

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
(Τ.Ε.Ι.) ΛΑΜΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**

**ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ**

**ΜΑΘΗΜΑ: «ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ»**

**Δρ. ΒΑΡΖΑΚΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ  
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΛΑΜΙΑ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2007

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Οι Συμπληρωματικές Σημειώσεις που ακολουθούν έχουν γραφτεί για να συμπληρώσουν τις ανάγκες του Μαθήματος “**Τηλεπικοινωνίες**” του Ε εξαμήνου του Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρονικής του Τ.Ε.Ι. Λαμίας, όπως αυτό ισχύει σήμερα. Η συγγραφή αυτών των Συμπληρωματικών Διδακτικών Σημειώσεων κρίθηκε απαραίτητη διότι σε αυτές παρουσιάζονται πρόσθετα στοιχεία θεωρίας, λυμένες ασκήσεις, παραδείγματα, και ασκήσεις με απαντήσεις, συμπληρώνοντας έτσι το βασικό σύγγραμμα του μαθήματος.

Θα πρέπει να σημειωθεί από το συγγραφέα, ότι η επέκταση, τυχόν διορθώσεις και υποδείξεις στις παρούσες σημειώσεις είναι πάντα ευπρόσδεκτες από τους συναδέλφους και τους φοιτητές του Τμήματος Ηλεκτρονικής του Α.Τ.Ε.Ι. Λαμίας.

**Δρ. Βαρζάκας Παναγιώτης**  
**Φυσικός-Ραδιοηλεκτρολόγος (Μ.Sc.)**  
**Επίκουρος Καθηγητής**  
**Τμήμα Ηλεκτρονικής**  
**Τ.Ε.Ι. Λαμίας**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER
2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ
3. ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΠΛΑΤΟΥΣ
4. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ AM-DSB-LC
5. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ AM-DSB-SC
6. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ VSB
7. ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (FDMA)
8. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (ΜΙΞΗ)
9. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (FM)
10. ΜΕΓΕΘΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ AM ΚΑΙ FM ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
11. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ AM ΚΑΙ FM
12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
13. ΟΜΟΔΥΝΟΙ-ΥΠΕΡΕΤΕΡΟΔΥΝΟΙ ΔΕΚΤΕΣ
14. ΣΥΜΦΩΝΗ ΦΩΡΑΣΗ
15. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΔΕΚΤΩΝ
16. ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΛΗΨΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
17. ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ FM ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
18. ΛΟΓΟΣ ΣΗΜΑ ΠΡΟΣ ΘΟΡΥΒΟ ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ FM
19. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ
20. ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ
21. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

# 1. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER

## 1.1 Ιδιότητες μετασχηματισμού Fourier

Τα σήματα είναι δυνατόν να περιγραφτούν τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Η σειρά Fourier και ο μετασχηματισμός Fourier αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για την προηγούμενη περιγραφή. Ο μετασχηματισμός Fourier χρησιμοποιείται ευρέως για την μετατροπή οποιασδήποτε κυματομορφής από το πεδίο του χρόνου στην αντίστοιχη της στο πεδίο της συχνότητας και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ως γενίκευση του αναπτύγματος σε σειρά Fourier, [1].

Για ένα σήμα  $x(t)$  ο **μετασχηματισμός Fourier** (Fourier Transform, FT)  $X(f)$  του  $x(t)$  ορίζεται ως, [1]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (1.1)$$

ενώ αντίστοιχα το αρχικό σήμα  $x(t)$  μπορεί να προκύψει με τον **αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier** (Inverse Fourier Transform, IFT) ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση, [1]:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi f t} df \quad (1.2)$$

Ο μετασχηματισμός Fourier χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί το φασματικό περιεχόμενο ενός σήματος δηλαδή να πραγματοποιηθεί η *φασματική ανάλυση* (spectrum analysis) ενός σήματος. Δηλαδή να ευρεθούν οι διαφορετικές συχνότητες (ή η συχνότητα) από τις οποίες συνίσταται το προς μελέτη σήμα. Σημειώνεται ότι η αναπαράσταση οποιουδήποτε σήματος  $x(t)$  στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας  $X(f)$  είναι απόλυτα ισοδύναμες.

Ο μετασχηματισμός Fourier παρουσιάζει ιδιότητες χρήσιμες στη διαδικασία φασματικής ανάλυσης ενός σήματος και πολλές φορές στην πράξη πραγματοποιούμε συνδυασμό βασικών ιδιοτήτων του μετασχηματισμού Fourier ώστε να οδηγηθούμε στη φασματική ανάλυση του συγκεκριμένου σήματος. Μερικές από τις πιο συνηθισμένες και ιδιαίτερα χρήσιμες ιδιότητες του μετασχηματισμού Fourier παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Στην αριστερή στήλη του πίνακα εμφανίζεται το σήμα σε μαθηματική μορφή και στη δεξιά στήλη του πίνακα ο μετασχηματισμός Fourier που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο σήμα.

Μαθηματική έκφραση σήματος	Μετασχηματισμός Fourier σήματος
$x(t)$	$X(f)$
$x_1(t)$	$X_1(f)$
$x_2(t)$	$X_2(f)$
$x(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t)$ (διαμόρφωση)	$\frac{1}{2} \cdot X(f - f_0) + \frac{1}{2} \cdot X(f + f_0)$

$a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t)$ (γραμμικότητα)	$a_1 \cdot X_1(f) + a_2 \cdot X_2(f)$
$x(at)$ (κλιμάκωση)	$\frac{1}{ a } \cdot X\left(\frac{f}{a}\right)$
$x(t - t_0)$ (χρονική ολίσθηση)	$X(f) \cdot \exp(-j 2\pi f t_0)$
$\cos(2\pi f_c t)$	$\frac{1}{2} \delta(f - f_c) + \frac{1}{2} \delta(f + f_c)$
$A \cdot \delta(t - t_0)$	$A \cdot \exp(-j 2\pi f t_0)$
$\delta(t)$ (συνάρτηση Dirac) (συνάρτηση δέλτα)	1
$x(-t)$ (αναστροφή χρόνου)	$X(-f)$
$u(t)$ (step function) (συνάρτηση βήματος)	$\frac{1}{j2\pi f} + \frac{1}{2} \delta(f)$
$A \cdot \exp(-j 2\pi f_0 t)$	$A \cdot \delta(f - f_0)$
$\frac{d^n}{dt^n}(x(t))$ (παραγωγή σήματος)	$(j2\pi f)^n \cdot X(f)$

Στον προηγούμενο πίνακα, η έκφραση  $\delta(f)$  παριστάνει τη *συνάρτηση δέλτα (delta function)* ή διαφορετικά τη λεγόμενη *συνάρτηση Dirac* ή μοναδιαία κρουστική συνάρτηση η οποία ουσιαστικά είναι ένας κρουστικός παλμός στην αρχή του άξονα των συχνοτήτων ( $f=0$ ) ή αντίστοιχα ένας κρουστικός παλμός στην αρχή του άξονα του χρόνου ( $t=0$ ) ( $\delta(t)$ ),

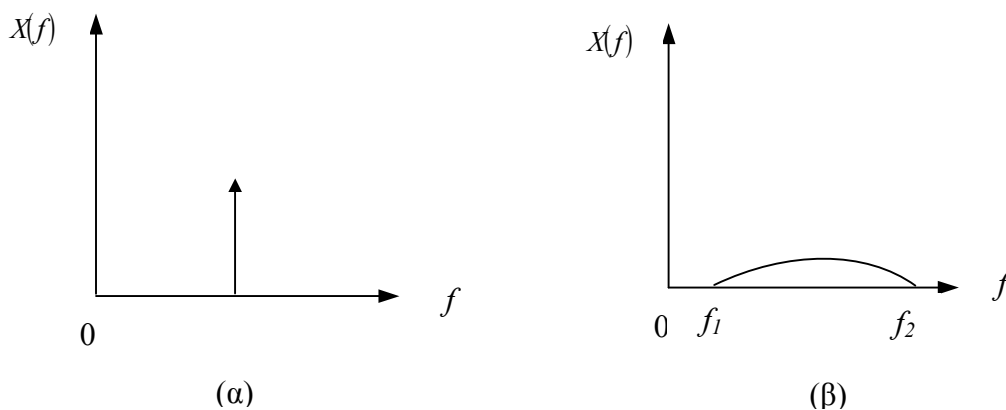
[1]. Επίσης, η έκφραση  $u(t)$  παριστάνει τη *συνάρτηση βήματος* (step function) ή *βηματική συνάρτηση*, η οποία ορίζεται από την επόμενη σχέση, [1]:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

Στον προηγούμενο πίνακα η χρονική ολίσθηση προς τον άξονα των θετικών χρόνων ( $t > 0$ ) αντιστοιχεί στην έκφραση  $(t - t_0)$  ενώ η αντίστοιχη χρονική ολίσθηση προς τον άξονα των αρνητικών χρόνων ( $t < 0$ ) αντιστοιχεί στην έκφραση  $(t + t_0)$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αντίστοιχες εκφράσεις ισχύουν για τις μετατοπίσεις στο πεδίο της συχνότητας δηλαδή αντίστοιχα οι εκφράσεις  $(f - f_0)$  και  $(f + f_0)$ .

## 1.2 ΣΥΝΕΧΗ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΑ ΦΑΣΜΑΤΑ

Η γραφική παράσταση του μετασχηματισμού Fourier ενός σήματος  $X(f)$  σε συνάρτηση με τη συχνότητα  $f$  μας δίνει μία εικόνα η οποία σε γενική περίπτωση ονομάζεται *φάσμα* του σήματος. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται δύο διαφορετικές εικόνες φασμάτων  $X(f)$  δύο διαφορετικών σημάτων  $x(t)$ .



**Σχήμα 1.2.1** Μορφές φασμάτων (α): διακριτό φάσμα σήματος (β): συνεχές φάσμα σήματος (από τη συχνότητα  $f_1$  έως και τη συχνότητα  $f_2$ ).

Στην περίπτωση που είναι δυνατό να διακρίνουμε από την ίδια τη μορφή του φάσματος ενός σήματος (ή ισοδύναμα από τη μαθηματική έκφραση του  $X(f)$ ) με ακρίβεια το πεπερασμένο πλήθος των διαφορετικών συχνοτήτων από τις οποίες συνίσταται το σήμα (δηλαδή τις φασματικές συνιστώσες του σήματος), τότε το φάσμα του σήματος ονομάζεται *διακριτό φάσμα* (discrete). Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση στην οποία δεν είναι δυνατόν να βρεθεί το πλήθος των συνιστωσών αυτών αλλά το φάσμα ενός σήματος εκτείνεται σε περιοχές συχνοτήτων (ή περιοχή συχνοτήτων) εμπεριέχοντας όλες τις συχνότητες των περιοχών (ή της περιοχής) τότε το φάσμα ονομάζεται *συνεχές* (continuous). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν έχει νόημα η αναπαράσταση του  $X(f)$  για αρνητικές τιμές συχνοτήτων διότι κάτι τέτοιο δεν έχει πρακτικό νόημα για τα συστήματα τηλεπικοινωνιών. Βέβαια, είναι συνηθισμένο μετά από τη μαθηματική ανάλυση, στην έκφραση του μετασχηματισμού  $X(f)$  να εμφανίζονται και όροι που αναφέρονται σε αρνητικές τιμές της συχνότητας. Τέλος, για την περίπτωση σημάτων με συνεχή φάσματα, αυτά εμφανίζονται σε εικόνες με γραμμοσκίαση ώστε να είναι εμφανές ότι το

συγκεκριμένο σήμα αναλύεται σε όλες τις συχνότητες της γραμμοσκιασμένης περιοχής και παρουσιάζει συνεχές φάσμα.

## 2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ (ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ AM)

Στη διαμόρφωση πλάτους (AM) παρουσιάζονται οι επόμενες κύριες περιπτώσεις εκπομπής με διαμόρφωση πλάτους, [3-5]:

- διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης (AM-DSB)
- διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης με συμπιεσμένο το φέρον (AM-DSB-SC)
- διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης (USB ή LSB)
- διαμόρφωση μερικώς κατεσταλμένης πλευρικής ζώνης (VSB).

Στη διαμόρφωση AM-DSB εκπέμπονται και οι δύο πλευρικές ζώνες συχνοτήτων και το φέρον σήμα με πλήρη ισχύ. Αποδεικνύεται ότι με το συγκεκριμένο είδος διαμόρφωσης έχουμε κατανάλωση ισχύος για την εκπομπή του φέροντος η οποία όμως δεν είναι χρήσιμη τελικά διότι η εκπεμπόμενη πληροφορία (σήμα μηνύματος) μεταφέρεται μέσω των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων στις οποίες στο συγκεκριμένο είδος διαμόρφωσης αποδίδεται μικρό ποσοστό της συνολικής διαθέσιμης ισχύος του πομπού. Για το λόγο αυτό προτιμάται η διαμόρφωση AM-DSB-SC δηλαδή με περιορισμό της ισχύος που αποδίδεται στο φέρον σήμα. Επίσης, γνωρίζουμε ότι η το εκπεμπόμενο σήμα φασματικά μεταφέρεται μέσω και των δύο πλευρικών ζωνών συχνοτήτων αλλά η εκπομπή από τον πομπό και των δύο πλευρικών ζωνών συχνοτήτων είναι περιττή σπατάλη εύρος ζώνης συχνοτήτων. Τελικά, προχωρούμε σε εκπομπή της μιας πλευρικής ζώνης συχνοτήτων και μέρος της αρχικής ισχύος του φέροντος κύματος.

## 3. ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΠΛΑΤΟΥΣ (AM)

Η Διεθνής Ένωση τηλεπικοινωνιών (*International Telecommunications Union, ITU*) καθόρισε τις παρακάτω ονομασίες για τις διαφορετικές περιπτώσεις διαμορφώσεων πλάτους (AM), [8]:

- A3E: εκπομπή και των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων και πλήρους του φέροντος δηλαδή χωρίς περιορισμό της ισχύος του φέροντος (χρησιμοποιείται στη ραδιοφωνία των μεσαίων και των βραχέων κυμάτων)
- R3E: εκπομπή της μίας πλευρικής ζώνης συχνοτήτων με υποβαθμισμένο (συμπιεσμένο το φέρον)(χρησιμοποιείται στη συχνότητα εκπομπής εκτάκτου ανάγκης των πλοίων)
- H3E: εκπομπή της μίας πλευρικής ζώνης συχνοτήτων με ολόκληρο το φέρον (εκπομπή της συνολικής ισχύος του φέροντος)
- J3E: εκπομπή της μίας πλευρικής ζώνης συχνοτήτων με υποβαθμισμένο το φέρον πλήρως (αποκοπή της ισχύος του φέροντος πλήρως)
- B8E: εκπομπή δύο ανεξάρτητων πλευρικών ζωνών συχνοτήτων με υποβαθμισμένο το φέρον (περιορισμός της ισχύος του φέροντος)
- C3F: εκπομπή της μίας πλευρικής ζώνης συχνοτήτων, πλήρους του φέροντος (πλήρης αποκοπή) και ενός μέρους της άλλης πλευρικής ζώνης συχνοτήτων (χρησιμοποιείται για την εκπομπή των τηλεοπτικών σημάτων).

