

ΔΟΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΖΕΥΞΕΙΣ

7^ο Εξάμηνο

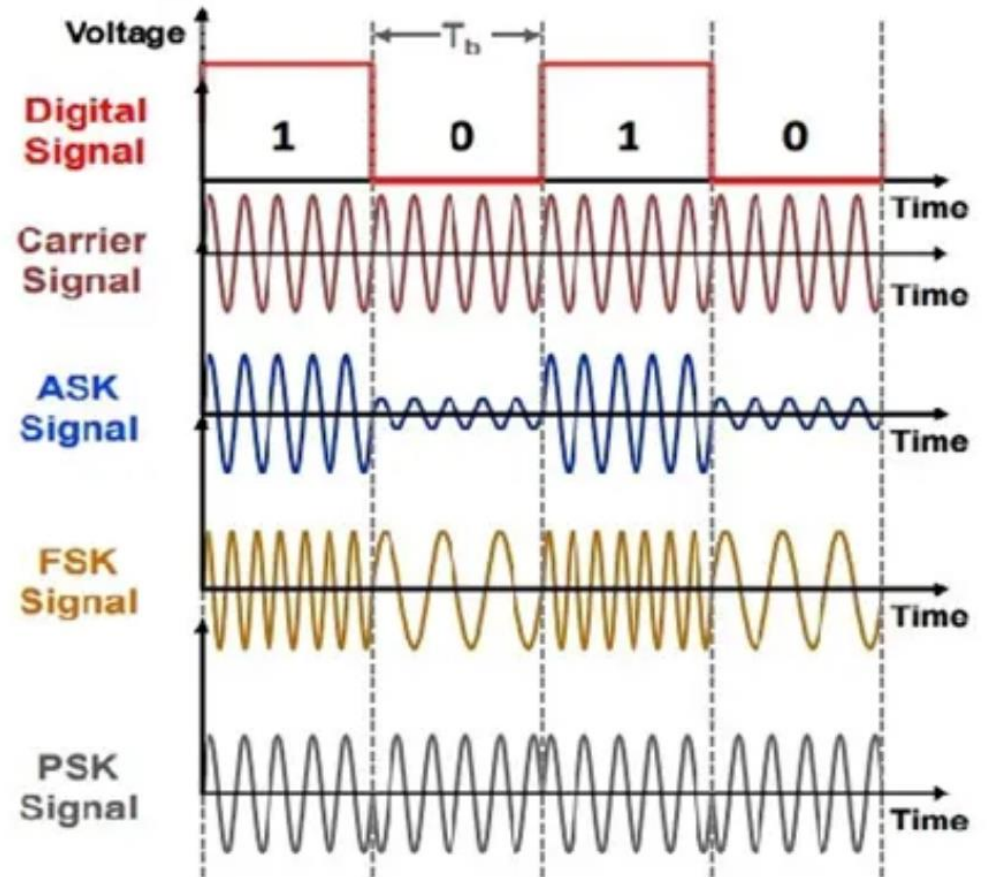
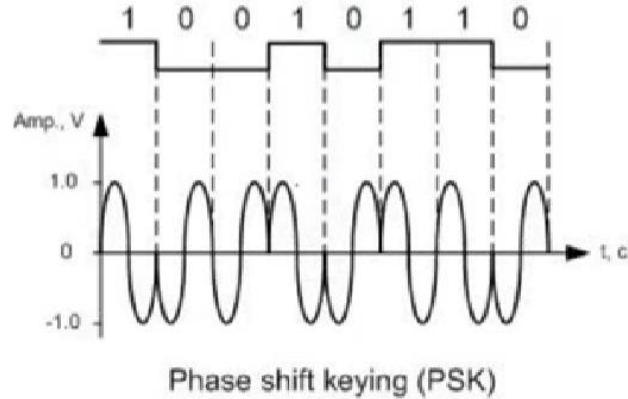
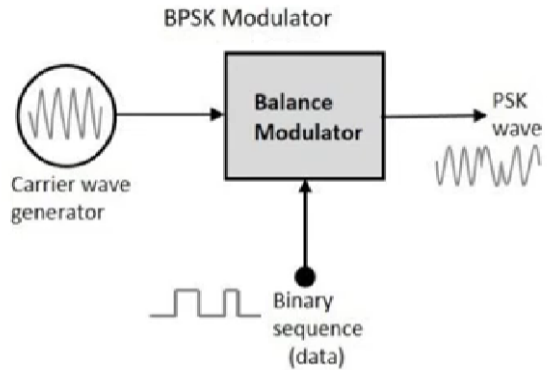
Σώζος Κώστας

Υποσυστήματα δορυφορικών ζεύξεων

- Διαμορφωτές-Διαμορφώσεις
- Μικροκυματικοί Ταλαντωτές
- Ενισχυτές-Θόρυβος
- Φίλτρα
- Transponders

Διαμορφωτές

$$c(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \phi_0]$$



Διαμορφωτές Φάσης και Πλάτους



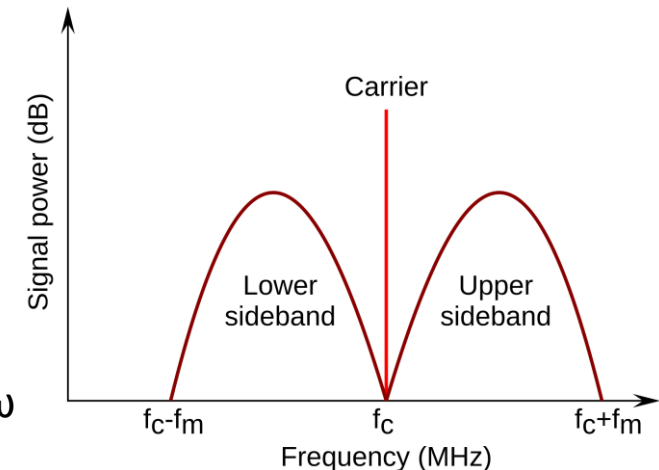
lower bias voltage,
narrower depletion zone,
higher capacitance



higher bias voltage,
wider depletion zone,
lower capacitance

- Διαμορφωτής φάσης: Ένας varactor (variable capacitance diode) μεταβάλλει τη χωρητικότητά του ώστε να δημιουργήσει καθυστέρηση στο χρόνο σε ένα σήμα
→ άρα να μεταβάλλει τη φάση του σε σχέση με το αρχικό σήμα.
- Διαμορφωτής πλάτους: Μια δίοδος λειτουργεί ως διακόπτης για να μεταβάλει το πλάτος του σήματος.
- Στην πράξη ένας πολλαπλασιαστής συχνοτήτων (mixer) μπορεί να διαμορφώσει το φέρον πολλαπλασιάζοντάς το με το προς διαμόρφωση σήμα (διπλάσιο γινόμενο).
- Ο mixer, σαν μη γραμμικό στοιχείο, θα δημιουργήσει τη διαφορά και το άθροισμα των δύο συχνοτήτων (sidebands της διαμόρφωσης).

$$v_o = (v_1 + v_2) + \frac{1}{2}(v_1 + v_2)^2 + \dots$$



* Πολλαπλασιασμός δύο σημάτων στο χρόνο = Συνέλιξη στη συχνότητα.

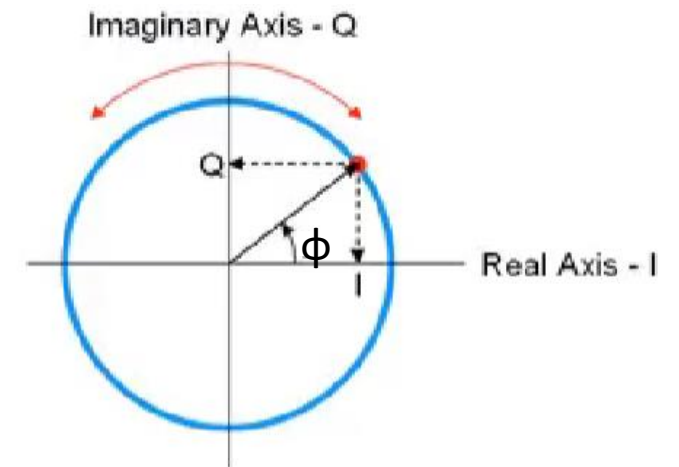
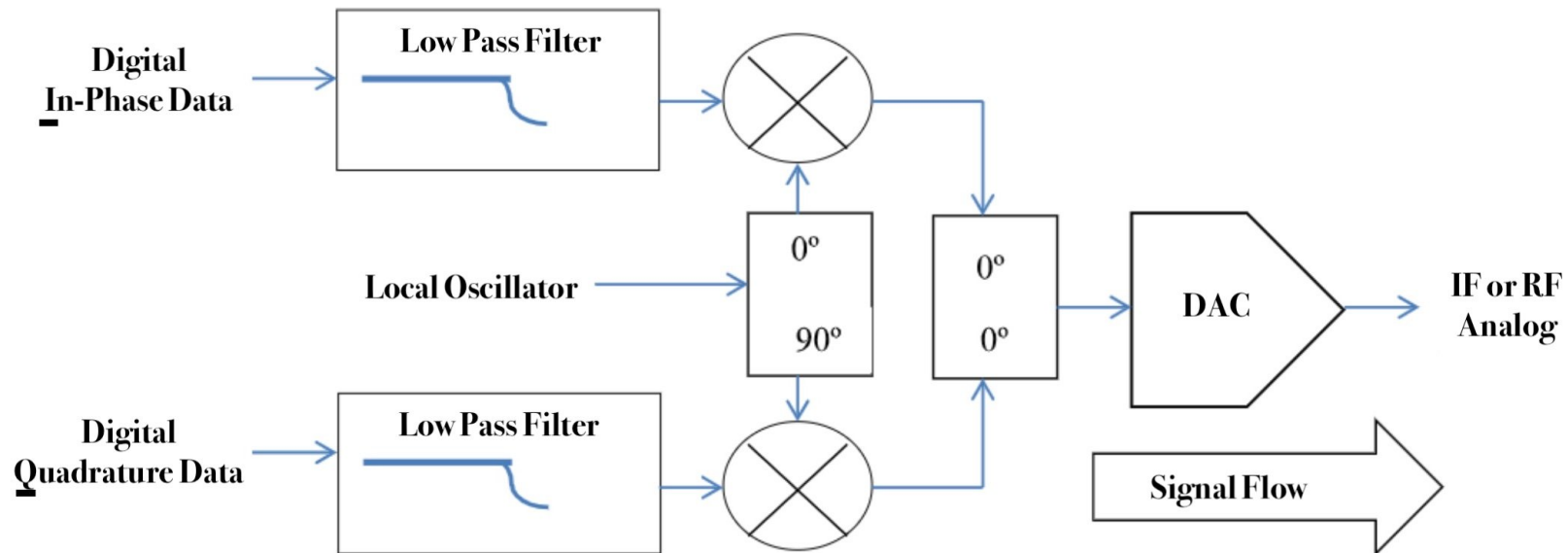
$$v_1 = (1 + k_a m(t)) \quad v_2 = \cos(\omega_c t) \quad v_{out} = k \times v_1 \times v_2$$

$$v_{out} = k \times [A_c \cos(\omega_c t)] \times [1 + m(t)]$$

❖ Ένα σήμα με 10 MHz bandwidth στην baseband καταλαμβάνει 20 MHz γύρω από το φέρον.

Διαμορφωτές I/Q

- Σήμερα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά I/Q (In-Phase and Quadrature) modulators για σχήματα BPSK, QPSK, QAM.
- Η διαμόρφωση επιτυγχάνεται συνδυάζοντας δύο διαμορφωτές πλάτους με διαφορά φάσης 90° .



$$s(t) = I(t) \cos(\omega_c t) - Q(t) \sin(\omega_c t)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{I} \right)$$

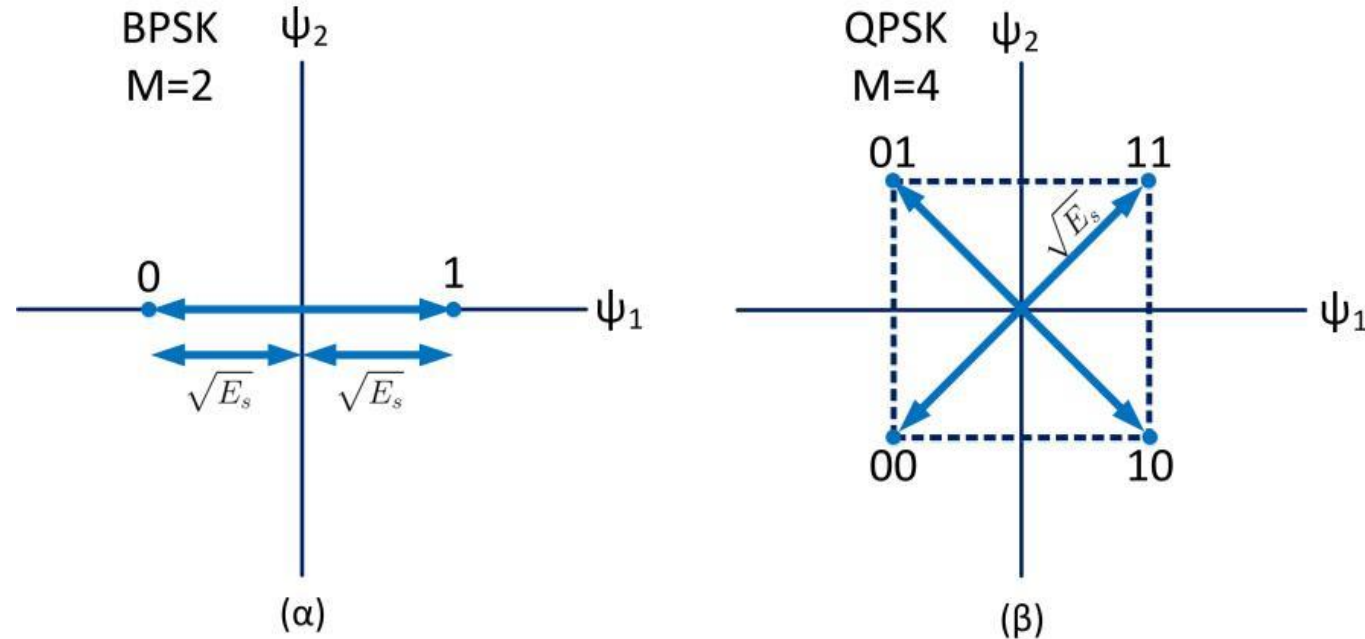
Διαμορφώσεις Φάσης (BPSK, QPSK)

Διαμόρφωση Binary Phase-Shift Keying (BPSK)

Αφορά τη μετατόπιση φάσης για μια κυματομορφή δύο συμβόλων. Οι μετατοπίσεις φάσης ισαπέχουν κατά 180° . Αυτό ισοδυναμεί με αντιστροφή της πραγματικής τιμής του πλάτους.

Διαμόρφωση Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK)

Αφορά τη μετατόπιση φάσης για μια κυματομορφή τεσσάρων συμβόλων. Οι μετατοπίσεις φάσης ισαπέχουν κατά 90° . Το πλάτος και η συχνότητα του διαμορφωμένου σήματος παραμένουν σταθερά.



