

应用于 5GHz 频段的宽带低噪声放大器设计

吴晓文^{1,2},陈晓东¹,刘 轶³

(1 中国科学院 上海高等研究院, 上海 201210; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 复旦大学, 上海 201210)

摘 要: 针对 WLAN 802. 11a/ax 频段和未来第五代移动通信 5 GHz 以上应用, 设计了一款 5~6 GHz 的低噪声放大器(LNA), 其工艺基于 IBM 0. 18 μm SiGeBiCMOS 工艺. 该设计采用共发射极的两级放大结构, 第一级采用射极电感负反馈, 第二级采用电压并联负反馈, 有效优化了噪声系数和线性度. 测试结果表明在 5~6 GHz 频率范围内, 输入反射系数 S_{11} 和输出反射系数 S_{22} 分别小于 -14. 6 dB 和 -12. 8 dB, 正向增益 S_{21} 大于 10. 4 dB, 噪声系数小于 2. 7 dB. 在 2. 5 V 工作电压下, 功耗为 15 mW.

关键词: SiGeBiCMOS; 低噪声放大器; 无线局域网; 宽带

中图分类号: TN722. 3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)09-0095-04

Design of a Wideband Low Noise Amplifier at 5 GHz Band

WU Xiao-wen^{1,2}, CHEN Xiao-dong¹, LIU Yi³

(1 Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Fudan University, Shanghai 201210, China)

Abstract: A low noise amplifier(LNA) for WLAN 802. 11a/ax standard and 5th-Generation applications covering 5 to 6 GHz was designed based on IBM 0. 18 μm SiGeBiCMOS process. The circuit adopted a two-stage and common emitter topology, the first stage used inductor feedback and the second stage used voltage shunt feedback which improved noise figure and linearity. The proposed LNA had an input reflection coefficient and output reflection coefficient of -14. 6 dB and -12. 8 dB respectively from 5 to 6 GHz, the gain is 10. 4 dB, and the noise figure is less than 2. 7 dB. The proposed LNA consumed 15mW power at 2. 5 V DC supply.

Key words: SiGeBiCMOS; low noise amplifier; WLAN; wideband

1 引言

近年来,随着无线通信技术的迅猛更迭,全球无线通信产业规模呈快速发展. 当前在 5 GHz 频段上有许多无线通信的应用,包括基于 IEEE802. 11a/ac/ax 的 WLAN 通信系统,无线电导航业务以及其他一些现代工业、科技、医疗当中的通信系统等, WRC-19 也将 5150-5925 MHz 纳入了 IMT 使用频段^[1]. 未来通信时代需要更多高带宽的产品,以覆盖多模多频协议以及实现更高的集成度.

SiGe BiCMOS 是一种将 SiGe HBT 和 CMOS 工艺结合的新技术^[2],兼具 SiGe HBT 增益高、截止频率高以及 CMOS 功耗低、集成度高和成本低廉的优势,非常适合高频和低噪声的应用.

低噪声放大器是无线接收机的核心器件,处在整个接收机的最前端,其基本的作用是在产生尽可能低的噪声前提下,对天线收到的微弱信号进行放大,它的性能将直接影响整个系统的噪声特性^[3,4].

2 LNA 设计原理

低噪声放大器是整个无线接收机的第一级有源电路,设计时除了应该考虑自身增益、线性度、功耗等指标外,还要兼顾同前后级其他模块的阻抗匹配性能.当然,噪声是衡量一个低噪声放大器性能最为核心的指标之一^[5].对于双极型晶体管器件,其最小噪声系数 $NF_{\min}$ 可由式(1)确定:

$$NF_{\min} = 1 + \frac{n}{\beta_{DC}} + \sqrt{\frac{2I_C}{V_T}(r_b + r_e)(\frac{f_T^2}{f_T^2} + \frac{1}{\beta_{DC}}) + \frac{n^2}{\beta_{DC}}} \quad (1)$$

式中, n 为集电极电流理想因子; β_{DC} 为晶体管的直流增益; f_T 为截止频率; I_C 为集电极电流; V_T 为阈值电压; r_b, r_e 分别为基极和发射极电阻.由此可知, SiGe HBT 器件具有较高的电流增益以及截止频率,所以非常适合低噪声放大器的设计.