## 4. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ AM-DSB-LC

### ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Πομπός AM-DSB-LC εκπέμπει σήμα ισχύος 24W όταν διαμορφωθεί με  $m=100\%$ . Να προσδιοριστεί η ισχύς εκπομπής όταν το βάθος διαμόρφωσης μειωθεί στο 60%, καταπιεσθεί η μία πλευρική ζώνη και το φέρον ελαττωθεί κατά 26dB.

Λύση:

Με δεδομένο ότι η συνολική αρχική εκπεμπόμενη ισχύς του σήματος AM-DSB-LC είναι ίση με 24W όταν ο δείκτης διαμόρφωσης είναι  $m=100\%$  (δηλαδή  $m=1$ ) ισχύει:

$$P_{AM-DSB-LC(m=1)} = P_c \cdot \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \quad (4.1)$$

όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι  $P_{AM-DSB-LC} = 24W$  και  $m=1$ . Συνεπώς από τη σχέση (4.1) λύνουμε ως προς  $P_c$  βρίσκοντας  $P_c=16W$ . Συνεπώς, στις δύο πλευρικές ζώνες συχνοτήτων του σήματος AM-DSB-LC κατανέμεται συνολική ισχύς ίση με:

$$P_{USB/LSB(m=1)} = P_{AM-DSB-LC(m=1)} - P_c = 24W - 16W = 8W \quad (4.2)$$

και σε κάθε μία από τις δύο πλευρικές ζώνες συχνοτήτων κατανέμεται ίδιο ποσοστό της συνολικής ισχύος ίσο με:

$$P_{USB(m=1)} = P_{LSB(m=1)} = \frac{P_{USB/LSB(m=1)}}{2} = 4W \quad (4.3)$$

Στη συνέχεια η άσκηση μας δίνει το δεδομένο ότι αλλάζουμε (μειώνουμε) το δείκτη διαμόρφωσης σε  $m' = 60\% = 0.6$ . Συνεπώς η σχέση (4.1) τροποποιείται όπως ακολουθεί:

$$P_{AM-DSB-LC(m'=0.6)} = P_c \cdot \left(1 + \frac{m'^2}{2}\right) \quad (4.4)$$

Η σχέση (4.4) μπορεί να γραφτεί και ως:

$$P_{AM-DSB-LC(m'=0.6)} = P_c + P_c \cdot \frac{m'^2}{2} = 16W + 16W \cdot \frac{0.6^2}{2} = 16W + 2 \cdot 1.44W \quad (4.5)$$

Από τη σχέση (4.5) μπορούμε να συμπεράνουμε άμεσα ότι η κάθε πλευρική ζώνη έχει ισχύ ίση με 1.44W, η οποία απορρίπτεται σύμφωνα με την εκφώνηση της άσκησης. Παράλληλα η ισχύς του φέροντος μειώνεται κατά 26dB, συνεπώς η τελική ισχύς του φέροντος μετά τη μείωση με ένα συντελεστή ίσο με  $10^{26/10}$  είναι ίση με:

$$P_c' = \frac{P_c}{10^{26/10}} = \frac{16W}{10^{2.6}} = \frac{16W}{398.1} = 0.04W \quad (4.6)$$

Τελικά, η ζητούμενη ισχύς μετά την αποκοπή της μίας πλευρικής ζώνης και τη μείωση της ισχύος του φέροντος βρίσκεται να είναι ίση με:

$$P_{τελ} = 1.44W + 0.04W = 1.480W \quad (4.7)$$



2. Σύστημα AM-DSB-LC εκπέμπει συνολική ισχύ 8KW όταν διαμορφώνεται από ένα ημιτονοειδές σήμα και πετυχαίνεται δείκτης διαμόρφωσης ίσος με 66.7%. Βρείτε:
- την ισχύ του φέροντος
  - το συντελεστή απόδοσης ισχύος του συγκεκριμένου πομπού
  - το πλάτος του φέροντος αν η κεραία εκπομπής ισοδυναμεί με μία ωμική αντίσταση ίση με 75Ω.

Λύση:

α) Εφαρμόζοντας τη σχέση (4.1) για δείκτη διαμόρφωσης ίσο με  $m=66.7\%=0.667$  υπολογίζουμε την ισχύ του φέροντος η οποία είναι ίση με:

$$P_c = \frac{P_{AM-DSB-LC}}{1 + \frac{m^2}{2}} = 6.54KW \quad (4.8)$$

β) Ο συντελεστής απόδοσης ισχύος μ ενός πομπού AM-DSB-LC εκφράζει το ποσοστό της ισχύος που αποδίδεται μετά τη διαμόρφωση στις πλευρικές ζώνες συχνοτήτων που παράγονται μετά τη διαμόρφωση. Από τον ορισμό του ο συντελεστής μ δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{P_{AM-DSB-LC} - P_c}{P_{AM-DSB-LC}} \quad (4.9)$$

Συνεπώς, για  $P_c=6.54KW$  και για  $P_{AM-DSB-LC} = 8KW$  από τη σχέση (4.9) βρίσκουμε το συντελεστή απόδοσης ισχύος του πομπού:  $\mu=0.18=18\%$ .

γ) Η ισχύς του φέροντος  $P_c$  είναι η ισχύς που εκπέμπεται μέσω της αντίστασης  $R=75\Omega$  και όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία κυκλωμάτων είναι η ισχύς που αντιστοιχεί στην ενεργό τιμή (rms power) του πλάτους  $A_{ενεργ}$ . Έτσι ισχύει:

$$P_c = \frac{A_{ενεργ}^2}{R} \quad (4.10)$$

Όμως το πλάτος ενός σήματος και η ενεργός τιμή του συνδέονται με τη σχέση:

$$A_{ενεργ} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (4.11)$$

Τελικά, η σχέση (4.10) λόγω της σχέσης (4.11) γίνεται:

$$P_c = \frac{A^2}{2R} \quad (4.12)$$

από την οποία με αντικατάσταση των τιμών βρίσκουμε ότι το πλάτος του φέροντος είναι ίσο με  $A=1095$  V.

3. Διαθέτουμε σήμα AM-DSB-LC με  $m=1$ . Υποβιβάζουμε το φέρον κατά 20dB αποκόπτουμε και τη μία πλευρική ζώνη και το αποτέλεσμα το οδηγούμε σε έναν ενισχυτή ισχύος με απολαβή ισχύος 20dB οπότε λαμβάνουμε στην έξοδο ισχύ ίση με 200W. Πόση είναι η ισχύς του φέροντος αρχικά;

Λύση:

Αν συμβολίσουμε την ισχύ του φέροντος στην είσοδο του ενισχυτή ισχύος με  $P_{in}$  τότε από τα δεδομένα της άσκησης ισχύει:

$$20dB = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (4.13)$$

όπου  $P_{out}=200W$ . Από τη σχέση (4.13) λύνοντας ως προς  $P_{in}$  βρίσκουμε:

$$\begin{aligned} \frac{20}{10} &= \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \Leftrightarrow \\ 2 &= \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \Leftrightarrow \\ 10^2 &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \Leftrightarrow P_{in} = \frac{P_{out}}{100} = \frac{200W}{100} = 2W \end{aligned} \quad (4.14)$$

Η ισχύς που υπολογίστηκε προηγουμένα είναι ίση με το άθροισμα της αρχικής ισχύος του φέροντος αφού έχει υποβιβαστεί κατά 20dB και της ισχύος της μίας πλευρικής ζώνης συχνοτήτων του σήματος AM-DSB-LC. Δηλαδή ισχύει:

$$\frac{P_c}{20dB} + P_{USB \text{ ή } LSB} = 2W \quad (4.15)$$

η οποία γράφεται ισοδύναμα:

$$\frac{P_c}{10^{10}} + P_{USB \text{ ή } LSB} = 2W \quad (4.16)$$

Όμως η ισχύς της κάθε μίας πλευρικής ζώνης συχνοτήτων (USB ή LSB) είναι ίση με:

$$P_{USB \text{ ή } LSB} = \frac{m^2}{4} \quad (4.17)$$

Άρα η σχέση (4.16) γίνεται δεδομένου ότι  $m=1$ :

$$\frac{P_c}{100} + \frac{P_c}{4} = 2W \quad (4.18)$$

από την οποία βρίσκουμε ότι η αρχική ισχύς του φέροντος είναι ίση με:

$$P_c = 7.7W \quad (4.19)$$

**4. Ένας ενισχυτής ισχύος μπορεί να δώσει στην έξοδό του ισχύ ίση με 10KW. Αν εκπέμπουμε με διαμόρφωση AM και με δείκτη διαμόρφωσης ίσο με 40%, να βρεθεί πως είναι κατανομημένη η ισχύς όταν έχουμε διαμόρφωση α) AM-DSB-LC β) AM-DSB-SC και γ) AM-SSB.**

Λύση:

α) Για την περίπτωση εκπομπής με ύπαρξη της πλήρους ισχύος του φέροντος AM-DSB-LC, η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$P_{AM-DSB-LC(m=0.4)} = P_c \cdot \left( 1 + \frac{m^2}{2} \right) \quad (4.20)$$

η οποία μπορεί να γραφτεί ισοδύναμα και με την παρακάτω μορφή:

$$P_{AM-DSB-LC(m=0.4)} = P_c + P_c \cdot \frac{m^2}{4} + P_c \cdot \frac{m^2}{4} \quad (4.21)$$

Συνεπώς, από τη σχέση (4.20) η ισχύς του φέροντος βρίσκεται να είναι ίση με:

$$P_c = \frac{P_{AM-DSB-LC(m=0.4)}}{\left(1 + \frac{m^2}{2}\right)} = \frac{10KW}{1 + \frac{0.4^2}{2}} = 9250W \quad (4.22)$$

Αντίστοιχα από τη σχέση (4.21) η ισχύς σε κάθε μία από τις πλευρικές ζώνες συχνοτήτων υπολογίζεται να είναι ίση με:

$$P_{USB \text{ ή } LSB(m=0.4)} = P_c \cdot \frac{m^2}{4} = 10KW \cdot \frac{0.4^2}{4} = 370W \quad (4.23)$$

β) Στην περίπτωση στην οποία αποκόπτουμε πλήρως το φέρον σήμα τότε η ισχύς που απομένει είναι η ισχύς των δύο πλευρικών ζωνών συχνοτήτων δηλαδή η συνολική ισχύς είναι τώρα ίση με:

$$2 \cdot P_{USB} = 2 \cdot P_{LSB} = 2 \cdot 370W = 740W \quad (4.24)$$

γ) Στην περίπτωση αυτή έχουμε αποκόψει πλήρως την ισχύ του φέροντος και της μίας πλευρικής ζώνης ολικά και έτσι η τελική συνολική ισχύς που απομένει είναι μόνο η ισχύς της μίας πλευρικής ζώνης δηλαδή ίση με 370W.

**5. Ένας πομπός AM-DSB-LC κατά την δοκιμαστική εκπομπή εκπέμπει μόνο το φέρον σήμα με ισχύ 9dB μικρότερη από την ισχύ της κανονικής εκπομπής. Κατά την κανονική εκπομπή η ισχύς της κάθε πλευρικής ζώνης συχνοτήτων είναι κατά 13dB μεγαλύτερη από την ισχύ του φέροντος. α) Να βρείτε το λόγο των πλατών του φέροντος κατά τις δύο προηγούμενες εκπομπές β) Εξηγήστε το λόγο για τον οποίο ενσωματώνεται το φέρον κατά την κανονική εκπομπή.**

*Λύση:*

Ας θεωρήσουμε ότι η ισχύς του φέροντος κατά την κανονική και κατά την δοκιμαστική εκπομπή είναι αντίστοιχα  $P_c$  και  $P_{c\Delta}$ . Επίσης, ας θεωρήσουμε ότι η ισχύς κάθε πλευρικής ζώνης και η συνολική ισχύς κατά την κανονική εκπομπή είναι αντίστοιχα  $P_s$  και  $P_t$ . Από την εκφώνηση της άσκησης ισχύουν οι σχέσεις:

$$-9dB = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{c\Delta}}{P_t} \right) \quad (4.25)$$

$$13dB = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{s\Delta}}{P_t} \right) \quad (4.26)$$

Επίσης, ισχύει για τη διαμόρφωση AM-DSB-LC ότι:

$$P_t = 2 \cdot P_s + P_c \quad (4.27)$$

Από τη σχέση (4.25) προκύπτει άμεσα ότι:

$$P_t = P_{c\Delta} \cdot 10^{0.9} = 8P_{c\Delta} \quad (4.28)$$

Αντίστοιχα από τη σχέση (4.26) προκύπτει άμεσα ότι:

$$P_s = P_c \cdot 10^{1.3} = 20P_c \quad (4.29)$$

Αν αντικαταστήσουμε τις σχέσεις (4.28) και (4.29) στη σχέση (4.27) τότε προκύπτει ότι:

$$8P_{c\Delta} = 41 \cdot P_c$$

$$\frac{P_{c\Delta}}{P_c} = \frac{41}{8} \quad (4.30)$$

Όμως για την περίπτωση ημιτονοειδών ή συνημιτονοειδών σημάτων η ισχύς και το πλάτος του σήματος συνδέονται με την επόμενη σχέση όπου  $R$  είναι η αντίσταση στην οποία εφαρμόζονται τα σήματα:

$$P = \frac{A^2}{2R} \quad (4.31)$$

Συνδυάζοντας τις δύο τελευταίες σχέσεις, προκύπτει ότι ο ζητούμενος λόγος  $k$  είναι ίσος με:

$$k = \left( \frac{P_{c\Delta}}{P_c} \right)^{1/2} = \left( \frac{41}{8} \right)^{1/2} \quad (4.32)$$

**6. Ένας ραδιοφωνικός σταθμός AM-DSB-LC εκπέμπει με συνολική μέση ισχύ 10KW. Ο δείκτης διαμόρφωσης έχει ρυθμιστεί σε 0.707 για ημιτονικό σήμα μηνύματος. Βρείτε την απόδοση ισχύος τα εκπομπής και τη μέση ισχύ της φέρουσας συνιστώσας του εκπεμπόμενου σήματος.**

*Λύση:*

Για ένα ημιτονικό σήμα μηνύματος με δείκτη διαμόρφωσης  $m=0.707$  το διαμορφωμένο σήμα AM-DSB-LC δίνεται από τη σχέση:

$$U_{AM-DSB-LC} = A_c \cdot (1 + 0.707 \cos \omega_x t) \cdot \cos(\omega_c t) \quad (4.33)$$

όπου  $A_c$  είναι το πλάτος του φέροντος,  $\omega_c$  είναι η κυκλική συχνότητα του φέροντος και  $\omega_x$  είναι η κυκλική συχνότητα του σήματος μηνύματος (πληροφορίας).

