

基于 GaN HEMT 宽带低噪声放大器设计*

王华树, 肖知明, 马伟, 胡伟波

(南开大学 电子信息与光学工程学院, 天津 300350)

摘要: 为了满足不同通信标准的要求, 利用氮化镓高电子迁移率晶体管器件设计了一个高线性度宽频带低噪声放大器。低噪声放大器采用两级电阻负反馈结构, 利用集总参数元件和微带线对低噪声放大器的输入和输出匹配网络进行优化, 实现低噪声、高线性度、宽频带和小回波损耗。在 1~3 GHz 频率范围内, 仿真结果表明, 低噪声放大器的噪声系数为 2.39~3.21 dB, 输入端反射系数小于 -10.6 dB, 输出端反射系数小于 -17.9 dB, 增益为 23.74~25.68 dB, 增益平坦度小于 ± 0.97 dB, 1 dB 压缩点输出功率大于 24.12 dBm, 三阶交调截取点输出功率大于 36.55 dBm。实际测试增益为 22.08~26.12 dB, 基本符合仿真结果。

关键词: 低噪声放大器; 氮化镓; 高电子迁移率晶体管; 负反馈

中图分类号: TN722.3

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191394

中文引用格式: 王华树, 肖知明, 马伟, 等. 基于 GaN HEMT 宽带低噪声放大器设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 60-64.

英文引用格式: Wang Huashu, Xiao Zhiming, Ma Wei, et al. Design of broadband low noise amplifier based on GaN HEMT[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 60-64.

Design of broadband low noise amplifier based on GaN HEMT

Wang Huashu, Xiao Zhiming, Ma Wei, Hu Wei

(College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: A high linearity wideband low noise amplifier(LNA) was designed using a gallium nitride(GaN) high electron mobility transistor(HEMT) devices to meet the requirements of different communication standards. The LNA uses a two-stage resistor negative feedback structure. In order to achieve low noise, high linearity, wideband and small return loss, the lumped parameter components and microstrip line are used to optimize the input and output matching network of LNA. In the frequency range of 1 to 3 GHz, the simulation results show that the noise figure of the LNA is 2.39~3.21 dB, the input reflection coefficient is less than -10.6 dB, the output reflection coefficient is less than -17.9 dB, the gain is 23.74~25.68 dB, the gain flatness is less than ± 0.97 dB, the output 1 dB compression point(OP1dB) is greater than 24.12 dBm, and the output third-order intercept point(OIP3) is greater than 36.55 dBm. The actual test gain is 22.08~26.12 dB, which is basically in accordance with the simulation results.

Key words: low noise amplifier; gallium nitride; high electron mobility transistor; negative feedback

0 引言

低噪声放大器被广泛用于无线通信、雷达、卫星通信^[1], 是射频接收机前端的重要组成部分, 对整个接收机系统的性能起着关键的作用。如图 1 所示, 低噪声放大器作为射频接收机前端的第一个有源电路模块, 其噪声系数、线性度和增益将影响接收机的灵敏度和动态范围, 从而影响整个系统的性能^[1-2]。近年来, 无线通信快速发展, 各种通信标准出现, 对低噪声放大器的频段和线性度提出了不同的要求。一个宽频带的低噪声能满足不同的通信标准的需求, 减小低噪声放大器的数量要求, 成为研究的热点。各种宽带低噪声放大器被研究者和学者提出, 宽带低噪声放大器常见方法有: 共栅结构、分布式结构、电阻负反馈结构、增益补偿匹配结构、平

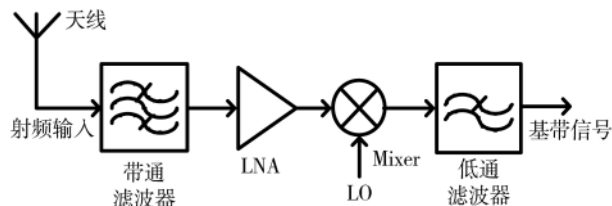


图 1 射频接收机前端的一种实现方式

衡式结构、有损匹配结构等^[3-4]。电阻负反馈电路结构简单、低功耗等特点, 成为低成本宽带低噪声放大器最常见方法。

半导体材料作为集成电路发展的基础, 在过去的几十年得到飞速发展。其中主要可以分为三个阶段: 以硅和锗等单晶体为代表的第一代半导体材料; 以砷化镓和磷化铟等化合物为代表的第二代半导体材料; 以氮化镓

