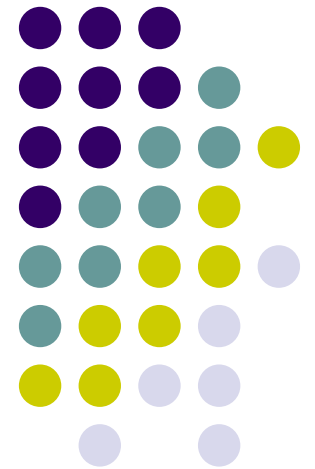
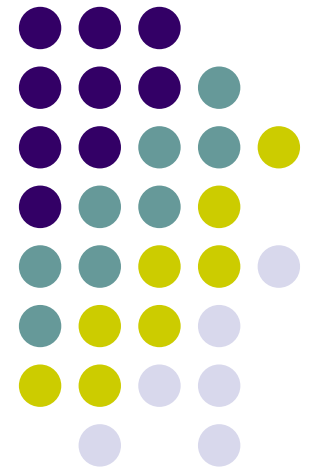


Θόρυβος στη διαμόρφωση CW

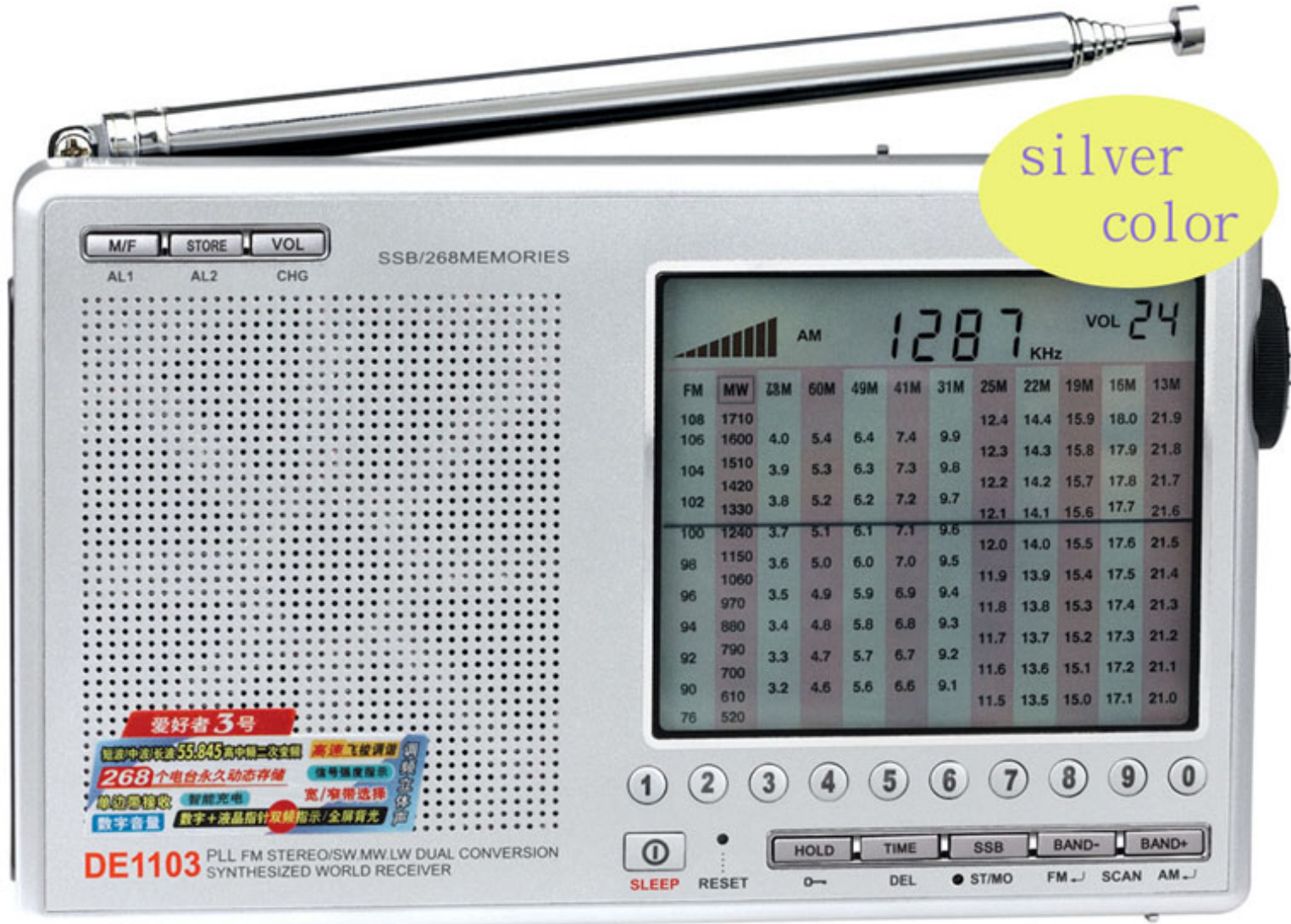


Εμπορικοί δέκτες





silver color



M/F STORE VOL
AL1 AL2 CHG

SSB/268MEMORIES

[Signal Strength]		AM		1287		VOL 24		KHz			
FM	MW	3M	60M	49M	41M	31M	25M	22M	19M	16M	13M
108	1710						12.4	14.4	15.9	18.0	21.9
106	1600	4.0	5.4	6.4	7.4	9.9	12.3	14.3	15.8	17.9	21.8
104	1510	3.9	5.3	6.3	7.3	9.8	12.2	14.2	15.7	17.8	21.7
	1420										
102	1330	3.8	5.2	6.2	7.2	9.7	12.1	14.1	15.6	17.7	21.6
100	1240	3.7	5.1	6.1	7.1	9.6	12.0	14.0	15.5	17.6	21.5
98	1150	3.6	5.0	6.0	7.0	9.5	11.9	13.9	15.4	17.5	21.4
	1060										
96	970	3.5	4.9	5.9	6.9	9.4	11.8	13.8	15.3	17.4	21.3
94	880	3.4	4.8	5.8	6.8	9.3	11.7	13.7	15.2	17.3	21.2
92	790	3.3	4.7	5.7	6.7	9.2	11.6	13.6	15.1	17.2	21.1
	700										
90	610	3.2	4.6	5.6	6.6	9.1	11.5	13.5	15.0	17.1	21.0
76	520										

爱好者3号

短波中波长波55.945高中解二次变频 高频直接调谐 调频立体声

268个电台永久动态存储 信号强度指示

总功率接收 智能充电 宽/窄带选择

数字音量 数字+液晶指针双频指示/全屏背光

DE1103 PLL FM STEREO/SW.MW.LW DUAL CONVERSION SYNTHESIZED WORLD RECEIVER

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

SLEEP RESET HOLD TIME SSB BAND- BAND+ DEL ST/MO FM SCAN AM

Κύριες λειτουργίες ραδιοφωνικών δεκτών



- Αποδιαμόρφωση
 - → λήψη του σήματος πληροφορίας
- Συντονισμός φέροντος
 - → επιλογή του σταθμού
- Φιλτράρισμα
 - → απαλοιφή θορύβου και παρεμβολών
- Ενίσχυση
 - → αντιμετώπιση των απώλειας ισχύος μετάδοσης



Βασική δυσκολία

- Κατασκευή επιλεκτικών (ζωνοπερατών) φίλτρων με μεταβλητή συχνότητα συντονισμού
- Μία μονάδα (κύκλωμα) με δυσκολία θα μπορούσε να επιτύχει όλα
 - Ευαισθησία (sensitivity)
 - Επιλεκτικότητα (selectivity)
 - Ποιότητα σήματος
 - Ενίσχυση



Πρακτικοί δέκτες

- Δέκτης άμεσης μετατροπής DC (Direct Conversion)
 - Ομοδύνηση: μίξη δύο σημάτων ίδιας συχνότητας
- Υπερετερόδυνος δέκτης (Superheterodyne receiver)
 - Ετεροδύνηση: μίξη δύο σημάτων διαφορετικών συχνοτήτων για λήψη νέας συχνότητας



Δέκτης άμεσης μετατροπής

- Ομόδυνη αποδιαμόρφωση
 - Απόρριψη ανεπιθύμητων συνιστωσών από το βαθυπερατό φίλτρο στην έξοδο
- Βρίσκονταν σε αφάνεια λόγω προβλημάτων υλοποίησης
 - Ολίσθηση συχνότητας τοπικού ταλαντωτή → PLL
 - Ανατροφοδότηση της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή στο κύκλωμα κεραίας
 - Ρεύμα ολίσθησης DC
- Επανήλθε στην επικαιρότητα μετά τη διάδοση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



Υπερετερόδυνος δέκτης

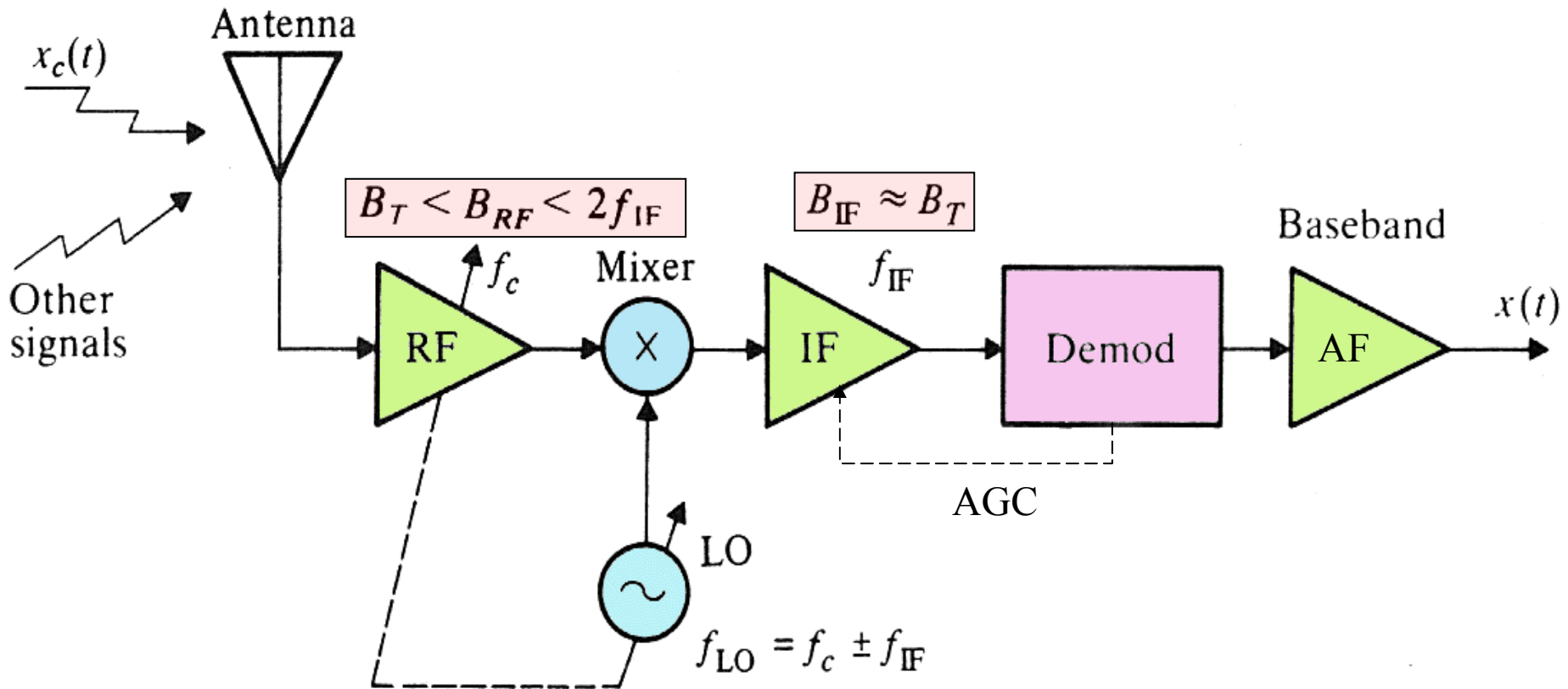
- Μίξη σημάτων RF με τοπικό φέρον για λήψη συγκεκριμένης ενδιάμεσης συχνότητας (IF)
 - Εφευρέθηκε το 1918 από τον E. Armstrong
 - Σχεδόν όλοι οι δέκτες ήταν τέτοιου τύπου



Βασική ιδέα

- Πρώτα, μετατροπή της συχνότητας φέροντος f_c του σήματος σε σταθερή ενδιάμεση συχνότητα f_{IF} μέσω συντονιζόμενου τοπικού ταλαντωτή f_{LO}
- Διάβαση μέσα από ζωνοπερατό φίλτρο υψηλής επιλεκτικότητας στην ενδιάμεση συχνότητα
 - Αφαίρεση το θορύβου και των εκτός ζώνης συνιστωσών πριν την μετατροπή σε σήμα βασικής ζώνης
- Τελικά, αποδιαμόρφωση σε σήμα βασικής ζώνης

Δομικό διάγραμμα

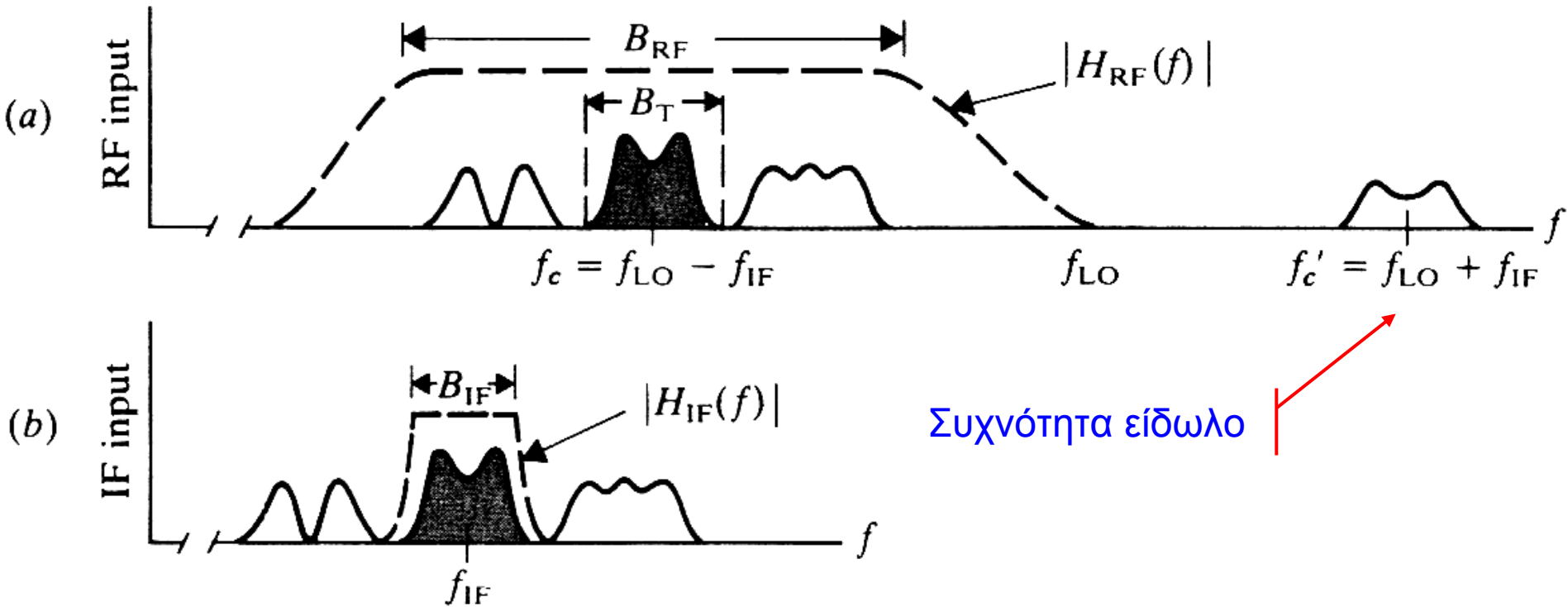




Δομικές μονάδες

- Ενισχυτής ραδιοσυχνοτήτων (RF)
 - Επιλεκτική ενίσχυση του σήματος που λαμβάνεται στην κεραία σε περιοχή περί το επιθυμητό σήμα
- Τοπικός ταλαντωτής
 - Μεταβλητή συχνότητα συντονισμού $f_{LO} = f_c \pm f_{IF}$
- Μείκτης
- Ενισχυτής ενδιάμεσων συχνοτήτων (IF)
 - Ενίσχυση περί τη σταθερή ενδιάμεση συχνότητα f_{IF}
- Φωρατής (αποδιαμορφωτής)
- Ενισχυτής ακουστικών συχνοτήτων (AF)
- AGC – Αυτόματος έλεγχος κέρδους
 - Για να παραμένει η ισχύς εξόδου σταθερή

Λειτουργία



- Εάν το φίλτρο ραδιοσυχνοτήτων δεν απορρίπτει πλήρως τη συχνότητα είδωλο, ο δέκτης θα αποδιαμορφώσει και το σήμα είδωλο!