Γνωρίζουμε από τη θεωρία ότι η συνολική μέση εκπεμπόμενη ισχύς του σήματος AM-DSB-LC δίνεται από τη σχέση:

$$P_{AM-DSB-LC} = P_c \cdot \left( 1 + \frac{m^2}{2} \right) = P_c + P_{\text{πλευρ}} = P_c + P_c \cdot \frac{m^2}{4} + P_c \cdot \frac{m^2}{4} \quad (4.34)$$

Συνεπώς η ισχύς και των δύο πλευρικών ζωνών συνολικά δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{πλευρ}} = P_c \cdot \frac{m^2}{2} = P_c \cdot \frac{0.707^2}{2} = 0.25 \cdot P_c \quad (4.35)$$

Έτσι η συνολική μέση ισχύς είναι ίση με:

$$P_{AM-DSB-LC} = P_c + 0.25P_c = 10KW \quad (4.36)$$

Από την προηγούμενη σχέση βρίσκουμε τελικά την μέση ισχύ της φέρουσας συνιστώσας του εκπεμπόμενου σήματος να είναι ίση με  $P_c = 8KW$ .

Η απόδοση ισχύος του πομπού είναι το ποσοστό της ολικής εκπεμπόμενης ισχύος που μεταφέρει χρήσιμη πληροφορία και εκφράζεται από το συντελεστή απόδοσης ισχύος του πομπού  $\mu$ :

$$\mu = \frac{P_{\text{πλευρ}}}{P_{AM-DSB-LC}} = \frac{P_{AM-DSB-LC} - P_c}{P_{AM-DSB-LC}} \quad (4.37)$$

Συνεπώς, η σχέση (4.37) γίνεται:

$$\mu = \frac{P_{\text{πλευρ}}}{P_{\text{AM-DSB-LC}}} = \frac{0.25P_c}{P_c + 0.25P_c} = \frac{0.25}{1 + 0.25} = 0.2 = 20\% \quad (4.38)$$

**7. Το σήμα εξόδου από ένα διαμορφωτή AM-DSB-LC δίνεται από τη σχέση:**

$$u(t) = 5 \cos(1800\pi t) + 20 \cos(2000\pi t) + 5 \cos(2200\pi t) \quad (4.39)$$

**α) να βρείτε την έκφραση του σήματος πληροφορίας (μηνύματος) και του φέροντος σήματος**

**β) ποιος είναι ο δείκτης διαμόρφωσης;**

**γ) ποιος είναι ο λόγος της ισχύος στις πλευρικές ζώνες συχνοτήτων προς την ισχύ του φέροντος;**

*Λύση:*

Η σχέση (4.39) γράφεται ισοδύναμα:

$$u(t) = 5 \cos(2 \cdot 900\pi t) + 20 \cos(2 \cdot 1000\pi t) + 5 \cos(2 \cdot 1100\pi t) \quad (4.40)$$

Από την προηγούμενη σχέση παρατηρούμε ότι το σήμα AM-DSB-LC αποτελείται από τρεις συνιστώσες με συχνότητες αντίστοιχα 900Hz, 1000Hz και 1100Hz. Με δεδομένο ότι το σήμα που έχουμε είναι AM-DSB-LC, η πρώτη από τις προηγούμενες συχνότητες αποτελεί τη φέρουσα συχνότητα και οι δύο επόμενες αποτελούν την κάτω πλευρική ζώνη συχνοτήτων (LSB) και την άνω πλευρική ζώνη συχνοτήτων (USB) αντίστοιχα. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} f_c &= 1000\text{Hz} \\ f_c - f_m &= 900\text{Hz} \\ f_c + f_m &= 1100\text{Hz} \end{aligned} \quad (4.41)$$

Συνεπώς, από τις προηγούμενες σχέσεις (4.41) βρίσκουμε άμεσα ότι η συχνότητα του σήματος πληροφορίας είναι ίση με  $f_m = 100\text{Hz}$ . Τα πλάτη των σημάτων στη σχέση (4.40) από τη θεωρία είναι γνωστό ότι είναι ίσα με:

$$\begin{aligned} A_c &= 20V \\ \frac{A_c m}{2} &= 5V \end{aligned} \quad (4.42)$$

θυμίζοντας ότι η σχέση (4.40) μπορεί να γραφτεί και ως:

$$u(t) = 5 \cos(2 \cdot (1000 - 100)\pi t) + 20 \cos(2 \cdot 1000\pi t) + 5 \cos(2 \cdot (1000 + 100)\pi t) \quad (4.43)$$

η οποία αποτελεί γενική μορφή της έκφρασης στο πεδίο του χρόνου για ένα σήμα AM-DSB-LC:

$$u(t) = A_c \cos(2f_c \pi t) + \frac{A_c m}{2} \cdot \cos(2(f_c - f_m) \pi t) + \frac{A_c m}{2} \cdot \cos(2 \cdot (f_c + f_m) \pi t) \quad (4.44)$$

Άρα από τις σχέσεις (4.42) βρίσκουμε ότι:

$$\frac{A_c m}{2} = 5V \Leftrightarrow$$

$$m = \frac{10V}{20V} = 0.5 = 50\%$$
(4.45)

Επίσης, από τον ορισμό του δείκτη διαμόρφωσης  $m$  ισχύει:

$$m = \frac{A_m}{A_c}$$
(4.46)

και έτσι βρίσκουμε ότι  $A_m = m \cdot A_c = 0.5 \cdot 20V = 10V$ .

Έτσι τελικά η έκφραση για το φέρον σήμα είναι η επόμενη:

$$c(t) = A_c \cdot \cos(2\pi f_c t) = 20V \cdot \cos(2\pi 1000t)$$
(4.47)

και για το σήμα μηνύματος:

$$m(t) = A_m \cdot \cos(2\pi f_m t) = 10V \cdot \cos(2\pi 100t)$$
(4.48)

## 5. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ AM-DSB-SC

### ΑΣΚΗΣΕΙΣ

#### 1. Σας δίνεται το σήμα μηνύματος:

$$f(t) = 2 \cos(100\pi t) + \cos(400\pi t)$$

**(σήμα διαμόρφωσης) το οποίο εφαρμόζεται στην είσοδο ενός διαμορφωτή AM-DSB-SC ο οποίος λειτουργεί σε φέρουσα συχνότητα 1KHz. Να βρείτε τη φασματική κατανομή στην έξοδο του διαμορφωτή.**

*Λύση:*

Το σήμα μηνύματος που μας δίνεται μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$f(t) = 2 \cos(2 \cdot 50\pi t) + \cos(2 \cdot 200\pi t)$$

από την οποία παρατηρούμε ότι αποτελείται από δύο διακριτές συχνότητες:

$$f_1 = 50\text{Hz} \text{ και } f_2 = 200\text{Hz}$$

Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι ένα σήμα AM-DSB-SC έχει την παρακάτω μορφή:

$$c_{AM-DSB-SC}(t) = f(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$$
(5.1)

(πολλαπλασιασμός του σήματος πληροφορίας με ένα συνημιτονικής ή ημιτονικής μορφής φέρον σήμα) όπου στη προηγούμενη σχέση  $f_c$  είναι η συχνότητα του φέροντος και  $f(t)$  το σήμα μηνύματος. Η σχέση (5.1) για τη συγκεκριμένη άσκηση μετατρέπεται όπως ακολουθεί:

$$c_{AM-DSB-SC}(t) = [2 \cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)] \cdot \cos(2\pi f_c t)$$
(5.2)

Από τη τριγωνομετρία ισχύει η επόμενη ταυτότητα:

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot \{\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)\}$$
(5.3)

Χρησιμοποιώντας την προηγούμενη τριγωνομετρική ταυτότητα η σχέση (5.2) γίνεται:

$$\begin{aligned}
c_{AM-DSB-SC}(t) &= [2 \cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)] \cdot \cos(2\pi f_c t) = \\
&= 2 \cdot \frac{1}{2} \{ \cos(2\pi(f_c + f_1)t) + \cos(2\pi(f_c - f_1)t) \} + \\
&\quad + \frac{1}{2} \{ \cos(2\pi(f_c + f_2)t) + \cos(2\pi(f_c - f_2)t) \}
\end{aligned} \tag{5.4}$$

Από τον τελευταίο όρο της σχέσης (5.4), μπορούμε να συμπεράνουμε άμεσα ότι η φασματική κατανομή του σήματος AM-DSB-SC αποτελείται από τις επόμενες συχνότητες:

$$\begin{aligned}
f_c + f_1 &= 1.05 \text{ KHz} \\
f_c - f_1 &= 0.95 \text{ KHz} \\
f_c + f_2 &= 1.20 \text{ KHz} \\
f_c - f_2 &= 0.80 \text{ KHz}
\end{aligned} \tag{5.5}$$

**2. Ένα σήμα AM-DSB-SC έχει προκύψει από τη διαμόρφωση από το επόμενο σήμα μηνύματος:**

$$m(t) = 2 \cos(2000\pi t) + \cos(6000\pi t)$$

**Το διαμορφωμένο σήμα AM-DSB-SC έχει τη μορφή:**

$$u(t) = 100 \cdot m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$$

όπου η συχνότητα του φέροντος είναι ίση με  $f_c = 1 \text{ MHz}$ .

**α) ποιο είναι το φάσμα του AM-DSB-SC σήματος;**

**β) ποια είναι η μέση ισχύ για τις διάφορες συνιστώσες συχνότητας του σήματος AM-DSB-SC ;**

*Λύση:*

α) Από την εξίσωση που μας δίνεται για το διαμορφωμένο AM-DSB-SC σήμα:

$$u(t) = 100 \cdot m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \tag{5.6}$$

μπορούμε άμεσα να βρούμε το πλάτος του φέροντος σήματος αφού το σήμα AM-DSB-SC προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του σήματος μηνύματος με το φέρον σήμα. Συνεπώς, από τη σχέση (5.6), βρίσκουμε ότι  $A_c = 100V$ .

Αν στη σχέση (5.6) αντικαταστήσουμε την έκφραση για το σήμα μηνύματος που μας δίνεται, έχουμε ότι:

$$u(t) = 100 \cdot [2 \cos(2 \cdot 1000\pi t) + \cos(2 \cdot 3000\pi t)] \cdot \cos(2\pi 10^6 t) \tag{5.7}$$

η οποία λόγω της τριγωνομετρικής ταυτότητας (5.3) γίνεται:

$$\begin{aligned}
u(t) &= 100 \cdot [2 \cos(2 \cdot 1000\pi t) + \cos(2 \cdot 3000\pi t)] \cdot \cos(2\pi 10^6 t) = \\
&= 2 \cdot 100 \cos(2\pi 10^6 t) \cos(2 \cdot 1000\pi t) + 100 \cos(2 \cdot 3000\pi t) \cos(2\pi 10^6 t) = \\
&= 100 \cos(2\pi(10^6 + 1000)t) + 100 \cos(2\pi(10^6 - 1000)t) + \\
&\quad + 50 \cos(2\pi(10^6 + 3000)t) + 50 \cos(2\pi(10^6 - 3000)t)
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Από την προηγούμενη σχέση και παρατηρώντας τους τέσσερις διακριτούς όρους συχνότητας συμπεραίνουμε ότι το φάσμα του σήματος AM-DSB-SC αποτελείται από τις επόμενες τέσσερις συχνότητες:

$$\begin{aligned} f_c + f_1 &= (10^6 + 1000) \text{ Hz} && (1^{\text{η}} \text{ άνω πλευρική συχνότητα}) \\ f_c - f_1 &= (10^6 - 1000) \text{ Hz} && (1^{\text{η}} \text{ κάτω πλευρική συχνότητα}) \\ f_c + f_2 &= (10^6 + 3000) \text{ Hz} && (2^{\text{η}} \text{ άνω πλευρική συχνότητα}) \\ f_c - f_2 &= (10^6 - 3000) \text{ Hz} && (2^{\text{η}} \text{ κάτω πλευρική συχνότητα}) \end{aligned}$$

β) Είναι γνωστό ότι αν ένα σήμα ημιτονικής ή συνημιτονικής μορφής έχει πλάτος  $A$  τότε η μέση ισχύς είναι ίση με:

$$P = \frac{A^2}{2R} \quad (5.9)$$

και στη περίπτωση που η ωμική αντίσταση  $R$  είναι μοναδιαία ( $R=1\Omega$ ) τότε η προηγούμενη σχέση τροποποιείται ως εξής:

$$P_{(R=1\Omega)} = \frac{A^2}{2} \quad (5.10)$$

Συνεπώς, οι τέσσερις διακριτές συχνότητες που προέκυψαν από το προηγούμενο ερώτημα έχουν αντίστοιχα μέση ισχύ:

$$f_c + f_1 = (10^6 + 1000) \text{ Hz} \quad \longrightarrow \quad \text{Μέση ισχύς: } \frac{100^2}{2}$$

$$f_c - f_1 = (10^6 - 1000) \text{ Hz} \quad \longrightarrow \quad \text{Μέση ισχύς: } \frac{100^2}{2}$$

$$f_c + f_2 = (10^6 + 3000) \text{ Hz} \quad \longrightarrow \quad \text{Μέση ισχύς: } \frac{50^2}{2}$$

$$f_c - f_2 = (10^6 - 3000) \text{ Hz} \quad \longrightarrow \quad \text{Μέση ισχύς: } \frac{50^2}{2}$$

## 6. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ VSB

Στη διαμόρφωση μερικώς κατεσταλμένης πλευρικής ζώνης συχνοτήτων (Vestigial Side Band, VSB) αντί να εκπέμπουμε όλη τη μία πλευρική ζώνη συχνοτήτων ενός σήματος AM-SSB (AM-USB ή AM-LSB) εκπέμπουμε μόνο ένα τμήμα αυτής, [9]. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα παρακάτω:

- μικρότερο απαιτούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων σε σχέση με το σήμα AM-DSB ή το σήμα AM-USB(LSB)
- ικανοποιητικότερη απόδοση της ισχύος που διατίθεται δηλαδή καλύτερη απόδοση ισχύος
- μείωση της πολυπλοκότητας των χρησιμοποιούμενων κυκλωμάτων
- καλύτερη απόκριση στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων από ότι το AM-SSB.