* 基金项目: 广东省重点领域研发计划(2019B010128001)

微电子技术 Microelectronic Technology

和碳化硅等宽带隙为代表的第三代半导体材料^[5]。1993年,基于第三代半导体 GaN 的 HEMT 被发明后^[6],GaN 在射频微波领域得到广泛的应用。由于 GaN HEMT 器件拥有宽带隙、高饱和载流子速度和优异的导热等特性,被广泛应用于在微波功率电路^[2]。其后,GaN HEMT 被证明拥有低的噪声特性,并被应用在低噪声放大器领域^[7]。

本文使用 GaN HEMT 器件设计了两级电阻并联负反馈低噪声放大器,并通过仿真和测试探索 GaN 低噪声放大器的噪声和线性度等特性。

1 电路设计和分析

1.1 器件选择

低噪声放大器的设计和仿真在射频微波先进设计系统(Advanced Design System, ADS)中完成。ADS 提供电路仿真和电磁(electromagnetism, EM)仿真全部设计技术,是射频微波电路设计最常用工具。Gree Inc.公司的 GaN HEMT 器件 CGH40006S 用于设计低噪声放大器。在 5.8 GHz, 28 V 漏极电压和 100 mA 漏极电流工作条件下,CGH-40006S 增益超过 10 dB。研究者普遍认为 GaN HEMT 比较适用于高功率的功率放大器,然而 CGH40006S 器件被证明也适用于低噪声放大器的设计^[8-9]。Gree Inc.公司提供 CGH40006S 器件的 ADS 非线性模型。基于以上考虑,选择 CGH40006S 器件设计低噪声放大器,探究 GaN 低噪声放大器的噪声、宽带和线性度等特性。

1.2 电阻并联负反馈低噪声放大器

低噪声放大器主要由核心放大电路、偏置网络、匹配网络组成。图 2 是宽带低噪声放大器的原理图。在工作频率相对较低的窄带应用中,通过电路的优化,单级低噪声放大器可实现很高的增益。由于晶体管的最大增益随频率的增加而降低,单级低噪声放大器很难在宽频带范围内实现高增益。文中的低噪声放大器将两个电阻负反馈低噪声放大器级联实现宽频带和高增益。如图 2 所示,M1 和 M2 的晶体管设置为相同静态工作点。电感 $L_3 \sim L_6$ 阻止射频信号进入偏置电路,不属于匹配电路的组成部分。为了滤除电源信号中高频噪声,在靠近电源一侧并联不同值的电容到地。这些电容不会对低噪声放大器的仿真产生影响,在原理图中未画出。 C_3 与 R_1 , C_5 与 R_2 分别组成低噪声放大器的第一级和第二级负反馈

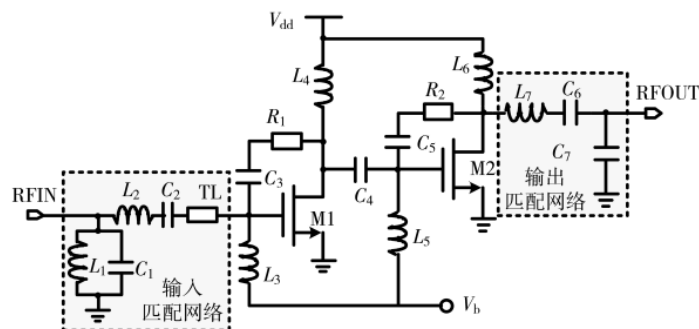


图2 电阻并联负反馈低噪声放大器原理图

回路。微带线 TL, 电感 L_1 和 L_2 , 电容 C_1 和 C_2 组成输入匹配网络; 电感 L_7 , 电容 C_6 和 C_7 组成输出匹配网络。

1.3 负反馈电路分析

负反馈电路通过改变低噪声放大器输入和输出阻抗,实现低噪声放大器的宽频带匹配。图 3 是低噪声放大器的小信号等效电路图,为了便于分析,输入和输出匹配网络在小信号等效电路图中省略。根据小信号等效电路图,可得第一级栅极处的输入阻抗 Z_{in} 和第二级漏极处的输出阻抗 Z_{out} :

