

一种 12 GHz 的高增益低噪声放大器

何谟谟¹, 胡钧剑², 高博², 贺良进²

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610090; 2. 四川大学 物理学院, 四川 成都 610065)

摘要: 通过分析 GaAs pHEMT 器件特性设计了一款两级高增益、低功耗的低噪声放大器。采用两级结构提高低噪声放大器的增益, 设计了一种共用电流结构, 降低了放大器的功耗, 同时降低电路噪声。输入、输出匹配均采用 LC 阶梯匹配网络, 具有良好的匹配性, 并使用 CAD 软件对电路进行设计优化。电路仿真结果表明, 在中心频率 12 GHz 下实现了增益为 27.299 dB、噪声系数为 0.889 dB、 S_{11} 和 S_{22} 均小于 -10 dB 的性能, 工作带宽为 600 MHz。此低噪声放大器作为 12 GHz 频段的接收机的前端设计研究, 具有一定意义。

关键词: GaAs pHEMT; LNA; 共电流两级结构; 高增益; LC 阶梯匹配网络

中图分类号: TN702

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212377

中文引用格式: 何谟谟, 胡钧剑, 高博, 等. 一种 12 GHz 的高增益低噪声放大器[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 104-107.

英文引用格式: He Moxu, Hu Junjian, Gao Bo, et al. A 12 GHz low noise amplifier with high-gain[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 104-107.

A 12 GHz low noise amplifier with high-gain

He Moxu¹, Hu Junjian², Gao Bo², He Liangjin²

(1. Chengdu Aircraft Industry(Group) Co., Ltd., Chengdu 610090, China;

2. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A two-stage low noise amplifier(LNA) with high gain and low power is proposed by analyzing the characteristics of GaAs pHEMT devices. A two-stage structure is used to increase the gain of the low noise amplifier, a shared current structure is presented to reduce the power consumption of the amplifier and the circuit noise at the same time. Input and output matching adopt LC ladder matching network, which has good matching performance. The circuit is simulated using CAD software. The circuit simulation results show that the gain is 27.299 dB, the noise figure is 0.889 dB, S_{11} and S_{22} are both less than -10 dB at the center frequency of 12 GHz, and the working bandwidth is 600 MHz. This low-noise amplifier has a certain significance as the front-end design research of the receiver in the 12 GHz frequency band.

Key words: GaAs pHEMT; LNA; common current two-stage structure; high gain; LC ladder matching network

0 引言

随着无线通信的快速发展, 低频段已不能满足应用需求, 使用频段逐渐向高频段发展。在 X~Ku 波段中, 12 GHz 频段被广泛用于卫星广播业务和高清电视数字广播通信系统, 同时, 12 GHz 频段还有望被用于 5G 通信服务^[1-2]。除此之外, 该频段也被用于个人医疗健康检测, 从生物电信号中提取特征信息以实时监测人体的健康状况^[3]。12 GHz 低噪声放大器是该类应用研究中不可缺少的单元。

作为射频前端的第一个有源电路, LNA 需要有高增益、低噪声以及好的信噪比。在高频段, LNA 的设计变得困难, 各项性能指标难以同时达到更好, 对高增益、低噪声、高集成度等性能的放大器提出了更高的挑战^[4]。

目前报道的文献中, 大都采用多级级联以提高放大器的增益, 级间需要匹配增加了电路的复杂程度以及芯

片面积。在文献[5]中, 使用了共源共栅结构和共源级设计 LNA, 实现了较高的峰值增益, 但是, 其使用了三级结构, 而且工作频率较低; 文献[6]中也使用了共源共栅结构设计 LNA, 可工作在较高的频率下, 由于使用的 CMOS 工艺在高频下的局限性, 无法实现较高的增益和较低的噪声系数; 文献[7]中基于 GaN 工艺设计的 LNA 在 X 波段下可实现较高的增益, 但是噪声系数和功耗很高; 文献[8]中采用级联共源级实现的 LNA, 具有较低的功耗和噪声, 但是增益不是很高。

目前, 已有 MESFET、HEMT、GaAs pHEMT 等多种高性能低噪声的半导体结构应用于放大器的设计。其中, GaAs pHEMT 晶体管, 它在未掺杂 GaAs 层和掺杂 AlGaAs 层中引入了 InGaAs 薄层, 这种特殊的结构可使电子聚集在 InGaAs 层的半导体界面附近, 由于两侧是高能带材料, 因此电子在聚集层中具有非常高的流动速度。这

