



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

HELLENIC REPUBLIC
National and Kapodistrian
University of Athens

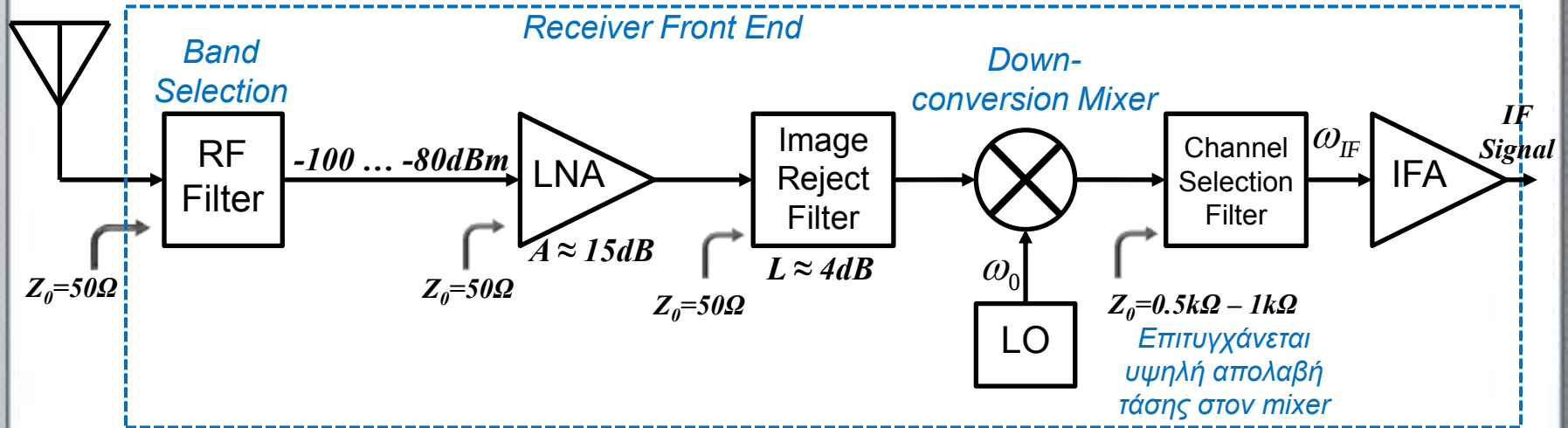


Εισαγωγή στη Σχεδίαση Κυκλωμάτων RF

Κεφάλαιο 6.2 Mixers

Βασικές Παράμετροι Μικτών (Mixer)

Βασικές παράμετροι των μικτών:



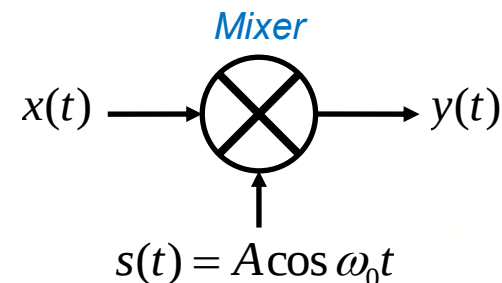
Τυπικά χαρακτηριστικά mixer

<u>NF (εικόνα θορύβου)</u>	<u>12 dB</u>
<u>IIP3</u>	<u>+5 dBm</u>
<u>Απολαβή</u>	<u>10 dB</u>
<u>Εμπέδηση εισόδου (και εξόδου)</u>	<u>50 Ω</u>
<u>Απομόνωση (Port-to-Port)</u>	<u>10-20 dB</u>

Mixers – Βασικές Παράμετροι

Με ημιτονικό σήμα τοπικού ταλαντωτή:

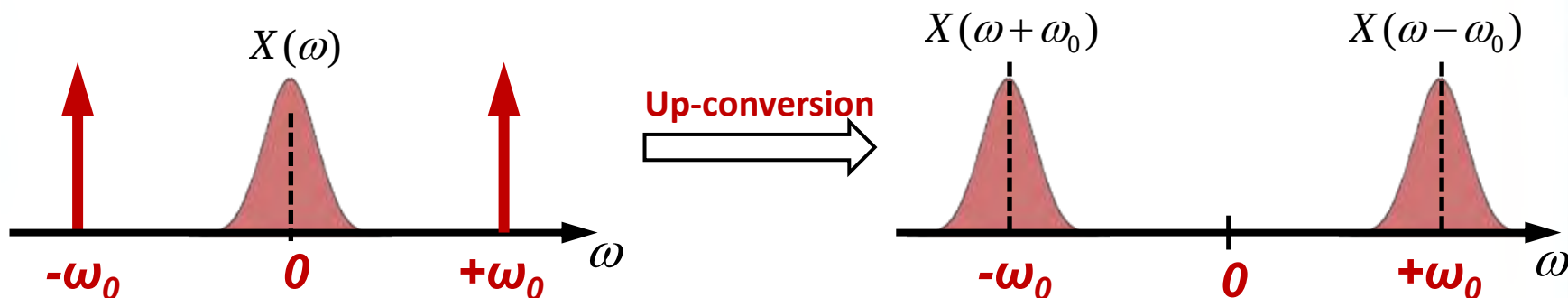
$$y(t) = x(t) \cdot s(t) \xleftrightarrow{FT} Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} X(\omega) * S(\omega)$$



$$S(\omega) = \pi A (\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0))$$

$$Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\nu) \cdot S(\omega - \nu) d\nu$$

$$Y(\omega) = \frac{A}{2} (X(\omega - \omega_0) + X(\omega + \omega_0))$$



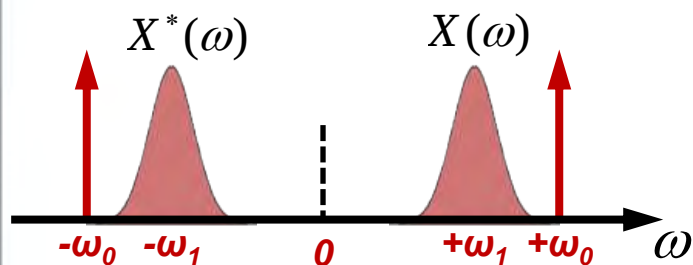
Mixers – Βασικές Παράμετροι

Με ημιτονικό σήμα τοπικού ταλαντωτή:

