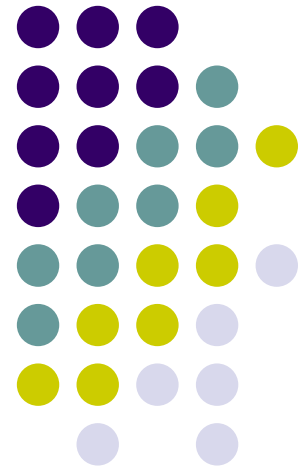


# Εμπορικοί δέκτες

---

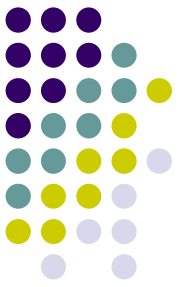




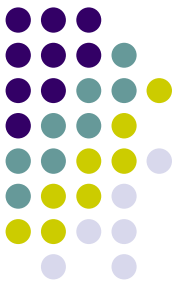
silver  
color



# Κύριες λειτουργίες ραδιοφωνικών δεκτών

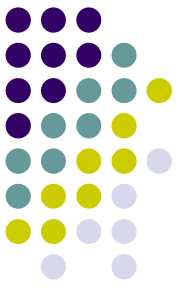


- Αποδιαμόρφωση
  - → λήψη του σήματος πληροφορίας
- Συντονισμός φέροντος
  - → επιλογή του σταθμού
- Φιλτράρισμα
  - → απαλοιφή θορύβου και παρεμβολών
- Ενίσχυση
  - → αντιμετώπιση των απώλειας ισχύος μετάδοσης



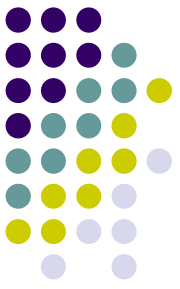
# Βασική δυσκολία

- 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



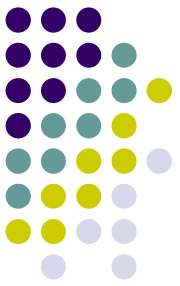
# Πρακτικοί δέκτες

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



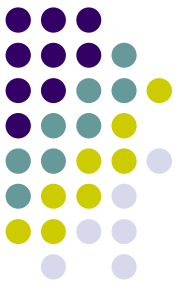
# Δέκτης άμεσης μετατροπής

- 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

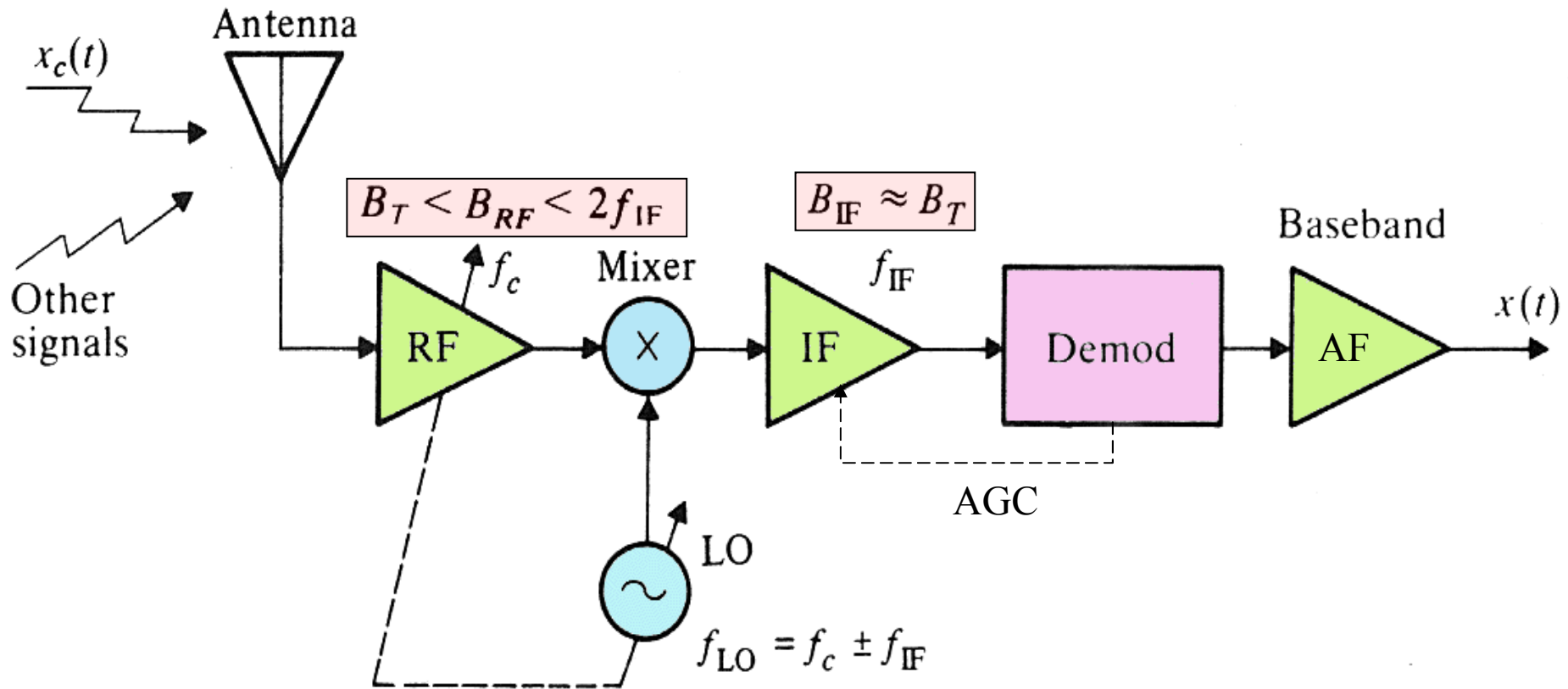
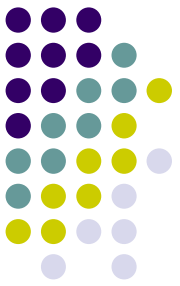


