

应用于双频 GPS 接收机的 CMOS 低噪声放大器设计

黄 伟¹, 庄海孝¹, 马成炎^{1,2}, 叶甜春¹

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2 杭州中科微电子有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘 要: 结合双频 GPS 接收机的主要性能, 提出了第一级低噪声放大器实现方案和电路实现方式. 通过对影响单端 LNA 性能主要因素的分析, 在电路结构和封装打线方式上进行改进, 实现了低噪声系数高转换增益的单端 LNA, 从而提高了接收机灵敏度和噪声性能.

关键词: 双频接收机; 灵敏度; 单端 LNA; 噪声系数

中图分类号: TN722.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)12-0153-04

Design of CMOS LNA in Dual-Band GPS Receiver

HUANG Wei¹, ZHUANG Hai-xiao¹, MA Chen-yan^{1,2}, YE Tian-chun¹

(1 Institute of Microelectronics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;

2 Hangzhou Zhongke Microelectronics Co. Ltd., Hangzhou 310053, China)

Abstract: With consideration of the crucial performances of dual-band GPS receivers, both system-level scheme and circuit-level implementation of the first stage LNAs are proposed. Through analysis of parameters influencing parameters of single-ended LNA, improvements in packaging and topology are presented to achieve low noise figure and high conversion gain, therefore, sensitivity and noise performance of the receiver are improved.

Key words: dual-band receiver; sensitivity; single-ended LNA; noise figure

1 引言

在工业生产交通运输等各领域, 以 GPS 为代表的全球卫星导航系统得到广泛应用, 尤其是近年来在个人消费电子领域的快速发展, 使得低成本、低功耗、高集成度的 CMOS 接收机成为发展趋势. 目前使用最为广泛的导航信号是 GPS 系统 L1 频段 C/A 码, 由于其在恶劣环境下因多径干扰而灵敏度恶化明显, 因此跟踪性能更强的 L2 频段 C/S 码成为新的选择^[1], 如图 1 所示.

文中结合接收机噪声性能, 对低噪声放大器主要性能参数进行分析, 提出了应用于兼容 GPS L1/L2 双频段接收机射频前端的第一级, 具有高性能的 CMOS 低噪声放大器的解决方案和实现方式.

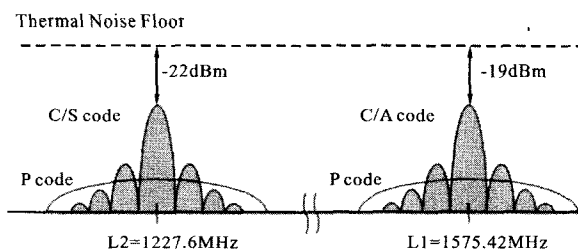


图 1 GPS L1/L2 频段频谱

2 双频 GPS 接收机中 LNA 设计

2.1 接收机中 LNA 主要性能指标

灵敏度是衡量接收机性能的关键指标之一, 与系统总噪声系数紧密相关, 通常用天线端可检测出的最小信号(MDS)表示, 定义为^[2]:

$$\text{MDS}[\text{dBm}] = N_0 \left[\frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right] + \text{NF}[\text{dB}] + \left(\frac{C}{N_0} \right)_{\min}$$

收稿日期: 2009-11-23; 修回日期: 2010-01-16

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2007AA12Z344)

$$[\text{dB-Hz}] = N_0 \left[\frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right] + \text{NF}[\text{dB}] + \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\min} [\text{dB}] + 10 \log R_b [\text{dB-Hz}]$$

其中, NF 为接收机系统噪声系数, R_b 为导航信号原始码率, N_0 为天线端热噪声功率密度, 室温下约为 -174 dBm/Hz , $(C/N_0)_{\min}$ 为数字基带相关器解调出卫星导航信号所需 A/D 输出信号最小载噪比. 接收机噪声系数越小, 灵敏度越高, 所以在卫星导航接收机设计中, 噪声系数是关键设计指标.