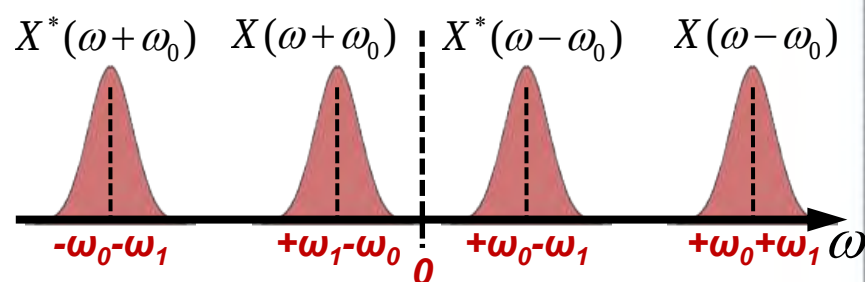
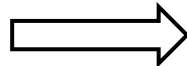
Mixer

$$X(\omega) \rightarrow \bigotimes \rightarrow Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} X(\omega) * S(\omega)$$

$S(\omega) = \pi A(\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0))$



Down-conversion

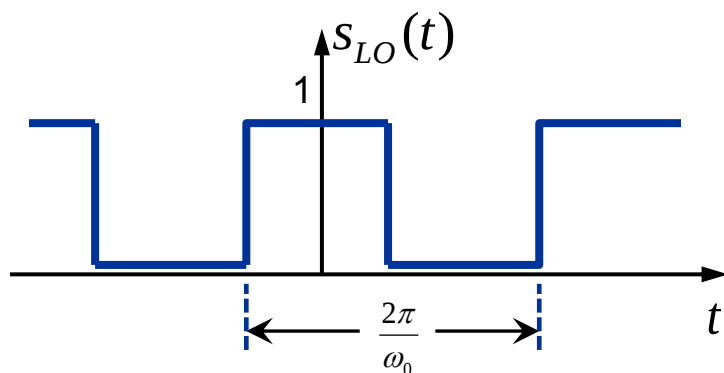
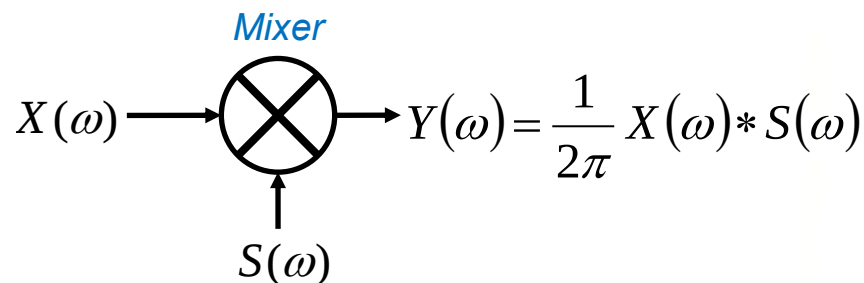


Mixers – Βασικές Παράμετροι

Με τετραγωνικό σήμα τοπικού ταλαντωτή:

$$y(t) = K_0 \cdot x_{RF}(t) \cdot s_{LO}(t)$$

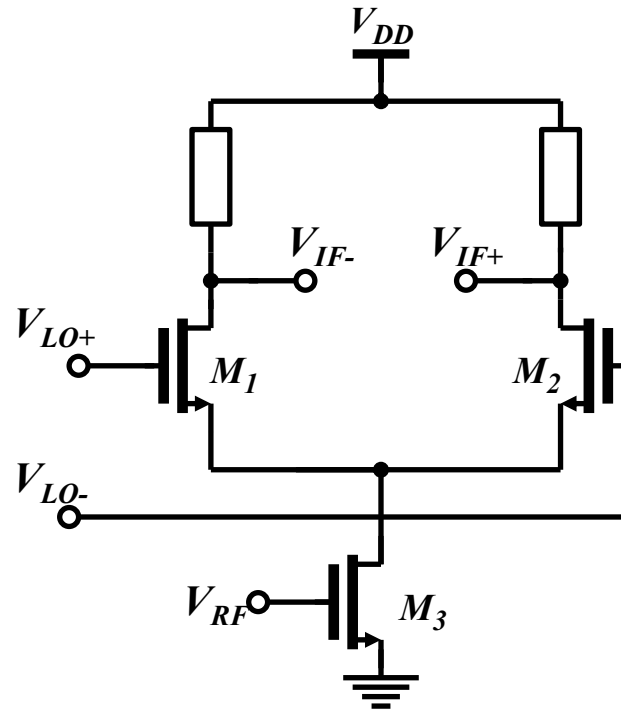
$$Y(\omega) = \frac{K_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X_{RF}(\omega - \nu) \cdot S_{LO}(\nu) d\nu$$



$$s(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_0 t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_0 t + \dots$$

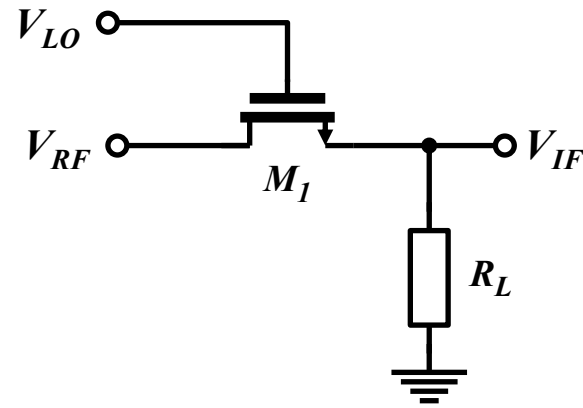
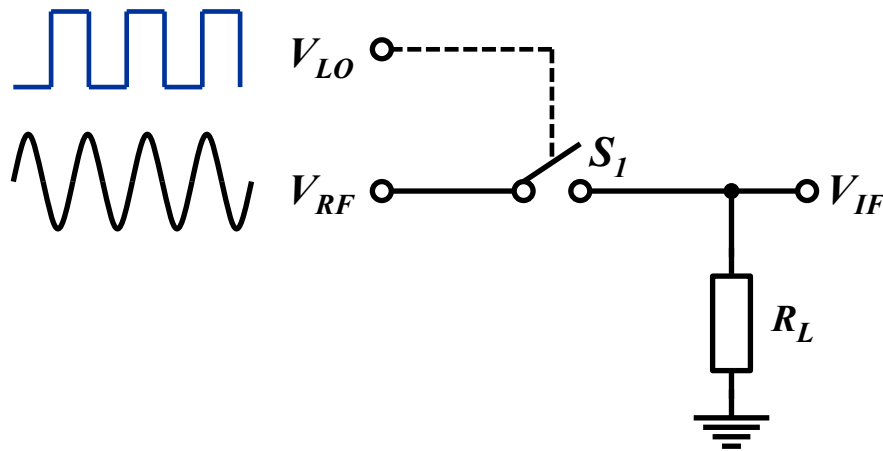
$$Y(\omega) = \frac{K_0}{2} X_{RF}(\omega) + \frac{K_0}{\pi} X_{RF}(\omega + \omega_0) + \frac{K_0}{\pi} X_{RF}(\omega - \omega_0) - \dots$$

Ενεργοί Μίκτες



Οι ενεργοί μίκτες, χάρη στην ενίσχυση που επιτυγχάνουν, μειώνουν τη συμβολή των επόμενων βαθμίδων στο θόρυβο του δέκτη, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται ευρέως στα RF.

