



ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (Θ)

Ενότητα 5: Μικροκυματικές Διατάξεις

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: Δρ. Στυλιανός Τσίτσος
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕ



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ενότητα 5

Μικροκυματικές Διατάξεις

Δρ. Στυλιανός Τσίτσος

Περιεχόμενα ενότητας

Σκοποί ενότητας

Μικροκυματικές Διατάξεις

ΘΟΡΥΒΟΣ

- Με τον όρο «**θόρυβος**» στην ευρύτερη έννοιά του, εννοούμε κάθε ανεπιθύμητο σήμα που μπορεί να υποβαθμίσει την απόδοση ενός συστήματος.
- Στις τηλεπικοινωνίες έχουμε μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διαμέσου της ατμόσφαιρας ή του διαστήματος. Το σήμα στον δέκτη είναι συνήθως αδύνατο και «μολυσμένο» από θόρυβο διαφόρων ειδών από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται ο δέκτης. Το ίδιο συμβαίνει και με άλλους τύπους μικροκυματικών σημάτων, όπως ραντάρ κλπ. Το σήμα στον δέκτη ενισχύεται, φιλτράρεται, και υφίσταται επεξεργασία έτσι ώστε ο δέκτης να μπορεί να εξάγει την πληροφορία που μεταφέρεται από το κύμα. Κάθε στοιχείο του δέκτη εισάγει το δικό του θόρυβο καθώς επεξεργάζεται το σήμα. Επομένως η μελέτη του θορύβου περιβάλλοντος και του θορύβου των συσκευών είναι σημαντική στις τηλεπικοινωνίες.

Θερμικός θόρυβος

- Η πηγή ενέργειας του θερμικού θορύβου είναι η θερμοκρασία του άμεσου περιβάλλοντος μέσα στο οποίο βρίσκεται το αντικείμενο που μας ενδιαφέρει:

$$T(^{\circ}K) = T(^{\circ}C) + 273$$

Επομένως το απόλυτο μηδέν είναι $273^{\circ}C$ κάτω από τη θερμοκρασία ψύξεως του νερού (που ορίζεται ως $0^{\circ}C$). Στους $0^{\circ}K$ όλα τα αντικείμενα σταματούν να κινούνται και μία τέτοια κατάσταση δεν έχει πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο.

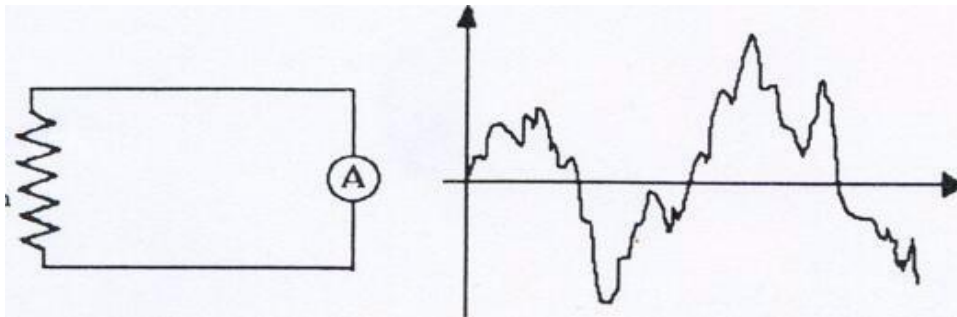
Όταν η απόλυτη θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι σε κάποια τιμή άλλη από το μηδέν, όλα τα αντικείμενα που βρίσκονται στο περιβάλλον θα αποκτήσουν κάποιο ποσό θερμικής ενέργειας.