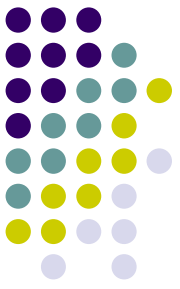
# Βασική ιδέα

- 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



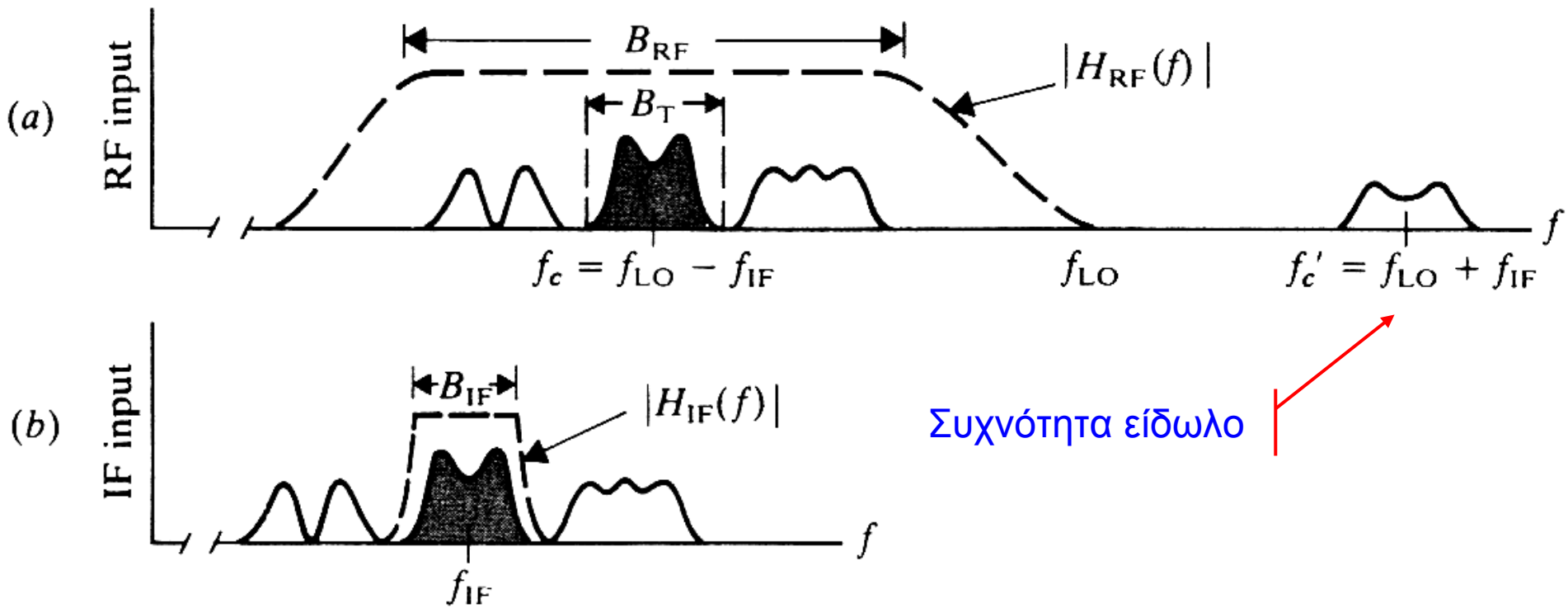


# Δομικές μονάδες

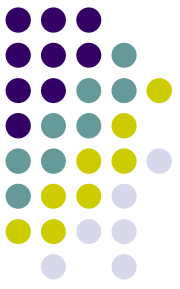
- Ενισχυτής ραδιοσυχνοτήτων (RF)
  - Επιλεκτική ενίσχυση του σήματος που λαμβάνεται στην κεραία σε περιοχή περί το επιθυμητό σήμα
- Τοπικός ταλαντωτής
  - Μεταβλητή συχνότητα συντονισμού  $f_{LO}=f_c \pm f_{IF}$
- Μείκτης
- Ενισχυτής ενδιάμεσων συχνοτήτων (IF)
  - Ενίσχυση περί τη σταθερή ενδιάμεση συχνότητα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



# Λειτουργία

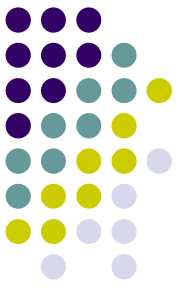


- Εάν το φίλτρο ραδιοσυχνοτήτων δεν απορρίπτει πλήρως τη συχνότητα είδωλο, ο δέκτης θα αποδιαμορφώσει και το σήμα είδωλο!



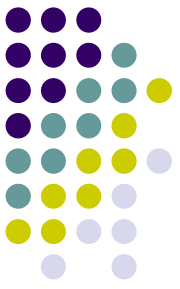
# Βαθμίδα RF

- Μεταφέρει την επιθυμητή συχνότητα λήψης στη 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 συμβάλει 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  $B_T < B_{RF} < 2f_{IF}$



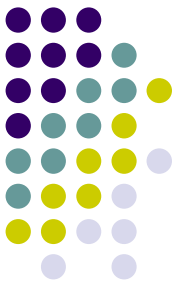
# Βαθμίδα IF

- 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

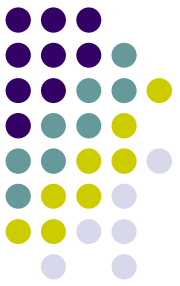
$$\frac{B_{IF}}{f_c} = \frac{200 \text{ kHz}}{10 \text{ MHz}} \approx 0,02$$



# 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

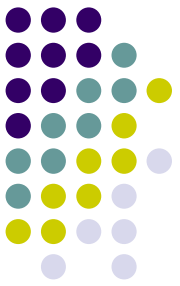
# Δέκτης AM



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

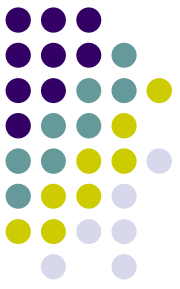


# Δέκτης FM

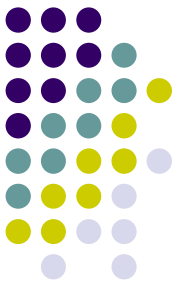


- Περιοχή ραδιοσυχνοτήτων 88 – 108 MHz
- Ενδιάμεση συχνότητα 10,7 MHz
- Εύρος ζώνης στην ενδιάμεση βαθμίδα 200 kHz