Βαθμίδα RF

- Μεταφέρει την επιθυμητή συχνότητα λήψης στην σταθερή ενδιάμεση συχνότητα
 - Στους δέκτες DC έχουμε $f_{IF}=0$, άρα καταλήγουμε απ' ευθείας στο σήμα βασικής ζώνης
 - Στους υπερετερόδυνους δέκτες $f_{IF} \gg 0$!
- Η βαθμίδα RF συμβάλλει στην απόρριψη του σήματος ειδώλου
 - Διπλοί υπερετερόδυνοι δέκτες (δύο ενδιάμεσες συχνότητες) για καλύτερη απόρριψη



Σήμα είδωλο

- Έστω ότι η συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή είναι $f_{LO} = f_c + f_{IF}$
- Η συχνότητα είδωλο είναι $f'_c = f_{LO} + f_{IF}$
- Για να απορριφθεί το σήμα είδωλο πρέπει $B_T < B_{RF} < 2f_{IF}$



Βαθμίδα IF

- Η βαθμίδα IF παρέχει ενίσχυση (κέρδος) και συμβάλει στην απόρριψη των παρεμβολών
- Το εύρος ζώνης στην ενδιάμεση βαθμίδα πρέπει να είναι σχετικά μικρό

$$0,01 < \frac{B_{IF}}{f_c} < 0,1$$

- Για παράδειγμα στην εμπορική ραδιοφωνία FM

$$\frac{B_{IF}}{f_c} = \frac{200 \text{ kHz}}{10 \text{ MHz}} \approx 0,02$$



Συντονισμός

- Ο συντονισμός του δέκτη επιτυγχάνεται μόνο με αλλαγή της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή
 - Εάν $f_{LO} > f_c$, έχουμε αντιστροφή της πλευρικής ζώνης (σε περίπτωση SSB)
- Ο φωρατής εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης
 - Φωρατής περιβάλλουσας, κύκλωμα κλίσης, PLL
- Δεν έχουμε προβλήματα λόγω ανατροφοδότησης του ενισχυμένου σήματος στην κεραία

Δέκτης AM



- Περιοχή ραδιοσυχνοτήτων 0,535 – 1,605 MHz
- Ενδιάμεση συχνότητα 455 kHz
- Εύρος ζώνης στην ενδιάμεση βαθμίδα 10 kHz

Δέκτης FM



- Περιοχή ραδιοσυχνοτήτων 88 – 108 MHz
- Ενδιάμεση συχνότητα 10,7 MHz
- Εύρος ζώνης στην ενδιάμεση βαθμίδα 200 kHz

Προτερήματα υπερετερόδυνων δεκτών



- Απλή κατασκευή
- Η τεχνική της μετατροπής συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα είδη διαμόρφωσης
- Ο υπερτερόδυνος δέκτης χειρίζεται τα θέματα ποιότητας λήψης σε διαφορετικές μονάδες
 - RF: Ευαισθησία
 - IF: Επιλεκτικότητα



Μειονεκτήματα

- Το βασικό πρόβλημα με τους υπερ-ετερόδυνους δέκτες είναι η απόκριση σε κίβδηλες (spurious) συχνότητες πέραν της f_c
 - Η προφανής συχνότητα είδωλο απαλείφεται με αύξηση της f_{IF}
 - Μη γραμμικότητες μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές και από ισχυρά σήματα σε υποπολλαπλάσια της f_{IF}



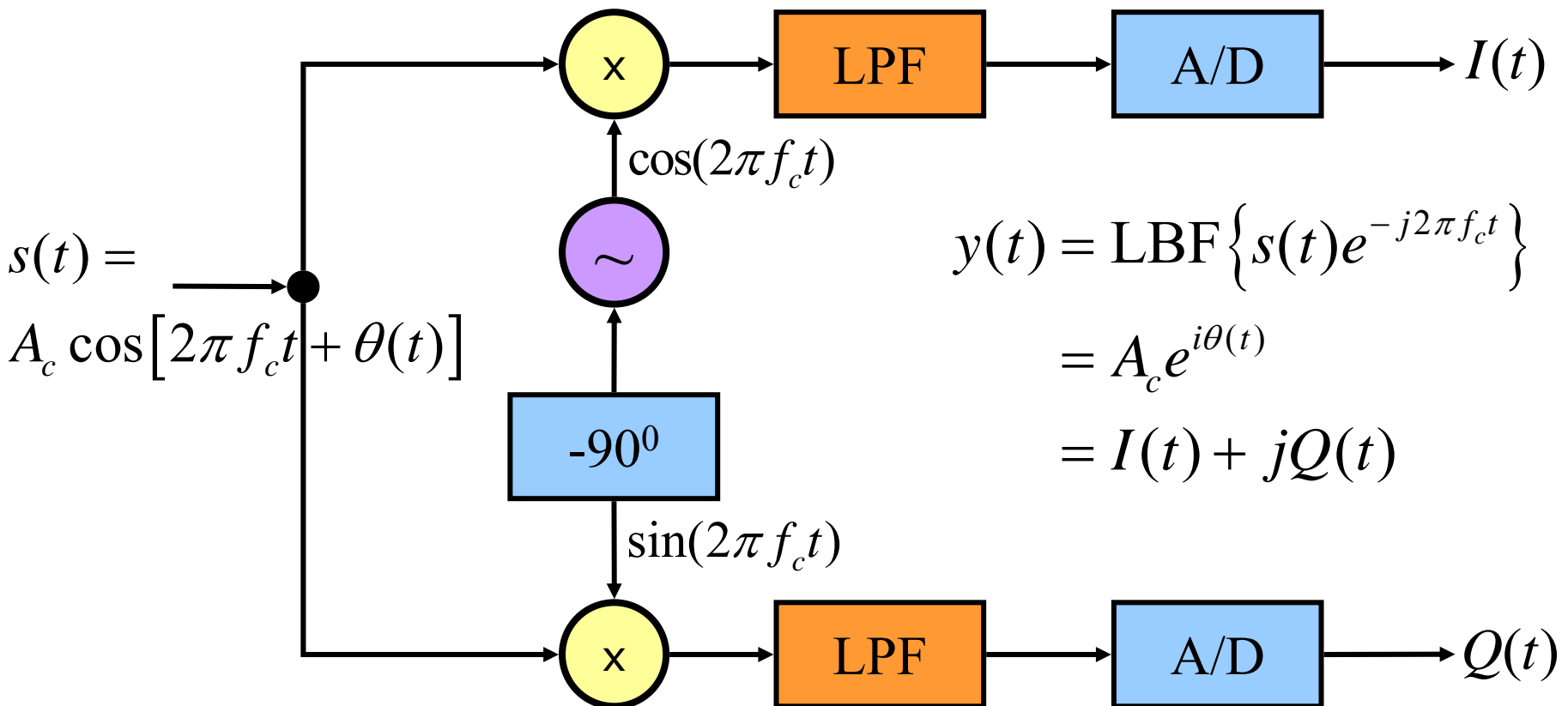
Δέκτες διπλής μετατροπής

- Δύο διαφορετικές βαθμίδες IF σε διαφορετικές ενδιάμεσες συχνότητες
- Πρώτη βαθμίδα IF στα 10,7 MHz \gg 455 kHz
 - Κακή επιλεκτικότητα (δεν είναι εύκολο να έχουμε στενό εύρος ζώνης), αλλά η απόρριψη του ειδώλου είναι εύκολη
 - Π.χ. για $f_c = 146,94$ MHz στα VHF, το είδωλο βρίσκεται 14% πιο ψηλά από το φέρον στα $146,94 + 2 \cdot 10,7 = 168,34$ MHz
- Δεύτερη βαθμίδα IF στα 455 kHz
 - Είδωλο στα $10,7 + 2 \cdot 0,455 = 11,6$ MHz, περίπου 8.5% πιο πάνω από το φέρον (Καθόλου άσχημα)
 - Το ζωνοπερατό δεύτερο φίλτρο IF BPF παρέχει την απαιτούμενη επιλεκτικότητα
- Για δέκτες ευρείας ζώνης, μπορεί να απαιτείται τριπλή μετατροπή για περαιτέρω βελτίωση της επιλεκτικότητας και απόρριψης ειδώλου

Δέκτες SDR (Software Defined Radio)



- Δώσε μου τα $I(t)$ και $Q(t)$ και μπορώ να αποδιαμορφώσω τα πάντα!



Δέκτες SDR (Software Defined Radio)



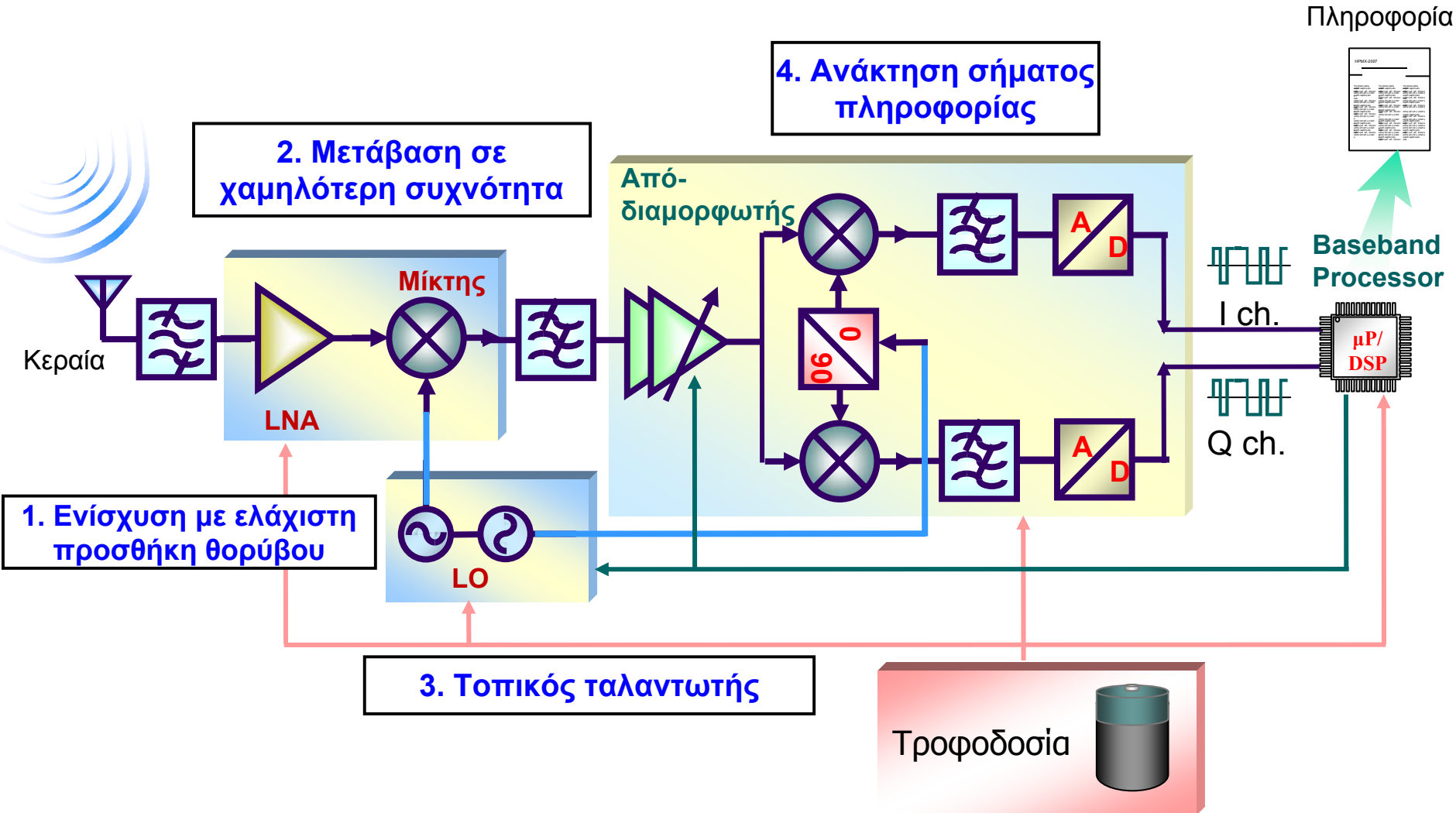
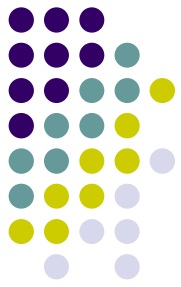
- Η αποδιαμόρφωση γίνεται με λογισμικό (μαθηματικές πράξεις) σε υπολογιστή

$$\text{AM} \rightarrow \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}$$