系统级联噪声系数计算公式为:

$$F_{\text{total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{n-1}}$$

其中, F_n 为第 n 级系统的噪声因子, G_n 为第 n 级系统的功率增益^[2]. 可以看出, 总噪声系数主要由前级系统的噪声性能和功率增益决定. 在 GPS 射频接收机系统中, 总的噪声系数取决于第一级 LNA 的性能, 因此, 第一级 LNA 需要较小的噪声系数和较大的功率增益.

在 GPS 接收机中, 由于接收信号为单通道弱信号 ($< -110 \text{ dBm}$), 故对系统线性度要求并不苛刻. 在考虑带外干扰的情况下, 系统线性度由后级电路决定, 如一次变频后 Gm-C 滤波器或双变频时第二级混频器. 因此, 在设计中第一级 LNA 线性度要求较为宽松.

2.2 双频接收机 LNA 方案选择

对双频带接收机, 第一级 LNA 可以采用单个宽带 LNA 和两个窄带 LNA 的方案. 宽带 LNA 同时覆盖 L1 和 L2 频段, 在一定功耗限制和较低噪声系数限制条件下, 在实现上并不可行^[3]. 对于通过控制开关选择谐振网络结构的窄带 LNA 的结构^[4], 由于控制开关引入的寄生效应会恶化负载谐振网络性能, 控制字引入的数字噪声也会形成较大干扰, 因此, 采用分别覆盖 L1 和 L2 频段的两个窄带 LNA 的方案, 经过 SAW 滤波器后由开关进行切换控制, 系统框图如图 2 所示.

3 单端 LNA 分析与实现

3.1 噪声分析

LNA 负载为 LC 谐振网络, 因此理论上不产生噪声, 由于片上 L、C 无源器件低 Q 值, 会有寄生电阻, 但折合到输入端对 LNA 噪声系数影响较小, 因此, LNA 的噪声系数主要由射频 MOS 管噪声特性

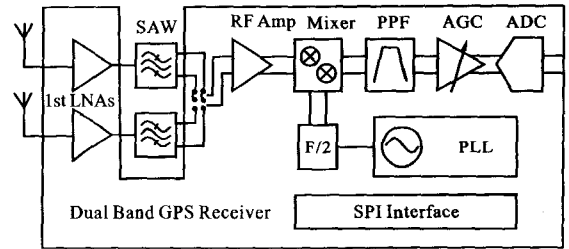


图 2 双频段 GPS 接收机系统框图

决定.

射频 MOS 电路主要噪声来源于沟道热噪声和因晶体管非准静态效应引入的栅噪声, 分别为

$$\overline{i_{nd}^2} = 4kT\gamma g_{d0}\Delta f, \quad \overline{i_{ng}^2} = 4kT\delta g_g\Delta f$$

其中 g_{d0} 为源漏电压相等时 MOS 管电导, $g_g = \frac{\omega^2 C_{gs}^2}{5g_{d0}}$. 沟道电荷热激励引起沟道电势波动, 从而产生栅噪声, 因此, 两种噪声源存在相关性, 相关系数

一般定义为 $c = \frac{\overline{i_{ng} \cdot i_{nd}^*}}{\sqrt{\overline{i_{ng}^2} \cdot \overline{i_{nd}^2}}}$. 其他非主要噪声源还包括

栅极电阻热噪声、栅极匹配电容寄生电阻的热噪声等. 前者可以通过增加输入射频管叉指数减小, 因通常采用高 Q 值片外电感, 后者可以忽略. 短沟道 MOS 噪声模型如图 3 所示.

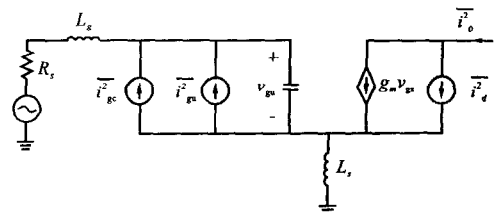


图 3 短沟道 MOS 管噪声模型

根据经典二端口网络噪声理论分析, $F = 1 + \frac{\gamma}{\alpha}$

$\cdot \frac{\chi}{Q_s} \frac{\omega_0}{\omega_T}$, 其中, $\alpha = \frac{g_m}{g_{d0}}$, ω_0 为谐振频率, ω_T 为射频管

