

基于多重反馈环路技术的 0.8~5.2 GHz CMOS 宽带 LNA 设计*

万求真[†], 吴潇婷, 徐蒙, 徐丹丹

(湖南师范大学 物理与信息科学学院, 湖南 长沙 410081)

摘要:在传统共栅放大器结构基础上,基于0.18 μm CMOS工艺,提出一种带多重反馈环路技术的0.8~5.2 GHz宽带低噪声放大器(LNA)。该电路采用的负反馈结构在改善噪声系数和输入阻抗匹配的同时并不需要消耗额外的功耗;采用的双重正反馈结构增加了输入级MOS管跨导设计的灵活性,并可通过输出负载阻抗反过来控制输入阻抗匹配,使得提出的LNA在宽频率范围内实现功率增益、输入阻抗与噪声系数的同时优化。后版图仿真结果显示,在0.8~5.2 GHz频段内,该宽带LNA的功率增益范围为12.0~14.5 dB,输入反射系数 S_{11} 为-8.0~-17.6 dB,输出反射系数 S_{22} 为-10.0~-32.4 dB,反向传输系数 S_{12} 小于-45.6 dB,噪声系数NF为3.7~4.1 dB。在3 GHz时的输入三阶交调点IIP3为-4.0 dBm。芯片在1.5 V电源电压下,消耗的功率仅为9.0 mW,芯片总面积为0.7 mm \times 0.8 mm。

关键词:CMOS;射频集成电路;低噪声放大器;宽带;多重反馈环路技术

中图分类号:TN432;TN722

文献标志码:A

Design of a 0.8~5.2 GHz CMOS Wideband LNA Employing Multiple Feedback Loop Technique

WAN Qiuzhen[†], WU Xiaoting, XU Meng, XU Dandan

(College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: Based on the traditional common-gate (CG) amplifier configuration, a 0.8~5.2 GHz wideband LNA employing multiple feedback loop technique using a 0.18 μm CMOS technology was presented. The negative feedback structure of the LNA can improve the noise figure and input impedance matching, while it does not require additional power consumption. The dual positive feedback structure of the LNA can also increase the flexibility of input MOS transistor transconductance, and in turn control the input impedance matching by the output load impedance. The combination of these techniques would optimize the power gain, input impedance, and noise figure simultaneously over a wide frequency range. Post-layout simulation results show that the wideband LNA has a power gain S_{21} of 12.0~14.5 dB, an input return

* 收稿日期:2016-04-11

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ6095), Natural Science Foundation of Hunan Province of China (2016JJ6095); 湖南省教育厅科学研究项目(14B107), Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (14B107); 湖南师范大学青年优秀人才培养项目(ET14102), Excellent talents in Hunan Normal University (ET14102); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201610542009), National Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates (201610542009)

作者简介:万求真(1984-),男,湖南岳阳人,湖南师范大学讲师,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: wanqiuzhen@sina.com

loss S_{11} of $-8.0 \sim -17.6$ dB, an output return loss S_{22} of $-10.0 \sim -32.4$ dB, and a reverse isolation S_{12} of less -45.6 dB in the frequency range of $0.8 \sim 5.2$ GHz. A noise figure of $3.7 \sim 4.1$ dB was also obtained in the required band with a power dissipation of 9.0 mW under a supply voltage of 1.5 V. The input third-order intercept point (IIP3) is -4.0 dBm at 3 GHz. The chip area including testing pads is only 0.7 mm \times 0.8 mm.

Key words: CMOS; RF integrated circuits; low noise amplifier (LNA); wideband; multiple feedback loop technique

在当前的无线通信领域中,各种各样的协议标准不断涌现,如2G/3G/4G(移动通信网)、WLAN(无线局域网)、RFID(射频识别)、Bluetooth(蓝牙)、UWB(超宽带)、GPS(全球定位系统),它们都在各自特定的无线通信领域中发挥着重要作用.这些无线通信方式大大促进了社会生产力的发展以及人与人之间信息的交流.然而,无论是2G/3G/4G、WLAN还是RFID等,它们都有着自身协议标准不能完成的通信活动.目前,随着下一代宽带无线通信技术的高速发展,人们对无线通信的需求已远非停留在单一标准、单一应用上,而是朝着多标准融合的方向不断前进.因此,满足多标准融合的发收机系统结构及其关键单元电路研究将是未来射频集成电路的发展趋势^[1-3].

作为射频集成电路中的一种关键单元电路,低噪声放大器(LNA, low-noise amplifier)无疑成为研究的热点.LNA位于射频接收机的最前端,它对整个接收机系统的灵敏度和动态范围起着决定性作用.对于LNA设计除了要求有优异的噪声性能外,为了能够抑制后级模块的噪声对整体接收机噪声的影响还应具有足够的功率增益;同时为了保证LNA在比较大的信号动态范围内能够正常工作,不出现失真,要求LNA应具有适当的线性度;为了实现功率最大传输,好的输入输出阻抗匹配也是LNA设计中需要的;另外,还要满足诸如增益平坦度、反向隔离度以及功耗等性能指标.