$$\text{Θερμική ενέργεια} = kT$$

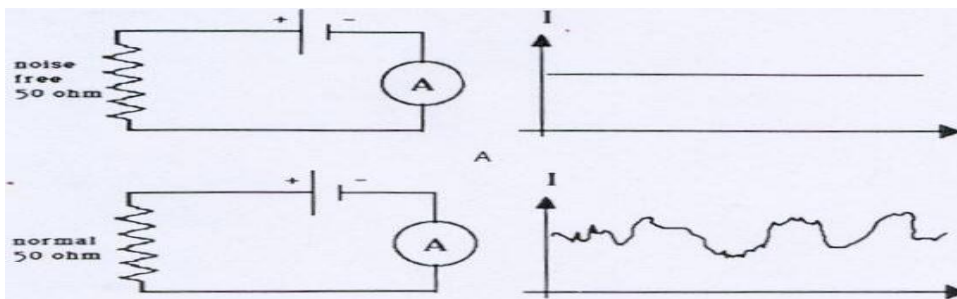
όπου $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Watt-sec/ $^{\circ}K$ είναι η σταθερά αναλογίας που ονομάζεται σταθερά του Boltzman.

Μικροκυματικές Διατάξεις

• Η θερμική ενέργεια όλων των αντικειμένων, π.χ. ηλεκτρονίων, ατόμων κλπ. είναι υπεύθυνη για τη λειτουργία των αντιστάσεων, ημιαγωγών και πολλών άλλων συσκευών. Επίσης, αποτελεί δυστυχώς μία **πηγή θορύβου** που τελικά περιορίζει την ανίχνευση αδύνατων σημάτων. Η θερμική ενέργεια κάνει αισθητή την παρουσία της σε ένα αντικείμενο με τη μορφή τυχαίων φυσικών κινήσεων όπως **μετατόπιση, περιστροφή και ταλάντωση**. Επίσης γίνεται αισθητή ως **ακτινοβολία** (ηλεκτρομαγνητικό κύμα). Η συχνότητα της ακτινοβολίας εκτείνεται θεωρητικά σε ολόκληρο το φάσμα, από πολύ χαμηλές μέχρι πολύ υψηλές συχνότητες, εξαιτίας της τυχαίας φύσης της θερμικής ενέργειας.

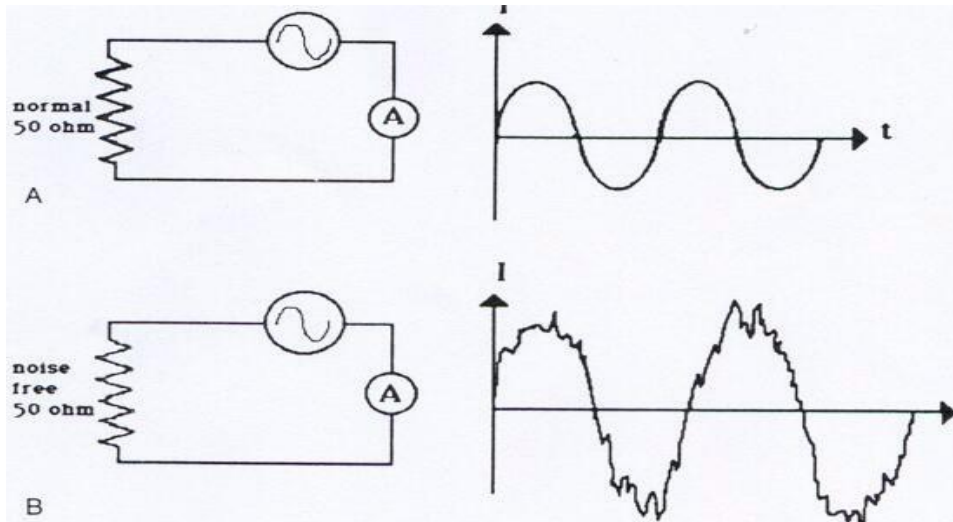


Σχήμα 1: Το ρεύμα θερμικού θορύβου που παρατηρείται σε μία αντίσταση 50 Ohms όταν αυτή βραχυκυκλωθεί.



Σχήμα 2: Όταν συνδέεται εγκάρσια σε μία μπαταρία, το ρεύμα που παρατηρείται είναι (A) καθαρό *dc* αν η αντίσταση είναι αθόρυβη (noise free), (B) *ac* επιπλέον του *dc* αν η αντίσταση είναι κανονική (normal).