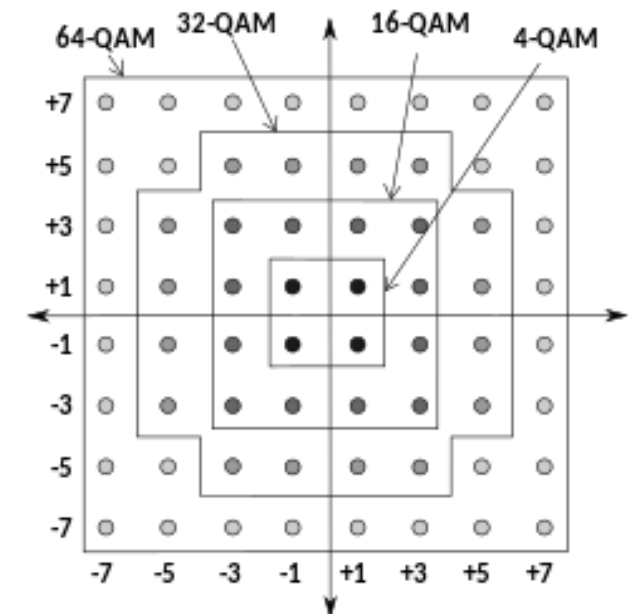
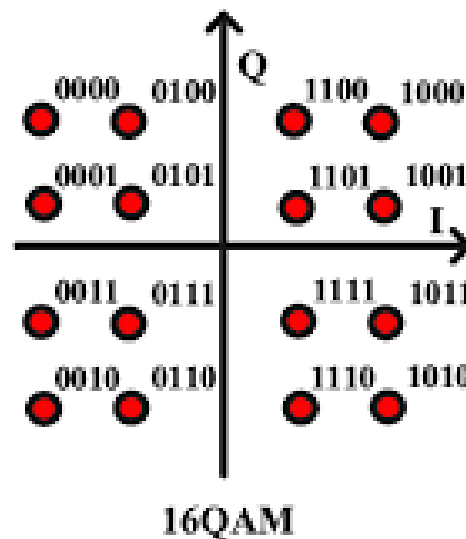
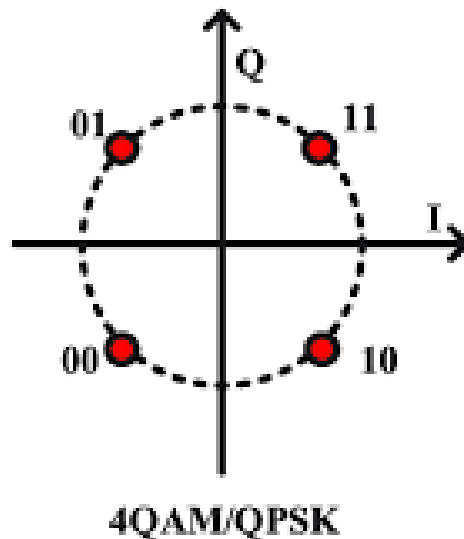
Διάγραμμα αστερισμού BPSK και QPSK

$$s_i^{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot E_s}{T_s}} \cdot \cos[2\pi f_o t + \phi_i(t)], \quad i = 0, 1, 2, 3,$$

$$\phi_i = (2i + 1) \frac{\pi}{4}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \text{ δηλ. } \phi_0 = \frac{\pi}{4}, \phi_1 = \frac{3\pi}{4}, \phi_2 = \frac{5\pi}{4} \text{ και } \phi_3 = \frac{7\pi}{4}.$$

Διαμορφωτές I/Q

- Οι I/Q διαμορφωτές παράγουν «αστερισμούς» διαμορφώσεων στο πεδίο I/Q.
- Κάθε σύμβολο του αστερισμού κωδικοποιεί μια ομάδα από bit.
- Ο πληθάριθμος των bit που αντιστοιχούν σε κάθε σύμβολο δίνεται από τη σχέση $N = \log_2(M)$, δηλαδή 1 για το BPSK, 2 για το QPSK, 4 για το QAM-16, 6 για το QAM-64, 8 για το QAM-256 κλπ.
- Όσο μεγαλύτερη η τάξη του αστερισμού, τόσο δυσκολότερο να διαχωριστούν τα σύμβολα αυξάνοντας τις απαιτήσεις σε SNR.



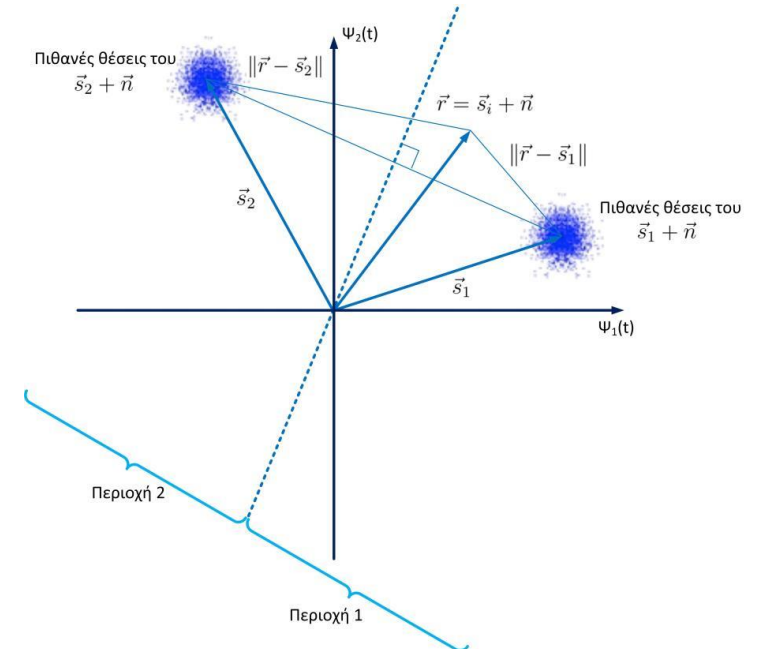
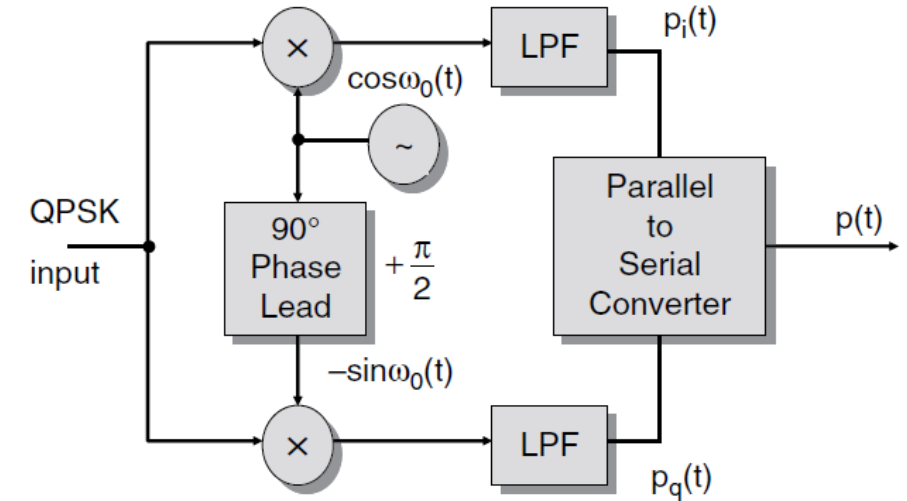
Αποδιαμορφωτές

Βασικές Λειτουργίες του Αποδιαμορφωτή

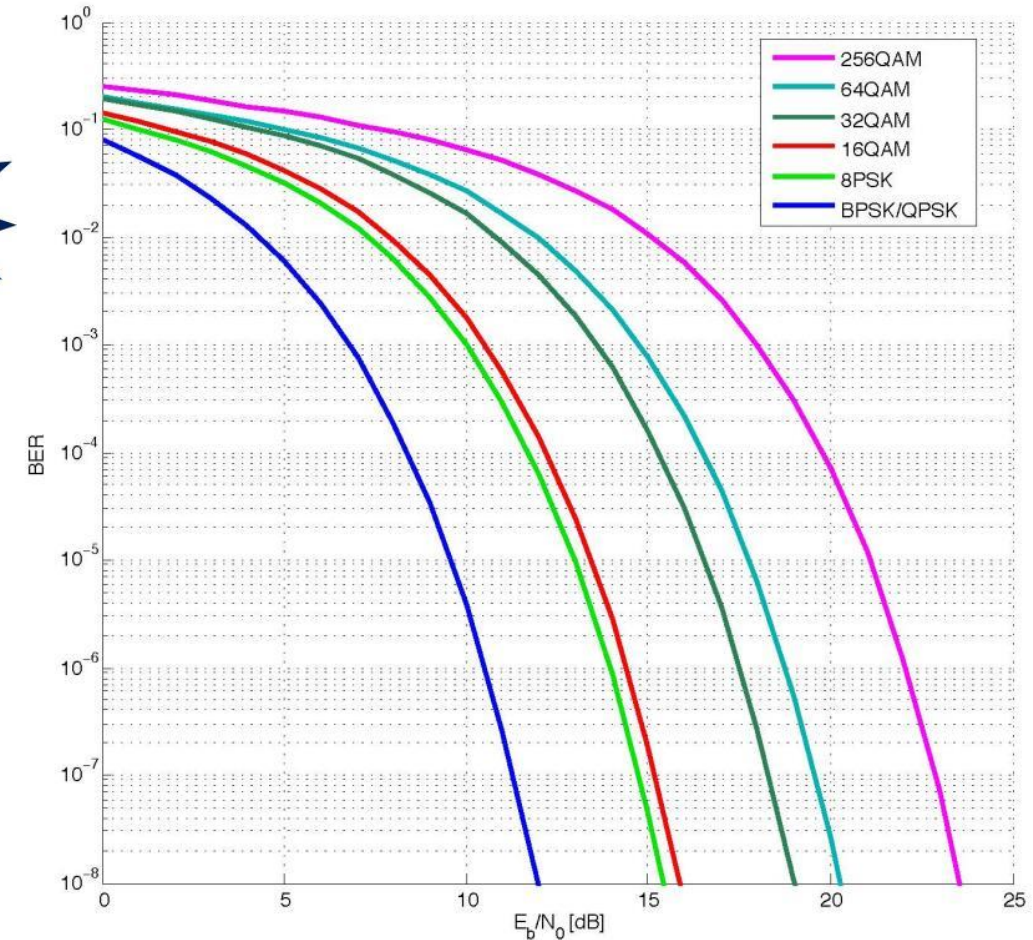
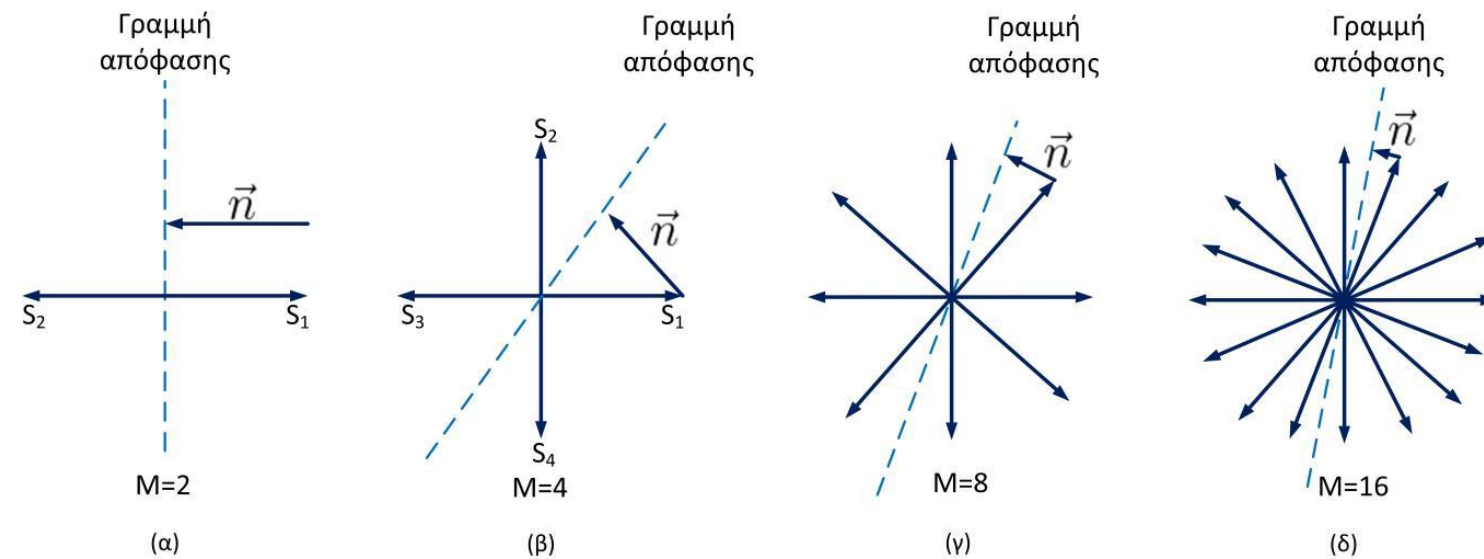
- **Ενίσχυση** του σήματος.
- **Μετατροπή** της συχνότητας σε χαμηλότερη.
- **Μετατροπή** της αναλογικής κυματομορφής σε ψηφιακή ακολουθία **bits**.

Χώρος Σημάτων και Θόρυβος

- Ο γεωμετρικός χώρος των διανυσμάτων επηρεάζεται από λευκό προσθετικό θόρυβο **Gauss**.
 - Η κατανομή των σημάτων δημιουργεί ένα "σύννεφο σημείων" γύρω από την **πρωτότυπη** κυματομορφή.
- Περιοχές απόφασης με βάση τον **κανόνα ελάχιστου σφάλματος**:
 - Όπου επιλέγεται το s_i που **ελαχιστοποιεί** την απόσταση.



Πιθανότητα Σφάλματος και Ρυθμός Μετάδοσης Σφαλμάτων



- Όσο αυξάνεται ο αριθμός των bits/symbol
 - Επιδεινώνεται η απόδοση με τον απαιτούμενο λόγο E_b/N_0 για δεδομένη πιθανότητα σφάλματος να αυξάνεται.
 - Αυξάνεται η απαίτηση ισχύος, ενώ μειώνεται το εύρος ζώνης.
- ❖ Το E_b/N_0 είναι την ενέργεια ανά bit προς την πυκνότητα φασματικής ισχύος του θορύβου (N/Hz). Είναι ένα χρήσιμο μέτρο για τη σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης και τον υπολογισμό του θεωρητικού BER.