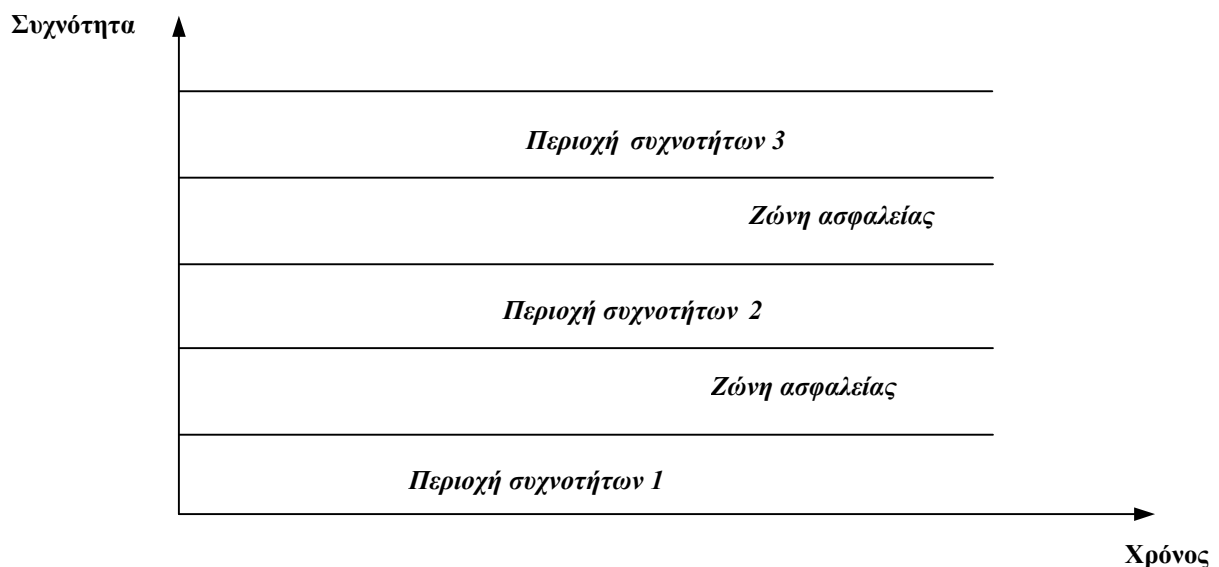


Η διαμόρφωση VSB βρίσκει εφαρμογές σε συστήματα τα οποία παρουσιάζουν μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων και τα οποία έχουν σημαντική ισχύ στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων (π.χ. τηλεοπτικό σήμα, σήμα fax, data).

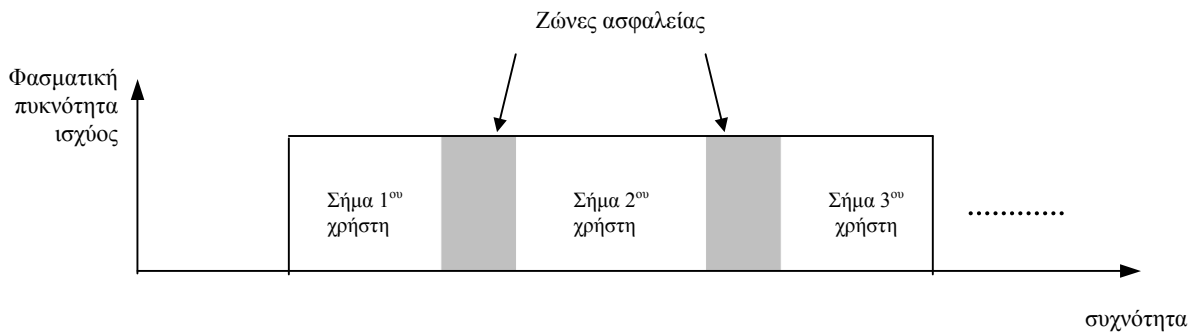
## 7. ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (FDMA)

Οι τεχνικές πολυπλεξίας (multiplexing techniques) αποτελούν μία πρόταση για την αποδοτική εκμετάλλευση των πόρων ενός τηλεπικοινωνιακού καναλιού ή των διατάξεων ενός τηλεπικοινωνιακού κέντρου. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών πολυπλεξίας είναι η δυνατότητα να μοιράζονται οι πόροι ενός τηλεπικοινωνιακού καναλιού σε διαφορετικούς χρήστες, [7].

Η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας είναι η μέθοδος με την οποία διαφορετικά σήματα πληροφορίας συνδυάζονται κατάλληλα ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη εκπομπή τους από ένα και μόνο κοινό κανάλι (μέσο μετάδοσης). Έτσι, ο διαχωρισμός των διαφορετικών σημάτων γίνεται στο πεδίο της συχνότητας. Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η αρχή της μεθόδου, όπου οι διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων παραμένουν σταθερές με την πάροδο του χρόνου και διαχωρίζονται μεταξύ τους με ζώνες ασφαλείας (guard bands). Είναι φανερό ότι κάθε εκπεμπόμενο σήμα, καταλαμβάνει συγκεκριμένη σταθερή περιοχή συχνοτήτων σταθερά στο χρόνο και οι ζώνες συχνοτήτων ασφαλείας έχουν σκοπό τα διάφορα σήματα να μην επικαλύπτονται, γεγονός που θα οδηγούσε στην εμφάνιση παρεμβολής μεταξύ των γειτονικών σε συχνότητα καναλιών (Adjacent Channel Interference, ACI). Το φαινόμενο ονομάζεται επίσης και διαφωνία (cross talk) και οφείλεται στο ότι δεν είναι δυνατός ο τέλει διαχωρισμός των σημάτων μεταξύ τους λόγω μη τέλει φασματικής συμπεριφοράς των αντίστοιχων φίλτρων. Στην περίπτωση, που σε καθεμία από τις ξεχωριστές περιοχές συχνοτήτων παραχωρείται σε ένα διαφορετικό χρήστη ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος για την εκπομπή του σήματος πληροφορίας του, τότε υλοποιείται η μέθοδος πολλαπλής προσπέλασης στο πεδίο της συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA) (Σχήμα 7.2).



Σχήμα 7.1 Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM).



**Σχήμα 7.2** Πολλαπλή προσπέλαση στο πεδίο της συχνότητας (FDMA).

Όπως ήδη αναφέρθηκε, προκειμένου να αποφύγουμε το φαινόμενο της διαφωνίας χρησιμοποιούμε ζώνες ασφαλείας συχνοτήτων μεταξύ των διαφορετικών σημάτων. Το συνολικό εύρος ζώνης συχνοτήτων  $B_{FDMA}$  που απαιτείται δίνεται από τη σχέση:

$$B_{FDMA} = n \cdot (B_s + B_g) \quad (7.1)$$

όπου  $n$  είναι το πλήθος των καναλιών (σημάτων) που πολυπλέκονται,  $B_s$  είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων που καταλαμβάνει καθένα από τα πολυπλεγμένα κανάλια (σήματα) και  $B_g$  είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων της ζώνης ασφαλείας μεταξύ των πολυπλεγμένων καναλιών.

Η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας βρίσκει εφαρμογή στα δίκτυα τηλεφωνικών σημάτων, σε συστήματα τηλεμετρίας, σε συστήματα ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών εκπομπών και σε επικοινωνιακά δίκτυα.

### Παράδειγμα:

Εκατό διακριτά τηλεφωνικά κανάλια (σήματα) πολυπλέκονται με διαίρεση συχνότητας έτσι ώστε η ζώνη ασφαλείας μεταξύ τους να είναι  $200\text{Hz}$ . Το συνολικό σήμα που προκύπτει διαμορφώνει κατά συχνότητα ένα μικροκυματικό σήμα συχνότητας  $1\text{GHz}$ . Αν ο δείκτης διαμόρφωσης προκύπτει να είναι ίσος με 3 και το εύρος ζώνης κάθε τηλεφωνικού καναλιού είναι  $3.8\text{KHz}$ , να βρείτε ποιο είναι το συνολικό απαιτούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων για την εκπομπή του σήματος FM.

*Λύση:*

Εφαρμόζουμε τη σχέση (7.1) για  $n=100$ ,  $B_s=3.8\text{KHz}$  και  $B_g=200\text{Hz}$  και έτσι βρίσκουμε ότι το συνολικό εύρος ζώνης συχνοτήτων του σήματος που θα εκπέμψουμε στη συνέχεια με διαμόρφωση FM είναι ίσο με  $B_{FDMA} = n \cdot (B_s + B_g) = 400\text{KHz}$ .

Για να υπολογίσουμε συνολικό απαιτούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων για την εκπομπή του σήματος FM, θα χρησιμοποιήσουμε το νόμο (κανόνα) του Carson:

$$B_{FM} = 2 \cdot (1 + \beta) \cdot f_m \quad (7.2)$$

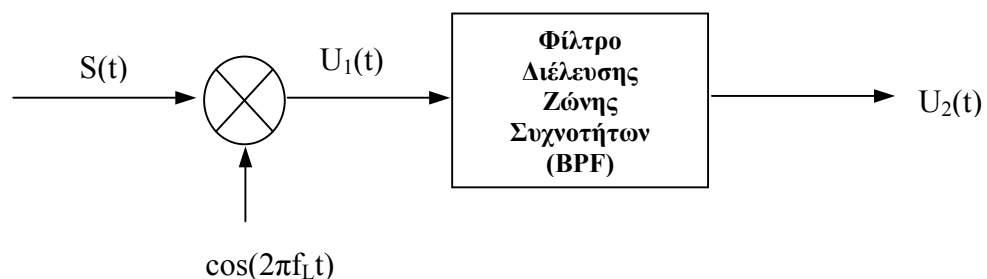
αλλά ως τιμή συχνότητας της  $f_m$  θα θέσουμε το εύρος ζώνης συχνοτήτων του συνολικού συστήματος  $B_{FDMA}$ . Έτσι, από τη σχέση (7.2) και για  $\beta=3$ , βρίσκουμε ότι:  $B_{FM} = 2400\text{KHz}$ .

## 8. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (ΜΙΞΗ)

Πολλές φορές είναι απαραίτητο να μετατοπίσουμε το φάσμα ενός διαμορφωμένου σήματος σε μία νέα περιοχή συχνοτήτων δηλαδή να μην αλλάξουμε τη μορφή του φάσματος του διαμορφωμένου σήματος αλλά να το μετατοπίσουμε γύρω από μία νέα φέρουσα συχνότητα  $f_c$  η οποία μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της αρχικής.

Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *μίξη* και εφαρμόζεται στους υπερετερόδυνους δέκτες AM και FM. Η μίξη πετυχαίνεται με πολλαπλασιασμό του σήματος που θέλουμε να μετατοπίσουμε φασματικά, με μία συχνότητα τοπικά παραγόμενη, κατάλληλης τιμής δηλαδή με το πολλαπλασιασμό της με το σήμα εξόδου ενός τοπικού ταλαντωτή με κατάλληλα υπολογισμένη συχνότητα εξόδου  $f_L$ . Επίσης, είναι απαραίτητο

Θα δώσουμε στη συνέχεια ένα παράδειγμα στο οποίο στόχος μας είναι να μετατοπίσουμε το φάσμα ενός σήματος AM-DSB-SC από τη συχνότητα  $f_c$  στη συχνότητα  $f_o < f_c$ . Η διάταξη της μίξης παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 8.1 Διαδικασία μίξης.

Η είσοδος στο μίκτη είναι σήμα AM-DSB-SC δηλαδή είναι της μορφής:

$$s(t) = m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (8.1)$$

όπου  $m(t)$  είναι το σήμα μηνύματος (πληροφορίας) και  $f_c$  είναι η αρχική συχνότητα του φέροντος. Το σήμα εξόδου του τοπικού ταλαντωτή έχει τη μορφή:

$$U_{LO}(t) = \cos(2\pi f_L t) \quad (8.2)$$

όπου  $f_L$  είναι η συχνότητα εξόδου του και θεωρώντας μοναδιαίο πλάτος. Τα δύο προηγούμενα σήματα οδηγούνται στον πολλαπλασιαστή από τον οποίο προκύπτει:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= [m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)] \cdot \cos(2\pi f_L t) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot m(t) \cdot \cos(2\pi(f_c - f_L)t) + \frac{1}{2} \cdot m(t) \cdot \cos(2\pi(f_c + f_L)t) \end{aligned} \quad (8.3)$$

χρησιμοποιώντας τη τριγωνομετρική ταυτότητα (5.3). Παρατηρούμε ότι και οι δύο όροι του αθροίσματος της σχέσης (8.3) αποτελούν σήματα AM-DSB-SC σε φέρουσες συχνότητες αντίστοιχα  $(f_c - f_L)$  και  $(f_c + f_L)$ . Αν επιλέξουμε  $f_L$  κατάλληλη ώστε να ισχύει:

$$f_c - f_L = f_0 \quad (8.4)$$

τότε μετά τη διέλευση του σήματος  $U_1(t)$  από το φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων (με κεντρική συχνότητα την  $f_c - f_L = f_0$ ) απορρίπτεται ο πρώτος όρος του αθροίσματος της (8.4) και απομένει στην έξοδο τελικά μόνο ο όρος:

$$U_2(t) = \frac{1}{2} \cdot m(t) \cdot \cos(2\pi(f_c - f_L)t) = \frac{1}{2} m(t) \cdot \cos(2\pi(f_o)t) \quad (8.5)$$

Παρατηρώντας τη σχέση (8.5), συμπεραίνουμε ότι το αρχικό σήμα  $s(t)$  έχει μετατοπιστεί φασματικά γύρω από μία νέα συχνότητα φέροντος και συγκεκριμένα την  $f_c - f_L = f_o$ , βέβαια με έναν υποβιβασμό στο πλάτος που προέκυψε από την διαδικασία του πολλαπλασιασμού. Δηλαδή επιλέγοντας κατάλληλα την  $f_L$  μπορούμε να μετατοπίσουμε στην επιθυμητή περιοχή το φάσμα του σήματος AM-DSB-SC.

### Παράδειγμα:

Έστω ότι διαθέτουμε σήμα AM-DSB-SC στο οποίο η συχνότητα του φέροντος  $f_c$  μεταβάλλεται από  $0.535\text{MHz}$  έως  $1.605\text{MHz}$ . Να βρεθεί σε ποια περιοχή συχνοτήτων θα πρέπει να μεταβάλλεται η συχνότητα εξόδου του τοπικού ταλαντωτή που θα χρησιμοποιήσουμε στο μίκτη ώστε το συγκεκριμένο φάσμα να μετατοπιστεί σε περιοχή συχνοτήτων με τα  $0.455\text{MHz}$ .

Λύση:

Μας δίνεται ότι:  $0.535\text{MHz} < f_c < 1.605\text{MHz}$  και ότι  $f_c - f_L = 0.455\text{MHz}$ . Από τις δύο αυτές σχέσεις έχουμε ότι:

$$f_L = f_c - 0.455\text{MHz} \quad (8.6)$$

Τη σχέση (8.6) θα την εφαρμόσουμε για τις δύο ακραίες τιμές που λαμβάνει η φέρουσα συχνότητα  $f_c$ . Έτσι έχουμε:

$$\text{για } f_c = 0.535\text{MHz} \Rightarrow f_L = 0.08\text{MHz} \quad (8.7)$$

$$\text{για } f_c = 1.605\text{MHz} \Rightarrow f_L = 1.15\text{MHz}$$

Τελικά, από τις σχέσεις (8.7) βλέπουμε ότι η συχνότητα εξόδου του τοπικού ταλαντωτή που θα χρησιμοποιήσουμε στο μίκτη πρέπει να λαμβάνει τιμές στο διάστημα:

$$0.08\text{MHz} < f_L < 1.15\text{MHz}$$

## 9. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (FM)

### ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Δίνεται σήμα FM από την επόμενη σχέση:

$$\varphi(t) = 20 \cdot \cos \left[ 2\pi 10^7 t + 10 \cdot \sin (2\pi 10^3 t) \right]$$

το οποίο και εφαρμόζεται σε μία ωμική αντίσταση  $R=50\Omega$ .

