نویز در مدارات الکترونیک

ابزار دقیق پیشرفته الکترونیکی

معرفی مباحث

- یادآوری محاسبات نویز
  - جمع نویز ها
  - مدل دو قطبی
- انواع نویز
- نویز در ادوات نیمه هادی
  - JFET,MOSFET,BJT
- بررسی نویز در آپ-امپ ها و تقویت کننده های ابزاردقیق
  - مدل نویز آپ امپ
  - مقایسه نویز در آپ-امپها
- طراحی کم نویز و بهینه سازی
  - انتخاب آپ-امپ مناسب
- مثال ها

Review of Basic Noise Analysis

- RMS Value and Power

$$I_{n(rms)} = \left[\frac{1}{T}\int_0^T i_n^2(t)dt\right]^{1/2} \qquad V_{n(rms)} = \left[\frac{1}{T}\int_0^T v_n^2(t)dt\right]^{1/2}$$

$$P_{diss} = \frac{V^2_{n(rms)}}{R = 1\Omega}$$

$$P_{diss} = I^2_{n(rms)} R = I^2_{n(rms)} \times 1\Omega$$

- SNR

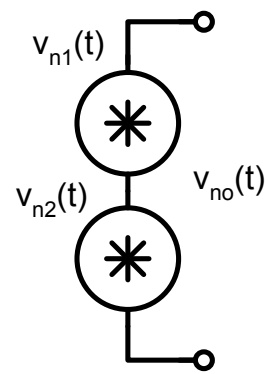
$$SNR = 10\log\left(\frac{Signal - Power}{Noise - Power}\right) \qquad SNR = 20\log\left(\frac{V_{Sig(rms)}}{V_{n(rms)}}\right)$$

- Noise Summation: We can add:
  - Instantaneous noise signals:

$$v_{no}(t) = v_{n1}(t) + v_{n2}(t) \qquad v_{no}(t) = v_{n1}(t) + v_{n2}(t)$$

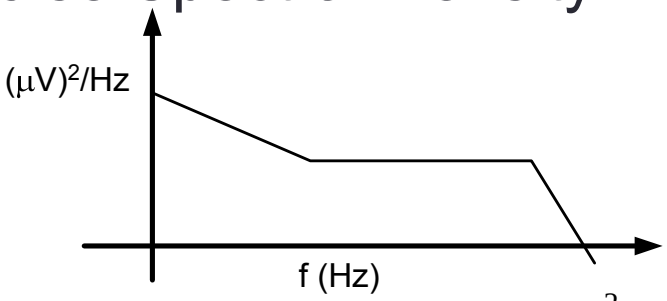
  - RMS: If Sources are uncorrelated

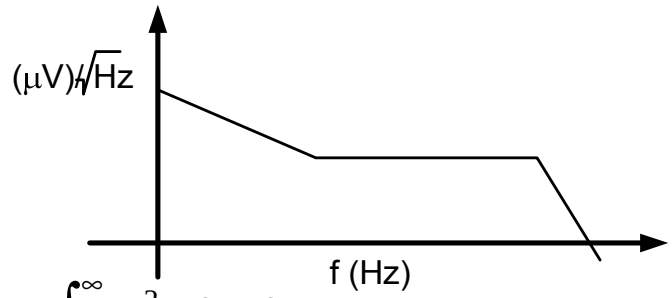
$$V^2_{no(rms)} = V^2_{n1(rms)} + V^2_{n2(rms)}$$



Review of Basic Noise Analysis

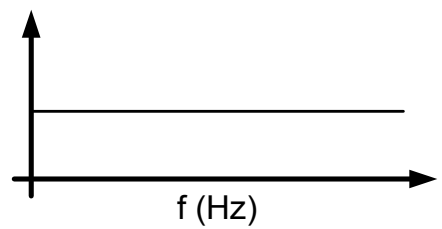
- Noise Spectral Density



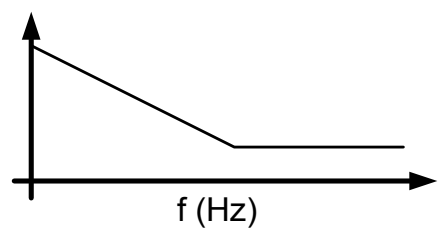


$$V_{n(rms)}^2 = \int_0^\infty V_n^2(f)\,df$$

- Major Types of Noise
  - White Noise
  - $V_n(f)=V_{nw}$

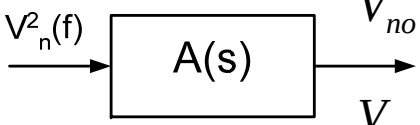


  - 1/f Noise
  - $V^2_n(f)=k^2_v/f$



Review of Basic Noise Analysis

- Filtered Noise

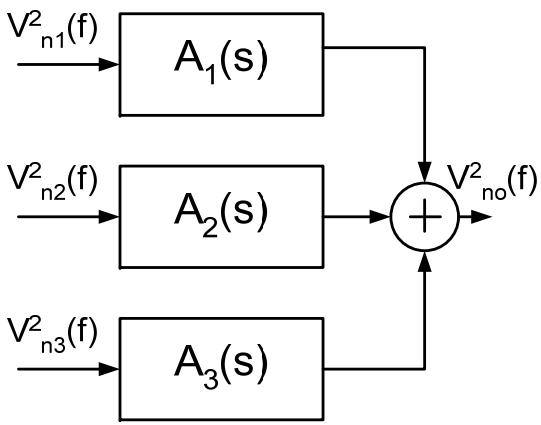


$$V_{no}^2(f) = |A(j2\pi f)|^2 V_{ni}^2(f)$$

$$V_{no}(f) = |A(j2\pi f)| V_{ni}(f)$$

$$V_{no(rms)}^2 = \int_0^\infty |A(j2\pi f)|^2 V_{ni}^2(f)\,df$$

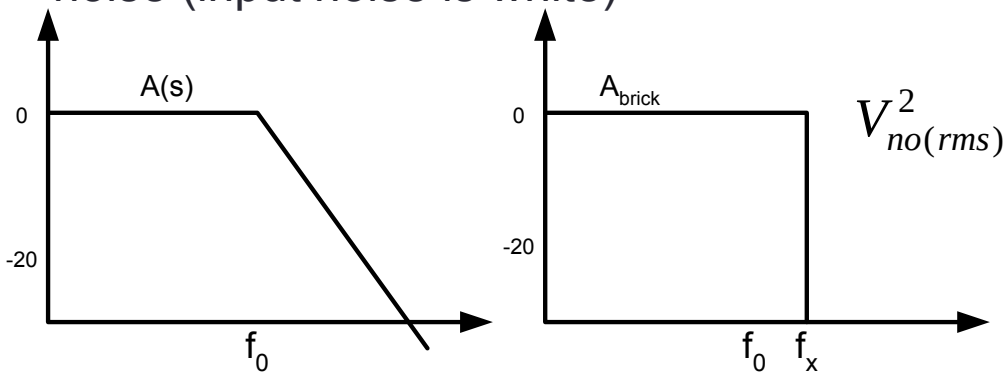
- Summation of Filtered Noise



$$V_{no}^2(f) = \sum_{i=1,2,3} |A_i(j2\pi f)|^2 V_{ni}^2(f)$$

Review of Basic Noise Analysis

- Noise Bandwidth of a filter:
  - Frequency span of a brick-wall filter that gives the same output rms noise (input noise is white)



$$V_{no(rms)}^2 = \int_0^\infty \left|A(j2\pi f)\right|^2 V_{nW}^2 df = V_{nW}^2 f_x$$

$$f_x = \int_0^\infty \left|A(j2\pi f)\right|^2 df$$

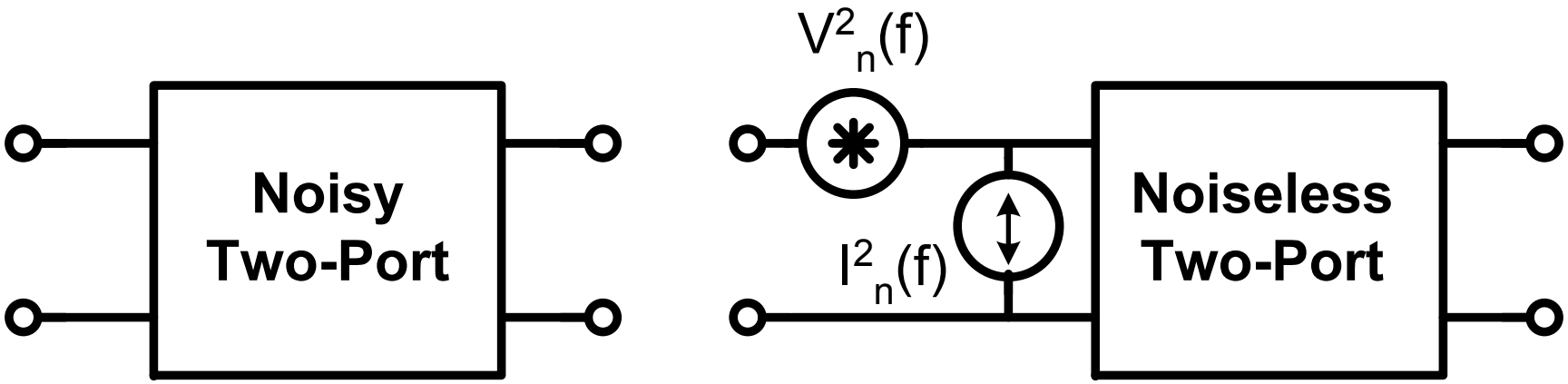
- Example
  - First-order low-pass

$$f_x = \int_0^\infty \left|\frac{1}{1+(\omega/\omega_o)^2}\right| df = \frac{\pi f_0}{2}$$

