

上一讲 放大器的频率特性

□概述

- ❖线性电路的S域分析法
- ❖密勒效应
- ❖极点与节点的关联

□共源级

□源跟随器

□共栅级

□共源共栅级

□差分对

模拟集成电路原理与设计

第7章 噪声

陈中建

chenzj@pku.edu.cn

62759620, 理科2号楼2617

微电子学系

授课内容

绪论, 2学时	重要性、一般概念
器件物理基础, 2学时	MOSFET结构、IV特性、二级效应、器件模型
单级放大器, 5学时	共源、共漏、共栅、共源共栅
EDA系统使用常识 和设计实习实例演示, 2学时	做设计实习所需软硬件系统的使用
差动放大器, 3学时	定性分析、定量分析、共模响应、吉尔伯特单元
无源/有源电流镜, 2学时	基本/共源共栅/有源电流镜
放大器的频率特性, 4学时	米勒效应、极点与节点关系、单级放大器频率特性分析
噪声, 4学时	统计特性、类型、电路表示、单级放大器噪声分析、噪声带宽
期中考试 2学时, 评卷 1学时。习题课若干学时	
反馈, 6学时	特性、四种反馈结构、负载影响、对噪声的影响
运算放大器, 6学时	性能参数、一级运放、两级运放、各指标分析
稳定性和频率补偿, 6学时	多极点系统、相位裕度、频率补偿
版图, 3学时	叉指、对称、ESD等

本讲 噪声

□ 噪声的统计特性

- ❖ 噪声谱（频域）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 热噪声
- ❖ 闪烁噪声

□ 电路中噪声的表示

□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

为什么要学习噪声知识？

- 电路能处理的信号的最小值等于噪声的水平
- 设计AIC时通常需要考虑噪声指标
 - ❖ 体现在信噪比（SNR）这一指标上
- 低噪声AIC在很多领域有重要应用

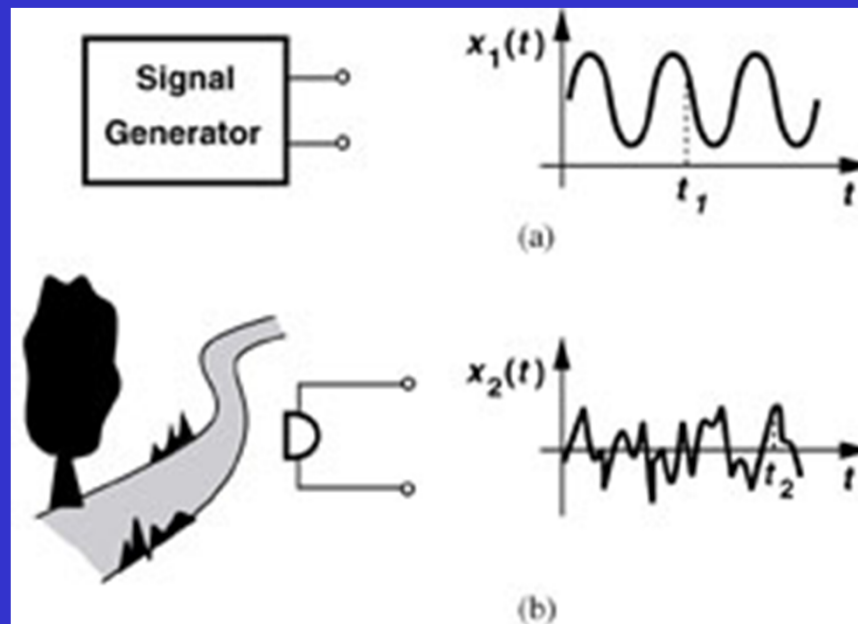
统计学特性

□ 噪声是一个随机过程

❖ 每一时刻的幅值是不能预测的

□ 哪些特性可以被预测？

❖ 平均功率、功率谱密度（噪声谱）、幅值分布

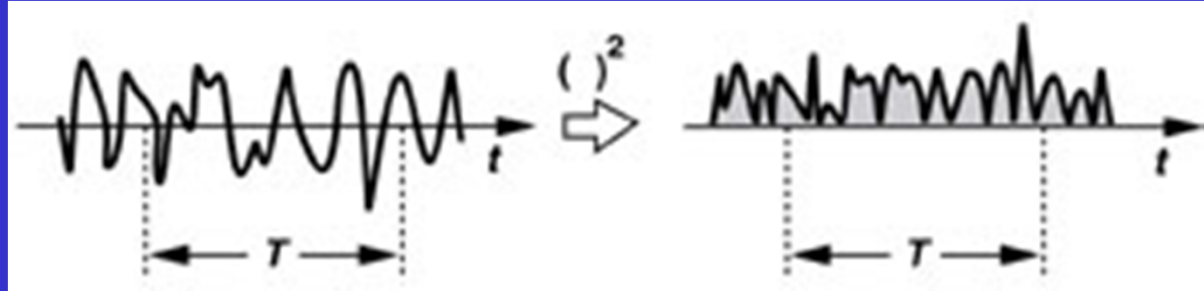


某一时刻的值
可预测

某一时刻的值
不可预测

平均功率

有些随机过程的平均功率也不可预测



电路中大多数噪声源有固定的平均功率，可以预测

均方根值（**root mean square**）的定义：

平均功率的定义：

$$P_{av} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x^2(t) dt$$

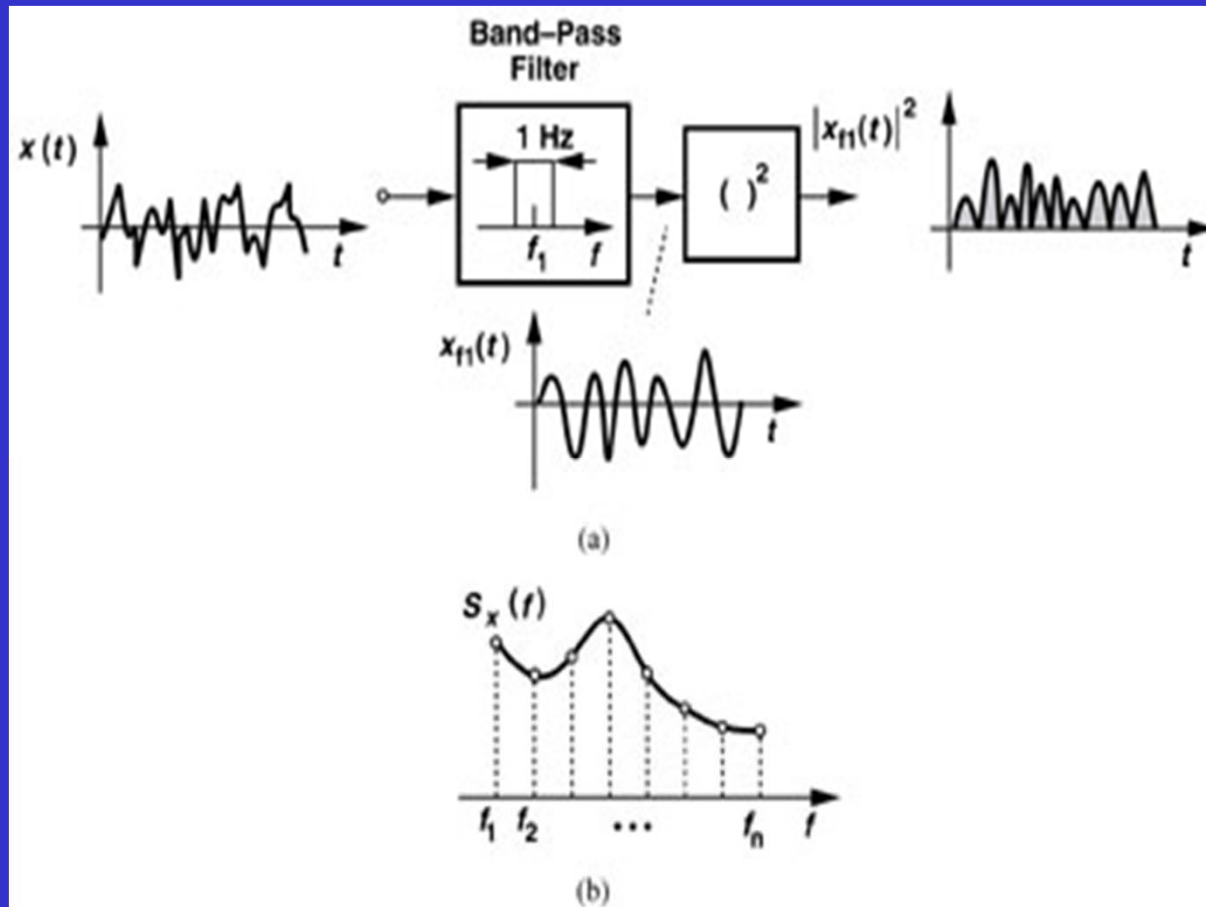
$$rms = \sqrt{P_{av}} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x^2(t) dt}$$

若 $x(t)$ 为电压信号，则 P_{av} 单位为 V^2

平均功率只反映了噪声的功率特性（幅值特性），没反映频率特性

噪声谱

又称为“功率谱密度” (**PSD: Power spectral density**) ;
PSD定义为: 在每个频率上信号具有的功率的大小;
反映了噪声的功率和频率两方面的特性



$X(t)$ 信号的
PSD写为 $S_X(f)$;
 $S_X(f)$ 定义为: f
附近1Hz带宽
内 $X(t)$ 具有的
平均功率; 单
位 V^2/Hz

电路中大多数
噪声源有可预
测的噪声谱

噪声谱

□ PSD在整个频率范围内为相同值

❖ 白噪声

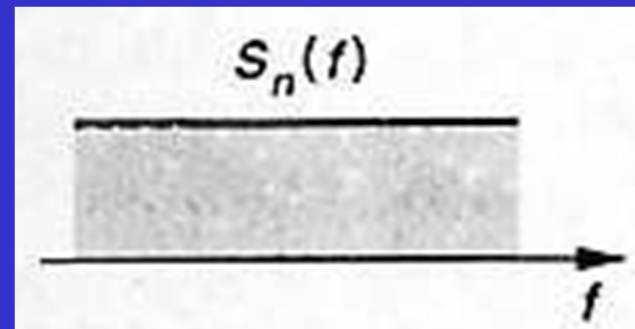
□ 定理

❖ “如果把噪声谱为 $S_X(f)$ 的一个信号加在一个传输函数为 $H(s)$ 的线性时不变系统上，则输出谱由下式给出”

$$S_Y(f) = S_X(f) |H(f)|^2, H(f) = H(s = 2\pi jf)$$

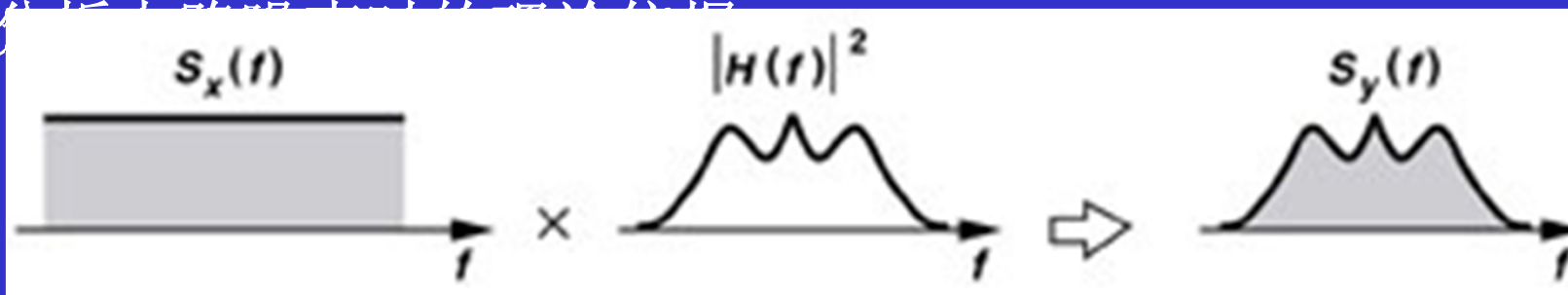
❖ 适用于线性时不变系统

❖ 外加噪声谱时系统传递函数

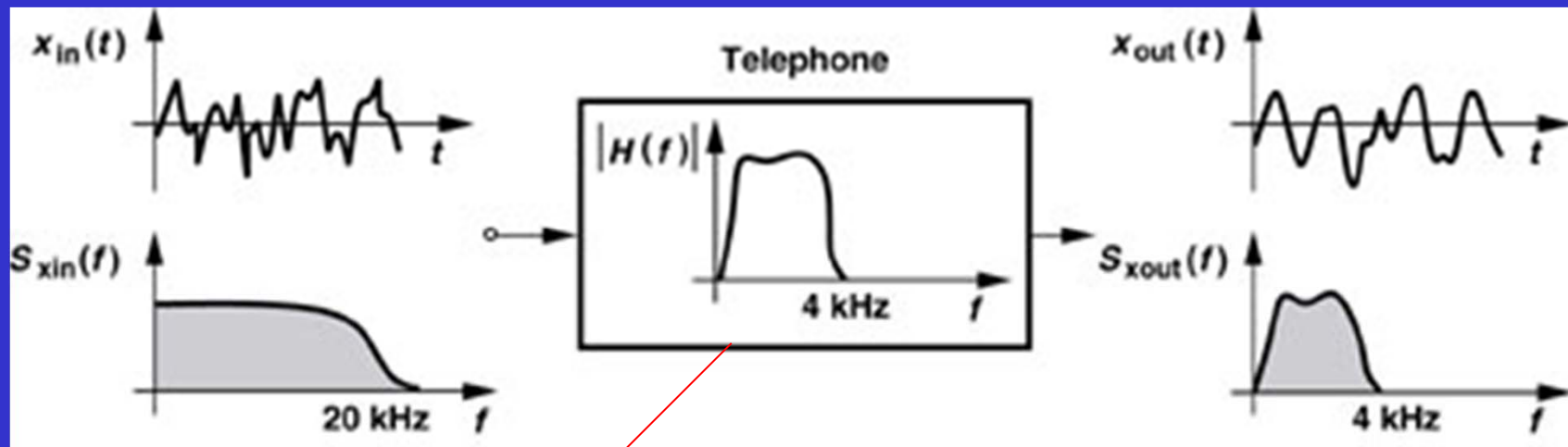
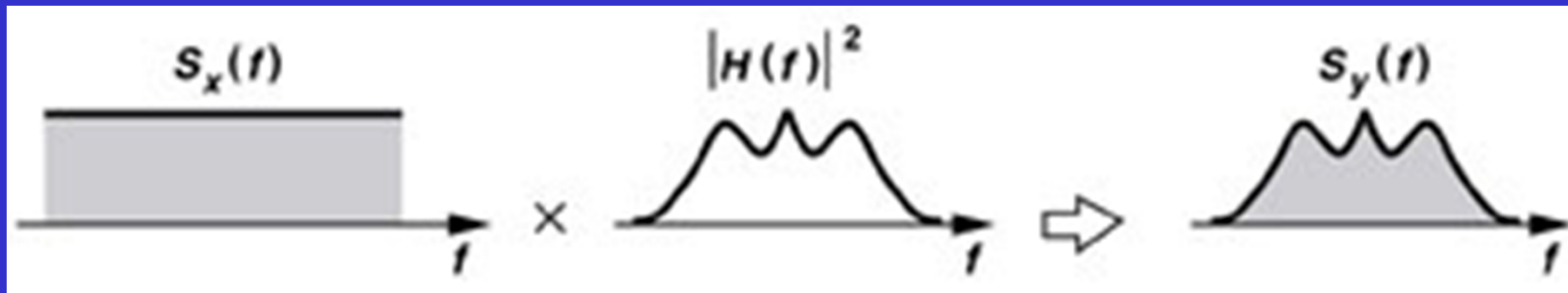


线性时不变系统:

具有叠加性、均匀性并且系统参数不随时间变化的系统



噪声谱被 $H(f)$ “整形”

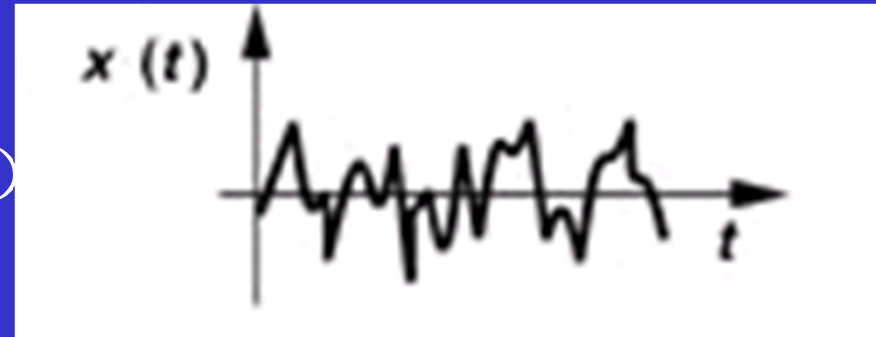


电话系统带宽为4KHz，声音信号的高频部分被滤除

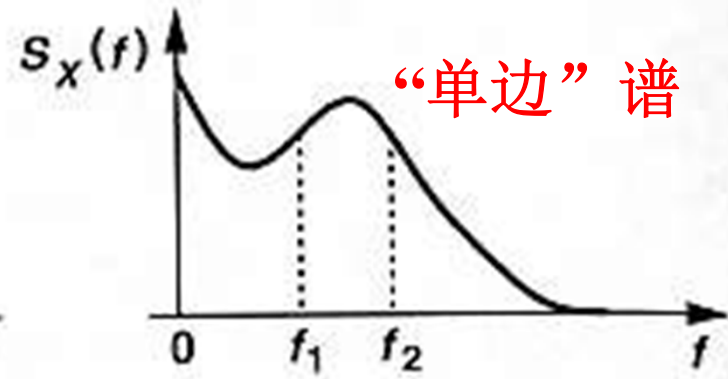
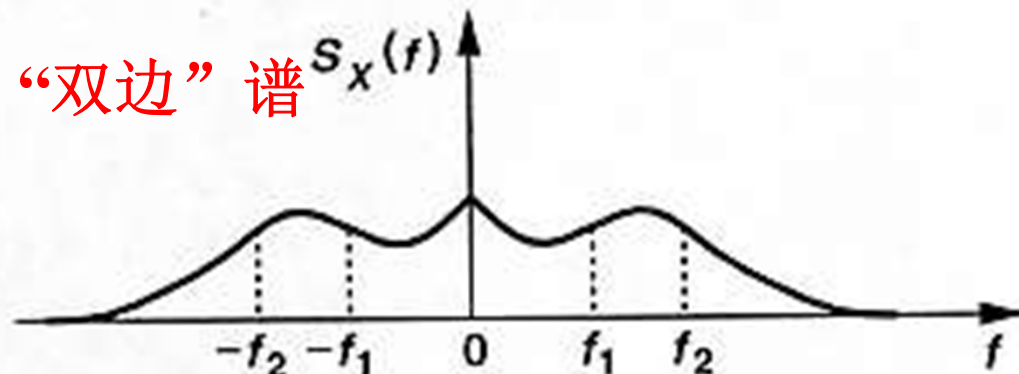
“双边”谱和“单边”谱

□参考文献[1]

- ❖ $X(t)$ 如果是实数，则 $S_X(f)$ 为 f 的偶函数（“双边”谱）
 - 从数学角度看
- ❖ $[f_1, f_2]$ 频率范围内 $x(t)$ 总功率 P_{f_1, f_2}
- ❖ 用带通滤波器测量的结果为“单边”谱（0到 $+\infty$ Hz）



$$P_{f_1, f_2} = \int_{-f_2}^{-f_1} S_X(f) df + \int_{f_1}^{f_2} S_X(f) df$$
$$= \int_{f_1}^{f_2} 2S_X(f) df$$



