

基于CHRT 0.18 μm CMOS工艺的 5 GHz低噪声放大器*

南超州, 虞小鹏*

(浙江大学 超大规模集成电路研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对5 GHz频段无线局域网通信标准的市场需求,提出了一种基于源端电感退化的低噪声放大器(LNA)。设计采用了新加坡特许半导体(CHRT)提供的0.18 μm 互补型金属氧化物半导体(CMOS)工艺库,并对设计结果进行了流片测试验证。重点分析了基于源端电感退化的低噪声放大器的关键参数与性能折中,包括输入噪声匹配、密勒效应(miller effect)对噪声性能造成的影响,以及解决方案等在射频低噪声放大器设计中至关重要的因素。研究表明,噪声系数(NF)、线性度以及增益等关键指标皆可满足5 GHz无线通信的需求;其中噪声系数(NF)在超低功耗条件下($P_{\text{com}} < 4 \text{ mW}$),可以达到3 dB以下。

关键词: 无线局域网;互补型金属氧化物半导体;低噪声放大器;密勒效应消除

中图分类号: TN47; TM13

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0714-04

5 GHz LNA based on CHRT 0.18 μm CMOS technology

NAN Chao-zhou, YU Xiao-peng

(Institute of VLSI Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at fulfilling the demand of wireless LAN communication standard, experimental studies on low noise amplifier(LNA) with inductive source degeneration were presented. The design was implemented in CHART 0.18 μm complementary metal-oxide-semiconductor(CMOS) technology. As the key parts of the consideration in a LNA design, the crucial trade-offs of key parameters and performance, including input noise matching, the impact on the performance of noise introduced by miller effect and the solution were carefully taken into consideration. The results indicate that, the key target can satisfy the requirements of wireless communication in 5 GHz range, such as NF, linearity and gain, under the condition of ultra-low power($P_{\text{com}} < 4 \text{ mW}$), the NF is less than 3 dB.

Key words: wireless LAN; complementary metal-oxide-semiconductor(CMOS); low noise amplifier(LNA); miller effect cancellation

0 引 言

近年来,无线通讯标准得到了迅猛发展,各种针对不同应用场合的无线互联技术正极大地改变着人类的生活。其中,由IEEE(电气与电子工程师协会)最初制定的802.11无线局域网标准已经发展成为应用最广泛的无线标准之一。鉴于其广阔的市场前景以及最初版本在速率和传输距离上的局限性,IEEE推出了802.11n标准,使Wireless LAN正式迈入了准千兆时代。

快速发展的IEEE 802.11系列无线标准急需更高集成度、低功耗、小面积的射频收发器,它决定了整个无线系统的费用、尺寸以及电池寿命等因素^[1]。作为接收机的第1级,低噪声放大器必须为后续各级(如混频器)提供足够的增益来克服噪声,并且自身附加尽可能少的噪声,同时减少功耗水平^[2]。所以它的表现对系统整体性能产生了决定性的影响。当前报道的低噪声放大器在低功耗条件下($P_{\text{com}} < 4 \text{ mW}$)的噪声系数主要集中在3.0 dB以上^[3-5]。

收稿日期:2011-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61106034)

作者简介:南超州(1987-),男,浙江乐清人,主要从事射频前端电路设计方面的研究。E-mail: nancz@vlsi.zju.edu.cn

通信联系人:虞小鹏,男,副教授,硕士生导师。E-mail: xpyu@vlsi.zju.edu.cn

为了能够满足当前市场上的5 GHz频段的无线局域网通信标准,同时兼顾低噪声系数($NF < 3 \text{ dB}$)和功耗水平($P_{\text{com}} < 4 \text{ mW}$),本研究拟设计一种5 GHz频段采用源端电感退化的集成射频低噪声放大器,探讨基于CHRT 0.18 μm CMOS工艺下,低噪声放大器的输入阻抗匹配机制,密勒效应的影响与消除,以及流片结果的测试。