  - Second-order lowpass

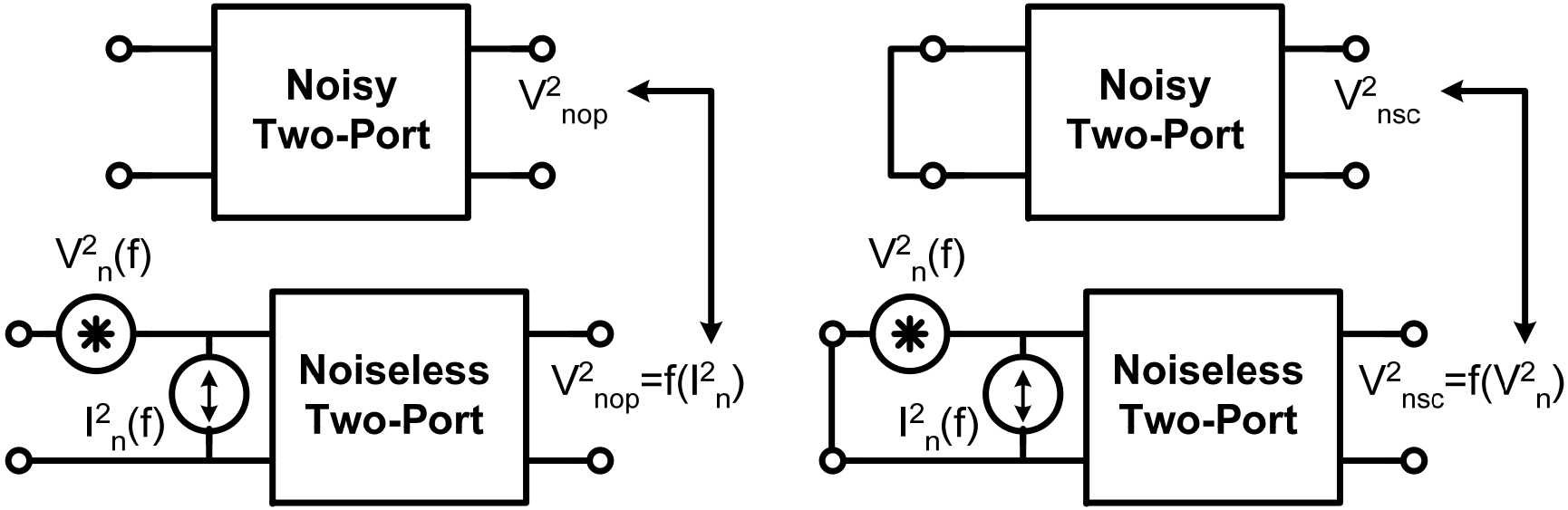
$$f_x = \int_0^\infty \left|\frac{1}{1+(j\omega/\omega_o Q)+(j\omega/\omega_o)^2}\right|^2 df = \frac{\pi f_0 Q}{2}$$

Noise of Two-Port Networks



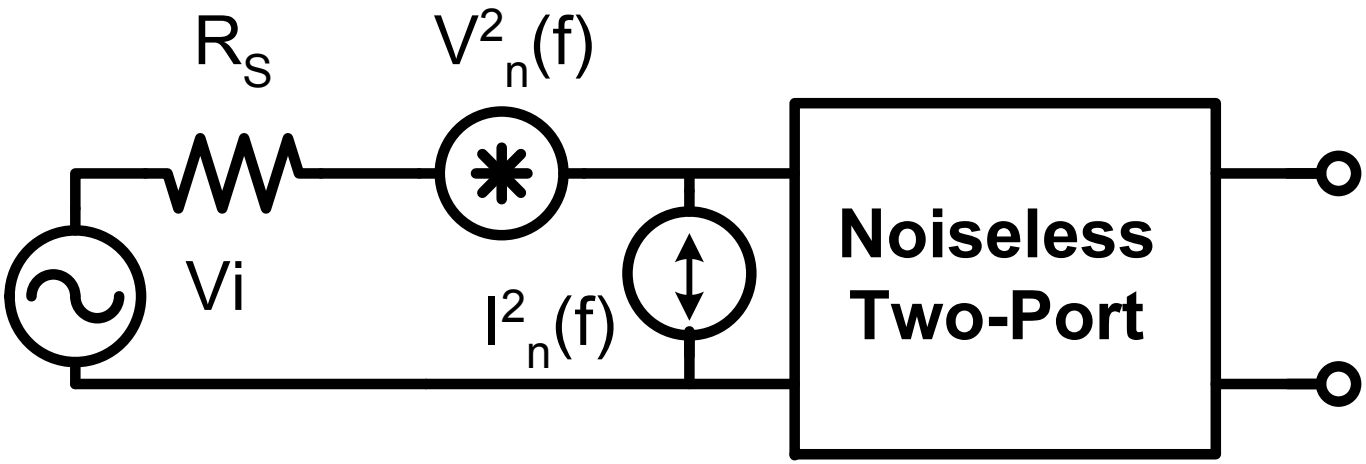
- Input-referred noise of any noisy two-port network can be modeled by an input series voltage noise and a parallel current noise
- In general, V_n and I_n are correlated

Finding the Input Noise Sources



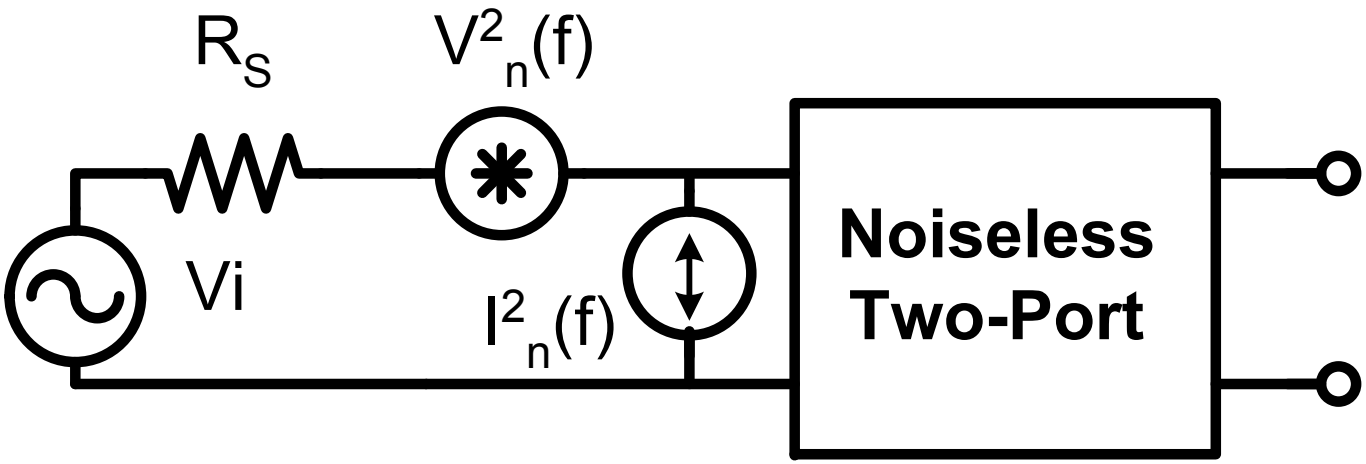
- To find V^2_n:
  - Short the input of the networks
  - Equate output noise of both noisy and equivalent networks
- To find I^2_n:
  - Open the input of the networks
  - Equate output noise of both noisy and equivalent networks

Two-Port Network: Effect of R_S



- If R_S is very small, effect of V_n is dominant
- If R_S is very large, effect of In is dominant
- For a given R_S, an optimum V_n/I_n ratio exist that minimizes the output noise
- To have Optimum Noise figure $R_S=V_n/I_n$ if V_n and I_n are uncorrelated

Two-Port Network: Effect of R_S



- if V_n and I_n are correlated, lets assume:
- $i_n = i_c + i_u \quad < v_n, i_u >= 0 \qquad i_c = G_c v_n$

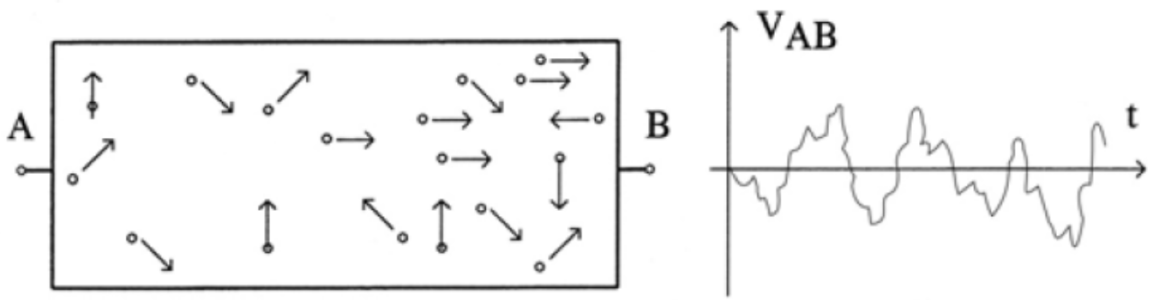
- Then

- $Gopt = Gs = \sqrt{\frac{i^2{}_n}{V^2{}_n} + G_c{}^2}$

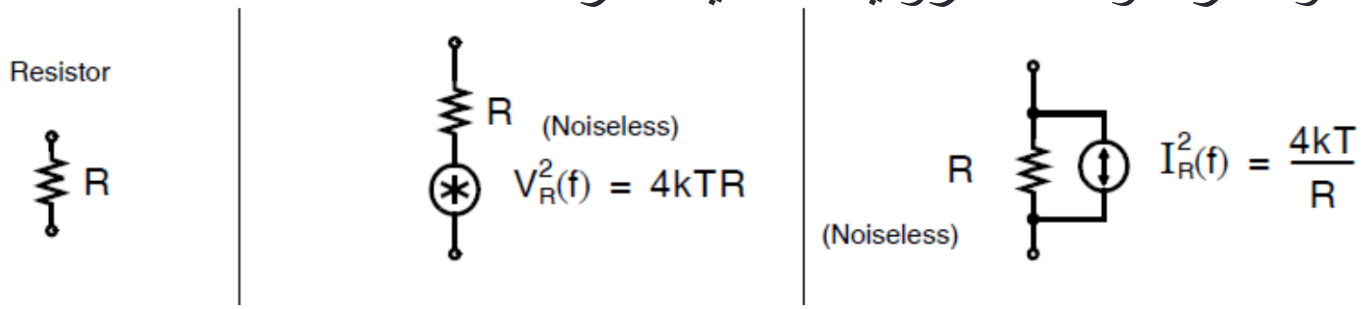
انواع نویز مهم در ادوات الکترونیک

- نویز حرارتی
  - مقاومت، تمام ادوات الکترونیک
- نویز فلیکر
  - MOSFET، BJT
- Shot Noise
  - دیود، BJT
- نویز بهمنی (Avalanche noise)
  - دیود زنر
- انواع دیگر نویز
  - Burst Noise
  - Diffusion Noise
  - Generation-Recombination Noise
  - Quantum Noise