种结构器件具有高的饱和电子速度、输出跨导、器件电流等,从而可获得更高的增益和较低的噪声系数,并且具有更好的频率性能^[9]。

本文的高增益低噪声放大器基于 0.25 μm GaAs pHEMT 的 TGF2040 晶体管进行设计。该晶体管的工作频率范围覆盖 DC-20 GHz,在 12 GHz 时有 13 dB 的增益,并且在 2 V、32 mA 的直流工作条件下最小噪声系数为 0.81 dB。设计中参考共源共栅结构提出一种两级增益结构,在 12 GHz 频段实现了 27 dB 以上的增益,同时两级共用电流技术降低了电路功耗。

1 低噪声放大器的设计

低噪声放大器在设计过程中,需要考虑噪声系数、增益、稳定性等多种因素,提高电路稳定性的同时会使增益降低。在反射系数 Γ_s 的复平面上画出所选器件的等噪声系数圆和等增益圆,它们各自的最佳位置不一致,不能同时实现最小噪声系数和最大功率增益,因此在进行设计时,需要对噪声和功率进行折中设计。

1.1 电路结构

传统的高增益设计中,两级 LNA 设计采用两个共源级级联构成,这种结构的一个重要特性是增益为两个级联结构的增益积,具有高增益,但功耗也增加。

本次设计的电路结构如图 1 所示,借鉴共源共栅结构,将共源级输出通过电容耦合到共栅器件的输入端,并采用电感串联。通过改进后的结构形成了两个共用电流的共源级级联结构。射频信号通过电容耦合沿实线路径进行传输,电感设计阻止射频信号,直流偏置电流流经虚线路径为两个晶体管所共用,达到节省功耗的目的。第一级晶体管的源端串联负反馈电感 L_1 ,提高了电路的稳定性,并且可以同时实现输入端共轭匹配和最小噪声匹配。第一级的栅-源之间并联电容 C_1 ,用来匹配栅-源之间的寄生电容 C_{gs} ,调节最佳的输入阻抗。级联电感 L_2 改变了第一级放大器的输出路径,并作为第二级的源端负反馈,提高电路的稳定性。电容 C_2 可以提高电路在高频下的增益和带宽。电容 C_3 作为交流电路中的参考地,影响交流通路中整个电路的稳定性。

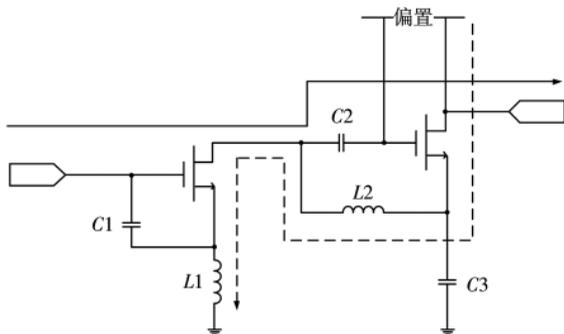


图 1 基本电路结构

1.2 稳定性分析

放大电路的设计目标之一是电路的稳定,以保证放

大器能够稳定的在工作频段内完成放大功能。提高电路稳定性的方法之一是在源端串联负反馈电感,适当地调节电感可使电路的最佳噪声源反射匹配到共轭阻抗^[10]。本设计采用源级退化电感增加电路的稳定性。

放大电路是否稳定常采用绝对稳定系数 K 来判断,电路 K 绝对稳定的充分必要条件为:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1 \quad (1)$$

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| < 1 \quad (2)$$

通过 CAD 软件对电路进行稳定性模拟仿真,结果如图 2 所示,在目标频率范围内,稳定系数 K 始终大于 1,因此该电路处于稳定状态。

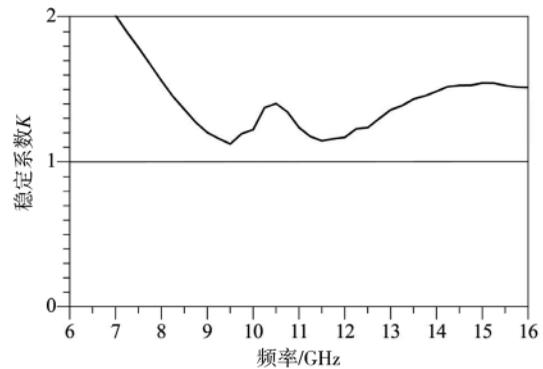


图 2 稳定系数 K 的曲线图

1.3 匹配电路的设计与分析

电路的输入端和输出端均采用 LC 阶梯匹配网络,拓扑如图 3 所示。该匹配网络做电路匹配时有较小的 Q 值,在宽频带内可以同时获得低噪声系数和高输出功率增益,实现良好的输入输出匹配^[11]。