为了同时满足多种协议标准融合,LNA主要有以下几种实现方法.传统的方法是采用多路LNA并行输入,在多个LNA通道之间,针对各种协议标准的中心工作频率分别进行匹配,它可以实现较好的噪声系数和功率增益,但缺点是芯片面积和功耗较大^[4].目前常用的多标准解决方案有宽带LNA和可配置LNA.宽带LNA可同时覆盖多种协议标准的工作频率,能适应多标准共存的要求,但它也会放大目标信道附近的干扰信号,很容易造成通道的

阻塞,从而提高了设计电路的线性度要求,也难以获得好的综合性能指标^[5-6].可配置LNA通过数字控制模块来实现电路的可调谐,采用开关电容阵列或MOS开关来选通不同的中心工作频率,可以保持带外干扰信号的免疫特性,但它很难在多种协议标准下同时获得好的阻抗匹配和低噪声系数^[7-8].因而,在多标准射频接收机中,LNA的设计与研究是一个很大的挑战.

鉴于此,本文在传统共栅放大器结构基础上,设计并实现一种带多重反馈环路技术的 $0.8 \sim 5.2$ GHz宽带LNA.该宽带LNA采用了双重正反馈结构与负反馈结构相结合的多重反馈环路技术,它增加了输入级MOS管跨导的设计灵活性,可以获得良好的线性度,并同时优化LNA的输入阻抗匹配、噪声系数、功率增益和功耗性能.仿真与实验结果表明,设计的宽带LNA在宽频率范围内具有良好的综合性能指标.在 $0.8 \sim 5.2$ GHz频段内,该宽带LNA的功率增益范围为 $12.0 \sim 14.5$ dB,输入反射系数 S_{11} 为 $-8.0 \sim -17.6$ dB,输出反射系数 S_{22} 为 $-10.0 \sim -32.4$ dB,反向传输系数 S_{12} 小于 -45.6 dB,噪声系数NF为 $3.7 \sim 4.1$ dB.在 3 GHz时的输入三阶交调点IIP3为 -4.0 dBm.此外,该电路在满足下一代宽带无线通信应用的同时,具有低压低功耗的特点.

1 电路结构与性能分析

1.1 传统共栅放大器

在传统的宽带LNA拓扑结构中,如分布式放大器^[9]、共栅放大器^[10]、并联负反馈放大器^[11]等,共栅放大器由于输入阻抗固有的匹配特性与高线性度而被广泛关注.为了同时满足多种协议标准融合,实现宽频率范围内的输入阻抗匹配和良好综合性能指标,本文宽带LNA设计将基于传统共栅放大器结构进行研究.图1(a)中给出了传统差分共栅放大器

的电路图. 在图 1(a)中, 差分电压增益 A_v 、差分输入阻抗 Z_{in} 和噪声系数 F (其中 $NF = 10 \log_{10} F$) 可以表示为^[12]:

$$A_v = (V_{op} - V_{on}) / (V_{ip} - V_{in}) = g_{m1} Z_L \quad (1)$$

$$Z_{in} = 2 / g_{m1} \quad (2)$$

$$F = 1 + \frac{\gamma}{\alpha g_{m1} R_S} + \frac{4R_S}{Z_L} = 1 + \frac{\gamma}{\alpha} \Big|_{g_{m1} R_S=1} + \frac{4R_S}{Z_L} \quad (3)$$

其中 g_{m1} 为输入放大管 M_1 的跨导, R_S 为信号源内阻, γ 是沟道电流热噪声系数, $\alpha = g_{m1} / g_{d01}$, g_{d01} 是 M_1 管中 V_{DS} 零偏置下的漏极电导. 式(3)中的第三项表示输出负载 Z_L 的噪声贡献. 从式(1)~式(3)中可以看出, 共栅放大器的输入阻抗 Z_{in} 受频率变化影响较小, 适合作为宽带 LNA 的输入匹配级; 但共

栅放大器的噪声系数与输入跨导 g_{m1} 成反比, 而输入跨导 g_{m1} 的大小受输入阻抗匹配限制 ($Z_{in} = 2R_S = 100 \Omega$, 即 $g_{m1} R_S = 1$); 这就限制了输入跨导 g_{m1} 一般不会很大, 导致共栅放大器的噪声系数会很大, 另外由于输入跨导 g_{m1} 相对较低而不能提供较高的功率增益.

1.2 带电容耦合技术的负反馈共栅放大器

为了获得高功率增益与低噪声系数, 需要增大共栅放大器中输入放大管 M_1 的跨导, 但输入阻抗随之降低, 恶化输入阻抗匹配, 这将反过来增加电路的功率消耗. 为缓解这一限制, 有文献采用电容耦合技术充当负反馈结构, 对传统共栅放大器进行改进^[13-15].