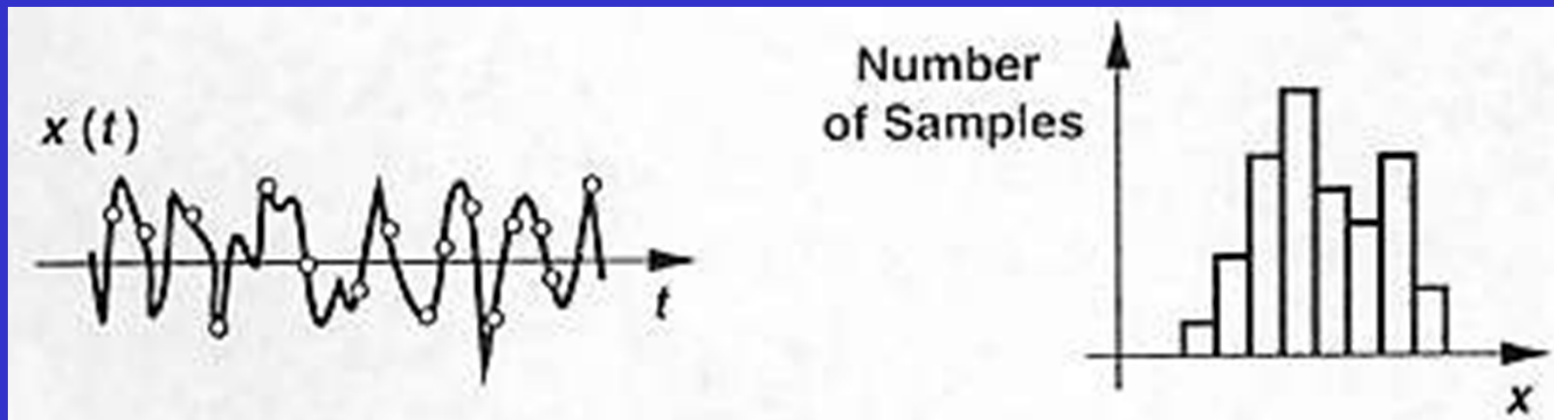
幅值分布

□ 概率密度函数

- ❖ 噪声瞬时值不可预测，但通过长期观察、统计，可以得到每个值出现的概率大小
- ❖ PDF: Probability density function, 定义为:

$$P_X(x)dx = x < X < x + dx \text{ 的概率}$$

- ❖ 许多随机量的PDF表现为高斯（正态）分布，如电阻的噪声



相关噪声源和非相关噪声源

□ 电路中通常同时存在多个噪声源

□ 相关噪声源

❖ 噪声功率不可以直接叠加

□ 非相关噪声源

❖ 不相关器件产生的噪声；噪声功率可以直接叠加

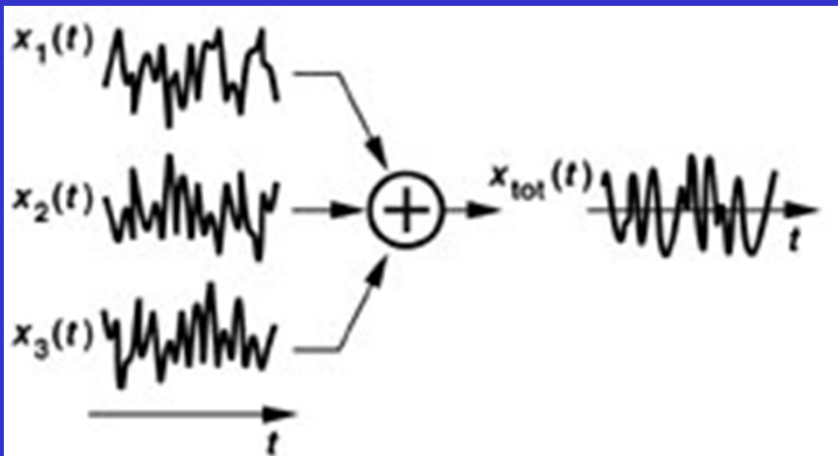
$$\begin{aligned} P_{av} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} [x_1(t) + x_2(t)]^2 dt \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x_1^2(t) dt + \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x_2^2(t) dt \\ &\quad + \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} 2x_1(t)x_2(t) dt \\ &= P_{av1} + P_{av2} + \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} 2x_1(t)x_2(t) dt \end{aligned}$$

$x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 不存在相关性时，第三项为零；

相关时第三项不为零；

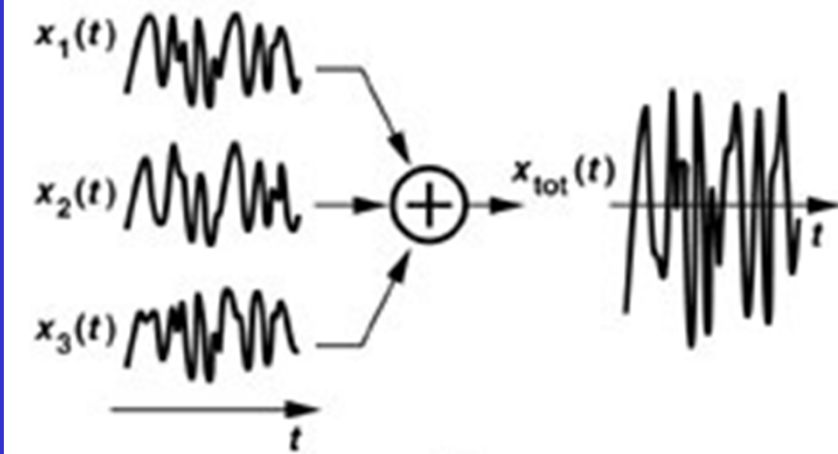
相关性越高（波形相似程度），第三项的值越大

相关噪声源和非相关噪声源



(a)

比赛前体育场中的观众交谈，产生非相关噪声，总噪声功率低



(b)

比赛中，由具体赛况驱动，观众会齐声呐喊，产生相关噪声，总噪声功率高

AIC设计中研究的噪声源通常是不相关的，因此噪声功率可直接叠加

$$P_{av} = P_{av1} + P_{av2} + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} 2x_1(t)x_2(t)dt$$

本讲 噪声

□ 噪声的统计特性

- ❖ 噪声谱（频域）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 热噪声
- ❖ 闪烁噪声

□ 电路中噪声的表示

□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

噪声的分类

□“环境”噪声和器件噪声

- ❖ “环境”噪声指来自电源线、地线、衬底等“外环境”的噪声（干扰）
- ❖ 器件噪声指构成AIC的器件本身所产生的噪声，如电阻、MOS管等

□器件噪声

- ❖ 热噪声
 - 电阻噪声、MOS管的沟道热噪声
- ❖ 闪烁噪声
 - MOS管

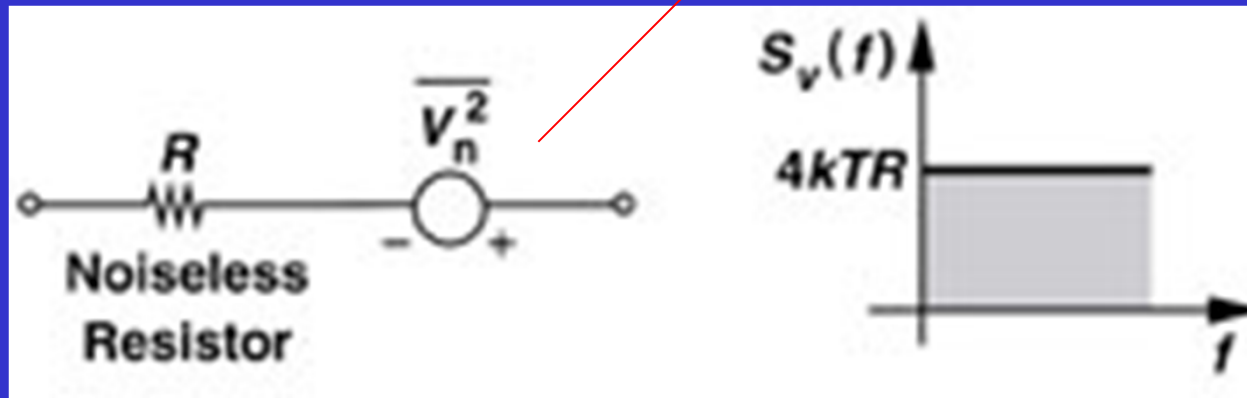
热噪声

□来源

- ❖ 导体中载流子的随机运动，引起导体两端电压波动
- ❖ 随机运动程度与绝对温度有关，因此噪声谱与绝对温度成正比

极性不重要，但在分析电路过程中要保持不变

□电阻的热噪声

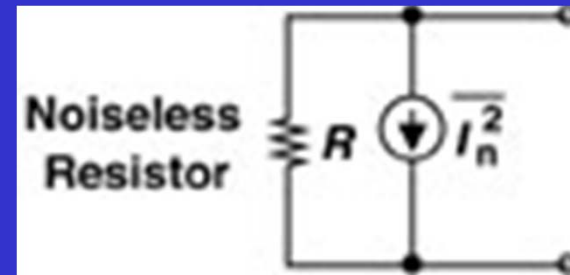


噪声谱密度：
 $S_v(f)=4kTR$

教材上默认
 $\Delta f=1\text{Hz}$

$$\overline{V_n^2} = 4kTR(\Delta f); \overline{I_n^2} = \frac{4kT}{R}(\Delta f)$$

$$R = 50, T = 300\text{K} \rightarrow V_n = 0.91\text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$$



电容和电感的噪声

□电阻存在热噪声

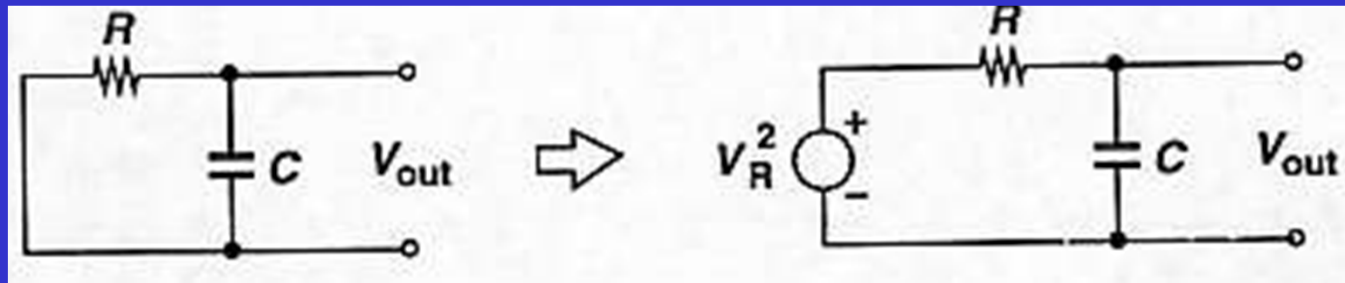
□理想电容和电感没有噪声

❖P.Gray书P760

❖实际的C和L有寄生电阻，寄生电阻引入热噪声

RC电路的输出噪声

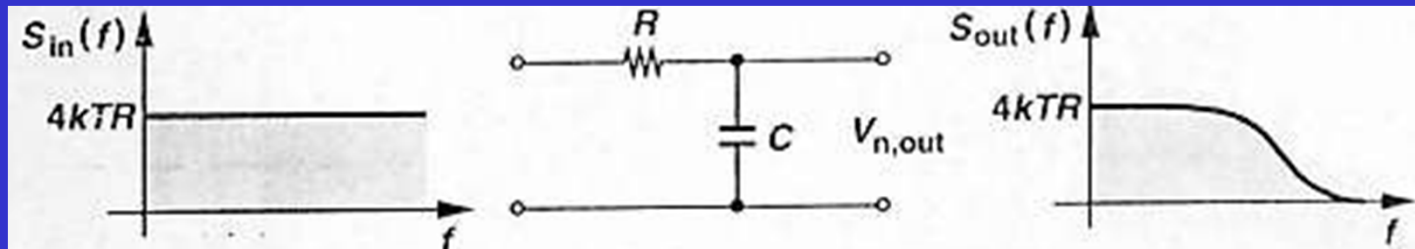
□ 计算RC电路的输出噪声谱和总噪声功率



开关电容电路的采样噪声

$$\frac{V_{out}}{V_R}(s) = \frac{1}{sRC + 1}$$

$$S_{out}(f) = S_R(f) \left| \frac{V_{out}}{V_R}(j\omega) \right|^2 = 4kTR \frac{1}{4\pi^2 R^2 C^2 f^2 + 1}$$



$$P_{n,out} = \int_0^{\infty} \frac{4kTR}{4\pi^2 R^2 C^2 f^2 + 1} df = \frac{kT}{C}$$

1pF电容时为64.3μV

与R无关，只能增大C来减小噪声

用电流源来表示热噪声

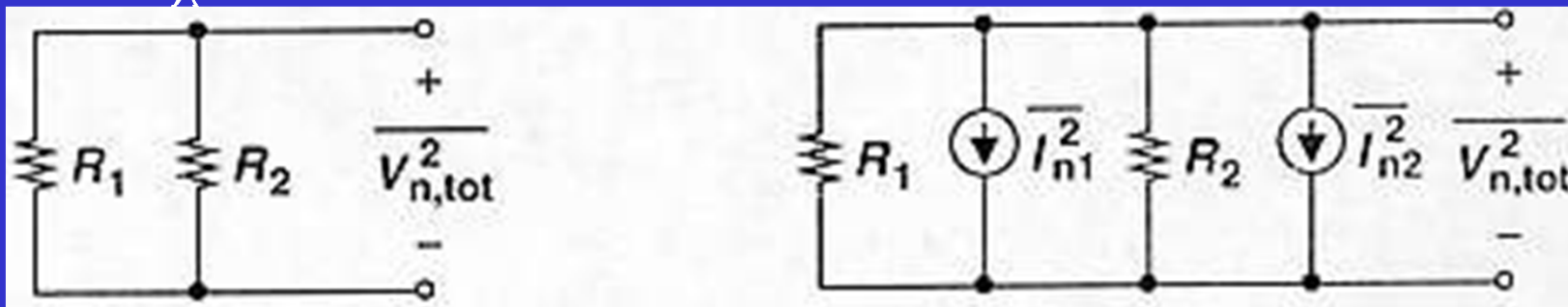
□ 噪声可以用串连电压源来表示，也可以用并联电流源表示



□ 多种表示的意义

$$\overline{V_n^2} = 4kTR(\Delta f); \overline{I_n^2} = \frac{4kT}{R}(\Delta f)$$

- ❖ 选择合适的表示法，会降低电路分析的复杂度
- ❖ 完整表征噪声需要这两种表示法——见“输入参考噪声”部



MOS管沟道区的热噪声

工作在饱和区的长沟道MOS管

γ 不是体效应系数。

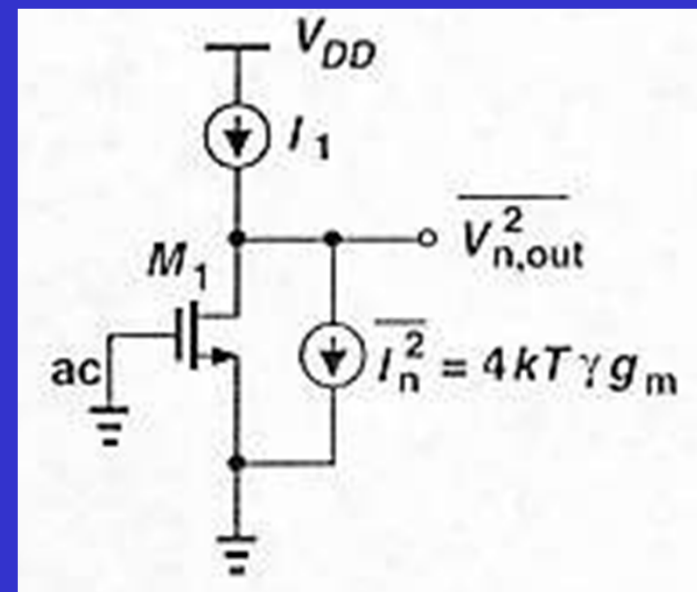
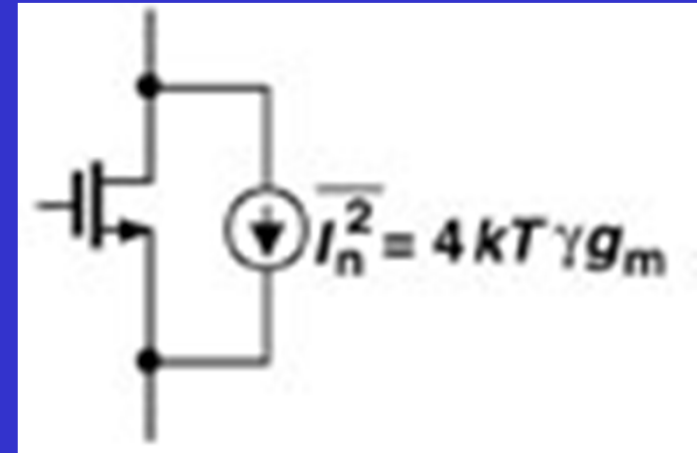
长沟道MOS管的 $\gamma=2/3$

亚微米MOS管会很大（0.25微米工艺时为2.5）

单个MOS管能产生的最大热噪声电压：

$$\overline{V_n^2} = \overline{I_n^2} r_o^2 = 4kT \left(\frac{2}{3} g_m\right) r_o^2$$

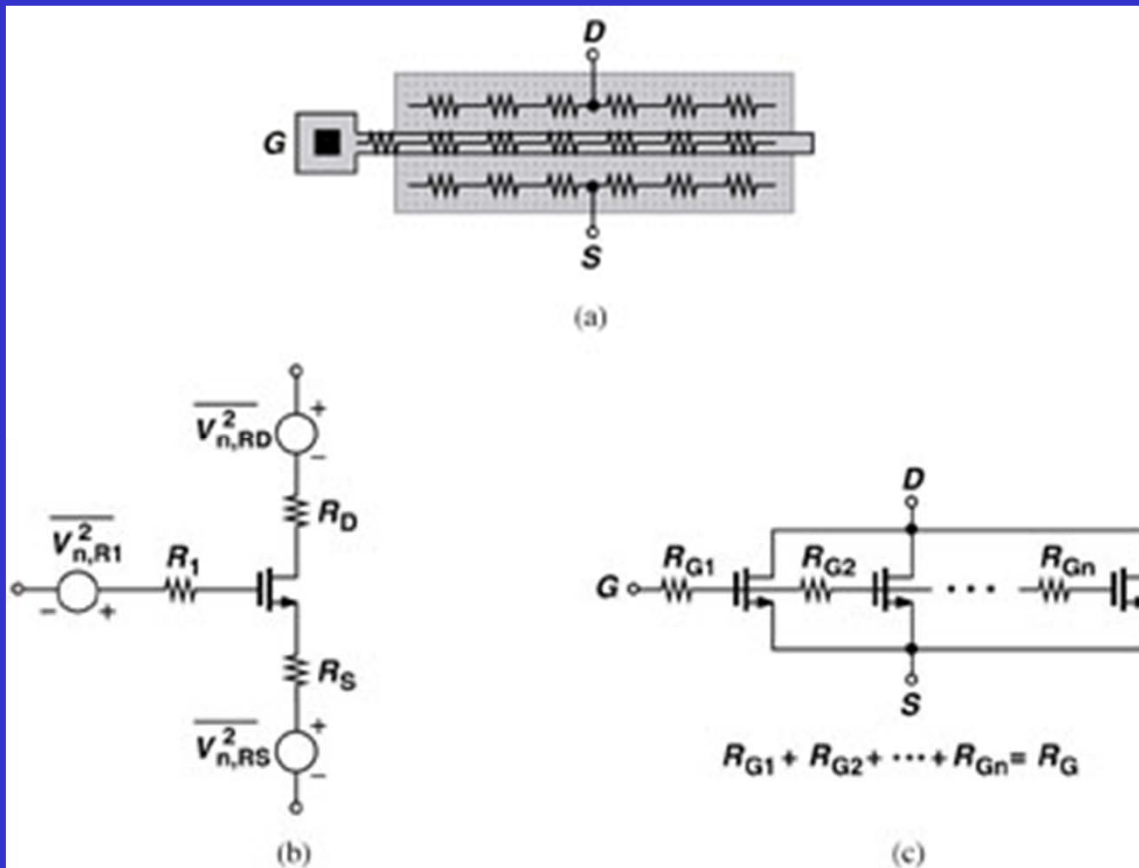
减少 g_m 可降低噪声。当 g_m 不影响其他关键指标时，应尽量小，如尾电流源的MOS管



MOS管欧姆区的热噪声

□ 欧姆区热噪声

❖ 栅、源、漏的材料电阻引入的热噪声



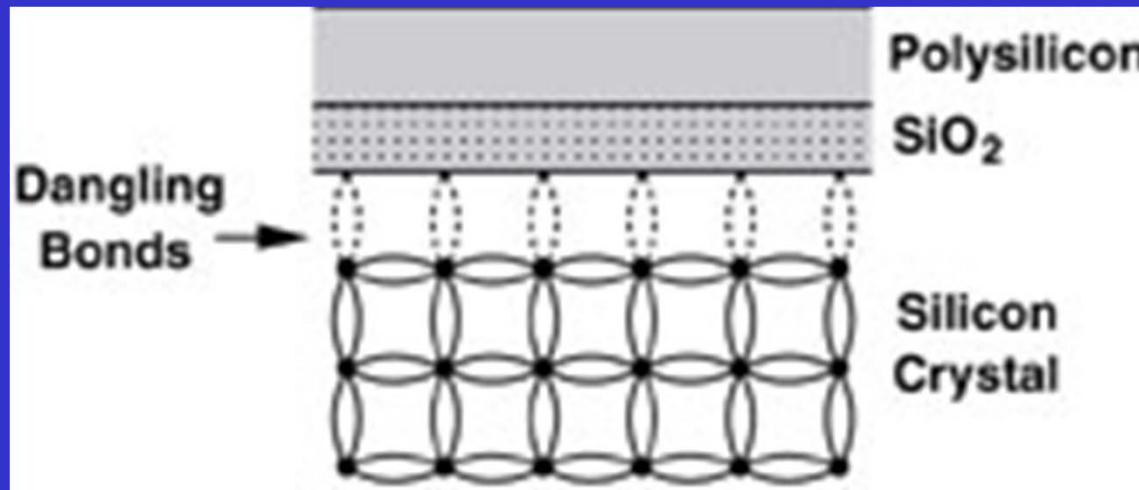
源/漏电阻通常很小，
可忽略其噪声

栅电阻会稍大，噪
声会有一定影响

MOS管的闪烁噪声

□来源

- ❖ 载流子在栅和衬底界面处的俘获与释放，导致源漏电流有噪声
- ❖ 用与栅极串联的电压源来模拟
- ❖ 载流子俘获与释放多发生在低频下
- ❖ 其噪声功率与所选工艺密切相关