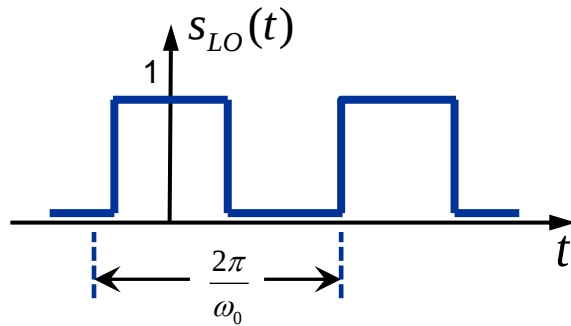
Παθητικοί Μίκτες



Οι παθητικοί μίκτες εμφανίζουν μεγαλύτερη γραμμικότητα και ταχύτητα απόκρισης και χρησιμοποιούνται στους σταθμούς βάσης.

Mixers – Απολαβή μετατροπής

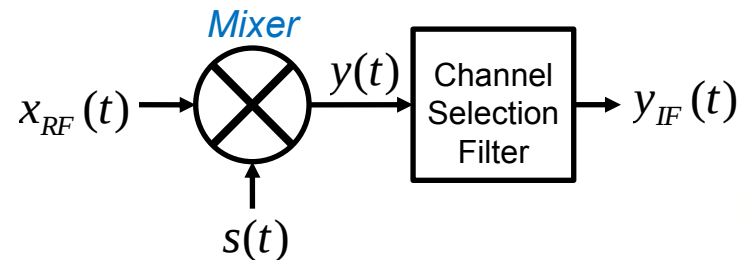
- Απολαβή μετατροπής τάσης: ο λόγος της RMS τάσης του σήματος IF προς την RMS τάση του σήματος RF.
- Απολαβή μετατροπής ισχύος (ίση με την απολαβή τάσης σε dB αν η αντίσταση εισόδου και η αντίσταση εξόδου είναι ίσες με την αντίσταση της πηγής σήματος).



$$s(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_0 t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_0 t + \dots$$

$$S(\omega) = \pi \delta(\omega) + 2(\delta(\omega + \omega_0) + \delta(\omega - \omega_0)) - \dots$$

$$Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X_{RF}(\omega - \nu) \cdot S(\nu) d\nu$$



$$Y(\omega) = \frac{1}{2} X_{RF}(\omega) + \underbrace{\frac{1}{\pi} X_{RF}(\omega + \omega_0) + \frac{1}{\pi} X_{RF}(\omega - \omega_0)} - \dots$$

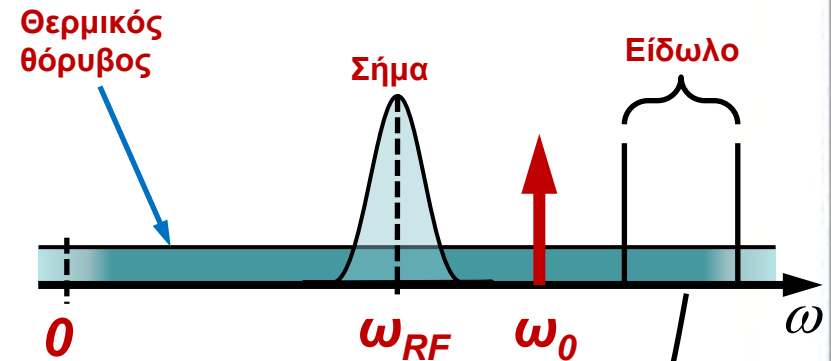
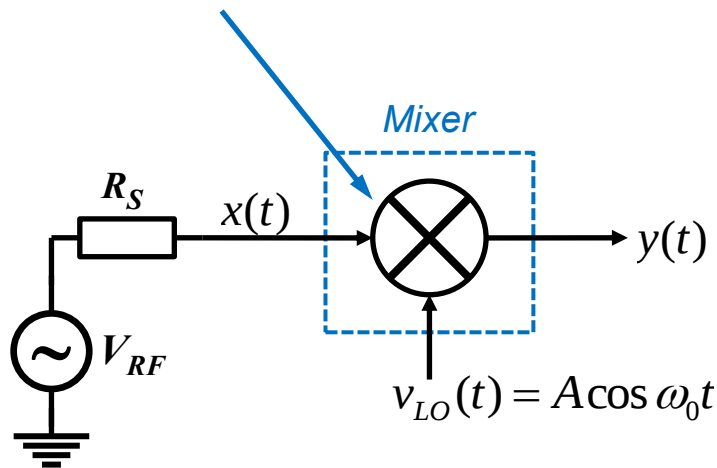
Voltage Conversion Gain G_C :
(Απολαβή μετατροπής τάσης < 1)

$$G_C = \frac{1}{\pi}$$

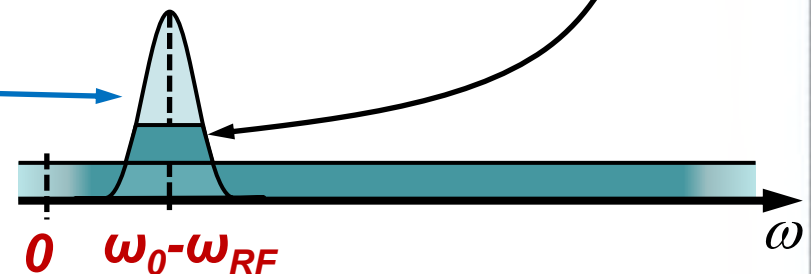
Active single balanced mixer: $G_C = \frac{2g_m R}{\pi}$

Mixers – Εικόνα θορύβου SSB

Αθόρυβος μίκτης με μοναδιαία απολαβή):



