

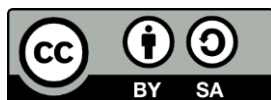
**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕ**

ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ 1

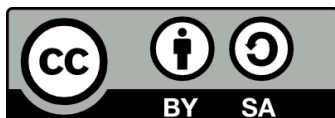
Δρ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΠΑΠΑΤΣΩΡΗΣ
Καθηγητής

ΣΕΡΡΕΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015



Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Το έργο αυτό αδειοδοτείται από την Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές Άδεια. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής, επισκεφτείτε <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.el>.

Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.

Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



5 Διαμόρφωση Γωνίας

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους μπορούμε να μεταβάλλουμε ένα ημιτονικό φορέα προκειμένου να υπερθέσουμε σε αυτόν πληροφορία: είτε μεταβάλλοντας το πλάτος του, τη φάση του ή τη συχνότητά του. Στα προηγούμενα κεφάλαια εξετάσαμε αναλυτικά την περίπτωση διαμόρφωσης μεταβάλλοντας το πλάτος του φορέα. Οι άλλες δύο παράμετροι, δηλαδή η φάση και η συχνότητα είναι αλληλένδετες καθόσον η μεταβολή της μιας επηρεάζει και την άλλη και αντίστροφα. Έτσι τόσο η διαμόρφωση συχνότητας όσο και η διαμόρφωση φάσης αποτελούν υποκατηγορίες μιας γενικότερης κατηγορίας διαμόρφωσης που ονομάζεται **διαμόρφωση γωνίας (angle modulation)**. Έτσι η διαμόρφωση γωνίας ορίζεται ως το είδος της διαμόρφωσης όπου η πληροφορία μεταβάλλει την γωνία του ημιτονικού φορέα. Ειδικότερα, για τις δύο υποκατηγορίες της διαμόρφωσης γωνίας έχουμε τους ακόλουθους ορισμούς:

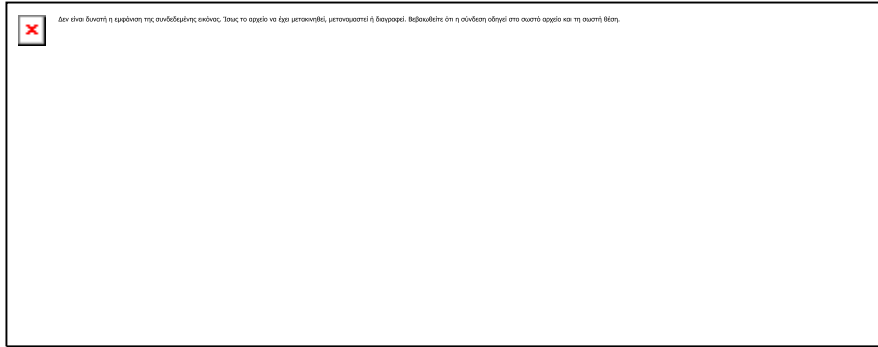
- **Διαμόρφωση φάσης (phase modulation – PM)**: ο τύπος της διαμόρφωσης όπου η γωνία φάσης του φορέα μεταβάλλεται σχετικά με την τιμή αναφοράς της ανάλογα με το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος.
- **Διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation – FM)**: ο τύπος της διαμόρφωσης όπου η συχνότητα του φορέα μεταβάλλεται σχετικά με την τιμή αναφοράς της ανάλογα με το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος.

Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο αυτών τύπων διαμόρφωσης γωνίας είναι ότι στην PM η μεταβολή της φάσης είναι ανάλογη του πλάτους της πληροφορίας, ενώ στην FM είναι η μεταβολή της συχνότητας που είναι ανάλογη του πλάτους της πληροφορίας.

Η αρχή λειτουργίας της διαμόρφωσης συχνότητας διατυπώθηκε αρχικά το 1931 ως εναλλακτική μέθοδος της διαμόρφωσης πλάτους. Το πρώτο πρακτικό σύστημα ραδιοφωνικής εκπομπής FM υλοποιήθηκε από τον ταγματάρχη Ε. Η. Armstrong το 1936, και ετέθη σε κανονική λειτουργία στη πόλη Alpine της πολιτείας New Jersey των ΗΠΑ.

5.1 Ένας απλός τρόπος παραγωγής FM

Προκειμένου να γίνει αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο παράγονται σήματα διαμορφωμένα κατά συχνότητα, ας θεωρήσουμε την απλή διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1.

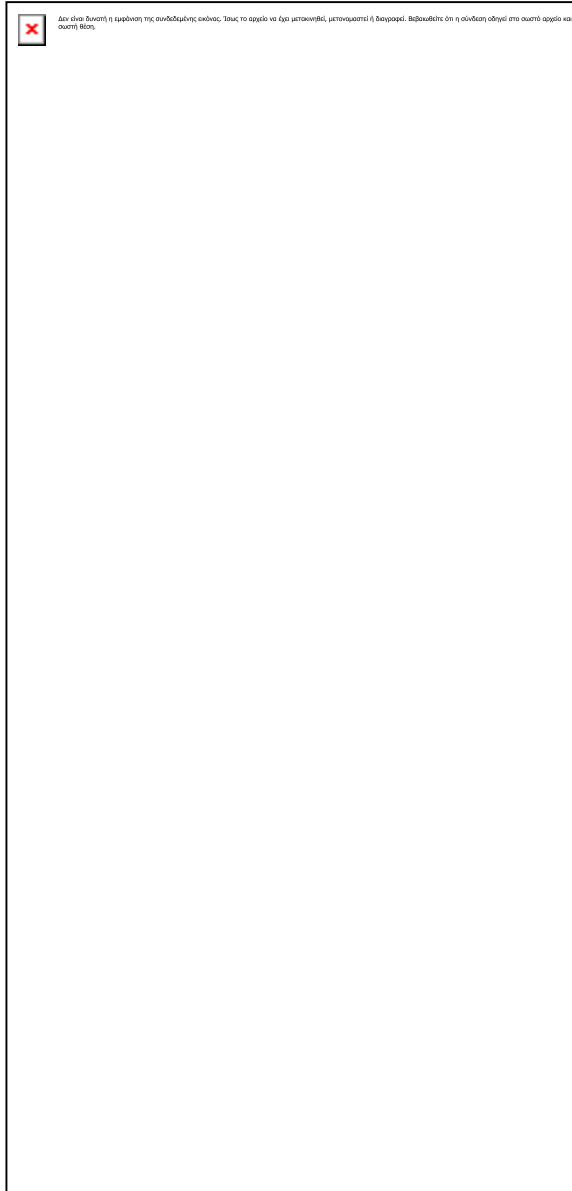


Σχήμα 5-1. Απλή διάταξη παραγωγής FM από πυκνωτικό μικρόφωνο.

