



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

HELLENIC REPUBLIC
National and Kapodistrian
University of Athens

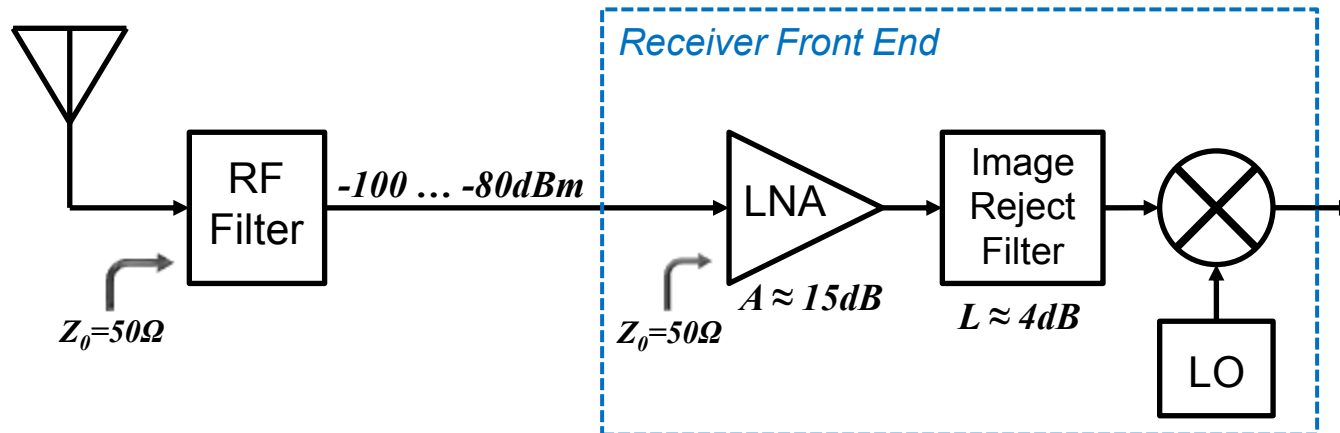


Εισαγωγή στη Σχεδίαση Κυκλωμάτων RF

Κεφάλαιο 6.1 LNA

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Βασικές παράμετροι των LNA:



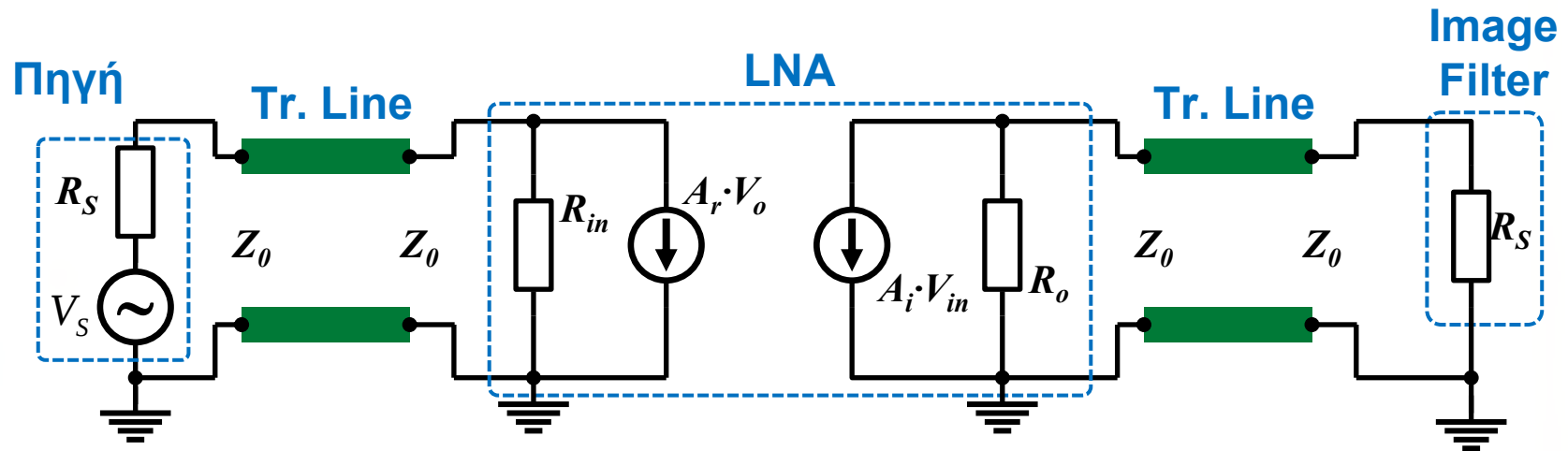
*Τυπικά χαρακτηριστικά των LNA για ετερόδυνες
αρχιτεκτονικές*

<u>NF (εικόνα θορύβου)</u>	<u>2 dB</u>
<u>IIP3</u>	<u>-10 dBm</u>
<u>Απολαβή</u>	<u>15 dB</u>
<u>Εμπέδηση εισόδου και εξόδου</u>	<u>50 Ω</u>
<u>Απώλειες επιστροφής εισόδου και εξόδου</u>	<u>-15 dB</u>
<u>Ανάστροφη Απομόνωση</u>	<u>20 dB</u>
<u>Παράγοντας σταθεροποίησης</u>	<u>> 1</u>

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Εικόνα θορύβου (NF):
$$NF_{tot} = NF_{LNA} + \frac{NF_{other} - 1}{G_{LNA}}$$

IIP3:
$$\frac{1}{IIP_{3,total}} = \frac{1}{IIP_{3,LNA}} + \frac{G_{LNA}}{IIP_{3,other}}$$



Av $SNR = 8dB$ $B = 200kHz$ $NF_{total} = 4dB$ $\Rightarrow P_{in,min} = -109dBm$

$$NF_{total} = 2dB(duplexer) + 2dB(LNA)$$

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

$NF_{LNA}=2dB$ σημαίνει: $R_{equ} = 29\Omega \mid_{\gamma_{\alpha} NF=2dB}$

$$\overline{V_n^2} = 4kT \left(r_b + \frac{1}{2g_m} \right) = 4kT \left(r_b + \frac{V_T}{2I_C} \right) = 4kT \cdot R_{equ}$$

Επίσης, $IIP3 = -10dBm \Rightarrow SFDR = 61dB$

LNA:

Voltage Amplifier

Power Amplifier

$Z_{in}=50\Omega$

$Z_{out}=50\Omega$

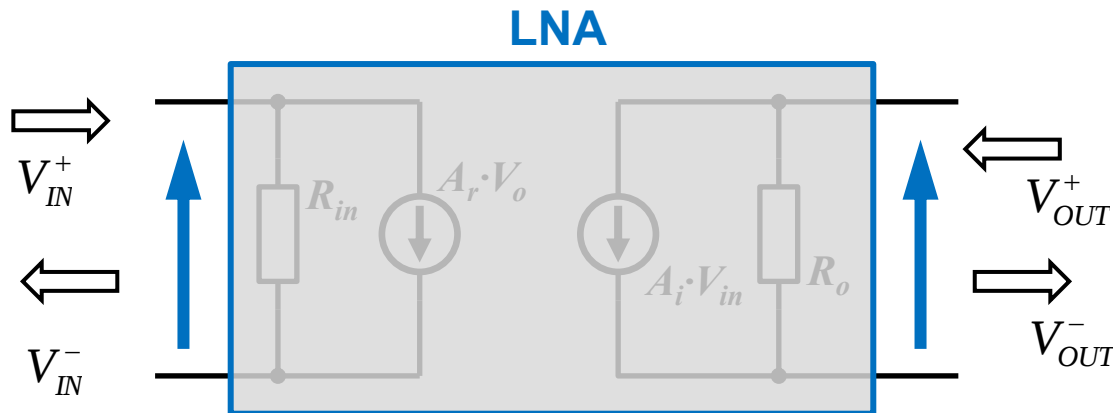


Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

S παράμετροι :

$$V_{IN}^- = S_{11}V_{IN}^+ + S_{12}V_{OUT}^+$$

$$V_{OUT}^- = S_{21}V_{IN}^+ + S_{22}V_{OUT}^+$$



απώλειες επιστροφής RL: $RL = 20 \log |S_{11}|$ $RL = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|$

Παράδειγμα: $RL = -15, \dots, -20 \text{ dB}$ $Z_0 = 50 \Omega \Rightarrow \Delta R = Z_0 - Z_{in} = 9 \Omega, \dots, 15 \Omega$

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Παράγοντας Σταθεροποίησης: $K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{21}||S_{12}|}$

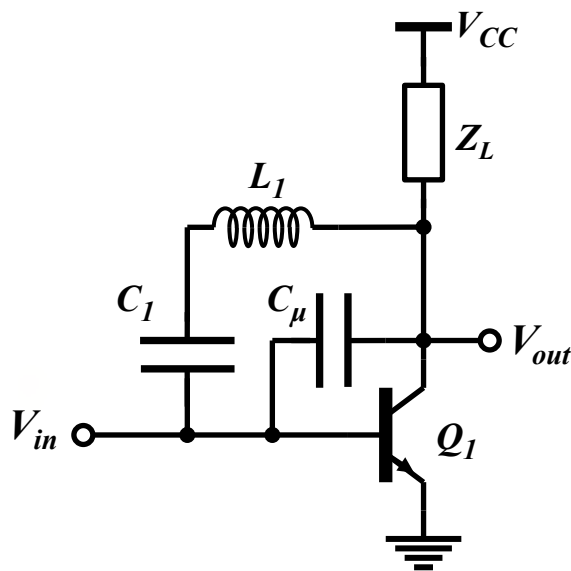
όπου: $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12}$

Το κύκλωμα είναι σταθερό χωρίς περιορισμούς, αν $K > 1$ και $|\Delta| < 1$.

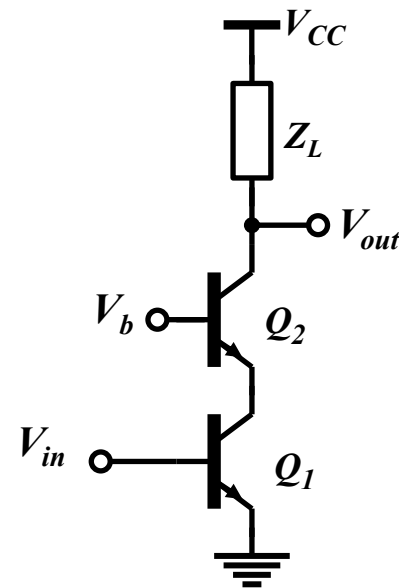


Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Κυκλώματα μείωσης ανάδρασης:



L_1 και C_μ συντονίζονται
στη συχνότητα ω_{RF}

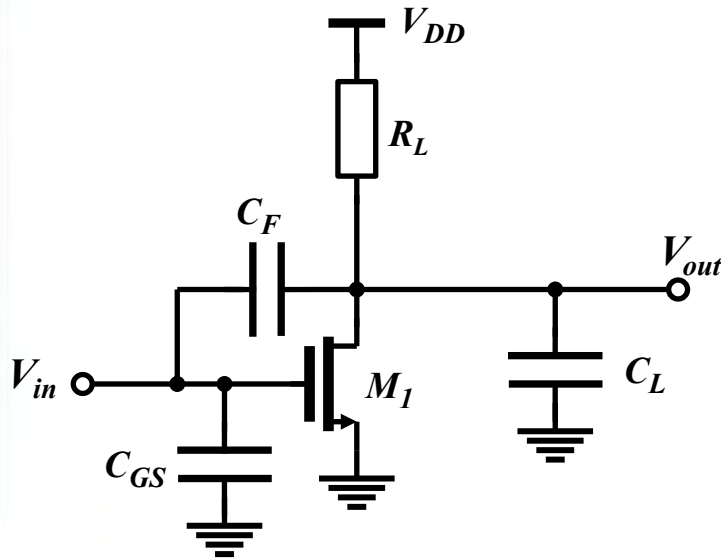


Κύκλωμα cascode

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Προσαρμογή Εισόδου σε κύκλωμα κοινής πηγής:

Παραλείποντας την C_{GS} υπολογίζουμε:



$$\text{Re}\{Y_{in}\} = R_L C_F \omega^2 \frac{C_F + g_m \cdot R_L (C_L + C_F)}{R_L^2 (C_L + C_F)^2 \omega^2 + 1}$$

$$\text{Im}\{Y_{in}\} = C_F \omega \frac{R_L^2 C_L (C_L + C_F) \omega^2 + 1 + g_m \cdot R_L}{R_L^2 (C_L + C_F)^2 \omega^2 + 1}$$

Av $g_m \cdot R_L \gg 1$, $C_L \gg C_F$ **και** $\omega = 1/(R_L \cdot C_L)$ **ισχύει:**

$$\text{Re}\{Y_{in}\} = \frac{g_m \cdot C_F}{2C_L} \quad \textbf{και} \quad \text{Im}\{Y_{in}\} = C_F \omega \left(1 + \frac{g_m \cdot R_L}{2} \right)$$

Με κατάλληλη επιλογή των στοιχείων μπορούμε να πετύχουμε $R_{in} = 50\Omega$.