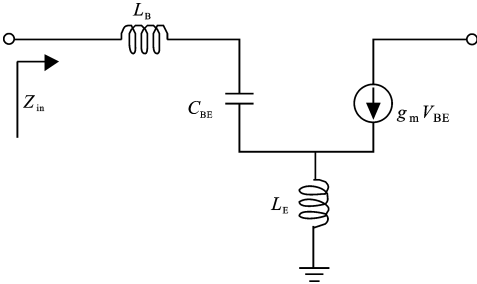


图 1 共射结构小信号模型

共射结构的双极型晶体管的小信号等效电路模型如图 1 所示,其输入阻抗 Z_{in} 为:

$$Z_{in} = s(L_B + L_E) + \frac{1}{sC_{BE}} + \frac{g_m}{C_{BE}}L_E \quad (2)$$

式中, L_B, L_E 分别为晶体管基极和发射极串联电感; C_{BE} 为基极 - 发射极电容; g_m 为晶体管的跨导. 调节 L_B, L_E 的值使得输入阻抗实部为 50, 虚部为零, 即

$$s(L_B + L_E) + \frac{1}{sC_{BE}} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{g_m}{C_{BE}}L_E = 50 \quad (4)$$

同时, 还需要选择 LC 网络参数使得晶体管在设计频率点 ω_0 处发生谐振, 即

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_B + L_E)C_{BE}}} \quad (5)$$

3 LNA 电路和版图

3.1 LNA 电路设计

本次设计采用 IBM 0.18 μm SiGe BiCMOS 工艺, 电路采用两级放大拓扑结构^[6,7], 如图 2 所示, 在

宽频带内增益、噪声系数等指标均较为平坦. 第一级采用噪声特性较好的射极电感负反馈结构, 基极电感 L_{B1} 的引入提升了设计的自由度, 它和电容 C_1 共同构成输入阻抗.

第二级采用线性度较好的电压并联反馈结构, 这种结构在电路工作频率远小于晶体管截止频率的情况下, 通过牺牲一定 S_{12} 性能实现了更好的线性度. 调节晶体管 Q_1 的发射极电感也可以优化线性度, 但这会降低整体电路的噪声性能. 两级电路通过耦合电容 C_2 实现连接, 偏置电压均为 940 mV, 输出端口加入电感 L_C , 很好地弥补了寄生电容对 S_{22} 的影响, 同时对整体电路的噪声几乎没有影响.

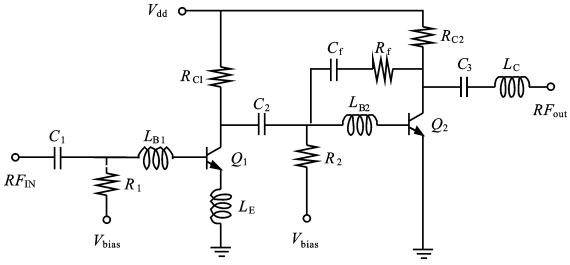


图 2 低噪声放大器电路图

本设计采用两级放大器级联结构, 第一级进行噪声匹配, 优化噪声系数和输入反射系数. 第二级进行功率匹配, 优化线性度和输出反射系数, 调整设计指标更加简单. 跟单级 Cascode 结构 LNA 相比, 级联 LNA 有着更高的增益和更高的带宽, 但是第二级电路会放大第一级输出的噪声, 所以在噪声系数和线性度性能方面会差一些.

3.2 LNA 版图设计

本文采用 Cadence 公司的 Virtuoso 软件进行版图设计, 尺寸为 $1.1 \times 0.8 \text{ mm}^2$. 所有元件均采用片内实现.

