



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

# Τηλεπικοινωνίες

## Ενότητα 5 : Θόρυβος

Δημοσθένης Βουγιούκας (dnougiou@aegean.gr)

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# 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.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» 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.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Θόρυβος

4

- Ο όρος *θόρυβος (noise)* χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις ανεπιθύμητες κυματομορφές που τείνουν να ενοχλούν τη μετάδοση και την επεξεργασία των σημάτων στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και πάνω στις οποίες δεν έχουμε πλήρη έλεγχο.
- **Θόρυβος βολής**
  - Ο θόρυβος βολής εμφανίζεται στις ηλεκτρονικές διατάξεις εξ αιτίας της διακριτής φύσης της ροής του ρεύματος στη διάταξη.
  - Έχει κατανομή Gauss με μηδενική μέση τιμή.

# Θόρυβος

5

## □ Θερμικός θόρυβος

- Ο θερμικός θόρυβος είναι το όνομα που δίνεται στον ηλεκτρικό θόρυβο που εμφανίζεται κατά την τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων σε ένα αγωγό.
- Η μέση τετραγωνική τιμή της τάσης/έντασης θερμικού θορύβου που εμφανίζεται στα άκρα αντίστασης, μετρούμενη σε εύρος ζώνης  $\Delta f$  Hertz δίνεται από:

$$E[V_{TN}^2] = 4kTR\Delta f \quad \text{volt}^2 \qquad E[I_{TN}^2] = \frac{1}{R^2} E[V_{TN}^2]$$

- $k$  σταθερά Boltzman =  $1.38 \times 10^{-23}$  joule ανά βαθμό Kelvin
- Από το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα συνεπάγεται ότι ο θερμικός θόρυβος έχει κατανομή Gauss με μηδενική μέση τιμή.

# Λευκός Θόρυβος

6

- Η ανάλυση θορύβου στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα βασίζεται σε μια ιδανική μορφή του θορύβου που καλείται **λευκός θόρυβος** (**white noise**), η φασματική πυκνότητα ισχύος (ΦΠΙ) του οποίου είναι ανεξάρτητη της συχνότητας λειτουργίας.

$$S_w(f) = \frac{N_0}{2}$$

- Ο παράγοντας  $1/2$  έχει περιληφθεί για να δείξει ότι το μισό της ισχύος συνδέεται με θετική συχνότητα και το μισό με αρνητική.

# Λευκός Θόρυβος

7

- Η παράμετρος  $N_0$  (Watt/Hertz) μπορεί να εκφραστεί σαν:

$$N_0 = kT_e$$

- $k$  = σταθερά Boltzmann
- $T_e$  = **Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου** (equivalent noise temperature) στο δέκτη, δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να διατηρηθεί μια αντίσταση θορύβου έτσι ώστε, συνδέοντας την αντίσταση στην είσοδο μιας χωρίς θόρυβο μορφής του συστήματος, να παράγει την ίδια διαθέσιμη ισχύ θορύβου στην έξοδο του συστήματος με αυτήν που παράγεται από όλες τις πηγές θορύβου στο πραγματικό σύστημα.
- Η  $T_e$  εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους του συστήματος.

# Λευκός Θόρυβος

8

- Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του λευκού θορύβου:

$$R_w(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau)$$

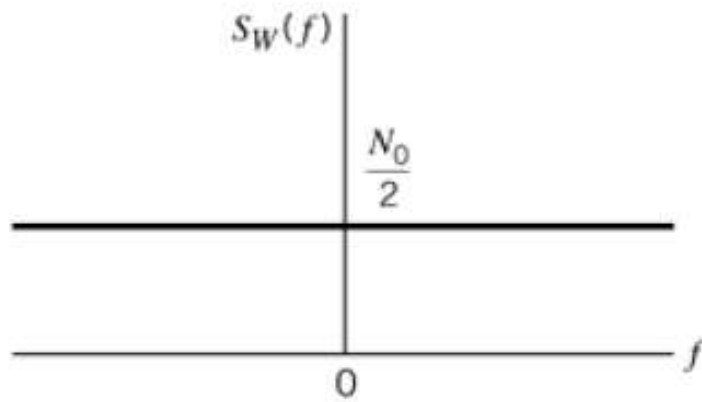
- Επομένως, οποιαδήποτε δύο διαφορετικά δείγματα λευκού θορύβου, ανεξάρτητα από το πόσο κοντά στο χρόνο λαμβάνονται, είναι ασυσχέτιστα.
- Αν ο λευκός θόρυβος  $w(t)$  είναι επίσης Gauss, τότε τα δύο δείγματα είναι στατιστικά ανεξάρτητα.



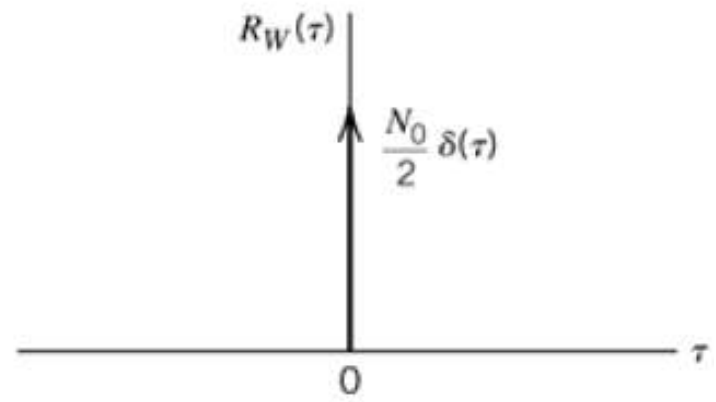
# Λευκός Θόρυβος

9

- Χαρακτηριστικές λευκού θορύβου:



(a)



(b)

# Λευκός Θόρυβος

10

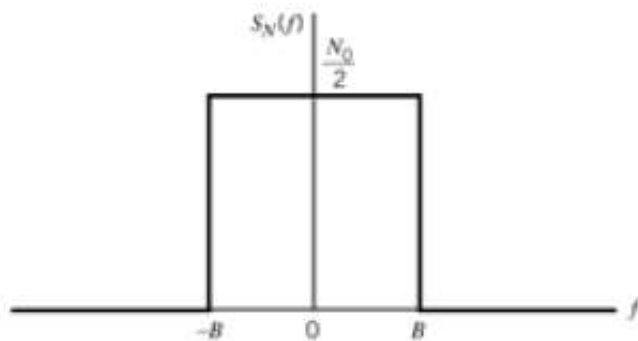
- Ο λευκός θόρυβος έχει άπειρη ισχύ, και δεν είναι φυσικά πραγματοποιήσιμος.
- Όσο όμως το εύρος ζώνης μιας στοχαστικής ανέλιξης θορύβου στην είσοδο ενός συστήματος είναι αισθητά μεγαλύτερο από αυτό του ίδιου του συστήματος, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε το λευκό θόρυβο σαν μοντέλο της ανέλιξης θορύβου στην είσοδο.
- Ο λευκός θόρυβος αντιπροσωπεύει την απόλυτη τυχαιότητα.
- Η χρησιμότητα του λευκού θορύβου είναι:
  - ανάλογη της κρουστικής συνάρτησης στα γραμμικά συστήματα
  - χρήσιμη στη στατιστική ανάλυση των συστημάτων λόγω απλών μαθηματικών εξισώσεων

# Λευκός Θόρυβος

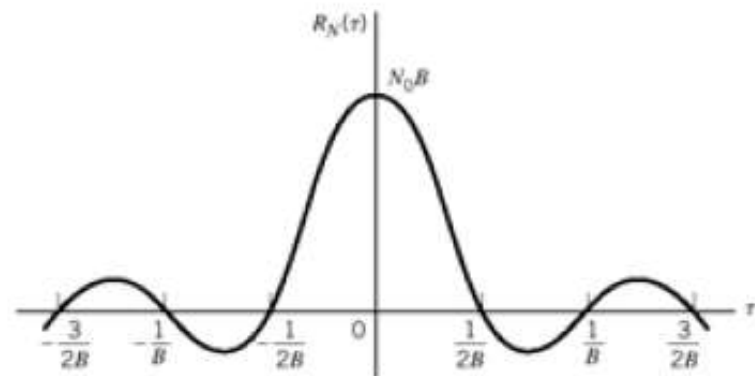
11

Παράδειγμα: Ιδανικός βαθυπερατός λευκός θόρυβος

- Έστω λευκός θόρυβος Gauss  $w(t)$  μηδενικής μέσης τιμής και φασματικής πυκνότητας ισχύος  $N_0/2$  εφαρμόζεται σε ιδανικό βαθυπερατό φίλτρο εύρους ζώνης  $B$  και απόκρισης πλάτους στη ζώνη διέλευση ίση με μονάδα.
- Ο θόρυβος  $n(t)$  στην έξοδο έχει τις εξής χαρακτηριστικές:



(α)



(β)

$$R_N(\tau) = N_0 B \operatorname{sinc}(2B\tau)$$

# Λευκός Θόρυβος

12

## Παράδειγμα: Ιδανικός βαθυπερατός λευκός θόρυβος

- Αφού η είσοδος είναι Gauss, και η έξοδος του φίλτρου είναι Gauss. Αν λαμβάνονται δείγματα του  $n(t)$  με ρυθμό  $2B$  φορές ανά δευτερόλεπτο, τα δείγματα είναι ασυσχέτιστα, και όντας Gauss είναι και στατιστικά ανεξάρτητα.  $R_N(\tau) = 0 \Rightarrow \tau = \pm \frac{n}{2B} \Rightarrow f_s = 2B$
- Συνεπώς, η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του συνόλου αυτών των δειγμάτων είναι ίση με το γινόμενο των ξεχωριστών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας.
  - Σημειώστε ότι κάθε τέτοιο δείγμα θορύβου έχει μηδενική μέση τιμή και διασπορά  $N_0B$ .