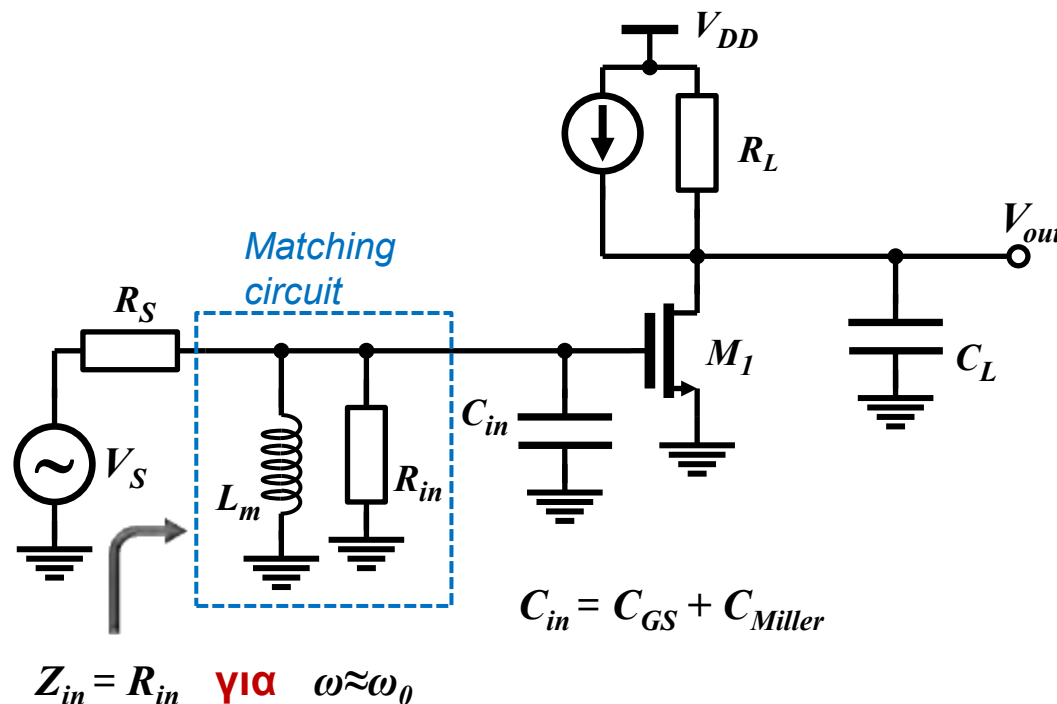
Μειονέκτημα: Χαμηλή απολαβή σε Υ.Σ

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Προσαρμογή Εισόδου:

Χρησιμοποιώντας ωμική αντίσταση $R_{in}=50\Omega$ και εξωτερικό πηνίο L_m για αντιστάθμιση της χωρητικότητας εισόδου, προσθέτουμε θόρυβο. Πράγματι:

$$NF = 1 + \frac{R_S}{R_{in}} \quad \text{Για } R_S = R_{in} \quad NF = 3dB$$



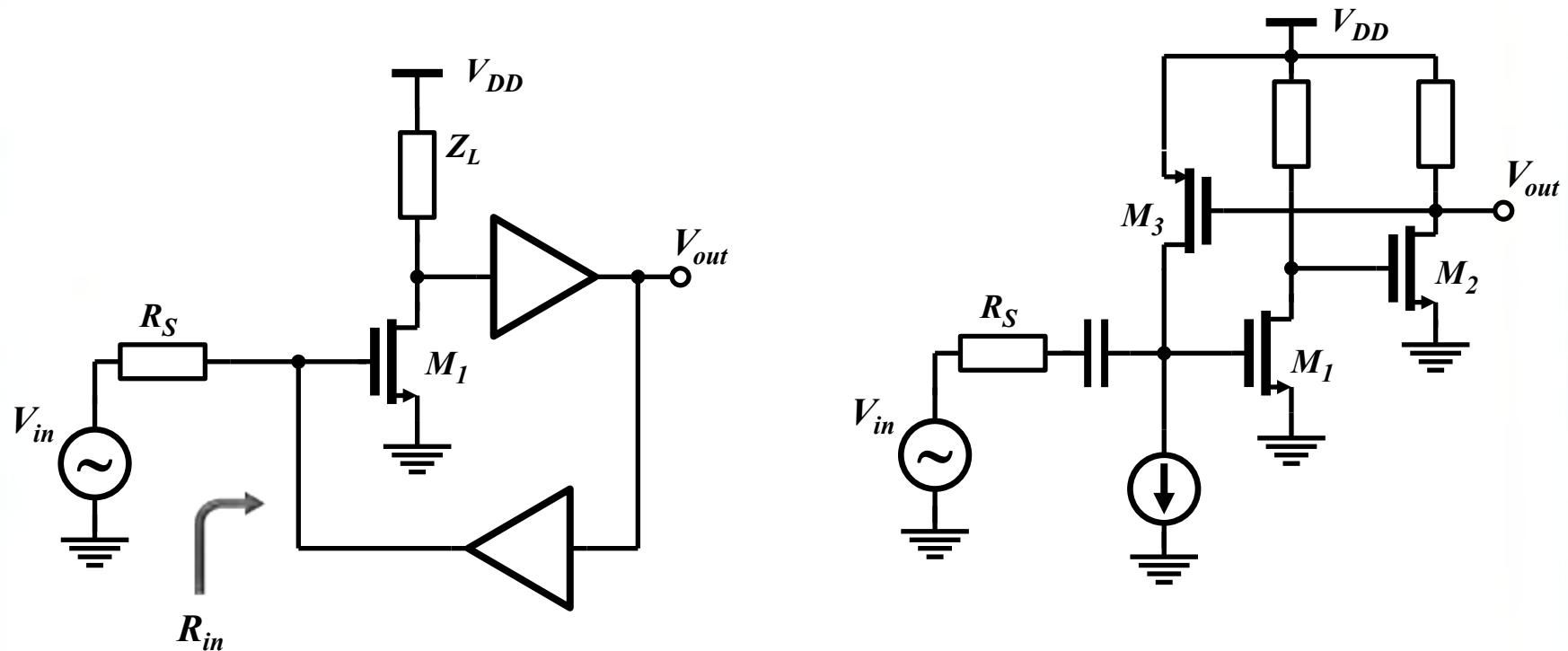
Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Κύκλωμα με αρνητική ανατροφοδότηση:

Μπορούμε να επιτύχουμε χαμηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} , με πραγματικό μέρος 50Ω .