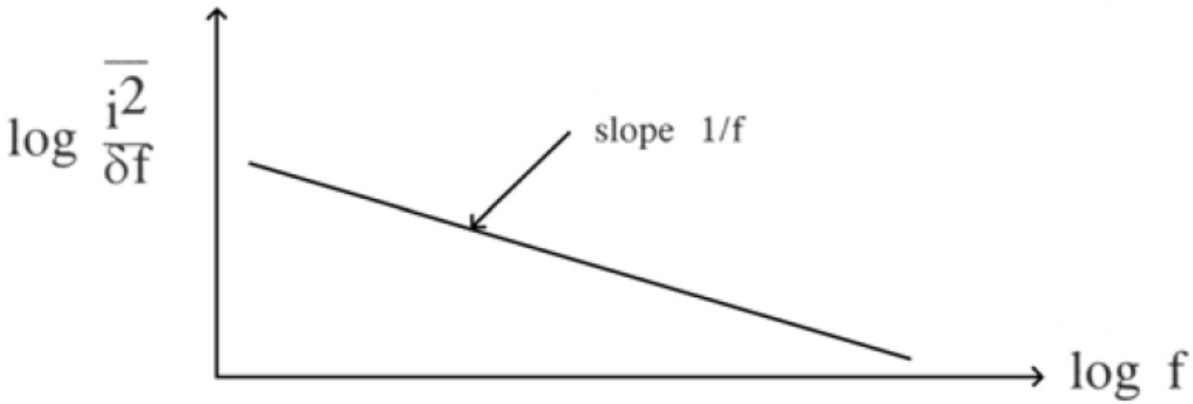
نویز حرارتی



- ناشی از حرکت random الکترون ها در رسانا به دلیل انرژی حرارتی
- بوسیله اینشتین پیش بینی شد، در سال 1928 بوسیله J.B.Johnson مشاهده شد (در متون قدیمی تر به نویز جانسون مشهور است)
- طیف فرکانسی یکنواخت (سفید) تا نزدیک فرکانس 10THz دردمای اتاق
- در مقاومت و اکثر ادوات الکترونیک اهمیت دارد



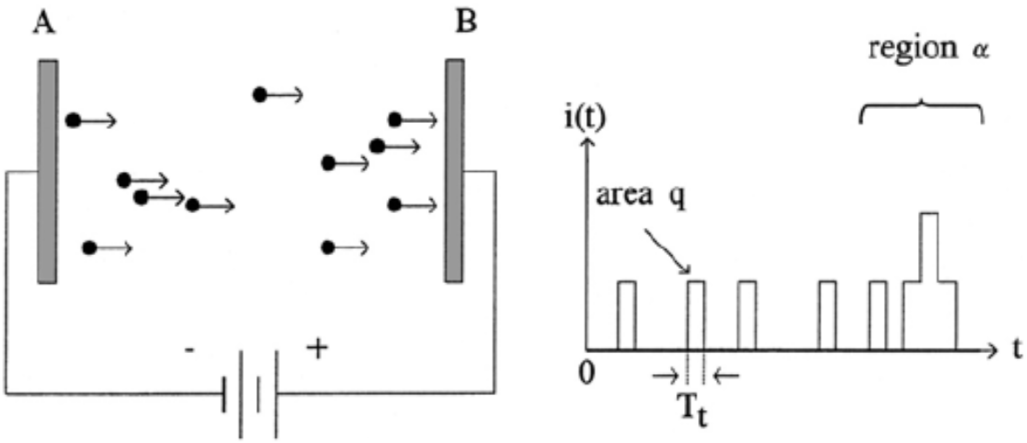
نویز فلیکر



- ناشی از افتادن حاملهای بار در تله های مسیر انتقال بار
- اندازه نویز به پروسس ساخت وابسته است و در ادوات با کیفیت ساخت بدتر بزرگتر است
- طیف توان متناسب با عکس فرکانس است و در فرکانسهای پایین اهمیت دارد
- این نویز حتما بر روی مولفه DC جریان سوار می شود
- توان نویز فلیکر با عکس ابعاد هندسی ادوات الکترونیک متناسب است
- در تمام ادوات الکترونیک موجود است. در MOSFET بسیار قابل توجه است. در انتقال جریان در محلولهای یونی نیز دیده می شود.

- $I^2(f) = KF\frac{I_{DC}}{f}$

Shot Noise

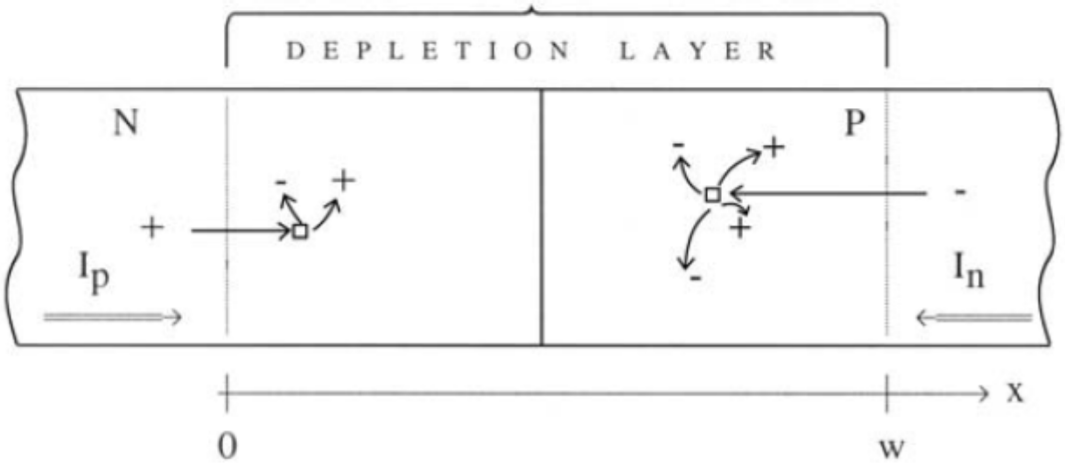


- ناشی از سرعت متفاوت حرکت الکترونها در جریان DC
- در پیوند PN بایاس مستقیم که حرکت الکترونها به وسیله سد پتانسیل محدود می شود دیده می شود
- در دیود و ترانزیستور BJT اهمیت دارد
- این نویز حتما بر روی مولفه DC جریان سوار می شود
- طیف فرکانسی سفید تا فرکانس چند گیگا هرتز دارد

- $I^2(f) = 2qI$

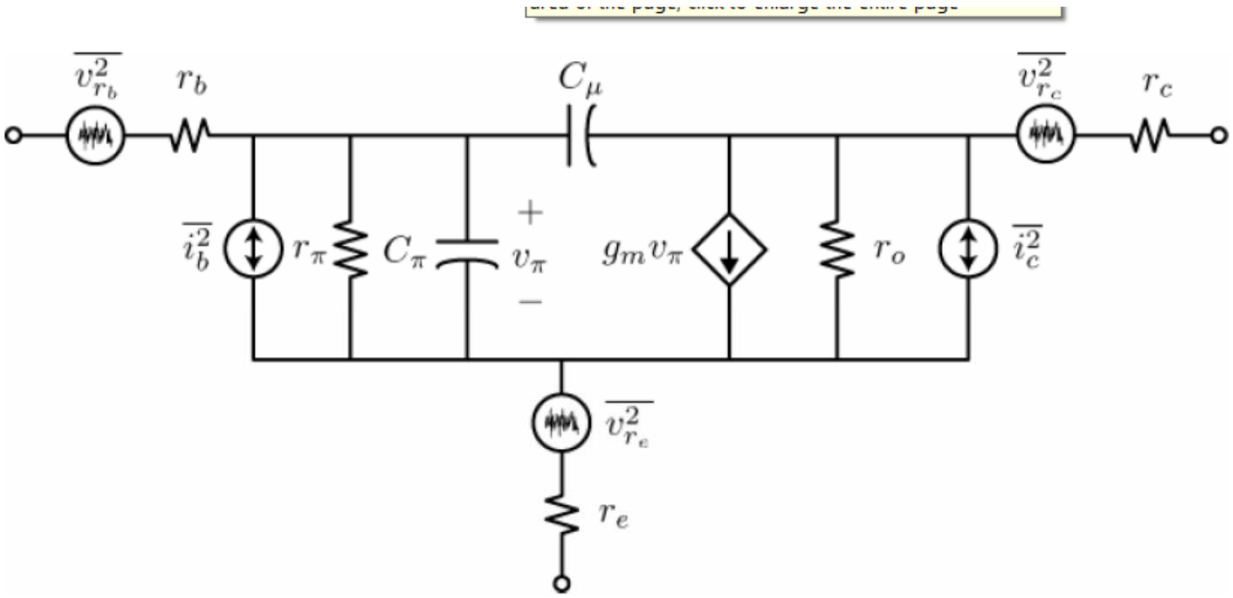
- q: بار الکترون

نویز بهمنی (Avalanche)