Μικροκυματικές Διατάξεις



Σχήμα 8.3: Όταν συνδέεται εγκάρσια σε μία πηγή σήματος, το ρεύμα που παρατηρείται είναι

(A) καθαρό *ac* αν η αντίσταση είναι αθόρυβη, (B) θορυβώδες *ac* αν η αντίσταση είναι κανονική.

• Γενικά, η **ισχύς θορύβου** που διαταράσσει ένα ηλεκτρονικό σύστημα δίνεται από τη σχέση:
Θερμική ισχύς θορύβου (Noise Power): $NP = kTB$

• **Πυκνότητα θορύβου (noise density, ND):** Πυκνότητα θορύβου $(ND) = NP/B$

Θόρυβος βολής

• Συμβαίνει ως τυχαίες διακυμάνσεις εκπομπής ηλεκτρονίων από τις καθόδους λυχνιών κενού ή πέρα από ένα φράγμα δυναμικού συσκευών όπως οι δίοδοι και τα τρανζίστορ.

Σε μία λυχνία κενού, τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από την κάθοδο προς την άνοδο η οποία είναι σε υψηλότερο δυναμικό. Η απελευθέρωση των ηλεκτρονίων από την επιφάνεια της καθόδου, δεν είναι ομοιόμορφη. Βεβαίως, ο μέσος αριθμός ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται είναι άμεσα ανάλογος με το συνεχές ρεύμα στην κάθοδο. Όμως ο πραγματικός αριθμός των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται σε μία αυθαίρετη στιγμή μπορεί να είναι μεγαλύτερος ή μικρότερος από τον μέσο ή τον αναμενόμενο αριθμό. Αυτές οι διακυμάνσεις συνιστούν τη φυσική βάση του θορύβου βολής.

Μικροκυματικές Διατάξεις

Λευκός θόρυβος και ροζ θόρυβος

• Ο λευκός θόρυβος αναφέρεται σε τελείως τυχαίο θόρυβο όπου οι ισχείς θορύβου όλων των συχνοτήτων είναι ίσες, ενώ ο ροζ θόρυβος μειώνεται καθώς αυξάνει η συχνότητα.

Λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR)

$$\text{SNR (Λόγος σήματος προς θόρυβο)} = \frac{\text{Ισχύς σήματος}}{\text{Ισχύς θορύβου}} = \frac{P_s}{P_n}$$
$$\text{SNR(dB)} = (\text{dbm}) - (\text{dBm})$$

Θερμοκρασία θορύβου

• Αν και ο θόρυβος σε έναν δέκτη μπορεί να προέλθει από πολλούς τύπους πηγών θορύβου, είναι χρήσιμο να περιγράψουμε τον παραγόμενο θόρυβο με θερμικό θόρυβο που έχει την ισοδύναμη ισχύ. Γι' αυτόν τον σκοπό, εισάγουμε τον όρο **θερμοκρασία θορύβου**.

Παράδειγμα:

- Η απόλυτη θερμοκρασία μέσα σε ένα εργαστήριο καθορίζεται να είναι 298 °K και η ισχύς θορύβου σε ένα εύρος ζώνης 1 MHz μετρείται να είναι 1 pW.

- Ισχύς θορύβου σε εύρος ζώνης 1 MHz εξαιτίας της θερμοκρασίας 298 °K μόνο = $k \cdot T \cdot 1 \text{ MHz} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ pW}$

Συνεπώς, ο θερμικός θόρυβος δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη για τη μετρούμενη ισχύ θορύβου 1 pW.

- Η ισοδύναμη θερμοκρασία T_n η οποία θα είχε ως αποτέλεσμα τον θερμικό θόρυβο του 1 pW μέσα στο εύρος ζώνης 1 MHz, θα είναι:

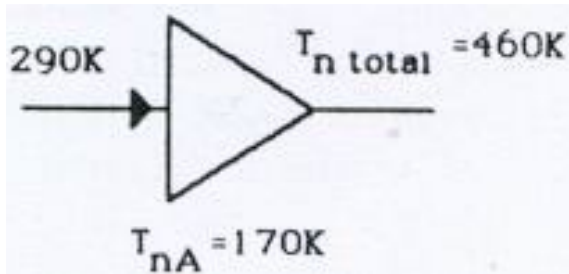
$$k \cdot T_n \cdot 10^6 = 1 \text{ pW} \quad \text{ή} \quad T_n = 7,25 \cdot 10^4 \text{ °K} = 72.207 \text{ °C!}$$