$$Z_{in} = \frac{1 + R_1(1/R_{ds1} + 1/Z_1)}{SC_{gs1}(1 + R_1/R_{ds1} + R_1/Z_1) + gm_1 + 1/R_{ds1} + 1/Z_1} \quad (1)$$

$$Z_{out} = \frac{R_{ds2}(R_2 + Z_2) + Z_2 R_{ds2} SC_{gs2} R_2}{(1 + SC_{gs2})(R_{ds2} + R_2) + Z_2 + gm_2 R_{ds2} Z_2} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中 $S = j\omega$, Z_1 为低噪声放大器第一级放大器漏极往输出端得到的输入阻抗, Z_2 为低噪声放大器第二级栅极往输入端得到的输出阻抗。为了进一步简化输入与输出阻抗分析,忽略栅极和源极的寄生电容。式(1)和式(2)进一步简化得:

$$Z_{in} = \frac{R_{ds1}Z_1 + R_1(R_{ds1} + Z_1)}{gm_1 R_{ds1} Z_1 + Z_1 + R_{ds1}} \quad (3)$$

$$Z_{out} = \frac{R_{ds2}(R_2 + Z_2)}{R_{ds2} + R_2 + Z_2 + gm_2 R_{ds2} Z_2} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)知,通过调节负反馈电阻 R_1 和 R_2 改变低噪声放大器输入和输出阻抗,并实现低噪声放大器的阻抗匹配。

1.4 噪声分析

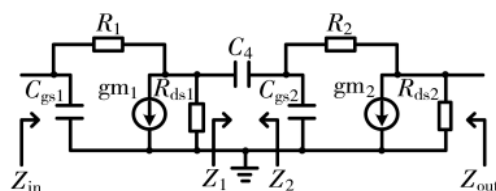


图3 低噪声放大器小信号等效图

图 4 是低噪声放大器原理框图。图中标注了每个界面的反射系数,便于低噪声放大器噪声系数的分析。通过噪声系数级联公式得到两级低噪声放大器的噪声系数:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} \quad (5)$$

式(5)中, F , F_1 , F_2 和 G_1 分别是低噪声放大器总噪声系数、第一级噪声系数、第二级噪声系数和第一级增益。由式(5)知,优化第一级放大器的噪声系数是提高多级低噪声放大器噪声性能的关键。式(6)是微波器件噪声系数一个更具体的表达式^[10]:

$$NF = NF_{min} + 4 \frac{R_n}{Z_0} \frac{| \Gamma_s - \Gamma_{opt} |^2}{(1 - | \Gamma_s |^2) \times | 1 + \Gamma_{opt} |^2} \quad (6)$$

式(6)中,在射频微波电路中 Z_0 通常为 50Ω , Γ_s 是源极反射系数, R_n 是微波器件的等效噪声电阻。理论上,当 Γ_s 等于最佳反射系数 Γ_{opt} 时,低噪声放大器可