1 窄带应用下LNA输入噪声匹配适用性

当模拟电路设计的操作频率上升到毫米波乃至更高频段时,由于各种寄生参数的影响,诸如密勒效应电容、结合线(bond-wire)寄生电感等,电路的功率资源不再有如低频时那样看起来无穷无尽,所以在射频电路设计中,阻抗匹配是一个必不可少的环节。相对于低噪声放大器来说,由于同时存在关键指标、噪声系数对源端阻抗匹配的敏感性问题,不仅需要考虑该低噪声放大器的功率匹配,以达到较好的电压驻波比性能,同时还要考虑最关键的噪声匹配。由于一般的MOSFET,产生最小噪声系数的信号源阻抗在特性上是电感性的,并且一般来说与使功率传输最大的条件无关,即MOSFET的电容性输入阻抗,对于射频中常见的50 Ω 电阻性信号源的良好匹配而又不降低噪声性能是非常困难的。为了达成功率匹配与噪声匹配之间的折中,被工业界较为广泛采用的噪声输入匹配方式主要有:

(1) 共栅结构输入级。由于该结构输入匹配网络的简易性、平坦的高频噪声曲线,而得到了宽带低噪声放大器设计者的极大关注。但是相应于共栅结构的宽带特性,其所付出的代价为低的匹配网络品质因素,从而导致较高的噪声系数,不适宜于窄带的应用。

(2) 源级电感退化结构。由于其良好的噪声性能及电路噪声优化设计的规范性,采用电感退化共源输入级的低噪声放大器架构在窄带射频接收机芯片设计中得到了极其广泛的应用^[6]。

下面就输入阻抗、匹配网络品质因素、噪声系数这3方面对这两种结构进行比较,以量化品质因素、输入阻抗对于带宽变化的敏感性。

1.1 输入阻抗

电感退化共源输入级:

$$Z_{\text{in}}(s) = \frac{s^2 + s \frac{g_{m1} L_s}{(L_s + L_g) C_{gs}} + \frac{1}{(L_s + L_g) C_{gs}}}{s / (L_s + L_g)} \quad (1)$$

共栅级输入级:

$$Z_{\text{in}}(s) = \frac{s / C_{gs}}{s^2 + s \frac{g_{m1}}{C_{gs}} + \frac{1}{L_s C_{gs}}} \quad (2)$$

1.2 输入阻抗网络品质因素

电感退化共源输入级:

$$Q_{\text{match}} = \frac{1}{2\omega C_{gs} R_s} \quad (3)$$

共栅极输入级:

$$Q_{\text{match}} = \frac{\omega C_{gs} R_s}{2} \quad (4)$$

1.3 噪声系数

电感退化共源输入级:

$$F_{\text{min}} = 1 + \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{\omega_o}{\omega_r} \right) \frac{2\delta\alpha^2}{5\gamma} Q_{\text{opt}} \quad (5)$$

共栅极输入级:

$$F_{\text{min}} = 1 + \frac{\gamma}{\alpha} + \left(\frac{\omega_o}{\omega_r} \right) \frac{\delta\alpha}{5} \approx 1 + \frac{\gamma}{\alpha} \quad (6)$$

式中: R_s —输入信号源电阻; L_s , L_g —栅极和源极的阻抗匹配电感; C_{gs} —输入级栅源电容; γ , α —噪声系数相关常数。

由式(3,4)可知,相较电感退化共源结构,共栅结构的输入阻抗匹配网络品质因素较小,意味着可以在更宽的范围内实现阻抗匹配,因而更适合于宽带设计。另一方面,由式(5,6)可知,电感退化共源极结构可以在输入匹配的同时获得很好的噪声性能;而由于输入阻抗匹配的限制($R_s = 1/g_m$),共栅极结构的噪声系数被限制为 $>3 \text{ dB}$ 。值得注意的是,由于栅电阻噪声的引入和放大,式(5)中等式右边的第2项显示了其与电路工作频率的强相关性,即随着工作频率的升高,电路的噪声系数会呈现强烈的上扬趋势;反观式(6)中,由于栅电阻噪声不出现在信号通路上,电路的噪声系数与工作频率呈现很弱的相关性,几乎可以忽略不计。因此,相较而言共源极结构的噪声系数曲线在较宽的工作范围内呈现平坦特性,但噪声系数性能更差。所以由WLAN无线标准对于噪声性能的苛刻要求,本研究在此选择电感退化共源级结构作为输入跨导级。