- بدلیل پدیده Impact Ionization و در نتیجه تغیرات ناگهانی تعداد حاملها در جریان بایاس نزدیک ولتاژ شکست دیود ها بوجود می آید
- دارای طیف سفید است.
- در دیود های زنر عامل اصلی نویز است
- توان آن بسیار از Shot Noise بیشتر است.
- رابطه مشخص برای آن وجود ندارد
  - (طیف ولتاژ $V^2=10^{-14}/Hz$ برای دیود زنر با جریان معکوس 0.5mA، معادل نویز حرارتی مقاومت 600kΩ)

نویزهای مهم در ترانزیستور BJT



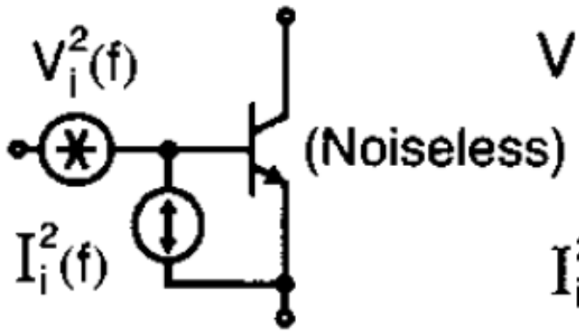
$$\overline{v_b^2} = 4k_B T r_b \Delta f$$

$$\overline{i_b^2} = 2qI_B\Delta f + K_1 I_B^{\alpha}\frac{\Delta f}{f}$$

$$\overline{i_c^2} = 2qI_C\Delta f$$

- نویز های اصلی:
- نویز حرارتی مقاومت بیس
- نویز فلیکر جریان بیس
- Shot noise جریان بیس
- Shot noise جریان کلکتور

نویز BJT: انتقال به ورودی



$$V_i^2(f) = 4kT\left(r_b + \frac{1}{2g_m}\right)$$

$$I_i^2(f) = 2q\left(I_B + \frac{KI_B}{f} + \frac{I_C}{|\beta(f)|^2}\right)$$

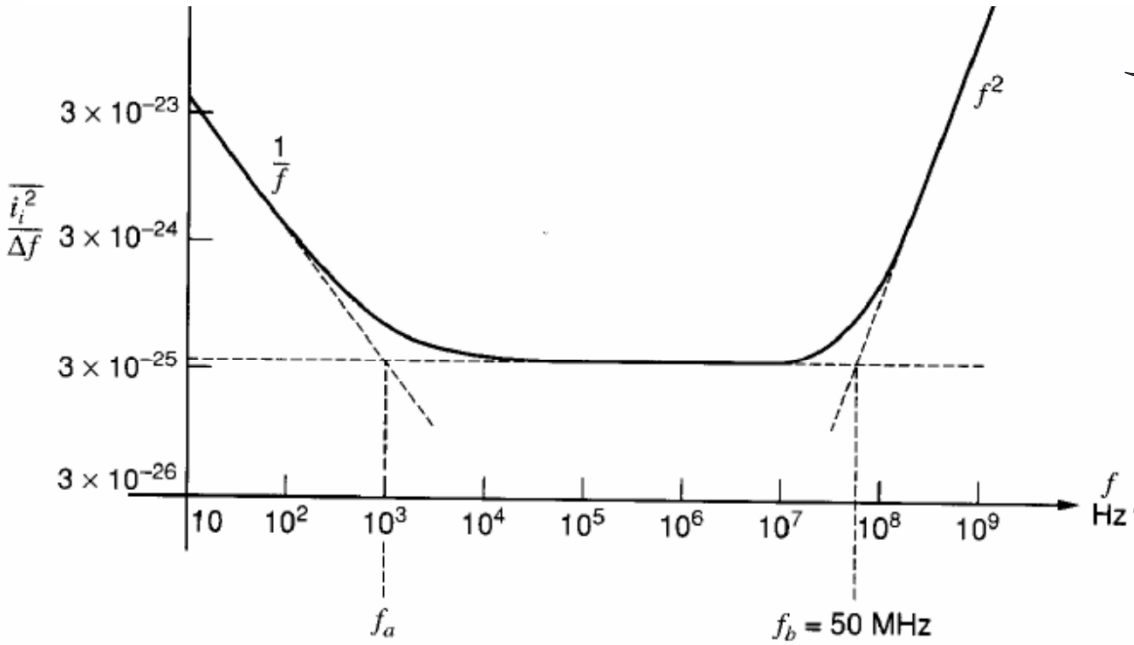
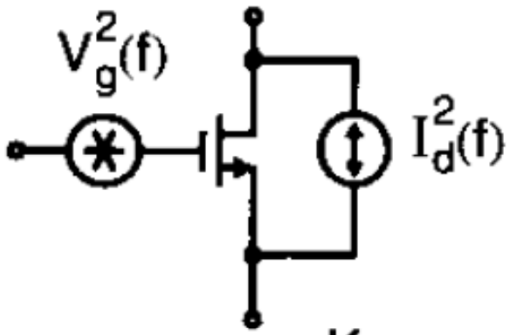


Figure 11.24 Equivalent input noise current spectral density of a bipolar transistor with I_C = 100 μA, $\beta_0 = \beta_F = 100$, f_T = 500 MHz. Typical flicker noise is included.

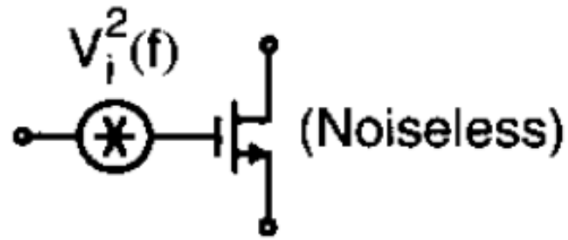
- منبع نویز جریان و ولتاژ منتقل شده به بیس
- مولفه shot noise جریان کلکتور قابل صرفنظر کردن در فرکانس پایین
- افزایش نویز در فرکانس بالا به دلیل کاهش β با فرکانس

نویزهای مهم در ترانزیستور MOSFET



$$V_g^2(f) = \frac{K}{WLC_{ox}f}$$

$$I_d^2(f) = 4kT\left(\frac{2}{3}\right)g_m$$

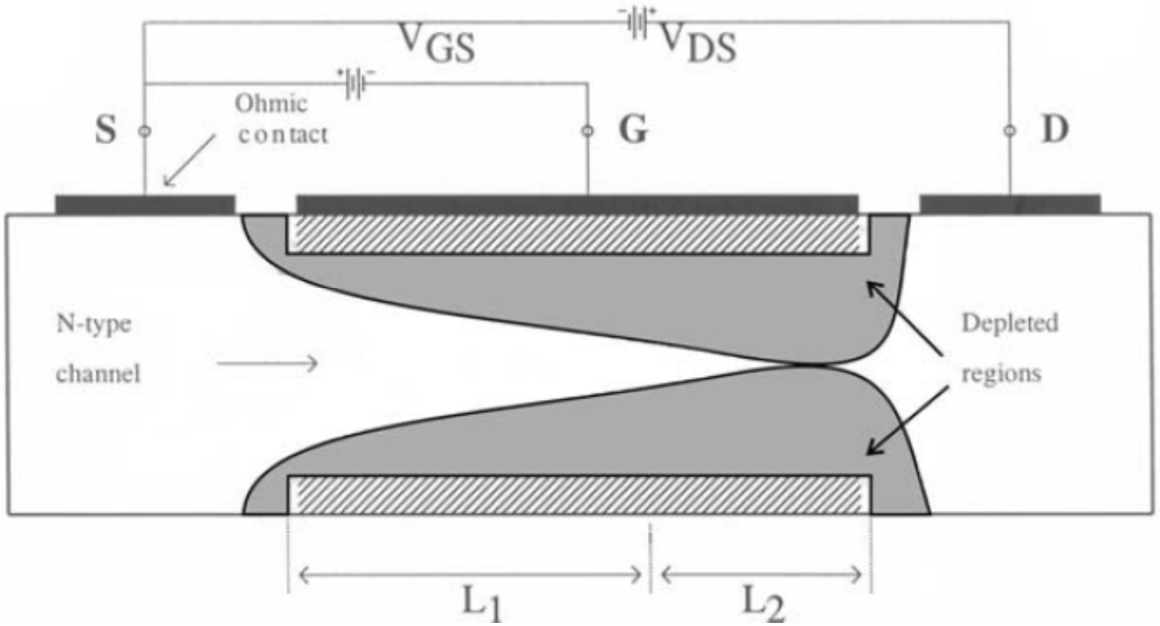


$$V_i^2(f) = 4kT\left(\frac{2}{3}\right)\frac{1}{g_m} + \frac{K}{WLC_{ox}f}$$

Simplified model for
low and moderate frequencies

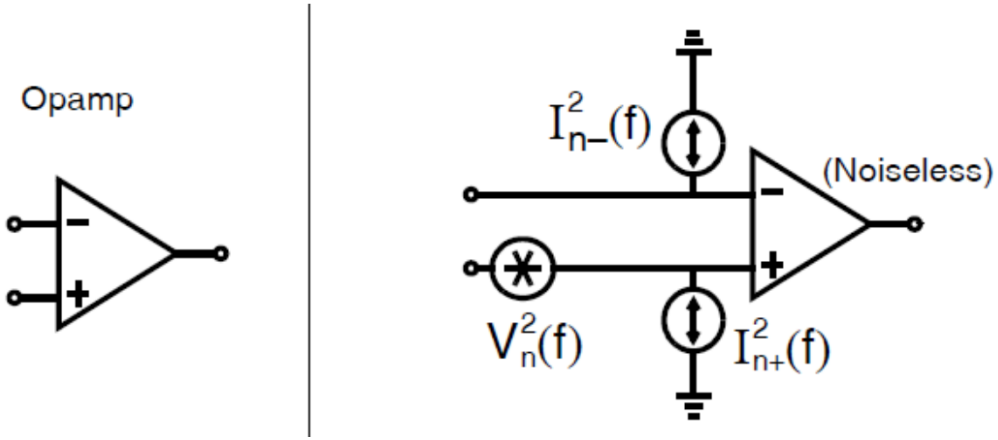
- نویز حرارتی
- نویز فلیکرقابل توجه در فرکانس پایین
- عدم وجود مولفه نویز جریانی ورودی فرکانس پایین
- نویز ولتاژ ورودی حرارتی بزرگتر از BJT (به دلیل g_m کوچکتر)