α) ποιο είναι η μέση ισχύς του σήματος FM;

β) ποιο είναι το ποσοστό της ισχύος του σήματος FM που κατανέμεται στη συχνότητα των  $10\text{MHz}$ ;

γ) ποια είναι η μέγιστη απόκλιση συχνότητας;

δ) ποιο είναι το εύρος ζώνης του σήματος FM; (δίνεται ότι:  $J_0(10) = -0.2459$ ).

Λύση:

α) Το σήμα FM που μας δίνεται είναι στη γενική μορφή ενός σήματος FM η οποία είναι η:

$$U_{FM}(t) = A_c \cdot \cos[2\pi f_c t + \beta \cdot \sin(2\pi f_m t)] \quad (9.1)$$

από την οποία για την περίπτωση που μας δίνεται στη συγκεκριμένη άσκηση, βρίσκουμε απευθείας ότι:

$$A_c = 20V, f_c = 10^7 \text{ Hz} = 10 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 10\text{MHz}, \beta = 10 \text{ και } f_m = 10^3 \text{ Hz} = 10\text{KHz} \quad (9.2)$$

δηλαδή βρίσκουμε αντίστοιχα το πλάτος του φέροντος, τη συχνότητα του φέροντος, το δείκτη διαμόρφωσης και τη συχνότητα του σήματος μηνύματος (πληροφορίας). Η μέση ισχύς  $P_{av}$  του σήματος FM, είναι ίση με:

$$P_{av} = \frac{A_c^2}{2R} \quad (9.3)$$

όπου  $R$  η αντίσταση στην οποία εφαρμόζεται το σήμα FM (θεωρούμε μοναδιαία αντίσταση δηλαδή  $R=1\Omega$ ) και έτσι  $P_{av}=4\text{W}$ .

β) Η φέρουσα συχνότητα είναι ίση με  $f_c = 10\text{MHz}$ . Η συχνότητα αυτή έχει πλάτος  $A_c \cdot J_0(\beta)$  και έτσι παρουσιάζει ενεργό ισχύ σε αντίσταση  $R$  ίση με:

$$\frac{A_c^2}{2R} \quad (9.4)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία της διαμόρφωσης FM, το ποσοστό της συνολικής ισχύος  $P_{av}$  που κατανέμεται στην  $f_c$  δίνεται από τη σχέση:

$$P_{av} \cdot |J_0^2(\beta)| = \frac{A_c^2}{2R} \cdot |J_0^2(\beta)| \quad (9.5)$$

Αν θεωρήσουμε μοναδιαία αντίσταση δηλαδή  $R=1\Omega$ , τότε η προηγούμενη σχέση δεδομένου ότι  $\beta=10$ , μας δίνει ότι η ισχύς στη φέρουσα (συχνότητα των  $10\text{MHz}$ ) είναι ίση με  $0.241\text{W}$ .

γ) Η μέγιστη απόκλιση συχνότητας  $\Delta f$  (η οποία εκφράζει τη μέγιστη απόκλιση συχνότητας από τη φέρουσα συχνότητα) δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$\Delta f = \beta \cdot f_m \quad (9.6)$$

η οποία για τις συγκεκριμένες τιμές της άσκησης μας δίνει  $\Delta f=10\text{KHz}$ .

δ) Για να υπολογίσουμε το εύρος ζώνης του σήματος FM θα εφαρμόσουμε το νόμο του Carson για δείκτη διαμόρφωσης  $\beta=10$  και για συχνότητα μηνύματος  $f_m = 10\text{KHz}$ . Έτσι έχουμε:

$$B_{FM} = 2 \cdot (1 + \beta) \cdot f_m \quad (9.7)$$

η οποία μας δίνει  $B_{FM}=22\text{KHz}$ .

**2. Ο επιθυμητός δείκτης διαμόρφωσης σε μία ζεύξη με διαμόρφωση FM είναι μεγαλύτερος του 3 ενώ η φέρουσα συχνότητα μεταφέρει μηδενική ισχύ. Αν το σήμα που προκαλεί τη διαμόρφωση έχει συχνότητα ίση με  $5\text{KHz}$ , ποιο είναι το ελάχιστο εύρος ζώνης συχνοτήτων της προηγούμενης ζεύξης;**

Λύση:

Η εκφώνηση της άσκησης μας δίνει ότι η ισχύς που κατανέμεται στη φέρουσα συχνότητα είναι μηδενική. Γνωρίζουμε ότι το ποσοστό της συνολικής μέσης ισχύος που κατανέμεται στη φέρουσα δίνεται από τη σχέση:

$$P_{av} \cdot |J_0^2(\beta)| \quad (9.8)$$

Έτσι, για να μηδενιστεί η σχέση (9.8) θα πρέπει να μηδενιστεί ο όρος  $|J_0^2(\beta)|$  δηλαδή συνεπώς να μηδενιστεί το  $J_0(\beta)$ . Δηλαδή θα πρέπει να βρούμε για ποιες τιμές του  $\beta$  μηδενίζεται η συνάρτηση  $J_0(\beta)$ . Από τη γραφική παράσταση της σελίδας.... του βιβλίου της θεωρίας, παρατηρούμε ότι μηδενισμός της  $J_0(\beta)$  γίνεται για διάφορες τιμές του  $\beta=2.4, 5.52, \dots$ . Όμως η άσκηση μας περιορίζει λέγοντας ότι ο δείκτης διαμόρφωσης είναι μεγαλύτερος του 3. Συνεπώς, η μικρότερη τιμή του  $\beta$  για την οποία έχουμε μηδενισμό της  $J_0(\beta)$  είναι η  $\beta=5.52$ . Για να υπολογίσουμε το εύρος ζώνης του σήματος FM (είναι το ελάχιστο διότι θεωρήσαμε τη μικρότερη τιμή του  $\beta$ ), χρησιμοποιούμε το νόμο του Carson:

$$B_{FM} = 2 \cdot (1 + \beta) \cdot f_m \quad (9.9)$$

η οποία μας δίνει  $B_{FM}=65.2\text{KHz}$ .

**3. Ένας μηχανικός τηλεπικοινωνιών ισχυρίζεται ότι προχωρά σε διαμόρφωση κατά συχνότητα ένα φέρον  $f_c = 100\text{MHz}$  με σήμα διαμόρφωσης  $f_m = 10\text{KHz}$ . Στη συνέχεια μειώνει συνεχώς το πλάτος  $A_m$  της συχνότητας  $f_m$  πετυχαίνοντας μέγιστη απόκλιση συχνότητας ίση με  $\Delta f=10\text{Hz}$ . Με τη συγκεκριμένη κατάσταση δηλώνει ότι το απαιτούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων είναι ίσο με  $B = 20\text{Hz}$ . Να δικαιολογήσετε με απόδειξη αν ο ισχυρισμός του μηχανικού είναι σωστός.**

Λύση:

Για να υπολογίσουμε το εύρος ζώνης συχνοτήτων για τη συγκεκριμένη εκπομπή FM, θα πρέπει να βρούμε κατ' αρχήν την τιμή του δείκτη διαμόρφωσης  $\beta$ :

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{10\text{Hz}}{10\text{KHz}} = 0.001 \quad (9.10)$$

Συνεπώς, επειδή η τιμή του  $\beta$  που βρέθηκε είναι:  $\beta \ll 1$ , το συγκεκριμένο σύστημα εκπομπής FM είναι περιορισμένου εύρους ζώνης συχνοτήτων (NBFM) και έτσι το εύρος ζώνης συχνοτήτων  $B_{FM}$  που απαιτεί ισούται με εκείνο ενός AM-DSB-LC σήματος και άρα δίνεται από τη σχέση:

$$B_{NBFM} = 2 \cdot f_m = 20\text{KHz} \quad (9.11)$$

Από το προηγούμενο αποτέλεσμα, αποδεικνύουμε ότι ο ισχυρισμός του μηχανικού σχετικά με το εύρος ζώνης του συγκεκριμένου σήματος FM είναι λανθασμένος.

**4. Σήμα FM έχει δείκτη διαμόρφωσης ίσο με 1, συχνότητα διαμόρφωσης 200Hz και συχνότητα φέροντος 10MHz. Το συγκεκριμένο σήμα εισάγεται σε ένα ιδανικό φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων με κεντρική συχνότητα διέλευσης 10MHz και εύρος ζώνης συχνοτήτων διέλευσης 500Hz. Να προσδιορίσετε το φάσμα του σήματος στην**

έξοδο του φίλτρου. Σας δίνονται οι τιμές της συνάρτησης Bessel:  $J_0(1) = 0.77$ ,  $J_1(1) = 0.44$ ,  $J_2(1) = 0.11$ ,  $J_3(1) = 0.02$ .

Λύση:

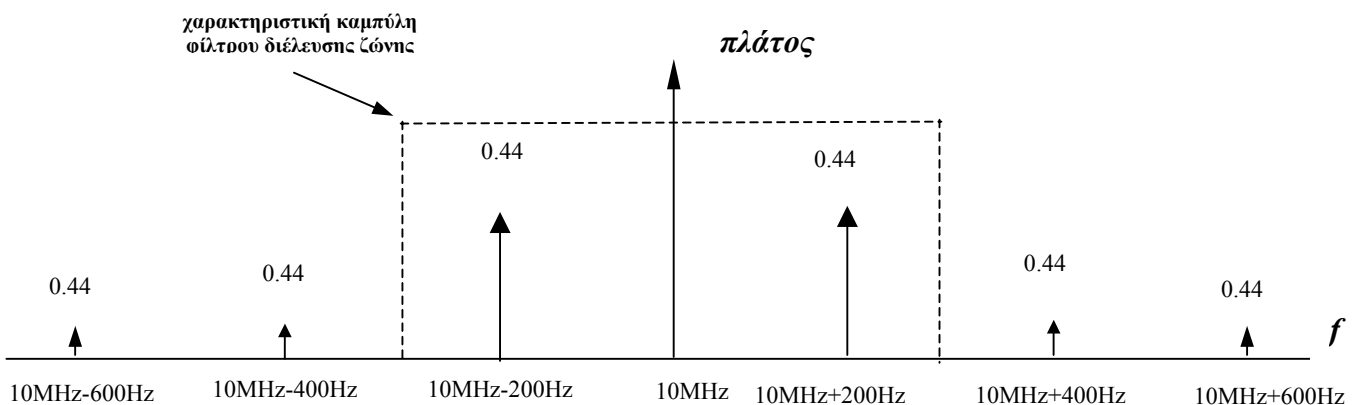
Αφού μας δίνεται η τιμή του δείκτη διαμόρφωσης  $\beta$  έχουμε μέσω του ορισμού του:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} \Rightarrow \Delta f = \beta \cdot f_m = 1 \cdot 200\text{Hz} = 200\text{Hz} \quad (9.12)$$

Η τιμή του  $\beta$  που μας δίνεται είναι:  $0.1 < \beta < 10$ . Άρα, μπορούμε να εφαρμόσουμε το νόμο του Carson για να υπολογίσουμε το εύρος ζώνης συχνοτήτων του σήματος FM:

$$B_{FM} = 2 \cdot (1 + \beta) \cdot f_m = 800\text{Hz} \quad (9.13)$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων του σήματος FM και η χαρακτηριστική καμπύλη του φίλτρου διέλευσης ζώνης συχνοτήτων. Συνεπώς, μετά τη διέλευση του σήματος από το φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων, οι συχνότητες που απομένουν στην έξοδο είναι οι επόμενες:



**Σχήμα 9.1** Φάσμα σήματος μετά την έξοδο του φίλτρου διέλευσης ζώνης συχνοτήτων (απομένουν στην έξοδο μόνο οι συχνότητες εκτός του πλαισίου με τη διακεκομμένη γραμμή).

5. Σε διαμορφωτή συχνότητας με σταθερά απόκλισης συχνότητας ίση με 5KHz/V εισάγουμε φέρον με πλάτος 10V και συχνότητα 500KHz και μήνυμα ημιτονικής μορφής με συχνότητα 5KHz και πλάτος 10V.

- να βρείτε σε ποια περιοχή μεταβάλλεται η στιγμιαία συχνότητα του διαμορφωμένου σήματος
- ποια είναι η τιμή του δείκτη διαμόρφωσης;
- ποιο είναι το εύρος ζώνης του σήματος FM;
- να σχεδιάσετε κατά προσέγγιση το εκπεμπόμενο φάσμα.

Λύση:

α) Η στιγμιαία συχνότητα του διαμορφωμένου σήματος μεταβάλλεται μέχρι μία μέγιστη απόκλιση συχνότητας  $\Delta f$  η οποία αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο στιγμιαίο πλάτος του σήματος μηνύματος δηλαδή σε  $A_m=10V$ , θεωρώντας τη σταθερά απόκλισης συχνότητας του διαμορφωτή  $K_f = 5KHz/V$  που μας δίνεται από την εκφώνηση της άσκησης. Δηλαδή ισχύει:

$$\Delta f = K_f \cdot A_m \quad (9.14)$$

Έτσι, από την προηγούμενη σχέση βρίσκουμε:  $\Delta f=50KHz$ .

β) Ο δείκτης διαμόρφωσης  $\beta$  βρίσκεται άμεσα από τη σχέση ορισμού του:

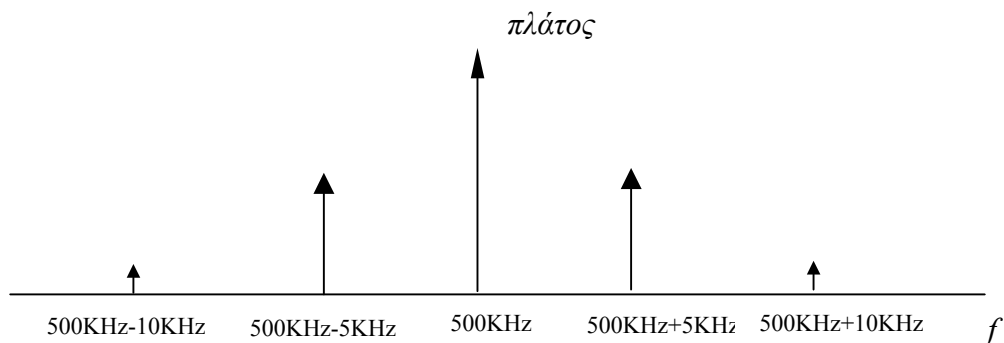
$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{50KHz}{5KHz} = 10 \quad (9.15)$$

γ) Για να υπολογίσουμε το εύρος ζώνης του σήματος FM χρησιμοποιούμε το νόμο του Carson:

$$B_{FM} = 2 \cdot (1 + \beta) \cdot f_m \quad (9.16)$$

από τον οποίο τελικά βρίσκουμε ότι:  $B_{FM} = 110KHz$ .

