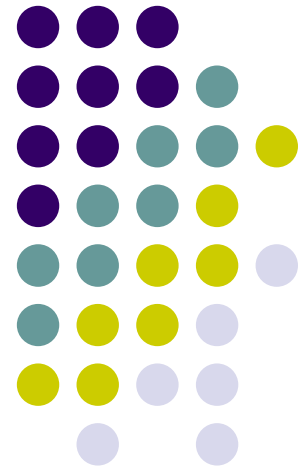
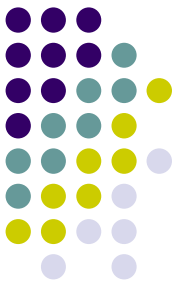


# Θόρυβος στη διαμόρφωση CW

---





# 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

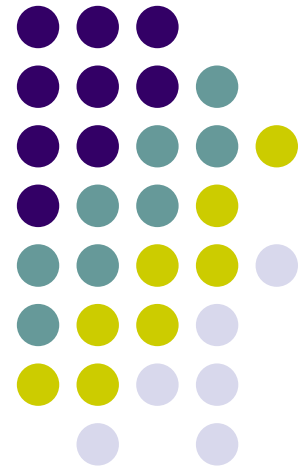
$$n(t) = n_c(t) \cos(2\pi f_c t) - n_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- όπου

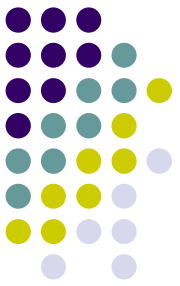
$$\overline{n_c^2} = \overline{n_s^2} = \overline{n^2} = N_R = N_0 B_T$$

# 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

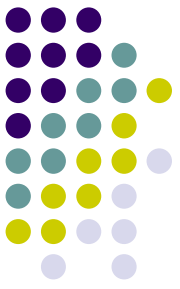
$$r(t) = [A_c m(t) + n_c(t)] \cos(2\pi f_c t) - n_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- 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

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

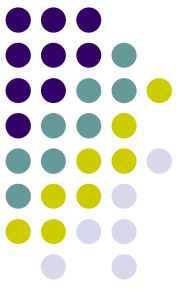
- Η ισχύς του θορύβου στην είσοδο είναι

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

- Η σηματοθορυβική σχέση στην είσοδο είναι

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

- όπου  $S_m$  η ισχύς του σήματος  $m(t)$



# SNR στην έξοδο του δέκτη

- Η ισχύς του σήματος στην έξοδο είναι

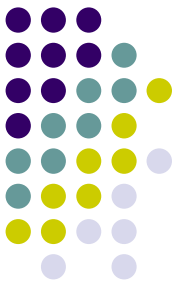
$$S_D = A_c^2 \overline{m^2} / 4 = A_c^2 S_m / 4$$

- 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

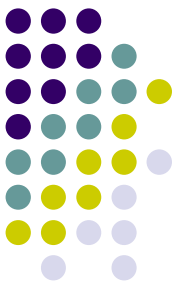
- Ο λόγος των σηματοθορυβικών σχέσεων εισόδου εξόδου στην DSB είναι

$$SNR_o = 2SNR_c$$

- και σε σύγκριση με το σύστημα βασικής ζώνης

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

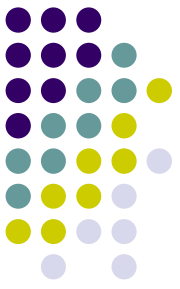
- Επομένως, η DSB δεν παρουσιάζει κάποια βελτίωση της σηματοθορυβικής σχέσης συγκρινόμενη με την μετάδοση στη βασική ζώνη



# 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

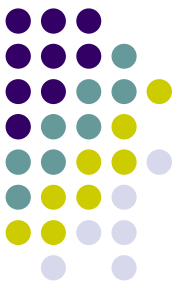
$$S_R = \overline{s^2} = A_c^2 S_m / 8 + A_c^2 S_{\hat{m}} / 8 = A_c^2 S_m / 4$$

- 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

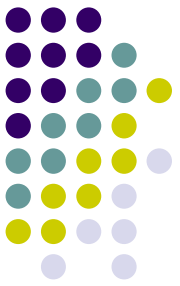
$$S_D = A_c^2 \overline{m^2} / 16 = A_c^2 S_m / 16$$

- 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

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



# Επίδοση SSB σε θόρυβο

- Ο λόγος των σηματοθορυβικών σχέσεων εισόδου εξόδου στην SSB είναι

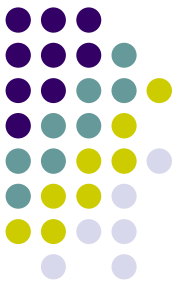
$$SNR_o = SNR_c$$

- 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

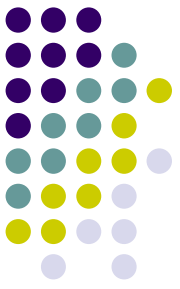
$$r(t) = \{A_c [1 + \mu m(t)] + n_c(t)\} \cos(2\pi f_c t) - n_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- 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 βαθυπερατό

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



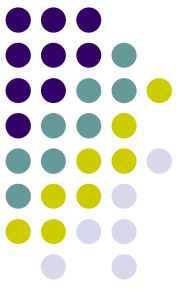
# SNR στην είσοδο του δέκτη

- 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

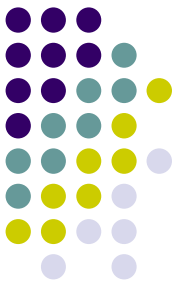
$$S_D = A_c^2 \mu^2 \overline{m^2} / 4 = \mu^2 A_c^2 S_m / 4$$

- 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

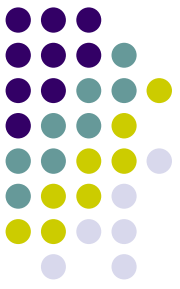
- Ο λόγος των σηματοθορυβικών σχέσεων εισόδου εξόδου στην AM είναι

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

- 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

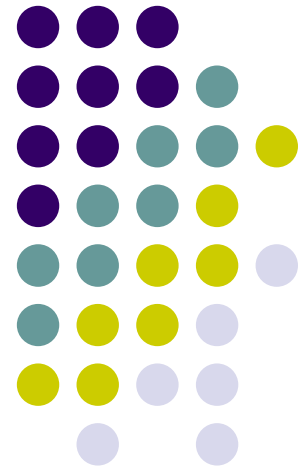
$$S_m \approx 0,1$$

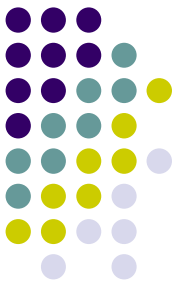
- που οδηγεί σε 10 db υποβάθμιση σε σχέση με την DSB



# 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

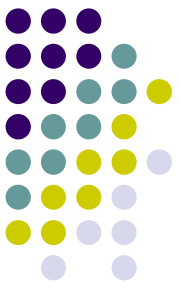
$$r(t) = \{A_c [1 + \mu m(t)] + n_c(t)\} \cos(2\pi f_c t) - n_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