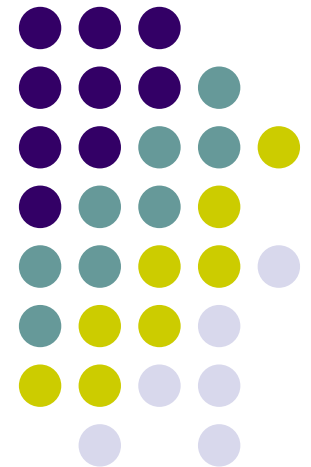
$$\text{FM} \rightarrow \arctan \frac{Q(t)}{I(t)}$$

$$\text{DSB, SSB} \rightarrow I(t)$$

Μοντέρνος δέκτης



Μοντέλο συστήματος αποδιαμόρφωσης παρουσία θορύβου

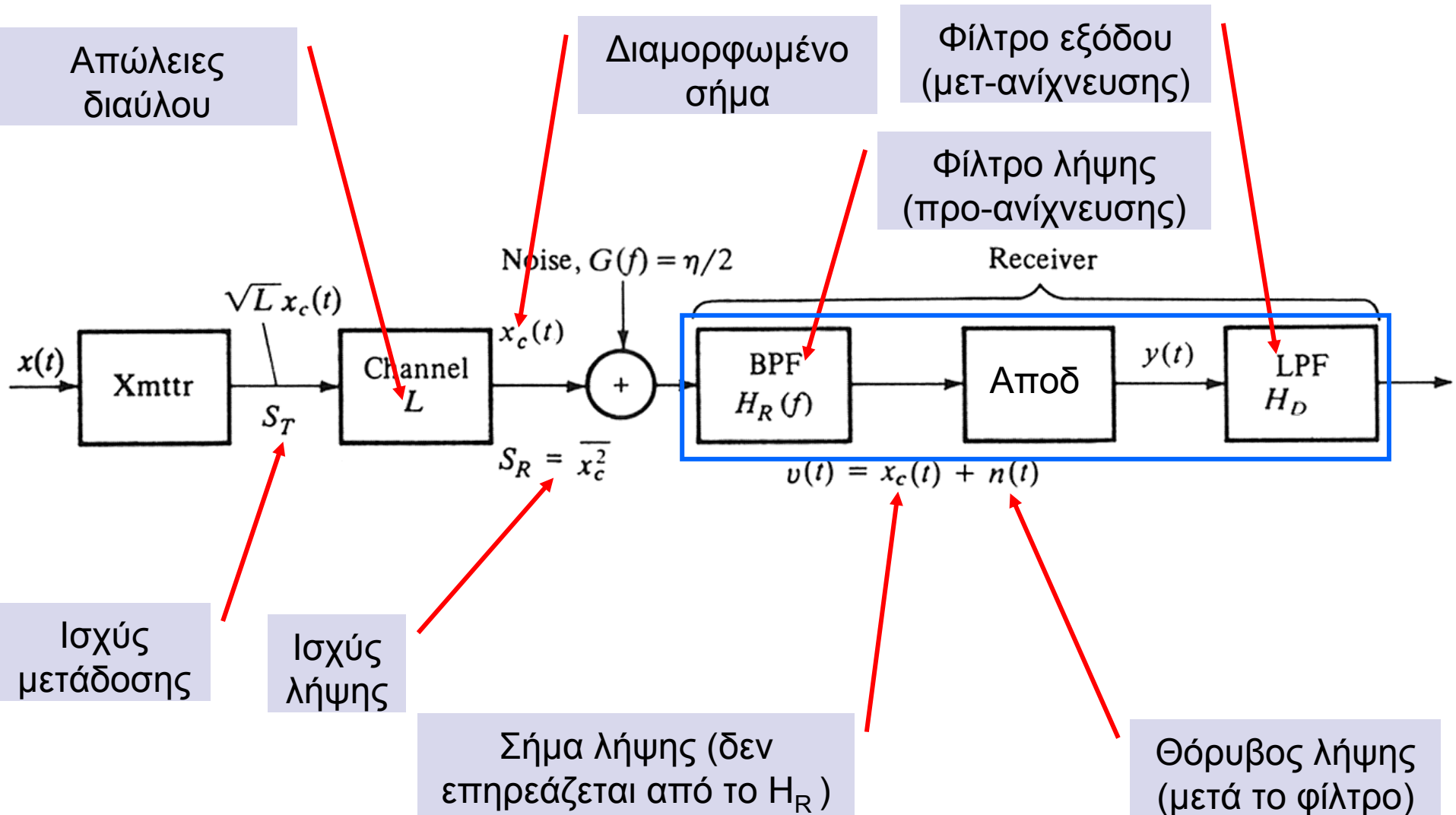


Επίδοση παρουσία θορύβου



- Η ανάλυση της επίδοσης των συστημάτων διαμόρφωσης παρουσία θορύβου είναι εξαιρετικά σημαντική για τη σχεδίαση των διαφόρων επικοινωνιακών συστημάτων
- Ο τελικός σκοπός είναι να αναπτυχθεί ένα σύστημα όπου οι επιδράσεις του θορύβου να ελαχιστοποιούνται
- Εάν η επίδραση του θορύβου ελαχιστοποιηθεί, τότε είναι δυνατό να μειωθεί η ισχύς εκπομπής στον πομπό
 - Εξαιρετικά σημαντικό στην κινητή τηλεφωνία για επαναχρησιμοποίηση του φάσματος
 - Δορυφορικές (deep space) επικοινωνίες λόγω της μεγάλης απόσβεσης

Μοντέλο συστήματος





Ο δέκτης

- Το μέρος του δέκτη πριν την αποδιαμόρφωση μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ζωνοπερατό φίλτρο με μοναδιαίο κέρδος και εύρος ζώνης ίσο με το εύρος ζώνης μετάδοσης
 - Το φίλτρο αυτό υλοποιείται στην ενδιάμεση βαθμίδα
 - Στην πράξη το εύρος ζώνης είναι αρκετά μεγαλύτερο του απαιτούμενου (τόσο στην είσοδο όσο και στην ενδιάμεση βαθμίδα του δέκτη)
- Η επίδραση της μίξης και ενίσχυσης στην πρώτη βαθμίδα είναι ταυτόσημες για το σήμα πληροφορίας και τον θόρυβο, οπότε δεν χρειάζεται να ληφθούν υπόψη



Το σήμα πληροφορίας

- Θεωρούμε κανονικοποιημένο αναλογικό σήμα πληροφορίας $|m(t)| \leq 1$ με ισχύ
$$S_m = \langle m^2(t) \rangle = E\{m^2(t)\}$$
- Υποθέτουμε ότι το σήμα πληροφορίας είναι εργοδικό, δηλαδή, ότι οι χρονικές και οι χωρικές μέσες τιμές ισούνται
$$\langle m(t) \rangle = E\{m(t)\}, \quad \langle m^2(t) \rangle = E\{m^2(t)\}$$
$$\langle m(t)m(t-\tau) \rangle = E\{m(t)m(t-\tau)\}$$
- Με τη χρονική μέση τιμή να ορίζεται ως

$$\langle m(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} m(t) dt$$



Ο διάυλος

- Εισάγει μόνο απόσβεση L στο σήμα χωρίς να προκαλεί καμία παραμόρφωση πλην της προσθήκης θορύβου
- Ο διάυλος υποτίθεται ότι είναι προσθετικού λευκού θορύβου Gauss (AGWN)
- όπου ο θόρυβος στο διάυλο έχει πυκνότητα φάσματος ισχύος

$$G(f) = N_0 / 2$$



Το διαμορφωμένο σήμα

- Το διαμορφωμένο σήμα $s(t)$ στην έξοδο του διαύλου (είσοδο του δέκτη) έχει πλάτος A_c και ισχύ S_R

$$S_R = \frac{S_T}{L} = E \{ s^2(t) \}$$

- όπου S_T η ισχύς μετάδοσης
- Το εκπεμπόμενο σήμα στο πομπό είναι

$$\sqrt{L}s(t)$$



Το σήμα λήψης

- Το προς αποδιαμόρφωση σήμα στην είσοδο του δέκτη είναι

$$r(t) = s(t) + n(t)$$

- όπου το $n(t)$ αναπαριστά το θόρυβο μετά το φίλτρο λήψης (προ-ανίχνευσης)
- Το φίλτρο λήψης $H_R(f)$ δεν επηρεάζει το σήμα λήψης, αλλά καθιστά τον θόρυβο ζωνοπερατό

$$\begin{aligned} r(t) &= A_r(t) \cos[2\pi f_c t + \phi_r(t)] \\ &= r_c(t) \cos(2\pi f_c t) - r_s(t) \sin(2\pi f_c t) \end{aligned}$$



Το αποδιαμορφωμένο σήμα

- Το σήμα μετά την αποδιαμόρφωση μπορεί να γραφθεί σύμφωνα με το είδος φωρατή

$$y(t) = \begin{cases} r_c(t) & \text{ομόδυνος αποδιαμορφωτής} \\ A_r(t) - \overline{A_r} & \text{φωρατής περιβάλλουσας} \\ \phi_r(t) & \text{φωρατής PM} \\ \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi_r(t) & \text{φωρατής FM} \end{cases}$$



Αποδιαμορφωτής

- Υποτίθεται ότι υπάρχει τέλειος συγχρονισμός του φέροντος στον δέκτη
- Ο όρος $\overline{A_r}$ αφορά την αφαίρεση της συνιστώσας DC για αποδιαμόρφωση με φωρατή περιβάλλουσας (πιθανώς να ισχύει και στις άλλες περιπτώσεις)
- Η σταθερά αποδιαμόρφωσης μπορεί να μην είναι μοναδιαία, αλλά η επίδρασή της είναι η ίδια όσον αφορά το σήμα πληροφορίας και τον θόρυβο
 - Την παραλείπουμε χωρίς βλάβη της γενικότητας
- Το μέρος του δέκτη μετά τον αποδιαμορφωτή είναι συνήθως ένα βαθυπερατό φίλτρο
 - Φίλτρο από-έμφασης στην FM



Θόρυβος λήψης

- Το σήμα και ο θόρυβος είναι στατιστικά ανεξάρτητα, άρα μπορούν να προστεθούν οι ισχύεις ώστε να ληφθεί η συνολική ισχύς λήψης

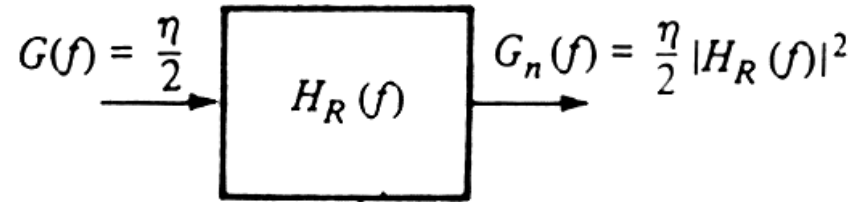
$$r^2 = s^2 + n^2 = S_R + N_R$$

- όπου N_R η ισχύς του θορύβου στη λήψη (είσοδο του δέκτη)
- Ο θόρυβος λήψης (πριν τη φώραση) είναι φιλτραρισμένη εκδοχή του θορύβου που εισάγει ο δίαυλος

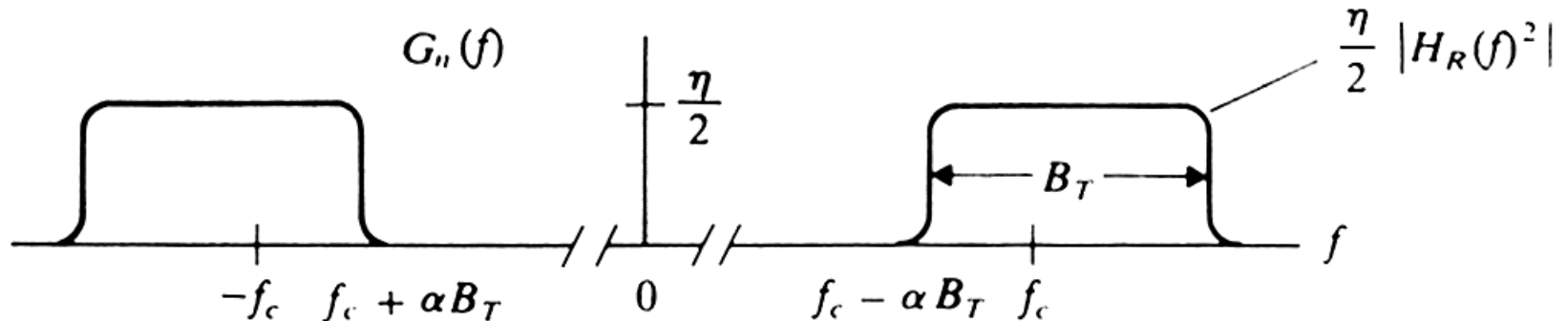
$$G_n(f) = \frac{N_0}{2} |H_R(f)|^2$$



Θόρυβος λήψης



(a)



(b)

- Παρατηρείστε ότι η συχνότητα φέροντος δεν είναι κατ' ανάγκη στο κέντρο της ζώνης διέλευσης



Ισχύς θορύβου λήψης

- Για λευκό θόρυβο στον δίαυλο

$$G_n(f) = \frac{N_0}{2} |H_R(f)|^2$$

- όπου $N_0/2$ η πυκνότητα φάσματος ισχύος του λευκού θορύβου
- Επομένως η ισχύς του θορύβου λήψης υποθέτοντας ιδανικό ζωνεπερατό φίλτρο εύρους ζώνης B_T είναι

$$N_R = \int_{-\infty}^{\infty} G_n(f) df = N_0 B_T$$

Σηματοθορυβική σχέση εισόδου



- Η σηματοθορυβική σχέση στην είσοδο του δέκτη ορίζεται ως

$$SNR_c \triangleq \frac{S_R}{N_R} = \frac{S_R}{N_0 B_T}$$

- Σημειώστε ότι το B_T είναι το **εύρος ζώνης μετάδοσης** μέσα στο οποίο όσος θόρυβος διαύλου εμφανισθεί θα οδηγείται προς τον φωρατή
- Για λόγους σύγκρισης ορίζουμε τη σηματοθορυβική σχέση εισόδου του **συστήματος βασικής ζώνης** (χωρίς διαμόρφωση) με ταυτόσημες ισχείς σήματος και θορύβου

Σηματοθορυβική σχέση εισόδου στη βασική ζώνη



- Τότε ως εύρος ζώνης (για τον θόρυβο) χρησιμοποιούμε το **εύρος ζώνης σήματος πληροφορίας**, επομένως

$$SNR_b \triangleq \frac{S_R}{N_0 W}$$

- και

$$SNR_c = \frac{W}{B_T} SNR_b, \quad SNR_c \leq SNR_b, \quad B_T \geq W$$

- όπου στην ακραία περίπτωση για το SSB ισχύουν οι ισότητες

Σηματοθορυβική σχέση εισόδου στη βασική ζώνη



- Η φυσική σημασία του SNR_b είναι ότι αποτελεί τη **μέγιστη** σηματοθορυβική σχέση στην είσοδο για αναλογική μετάδοση στη βασική ζώνη

Σηματοθορυβική σχέση εξόδου



- Εάν ο θόρυβος στην έξοδο του δέκτη μετά την αποδιαμόρφωση εμφανίζεται με μορφή προσθετικής συνιστώσας, η σηματοθορυβική σχέση στην έξοδο του δέκτη ορίζεται ως

$$SNR_o \triangleq \frac{S_D}{N_D}$$

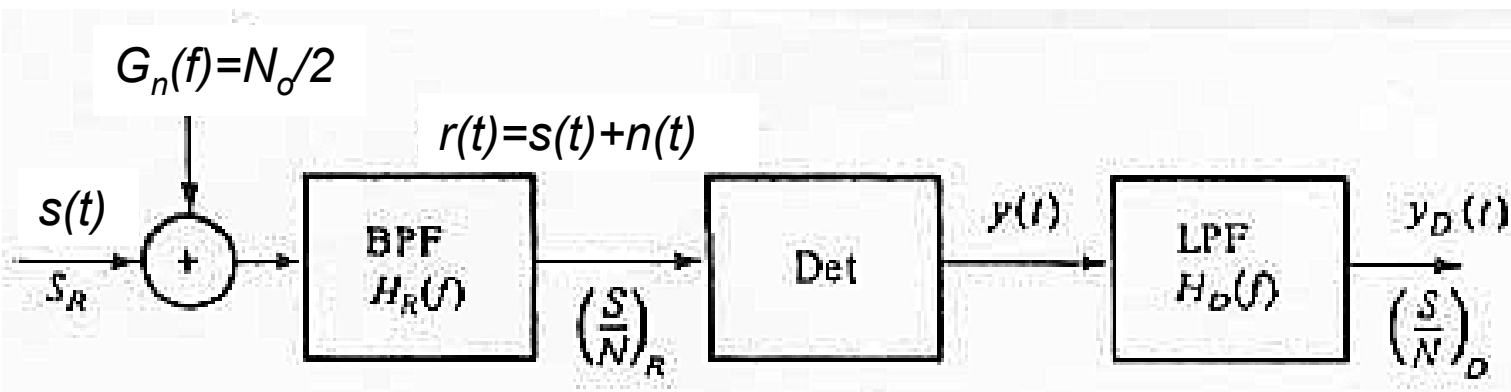
- όπου N_D η ισχύς του θορύβου στην έξοδο του δέκτη