Το σήμα μετά την μετατροπή συχνότητας έχει διπλάσιο θόρυβο

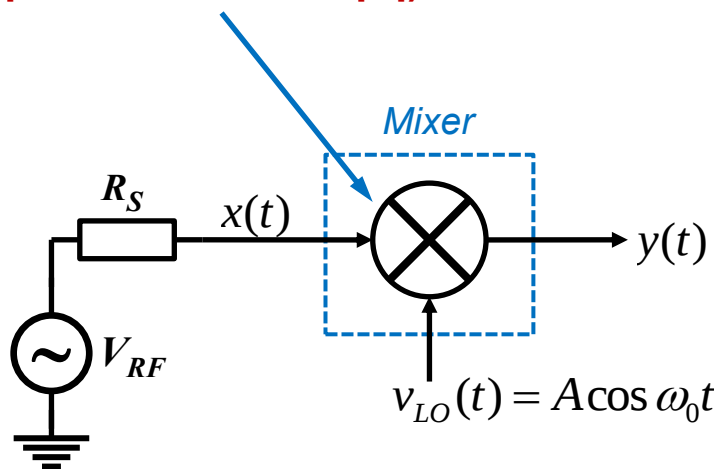


$$SNR_{out} = (1/2) \cdot SNR_{IN}$$

$$NF = 3dB$$

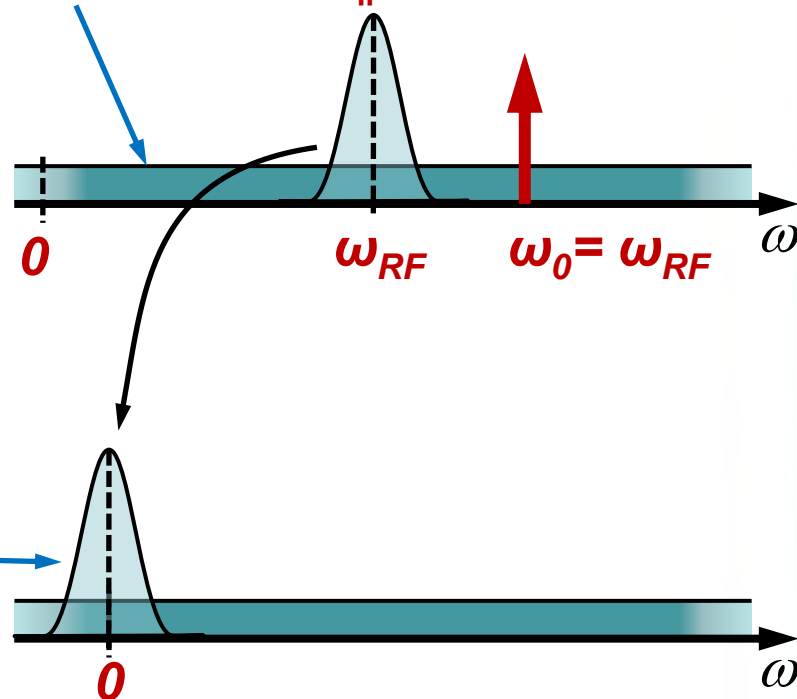
Mixers – Εικόνα θορύβου DSB

Αθόρυβος μίκτης με
μοναδιαία απολαβή:



Θερμικός
θόρυβος

Σήμα

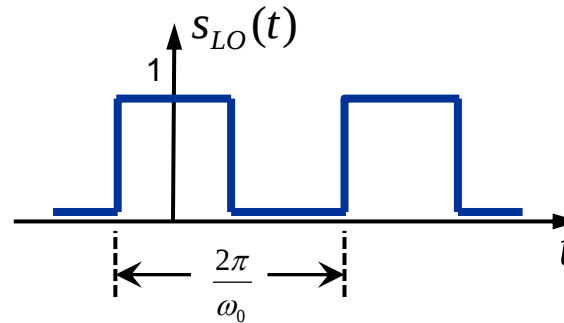


$$SNR_{out} = SNR_{IN}$$

$$NF = 0dB$$

Mixers – θόρυβος με μη ημιτονικό σήμα LO

Εικόνα θορύβου (NF):



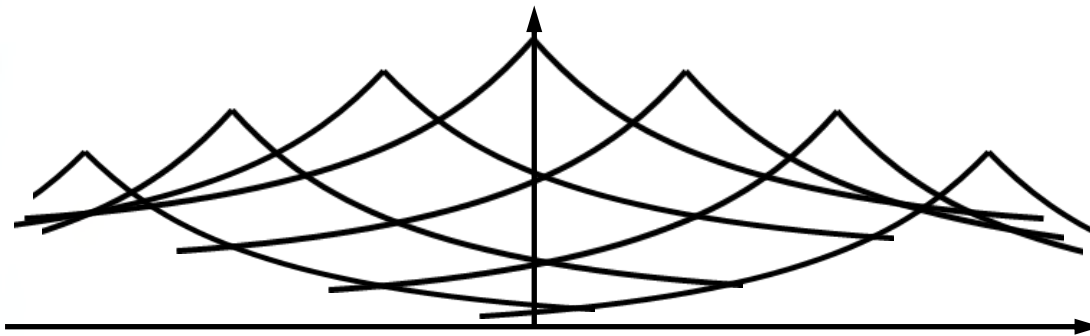
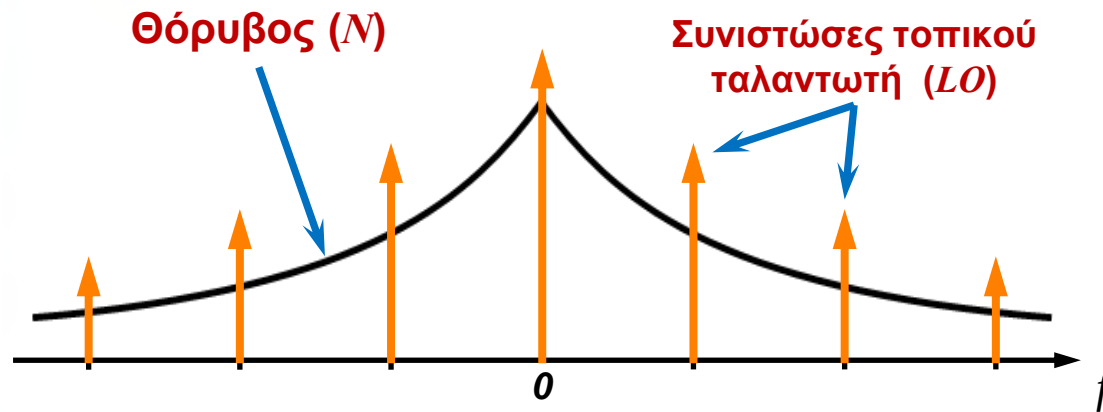
$$v_{LO}(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_0 t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_0 t + \dots$$

$$y_n(t) = H(\omega, t) \cdot x_n(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} H_l(\omega) e^{jl\omega_0 t} \cdot x_n(t)$$