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

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

- όπου η περιβάλλουσα είναι

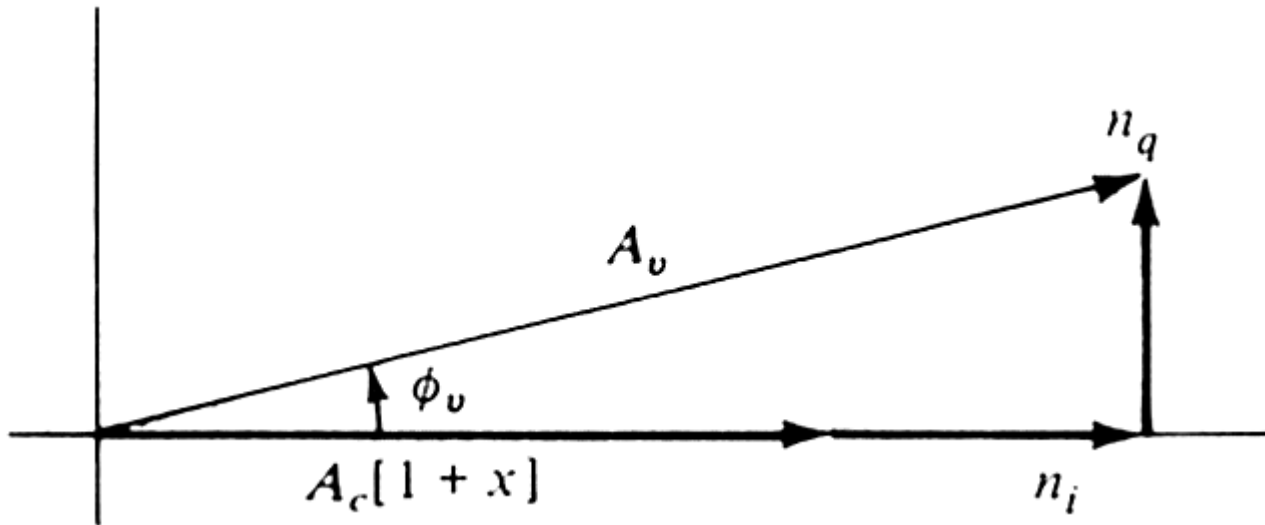
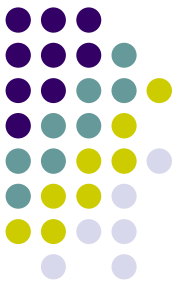
$$A_r(t) = \sqrt{\{A_c [1 + \mu m(t)] + n_c(t)\}^2 + \{n_s(t)\}^2}$$

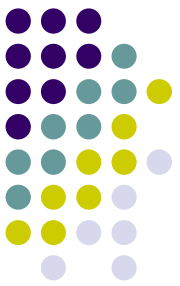


# Ανάλυση ασθενούς θορύβου

- Εάν το σήμα είναι ισχυρότερο του θορύβου  
 $A_c^2 \gg n^2$
- 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

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

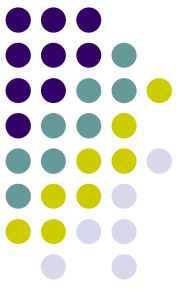
$$A_r(t) \approx A_n(t) + A_c [1 + \mu m(t)] \cos \phi_n(t)$$

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



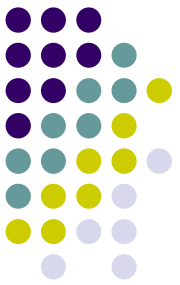
# Φαινόμενο κατώφλιου AM

- 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

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

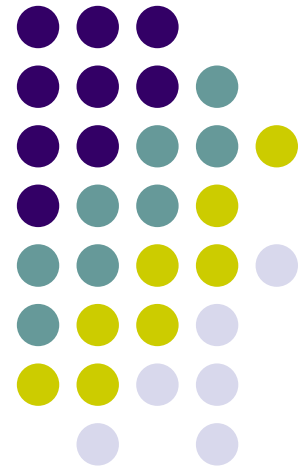


# Φαινόμενο κατωφλίου AM

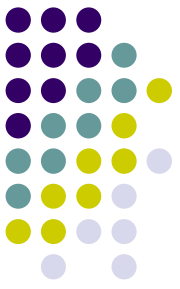
- Δηλαδή, είμαστε πάνω από το κατώφλι εάν
$$SNR_{c,th} = 4 \ln 10 \approx 10$$
$$SNR_{b,th} = 8 \ln 10 \approx 20$$
- Στην εμπορική ραδιοφωνία η σηματοθρομβική σχέση πρέπει να είναι 30 db ή περισσότερο για ικανοποιητική ακρόαση, οπότε το φαινόμενο κατωφλίου δεν αποτελεί σημαντικό περιορισμό

# 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

$$S_R = A_c^2 / 2$$

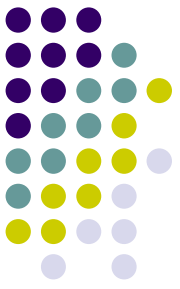
- Η ισχύς του θορύβου στην είσοδο του δέκτη είναι