Χωρητικότητα διαύλου

Υποβάθμιση Σήματος και Διαύλου

- Ο δίαυλος επικοινωνίας προκαλεί **υποβαθμίσεις** στον δέκτη:
 - Προσθετικός θόρυβος
 - Παρεμβολές
 - Παραμόρφωση
- Αυτές οι υποβαθμίσεις επηρεάζουν τον **συγχρονισμό** και οδηγούν σε **απώλειες bits**.
- Η μέγιστη χωρητικότητα ενός διαύλου (σε bps) ιδανικού, χωρίς σκιάσεις, διαλείψεις ή ISI δίνεται από το θεώρημα Shannon-Hartley

Θεώρημα Shannon-Hartley

- Για δίαυλο **AWGN** με εύρος ζώνης **B**:
- **C**: Χωρητικότητα διαύλου (bps)
- **S**: Ισχύς σήματος
- **N_o**: Φασματική πυκνότητα θορύβου

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{B \cdot N_o} \right) = B \cdot \log_2 (1 + SNR)$$

Ρυθμός Πληροφορίας και Φασματική Απόδοση

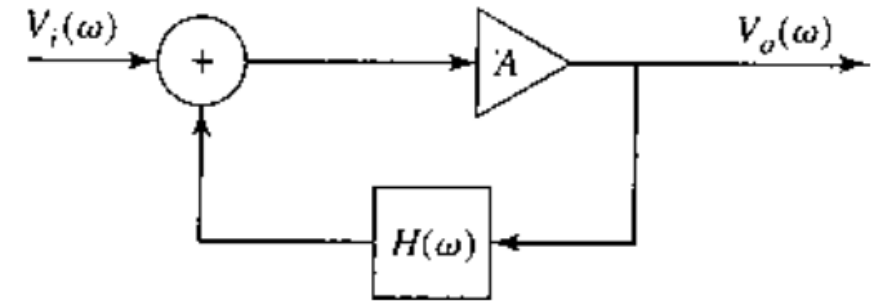
- Αν **Rb < C**, μετάδοση **χωρίς σφάλματα**.
- Αν **Rb > C**, **μη αξιόπιστη μετάδοση**.

Η χωρητικότητα του καναλιού μπορεί να αυξηθεί:

- Με αύξηση του **bandwidth** του καναλιού
- Με αύξηση της τάξης διαμόρφωσης (που απαιτεί μεγαλύτερο SNR)

Μικροκυματικοί Ταλαντωτές

- Η πιο κοινή μορφή γραμμικού ταλαντωτή είναι ένας ηλεκτρονικός ενισχυτής (πχ. τρανζίστορ ή τελεστικός ενισχυτής), με ένα βρόχο ανάδρασης, με την έξοδο να επιστρέφει στην είσοδό μέσω ενός ηλεκτρονικού φίλτρου, ώστε να παρέχει θετική ανάδραση.
- Όταν η τροφοδοσία του ενισχυτή ενεργοποιείται, ο ηλεκτρονικός θόρυβος στο κύκλωμα παρέχει ένα σήμα διαφορετικό από το μηδέν για να ξεκινήσουν οι ταλαντώσεις.
- Ο θόρυβος μεταφέρεται γύρω από τον βρόχο, ενισχύεται και φιλτράρεται μέχρι να συγκλίνει γρήγορα σε ένα ημιτονοειδές κύμα σε μία μόνο συχνότητα.
- Εάν ο παρονομαστής γίνει μηδέν σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, είναι δυνατό να επιτευχθεί μια μη μηδενική τάση εξόδου για μια μηδενική τάση εισόδου, σχηματίζοντας έτσι έναν ταλαντωτή (κριτήριο Barkhausen).

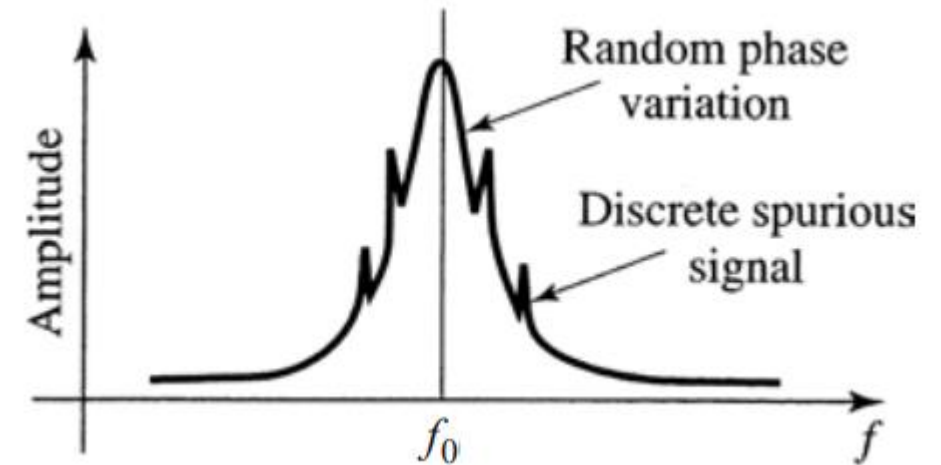


$$V_o(\omega) = AV_i(\omega) + H(\omega)AV_o(\omega)$$

$$V_o(\omega) = \frac{A}{1 - AH(\omega)} V_i(\omega)$$

Μικροκυματικοί ταλαντωτές - Θόρυβος Φάσης

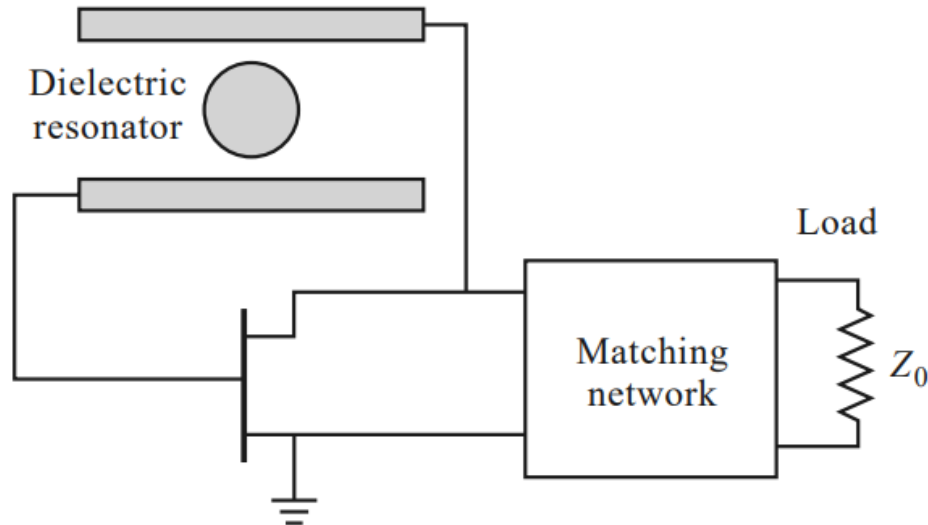
- Ένας ιδανικός ταλαντωτής θα είχε ένα φάσμα συχνοτήτων συνάρτησης δέλτα στη συχνότητα λειτουργίας του, αλλά ένας ρεαλιστικός ταλαντωτής θα έχει ένα ευρύτερο φάσμα. Τα σήματα που οφείλονται σε αρμονικές του ταλαντωτή εμφανίζονται ως διακριτές αιχμές στο φάσμα. Ο θόρυβος φάσης, που οφείλεται σε τυχαίες διακυμάνσεις που προκαλούνται από θερμικές και άλλες πηγές θορύβου, εμφανίζεται ως μια ευρεία, συνεχής κατανομή.
- Ο θόρυβος που παράγεται από έναν ταλαντωτή είναι σημαντικός, επειδή μπορεί να υποβαθμίσει σοβαρά την απόδοση ενός συστήματος επικοινωνιών. Εκτός από την αύξηση του επιπέδου θορύβου του δέκτη, ένας θορυβώδης τοπικός ταλαντωτής θα οδηγήσει σε down-conversion και ανεπιθύμητες κοντινές συχνότητες, περιορίζοντας έτσι την επιλεκτικότητα του δέκτη και το πόσο κοντά μπορούν να τοποθετηθούν τα γειτονικά κανάλια.
- Ο θόρυβος φάσης ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος σε μία πλευρική ζώνη προς τη συνολική ισχύ σήματος ανά μονάδα εύρους ζώνης (1 Hz) σε μια συγκεκριμένη μετατόπιση, fm, από τη συχνότητα σήματος. Συνήθως εκφράζεται σε **(-dBc/Hz)**. Μια τυπική προδιαγραφή θορύβου φάσης ταλαντωτή μπορεί να είναι -110 dBc/Hz στα 25 kHz από το φέρων.



Μικροκυματικοί Ταλαντωτές

1. Ταλαντωτές διηλεκτρικών συντονιστών/Dielectric Resonator Oscillators (DRO)

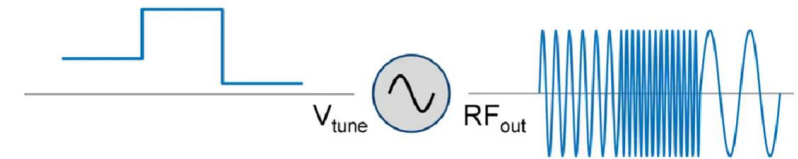
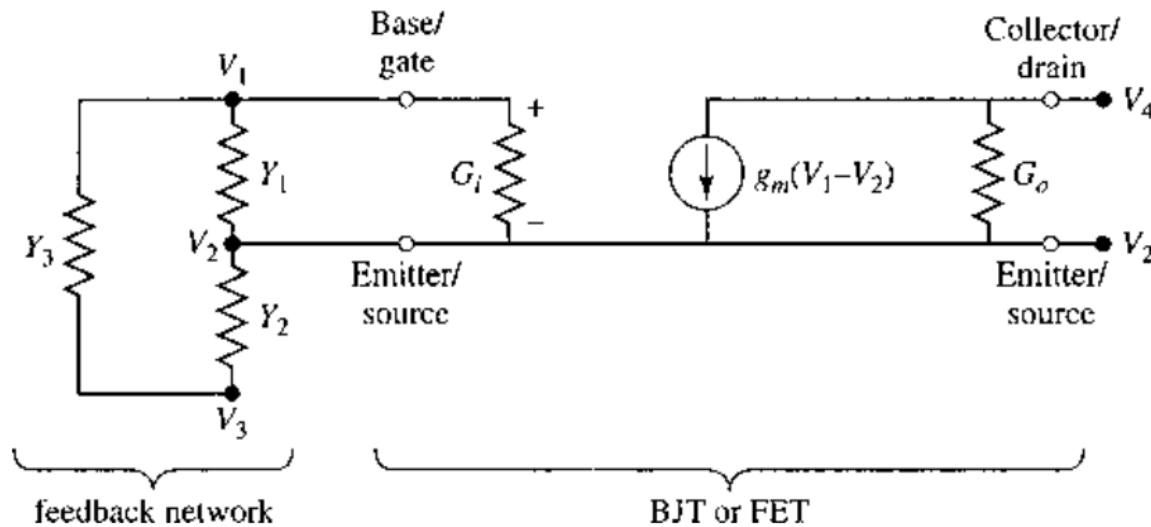
- Διηλεκτρικός συντονιστής: Συντονιστής κατασκευασμένος από κεραμικό υλικό υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς. Παρέχει μια σταθερή αναφορά συχνότητας, διεγείρομενος από ένα αρχικό σήμα και φτάνοντας στη φυσική συχνότητα συντονισμού του, η οποία καθορίζεται από τις φυσικές ιδότητες του διηλεκτρικού και τη γεωμετρία του.
- Ενισχυτής τρανζίστορ: Ενισχύει το σήμα από τον διηλεκτρικό συντονιστή.
- Βρόχος ανάδρασης: Το ενισχυμένο σήμα επιστρέφει στον συντονιστή για να διατηρηθεί η ταλάντωση στην επιθυμητή συχνότητα με βελτιωμένη ποιότητα.



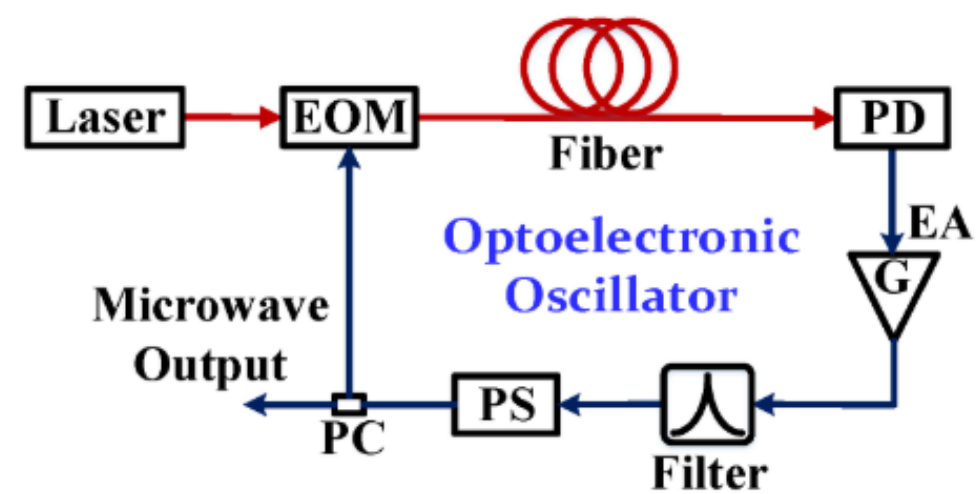
Μικροκυματικοί Ταλαντωτές

2. Ταλαντωτές ελεγχόμενης τάσης/Voltage control oscillators (VCO)

- Ο ταλαντωτής διαθέτει ένα κύκλωμα συντονισμού (LC tank) που καθορίζει τη φυσική συχνότητα ταλάντωσης.
- Μια δίοδος varactor συνδέεται στο κύκλωμα συντονισμού. Η χωρητικότητά της αλλάζει με την εφαρμοζόμενη τάση.
- Η αλλαγή της χωρητικότητας αλλάζει τη συχνότητα συντονισμού και, συνεπώς, τη συχνότητα εξόδου του ταλαντωτή.
- Η ενεργή συσκευή (τρανζίστορ ή FET) παρέχει κέρδος και διατηρεί την ταλάντωση.



Μικροκυματικοί Ταλαντωτές



3. Οπτοηλεκτρονικοί ταλαντωτές (ΟΕΟ)

- Το σήμα ταλάντωσης ενός ΟΕΟ παίζει το ρόλο του σήματος RF οδήγησης που διαμορφώνει το οπτικό φέρον. Ο γρήγορος φωτοανιχνευτής επιτυγχάνει τη φωτοηλεκτρική μετατροπή, δίνοντας ένα ταχύτατο σήμα RF. Το ανακτημένο σήμα RF ενισχύεται, φιλτράρεται και μετατοπίζεται στη φάση. Τέλος, επιστρέφεται στον ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή για το κλείσιμο του βρόχου και την έξοδο μέσω του συζευκτήρα ισχύος.
- Μόλις πληρούνται οι συνθήκες πλάτους και φάσης της ταλάντωσης, ο ΟΕΟ εξάγει ένα σήμα μικροκυμάτων υψηλής ποιότητας.
- Το παραγόμενο σήμα μικροκυμάτων χαρακτηρίζεται από υψηλή φασματική καθαρότητα και χαμηλό θόρυβο φάσης (< -150 dBc/Hz @ 6 kHz offset για ένα φέρον 10 GHz).
- Λόγω του τεράστιου bandwidth των οπτικών διαμορφωτών και φωτοδιόδων, το φέρον μπορεί να παραχθεί σε συχνότητες > 100 GHz, που είναι αδύνατον με άλλες ηλεκτρονικές μεθόδους.