4 仿真结果和测试结果分析

4.1 仿真结果

本设计采用 Cadence 公司的 SpectreRF 软件, 工艺库选用 0.18 μm SiGe BiCMOS 工艺, 并用 Mentor Calibre 提取寄生参数进行了后仿. 工作电压在 2.5 V 时, LNA 功耗为 15 mW. 仿真结果如图 3~6 所示, 在 5~6 GHz 内, 输入反射系数 S_{11} 小于 -16.5 dB, 输出反射系数 S_{22} 小于 -13.2 dB, 较好地实现了前后级匹配. 前向增益 S_{21} 大于 17.3 dB 且平坦度较好, 反向隔离度 S_{12} 小于 -40 dB.

图 7 所示的噪声系数 NF 在 5~6 GHz 工作频

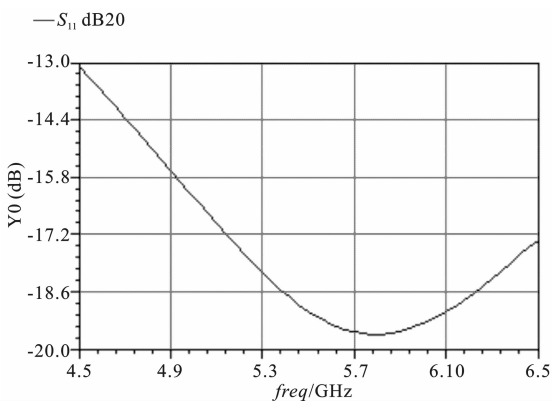


图 3 S_{11} 后仿结果

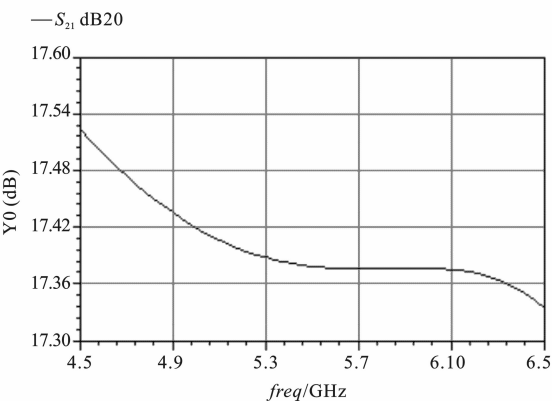


图 4 S_{21} 后仿结果

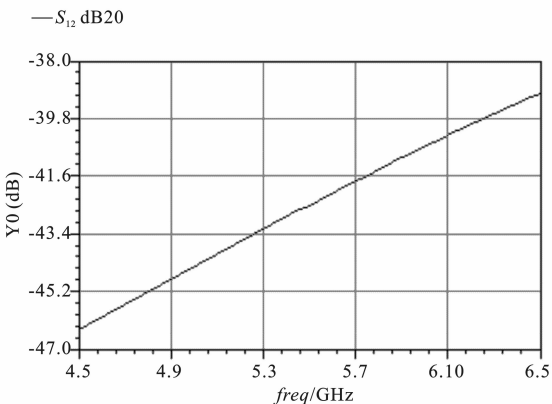


图 5 S_{12} 后仿结果

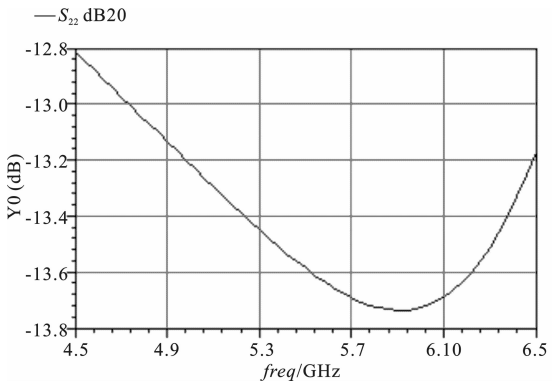


图 6 S_{22} 后仿结果

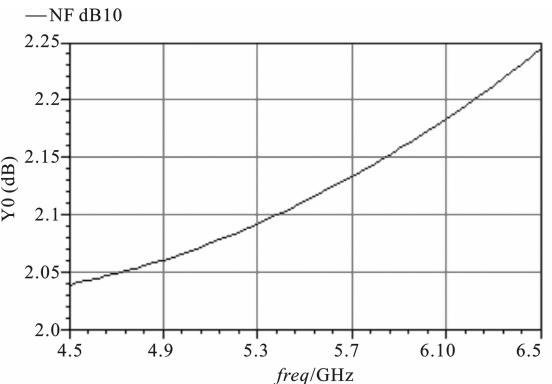


图 7 噪声系数 NF 后仿结果

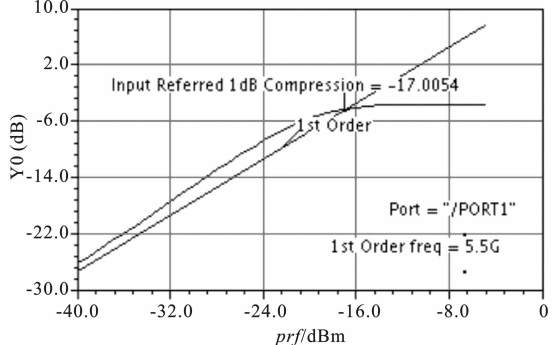


图 8 1dB 压缩点后仿结果

cade 探针台 (S300), 稳压电流源等。