微电子技术

Microelectronic Technology

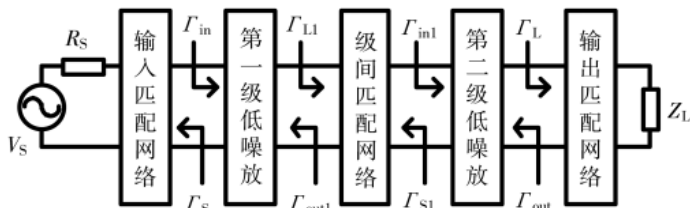


图4 低噪声放大器原理框图

获得最小噪声系数。

1.5 匹配电路分析

低噪声放大器的匹配需要考虑噪声和增益匹配。低噪声放大器的增益决定对后级电路噪声的抑制能力。对于实际带封装的晶体管器件,除了晶体管各个端之间的寄生电容,还会因封装引入寄生电容、电感和电阻。由式(1)和式(2)知,仅考虑晶体管栅极和源极之间的寄生电容,低噪声放大器的输入和输出阻抗已经很复杂。如果考虑其他寄生的影响,低噪声放大器的输入和输出阻抗将更加复杂。基于以上原因,仅依靠电阻负反馈实现宽频带,并保证各个参数性能是不现实的。为了折中各个情况,低噪声放大器的输入匹配被设计成图2所示。微带线 TL,电感 L_1 和 L_2 ,电容 C_1 和 C_2 构成了低噪声放大器的输入匹配网络。微带线 TL 实现低噪声放大器的阻抗变换,使低噪声放大器的阻抗匹配更容易。 L_2 和 C_2 组成一个具有带通滤波功能的匹配电路,实现带内阻抗匹配和带外信号增益抑制。 L_1 和 C_1 组成谐振匹配电路,进一步扩展低噪声放大器的带宽。低频时,并联的电感 L_1 降低输入阻抗的 Q 值,而电容 C_1 对匹配电路影响很小。高频时,并联的电容 C_1 降低输入阻抗的 Q 值,而电感 L_1 对匹配电路影响很小。基于以上的分析,通过合理选取各个元件值,得到满足各个性能要求的低噪声放大器。两级之间通过一个小电容 C_4 实现级间匹配,电容 C_4 可以改善低噪声放大器带内增益的平坦度。输出匹配电路由 L_7 和 C_7 组成一个低通特性 L 型匹配网络。 C_6 作为隔直电容,确保低噪声放大器的静态工作点。

2 低噪声放大器仿真结果

低噪声放大器的设计和仿真在 ADS 中完成。仿真结果是将 EM 仿真结果和带封装集总参数元件联合仿真得到的。设计选用 $35\ \mu\text{m}$ 厚的铜作为微带线,衬底是 $0.6\ \text{mm}$ 的 FR4。联合仿真使用 Murata 公司的电容和电感,负反馈电阻是 Vishay 公司的射频电阻。以上的电阻、电感和电容有 ADS 仿真模型或 SP 仿真文件可用。

图5~图11是低噪声放大器仿真结果。图5是低噪声放大器 S 参数仿真结果,在 $1\sim 3\ \text{GHz}$ 频率范围内,增益 $23.74\sim 25.68\ \text{dB}$,增益的平坦度小于 $\pm 0.97\ \text{dB}$,输入端反射系数 S_{11} 小于 $-10.6\ \text{dB}$,输出端反射系数 S_{22} 小于 $-17.9\ \text{dB}$ 。图6是稳定因子 μ 值仿真结果。 μ 在 $0.5\sim 4\ \text{GHz}$ 大于 2.292 ,表明低噪声放大器在整个频带内无条件稳定。图7是噪声系数仿真结果,在 $1\sim 3\ \text{GHz}$ 频率