特征频率, $Q_s = \frac{\omega_0(L_g + L_s)}{R_s} = \frac{1}{\omega_0 C_{gs} R_s}$, $\chi = 1 + 2$

$|c| Q_s \sqrt{\frac{\delta \alpha^2}{5\gamma} + \frac{\delta \alpha^2}{5\gamma} (1 + Q_s^2)}$. 在满足功率约束的条件下, 可以得到最优 Q_s 值为 $Q_{sp} = |c|$

$\sqrt{\frac{5\gamma}{\delta} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{3}{|c|^2} \left(1 + \frac{\delta}{5\gamma} \right)} \right]}$, 若 Q_{sp} 取 4.5, 此时晶体管有源区宽度为 $W_{opt} = \frac{3}{2} \frac{1}{2\omega_0 L C_{gs} Q_{sp}}$, 噪

声系数为 $F = 1 + 2.4 \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{\omega}{\omega_T} \right)$. 由于噪声系数对 Q_{sp}

值的变化不敏感^[5], 因此为了减小晶体管面积, 设计

中通常取略高的 Q_s 值。

3.2 结构分析

LNA 多种结构中,为实现低噪声系数要求,采用源极电感负反馈结构,如图 4(a)所示, C_p 为 PAD 寄生电容。Cascode 管 M_c 减小输入管寄生电容的 Miller 效应,增加反向隔离,减小输出匹配网络与输入端相互影响,改善稳定性。 C_1 增加了输入管自由度,使得能够在功率匹配和噪声匹配之间取得较好的结合,并可增加 LNA 线性度,但同时会减小转换增益; C_c 作为前馈电路用于增加增益,但会削弱反向隔离,影响稳定性。因此 C_1 、 C_c 需要在线性度、匹配、转换增益、稳定性之间做出折中,确定合理的取值。射频电源、地之间的大电容 C_{cp} 用作退耦电容,减小射频电源对电路性能的影响,减弱电路对封装的敏感度。

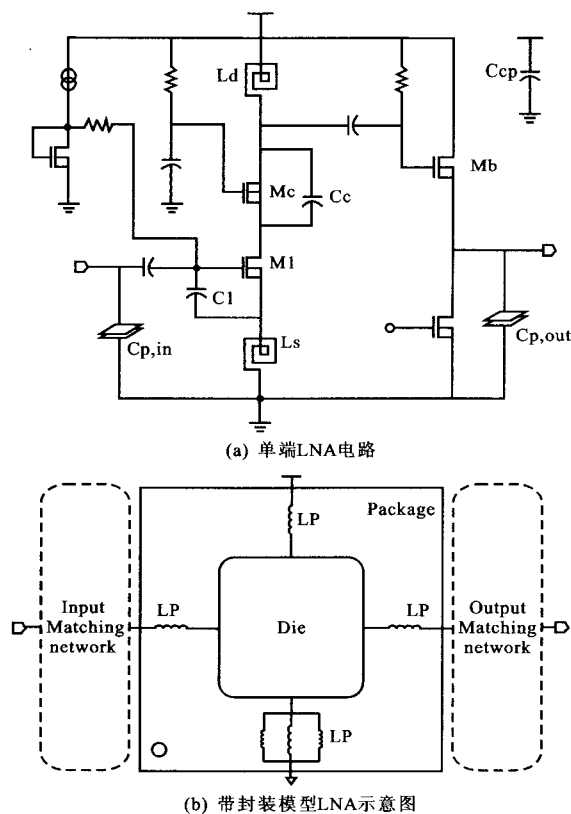


图 4 LNA 电路

相比差分结构,单端 LNA 易受电源噪声影响,其 S 参数受封装影响较大。因此,需要在射频电源和地增加退耦电容以减小射频电源的噪声和减小对封装模型的敏感度。针对通过衬底耦合的共模噪声,需通过在版图设计中进行有效地隔离进行抑制。