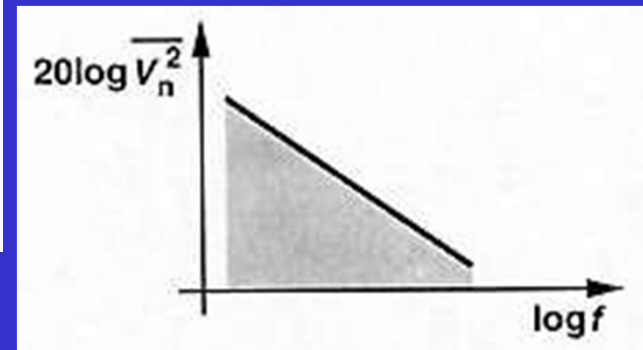


减少1/f噪声主要靠增大器件面积

1/f噪声

$$\overline{V_n^2} = \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f}$$

K 数量级 $10^{-25} V^2 F$



MOS管的闪烁噪声

1/f噪声的转角频率 f_c

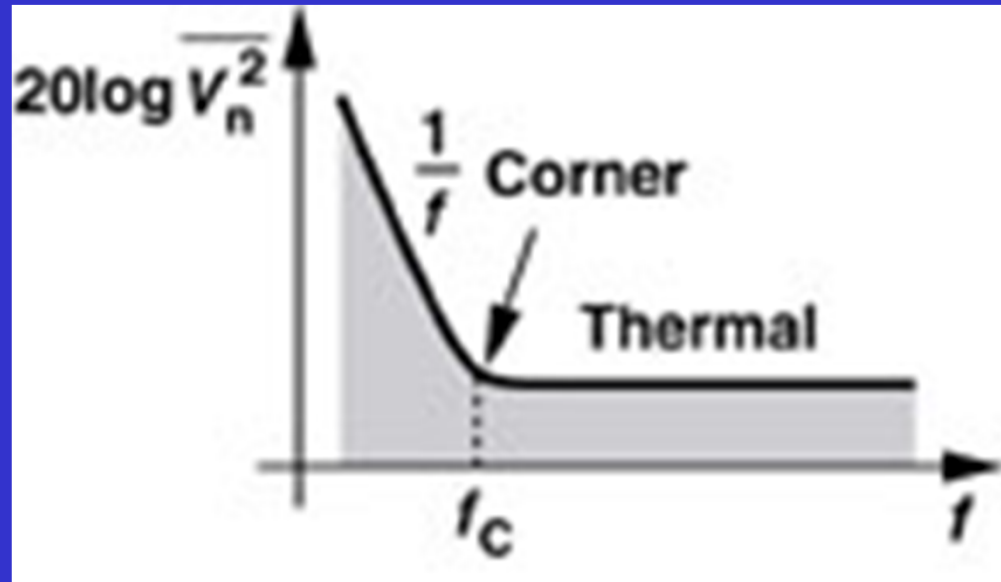
定义为:

热噪声和1/f噪声曲线的交叉点

用来界定1/f噪声起主导作用的频段

与面积和偏置电流有关。
对于给定的L, f_c 相对固定。
亚微米MOS管的 f_c 在
500KHz-1MHz之间

$$\overline{V_n^2} = \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f}$$



$$4kT \left(\frac{2}{3} g_m \right) \approx \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f_c} g_m^2$$
$$f_c \approx \frac{K}{C_{ox}WL} g_m \frac{3}{8kT} \quad (\text{对长沟道器件})$$

MOS管的总噪声

□在1KHz—1MHz频带内，计算NMOS管源漏电流的总噪声

热噪声：
$$\overline{I_n^2} = 4kT \left(\frac{2}{3} g_m \right)$$

$$\overline{I_{n,tot}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3} g_m \right) (10^6 - 10^3) \approx 4kT \left(\frac{2}{3} g_m \right) \times 10^6$$

1/f噪声：
$$\overline{V_{n,1/f}^2} = \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f}$$

$$\overline{I_{n,1/f}^2} = \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f} g_m^2$$

$$\overline{I_{n,1/f,tot}^2} = \frac{Kg_m^2}{C_{ox}WL} \int_{1KHz}^{1MHz} \frac{df}{f} = \frac{Kg_m^2}{C_{ox}WL} \ln 10^3 = \frac{6.91Kg_m^2}{C_{ox}WL}$$

本讲 噪声

□ 噪声的统计特性

- ❖ 噪声谱（频域）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 热噪声
- ❖ 闪烁噪声

□ 电路中噪声的表示

□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

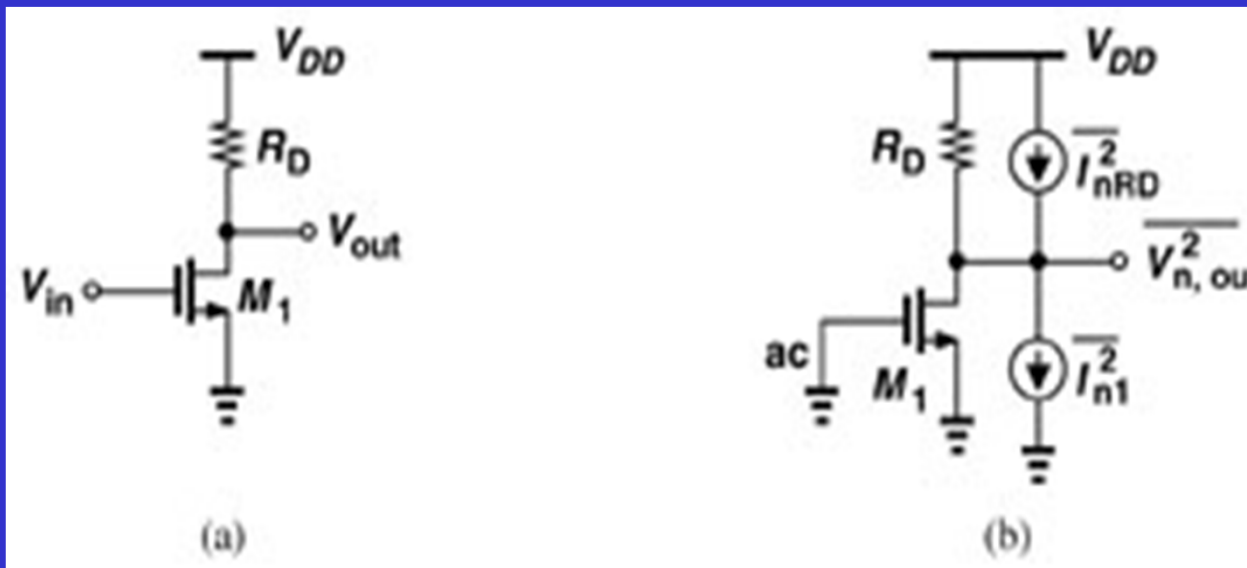
□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

输出参考噪声电压

表示方法一

把输入置交流地，计算电路中各噪声源在输出端产生的总噪声



这种表示法的不足:

输出参考噪声与电路增益有关，无法比较不同电路的噪声性能

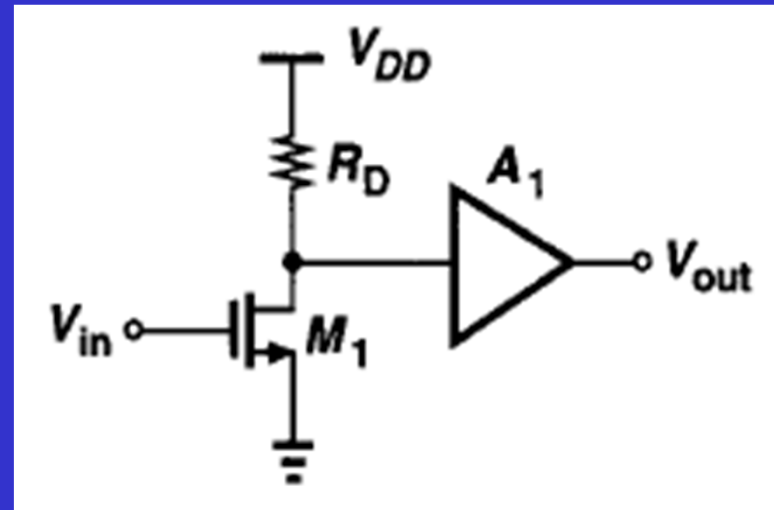
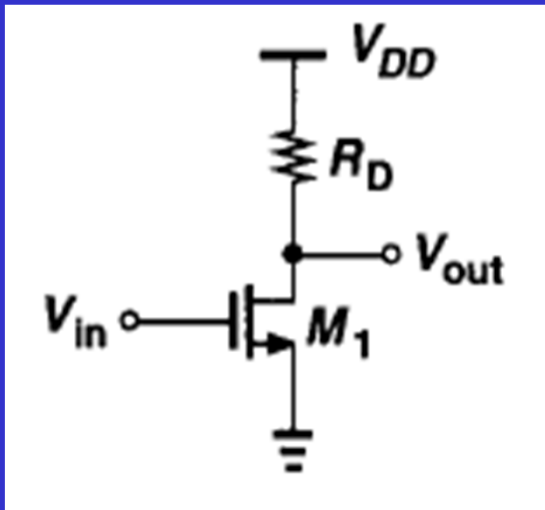
$$\overline{V_{n,out}^2} = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f} g_m^2 + \frac{4kT}{R_D} \right) R_D^2$$

M1管的热噪声+M1管的1/f噪声+ R_D 的热噪声

输出参考噪声电压

□这种表示法的不足

- ❖ 输出参考噪声与电路增益有关，无法比较不同电路的噪声性能

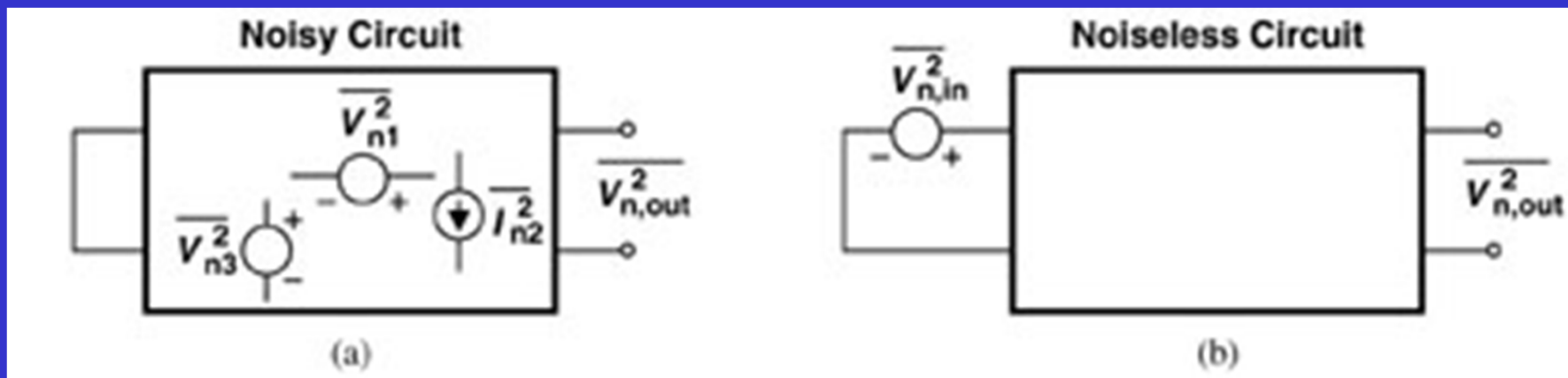


从输出参考噪声看，右图噪声大，噪声特性不好
但实际信噪比相同

输入参考噪声电压

表示方法二

在输入端用一个信号源来代表所有噪声源的影响

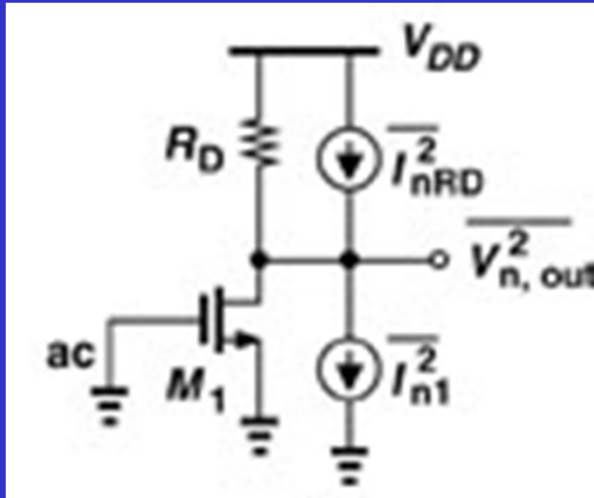


$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_v^2}$$

输入参考噪声反映了输入信号被噪声“侵害”的程度，能用于不同电路的噪声指标的比较

示例—输入参考噪声电压的计算

计算输入参考噪声电压



$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_v^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{g_m^2 R_D^2}$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f} g_m^2 + \frac{4kT}{R_D} \right) R_D^2 \frac{1}{g_m^2 R_D^2}$$

$$= 4kT \frac{2}{3g_m} + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f} + \frac{4kT}{g_m^2 R_D}$$

等效热噪声电阻 R_T :

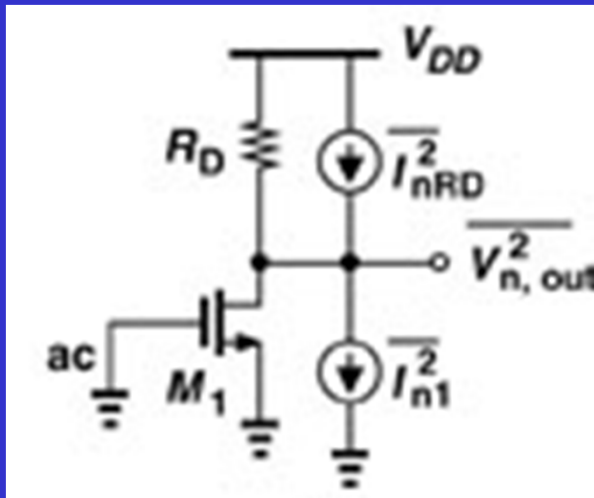
电路在单位带宽内的总的输入参考热噪声等于 R_T 的热噪声

$$\overline{V_{n,in,热噪声部分}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D} \right)$$

$$R_T = \frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D}$$

例题 求CS级总输入参考噪声电压

□ 对于图示电路， $W/L=50/0.5$ ， $I_D=1\text{mA}$ ， $R_D=2\text{K}\Omega$ ，在100MHz带宽内的总输入参考噪声电压是多少？



$$\overline{V_{n,out}^2} = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f} g_m^2 + \frac{4kT}{R_D} \right) R_D^2$$

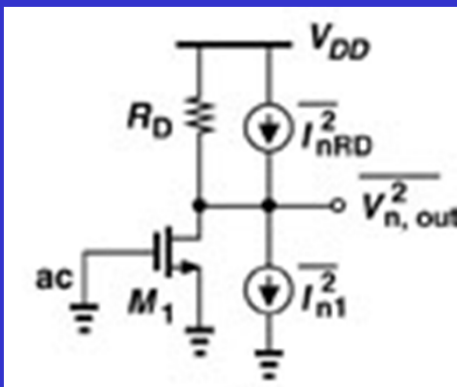
$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_v^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{g_m^2 R_D^2}$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f} g_m^2 + \frac{4kT}{R_D} \right) R_D^2 \frac{1}{g_m^2 R_D^2}$$

$$= 4kT \frac{2}{3g_m} + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f} + \frac{4kT}{g_m^2 R_D}$$

例题 求CS级总输入参考噪声电压

□ 对于图示电路,
 $W/L=50/0.5$,
 $I_D=1\text{mA}$,
 $R_D=2\text{K}\Omega$, 在
 100MHz带宽
 内的总输入参
 考噪声电压是
 多少?



$$g_m = \sqrt{2I_D \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}} = \sqrt{2 \times 1 \times 0.13429 \times \frac{50}{0.5}} = 5.18 [\text{mA/V}]$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = 4kT \frac{2}{3g_m} + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f} + \frac{4kT}{g_m^2 R_D}$$

$$\overline{V_{n,in,total}^2} = \int_1^{100M} \left(4kT \frac{2}{3g_m} + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f} + \frac{4kT}{g_m^2 R_D} \right) df$$

$$= 4kT \frac{2}{3g_m} \times 100M + \frac{K}{C_{ox} WL} \ln f \Big|_1^{100M} + \frac{4kT}{g_m^2 R_D} \times 100M$$

$$= 4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times \frac{2}{3 \times 5.18 \times 10^{-3}} \times 100M$$

$$+ \frac{1.06 \times 10^{-25}}{3.836 \times 10^{-15} \times 50 \times 0.5} \times \ln 10^8 + \frac{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}{5.18^2 \times 10^{-6} \times 2000} \times 100M$$

$$= 264.36 \times 10^{-12} \text{V}^2$$

$$\overline{V_{n,in,total}} = \sqrt{\overline{V_{n,in,total}^2}} = \sqrt{264.36 \times 10^{-12}} = 16.26 \mu\text{V}$$

仅用 $V_{n,in}$ 表示电路中的噪声不完善

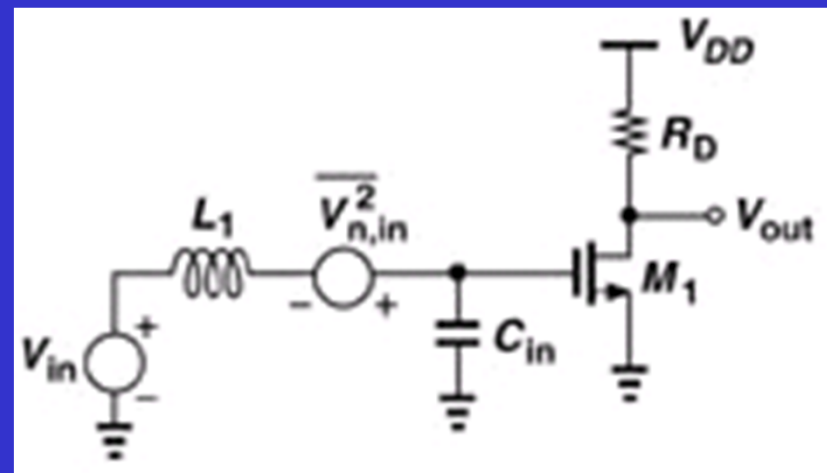
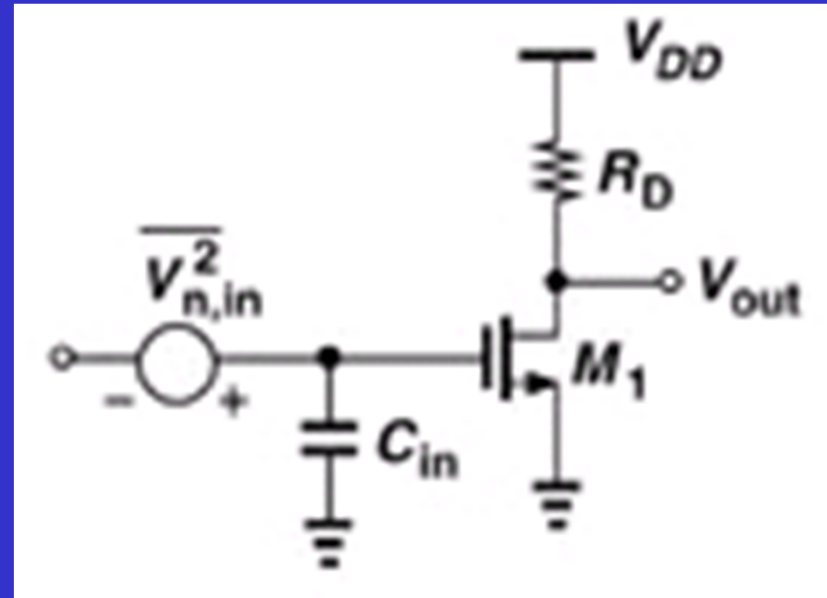
只考虑热噪声时，CS级的输出参考噪声电压为：

$$\overline{V_{n,out}^2} = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{4kT}{R_D} \right) R_D^2$$

输入参考噪声电压为：

$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_v^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{g_m^2 R_D^2} = 4kT \frac{2}{3g_m} + \frac{4kT}{g_m^2 R_D}$$

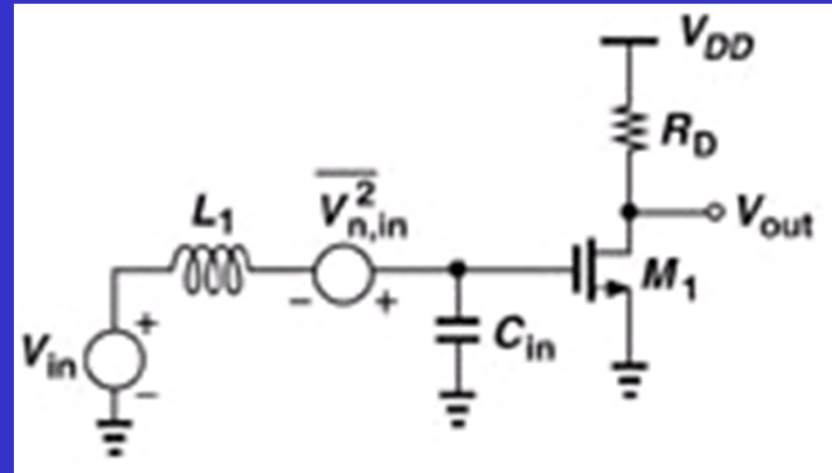
CS级由一信号源 V_{in} 驱动且信号源阻抗为 sL_1 时，输出参考噪声电压是多少？