Σύγκριση βασικών μικροκυματικών ταλαντωτών

Χαρακτηριστικό	VCO	DRO	OEO
Συχνότητα φέροντος	<50 GHz	2–100 GHz	0.1–500 GHz
Εύρος μετακίνησης	Σχετικά ευρύ (10–30%)	Περιορισμένο (1–5%)	Ευρύτατο
Θόρυβος Φάσης	Μεγάλος (–90 to –120 dBc/Hz)	Μέτριος (–110 to –150 dBc/Hz)	Χαμηλός (–150 to –180 dBc/Hz)
Σταθερότητα	Μέτρια	Πολύ μεγάλη	Πολύ μεγάλη
Μέγεθος	Μικρό	Μεσαίο	Μεγάλο
Κατανάλωση	Μικρή	Μεσαία	Μεγάλη
Κόστος	Μικρό	Μεσαίο	Μεγάλο
Τυπικές εφαρμογές	RF synthesizers, PLLs, Δορυφορικές	Δορυφορικές, Μικροκυματικές	Ερευνητικές και επόμενης γενιάς δορυφορικές

Ενισχυτές

Βασικές παράμετροι ενισχυτών:

- Κέρδος (gain), συνήθως εκφράζεται σε dB.

$$gain(dB) = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) dB, \quad gain(dB) = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) dB$$

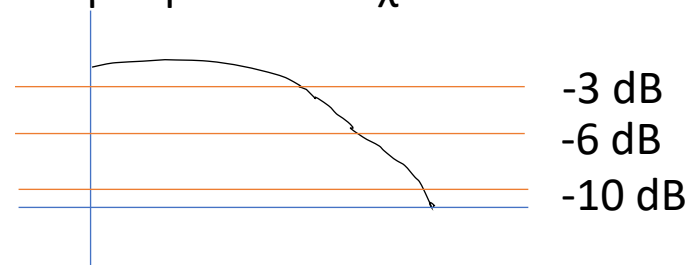
- Λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), συνήθως εκφράζεται σε dB.

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2, \quad SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right)$$

- Εικόνα θορύβου (NF)

$$NF = 10 \log_{10}(F) = 10 \log_{10} \left(\frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \right)$$

- Εύρος ζώνης (Bandwidth): Η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να ενισχύθει.
Συνήθως δίνεται στα -3dB.

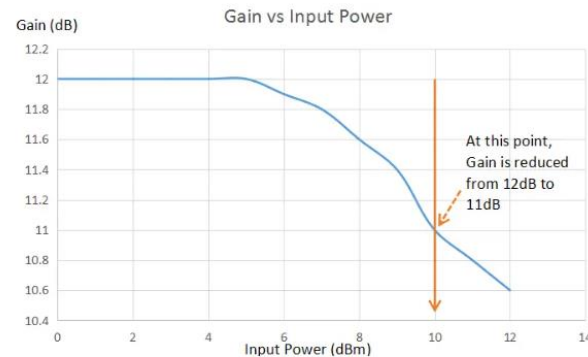
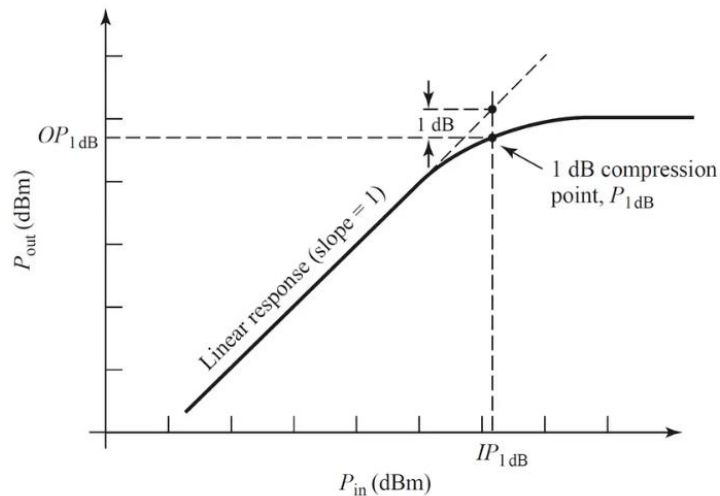


Ενισχυτές LNA

- Ένας ενισχυτής χαμηλού θορύβου (LNA) ενισχύει την τάση ενός σήματος πολύ χαμηλής ισχύος χωρίς να υποβαθμίζει σημαντικά την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR).
- Οποιοσδήποτε ηλεκτρονικός ενισχυτής αυξάνει την ισχύ τόσο του σήματος όσο και του θορύβου που υπάρχει στην είσοδό του, αλλά εισάγει επίσης επιπλέον θόρυβο.
- Οι LNA έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν αυτόν τον επιπλέον θόρυβο, επιλέγοντας ειδικά ηλεκτρονικά, ειδικά σημεία λειτουργίας και ειδικές τοπολογίες κυκλωμάτων. Η ελαχιστοποίηση του πρόσθετου θορύβου πρέπει να εξισορροπείται με άλλους στόχους σχεδιασμού, όπως η επαρκής αύξηση της ισχύος και το μεγάλο εύρος ζώνης.
- **Τυπικά NF είναι της τάξης του ~ 1.5 dB, ενώ το gain ξεπερνά τα ~ 20 dB.**
- Αρκετές φορές χρησιμοποιούνται συστοιχίες από ενισχυτές. **Ο ακριβότερος, με καλύτερα χαρακτηριστικά και μικρότερο θόρυβο, τοποθετείται πάντα πρώτος.**
- Junction field-effect transistors (JFETs) και high-electron-mobility transistors (HEMTs) είναι οι πιο συχνές τεχνολογίες με το GaAs και το InP να είναι οι βασικές πλατφόρμες υλικών. Τα ηλεκτρονικά συνήθως οδηγούνται σε περιοχές με χαμηλό ρεύμα για να μειωθεί ο θόρυβος βολής.

High Power Amplifiers (HPA)

- Ο σκοπός ενός ενισχυτή ισχύος είναι να παρέχει τη μέγιστη ισχύ σε ένα φορτίο με ελάχιστη παραμόρφωση του σήματος.
- Όσον αφορά το επίπεδο του σήματος, ο ενισχυτής ισχύος πρέπει να μεγιστοποιεί την αναλογία σήματος προς θόρυβο σε όρους ισχύος σε σύγκριση με το επίπεδο θορύβου εντός του εύρους ζώνης του σήματος.
- Σημαντικές παράμετροι είναι το gain-bandwidth γινόμενο, η γραμμικότητα και η χαρακτηριστική εισόδου εξόδου (λειτουργούν συνήθως κοντά στην επιρροή κόρου).



TWTA	(Traveling-Wave Tube Amplifier)	C, Ku, Ka	Υψηλή ισχύς, μεγάλο εύρος ζώνης, χρησιμοποιείται στους περισσότερους δορυφόρους επικοινωνιών
SSPA	(Solid-State Power Amplifier)	L, S, C	Μεγαλύτερη αξιοπιστία, χαμηλότερη απόδοση σε υψηλές ισχύς, μικρότερη ισχύς εξόδου
KPA	(Klystron Power Amplifier)	Παλιό σύστημα	Πολύ υψηλή ισχύς, στενό εύρος ζώνης, μεγάλος όγκος και βάρος – σπάνια χρήση σήμερα

Σύγκριση LNA-HPA

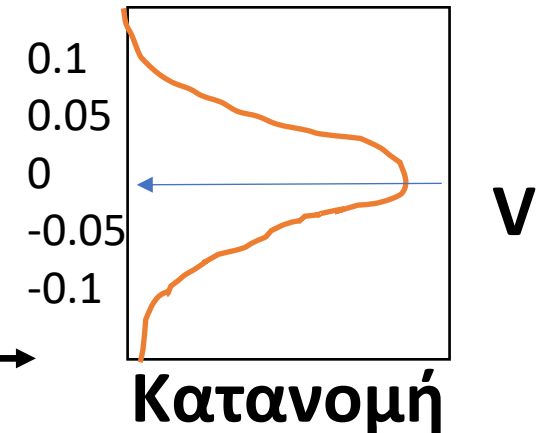
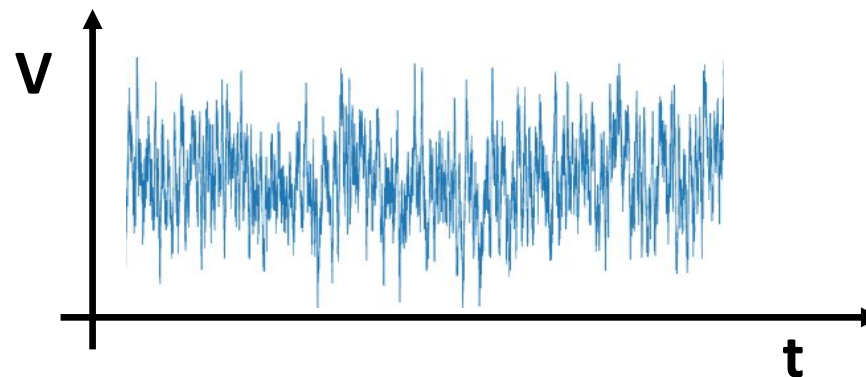
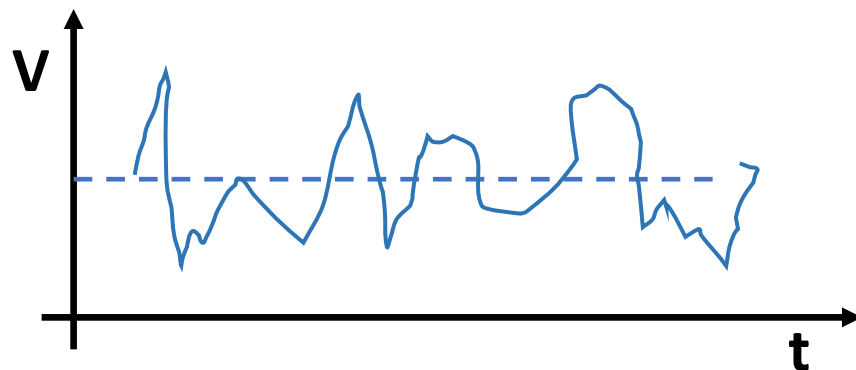
	LNA	HPA
Τοποθέτηση	Μέρος του δέκτη (ακριβώς μετά τη κεραία)	Μέρος του πομπού (ακριβώς πριν την κεραία)
Σήμα εισόδου	-130 dBm έως -90 dBm	0 dBm έως 10 dBm
Τυπικό Gain	10 έως 23 dBm	30 - 40 dBm
NF	<2 dB	>4 dB
Κατανάλωση	Χαμηλή	Υψηλή
Ψύκτρες	Δεν απαιτούνται	Απαιτούνται

Θόρυβος και η αντιμετώπισή του

- Ο θόρυβος είναι μια τυχαία διακύμανση γύρω από το σήμα με μηδενική μέση τιμή
- Έχει πολλές πηγές και πολλά είδη, πολλές από αυτές εγγενής στα συστήματα και αναπόφευκτες.
- Οι τρόποι να αποφύγουμε το θόρυβο μερικώς είναι λίγοι και κυρίως εξαρτώνται από τον κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος.
- Ένα μεγάλο μέρος του κόστους ενός ενισχυτή προκύπτει από τις επιδόσεις του όσον αφορά το θόρυβο.
- Μας ενδιαφέρει να ξέρουμε τις πηγές θορύβου και τα όρια σε κάθε σύστημα έτσι ώστε πχ:
 - Να χρησιμοποιούμε τους κατάλληλους ενισχυτές και φίλτρα
 - Να μην ξοδεύουμε μεγάλα ποσά σε ηλεκτρονικά ενώ το επίπεδο θορύβου τα καθιστά λιγότερο χρήσιμα

Βασικά χαρακτηριστικά του θορύβου

- Είναι τυχαίος, δεν μπορούμε να προβλέψουμε το επόμενο σημείο με βάση τα προηγούμενα
- Έχει μηδενική μέση τιμή
- Είναι σήμα με στατικά χαρακτηριστικά (δεν αλλάζει η τυπική του απόκλιση με το χρόνο, η αιτία του/η φύση του με το χρόνο κλπ)
- Οι διάφορες πηγές θορύβου λειτουργούν αθροιστικά
- Δεν είναι όλες οι αλλοιώσεις θόρυβος
 - Μονοτονικά μεταβαλλόμενες διαταραχές (Θερμική ολίσθηση)
 - DC offsets → Ότι δεν είναι θόρυβος συνήθως μπορεί να αντισταθμιστεί



Φασματικά χαρακτηριστικά του θορύβου

- Ο θόρυβος στο πεδίο του χρόνου είναι άθροισμα τυχαίων μεταβολών (impulses)
- Βάση του μετασχηματισμού Fourier, μια τέτοια μορφή καταλαμβάνει όλες τις συχνότητες ισοπίθανα
- Πιο διαισθητικά: ο θόρυβος αλλάζει τυχαία σε κάθε χρονική στιγμή (πολύ μικρό dt), έτσι η συχνότητες του μπορεί να είναι πολύ μεγάλες (μεγάλο df)
- Ένας θόρυβος που η ισχύς του κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το εύρος ζώνης του, λέγεται λευκός θόρυβος
- Υπάρχουν και συχνотικά μεταβαλλόμενοι θόρυβοι (ροζ θόρυβος, κ.α)

Θόρυβος και φίλτρα

- Επειδή ο θόρυβος (η ισχύς του θορύβου) κατανέμεται σε πολύ μεγάλο εύρος ζώνης, ένα φίλτρο που αποκόπτει μέρος των συχνοτήτων, αποκόπτει ένα μέρος της ισχύος του θορύβου
- Τα φυσικά συστήματα περιγράφονται από συναρτήσεις μεταφοράς με δεδομένο εύρος ζώνης: άρα κάθε φυσικό σύστημα έχει το δικό του επίπεδο θορύβου
- Το φιλτράρισμα είναι ο μόνος τρόπος να μειωθεί η ισχύς του θορύβου σε ένα σύστημα
 - Σχεδιάζουμε τα συστήματά μας έτσι ώστε να αποφύγουμε όσες πηγές θορύβων μπορούμε
 - Δεν χρησιμοποιούμε εξαρτήματα/κυκλώματα με μεγαλύτερο εύρος ζώνης από αυτό που απαιτεί η εφαρμογή
 - Χρησιμοποιούμε φίλτρα (αναλογικά, ψηφιακά) για να περιορίσουμε περαιτέρω το εύρος ζώνης του συστήματος, αν αυτό δεν δυσχαιρένει πολύ τα αποτελέσματά μας