2 密勒效应的修正与带宽拓展

密勒效应,即指任何跨接于主信号通路的输入/输出端口的阻抗,可以等效地划分为两个分别连接于输入/输出与地之间的不同阻抗。由于射频低噪声放大器一般级联在天线之后,它的输入端与漏端均是工作在射频频率的信号点。这些点上的寄生电容构成较

低频率的极点,从而恶化了低噪声放大器,甚至于整个接收机前段系统可达到的操作频带。

以往的研究^[7]已经揭示共源共栅结构在提高放大器的电压增益和提高电流源的输出阻抗方面具有十分有利的效果,另外这种结构也为电路提供良好的屏蔽作用。通过比较发现(比较结果示意图如图1所示),共源共栅结构具有相对较高输入级阻抗,是通过减小密勒等效电容而得到。

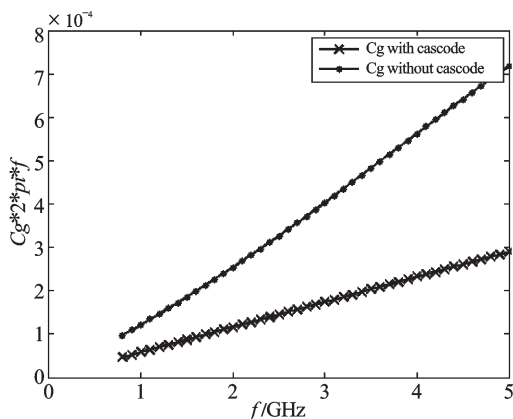


图1 共源共栅结构与简单共源输入级的栅极电容比较

为了实现在WLAN频带内的平坦增益曲线,本研究同时使用共栅共源结构与级间串联电感峰振的方法来达到这一目的,如图2(a)、(b)所示。本研究在级联的两级之间插入串联电感。在插入与不插入串联电感 L_1 情况下级联电路的小信号模型如图2(c)所示。 C_1 和 C_2 为 M_1 漏极和 M_2 源级的寄生电容, L_1 为级间插入串联电感, G_m 为 M_2 的等效输入跨导。在插入和不插入 L_1 情况下流入等效跨导的电流 i_o 与 i_d 的电流传输

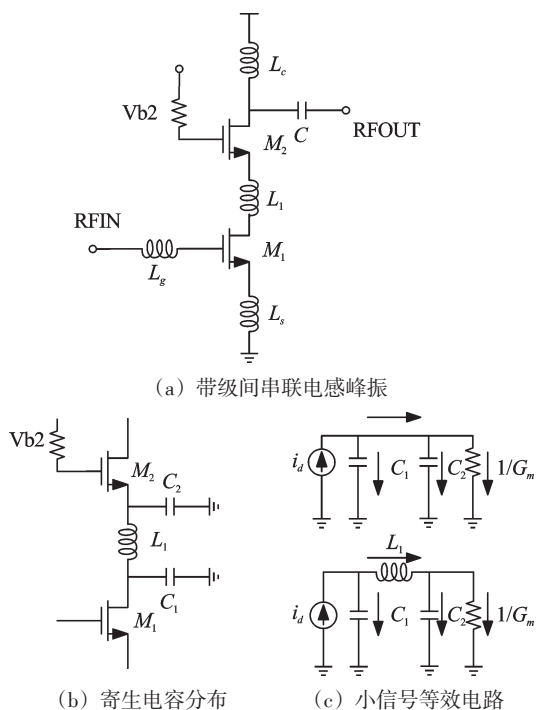


图2 带级间串联电感峰振电路分析

比率的传输函数为:

$$\frac{i_o}{i_d} \Big|_{w.o} = \frac{1}{1 + \left(\frac{C_1 + C_2}{G_m} \right) \cdot s} \quad (7)$$

$$\frac{i_o}{i_d} \Big|_{w/i} = \frac{1}{s^3 \frac{L_3 C_1 C_2}{G_m} + s^2 L_3 C_1 + s \frac{C_1 + C_2}{G_m} + 1} \quad (8)$$

