

Τμήμα
Μηχανικών
Πληροφορικής τ.ε.
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Δυτικής Ελλάδας

Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα Ι

Διάλεξη 3: Ο Θόρυβος στα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

Δρ. Μιχάλης Παρασκευάς
Επίκουρος Καθηγητής

Ατζέντα

- Εισαγωγή
- Τύποι Θορύβου
 - Θερμικός θόρυβος
 - Θόρυβος βολής
 - Θόρυβος περιβάλλοντος
 - Κρουστικός θόρυβος
- Κατηγορίες Θορύβου
 - Προσθετικός θόρυβος
 - Πολλαπλασιαστικός θόρυβος
- Θερμικός Θόρυβος
- Λευκός θόρυβος
- Ζωνοπερατός θόρυβος

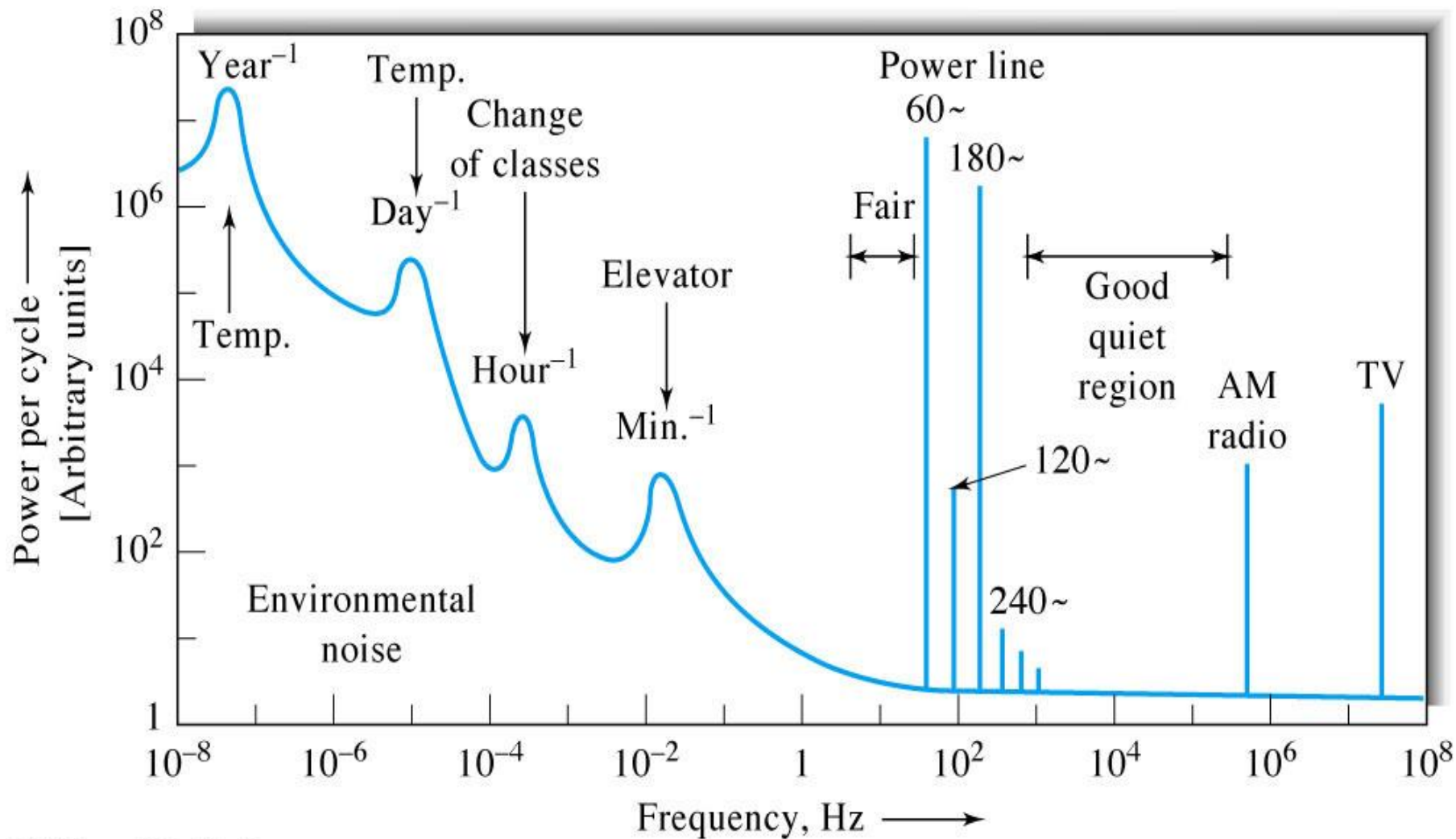
Εισαγωγή



- Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα αποτελούνται από ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία δημιουργούν θόρυβο.
- Ο θόρυβος είναι η κυριότερη αιτία υποβάθμισης της ποιότητας επικοινωνίας.
 - εισάγει αβεβαιότητα στη διαδικασία ανάκτησης από το δέκτη της εκπεμπόμενης πληροφορίας.
- Υπάρχουν διάφοροι τύποι θορύβου οι οποίοι δημιουργούνται από διαφορετικά αίτια. Οι περισσότεροι από αυτούς έχουν "ηλεκτρική" προέλευση, με την έννοια ότι συνδέονται με την κίνηση ηλεκτρικών φορέων (π.χ. ηλεκτρόνια) υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

Εισαγωγή

NOISE



Τύποι Θορύβου

- Οι κυριότεροι τύποι θορύβου που εμπλέκονται σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι:
 - *Θερμικός θόρυβος (Thermal noise.) ή θόρυβος Johnson*
 - εκφράζει τη θερμική διαταραχή λόγω της θερμικής διέγερσης των ηλεκτρονίων
 - πήρε την ονομασία του από τον τρόπο που δημιουργείται
 - έχει σπουδαία σημασία στις τηλεπικοινωνίες, αφού εμφανίζεται στις ωμικές αντιστάσεις των ηλεκτρονικών διατάξεων
 - *Θόρυβος Schottky ή θόρυβος βολής*
 - παρατηρείται κυρίως στην επαφή· ημιαγωγών των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και συνδέεται με την τυχαία εκπομπή ή άφιξη των ηλεκτρονίων στην άνοδο.