Η απλή αυτή διάταξη παραγωγής σήματος FM αποτελείται από ένα συντονιζόμενο LC κύκλωμα, που, σε συνδυασμό με ένα κύκλωμα ταλαντωτή παράγει μια ημιτονική κυματομορφή στην έξοδό του. Η χωρητική συνιστώσα του LC κυκλώματος δεν είναι ένας κοινός πυκνωτής αλλά ένα πυκνωτικό μικρόφωνο (capacitor microphone), το οποίο στην πραγματικότητα συμπεριφέρεται ως πυκνωτής μεταβλητής χωρητικότητας. Όταν δεν υπάρχει κάποιο ακουστικό σήμα στην είσοδο του μικροφώνου, η χωρητικότητα στην έξοδό του λαμβάνει μια σταθερή και συγκεκριμένη τιμή. Στην περίπτωση που υπάρχει σήμα ομιλίας, τα παραγόμενα ακουστικά κύματα δονούν τους οπλισμούς του πυκνωτή προκαλώντας μεταβολή της χωρητικότητας γύρω από τη σταθερή τιμή. Ο ρυθμός μεταβολής της χωρητικότητας είναι ίσος προς τη συχνότητα των προσπιπτόμενων ακουστικών κυμάτων, ενώ η μεταβολή της χωρητικότητας είναι ανάλογη του πλάτους των ακουστικών κυμάτων. Λόγω του ότι η χωρητικότητα αυτή επηρεάζει άμεσα την συχνότητα του κυκλώματος του ταλαντωτή, ισχύουν τα ακόλουθα δύο πολύ σημαντικά συμπεράσματα για τη συχνότητα εξόδου:

1. Η συχνότητα των προσπιπτόμενων ηχητικών κυμάτων καθορίζει το ρυθμό αλλαγής της συχνότητας.
2. Το πλάτος των προσπιπτόμενων ηχητικών κυμάτων καθορίζει το μέτρο της μεταβολής της συχνότητας.

Ας δούμε όμως πιο αναλυτικά πως παράγεται ένα σήμα FM, σχολιάζοντας την απλή περίπτωση που η πληροφορία είναι ένα καθαρό ημιτονικό ακουστικό σήμα περιόδου T , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2.



Σχήμα 5-2. Παραγωγή FM.

Μέχρι την χρονική στιγμή T_1 ο αδιαμόρφωτος φορέας είναι μια ημιτονική κυματομορφή σταθερής συχνότητας και πλάτους, η οποία ονομάζεται **συχνότητα ηρεμίας (rest frequency)**. Τη χρονική στιγμή T_1 το πλάτος της πληροφορίας αρχίζει να αυξάνεται για να φθάσει σταδιακά στη μέγιστη τιμή του τη χρονική στιγμή T_2 . Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος η συχνότητα του φορέα

αυξάνεται σταδιακά και φθάνει στη μέγιστη τιμή της όταν το πλάτος της πληροφορίας γίνεται μέγιστο, δηλαδή στη χρονική στιγμή T_2 . Από τη χρονική στιγμή T_2 έως και την T_4 το πλάτος της πληροφορίας μεταβαίνει σταδιακά από τη μέγιστη θετική στην ελάχιστη αρνητική τιμή του, και, αντιστοίχως η συχνότητα του διαμορφωμένου κύματος μεταβαίνει από μια μέγιστη τιμή -που είναι μεγαλύτερη της συχνότητας ηρεμίας- σε μια ελάχιστη τιμή -που είναι μικρότερη της συχνότητας ηρεμίας-. Τη χρονική στιγμή T_3 το πλάτος του ακουστικού σήματος είναι μηδέν και επομένως η συχνότητα του διαμορφωμένου φορέα είναι στιγμιαία ίση προς την συχνότητα ηρεμίας. Στη συνέχεια, το πλάτος του ακουστικού σήματος αρχίζει και πάλι να αυξάνει από τη χρονική στιγμή T_4 έως και $T+T_1$ με αποτέλεσμα αντιστοιχική αύξηση της συχνότητας του σήματος FM, κ.ο.κ.

Το ποσό της αύξησης ή της μείωσης της συχνότητας του διαμορφωμένου σήματος περί την συχνότητα ηρεμίας του φορέα f_c ονομάζεται απόκλιση συχνότητας δ (frequency deviation). Η γραφική παράσταση της απόκλισης συχνότητας συναρτήσει του χρόνου φαίνεται στο Σχήμα 5-2(c). Λόγω του ότι το σήμα της πληροφορίας είναι ένας καθαρός ημιτονικός τόνος, η συνάρτηση της απόκλισης συχνότητας είναι επίσης ημιτονική. Στο Σχήμα 5-2(d) διακρίνεται και το αντίστοιχο σήμα διαμορφωμένο κατά πλάτος για λόγους σύγκρισης.

Το απλό κύκλωμα με το πυκνωτικό μικρόφωνο χρησιμοποιείται σπάνια σε πρακτικές εφαρμογές, αλλά η αξία του συνίσταται στην ευκολία με την οποία μπορεί κανείς να αντιληφθεί πρακτικά τη διαδικασία παραγωγής διαμόρφωσης συχνότητας. Αν η συχνότητα του προσπιπτόμενου ακουστικού κύματος διπλασιαζόταν ενώ το πλάτος του παρέμενε σταθερό, τότε ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας του διαμορφωμένου κύματος περί τη συχνότητα ηρεμίας θα διπλασιαζόταν. Εφόσον όμως το πλάτος του ακουστικού κύματος παρέμενε σταθερό, η απόκλιση συχνότητας άνω και κάτω της συχνότητας ηρεμίας θα παρέμενε η ίδια. Από την άλλη πλευρά, εάν το πλάτος του προσπιπτόμενου ακουστικού κύματος διπλασιαζόταν ενώ η συχνότητά του παρέμενε σταθερή, τότε η απόκλιση συχνότητας θα διπλασιαζόταν αλλά ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας του διαμορφωμένου κύματος θα παρέμενε σταθερός. Τα συμπεράσματα αυτά συνοψίζει ο Πίνακας 5-1.

Πληροφορία		Διαμορφωμένο σήμα FM	
Συχνότητα	Πλάτος	Απόκλιση	Ρυθμός αλλαγής συχνότητας φορέα
f_i	V_i	δ	ϱ
$n \times f_i$	V_i	δ	$n \times \varrho$
f_i	$n \times V_i$	$n \times \delta$	ϱ

Πίνακας 5-1. Επίδραση της μεταβολής του πλάτους και της συχνότητας της πληροφορίας στο διαμορφωμένο κατά συχνότητα σήμα.

Επομένως στη διαμόρφωση FM:

- Το πλάτος της πληροφορίας καθορίζει το εύρος της απόκλισης συχνότητας του διαμορφωμένου σήματος.
- Η συχνότητα της πληροφορίας καθορίζει το ρυθμό αλλαγής της συχνότητας του διαμορφωμένου σήματος.