# Προτερήματα υπερετερόδυνων δεκτών

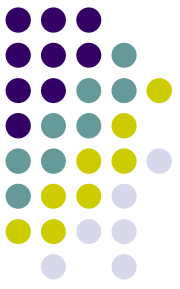


- Απλή κατασκευή
- Η τεχνική της μετατροπής συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα είδη διαμόρφωσης
- Ο υπερτερόδυνος δέκτης χειρίζεται τα θέματα ποιότητας λήψης σε διαφορετικές μονάδες
  - RF: Ευαισθησία
  - IF: Επιλεκτικότητα



# Μειονεκτήματα

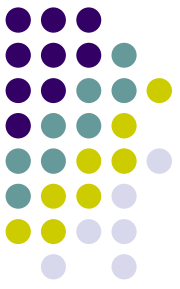
- Το βασικό πρόβλημα με τους υπερ-ετερόδυνους δέκτες είναι η απόκριση σε κίβδηλες (spurious) συχνότητες πέραν της  $f_c$ 
  - Η προφανής συχνότητα είδωλο απαλείφεται με αύξηση της  $f_{IF}$
  - Μη γραμμικότητες μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές και από ισχυρά σήματα σε υποπολλαπλάσια της  $f_{IF}$



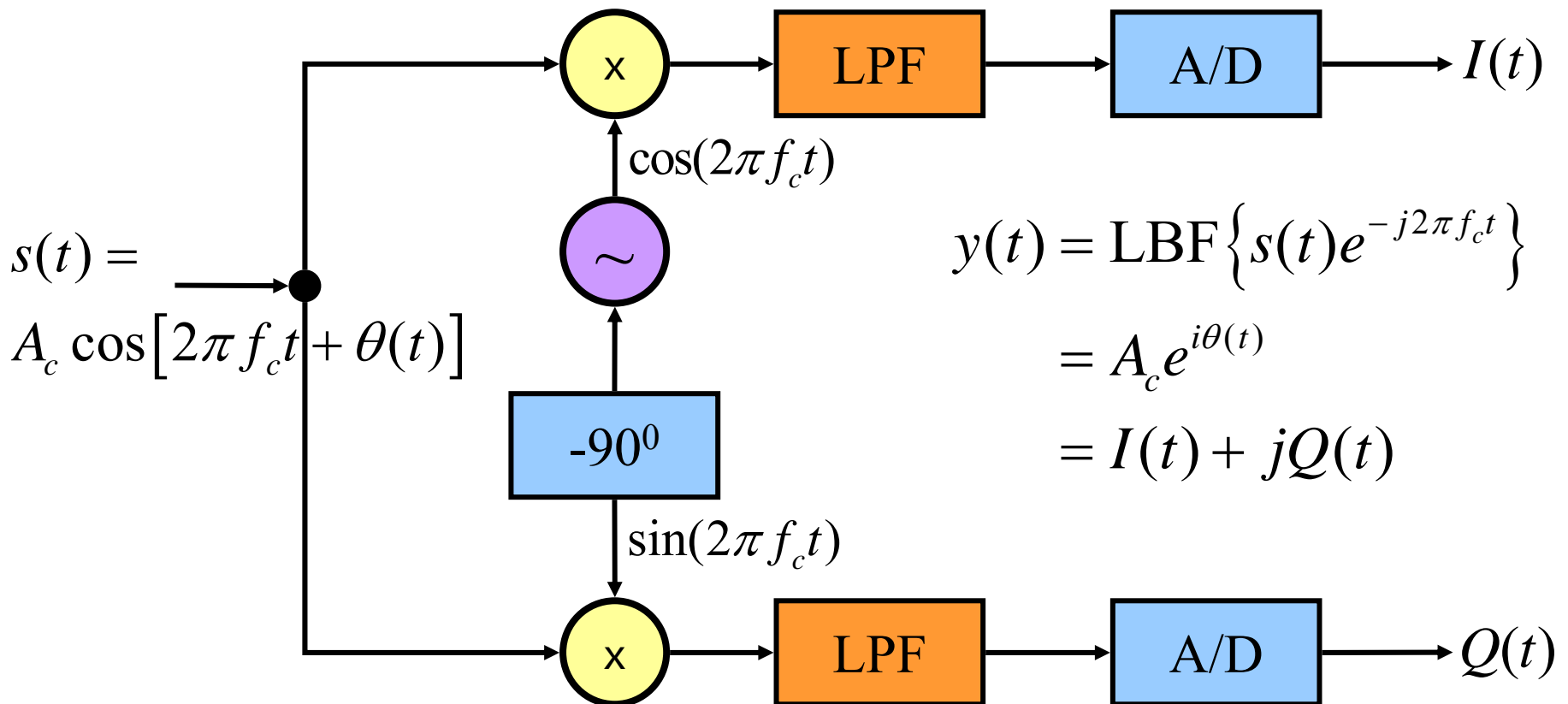
# Δέκτες διπλής μετατροπής

- Δύο διαφορετικές βαθμίδες IF σε διαφορετικές ενδιάμεσες συχνότητες
- Πρώτη βαθμίδα IF στα  $10,7 \text{ MHz} \gg 455 \text{ kHz}$ 
  - Κακή επιλεκτικότητα (δεν είναι εύκολο να έχουμε στενό εύρος ζώνης), αλλά η απόρριψη του ειδώλου είναι εύκολη
  - Π.χ., για  $f_c = 146,94 \text{ MHz}$  στα VHF, το είδωλο βρίσκεται 14% πιο ψηλά από το φέρον στα  $146,94 + 2 \cdot 10,7 = 168,34 \text{ MHz}$
- Δεύτερη βαθμίδα IF στα  $455 \text{ kHz}$ 
  - Είδωλο στα  $10,7 + 2 \cdot 0,455 = 11,6 \text{ MHz}$ , 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

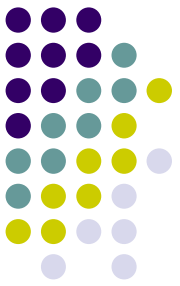
# Δέκτες SDR (Software Defined Radio)



