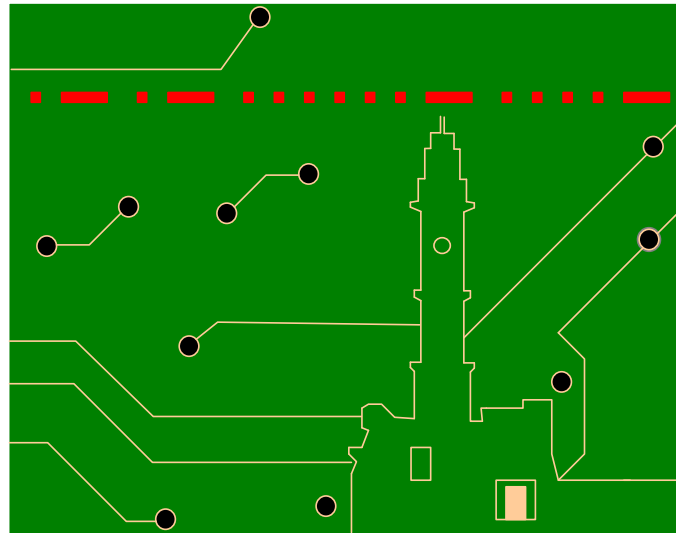


# ΤΗΛ412 Ανάλυση & Σχεδίαση (Σύνθεση) Τηλεπικοινωνιακών Διατάξεων

## Διάλεξη 4



Άγγελος Μπλέτσας

ΗΜΜΥ Πολυτεχνείου Κρήτης, Φθινόπωρο 2016

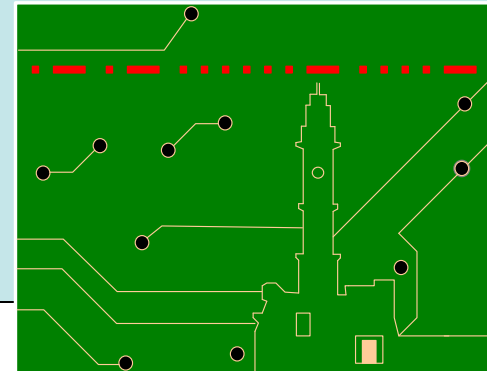
# Διάλεξη 4 – Βασικές Έννοιες (συνέχεια από Διαλέξεις 2, 3)

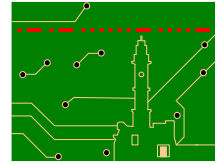
Βασικές έννοιες:

- Προηγούμενη διάλεξη: Εισαγωγή σε μη-γραμμικότητες (1-dB CP, IP3)

Σήμερα:

- Θερμικός Θόρυβος Αντίστασης
- Υπολογισμός Παράγοντα Θορύβου (NF)
- Ευαισθησία
- Δυναμική Περιοχή





# Τάση θερμικού θορύβου αντίστασης R:

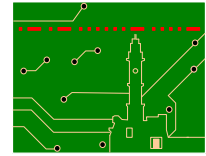
$$\overline{V_n^2} = 4 k T R = \text{μέση τετραγωνική τιμή τάσης ανά μονάδα εύρους ζώνης} \\ (\text{V}^2/\text{Hz})$$

k =  $1.38 \times 10^{-23}$  Joules/K (σταθερά Boltzmann)

T = θερμοκρασία (σε Kelvin)

- Σημείωση 1: προκύπτει από φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) σταθερής και ίσης με  $2 k T$  (Watt/Hz), δηλ. *ΛΕΥΚΟΥ* θερμικού θορύβου (ακριβής προσέγγιση μέχρι  $|f| < 100$  GHz).
- Σημείωση 2: ο παράγοντας x 2 στην παραπάνω μέση τετραγωνική τιμή προκύπτει από τον ορισμό της ενεργού τιμής.
- Σημείωση 3:  $2kT$  (PSD) σε Watt/Hz αλλά  $\overline{V_n^2}$  σε  $\text{V}^2/\text{Hz}$  [δοκιμάστε BW=100MHz, R=1MOhm + παλμογράφο].

# Θυμάστε τον Παράγοντα Θορύβου (Noise Figure – NF)?



$$\text{noise figure} = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

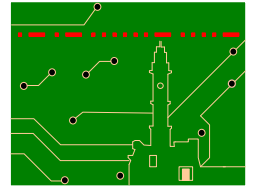
- Ιδεατό αθόρυβο σύστημα => NF = 1 (0 dB).
- Παράγοντας Θορύβου Συστημάτων σε Σειρά (εξ. Friis):

$$NF_{tot} = 1 + (NF_1 - 1) + \frac{NF_2 - 1}{A_{p1}} + \dots + \frac{NF_m - 1}{A_{p1}A_{p2}\dots A_{p(m-1)}}$$

Κέρδος Ισχύος

- NF μιας βαθμίδας ελαττώνεται όσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος ΙΣΧΥΟΣ της προηγούμενης =>
- ...οι αρχικές βαθμίδες είναι οι πιο σημαντικές για τον συνολικό παράγοντα θορύβου (NF)!