Λόγος σήματος προς θόρυβο

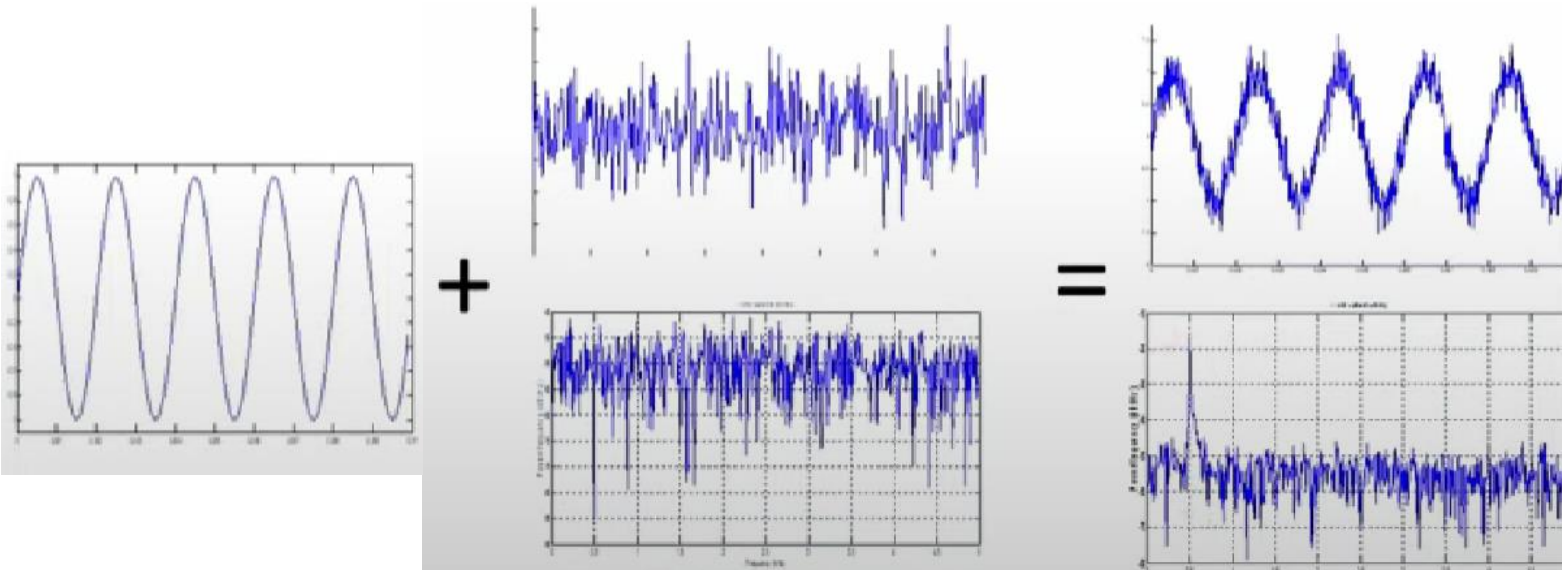
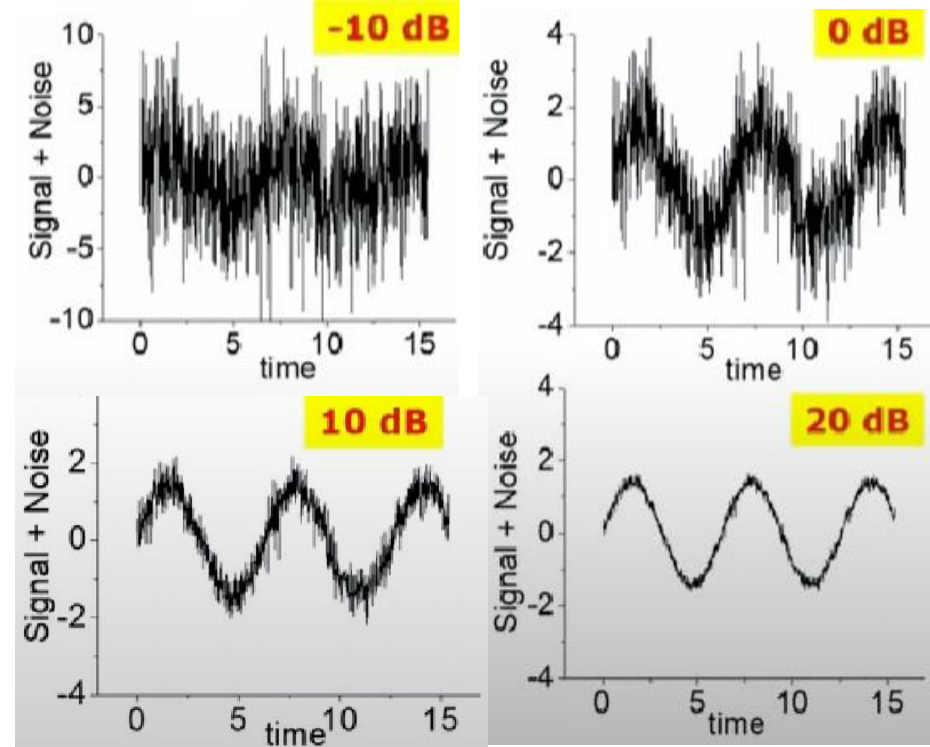
Signal-to-noise ratio or SNR

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad \text{όπου } P_s \text{ το σήμα και } P_n \text{ ο θόρυβος}$$

Μετριέται σε dB (ως λόγος σε λογαριθμική κλίμακα)

- 3 dB διαφορά δυο σημάτων $\rightarrow$ το ένα διπλάσιο του άλλου
- 10 dB διαφορά δύο σημάτων $\rightarrow$ το ένα δεκαπλάσιο του άλλου
- 20 dB διαφορά δύο σημάτων $\rightarrow$ το ένα εκατονταπλάσιο του άλλου

Τι βλέπω για κάθε τιμή SNR



Θερμικός θόρυβος

- Θερμικός ή Johnson ή Johnson-Nyquist θόρυβος είναι ο θόρυβος που οφείλεται στην τυχαία θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων στους αντιστάτες και εμφανίζεται ως μια τάση ανοικτού κυκλώματος.
- Ο θερμικός θόρυβος είναι λευκός, δηλαδή παρουσιάζεται ισοκατανεμημένος σε όλο το φάσμα συχνοτήτων.
- Το πλάτος του ακολουθεί μια Gaussian κατανομή.
- Είναι παρόν σε όλα τα κυκλώματα. Η μέση τετραγωνική διακύμανση της τάσης του δίνεται από την: $V^2 = 4kTR\Delta f$ όπου k , T , R , Δf είναι η σταθερά Boltzmann's, η απόλυτη θερμοκρασία, η αντίσταση και το εύρος ζώνης.
- Όταν αναφερόμαστε σε ισχύ: $P_N = \frac{(V_{rms}^2/2)}{R}$, $P_N = k T B$
- Οι μόνοι τρόποι να μειωθεί είναι να μειώσουμε το εύρος ζώνης ή να μειώσουμε τη θερμοκρασία (το οποίο είναι δύσκολο και ακριβό)

Θόρυβος βολής (Shot noise)

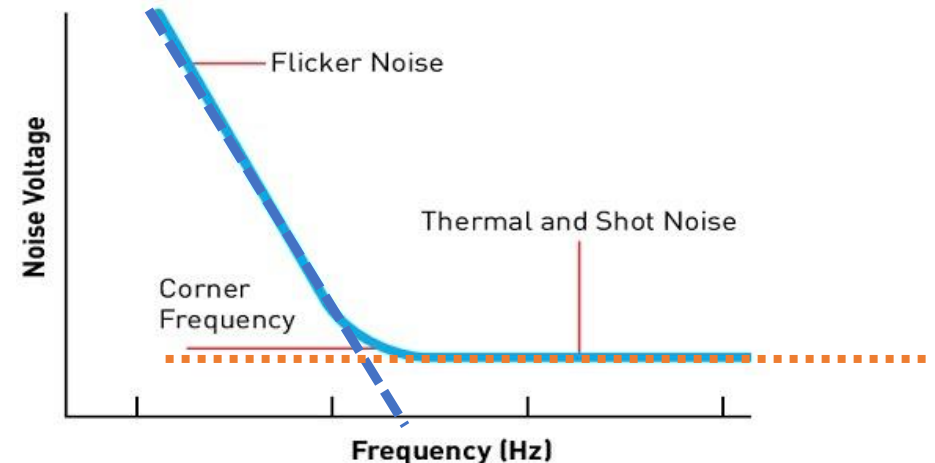
- Ο θόρυβος βολής ή κβαντικός θόρυβος είναι ένας ακόμα Gaussian λευκός θόρυβος.
- Προέρχεται από τις κβαντικές διακυμάνσεις του ηλεκτρικού ρεύματος (τυχαία περάσματα ηλεκτρονίων από ένα φράγμα δυναμικού).
- Το μέσο τετραγωνικό ρεύμα του δίνεται από την: $i^2 = 2qI_{dc}\Delta f$, όπου q , I_{dc} , και Δf είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, το dc ρεύμα, και το εύρος ζώνης. ($P = 2qIBR$)
- Γίνεται κυρίαρχος σε πολύ μικρές τιμές θερμοκρασίας, ή σε μεγάλες τιμές ρεύματος



Flicker θόρυβος

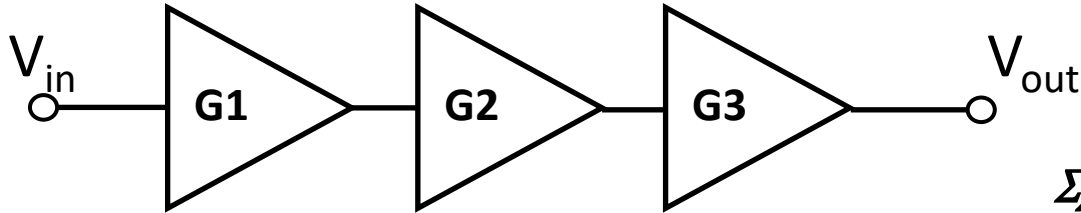
- Flicker, $1/f$, ή ροζ θόρυβος είναι το αποτέλεσμα της διακύμανσης της αγωγιμότητας όταν ένα ρεύμα περνά από μια διεπιφάνεια. Οφείλεται στην παγίδευση και απελευθέρωση φορτίου στις καταστάσεις της διεπιφάνειας (που είναι αργή διαδικασία).
- Το όνομά του προέρχεται από το φάσμα του ($1/f$) και ονομάζεται ροζ επειδή έτσι θα τον βλέπαμε αν το φάσμα εκπομπής του ήταν στο ορατό.
- Οι αντιστάτες από άνθρακα, οι πιεζοαντιστάτες και τα FET εμφανίζουν ροζ θόρυβο ενώ οι αντιστάτες μεταλλικών φιλμ όχι.
- Γίνεται ασήμαντος στις μεγάλες συχνότητες, αλλά δημιουργεί μεγάλο πρόβλημα στις μικρότερες.
- Το μέσο τετραγωνικό ρεύμα του δίνεται από την:

$$i^2 = K \frac{I_{dc}}{f} \quad P = K \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)$$



Θόρυβος σε συστοιχίες ενισχυτών

- Κάθε πηγή θορύβου σε ένα σύστημα θεωρείται ανεξάρτητη από την άλλη. Οι συνεισφορές τους δρουν αθροιστικά.
- Κάθε στάδιο προσθέτει θόρυβο στο προηγούμενο και σε περιπτώσεις ενίσχυσης ενισχύει τον προηγούμενο θόρυβο.
- Έτσι η πιο σημαντική πηγή θορύβου είναι πάντα η πρώτη που παρουσιάζεται σε ενά σύστημα
- Για παράδειγμα, τρεις ενισχυτές σε σειρά παράγουν θόρυβο που δίνεται από την: $V_{out}^2 = (G_1 G_2 G_3)^2 v_1^2 + (G_2 G_3)^2 v_2^2 + (G_3)^2 v_3^2$



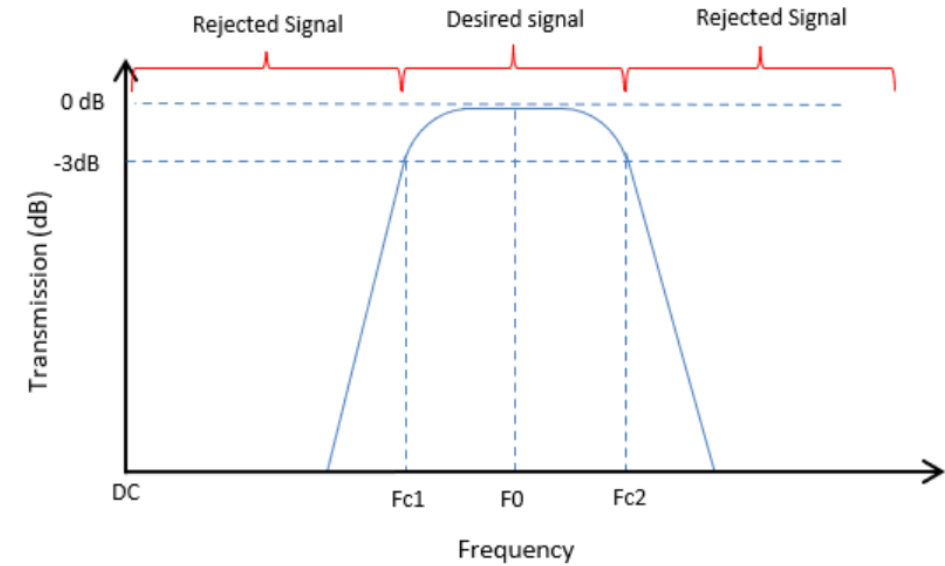
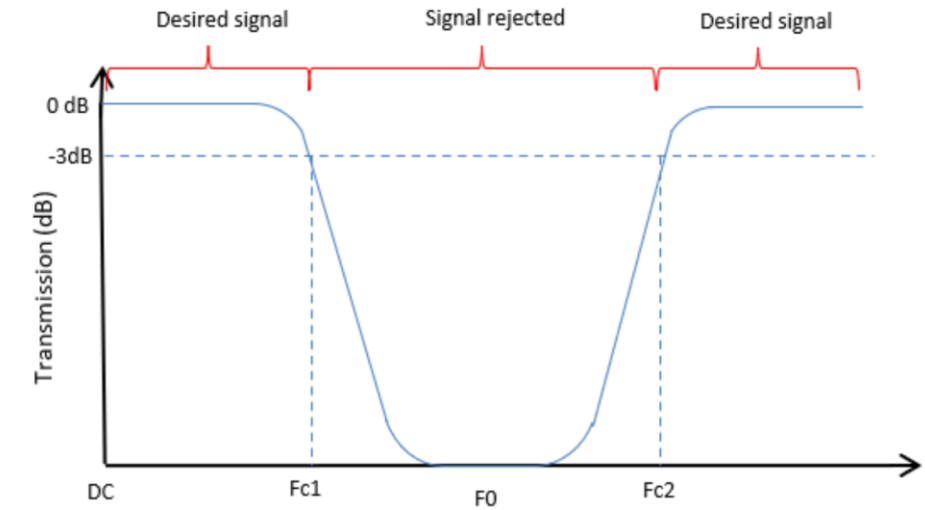
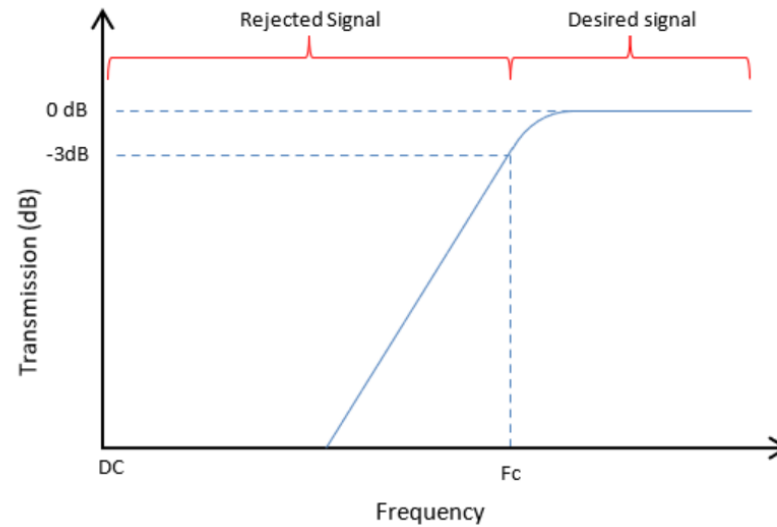
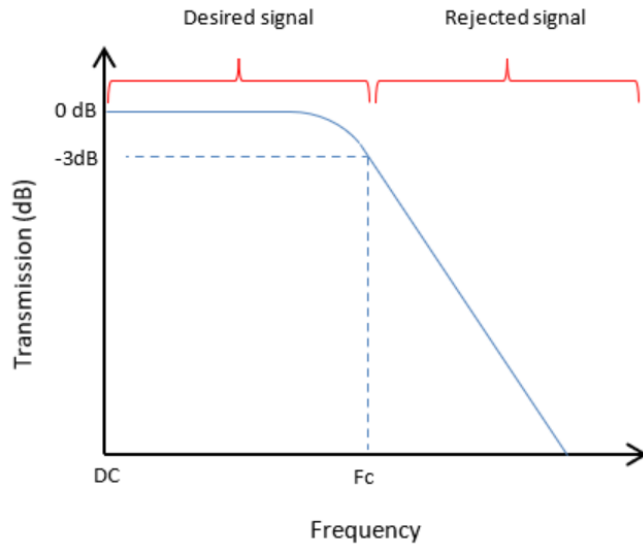
Σχέση του Friis για το θόρυβο: $F_{tot} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$