式(7,8)的频率响应曲线如图3所示。由以上讨论可以得到适当选择级间串联电感 L_1 ,可以使其与寄生电容 C_1 以及 C_2 在需要的频率处产生谐振,这样就为电路的射频信号节点增大了对地的阻抗,从而解决了 M_3 和 M_4 源级引入的寄生电容问题^[8]。

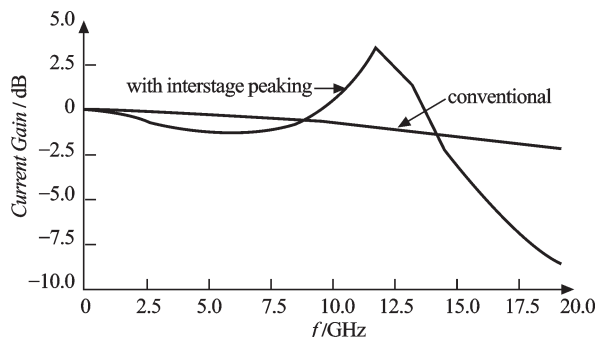


图3 传统型与带级间峰振技术的输入级与级联之间电流传导函数的频率响应

3 测试结果

该设计采用CHRT 0.18um CMOS工艺流片进行测试。芯片的照片如图4所示,芯片的主体所占面积为 $0.4 \times 0.5 \text{ mm}^2$ 。

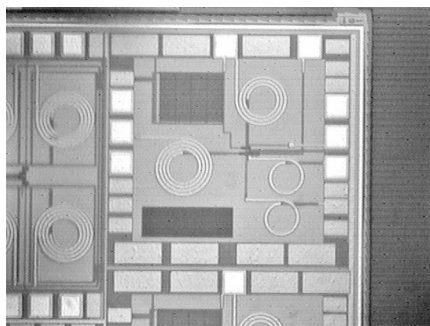
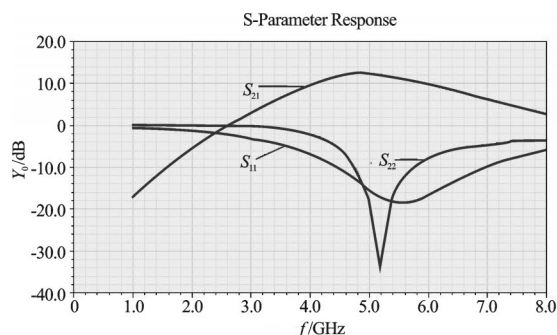
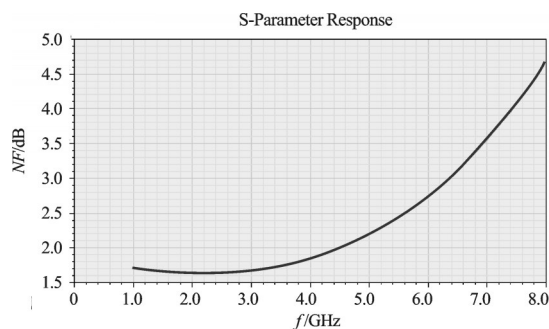


图4 芯片照片

该低噪声放大器的电路工作电压是1.8 V,本研究使用级联Elite 300测试台进行芯片测试。S参数测试由网络分析仪完成。其结果如图5(a)所示,该设计在5 GHz~5.8 GHz间的 S_{11} , S_{22} 保持在-10 dB以下,实现了VSWR小于2.0的业界要求。同时 S_{21} 在4.5 GHz~6 GHz之间保持大于10 dB的增益,很好地满足了射频信号放大要求。低噪声放大器噪声系数如图5(b)所示,由图5(b)可知,该低噪声放大器能实现1 GHz~5.8 GHz之间保持NF小于2.8 dB,保持低噪声放大。