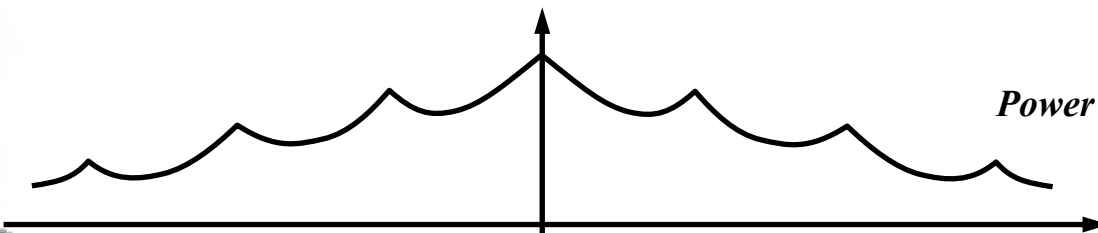
$$Y_n(\omega) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} H_l(\omega) X_n(\omega + l\omega_0)$$

$$S_{yn}(\omega) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} |H_l(\omega)|^2 S_{xn}(\omega + l\omega_0)$$

Mixers – θόρυβος με μη ημιτονικό σήμα LO



Ο θόρυβος αντιγράφεται σε κάθε αρμονική του σήματος LO
(*noise folding*)



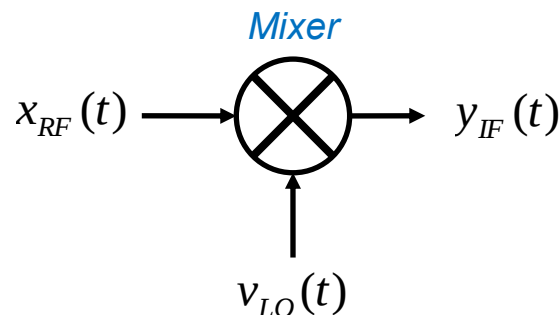
Ο συνολικός θόρυβος εξόδου

Power Spectra Density of stationery folded noise

$$S_{yn}(\omega) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} |H_l(\omega)|^2 S_{xn}(\omega + l\omega_0)$$

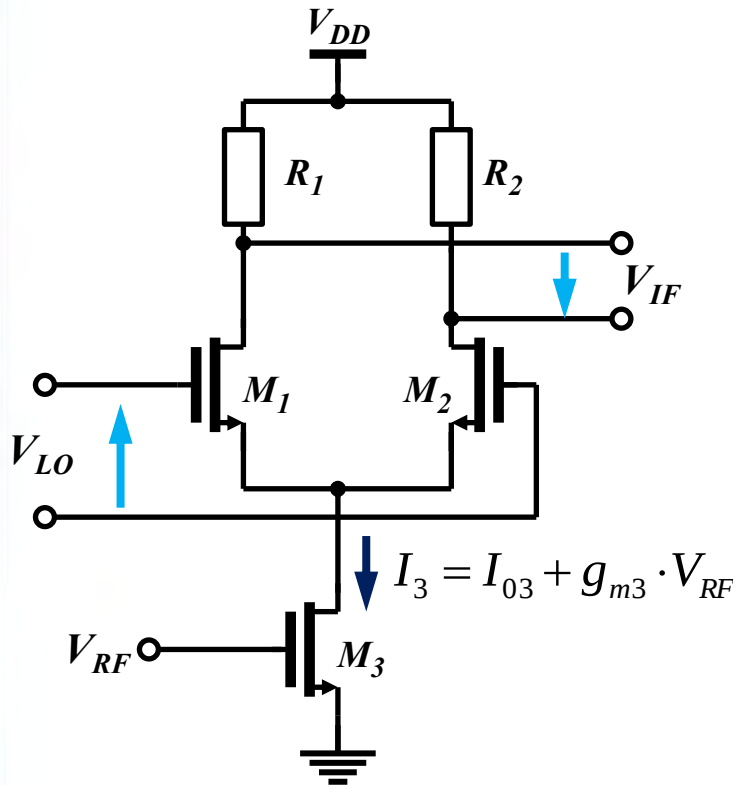
Mixers – Απομόνωση Εισόδων εξόδων

- Η ελλιπής απομόνωση $LO-RF$ προκαλεί διαρροή του τοπικού ταλαντωτή προς τον LNA και ενδεχομένως προς την κεραία.
- Η ελλιπής απομόνωση $RF-LO$ επιτρέπει σε ισχυρούς παρεμβολείς να αλληλεπιδράσουν με τον τοπικό ταλαντωτή που οδηγεί τον μίκτη.
- Η ελλιπής απομόνωση $LO-IF$ μπορεί να προκαλέσει απευαισθητοποίηση των βαθμίδων που ακολουθούν.
- Η απομόνωση $RF-IF$ καθορίζει τι ποσοστό του RF σήματος εμφανίζεται απ' ευθείας στην έξοδο IF , κάτι που είναι κρίσιμο στους ομόδυνους δέκτες.