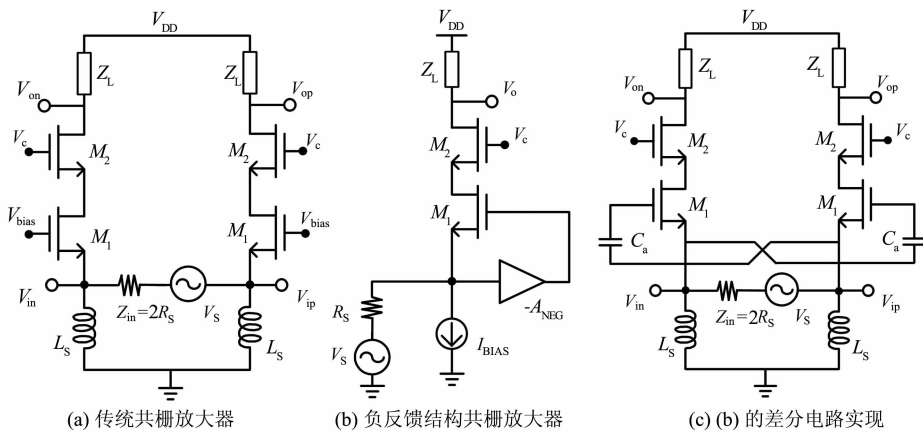


图 1 传统共栅放大器及改进结构

Fig. 1 The traditional CG amplifier and its improved structure

图 1(b)给出了负反馈共栅放大器的结构图. 在图 1(b)中, 设 A_{NEG} 为负反馈结构的环路增益. 当在输入放大管 M_1 的源极和栅极引入 $-A_{NEG}$ 的增益后, 放大管 M_1 的有效跨导 g_{m1} 会增加 $(1 + A_{NEG})$ 倍, 此时输入阻抗匹配条件可表示为 $g_{m1}(1 + A_{NEG})R_S = 1$, α 系数也同样增加到原来的 $(1 + A_{NEG})$ 倍. 图 1(c)是图 1(b)的具体电路实现形式, 它为采用电容耦合技术实现的差分负反馈共栅放大器电路图. 在图 1(c)中, 输入信号由放大管 M_1 的源极经耦合电容 (C_a) 交叉连接在反向放大管 M_1 的栅极, 电容耦合技术为放大管 M_1 开辟了一条负反馈环路. 此时, 环路增益 A_{NEG} 可以表示为 $(C_a - C_{gs1}) / (C_a + C_{gs1})$, 由于 C_a 远大于放大管 M_1 的栅源寄生电容 C_{gs1} , 则 A_{NEG} 的值近似为单位 1. 图 1(c)中的差分电压增益 A_v 、差分输入阻抗 Z_{in} 和噪声系数 F 变成:

$$A_v = (V_{op} - V_{on}) / (V_{ip} - V_{in}) =$$

$$g_{m1}(1 + A_{NEG})Z_L \quad (4)$$

$$Z_{in} = 2 / g_{m1}(1 + A_{NEG}) = 2R_S \quad (5)$$

$$F = 1 + \frac{\gamma}{\alpha g_{m1}(1 + A_{NEG})^2 R_S} + \frac{4R_S}{Z_L} = 1 + \frac{\gamma}{\alpha(1 + A_{NEG})} \Big|_{g_{m1}(1 + A_{NEG})R_S=1} + \frac{4R_S}{Z_L} \quad (6)$$

可以看到, 在满足输入阻抗匹配 ($g_{m1}(1 + A_{NEG})R_S = 1$) 条件下, 引入的负反馈结构不增加新的噪声和非线性源, 它可以增强输入放大管 M_1 的有效跨导, 这将意味着消耗更少的直流偏置电流, 产生更少的 M_1 管沟道电流热噪声, 因此它能在改善噪声系数的同时并不需要消耗额外的功耗.

1.3 提出的基于多重反馈环路技术的宽带 LNA

在负反馈共栅放大器中, 输入放大管 M_1 的跨导由 g_{m1} 增强到 $g_{m1}(1 + A_{NEG})$, 在满足输入阻抗匹配 ($g_{m1}(1 + A_{NEG})R_S = 1$) 条件下, 输入放大管 M_1 的跨导 g_{m1} 却被限制在 10 mS, 这导致了较低的功

率增益. 为了满足多种协议标准融合, 需要增加输入管 M_1 跨导 g_{m1} 的设计灵活性, 本文在图 1(c) 的基础上, 提出一种基于多重反馈环路技术的宽带 LNA, 具体电路图如图 2(a) 所示; 它将双重正反馈结构与负反馈结构结合起来进行设计, 其原理图如图 2(b) 所示. 一方面, 由 M_2 管与电容 C_b 构成的正反馈环路 A_{pos1} 并行跨接在输入放大管 M_1 的源极与共栅管 M_4 的漏极之间. 另一方面, 由 M_3 管替代传统共栅放大器的尾部电流源, 它与耦合电容 C_c 一起, 产生另一条正反馈环路 A_{pos2} . 双重正反馈结构 A_{pos1}, A_{pos2} 的联合设计, 将在图 1(c) 的基础上增加输入跨导 g_{m1} 设计的灵活性, 使得研究的宽带 LNA 在满足输入阻抗匹配的同时, 可以获得更大的功率增益和更小的噪声系数. 下面对图 2 中多重反馈环路技术进行分析.