$$N_R = N_0 B_T$$

- 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

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

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

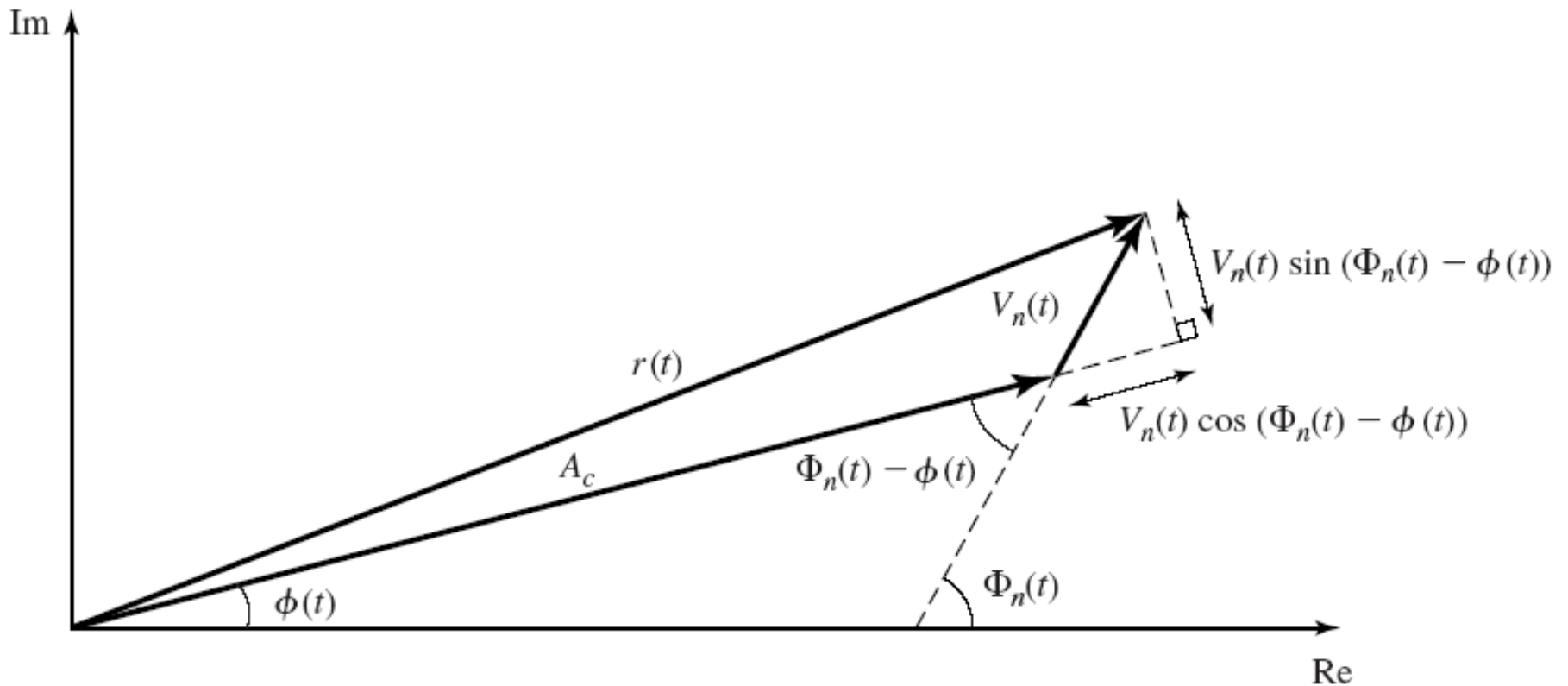
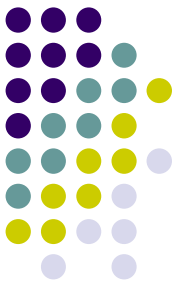
$$= A_r(t) \cos[2\pi f_c t + \phi_r(t)]$$

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

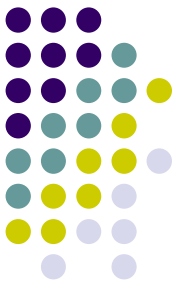
$$\phi_r(t) = \phi(t) + \arctan \frac{A_n(t) \sin[\phi_n(t) - \phi(t)]}{A_c + A_n(t) \cos[\phi_n(t) - \phi(t)]}$$

- 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

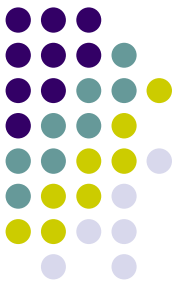
$$\phi_r(t) \approx \phi(t) + \frac{A_n(t) \sin[\phi_n(t) - \phi(t)]}{A_c}$$

- 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

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

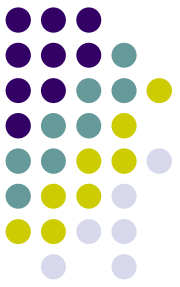
# Θόρυβος στην έξοδο του αποδιαμορφωτή



- 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

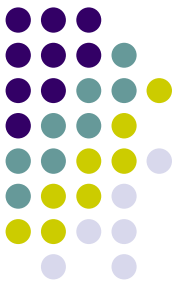


- Το φάσμα του θορύβου εκτείνεται σε εύρος ζώνης  $B_T/2$

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

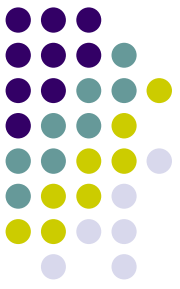
- Στην περίπτωση FM το φάσμα έχει παραβολική μορφή
  - Ο θόρυβος είναι υψηλότερος στις μεγάλες συχνότητες

# Σήμα και θόρυβος στην έξοδο του δέκτη

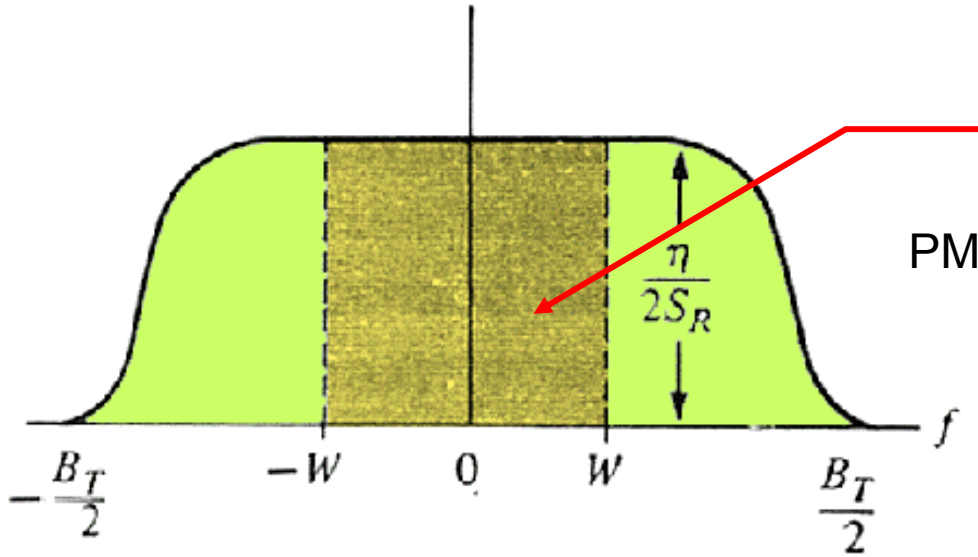


- Στην έξοδο του δέκτη, μετά το φίλτρο μετ' ανίχνευσης, ο θόρυβος περιορίζεται στο εύρος ζώνης  $W$  του σήματος πληροφορίας
  - Πλην της περίπτωσης διαμόρφωσης στενής ζώνης η διαφορά αυτή είναι σημαντική για την σηματοθορυβική επίδοση του δέκτη

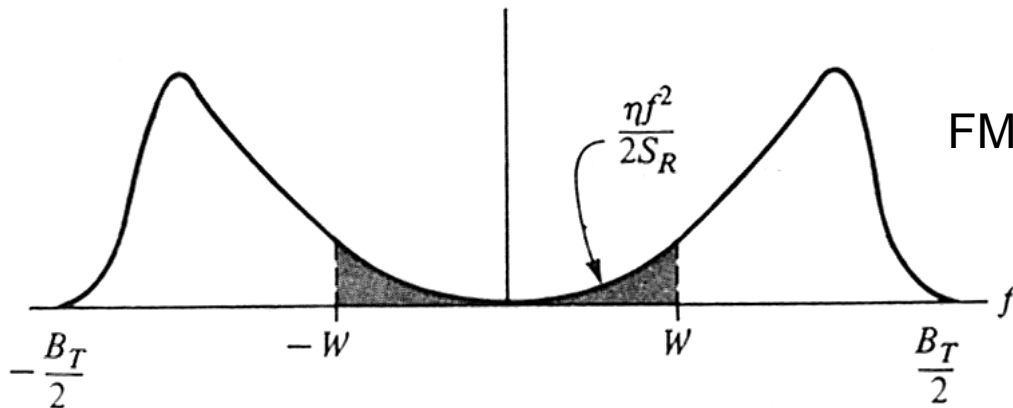
$$S_n(f) = \begin{cases} \frac{N_o}{A_c^2} & \text{PM} \\ \frac{N_o}{A_c^2} f^2 & \text{FM} \end{cases} \quad |f| \leq W$$