5.2 Ανάλυση FM

Η πλήρης μαθηματική ανάλυση της διαμόρφωσης γωνίας απαιτεί τη χρήση ιδιαίτερα πολύπλοκων μαθηματικών. Για το λόγο αυτό στην ενότητα αυτή θα παρατεθούν μόνο τα τελικά αποτελέσματα. Έτσι, για την διαμόρφωση PM η μαθηματική σχέση που δίνει την στιγμιαία τιμή της τάσεως e_{PM} είναι:

$$(5.1) \quad e_{PM}(t) = A_c \cdot \sin \left[2\pi f_c \cdot t + m_p \cdot \sin(2\pi f_i \cdot t) \right],$$

όπου A_c είναι το μέγιστο πλάτος του φορέα, m_p η μέγιστη ολισθήση φάσης που προκαλείται από το σήμα της πληροφορίας σε *radians* και f_c, f_i είναι οι συχνότητες του φορέα και της πληροφορίας, αντίστοιχα. Η μέγιστη ολισθήση φάσης που προκαλείται από το σήμα της πληροφορίας, m_p , ονομάζεται **δείκτης διαμόρφωσης (modulation index)** της PM. Η ακόλουθη εξίσωση δίνει την ισοδύναμη για τη διαμόρφωση συχνότητας έκφραση για τη στιγμιαία τιμή της τάσεως e_{FM} , δηλαδή:

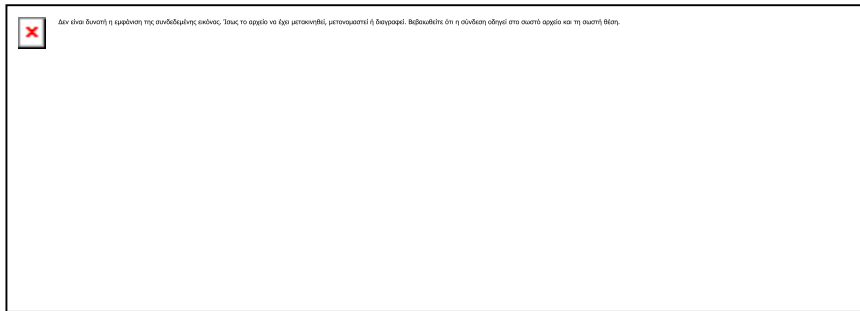
$$(5.2) \quad e_{FM}(t) = A_c \cdot \sin \left[2\pi f_c \cdot t + m_f \cdot \sin(2\pi f_i \cdot t) \right],$$

όπου m_f είναι ο δείκτης διαμόρφωσης (**modulation index**) της FM, ο οποίος ορίζεται ως:

$$(5.3) \quad m_f = \frac{\delta}{f_i},$$

όπου δ η μέγιστη ολίσθηση φάσης (ή ισοδύναμα όπως έχουμε ήδη ορίσει απόκλιση συχνότητας) προκαλούμενη από το σήμα της πληροφορίας.

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (5.1) και (5.2) προκύπτει και η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο υποκατηγοριών της διαμόρφωσης γωνίας, δηλαδή ότι στην PM η φάση του φορέα μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος, ενώ στην FM η φάση καθορίζεται από το λόγο του πλάτους προς τη συχνότητα της πληροφορίας. Επομένως, η διαμόρφωση FM δεν είναι ευαίσθητη στη συχνότητα του διαμορφώνοντος σήματος, ενώ η PM είναι.



Σχήμα 5-3. Η επίδραση του πλάτους της πληροφορίας στην απόκλιση συχνότητας στην FM και PM.

Η διαφορά μεταξύ των διαμορφώσεων FM και PM είναι στην πραγματικότητα λεπτή. Εάν το σήμα της πληροφορίας ολοκληρωθεί και το παραγόμενο σήμα στη συνέχεια διαμορφώσει τον φορέα κατά φάση, τότε προκύπτει διαμόρφωση συχνότητας. Στην FM το εύρος της απόκλισης δεν εξαρτάται από την συχνότητα της πληροφορίας, όπως στην περίπτωση της PM. Το εύρος της απόκλισης είναι όμως ανάλογο του πλάτους του σήματος της πληροφορίας τόσο για την FM όσο και για την PM. Οι διαπιστώσεις αυτές παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 5-3.

5.2.1 Μαθηματική λύση για την διαμόρφωση FM

Η Εξίσωση (5.2) είναι στην πραγματικότητα πιο πολύπλοκη απ' ό,τι φαίνεται, διότι περιέχει το ημίτονο ενός ημιτόνου. Ο προσδιορισμός του συχνοτικού περιεχομένου ενός σήματος FM απαιτεί τη γνώση και τη χρήση των συναρτήσεων Bessel. Με τη βοήθεια των συναρτήσεων Bessel αποδεικνύεται ότι η διαμόρφωση ενός φορέα κατά συχνότητα δημιουργεί ένα άπειρο πλήθος πλευρικών συνιστωσών οι οποίες είναι πολλαπλάσια της συχνότητας της πληροφορίας f_i , εκατέρωθεν της συχνότητας του φορέα. Ευτυχώς, το πλάτος των συνιστωσών αυτών μειώνεται γρήγορα καθώς απομακρυνόμαστε από τη συχνότητα του φορέα, επιτρέποντας την εκπομπή ενός σήματος FM εντός πεπερασμένου εύρους ζώνης. Η πλήρης λύση για την κυματομορφή FM δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

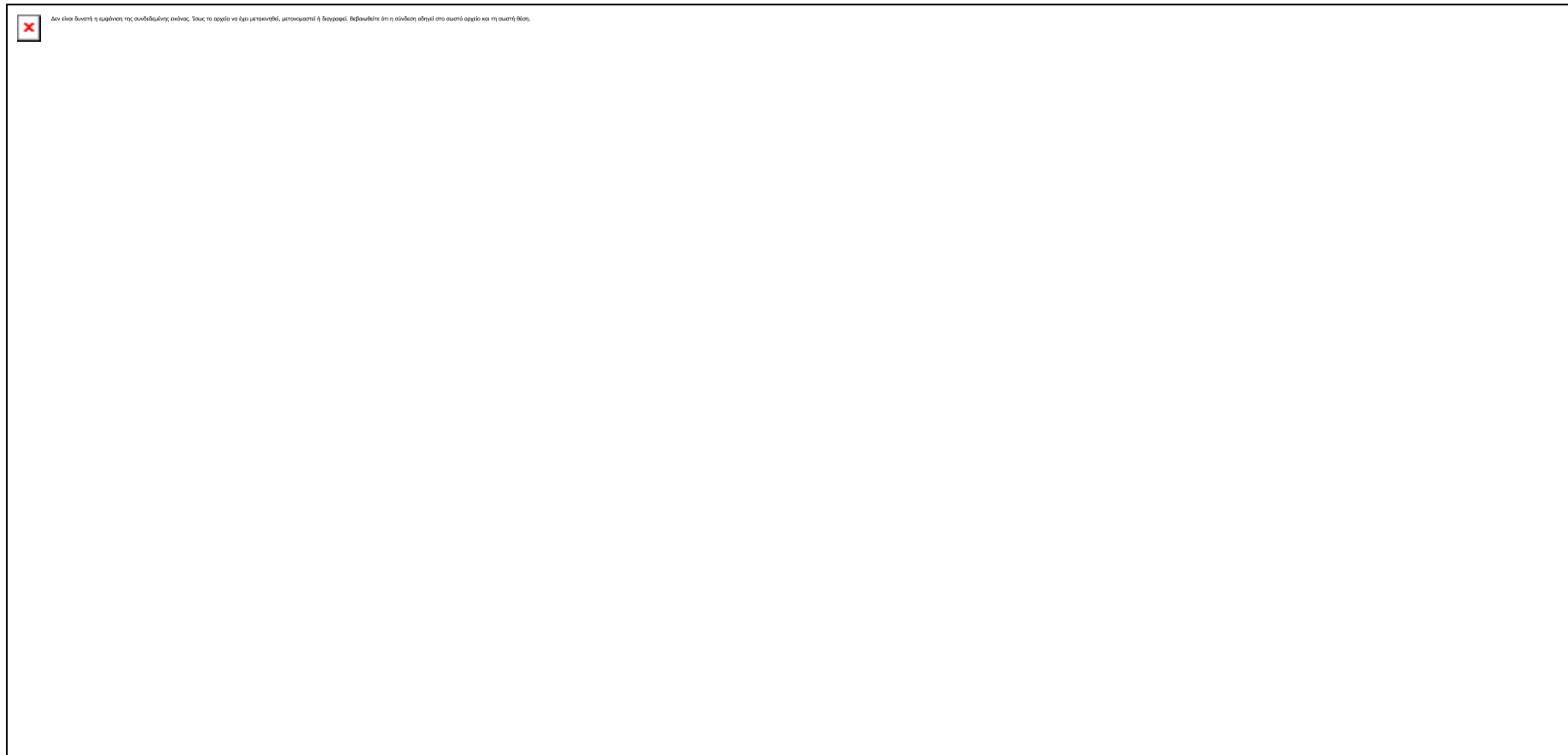
$$(5.4) \quad e_{FM}(t) = J_0(m_f) \cos(2\pi f_c \cdot t) - J_1(m_f) [\cos(2\pi(f_c - f_i) \cdot t) - \cos(2\pi(f_c + f_i) \cdot t)] \\ + J_2(m_f) [\cos(2\pi(f_c - 2f_i) \cdot t) + \cos(2\pi(f_c + 2f_i) \cdot t)] \\ - J_3(m_f) [\cos(2\pi(f_c - 3f_i) \cdot t) - \cos(2\pi(f_c + 3f_i) \cdot t)] \\ + \dots$$