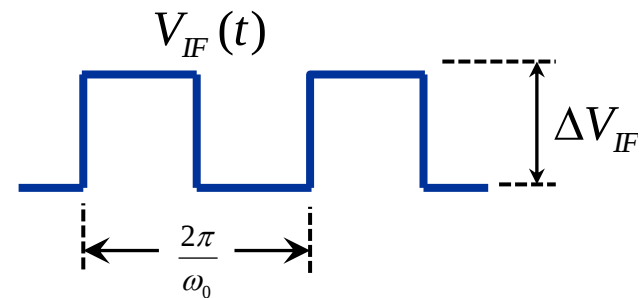
Mixers – Απομόνωση Εισόδων εξόδων

- Εκτίμηση της απομόνωσης $LO-RF$



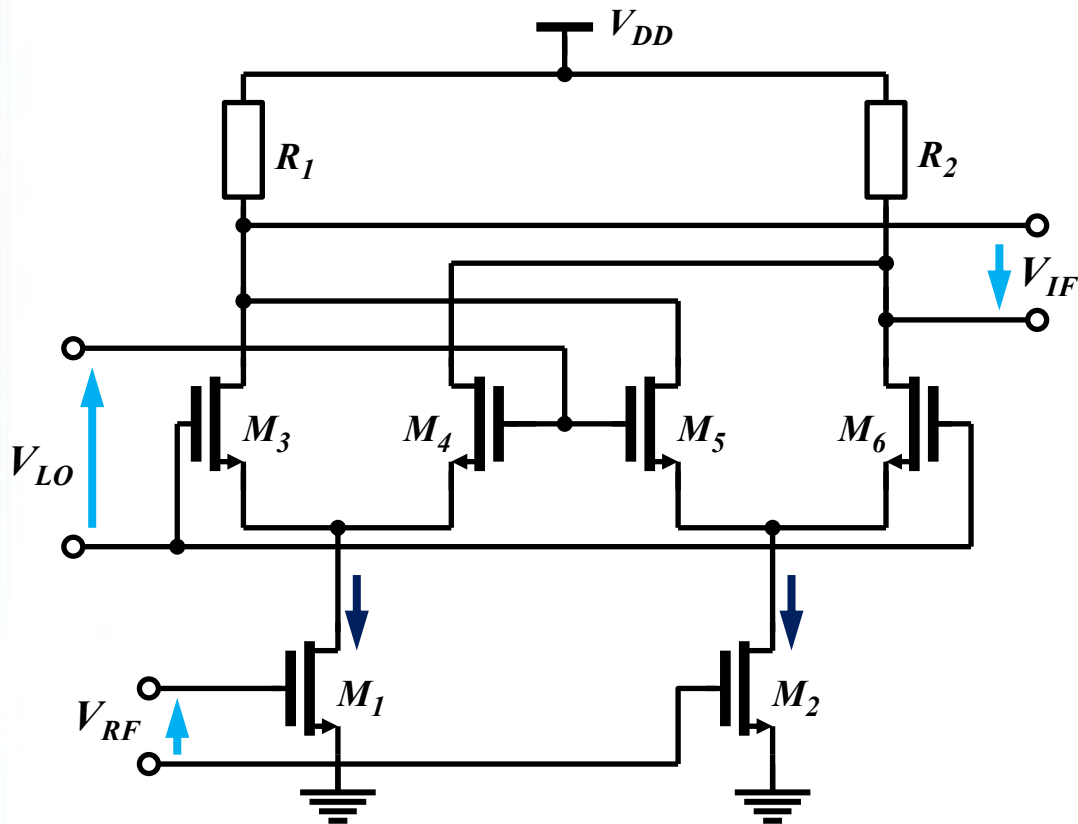
$$\left. \begin{array}{l} V_{LO} > 0 \rightarrow V_{IF} = R_1 I_{03} \\ V_{LO} < 0 \rightarrow V_{IF} = -R_2 I_{03} \end{array} \right\} \Delta V_{IF} = 2R I_{03}$$

Large Feedthrough



Mixers – Απομόνωση Εισόδων εξόδων

Εκτίμηση της απομόνωσης *LO-RF*

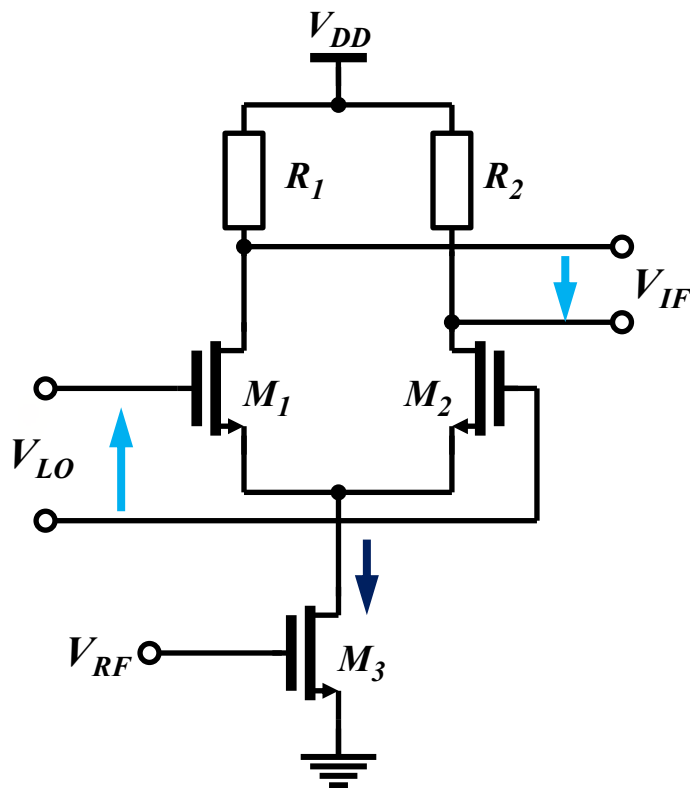


$$\left. \begin{array}{ll} V_{LO} > 0 & \rightarrow V_{IF} = R_1 I_{02} - R_2 I_{01} = R(I_{02} - I_{01}) \\ V_{LO} < 0 & \rightarrow V_{IF} = R_1 I_{01} - R_2 I_{02} = R(I_{01} - I_{02}) \end{array} \right\} \Delta V_{IF} = 2R(I_{01} - I_{02}) \approx 0$$

Small Feedthrough

Mixers – Μίκτες Απλής και Διπλής Ισοστάθμισης

- Αν ένας μίκτης χρησιμοποιεί διαφορικό σήμα LO αλλά μονόπλευρο RF σήμα, λέγεται «απλής ισοστάθμισης».

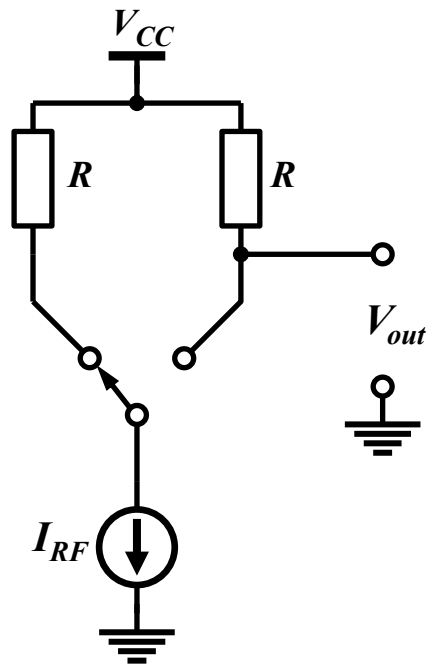


Πλεονεκτήματα: μικρότερος θόρυβος ανηγμένος στην είσοδο για δεδομένη κατανάλωση ισχύος