-Επομένως, αν ο θερμικός θόρυβος ήταν η μόνη πηγή του θορύβου 1pW, το περιβάλλον θα ήταν σε θερμοκρασία $7,25 \cdot 10^4 \text{ °K}$. Αυτή η θερμοκρασία είναι γνωστή ως **θερμοκρασία θορύβου του περιβάλλοντος** και όχι η πραγματική του θερμοκρασία.

- Αν η θερμοκρασία θορύβου ενός περιβάλλοντος βρεθεί να είναι 350 °K και η πραγματική θερμοκρασία είναι 298 °K, είναι προφανές ότι ο θερμικός θόρυβος είναι η κύρια πηγή. Στη συνέχεια μπορούμε να λάβουμε μέτρα για να ελαττώσουμε τον θόρυβο, ελαττώνοντας την πραγματική θερμοκρασία μέσω ψύξης.

- Από την άλλη πλευρά, αν η θερμοκρασία θορύβου ενός περιβάλλοντος βρεθεί να είναι 50.000 °K και η πραγματική θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι 298 °K, τότε ο θερμικός θόρυβος δεν είναι η κύρια πηγή θορύβου.

Μικροκυματικές Διατάξεις



- Ο ενισχυτής προσθέτει μία ισχύ θορύβου (ανεξάρτητα από το θόρυβο ή το σήμα που έρχεται στην είσοδο) ισοδύναμη με $170\text{ }^\circ\text{K}$ ή μία ισχύ θορύβου μέσα σε 1 MHz εύρος ζώνης ίση με $kTB=1,38\bullet 10^{11}\bullet 170\bullet 10^6\text{ pW}=2,35\bullet 10^{-3}\text{ pW}$, στην είσοδό του. Η συνολική ισοδύναμη ισχύς θορύβου στην είσοδο του ενισχυτή μπορεί να εκφραστεί σαν μία θερμοκρασία θορύβου προσθέτοντας τη θερμοκρασία θορύβου εισόδου στη θερμοκρασία θορύβου του ενισχυτή, δηλαδή $290+170=460\text{ }^\circ\text{K}$. Αυτή η θερμοκρασία θορύβου που αντιστοιχεί σε $6,45\bullet 10^{-3}\text{ pW}$ δεν είναι απαραίτητα όλη εκείνη που παράγεται στην είσοδο αλλά είναι ένας ισοδύναμος δείκτης, που παριστάνει θόρυβο που παράγεται σε κάθε σημείο του ενισχυτή. Η πραγματική ισχύς εξόδου του θορύβου, από την άλλη πλευρά, μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας αυτή την ισοδύναμη ισχύ με το κέρδος των 30 dB ή $6,45\text{ pW}$.

Επίδραση ενός ενισχυτή στο SNR

▪ Ένας ενισχυτής (ή οποιαδήποτε άλλη συσκευή) δεν μπορεί να διαχωρίσει ένα σήμα που περιέχει την επιθυμητή πληροφορία, από τον θόρυβο όσο και τα δύο βρίσκονται μέσα στο εύρος ζώνης λειτουργίας του. Για παράδειγμα, ένας ενισχυτής με κέρδος G θα ενισχύσει και το σήμα και τον θόρυβο κατά τον ίδιο παράγοντα G . Επομένως, στην καλύτερη περίπτωση, το SNR στην έξοδο του ενισχυτή δεν θα είναι καλύτερο από το SNR στην είσοδο.

▪ Ο συνολικός θόρυβος εισόδου είναι το άθροισμα του θορύβου που συνοδεύει το σήμα και του θορύβου της συσκευής. Κατά τη διάρκεια επεξεργασίας του σήματος, οι ημιαγωγοί, οι λυχνίες ή άλλα στοιχεία που περιλαμβάνονται, θα προσθέσουν τον δικό τους θόρυβο. Έτσι, ο λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο της συσκευής μπορεί μόνο να υποβαθμιστεί και όχι να βελτιωθεί.