όπου e_{FM} είναι η κυματομορφή FM και $J_n(m_f)$ η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και τάξεως n , η οποία καθορίζει το πλάτος της n -οστής αρμονικής. Ειδικότερα, η $J_0(m_f)$ δίδει το πλάτος στη συχνότητα του φορέα, ενώ η $J_n(m_f)$ δίδει το πλάτος των αρμονικών στις συχνότητες $f_c - n f_i$, $f_c + n f_i$. Η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και τάξεως n μπορεί να προσδιοριστεί από την ακόλουθη Εξίσωση:

$$(5.5) \quad J_n(m_f) = \left(\frac{m_f}{2}\right)^n \cdot \left[\frac{1}{n!} - \frac{(m_f/2)^2}{1!(n+1)!} + \frac{(m_f/2)^4}{2!(n+2)!} - \frac{(m_f/2)^6}{3!(n+3)!} + \dots \right],$$

ή από τον αναδρομικό τύπο:

$$(5.6) \quad J_{n+1}(m_f) = \frac{2n}{m_f} J_n(m_f) - J_{n-1}(m_f).$$



Πίνακας 5-2. Αρμονικές συχνότητες FM και προσδιορισμός των πλατών τους από τις συναρτήσεις Bessel.

Ο προσδιορισμός των πλατών των απείρων αρμονικών που δημιουργεί η διαμόρφωση συχνότητας είναι αρκετά κοπιαστικός και εξαρτάται από τον δείκτη διαμόρφωσης. Για το λόγο αυτό τα πλάτη $J_n(m_f)$ δίδονται συνήθως πινακοποιημένα για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης m_f . Ο Πίνακας 5-2 περιέχει προϋπολογισμένα πλάτη $J_n(m_f)$ για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης m_f .

Ο Πίνακας 5-2 μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για τον προσδιορισμό του εύρους ζώνης που καταλαμβάνει το διαμορφωμένο κατά συχνότητα σήμα. Για παράδειγμα στην περίπτωση που $m_f = 0.25$ το πλάτος στη συχνότητα του φορέα λαμβάνει την τιμή 0.98 ενώ η πρώτη αρμονική 0.12. Τα πλάτη των αρμονικών ανωτέρας τάξης είναι αμελητέα και γι αυτό στη θέση τους υπάρχουν παύλες στον σχετικό Πίνακα. Επίσης, το εύρος ζώνης περιλαμβάνει όλες τις μη μηδενικού πλάτους αρμονικές, δηλαδή σ' αυτή την περίπτωση εκτείνεται απλώς μέχρι και την πρώτη αρμονική. Μια εναλλακτική αλλά προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό του εύρους ζώνης που καταλαμβάνει ένα σήμα διαμορφωμένο κατά συχνότητα είναι ο κανόνας του Carson. Ο κανόνας του Carson δίδεται από τη σχέση:

$$(5.7) \quad BW_{FM} \approx 2 \cdot (\delta_{\max} + f_{i_{\max}}),$$

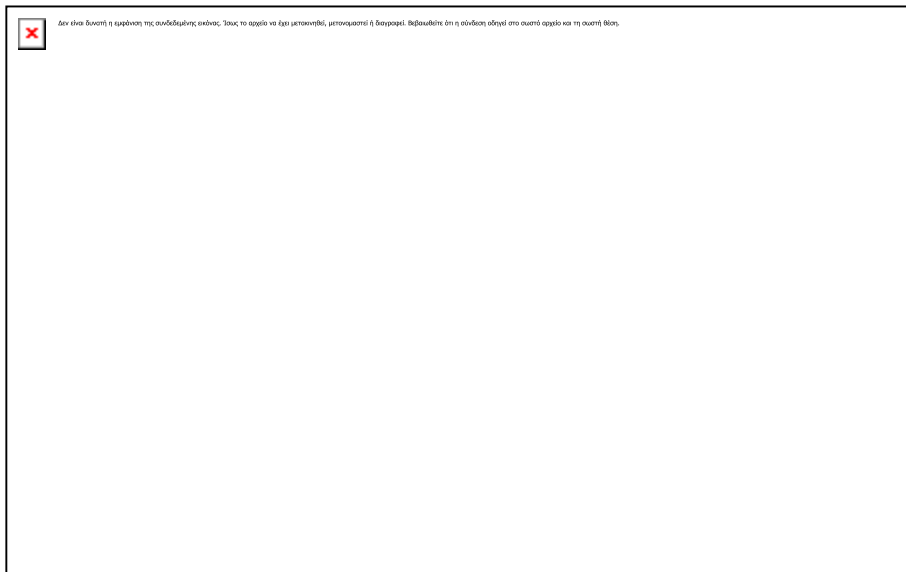
όπου δ_{\max} είναι η μέγιστη απόκλιση συχνότητας και $f_{i_{\max}}$ είναι η μέγιστη συχνότητα της πληροφορίας. Το εύρος ζώνης που προσδιορίζει ο κανόνας του Carson περιλαμβάνει περίπου 98% της συνολικής ισχύος του σήματος FM.