差分结构 LNA 由于有“虚地点”,因此源极负反馈电感不受封装打线的影响,因此可以保证较好的匹配、转换增益和噪声系数等性能,如图 4(b)所

示。而对于单端 LNA,源极负反馈电感可以通过外接、片上以及封装打线寄生电感三种方式实现,外接电感降低集成度增加片外元件,封装寄生电感的寄生模型精确度和一致性直接影响输入匹配和其他 S 参数,因此多采用片上螺旋电感实现。但由于射频地通过 PAD 经封装打线连接到地,因此,金线的寄生参数对 LNA 性能有较大影响,其寄生电感会影响输入匹配,寄生电阻和电容对转换增益和噪声系数也有影响,同时,这些寄生效应会影响放大器稳定性。为削弱寄生效应对放大器性能的恶化,在设计中,增加射频地到封装地的打线数目,通过并联形式减小封装寄生效应对 LNA 性能的影响。

由于需要连接到后级 SAW/Balun,因此,LNA 输出电阻应匹配到 50Ω 。采用电容分压进行匹配的方式如图 5 所示^[6]。输出阻抗实部为 $50\left(1+\frac{C_1}{C_2}\right)^2$ ^[7],易受分压电容比例变化影响。为了得到稳定的 50Ω 输出电阻,采用源极跟随器作为第二级输出 buffer,输出电阻表示为 $r_{out} = 1/g_m + j\omega C_{eq}$, C_{eq} 与 M_b 寄生电容 C_{gs} 和前级谐振电容相关。实部通过 M_b 管跨导实现,虚部通过片外电感消除,从而达到准确输出电阻匹配。增加输出 buffer 同时可以改善反相隔离,提高稳定性,代价是消耗一部分功耗。

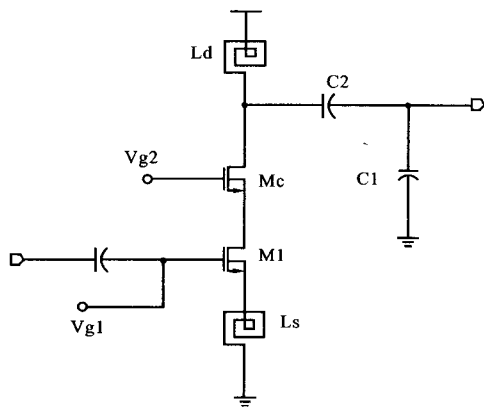


图 5 分压式输出结构示意图

4 结果及分析

设计采用 TSMC0.18 μm RF-CMOS 工艺实现,版图如图 6 所示。仿真结果显示,设计的 L1/L2 频段窄带单端 LNA 实现了高转换增益和低噪声系数的要求,后级电路总噪声系数为 8dB,并考虑 1.6dB 的 SAW 滤波器插损,可以得到接收机总噪声系数低于 2dB,从而使得该双频 GPS 接收机具有较高灵敏度和噪声性能。电路工作电压 1.8V,功耗为 7.38mW,技术指标如图 7 所示。表 1 为本设计指

标与参考文献主要指标对比情况.