δ) Το εκπεμπόμενο φάσμα του σήματος FM παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



**Σχήμα 9.2** Εκπεμπόμενο φάσμα σήματος FM.

### ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΜΕ ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ

1. Μία φέρουσα συχνότητα  $20MHz$  διαμορφώνεται κατά συχνότητα από ένα ημιτονικό σήμα έτσι ώστε η μέγιστη απόκλιση συχνότητας να είναι ίση με  $100KHz$ . Να βρείτε το δείκτη διαμόρφωσης και το εύρος ζώνης συχνοτήτων του σήματος FM αν η συχνότητα του σήματος μηνύματος (πληροφορία) είναι: α)  $1KHz$ , β)  $100KHz$ , γ)  $500KHz$ .

(Απάντηση: α)  $\beta=100$ ,  $B_{FM}=200KHz$ , β)  $\beta=1$ ,  $B_{FM}=400KHz$ , γ)  $\beta=0.2$ ,  $B_{FM}=1MHz$ ).

2. Σε ένα σύστημα διαμόρφωσης συχνότητας ημιτονοειδές σήμα  $2KHz$  διαμορφώνεται έτσι ώστε να προκύπτει τελικά απόκλιση συχνότητας ίση με  $5KHz$ .

α) ποιο είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων του διαμορφωμένου σήματος

β) Αυξάνουμε το πλάτος του διαμορφώνοντος ημιτονοειδούς σήματος κατά ένα παράγοντα ίσο με 3 και μειώνουμε παράλληλα τη συχνότητά του στο  $1KHz$ . Να βρεθεί η μέγιστη απόκλιση συχνότητας και το εύρος ζώνης συχνοτήτων του νέου διαμορφωμένου σήματος (Απάντηση: α)  $B_{FM}=14KHz$ , β)  $\Delta f=15KHz$ ,  $B_{FM}=32KHz$ ).



3. Ποιο είναι το εύρος ζώνης για ένα σήμα FM στο οποίο η διαμορφούσα συχνότητα είναι  $2\text{KHz}$  και η μέγιστη απόκλιση συχνότητας  $10\text{KHz}$ ; (Απάντηση:  $B_{FM}=24\text{KHz}$  ).

4. Φέρον συχνότητας  $1\text{GHz}$  διαμορφώνεται κατά FM από ημιτονοειδές σήμα  $10\text{KHz}$  έτσι ώστε η μέγιστη απόκλιση συχνότητας να είναι ίση με  $1\text{KHz}$ .

α) ποιο είναι το εύρο ζώνης του σήματος FM;

β) ποιο είναι το εύρος ζώνης του σήματος FM αν το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος διπλασιαστεί;

γ) ποιο είναι το εύρος ζώνης FM αν η συχνότητα του διαμορφώνοντος διπλασιαστεί

δ) ποιο είναι το εύρος ζώνης FM αν η συχνότητα και το πλάτος του διαμορφώνοντος διπλασιαστεί; (Απάντηση: α)  $B_{FM}=22\text{KHz}$ , β)  $B_{FM}=24\text{KHz}$ , γ)  $B_{FM}=21\text{KHz}$ , δ)  $B_{FM}=44\text{KHz}$  ).

## 10. ΜΕΓΕΘΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ AM ΚΑΙ FM ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

A. Στα συστήματα AM που χρησιμοποιούνται στην πράξη για εκπομπή ραδιοφωνικού σήματος, οι τιμές των σημαντικότερων μεγεθών που χρησιμοποιούνται καταγράφονται στη συνέχεια:

- Συχνότητα φέροντος:  $540\text{KHz}-1600\text{KHz}$
- Φασματική απόσταση μεταξύ των φερουσών συχνοτήτων (φασματική απόσταση μεταξύ των ραδιοφωνικών σταθμών AM):  $10\text{KHz}$
- Ενδιάμεση συχνότητα:  $455\text{KHz}$
- Εύρος ζώνης συχνοτήτων ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας:  $6-10\text{KHz}$
- Εύρος ζώνης συχνοτήτων ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων:  $3-5\text{KHz}$

B. Στα συστήματα FM που χρησιμοποιούνται στην πράξη για εκπομπή ραδιοφωνικού σήματος, οι τιμές των σημαντικότερων μεγεθών που χρησιμοποιούνται καταγράφονται στη συνέχεια:

- Συχνότητα φέροντος:  $88.1\text{KHz}-107.9\text{KHz}$
- Μέγιστη επιτρεπόμενη συχνότητα σήματος μηνύματος (σήμα διαμόρφωσης) (σήμα φωνής, μουσικής κα.):  $15\text{KHz}$
- Δείκτης διαμόρφωσης:  $\beta=5$
- Συνολικό εύρος ζώνης μέγιστης απόκλισης συχνότητας:  $(2\Delta f)=150\text{KHz}$
- Μέγιστη απόκλιση συχνότητας:  $\Delta f=75\text{KHz}$
- Φασματική απόσταση μεταξύ των φερουσών συχνοτήτων (φασματική απόσταση μεταξύ των ραδιοφωνικών σταθμών FM):  $200\text{KHz}$
- Ενδιάμεση συχνότητα:  $10.7\text{MHz}$
- Μέγιστο εύρος ζώνης συχνοτήτων που απασχολεί ένας ραδιοφωνικός σταθμός FM κατά την εκπομπή:  $180\text{KHz}$  (μικρότερο από τη φασματική απόσταση μεταξύ των σταθμών FM)
- Εύρος ζώνης συχνοτήτων του ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας:  $200-250\text{KHz}$
- Εύρος ζώνης συχνοτήτων του ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων:  $15\text{KHz}$ .

Γ. Για την εκπομπή του ακουστικού σήματος (σήμα ήχου) στα πρακτικά τηλεοπτικά συστήματα (εκπομπή ακουστικού σήματος TV), χρησιμοποιείται διαμόρφωση FM για την οποία ισχύουν οι παρακάτω τιμές μεγεθών:

- Μέγιστη απόκλιση συχνότητας:  $\Delta f = 25 \text{ KHz}$
- Μέγιστη επιτρεπόμενη συχνότητα σήματος μηνύματος (σήμα διαμόρφωσης) (σήμα φωνής τηλεοπτικού σήματος):  $f_{m,\max} = 15 \text{ KHz}$
- Μέγιστο εύρος ζώνης συχνοτήτων που απασχολεί η εκπομπή του ακουστικού σήματος:  $B_{FM} = 2 \cdot (\Delta f + f_{m,\max}) = 80 \text{ KHz}$ .

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να ειπωθεί, ότι αν η διαμόρφωση σε ένα σύστημα εκπομπής FM προκύπτει όχι από ημιτονοειδές σήμα αλλά από ένα αυθαίρετο σήμα πληροφορίας (μηνύματος)  $x(t)$  με εύρος ζώνης συχνοτήτων, τότε το μέγεθος που αντιστοιχεί στο δείκτη διαμόρφωσης  $\beta$ , ονομάζεται τώρα λόγος απόκλισης συχνότητας  $D$  και ορίζεται από τη σχέση:

$$D = \frac{\Delta\omega}{\omega_M} \quad (10.1)$$

όπου  $\Delta\omega$  είναι η μέγιστη απόκλιση συχνότητας του σήματος FM σε (rad/sec) και  $\omega_M$  είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων του σήματος (πληροφορίας) μηνύματος  $x(t)$ . Στην περίπτωση που εξετάζουμε, ο νόμος του Carson για το εύρος ζώνης συχνοτήτων του σήματος FM τροποποιείται όπως ακολουθεί, [1]:

$$B_{FM} = 2 \cdot (1 + D) \cdot \omega_m \quad (10.2)$$

## 11. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ AM ΚΑΙ FM

Τα αναλογικά συστήματα διαμόρφωσης AM και FM παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

1. Στη διαμόρφωση FM οι ενισχυτές που χρησιμοποιούνται δεν είναι απαραίτητο να παρουσιάζουν γραμμική λειτουργία δεδομένου ότι η πληροφορία που μεταδίδεται στη συγκεκριμένη διαμόρφωση, μεταφέρεται έμμεσα στη συχνότητα του φέροντος και έτσι τυχόν μη γραμμικά φαινόμενα στους χρησιμοποιούμενους ενισχυτές δεν οδηγούν σε παραμόρφωση του σήματος στην έξοδο του δέκτη μετά την αποδιαμόρφωση. Συνεπώς στη διαμόρφωση FM μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ενισχυτές σε τάξη C. Αντίθετα, μη γραμμική λειτουργία των ενισχυτών στην περίπτωση της διαμόρφωσης AM οδηγεί σε παραμόρφωση πλάτους στο τελικό σήμα εξόδου δηλαδή το μεταδιδόμενο σήμα παρουσιάζεται παραμορφωμένο στο πλάτος (παραμόρφωση περιβάλλουσας) (envelope distortion) στην έξοδο του δέκτη AM κάτι που δεν είναι επιθυμητό.
2. Η διαμόρφωση FM σε αντίθεση με τη διαμόρφωση AM είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στα φαινόμενα παραμόρφωσης φάσης. Το γεγονός αυτό εξηγείται διότι στη διαμόρφωσης FM η πληροφορία μεταφέρεται στη στιγμιαία συχνότητα του φέροντος σήματος και έτσι τυχόν αλλαγή φάσης του φέροντος επηρεάζει το εκπεμπόμενο σήμα το οποίο τελικά εμφανίζεται με παραμόρφωση στην έξοδο του δέκτη FM, μετά τη διαδικασία της αποδιαμόρφωσης. Αντίθετα, στη διαμόρφωση AM φαινόμενα αλλαγής της φάσης δεν επηρεάζουν το τελικό σήμα διότι όπως ήδη έχει αναφερθεί η πληροφορία

μεταδίδεται μέσω του στιγμιαίου πλάτους του φέροντος σήματος. Βέβαια αυτό συνδυάζεται και από το γεγονός ότι το ανθρώπινο αυτί δεν αντιλαμβάνεται αλλαγές στη φάση.

3. Αν συγκριθούν τα συστήματα διαμόρφωσης AM και FM, υπό κανονικοποιημένες συνθήκες, αποδεικνύεται ότι η διαμόρφωση AM παρουσιάζει ισχύ θορύβου κατά προσέγγιση 18.7dB μεγαλύτερη από τη διαμόρφωση FM, [6]. Τελικά, στο δέκτη σήματος AM παρουσιάζεται 74.1 φορές περισσότερη ισχύς θορύβου από ότι σε αντίστοιχο δέκτη FM. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίον η διαμόρφωση FM εφαρμόζεται στα συστήματα εκπομπής στα οποία χρειαζόμαστε καλύτερη ποιότητα στο τελικό σήμα στην έξοδο του δέκτη.
4. Τα συστήματα διαμόρφωσης AM και FM επηρεάζονται με από την καμπύλη απόκρισης συχνοτήτων του μέσου μετάδοσης (κανάλι επικοινωνίας). Η συμπεριφορά του μέσου μετάδοσης οδηγεί και στα δύο συστήματα διαμόρφωσης σε εξασθένιση των πλευρικών ζωνών στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων. Στη διαμόρφωση AM έχουμε σαν αποτέλεσμα την εξασθένιση των υψηλών συχνοτήτων του τελικού σήματος μετά την αποδιαμόρφωση (σήματος μηνύματος). Αντίστοιχα, στη διαμόρφωση FM, το μέσο μετάδοσης, προκαλεί το ψαλιδισμό των συνιστωσών μεγάλου πλάτους του τελικού σήματος μετά την αποδιαμόρφωση (σήματος μηνύματος).
5. Ένα σύστημα διαμόρφωσης FM παρουσιάζει γενικά μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων σε σχέση με ένα σύστημα διαμόρφωσης AM, εκτός βέβαια από την περίπτωση της διαμόρφωσης *FM περιορισμένης ζώνης συχνοτήτων* (NBFM, Narrow Band FM) στην οποία τα δύο συστήματα διαμόρφωσης απαιτούν το ίδιο συνολικό εύρος ζώνης συχνοτήτων.
6. Σε σχέση με τη δομή ενός δέκτη διαμόρφωσης AM και ενός δέκτη διαμόρφωσης FM, ένας δέκτης FM περιλαμβάνει επιπλέον το κύκλωμα του *περιοριστή* και το *κύκλωμα του αυτομάτου ελέγχου της συχνότητας* (Automatic Frequency Control, AFC) του τοπικού ταλαντωτή το οποίο έχει σαν σκοπό τη διόρθωση της συχνότητας εξόδου του τοπικού ταλαντωτή δηλαδή των τυχόν μικρών αλλαγών (ολισθήσεων) της συχνότητας εξόδου του.

## 12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

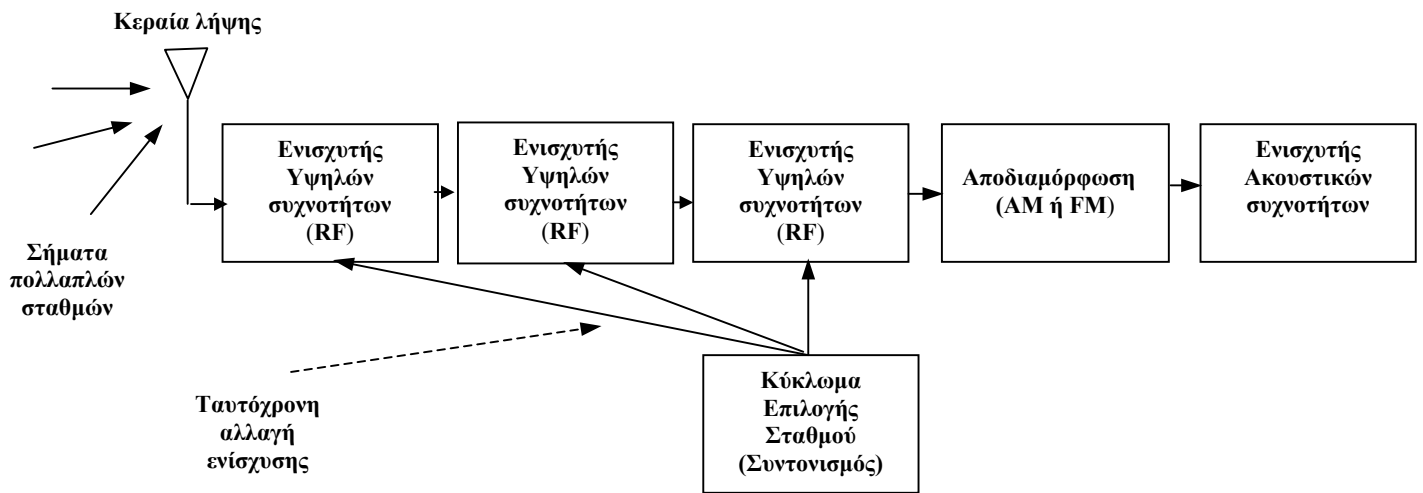
Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται μία σύγκριση των βασικών αναλογικών διαμορφώσεων σε σχέση με την πολυπλοκότητά τους όσον αφορά τον εξοπλισμό που απαιτούν κύρια στη διαδικασία της αποδιαμόρφωσης και δίνονται επίσης και οι σημαντικότερες εφαρμογές τους.