نویزهای مهم در ترانزیستور JFET



- از نظر روابط، مشابه روابط نویز در MOSFET
- نویز فلیکر بسیارپایین تر از MOSFET به دلیل عبور جریان از bulk
- نویز فلیکر پایین تر از BJT
- نویز جریانی بسیارکم
- نویز ولتاژ ورودی حرارتی بزرگتر از BJT (به دلیل g_m کوچکتر)

نویز در آپ امپ ها



$V_n(f)$, $I_{n-}(f)$, $I_{n+}(f)$

— Values depend on opamp
— Typically, all uncorrelated

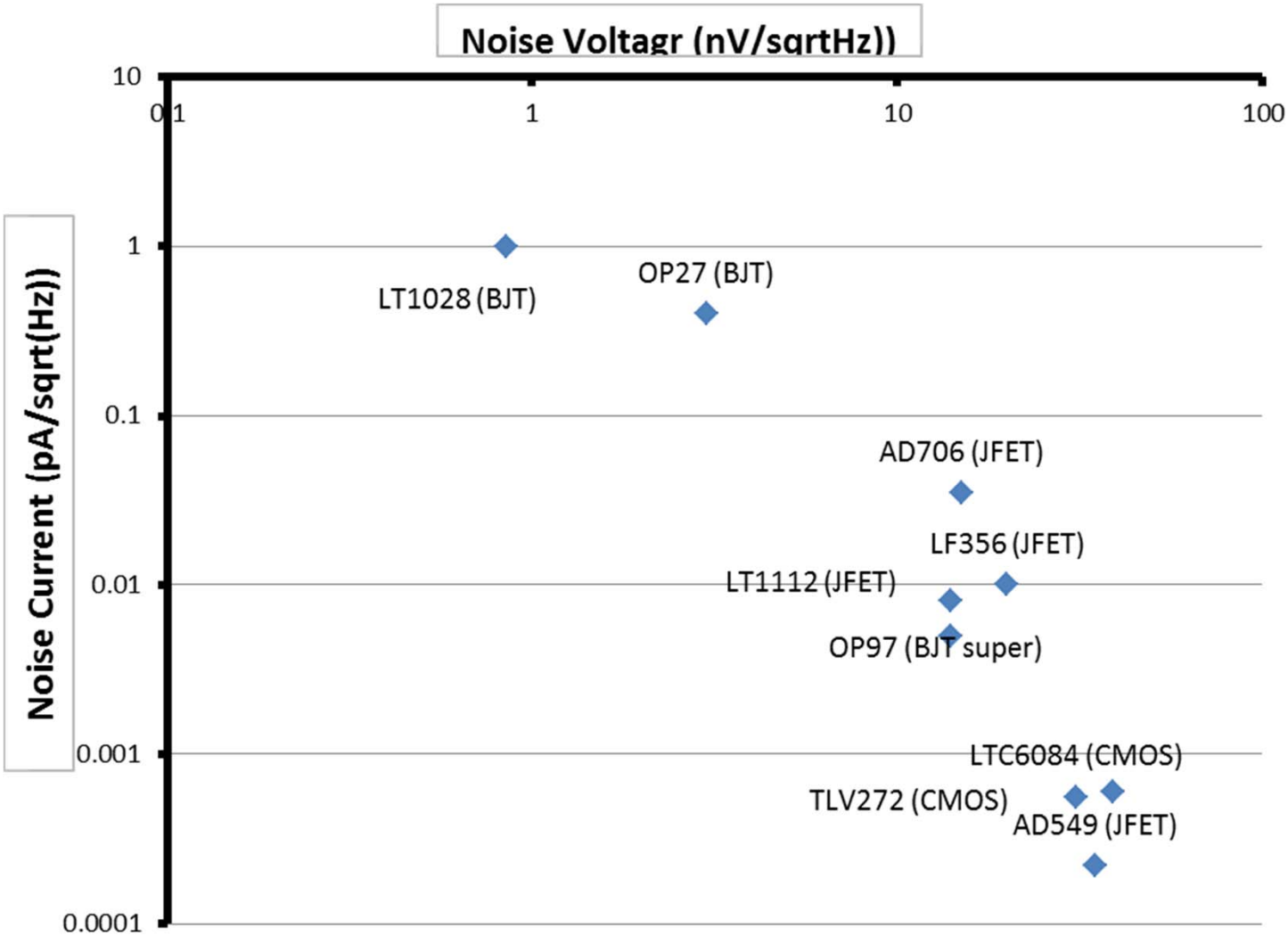
- منبع ولتاژ ورودی
- دو منبع جریان در ورودی

مقایسه نویز در آپ-امپ های مختلف

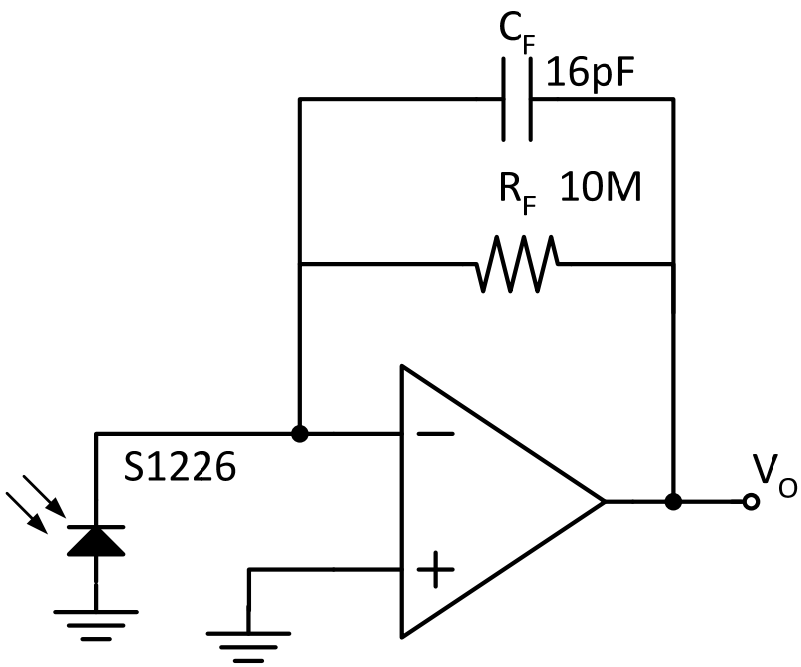
	Vn(uV)	In(pA)	Low 0.1-10 uVpp	Low 0.1-10 pApp	FC V Hz	FC I Hz
OP27 (BJT)	3	0.4	0.08		2.4	140
LF356 (JFET)	20	0.01			100	
LTC6084 (CMOS)	31	0.00056	3			<1
AD549 (JFET)	35	0.00022	4	0.7	110	
TLV272 (CMOS)	39	0.0006			250	
AD706 (JFET)	15	0.035	0.5	3	5	10
OP97 (BJT super)	14	0.005	0.5		2.5	120
LT1112 (JFET)	14	0.008	0.3	2.2	2.5	140
LT1028 (BJT)	0.85	1	0.035		3.5	250
AD743 (JFET)	3.2	0.007	0.38		20	100

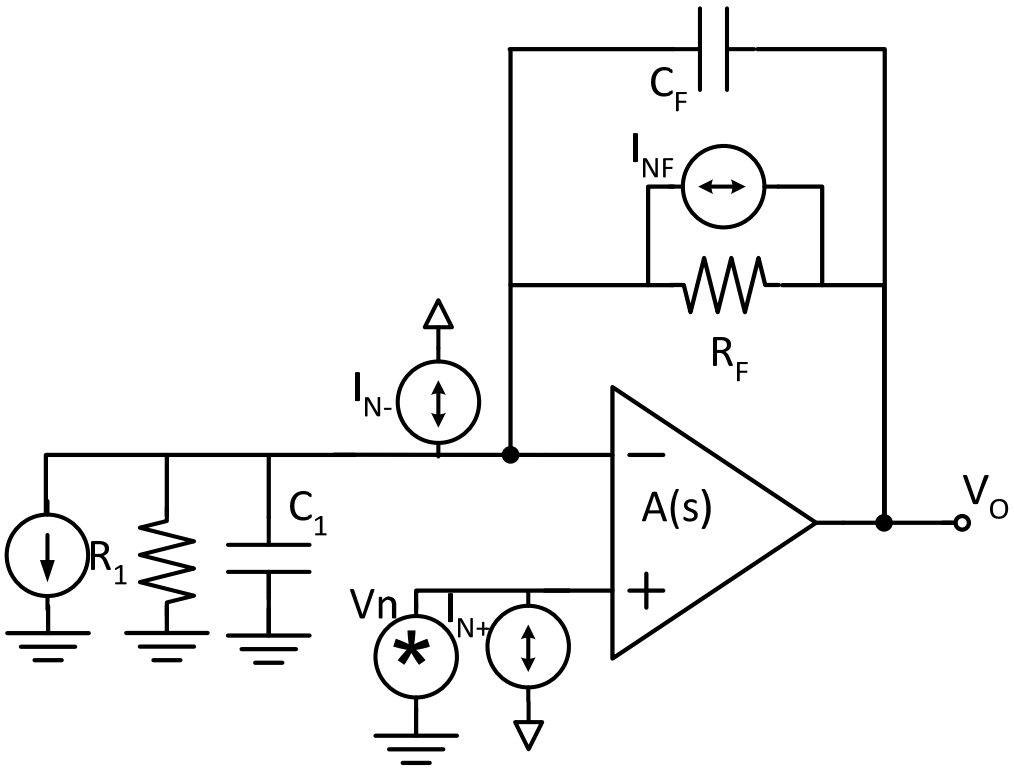
	نویز ولتاژ فرکانس بالا	نویز جریان فرکانس بالا	نویز ولتاژ فرکانس پایین	نویز جریان فرکانس پایین
BJT	کم	زیاد	کم	زیاد
JFET	زیاد	کم	متوسط	بسیار کم
CMOS	زیاد	کم	زیاد	بسیار کم