S 参数测试结果如图 9 所示, 在 5~6 GHz 工作频段内, 输入反射系数 S_{11} 和输出反射系数 S_{22} 分别小于 -14.6 dB 和 -12.8 dB, 匹配良好。正向增益 S_{21} 大于 10.4 dB, 反向隔离度 S_{12} 小于 -28 dB。噪声系数 NF 的测试结果如图 10 所示, 设计工作频段内最大噪声系数仅为 3.1 dB, 减去两端接头的 0.4 dB 左右的噪声, 实际噪声系数为 2.7 dB 左右。1 dB 压缩点通过对比输入/输出信号强度得出, 实测结果大于 -18 dBm。

测试结果对比后仿结果, 输入反射系数 S_{11} 恶

带内小于 2.2 dB, 噪声性能较好。低噪声放大器的线性度由 1 dB 压缩点表征^[8], 如图 8 所示。在 5.5 GHz 频点处, 其仿真结果为 -17 dBm。

4.2 测试结果

基于 IBM 0.18 μm SiGe BiCMOS 工艺, 对本次设计的低噪声放大器进行了流片, 其输入输出 PAD 均采用 GSG 结构, 方便进行在片测试, 测试仪器采用 Agilent 矢量网络分析仪 (N5242A), Cas-

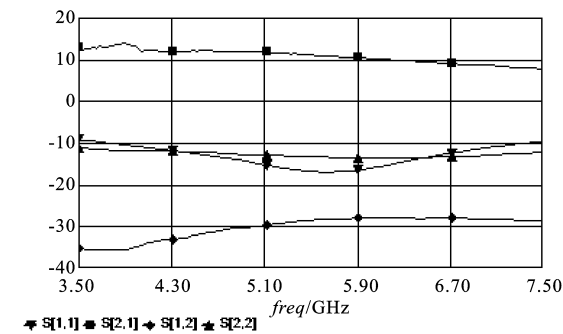


图 9 S 参数测试结果

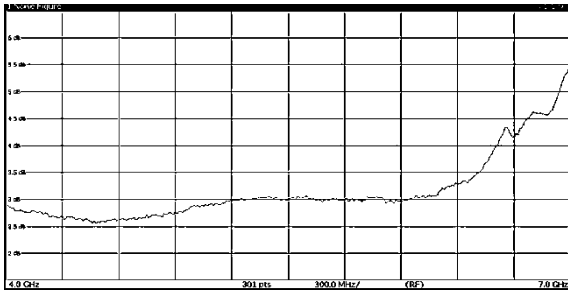


图 10 噪声系数 NF 测试结果

化了 2 dB,输出反射系数 S_{22} 基本一致. 前向增益 S_{21} 整体下降了 5 dB 左右,原因可能是由于测试台只有最大为 150 μm pitch 的探针,而设计 GSG 间距为 180 μm ,探针与 PAD 接触不够良好导致增益下降. 噪声系数 NF 测试结果良好,较后仿结果恶化了 0.5 dB 左右. 1 dB 压缩点与仿真结果基本保持一致.