- Για αυτό οι καλύτεροι low noise amplifiers σε RF συστήματα τοποθετούνται πάντα πρώτοι. Αντίστοιχα προτιμάται η μεγαλύτερη ισχύς να στέλνεται πάντα από τον πομπό.

Μικροκυματικά φίλτρα

Γενικότερα, τα τηλεπικοινωνιακά φίλτρα χωρίζονται σε:

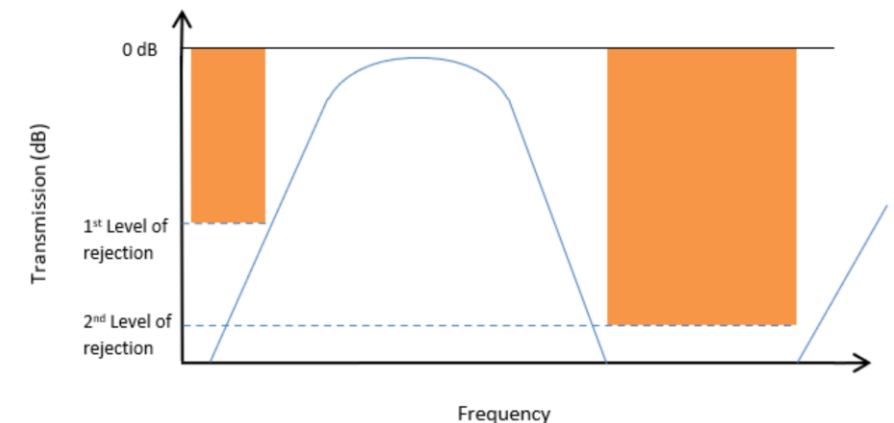
- Χαμηλοπερατά (Low pass) φίλτρα
- Υψηλοπερατά (High pass) φίλτρα
- Ζωνοπερατά (Band pass) φίλτρα
- Αποκοπής ζώνης (Band stop) φίλτρα



Μικροκυματικά φίλτρα

Χαρακτηριστικά και ορισμός προδιαγραφών

- **Συχνότητα αποκοπής:** ορίζει πότε το σήμα εξασθενεί κατά -3dB (άλλες φορές κατά -6 dB κατά σύμβαση), πράγμα που σημαίνει ότι το μισό σήμα (ή το ένα τέταρτο) μεταδίδεται και το άλλο μισό εξασθενεί. Ορίζει αυτό που συχνά ονομάζεται εύρος ζώνης 3dB .
- **Απώλεια εισαγωγής (insertion loss):** ορίζει το μέγεθος της απώλειας ισχύος εντός του εύρους ζώνης συχνότητας του σήματος, δηλαδή τη διαφορά ισχύος μεταξύ της εισόδου και της εξόδου. Κατά το σχεδιασμό ενός φίλτρου, συχνά επιδιώκουμε να ελαχιστοποιήσουμε αυτή τη παράμετρο, προκειμένου να περιορίσουμε τις απώλειες και να βελτιώσουμε τη συνολική απόδοση του συστήματος. Συχνά ορίζει το χρησιμοποιήσιμο εύρος ζώνης του φίλτρου.
- **Βαθμός απόρριψης (Rejection):** ορίζει τις απώλειες έξω από το εύρος ζώνης του φίλτρου. Επιδιώκεται αυτές οι απώλειες να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να απορρίπτονται επαρκώς οι συχνότητες που δεν θέλουμε να φιλτράρουμε.
- **Καθυστέρηση ομάδας:** Η καθυστέρηση ομάδας ποσοτικοποιεί τη γραμμικότητα φάσης που παρατηρείται στο σήμα κατά τη διέλευσή του από το φίλτρο.



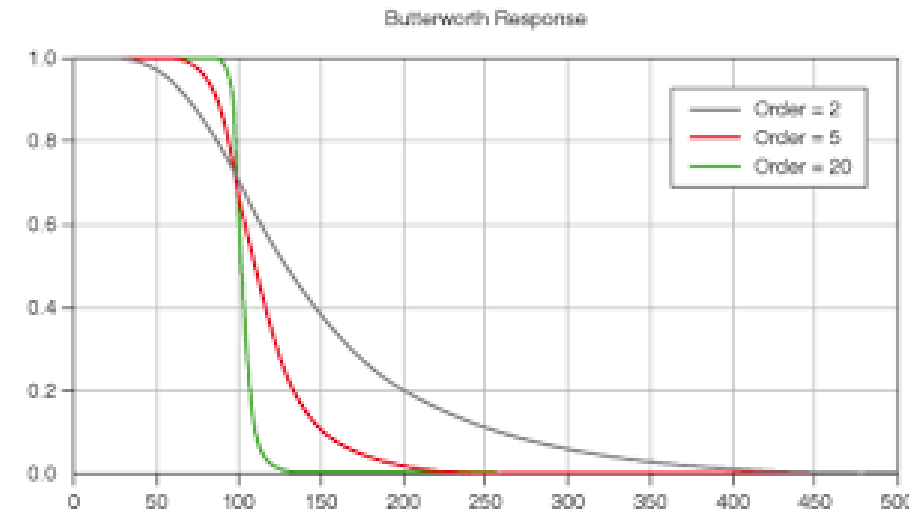
Μικροκυματικά φίλτρα

Q-Factor (Quality factor)

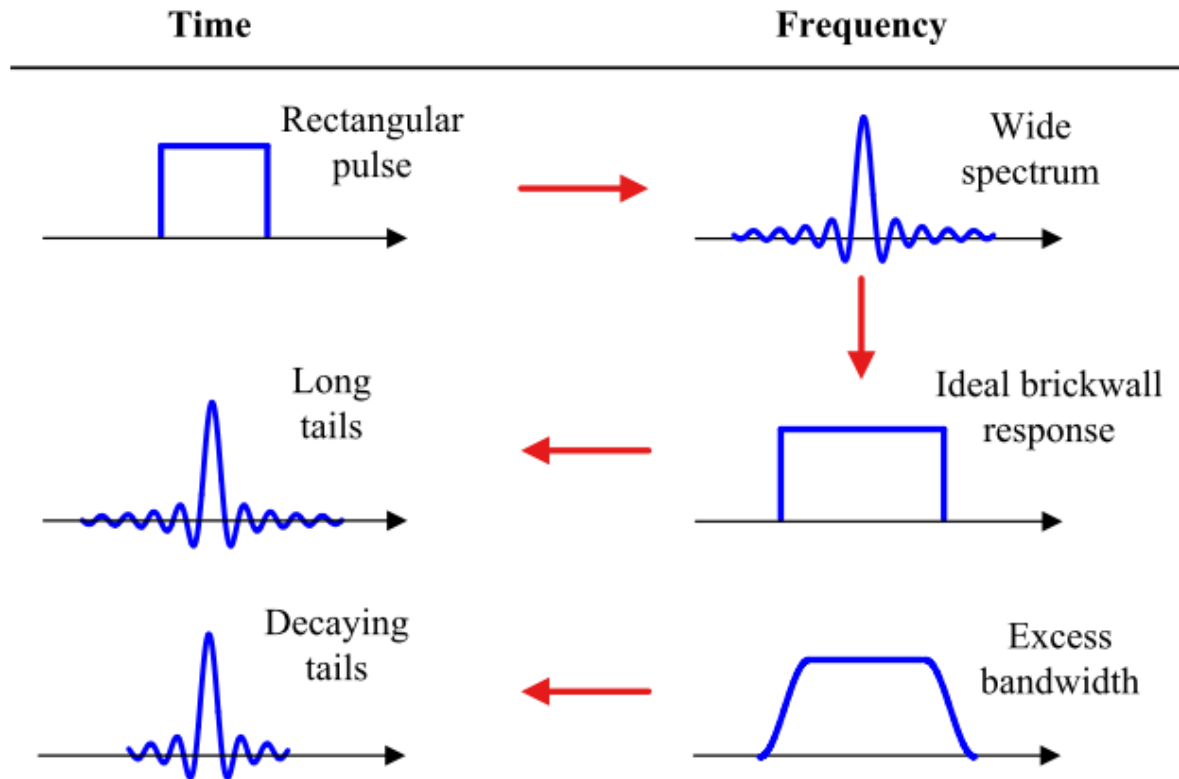
- Είναι ένα από τα σημαντικότερα Figure-of-merits (FOM) ενός φίλτρου.
- Ορίζεται ως $Q = \omega \frac{\text{ενεργεια που αποθηκεύεται στο φίλτρο}}{\text{μεση ισχυς που εισερχεται}}$
- Στα band-pass φίλτρα παίρνει τη μορφή $Q = \omega \frac{f_c}{\Delta f_{-3dB}}$

Steepness

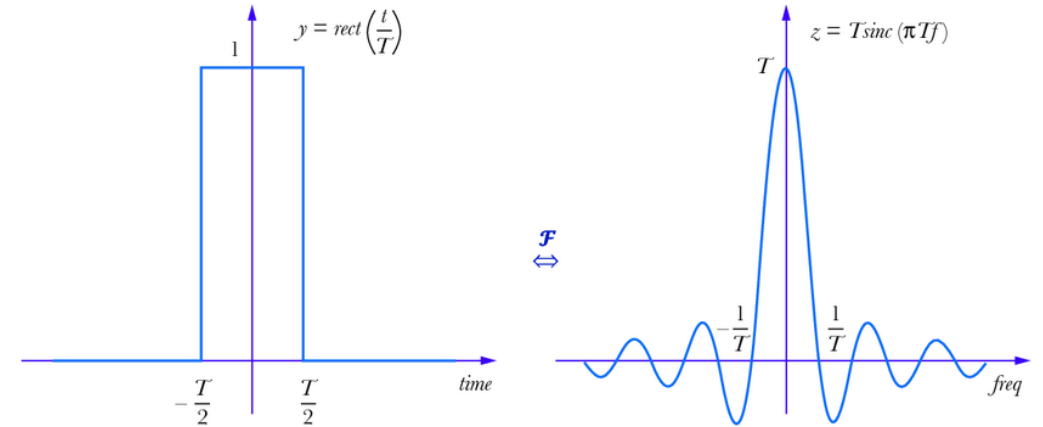
- Το ποιοτικό μέγεθος που ορίζει πόσο γρήγορα ένα φίλτρο εξασθενεί τις συχνότητες πέρα από το ονομαστικό του bandwidth.
- Συνήθως μετريέται σε dB/octave (dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας).
- Τα φίλτρα μεγαλύτερης τάξης (φίλτρα που κατασκευάζονται από συστοιχίες απλούστερων φίλτρων) έχουν μεγαλύτερο steepness.



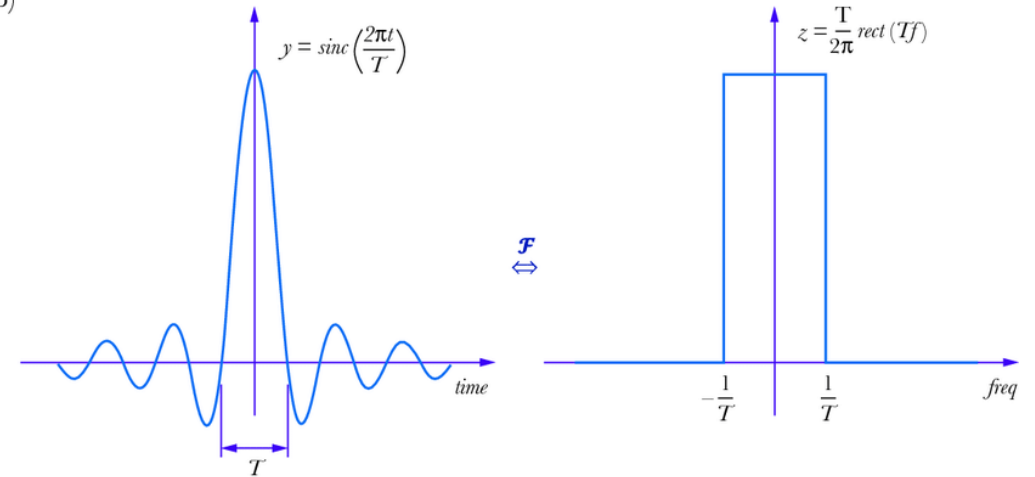
Ψηφιακά Φίλτρα για Μορφοποίηση Παλμών



(a)



(b)



Φίλτρο Τετραγωνικής Ρίζας Ανυψωμένου Συνημιτόνου (RRC)

- **Ανυψωμένο Συνημίτονο (RRC):**

- Θεωρητικό μοντέλο φιλτραρίσματος που μειώνει την ISI.
- Χρησιμοποιεί τον παράγοντα εξασθένισης (Roll-off factor) α ($0 \leq \alpha \leq 1$).