Προβλήματα: (α) Το σήμα της εξόδου περιέχει σημαντικό ποσοστό θορύβου.

(β) Η ολική ολίσθηση της φάσης εξαρτάται από τη συχνότητα και μπορεί να οδηγήσει σε ταλάντωση.



Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

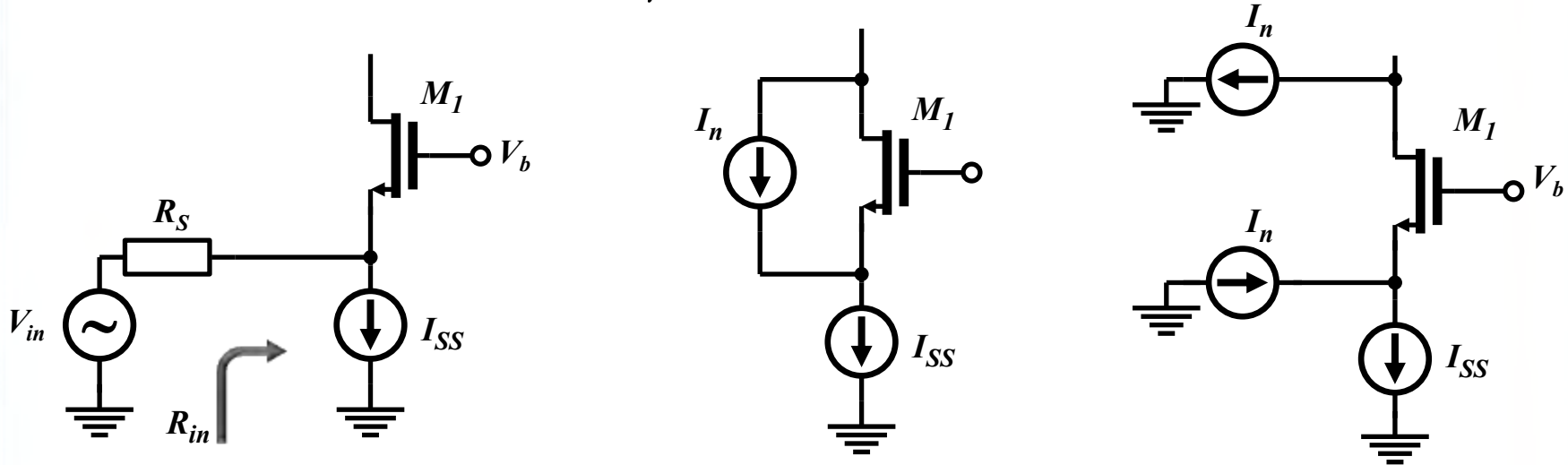
Βαθμίδα κοινής πύλης:

Μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να εμφανίζει $R_{in} = 1/(g_m + g_{mb}) = 50\Omega$. Η χωρητικότητα εισόδου μπορεί να αντισταθμιστεί από εξωτερικό πηνίο.

Μειονέκτημα: Η διαγωγιμότητα του τρανζίστορ δεν μπορεί να είναι οσοδήποτε μεγάλη, πράγμα που θέτει κατώτατο όριο στο NF . Αν λάβουμε υπόψη μόνο το θερμικό θόρυβο του καναλιού του M_1 :

$$I_n^2 = 4kT\gamma g_m \quad \text{όπου: } \gamma = 2/3,$$

$$NF = 1 + \gamma \quad \text{Για } \gamma = 2/3 \Rightarrow NF = 5/3 = 2.2dB$$



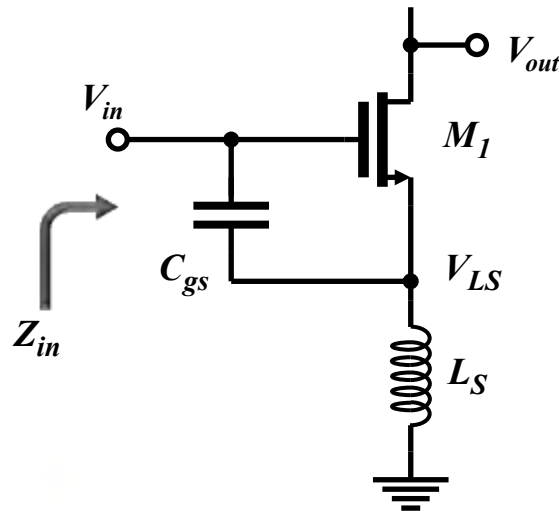
Αντίστοιχα στη συνδεσμολογία κοινής βάσης: $NF = 1.77dB$

Στις υπομικρονικές τεχνολογίες ισχύει $\gamma \gg 2/3$

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Κύκλωμα κοινής πηγής με εκφυλισμό της πηγής:

Παραλείποντας τις χωρητικότητες πύλης-εκροής και πηγής-υποστρώματος, έχουμε:



$$V_{in} = V_{gs} + V_{LS}$$

$$V_{in} = j\omega L_S (g_m V_{gs} + j\omega C_{gs} V_{gs}) + V_{gs}$$

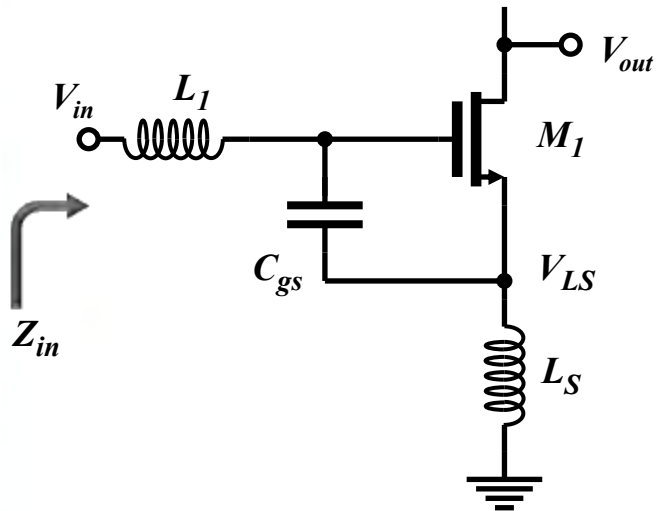
$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{j\omega C_{gs} V_{gs}} = \frac{g_m L_S}{C_{gs}} + j \left(\omega L_S - \frac{1}{\omega C_{gs}} \right)$$

Επιλέγοντας κατάλληλα τα g_m , L_S , και C_{GS} μπορούμε να έχουμε το πραγματικό μέρος $= 50\Omega$ (χωρίς θερμικό θόρυβο).