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



# Δέκτες SDR (Software Defined Radio)



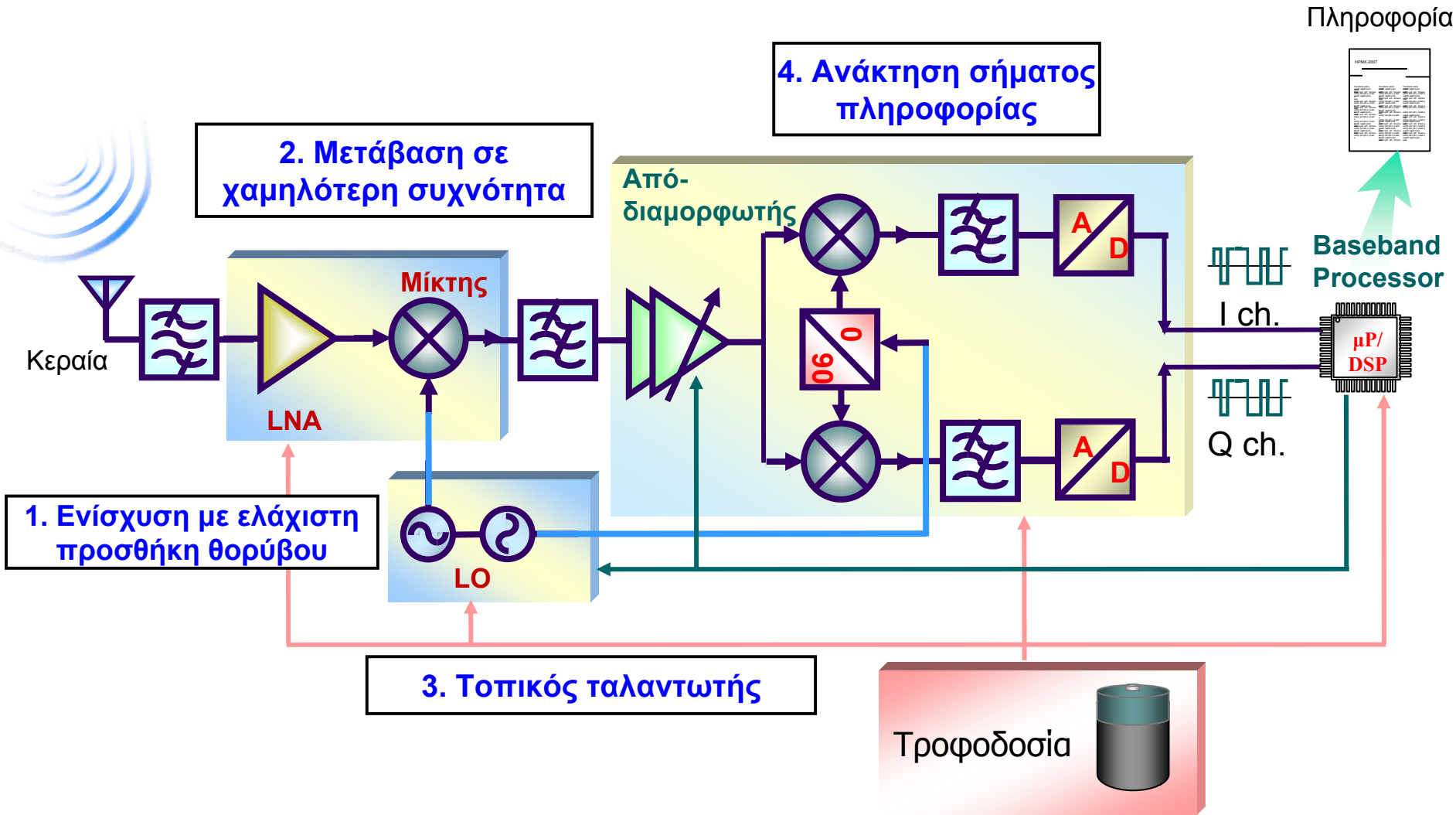
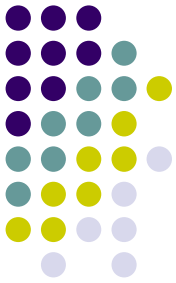
- Η αποδιαμόρφωση γίνεται με λογισμικό (μαθηματικές πράξεις) σε υπολογιστή

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

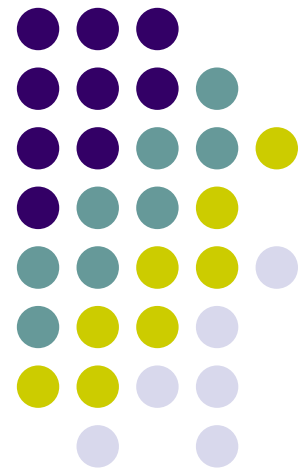
$$\text{FM} \rightarrow \arctan \frac{Q(t)}{I(t)}$$