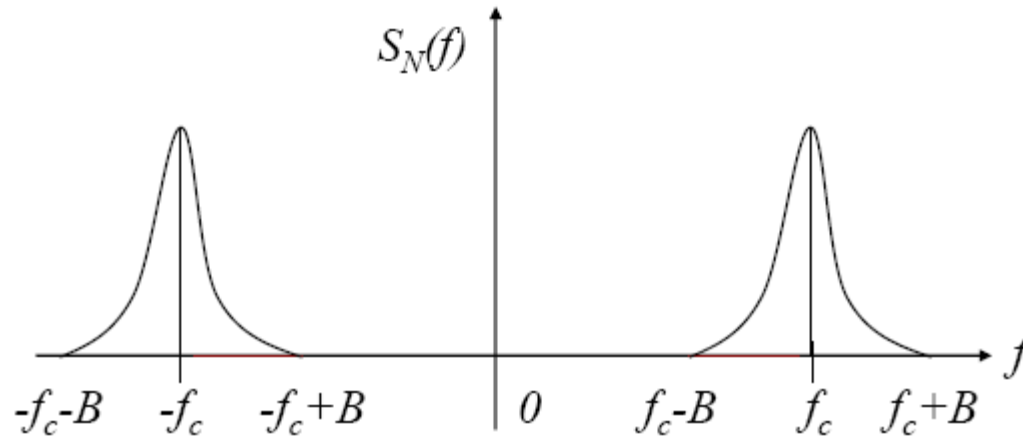
$$E \left\{ x \left( t \pm \frac{n}{2B} \right) x(t) \right\} = 0$$

# Θόρυβος Στενής Ζώνης

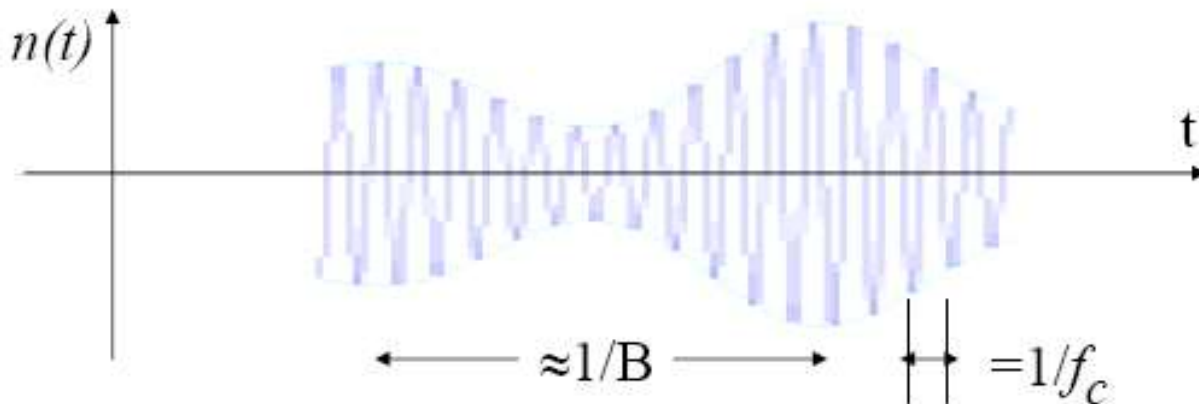
- Στην είσοδο του δέκτη πρακτικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων συνήθως υπάρχει ένα φίλτρο στενής ζώνης, δηλαδή η συχνότητα στο μέσο της ζώνης είναι μεγάλη συγκρινόμενη με το εύρος ζώνης του ( $f_c \gg B$ ).
- Η στοχαστική ανέλιξη θορύβου που εμφανίζεται στην έξοδο ενός τέτοιου φίλτρου ονομάζεται **θόρυβος στενής ζώνης**.
- Η συνάρτηση δείγμα  $n(t)$  μιας τέτοιας ανέλιξης εμφανίζεται περίπου παρόμοια με μια ημιτονική κυματομορφή συχνότητας  $f_c$ , που κυματώνεται αργά τόσο σε φάση όσο και σε πλάτος.

# Θόρυβος Στενής Ζώνης

14



- Συνάρτηση δείγμα θορύβου στενής ζώνης:



# Θόρυβος Στενής Ζώνης

15

- Ανάλογα με την εφαρμογή ενδιαφέροντος, υπάρχουν 2 συγκεκριμένες αναπαραστάσεις θορύβου στενής ζώνης:
  - Ο θόρυβος στενής ζώνης ορίζεται μέσω ενός ζευγαριού συνιστωσών οι οποίες ονομάζονται **συμφασική** (in-phase) και **ορθογωνική** (quadrature) συνιστώσα
  - Ο θόρυβος στενής ζώνης ορίζεται μέσω δύο άλλων συνιστωσών οι οποίες ονομάζονται **περιβάλλουσα** (envelope) και **φάση** (phase)

# Θόρυβος Στενής Ζώνης

16

- Έστω θόρυβος  $n(t)$  που παράγεται στην έξοδο ενός φίλτρου στενής ζώνης, σε απόκριση της συνάρτησης δείγματος  $w(t)$  μιας ανέλιξης λευκού θορύβου Gauss με  $\mu_w = 0$  και  $\sigma_w(f) = 1$ .

$$S_N(f) = |H(f)|^2$$

- Οποιοσδήποτε θόρυβος στενής ζώνης που συναντιέται στην πράξη μπορεί να μοντελοποιηθεί εφαρμόζοντας λευκό θόρυβο σε κατάλληλο φίλτρο.



# Θόρυβος Στενής Ζώνης

17

- Θεωρούμε ότι το φάσμα ισχύος του  $n(t)$  είναι κεντραρισμένο γύρω από την  $f_c$ :

$$n(t) = n_I(t) \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$$n_I(t) = n(t) \cos(2\pi f_c t) + \hat{n}(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$$n_Q(t) = \hat{n}(t) \cos(2\pi f_c t) - n(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$$n_+(t) = n(t) + j\hat{n}(t)$$

$$\tilde{n}(t) = n_+(t) \exp(-2\pi f_c t)$$

$$\tilde{n}(t) = n_I(t) + jn_Q(t)$$

$n_I(t)$ ,  $n_Q(t)$  βαθυπερατά σήματα

# Θόρυβος Στενής Ζώνης

- Αναπαράσταση του θορύβου στενής ζώνης  $n(t)$  σε κανονική μορφή:

$$n(t) = n_I(t) \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- **Ιδιότητα 1:** Εάν ο θόρυβος στενής ζώνης  $n(t)$ , έχει μηδενική μέση τιμή, τότε η  $n_I(t)$  και η  $n_Q(t)$  έχουν επίσης μηδενική μέση τιμή.
- **Ιδιότητα 2:** Εάν ο θόρυβος στενής ζώνης  $n(t)$  είναι Gauss, τότε η  $n_I(t)$  και η  $n_Q(t)$  είναι από κοινού Gauss.
- **Ιδιότητα 3:** Εάν ο θόρυβος στενής ζώνης  $n(t)$  είναι στατικός με την ευρεία έννοια, τότε η  $n_I(t)$  και η  $n_Q(t)$  είναι από κοινού στατικές με την ευρεία έννοια.

# Θόρυβος Στενής Ζώνης

19

- **Ιδιότητα 4:** Η  $n_I(t)$  και η  $n_Q(t)$  έχουν την ίδια φασματική πυκνότητα ισχύος:

$$S_{N_I}(f) = S_{N_Q}(f) = \begin{cases} S_N(f - f_c) + S_N(f + f_c), & -B \leq f \leq B \\ 0, & \text{αλλου} \end{cases}$$

- **Ιδιότητα 5:** Εάν ο θόρυβος στενής ζώνης  $n(t)$ , έχει μηδενική μέση τιμή, τότε η  $n_I(t)$  και η  $n_Q(t)$  έχουν την ίδια μεταβλητότητα με αυτή του  $n(t)$ .

# Θόρυβος Στενής Ζώνης

20

- **Ιδιότητα 6:** Οι ετεροφασματικές πυκνότητες των  $n_I(t)$  και  $n_Q(t)$  είναι καθαρά φανταστικές:

$$S_{N_I N_Q}(f) = -S_{N_Q N_I}(f) = \begin{cases} j[S_N(f + f_c) - S_N(f - f_c)], & -B \leq f \leq B \\ 0, & \text{αλλου} \end{cases}$$

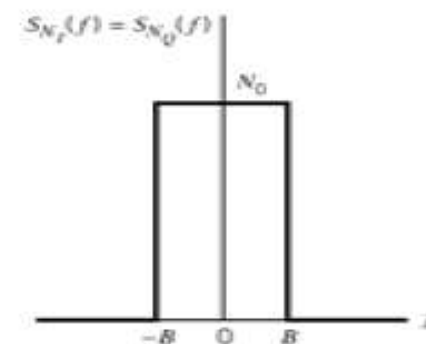
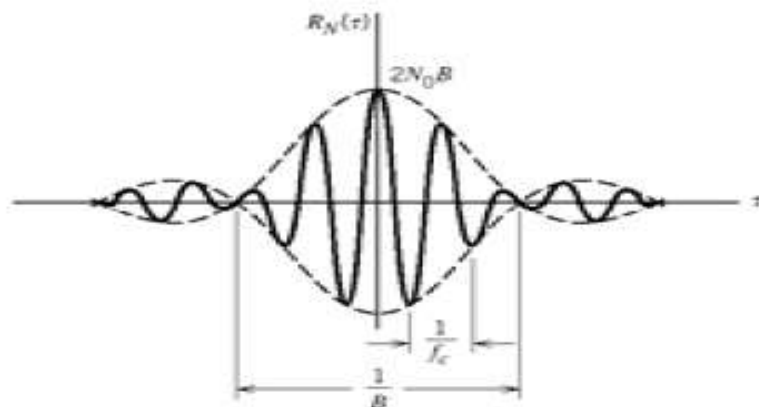
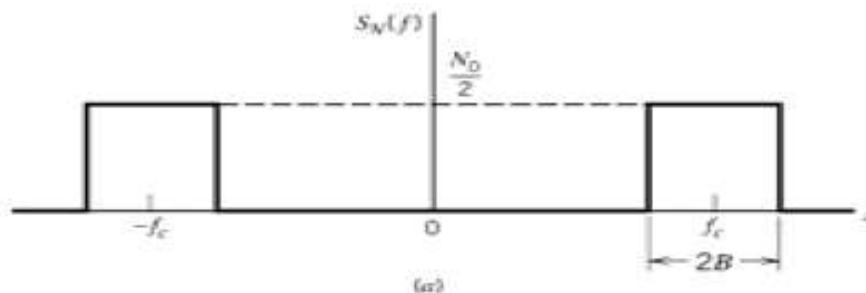
- **Ιδιότητα 7:** Εάν θόρυβος στενής ζώνης  $n(t)$  είναι Gauss με μηδενική μέση τιμή και η φασματική πυκνότητα ισχύος  $S_N(f)$  αυτού είναι τοπικά συμμετρική γύρω από την  $\pm f_c$  τότε η  $n_I(t)$  και η  $n_Q(t)$  είναι στατιστικά ανεξάρτητες.