# Πώς υπολογίζεται ο Παράγοντας Θορύβου σε μια Τηλεπ. Διάταξη?



- Βασική Αρχή: οι σηματοθορυβικές σχέσεις SNRs υπολογίζονται με βάση την αντίσταση  $R_s$  της πηγής...  
...υποθέτοντας κέρδος ΤΑΣΗΣ  $a$  στα άκρα της αντίστασης της πηγής και  $A_v$  στα άκρα της διάταξης

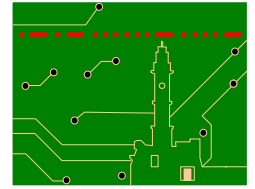
$$SNR_{in} = \frac{a^2 V_{in}^2}{a^2 V_{RS}^2}$$

$$SNR_{out} = \frac{a^2 A_v^2 V_{in}^2}{[V_{RS}^2 + (V_n + I_n R_s)^2] a^2 A_v^2}$$

Ο θόρυβος της διάταξης μοντελοποιείται ως μια πηγή στην είσοδο της διάταξης

$$= \frac{V_{in}^2}{[V_{RS}^2 + (V_n + I_n R_s)^2]}$$

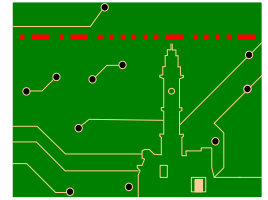
# Πώς υπολογίζεται ο Παράγοντας Θορύβου σε μια Τηλεπ. Διάταξη?



- Βασική Αρχή: οι σηματοθορυβικές σχέσεις SNRs υπολογίζονται με βάση την αντίσταση  $R_s$  της πηγής  
...υποθέτοντας κέρδος ΤΑΣΗΣ  $\alpha$  στα άκρα της αντίστασης της πηγής και  $A_v$  στα άκρα της διάταξης

$$\begin{aligned} \text{noise figure} &= \frac{SNR_{\text{in}}}{SNR_{\text{out}}} = \frac{\overline{V_{RS}^2} + \overline{(V_n + I_n R_S)^2}}{\overline{V_{RS}^2}} \quad \Rightarrow \quad \text{(Per unit bandwidth)} \\ &= 1 + \frac{\overline{(V_n + I_n R_S)^2}}{\overline{V_{RS}^2}} \quad NF = 1 + \frac{\overline{(V_n + I_n R_S)^2}}{4kTR_S} \end{aligned}$$

# Πώς υπολογίζεται ο Παράγοντας Θορύβου σε μια Τηλεπ. Διάταξη?



$$NF = 1 + \frac{\overline{(V_n + I_n R_S)^2}}{4kTR_S} \quad \Rightarrow \quad NF = \frac{\overline{4kTR_S + (V_n + I_n R_S)^2}}{4kTR_S}$$

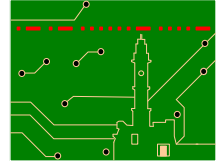
$$A = aA_v$$

$$= \frac{A^2 [\overline{4kTR_S + (V_n + I_n R_S)^2}]}{A^2} \frac{1}{4kTR_S}$$

Συνολικός  
μετρούμενος  
θόρυβος στην έξοδο  
της διάταξης

$$= \frac{V_{n,out}^2}{A^2} \frac{1}{4kTR_S}$$

# Πώς υπολογίζεται ο Παράγοντας Θορύβου σε μια Τηλεπ. Διάταξη?



$$\begin{aligned} NF &= \frac{4kTR_S + \overline{(V_n + I_n R_S)^2}}{4kTR_S} \\ &= \frac{A^2 [4kTR_S + \overline{(V_n + I_n R_S)^2}]}{A^2} \frac{1}{4kTR_S} \\ &= \frac{V_{n,out}^2}{A^2} \frac{1}{4kTR_S} \end{aligned}$$