1.3.1 输入阻抗

当输入电流 I_{in} 加入到放大管 M_1 的源极时, 由 M_2 管与 M_3 管各自构成的正反馈环路将分别产生

一个与输入电流同相的反馈电流 I_{pos1} 和 I_{pos2} , 电流方向如图 2(b) 所示. 由于增加了正反馈环路电流 I_{pos1} 和 I_{pos2} 的影响, 提出的宽带 LNA 的输入阻抗 Z_{in} 可表示为:

$$Z_{in} = \frac{2}{g_{m1}(1 + A_{NEG})(1 - A_{pos1} - A_{pos2})} = \frac{2}{g_{m1}(1 + A_{NEG})(1 - g_{m2}Z_{load}(\omega) - g_{m3}/2g_{m1})} \quad (7)$$

其中, g_{m1} 和 g_{m2} 为 MOS 管 M_1 和 M_2 的跨导, A_{pos1}, A_{pos2} 为各自构成的正反馈环路增益, $A_{pos1} = g_{m2}Z_{load}(\omega), A_{pos2} = g_{m3}/2g_{m1}$, 在电路设计中设置 $(A_{pos1} + A_{pos2}) < 1$ 以满足 LNA 的稳定性. 从上式中可以看出, 输入放大管 M_1 的跨导 g_{m1} 值打破了传统共栅放大器输入阻抗匹配的限制. 在此时输入阻抗匹配 $g_{m1}(1 + A_{NEG})(1 - A_{pos1} - A_{pos2})R_S = 1$ 条件下, g_{m1} 可以通过选择双重正反馈 $(A_{pos1} + A_{pos2})$ 的值来灵活设置, 因此输入跨导 g_{m1} 可以比传统共栅放大器结构高得多.

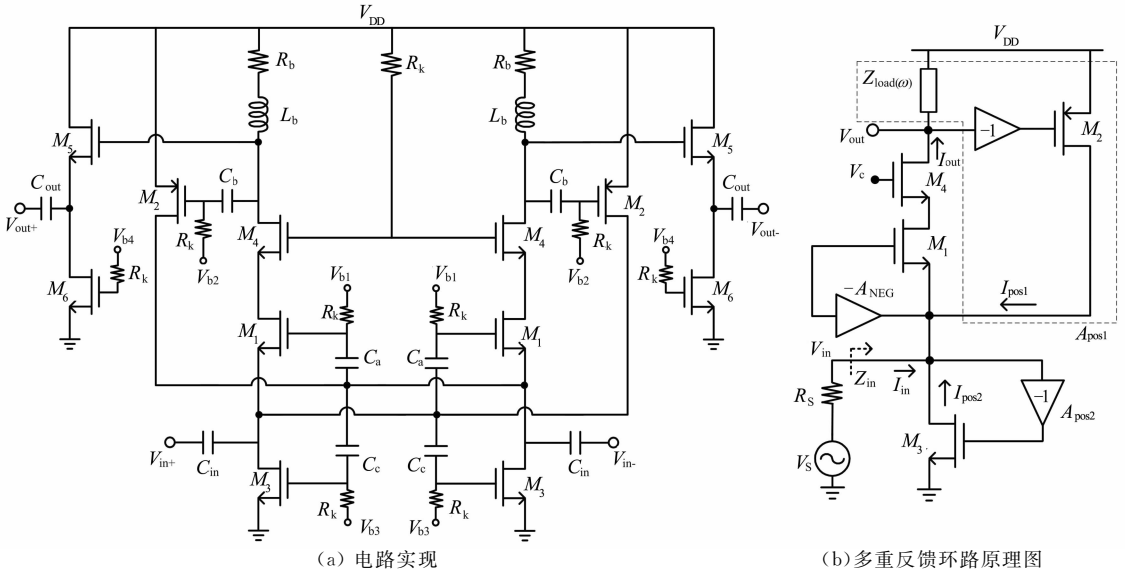


图 2 提出的基于多重反馈环路技术的宽带 LNA
Fig. 2 The proposed wideband LNA based on the multiple feedback loop

如当 $A_{pos1} + A_{pos2} = 0.8, A_{NEG} = 1$ 时, $g_{m1} = 50$ mS, 这将显著增加功率增益. 另外, 由 M_2 管构成的正反馈结构的环路增益 A_{pos1} 为 $g_{m2}Z_{load}(\omega)$, 正反馈环路 A_{pos1} 可以通过输出负载阻抗 $Z_{load}(\omega)$ 反过来控制输入阻抗匹配, 从而进一步增加了输入阻抗设计的灵活性.