# Θόρυβος Στενής Ζώνης

21

## Παράδειγμα: Ιδανικός ζωνοπερατός λευκός θόρυβος

- Έστω λευκός θόρυβος Gauss  $w(t)$  μηδενικής μέσης τιμής και φασματικής πυκνότητας ισχύος  $N_0/2$  εφαρμόζεται σε ιδανικό ζωνοπερατό φίλτρο εύρους ζώνης  $2B$ , κεντρική συχνότητα  $f_c$  και απόκριση πλάτους στη ζώνη διέλευσης ίση με μονάδα.



# Θόρυβος Στενής Ζώνης

22

$$\begin{aligned} R_N(\tau) &= \int_{-f_c-B}^{-f_c+B} \frac{N_0}{2} \exp(j2\pi f\tau) df + \int_{f_c-B}^{f_c+B} \frac{N_0}{2} \exp(j2\pi f\tau) df = \\ &= 2N_0B \operatorname{sinc}(2B\tau) \cos(2\pi f_c\tau) \end{aligned}$$

- Από την φασματική πυκνότητα ισχύος της συμφασικής και της ορθογωνικής υπολογίζεται εύκολα ότι:

$$R_{N_I}(\tau) = R_{N_Q}(\tau) = 2N_0B \operatorname{sinc}(2B\tau)$$

# Θόρυβος Στενής Ζώνης

23

- Αναπαράσταση του θορύβου στενής ζώνης συναρτήσει της περιβάλλουσας και της φάσης:

$$n(t) = r(t) \cos [2\pi f_c t + \psi(t)]$$

$$r(t) = [n_I^2(t) + n_Q^2(t)]^{1/2}$$

$$\psi(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{n_Q(t)}{n_I(t)} \right]$$

# Θόρυβος Στενής Ζώνης

24

- Οι τυχαίες μεταβλητές  $R$  και  $\Psi$  είναι στατιστικά ανεξάρτητες.
- Η  $\Psi$  είναι ομοιόμορφα κατανομημένη μέσα στο διάστημα 0 ως  $2\pi$ :

$$f_{\Psi}(\psi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & 0 \leq \psi \leq 2\pi \\ 0, & \text{αλλο\u03c5} \end{cases}$$

- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της  $R$  είναι:

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), & r \geq 0 \\ 0, & \text{αλλο\u03c1} \end{cases}$$



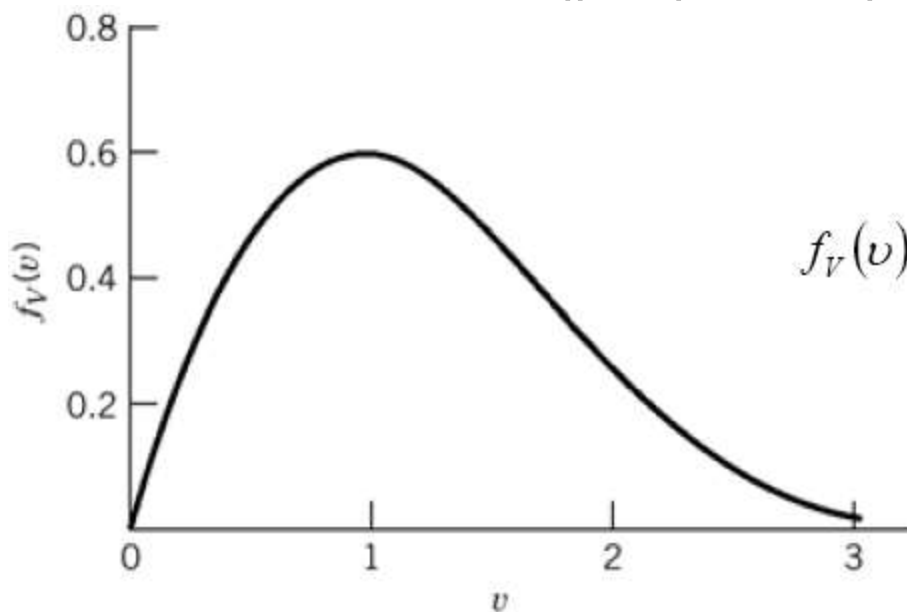
# Θόρυβος Στενής Ζώνης

25

- Για ευκολία στη γραφική παράσταση, έστω:

$$u=r/\sigma \quad \text{και} \quad f_V(u)=\sigma f_R(R)$$

Κανονικοποιημένη κατανομή Rayleigh



$$f_V(v) = \begin{cases} v \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right), & v \geq 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

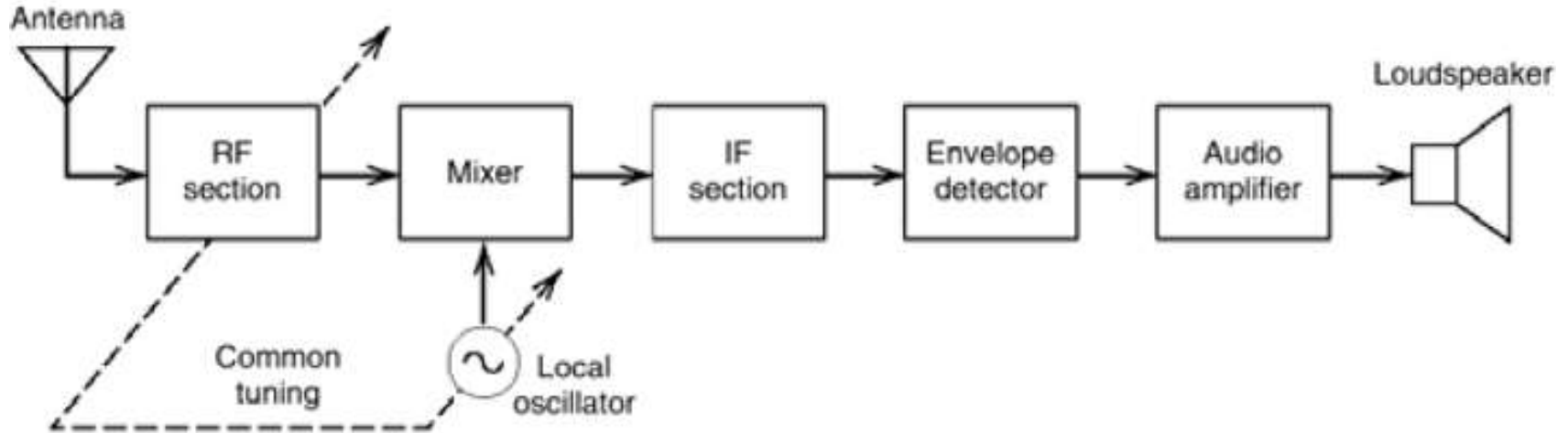
# Θόρυβος σε Διαμόρφωση CW

26

- Στα συστήματα διαμόρφωσης CW (Continuous-Wave) το κριτήριο της συμπεριφοράς τους ως προς το θόρυβο, είναι ο λόγος **σήματος-προς-θόρυβο** στην **έξοδο** (output signal-to-noise ratio, *SNRo*).
- Ο λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο ορίζεται σαν ο λόγος της μέσης ισχύος του αποδιαμορφωμένου σήματος πληροφορίας προς τη μέση ισχύ του θορύβου, και των δύο μετρούμενων στην έξοδο του δέκτη.
- Στην ανάλυσή μας θεωρούμε ότι ο θόρυβος είναι στατικός, λευκός και Gauss (Additive White Gaussian Noise, AWGN).

# Υπερετερόδυνος (superheterodyne) δέκτης

27



## □ Τυπικές παράμετροι

	Ραδιόφωνο AM	Ραδιόφωνο FM
Περιοχή συχνότητας φέροντος RF	0.535-1.605MHz	88-108MHz
Μεσαία συχνότητα τμήματος IF	0.455MHz	10.7MHz
Εύρος ζώνης IF	10kHz	200kHz

# Υπερετερόδυνος (superheterodyne) δέκτης

28

- Μετατροπή συχνότητας ή λειτουργία ετεροδύνησης

$$f_{IF} = f_{RF} - f_{LO}$$

$$f_{IF} = f_{RF} - f_{LO}$$

- Πιθανότητα λήψης δύο σημάτων:

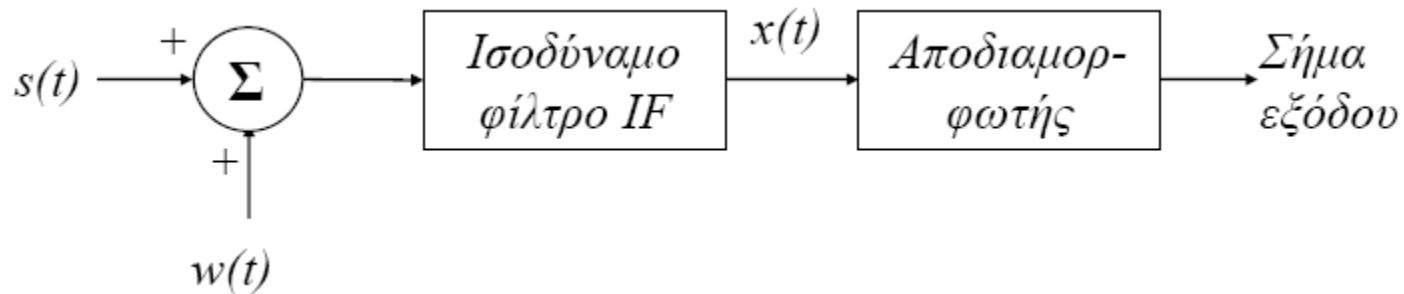
$$f_{IF}' = f_{RF} + f_{LO}$$

- Χρησιμοποιούνται επιλεκτικές βαθμίδες στο τμήμα RF έτσι ώστε να ευνοηθεί το επιθυμητό σήμα και να διαχωριστεί από το ανεπιθύμητο σήμα ή *σήμα είδωλο* (*image signal*).