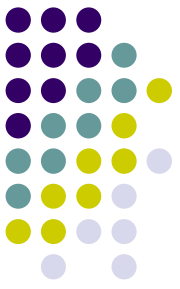
# Θόρυβος στην έξοδο του δέκτη



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







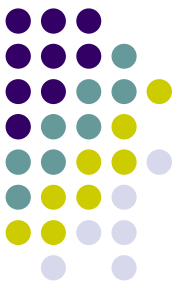
# SNR στην έξοδο του δέκτη

- 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

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



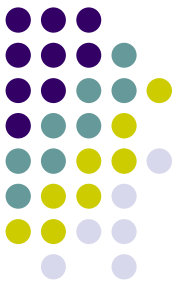
# SNR στην έξοδο του δέκτη

- 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

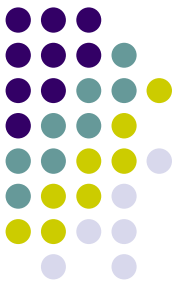
$$SNR_o = \begin{cases} \Delta\phi^2 S_m SNR_b & \text{PM} \\ 3D^2 S_m SNR_b & \text{FM} \end{cases}$$



# SNR στην έξοδο του δέκτη

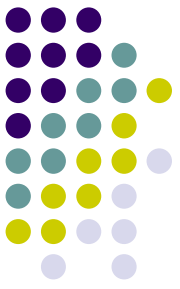
- Ο λόγος σηματοθορυβικών σχέσεων εισόδου εξόδου είναι

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



# Καταστολή θορύβου

- Στη διαμόρφωση γωνίας η σηματοθορυβική σχέση εξόδου είναι ανάλογη του τετραγώνου του δείκτη διαμόρφωσης ( $\Delta\varphi$  ή  $\Delta f$ )
  - $SNR_o$  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  $\pi$



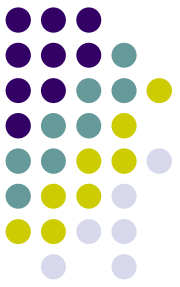
# Καταστολή θορύβου

- Η σηματοθορυβική σχέση εξόδου είναι καλύτερη από την DSB εάν

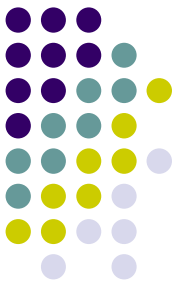
$$\begin{cases} \Delta\phi^2 S_m > 1 & \text{PM} \\ 3D^2 S_m > 1 & \text{FM} \end{cases}$$

- 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)

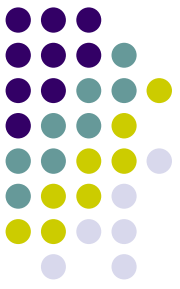


# Φαινόμενο κατωφλίου

- 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

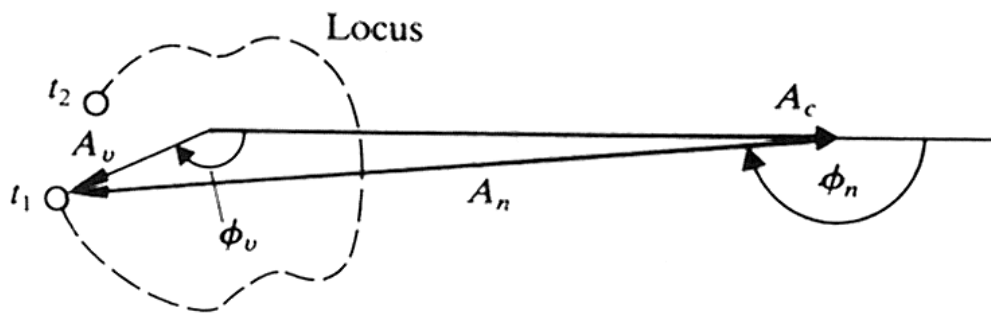
- Όμως το πρόβλημα εμφανίζεται πολύ πριν γίνει ο θόρυβος τόσο ισχυρός, όταν

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

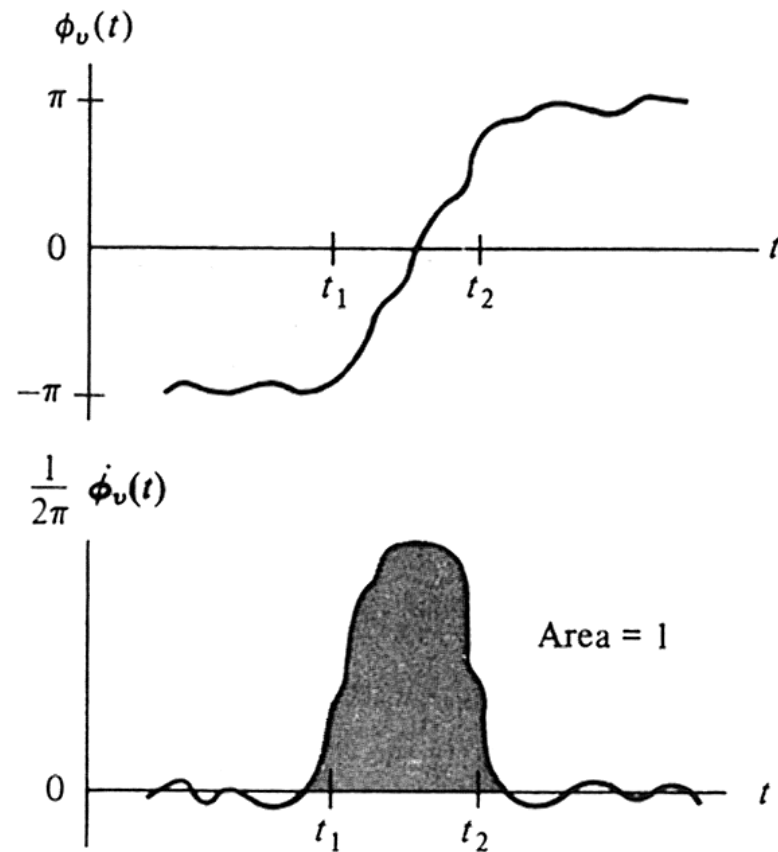
- Τότε μικρές αλλαγές στο θόρυβο εμφανίζονται ως εκρήξεις (κλικ) στην έξοδο
- Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν η συνισταμένη θορύβου και σήματος διαγράφει ένα κύκλο γύρω από την αρχή, δηλαδή, η φάση αλλάζει κατά  $2\pi$ 
  - Τότε η παράγωγος της φάσης θα δώσει παλμούς που ακούγονται σαν κλικ στην έξοδο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