Τύποι Θορύβου

- *θόρυβος του περιβάλλοντος*, γνωστός και ως *Παρεμβολή (Interference)*
 - οφείλεται σε διάφορα αίτια εκτός των ηλεκτρονικών διατάξεων που εμπλέκονται στην επικοινωνία. Παραδείγματα παρεμβολών είναι ο θόρυβος από άλλους χρήστες, από άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, από ατμοσφαιρικά παράσιτα, κ.λπ.
- Στην κατηγορία της παρεμβολής ανήκει και ο λεγόμενος *Κρουστικός θόρυβος (Impulsive Noise)*
 - εκδηλώνεται υπό τη μορφή *ριπών (burst)* μεγάλου πλάτους και πολύ μικρής διάρκειας
 - Παρατηρείται σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές
 - προκαλεί κυρίως προβλήματα συγχρονισμού των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων
 - μπορεί να δημιουργηθεί από τα συστήματα εκκίνησης των αυτοκινήτων (μίζες), από τις γραμμές μεταφοράς ρεύματος, τις λάμπες φθορίου, βιομηχανικούς διακόπτες ρεύματος, κ.λπ.

Κατηγορίες Θορύβου

- Οι διάφοροι τύποι θορύβου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:
 - **Προσθετικός θόρυβος:** το λαμβανόμενο σήμα και ο θόρυβος προστίθενται στο δέκτη
 - $r(t) = s(t) + n(t)$
όπου $r(t)$ είναι το λαμβανόμενο σήμα, $s(t)$ το σήμα πληροφορίας και $n(t)$ ο θόρυβος
 - **Πολλαπλασιαστικός θόρυβος:** ο θόρυβος επιδρά πολλαπλασιαστικά
 - $r(t) = s(t) \times \alpha(t)$
ο παράγοντας $\alpha(t)$ χαρακτηρίζει την τυχαία μεταβολή του καναλιού και η επίδρασή του στο σήμα πληροφορίας είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από αυτή του προσθετικού θορύβου. Τέτοια περίπτωση είναι οι διαλείψεις (fading) σε ασύρματα κανάλια.
- Συχνά σε πρακτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα εμφανίζονται ταυτόχρονα και τα δύο παραπάνω είδη θορύβου (π.χ. ασύρματες επικοινωνίες).