مقایسه نویز در آپ-امپ های مختلف



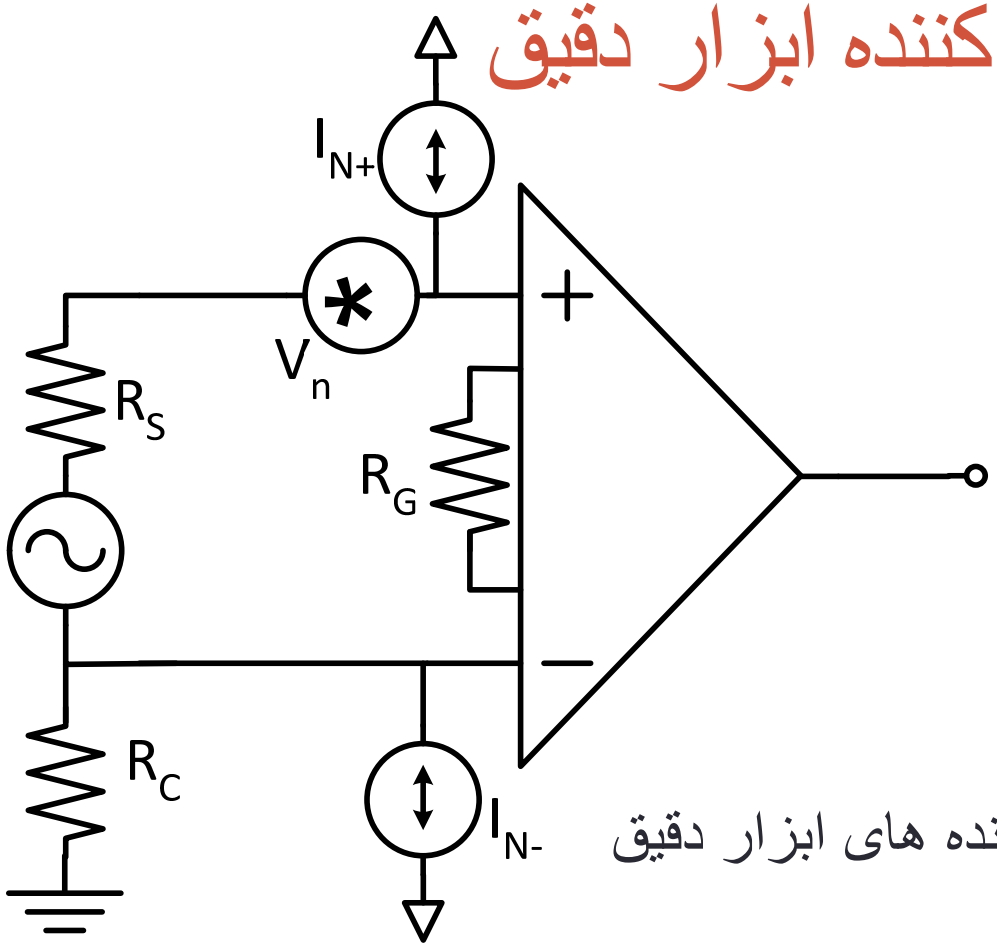
مثال: انتخاب آپ-امپ مناسب





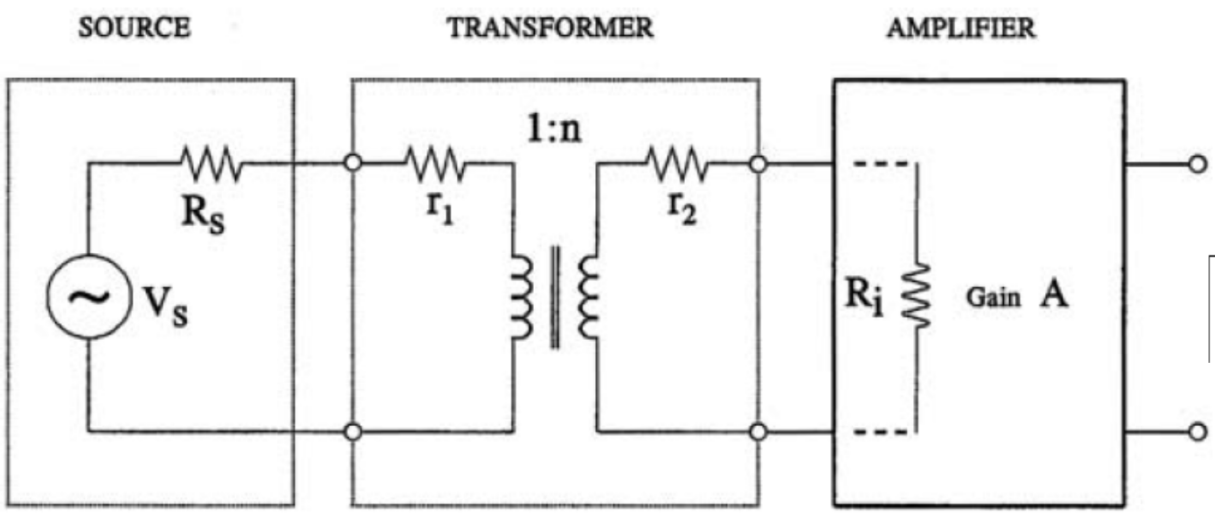
- تحلیل نویزتقویت کننده جریان به ولتاژ سنسور نوری
- نویز RMS خروجی برای دو آپ-امپ OP27 و AD706

مثال:نویز در تقویت کننده ابزار دقیق



- بررسی اثر نویز در تقویت کننده های ابزار دقیق

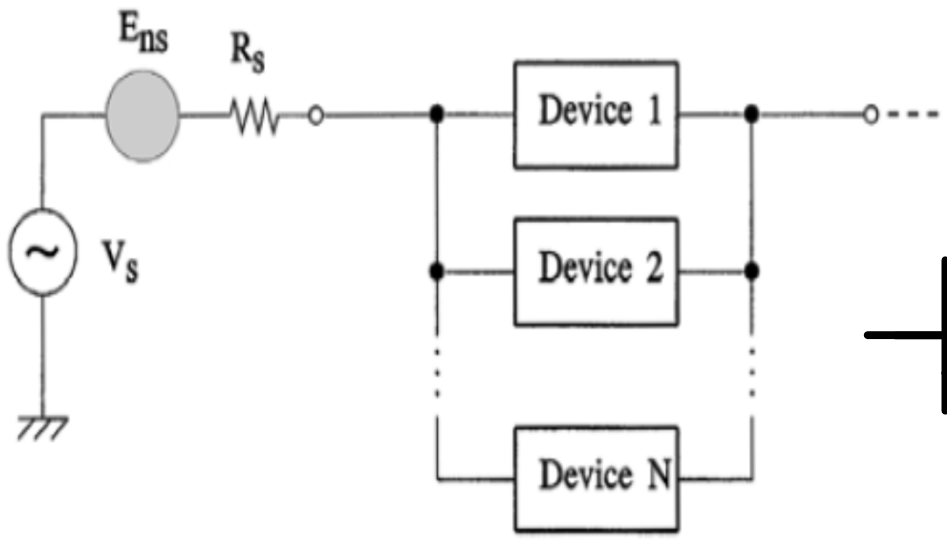
نکاتی در مورد طراحی کم نویز: ترانس

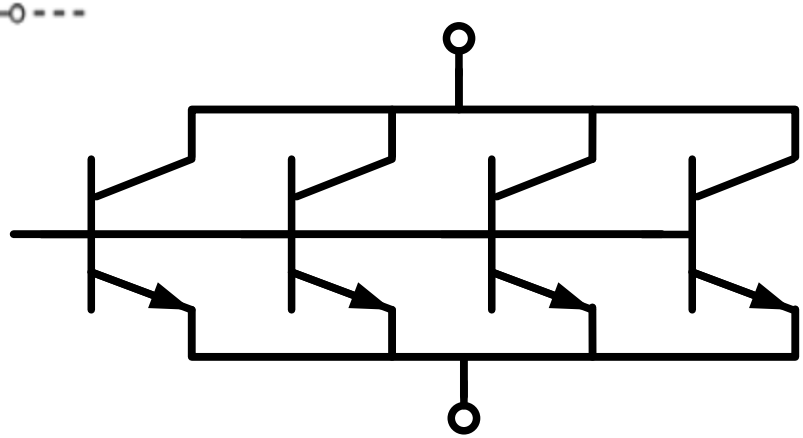


$$n^2 = \sqrt{\overline{E_n^2} / \overline{I_n^2} R_s^2}$$

- استفاده از ترانس جهت تغییر امپدانس سنسور به مقدار بهینه برای حداقل نویز
- نا مناسب برای R_S بسیار کم: تاثیر نویز مقاومتهای سیم پیچها در نویز کل
- مشکلات کلی ترانس: ابعاد بزرگ، اثرات غیر خطی، دقت محدود، محدودیت عرض باند