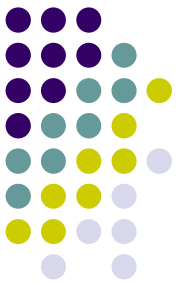
# Φαινόμενο κατωφλίου



(a)



(b)



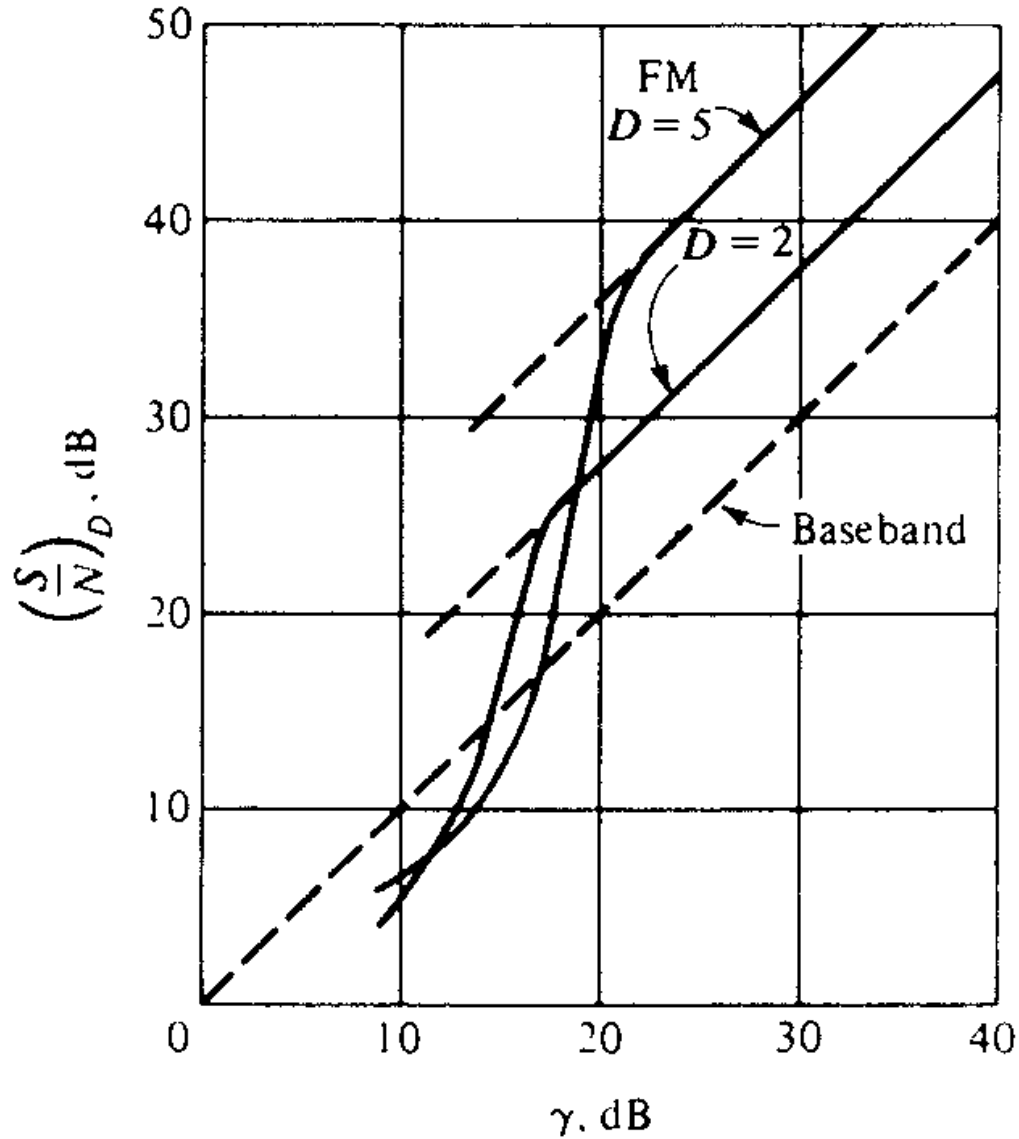
# Ανάλυση του Rice

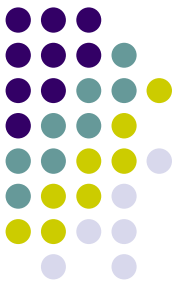
- Ο Rice μελέτησε το φαινόμενο για FM διαμορφωμένο με από τόνο
- Τότε