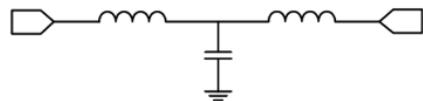


图 3 LC 阶梯匹配网络

电路的等噪声系数圆和等增益圆如图 4 所示。电路输入端为实现最小噪声系数,输入端阻抗定义为 m_1 点的最小噪声系数阻抗,并匹配到 50 Ω ;输出端匹配按照增益最佳匹配进行设计。

通过合理地设计 LC 阶梯匹配网络可实现电路的输入输出匹配。图 5 显示了模拟的 S_{11} 和 S_{22} 在 11.7~12.3 GHz 内满足 $\Gamma=0.316$,即回波损耗优于 -10 dB,表明设计的 LC 阶梯匹配网络实现了良好的输入输出匹配。

1.4 电路性能分析

电容 C_1 并联在第一级的栅-源之间,用来补偿栅源的寄生电容 C_{gs} ,调节最佳的输入匹配。通过对 C_1 进行变量分析,得到不同的电容值对 S_{11} 的影响,如表 1 所示,取 C_1 的值为 0.35 pF 时,可得到 $S_{11} < -10$ dB 的最大的带宽为 2 GHz。

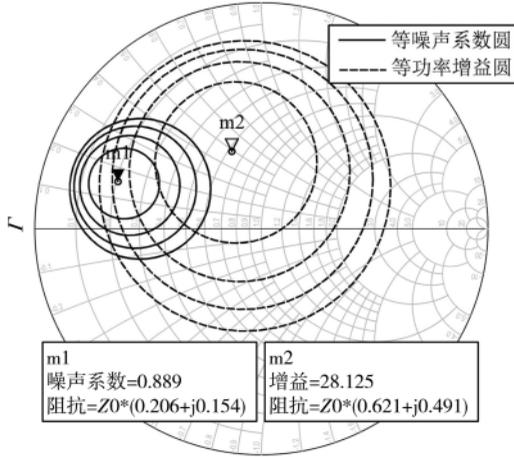


图4 等噪声系数圆和等功率增益圆

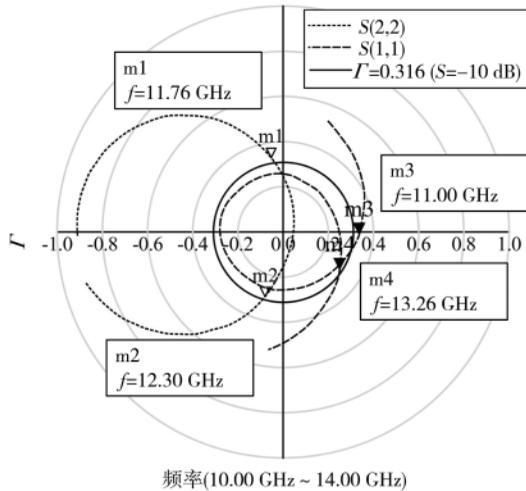


图5 基于LC阶梯匹配网络的 S_{11} 和 S_{22} 仿真结果 (Γ 为反射系数)

表1 $C1$ 对 S_{11} 参数的影响

$C1/\mu\text{F}$	0	0.1	0.2	0.3	0.35	0.4	0.5	0.6
$S_{11}\text{-BW}/\text{GHz}$	1	1.1	1.1	1.9	2	1.9	1.7	1.2

级联的电容 $C2$ 与电感 $L2$ 以不同的作用对电路的增益和回波损耗有影响。表2和表3分别为电容 $C2$ 和电感 $L2$ 对增益(在12 GHz时)以及 S_{11} ($S_{11} < -10$ dB)和 S_{22} ($S_{22} < -10$ dB)的影响。随着电容和电感从小到大的变化,增益先增大后减小,同时考虑 S_{11} 和 S_{22} 小于-10 dB的带