1.3.2 电流增益

相比于传统共栅放大器的电流增益受限为 1, 而引入双重正反馈结构的共栅放大器的电流增益将

大于 1, 增强的电流增益可用来改善宽带 LNA 的噪声系数. 在图 2(b) 中, 提出的宽带 LNA 的输出电流 I_{out} 由信号源提供的输入电流 I_{in} 与由 M_2, M_3 管各自产生的正反馈电流 I_{pos1}, I_{pos2} 之和组成, 宽带 LNA 的电流增益可以表示为:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{1 - A_{pos1} - A_{pos2}} = \frac{1}{1 - g_{m2}Z(\omega) - g_{m3}/2g_{m1}} \quad (8)$$

从式(8)中可以看出,提出的宽带 LNA 的电流增益可以通过双重正反馈结构的环路增益 A_{pos1} , A_{pos2} 来进行控制,如同上面分析中的输入阻抗 Z_{in} 一样.

1.3.3 噪声系数

在噪声系数的分析中,本文忽略 MOS 管栅极电阻噪声,只考虑 MOS 管沟道电流热噪声对输出噪声的贡献.在提出的基于多重反馈环路技术的宽带 LNA 中,包括信号源内阻的噪声电流源主要有 5 种.输入放大管 M_1 的噪声电流全部流过负载阻抗 $Z_{\text{load}}(\omega)$,对差分电路噪声系数的贡献为:

$$F_{M_1} = \frac{\gamma(1 - g_{m2}Z_{\text{load}}(\omega))}{\alpha(2g_{m1} - g_{m3})R_S(1 + A_{\text{NEG}})} \quad (9)$$

可以看出,输入放大管 M_1 的噪声贡献与正反馈结构 A_{pos1} 的增益上升成比例下降关系,相比于传统的共栅放大器,输入放大管 M_1 的噪声贡献被大约降低至原来的 $(1 - g_{m2}Z_{\text{load}}(\omega))/2$.另外, M_2 管的噪声电流并不直接流过输出负载,而是通过正反馈结构 A_{pos1} 来影响输出噪声贡献,它对差分电路噪声系数的贡献为 $\frac{\gamma}{\alpha}g_{m2}R_S$; M_3 管的噪声电流对差分电路噪声系数的贡献为 $\frac{\gamma}{\alpha}g_{m3}R_S$; 输出负载 $Z_{\text{load}}(\omega)$ 对噪声系数的贡献为 $\frac{R_S}{Z_{\text{load}}(\omega)}(1 + \frac{1}{2g_{m1}R_S})^2$.将以上 4 种噪声电流源与信号源内阻噪声全部加起来得到总的噪声系数为:

$$F = 1 + \frac{\gamma(1 - g_{m2}Z_{\text{load}}(\omega))}{\alpha(2g_{m1} - g_{m3})R_S(1 + A_{\text{NEG}})} + \frac{\gamma}{\alpha}g_{m2}R_S + \frac{\gamma}{\alpha}g_{m3}R_S + \frac{R_S}{Z_{\text{load}}(\omega)}(1 + \frac{1}{2g_{m1}R_S})^2 \quad (10)$$

从式(10)中可以看出,双重正反馈结构的引入提高了输入放大管 M_1 的跨导,增大了功率增益,大大降低了输入放大管 M_1 的噪声贡献,虽然在双重正反馈结构中同时引入了 M_2 管与 M_3 管的额外噪声贡献,但相比输入放大管 M_1 噪声贡献的降低,额外的噪声源引入的噪声贡献可以忽略不计.

因此,在本文提出的宽带 LNA 中,可以看到,由耦合电容(C_a)交叉连接构成的负反馈结构与由 M_2 , M_3 管构成的双重正反馈结构一起,多重反馈环路技术增加了输入管 M_1 跨导 g_{m1} 的设计灵活性,从而可以优化宽带 LNA 的输入阻抗匹配、功率增益、噪声系数和功耗性能.

另外,为了使提出的宽带 LNA 在足够宽的频率范围内具有平坦增益,输出负载 $Z_{\text{load}}(\omega)$ 采用电

感 L_b 和电阻 R_b 构成的串联峰值结构.其中,负载电阻 R_b 用来增大低频频段的电压增益;而串联峰值电感 L_b 的等效阻抗值会随着频率的增加而增大,它可以补偿寄生电容的影响来达到高平坦增益和好的宽带特性.在输出级,为了实现宽带输出阻抗匹配,在放大器的后面连接有一个源极跟随器,由 M_5 管和 M_6 管构成的源极跟随器具有较高的输入阻抗和中等输出阻抗.同时,共栅管 M_4 堆叠在输入放大管 M_1 之上,它可以抑制输入放大管 M_1 的栅漏寄生电容 C_{gd1} ,减少密勒效应,增加电路的稳定性,为宽带 LNA 提供很好的反向隔离性能.