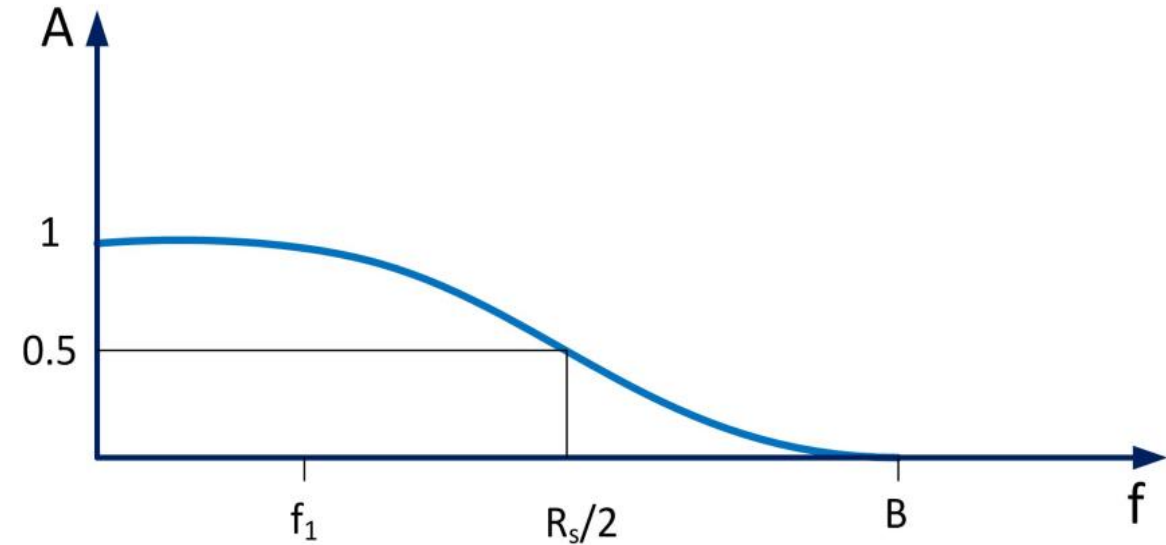
- **Ιδιότητες Φίλτρου RRC:**

- Μείωση φασματικών πλευρικών συνιστωσών.
- Ελεγχόμενη ISI μόνο εκτός στιγμών δειγματοληψίας.

- **Παράγοντας Εξασθένισης:**

- Καθορίζει το υπερβάλλον εύρος ζώνης σε συνάρτηση με τον ρυθμό συμβόλων
- Πραγματικό εύρος ζώνης που καταλαμβάνει ο παλμός για συγκεκριμένο ρυθμό συμβόλων και α .

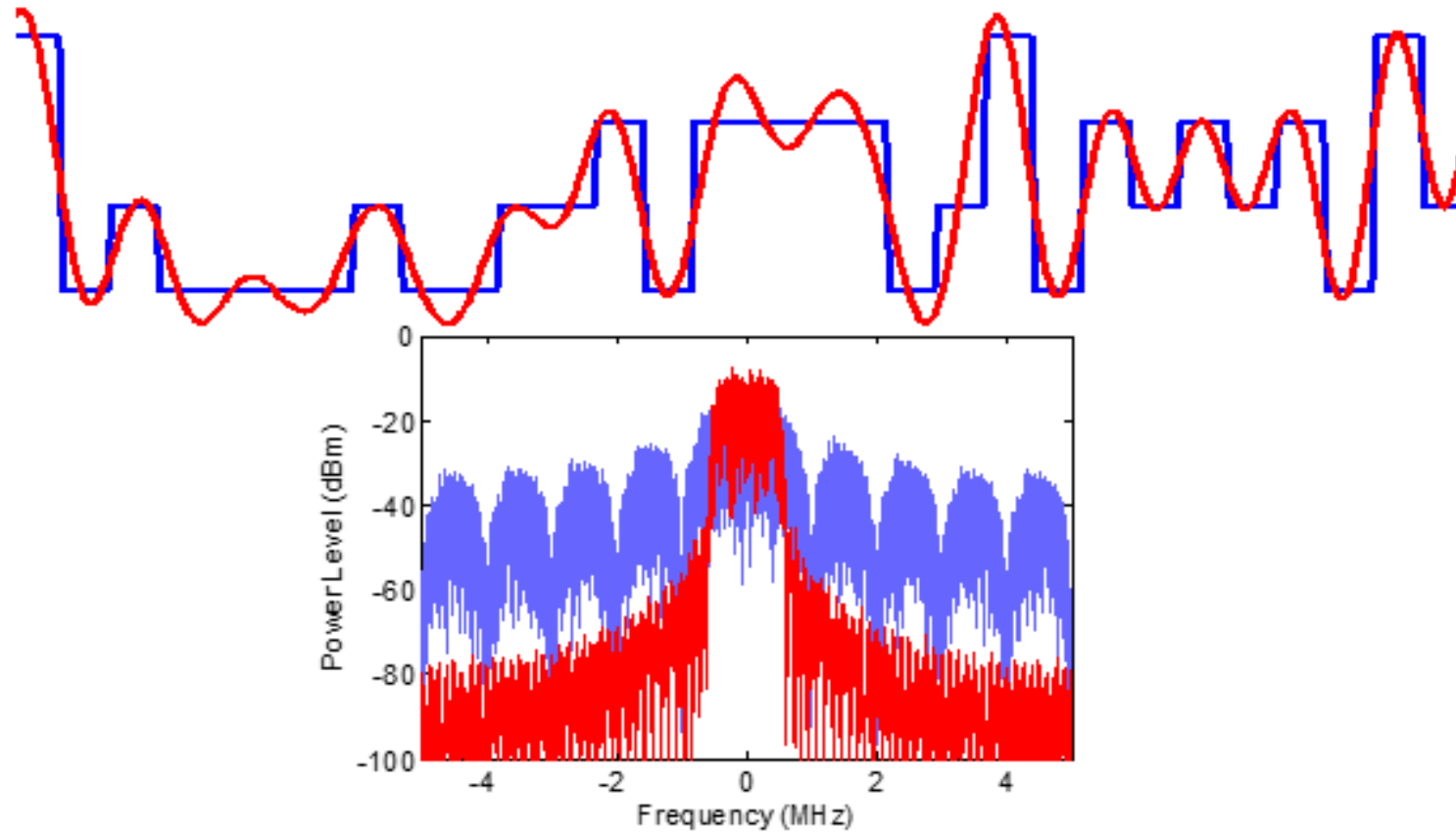
$$B = (1 + \alpha) R_s$$



Η απόκριση συχνότητας του φίλτρου ανυψωμένου συνημιτόνου

Φίλτρα για Μορφοποίηση Παλμών

Pulse Shaping



5/13/2022

Copyright © 2012-2022, Dan Boschen

73

Analog-to-digital converter (ADC)

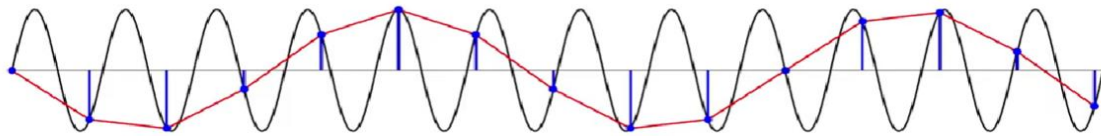
- Δέχονται ως είσοδο μία αναλογική τάση (V_a) και παράγουν X τάσεις εξόδου $V_{OUT}(0)$, $V_{OUT}(1)$, ..., $V_{OUT}(X-2)$, $V_{OUT}(X-1)$.
- Κάθε τάση εξόδου μπορεί να λάβει δύο τιμές (πχ 0 V ή 1 V) και αντιστοιχεί σε ένα bit. Ένας ADC ενός bit (Slicer) δίνει μόνο 0 και 1.
- Το πλήθος των bits (N) που παράγει ένα κύκλωμα ADC ονομάζεται διακριτική ικανότητα (resolution).
- Το πλήθος των διαφορετικών ψηφιακών τιμών που παράγει ένα κύκλωμα ADC είναι 2^N και είναι ακέραιες τιμές μεταξύ 0 και $2^N - 1$.
 - Χωρίζει το διάστημα τιμών $[0, V]$ της αναλογικής τάσης εισόδου σε 2^N υποδιαστήματα.
 - Αριθμεί τα υποδιαστήματα αυτά ως 0, 1, ... , $2^N - 1$.
 - Ανιχνεύει σε ποιο υποδιάστημα βρίσκεται η αναλογική τιμή εισόδου.
 - Παράγει ως ψηφιακή τιμή τον αριθμό του υποδιαστήματος (Κβάντιση)

ADC

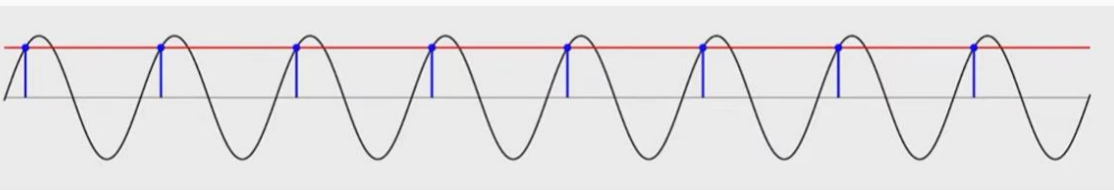
- Ορίζεται το εύρος υποδιαστήματος: $LSB = \frac{V}{2^N - 1} \rightarrow$ πχ για 2 bit $2^2 - 1 = 3$.
Άρα, για $V = 3\text{ V} \rightarrow LSB = 3\text{ V} / 3 = 1\text{ V}$
 - $\rightarrow$ Ότιδήποτε είναι από $-0.5 - 0.5\text{ V}$ δίνει το bit (00)
 - $\rightarrow$ Ότιδήποτε είναι από $0.5 - 1.5\text{ V}$ δίνει το bit (01)
 - $\rightarrow$ Ότιδήποτε είναι από $1.5 - 2.5\text{ V}$ δίνει το bit (10)
 - $\rightarrow$ Ότιδήποτε είναι από $2.5 - 3.5\text{ V}$ δίνει το bit (11)
- Για τη μετατροπή μίας αναλογικής τιμής σε ψηφιακή χρειάζεται κάποιος χρόνος (χρόνος μετατροπής). Επειδή στη διάρκεια της μετατροπής το αναλογικό σήμα μπορεί να έχει αλλάξει τιμή, υπάρχει το ενδεχόμενο να παρατηρηθούν σφάλματα μετατροπής.
- Για την εξάλειψη τέτοιου είδους σφαλμάτων, χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης (Sample and hold ή S/H κύκλωμα) πριν οδηγηθεί το σήμα εισόδου στο ADC.
- Ένα τυπικό κύκλωμα S/H, αποθηκεύει το ηλεκτρικό φορτίο σε έναν πυκνωτή και περιλαμβάνει ένα γρήγορο διακόπτη (υλοποιημένο με FET) σε συνδεσμολογία buffer.

ADC

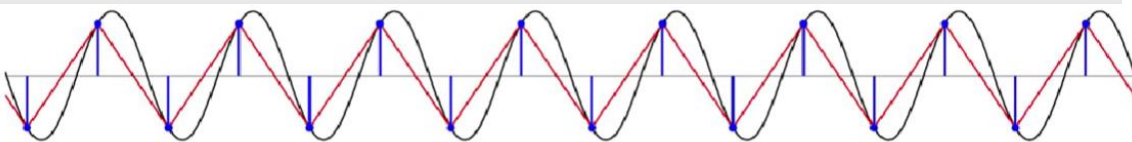
- Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ADC είναι:
 - Το resolution (N bits) και effective number of bits (ENOB<N)
 - Ο ρυθμός δειγματολειτουργίας (Samples per second)
 - Το bandwidth (Hz)
 - Λόγος σήματος προς θόρυβο και παραμορφώσεις (SNDR σε dB)
 - Η κατανάλωση (W)
- Σύμφωνα με το θεώρημα του Nyquist θέλουμε ο ρυθμός δειγματολειτουργίας να είναι τουλάχιστον διπλάσιος από τη μέγιστη συχνότητα που θέλουμε να μετρήσουμε, αλλιώς δημιουργείται το φαινόμενο του aliasing.



$$f_s/f=0.7$$



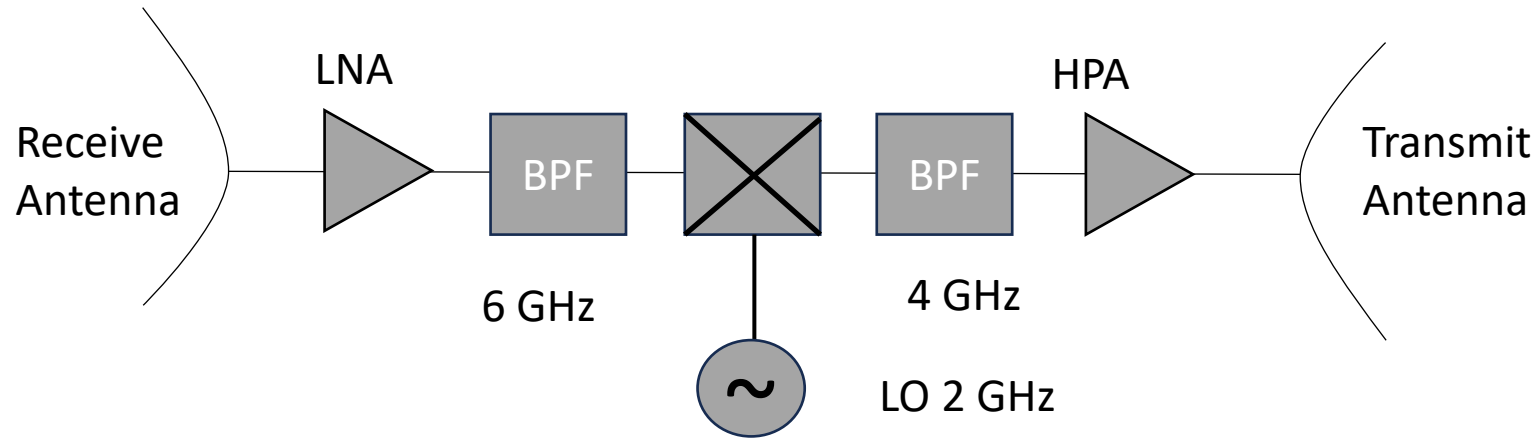
$$f_s/f=1$$



$$f_s/f=2$$

❖ Πολλές φορές χρησιμοποιούνται φίλτρα για να περιορίσουν την πραγματική συχνότητα του σήματος στο μισό της συχνότητας δειγματολειτουργίας που διαθέτουμε!