表2 $C2$ 对增益、 S_{11} 、 S_{22} 参数的影响

$C2/\mu\text{F}$	增益/dB	$S_{11}\text{-BW}/\text{GHz}$	$S_{22}\text{-BW}/\text{GHz}$
0.1	6.066	0	0
0.3	17.475	0	0
0.5	25.306	1.2	0.5
0.6	27.605	2.2	0.5
0.7	28.059	0.9	0.2
1	25.536	0.8	0

表3 $L2$ 对增益、 S_{11} 、 S_{22} 参数的影响

$L2/\text{nH}$	增益/dB	$S_{11}\text{-BW}/\text{GHz}$	$S_{22}\text{-BW}/\text{GHz}$
0.2	23.794	1.1	0
0.25	27.915	1.6	0.3
0.29	28.041	2	0.4
0.3	27.738	2.1	0.5
0.31	27.380	2.2	0.5
0.33	26.601	2.4	0.6
0.35	25.837	2.5	0.65

注:增益取12 GHz时的值, S_{11} 和 S_{22} 的带宽取小于-10 dB。

宽,取 $C2=0.6 \mu\text{F}$, $L2=0.31 \text{ nH}$,可使电路在增益最大化的同时,输入和输出回波损耗都最佳。

2 电路仿真结果

整体电路结构如图6所示,器件的直流工作点选取为: $V_{\text{ds}}=2 \text{ V}$, $I_{\text{ds}}=32 \text{ mA}$ 。

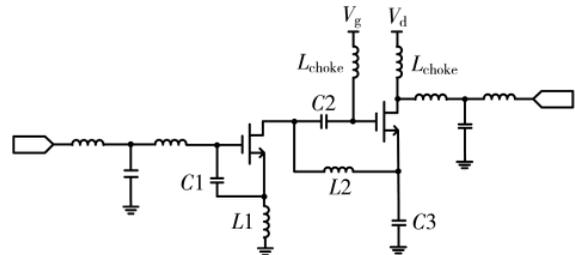


图6 整体电路结构图

使用CAD软件进行参数仿真,仿真结果如图7所示,在12 GHz放大器的增益达到27.299 dB,最小噪声系数为0.889 dB,同时 S_{11} 和 S_{22} 都小于-10 dB,说明该电路在中心频率为12 GHz时有很好的匹配性,覆盖范围大概为11.7~12.3 GHz。

表4展示了本次设计与同频带内的LNA的比较。所设计的共电流型两级级联结构LNA在12 GHz的频带内具有最高的增益、最小的噪声系数(NF)以及较小的功耗。尽管所设计的LNA频带较窄,仅为600 MHz左右,但是满足12 GHz中心频带的应用需求。

表4 不同文献中设计的低噪声放大器电路性能参数对比

文献	带宽/GHz	增益/dB	NF/dB	功耗/mW
文献[3]	6~18	14	2.4	-
文献[12]	8~12	18	1.5~2.8	72
	12~18	20	3.3~4.4	
文献[6]	8~12	24	4.5~5	100
文献[7]	10.7~13.1	20.6	1.3	43.2
本设计	11.7~12.3	27.2	<1	64