Θερμικός Θόρυβος

- Ο *θερμικός θόρυβος* (Thermal noise) ή θόρυβος Johnson μελετήθηκε από τους Johnson και Nyquist το 1928 σε μεταλλικούς αγωγούς.

- Αν $v(t)$ είναι η στιγμιαία τάση στα άκρα ενός αγωγού με αντίσταση R Ohm εξαιτίας της κίνησης των ηλεκτρονίων, η $v(t)$ είναι τυχαία διαδικασία και τα δείγματα αυτής είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν Gaussian κατανομή με μέση τιμή μηδέν και Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (ΣΠΠ)

$$f_v(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \text{ όπου } \sigma^2 \text{ είναι η διακύμανση της κατανομής}$$

- Από τις εργασίες των Johnson και Nyquist αποδείχθηκε ότι

$$\sigma^2 \triangleq E[x^2] = 4kTRW$$

- k είναι η σταθερά Boltzmann, με $k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$
- T η θερμοκρασία της αντίστασης σε $^{\circ}K$.
- W το εύρος ζώνης των συχνοτήτων λειτουργίας σε Hz και

Θερμικός Θόρυβος

- Η Φασματική Πυκνότητα Ισχύος της $v(t)$ αποδεικνύεται πως έχει σταθερή τιμή για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων (πρακτικά για όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα)

$$S_v(f) = 2RkT \frac{V^2}{Hz}, |f| \leq 10^{12} Hz$$

- Η ισχύς του θορύβου είναι

$$p_n = 4kTW$$

- Στους δέκτες ο θερμικός θόρυβος προστίθεται με αυτόν που οφείλεται στα ενεργά στοιχεία.

Λευκός Θόρυβος

- Από την προηγούμενη διαφάνεια προκύπτει ότι ο θερμικός θόρυβος έχει **επίπεδο φάσμα** (σταθερή τιμή φασματικής πυκνότητας ισχύος σε μία πολύ μεγάλη περιοχή συχνοτήτων).
- Το ίδιο συμβαίνει και για άλλα είδη θορύβου, όπως ο θόρυβος Schottky που εμφανίζεται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα.
- Ο θόρυβος ο οποίος παρουσιάζει την ιδιότητα του επίπεδου φάσματος ονομάζεται **λευκός θόρυβος** (white noise), σε αντιστοιχία με το λευκό φως το οποίο σε κάθε περιοχή Δf του φάσματος παρουσιάζει την ίδια ενέργεια.
- Η φασματική πυκνότητα ισχύος του λευκού θορύβου δίνεται από τη σχέση:

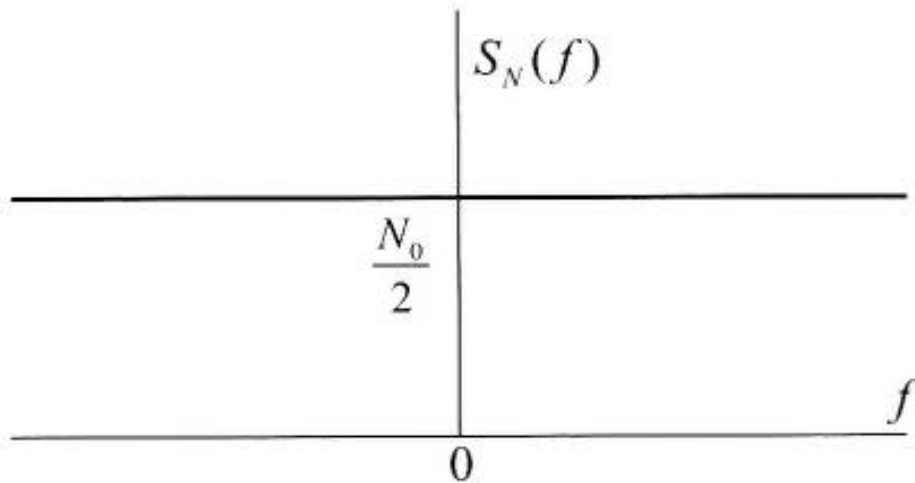
$$S_N(f) = \frac{kT}{2} = \frac{N_0}{2}, f \in (-\infty, +\infty)$$

όπου $N_0 = 10^{-21} \frac{W}{Hz}$, σε θερμοκρασία δωματίου.