Στην πραγματικότητα το φανταστικό μέρος μπορεί να μην είναι μηδέν στη συχνότητα λειτουργίας. Το πηνίο εκφυλισμού υποβιβάζει την ισοδύναμη διαγωγιμότητα και κάνει πιο σημαντικό το θόρυβο της επόμενης βαθμίδας.

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Κύκλωμα κοινής πηγής με εκφυλισμό της πηγής (συνέχεια):



$$Z_{in} = \underbrace{\frac{g_m L_S}{C_{gs}}}_{\approx R_S} + j \left(\omega(L_S + L_1) - \frac{1}{\omega C_{gs}} \right)$$

Εξαλείφεται για $\omega \approx \omega_0$

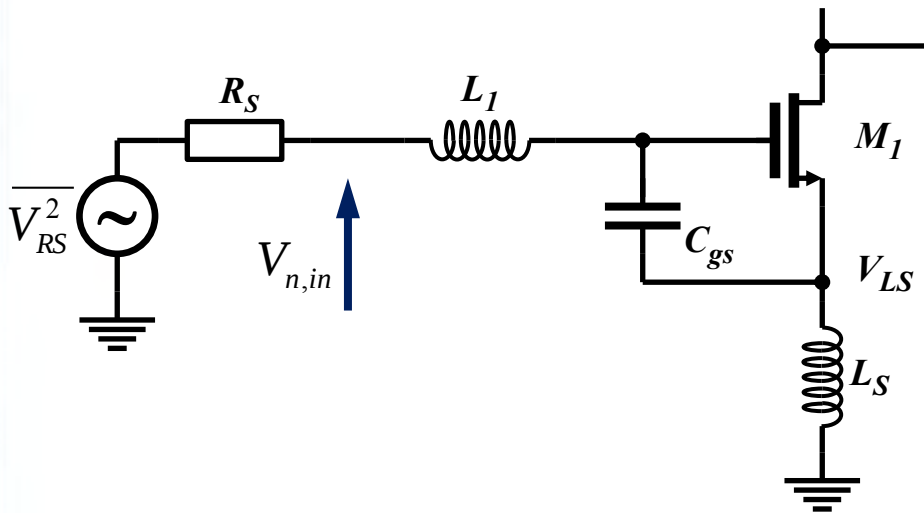
Η L_1 δίνει πρόσθετο βαθμό ελευθερίας.

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Υπολογισμός εικόνας θορύβου.

$$NF = \frac{S_{in} / N_{in}}{S_{out} / N_{out}} = \frac{S_{in}}{S_{out}} \cdot \frac{N_{dev,out} + GN_{in}}{N_{in}}$$

$$G = \frac{S_{out}}{S_{in}} \quad \text{Απολαβή ισχύος}$$



$$NF = \frac{N_{dev,out} + GN_{in}}{GN_{in}}$$

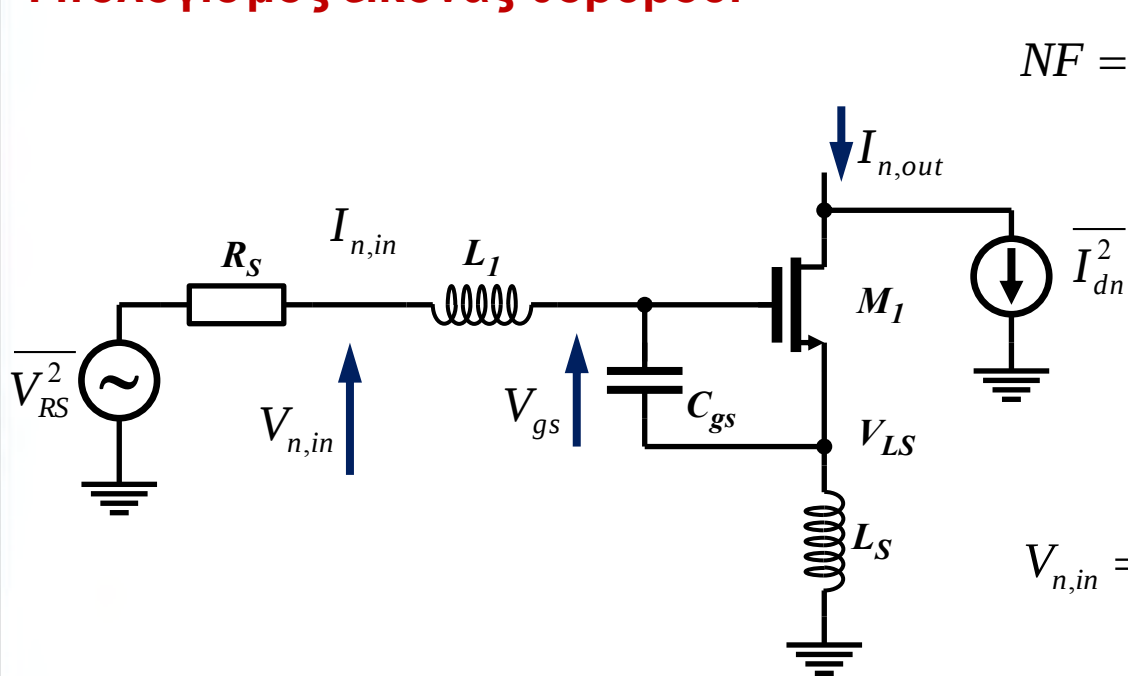
$$NF = \frac{N_{dev,out}}{GN_{in}} + 1$$

$$N_{dev,out} = 4kT\gamma g_m$$

$$N_{in} = V_{n,in}^2$$

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Υπολογισμός εικόνας θορύβου.



$$NF = \frac{N_{dev,out}}{GN_{in}} + 1$$

$$N_{dev,out} = 4kT\gamma g_m$$

$$N_{in} = V_{n,in}^2$$

για $\omega \approx \omega_0$ ισχύει $Z_{in} = R_S$

Άρα:

$$V_{n,in} = V_{RS} / 2 \quad \text{και} \quad I_{n,in} = \frac{1}{2} (V_{RS} / R_S)$$

$$G = G_m^2$$

$$G_m = \frac{I_{n,out}}{V_{n,in}}$$

Υπολογισμός απολαβής:

$$V_{gs} = I_{n,in} \cdot \frac{1}{j\omega C_{gs}}$$

$$I_{n,out} = g_m \cdot V_{gs}$$

$$G_m = \frac{g_m I_{n,in}}{j\omega C_{gs} V_{n,in}} = \frac{g_m}{j\omega C_{gs} R_S} \bigg|_{\omega=\omega_0} = \frac{g_m}{j} Q$$

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Υπολογισμός εικόνας θορύβου (συνέχεια).

$$NF = \frac{N_{dev,out}}{|G_m|^2 N_{in}} + 1 = \frac{4kT\gamma g_m}{(g_m Q)^2 \cdot \left(\frac{4kTR_S}{4}\right)} + 1 \qquad NF = \frac{4\gamma}{Q^2 \cdot g_m R_S} + 1$$

Το NF μπορεί να βελτιστοποιηθεί μόνο με τα g_m και Q διότι το R_S είναι καθορισμένο.