Μειονεκτήματα: μεγαλύτερη επίδραση του θορύβου του LO και μικρότερη απομόνωση $LO-IF$

$$G_C = \frac{2g_m R}{\pi}$$

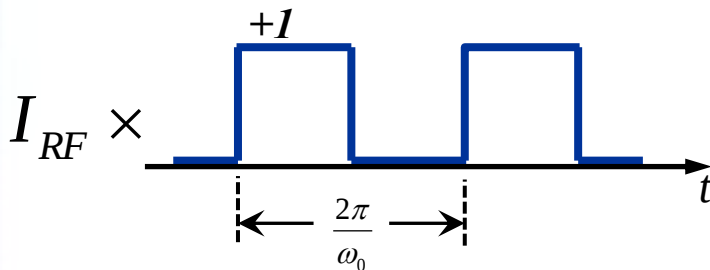
Mixers – Μονόπλευρη έξοδος



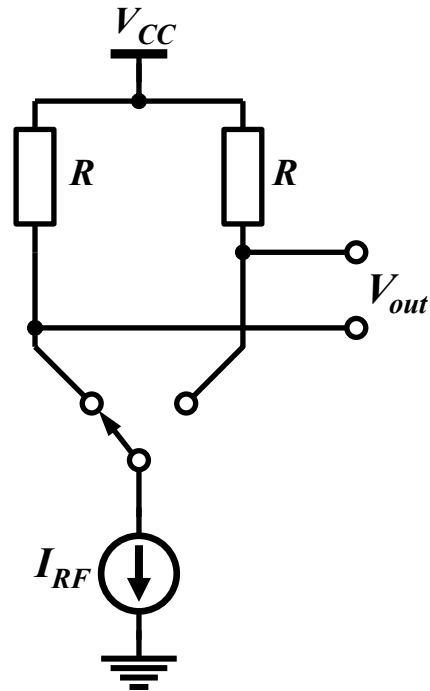
- Direct feedthrough ($RF-IF$)
- Αύξηση του NF

$$V_{out}(t) = I_{RF} R [a + bS(t)]$$

$$a = b = \frac{1}{2}$$



Mixers – Διαφορική έξοδος

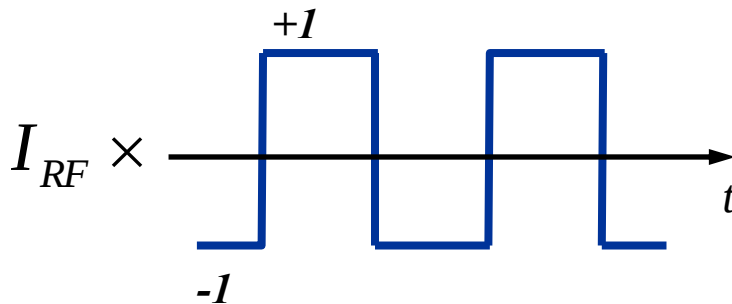


Direct feedthrough ($RF-IF$)

- **Αύξηση του NF**

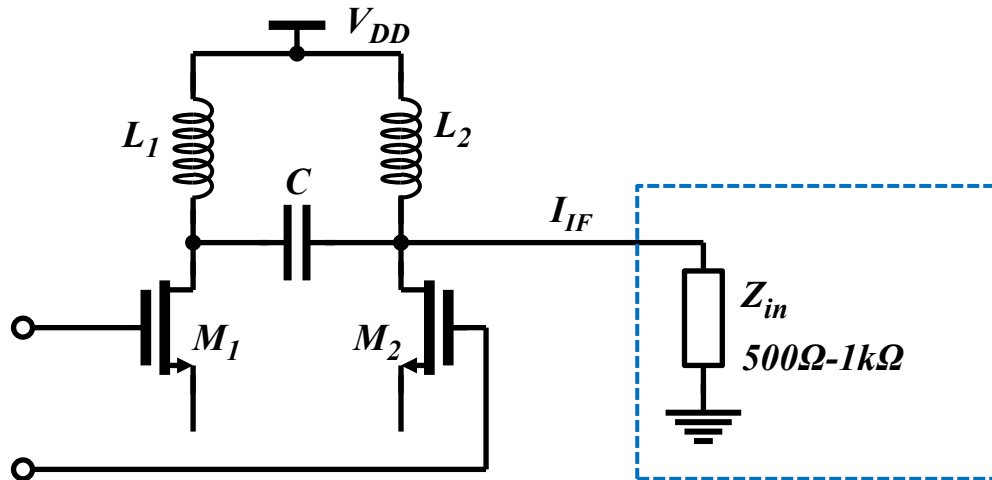
$$V_{out}(t) = I_{RF} R[a + bS(t)]$$

$$a = 0, \quad b = 1$$



Mixers – Μετατροπή διαφορικής εξόδου σε μονόπλευρη

Δικτύωμα μετατροπής διαφορικής εξόδου σε μονόπλευρη.



Mixers – Ανεπιθύμητες Συχνότητες

Επιθυμητή συχνότητα:

$$|\omega_{LO} - \omega_{RF}|$$

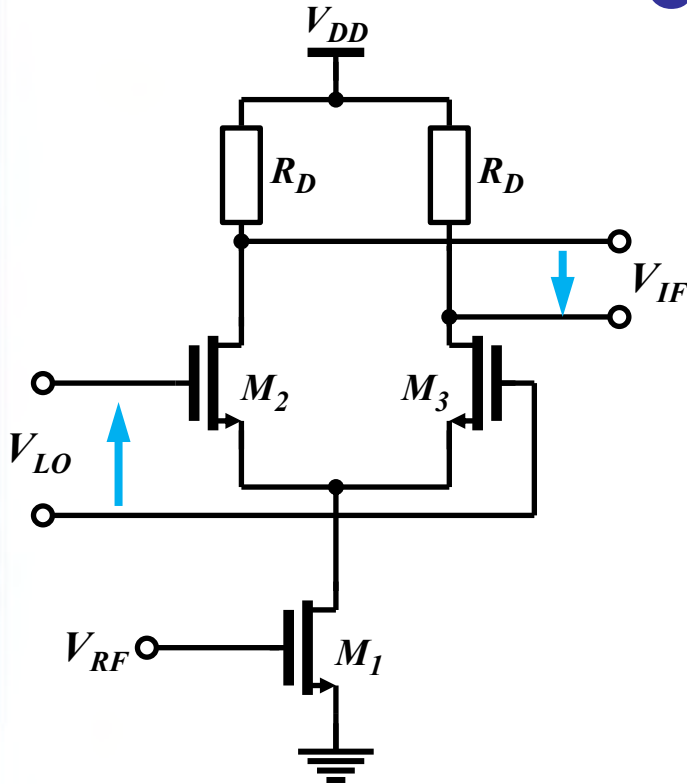
Ανεπιθύμητες συχνότητες:

$$|m\omega_{LO} \pm n\omega_{RF}|$$

Όπου m και n ακέραιοι

Οι ανεπιθύμητες συχνότητες οφείλονται σε μη γραμμικότητες.
Η πλήρης μελέτη τους απαιτεί ανάλυση μέσω Η/Υ.