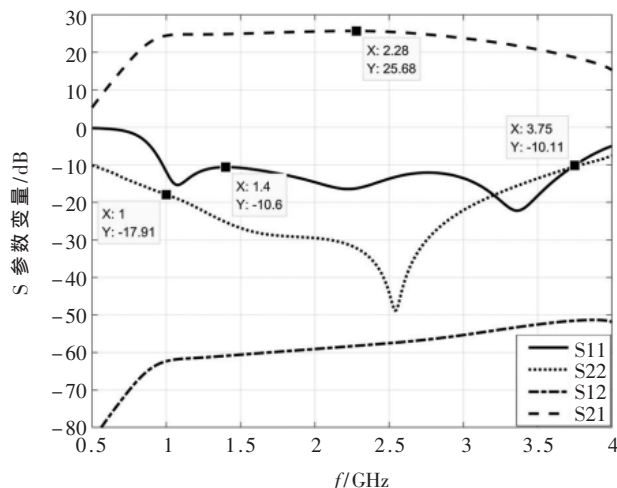


图5 S参数仿真结果

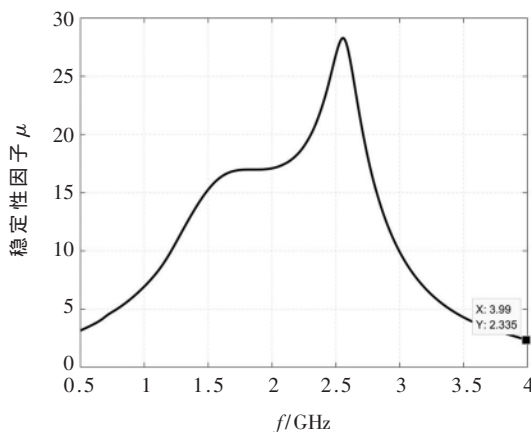
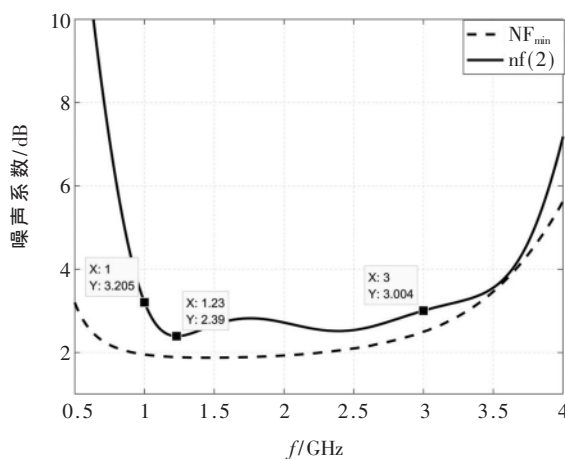
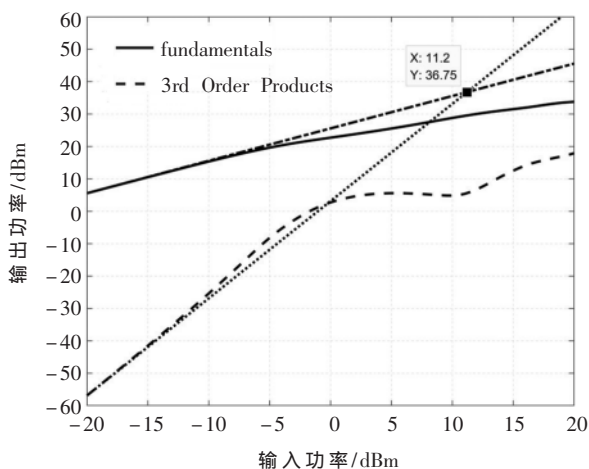
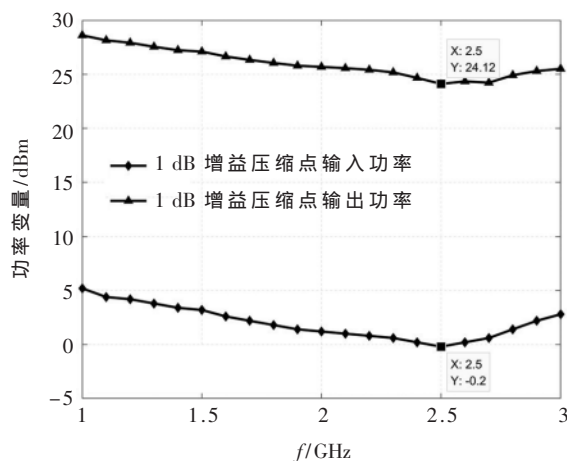
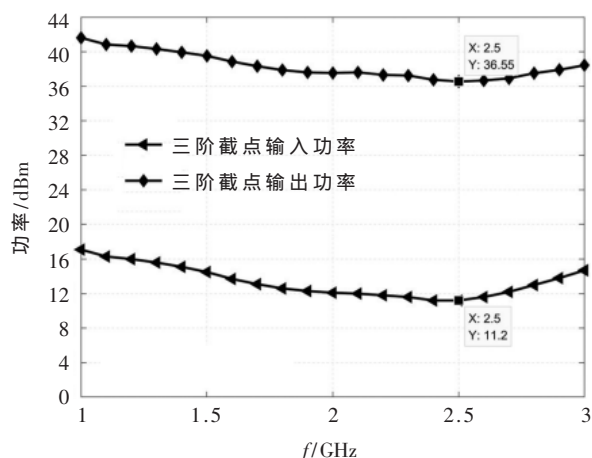
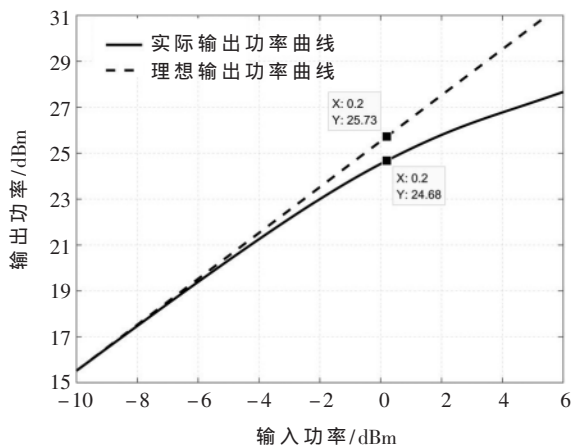
图6 稳定性参数 μ 值仿真结果