5.2.2 Φορέας μηδενικού πλάτους

Το Σχήμα 5-4 απεικονίζει το φάσμα FM για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης για σταθερή συχνότητα διαμόρφωσης. Παρατηρώντας ταυτόχρονα και τις τιμές των πλατών, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 5-2, διαπιστώνουμε ότι καθώς ο δείκτης διαμόρφωσης μεταβαίνει από την τιμή $m_f=2$ στην τιμή $m_f=2.5$ η συνάρτηση J_0 της συνιστώσας του φορέα αλλάζει πρόσημο. Η μετάβαση από θετικό σε αρνητικό πρόσημο σημαίνει αντιστροφή φάσης, αλλά για $m_f=2.4$ η συνιστώσα του φορέα έχει μηδενικό πλάτος και όλη η ενέργεια του σήματος FM περιέχεται στις πλευρικές

συχνότητες. Το ίδιο επίσης συμβαίνει και για τιμές του δείκτη διαμόρφωσης $m_f=5.5$, 8.65, και μεταξύ 10 και 12 και 12 και 15.

Η κατάσταση αυτή στην οποία το πλάτος του φορέα μηδενίζεται παρέχει ένα βολικό τρόπο για τον προσδιορισμό της απόκλισης που προκαλείται σε έναν διαμορφωτή FM. Ο φορέας διαμορφώνεται από ένα ημιτονικό σήμα δεδομένης συχνότητας. Το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος μεταβάλλεται ενώ ταυτόχρονα το συχνοτικό περιεχόμενο του παραγόμενου σήματος FM παρατηρείται στην οθόνη ενός φασματικού αναλυτή. Στο σημείο που το πλάτος του φορέα μηδενίζεται, ο δείκτης διαμόρφωσης m_f προσδιορίζεται με βάση τον αριθμό των παρατηρουμένων πλευρικών συνιστωσών. Για παράδειγμα, εάν 4 ή 5 αρμονικές εμφανίζονται γύρω από τον μηδενικού πλάτους φορέα, τότε μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι $m_f=2.4$. Τότε, η απόκλιση συχνότητας είναι απλά $2.4 \times f_i$.



Σχήμα 5-4. Φάσμα FM για σήμα πληροφορίας σταθερής συχνότητας αλλά μεταβαλλόμενου πλάτους (και συνεπώς απόκλισης).

5.2.3 Τυπικές εφαρμογές FM

Η τυποποιημένη ραδιοφωνική εκπομπή FM στην Ελλάδα χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 300kHz για κάθε σταθμό. Το εύρος αυτό ζώνης είναι πραγματικά αρκτικό, και θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί ότι εντός αυτού θα μπορούσαν να χωρέσουν αρκετές δεκάδες ραδιοφωνικών σταθμών AM. Από την άλλη πλευρά όμως, η ραδιοφωνική

εκπομπή FM επιτρέπει την αναπαραγωγή σημάτων με συχνοτικό περιεχόμενο μέχρι και 15kHz με πολύ υψηλή πιστότητα, ενώ είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στην επίδραση του θορύβου.

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ο ένας σταθμός δεν παρεμβάλλει τον άλλο¹, χρησιμοποιούνται **ζώνες φύλαξης (guard bands)** μεταξύ γειτονικών εκπομπών (προγραμμαμάτων σταθμών). Έτσι η μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση συχνότητας περί την συχνότητα του φορέα για τους ραδιοφωνικούς σταθμούς FM στη χώρα μας είναι $\pm 75\text{kHz}$, ενώ το εύρος των άνω και κάτω ζωνών φύλαξης είναι επίσης 75kHz. Η συχνότητα του φορέα πρέπει να παραμένει σταθερή με επιτρεπόμενη μέγιστη διακύμανση περί την εκχωρηθείσα τιμή $\pm 2\text{kHz}$. Επίσης, ορίζεται ότι έχουμε FM διαμόρφωση 100% όταν η απόκλιση συχνότητας φθάνει στη μέγιστη επιτρεπτή τιμή της, δηλαδή 75kHz. Η τιμή του δείκτη διαμόρφωσης που αντιστοιχεί στις μέγιστες τιμές της απόκλισης συχνότητας και της συχνότητας της πληροφορίας ονομάζεται συχνά **λόγος απόκλισης (deviation ratio)**. Για την ραδιοφωνική FM ο λόγος απόκλισης έχει την τιμή $75\text{kHz}/15\text{kHz} = 5$.

Διαμόρφωση συχνότητας χρησιμοποιείται επίσης ευρέως και σε εφαρμογές συστημάτων επικοινωνίας, όπως επικοινωνίες ασφάλειας, αεροναυτικές επικοινωνίες, ειδικά ραδιοδίκτυα (ταξί, στόλος διανομής αγαθών, βιομηχανικές επικοινωνίες), μετεωρολογία, κλπ. Στα συστήματα αυτά η πληροφορία είναι συνήθως ανθρώπινη ομιλία, και επομένως η συνήθης μέγιστη συχνότητα δεν ξεπερνά τα 3.4kHz. Το εύρος ζώνης που εκχωρείται σε αυτές τις εφαρμογές δεν ξεπερνά συνήθως τα 25kHz και γι αυτό το λόγο αναφέρονται ως συστήματα **FM στενής ζώνης (narrowband FM)**.

5.3 Περιορισμός του Θορύβου στην FM

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της διαμόρφωσης FM έναντι της διαμόρφωσης AM είναι η πολύ ανώτερη συμπεριφορά της σχετικά με το θόρυβο. Διαισθητικά γνωρίζουμε ότι πολύ σπάνια ακούγεται στατικός θόρυβος στην FM, ενώ αντιθέτως στην AM είναι κοινή υπόθεση. Η προσθήκη θορύβου σε ένα λαμβανόμενο σήμα προκαλεί μεταβολή του πλάτους του. Εφόσον στην AM η μεταβολή του πλάτους περιέχει την πληροφορία, κάθε προσπάθεια απαλλαγής από το θόρυβο επιδρά αρνητικά στο λαμβανόμενο σήμα. Στην περίπτωση όμως της FM η πληροφορία δεν μεταφέρεται στη μεταβολή του πλάτους αλλά στην μεταβολή της συχνότητας. Οι απότομες και για πολύ μικρό χρονικό διάστημα μεταβολές του πλάτους που οφείλονται στον εξωτερικό θόρυβο εξουδετερώνονται από ένα κύκλωμα περιοριστή πλάτους (limiter) ή/και εμμέσως από τη χρήση κυκλωμάτων ανίχνευσης τα οποία δεν είναι ευαίσθητα στις διακυμάνσεις πλάτους.



Σχήμα 5-5. Ποιοτική σύγκριση της επίδρασης του θορύβου στις διαμορφώσεις FM και AM.

Το Σχήμα 5-5(a) παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο δρα ένα κύκλωμα περιοριστή πλάτους στην FM συμπιέζοντας την επίδραση του θορύβου. Αντίθετα, στην περίπτωση του δέκτη AM ο θόρυβος περνά στις ενδιάμεσες μονάδες του δέκτη και τελικά ακούγεται ενοχλητικά στο μεγάφωνο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-5(b). Παρά

¹ Ανακαλέστε ότι το φάσμα της FM είναι άπειρο.