仅用 $V_{n,in}$ 表示电路中的噪声不完善

CS级由一信号源 V_{in} 驱动且信号源阻抗为 sL_1 时，输出参考噪声电压是多少？

$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_v^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{g_m^2 R_D^2} = 4kT \frac{2}{3g_m} + \frac{4kT}{g_m^2 R_D}$$



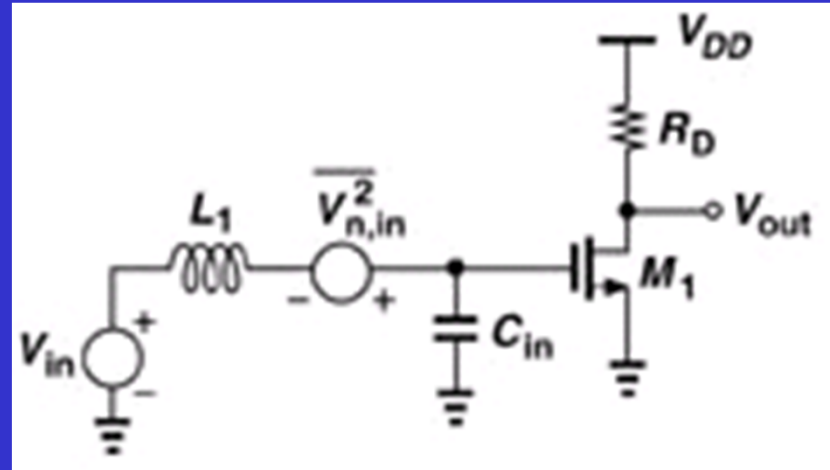
$$\begin{aligned} \therefore \frac{V_{G1}}{1/sC_{in}} + \frac{V_{G1} - V_{n.in}}{sL_1} &= 0 \\ \therefore V_{G1} &= V_{n.in} \cdot \frac{\frac{1}{sC_{in}}}{sL_1 + \frac{1}{sC_{in}}}, V_{n.out} = V_{G1} \cdot (g_{m1} R_D) \end{aligned}$$

$$\overline{V_{n,out}^2} = \overline{V_{n.in}^2} \cdot \left(\frac{\frac{1}{sC_{in}}}{sL_1 + \frac{1}{sC_{in}}} \right)^2 \cdot (g_{m1} R_D)^2$$

仅用 $V_{n,in}$ 表示电路中的噪声不完善

CS级由一信号源 V_{in} 驱动且信号源阻抗为 sL_1 时，输出参考噪声电压是多少？

$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_v^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{g_m^2 R_D^2} = 4kT \frac{2}{3g_m} + \frac{4kT}{g_m^2 R_D}$$

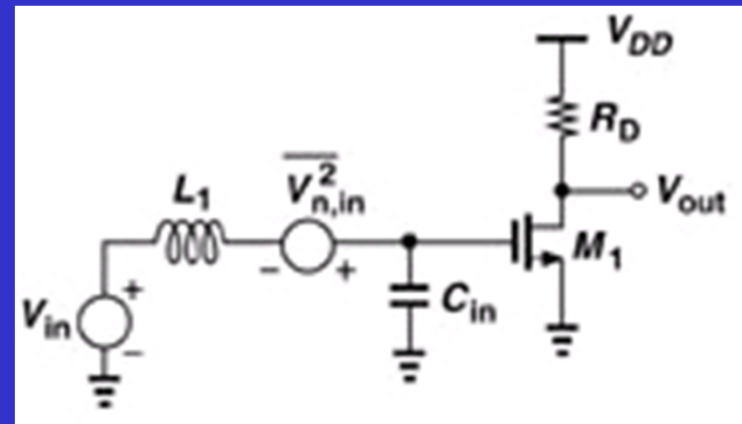


$$\begin{aligned} \overline{V_{n,out}^2} &= \overline{V_{n,in}^2} \cdot \left(\frac{1}{sL_1 + \frac{1}{sC_{in}}} \right)^2 \cdot (g_{m1} R_D)^2 = \overline{V_{n,in}^2} \cdot (g_{m1} R_D)^2 \cdot \left(\frac{1}{sL_1 + \frac{1}{sC_{in}}} \right)^2 \\ &= \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{4kT}{R_D} \right) R_D^2 \cdot \left(\frac{1}{sL_1 + \frac{1}{sC_{in}}} \right)^2 \end{aligned}$$

仅用 $V_{n,in}$ 表示电路中的噪声不完善

CS级由一信号源 V_{in} 驱动且信号源阻抗为 sL_1 时，输出参考噪声电压是多少？

$$\overline{V_{n,out}^2} = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{4kT}{R_D}\right) R_D^2 \cdot \left(\frac{1}{sL_1 + \frac{1}{sC_{in}}}\right)^2$$



上式表明：输出参考噪声电压与信号源的阻抗有关
令 $v_{in}=0$ 可知，输出参考噪声电压与信号源阻抗无关

$$\overline{V_{n,out}^2} = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{4kT}{R_D}\right) R_D^2$$

该例证明：

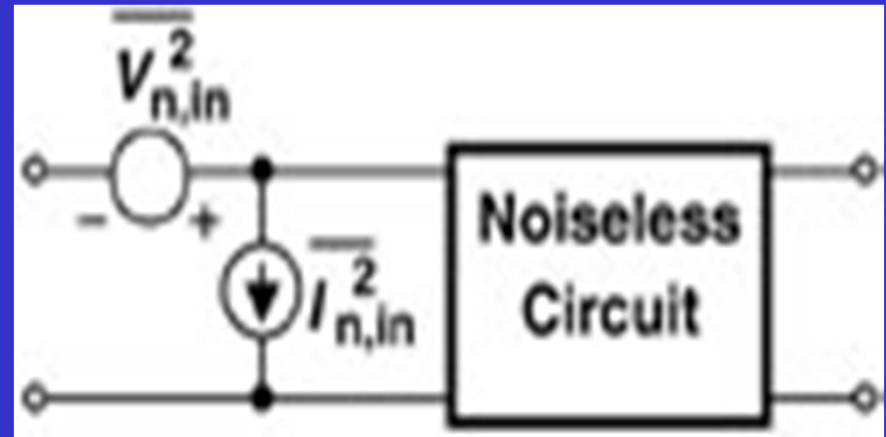
仅用输入参考噪声电压来表示电路的噪声是不完善的

电路中噪声的完善表示

用串联电压源和并联电流源
共同来表示输入参考噪声

已证明：

用串联电压源和并联电流源
来共同表示输入参考噪声，
是必须的，并且足以表示任
何线性二端口电路的噪声

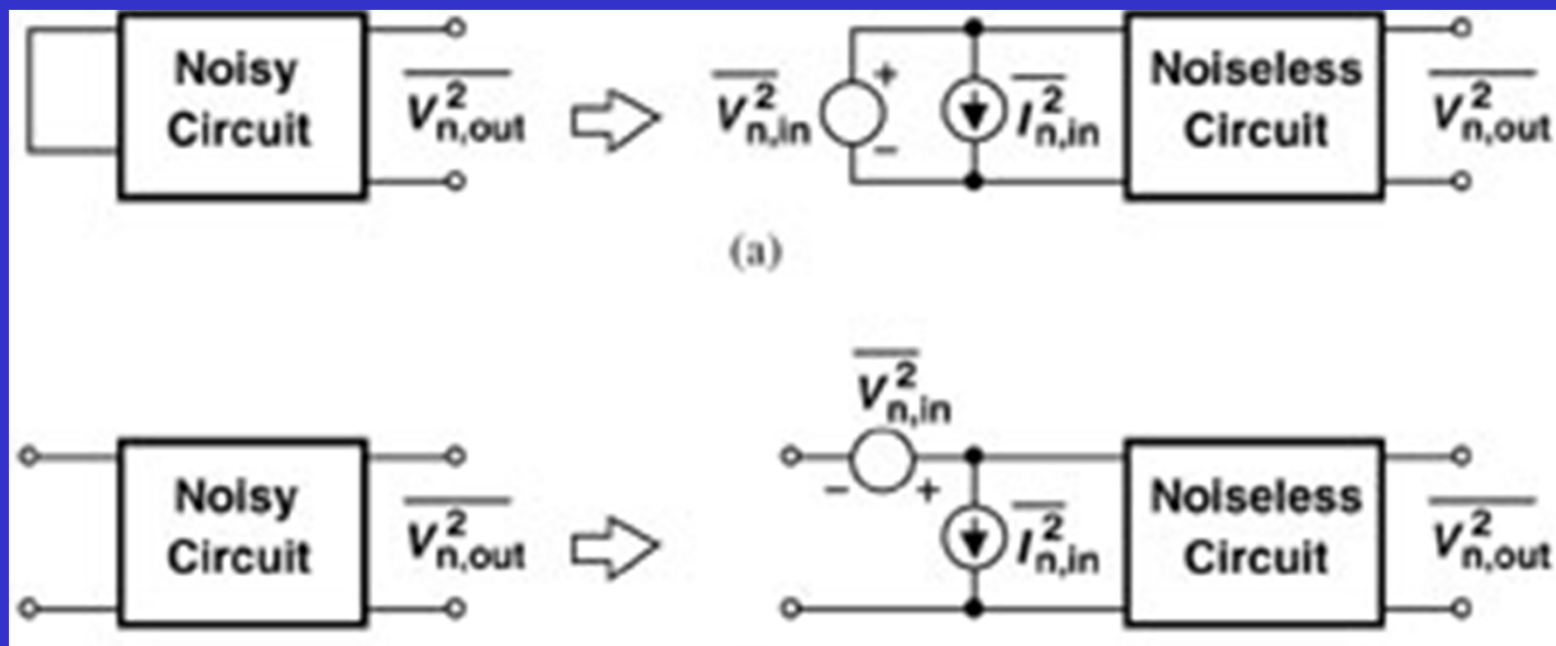
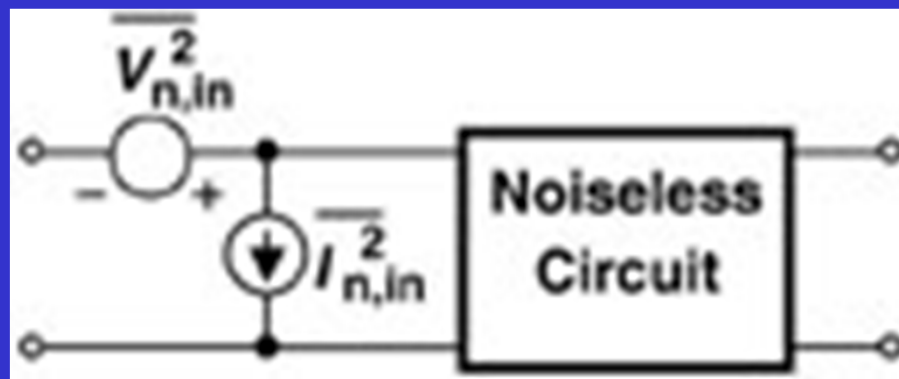


如何计算串联电压源和并联电流源？

该表示方法应该在任何信号源内阻情况下都正确，
因此，可针对信号源内阻为零和无穷大两种极端情
形来计算

如何计算串联电压源和并联电流源？

针对信号源内阻为零和无穷大两种极端情形来计算

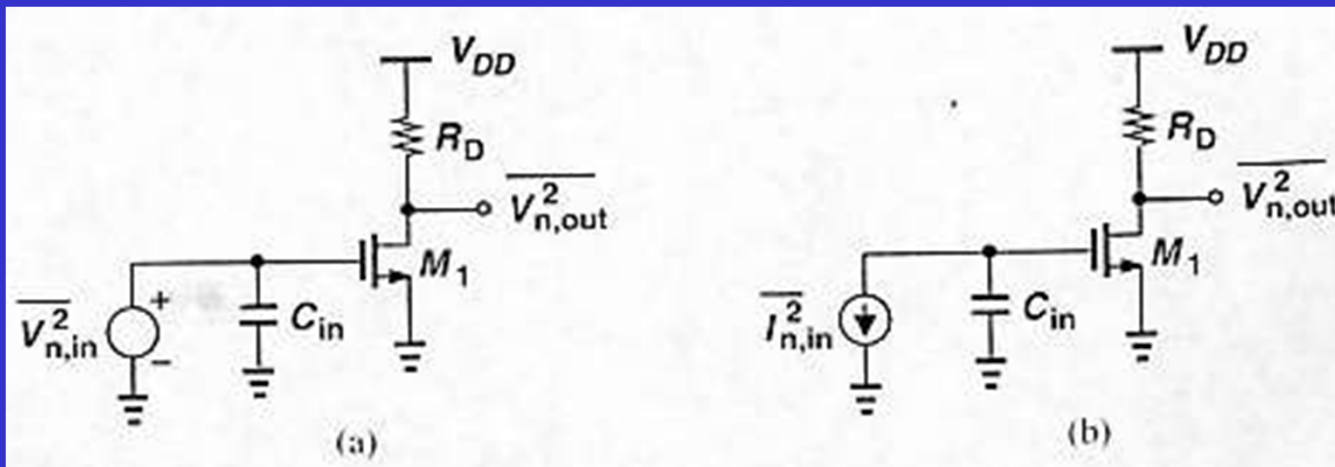
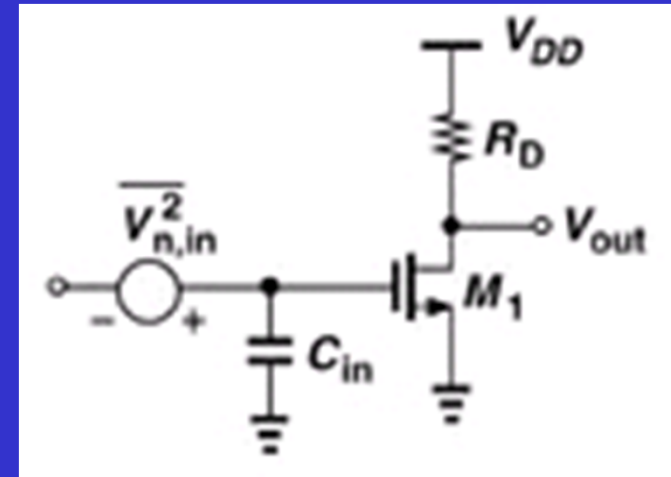


示例—串联电压源和并联电流源计算

$$\overline{V_{n,in}^2} = 4kT \frac{2}{3g_m} + \frac{4kT}{g_m^2 R_D} \quad (\text{不含 } 1/f \text{ 噪声})$$

$$\overline{V_{n,out}^2} = \overline{I_{n,in}^2} \left(\frac{1}{C_{in} \omega} \right)^2 g_m^2 R_D^2 = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{4kT}{R_D} \right) R_D^2$$

$$\overline{I_{n,in}^2} = (C_{in} \omega)^2 \frac{4kT}{g_m^2} \left(\frac{2}{3} g_m + \frac{1}{R_D} \right)$$



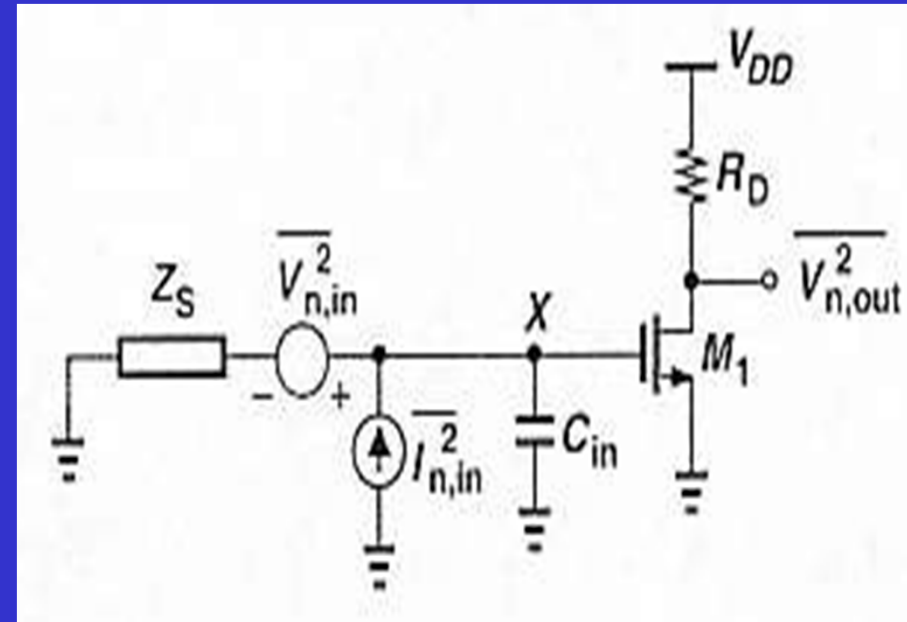
电路中噪声的表示

用串联电压源和并联电流源同时来表示输入参考噪声，是否把“噪声计算了两次”？
没有

可以证明：
对任何源阻抗 Z_S ，计算的输出噪声都是正确的

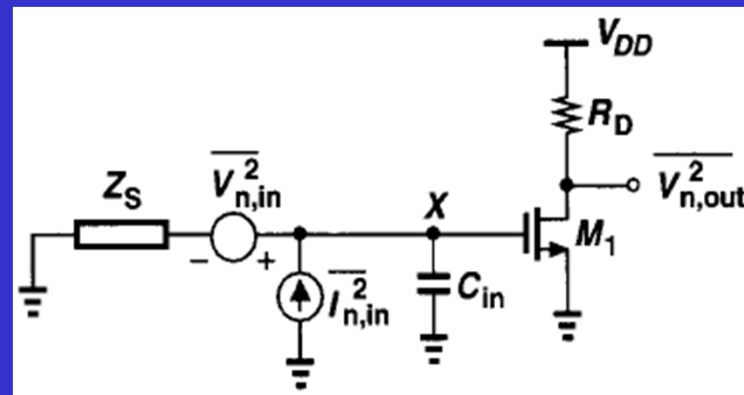
证明思路：

由 $V_{n,in}$ 和 $I_{n,in}$ ，求出 $V_{n,X}$ ，再乘以增益($g_m R_D$)，即可求出 $V_{n,out}$



电路中噪声的表示

- 假定 Z_S 无噪声，以简化分析
- 计算 $V_{n,in}$ 和 $I_{n,in}$ 在 M1 栅极产生的总噪声电压



$\overline{V_{n,in}^2}$ 和 $\overline{I_{n,in}^2}$ 来自同一噪声源，是相关的，因此，功率不能直接叠加。

$$V_{n,in} = V_{n,M1} + \frac{1}{g_m R_D} V_{n,RD}$$

$$I_{n,in} = C_{in} s V_{n,M1} + \frac{C_{in} s}{g_m R_D} V_{n,RD},$$

$$V_{n,X} = V_{n,in} \frac{\frac{1}{C_{in} s}}{\frac{1}{C_{in} s} + Z_S} + I_{n,in} \frac{\frac{Z_S}{C_{in} s}}{\frac{1}{C_{in} s} + Z_S}$$

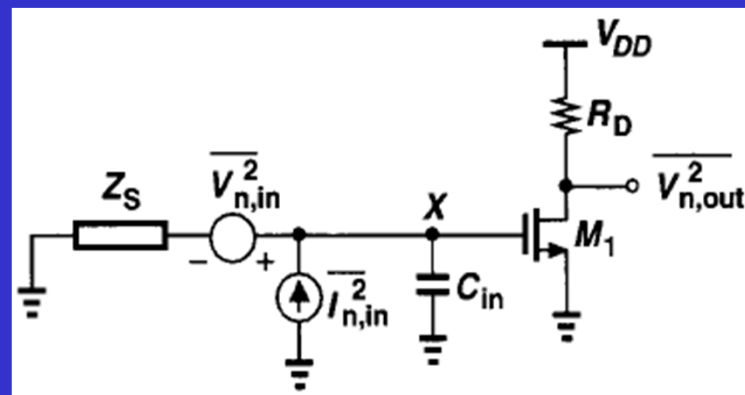
$$= \frac{V_{n,in} + I_{n,in} Z_S}{Z_S C_{in} s + 1}.$$