图7 噪声系数仿真结果

内,噪声系数为 $2.39\sim 3.21\ \text{dB}$ 。由图8知 $2.4\ \text{GHz}$ 频率下 $1\ \text{dB}$ 增益压缩点输出功率为 $24.68\ \text{dBm}$ 。图9是 $1\sim 3\ \text{GHz}$ 频率范围内 $1\ \text{dB}$ 增益压缩点,其 $1\ \text{dB}$ 增益压缩点输出功率大于 $24.12\ \text{dBm}$ 。由图10知在 $2.395\ \text{GHz}$ 和 $2.405\ \text{GHz}$ 互调输入信号下 $2.4\ \text{GHz}$ 三阶交调截取点输入功率为 $11.2\ \text{dBm}$,输出功率为 $36.75\ \text{dBm}$ 。图10是 $1\sim 3\ \text{GHz}$ 频率内三阶交调截取点仿真结果。在 $1\sim 3\ \text{GHz}$ 频



率内，三阶交调截取点输入功率大于 11.2 dBm，输出功率大于 36.55 dBm。

3 低噪声放大器测试结果

在仿真基础上，本文利用集总参数元件和 GCH40006S GaN 器件在 PCB 板级实现了一个宽带的低噪声放大器。图 12 是 PCB 板级低噪声放大器及实测平台。因为仪器

限制，本文只对带宽和增益测试和验证。通过 keysight N9000B 频谱分析仪和 N5171B 信号源对低噪声放大器的增益进行测试。图 13 是 0.5~3 GHz 频率下低噪声放大器增益仿真与测试结果对比。测试结果符合仿真预期。由于实际集总参数元件和 GaN 器件存在的偏差，PCB 板加工的误差，焊接时引入的寄生电容和电阻等因素，导致增益测试结果与仿真存在一些偏差。

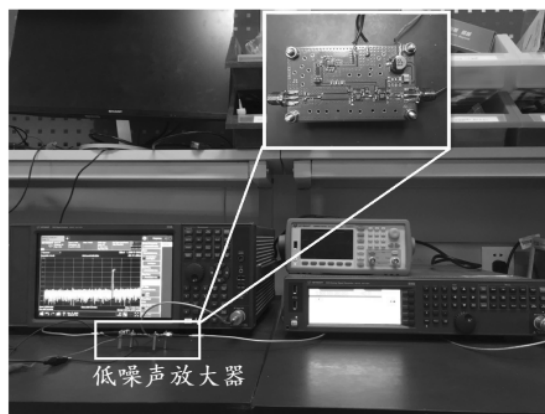
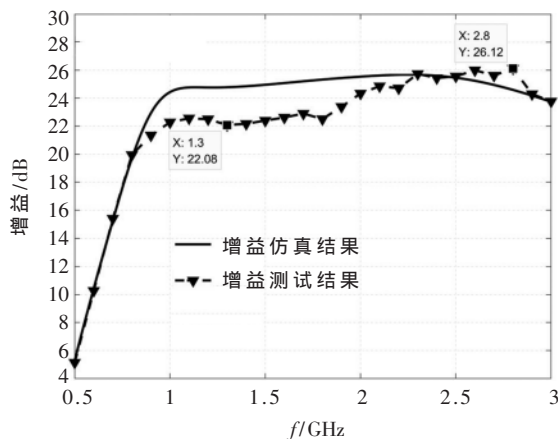


图 12 低噪声放大器及实验室测试平台



微电子技术

Microelectronic Technology

表 1 总结了本文低噪声放大器和部分参考文献 CMOS 低噪声放大器主要性能参数。与参考文献 CMOS 低噪声放大器相比,本文设计的 GaN 低噪声放大器拥有最大的增益,并且三阶交调截取点输入功率远超 CMOS 低噪声放大器,表明 GaN 低噪声放大器线性性能优于 CMOS 工艺的低噪声放大器。为了实现高增益和宽带匹配,低噪声放大器使用两级电阻负反馈结构,牺牲了部分噪声性能。此外,仿真使用非理想的集总参数元件,一定程度恶化了低噪声放大器的噪声性能。但由表 1 知, GaN 低噪声放大器依然保持较好的噪声性能。因此 GaN 低噪声放大器拥有很好的噪声特性。