Το βασικό πρόβλημα

- Η ερώτηση είναι: δοθέντος του $r(t)$ και του είδους του φωρατή να βρεθεί το σήμα (με θόρυβο) στην τελική έξοδο $y_D(t)$ και εάν ο θόρυβος εμφανίζεται προσθετικά να βρεθεί η σηματοθορυβική σχέση στην έξοδο

$$SNR_o = \frac{S_D}{N_D}$$





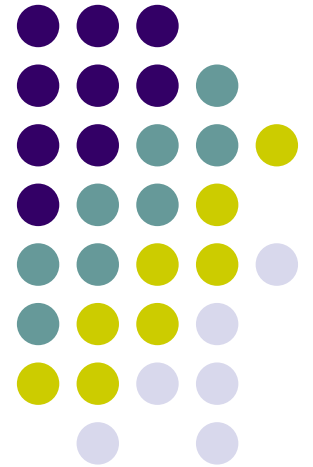
Επίδοση

- Η επίδοση του δέκτη προσδιορίζεται από τον λόγο των σηματοθορυβικών σχέσεων

$$\text{Επίδοση} = \frac{SNR_o}{SNR_c}$$

- Όσο υψηλότερη η τιμή του, τόσο καλύτερος είναι ο δέκτης

Ζωνοπερατός θόρυβος





Ζωνοπερατός θόρυβος

- Θεωρούμε ότι ο θόρυβος στον δίαυλο είναι **λευκός**, δηλαδή, αναπαριστάνεται από στατική, μηδενικής μέσης τιμής διαδικασία Gauss

$$\bar{n} = 0, \quad \overline{n^2} = \sigma_n^2 = N_R$$

- Ο ζωνοπερατός θόρυβος λήψης μπορεί να γραφτεί συναρτήσει των ορθογωνίων συνιστωσών του ως εξής

$$n(t) = n_c(t) \cos(2\pi f_c t) - n_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$



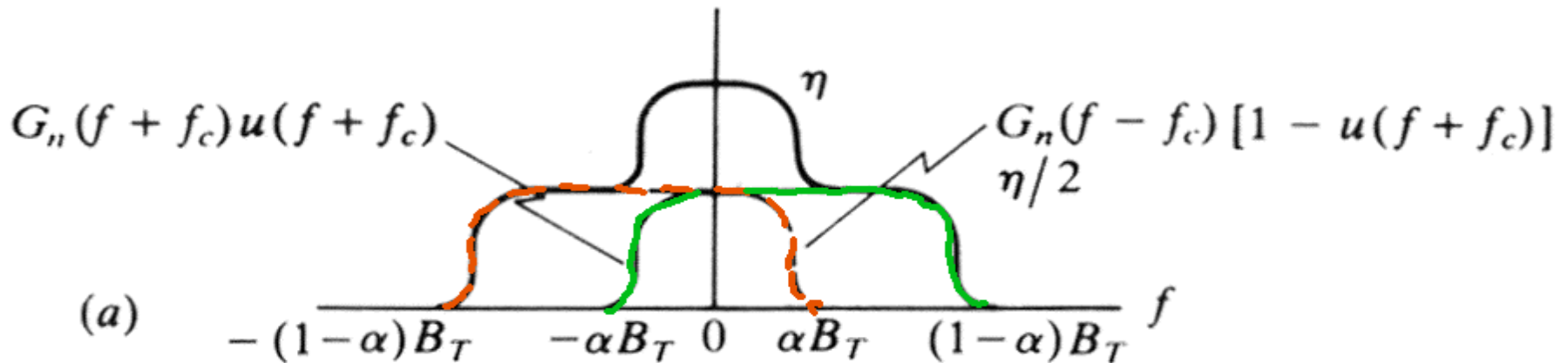
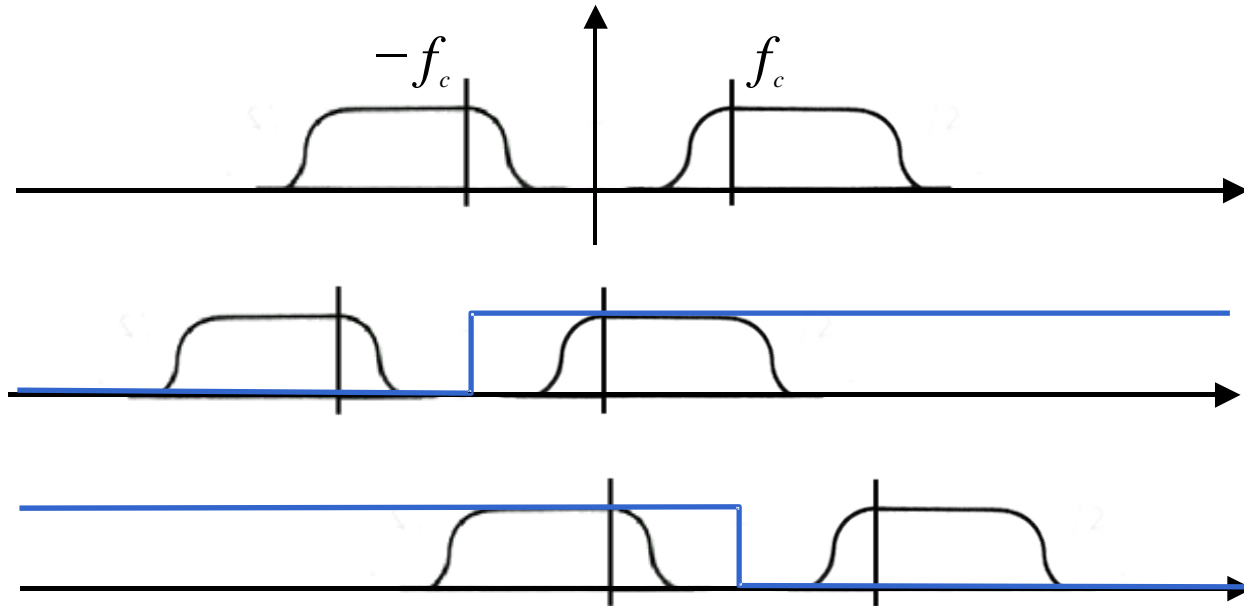
Ζωνοπερατός θόρυβος

- Όπου οι πυκνότητες φάσματος ισχύος των δύο συνιστωσών είναι ταυτόσημες

$$\begin{aligned}G_{n_c}(f) &= G_{n_s}(f) \\ &= \frac{1}{2}G_n(f - f_c)[1 - \text{sgn}(f - f_c)] \\ &\quad + \frac{1}{2}G_n(f + f_c)[1 + \text{sgn}(f + f_c)]\end{aligned}$$

- Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί σε **μετακίνηση προς τα επάνω των αρνητικών συχνοτήτων**, ενώ ο δεύτερος σε μετακίνηση των **θετικών συχνοτήτων προς τα κάτω**

Πώς βρίσκουμε τις ορθογώνιες συνιστώσες

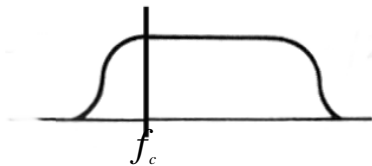


Ορθογώνιες συνιστώσες ζωνοπερατού θορύβου

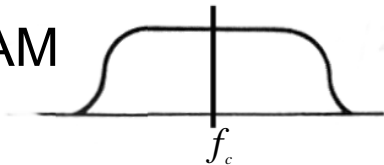


- Η φασματική μορφή των ορθογώνιων συνιστωσών μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τη φασματική μορφή του ζωνοπερατού θορύβου λόγω του συστήματος διαμόρφωσης

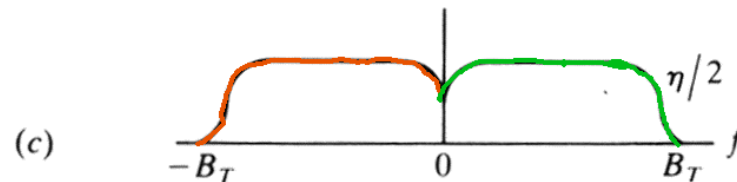
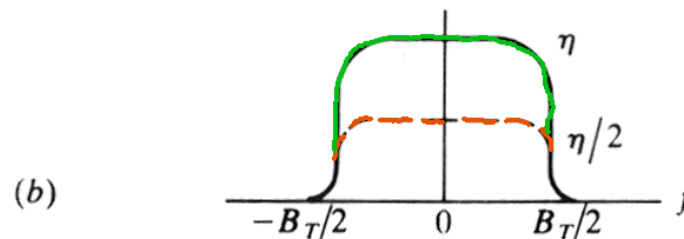
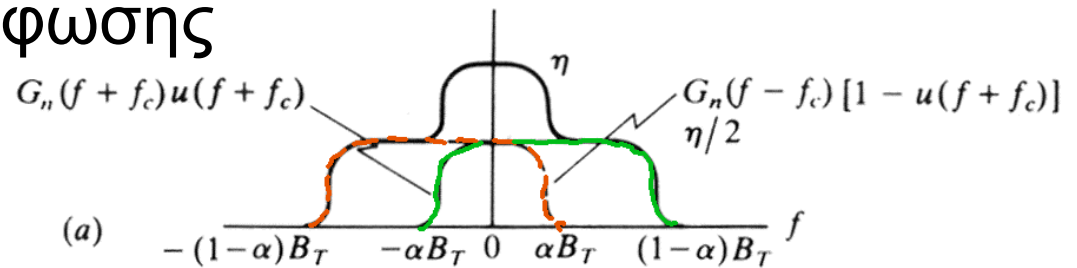
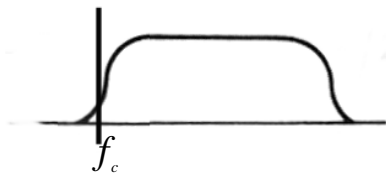
VSB

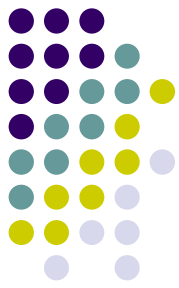


FM, PM
DSB, AM



USB





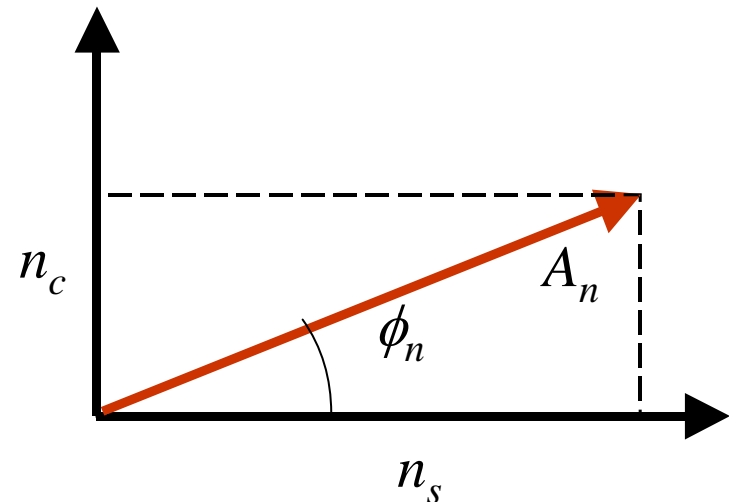
Ζωνοπερατός θόρυβος

- Οι δύο συνιστώσες **συμφασική** και **ορθογωνική** είναι
 - Βαθυπερατές
 - Ανεξάρτητες
 - Μηδενικής μέσης τιμής
 - Ίδιας ισχύος

$$\overline{n_c} = \overline{n_s} = 0,$$

$$\overline{n_c(t)n_s(t)} = 0$$

$$\overline{n_c^2} = \overline{n_s^2} = \overline{n^2} = N_R = N_0 B_T$$





Κατανομή πλάτους θορύβου

- Ο ζωνοπερατός θόρυβος εκφρασμένος στη μορφή περιβάλλουσας-φάσης

$$n(t) = A_n(t) \cos[2\pi f_c t + \phi_n(t)]$$

- Το πλάτος $A_n^2(t) = n_c^2 + n_c^2$ έχει κατανομή Rayleigh

$$p_{A_n}(A_n) = \frac{A_n}{N_R} \exp\left\{-\frac{A_n^2}{2N_R}\right\}, \quad A_n \geq 0$$

- με μέση τιμή και μεταβλητότητα

$$\overline{A_n} = \sqrt{\frac{\pi N_R}{2}}, \quad \overline{A_n^2} = 2N_R, \quad P(A_n > a) = \exp\left\{-\frac{a^2}{2N_R}\right\}$$



Κατανομή φάσης θορύβου

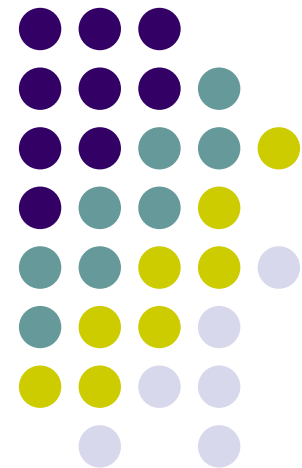
- ενώ η φάση

$$\phi_n = \arctan \frac{n_s}{n_c}$$

- είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα, με αποτέλεσμα

$$\overline{n^2} = \overline{A_n^2 \cos^2 [2\pi f_c t + \phi_n]} = \overline{A_n^2} \times \frac{1}{2} = N_R$$

Γραμμική διαμόρφωση με θόρυβο





Ορισμοί

- Το σήμα στη λήψη (μετά το φίλτρο προ-ανίχνευσης) είναι

$$r(t) = \overline{s(t)} + n(t)$$

- όπου $\overline{s^2} = S_R$, $\overline{n^2} = N_R$

- Οι σηματοθορυβικές σχέσεις είναι

$$SNR_c = \frac{S_R}{N_R} = \frac{S_R}{N_0 B_T} = \frac{W}{B_T} SNR_b, \quad SNR_o = \frac{S_D}{N_D}$$

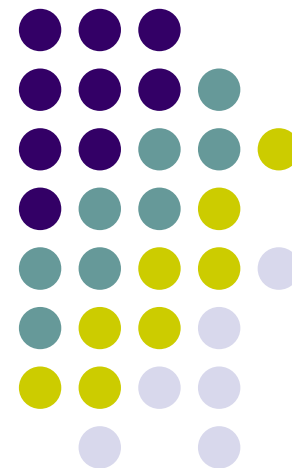
- Ο ζωνοπερατός θόρυβος είναι

$$n(t) = n_c(t) \cos(2\pi f_c t) - n_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- όπου

$$\overline{n_c^2} = \overline{n_s^2} = \overline{n^2} = N_R = N_0 B_T$$

Θόρυβος στην ομόδυνη αποδιαμόρφωση



Επίδραση θορύβου στην DSB



- Εάν η διαμόρφωση είναι DSB

$$s(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t)$$

- Το σήμα στην είσοδο του δέκτη είναι

$$r(t) = [A_c m(t) + n_c(t)] \cos(2\pi f_c t) - n_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- Ο ιδανικός **ομόδυνος** αποδιαμορφωτής εξάγει τη συμφασική συνιστώσα (απορρίπτοντας τους όρους με τη διπλάσια συχνότητα φέροντος) ώστε τελικά

$$y(t) = [A_c m(t) + n_c(t)] / 2$$

- και εάν το φίλτρο εξόδου είναι ιδανικό βαθυπερατό

$$y_D(t) = [A_c m(t) + n_c(t)] / 2$$



SNR στην είσοδο του δέκτη

- Η ισχύς του σήματος στην είσοδο είναι

$$S_R = \overline{s^2} = A_c^2 S_m / 2$$

- Η ισχύς του θορύβου στην είσοδο είναι

$$N_R = \overline{n^2} = N_0 B_T = 2N_0 W$$

- Η σηματοθορυβική σχέση στην είσοδο είναι

$$SNR_c = \frac{S_R}{N_R} = \frac{A_c^2 S_m}{2N_0 B_T} = \frac{A_c^2 S_m}{4N_0 W}$$