το ότι το κύκλωμα του περιοριστή πλάτους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην εξάλειψη του θορύβου που μεταβάλλει το πλάτος της διαμορφωμένης κυματομορφής, εισάγει ανεπιθύμητη ολίσθηση φάσης η οποία δυστυχώς δεν μπορεί να απομακρυνθεί από το δέκτη.

Η συχνότητα του σήματος του θορύβου ευρίσκεται κοντά στη συχνότητα του επιθυμητού FM σήματος, λόγω του φαινομένου της επιλεκτικότητας των συντονισμένων κυκλωμάτων στο δέκτη. Με άλλα λόγια, εάν είμαστε συντονισμένοι σε ένα σταθμό FM, ως πούμε στα 100MHz, λόγω της επιλεκτικότητας του δέκτη ενισχύονται μόνο οι συχνότητες που είναι πολύ κοντά στα 100MHz. Ο θόρυβος που επηρεάζει τη λήψη του σταθμού αυτού θα πρέπει να ευρίσκεται γύρω από τα 100MHz, εφόσον όλες οι άλλες συχνότητες υφίστανται μεγάλη εξασθένηση. Το αποτέλεσμα της πρόσθεσης του επιθυμητού σήματος και του θορύβου θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός σήματος με διαφορετική γωνία φάσης από αυτή που θα είχε μόνο του το επιθυμητό σήμα. Έτσι, παρότι το γεγονός ότι το πλάτος του θορύβου εξαιρείται, το σήμα του θορύβου είναι σε θέση να προκαλέσει διαμόρφωση φάσης, η οποία εμμέσως προκαλεί ανεπιθύμητη διαμόρφωση FM. Το μέγεθος της παραγόμενης απόκλισης συχνότητας δ_n που προκαλείται από την PM που οφείλεται στο θόρυβο, δίδεται από την σχέση:

$$(5.8) \quad \delta_n = \phi \times f_i,$$

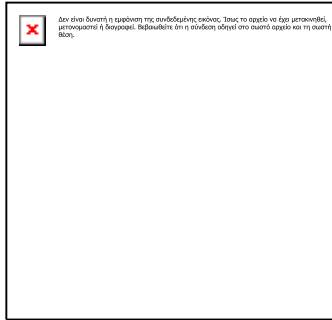
όπου ϕ είναι η ολίσθηση φάσης σε *radians* και f_i η συχνότητα της πληροφορίας.

5.3.1 Ανάλυση θορύβου στην FM

Η ολίσθηση φάσης που προκαλείται από το θόρυβο μπορεί να εκτιμηθεί από την Εξίσωση (5.8). Για να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο ο θόρυβος επηρεάζει την διαμόρφωση FM ως θεωρήσουμε το σενάριο που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-6. Ο λόγος του σήματος S προς το θόρυβο N είναι 2:1, ενώ λόγω του ότι οι συχνότητές του είναι παραπλήσιες αλλά διαφορετικές, ο θόρυβος παριστάνεται ως περιστρεφόμενο διάνυσμα. Η ολίσθηση φάσης της συνισταμένης R των δύο

διανυσμάτων λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν τα διανύσματα του σήματος και του θορύβου είναι κάθετα μεταξύ τους. Έτσι, στην χειρότερη περίπτωση:

$$(5.9) \quad \phi = \sin^{-1} \frac{N}{S} = \sin^{-1} \frac{1}{2} = 30^\circ \approx 0.5 \text{rad} .$$



Σχήμα 5-6. Ολίσθηση φάσης προκαλούμενη από θόρυβο.

Υποθέτοντας ότι η μέγιστη συχνότητα που περιέχεται στο σήμα της πληροφορίας είναι η μεγαλύτερη δυνατή, δηλαδή 15kHz, προκύπτει η χειρότερη δυνατή τιμή για την απόκλιση δ_{noise} που εισάγει ο θόρυβος, ήτοι:

$$(5.10) \quad \delta_{noise} = \phi \times f_i = 0.5 \text{rad} \times 15 \text{kHz} = 7.5 \text{kHz} .$$

Στην τυποποιημένη ραδιοφωνία FM για διαμορφώνον σήμα συχνότητας 15kHz αντιστοιχεί απόκλιση $\delta=75\text{kHz}$. Υποθέτοντας ότι ο δέκτης δεν εισάγει επιπρόσθετο θόρυβο (δηλαδή έχει παράγοντα θορύβου $NF=1$), ο λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του δέκτη είναι προσεγγιστικά ίσος με $(S/N)_o = \delta / \delta_{noise} = 75\text{kHz} / 7.5\text{kHz} = 10$. Επομένως, ενώ στην είσοδο του δέκτη FM ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι 2:1, στην έξοδό του είναι 10:1 αποδεικνύοντας ότι η διαμόρφωση συχνότητας έχει την ενδογενή ιδιότητα να συμπιέζει τα φαινόμενα του θορύβου σε αντίθεση με την διαμόρφωση AM στην οποία ο λόγος S/N έχει περίπου την ίδια τιμή στην έξοδο με την τιμή εισόδου.

Η ενδογενής ιδιότητα της FM να συμπιέζει το θόρυβο μπορεί να εφαρμοστεί στην εξάλειψη σημάτων παρεμβολής. Έτσι όταν ένας σταθμός παρεμβάλλεται από κάποιον άλλο ο δέκτης έχει την δυνατότητα να απορρίψει τον παρεμβάλλοντα σταθμό, εάν ο λόγος των δύο σημάτων είναι τουλάχιστον 2:1 (επιθυμητός προς ανεπιθύμητο). Η ιδιότητα αυτή της FM συνιστά το **φαινόμενο σύλληψης (capture**

effect). Ωστόσο, όταν οι ισχείς των δύο FM σταθμών είναι περίπου ίδιες, το φαινόμενο σύλληψης έχει ως αποτέλεσμα την εναλλακτική υπερίσχυση του ενός ή του άλλου. Για όσο χρόνο το ένα σήμα είναι ισχυρότερο από το άλλο, αυτό το σήμα θα υπερισχύει και θα ακούγεται στο δέκτη, ενώ το ασθενέστερο θα απορρίπτεται. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην ΑΜ, που ανεξάρτητα από την στάθμη ισχύος των συγχαναλικών σημάτων, περνά στην έξοδο του δέκτη και τα δύο σήματα κατά προσθετικό τρόπο. Έτσι, ακόμα κι αν ο ένας σταθμός είναι πολύ ισχυρότερος από τον άλλο, ο ασθενής σταθμός θα εξακολουθήσει να ακούγεται στο υπόβαθρο. Στην περίπτωση που οι σταθμοί είναι περίπου ίδιας ισχύος, τότε θα ακούγονται και οι δύο μαζί με τελικό αποτέλεσμα να είναι ακατάληπτοι. Το φαινόμενο σύλληψης γίνεται επίσης αντιληπτό στο Σχήμα 5-7.



Σχήμα 5-7. Λόγος σήματος προς θόρυβο πριν και μετά την αποδιαμόρφωση για ΑΜ και FM.

