

用于无线传感网络低功耗亚阈值 CMOS 低噪声放大器设计

孟凡振, 王锡良

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 设计一种工作在亚阈值区的低功耗 CMOS 低噪声放大器(LNA), 用于无线传感网络. 为了满足低功耗和高增益, 设计使用共源共栅(cascode)结构并利用 UMC 65nm 工艺库进行仿真分析. 仿真结果表明, 在 780MHz 中心频率下, 电路的增益大约 34 dB, 功耗仅为 55 μ W, 电源电压为 1.2V.

关键词: 无线传感网络; CMOS; 低噪声放大器; 亚阈值

中图分类号: TN433

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)05-0047-03

Design of a Low Power Sub-threshold CMOS Low Noise Amplifier for Wireless Sensor Network

MENG Fan-zhen, WANG Xi-liang

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Design of a low power CMOS low noise amplifier (LNA) in sub-threshold region is presented, which is applied for wireless sensor network. In order to meet the low power and high gain, cascode LNA should be adopted and simulated by the using the UMC 65nm CMOS process. The simulation results show that, the circuit operating at the 780MHz could achieve a 34dB gain and the power consumption is only 55 μ W for 1.2V DC voltage.

Key words: wireless sensor network; CMOS; low noise amplifier; sub-threshold

1 引言

目前, 无线传感网络成为新的信息技术革命之一. 它不但能够将物与物相连接, 而且更加方便地进行无线传输, 其中无线节点是最重要的部分. 这些节点应该能够保障工作 10 年, 就必须尽可能的降低功耗^[1]. 无线收发机是节点电路最主要的部分, 低噪声放大器(LNA)作为无线接收机的第一级, 低功耗则成为无线收发机首要的要求.

图 1(a)、(b)展示了前端放大器(FEA)和所占的功耗, 主要指低噪声放大器 LNA 所占的功耗^[2]. 当然, LNA 在设计时需噪声系数(NF)、功耗增益、线性度和阻抗匹配等几个指标间进行折中考虑.

2 理论分析

2.1 低噪声放大器结构

通常, 广泛应用的单级低噪声放大器有两种结

构: 共源结构和共栅结构. 共源结构主要应用于窄带放大器的情况, 这是由于共源放大器一般采用电感器源极负反馈的方式来实现功率和噪声的匹配, 输入匹配主要为单级谐振方式. 而共栅放大器结构由于输入端的阻抗实部为 MOSFET 的跨导倒数, 该值在较大的频带范围内可以提供稳定的输入阻抗实部. 结构对比如表 1.

表 1 共栅和共源结构对比

结构	阻抗匹配	噪声	增益	功耗
共栅	宽带	一般	差	一般
共源	窄带	好	好	好

从表中可以看出, 共源共栅结构的低噪声放大器有比较好的特点, 并且共源共栅结构(Cascode)的共栅级能够避免共源级米勒电容的影响, 从而使输入输出端得到良好的隔离, 保证系统的稳定. 共源共栅结构的 LNA 如图 2 所示.

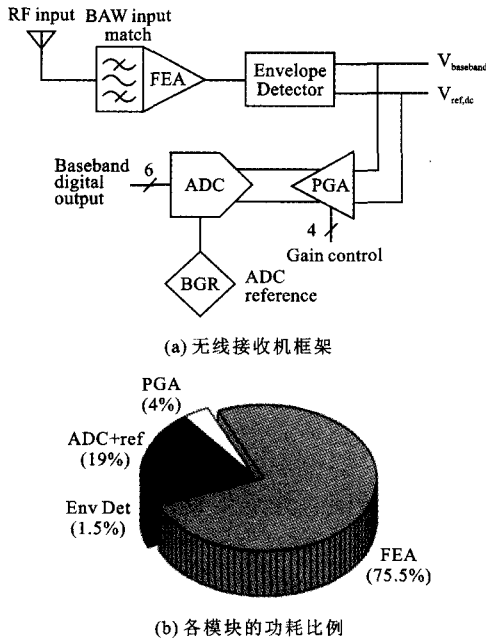


图1 LNA所占功耗比例

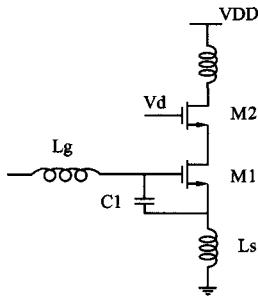


图2 共源共栅的 LNA

利用小信号等效电路,其等效输入电路如图3所示.由等效电路图可得,输入阻抗为:

$$Z_{in} = j\omega_0(L_s + L_g) + \frac{1}{j\omega_0(C_{gs} + C_1)} + \omega_T L_s \quad (1)$$

$$\text{其中, } \omega_T = \frac{g_{m1}}{C_{gs}} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(C_{gs} + C_1)(L_g + L_s)}},$$

g_{m1} 为 MOS 管 M1 的跨导, ω_T 为谐振频率.

当电路处于 LC 回路谐振,其输入阻抗:

$$Z_{in} = \text{Re}(Z_{in}) = \omega_T L_s \quad (2)$$

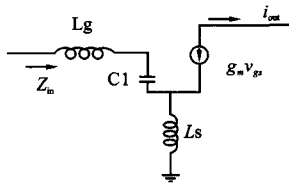


图3 小信号等效电路

由于输入阻抗要匹配到 50Ω , 因此可通过调节 L_s 值就能使输入阻抗匹配. 通过调节 C_1 、 L_g 和 L_s , 使其谐振到需要的频率. 该结构的电路不需要其他

的外接电阻, 就能达到比较好的匹配.

根据二端口噪声理论, 一个二端口网络能够实现噪声匹配, 可以得到最小的噪声系数 F_{min} . 在共源共栅结构中, M2 对噪声影响很小, 以近似得到二端口噪声模型, 最小噪声系数^[3]:

$$F_{min} \approx 1 + \frac{2\omega_0}{\sqrt{5}\omega_T} \sqrt{\delta\gamma(1-|c|^2)} \quad (3)$$

其中, c 为栅-漏极噪声的相关系数; δ 跟工艺相关的噪声参数, 且 $\delta = 2\gamma$. 通过增加 C_1 不但没有影响最小噪声 F_{min} 值, 而且可减少源极电感 L_s 值. 从而不仅可以减少芯片的面积, 并在一定程度上提高系统的增益^[4].

2.2 亚阈值区 MOS 管

传统上, CMOS 低噪声放大器 MOS 管工作在饱和区. 按照 MOS 管噪声模型, 预测在亚阈值区噪声随着漏极电流的减少而增大. 但是, 研究发现深亚微米 MOS 管最小噪声在亚阈值区为常数, 而且增大管子的栅宽能够大大地减少功耗^[5]. MOS 管运行在低的栅电压下工作, 导通电流 (I_D) 随着栅极电压几何指数变化如图4所示.

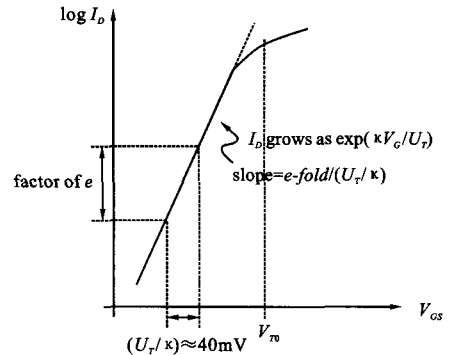


图4 漏极电流跟栅源电压的关系(亚阈值区)

根据 MOS 管的工作, 漏极电流跟栅源电压之间的关系:

$$I_D = I_0 \frac{W}{L} \exp\left(\frac{\kappa V_G - V_S}{U_T}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-V_{DS}}{U_T}\right)\right] \quad (4)$$

其中, $U_T = \frac{kT}{q} \cong 26\text{mV}$ 在室温下(当 $V_{DS} \geq U_T$, 工作在饱和区).

为了降低低噪声放大器的功耗和达到设计的要求, 共源共栅结构的 LNA 工作在亚阈值区.