(a) 低噪声放大器S参数



(b) 低噪声放大器噪声系数

图5 测试结果

4 结束语

本研究设计了一个基于CHRT 0.18 μm 工艺的源级电感退化低噪声放大器,其工作于5 GHz。该低噪声放大器通过采用共源共栅结构,以及级间电感峰振技术,使得其在高频工作条件下,有效地减缓了寄生电容对信号通路的旁路,从而造成低噪声放大器关键性能的下降。本研究通过流片测试,证明了该电路拓扑方案的有效性。

参考文献(References):

- [1] LEE T. The Design of CMOS Radio Frequency Integrated Circuits[M]. 2nd ed. Cambridge University Press, 2004.
- [2] PARK J, LEE C H, KIM B S, et al. Design and analysis of low flicker noise CMOS mixers for direct down conversion receivers[J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique**, 2006, 54(12): 4372 - 4380.
- [3] DAO V K, CHOI B G, PARK C S. Dual-band LNA for 2.4/5.2 GHz applications [C]//IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, 2006: 413-416.
- [4] SHAEFFER D K, LEE T H. A 1.5-V, 1.5-GHz CMOS Low Noise Amplifier [C]//Symposium on VLSI Circuits, 1996: 32-33.
- [5] XUAN K, TSANG K F, LEE W C, et al. 0.18 μm CMOS dual-band low-noise amplifier for ZigBee development[J]. **Electronics Letters**, 2010, 46(1): 85-86.
- [6] NOH N M, ZULKIFLI T Z A. Study and analysis of a 0.18 μm single-ended inductively-degenerated common-source cascode LNA under post-layout corner conditions[C]//International Conference on Intelligent and Advanced Systems, 2007: 1312-1317.
- [7] HU B, YU X P, HE L N. 0.9~10 GHz low noise amplifier with capacitive cross coupling[C]//Proc. of IEEE International Conference on Ultra-wideband. Nanjing, China: [s.n.], 2010: 245-248.
- [8] FAN Xiao-hua, ZHANG Heng, SANCHEZ-SINENCIO E. A noise reduction and linearity improvement technique for a differential cascode LNA [J]. **IEEE Journal of Solid State Circuits**, 2008, 43(3): 588-599.

[编辑:张翔]

(上接第708页)

参考文献(References):

- [1] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述[J]. **电力系统自动化**, 2009, 33(17): 10-15.
- [2] 万秋兰. 大电网实现自愈的理论研究方向[J]. **电力系统自动化**, 2009, 33(17): 29-32.
- [3] 姚建国, 严胜, 杨胜春. 中国特色智能调度的实践与展望[J]. **电力系统自动化**, 2009, 33(17): 16-20.
- [4] 中国标准出版社第四编辑室. GB/T 13730-2002. 地区电网调度自动化系统. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [5] 郑延海, 张小白, 钱玉妹, 等. 电力系统实际时安全约束调度的混合算法[J]. **电力系统自动化**, 2005, 29(12): 49-52.
- [6] 潘凯岩, 刘仲尧, 宋学清, 等. 自动负荷控制系统在佛山电网中的应用[J]. **电力系统自动化**, 2009, 33(22): 94-97.
- [7] 李少谦, 张孟君, 妮小惠, 等. 消除330kV变压器过载的自动负荷转移控制技术[J]. **电力系统保护与控制**, 2009, 37(11): 106-108.
- [8] 潘凯岩, 刘仲尧, 宋学清, 等. 自动负荷控制系统在佛山电网中的应用[J]. **电力系统自动化**, 2009, 33(22): 94-97.
- [9] 李少谦, 张孟君, 妮小惠, 等. 消除330kV变压器过载的自动负荷转移控制技术[J]. **电力系统保护与控制**, 2007, 31(20): 106-108.
- [10] 王成相, 赵玮, 王成山, 等. 等计及不确定性的预想事故自动选择区间方法[J]. **电力系统自动化**, 2009, 33(22): 27-30.
- [11] 许自纲, 王洪, 秦晓平, 等. 直流潮流法在西部电网可靠性评估中的应用[J]. **电力系统自动化**, 2009, 25(7): 31-35.

[编辑:李辉]