3 结论

本文基于 $0.25 \mu\text{m}$ GaAs pHEMT的TGF2040器件,借鉴了共源共栅结构,通过改进形成共电流型两级低噪

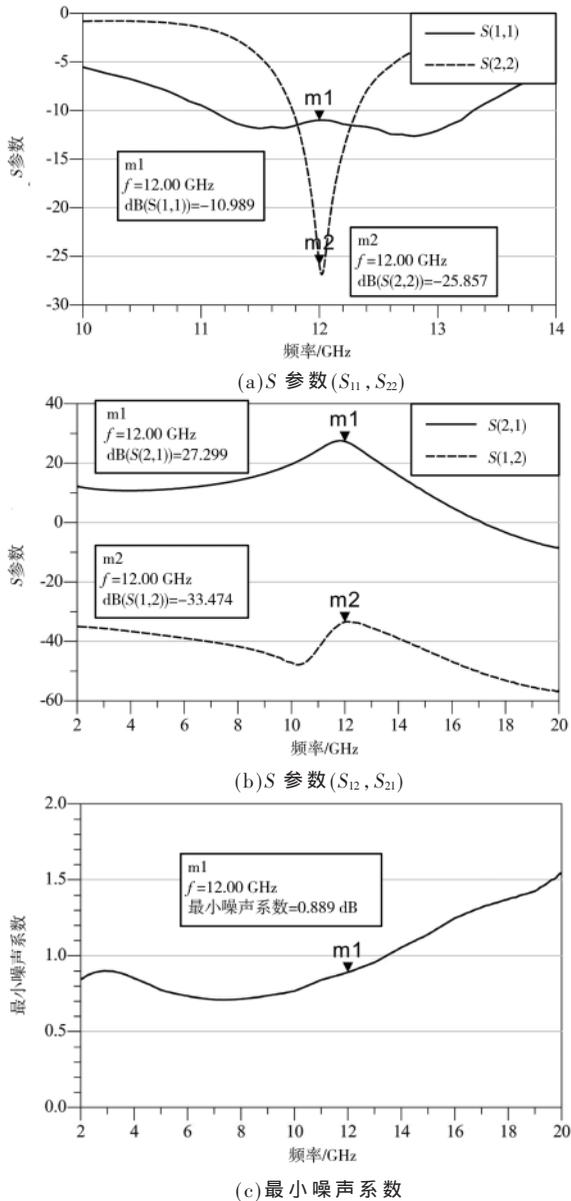


图7 仿真结果

声高增益放大器。用 LC 阶梯网络实现电路的输入、输出匹配,两级结构中都引入级负反馈增加了系统稳定性。通过 CAD 仿真,该放大器在 12 GHz 时有 27.299 dB 的高增益,噪声系数为 0.889 dB,在 11.7~12.3 GHz 的频率范围内, S_{11} 和 S_{22} 均小于 -10 dB,电路稳定,具有良好的性能。

参考文献

- [1] GB/T 14434-1993, 12GHz 频段卫星广播业务(BSS)及其馈线链路的规划参数[S].1993.

- [2] RUSTAKO A J. An earth-space propagation measurement at crawford hill using the 12-GHz CTS satellite beacon[J]. The Bell System Technical Journal, 2013, 57(5): 1431-1448.
- [3] Wang Yu, Cui Jie, Zhang Renli. A C to Ku band ultra-wide-band LNA with RLC-feedback and T-matching network[C]// 2019 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference, 2019.
- [4] 雷华奎, 李志强, 王显泰, 等. 一种 2.2~4 GHz 高增益低噪声放大器[J]. 微电子学, 2021, 51(4): 471-476.
- [5] CHOU C F, CHANG Y C, WANG H, et al. High gain fully on-chip LNAs with wideband input matching in 0.15- μ m GaAs pHEMT for radio astronomical telescope[C]// 2015 European Microwave Conference (EuMC 2015). IEEE, 2015.
- [6] ARSALAN M, AMIR F, KHAN T. pHEMT LNA design and characterization for 4G applications[C]// IEEE International Multi Topic Conference. IEEE, 2015.
- [7] KIM D, LEE D H, SIM S, et al. An X-band switchless bidirectional GaN MMIC amplifier for phased array systems[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(12): 878-880.
- [8] XIE C, YU Z, TAN C. An X/Ku dual-band switch-free reconfigurable GaAs LNA MMIC based on coupled line[J]. IEEE Access, 2020, PP(99): 1.
- [9] 陆雨茜, 陈华康, 高博, 等. K 波段高功率放大器 MMIC 设计[J]. 电子与封装, 2018, 18(10): 26-28, 35.
- [10] RAY A K, SHIT R C. Design of ultra-low noise, wideband low-noise amplifier for highly survival radar receiver[J]. IET Circuits Devices & Systems, 2016, 10(6): 473-480.
- [11] HU J, MA K, MOU S, et al. Analysis and design of a 0.1-23 GHz LNA MMIC using frequency-dependent feedback[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019, 66(9): 1517-1521.
- [12] HE M J, YANG P, LI B. A reconfigurable low noise amplifier for X/Ku band[C]// 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2018.

(收稿日期: 2021-11-25)

作者简介:

何谟谓(1970-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 电磁场与电磁波、信号与系统、电磁干扰与抑制、供电兼容性等。

胡钧剑(1997-), 通信作者, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 化合物半导体器件和电路设计, E-mail: 1169025483@qq.com。

高博(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 基于硅基或化合物半导体工艺技术研究高速、低功耗集成电路和系统。



扫码下载电子文档

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