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

# Μοντέρνος δέκτης

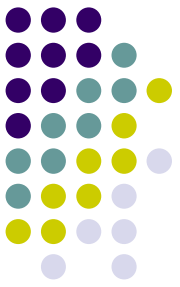


# Μοντέλο συστήματος αποδιαμόρφωσης παρουσία θορύβου





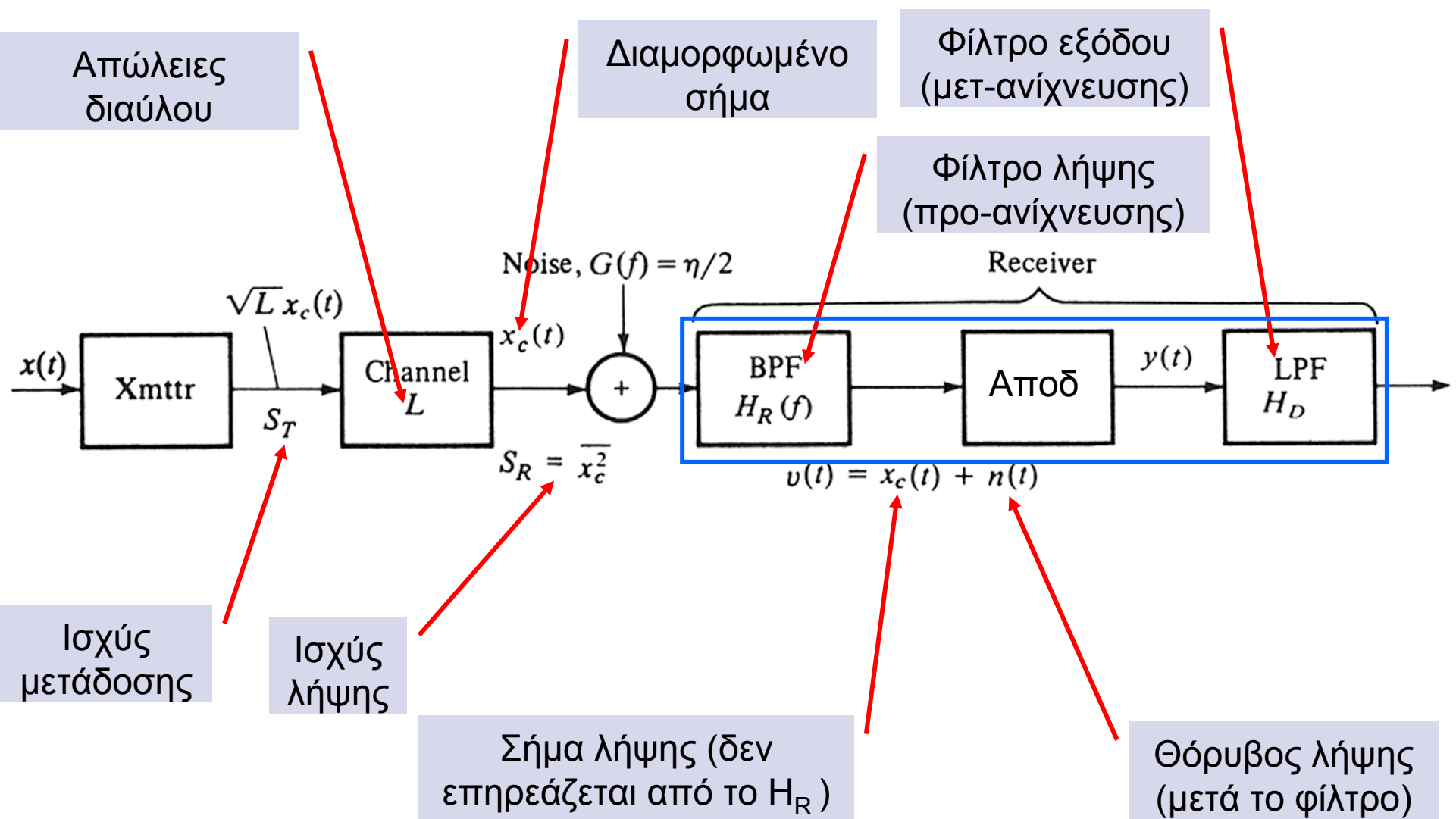
# Επίδοση παρουσία θορύβου



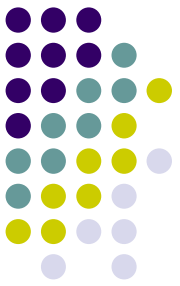
- Η ανάλυση της επίδοσης των συστημάτων διαμόρφωσης παρουσία θορύβου είναι εξαιρετικά σημαντική για τη σχεδίαση των διαφόρων επικοινωνιακών συστημάτων
- Ο τελικός σκοπός είναι να αναπτυχθεί ένα σύστημα όπου οι επιδράσεις του θορύβου να ελαχιστοποιούνται
- Εάν η επίδραση του θορύβου ελαχιστοποιηθεί, τότε 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



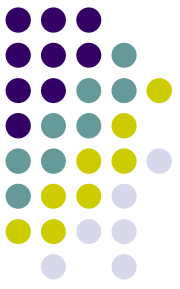
# Μοντέλο συστήματος



# 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

$$S_m = \langle m^2(t) \rangle = E\{m^2(t)\}$$

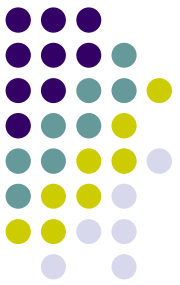
- Υποθέτουμε ότι το σήμα πληροφορίας είναι εργοδικό, δηλαδή, ότι οι χρονικές και οι χωρικές μέσες τιμές ισούνται

$$\langle m(t) \rangle = E\{m(t)\}, \quad \langle m^2(t) \rangle = E\{m^2(t)\}$$

$$\langle m(t)m(t-\tau) \rangle = E\{m(t)m(t-\tau)\}$$

- Με τη χρονική μέση τιμή να ορίζεται ως

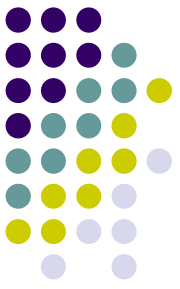
$$\langle m(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} m(t) dt$$



# Ο δίαυλος

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

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



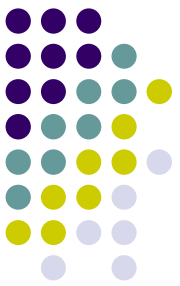
# Το διαμορφωμένο σήμα

- 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

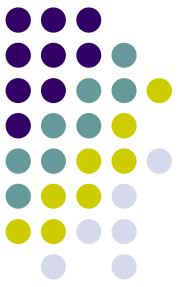
- Το προς αποδιαμόρφωση σήμα στην είσοδο του δέκτη είναι

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

- 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

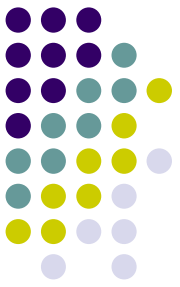


- Το σήμα μετά την αποδιαμόρφωση μπορεί να γραφθεί σύμφωνα με το είδος φωρατή

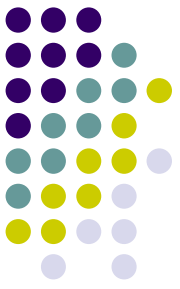
$$y(t) = \begin{cases} r_c(t) & \text{ομόδυνος αποδιαμορφωτής} \\ A_r(t) - \overline{A_r} & \text{φωρατής περιβάλλουσας} \\ \phi_r(t) & \text{φωρατής PM} \\ \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi_r(t) & \text{φωρατής FM} \end{cases}$$