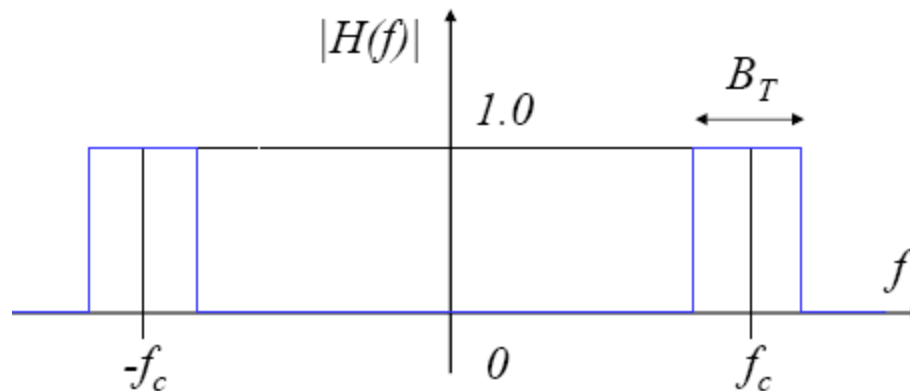
# Δέκτες AM

29

- Μοντέλο δέκτη AM:



- Ιδανική χαρακτηριστική ισοδύναμου φίλτρου IF:



# Δέκτες AM

30

- Το ισοδύναμο φίλτρο  $IF$  παριστάνει τα χαρακτηριστικά των διαδοχικών φιλτραρισμάτων στα τμήματα  $RF$  και  $IF$  του δέκτη.
- $w(t)$  = προσθετικός θόρυβος στο μπροστινό τμήμα του δέκτη (front-end receiver noise).
- Ο  $w(t)$  μοντελοποιείται ως λευκός θόρυβος Gauss (AWGN) με μηδενική μέση τιμή και φασματική πυκνότητα ισχύος  $N_0/2$ , που ορίζεται τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές συχνότητες.
- $N_0$  = η μέση ισχύς θορύβου ανά μονάδα εύρους ζώνης μετρούμενη στο μπροστινό τμήμα του δέκτη.

# Δέκτες AM

31

- Στην έξοδο του φίλτρου  $IF$ :

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

- όπου το  $n(t)$  είναι ζωνοπεριορισμένος λευκός θόρυβος που μπορεί να θεωρηθεί σαν θόρυβος στενής ζώνης.

$$S_N(f) = \begin{cases} \frac{N_0}{2}, & f_c - \frac{B_T}{2} \leq |f| \leq f_c + \frac{B_T}{2} \\ 0, & \text{αλλοίω} \end{cases}$$

# Δέκτες AM

32

- Μέτρο της πιστότητας του λαμβανόμενου σήματος πληροφορίας είναι ο *λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο (output signal-to-noise ratio)* που ορίζεται ως:

$$(SNR)_o = \frac{\text{μέση ισχύς του σήματος πληροφορίας στην έξοδο του δέκτη}}{\text{μέση ισχύς του θορύβου στην έξοδο του δέκτη}}$$

- Ο SNR είναι σαφής όσο το ανακτώμενο σήμα πληροφορίας και ο θόρυβος είναι προσθετικά.
- Ο SNR εξαρτάται μεταξύ άλλων από τον τύπο της διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης που χρησιμοποιείται.



# Δέκτες AM

33

- Ορίζουμε το *λόγο σήματος προς θόρυβο στο διάυλο (channel signal-to-noise ratio)* ως:

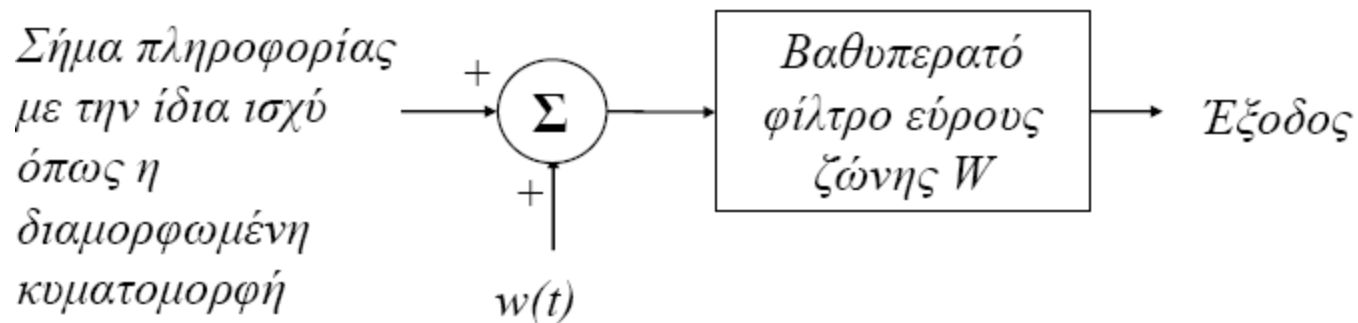
$$(SNR)_c = \frac{\text{μέση ισχύς του διαμορφωμένου σήματος πληροφορίας στην είσοδο του δέκτη}}{\text{μέση ισχύς του θορύβου στο εύρος ζώνης της πληροφορίας στην είσοδο του δέκτη}}$$

- Συγκρίνει συστήματα με διαφορετικά είδη διαμόρφωσης σε αντικειμενική βάση
  - Το σήμα  $s(t)$  που εκπέμπεται από κάθε σύστημα να έχει την ίδια ισχύ
  - Ο θόρυβος  $n(t)$  της βαθμίδας εισόδου του δέκτη έχει την ίδια μέση ισχύ, μετρούμενη στο εύρος ζώνης συχνοτήτων πληροφορίας  $W$ .
- Αυτός ο λόγος μπορεί να θεωρηθεί σαν ο SNR που προκύπτει από την απ' ευθείας μετάδοση (*direct transmission*) ή μετάδοση βασικής ζώνης (*baseband transmission*) της πληροφορίας χωρίς διαμόρφωση.

# Δέκτες AM

34

- Απεικόνιση της μετάδοσης στη βασική ζώνη ενός σήματος πληροφορίας με εύρος ζώνης  $W$  για τον υπολογισμό του  $SNR_C$



- Εδώ θεωρείται ότι:
  - η ισχύς πληροφορίας στην είσοδο του βαθυπερατού φίλτρου είναι η ίδια με την ισχύ του διαμορφωμένου σήματος πληροφορίας
  - το βαθυπερατό φίλτρο περνά το σήμα πληροφορίας και απορρίπτει τον εκτός ζώνης θόρυβο.

# Δέκτες AM

35

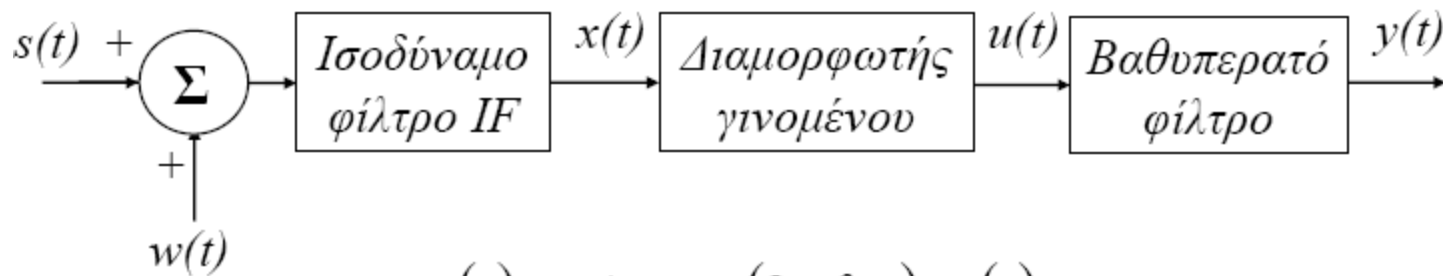
- Για λόγους σύγκρισης διαφόρων συστημάτων διαμόρφωσης, κανονικοποιούμε την επίδοση του δέκτη ως προς την επίδοση του καναλιού και ορίζουμε ένα *δείκτη αξιολόγησης (figure of merit)* για το δέκτη ως εξής:

$$\text{Δείκτης αξιολόγησης} = \frac{(SNR)_o}{(SNR)_c}$$

- Παίρνει τιμές  $>1$ ,  $=1$ ,  $<1$ , ανάλογα με τον τύπο της διαμόρφωσης.
- Προφανώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος τόσο καλύτερο από πλευράς θορύβου θεωρείται το σύστημα.