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

- όπου ο δεύτερος όρος περιλαμβάνει την επίδραση των κλικ

# Ανάλυση του Rice

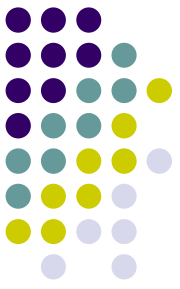




# Το κατώφλι

- 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

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

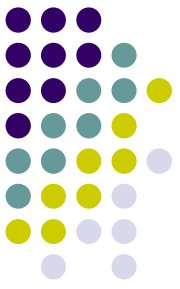
- Το κατώφλι αντιστοιχεί

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

- για την οποία προκύπτει

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

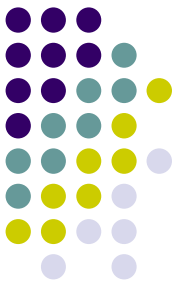
# Σηματοθορυβική σχέση στο κατώφλι



- Η ελάχιστη σηματοθορυβική σχέση για δοθέντα λόγο απόκλισης είναι

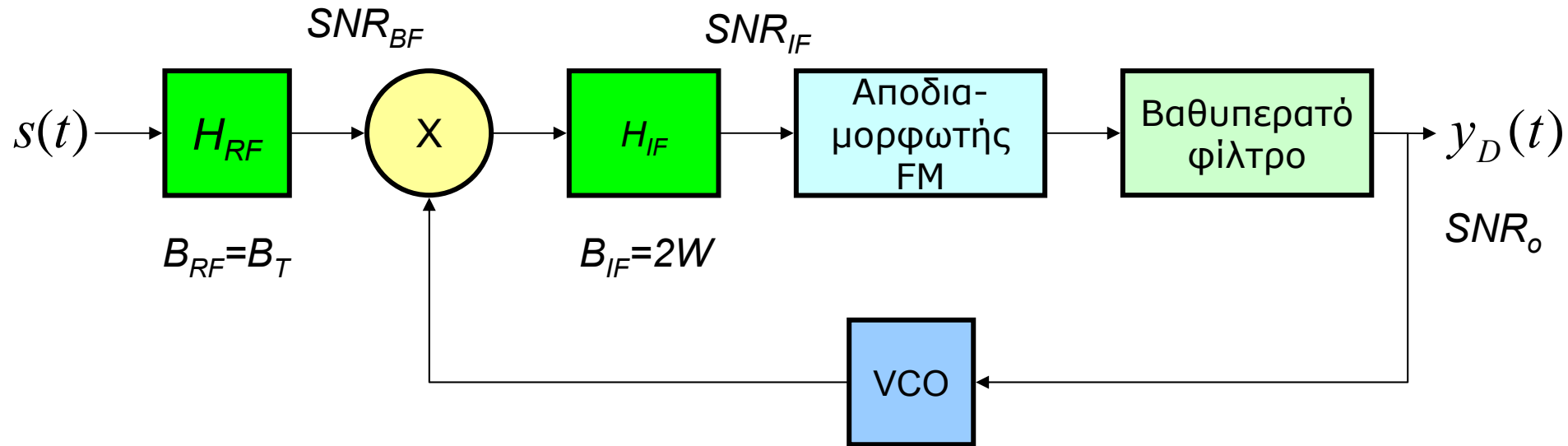
$$SNR_{o,th} = 60D^2(D + 2)S_m, \quad D > 2$$

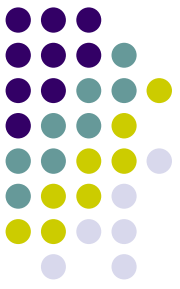
- Ισοδύναμα, για δοθείσα επιθυμητή τιμή σηματοθορυβικής σχέσης και χωρίς περιορισμούς εύρους ζώνης βρίσκουμε τον μέγιστο λόγο απόκλισης λύνοντας ως προς  $D$ 
  - Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο πλέον αποδοτικό σύστημα FM, δηλαδή, αυτό που απαιτεί την ελάχιστη ισχύ και λειτουργεί πάνω από το κατώφλι



# Μείωση κατωφλίου

- Δέκτης FMFB (FM feedback)

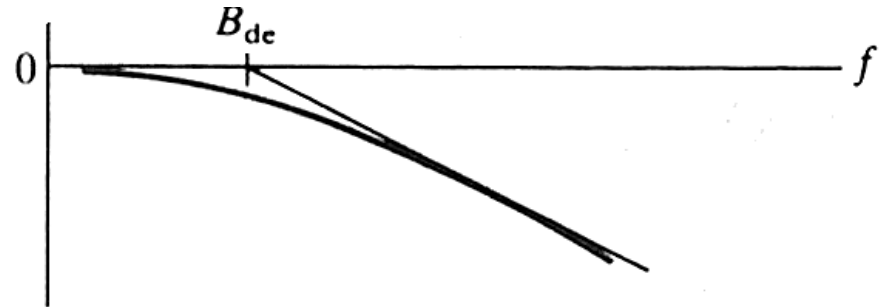
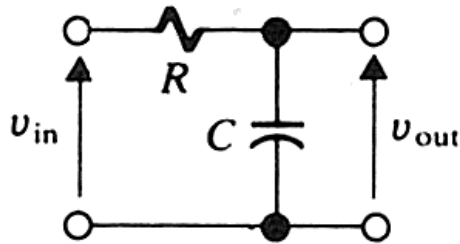




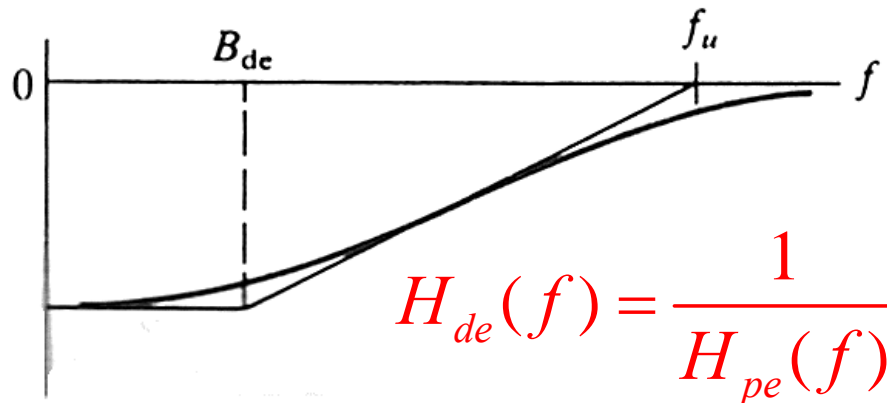
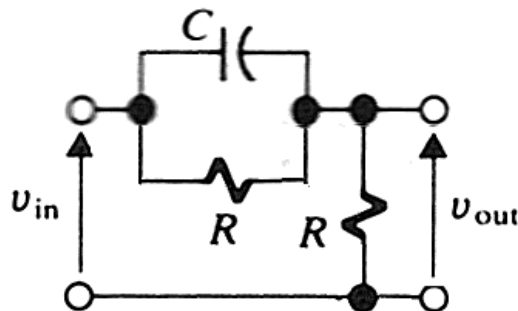
# Προέμφαση-Αποέμφαση

- 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**)

$$H_{de}(f)$$

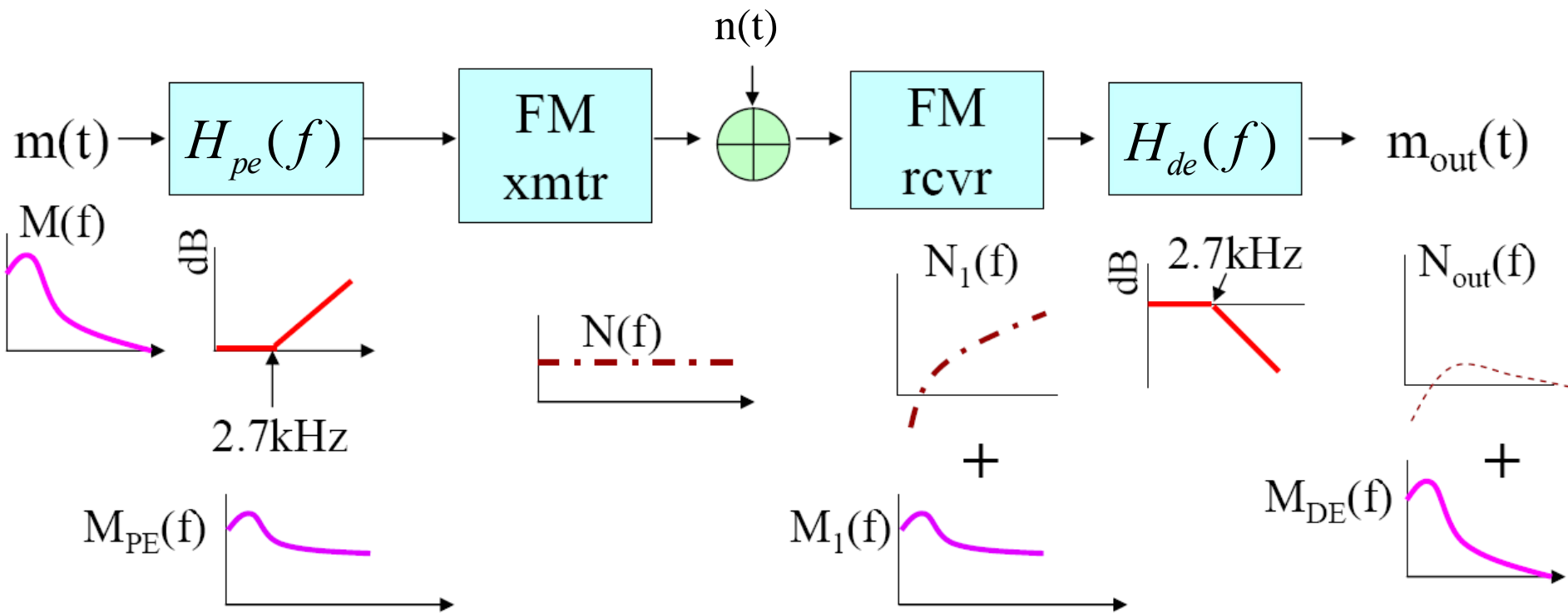
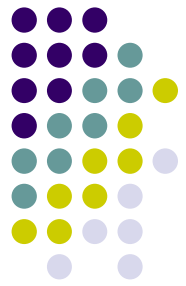