Παρατηρείστε ότι ο λόγος S/N μετά την αποδιαμόρφωση μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με το λόγο S/N πριν την αποδιαμόρφωση για την ΑΜ και την SSB. Υποθέτοντας ιδανικούς αποδιαμορφωτές (NF=1) η SSB (και η DSB) παρουσιάζουν τον ίδιο λόγο S/N τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του ανιχνευτή. Η μείωση της απόδοσης που διακρίνεται για την ΑΜ οφείλεται στην σπατάλη ενέργειας στο φορέα, ενώ η απόδοση της SSB είναι σαφώς καλύτερη από αυτή της ΑΜ λόγω της αποκοπής του φορέα. Στην FM και για τιμές του δείκτη διαμόρφωσης μεγαλύτερες της μονάδας η βελτίωση στο λόγο S/N στην έξοδο του αποδιαμορφωτή είναι

σημαντική. Για παράδειγμα, για $m_f=5$ και $S/N=20$ πριν την αποδιαμόρφωση, ο λόγος S/N γίνεται περίπου 38 μετά την αποδιαμόρφωση, δηλαδή βελτιώνεται περίπου 2 φορές.

Τέλος, αξιοπρόσεκτο στο Σχήμα 5-7 είναι και το σημείο καμπής -το οποίο συχνά ονομάζεται και κατώφλι (threshold)-, κάτω από το οποίο ο λόγος S/N μετά την αποδιαμόρφωση χειροτερεύει με γοργό ρυθμό όταν η στάθμη του θορύβου πλησιάζει τη στάθμη του ωφέλιμου σήματος.

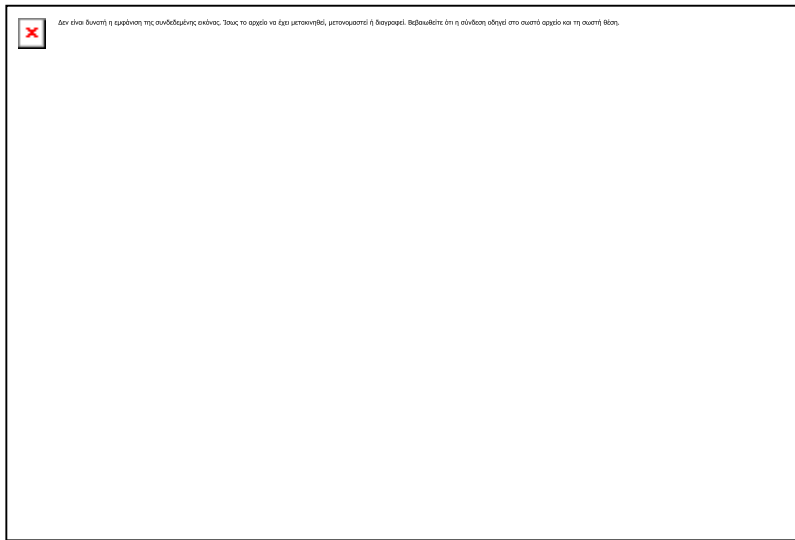
5.3.2 Προέμφαση και αποέμφαση

Έχει αποδειχθεί ότι η ενδογενής ικανότητα της FM να συμπιέζει το θόρυβο ελαττώνεται καθώς η συχνότητα της πληροφορίας αυξάνεται. Επίσης οι υψίσυχνες συνιστώσες της πληροφορίας έχουν γενικά μικρότερο πλάτος από αυτές των χαμηλών συχνοτήτων. Έτσι, το πλάτος ενός μουσικού τόνου υψηλής συχνότητας μπορεί να είναι υποδιπλάσιο ή και ακόμη μικρότερο του πλάτους ενός τόνου χαμηλής συχνότητας. Στην FM όμως υποδιπλάσιο πλάτος σημαίνει και υποδιπλάσια απόκλιση συχνότητας και συνεπώς υποβιβασμό της ικανότητας απόρριψης θορύβου στο μισό. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό, το πλάτος των υψηλότερων συχνοτήτων ενισχύεται επιπλέον. Η διαδικασία της επιλεκτικής ενίσχυσης των υψηλότερων συχνοτήτων, ονομάζεται **προέμφαση (preemphasis)**. Εξ ορισμού, η ενίσχυση του πλάτους των υψίσυχνων συνιστωσών του ακουστικού σήματος λαμβάνει χώρα πριν τη διαμόρφωση. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση του λόγου σήματος υψηλών συχνοτήτων προς θόρυβο.

Η διαδικασία αυτή της επιλεκτικής ενίσχυσης των υψηλών συχνοτήτων πρέπει βεβαίως να αποκατασταθεί στο δέκτη, διότι η φυσική ισορροπία της έντασης των τόνων που συνθέτουν το ακουστικό έχει μεταβληθεί. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός κυκλώματος **αποέμφασης (deemphasis)**, του οποίου σκοπός είναι η απόσβεση του πλάτους των υψηλών συχνοτήτων με τέτοιο τρόπο ώστε να ανακτηθεί η αρχική τονική ισορροπία. Το κύκλωμα αποέμφασης τοποθετείται μεταξύ του ανιχνευτή και του ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων έτσι ώστε οι ακουστικές

συχνότητες να επιστρέψουν στο αρχικό τους επίπεδο (δηλαδή πριν η προέμφαση εφαρμοστεί) πριν τελικά ενισχυθούν στον ακουστικό ενισχυτή.

Ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνουν χώρα οι επιλεκτικές διαδικασίες ενίσχυσης και απόσβεσης συχνοτήτων συναρτήσει της συχνότητας της πληροφορίας στα κυκλώματα της προέμφασης και αποέμφασης απεικονίζεται στο . Η χαρακτηριστική καμπύλη της προέμφασης είναι επίπεδη για συχνότητες μέχρι 500Hz, αλλά από 500Hz έως 15000Hz το κέρδος αυξάνεται σταδιακά για να φθάσει από τα 3dB στα 2,120Hz στα 17dB στα 15kHz.



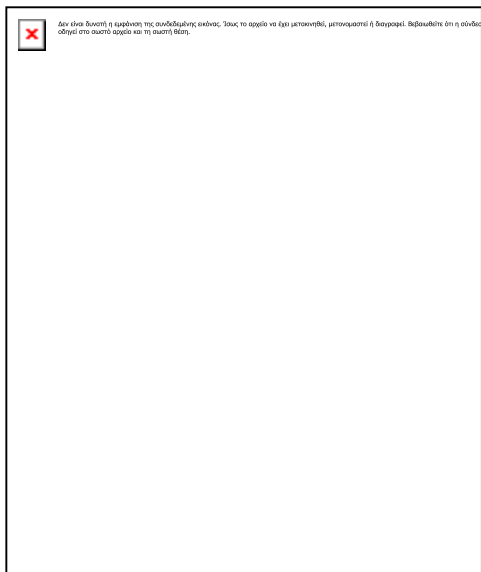
Σχήμα 5-8. Καμπύλες έμφασης για $\tau=75\mu s$ για ραδιοφωνική εκπομπή FM στις ΗΠΑ.