# SNR για Ομόδυνη Λήψη με Διαμόρφωση DSB-SC

36



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

- Έστω  $m(t)$  συνάρτηση δείγμα μιας στατικής ανέλιξης με μηδενική μέση τιμή και φασματική πυκνότητα ισχύος  $S_M(f)$ .
- Μέση ισχύς του σήματος πληροφορίας:

$$P = \int_{-W}^W S_M(f) df$$

# SNR για Ομόδυσνη Λήψη με Διαμόρφωση DSB-SC

37

- Η φασματική πυκνότητα ισχύος  $S_S(f)$  της διαμορφωμένης κυματομορφής  $s(t)$ : (απόδειξη;)

$$S_S(f) = \frac{A_c^2}{4} [S_M(f - f_c) + S_M(f + f_c)]$$

- Το εύρος ζώνης μετάδοσης  $B_T$  είναι  $2W$ .
- Η μέση ισχύς του  $s(t)$  είναι  $A_c^2 P/2$ .
- Με φασματική πυκνότητα ισχύος  $N_0/2$ , η μέση ισχύς θορύβου στο εύρος ζώνης πληροφορίας είναι  $WN_0$ .

$$(SNR)_{C,DSB} = \frac{A_c^2 P}{2WN_0}$$

# SNR για Ομόδυνη Λήψη με Διαμόρφωση DSB-SC

38

- Το σήμα στην είσοδο του ομόδυνου φωρατή είναι:

$$\begin{aligned}x(t) &= s(t) + n(t) = \\ &= A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) + n_I(t) \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t)\end{aligned}$$

- Έξοδος διαμορφωτή γινομένου:

$$\begin{aligned}u(t) &= x(t) \cos(2\pi f_c t) = \frac{1}{2} A_c m(t) + \frac{1}{2} n_I(t) \\ &\quad + \frac{1}{2} [A_c m(t) + n_I(t)] \cos(4\pi f_c t) - \frac{1}{2} A_c n_Q(t) \sin(4\pi f_c t)\end{aligned}$$

- Έξοδος βαθυπερατού φίλτρου:

$$y(t) = \frac{1}{2} A_c m(t) + \frac{1}{2} n_I(t)$$

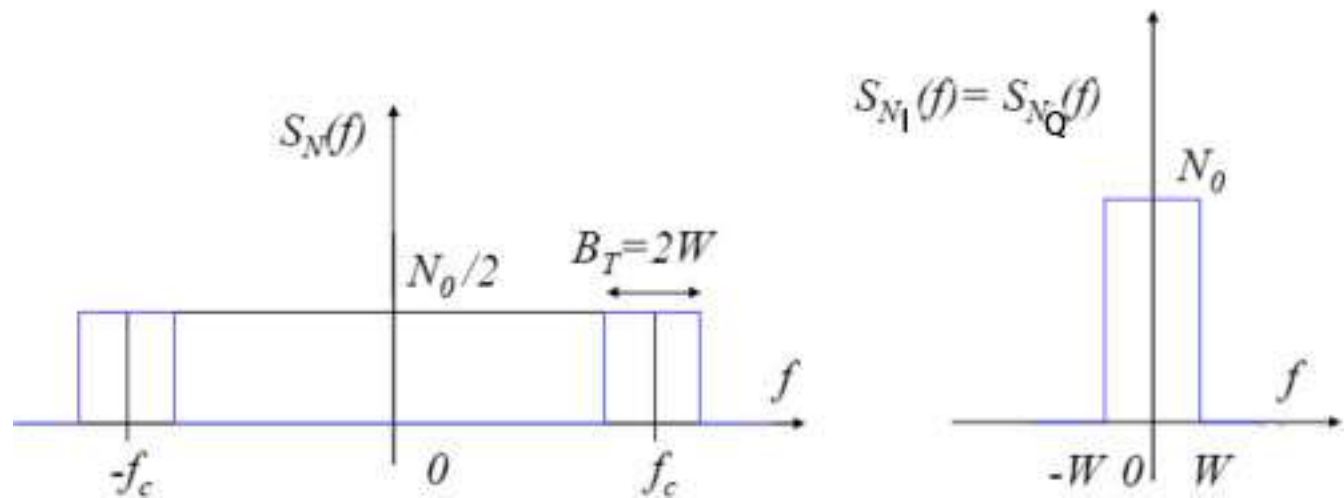
# SNR για Ομόδυνα Λήψη με Διαμόρφωση DSB-SC

$$y(t) = \frac{1}{2} A_c m(t) + \frac{1}{2} n_I(t)$$

39

- Μέση ισχύς του σήματος πληροφορίας στην έξοδο του δέκτη =  $A_c^2 P/4$
- Συνιστώσα θορύβου στην έξοδο του δέκτη =  $n_I(t)/2$
- Η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου στην έξοδο του δέκτη =  $(1/2)^2$  φορές εκείνης του  $n_I(t)$ 
  - λόγω του ότι περνάει από βαθυπερατό φίλτρο και της ιδιότητας ότι η μέση ισχύς της βαθυπερατής συνιστώσας θορύβου  $n_I(t)$  είναι ίδια με αυτή του ζωνοπερατού θορύβου  $n(t)$

Μέση ισχύς του θορύβου στην έξοδο του δέκτη =  $(1/2)^2 2WN_0 = WN_0/2$



# SNR για Ομόδυνα Λήψη με Διαμόρφωση DSB-SC

40

$$(SNR)_{O,DSB} = \frac{A_c^2 P / 4}{WN_0 / 2} = \frac{A_c^2 P}{2WN_0}$$

Δείκτης αξιολόγησης:  $\left. \frac{(SNR)_O}{(SNR)_C} \right|_{DSB} = 1$

- Η ομόδυνα φώραση έχει τη μοναδική ιδιότητα ότι για κάθε λόγο σήματος προς θόρυβο στην είσοδο, η έξοδος είναι αυστηρά ανάλογη προς το αρχικό σήμα πληροφορίας.
- Η συνιστώσα του σήματος πληροφορίας εξόδου είναι ανέπαφη και η συνιστώσα του θορύβου εμφανίζεται πάντα προσθετικά στην πληροφορία ανεξάρτητα από το λόγο σήματος προς θόρυβο στην είσοδο.



# SNR για Ομόδυνη Λήψη με Διαμόρφωση SSB

41

- LSSB:  $s(t) = \frac{A_c}{2} \cos(2\pi f_c t) m(t) + \frac{A_c}{2} \sin(2\pi f_c t) \hat{m}(t)$
- Οι  $m(t)$  και  $\hat{m}(t)$  είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Συνεπώς, με το  $m(t)$  να θεωρείται ότι έχει μηδενική μέση τιμή, προκύπτει ότι οι  $m(t)$  και  $\hat{m}(t)$  είναι ασυσχέτιστες, έτσι ώστε τα φάσματα πυκνότητας ισχύος αυτών να είναι προσθετικά.
- Οι  $m(t)$  και  $\hat{m}(t)$  έχουν την ίδια φασματική πυκνότητα ισχύος.
- Η μέση ισχύς του  $s(t)$  είναι  $A_c^2 P/4$  (μισό από αυτό της DSB-SC)
- Η μέση ισχύς θορύβου στο εύρος ζώνης πληροφορίας  $W$  είναι  $WN_0$ .

$$(SNR)_{C,DSB} = \frac{A_c^2 P}{4WN_0}$$

# SNR για Ομόδυννη Λήψη με Διαμόρφωση SSB

42

- Θόρυβος στο εύρος ζώνης της SSB:

$$n(t) = n_I(t) \cos \left[ 2\pi \left( f_c - \frac{W}{2} \right) t \right] - n_Q(t) \sin \left[ 2\pi \left( f_c - \frac{W}{2} \right) t \right]$$

- Έξοδος ομόδυνου φωρατή:

$$R_N(\tau) = 0 \Rightarrow \tau = \pm \frac{n}{2B} \Rightarrow f_s = 2B$$

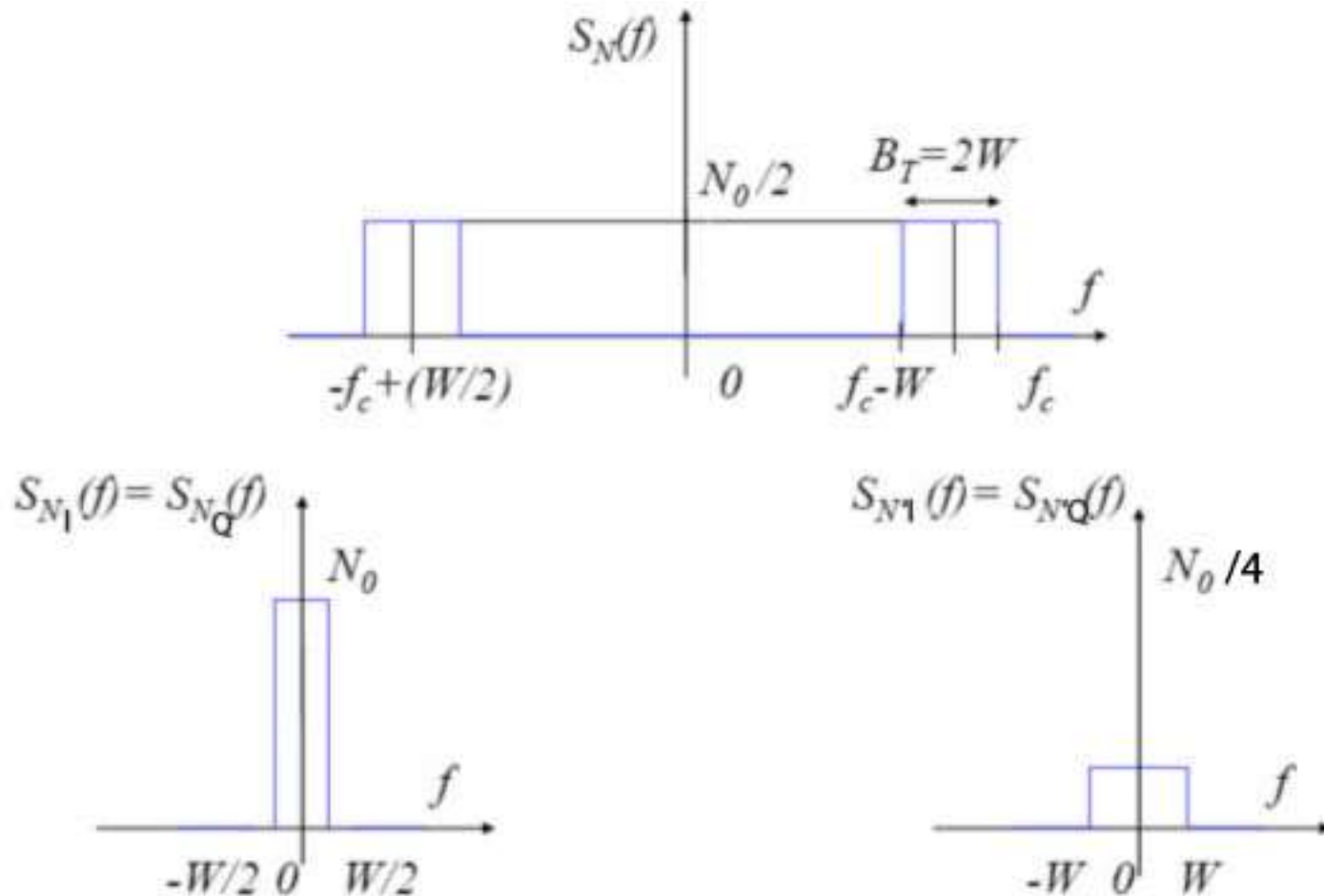
- Μέση ισχύς της ανακτώμενης πληροφορίας:  $A_c^2 P / 16$