Μικροκυματικές Διατάξεις

Δείκτης θορύβου και ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου

• Ο δείκτης θορύβου (noise figure, NF) είναι ένα μέτρο του πόσο καλή είναι η συσκευή όσον αφορά την πρόσθεση του θορύβου:

$$NF = \frac{SNR(in)}{SNR(out)} \quad NF(dB) = SNR(in, dB) - SNR(out, dB)$$

• Η σχέση μεταξύ του δείκτη θορύβου NF και της ισοδύναμης θερμοκρασίας της συσκευής T_n είναι:

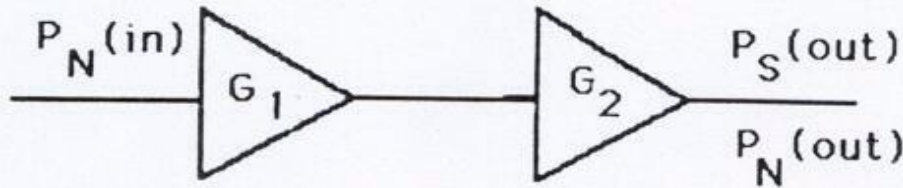
$$NF = 1 + T_n / 290 \text{ } ^\circ K$$

(Στις παραπάνω εξισώσεις ο δείκτης θορύβου είναι ένας αριθμός και όχι dB).

• Το ισοδύναμο ποσόν ισχύος θερμικού θορύβου που παράγεται από τη συσκευή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P_N = kT_n B \quad P_N = k \cdot (NF - 1) \cdot 290 \cdot B$$

Ενισχυτές σε σειρά



$$NF(\text{συνολικό}) = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1}$$

(Οι τιμές του δείκτη θορύβου είναι σε αριθμούς και όχι σε dB)

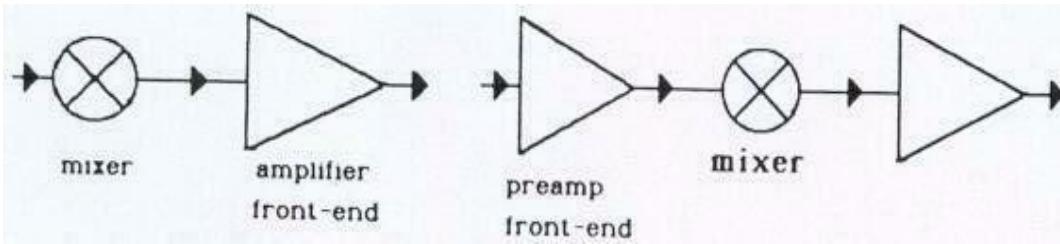
Ο συνολικός δείκτης θορύβου τριών ή περισσότερων ενισχυτών σε σειρά μπορεί να γενικευθεί ως εξής:

$$NF(\text{συνολικό}) = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή ως εξίσωση του Friis και μπορεί να εκφραστεί με όρους ισοδύναμης θερμοκρασίας θορύβου:

$$T_n(\text{συνολικό}) = T_{n1} + \frac{T_{n2}}{G_1} + \frac{T_{n3}}{G_1 G_2} + \dots$$

Μικροκυματικές Διατάξεις



Στο αριστερό μέρος του σχήματος, ο συνολικός δείκτης θορύβου κυριαρχείται από εκείνον του μείκτη και είναι συνήθως υψηλός. Ο ενισχυτής μετά τον μείκτη έχει μικρή επίδραση στο συνολικό SNR . Στο δεξιό μέρος του σχήματος, ο συνολικός δείκτης θορύβου κυριαρχείται από εκείνον του ενισχυτή χαμηλού θορύβου. Αν και ο μείκτης έχει μεγάλο δείκτη θορύβου, η συνεισφορά του καταστέλλεται από το κέρδος του ενισχυτή χαμηλού θορύβου.

Τέλος Ενότητας