$$A = aA_v$$

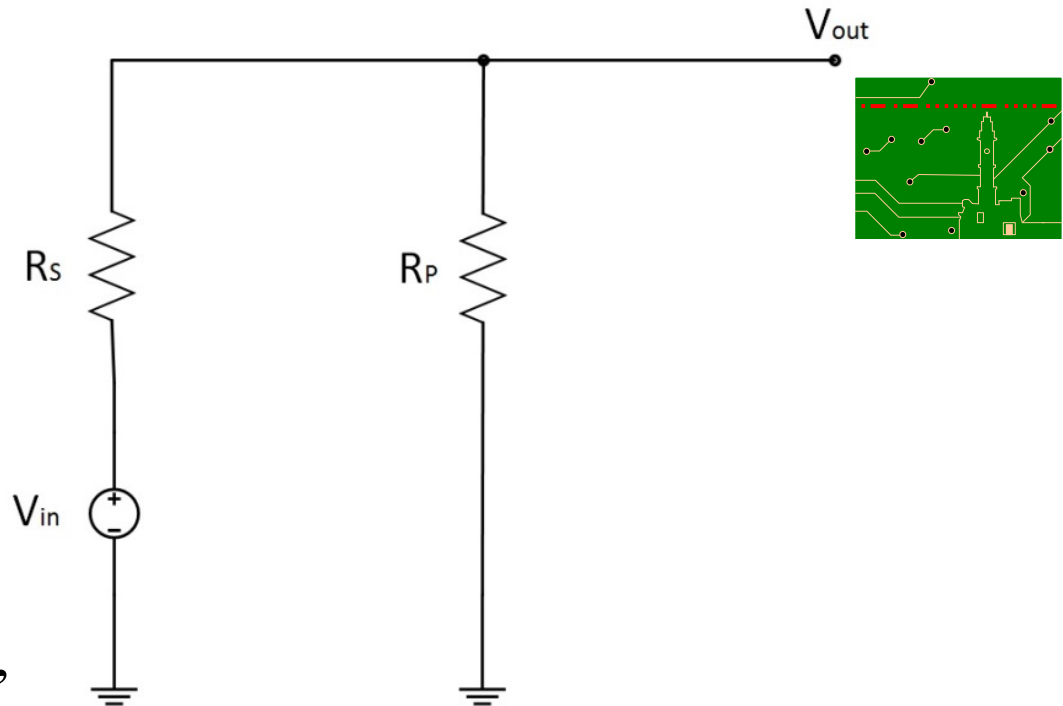
- Σημείωση 1: το NF ορίζεται σε σχέση με την αντίσταση της πηγής!

...το οποίο σημαίνει πως σε βαθμίδες σε σειρά, η αντίσταση εξόδου της προηγούμενης βαθμίδας χρειάζεται για να υπολογιστεί το NF της αμέσως επόμενης βαθμίδας (περισσότερα παρακάτω).

- Σημείωση 2: end-to-end voltage gain A (στο τετράγωνο) απαιτείται!



# Παράδειγμα 1:



$$V_{n,out}^2 = 4kT(R_S \parallel R_P),$$

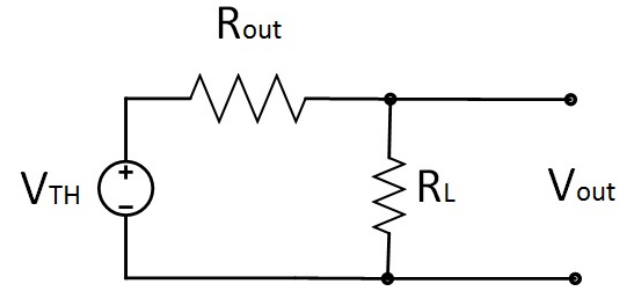
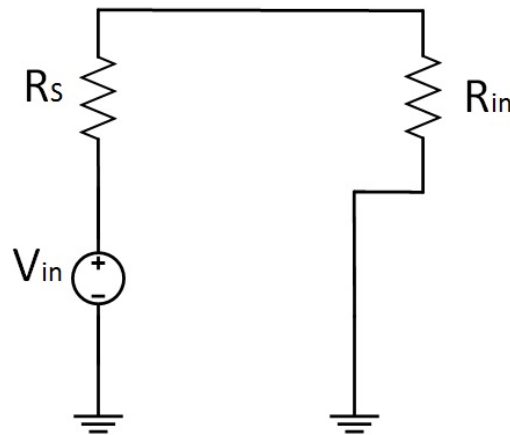
$$A_v = \frac{R_P}{R_S + R_P} \Rightarrow NF = 4kT(R_S \parallel R_P) \frac{(R_S + R_P)^2}{R_P^2} \frac{1}{4kTR_S}$$
$$= 1 + \frac{R_S}{R_P}$$

- Η συνθήκη για ελάχιστο NF δεν ταυτίζεται με την συνθήκη για μέγιστη μεταφορά ισχύος!