SNR στην έξοδο του δέκτη

- Η ισχύς του σήματος στην έξοδο είναι

$$S_D = A_c^2 \overline{m^2} / 4 = A_c^2 S_m / 4$$

- Η ισχύς του θορύβου στην έξοδο είναι

$$N_D = \overline{n_c^2} / 4 = N_0 B_T / 4 = N_0 W / 2$$

- Η σηματοθορυβική σχέση στην έξοδο είναι

$$SNR_o = \frac{S_D}{N_D} = \frac{A_c^2 S_m}{N_0 B_T} = \frac{A_c^2 S_m}{2N_0 W} = \frac{S_R}{N_0 W}$$



Επίδοση DSB σε θόρυβο

- Ο λόγος των σηματοθορυβικών σχέσεων εισόδου εξόδου στην DSB είναι

$$SNR_o = 2SNR_c$$

- και σε σύγκριση με το σύστημα βασικής ζώνης

$$SNR_o = \frac{S_R}{N_0W} = SNR_b$$

- Επομένως η DSB δεν παρουσιάζει κάποια βελτίωση της σηματοθορυβικής σχέσης συγκρινόμενη με την μετάδοση στη βασική ζώνη



Επίδραση θορύβου στην SSB

- Εάν η διαμόρφωση είναι SSB
$$s(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) / 2 \mp A_c \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t) / 2$$
- Το σήμα στην είσοδο του δέκτη είναι
$$r(t) = \left[A_c m(t) / 2 + n_c(t) \right] \cos(2\pi f_c t) \mp \left[A_c \hat{m}(t) / 2 + n_s(t) \right] \sin(2\pi f_c t)$$
- Ο ιδανικός **ομόδυνος** αποδιαμορφωτής εξάγει τη συμφασική συνιστώσα (απορρίπτοντας τους όρους με τη διπλάσια συχνότητα φέροντος) ώστε τελικά
$$y(t) = [A_c m(t) / 2 + n_c(t)] / 2$$
- και εάν το φίλτρο εξόδου είναι ιδανικό βαθυπερατό
$$y_D(t) = [A_c m(t) / 2 + n_c(t)] / 2$$



SNR στην είσοδο του δέκτη

- Η ισχύς του σήματος στην είσοδο είναι

$$S_R = \overline{s^2} = A_c^2 S_m / 8 + A_c^2 S_{\hat{m}} / 8 = A_c^2 S_m / 4$$

- Η ισχύς του θορύβου στην είσοδο είναι

$$N_R = \overline{n^2} = N_0 B_T = N_0 W$$

- Η σηματοθορυβική σχέση στην είσοδο είναι

$$SNR_c = \frac{S_R}{N_R} = \frac{A_c^2 S_m}{2N_0 B_T} = \frac{A_c^2 S_m}{4N_0 W}$$



SNR στην έξοδο του δέκτη

- Η ισχύς του σήματος στην έξοδο είναι

$$S_D = A_c^2 \overline{m^2} / 16 = A_c^2 S_m / 16$$

- Η ισχύς του θορύβου στην έξοδο είναι

$$N_D = \overline{n_c^2} / 4 = N_0 B_T / 4 = N_0 W / 4$$

- Η σηματοθορυβική σχέση στην έξοδο είναι

$$SNR_o = \frac{S_D}{N_D} = \frac{A_c^2 S_m}{4 N_0 B_T} = \frac{A_c^2 S_m}{4 N_0 W} = \frac{S_R}{N_0 W}$$



Επίδοση SSB σε θόρυβο

- Ο λόγος των σηματοθορυβικών σχέσεων εισόδου εξόδου στην SSB είναι

$$SNR_o = SNR_c$$

- και σε σύγκριση με το σύστημα βασικής ζώνης

$$SNR_o = \frac{S_R}{N_0 W} = SNR_b$$

- Επομένως η SSB δεν παρουσιάζει κάποια βελτίωση της σηματοθορυβικής σχέσης συγκρινόμενη με την μετάδοση στη βασική ζώνη



Επίδραση θορύβου στην AM

- Εάν η διαμόρφωση είναι AM

$$s(t) = A_c [1 + \mu m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

- Το σήμα στην είσοδο του δέκτη είναι

$$r(t) = \{A_c [1 + \mu m(t)] + n_c(t)\} \cos(2\pi f_c t) - n_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- Ο ιδανικός **ομόδυνος** αποδιαμορφωτής εξάγει τη συμφασική συνιστώσα (απορρίπτοντας τους όρους με τη διπλάσια συχνότητα φέροντος) και τον όρο DC ώστε τελικά

$$y(t) = [\mu A_c m(t) + n_c(t)] / 2$$

- και εάν το φίλτρο εξόδου είναι ιδανικό βαθυτερατό

$$y_D(t) = [\mu A_c m(t) + n_c(t)] / 2$$



SNR στην είσοδο του δέκτη

- Η ισχύς του σήματος στην είσοδο είναι

$$S_R = \overline{s^2} = \frac{1}{2} A_c^2 (1 + \mu^2 S_m)$$

- Η ισχύς του θορύβου στην είσοδο είναι

$$N_R = \overline{n^2} = N_0 B_T = 2N_0 W$$

- Η σηματοθορυβική σχέση στην είσοδο είναι

$$SNR_c = \frac{S_R}{N_R} = \frac{A_c^2 (1 + \mu^2 S_m)}{2N_0 B_T} = \frac{A_c^2 (1 + \mu^2 S_m)}{4N_0 W}$$



SNR στην έξοδο του δέκτη

- Η ισχύς του σήματος στην έξοδο είναι

$$S_D = A_c^2 \mu^2 \overline{m^2} / 4 = \mu^2 A_c^2 S_m / 4$$

- Η ισχύς του θορύβου στην έξοδο είναι

$$N_D = \overline{n_c^2} / 4 = N_0 B_T / 4 = N_0 W / 2$$

- Η σηματοθορυβική σχέση στην έξοδο είναι

$$SNR_o = \frac{S_D}{N_D} = \frac{\mu^2 A_c^2 S_m}{N_0 B_T} = \frac{\mu^2 A_c^2 S_m}{2N_0 W} = \frac{\mu^2 S_m}{1 + \mu^2 S_m} \frac{S_R}{N_0 W}$$



Επίδοση AM σε θόρυβο

- Ο λόγος των σηματοθορυβικών σχέσεων εισόδου εξόδου στην AM είναι

$$SNR_o = \frac{2\mu^2 S_m}{1 + \mu^2 S_m} SNR_c$$

- και σε σύγκριση με το σύστημα βασικής ζώνης

$$SNR_o = \frac{\mu^2 S_m}{1 + \mu^2 S_m} \frac{S_R}{N_0 W} = \frac{\mu^2 S_m}{1 + \mu^2 S_m} SNR_b$$

- Επομένως η AM έχει πάντα χειρότερη σηματοθορυβική σχέση συγκρινόμενη με την μετάδοση στη βασική ζώνη



Επίδοση AM σε θόρυβο

- Για πλήρη διαμόρφωση AM ($\mu=1$) από απλό τόνο

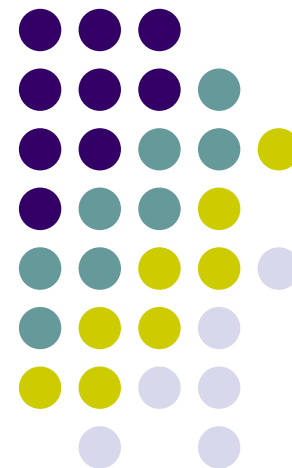
$$S_m = 1/2, \quad SNR_o = SNR_b / 3$$

- που είναι 5 db χειρότερη από το DSB
- Συνήθως όμως για σήματα φωνής

$$S_m \approx 0,1$$

- που οδηγεί σε 10 db υποβάθμιση συγκρινόμενο με την DSB

Θόρυβος στον φωρατή περιβάλλουσας





Επίδραση θορύβου στην AM

- Εάν η διαμόρφωση είναι AM

$$s(t) = A_c [1 + \mu m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

- Το σήμα στην είσοδο του δέκτη είναι

$$r(t) = \{A_c [1 + \mu m(t)] + n_c(t)\} \cos(2\pi f_c t) - n_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- Ο **φωρατής περιβάλλουσας** εξάγει την περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος ώστε τελικά

$$y(t) = A_r(t) - \overline{A_r}$$

- όπου η περιβάλλουσα είναι

$$A_r(t) = \sqrt{\{A_c [1 + \mu m(t)] + n_c(t)\}^2 + \{n_s(t)\}^2}$$



Ανάλυση ασθενούς θορύβου

- Εάν το σήμα είναι ισχυρότερο του θορύβου

$$A_c^2 \gg \overline{n^2}$$

- Η περιβάλλουσα είναι κατά προσέγγιση

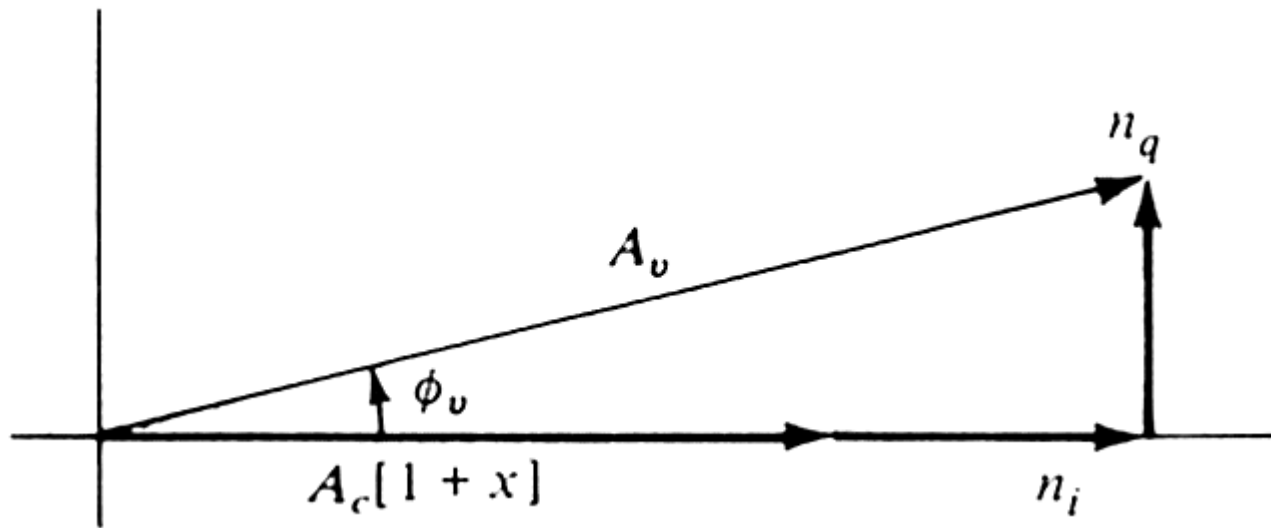
$$A_r(t) \approx A_c [1 + \mu m(t)] + n_c(t)$$

- οπότε τελικά ο **φωρατής περιβάλλουσας** δίνει

$$y_D(t) = A_r(t) - \overline{A_r} = \mu A_c m(t) + n_c(t)$$

- Άρα και για τον φωρατή περιβάλλουσας η ανάλυση των σηματοθορυβικών σχέσεων είναι ταυτόσημη με αυτή για τον ομόδονυνο φωρατή!

Αναπαράσταση με φασιθέτες





Φαινόμενο κατωφλίου AM

- Εάν το σήμα είναι ασθενές σε σχέση με τον θόρυβο

$$A_c^2 \ll \overline{n^2}$$

- τότε ο θόρυβος και η περιβάλλουσα είναι

$$n(t) = A_n(t) \cos[2\pi f_c t + \phi_n(t)]$$

$$A_r(t) \approx A_n(t) + A_c [1 + \mu m(t)] \cos \phi_n(t)$$

- και η έξοδος του φωρατή είναι

$$y(t) = A_n(t) + \mu A_c m(t) \cos \phi_n(t) - \overline{A_n}, \quad \overline{A_n} = \sqrt{\pi N_R / 2}$$

- Επομένως το σήμα πληροφορίας χάνεται ολοσχερώς!

- Στον ομόδουνο φωρατή το σήμα παραμένει ασθενές, αλλά αναλλοίωτο, μέσα στον ισχυρό θόρυβο



Φαινόμενο κατώφλιου AM

- Υπάρχει επομένως ένα κατώφλι πάνω από το οποίο ο φωρατής περιβάλλουσας λειτουργεί ικανοποιητικά
- Προβλήματα στην αποδιαμόρφωση θα εμφανισθούν εάν συμβαίνει αρκετά συχνά

$$A_n > A_c$$

- Π.χ. μπορούμε να θεωρήσουμε ότι λειτουργούμε πάνω από το κατώφλι εάν η πιθανότητα

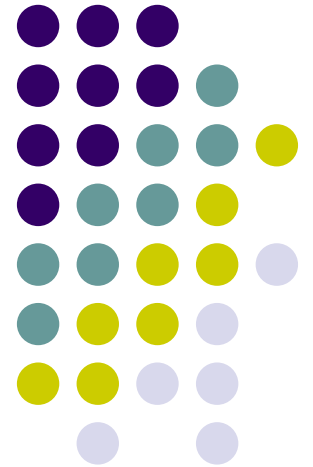
$$\Pr\{A_n \geq A_c\} = \exp\left(-\frac{A_c^2}{4WN_0}\right) = 0.01$$



Φαινόμενο κατωφλίου AM

- Δηλαδή, είμαστε πάνω από το κατώφλι εάν
$$SNR_{c,th} = 4 \ln 10 \approx 10$$
$$SNR_{b,th} = 8 \ln 10 \approx 20$$
- Στην εμπορική ραδιοφωνία η σηματοθρομβική σχέση πρέπει να είναι 30 db ή περισσότερο για ικανοποιητική ακρόαση, οπότε το φαινόμενο κατωφλίου δεν αποτελεί σημαντικό περιορισμό

Διαμόρφωση γωνίας με θόρυβο





SNR στην είσοδο του δέκτη

- Εάν η διαμόρφωση είναι PM ή FM

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)], \quad \phi(t) = \begin{cases} \Delta\phi m(t) & \text{PM} \\ 2\pi\Delta f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau & \text{FM} \end{cases}$$

- Η ισχύς του σήματος στην είσοδο του δέκτη είναι

$$S_R = A_c^2 / 2$$

- Η ισχύς του θορύβου στην είσοδο του δέκτη είναι

$$N_R = N_0 B_T$$

- Η σηματοθορυβική σχέση στην είσοδο του δέκτη είναι

$$SNR_c = \frac{A_c^2}{2N_0 B_T}$$

Επίδραση θορύβου στην διαμόρφωση γωνίας



- Το σήμα στην είσοδο του δέκτη είναι

$$r(t) = s(t) + n(t) =$$

$$= A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] + A_n(t) \cos[2\pi f_c t + \phi_n(t)]$$