# 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

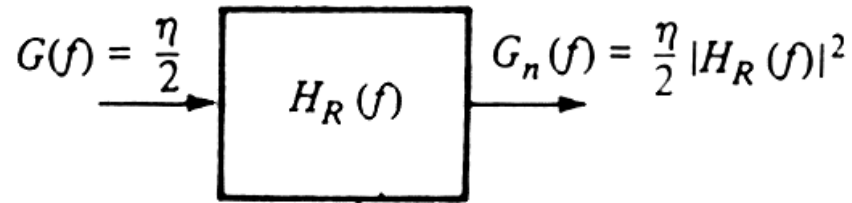
$$r^2 = s^2 + n^2 = S_R + N_R$$

- 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

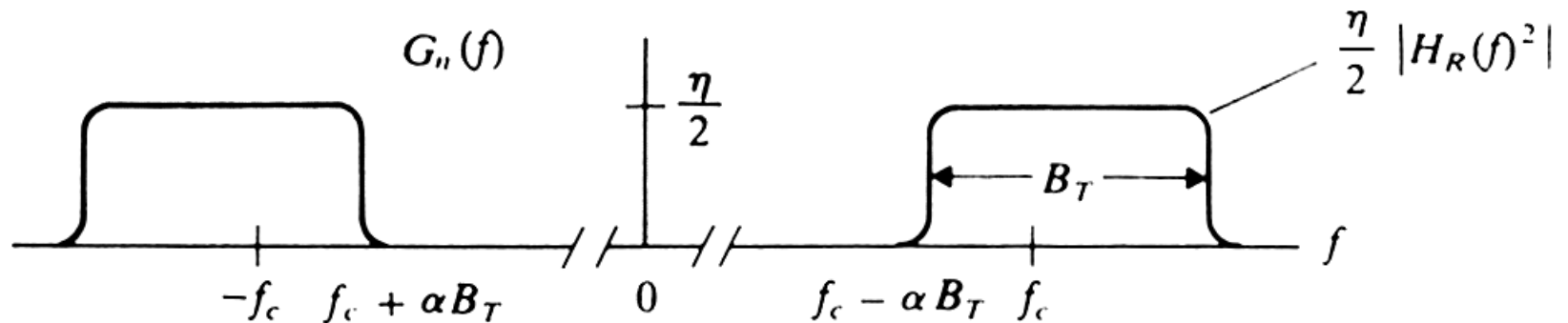
$$G_n(f) = \frac{N_0}{2} |H_R(f)|^2$$



# Θόρυβος λήψης

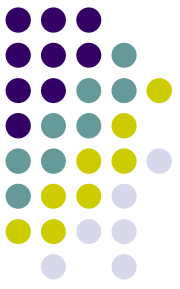


(a)



(b)

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



# Ισχύς θορύβου λήψης

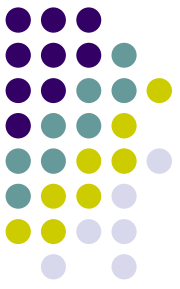
- Για λευκό θόρυβο στον δίαυλο

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

- 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

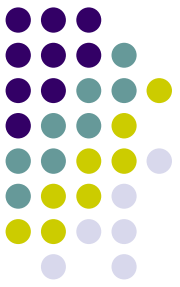
$$SNR_b \triangleq \frac{S_R}{N_0 W}$$

- και

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

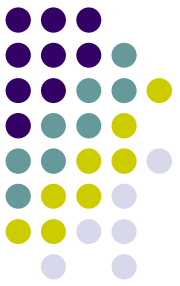
- όπου στην ακραία περίπτωση για το SSB ισχύουν οι ισότητες

# 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

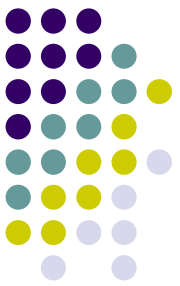


- Εάν ο θόρυβος στην έξοδο του δέκτη μετά την αποδιαμόρφωση εμφανίζεται με μορφή προσθετικής συνιστώσας, η σηματοθορυβική σχέση στην έξοδο του δέκτη ορίζεται ως