3 电路设计

设计的 LNA 电路拓扑如图5所示, 其中电感 L_s 和 L_g 均采用片上螺旋电感, 和电容 $C1$ 实现输入

匹配;I_{DC}、M3 和 R2 组成共源共栅 LNA 的偏置电路,NMOS 晶体管 M1 与 M3 形成了电流镜;为了避免偏置电路对信号的影响,电阻 R2 一般选值足够大,大约为 4000~5000Ω;其 R1、L_d、C3、C4 组成输出端口匹配;C2 和 C3 用于隔离直流信号,以免对输入和输出信号产生影响. VDD 为直流电源,取值 1.2V. 为了便于调节和减少面积,采用片外匹配.

为了减少功耗,NMOS 晶体管(M1 和 M2)需要偏置于亚阈值区. 因此 I_{DC} 提供的偏置电流为 2μA,NMOS 管 M1 的 V_{TH} 阈值电压为 400mV,而其栅源电压为 350mV 工作在亚阈值区. 通过调节宽长比(W/L)而满足相应的增益和匹配要求.

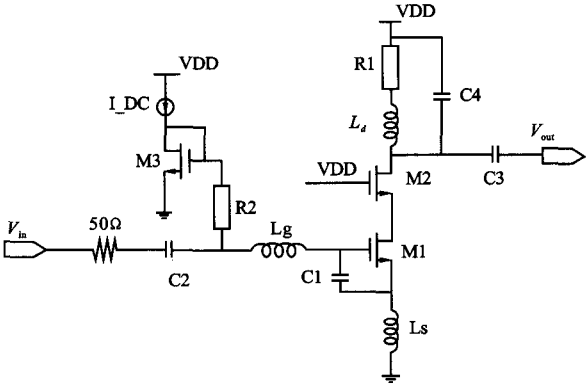


图 5 共源共栅 LNA 电路图

根据功耗约束情况,最优的栅宽公式^[3]:

$$W_{opt} = \frac{3}{2} \times \frac{1}{\omega_0 L_{eff} C_{ox} R_s Q_s} \tag{5}$$

其中,L_{eff}为有效栅长,C_{ox}为单位面积栅氧化层电容,C_{gs}为栅源电容(C_{gs}= $\frac{2}{3} \times \omega_{opt} L_{eff} C_{ox}$),Q_s是最佳的品质因数,通常取 4.5,这些可以根据工艺库,算出相应的栅宽.

4 仿真结果和讨论

根据上面的 LNA 结构,采用 UMC 65nm CMOS 工艺库,利用 Cadence 仿真软件进行仿真,电路版图(Layout)其仿真结果如下:

①功耗:电源电压 VDD=1.2V,总电流 I 为 46μA,则功耗 P 小于 55μW,满足小于 100μW 的要求;

②S11:在中心频率 780MHz 处,常温(27°C)大约为-17db,85°C 为-18db,-35°C 为-16db;均满足小于-15db 的要求,如图 6 所示;

③瞬态波形图和 AC 增益:频率 780MHz 瞬态波形图,AC 增益大约为 34.5db,如图 7 所示.

与其他 CMOS 低噪声放大器对比如表 2,通过

比较发现工作在亚阈值区低功耗 LNA 有比较好的性能,尤其功耗方面.

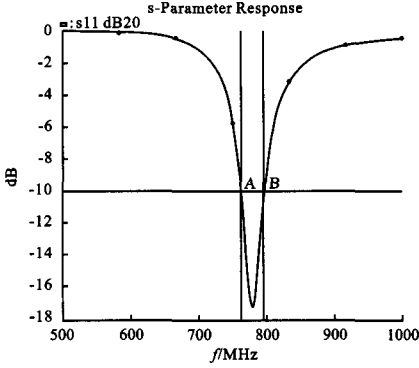


图 6 LNA 的 S11 仿真参数(27°C)