表 1 与 CMOS 工艺低噪声放大器比较

文献	工艺	频率/GHz	NF/dB	增益/dB	IIP3/dBm
文献[11]	CMOS	0.04~1.2	2.1~3.4	16.4	0
文献[12]	CMOS	3~6.5	1.9~3.4	16	-13@4 GHz
文献[13]	CMOS	0.002~2.3	1.7	21	-1.5
文献[14]	CMOS	0.4~1	4.2	15.5~18	-21~-14
文献[15]	CMOS	2.65	3.5	10.8	-1.6
本文	GaN	1.0~3.0	2.39~3.21	23.7~25.7	>11.2

4 结论

本文使用 GaN 器件设计了一个宽带高增益的低噪声放大器。仿真结果表明, GaN 低噪声放大器有宽的带宽、高的增益、优异的线性度和较好的噪声性能。该电路满足多种通信标准的带宽要求,具有一定的使用价值,并且展示了 GaN 在低噪声放大器应用的潜力。

参考文献

- [1] QUAN X, LI Y, Fu M. Design of broadband low noise amplifier with high gain and high flatness[C]. 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT), 2018: 1-3.
- [2] SARATHKRISHNA S, BALAMURUGAN K, DEVI M N, et al. Design and analysis of GaN HEMT based LNA with CPW matching[C]. 2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks(WOCN), 2014: 1-4.
- [3] 徐晓宁, 胡兆刚. 基于 ADS 的 S 波段平衡式宽带低噪声放大器设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(12): 149-152.
- [4] 谢晓峰, 肖仕伟, 沈川. 0.02~2 GHz GaN 分布式功率放大器的原理及设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(24): 141-144.
- [5] 李亮, 沈羽, 柴晓宇, 等. 半导体材料在电子科学技术中的发展前景[J]. 中国新通信, 2019, 21(18): 60-61.
- [6] 赵正平. 发展中的 GaN 微电子(一)[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(3): 256-262.
- [7] 陈勇波, 周建军, 徐跃杭, 等. GaN 高电子迁移率晶体管高频噪声特性的研究[J]. 微波学报, 2011, 27(6): 84-88.
- [8] BASSAL A M, JARNDAL A H. GaN low noise amplifier

design for WiMax applications[C]. 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium(MMS), 2016: 1-4.

- [9] JARNDAL A H, BASSAL A M. A broadband hybrid GaN cascode low noise amplifier for WiMax applications[C]. 2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics(ICMAP), 2018: 1-2.
- [10] 唐健, 李俊生, 王晓亮. UHF/SHF 单片低噪声放大器的设计[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(7): 133-135, 139.
- [11] YU Y, YANG Y, CHEN Y E. A compact wideband CMOS low noise amplifier with gain flatness enhancement[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(3): 502-509.
- [12] LI C, LI M, HE K, et al. A Low-Power Self-Forward-Body-Bias CMOS LNA for 3 - 6.5-GHz UWB receivers[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010, 20(2): 100-102.
- [13] EL-NOZAH M, HELMY A A, SANCHEZ-SINENCIO E, et al. An inductor-less noise-cancelling broadband low noise amplifier with composite transistor pair in 90 nm CMOS technology[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 46(5): 1111-1122.
- [14] LIU H, ZHANG Z. An ultra-low power CMOS LNA for WPAN applications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(2): 174-176.
- [15] MA T, HU F. A wideband flat gain low noise amplifier using active inductor for input matching[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019, 66(6): 904-908.

(收稿日期: 2019-12-18)

作者简介:

王华树(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 射频低噪声放大器设计。

肖知明(1983-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 电源管理、模拟/射频集成电路设计。

马伟(1995-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 射频集成电路设计。

胡伟波(1982-), 通信作者, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 模/数、数/模转换器、无线感知芯片和系统实现, 第三代半导体, 生物芯片。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所