Single conversion transponder



Σήμα εισόδου:

$$x(t) = A \cos(2\pi f_{6\text{GHz}} t)$$

Σήμα μετά το μείκτη:

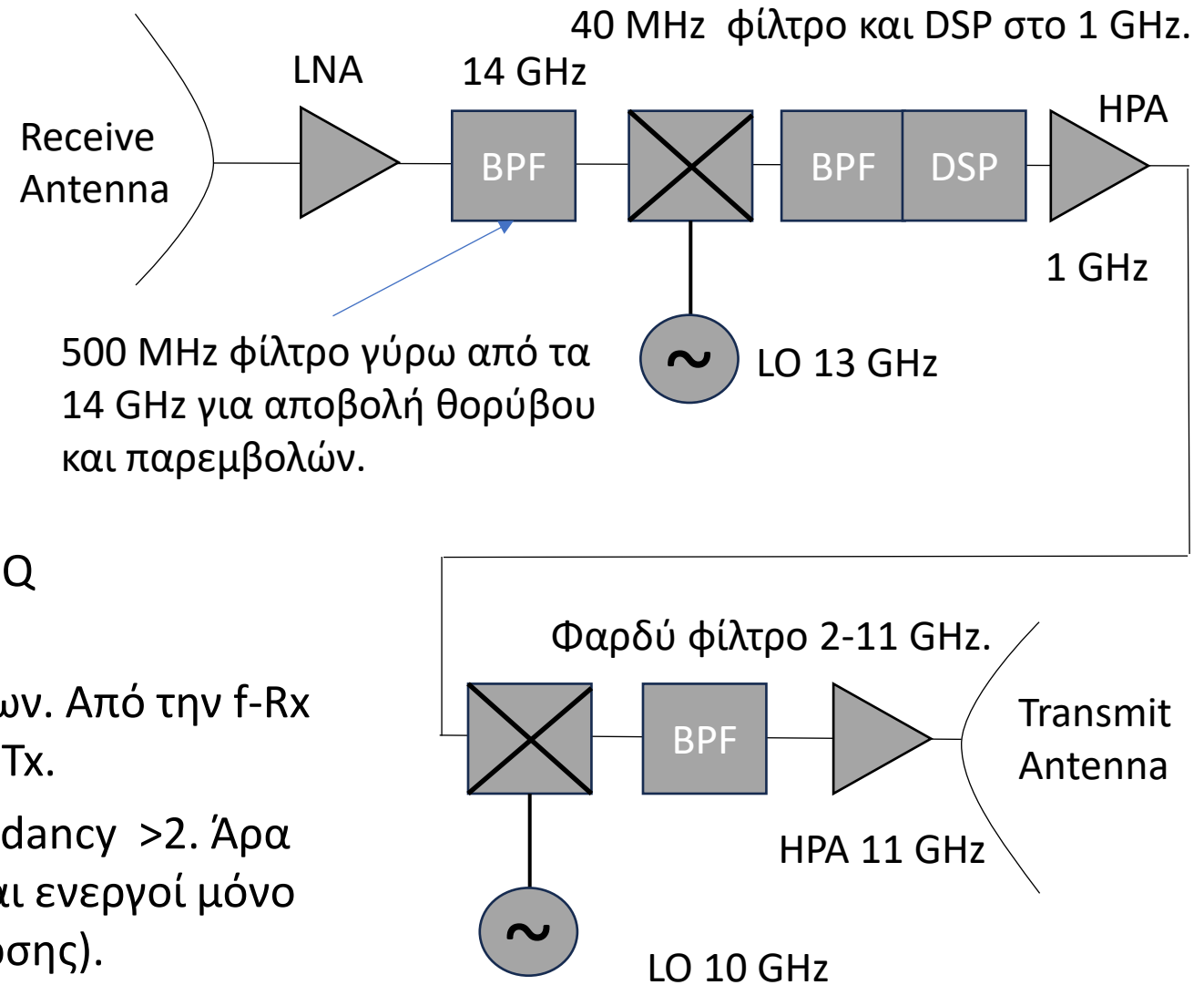
$$x(t) = K A \cos(2\pi f_{6\text{GHz}} t) X_{LO} \cos(2\pi f_{LO} t) = \frac{1}{2} K A \cos(2\pi (f_{6\text{GHz}} - f_{LO}) t) + \frac{1}{2} K A \cos(f_{6\text{GHz}} + 2\pi f_{LO} t)$$

Σήμα μετά το φίλτρο και τον ενισχυτή:

$$x(t) = G K A \cos(2\pi (f_{6\text{GHz}} - f_{LO}) t)$$

Double conversion transponder

- Για λειτουργία σε μεγαλύτερης συχνότητας ζώνες, τα ηλεκτρονικά γίνονται πιο ακριβά και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια.
- Το κομμάτι με τη μεγαλύτερη κατανάλωση συνήθως αφορά την ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP). → Επεξεργασία έως 2-3 GHz, μετά από εκεί pipelining.
- Απαιτητική η κατασκευή φίλτρων πολύ μεγάλου Q (πχ. 40 MHz εύρος ζώνης σε συχνότητα 10 GHz).
- Χρησιμοποιείται συχνά η μετατροπή δύο βημάτων. Από την f_{-Rx} σε ενδιάμεση συχνότητα (IF) και από εκεί στην f_{-Tx} .
- Μειονέκτημα οι 2 HPAs. Συνήθως υπάρχει redundancy >2. Άρα στο δορυφόρο τοποθετούνται 4 HPAs για να είναι ενεργοί μόνο 2 (καλύπτονται οι περιπτώσεις πρόωρης απόσυρσης).



Άσκηση στους ενισχυτές

- Ένας ΗΡΑ προσφέρει κέρδος $G=50 \text{ dB}$.
Αν η ισχύς στην είσοδο του ενισχυτή είναι -25 dBm , βρείτε την ισχύ εξόδου σε **dBm** και σε **Watt** και σε **dBW**.

- $P(W) = 10^{(dBm-30)/10}$
- $P(dBW) = P(dBm) - 30$

- **Λύση:**

- $P_{out(dBm)} = P_{in(dBm)} + G(dB) = -25 + 50 = 25 \text{ dBm}$
- $P_{out(W)} = 10^{(25-30)/10} = 10^{-0.5} = 0.316 \text{ W}$
- $P(dBW) = 25 - 30 = -5 \text{ dBW}$

Άσκηση στους ενισχυτές

- Έχουμε τρεις ενισχυτές σε σειρά (από είσοδο προς έξοδο):
 - **Ενισχυτής 1 (LNA):** κέρδος $G_1 = 20 \text{ dB}$, εικόνα θορύβου $NF_1 = 1.5 \text{ dB}$.
 - **Ενισχυτής 2 (IF amp):** κέρδος $G_2 = 15 \text{ dB}$, εικόνα θορύβου $NF_2 = 3.0 \text{ dB}$.
 - **Ενισχυτής 3 (HPA driver):** κέρδος $G_3 = 30 \text{ dB}$, εικόνα θορύβου $NF_3 = 6.0 \text{ dB}$.
- Υπολόγισε το **συνολικό κέρδος** της αλυσίδας σε dB και σε γραμμική αναλογία.
- Υπολόγισε τη **συνολική εικόνα θορύβου (NF total)** της αλυσίδας σε dB
- Για να μετατρέψουμε dB $\rightarrow$ γραμμική αναλογία ισχύος: $G_{linear} = 10^{G_{dB}/10}$
- $G_1 = 20 \text{ dB} \Rightarrow G_1 = 10^{20/10} = 10^2 = 10$
- $G_2 = 15 \text{ dB} \Rightarrow G_2 = 10^{15/10} = 10^{1.5} \approx 31.6227766$
- $G_3 = 30 \text{ dB} \Rightarrow G_3 = 10^{30/10} = 10^3 = 1000$
- Το συνολικό κέρδος σε dB είναι άθροισμα των κερδών (όταν είναι σε dB):
- $G_{tot(dB)} = G_1 + G_2 + G_3 = 20 + 15 + 30 = 65 \text{ dB}$.
- Σε γραμμική αναλογία:
- $G_{tot} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 10 \times 31.6227766 \times 1000 \approx 3162277.66$ (Επίσης $10^{65/10} = 10^{6.5} \approx 3162277.66$)

- Εικόνα θορύβου (NF) σε dB $\rightarrow$ παράγοντας θορύβου F (γραμμικά):
 - $F = 10^{NF/10}$.
 - $NF_1 = 1.5 \text{ dB} \Rightarrow F_1 = 10^{1.5/10} = 10^{0.15} \approx 1.412537545$.
 - $NF_2 = 3.0 \text{ dB} \Rightarrow F_2 = 10^{3/10} = 10^{0.3} \approx 1.995262315$.
 - $NF_3 = 6.0 \text{ dB} \Rightarrow F_3 = 10^{6/10} = 10^{0.6} \approx 3.981071706$.
- Ο τύπος Friis για σειριακά στάδια (όταν τα κέρδη και οι παράγοντες είναι σε γραμμική μορφή):
 - $F_{tot} = F_1 + \frac{F_2-1}{G_1} + \frac{F_3-1}{G_1 G_2} + \dots$
- Εδώ έχουμε τρία στάδια, άρα:
 - Υπολογίζουμε το $\frac{F_2-1}{G_1} = \frac{1.995262315-1}{100} = \frac{0.995262315}{100} = 0.00995262315$.
 - $\frac{F_3-1}{G_1 G_2} = \frac{3.981071706-1}{3162.27766} = \frac{2.981071706}{3162.27766} \approx 0.000942809$.
 - $F_{tot} \approx 1.412537545 + 0.00995262315 + 0.000942809 \approx 1.423432977$.
- Μετατροπή σε dB: $NF_{tot(dB)} = 10 \log_{10}(F_{tot}) \Rightarrow NF_{tot(dB)} \approx 10 \times 0.1530 \approx 1.53 \text{ dB}$.
- ❖ Σημείωση: η συνολική εικόνα θορύβου παραμένει κοντά στην εικόνα του πρώτου ενισχυτή (1.5 dB) επειδή ο πρώτος ενισχυτής έχει μεγάλο κέρδος και έτσι «καταπνίγει» τον θόρυβο των επόμενων σταδίων — αυτό είναι το βασικό μάθημα του Friis.

Άσκηση στον θερμικό θόρυβο

Ένας αντιστάτης $R = 50 \Omega$ λειτουργεί σε θερμοκρασία $T = 290 \text{ K}$. Το σήμα του διέρχεται από δέκτη με εύρος ζώνης $B = 10 \text{ MHz}$.

Να υπολογιστούν:

1. Η ισχύς θερμικού θορύβου σε Watt και σε dBm.
2. Η τάση θορύβου (rms) στα άκρα του αντιστάτη.
3. Αν το εύρος ζώνης αυξηθεί στα 20 MHz, τι αλλάζει στην ισχύ και στην τάση θορύβου;
4. Πώς μεταβάλλεται ο θόρυβος αν η θερμοκρασία αυξηθεί στους 580 K;

1) $P_N = k T B = (1.38 \times 10^{-23})(290)(10^7) = 4.002 \times 10^{-14} \text{ W}.$

• $P_{dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_N}{10^{-3}} \right) = 10 \log_{10}(4.0 \times 10^{-11}) = 10(-10.397) = -103.97 \text{ dBm}.$

2) Για έναν αντιστάτη R , η rms τάση θορύβου είναι: $V_N = \sqrt{4 k T R B}.$

• $V_N = \sqrt{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 290 \times 50 \times 10^7} = \sqrt{8.004 \times 10^{-11}} = 8.95 \times 10^{-6} \text{ V} = 8.95 \mu\text{V}.$

3) Η ισχύς θορύβου είναι ανάλογη του εύρους ζώνης (B).

• $P'_N = k T B' = 2 \times 4.0 \times 10^{-14} = 8.0 \times 10^{-14} \text{ W}.$

• $10 \log_{10}(8.0 \times 10^{-11}) = -100.97 \text{ dBm}.$

• Η rms τάση μεγαλώνει ως $\sqrt{B}$: $V'_N = \sqrt{2} V_N = 1.414 \times 8.95 = 12.7 \mu\text{V}$

4) $P''_N = k T'' B = 2 \times 4.0 \times 10^{-14} = 8.0 \times 10^{-14} \text{ W}.$ $V''_N = \sqrt{2} V_N = 1.414 \times 8.95 = 12.7 \mu\text{V}.$

Άσκηση στη μετάδοση QPSK σήματος

- Έστω σύστημα **QPSK** με:
 - Ρυθμό bit $R_b = 10 \text{ Mbps}$.
 - Διαμόρφωση QPSK (2 bits/σύμβολο).
 - Χρησιμοποιείται RRC φίλτρο για pulse shaping με roll-off factor $\alpha = 0.25$.
- 1. Υπολόγισε τον **ρυθμό συμβόλων** R_s .
- 2. Βρείτε από τη γραφική παράσταση το **ελάχιστο απαιτούμενο E_b/N_0 (dB)** ώστε $BER = 10^{-5}$.
- 3. Υπολόγισε το **E_s/N_0 (dB)**.
- 4. Υπολόγισε το **bandwidth του καναλιού**.
- 5. Υπολόγισε τη **φασματική αποδοτικότητα (bits/s/Hz)**.
- 6. Πόση πρέπει να είναι η ελάχιστη συχνότητα δειγματολειτουργίας για να αποφευχθεί το aliasing?
- 7. Αν ο ADC που διαθέτουμε έχει $f_s = 11 \text{ Msps}$, τι απαιτείται στο RRC φίλτρο;

1) Ρυθμός συμβόλων R_s

- QPSK: 2 bits ανά σύμβολο, οπότε: $R_s = \frac{R_b}{2} = \frac{10 \times 10^6}{2} = 5 \times 10^6 \text{ symbols/s(baud)} = 5 \text{ Mbaud}$.

2) Από τη γραφική $E_s/N_0=9.59 \text{ dB}$.

3) Από E_b/N_0 σε E_s/N_0

- QPSK: κάθε σύμβολο μεταφέρει $k = 2 \text{ bits}$, άρα $\frac{E_s}{N_0} = k \frac{E_b}{N_0} = 2 \frac{E_b}{N_0}$.
- Σε dB προσθέτουμε $10 \log_{10}(2) = 3.01 \text{ dB}$.
- Άρα $E_s/N_0 \text{ (dB)} \approx 9.59 + 3.01 = 12.60 \text{ dB}$.

4) Channel bandwidth

- Η κατεχόμενη ζώνη με RRC roll-off α είναι: $B = (1 + \alpha) R_s$.
- Εδώ $R_s = 5 \text{ Mbaud}$, $\alpha = 0.25$: $B = (1 + 0.25) \times 5 \times 10^6 = 1.25 \times 5 \times 10^6 = 6.25 \times 10^6 \text{ Hz} = 6.25 \text{ MHz}$.

5) Φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency)

- Φασματική αποδοτικότητα $\eta = \text{bits/s/Hz} = R_b/B$.
- $\eta = \frac{10 \times 10^6}{6.25 \times 10^6} = 1.6 \text{ bits/s/Hz}$.

6) Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας

- Διπλάσια της μέγιστης συχνότητας που βρίσκεται στο εύρος ζώνης (Θεώρημα Nyquist). Άρα $f_s > 12.5 \text{ Msps}$

7) Νέο roll-off factor

- Θέλουμε το $B=5.5 \text{ MHz}$. Άρα $B = (1 + \alpha) \times 5 \times 10^6$ ή $\alpha = \frac{5.5 \times 10^6}{5 \times 10^6} - 1 = 1.1 - 1 = 0.1$