2 实验结果分析

本文提出的 0.8~5.2 GHz 宽带 LNA 采用 0.18 μm CMOS 工艺,在 Cadence SpectreRF 中对电路进行仿真,采用 Cadence Virtuoso 软件进行版图设计.在版图设计时,尽量采用对称结构进行绘制,同时尽量减小版图设计面积;所有有源和无源元件,包括片上螺旋电感和 MIM(Metal-Insulator-Metal)电容都在片集成.通过对电路原理图和版图的多次迭代优化以后,将版图中提取出来的所有寄生参数代入电路原理图中进行后仿真.图 3 为本文提出的宽带 LNA 的芯片版图照片,它包括测试焊盘(PAD)在内的版图总面积为 0.7 mm \times 0.8 mm.

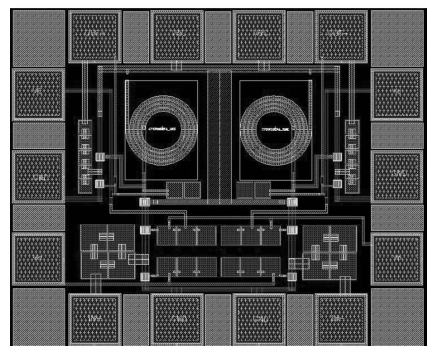


图 3 提出的宽带 LNA 的芯片版图照片
Fig. 3 The layout of the proposed wideband LNA

图 4 显示了后仿真的输入反射系数 S_{11} ,在 0.8~5.2 GHz 频率范围内,仿真的 S_{11} 为 -8.0~-17.6 dB,实现了较好的输入阻抗匹配性能.仿真的 S_{11} 结果也进一步验证了双重正反馈结构与负反馈结构的结合技术在宽带输入阻抗匹配中的成功设计.图 4 同时给出了后仿真的输出反射系数 S_{22} ,在

0.8~5.2 GHz 频率范围内,仿真的 S_{22} 为 $-10.0 \sim -32.4$ dB,具有很好的输出阻抗匹配性能.与前仿真结果相比,后仿真的 S_{11} 与 S_{22} 稍有一些下降,其原因可能是不精确的电感模型或输入输出测试 PAD 中的寄生电容所引起的.

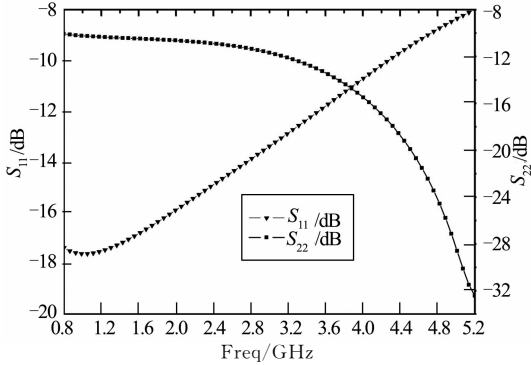


图4 仿真的输入输出反射系数 S_{11} 与 S_{22}

Fig. 4 Simulated input and output return loss (S_{11} and S_{22})

图5显示了后仿真的功率增益特性,仿真的功率增益在0.8~5.2 GHz 频率范围内为 $12.0 \sim 14.5$ dB,平均功率增益为 13.25 dB,且增益平坦度保持

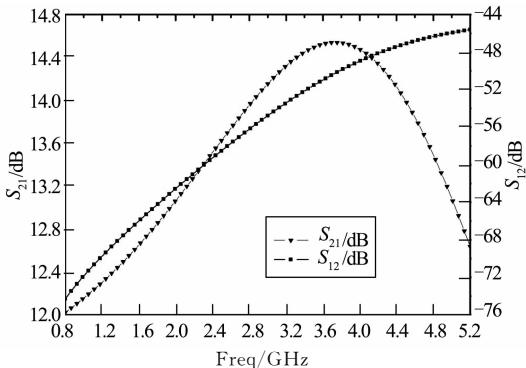


图5 仿真的功率增益 S_{21} 与反向传输系数 S_{12}

Fig. 5 Simulated power gain S_{21} and reverse isolation S_{12}

在 ± 1.25 dB 范围内,具备了较好的增益平坦度性能.图5同时给出了宽带LNA的反向传输系数 S_{12} ,仿真的 S_{12} 在0.8~5.2 GHz 频率范围内保持在 -45.6 dB 以下,具有很好的反向隔离度.由于提出的宽带LNA中采用共栅MOS管层叠结构,通过共栅管 M_4 的反向隔离作用, S_{12} 可以满足设计要求.