CMOS Mixers



Το πλάτος της τάσης του LO στο κύκλωμα αυτό επηρεάζει τόσο την απολαβή μετατροπής όσο και τον θόρυβο.

Επειδή απαιτείται αρκετά μεγάλο πλάτος για να επιτύχουμε πλήρη μεταγωγή, αν τα $M2$ και $M3$ είναι ταυτόχρονα αγωγίμα για ένα σημαντικό τμήμα της περιόδου, τότε ένα μέρος από το RF ρεύμα που παράγεται από το $M1$ «χάνεται» σαν σήμα κοινού τρόπου. Αυτό μειώνει την απολαβή μετατροπής και αυξάνει το θόρυβο από τα $M2$ και $M3$.

Για δεδομένο πλάτος LO , αυξάνουμε το W των $M2$ και $M3$ ή μειώνουμε το ρεύμα πόλωσής τους.

Για να βελτιωθεί η γραμμικότητα της θύρας RF του μίκτη πρέπει να αυξηθεί η τάση υπεροδήγησης πύλης-πηγής του τρανζίστορ εισόδου. Για δεδομένο ρεύμα πόλωσης, ωστόσο, αύξηση της υπεροδήγησης οδηγεί σε χαμηλότερη αγωγιμότητα, αυξάνοντας έτσι την εικόνα θορύβου και μειώνοντας την απολαβή μετατροπής. Σε σχεδιασμούς χαμηλής τάσης, ο συμβιβασμός μεταξύ της γραμμικότητας και της απολαβής του μίκτη είναι συχνά προβληματικός.

Mixers – Παθητικοί μίκτες CMOS

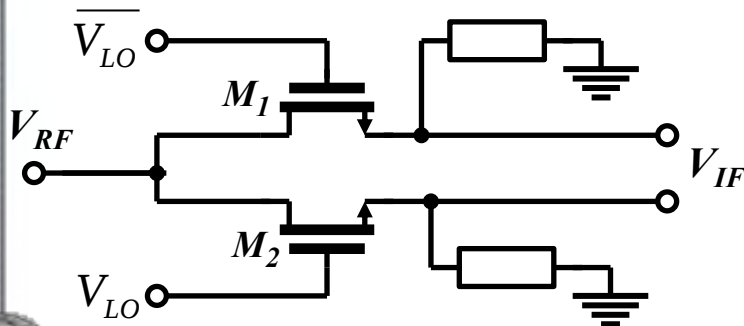
Παθητικοί μίκτες *CMOS*.

Πλεονεκτήματα:

- α) Υψηλότερη $IP3$ αν τα $M1$ και $M2$ δέχονται υψηλή τάση υπεροδήγησης πύλης-πηγή στην αγωγίμη κατάσταση (ON), έτσι ώστε η V_{RF} να μη μεταβάλλει σημαντικά την αντίστασή αγωγιμότητάς τους.
- β) Δεν αντλούν ισχύ από την τάση τροφοδοσίας.

Μειονεκτήματα:

- α) Ο θόρυβος της βαθμίδας που ακολουθεί τον μίκτη «μεγεθύνεται» όταν ανάγεται στη V_{RF} επειδή η απολαβή του μίκτη είναι μικρότερη της μονάδας. Η απολαβή τάσης του μίκτη στην ιδανική περίπτωση είναι ίση με $2/\pi$. Για ημιτονικό σήμα LO , η απολαβή είναι ακόμη χαμηλότερη, επειδή τα $M1$ και $M2$ είναι ταυτόχρονα αγωγιμα για αξιοσημείωτο τμήμα της περιόδου.
- β) Το μεγάλο πλάτος που απαιτείται για τα $M1$ και $M2$, για χαμηλή αντίσταση αγωγιμότητας, οδηγεί σε σημαντική χωρητική διατροφοδότηση από την LO στην IF .

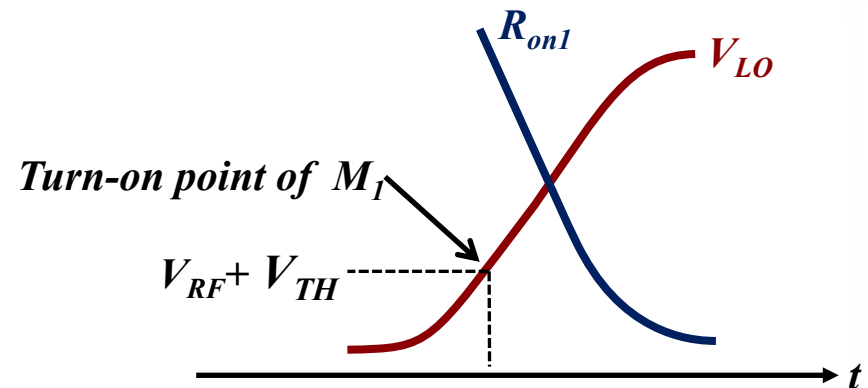
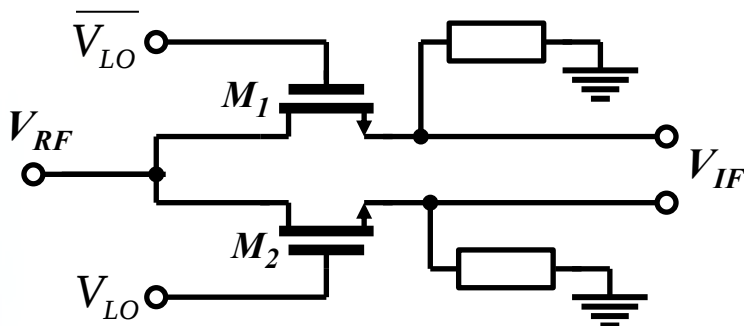


Mixers – Παθητικοί μίκτες CMOS

Η γραμμικότητα των παθητικών μικτών μειώνεται για χαμηλές τάσεις τροφοδοσίας.

Με ημιτονικά σήματα LO , οι διακόπτες παρουσιάζουν σχετικά μικρή τάση υπεροδήγησης πύλης-πηγής, για ένα σημαντικό μέρος της περιόδου.

Έτσι, η είσοδος RF μεταβάλλει σημαντικά την αντίσταση αγωγιμότητας του μεταγωγέα κατά τη διάρκεια του χρόνου αυτού, και εισάγει παραμόρφωση.



Mixers

Τέλος