Η χαρακτηριστική του δικτύου αποέμφασης είναι ακριβώς αντίθετη αυτής του δικτύου προέμφασης. Ιδανικά, η χαρακτηριστική απόσβεσης του δικτύου αποέμφασης πρέπει να είναι το κατοπτρικό είδωλο της χαρακτηριστικής του δικτύου προέμφασης, ώστε να διατηρηθεί ακριβώς η τονική ισορροπία. Το σημείο ημίσεως ενίσχυσης (ή απόσβεσης) είναι στα 2,120Hz και αντιστοιχεί σε σταθερά χρόνου $RC = 1/2\pi f = 1/2\pi \cdot 2,120 = 75\mu s$.



Σχήμα 5-9. Κυκλώματα προέμφασης και αποέμφασης.

Τυπικά κυκλώματα προέμφασης και αποέμφασης απεικονίζονται στο Σχήμα 5-9. Η διαδικασία της προέμφασης μπορεί να εφαρμοστεί και δυναμικά, δηλαδή μεταβλητή ενίσχυση ανάλογα με το στιγμιαίο επίπεδο ισχύος της διαμορφωμένης FM κυματομορφής. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ η αρχή διαχείρισης φάσματος επιτρέπει στους ραδιοφωνικούς σταθμούς δυναμική προέμφαση επιβάλλοντας τη μείωση της χρονικής σταθεράς RC στα 25μs. Έτσι, προκύπτει η εκπομπή ραδιοφωνικού προγράμματος με την μέθοδο Dolby (Σχήμα 5-10). Στη μέθοδο Dolby το επίπεδο της προέμφασης είναι ανάλογο της στάθμης ισχύος του διαμορφωμένου σήματος.



Σχήμα 5-10. Χαρακτηριστικές δυναμικές προέμφασης Dolby στις ΗΠΑ.

5.4 Δέκτης FM

Ο βασικός δέκτης FM χρησιμοποιεί την αρχή του υπερετεροδύνου δέκτη. Στο παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού δέκτη FM, ο οποίος όπως παρατηρούμε έχει πολλές ομοιότητες με τους δέκτες AM που έχουμε ήδη περιγράψει. Οι μόνες φαινομενικά διαφορές συνίστανται στην αντικατάσταση του κυκλώματος του ανιχνευτή από τον **διευκρινιστή (discriminator)**, στην προσθήκη ενός δικτύου αποέμφασης (deemphasis network) και στο γεγονός ότι η χρήση του βρόχου αυτομάτου ελέγχου κέρδους AGC είναι προαιρετική. Το μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού δέκτη FM παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-11.



Σχήμα 5-11. Μπλοκ διάγραμμα τυπικού δέκτη FM.

Ο διευκρινιστής εξάγει την πληροφορία από τον υψίσυχο φορέα μετατρέποντας τις μεταβολές συχνότητας ή φάσης του φορέα σε διακυμάνσεις πλάτους. Το δίκτυο αποέμφασης—όπως έχουμε ήδη εξηγήσει— εισάγει επιλεκτική απόσβεση στις υψηλές συχνότητες ώστε να ανακτηθεί η αρχική τονική ισορροπία. Η προαιρετική χρήση AGC μπορεί αρχικά να δημιουργήσει ερωτηματικά. Όμως, η χρήση περιοριστών στους δέκτες FM υλοποιεί εμμέσως την διαδικασία AGC. Ο μείκτης, ο τοπικός

ταλαντωτής και οι ενισχυτές ενδιάμεσων βαθμίδων είναι ουσιαστικά όμοιοι με αυτούς που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια για τη διαμόρφωση ΑΜ. Η καθολικώς τυποποιημένη ενδιάμεση συχνότητα (IF) για την FM είναι 10.7MHz σε αντιδιαστολή με τους 455kHz για την ΑΜ.

5.5 Προβλήματα

- 1) Ορίστε τη διαμόρφωση γωνίας και τις υποκατηγορίες της.
- 2) Ποια η διαφορά μεταξύ διαμόρφωσης φάσης και συχνότητας;
- 3) Σε ένα πομπό FM η έξοδος αλλάζει μεταξύ 90.001 και 89.999MHz 1000 φορές το δευτερόλεπτο. Το πλάτος της πληροφορίας είναι 3V. Προσδιορίστε τη συχνότητα του φορέα και τη συχνότητα της πληροφορίας. Εάν η έξοδος αλλάζει μεταξύ 90.0015 και 89.9985MHz, υπολογίστε το πλάτος της πληροφορίας.
- 4) Εξηγήστε τι συμβαίνει στο φορέα FM όταν η τιμή του δείκτη διαμόρφωσης αυξάνεται σταδιακά από 0 σε 15.
- 5) Υπολογίστε το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει ένα σήμα FM όταν η μέγιστη αποκλιση είναι 15kHz και η συχνότητα της πληροφορίας 3kHz. Επαναλάβετε για συχνότητες πληροφορίας 1 και 5kHz.
- 6) Ένας πομπός FM διαμορφώνεται κατά 40% από ένα τόνο δοκιμής 5kHz. Ποια η διακύμανση συχνότητας του πομπού, όταν το ποσοστό διαμόρφωσης διπλασιαστεί;
- 7) Προσδιορίστε το εύρος ζώνης που απαιτείται για την εκπομπή ενός σήματος FM με $f_i=10\text{kHz}$ και μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση $\delta=20\text{kHz}$.
- 8) Προσδιορίστε το μέγιστο επιτρεπτό εύρος διακύμανσης του δείκτη διαμόρφωσης για την τυποποιημένη ραδιοφωνική εκπομπή FM η οποία έχει διαμορφώνουσες συχνότητες από 30Hz έως 15kHz. Επαναλάβετε για σύστημα FM στενής ζώνης που επιτρέπει μέγιστη αποκλιση $\delta=10\text{kHz}$ και διαμορφώνεται από συχνότητες εκτεινόμενες από 100Hz σε 3kHz.

- 9) Προσδιορίστε την σχετική ισχύ του φορέα και των πλευριών συνιστωσών όταν ο δείκτης διαμόρφωσης είναι 2. Δώστε αριθμητικό αποτέλεσμα όταν ο πομπός FM εκπέμπει συνολικά ισχύ 10kW.
- 10) Ένας πομπός FM παρέχει στην είσοδο μιας κεραιάς εκπομπής εμπέδησης 75Ω ένα σήμα $v(t) = 1000 \cdot \sin[10^9 \cdot t + 4 \sin(10^4 \cdot t)]$. Υπολογίστε τις συχνότητες του φορέα και της πληροφορίας, την ισχύ, το δείκτη διαμόρφωσης την απόκλιση και το καταλαμβανόμενο εύρος ζώνης.
- 11) Ο λόγος S/N είναι 4 στην είσοδο ενός δέκτη FM. Υπολογίστε για την χειρότερη περίπτωση το λόγο S/N στην έξοδο του δέκτη όταν ο εσωτερικός θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος.
- 12) Εξηγήστε γιατί τα συστήματα FM στενής ζώνης έχουν χειρότερη απόδοση αναφορικά στο θόρυβο από συστήματα ευρείας ζώνης.