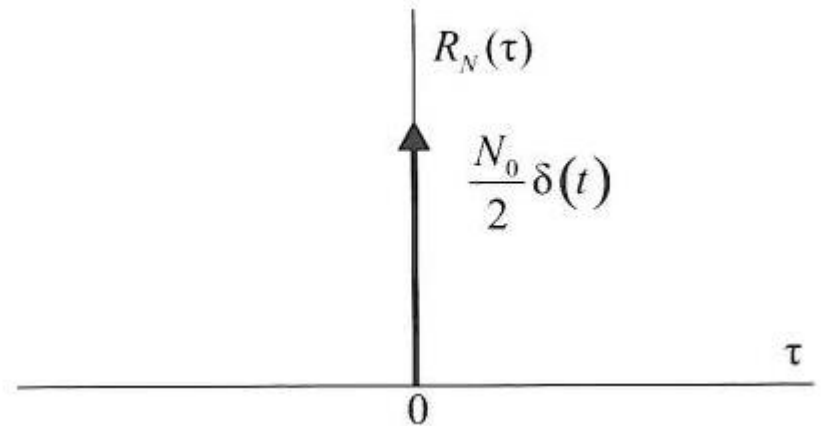
Ιδιότητες Λευκού Θορύβου

- Ο λευκός θόρυβος, ανεξάρτητα αν ακολουθεί ή όχι Gaussian κατανομή, αποτελεί μία ιδανική περίπτωση **τυχαίας διαδικασίας** αφού η ισχύς του είναι άπειρη.
 - Η χρησιμότητά του οφείλεται στο γεγονός ότι αν ο θόρυβος αυτός διέλθει μέσα από ένα γραμμικό φίλτρο με απόκριση συχνότητας $H(f)$, για το οποίο ισχύει $\int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df < \infty$, τότε η έξοδος του φίλτρου είναι μία στάσιμη διαδικασία θορύβου $N(t)$ με μηδενική μέση τιμή.
 - Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μελέτη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, αφού στην πράξη τα περισσότερα είναι ζωνοπερατά και η τιμή της $|H(f)|$ είναι πεπερασμένη. Έτσι αν ο θόρυβος παρουσιάζει επίπεδο φάσμα στην περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του συστήματος μπορεί να θεωρηθεί ως λευκή διαδικασία, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανάλυση.
- Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της $N(t)$ δίνεται από τη σχέση $R_N(t) = \frac{N_0}{2} \delta(t)$

Ιδιότητες Λευκού Θορύβου



(α) Φασματική Πυκνότητα
Ισχύος λευκού θορύβου



(β) Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης
λευκού θορύβου

Ιδιότητες Λευκού Θορύβου

- Δύο δείγματα λευκού θορύβου είναι μεταξύ τους ασυσχέτιστα, ανεξάρτητα της χρονικής τους απόστασης.
- Λευκός και Gaussian θόρυβος είναι δύο διαφορετικές έννοιες οι οποίες μπορεί ή όχι να συνυπάρχουν. Δηλαδή ο λευκός θόρυβος μπορεί να μην είναι Gaussian και αντίστροφα ο Gaussian θόρυβος μπορεί να μην είναι λευκός.
- Αν μία λευκή διαδικασία είναι Gaussian τότε ο θόρυβος αναφέρεται ως λευκός Gaussian θόρυβος (white Gaussian noise - WGN).
- Ο WGN αποτελεί ακραία περίπτωση τυχαιότητας (randomness) μίας διαδικασίας, αφού τα δείγματα - επιπλέον της έλλειψης συσχέτισης - είναι: στατιστικά ανεξάρτητα.

Ζωνοπερατός Θόρυβος

- Στα περισσότερα τηλεπικοινωνιακά συστήματα τα σήματα είναι ζωνοπερατά. Το φάσμα τους συγκεντρώνεται γύρω από μία κεντρική συχνότητα η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη συγκρινόμενη με το εύρος ζώνης των σημάτων απών.
- Έτσι προκειμένου να λειτουργήσει αξιόπιστα ο δέκτης χρησιμοποιεί ζωνοπερατά φίλτρα, τα οποία "απομονώνουν" το σήμα που μεταφέρει την πληροφορία από άλλες ανεπιθύμητες παρεμβολές.
- Η χρησιμοποίηση των ζωνοπερατών φίλτρων έχει ως αποτέλεσμα ο θόρυβος στις διάφορες βαθμίδες του δέκτη να είναι ζωνοπερατός, ανεξάρτητα αν στην είσοδό του έχει μεγάλο εύρος ζώνης ή ακόμα και αν θεωρείται λευκός.