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{1}{R_S \omega_0 C_{gs}} \\ R_S &= \frac{g_m L_S}{C_{gs}} \quad (1) \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} Q^2 \cdot g_m R_S &= \frac{g_m R_S}{(R_S \omega_0 C_{gs})^2} \\ \omega_0^2 &= \frac{1}{(L_1 + L_S) C_{gs}} \quad (2) \end{aligned} \right\} \quad Q^2 \cdot g_m R_S = \frac{L_1 + L_S}{L_S}$$

Άρα: $NF = \frac{4\gamma}{1 + L_1 / L_S} + 1$

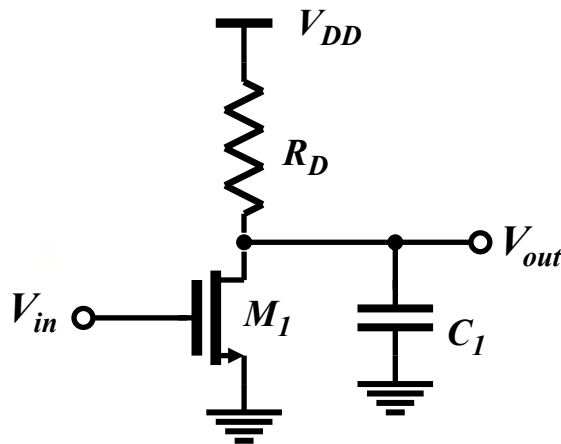
Δεν επιλέγονται αυθαίρετα τα L_S και L_1 καθώς υπάρχουν οι περιορισμοί (1) και (2)

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

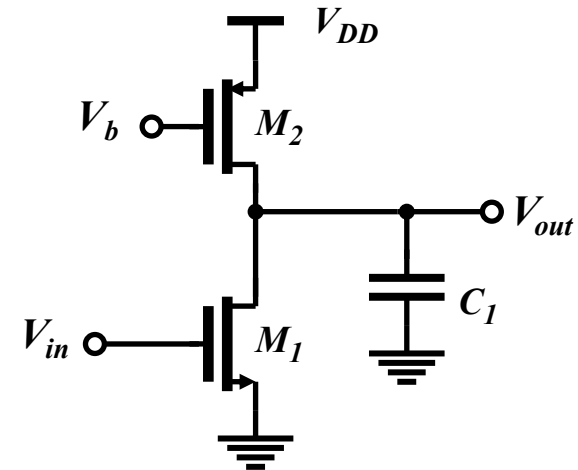
6.1.4 Κυκλώματα LNA σε τεχνολογία CMOS (Όχι το 6.1.3)

Στις υπομικρονικές τεχνολογίες, με κατάλληλη πόλωση, μπορεί να επιτευχθεί αποδεκτή στάθμη θορύβου των MOSFET. Στις εφαρμογές RF τα MOSFET είναι δυνατόν να εμφανίζουν καλύτερη γραμμικότητα από τα διπολικά τρανζίστορ.

Βασικές τοπολογίες κοινής πηγής.



Λόγω της χαμηλής διαγωγιμότητας των MOSFET, η απολαβή τάσης είναι σχετικά μικρή, οπότε κυριαρχεί ο θόρυβος της R_D και της επόμενης βαθμίδας

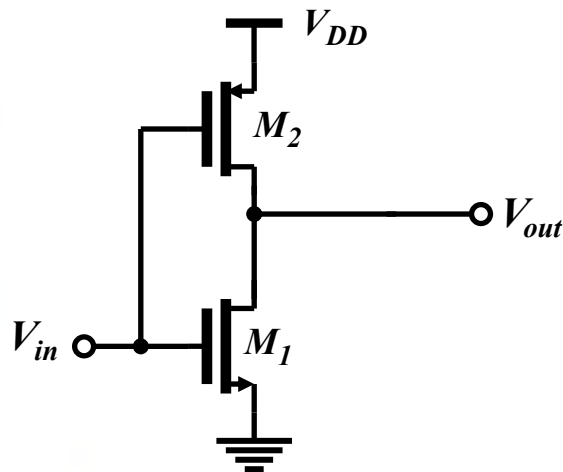


Αντικαθιστούμε το φόρτο από πηγή ρεύματος, M_2 . Αν η αντίσταση εξόδου του M_2 είναι αρκετά μεγάλη, η απολαβή του κυκλώματος γίνεται: $\sim gm_1 / j\omega C_1$.

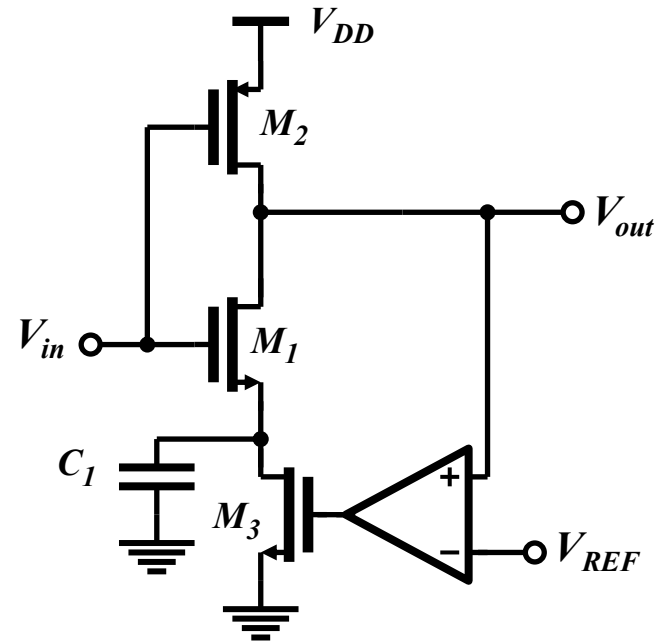
Η πηγή ρεύματος συνεισφέρει επίσης στο θόρυβο.