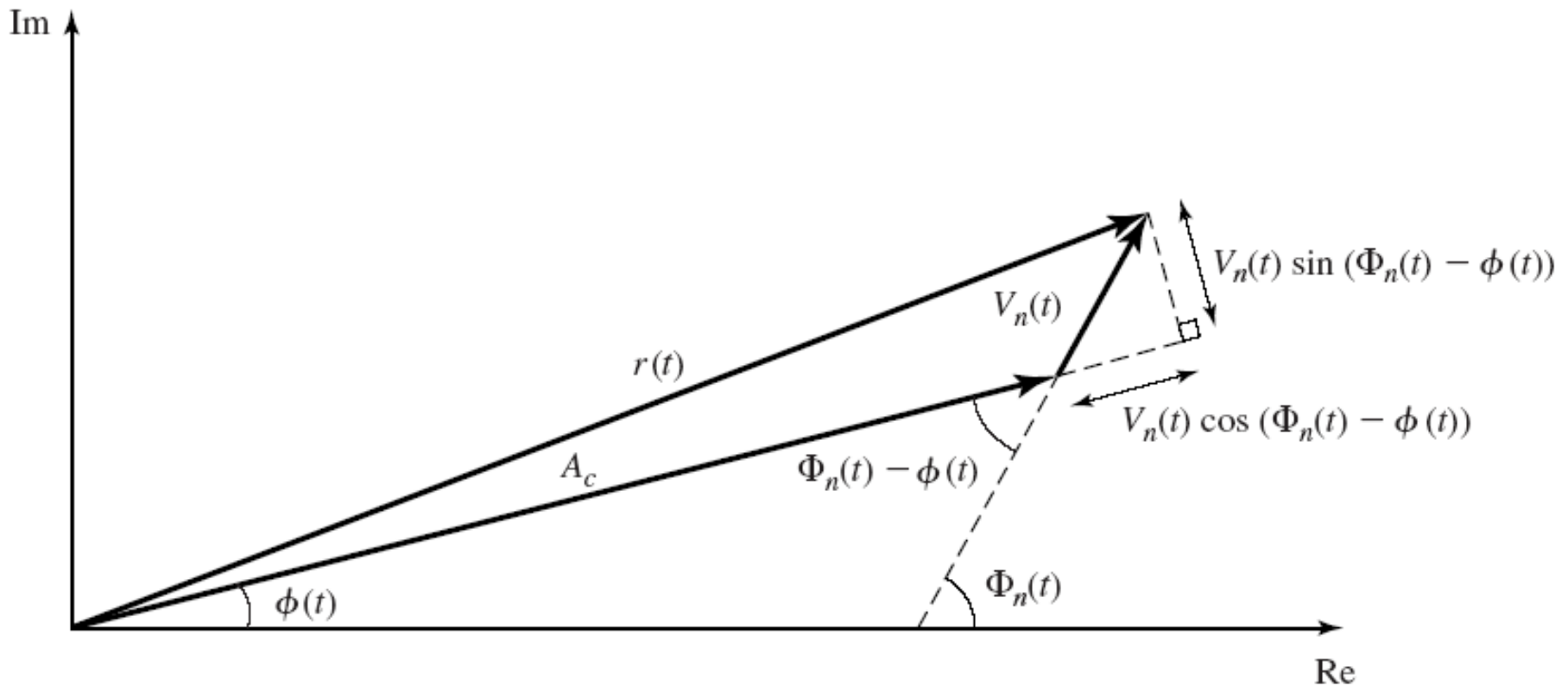
$$= A_r(t) \cos[2\pi f_c t + \phi_r(t)]$$

- Ο περιοριστής θα απαλείψει τη μεταβολή πλάτους
οπότε ενδιαφέρει μόνο η γωνία

$$\phi_r(t) = \phi(t) + \arctan \frac{A_n(t) \sin[\phi_n(t) - \phi(t)]}{A_c + A_n(t) \cos[\phi_n(t) - \phi(t)]}$$

- όπου ο πρώτος όρος είναι η φάση, ενώ ο δεύτερος
όρος περιλαμβάνει το **σήμα και τον θόρυβο**

Αναπαράσταση με φασιθέτες



Θόρυβος στην έξοδο του αποδιαμορφωτή



- Για απλοποίηση της ανάλυσης μπορούμε να υποθέσουμε ασθενή θόρυβο, δηλαδή,

$$A_c \gg A_n(t)$$

- Τότε

$$\phi_r(t) \approx \phi(t) + \frac{A_n(t) \sin[\phi_n(t) - \phi(t)]}{A_c}$$

- Μια δεύτερη προσέγγιση είναι να αντικαταστήσουμε τον όρο $\phi_n(t) - \phi(t)$ **μόνο** με το $\phi_n(t)$

- Η $\phi_n(t)$ έχει ομοιόμορφη κατανομή, το αυτό και η $\phi_n(t) - \phi(t)$

- ΟΠΟΤΕ

$$\phi_r(t) \approx \phi(t) + \frac{A_n(t) \sin[\phi_n(t)]}{A_c} = \phi(t) + \frac{1}{A_c} n_s(t)$$

Θόρυβος στην έξοδο του αποδιαμορφωτή



- Η προηγούμενη σχέση δηλώνει ότι η φάση $\varphi(t)$ που προέρχεται από το σήμα πληροφορίας και ο ισοδύναμος θόρυβος φάσης εμφανίζονται προσθετικά
- Ο προσθετικός όρος θορύβου εξαρτάται από την **ορθογωνική** συνιστώσα $n_s(t)$ και είναι αντιστρόφως ανάλογη του πλάτους του σήματος
- Η έξοδος του αποδιαμορφωτή θα είναι

$$y(t) = \begin{cases} \Delta\phi m(t) + \frac{n_s(t)}{A_c} & \text{PM} \\ \Delta f m(t) + \frac{1}{2\pi A_c} \frac{dn_s(t)}{dt} & \text{FM} \end{cases}$$

Φάσμα θορύβου στην έξοδο του αποδιαμορφωτή



- Το φάσμα του θορύβου εκτείνεται σε εύρος ζώνης $B_T/2$

$$S_n(f) = \begin{cases} \frac{N_o}{A_c^2} & \text{PM} \\ \frac{N_o}{A_c^2} f^2 & \text{FM} \end{cases} \quad |f| \leq \frac{B_T}{2}$$

- Στην περίπτωση FM το φάσμα έχει παραβολική μορφή
 - Ο θόρυβος είναι υψηλότερος στις μεγάλες συχνότητες

Σήμα και θόρυβος στην έξοδο του δέκτη

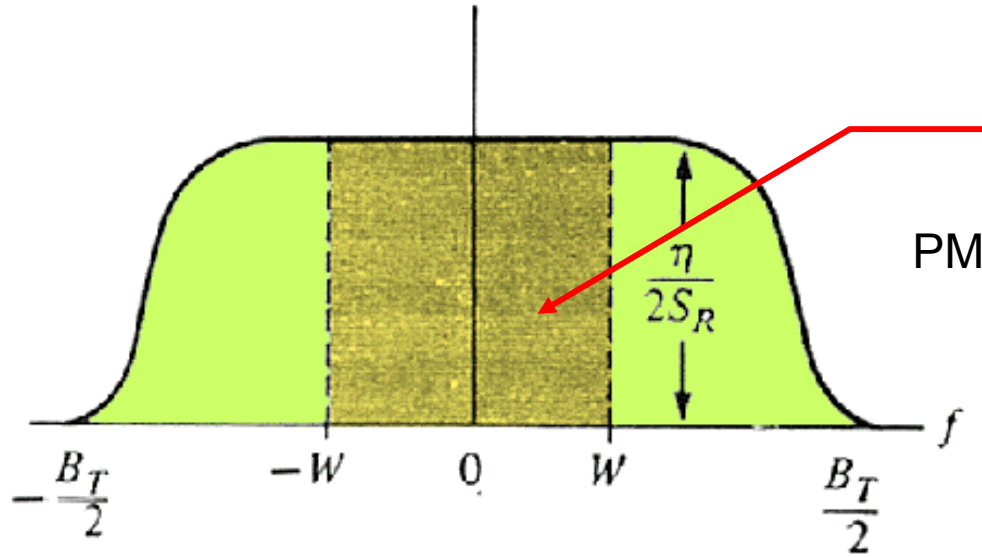


- Στην έξοδο του δέκτη, μετά το φίλτρο μετ' ανίχνευσης, ο θόρυβος περιορίζεται στο εύρος ζώνης W του σήματος πληροφορίας
 - Πλην της περίπτωσης διαμόρφωσης στενής ζώνης η διαφορά αυτή είναι σημαντική για την σηματοθορυβική επίδοση του δέκτη

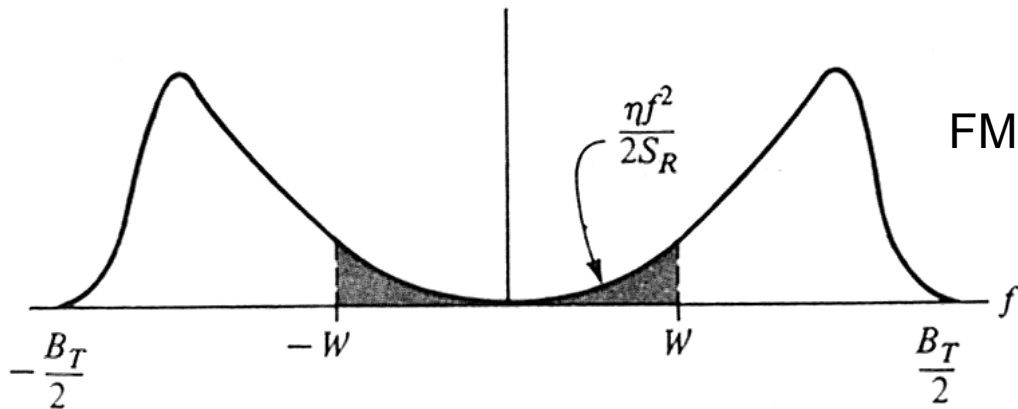
$$S_n(f) = \begin{cases} \frac{N_o}{A_c^2} & \text{PM} \\ \frac{N_o}{A_c^2} f^2 & \text{FM} \end{cases} \quad |f| \leq W$$



Θόρυβος στην έξοδο του δέκτη



Μόνο ο θόρυβος στο εύρος ζώνης του σήματος εμφανίζεται στην έξοδο του δέκτη μετά το φίλτρο μετ' ανίχνευσης





SNR στην έξοδο του δέκτη

- Η ισχύς του σήματος στην έξοδο είναι

$$S_D = \begin{cases} \Delta\phi^2 S_m & \text{PM} \\ \Delta f^2 S_m & \text{FM} \end{cases}$$

- Η ισχύς του θορύβου στην έξοδο είναι

$$N_D = \begin{cases} \frac{2N_0W}{A_c^2} = \frac{N_0W}{S_R} & \text{PM} \\ \frac{2N_0W^3}{3A_c^2} = \frac{N_0W^3}{3S_R} & \text{FM} \end{cases}$$



SNR στην έξοδο του δέκτη

- Η σηματοθρομβική σχέση στην έξοδο είναι

$$SNR_o = \frac{S_D}{N_D} = \begin{cases} \frac{\Delta\phi^2 S_m A_c^2}{2N_0 W} = \frac{\Delta\phi^2 S_m S_R}{N_0 W} & \text{PM} \\ 3\left(\frac{\Delta f}{W}\right)^2 \frac{S_m A_c^2}{2N_0 W} = 3\left(\frac{\Delta f}{W}\right)^2 \frac{S_R S_m}{N_0 W} & \text{FM} \end{cases}$$

- και λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο διαμόρφωσης και τη σηματοθρομβική σχέση στη βασική ζώνη

$$SNR_o = \begin{cases} \Delta\phi^2 S_m SNR_b & \text{PM} \\ 3D^2 S_m SNR_b & \text{FM} \end{cases}$$



SNR στην έξοδο του δέκτη

- Ο λόγος σηματοθορυβικών σχέσεων εισόδου εξόδου είναι

$$\frac{SNR_o}{SNR_c} = \begin{cases} \Delta\phi^2 \frac{B_T}{W} S_m & \text{PM} \\ 3D^2 \frac{B_T}{W} S_m = 3D^2 (D+1) S_m & \text{FM} \end{cases}$$



Καταστολή θορύβου

- Στη διαμόρφωση γωνίας η σηματοθορυβική σχέση εξόδου είναι ανάλογη του τετραγώνου του δείκτη διαμόρφωσης ($\Delta\varphi$ ή Δf)
 - SNR_o μπορεί να αυξηθεί μέσω της αύξησης του δείκτη διαμόρφωσης διατηρώντας την ισχύ σταθερή
- Η FM υπερέχει της PM όσον αφορά την επίδοση στον θόρυβο
 - Η βελτίωση στην PM περιορίζεται από το ότι η απόκλιση φάσης $\Delta\varphi$ είναι μικρότερη του π



Καταστολή θορύβου

- Η σηματοθορυβική σχέση εξόδου είναι καλύτερη από την DSB εάν

$$\begin{cases} \Delta\phi^2 S_m > 1 & \text{PM} \\ 3D^2 S_m > 1 & \text{FM} \end{cases}$$

- Για $D > 0.6$ η FM είναι καλύτερη της DSB
- Η τιμή αυτή του λόγου απόκλισης σηματοδοτεί τη μετάβαση από FM στενής ζώνης σε FM ευρείας ζώνης
- Η PM είναι 10 db το πολύ καλύτερη από την DSB

Ανταλλαγή εύρους ζώνης-ισχύος



- Η σηματοθορυβική σχέση SNR_o μπορεί να βελτιωθεί μέσω της αύξησης του εύρους ζώνης μετάδοσης αντί της αύξησης ισχύος εκπομπής
 - Όμως μεγαλώνοντας το εύρος ζώνης μεγαλώνει και ο θόρυβος με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να μην ισχύει η ανάλυση ασθενούς θορύβου (φαινόμενο κατωφλίου)