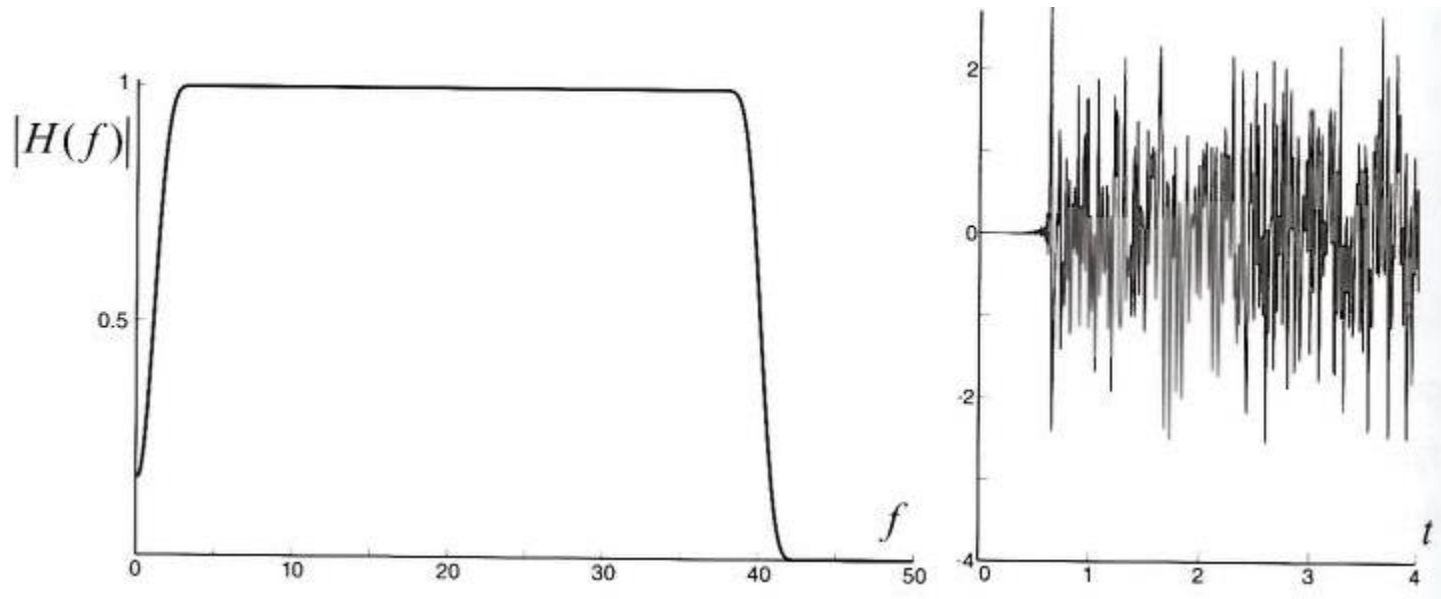
Ζωνοπερατός Θόρυβος

- Έστω $N(t)$ η διαδικασία που περιγράφει το θόρυβο στην έξοδο του ζωνοπερατού φίλτρου, στην είσοδο του οποίου υπάρχει η Τ.Δ. λευκού θορύβου $X(t)$ με φασματική πυκνότητα ισχύος $S_X(f) = \frac{N_0}{2}$.
- Η φασματική πυκνότητα ισχύος $N(f)$ θα είναι:

$$S_N(f) = \frac{N_0}{2} |H(f)|$$

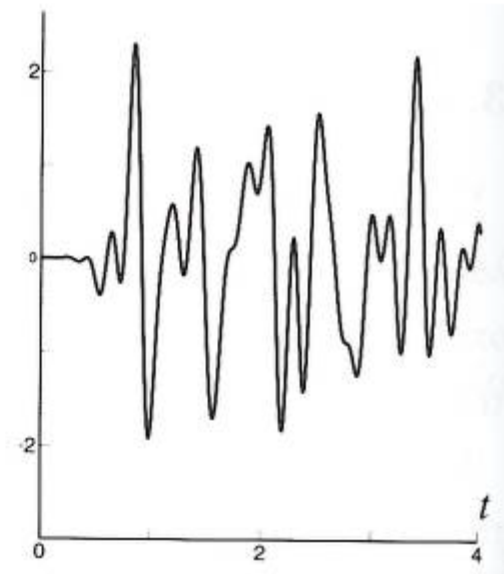
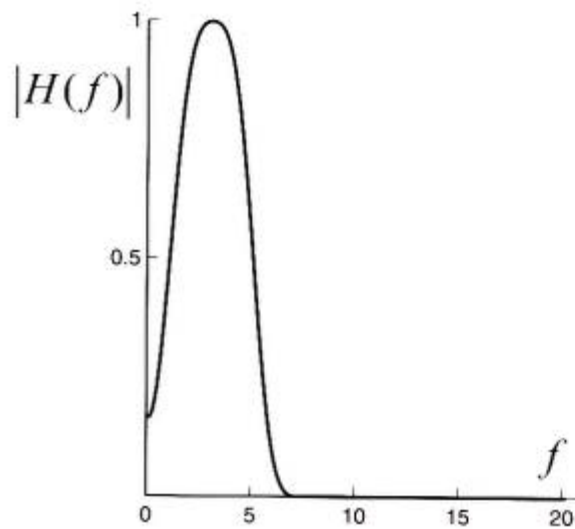
όπου $H(f)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του ζωνοπερατού φίλτρου.

Ζωνοπερατός Θόρυβος



Απόκριση Συχνότητας (μεγάλο εύρος ζώνης)

Ζωνοπερατός Θόρυβος



Απόκριση Συχνότητας (μικρό εύρος ζώνης)

Άσκηση 1

Να υπολογιστεί η φασματική πυκνότητα ισχύος και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της εξόδου ενός χαμηλοπερατού RC φίλτρου, αν η είσοδος είναι λευκή τυχαία διεργασία Gaussian θορύβου.

Απάντηση: Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου RC (σχήμα α) είναι:

$$H(f) = \frac{1}{1 + j2\pi fRC}$$

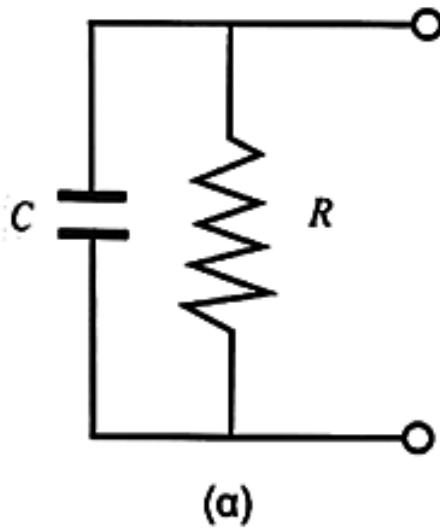
οπότε η απόκριση συχνότητας είναι:

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + (2\pi fRC)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{W_{0.5}}\right)^2}$$

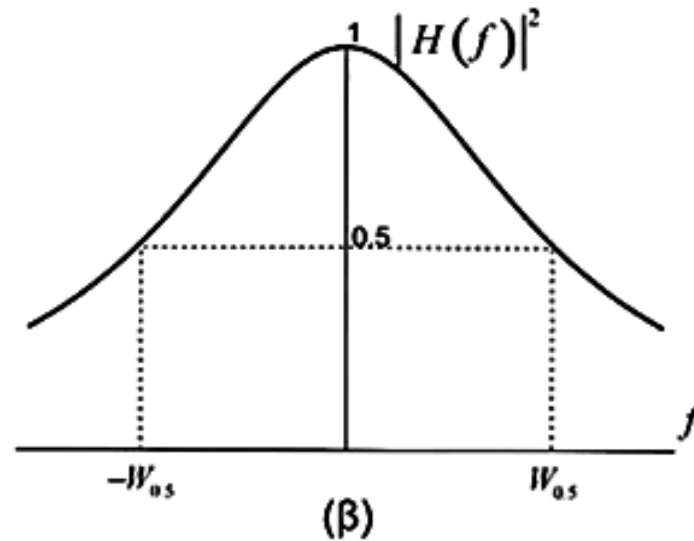
όπου $W_{0.5} = \frac{1}{2\pi RC}$ είναι το 3-dB εύρος ζώνης του φίλτρου.