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Βασικές τοπολογίες κοινής πηγής



Ο ολικός θόρυβος ανηγμένος στην είσοδο μειώνεται αν και το M2 κάνει ενίσχυση του σήματος.

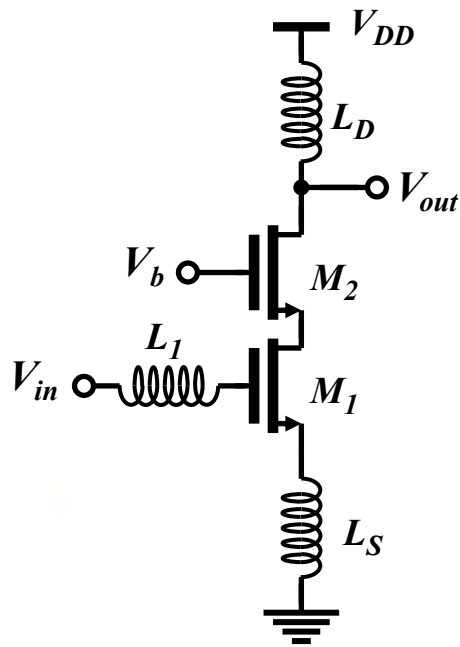


Το κύκλωμα ανατροφοδότησης χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση του ρεύματος πόλωσης. Η ολική διαγωγιμότητα γίνεται: $g_{m1} + g_{m1}$, αλλά το κύκλωμα εμφανίζει μεγάλη αντίσταση εισόδου.

Θα πρέπει να προστεθεί μία βαθμίδα εξόδου για να επιτύχουμε αντίσταση εξόδου $= 50\Omega$. Η τοπολογία ακολουθητή πηγής επιτυγχάνει πολύ μικρότερη απολαβή τάσης από την τοπολογία κοινής πηγής.

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Τοπολογία κοινής πηγής με εκφυλισμό της πηγής.



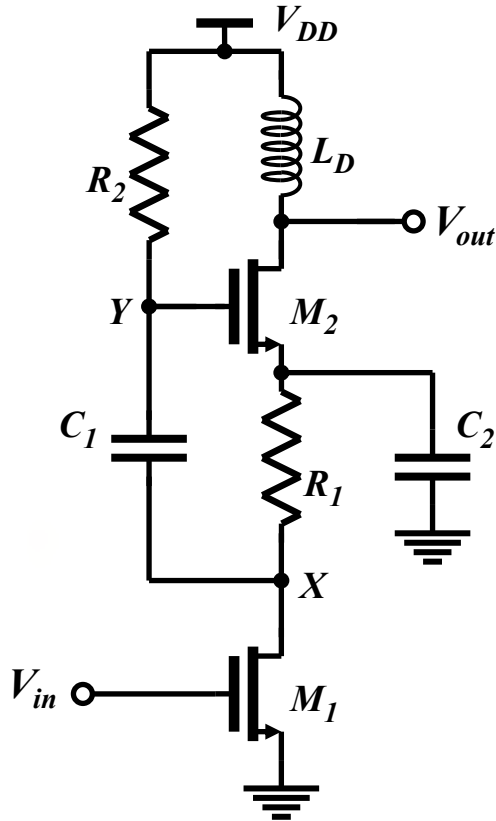
Το τρανζίστορ κοινής πύλης M_2 αυξάνει την ανάστροφη απομόνωση του LNA και έτσι:

- μειώνει τη διαρροή του τοπικού ταλαντωτή που προέρχεται από τον μίκτη που ακολουθεί
- σταθεροποιεί το κύκλωμα εμποδίζοντας την ανάδραση από την έξοδο στην είσοδο.

Χρειάζεται ακόμη μία βαθμίδα για προσαρμογή της εξόδου στα 50Ω.

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Τοπολογία κοινής πηγής δύο βαθμίδων