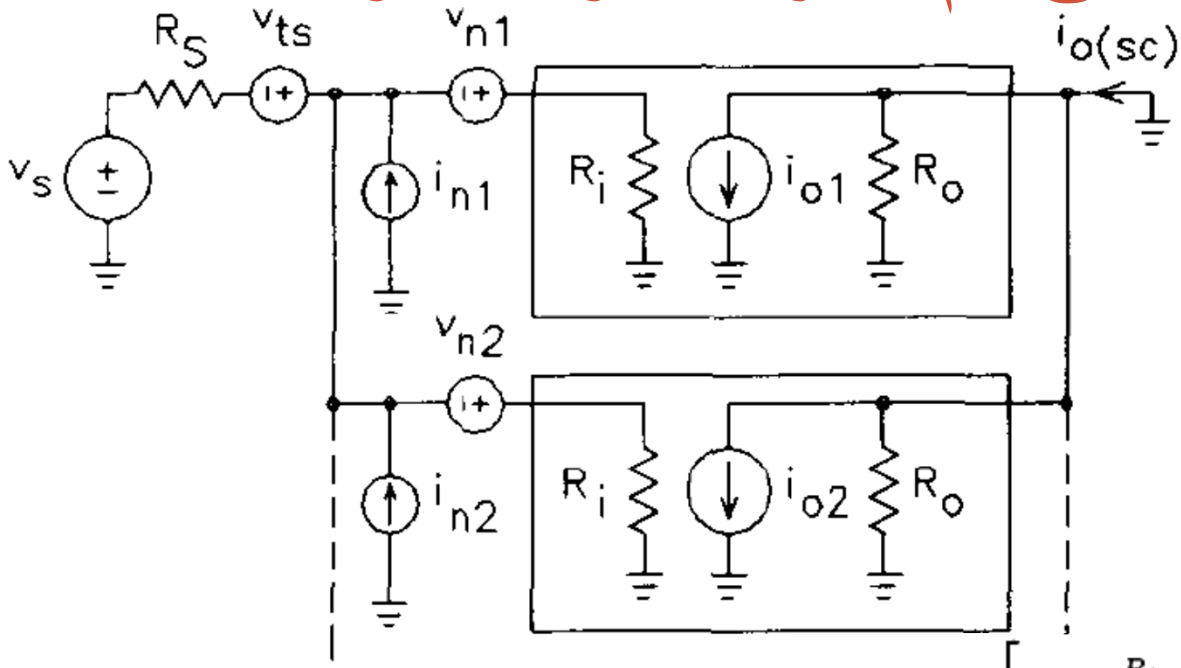
نکاتی در مورد طراحی کم نویز: موازی سازی





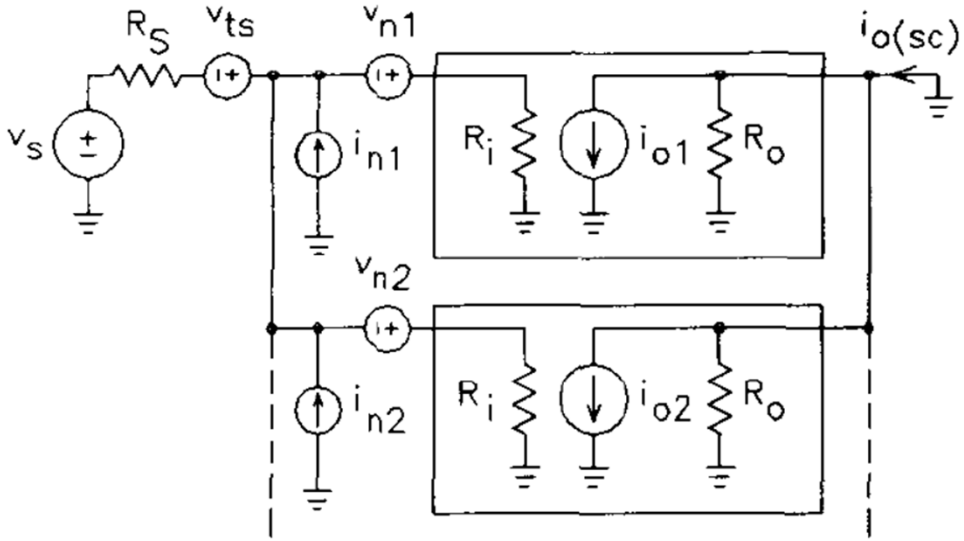
- موازی سازی ادوات طبقه ورودی (BJT یا FET طبقه اول)
- کاهش نویز ولتاژ و افزایش نویز جریان

نکاتی در مورد طراحی کم نویز: موازی سازی



$$i_{o(sc)} = g_m \left[N \frac{\frac{R_i}{N}}{R_S + \frac{R_i}{N}} (v_s + v_{ts}) + N \left(R_S \| \frac{R_i}{N} \right) \sum_{j=1}^{N} i_{nj} + \sum_{j=1}^{N} \left(\frac{R_i}{R_i + R_S \| \left(\frac{R_i}{N-1} \right)} v_{nj} - \frac{R_S \| \left(\frac{R_i}{N-1} \right)}{R_i + R_S \| \left(\frac{R_i}{N-1} \right)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{N} v_{nk} \right) \right]. \quad (23)$$

نکاتی در مورد طراحی کم نویز: موازی سازی



- در حالت یکسان بودن ادوات:

$$V_{ni} = \sqrt{4kTR_S\Delta f + \frac{1}{N}V_n^2 + 2\rho V_n I_n R_S + N I_n^2 R_S^2}$$

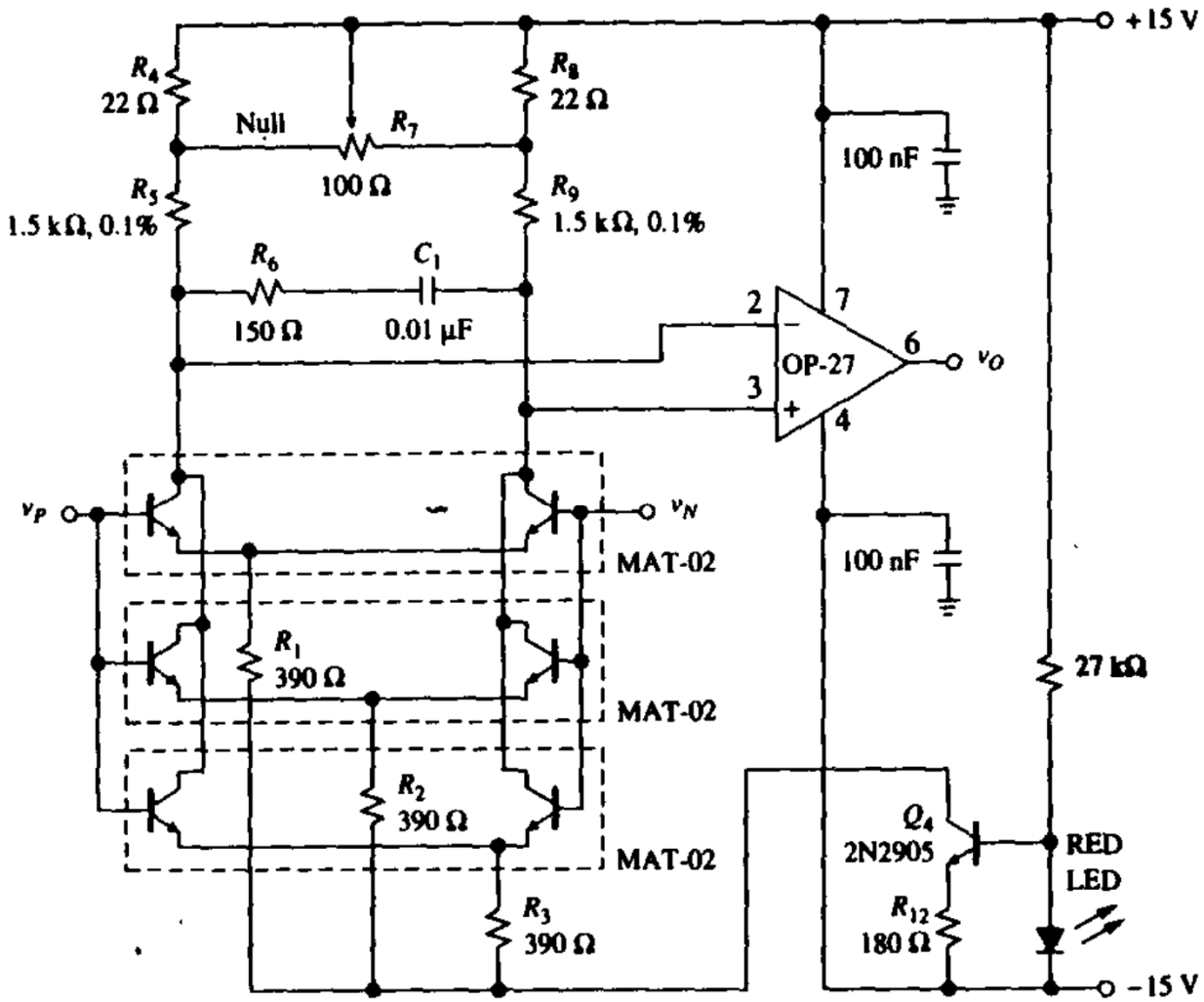
- در حالت R_S نزدیک صفر:

$$V_{ni} = V_n/\sqrt{N}$$

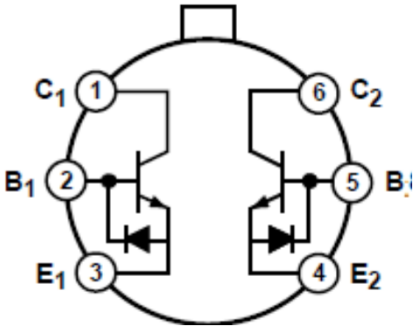
- حالت $R_S \neq 0$:مقدار N بهینه:

$$N = \frac{V_n}{I_n R_S}$$

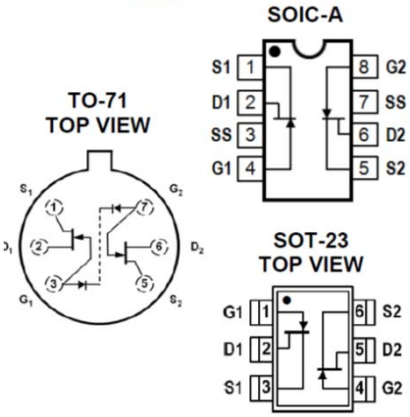
مثال عملی موازی سازی



طراحی کم نویز: زوج تفاضلی خارجی



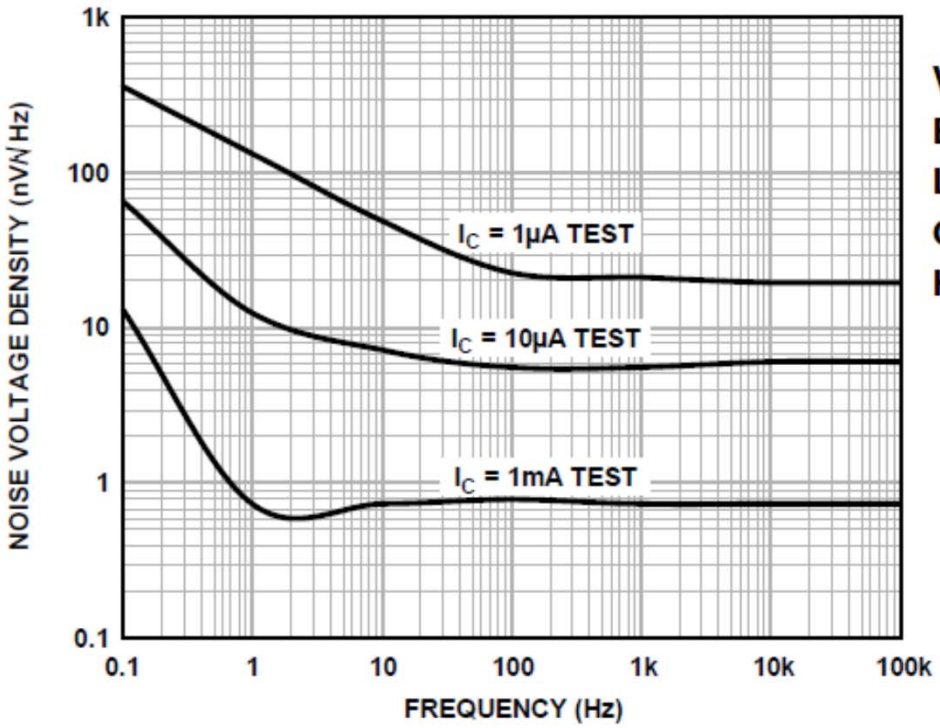
MAT12: Analog Devices



LSK489: Linear systems

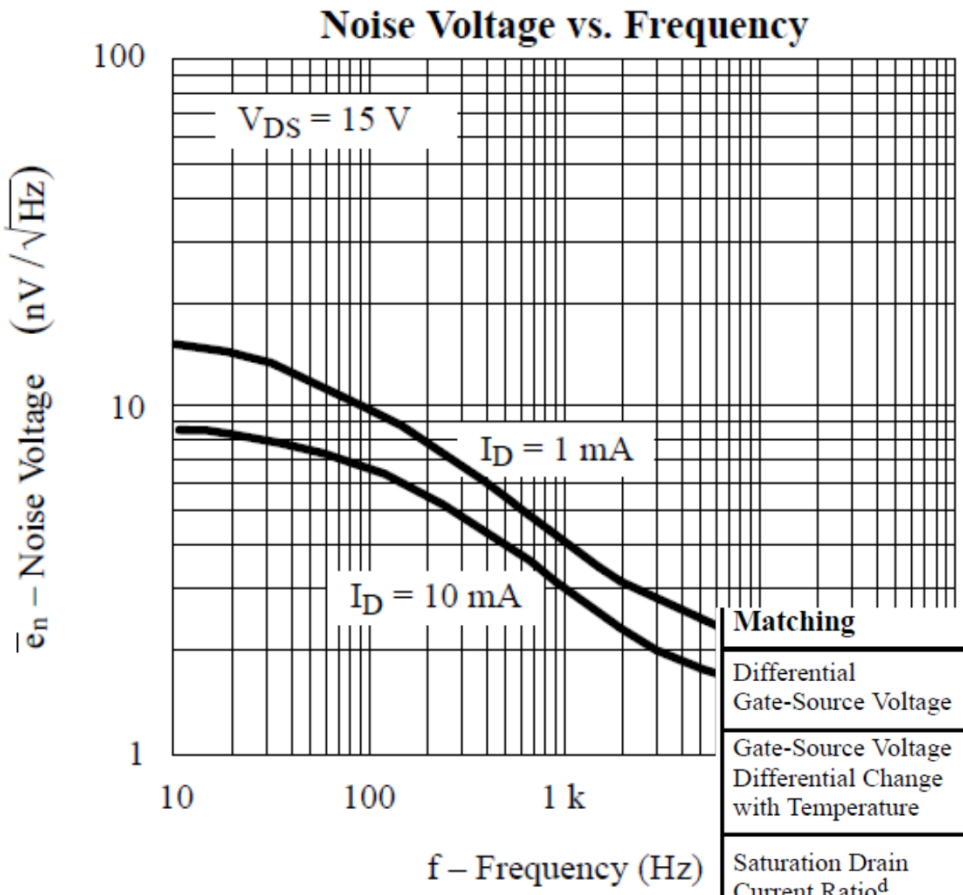
- در صورت کم نیاز به سطح نویز پایین تر از آنچه با آپ-امپ قابل دسترسی است:
- ساخت طبقه اول تفاضلی با زوجهای تفاضلی BJT و JFET
- ادوات کم نویز به دلیل ساخت دقیق
- امکان بایاس کردن با جریان بزرگ ← افزایش g_m و در نتیجه نویز ولتاژ
- امکان موازی کردن ادوات ← کاهش نویز ولتاژ
- ابعاد بزرگ افزاره ها: نویز فلیکر کوچک
- قیمت بسیار بالا و دسترسی محدود

زوج تفاضلی BJT: MAT12

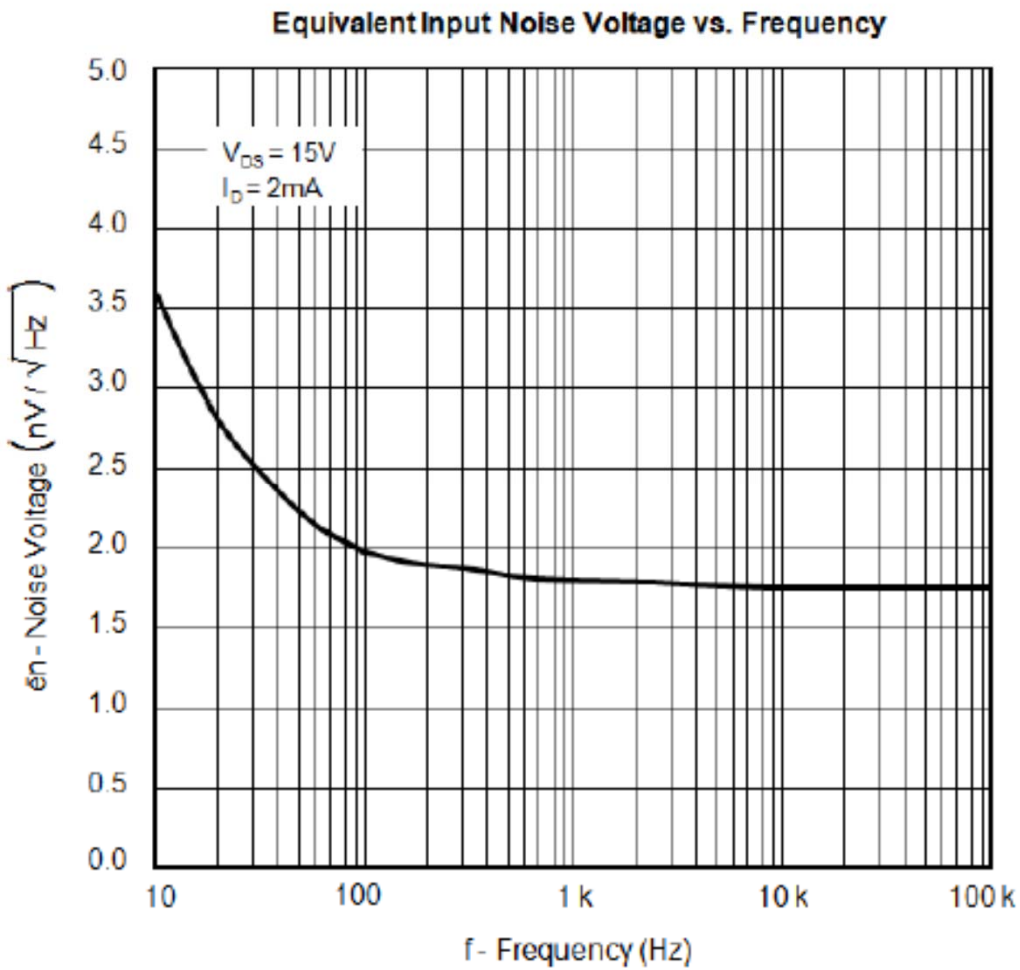


Very low voltage noise: 1 nV/√Hz maximum at 100 Hz
Excellent current gain match: 0.5% typical
Low offset voltage (V_{OS}): 200 μV maximum
Outstanding offset voltage drift: 0.03 μV/°C typical
High gain bandwidth product: 200 MHz

زوج تفاضلی JFET: 2N5564 (قدیمی)



Matching

Differential Gate-Source Voltage	$\lvert V_{GS1}-V_{GS2}\rvert$	V_{DG} = 15 V, I_D = 2 mA			5
Gate-Source Voltage Differential Change with Temperature	$\frac{\Delta\lvert V_{GS1}-V_{GS2}\rvert}{\Delta T}$	V_{DG} = 15 V, I_D = 2 mA T_A = –55 to 125°C			10
Saturation Drain Current Ratio[d]	$\frac{I_{DSS1}}{I_{DSS2}}$	V_{DS} = 15 V, V_{GS} = 0 V	0.98	0.95	1
Transconductance Ratio	$\frac{g_{fs1}}{g_{fs2}}$	V_{DS} = 15 V, I_D = 2 mA f = 1 kHz	0.98	0.95	1
Common Mode Rejection Ratio[d]	CMRR	V_{DG} = 10 to 20 V I_D = 2 mA	76		

زوج تفاضلی JFET: LSK489 (جدید)