Το $|H(f)|^2$ δείχνεται στο Σχήμα β.

Άσκηση 1 (συνέχεια)



(α) Κύκλωμα RC



(β) Φασματική απόκριση φίλτρου RC

Άσκηση 1 (συνέχεια)

Απάντηση: Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου RC (Σχήμα α) είναι:

$$H(f) = \frac{1}{1 + j2\pi fRC}$$

οπότε για την απόκριση συχνότητας θα ισχύει:

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + (2\pi fRC)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{W_{0.5}}\right)^2}$$

όπου $W_{0.5} = \frac{1}{2\pi RC}$ είναι το 3-dB εύρος ζώνης του φίλτρου.

Η απόκριση συχνότητας $|H(f)|^2$ του φίλτρου δείχνεται στο σχήμα β.

Άσκηση 1 (συνέχεια)

Η φασματική πυκνότητα ισχύος στην έξοδο του φίλτρου είναι:

$$S_N(f) = S_X(f)|H(f)|^2 = \frac{N_0}{N_0 + 2\left(\frac{f}{W_{0.5}}\right)^2}$$

και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης:

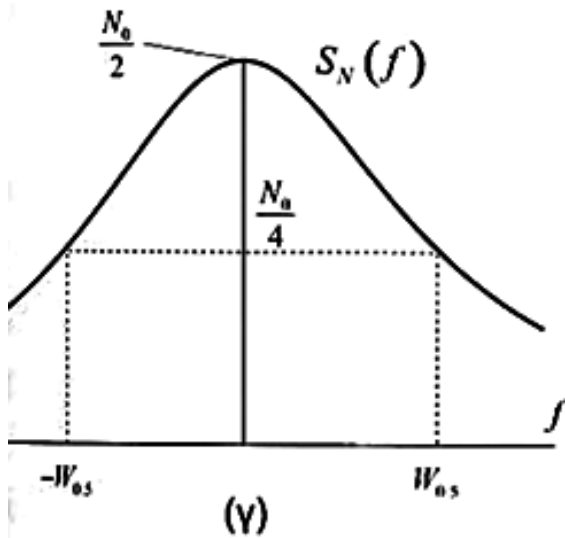
$$R_N(\tau) = F^{-1}[S_N(f)] = \frac{\pi N_0 W_{0.5}}{2} e^{-|\tau|2\pi W_{0.5}}$$

Οι $S_N(f)$ και $R_N(\tau)$ δείχνονται στα σχήματα (γ) και (δ), αντίστοιχα.

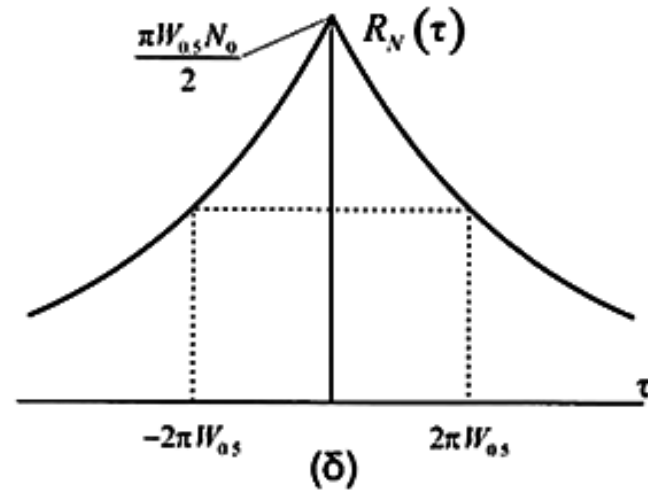
Η κανονικοποιημένη ισχύς στην έξοδο του φίλτρου είναι:

$$P_N = R_N(0) = \frac{\pi N_0 W_{0.5}}{2}$$

Άσκηση 1 (συνέχεια)



(γ) Φασματική πυκνότητα ισχύος εξόδου



(δ) Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης εξόδου