$V_{n,M1}$: M1管表现在栅极的噪声电压； $V_{n,RD}$: R_D 表现在M1栅极的噪声电压

电路中噪声的表示

$$V_{n,in} = V_{n,M1} + \frac{1}{g_m R_D} V_{n,RD}$$

$$I_{n,in} = C_{in} s V_{n,M1} + \frac{C_{in} s}{g_m R_D} V_{n,RD},$$



$$V_{n,X} = V_{n,in} \frac{\frac{1}{C_{in} s}}{\frac{1}{C_{in} s} + Z_S} + I_{n,in} \frac{\frac{Z_S}{C_{in} s}}{\frac{1}{C_{in} s} + Z_S}$$

$$= \frac{V_{n,in} + I_{n,in} Z_S}{Z_S C_{in} s + 1}.$$

可以看到： $V_{n,X}$ 与 Z_S 和 C_{in} 无关，仅与本级电路有关

$$V_{n,X} = \frac{1}{Z_S C_{in} s + 1} \left[V_{n,M1} + \frac{1}{g_m R_D} V_{n,RD} + C_{in} s Z_S \left(V_{n,M1} + \frac{1}{g_m R_D} V_{n,RD} \right) \right]$$

$$= V_{n,M1} + \frac{1}{g_m R_D} V_{n,RD}.$$

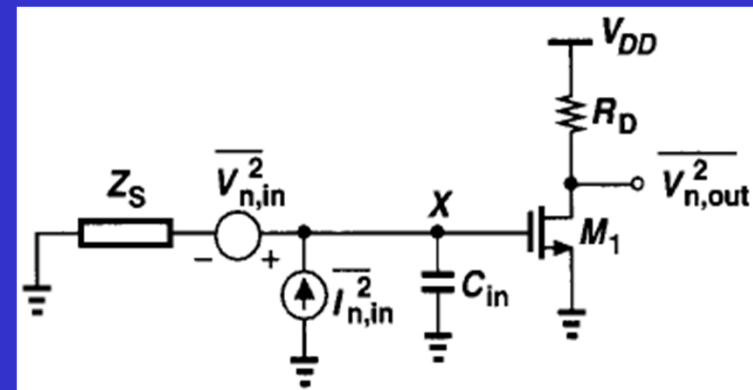
电路中噪声的表示

$$V_{n,X} = \frac{1}{Z_S C_{in} s + 1} \left[V_{n,M1} + \frac{1}{g_m R_D} V_{n,RD} + C_{in} s Z_S \left(V_{n,M1} + \frac{1}{g_m R_D} V_{n,RD} \right) \right]$$

$$= V_{n,M1} + \frac{1}{g_m R_D} V_{n,RD}.$$

$$\overline{V_{n,out}^2} = g_m^2 R_D^2 \overline{V_{n,X}^2}$$

$$= 4kT \left(\frac{2}{3} g_m + \frac{1}{R_D} \right) R_D^2,$$



结论：用串联电压源和并联电流源同时来表示输入参考噪声，没有把噪声计算两次，是必要的，完善的表示方法

本讲 噪声

□ 噪声的统计特性

- ❖ 噪声谱（频域）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 热噪声
- ❖ 闪烁噪声

□ 电路中噪声的表示

□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

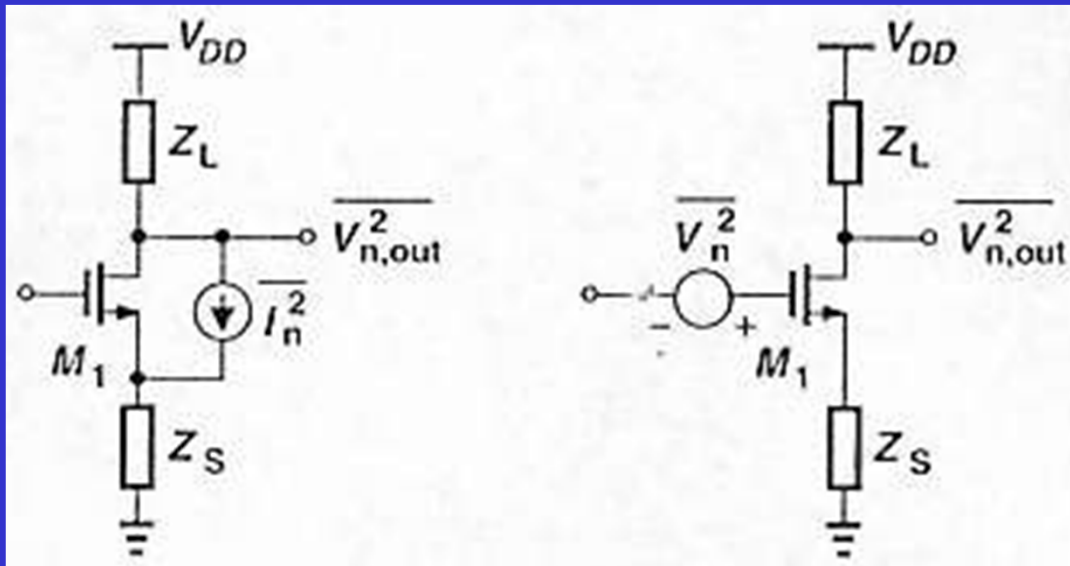
辅助定理

□ 用于简化噪声分析和计算

□ 定理内容

$$\overline{V_{n,gate}^2} = \overline{I_{n,DS}^2} / g_m^2$$

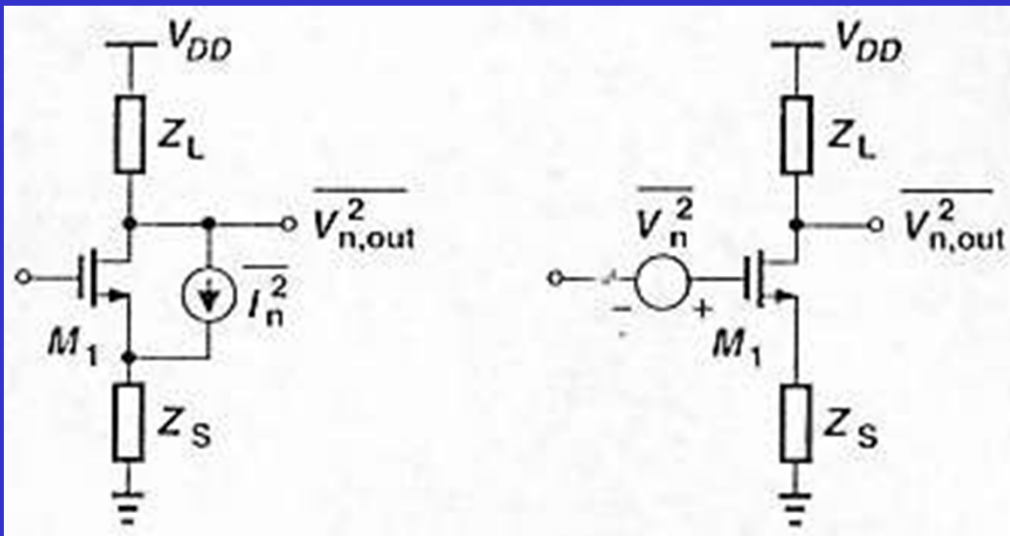
- ❖ 源漏之间的噪声电流源可以等效为与栅级串联的噪声电压源（对任意的 Z_S ），反之亦可
- ❖ 条件：均由有限阻抗驱动；低频时



若驱动阻抗无限大，则右图中 V_n^2 一端悬浮，无法起作用

高频时，栅电压到源漏电流的跨导会随频率改变

辅助定理的证明



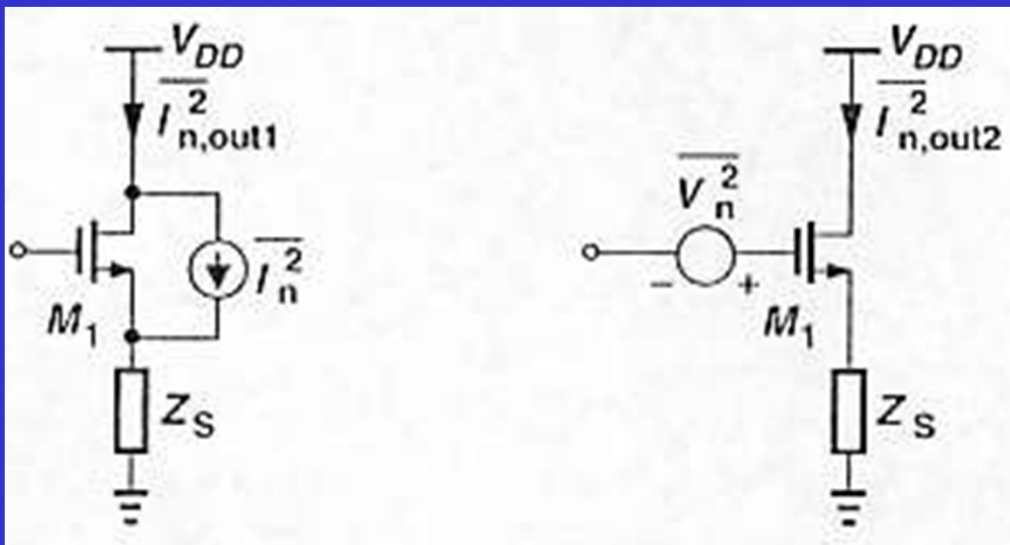
思路:

考察这两个电路在下列条件成立时是否真等效?

$$\overline{V_{n,gate}^2} = \overline{I_{n,DS}^2} / g_m^2$$

证明:

输出阻抗相同，只考察输出短路电流是否相等即可



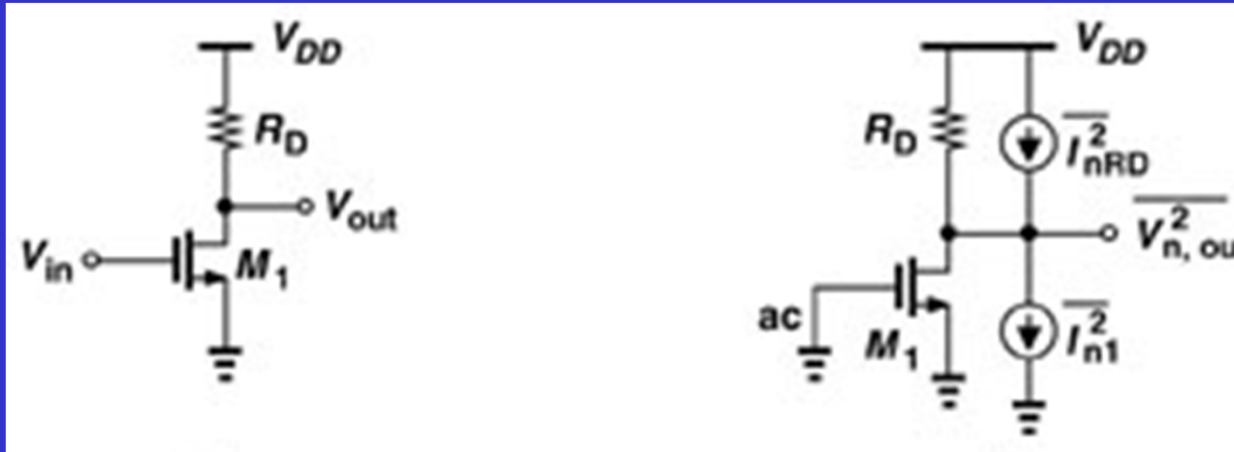
$$I_{n,out1} = \frac{I_n}{Z_S (g_m + 1/r_o) + 1}$$

$$I_{n,out2} = \frac{g_m V_n}{Z_S (g_m + 1/r_o) + 1}$$

噪声的通用分析步骤

- 在电路中标出各噪声源
- 计算每个不相关噪声源在输出端产生的输出噪声
- 用叠加定理把各噪声源在输出端产生的输出噪声叠加起来，得到总的输出噪声
- 在带宽内对总的输出噪声积分，得到带宽内的总输出噪声
- 用总输出噪声除以低频增益，得等效输入噪声

共源级

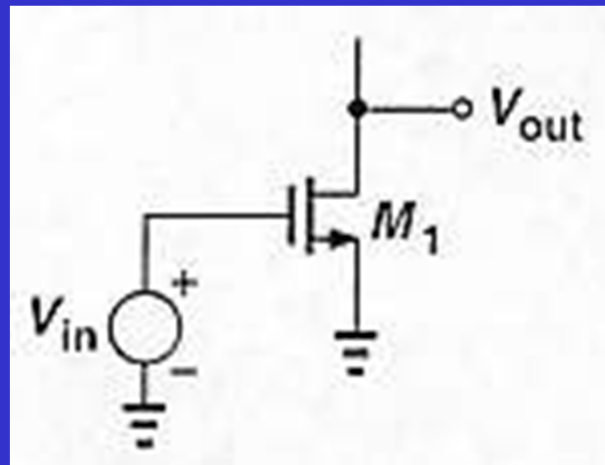
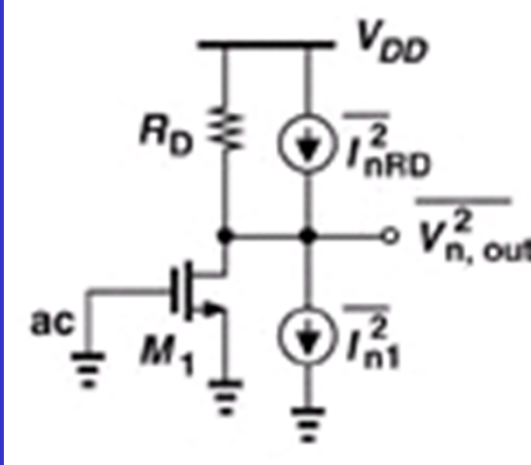


$$\overline{V_{n,out}^2} = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f} g_m^2 + \frac{4kT}{R_D} \right) R_D^2$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_{v0}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D} \right) + \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f}$$

$$\overline{I_{n,in}^2} = \frac{1}{Z_{in}^2} \left[4kT \left(\frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D} \right) + \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f} \right] \approx 0 \text{ (低频时)}$$

共源级

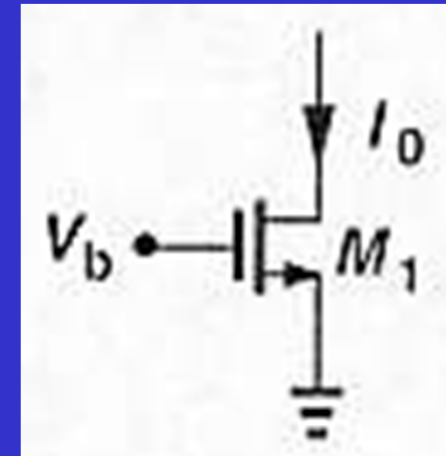


做放大器使用时，
增大 g_m 可LN

增大 R_D 可LN

$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_{v0}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D} \right) + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f}$$

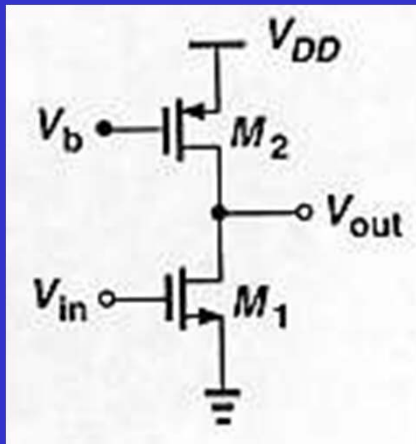
$$\overline{V_{n,out}^2} = \left(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f} g_m^2 + \frac{4kT}{R_D} \right) R_D^2$$



做电流源使用时减小 g_m 可LN

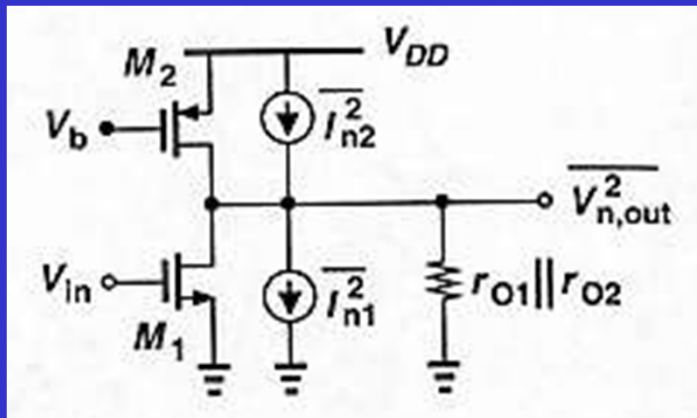
$$\overline{I_{n,out}^2} = 4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f} g_m^2$$

例题一共源级噪声分析



M1和M2均工作在饱和区。计算：

- 1、输入参考热噪声电压
- 2、若负载电容为 C_L ，求总输出热噪声
- 3、若输入是振幅为 V_m 的低频正弦信号，求输出信噪比



1、求输入参考热噪声电压

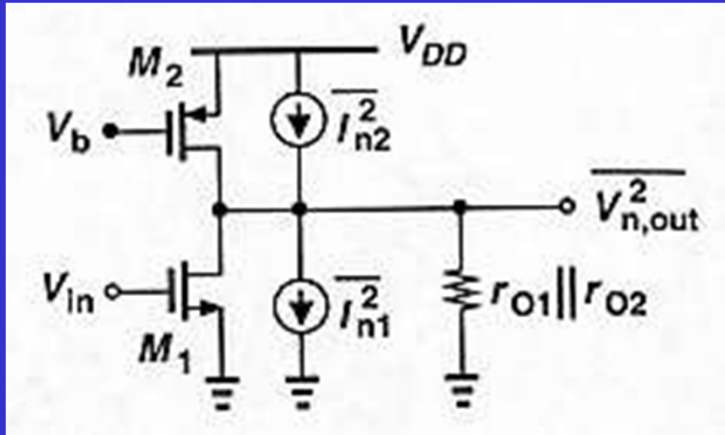
$$\overline{V_{n,out}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3} g_{m1} + \frac{2}{3} g_{m2} \right) (r_{O1} \parallel r_{O2})^2$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = \overline{V_{n,out}^2} / A_{v0} = 4kT \left(\frac{2}{3} g_{m1} + \frac{2}{3} g_{m2} \right) \frac{1}{g_{m1}^2}$$

$$= 4kT \left(\frac{2}{3g_{m1}} + \frac{2g_{m2}}{3g_{m1}^2} \right)$$

增大 g_{m1} 、减小 g_{m2} ，
可LN

例题一共源级噪声分析



1、求输入参考热噪声电压

若 $I_{D1}=0.5\text{mA}$, $(W/L)_{1-2}=50/0.5$

$$g_{m1} = \sqrt{2I_{D1}\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_1}$$

$$= \sqrt{2 \times 0.5 \times 0.13429 \times \frac{50}{0.5}} = 3.665\text{mA/V}$$

$$g_{m2} = \sqrt{2I_{D2}\mu_p C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_2}$$

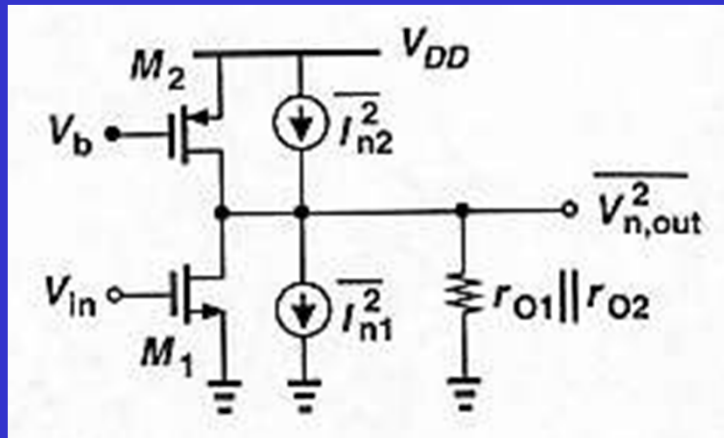
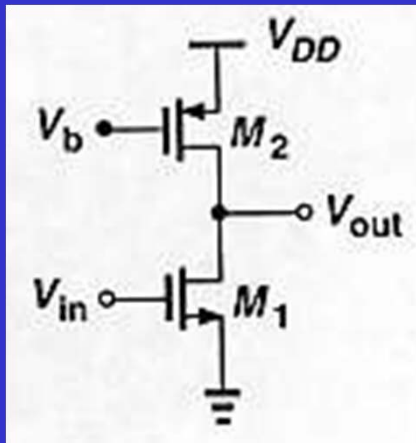
$$= \sqrt{2 \times 0.5 \times 0.03837 \times \frac{50}{0.5}} = 1.959\text{mA/V}$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = \overline{V_{n,out}^2} / A_{v0} = 4kT \left(\frac{2}{3} g_{m1} + \frac{2}{3} g_{m2} \right) \frac{1}{g_{m1}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3g_{m1}} + \frac{2g_{m2}}{3g_{m1}^2} \right)$$

$$= 4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \left(\frac{2}{3 \times 3.665 \times 10^{-3}} + \frac{2 \times 1.959 \times 10^{-3}}{3 \times 3.665^2 \times 10^{-6}} \right) = 4.62 \times 10^{-18} \text{V}^2 / \text{Hz}$$

$$\overline{V_{n,in}} = \sqrt{\overline{V_{n,in}^2}} = \sqrt{4.62 \times 10^{-18}} = 2.15\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}$$

例题一 共源级噪声分析



2、若负载电容为 C_L ，求总输出热噪声

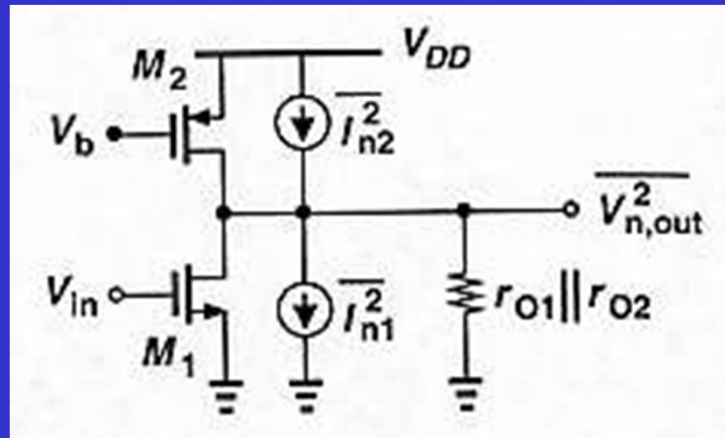
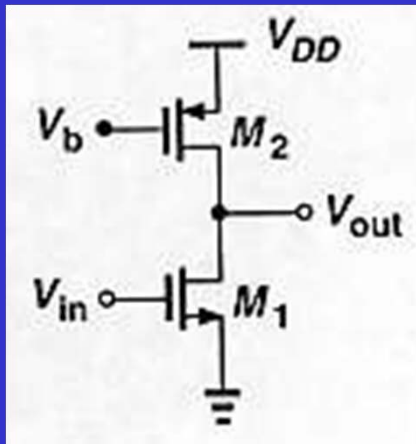
$$\overline{V_{n,out}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3} g_{m1} + \frac{2}{3} g_{m2} \right) (r_{O1} \parallel r_{O2})^2$$