Φαινόμενο κατωφλίου

- Εάν ο θόρυβος υπερισχύει του σήματος

$$A_n(t) \gg A_c$$

- Η φάση στον αποδιαμορφωτή θα είναι

$$\phi_r(t) \approx \phi_n(t) + \frac{A_c \sin[\phi_n(t) - \phi(t)]}{A_n(t)}$$

- δηλαδή, ο θόρυβος επικρατεί πλήρως και το σήμα δεν είναι ανακτήσιμο



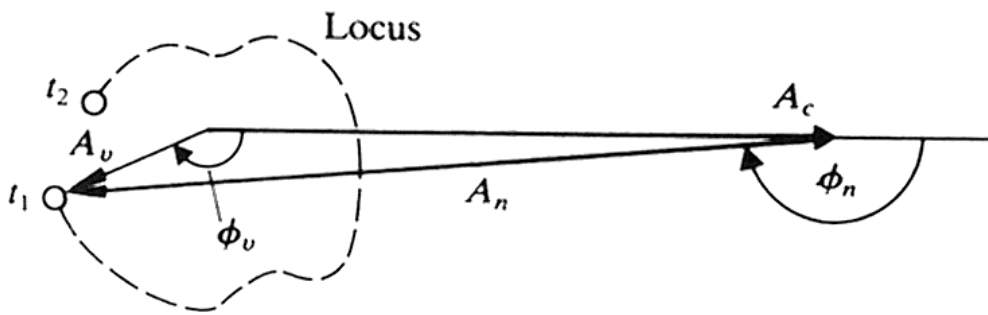
Φαινόμενο κατωφλίου

- Όμως το πρόβλημα εμφανίζεται πολύ πριν γίνει ο θόρυβος τόσο ισχυρός, όταν

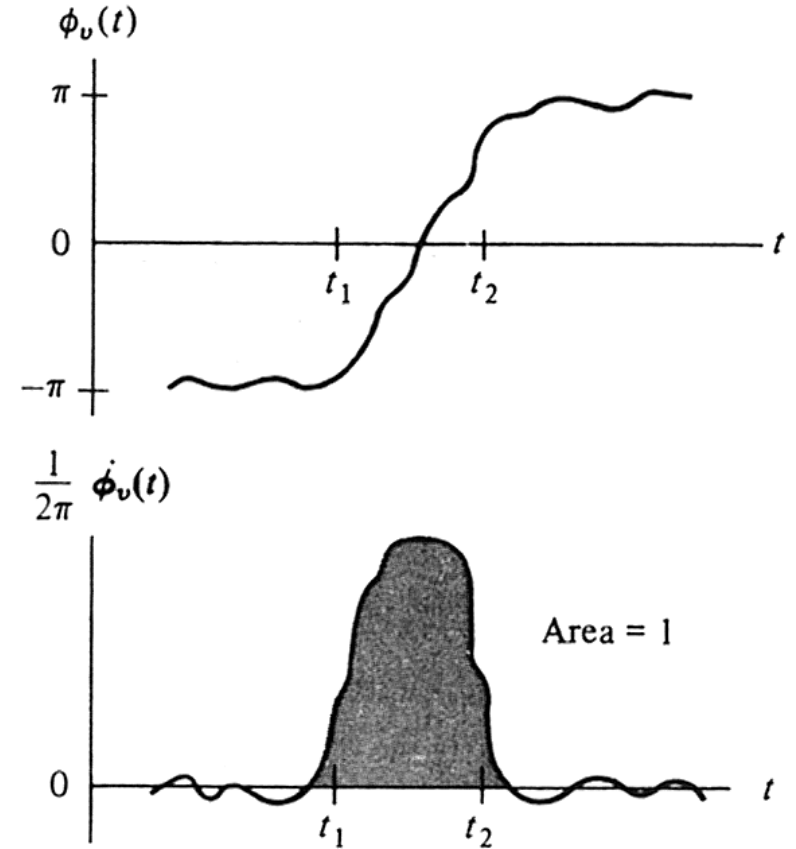
$$\overline{A_n} \approx A_c$$

- Τότε μικρές αλλαγές στο θόρυβο εμφανίζονται ως εκρήξεις (κλικ) στην έξοδο
- Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν η συνισταμένη θορύβου και σήματος διαγράφει ένα κύκλο γύρω από την αρχή, δηλαδή, η φάση αλλάξει κατά 2π
 - Τότε η παράγωγος της φάσης θα δώσει παλμούς που ακούγονται σαν κλικ στην έξοδο σκεπάζοντας το σήμα

Φαινόμενο κατωφλίου



(a)



(b)



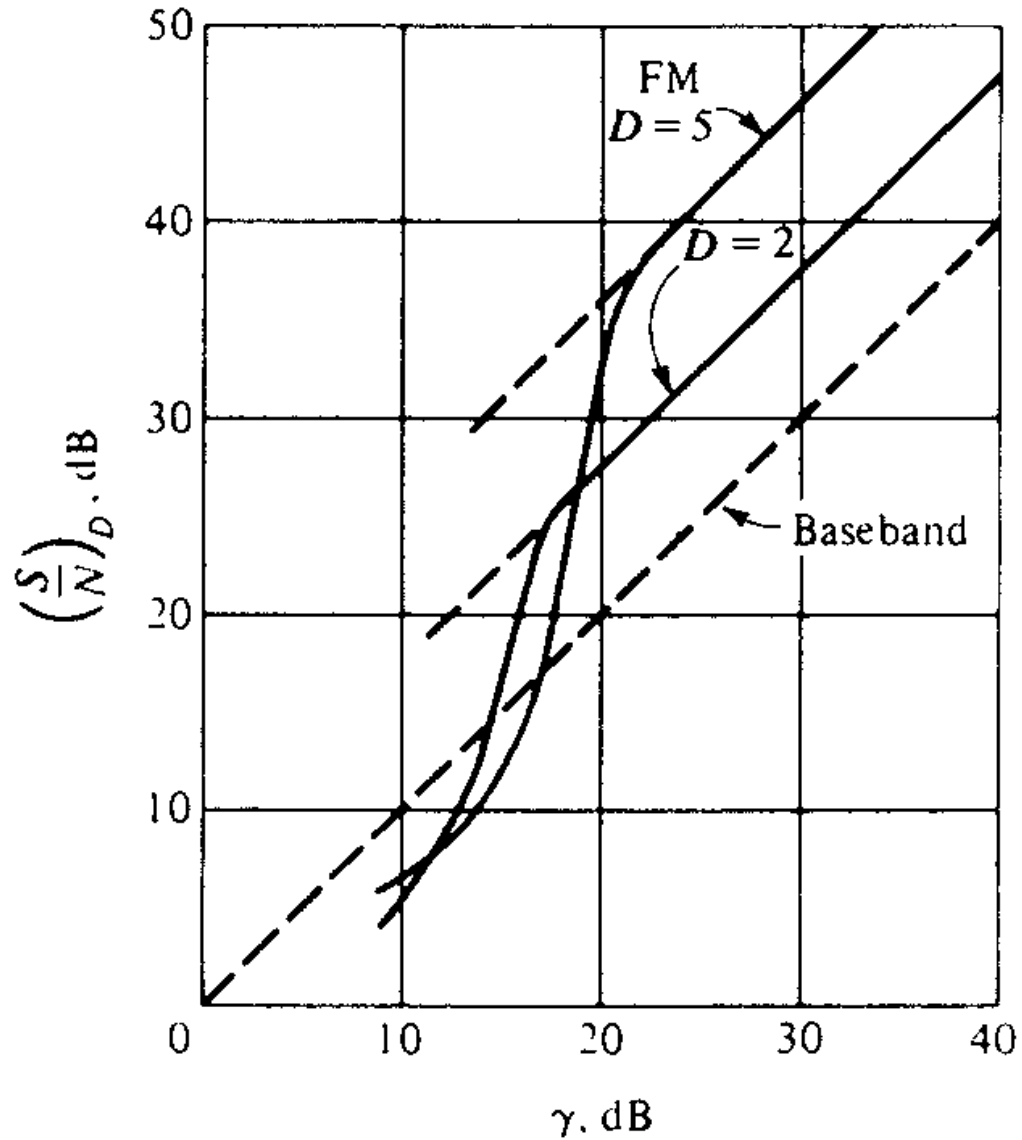
Ανάλυση του Rice

- Ο Rice μελέτησε το φαινόμενο για FM διαμορφωμένο με από τόνο
- Τότε

$$N_D = \frac{N_0 W^3}{3S_R} \left[1 + \frac{12D}{\pi} SNR_b \exp \left\{ -\frac{W}{B_T} SNR_b \right\} \right]$$

- όπου ο δεύτερος όρος περιλαμβάνει την επίδραση των κλικ

Ανάλυση του Rice





Το κατώφλι

- Οι καμπύλες εμφανίζουν μια απότομη καμπή “γόνατο” εξ αιτίας του εκθετικού όρου
- Στην περιοχή αυτή, μικρές αλλαγές στην ισχύ του σήματος έχουν δραματικά αποτελέσματα στην έξοδο
 - Τη μια στιγμή υπάρχει σήμα, την επόμενη εξαφανίζεται
 - Κάτω από το κατώφλι, ο θόρυβος καταλαμβάνει την έξοδο
- Στην πράξη εάν $SNR_c > 10$ δεν εμφανίζονται τέτοια φαινόμενα

Σηματοθορυβική σχέση στο κατώφλι



- Επειδή

$$SNR_c = \frac{W}{B_T} SNR_b$$

- Το κατώφλι αντιστοιχεί

$$SNR_{b,th} = 10 \frac{B_T}{W} \approx 20(D + 2), \quad D > 2$$

- για την οποία προκύπτει

$$SNR_{o,th} = 3D^2 S_m SNR_{b,th} \approx 60D^2 (D + 2) S_m, \quad D > 2$$

Σηματοθορυβική σχέση στο κατώφλι



- Η ελάχιστη σηματοθορυβική σχέση για δοθέντα λόγο απόκλισης είναι

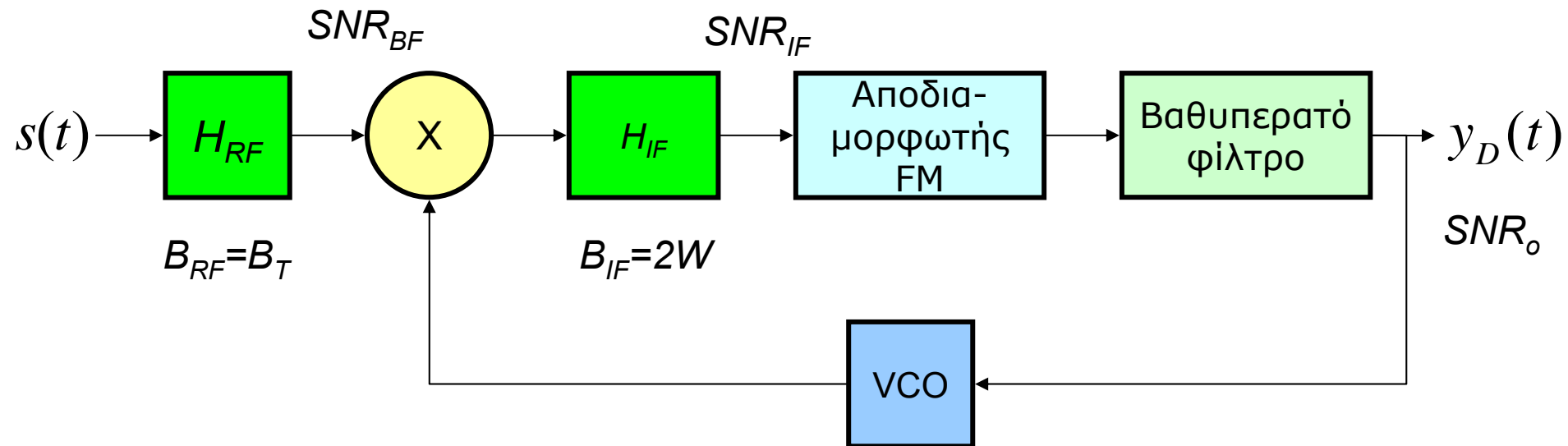
$$SNR_{o,th} = 60D^2(D+2)S_m, \quad D > 2$$

- Ισοδύναμα, για δοθείσα επιθυμητή τιμή σηματοθορυβικής σχέσης και χωρίς περιορισμούς εύρους ζώνης βρίσκουμε τον μέγιστο λόγο απόκλισης λύνοντας ως προς D
 - Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο πλέον αποδοτικό σύστημα FM, δηλαδή, αυτό που απαιτεί την ελάχιστη ισχύ και λειτουργεί πάνω από το κατώφλι



Μείωση κατωφλίου

- Δέκτης FMFB (FM feedback)

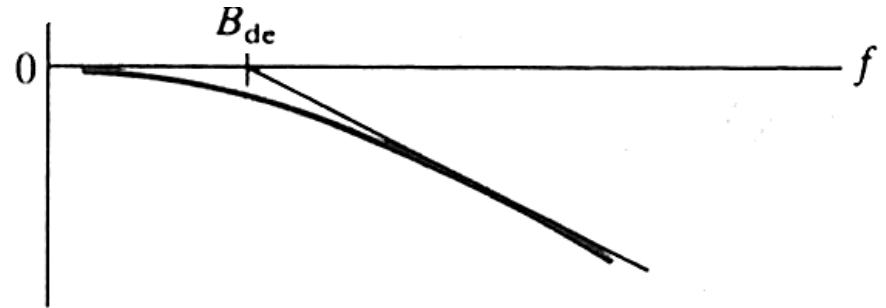
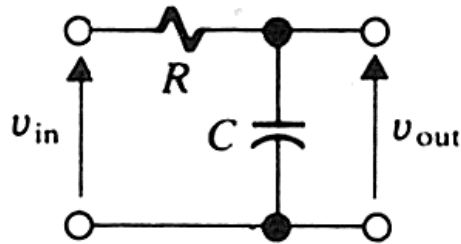




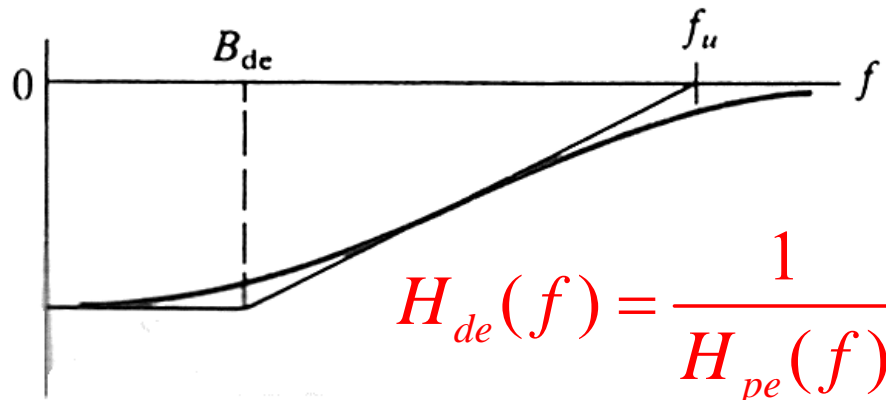
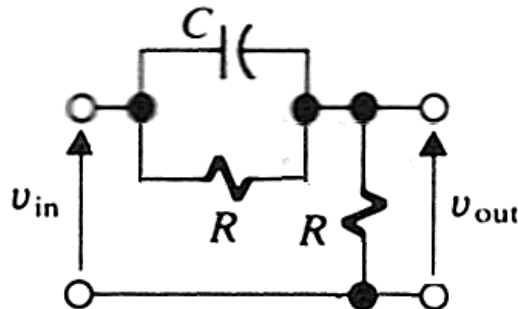
Προέμφαση-Αποέμφαση

- Μπορούμε να βελτιώσουμε τη σηματοθρομβική σχέση εάν ενισχύσουμε τις υψηλές συχνότητες του σήματος πριν τη διαμόρφωση (**προέμφαση**) και τις υποβαθμίσουμε αντίστοιχα κατά την αποδιαμόρφωση (**αποέμφαση**)