对于噪声系数的后仿真如图6所示,在0.8~5.2 GHz 频率范围内噪声变化比较平缓,仿真的噪声系数在 $3.7 \sim 4.1$ dB 范围内变化,平均噪声系数NF为 3.9 dB,达到了很优越的噪声特性.后仿真的NF稍大于它的前仿真结果,其原因可能是片上电感的有限Q值和深亚微米工艺下存在的不可忽略的寄生参数所导致的.另外,为了观察宽带LNA的线性度,采用双频输入法对输入三阶交调点(IIP3)进行仿真,用两个信号源分别产生 3.0 GHz 和 3.01 GHz 的输入信号,它们的输入信号功率都设置为 -30 dBm.如图7所示,仿真得到的IIP3约为 -4.0 dBm,表明该宽带LNA实现了良好的线性度性能.在以上的电路仿真过程中,提出的宽带LNA采用 1.5 V 的电源电压,它不包括源极跟随器的电流消耗为 6.0 mA,消耗的功率仅为 9.0 mW,可以满足低压低功耗电路的设计要求.

本文提出的宽带LNA与最近发表的宽带LNA的比较结果如表1所示.从表中可以看出,该宽带LNA在0.8~5.2 GHz 频率范围内,与类似工作频带下的放大器相比,在电压、功耗设计上具有一定优势,同时该宽带LNA在噪声系数、功率增益、线性度、输入输出阻抗匹配与芯片面积等各个性能指标之间进行了折中,具有更好的综合性能指标.

表1 提出的宽带LNA与相关论文性能比较

Tab. 1 Performance summary of the proposed wideband LNA and comparison with other works

性能	文献					
	[6]	[10]	[11]	[13]	[16]	本工作
工艺/(CMOS)	90 nm	$0.18 \mu\text{m}$	$0.18 \mu\text{m}$	$0.18 \mu\text{m}$	65 nm	$0.18 \mu\text{m}$
频率/GHz	$3.0 \sim 8.5$	$1.5 \sim 5$	$1.85 \sim 10.2$	$1.4 \sim 11.4$	$0.1 \sim 1.6$	$0.8 \sim 5.2$
S_{11} /dB	< -10.5	< -18	< -10.0	< -9.0	< -8.0	< -8.0
S_{22} /dB	< -19	< -7.5	< -10.0	—	< -8.0	< -10.0
功率增益/dB	< 16.0	$11.4 \sim 11.5$	< 13.5	$11 \sim 14$	13.0	$12.0 \sim 14.5$
S_{12} /dB	—	—	< -35.0	—	—	< -45.6
电源电压/V	1.2	1.8	1.0	1.8	1.2	1.5
噪声系数 NF/dB	$3.1 \sim 4.4$	$5.1 \sim 5.2$	$4.1 \sim 5.7$	$3.9 \sim 4.5$	$2.1 \sim 3.5$	$3.7 \sim 4.1$
IIP3 /dBm	$-5.4 @ 5 \text{ GHz}$	$-7.0 @ 5 \text{ GHz}$	$-1.0 @ 4 \text{ GHz}$	$-1 @ 9 \text{ GHz}$	$5.5 @ 0.5 \text{ GHz}$	$-4.0 @ 3 \text{ GHz}$
功耗/mW	16.0	10.8	13.0	8.0	20.8	9.0
面积/(mm \times mm)	—	0.7×0.8	0.7×0.9	1.2×1.5	0.5×0.8	0.7×0.8

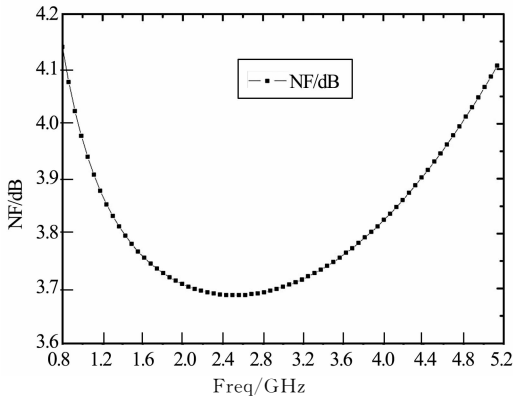


图6 仿真的噪声系数 NF

Fig. 6 Simulated noise figure (NF)

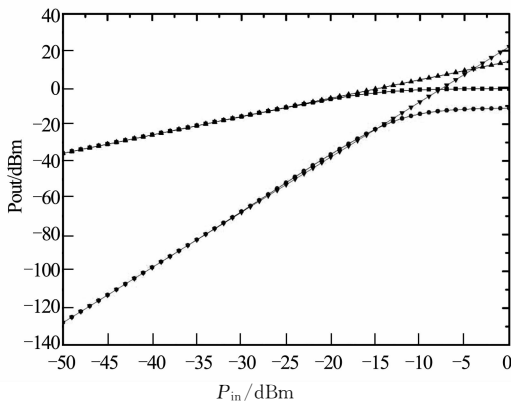


图7 仿真的输入三阶交调点 IIP3

Fig. 7 Simulated input third-order intercept point (IIP3)