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

- όπου  $N_D$  η ισχύς του θορύβου στην έξοδο του δέκτη

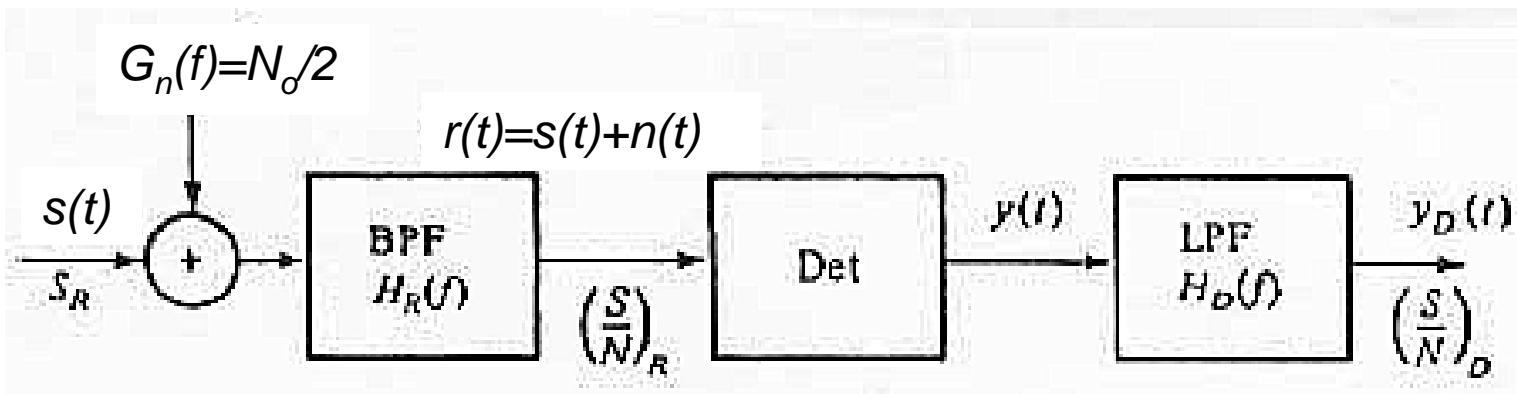




# Το βασικό πρόβλημα

- 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

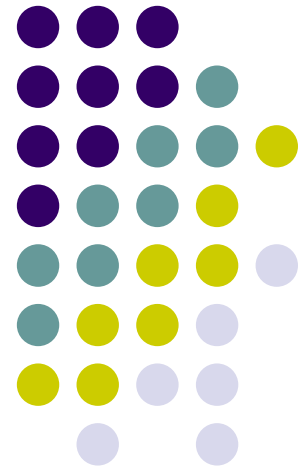
- Η επίδοση του δέκτη προσδιορίζεται από τον λόγο των σηματοθορυβικών σχέσεων

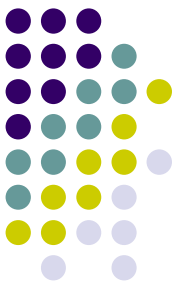
$$\text{Επίδοση} = \frac{SNR_o}{SNR_c}$$

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

# Ζωνοπερατός θόρυβος

---





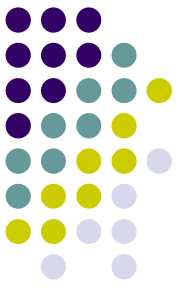
# Ζωνοπερατός θόρυβος

- Θεωρούμε ότι ο θόρυβος στον δίαυλο είναι **λευκός**, δηλαδή, αναπαριστάται 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

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



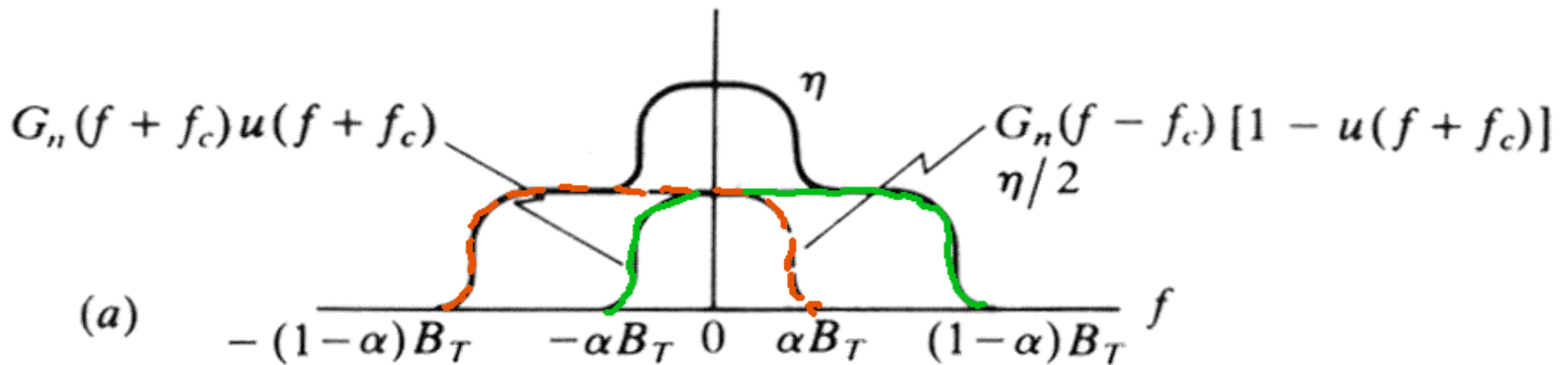
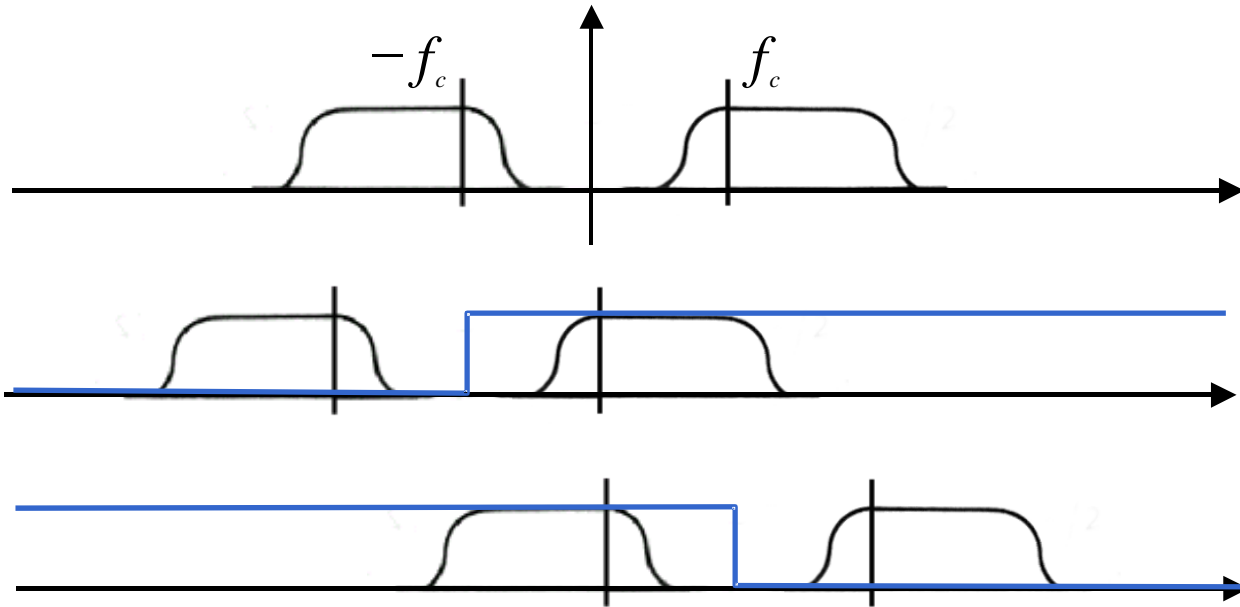
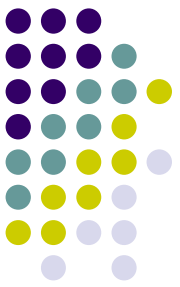
# Ζωνοπερατός θόρυβος