频带内积分，得总输出热噪声

$$\begin{aligned} \overline{V_{n,out,tot}^2} &= \int_0^\infty [4kT \left(\frac{2}{3} g_{m1} + \frac{2}{3} g_{m2} \right) (r_{O1} \parallel r_{O2} \parallel \frac{1}{sC_L})^2] df \\ &= \frac{2}{3} (g_{m1} + g_{m2}) (r_{O1} \parallel r_{O2}) \frac{kT}{C_L} \end{aligned}$$

增大 C_L 可以 LN，但牺牲带宽；而带宽由输入信号带宽决定

例题一 共源级噪声分析



3、若输入是振幅为 V_m 的低频正弦信号，求输出信噪比

- 1、增大 C_L 可以提高SNR，但牺牲带宽；
- 2、增大 g_{m1} 、减小 g_{m2} 可以提高SNR
- 3、增大 A_{v0} 可以增大SNR

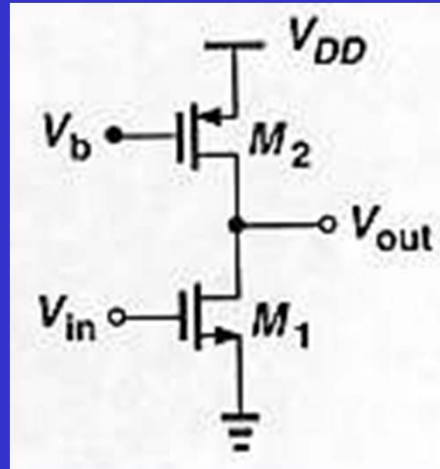
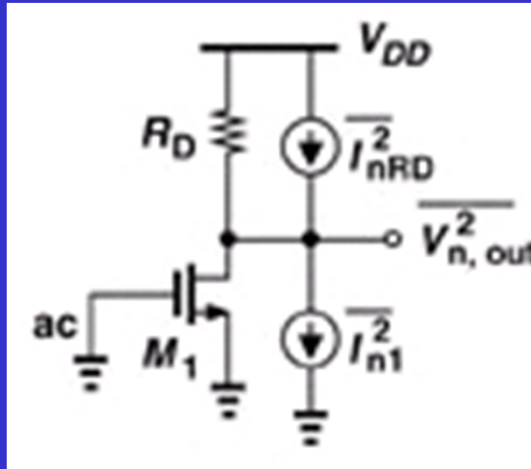
$$\overline{V_{n,out,tot}^2} = \frac{2}{3} (g_{m1} + g_{m2}) (r_{O1} \parallel r_{O2}) \frac{kT}{C_L}$$

输入信号在输出端产生的信号振幅为：
SNR为功率之比：

$$g_{m1} (r_{O1} \parallel r_{O2}) V_m$$

$$SNR_{out} = \frac{[g_{m1} (r_{O1} \parallel r_{O2}) V_m / \sqrt{2}]^2}{\frac{2}{3} (g_{m1} + g_{m2}) (r_{O1} \parallel r_{O2}) \frac{kT}{C_L}} = \frac{3C_L}{4kT} \frac{g_{m1}^2 (r_{O1} \parallel r_{O2})}{g_{m1} + g_{m2}} V_m^2$$

共源级的LN设计



减小热噪声:

增大 I_{DS} 使 g_{m1} 最大, 牺牲功耗和输出摆幅

增大 W 使 g_{m1} 最大, 会增大寄生电容

$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D}$$

减小1/f噪声:

增大 WL , 但增大寄生电容降低速度

$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_{v0}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D} \right) + \frac{K}{C_{ox} WL} \frac{1}{f}$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = 4kT \frac{2}{3} \left(\frac{1}{g_{m1}} + \frac{g_{m2}}{g_{m1}^2} \right) + \frac{1}{C_{OX}} \left[\frac{K_P g_{m2}^2}{(WL)_2 g_{m1}^2} + \frac{K_N}{(WL)_1} \right] \frac{1}{f}$$

本讲 噪声

□ 噪声的统计特性

- ❖ 噪声谱（频域）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 热噪声
- ❖ 闪烁噪声

□ 电路中噪声的表示

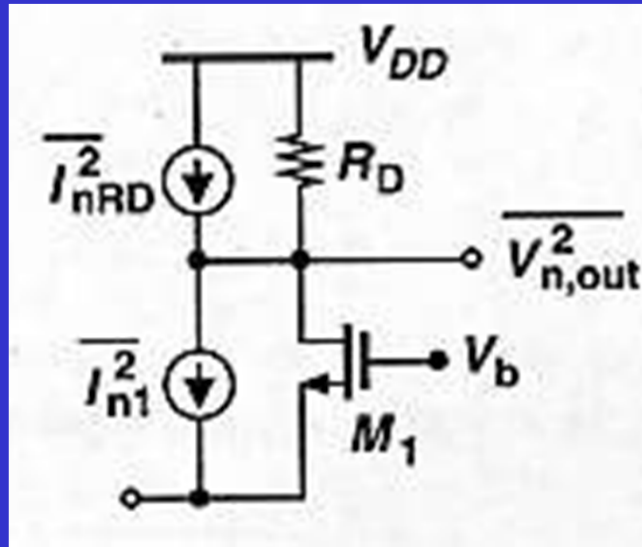
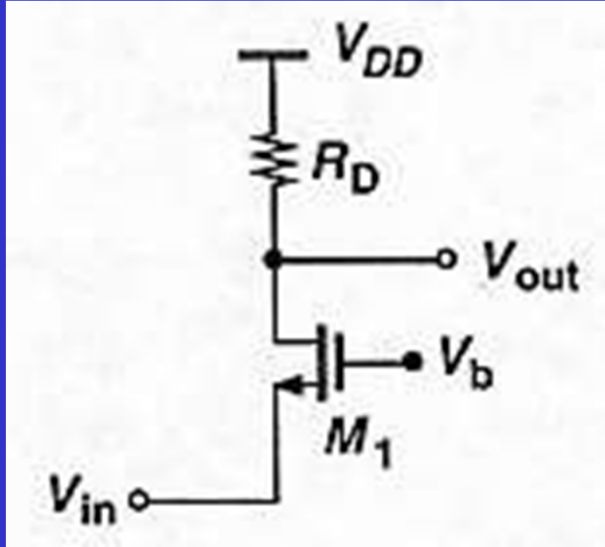
□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

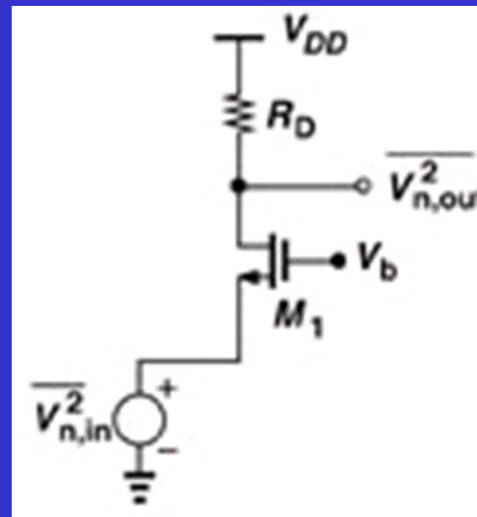
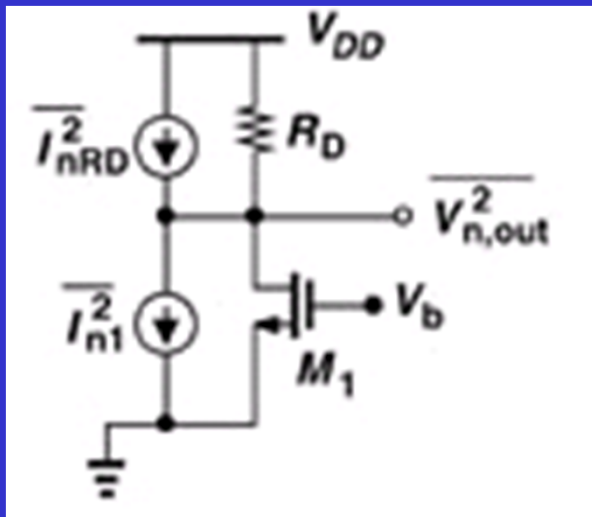
□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

共栅级



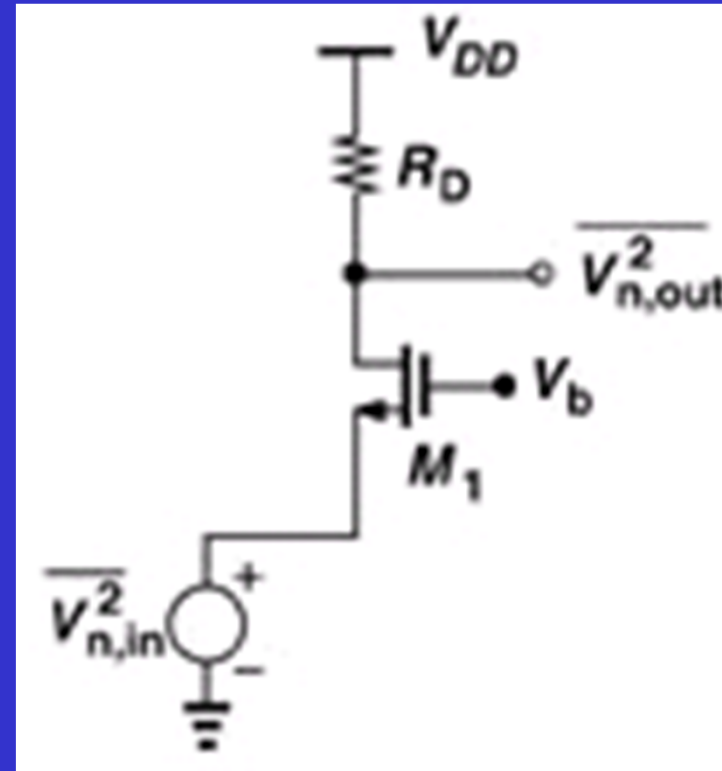
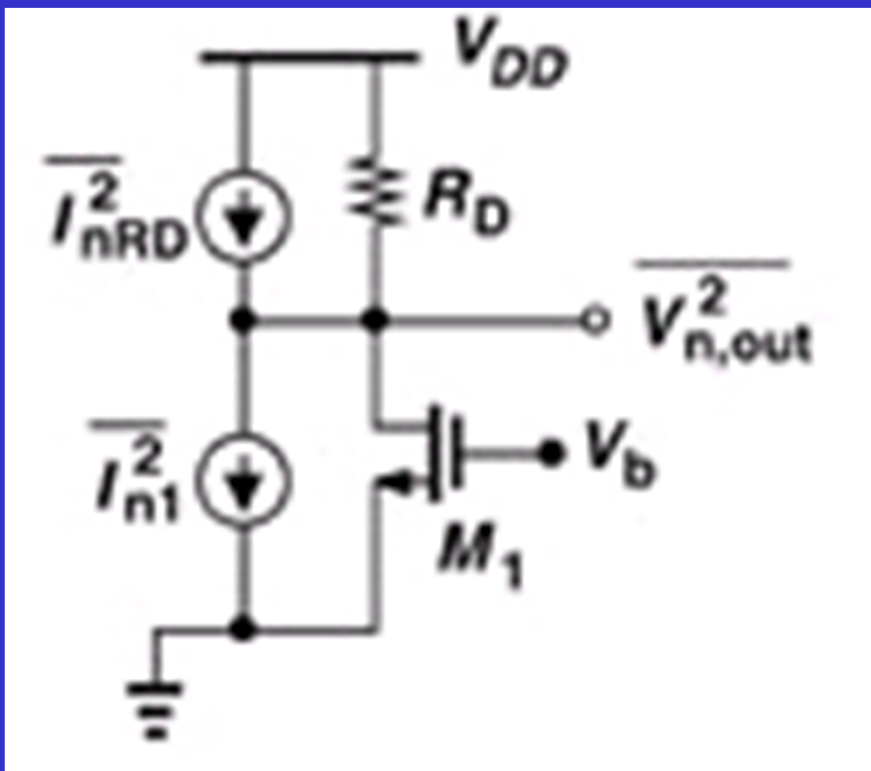
先只考虑热噪声
计算输入参考噪声电压



思路：
将输入短接到地（相当于驱动源内阻为零情形），计算输出端噪声电压；再除以低频增益 A_{v0}

输入参考热噪声电压

$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_{v0}^2} = \frac{(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{4kT}{R_D}) R_D^2}{(g_m + g_{mb})^2 R_D^2} = \frac{4kT (\frac{2}{3} g_m + \frac{1}{R_D})}{(g_m + g_{mb})^2}$$

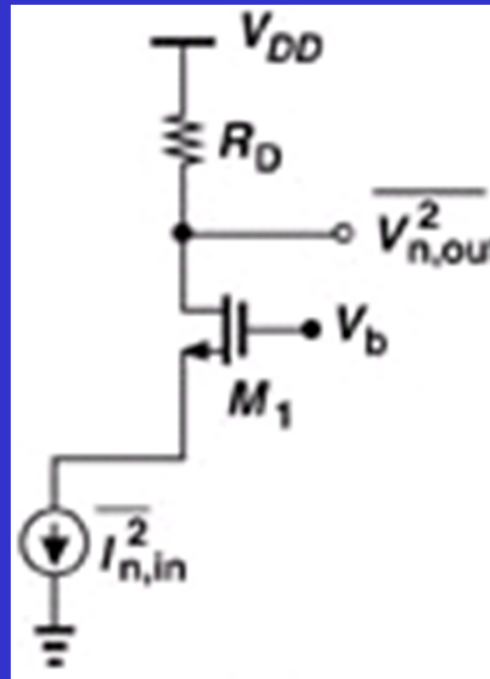
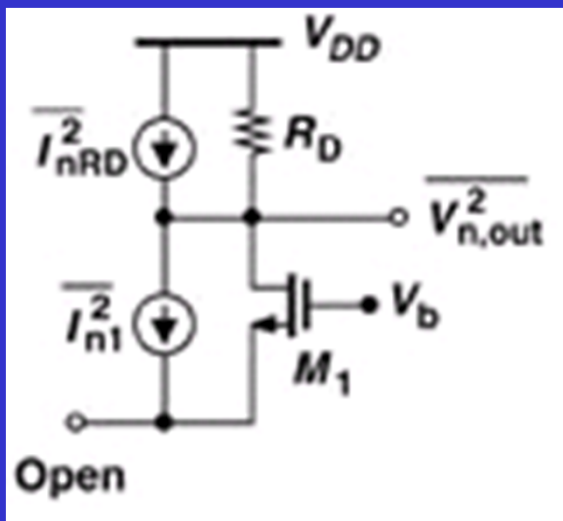


输入参考热噪声电流

思路:

将输入断路（相当于驱动源内阻为无穷大情形），计算输出端噪声电压；再计算输入增益

$$\overline{I_{n,in}^2} = \frac{4kTR_D}{R_D^2} = \frac{4kT}{R_D}$$



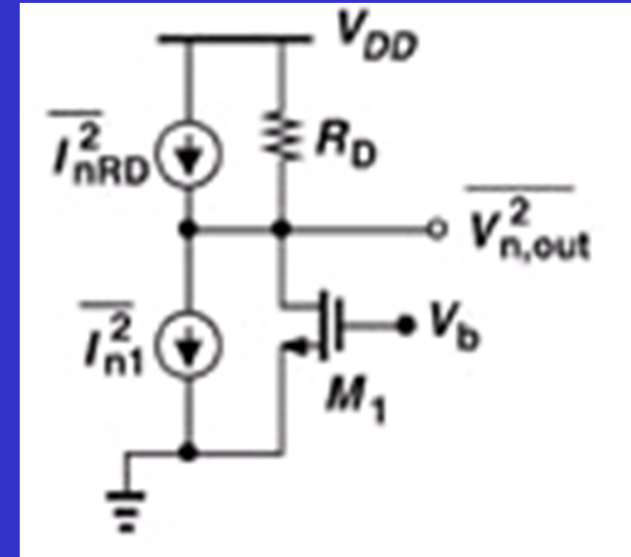
I_{n1}^2 对 $V_{n,out}^2$ 的计算无影响

共栅级的缺点:

由于从输入到输出的电流增益为1，因此，负载电阻的噪声电流将直接反映在输入端

例题

□ 对于图示电路， $W/L=50/0.5$ ，
 $I_D=1\text{mA}$ ， $R_D=1\text{K}\Omega$ ，求输入参考
 热噪声电压和电流？



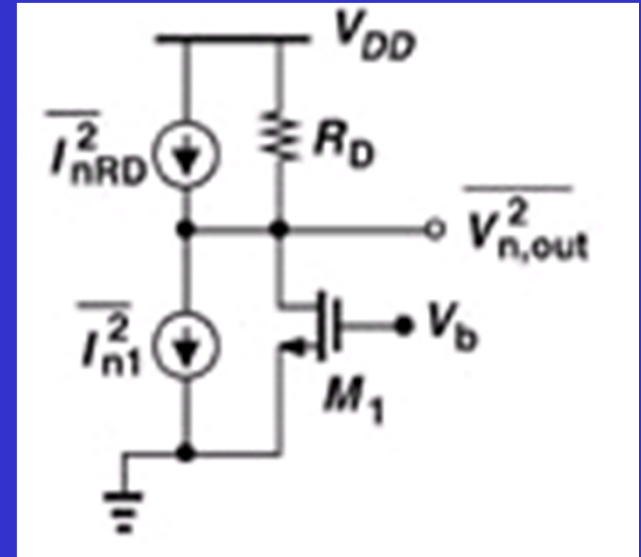
$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_{v0}^2} = \frac{(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{4kT}{R_D}) R_D^2}{(g_m + g_{mb})^2 R_D^2} = \frac{4kT (\frac{2}{3} g_m + \frac{1}{R_D})}{(g_m + g_{mb})^2}$$

$$g_m = \sqrt{2I_D \mu_n C_{OX} (\frac{W}{L})_1} = \sqrt{2 \times 0.5 \times 0.13429 \times \frac{50}{0.5}} = 3.665 \text{mA/V}$$

$$g_{mb} = \frac{\gamma}{2\sqrt{2\Phi_F + V_{SB}}} g_m = \frac{0.45}{2 \times \sqrt{0.9 + 0}} g_m = 0.869 \text{mA/V}$$

例题

□ 对于图示电路， $W/L=50/0.5$ ， $I_D=1\text{mA}$ ， $R_D=1\text{K}\Omega$ ，求输入参考热噪声电压和电流？



$$g_m = 3.665\text{mA/V}, \quad g_{mb} = 0.869\text{mA/V}$$

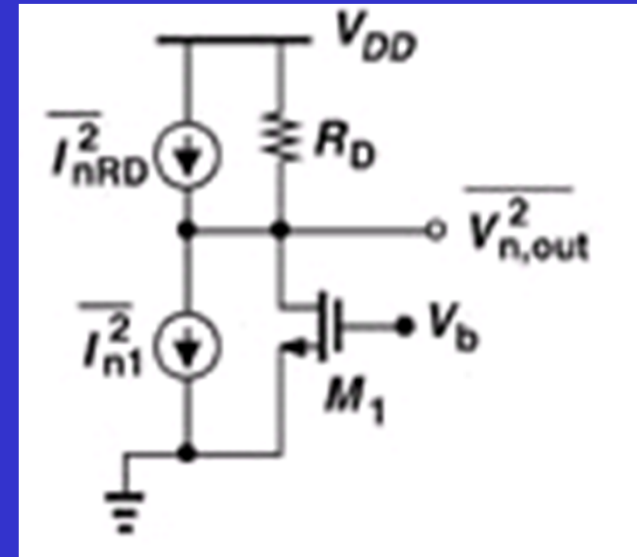
$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_{v0}^2} = \frac{(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{4kT}{R_D}) R_D^2}{(g_m + g_{mb})^2 R_D^2} = \frac{4kT (\frac{2}{3} g_m + \frac{1}{R_D})}{(g_m + g_{mb})^2}$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{1.656 \times 10^{-20} (\frac{2}{3} \times 3.665 \times 10^{-3} + \frac{1}{1000})}{(3.665 \times 10^{-3} + 0.869 \times 10^{-3})^2} = 2.774 \times 10^{-18} \text{V}^2 / \text{Hz}$$

$$\overline{V_{n,in}} = \sqrt{\overline{V_{n,in}^2}} = \sqrt{2.774 \times 10^{-18}} = 1.67 \text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}$$

例题

□ 对于图示电路， $W/L=50/0.5$ ，
 $I_D=1\text{mA}$ ， $R_D=1\text{K}\Omega$ ，求输入参考
热噪声电压和电流？



$$\overline{I_{n,in}^2} = \frac{4kTR_D}{R_D^2} = \frac{4kT}{R_D} = \frac{1.656 \times 10^{-20}}{1000} = 1.656 \times 10^{-23} \text{ A}^2 / \text{Hz}$$

$$\overline{I_{n,in}} = \sqrt{\overline{I_{n,in}^2}} = \sqrt{1.656 \times 10^{-23}} = 4.08 \text{ pA} / \sqrt{\text{Hz}}$$