3 结束语

本文基于 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS 工艺,设计并实现了一种带多重反馈环路技术的 $0.8\sim 5.2$ GHz 宽带 LNA. 该电路在传统共栅放大器结构基础上,采用的负反馈结构在改善噪声系数和输入阻抗匹配的同时并不需要消耗额外的功耗;采用的双重正反馈结构可通过输出负载阻抗反过来控制输入阻抗匹配,且增加了输入级 MOS 管跨导设计的灵活性,使得提出的宽带 LNA 能够同时达到高的功率增益,良好的阻抗匹配和较低的噪声性能. 后版图仿真结果显示,在 $0.8\sim 5.2$ GHz 频率范围内,最大功率增益 S_{21} 为 14.5 dB,输入反射系数 S_{11} 小于 -8.0 dB,输出反射系数 S_{22} 小于 -10.0 dB,噪声系数 NF 为 $3.7\sim 4.1$ dB. 在 3 GHz 时的输入三阶交调点 IIP3 为 -4.0 dBm,具有良好的线性度. 在 1.5 V 电源电压下,消耗的功率仅为 9.0 mW. 本文提出的双重正反馈结构与负反馈结构相结合的多重反馈环路技术,为深亚微米工艺下设计单片集成的 CMOS 宽带 LNA 提供了参考.

参考文献

[1] HOMAYOUN Aliakbar, RAZAVI Behzad. A low-power CMOS receiver for 5 GHz WLAN [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits,

- 2015, 50(3):630-643.
- [2] KANG Sungyoon, KIM Unha, KIM Junghyun. A multi-mode multi-band reconfigurable power amplifier for 2G/3G/4G handset applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(1):49-51.
- [3] ZHANG Xinwang, CHI Baoyong, WANG Zhihua. A $0.1\sim 1.5$ GHz harmonic rejection receiver front-end with phase ambiguity correction, vector gain calibration and blocker-resilient TIA [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2015, 62(4):1005-1014.
- [4] HAN Junghwan, KWON Kuduck. A SAW-less receiver front-end employing body-effect control IIP2 calibration [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(9):2691-2698.
- [5] LEE Hankyu, CHUNG Taeyoung, SEO Heesong, et al. A wide-band differential low-noise-amplifier with IM3 harmonics and noise canceling [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(1):46-48.
- [6] REJA Md Mahbub, MOEZ Kambiz, FILANOVSKY Igor. An area-efficient multistage $3.0\sim 8.5$ -GHz CMOS UWB LNA using tunable active inductors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2010, 57(8):587-591.
- [7] 路守领, 韩科锋, 王俊宇. 应用于 DCS1800, PCS1900, WCDMA Bluetooth 的多模窄带低噪声放大器[J]. 复旦学报:自然科学版, 2010, 49(6):779-784.
LU Shouling, HAN Kefeng, WANG Junyu. A multi-mode narrow-band low noise amplifier adapted to DCS1800, PCS1900, WCDMA, Bluetooth[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2010, 49(6):779-784. (In Chinese)
- [8] LIN Jiawei, YEN Datong, HU Weiyi, et al. A 900 MHz to 5.2 GHz dual-loop feedback multi-band LNA [C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Taipei, 2009:1024-1027.
- [9] SHIN Shihchieh, LIN Chinshen, TSAI Mingda, et al. A low-voltage and variable-gain distributed amplifier for $3.1\sim 10.6$ GHz UWB systems [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(4):179-181.
- [10] 何小威, 李晋文, 张民选. $1.5\sim 6$ GHz 增益和噪声系数稳定的两级超宽带 CMOS 低噪声放大器设计与性能模拟 [J]. 电子学报, 2010, 38(7):1668-1672.
HE Xiaowei, LI Jinwen, ZHANG Minxuan. Design and performance simulation of a $1.5\sim 6$ GHz two-stage UWB CMOS LNA with extra flat gain and NF [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7):1668-1672. (In Chinese)
- [11] JUNG Jihak, YUN Taeyeoul, CHOI Jaehoon, et al. Wideband and low noise CMOS amplifier for UWB receivers [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(4):749-752.
- [12] IM Donggu, NAM Ilku. A wideband digital TV receiver front-end with noise and distortion cancellation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(2):562-572.
- [13] WANG Hongrui, ZHANG Li, YU Zhiping. A wideband inductorless LNA with local feedback and noise cancelling for low-power low-voltage applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2010, 57(8):1993-2005.
- [14] HAN Hong Gul, JUNG Doo Hwan, KIM Tae Wook. A $2.88\text{mW}+9.06\text{dBm}$ IIP3 common-gate LNA with dual cross-coupled capacitive feedback [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(3):1019-1025.
- [15] 何晓丰, 莫太山, 马成炎, 等. 带有低噪声单端转差分电路的射频增益可控放大器 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4):976-980.
HE Xiaofeng, MO Taishan, MA Chengyan, et al. RF programmable amplifier with low noise single-ended differential circuit[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(4):976-980. (In Chinese)
- [16] CHUNG Taeyoung, LEE Hankyu, JEONG Daechul, et al. A wide-band CMOS noise-canceling low-noise amplifier with high linearity [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(8):547-549.