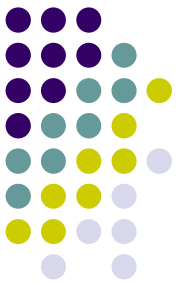
$$H_{pe}(f)$$





# Πρόέμφαση-Αποέμφαση

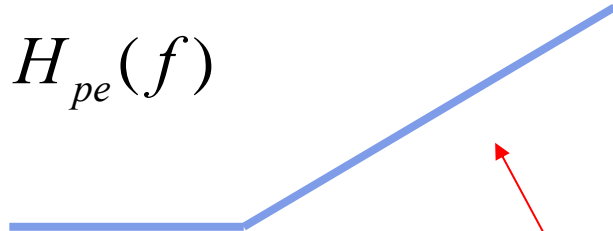




# Τι είδους διαμόρφωση?

- Το φίλτρο προέμφασης παραγωγίζει τις υψηλές συχνότητες του σήματος

$$H_{pe}(f)$$

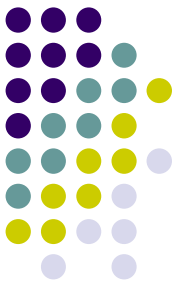


Μοιάζει με  
διαφοριστή

→ Διαμόρφωση PM!

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

# Φίλτρο προέμφασης, αποέμφασης



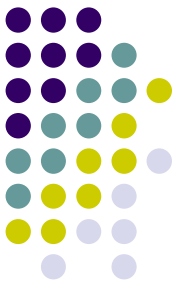
- Το φίλτρο αποέμφασης στον δέκτη είναι

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

- 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

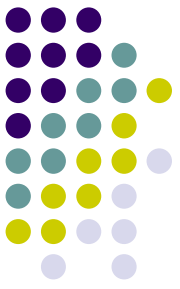


- Με το φίλτρο αποέμφασης η ισχύς θορύβου στην έξοδο είναι

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

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

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



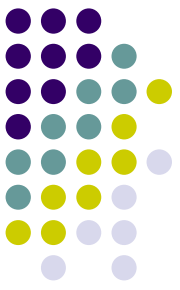
# Κέρδος Αποέμφασης

- 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

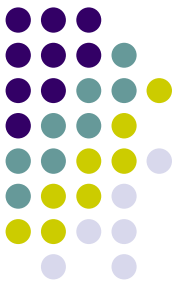
$$\frac{1}{3} \left( \frac{W}{B_{de}} \right)^2$$



# Παράδειγμα

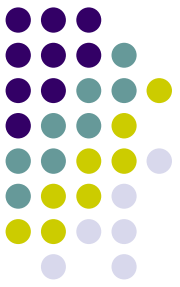
- Στη ραδιοφωνία FM,  $\Delta f = 75$  kHz,  $W = 15$  kHz,  $D = 5$ ,  $S_m = 1/2$ ,  $B_{de} = 2,1$  kHz
- Χωρίς προέμφαση  $\frac{SNR_o}{SNR_b} = 3D^2 S_m = 3 \cdot 5^2 \cdot \frac{1}{2} \approx 38$
- Με προέμφαση  $\frac{SNR_o}{SNR_b} = \left( \frac{\Delta f}{B_{de}} \right)^2 S_m \approx 640$
-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