输入参考1/f噪声电压和电流

计算输入参考1/f噪声电压和电流

输入短接地，计算输入参考1/f噪声电压

$$\overline{V_{n,out}^2} = \frac{1}{C_{OX} f} \left[\frac{g_{m1}^2 K_N}{(WL)_1} + \frac{g_{m3}^2 K_P}{(WL)_3} \right] (r_{O1} \parallel r_{O3})^2$$

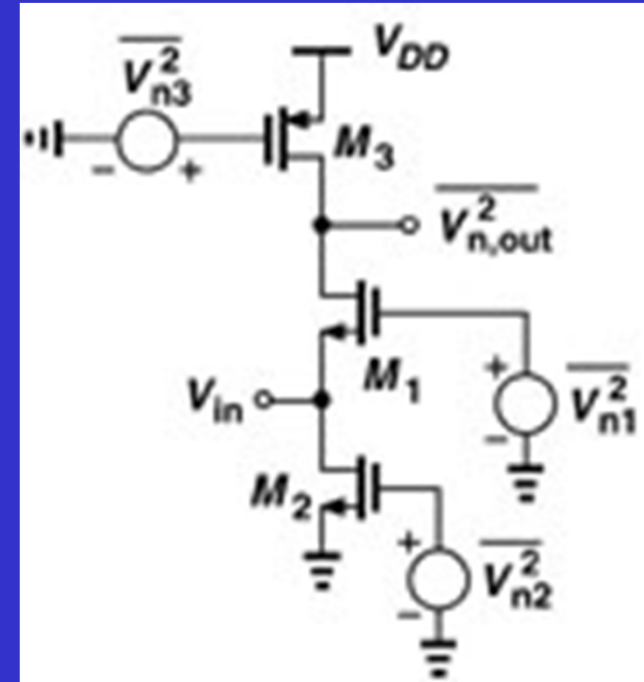
$$\overline{V_{n,in}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_{v0}^2}$$

$$= \frac{1}{C_{OX} f} \left[\frac{g_{m1}^2 K_N}{(WL)_1} + \frac{g_{m3}^2 K_P}{(WL)_3} \right] \frac{1}{(g_{m1} + g_{mb1})^2}$$

输入开路，计算输入参考1/f噪声电流

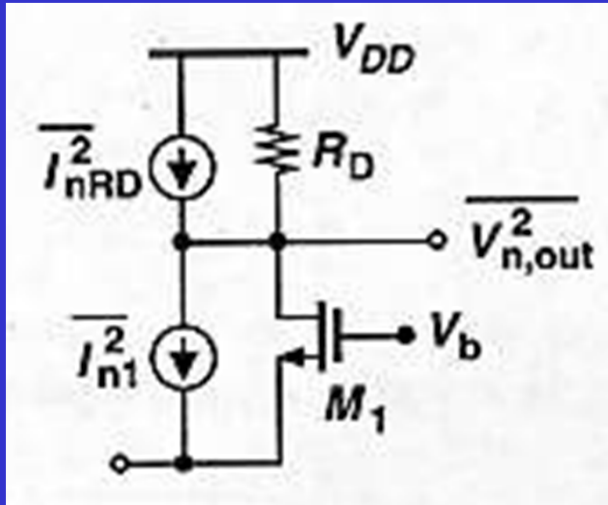
$$\overline{V_{n,out}^2} = \frac{1}{C_{OX} f} \left[\frac{g_{m2}^2 K_N}{(WL)_2} + \frac{g_{m3}^2 K_P}{(WL)_3} \right] R_{out}^2$$

$$\overline{I_{n,in}^2} = \frac{1}{C_{OX} f} \left[\frac{g_{m2}^2 K_N}{(WL)_2} + \frac{g_{m3}^2 K_P}{(WL)_3} \right]$$



把输入参考1/f噪声和输入参考热噪声相加，可得输入参考总噪声

偏置电路对噪声的影响

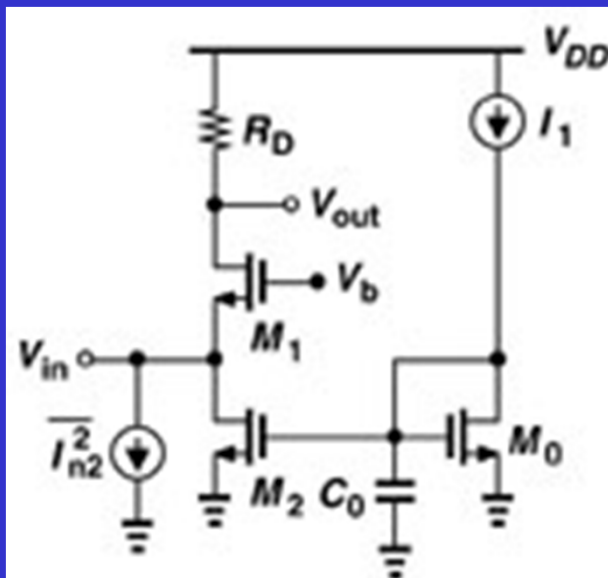


$$\overline{I_{n2}^2} \approx 4kT \frac{2}{3} g_{m2}$$

$$I_D = \frac{1}{2} g_m (V_{GS} - V_{TH})$$

忽略M₀的噪声的影响（电容C₀将该噪声旁路到地）

输入短接地，计算输入参考噪声电压：
M2的噪声对计算结果无影响



输入开路，计算输入参考噪声电流：
M2的噪声电流直接与前面计算的结果相加即可。减小g_{m2}可以减小M2贡献的输入参考噪声电流

对于给定偏置电流，减小g_{m2}需要增大过电压，导致输入摆幅减小

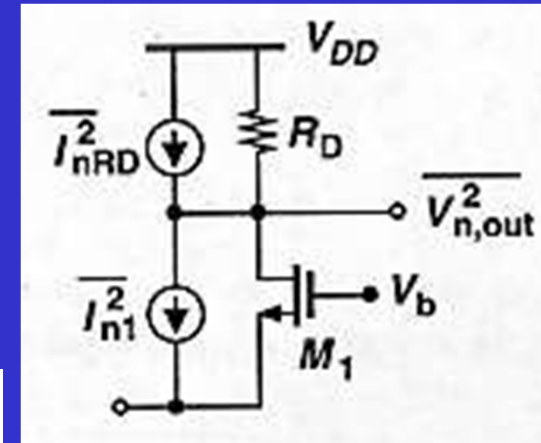
共栅级的噪声特点

□ 热噪声

❖ 从输入到输出的电流增益为1

□ 1/f噪声

❖ 增大WL



$$\overline{V_{n,in,1/f}^2} = \frac{1}{C_{OX} f} \left[\frac{g_{m1}^2 K_N}{(WL)_1} + \frac{g_{m3}^2 K_P}{(WL)_3} \right] \frac{1}{(g_{m1} + g_{mb1})^2}$$

$$\overline{I_{n,in,1/f}^2} = \frac{1}{C_{OX} f} \left[\frac{g_{m2}^2 K_N}{(WL)_2} + \frac{g_{m3}^2 K_P}{(WL)_3} \right]$$

$$\overline{I_{n,in,热噪声}^2} = \frac{4kTR_D}{R_D^2} = \frac{4kT}{R_D}$$

$$\overline{V_{n,in,热噪声}^2} = \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_{v0}^2} = \frac{(4kT \frac{2}{3} g_m + \frac{4kT}{R_D}) R_D^2}{(g_m + g_{mb})^2 R_D^2} = \frac{4kT (\frac{2}{3} g_m + \frac{1}{R_D})}{(g_m + g_{mb})^2}$$

本讲 噪声

□ 噪声的统计特性

- ❖ 噪声谱（频域）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 热噪声
- ❖ 闪烁噪声

□ 电路中噪声的表示

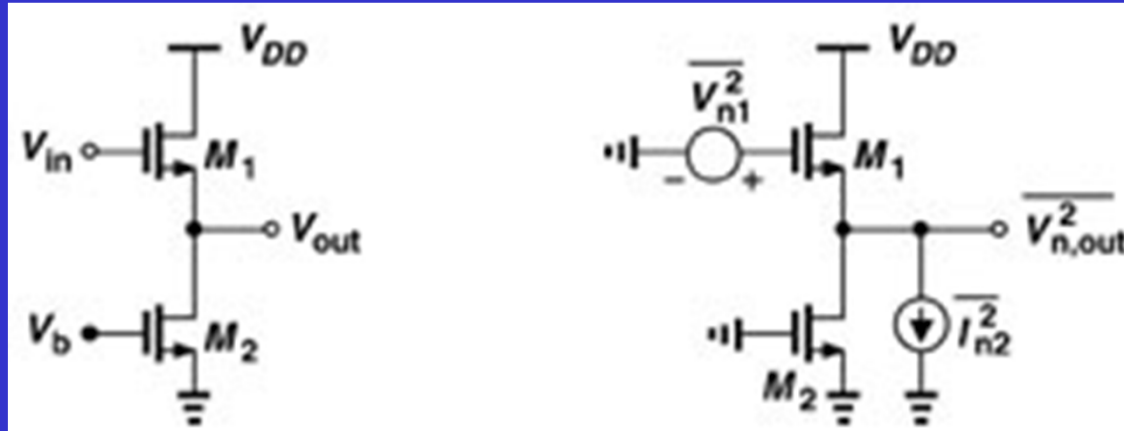
□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

源跟随器



用前面方法，计算输入参考1/f噪声电压

计算输入参考热噪声电压：输入短接地

$$\overline{I_{n2}^2} = 4kT \frac{2}{3} g_{m2}$$

$$\overline{V_{n,out}^2} \Big|_{M_2} = \overline{I_{n2}^2} \left(\frac{1}{g_{m1}} \parallel \frac{1}{g_{mb1}} \parallel r_{O1} \parallel r_{O2} \right)^2$$

$$A_v = \frac{g_{m1} \left(\frac{1}{g_{mb1}} \parallel r_{O1} \parallel r_{O2} \right)}{1 + g_{m1} \left(\frac{1}{g_{mb1}} \parallel r_{O1} \parallel r_{O2} \right)}$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = \overline{V_{n1}^2} + \frac{\overline{V_{n,out}^2} \Big|_{M_2}}{A_v^2} = 4kT \frac{2}{3} \left(\frac{1}{g_{m1}} + \frac{g_{m2}}{g_{m1}^2} \right)$$

增益小于1，因此输入参考噪声较大

本讲 噪声

□ 噪声的统计特性

- ❖ 噪声谱（频域）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 热噪声
- ❖ 闪烁噪声

□ 电路中噪声的表示

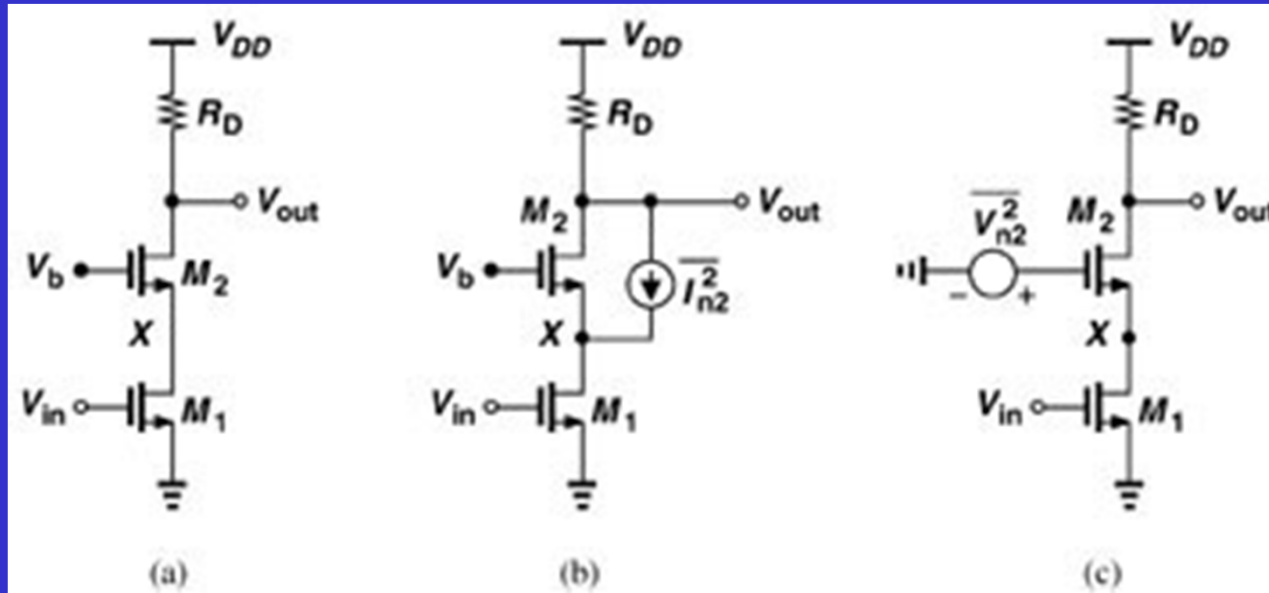
□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

共源共栅级



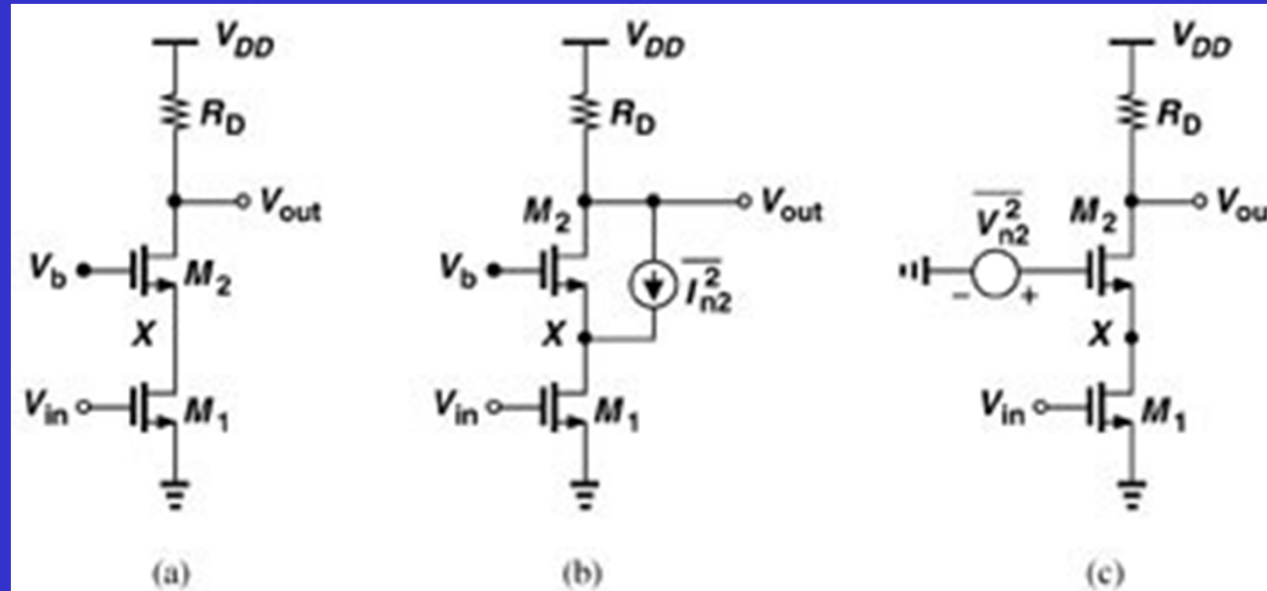
$$\overline{V_{n,in}^2} |_{M1, RD} = 4kT \left(\frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D} \right)$$

只考虑热噪声

M2的噪声对输出噪声的贡献很小，因为图(c)中从M2栅极到输出的增益很小（同带源极负反馈的放大器）

$$\frac{V_{n,out}}{V_{n2}} = - \frac{R_D}{r_{O1} + \frac{1}{g_{m2}}}$$

共源共栅级



在高频时X节点的电容会使得从M2栅极到输出的增益变大，增大输出噪声

$$\frac{V_{n,out}}{V_{n2}} = - \frac{R_D}{1/sC_x + \frac{1}{g_{m2}}}$$

高频时，X节点的电容还会旁路M1产生的信号电流，从而减小Vin到Vout的增益，导致输入参考噪声电压增大

本讲 噪声

□ 噪声的统计特性

- ❖ 噪声谱（频域）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 热噪声
- ❖ 闪烁噪声

□ 电路中噪声的表示

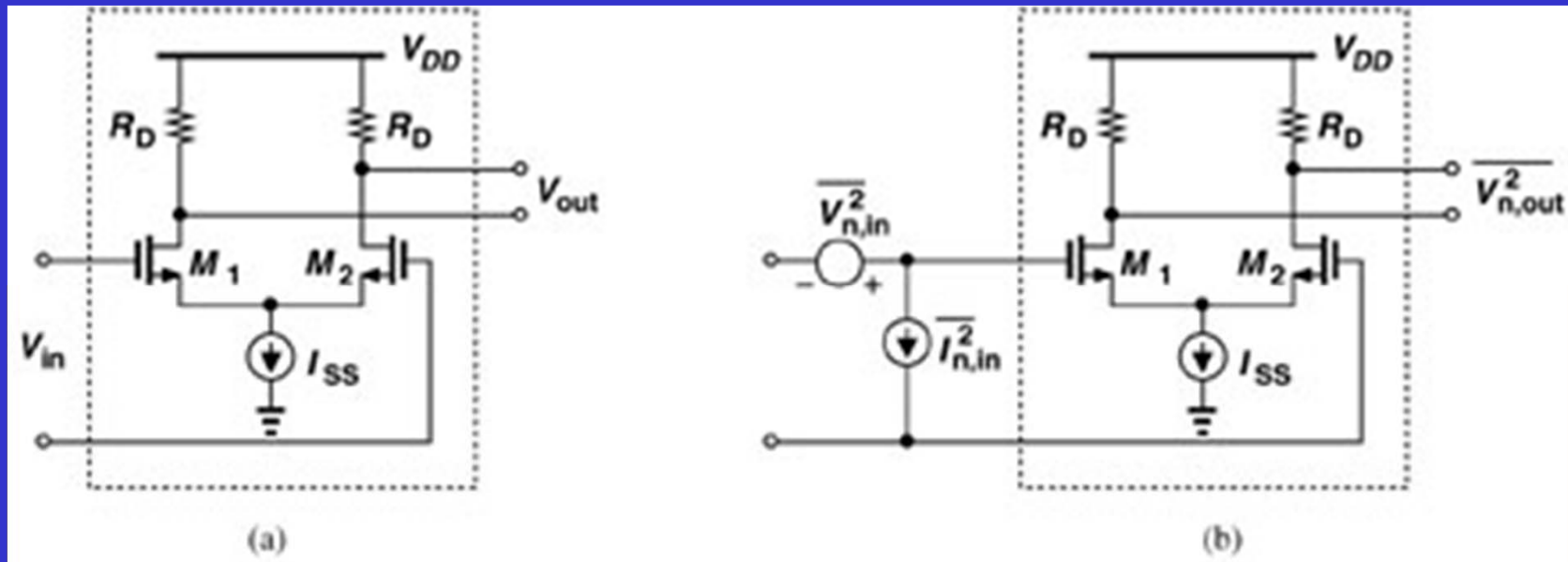
□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

差分对

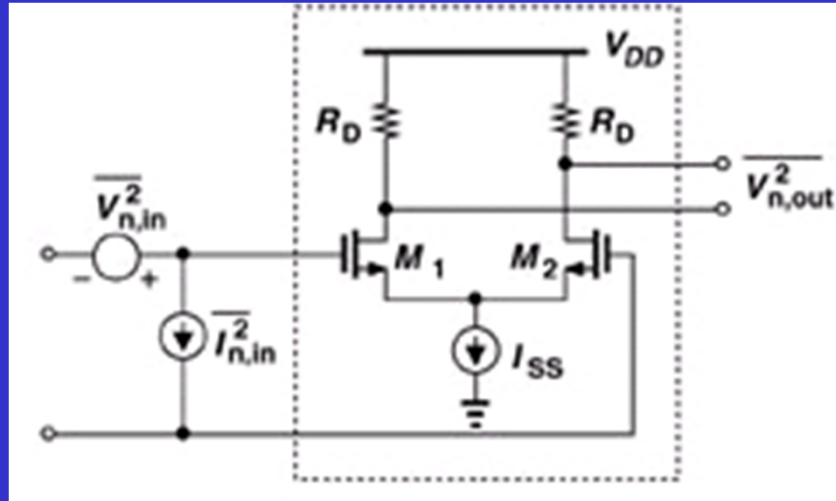


可以看作二端口电路

低频时输入端口看到的输入阻抗很大，使得输入参考噪声电流可忽略

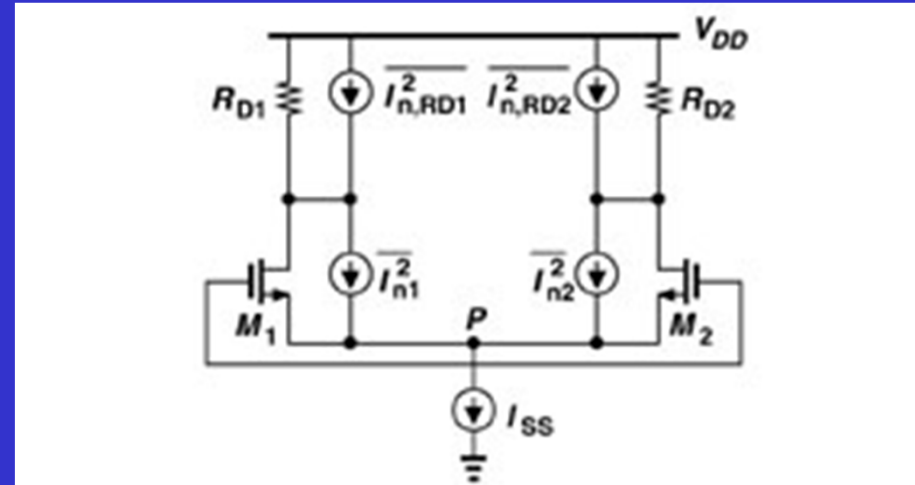
计算输入参考热噪声电压

计算输入参考热噪声电压

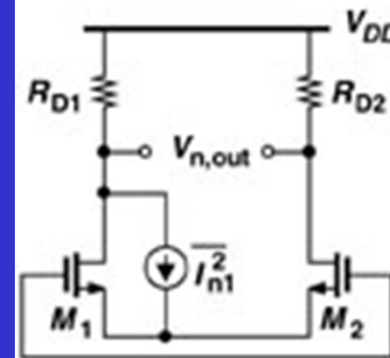


计算输入参考热噪声电压：
需要将输入短路且接交流地
(无差分输入)