## Παράδειγμα 2 (Κύκλωμα με απώλειες):

$$L = \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad P_{in} \propto \frac{V_{in}^2}{R_s} \quad P_{out} \propto \frac{V_{TH}^2}{R_{out}}$$

$$L = \frac{V_{in}^2}{V_{TH}^2} \frac{R_{out}}{R_s}$$



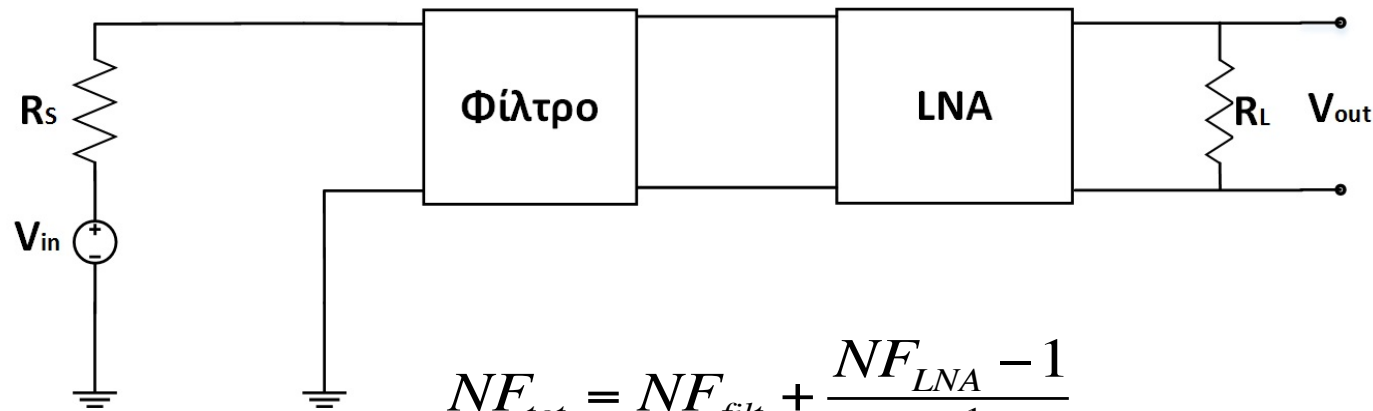
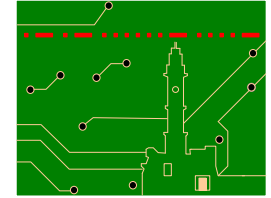
$$V_{n,out}^2 = 4kTR_{out} \frac{R_L^2}{(R_L + R_{out})^2}$$

$$A_v = \frac{V_{TH}}{V_{in}} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$$

$$\begin{aligned} \text{NF} &= 4kTR_{out} \frac{V_{in}^2}{V_{TH}^2} \frac{1}{4kTR_s} \\ &= L. \end{aligned}$$

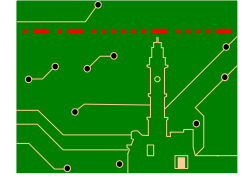
- Απώλεια ισχύος = NF για κυκλώματα με απώλειες!
- Προσοχή: L είναι η ΑΠΩΛΕΙΑ ισχύος (όχι ΚΕΡΔΟΣ), δηλ.  $L^{-1} = G$

# Παράδειγμα 3: Φίλτρο σε σειρά με LNA



$$\begin{aligned} NF_{tot} &= NF_{filt} + \frac{NF_{LNA} - 1}{L^{-1}} \\ &= L + L(NF_{LNA} - 1) \\ &= L \cdot NF_{LNA}, \end{aligned}$$

- Προσοχή: η παραπάνω υποθέτει ότι το  $NF_{LNA}$  αναφέρεται σε αντίσταση εισόδου ίση με την αντίσταση εξόδου του παραπάνω φίλτρου...
- Συνήθως στην Μηχανική Ραδιοσυχνοτήτων (RF engineering), όλα τα συστήματα σχεδιάζονται στα 50 ή 75  $\Omega$ m.
- Μην ξεχνάτε: η εξίσωση Friis χρησιμοποιεί κέρδη ισχύος (και όχι κέρδη τάσης).



# Η έννοια της Ευαισθησίας:

“Το ελάχιστο επίπεδο σήματος που μπορεί η Τηλεπ. Διάταξη να ανιχνεύσει με αποδεκτή σηματοθορυβική σχέση”.