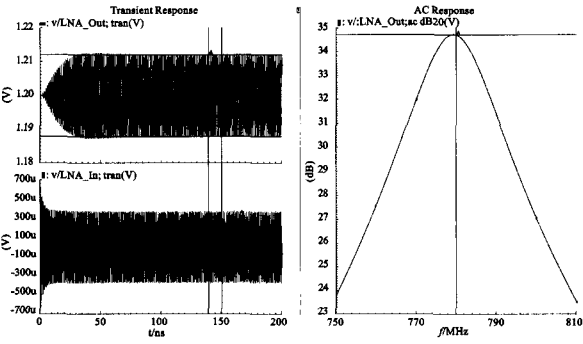


图 7 瞬态波形图和 AC 增益

表 2 与以前的工作对比

	F (GHz)	VDD (V)	P (mW)	S11 (dB)	Gain (dB)	Technology (nm)
文献[6]	0.96	1.2	0.72	-15	13	130
文献[7]	1.00	1.00	0.26	—	3.6	180
本文	0.78	1.2	0.055	-17	35	65

5 结束语

本文主要针对无线传感网络低功耗的要求,利用 MOS 管工作亚阈值区降低功耗的方法,设计了低噪声放大器. 利用 UMC 65nm CMOS 工艺库进行仿真,理论分析与仿真结果比较符合. 在栅漏之间并联一个电容 C1,既降低电感 Ls 的值,又容易进行匹配. 电源电压 1.2V,电流大约 46μA,功耗小于 100μW,还需要在增益和噪声之间折中.

参考文献:

[1] Rabaey J M., Ammer J, Karalar T, et al. PicoRadios for wireless sensor networks: The next challenge in ultra-low-power design[C]// IEEE ISSCC. San Francisco, CA, 2002: 200—201.

(下转第 54 页)

- cheating monitoring system of the electronic truck scale[C]// 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, China; Changsha, 2010: 722—725.
- [2] 孙志婷,刘婷婷,李顺云. 防作弊地磅称重系统的设计与实现[J]. 煤炭技术,2011,30(7):189—191.
- [3] 蔡连生. 红外线定位地磅计量管理系统的开发与应用煤矿机电[J]. 煤矿机电,2009(5):95.
- [4] 董立玮,赵 昀,赵治鹏. 水泥企业电子汽车衡防作弊系统解决方案[J]. 水泥,2011(11):52—54.
- [5] 申向春. 网络化运销系统自动称重防作弊关键技术研究[实现][D]. 辽宁:大连交通大学,2010:13—22.
- [6] 赵京东. 用两步 Hough 变换检测圆[J]. 计算机应用,2008,28(7):1761—1763.
- [7] 肖华勇. 实用数学建模与软件应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008: 39—40.
- [8] 张重德,张崇巍. 一种提高视频车速检测精度的方法[J]. 上海交通大学学报,2010,44 (10):1439—1443.

作者简介:



曾 飞 女,(1982—),博士研究生,讲师.研究方向为模式识别与智能控制技术.

(上接第 49 页)

- [2] Pletcher N M. Ultra—low power wake—up receivers for wireless sensor networks[D]. California: University of California, Berkeley, 2008.
- [3] Lee T H. The design of CMOS radio frequency integrated circuits[M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [4] 肖珺,李永明,王志华. 低功耗 CMOS 低噪声放大器的设计[J]. 微电子学报,2006, 36(5): 670—673.
- [5] Lee H, Mohammadi S. A 3GHz subthreshold CMOS low noise amplifier[C]// IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium. San Francisco, CA, 2006: 325 - 328.
- [6] Wang S B T, Niknejad A M, Brodersen R W. A Sub—mW 960MHz ultra—wideband CMOS LNA[C]// IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium. Southern California, CA, 2005: 35—38.
- [7] Perumana B G, Chakraborty S, ChangHo Lee. A fully monolithic 260uW, 1GHz subthreshold low noise amplifier[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(6): 428—430.

作者简介:

孟凡振 男,(1987—),硕士研究生.研究生方向低功耗射频集成电路设计.

王锡良 男,(1965—),副教授.研究方向为集成电路软件和硬件、无源器件建模和设计.