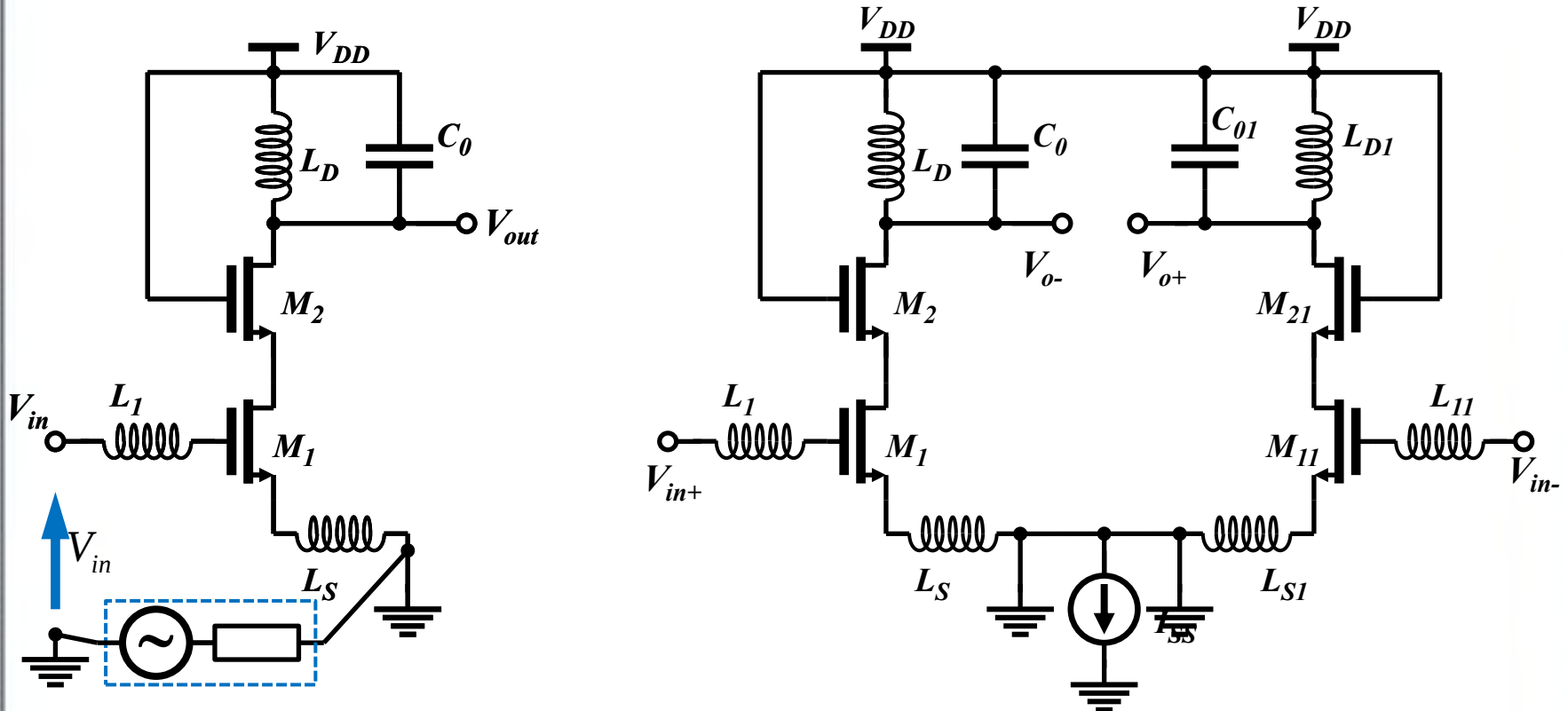


Τα M_1 και M_2 λειτουργούν ως διατάξεις κοινής πηγής, που πολώνονται με το ίδιο ρεύμα. Το σήμα που ενισχύεται από το M_1 φτάνει στην πύλη του M_2 μέσω του C_1 , ενώ η πηγή του M_2 γειώνεται μέσω του C_2 .

- Μειωμένη κατανάλωση ισχύος λόγω της επαναχρησιμοποίησης του ρεύματος πόλωσης.
- Μείωση της απολαβής ΥΣ στα X και Y λόγω παρασιτικών χωρητικότητων της C_1 .

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Διαφορικά κυκλώματα :

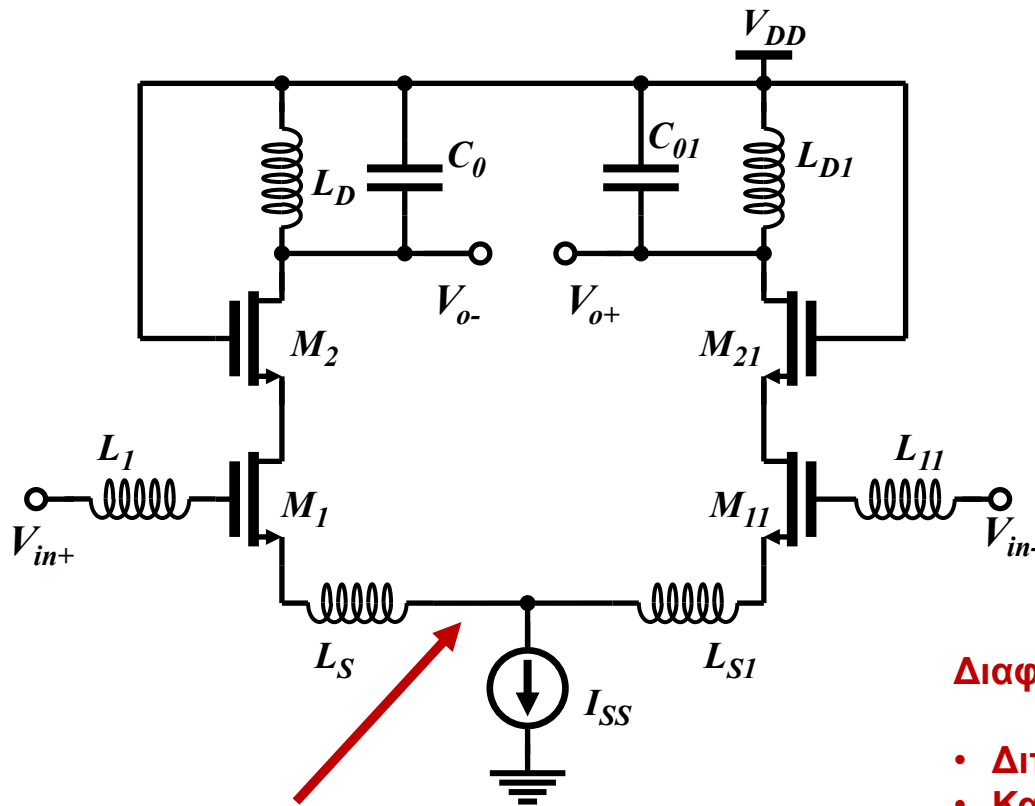


Τα Διαφορικά κυκλώματα έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- (α) αποφεύγονται παρασιτικοί βρόχοι γείωσης (ground loop) και παρασιτικές διαμορφώσεις από άλλες βαθμίδες,
- (β) λόγω της συμμετρίας απορρίπτονται οι διαταραχές κοινού τρόπου (common mode disturbances)

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Διαφορικός LNA



Εικονική γη
(virtual ground)

Βαθμίδα εισόδου CS με εκφυλισμό πηγής.
Δεύτερη βαθμίδα: CG για υψηλή απολαβή τάσης. Συνήθως απαιτείται μια βαθμίδα απομόνωσης στην έξοδο (buffer)

Διαφορικός LNA:

- Διπλή απολαβή
- Καλύτερη γραμμικότητα
- Διπλή απώλεια ισχύος
- Διπλό κόστος σε επιφάνεια πυριτίου
- Υψηλότερο NF
- ... αλλά χρήσιμος

Ενισχυτές Χαμηλού Θορύβου (LNA)

Υπολογισμός απολαβής LNA:

$$A_V = G_m \cdot \underbrace{A_{I,CG}}_{\text{απολαβή } V/I \text{ της βαθμίδας CG}} \cdot (j\omega_0 L_0 // (1 / j\omega_0 C_0))$$

διαγωγιμότητα της βαθμίδας CS . $G_m = -jg_m Q$

$$A_V = -jg_m Q \cdot 1 \cdot \frac{j\omega_0 L_0}{1 - \omega_0^2 L_0 C_0} =$$
$$= g_m \cdot \frac{1}{R_S \omega_0 C_{gs}} \cdot \frac{\omega_0 L_0}{1 - \omega_0^2 L_0 C_0}$$

$$A_V = \frac{1}{\omega_0 L_S} \cdot \frac{\omega_0 L_0}{1 - \omega_0^2 L_0 C_0}$$

Υπολογισμός ισχύος:

$$P \propto \frac{L^2}{\mu} \cdot \frac{R_S^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{1}{L_S^3 (1 + L_1 / L_S)}$$

όπου:

L : μήκος καναλιού τεχνολογίας (channel length)

μ : ευκινησία (mobility)

R_S : καθιερωμένη αντίσταση στα RF (50Ω)