<i>Είδος διαμόρφωσης</i>	<i>Πολυπλοκότητα εξοπλισμού</i>	<i>Εφαρμογές διαμόρφωσης</i>
AM	(Μικρή) Απλή αποδιαμόρφωση με φωρατή περιβάλλουσας	Ραδιοφωνική εκπομπή AM
AM-DSB-SC	(Μέση) Σύμφωνη αποδιαμόρφωση με ενσωμάτωση	Πολυπλεξία σημάτων με μικρό εύρος ζώνης συχνοτήτων

	φέρων-πιλότου μαζί με το σήμα	
SSB	(Μεγάλη) Σύμφωνη αποδιαμόρφωση, πολυπλοκότητα διαμορφωτών	Επικοινωνία φωνής σημείο προς σημείο (point to point) π.χ. CB
VSB	(Μεγάλη) Σύμφωνη αποδιαμόρφωση	Μετάδοση ψηφιακών δεδομένων και σημάτων μεγάλου εύρους ζώνης συχνοτήτων
VSB με ενσωματωμένο φέρον	(Μέση) Φωρατής περιβάλλουσας	Μετάδοση τηλεοπτικού σήματος δεδομένων και σημάτων μεγάλου εύρους ζώνης συχνοτήτων
FM	(Μέση) Πολύπλοκη διαμόρφωση-Αποδιαμόρφωση με PLL ή με χρήση διευκρινιστή	Ραδιοφωνική εκπομπή FM και μικροκυματικές επικοινωνίες αναμετάδοσης
PM	Πολυπλοκότητα όμοια με τη διαμόρφωση FM	Μετάδοση δεδομένων (data) και μετάδοση σημάτων φωνής με πολυπλεξία

### 13. ΟΜΟΔΥΝΟΙ-ΥΠΕΡΕΤΕΡΟΔΥΝΟΙ ΔΕΚΤΕΣ

Αρχικά, οι δέκτες που προτάθηκαν για τη διαμόρφωση AM και FM ήταν ομόδυνα. Δηλαδή, η ενίσχυση του σήματος υψηλής συχνότητας (σήμα ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency, RF) που λαμβάνεται πραγματοποιείται στην ίδια περιοχή των υψηλών συχνοτήτων και δεν πραγματοποιείται η διαδικασία της μίξης. Η δομή ενός ομόδυνου δέκτη για ραδιοφωνική λήψη AM ή FM παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 13.1.



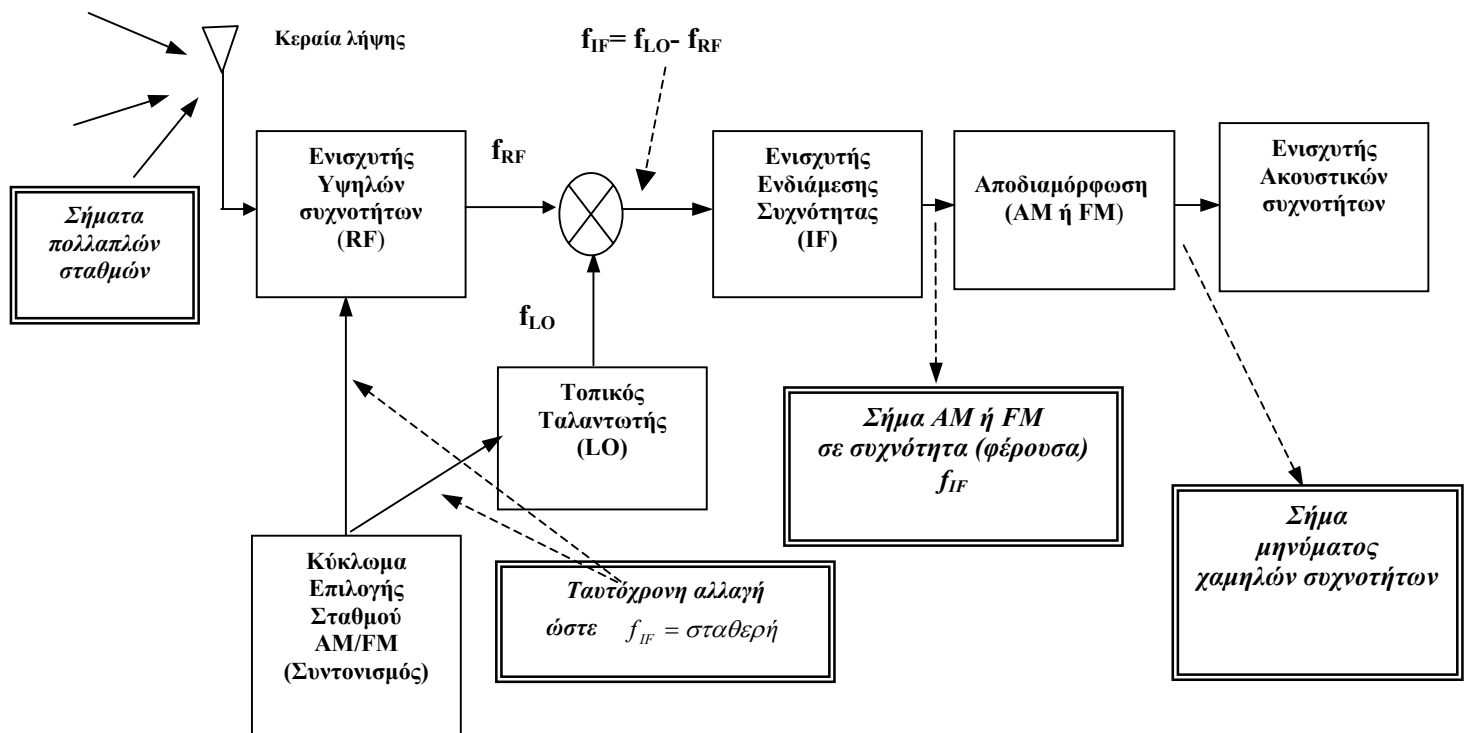
**Σχήμα 13.1** Δομή ομόδυνου ραδιοφωνικού δέκτη AM ή FM.

Στη δομή του προηγούμενου δέκτη, παρατηρούμε ότι το λαμβανόμενο σήμα υψηλών συχνοτήτων (RF) ενισχύεται διαδοχικά χωρίς να μετατοπίζεται σε άλλη περιοχή συχνοτήτων. Αρχικά, με το κύκλωμα επιλογής σταθμού, επιλέγουμε πιο σταθμό AM ή FM θέλουμε να λάβουμε. Έτσι κατ' αρχήν, συντονιζόμαστε (tuning) στην αντίστοιχη φέρουσα συχνότητα  $f_c$  και λαμβάνουμε όλο το φάσμα συχνοτήτων γύρω από αυτή. Το σήμα υψηλών συχνοτήτων που έχουμε επιλέξει λόγω απόστασης που μεσολαβεί συνήθως μεταξύ πομπού και δέκτη έχει υποστεί *εξασθένιση* (attenuation). Για το λόγο αυτό προχωράμε σε ενίσχυση στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων αλλά χρησιμοποιούμε πολλαπλά στάδια ενίσχυσης διότι ένας μόνο ενισχυτής υψηλών συχνοτήτων δεν μας αποδίδει τη ζητούμενη ενίσχυση ισχύος. Τα μειονεκτήματα των διαδοχικών σταδίων ενίσχυσης είναι ότι όλοι οι ενισχυτές πρέπει να έχουν ίδιο ακριβώς συντονισμό στην περιοχή της  $f_c$  που επιλέχθηκε και ότι το εύρος ζώνης συχνοτήτων στο οποίο θα πρέπει να παρουσιάζουν ομοιόμορφη ενίσχυση είναι μεγάλο.

Συνοπτικά, οι διαδικασίες που περιλαμβάνει ένας ομόδυνος δέκτης AM ή FM είναι οι παρακάτω:

1. επιλογή επιθυμητού σταθμού με *συντονισμό* (tuning) στην αντίστοιχη φέρουσα συχνότητα (tuning) και *απόρριψη* των υπολοίπων σημάτων υψηλών συχνοτήτων τα οποία λαμβάνονται από την κεραία λήψης του σταθμού
2. *ενίσχυση* (amplification) του σήματος υψηλών συχνοτήτων με διαδοχικά στάδια ενίσχυσης
3. *αποδιαμόρφωση* ή *φώραση* (demodulation) του σήματος AM ή FM
4. ενίσχυση του σήματος πληροφορίας (μηνύματος) στην περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων
5. οδήγηση του τελικού σήματος χαμηλών συχνοτήτων στην έξοδο (ηχείο κ.α).

Η διαδικασία της διαδοχικής ενίσχυσης στις υψηλές συχνότητες αποφεύγεται με τη χρησιμοποίηση του υπερετερόδυνου δέκτη, η δομή του οποίου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 13.2** Δομή υπερετερόδυνου ραδιοφωνικού δέκτη AM ή FM.

Οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται σε έναν υπερετερόδυνο δέκτη AM ή FM είναι οι παρακάτω:

1. λήψη πολλαπλών σημάτων με διαμόρφωση AM ή FM στην κεραία λήψης (σήματα διαμορφωμένα στην περιοχή συχνοτήτων της φέρουσας  $f_c$ )
2. επιλογή του επιθυμητού σταθμού (επιθυμητής εκπομπής δηλαδή επιθυμητού σήματος διαμορφωμένου στη συχνότητα  $f_c$ ) μέσω του κυκλώματος συντονισμού
3. το σήμα που επιλέγεται δεδομένου ότι βρίσκεται στην περιοχή συχνοτήτων της φέρουσας  $f_c$  ενισχύεται με τη χρησιμοποίηση ενισχυτή υψηλών συχνοτήτων (ενισχυτής ραδιοσυχνοτήτων, ενισχυτής RF)
4. το επιλεγμένο σήμα μετά την ενίσχυσή του μετατοπίζεται γύρω από την ίδια υψηλή συχνότητα η οποία ονομάζεται *ενδιάμεση συχνότητα* (Intermediate Frequency, IF)  $f_{IF}$  η οποία είναι και στα δύο συστήματα διαμόρφωσης σταθερής τιμής και σε όλα τα συστήματα δεκτών. Ο σκοπός της μετατόπισης του φάσματος του διαμορφωμένου σήματος από τη συχνότητα  $f_c$  στη συχνότητα  $f_{IF}$  είναι η αποφυγή διαδοχικών βαθμίδων ενίσχυσης, όπως συμβαίνει στον ομόδυνο δέκτη. Έτσι, η ενίσχυση πραγματοποιείται στην περιοχή της ενδιάμεσης συχνότητας (με τη χρησιμοποίηση ενός ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας) ανεξάρτητα από το διαμορφωμένο σήμα που επιλέγεται και μάλιστα σε μία περιοχή περιορισμένου εύρους ζώνης συχνοτήτων, κάτι που είναι πρακτικά εφικτό σε αντίθεση με τις διαδοχικές ενισχύσεις στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων που απαιτούνται στην περίπτωση του ομόδυνου δέκτη. Η μετατόπιση του φάσματος στην περιοχή της ενδιάμεσης συχνότητας πραγματοποιείται με τη διαδικασία της μίξης. Επίσης, λόγω της μετατόπισης στην περιοχή της ενδιάμεσης συχνότητας τα συντονισμένα κυκλώματα των δεκτών λειτουργούν με μεγαλύτερη πιστότητα, ευαισθησία και

επιλεκτικότητα. Οι τιμές της ενδιάμεσης συχνότητας  $f_{IF}$  για τη διαμόρφωση AM, FM και για την εκπομπή στην περιοχή των βραχέων κυμάτων, δίνονται στη συνέχεια:

Είδος διαμόρφωσης	Τιμή Ενδιάμεσης Συχνότητας
AM	$f_{IF} = 455\text{KHz}$
FM	$f_{IF} = 10.7\text{MHz}$
<b>ΒΡΑΧΕΑ ΚΥΜΑΤΑ</b>	$f_{IF} = 1600\text{KHz}$

5. η αποδιαμόρφωση του σήματος AM ή FM πραγματοποιείται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στη περίπτωση του ομόδνου δέκτη
6. το σήμα χαμηλών συχνοτήτων (σήμα μηνύματος) που αναδεικνύεται από τη αποδιαμόρφωση, ενισχύεται μέσω ενός ενισχυτή χαμηλών συχνοτήτων και οδηγείται στην έξοδο του δέκτη.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί, ότι ένας δέκτης AM, περιλαμβάνει επίσης και ένα αυτομάτου κύκλωμα ελέγχου της έντασης (τάσης) (*Automatic Volume Control, AVC*) το οποίο έχει ως σκοπό να ρυθμίσει τη στάθμη της τάσης εξόδου του δέκτη στην επιθυμητή τιμή. Αυτό πετυχαίνεται μέσω ανάδρασης από την έξοδο της βαθμίδας της αποδιαμόρφωσης, προς το κύκλωμα AVC και στη συνέχεια προς τον ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας. Έτσι, ανάλογα με τη στάθμη τάσης στην έξοδο του φωρατή, ρυθμίζεται και η ενίσχυση του ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας έτσι ώστε αυτή να μειωθεί ή να αυξηθεί τείνοντας κάθε φορά προς την επιθυμητή τιμή.

Αντίστοιχα, ένας δέκτης FM περιλαμβάνει κύκλωμα αυτομάτου ελέγχου της συχνότητας (*Automatic Frequency Control, AFC*), το οποίο έχει ως σκοπό τη ρύθμιση της συχνότητας εξόδου του τοπικού ταλαντωτή του δέκτη κάθε φορά, ώστε να πετυχαίνεται πάντα η τιμή της ενδιάμεσης συχνότητας που προκύπτει από τη μίξη να είναι σταθερή.