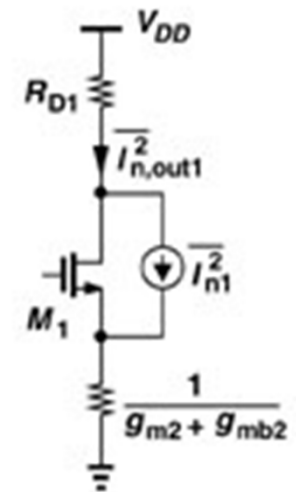
思路：
求出总输出参考热噪声电压，
除以差动增益的平方即可



(a)



(b)



(c)

计算输入参考热噪声电压

求出总输出参考热噪声电压

I_{n1} 和 I_{n2} 不相关，P点不能当作交流地，因此，无法用半电路法来简化计算

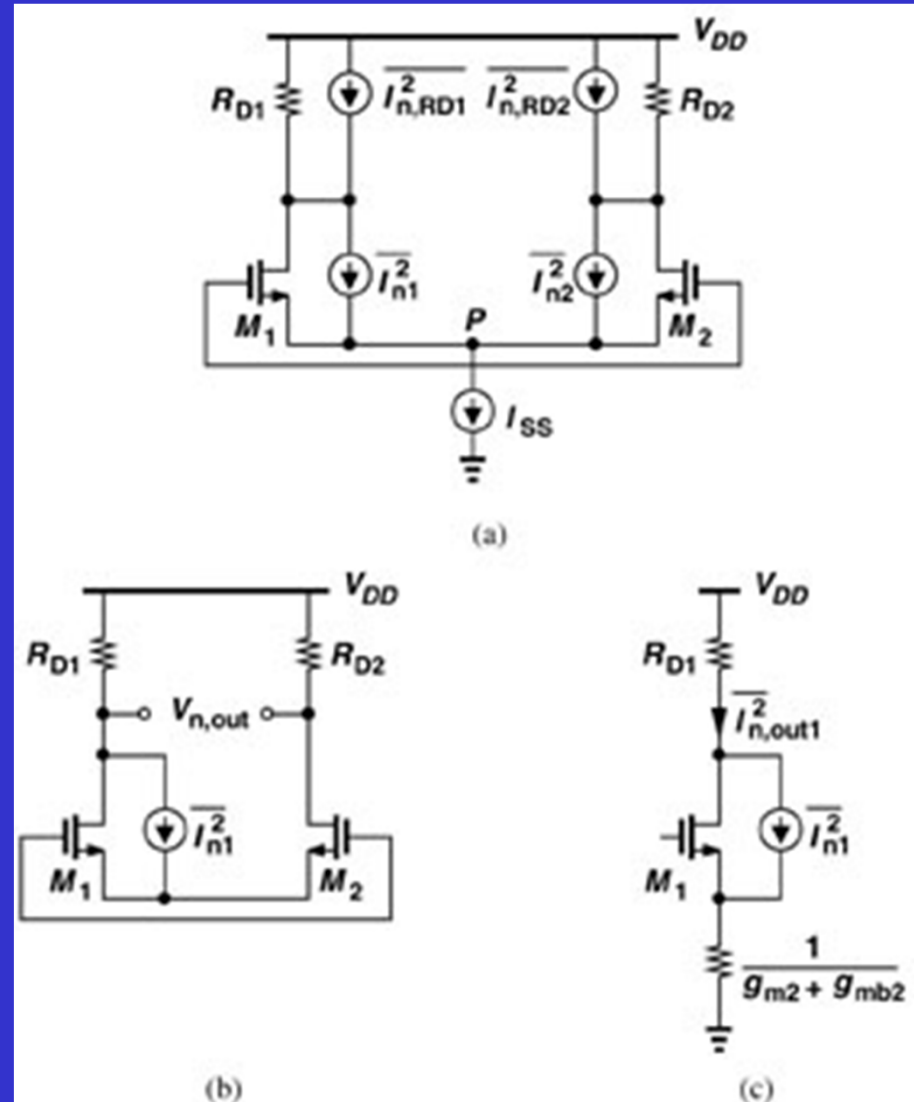
计算方法：

分别计算每个噪声源对输出的影响，然后总叠加

$$V_{n,out} \Big|_{M1} = \frac{I_{n1}}{2} R_{D1} + \frac{I_{n1}}{2} R_{D2}$$

(推导见教材)

若 $R_{D1}=R_{D2}$ ，则： $V_{n,out} \Big|_{M1} = I_{n1} R_D$



计算输入参考热噪声电压

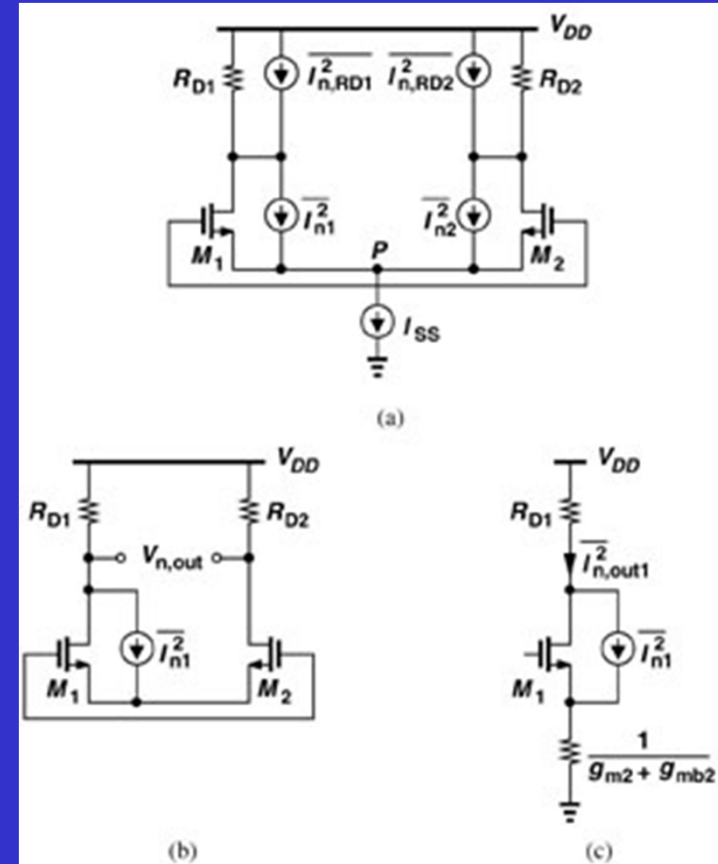
求出总输出参考热噪声电压

加上 R_D 的噪声，总输出噪声电压为：

$$\begin{aligned} \overline{V_{n,out}^2} &= (\overline{I_{n1}^2} + \overline{I_{n2}^2})R_D^2 + 2(4kTR_D) \\ &= 8kT \left(\frac{2}{3} g_m R_D^2 + R_D \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{V_{n,in}^2} &= \frac{\overline{V_{n,out}^2}}{A_{v0}^2} = \frac{8kT \left(\frac{2}{3} g_m R_D^2 + R_D \right)}{g_m^2 R_D^2} \\ &= 8kT \left(\frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D} \right) \end{aligned}$$

输入参考噪声电压是共源级的两倍



$$\overline{V_{n,in,CS}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D} \right)$$

输入参考热噪声电压的简化计算

如果把M1、M2、 R_D 的噪声用噪声电压源来表示，计算会很简单

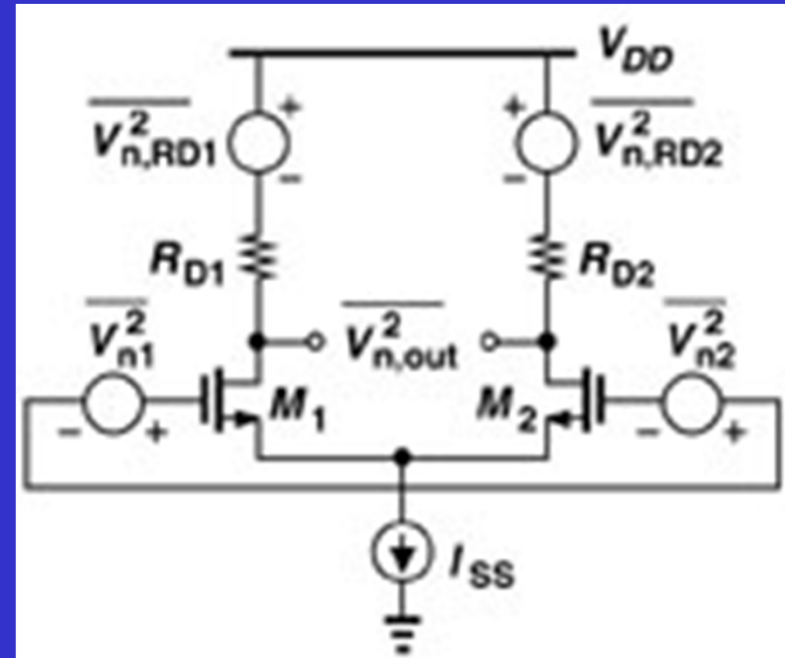
$$\overline{V_{n1}^2} = 4kT \frac{2}{3g_m} + \frac{K}{C_{ox}} \frac{1}{WL f}$$

$$\overline{V_{n,RD1}^2} = 4kTR_D$$

$$\overline{V_{n,in}^2} = 8kT \left(\frac{2}{3g_m} + \frac{1}{g_m^2 R_D} \right) + \frac{2K}{C_{ox}} \frac{1}{WL f}$$

$$\overline{I_{n,in}^2} \approx 0 \text{ (低频时)}$$

因为输入阻抗在低频时很大



尾电流源的噪声影响

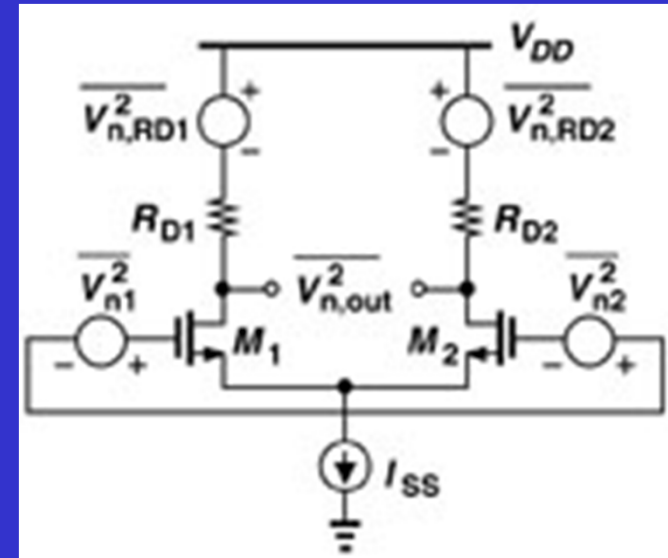
□ 若差分信号为零且电路对称

- ❖ I_{SS} 的噪声平均分配给 M_1 和 M_2 , 只在输出端产生一个共模噪声电压

□ 若差分信号不为零

- ❖ I_{SS} 上的噪声会调制 M_1 和 M_2 管的跨导, 产生差分输出噪声

□ 通常忽略



$$\begin{aligned} \Delta I_{D1} - \Delta I_{D2} &= g_m \Delta V_{in} \\ &= \sqrt{2 \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \left(\frac{I_{SS} + I_n}{2} \right)} \Delta V_{in} \\ &= \sqrt{2 \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \frac{I_{SS}}{2} \left(1 + \frac{I_n}{I_{SS}} \right)} \Delta V_{in} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{D1} - \Delta I_{D2} &\approx \sqrt{2 \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \frac{I_{SS}}{2} \left(1 + \frac{I_n}{2I_{SS}} \right)} \Delta V_{in} \\ &= g_{m0} \left(1 + \frac{I_n}{2I_{SS}} \right) \Delta V_{in} \end{aligned}$$

本讲 噪声

□ 噪声的统计特性

- ❖ 噪声谱（频域）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 热噪声
- ❖ 闪烁噪声

□ 电路中噪声的表示

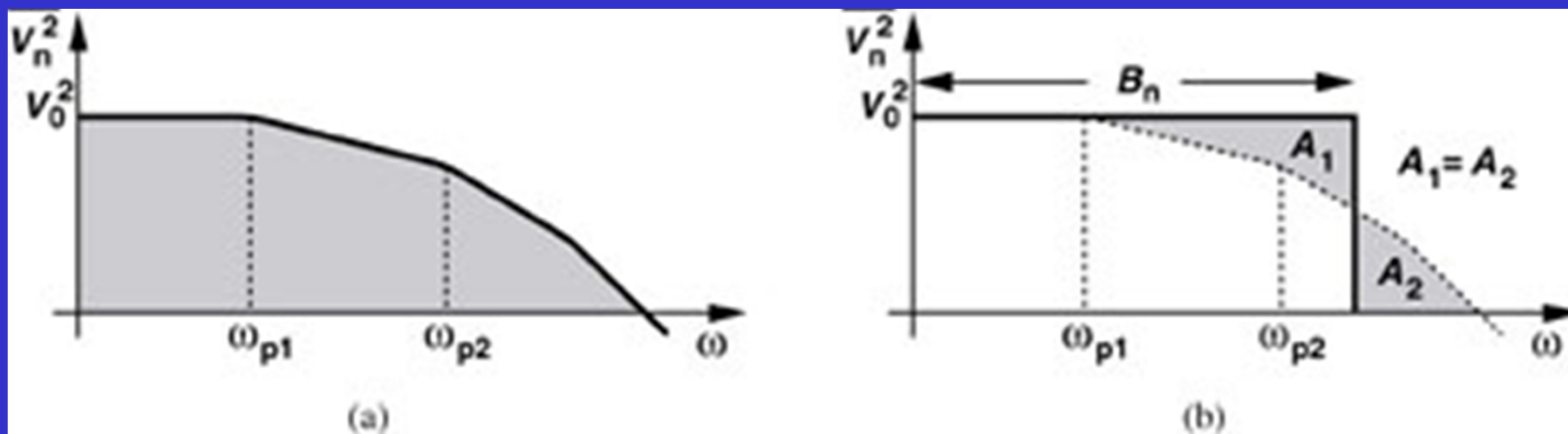
□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

噪声带宽



总噪声：
$$\overline{V_{n,out,tot}^2} = \int_0^{\infty} \overline{V_{n,out}^2} df$$

有时把总噪声简单地表示为： $\overline{V_0^2} \cdot B_n$ $\overline{V_0^2}$ 低频噪声功率谱密度

噪声带宽为：
$$\overline{V_0^2} \cdot B_n = \int_0^{\infty} \overline{V_{n,out}^2} df$$

多个电路具有相同低频噪声、但有不同高频传输函数时，用噪声带宽来比较它们的总噪声

总结

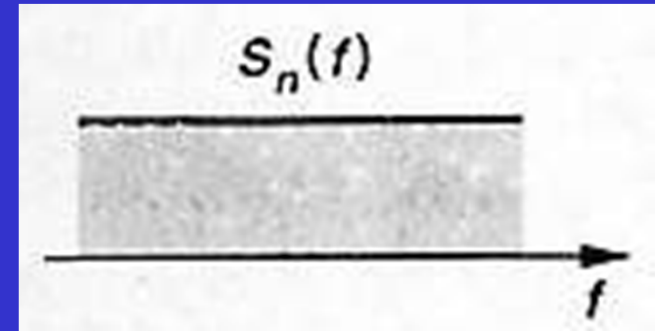
□ 噪声的统计特性

- ❖ 平均功率
- ❖ 噪声谱（功率谱密度PSD）
- ❖ 幅值分布（时域）
- ❖ 相关噪声源和非相关噪声源

□ 噪声的类型

- ❖ 环境噪声和器件噪声
- ❖ 热噪声和闪烁噪声

$$P_{av} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x^2(t) dt$$



$$\overline{V_n^2} = 4kTR(\Delta f)$$

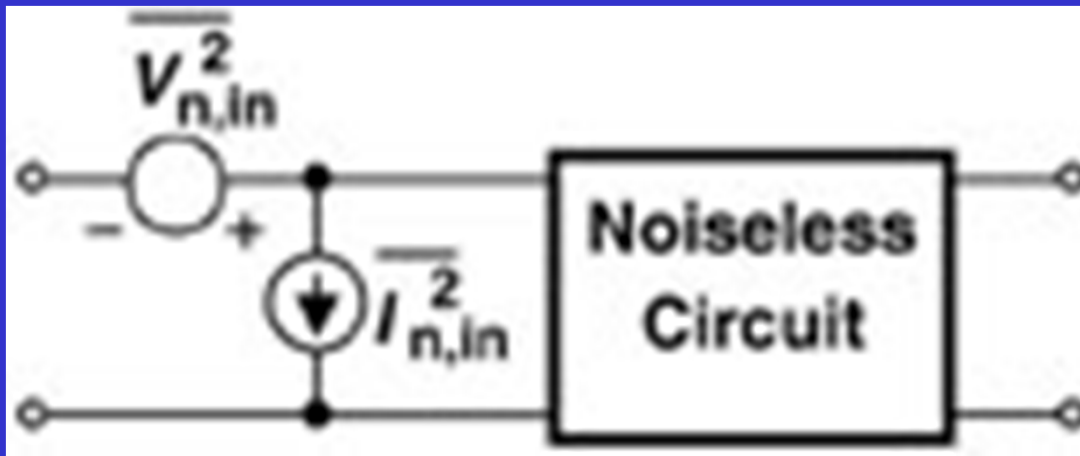
$$\overline{I_n^2} = \frac{4kT}{R}(\Delta f)$$

$$\overline{V_{n,MOS}^2} = \frac{K}{C_{ox}WL} \frac{1}{f}$$

$$\overline{I_{n,MOS}^2} = 4kT \left(\frac{2}{3} g_m \right)$$

总结

□ 电路中噪声的表示



□ 单级放大器中的噪声

❖ 共源、共栅、共漏、共源共栅

□ 差分对中的噪声

□ 噪声带宽

重点掌握

□ 噪声的统计特性

- ❖ 掌握平均功率和功率谱密度的含义

□ AIC中的主要噪声源

- ❖ 掌握电阻热噪声、MOS管沟道热噪声和 $1/f$ 噪声的表达式

□ 电路噪声的表示

- ❖ 掌握等效输入噪声电压和等效输入噪声电流的计算方法

□ 单级放大器中的噪声

- ❖ 掌握等效输入噪声电压和等效输入噪声电流的推导方法

作业

□7.23

❖ 低噪声CG级设计

❖ “ $(W/L)_{1\sim 3}$ ”改为“ $(W/L)_1$ ”。译错了，原书为“ $(W/L)_1=50/0.5$ ”

□7.12的图(b)

❖ 推导电流镜作负载的差分对的输入参考热噪声电压

□交作业时间

❖ 听助教通知

设计实习7

□ 针对设计实习3所设计的共源共栅放大级。仿真其输出噪声电压谱密度曲线，输入参考噪声电压谱密度曲线。

□ 实习目的

❖ 仿真常用单级放大器，掌握噪声特性的仿真、分析方法

□ 实习后，提交《设计实习7报告》到助教Email信箱

❖ 报告内容

▪ 实习目的、实习内容、实习结果及对结果的必要分析

❖ 电子版

❖ 文件命名规范：学号-姓名-设计实习7报告

□ 参考结果

❖ 1Hz频率处输出噪声电压谱密度为 $1.67\text{mV}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

❖ 1Hz频率处输入噪声电压谱密度为 $1.821\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

下一讲

绪论, 2学时	重要性、一般概念
器件物理基础, 2学时	MOSFET结构、IV特性、二级效应、器件模型
单级放大器, 5学时	共源、共漏、共栅、共源共栅
EDA系统使用常识 和设计实习实例演示, 2学时	做设计实习所需软硬件系统的使用
差动放大器, 3学时	定性分析、定量分析、共模响应、吉尔伯特单元
无源/有源电流镜, 2学时	基本/共源共栅/有源电流镜
放大器的频率特性, 4学时	米勒效应、极点与节点关系、单级放大器频率特性分析
噪声, 4学时	统计特性、类型、电路表示、单级放大器噪声分析、噪声带宽
期中考试 2学时, 评卷 1学时。习题课若干学时	
反馈, 6学时	特性、四种反馈结构、负载影响、对噪声的影响
运算放大器, 6学时	性能参数、一级运放、两级运放、各指标分析
稳定性和频率补偿, 6学时	多极点系统、相位裕度、频率补偿
版图, 3学时	叉指、对称、ESD等