- Υπολογισμός της μέση ισχύος του θορύβου εξόδου:

- Το  $\cos(\pi Wt)$  είναι ανεξάρτητο τόσο από την  $n_I(t)$  όσο και από την  $n_Q(t)$ . Η φασματική πυκνότητα ισχύος της  $n'_I(t) = n_I(t) \cos(\pi Wt)$  λαμβάνεται μετατοπίζοντας το  $S_{N_I}(f)$  αριστερά κατά  $W/2$ , μετατοπίζοντας τα  $S_{N_I}(f)$  δεξιά κατά  $W/2$ , προσθέτοντάς τα και διαιρώντας διά 4.

# SNR για Ομόδυσνη Λήψη με Διαμόρφωση SSB

43



# SNR για Ομόδυνη Λήψη με Διαμόρφωση SSB

44

- Μέση ισχύς της ανακτώμενης πληροφορίας:  $A_c^2 P/16$
- Μέση ισχύς του θορύβου εξόδου:  $WN_0/4$

- Δείκτης Αξιολόγησης:  $\frac{(SNR)_o}{(SNR)_c} \Big|_{SSB} = 1$   $(SNR)_{o,SSB} = \frac{A_c^2 P}{4WN_0}$
- Για την ίδια μέση ισχύ μεταδιδόμενου ή διαμορφωμένου σήματος πληροφορίας και την ίδια ισχύ θορύβου στο εύρος ζώνη πληροφορίας, ένας δέκτης SSB θα έχει ακριβώς το ίδιο SNR όπως ένας δέκτης DSBSC όταν και οι δύο δέκτες χρησιμοποιούν **ομόδυνη φώραση** για την ανάκτηση του σήματος πληροφορίας.

# Θόρυβος σε Δέκτες ΑΜ με Φωρατή Περιβάλλουσα

45

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

- Μέση ισχύς του  $s(t)$ :  $A_c^2(1+k_a^2P)/2$
- Μέση ισχύς του θορύβου:  $WN_0$

$$(SNR)_{C,AM} = \frac{A_c^2(1+k_a^2P)}{2WN_0}$$

# Θόρυβος σε Δέκτες ΑΜ με Φωρατή Περιβάλλουσας

46

- Λαμβανόμενο σήμα:

$$x(t) = s(t) + n(t) = \left[ A_c + A_c k_a m(t) + n_I(t) \right] \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- Έξοδος φωρατή περιβάλλουσας:

$$y(t) = \left\{ \left[ A_c + A_c k_a m(t) + n_I(t) \right]^2 + n_Q^2(t) \right\}^{1/2}$$

- Όταν η μέση ισχύς του φέροντος είναι μεγάλη συγκρινόμενη με τη μέση ισχύ θορύβου:

$$y(t) \approx A_c + A_c k_a m(t) + n_I(t)$$

- Η dc συνιστώσα δεν περιέχει πληροφορία και παραλείπεται.

# Θόρυβος σε Δέκτες AM με Φωρατή Περιβάλλουσα

47

$$(SNR)_{O,AM} = \frac{A_c^2 k_a^2 P}{2WN_0}$$

$$\frac{(SNR)_O}{(SNR)_C} \Big|_{AM} = \frac{k_a^2 P}{1 + k_a^2 P} < 1$$

- Η επίδοση ως προς θόρυβο ενός δέκτη AM είναι πάντα κατώτερη από αυτή ενός δέκτη DSB-SC ή SSB.
- Αυτό οφείλεται στην απώλεια της ισχύος μετάδοσης που προκύπτει από τη μετάδοση του φέροντος σε συνιστώσα της AM κυματομορφής.

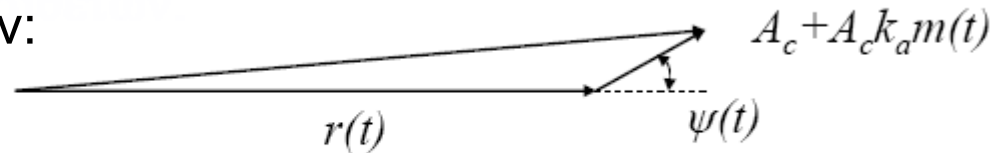
# Θόρυβος σε Δέκτες AM με Φωρατή Περιβάλλουσα

48

- Όταν ο λόγος φέροντος προς θόρυβο είναι μικρός συγκρινόμενος με τη μονάδα:

$$n(t) = r(t) \cos[2\pi f_c t + \psi(t)]$$

- Διάγραμμα φασιθετών:



$$y(t) \approx r(t) + A_c \cos[\psi(t)] + A_c k_a m(t) \cos[\psi(t)]$$

- Η έξοδος του **φωρατή περιβάλλουσα** δεν έχει συνιστώσα αυστηρά ανάλογη προς το σήμα πληροφορίας  $m(t)$ . Και αφού η φάση  $\psi(t)$  του θορύβου στενή ζώνης είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε  $2\pi$  rad, έχουμε πλήρη απώλεια της πληροφορίας.



# Θόρυβος σε Δέκτες ΑΜ με Φωρατή Περιβάλλουσας

49

- Η απώλεια της πληροφορίας σε έναν φωρατή που λειτουργεί σε χαμηλό SNR αναφέρεται ως **φαινόμενο κατωφλίου (threshold effect)**.
- Με τον όρο κατώφλι εννοούμε την τιμή του λόγου φέροντος προς θόρυβο κάτω από την οποία η επίδοση ως προς θόρυβο ενός φωρατή χειροτερεύει πιο απότομα από ό,τι αναλογικά προς το λόγο φέροντος προς θόρυβο.
- Κάθε μη γραμμικός φωρατής (π.χ. φωρατής περιβάλλουσας) εμφανίζει φαινόμενο κατωφλίου.
  - Ο ομόδυνος φωρατής δεν εμφανίζει τέτοιο φαινόμενο.

# Δέκτες FM

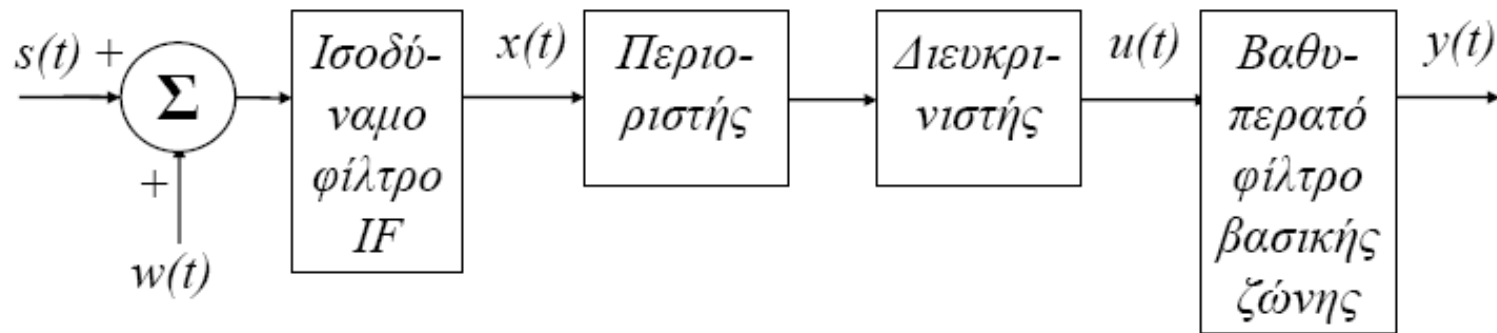
50

- Όπως οι ραδιοφωνικοί δέκτες AM, οι περισσότεροι δέκτες FM είναι επίσης **υπερετερόδυνου τύπου**.
- Τυπικές παράμετροι:
  - ▣ Περιοχή συχνότητας φέροντος RF = 88 - 108MHz
  - ▣ Μεσαία συχνότητα τμήματος IF = 10.7MHz
  - ▣ Εύρος ζώνης IF = 0.2MHz
- Ο **περιοριστής πλάτους (amplitude limiter)** που ακολουθεί το τμήμα IF, χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει τις μεταβολές πλάτους ψαλιδίζοντας τη διαμορφωμένη κυματομορφή στην έξοδο του IF τμήματος.
- Ο **διευκρινιστής (discriminator)** αποτελείται από δύο στοιχεία:
  - ▣ Ένα κύκλωμα κλίσης ή διαφοριστή με μία καθαρά φανταστική συνάρτηση μεταφοράς που μεταβάλλεται με τη συχνότητα
  - ▣ Ένα φωρατή περιβάλλουσας που ανακτά τη μεταβολή του πλάτους και αναπαράγει το σήμα,