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$
$$= \frac{P_{sig} / P_{RS}}{SNR_{out}}$$



$$P_{sig} = P_{RS} \cdot NF \cdot SNR_{out}$$

(Ισχύς σήματος εισόδου ανά μονάδα εύρους ζώνης)



$$P_{sig,tot} = P_{RS} \cdot NF \cdot SNR_{out} \cdot B$$



$$P_{in,min} \text{ dBm} = P_{RS} \text{ dBm/Hz} + NF \text{ dB} + SNR_{min} \text{ dB} + 10 \log[B \text{ Hz}]$$

$$P_{RS} = \frac{4kTR_S}{4} \frac{1}{R_{in}}$$

$$= kT$$

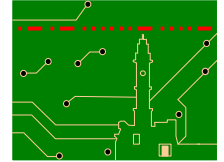
$$= -174 \text{ dBm/Hz}$$

Γιατί ÷ 4?

÷ 2: λόγω ενεργού τιμής

÷ 2: λόγω προσαρμογής ισχύος

# Η έννοια της Ευαισθησίας:



“Το ελάχιστο επίπεδο σήματος που μπορεί η Τηλεπ. Διάταξη να ανιχνεύσει με αποδεκτή σηματοθρουβική σχέση”.

$$P_{in,min}[\text{dBm}] = P_{\text{RSl}}[\text{dBm/Hz}] + NF[\text{dB}] + SNR_{\text{min}}[\text{dB}] + 10 \log B$$



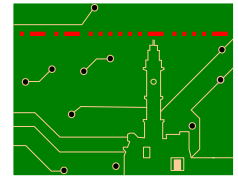
$$P_{in,min} = -174 \text{ dBm/Hz} + NF + 10 \log B + SNR_{\text{min}}$$



=“noise floor F”

- Προσοχή 1: μικρό επίπεδο ανιχνεύσιμου σήματος (υψηλή ευαισθησία) μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μικρού εύρους ζώνης!
- Προσοχή 2:  $SNR_{\text{min}}$  είναι η σηματοθρουβική σχέση εξόδου στην οποία λειτουργεί η διάταξη.

# (Μία) Έννοια Δυναμικής Περιοχής:



“Ο λόγος μεταξύ του μέγιστου επίπεδου σήματος που μπορεί να ανεχθεί το σύστημα και του ελάχιστου επίπεδου σήματος όπου το σύστημα δουλεύει με λογικά αποδεκτή ποιότητα”.

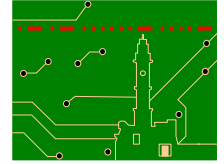
- Παρατηρήστε ότι ο ορισμός δεν είναι σαφής => διαφορετικό αποτέλεσμα σε analog-to-digital-converters (ADC)s, διαφορετικό σε συστήματα RF...
- Συστήματα RF: ελάχιστο σήμα με βάση την ευαισθησία...  
μέγιστο σήμα με βάση την συμπεριφορά σε ενδοδιαμόρφωση, δηλ. επίπεδο σήματος εισόδου όπου τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης 3<sup>ης</sup> τάξης γίνονται ίσα με το δάπεδο θορύβου (noise floor).

=> “Spurious-free dynamic range (SFDR)”. Θυμηθείτε ότι:

$$P_{IIP3} = P_{in} + \frac{P_{out} - P_{IM,out}}{2}$$

# Spurious-free Dynamic Range

(Δυναμική Περιοχή Χωρίς Μη-Αυθεντικά Σήματα):



$$P_{IIP3} = P_{in} + \frac{P_{out} - P_{IM,out}}{2}$$

⇕

$$P_{IIP3} = P_{in} + \frac{P_{in} - P_{IM,in}}{2}$$

⇕

$$= \frac{3P_{in} - P_{IM,in}}{2},$$

⇕

$$P_{in} = \frac{2P_{IIP3} + P_{IM,in}}{3}$$

⇓

$$P_{in,max} = \frac{2P_{IIP3} + F}{3}$$

$$SDFR = \frac{2P_{IIP3} + F}{3} - (F + SNR_{min})$$

$$= \frac{2(P_{IIP3} + F)}{3} - SNR_{min}$$

Παράδειγμα:  $IIP3 = -15$  dBm,  $NF = 9$  dB,  
 $B = 200$  kHz,  $SNR_{min} = 12$  dB

$\Rightarrow$  SFDR  $\approx 53$  dB

Σκεφτείτε το ως το μέγιστο επίπεδο του παρεμβολέα (σε σχέση με το χρήσιμο σήμα), το οποίο μπορεί να αντέξει ο δέκτης για σχετικά ασθενές χρήσιμο σήμα εισόδου!

# Βιβλιογραφία

B. Razavi, RF Microelectronics, Prentice Hall, Έκδοση 1998.



# Ερωτήσεις?