## 14. ΣΥΜΦΩΝΗ ΦΩΡΑΣΗ

*Σύμφωνη φώραση* (coherent detection) ονομάζεται η διαδικασία στην οποία για να αποδιαμορφώσουμε το διαμορφωμένο σήμα που λαμβάνουμε στο δέκτη, προχωράμε στη απευθείας μετατόπιση του φάσματος του διαμορφωμένου σήματος από την περιοχή των υψηλών συχνοτήτων στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων (περιοχή συχνοτήτων αρχικού σήματος μηνύματος). Η προηγούμενη διαδικασία, υλοποιείται με πολλαπλασιασμό στο δέκτη του λαμβανομένου σήματος (με φάσμα γύρω από τη συχνότητα  $f_c$ ) με ένα τοπικά παραγόμενο σήμα φέροντος (σήμα φέροντος το οποίο παράγεται από ταλαντωτή στο δέκτη). Στη συνέχεια ακολουθεί ένα φίλτρο διέλευσης

χαμηλών συχνοτήτων (Low Pass Filter, LPF) από την έξοδο του οποίου λαμβάνεται σήμα, ανάλογο του σήματος πληροφορίας. Βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία της σύμφωνης φώρασης, είναι το τοπικά παραγόμενο φέρον να είναι της ίδιας συχνότητας και της ίδιας φάσης με το φέρον του σήματος που λαμβάνεται δηλαδή απαιτείται η παραγωγή ενός ακριβούς αντιγράφου του αδιαμόρφωτου φέροντος στο δέκτη ή διαφορετικά απαιτείται ο *συγχρονισμός* (synchronization) του δέκτη με το εκπεμπόμενο φέρον σήμα. Σε διαφορετική περίπτωση, όταν δεν υπάρχει συγχρονισμός, η ανάδειξη (φώραση) του σήματος πληροφορίας (μηνύματος) πραγματοποιείται με ύπαρξη σφάλματος δηλαδή το τελικό σήμα μηνύματος εμφανίζεται στην έξοδο του δέκτη παραμορφωμένο ή με εξασθένηση στο πλάτος του.

Η λύση για την πιστή παραγωγή φέροντος σήματος στο δέκτη, είναι η ενσωμάτωση με διάφορους τρόπους στο διαμορφωμένο σήμα αδιαμόρφωτο φέρον μικρής ισχύος, το οποίο ανιχνεύεται στο δέκτη μέσω κατάλληλου φίλτρου. Μειονεκτήματα της μεθόδου σύμφωνης φώρασης, είναι η μείωση της εμβέλειας του πομπού αφού μέρος της ισχύος του αποδίδεται για την εκπομπή του αδιαμόρφωτου φέροντος.

## 15. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΔΕΚΤΩΝ

Στην παράγραφο αυτή δίνονται μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός δέκτη αναλογικής διαμόρφωσης και οι αντίστοιχοι ορισμοί τους:

1. **Σταθερότητα συντονισμού δέκτη** (stability): ικανότητα του δέκτη να διατηρεί την αρχική του ρύθμιση και το συντονισμό του σε ορισμένη συχνότητα. Η σταθερότητα του συντονισμού του δέκτη, σε δεδομένη συχνότητα, εκφράζεται σε *Hz* ή σε *KHz* απόκλισης από την αρχική ρύθμιση του δέκτη (αρχική συχνότητα συντονισμού δέκτη).
2. **Ευαισθησία λήψης** (sensitivity): η ελάχιστη τιμή του σήματος ώστε το ωφέλιμο σήμα να αποδίδεται με καλή ποιότητα. Η ευαισθησία λήψης ενός δέκτη εκφράζεται με το *λόγο σήμα προς θόρυβο* (*Signal-to-Noise Ratio*)(*S/N*) συνήθως εκφρασμένο σε *dB*.
3. **Πιστότητα δέκτη** (fidelity): η ικανότητα ενός δέκτη να αποδίδει στην έξοδό του το αρχικά εκπεμπόμενο σήμα με όσο το δυνατόν λιγότερη παραμόρφωση δηλαδή να παρουσιάζει ένα όσο το δυνατόν “πιστό” αντίγραφο του αρχικά εκπεμπόμενου σήματος.
4. **Επιλεκτικότητα λήψης** (selectivity): η ικανότητα του δέκτη αφού συντονιστεί να επιλέγει, ενισχύει και να αποδιαμορφώνει το επιθυμητό σήμα χωρίς να επηρεάζεται από γειτονικές σε συχνότητα εκπομπές. Εκφράζεται σε *Hz* ή σε *KHz* και μας δίνει τη φασματική απόσταση (απόσταση συχνοτήτων) ώστε να μην έχω “επικάλυψη” μεταξύ των γειτονικών σε συχνότητα εκπομπών δηλαδή για να μην “παρενοχλεί” μία εκπομπή μία γειτονική σε συχνότητα εκπομπή.
5. **Γραμμικότητα λειτουργίας δέκτη** (linearity): η ικανότητα του δέκτη να συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο για ασθενή και για ισχυρά σήματα στην είσοδό του δηλαδή να παρουσιάζει γραμμική λειτουργία.
6. **Έλλειψη παρασιτικών εκπομπών**: η ικανότητα όσο το δυνατόν, μη εκπομπής παρασιτικών σημάτων μικρής ισχύος από τα ίδια τα κυκλώματα του δέκτη, φαινόμενο το οποίο συνήθως προέρχεται από τους τοπικούς ταλαντωτές του δέκτη.



## 16. ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΛΗΨΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στην παράγραφο αυτή καταγράφονται οι τυπικές τιμές της τάσης η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται στην κεραία λήψης ενός δέκτη (received signal level) με αντίστοιχη διαμόρφωση και περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας ώστε να μην δημιουργούνται παρεμβολές (interference) σε άλλες εκπομπές ή υπερκορεσμός στους ενισχυτές που περιλαμβάνει ο αντίστοιχος δέκτης. Παράλληλα, οι συγκεκριμένες τιμές λαμβανόμενης τάσης, οδηγούν σε ικανοποιητική ποιότητα στο τελικό σήμα στην έξοδο του αντίστοιχου δέκτη (ικανοποιητική ακρόαση ήχου ή παρακολούθηση εικόνας):

<i>Σύστημα διαμόρφωσης</i>	<i>Απαιτούμενη περιοχή τιμών τάσης στην κεραία λήψης</i>
AM	55μV-300mV
FM	100μV-100mV
VHF	1mV-50mV
UHF	1.5mV-50mV

## 17. ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ FM ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στην εκπομπή και στη λήψη ενός σήματος FM, υπάρχουν επιπλέον κυκλώματα σε σχέση με ένα πομπό και ένα δέκτη σήματος AM, ο σκοπός των οποίων και η δομή περιγράφονται σύντομα στη συνέχεια, [3-5]:

1. *περιοριστής πλάτους σήματος κατά την εκπομπή (limiter)*: κατά την εκπομπή ενός σήματος FM, η μέγιστη απόκλιση συχνότητας  $\Delta f$  από την αρχική τιμή συχνότητας της φέρουσας συχνότητας αντιστοιχεί στο μέγιστο στιγμιαίο πλάτος του σήματος μηνύματος  $x(t)$  σύμφωνα με τη σχέση  $\Delta f = K_f \cdot A_m$ , διατηρώντας βέβαια ίδιο κύκλωμα διαμορφωτή (δηλαδή σταθερή την τιμή της σταθεράς απόκλισης συχνότητας του διαμορφωτή  $K_f$ ). Σε πρακτικά κυκλώματα πομπών FM, είναι επιθυμητό η μέγιστη απόκλιση συχνότητας να μην ξεπεράσει την τιμή των 75KHz η οποία είναι τις περισσότερες φορές σταθερή. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να έχουμε περιορισμό σε κατάλληλη τιμή του πλάτους του σήματος μηνύματος, ώστε να μην πραγματοποιηθεί μέγιστη απόκλιση συχνότητας πάνω από 75KHz.

2. *περιοριστής πλάτους στην εκπομπή (limiter)*: κατά τη λήψη ενός σήματος FM, γνωρίζουμε ότι η πληροφορία που έχει εκπεμφθεί μεταφέρεται μέσω της διαμόρφωσης στη στιγμιαία συχνότητα του λαμβανομένου σήματος. Συνεπώς, οποιαδήποτε αλλαγή του στιγμιαίου πλάτους του λαμβανομένου σήματος FM (πλάτος φέρουσας συχνότητας) δεν

έχει κάποια επίπτωση στην αποδιαμόρφωση του σήματος FM και κύρια οφείλεται στο θόρυβο του καναλιού επικοινωνίας (μέσου μετάδοσης). Για το λόγο αυτό, στο δέκτη FM χρησιμοποιείται περιοριστής πλάτους, οποίος αποκόπτει τις μικρές αλλαγές πλάτους του λαμβανόμενου σήματος FM που οφείλονται στην πρόσθεση του θορύβου.

3. *Φίλτρο προ-έμφασης-Φίλτρο από-έμφασης*: ο θόρυβος του καναλιού επικοινωνίας (μέσο μετάδοσης) στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι *λευκός, προσθετικός θόρυβος κατανομής Gauss* (Additive White Gaussian Noise, AWGN) και για αυτό παρουσιάζει μεγαλύτερη ισχύ στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων. Χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο κατά την εκπομπή (φίλτρο προέμφασης) ενισχύουμε τις υψηλές συχνότητες του σήματος που θέλουμε να μεταδώσουμε  $x(t)$ , σε σχέση με τις χαμηλές συχνότητες του  $x(t)$ . Αντίστοιχα, στο δέκτη, πρέπει να ακολουθήσουμε την αντίστροφη διαδικασία επαναφέροντας τις υψηλές συχνότητες στην αρχική τους ισχύ, κάτι που πραγματοποιείται με το φίλτρο αποέμφασης. Τα κυκλώματα προέμφασης και αποέμφασης υλοποιούνται συνήθως με παθητικά φίλτρα RC, στα οποία οι σταθερές χρόνου έχουν επιλεγεί κατάλληλα.

## 18. ΛΟΓΟΣ ΣΗΜΑ ΠΡΟΣ ΘΟΡΥΒΟ ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ FM

Ο λόγος σήμα προς θόρυβο στην έξοδο του αποδιαμορφωτή FM,  $\left(\frac{S_0}{N_0}\right)$  συνδέεται με το λόγο σήμα προς θόρυβο στην είσοδο του αποδιαμορφωτή FM  $\left(\frac{S_i}{N_i}\right)$ , και το δείκτη διαμόρφωσης  $\beta$  με τη σχέση:

$$\left(\frac{S_0}{N_0}\right) = 6 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) \cdot \left(\frac{S_i}{N_i}\right) \quad (18.1)$$

όπου στη σχέση (18.1)  $S_i, N_i$  είναι η ισχύς του σήματος και του θορύβου αντίστοιχα, στην είσοδο του δέκτη FM και  $S_0, N_0$  είναι η ισχύς του σήματος και του θορύβου αντίστοιχα, στην έξοδο του δέκτη FM. Από τη σχέση (18.1), μπορούμε να δούμε ότι αύξηση του δείκτη διαμόρφωσης  $\beta$  οδηγεί σε αύξηση του λόγου  $\left(\frac{S_0}{N_0}\right)$  δηλαδή σε βελτίωση της

ποιότητας του τελικού σήματος στην έξοδο του δέκτη FM. Όμως, όπως ήδη γνωρίζουμε, η αύξηση του  $\beta$  οδηγεί σε άμεση αύξηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης συχνοτήτων του σήματος FM. Δηλαδή τα δύο φαινόμενα είναι αντίστροφα μεταξύ τους. Συμπερασματικά, θα πρέπει ανάλογα με την επιθυμητή ποιότητα στην έξοδο του δέκτη να έχουμε επιλέξει αντίστοιχη τιμή του δείκτη διαμόρφωσης αλλά χωρίς να αυξηθεί το εύρος ζώνης του σήματος FM ανεξέλεγκτα, εκτός των ορίων που έχουν τεθεί.

## 19. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ

### A. Τριγωνομετρικές ταυτότητες:

$$1. \sin^2 a + \cos^2 a = 1$$

$$2. \cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot \{\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)\}$$

$$3. \sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} \cdot \{\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)\}$$

$$4. \sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot \{\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)\}$$

$$5. \cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2}$$

$$6. \sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$$

$$7. \cos \theta = \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2}$$

$$8. \sin \theta = \frac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j}$$

$$9. \sin 2\theta = 2 \cos \theta \cdot \sin \theta$$

$$10. \cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 2 \cos^2 \theta - 1 = 1 - 2 \sin^2 \theta$$

$$11. \cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$$

$$12. \cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta$$

$$13. \sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$$

$$14. \sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta$$

**B. Ιδιότητες συναρτήσεων Bessel  $J_n(\beta)$  πρώτου είδους τάξης  $n$  με όρισμα  $\beta$ :**

$$1. e^{j\beta \sin \omega_m t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cdot e^{jn\omega_m t}$$

$$2. J_{-n}(\beta) = (-1)^n \cdot J_n(\beta)$$

$$3. J_{n-1}(\beta) + J_{n+1}(\beta) = \frac{2n}{\beta} \cdot J_n(\beta)$$

$$4. \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta) = 1$$

**Γ. Αόριστα ολοκληρώματα:**

$$1. \int \cos(ax) dx = \frac{1}{a} \cdot \sin(ax)$$

$$2. \int \sin(ax) dx = -\frac{1}{a} \cdot \cos(ax)$$

$$3. \int e^{ax} dx = \frac{1}{a} \cdot e^{ax}$$

## **20. ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ (κατά θεματική σειρά)**

### **1.**

FT: Fourier Transform

IFT: Inverse Fourier Transform

### **2.**

AM: Amplitude Modulation

FM: Frequency Modulation

PM: Phase Modulation

SSB: Single Side Band

DSB: Double Side Band

AM-DSB-LC: Amplitude Modulation Double Side Band Large Carrier

AM-DSB-SC: Amplitude Modulation Double Side Band Large Carrier

VSB: Vestigial Side Band

S: Signal

N: Noise

I: Interference

SNR: Signal-to-Noise Ratio

SIR: Signal-to-Interference Ratio

AWGN: Additive White Gaussian Noise

### **3.**

FDM: Frequency Division Multiplexing

FDMA: Frequency Division Multiple Access

ACI: Adjacent Channel Interference

### **4.**

RF: Radio Frequency

IF: Intermediate Frequency

LO: Local Oscillator

BPF: Band Pass Filter

LPF: Low Pass Filter

AVC: Automatic Voltage Control

AFC: Automatic Frequency Control

UHF: Ultra High Frequencies

VHF: Very High Frequencies.

## 21. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] HSU H.P., *Αναλογικές και Ψηφιακές Επικοινωνίες*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2002.
- [2] ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Φ., ΚΑΨΑΛΗΣ Χ., ΚΩΤΤΗΣ Π., *Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1995.
- [3] PROAKIS J., SALEHI M., *Συστήματα Επικοινωνιών*, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Αθηνών, 2002.
- [4] HAYKIN, S., *Συστήματα Επικοινωνιών*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1995.
- [5] TAUB H., SCHILLING D.L., *Αρχές Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.
- [6] ΚΥΡΙΑΚΗ Γ., ΤΟΥΣΟΥΝΗ Ν., *Ραδιοφωνία και Ηλεκτρακουστική*, Εκδόσεις ΙΩΝ, 1991.
- [7] ΒΑΡΖΑΚΑΣ Π., Διδακτορική διατριβή: *Μέθοδος εκτίμησης φασματικής απόδοσης συστημάτων επικοινωνιών κινητών*, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής, 1999.
- [8] ΚΟΝΤΟΓΕΩΡΓΟΣ Α. *Τηλεπικοινωνίες Ι*, Τ.Ε.Ι. Λαμίας, Τμήμα Ηλεκτρονικής, 1990.
- [9] ΚΩΤΤΗΣ Π., *Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.