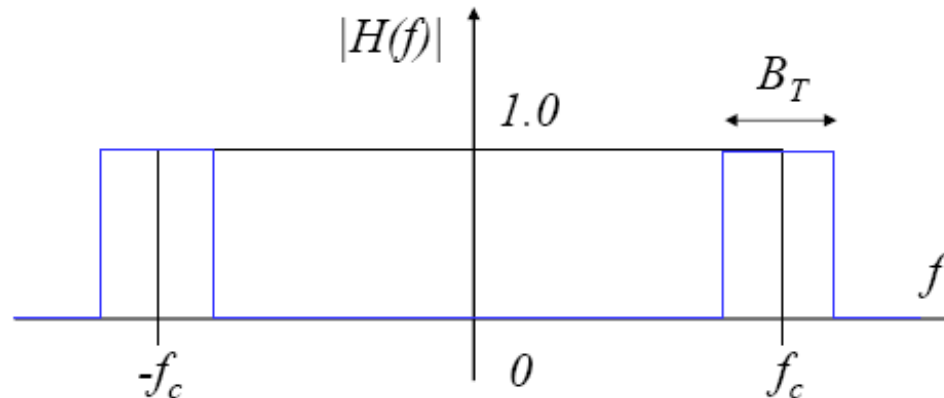
# Δέκτες FM

51

- Μοντέλο δέκτη FM:



- Ιδανική χαρακτηριστική ισοδύναμου φίλτρου IF



# Θόρυβος στη Λήψη FM

52

- Θόρυβος στενής ζώνης  $n(t)$  στην έξοδο του IF φίλτρου:

$$n(t) = n_I(t) \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- ή συναρτήσει της περιβάλλουσας και της φάσης του:

$$n(t) = r(t) \cos[2\pi f_c t + \psi(t)]$$

$$r(t) = [n_I^2(t) + n_Q^2(t)]^{1/2} \quad \psi(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{n_Q(t)}{n_I(t)} \right]$$

- Η περιβάλλουσα  $r(t)$  έχει κατανομή Rayleigh και η φάση  $\psi(t)$  είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε  $2\pi$  rad.

# Θόρυβος στη Λήψη FM

53

- Σήμα FM  $s(t)$  στην έξοδο του IF φίλτρου:

$$s(t) = A_c \cos \left[ 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right]$$

$$s(t) = A_c \cos [2\pi f_c t + \phi(t)] \quad \phi(t) = 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau$$

- Ολικό σήμα στην έξοδο του IF φίλτρου:

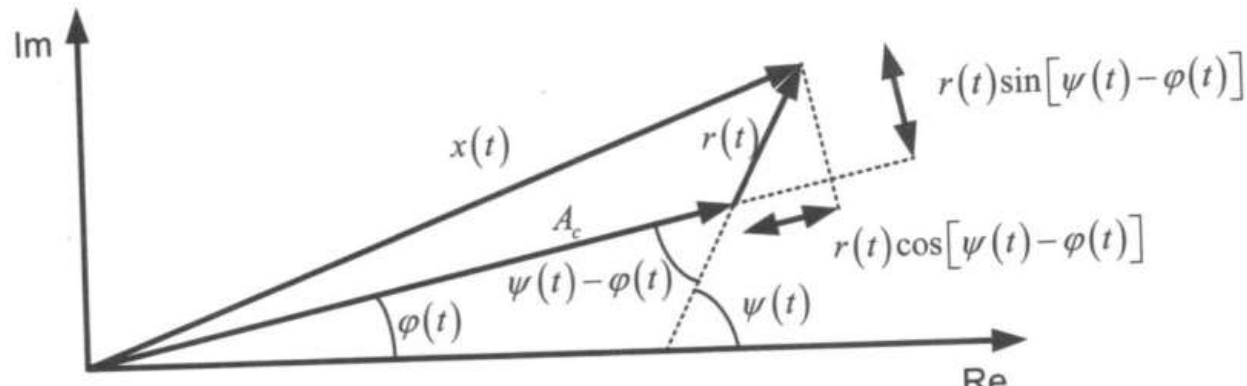
$$x(t) = s(t) + n(t) =$$

$$= A_c \cos [2\pi f_c t + \phi(t)] + r(t) \cos [2\pi f_c t + \psi(t)]$$

# Θόρυβος στη Λήψη FM

54

- Διάγραμμα φασιθετών:



$$\theta(t) = \phi(t) + \tan^{-1} \left\{ \frac{r(t)\sin[\psi(t) - \phi(t)]}{A_c + r(t)\cos[\psi(t) - \phi(t)]} \right\}$$

- Η περιβάλλουσα δε μας ενδιαφέρει γιατί περνάει μέσα από τον περιοριστή.
- Σκοπός μας είναι ο προσδιορισμός του σφάλματος στη στιγμιαία συχνότητα του φέροντος που προκαλείται από το θόρυβο.

# Θόρυβος στη Λήψη FM

55

- Θεωρώντας το διευκρινιστή ιδανικό (διαφοριστής+φωρατής περιβάλλουσας), η έξοδος του είναι ανάλογη προς το  $\theta'(t)/2\pi$ .
- Θεωρούμε ότι ο λόγος φέροντος προς θόρυβο στην έξοδο του διευκρινιστή είναι μεγάλος, τότε:

$$\theta(t) \approx \phi(t) + \frac{r(t)}{A_c} \sin[\psi(t) - \phi(t)]$$

- Η έξοδος του διευκρινιστή είναι συνεπώς:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \approx k_f m(t) + n_d(t)$$

- όπου: 
$$n_d(t) = \frac{1}{2\pi A_c} \frac{d}{dt} \{ r(t) \sin[\psi(t) - \phi(t)] \}$$

Προσθετικός  
θόρυβος

# Θόρυβος στη Λήψη FM

56

- Με την  $\psi(t)$  ομοιόμορφα κατανεμημένη πάνω στο διάστημα  $2\pi$  και με υψηλό λόγο φέροντος προς θόρυβο:

$$n_d(t) = \frac{1}{2\pi A_c} \frac{d}{dt} \{r(t) \sin[\psi(t)]\}$$

- Αλλά:  $n_Q(t) = r(t) \sin[\psi(t)]$

- Επομένως:  $n_d(t) = \frac{1}{2\pi A_c} \frac{dn_Q(t)}{dt}$

- Ο προσθετικός θόρυβος  $n_d(t)$  που εμφανίζεται στην έξοδο του διευκρινιστή καθορίζεται ουσιαστικά από το πλάτος φέροντος  $A_c$  και την ορθογωνική συνιστώσα  $n_Q(t)$  του θορύβου στενής ζώνης  $n(t)$ .



# Θόρυβος στη Λήψη FM

57

- Υπολογισμός του λόγου σήματος προς θόρυβο στην έξοδο:
  - ▣ Έξοδος πληροφορίας από το βαθυπερατό φίλτρο =  $k_f m(t)$
  - ▣ και μέση ισχύς σήματος εξόδου =  $k_f^2 P$ , όπου  $P$  η μέση ισχύς του σήματος πληροφορίας.
- Υπολογισμός της φασματικής πυκνότητας ισχύος θορύβου  $n_d(t)$ :

$$S_{N_d}(f) = \frac{f^2}{A_c^2} S_{N_o}(f) = \begin{cases} \frac{N_o f^2}{A_c^2}, & -B_T / 2 \leq f \leq B_T / 2 \\ 0, & \text{αλλου} \end{cases}$$

$$\left( \frac{d}{dt} \xrightarrow{\text{Fourier}} j2\pi f \right)$$

$$H(f) = \frac{j2\pi f}{2\pi A_c} = \frac{jf}{A_c}$$

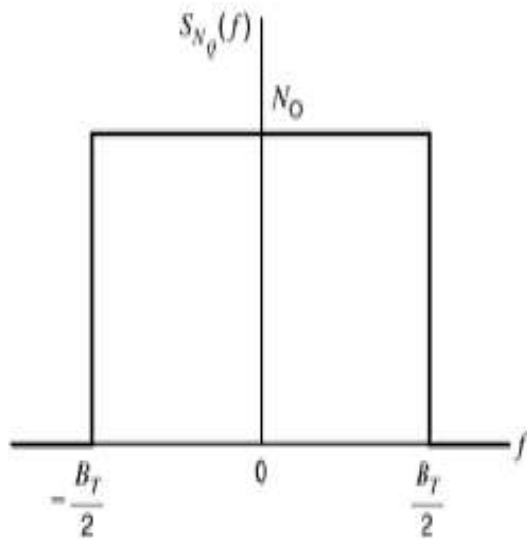
$$S_{N_d}(f) = |H(f)|^2 S_{N_o}(f)$$

# Θόρυβος στη Λήψη FM

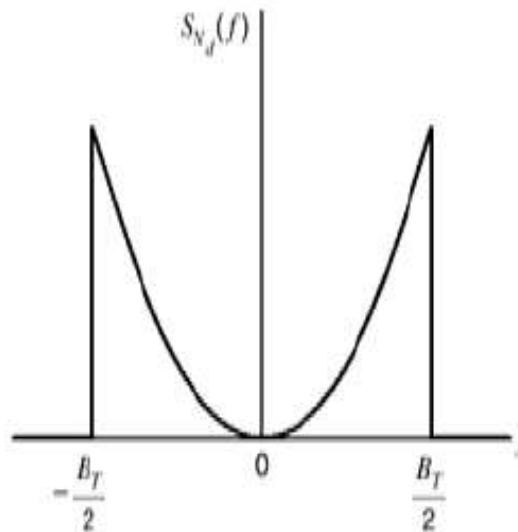
58

- Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του θορύβου στην έξοδο:

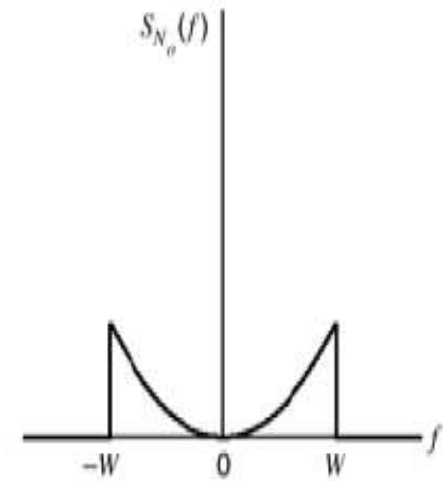
$$S_{N_o}(f) = \begin{cases} \frac{N_o f^2}{A_c^2}, & |f| \leq W \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$



(a)



(b)



(c)

Τηλεπικοινωνίες

ΦΠΙ Ορθογ. Συνιστώσας

ΦΠΙ στην έξοδο διευκρ.