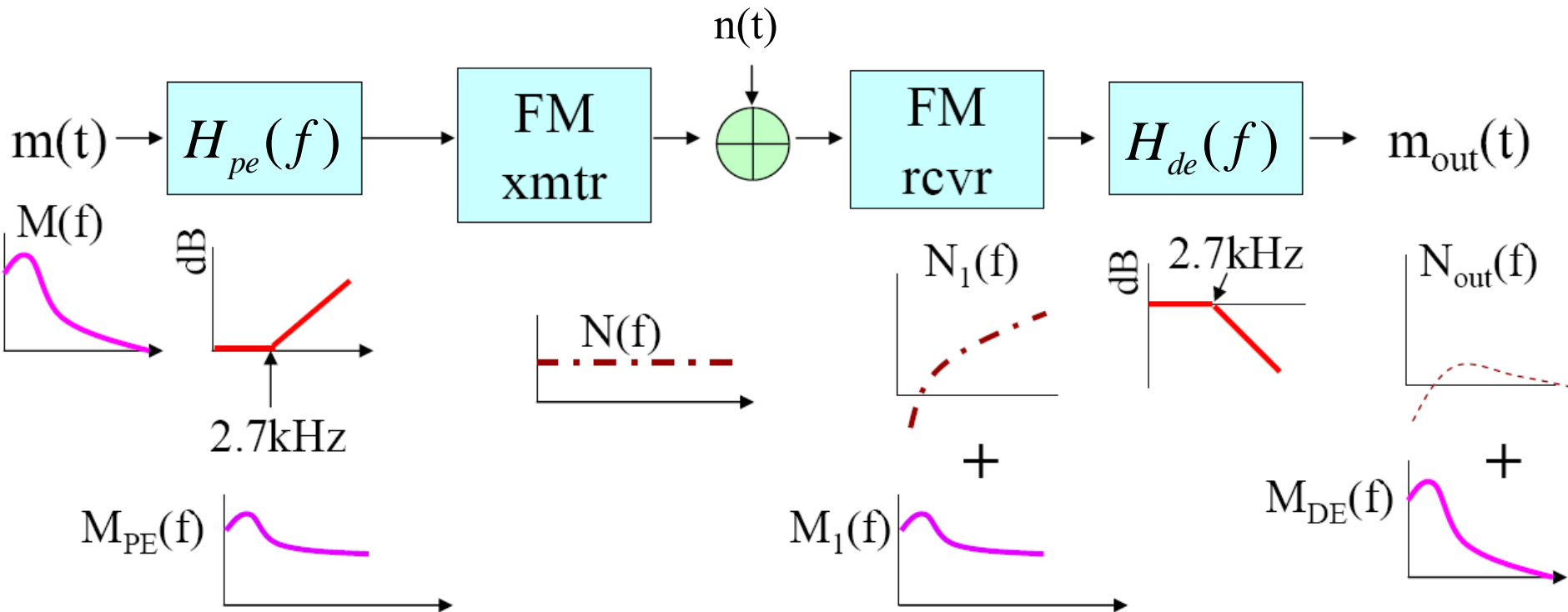
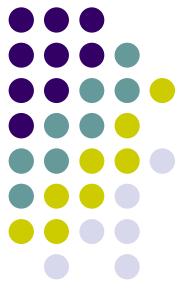
$$H_{de}(f)$$



$$H_{pe}(f)$$



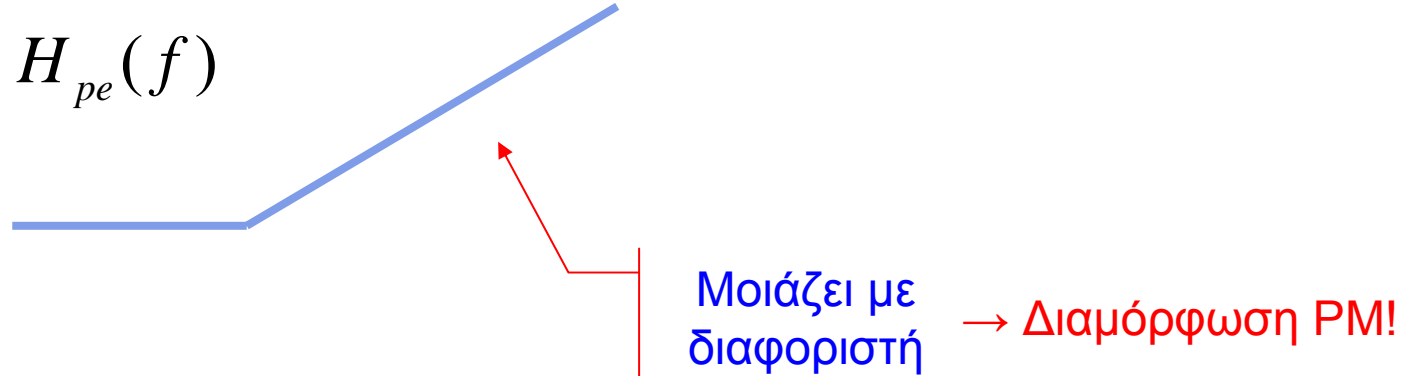
Πρόέμφαση-Αποέμφαση





Τι είδους διαμόρφωση?

- Το φίλτρο προέμφασης παραγωγίζει τις υψηλές συχνότητες του σήματος



- Το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί μίξη διαμόρφωσης FM για τις χαμηλές συχνότητες και διαμόρφωσης PM για τις υψηλές συχνότητες του σήματος

Φίλτρο προέμφασης, αποέμφασης



- Το φίλτρο αποέμφασης στον δέκτη είναι

$$H_{de}(f) = \left[1 + j \frac{f}{B_{de}} \right]^{-1} \approx \begin{cases} 1 & |f| \ll B_{de} \\ \frac{B_{de}}{jf} & |f| \gg B_{de} \end{cases}$$

- Το φίλτρο προέμφασης στον πομπό είναι

$$H_{pe}(f) = \left[1 + j \frac{f}{B_{de}} \right] \approx \begin{cases} 1 & |f| \ll B_{de} \\ \frac{jf}{B_{de}} & |f| \gg B_{de} \end{cases}$$

Ισχύς θορύβου με φίλτρο αποέμφασης



- Με το φίλτρο αποέμφασης η ισχύς θορύβου στην έξοδο είναι

$$N_D = \int_{-W}^W |H_{de}(f)|^2 \frac{N_0 f^2}{3S_R} df = \frac{N_0 B_{de}^3}{S_R} \left[\left(\frac{W}{B_{de}} \right) - \arctan \left(\frac{W}{B_{de}} \right) \right]$$

- Στη συνήθη περίπτωση όπου $W \gg B_{de}$
- Η ισχύς θορύβου είναι

$$N_D \approx \frac{N_0 B_{de}^2 W}{S_R}$$



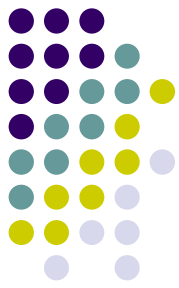
Κέρδος Αποέμφασης

- Η σηματοθρομβική σχέση εξόδου με φίλτρο αποέμφασης είναι

$$SNR_o = \left(\frac{\Delta f}{B_{de}} \right)^2 S_m SNR_b$$

- δηλαδή, έχουμε κέρδος αποέμφασης

$$\frac{1}{3} \left(\frac{W}{B_{de}} \right)^2$$



Παράδειγμα

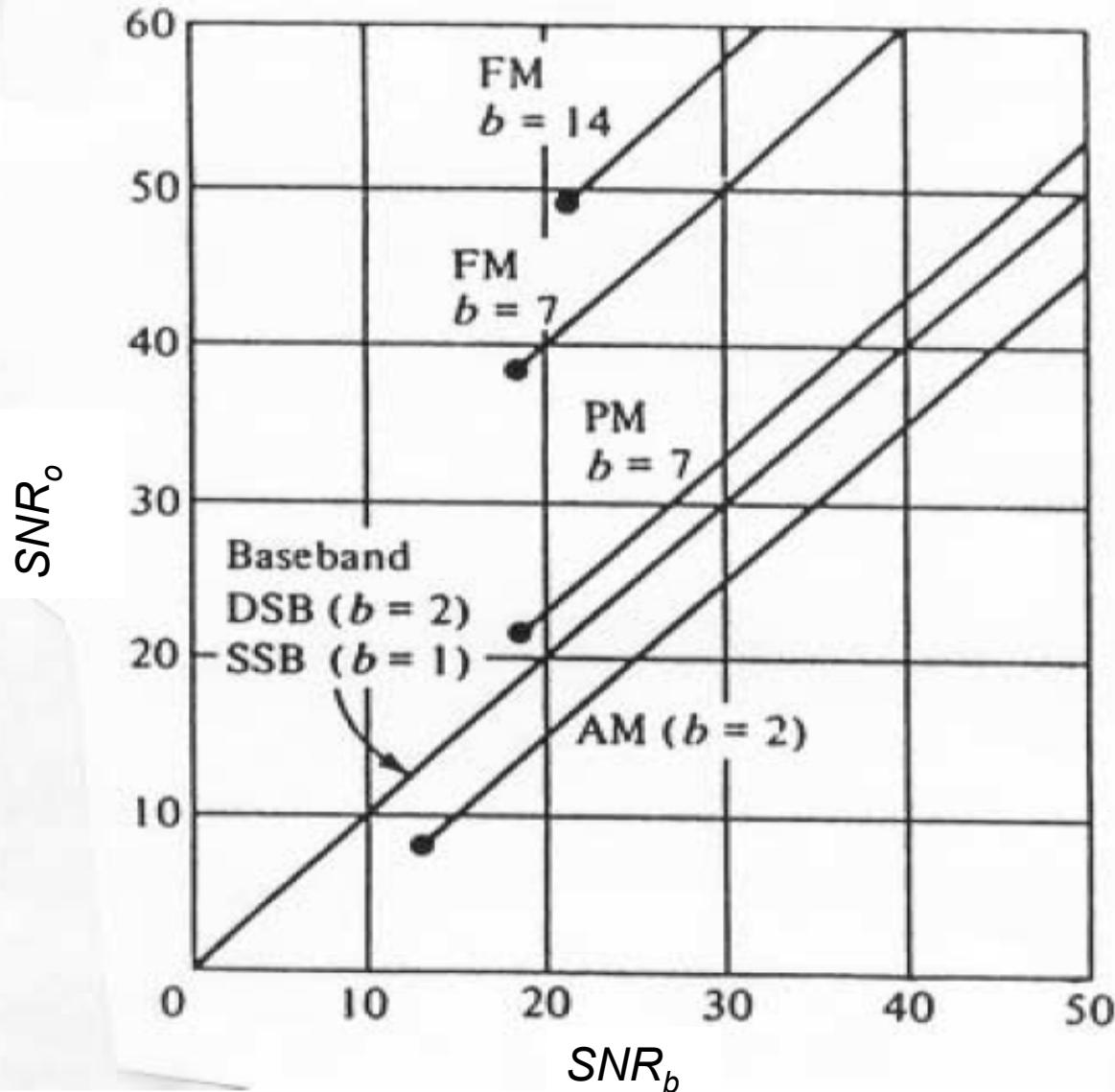
- Στη ραδιοφωνία FM $\Delta f = 75 \text{ kHz}$, $W = 15 \text{ kHz}$,
 $D = 5$, $S_m = 1/2$, $B_{de} = 2,1 \text{ kHz}$
- Χωρίς προέμφαση $\frac{SNR_o}{SNR_b} = 3D^2 S_m = 3 \cdot 5^2 \cdot \frac{1}{2} \approx 38$
- Με προέμφαση $\frac{SNR_o}{SNR_b} = \left(\frac{\Delta f}{B_{de}} \right)^2 S_m \approx 640$
- Οικονομία κατά 640 σε ισχύ με αύξηση κατά 15 σε εύρος ζώνης σε σχέση με SSB

Σύστημα Dolby



- Η βασική ιδέα των φίλτρων προέμφασης και αποέμφασης βρίσκει εφαρμογή και στην ηχογράφηση σε ταινία, ειδικά, σε κασέτες
- Εδώ σκοπός είναι να περιορισθεί ο μάλλον ενοχλητικός θόρυβος στις υψηλές συχνότητες
- Όλα τα μοντέρνα συστήματα ήχου είναι εφοδιασμένα με την τεχνική Dolby

Σύγκριση συστημάτων διαμόρφωσης

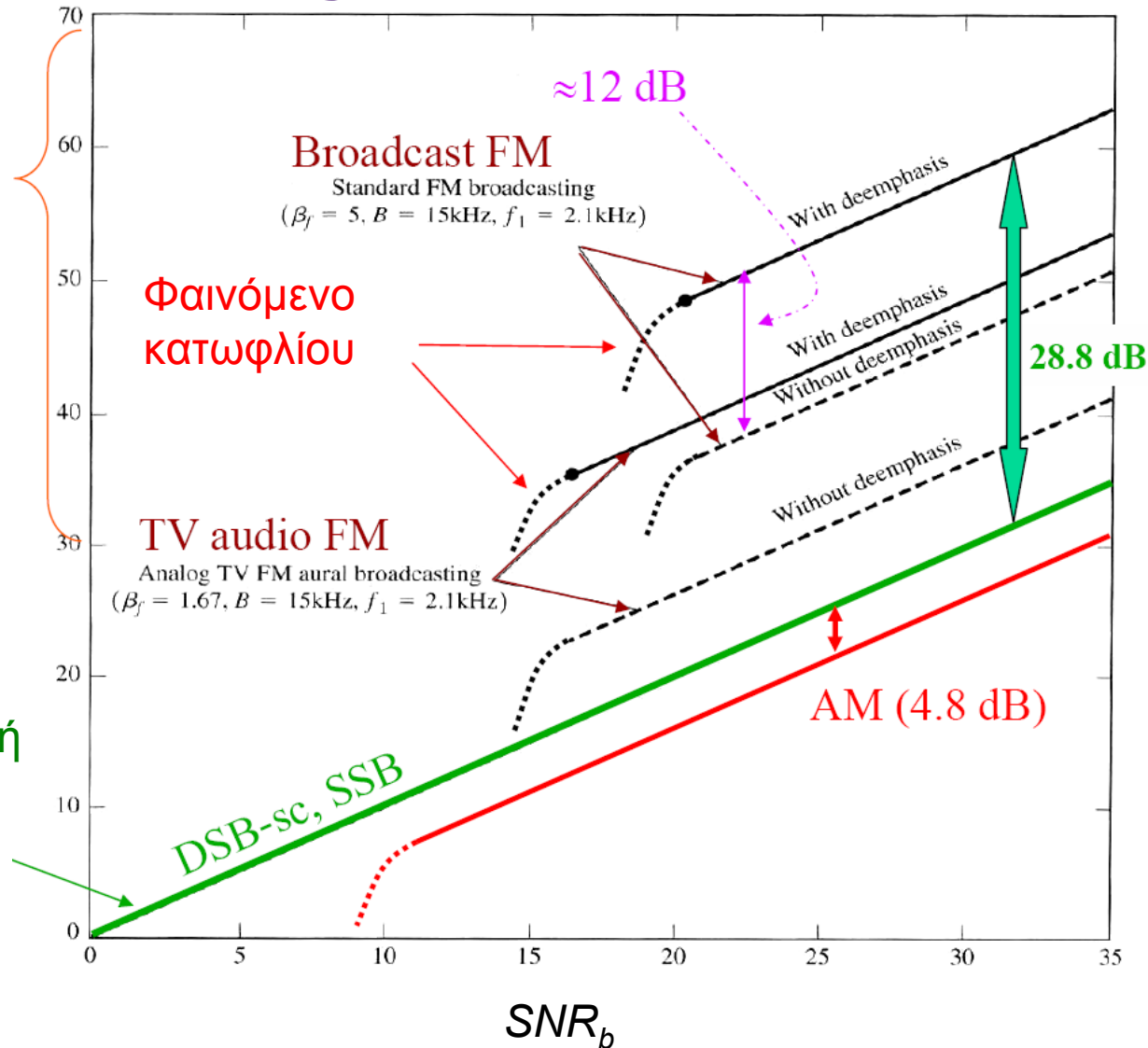


Σύγκριση συστημάτων διαμόρφωσης



Στην περιοχή αυτή ο θόρυβος δεν γίνεται αντιληπτός

Φαινόμενο κατωφλίου



Η απόσταση από την πράσινη γραμμή είναι το κέρδος που έχουμε από το σύστημα διαμόρφωσης