- Όπου οι πυκνότητες φάσματος ισχύος των δύο συνιστωσών είναι ταυτόσημες

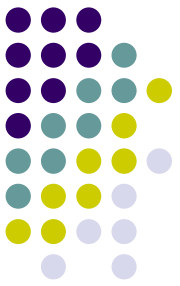
$$\begin{aligned}G_{n_c}(f) &= G_{n_s}(f) \\ &= \frac{1}{2}G_n(f - f_c)[1 - \text{sgn}(f - f_c)] \\ &\quad + \frac{1}{2}G_n(f + f_c)[1 + \text{sgn}(f + f_c)]\end{aligned}$$

- 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

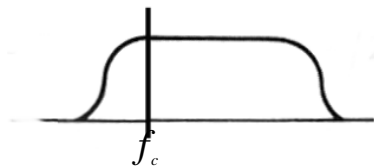


# Ορθογώνιες συνιστώσες ζωνοπερατού θορύβου

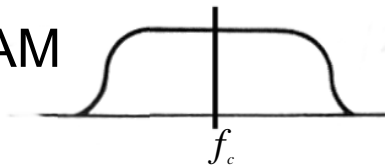


- Η φασματική μορφή των ορθογώνιων συνιστωσών μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τη φασματική μορφή του ζωνοπερατού θορύβου λόγω του συστήματος διαμόρφωσης

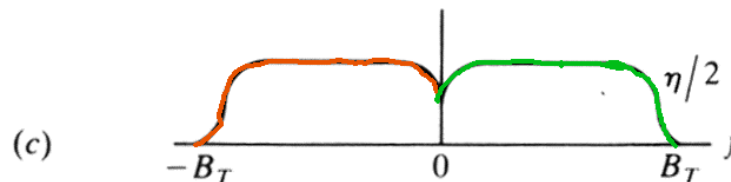
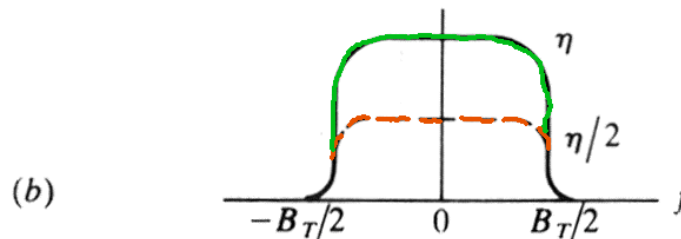
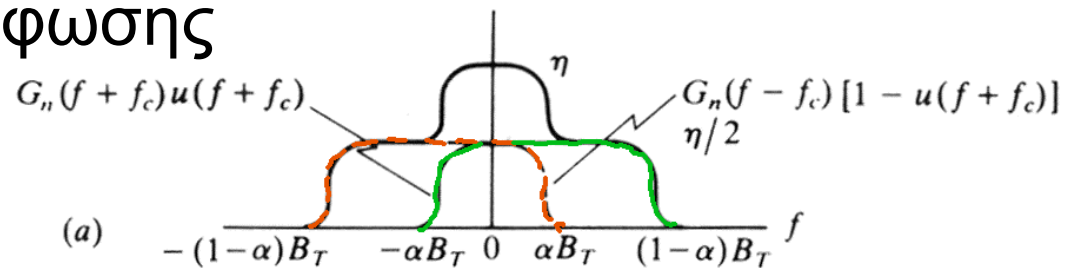
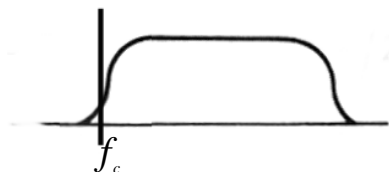
VSB

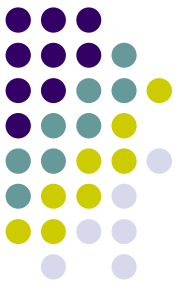


FM, PM  
DSB, AM



USB





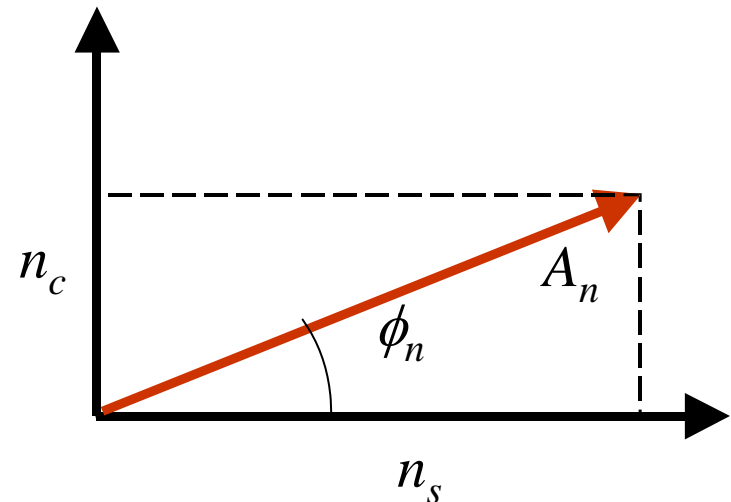
# Ζωνοπερατός θόρυβος

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

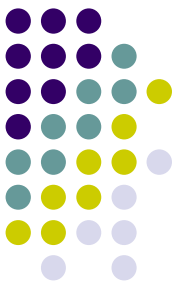
$$\overline{n_c} = \overline{n_s} = 0,$$

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

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







# Κατανομή πλάτους θορύβου

- Ο ζωνοπερατός θόρυβος εκφρασμένος στη μορφή περιβάλλουσας-φάσης

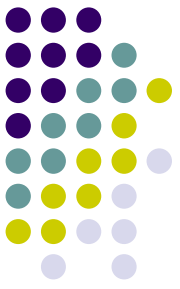
$$n(t) = A_n(t) \cos[2\pi f_c t + \phi_n(t)]$$

- 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

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