表 1 为本文设计的低噪声放大器同参考文献和近年来公司产品的性能参数对比结果. 从表中可知,本设计的输入匹配优于参考文献[9],噪声系数优于参考文献[10]. 与 Avago 公司的产品对比,本设计的 S_{11} 和 S_{22} 均较小,说明匹配性能更加理想.

表 1 低噪声放大器的主要参数对比

方案	Gain/dB	NF/dB	S_{11} /dB	S_{22} /dB	频率/GHz
本文	>10.4	<2.7	<-14.6	<-12.8	5~6
文献[9]	10.3	2.3	-12.2	-20	5.8
文献[10]	>25.1	3.5~3.7	<-10	<-10	3~6
MGA-T6	>14.9	<1.9	<-8.5	<-9	4.9~6

5 结束语

本文基于 0.18 μm SiGe BiCMOS 工艺,设计了一款应用于 5~6 GHz 频段的低噪声放大器,并对仿真和测试结果进行分析. 实测表明,所设计的低噪

声放大器在增益、噪声系数和匹配度等设计指标方面较为理想,满足 WLAN 802.11a/ax 无线接收机射频前端的需求.

参考文献:

[1] 方箭,李景春,黄标,等. 5G 频谱研究现状及展望[J]. 电信科学,2015,31(12):111-118.

[2] S. Bhaumik and J. G. bij de Vaate. Hybrid LNAs with SiGe HBTs on 7th generation BiCMOS process [C]. 2014 44th European Microwave Conference, Rome, 2014, 1388-1391.

[3] D. K. Shaeffer and T. H. Lee. A 1.5-V, 1.5-GHz CMOS low noise amplifier[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 32, no. , 1997(5): 745-759

[4] A. Bevilacqua and A. M. Niknejad. An ultrawideband CMOS low-noise amplifier for 3.1-10.6-GHz wireless receivers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004,39(12): 2259-2268

[5] 王巍,宫召英,杨铿,等. 3~5 GHz 超宽带无电感 CMOS 低噪声放大器设计[J]. 微电子学与计算机, 2012,29(6):130-133

[6] M. S. Alam, A. Mukerjee and M. Schroter. Performance investigation of dual band millimetre wave SiGe low noise amplifier[C]. 2015 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), Hyderabad, 2015, 258-261.

[7] 池保勇,余志平,石秉学. CMOS 射频集成电路分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社,2006:196-228.

[8] Lin Hua, Qiong Yan, Lei Chen, Runxi Zhang, Chunqi Shi and Zongsheng Lai. A 0.8 - 2.5GHz wideband SiGe BiCMOS low noise amplifier with noise figure of 1.98 - 3.3dB[C]. 2011 9th IEEE International Conference on ASIC, Xiamen, 2011., 1086-1089.

[9] 周洪敏,张瑛,丁可柯. 5.8GHz 0.18 μm CMOS 低噪声放大器的设计[J]. 计算机工程与应用,2014,50(23): 61-64.

[10] 丁春宝,张万荣,谢红云,等. 3~6GHz SiGe HBT Cascode 低噪声放大器的设计[J]. 北京工业大学学报, 2012,38(8):1162-1166.

作者简介:

吴晓文 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为低噪声放大器设计.

陈晓东(通讯作者) 男,(1969-),博士,研究员. 研究方向为物联网技术. E-mail:chenxd@sari.ac.cn.

刘 铁 男,(1961-),博士,教授. 研究方向为射频功放.