-in-Line Package



Order Number LM565CN
See NS Package Number N14A



Σχήμα 3.10 FM Detector using the LM565 PLL