ΦΠΙ στην έξοδο δέκτη

# Θόρυβος στη Λήψη FM

59

- Όπου  $B_T$  το εύρος ζώνης μετάδοσης του FM σήματος (και του IF φίλτρου), και  $W$  το εύρος ζώνης της πληροφορίας (και του βαθυπερατού φίλτρου).
- Για FM ευρείας ζώνης:  $B_T/2 > W$ .
- Μέση ισχύς θορύβου στην έξοδο:

$$\frac{N_0}{A_c^2} \int_{-W}^W f^2 df = \frac{2N_0 W^3}{3A_c^2}$$

- Η μέση ισχύς θορύβου στην έξοδο είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τη μέση ισχύ του φέροντος  $A_c^2/2$ .
- Συνεπώς η αύξηση της ισχύος του φέροντος έχει μια **επίδραση καταστολής θορύβου (noise quieting effect)**.

# Θόρυβος στη Λήψη FM

60

□ SNR στην έξοδο:  $(SNR)_{O,FM} = \frac{3A_c^2 k_f^2 P}{2N_0 W^3}$

- Η μέση ισχύς του  $s(t)$  είναι  $A_c^2/2$ , ενώ η μέση ισχύς θορύβου στο εύρος ζώνης του μηνύματος είναι  $WN_0$ .

Άρα:

$$(SNR)_{C,FM} = \frac{A_c^2}{2WN_0}$$

- Δείκτης αξιολόγησης:

$$\left. \frac{(SNR)_O}{(SNR)_C} \right|_{FM} = \frac{3k_f^2 P}{W^2} = \frac{3\beta^2 P}{\left( \max [|m(t)|] \right)^2}$$

$$\left. \frac{(SNR)_O}{(SNR)_C} \right|_{FM} = \frac{3}{2} \beta^2 \quad \text{Μόνο για ημιτονοειδές σήμα πληροφορίας}$$

# Φαινόμενο κατωφλίου στα Συστήματα FM

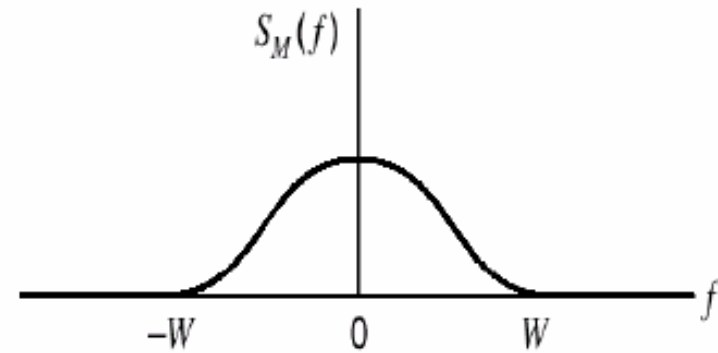
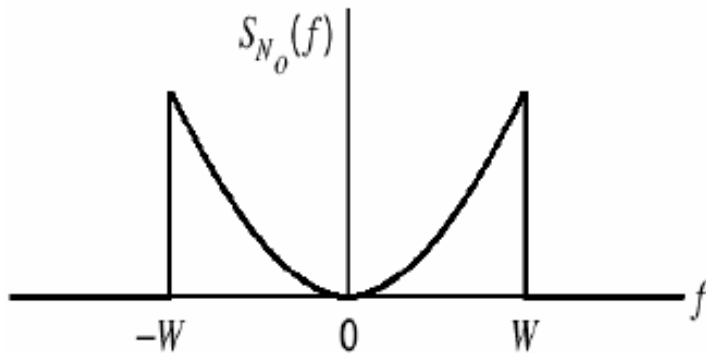
61

- Οι αποδιαμορφωτές FM εμφανίζουν μία τιμή κατωφλίου για το σηματοθορυβικό λόγο εισόδου ( $SNR_{C,th}$ ) κάτω από την οποία η βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου εξόδου ( $SNR_o$ ) υποβαθμίζεται.
- Η υποβάθμιση εμφανίζεται ως 'χιόνια' στην αναλογική τηλεόραση και ως 'κλικ' στο αναλογικό ραδιόφωνο.
- Το φαινόμενο κατωφλίου θέτει ένα άνω όριο στην ανταλλαγή που κάνουμε μεταξύ εύρους ζώνης και εκπεμπόμενης ισχύος.
- **Πρακτικός Κανόνας:** Για την αποφυγή του φαινομένου κατωφλίου στις διαμορφώσεις FM πρέπει να ισχύει:

$$SNR_{C,th} = 20(\beta + 1)$$

# Προέμφαση και Αποέμφαση στα Συστήματα FM

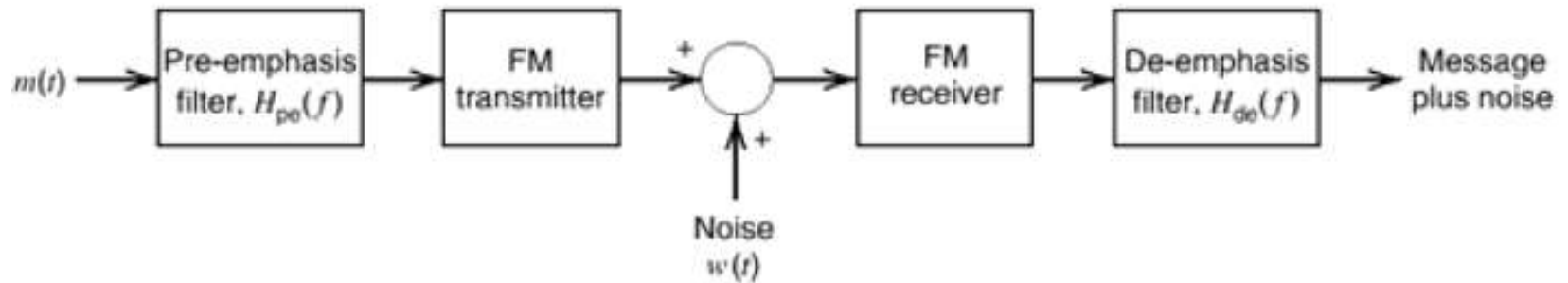
62



- Με τη μέθοδο της **προέμφασης (pro-emphasis)** στον πομπό και **αποέμφασης (de-emphasis)** στο δέκτη τονίζουμε τεχνητά τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας του σήματος πληροφορίας πριν από τη διαμόρφωση στον πομπό και στην έξοδο του διευκρινιστή στο δέκτη εκτελούμε την αντίστροφη λειτουργία αποέμφασης των συνιστωσών υψηλής συχνότητας.

# Προέμφαση και Αποέμφαση στα Συστήματα FM

63



- Με τη διαδικασία αυτή οι συνιστώσες υψηλής συχνότητας του θορύβου στην έξοδο του διευκρινιστή μειώνονται. 
$$H_{de}(f) = \frac{1}{H_{pe}(f)}, \quad -W \leq f \leq W$$
- Η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου στην έξοδο του φίλτρου αποέμφασης είναι:  $|H_{de}(f)|^2 S_{Nd}(f)$ .
- Μέση ισχύς θορύβου στην έξοδο: 
$$\frac{N_0}{A_C^2} \int_{-W}^W f^2 |H_{de}(f)|^2 df$$

# Προέμφαση και Αποέμφαση στα Συστήματα FM

64

- Βελτίωση SNR εξόδου:

$$D = \frac{\text{μέση ισχύς θορύβου στην έξοδο χωρίς προέμφαση-αποέμφαση}}{\text{μέση ισχύς του θορύβου στην έξοδο με προέμφαση-αποέμφαση}}$$

$$D = \frac{\frac{2N_0W^3}{3A_C^2}}{\frac{N_0}{A_C^2} \int_{-W}^W f^2 |H_{de}(f)|^2 df} = \frac{2W^3}{3 \int_{-W}^W f^2 |H_{de}(f)|^2 df}$$



# Συμπεράσματα

65

- Σύγκριση για την περίπτωση διαμόρφωσης απλής ημιτονικής κυματομορφής και με τον ίδιο ακριβώς  $SNR_C$ :
  - ▣ Ανάμεσα στην οικογένεια AM, η διαμόρφωση SSB είναι η βέλτιστη όσο αφορά την επίδοση ως προς θόρυβο όπως επίσης και την εξοικονόμηση εύρους ζώνης.
  - ▣ Επιτυγχάνεται βελτίωση στην επίδοση ως προς θόρυβο χρησιμοποιώντας FM ευρείας ζώνης, με τίμημα το παραπάνω εύρος ζώνης μετάδοσης.

# Συμπεράσματα

66

Σύγκριση της επίδοσης ως προς θόρυβο διάφορων συστημάτων διαμόρφωσης CW.

Curve I: Full AM,  $\mu = 1$ .

Curve II: DSB-SC, SSB.

Curve III: FM,  $\beta = 2$ .

Curve IV: FM,  $\beta = 5$ .

(Curves III and IV include 13-dB preemphasis, de-emphasis improvement.)