# Σύστημα Dolby

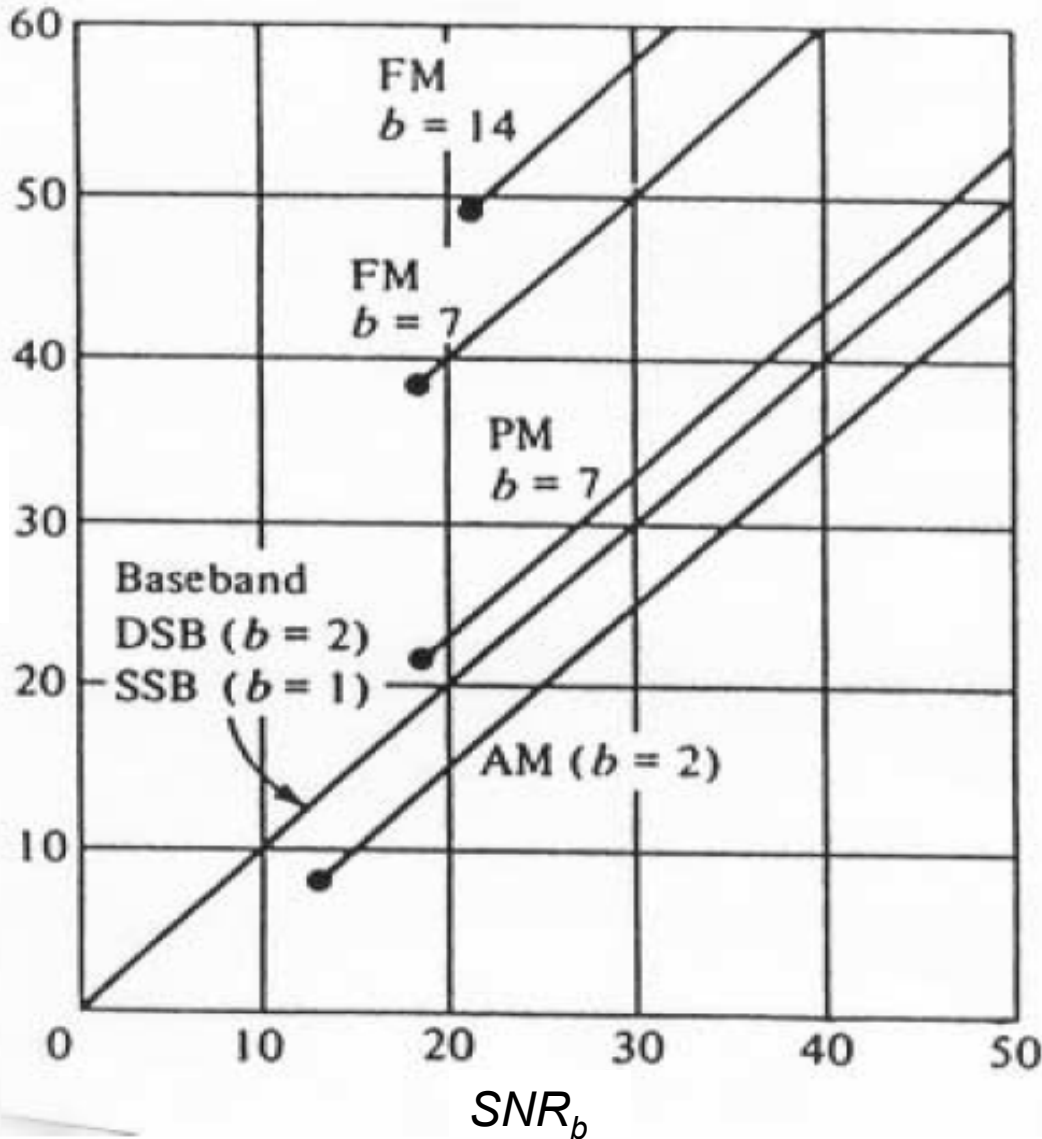


- Η βασική ιδέα των φίλτρων προέμφασης και αποέμφασης βρίσκει εφαρμογή και στην ηχογράφηση σε ταινία, ειδικά, σε κασέτες
- Εδώ σκοπός είναι να περιορισθεί ο μάλλον ενοχλητικός θόρυβος στις υψηλές συχνότητες
- Όλα τα μοντέρνα συστήματα ήχου είναι εφοδιασμένα με την τεχνική Dolby

# Σύγκριση συστημάτων διαμόρφωσης



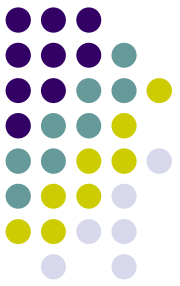
$SNR_o$



$SNR_b$

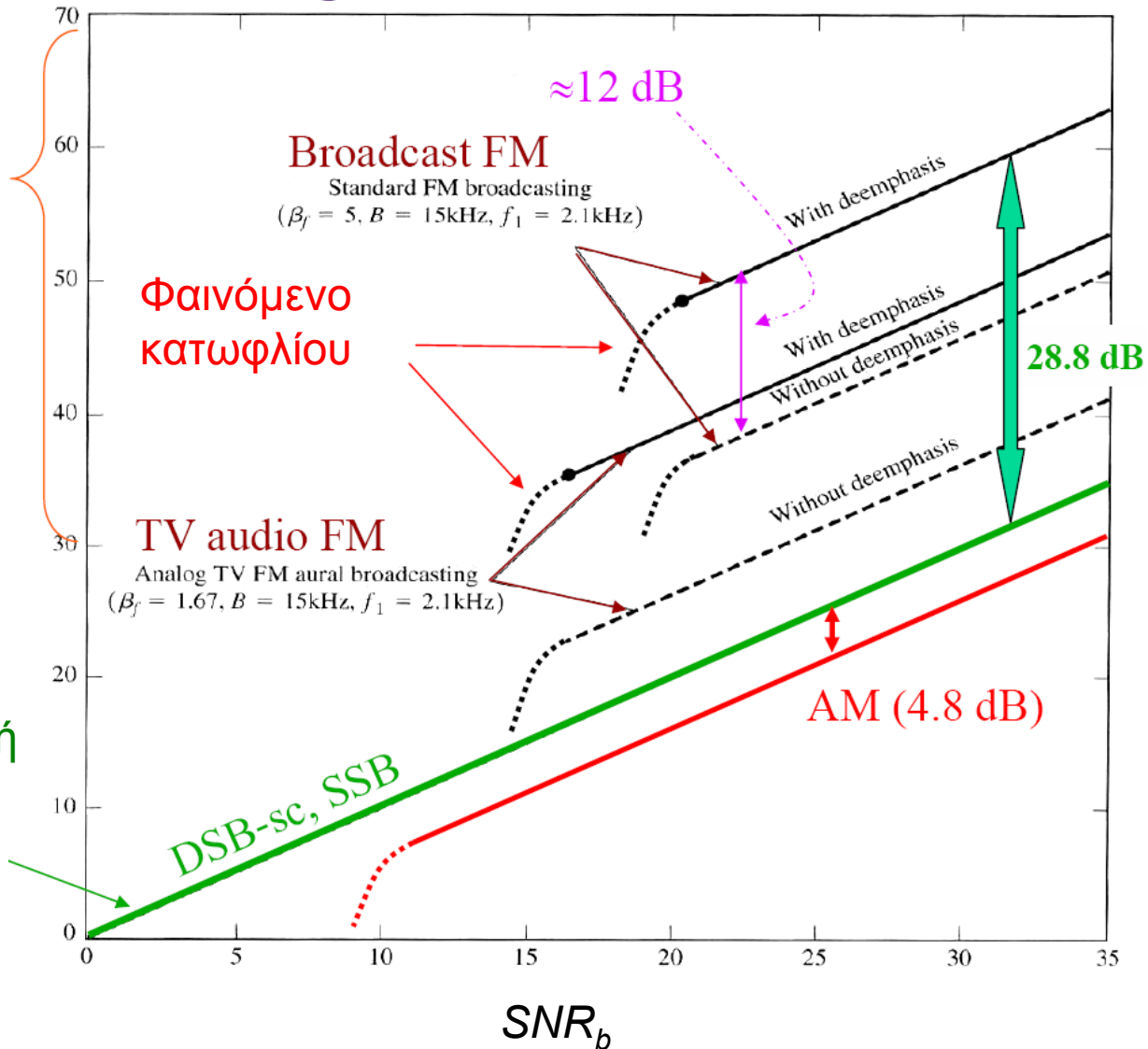


# Σύγκριση συστημάτων διαμόρφωσης



Στην περιοχή αυτή ο θόρυβος δεν γίνεται αντιληπτός

$SNR_o$



Φαινόμενο κατωφλίου

$\approx 12\text{ dB}$

Broadcast FM

Standard FM broadcasting  
( $\beta_f = 5, B = 15\text{kHz}, f_1 = 2.1\text{kHz}$ )

With deemphasis

With deemphasis

Without deemphasis

Without deemphasis

28.8 dB

TV audio FM

Analog TV FM aural broadcasting  
( $\beta_f = 1.67, B = 15\text{kHz}, f_1 = 2.1\text{kHz}$ )

AM (4.8 dB)

DSB-sc, SSB

$SNR_b$

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