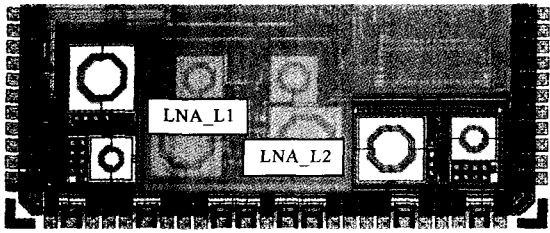


图 6 接收机中 LNA 版图

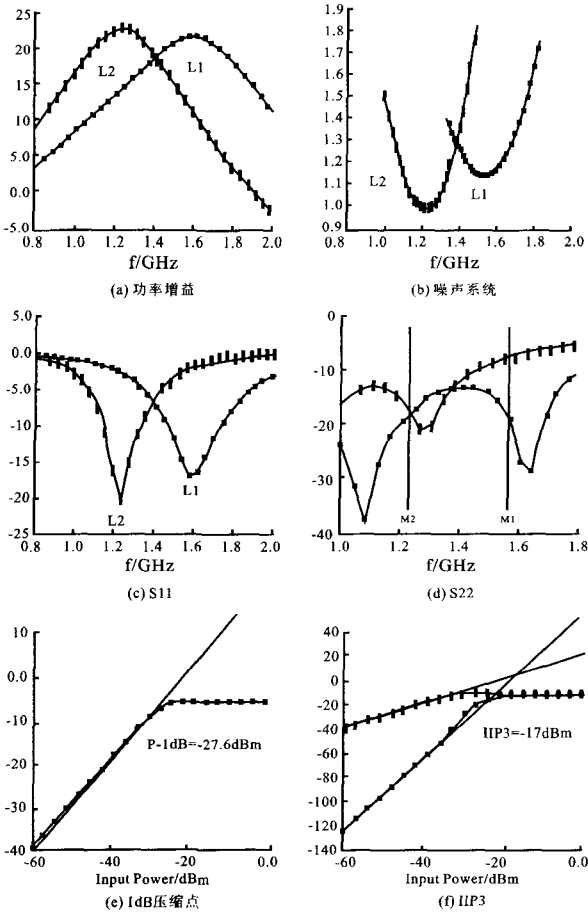


图 7 LNA 主要性能参数

表 1 主要性能参数对比

	参数	文献[8]	文献[9]	文中	单位
LNA	NF	3.6	3	1.2	dB
	功率增益	26	—	21	dB
	S11	—	<-15	-16	dB
	S22	—	—	-18	dB
	IIP3	-3	—	-17	dBm
	1dB 压缩点	—	-13	-27.6	dBm
	功耗	12.5	4.8	7.38	mW
射频前端	NF	3.8	3.6	<2.0	dB

5 结束语

文中提出了应用于 GPS 双频段接收机的 LNA 解决方案和电路实现方式,结合接收机主要性能参数对 LNA 相关性能设计指标进行了分析.通过输入管、Cascode 管并联电容和前馈电容的引入,增加了设计自由度,改善了转换增益及噪声系数.针对封装、寄生等问题通过增加接地金线、输出 buffer、退耦电容的引入,在实现低噪声系数高增益的同时改善了隔离和匹配,同时实现了接收机的高灵敏度和低噪声系数.

参考文献:

[1] Jinho Ko, Jongmoon Kim. A 19mW 2.6mm² L1/L2 dual-band CMOS GPS receiver[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(7): 1414-1425.

[2] 董在望. 高等模拟集成电路[M]. 北京:清华大学出版社, 2006: 267-270.

[3] Anderson S, Svensson C, Drugge O. Wideband LNA for a multistandard wireless receiver in 0.18 um CMOS [C]// Digest of Technical Papers ESSCIRC. Sweden, 2003: 655-658.

[4] 施晓楠, 陆伟成, 唐璞山, 等. CMOS 多频带低噪声放大器设计[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(6): 9-13.

[5] Shaeffer D K, Lee T H. A 1.5V, 1.5GHz CMOS low noise amplifier[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1997, 32(5): 745-759.

[6] 马红波, 冯全源. 1.3GHz 0.25um CMOS 低噪声放大器的设计[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(5): 13-18.

[7] Brian A Floyd, Jesal Mehta, Carlos Gamero, et al. A 900MHz, 0.8um CMOS low noise amplifier with 1.2dB noise figure[C]// Proceedings of the IEEE 1999 Custom Integrated Circuits. San Diego, 1999: 661-664.

[8] Svelto F, Deantoni S, Montagna G, et al. An 8mA, 3.8dB NF, 40dB gain CMOS front-end for GPS applications[C]// Proceedings of the 2000 International Symposium on Low Power Electronics and Design. Italy: Rapallo, 2000: 279-283.

[9] Tamer A Abdelrahim, Tarek Elesseily, Ahmed Saad Abdou, et al. A 12mW fully integrated low-IF dual-band GPS receiver on 0.13um CMOS[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems. New Orleans, 2007: 3034-3038.

作者简介:

黄伟男, (1980-), 博士研究生. 研究方向为射频/模拟 IC 设计.