

文章编号: 1672-2892(2011)01-0044-05

0.2 GHz~3.2 GHz 超宽带低噪声放大器的研制

肖勇¹, 吴中川², 白波¹, 刘杰¹

(1.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2.海军驻绵阳地区军事代表室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了降低接收前端的噪声, 设计并制作一种超宽带低噪声放大器。基于负反馈技术和宽带匹配技术, 利用 Avago ATF-54143 PHEMT 晶体管设计了放大器电路。运用 ADS2009 对重要指标进行仿真及优化。实测结果表明, 在 0.2 GHz~3.2 GHz 这 4 个倍频程的超宽带范围内, 增益大于 24 dB, 增益平坦小于 ± 2 dB。在 0.2 GHz~2GHz 内, 噪声系数(NF)小于 1.2 dB; 在 2 GHz~2.6 GHz 内, $NF < 1.5$ dB; 在 2.6 GHz~3.2 GHz 内, $NF < 2$ dB。该放大器性能良好, 满足工程应用要求, 可用于通信系统的接收机前端。

关键词: 超宽带; 低噪声放大器; 负反馈

中图分类号: TN722.3

文献标识码: A

Development of ultra-broad band LNA in 0.2 GHz–3.2 GHz

XIAO Yong¹, WU Zhong-chuan², BAI Bo¹, LIU Jie¹

(1.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China;
2.Mianyang Representative Office of Navy, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: To reduce the noise of receiving front-ends, the design and fabrication of an ultra-wide band Low Noise Amplifier(LNA), were presented based on negative feedback and wide band matching technologies. The amplifier tube ATF-54143 made by Avago was chosen for this design, whose key indexes were simulated and optimized by using ADS2009. The test results indicate that the gain is greater than 24 dB; the flatness is lower than ± 2 dB over the four octaves 0.2 GHz–3.2 GHz. Noise Figure(NF) is below 1.2 dB over 0.2 GHz–2 GHz; and less than 1.5 dB over 2 GHz–2.6 GHz; less than 2 dB over 2.6 GHz–3.2 GHz. The good performance of this amplifier satisfies the requirement of engineering application, and it can be applied to the receiver front-end of communication systems.

Key words: ultra-wide band; Low Noise Amplifier; negative feedback

低噪声放大器(LNA)主要用于射频微波电路接收前端, 对微弱的接收信号进行放大, 其性能的优劣直接影响着整个接收链路的噪声系数(NF)、灵敏度和线性度等重要指标, 从而影响通信信号质量^[1]。LNA设计的基本要求是^[2]: 极低的 NF、较高的增益、良好的稳定性和较好的增益平坦度。随着雷达系统以及卫星通信、宽带接收机等各种无线通信设备性能的提升, 对 LNA 各项指标的要求越来越严格, 对带宽也提出了更高的要求。各项指标之间的折中选择是设计中的重点和难点。笔者利用微波 CAD 软件 ADS2009, 设计制作了一种微波混合集成 LNA, 在 4 个倍频程的工作频带内, 具有良好的 NF、增益及平坦度。

1 超宽带 LNA 设计要求

工作频段 0.2 GHz~3.2 GHz, 增益大于 24 dB, 增益平坦小于 ± 2 dB, $NF < 2$ dB。本设计采用两级放大器级联的结构。放大电路的第 1 级选用低噪声系数晶体管, 降低 NF。第 2 级选用宽带高增益放大器, 提高增益。在第 1 级晶体管上采用负反馈设计, 增加带宽。末级采用电感—电阻结构补偿电路, 调整增益平坦度。

2 超宽带 LNA 的设计理论

2.1 噪声系数

收稿日期: 2010-11-12; 修回日期: 2010-12-21

放大器的 NF 可表示为^[1,3]:

$$NF = \frac{P^T}{P^I} = \frac{GKT_0B + GKT_eB}{GKT_0B} \quad (1)$$

式中: P^T 为放大电路的输出总噪声功率; P^I 为 P^T 中由输入端电阻的热噪声导致的噪声可用功率; G 为放大电路的可用功率增益; K 为玻尔兹曼常数; B 为频带宽度; T_0 为标准室温; T_e 为放大电路输入端的等效噪声温度。

当两级放大电路级联时, 设可用功率增益分别为 G_1 和 G_2 , NF_1 为其第 1 级的噪声系数, NF_2 为其第 2 级的噪声系数, T_{e1} 和 T_{e2} 分别为两级的等效噪声温度, 电路示意图 1^[4]。

根据 NF 的定义, 级联放大电路的 NF 可表示为:

$$NF = \frac{P_{NO2}}{P_1} = \frac{P_{NO1}G_2 + G_2KT_{e2}B}{P_1} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} \quad (2)$$

式中: P_{NO1} 为第 1 级输出总噪声功率; P_{NO2} 为第 2 级输出总噪声功率。

由此可见, 该电路整体 NF 主要受第 1 级噪声和增益影响, 因此是设计的关键。第 1 级的 NF 越小, 增益越大, 总的 NF 就越小。但是增益太大容易造成后级电路饱和, 因此必须对 NF 和增益折中设计。

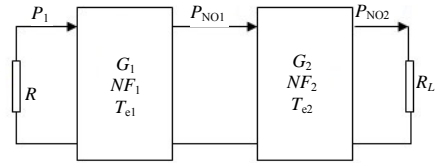


Fig.1 Sketch of cascade amplifier
图1 两级放大器电路示意图

2.2 稳定性

由于内部反馈的存在, 工作在较高频段的放大管会随着其反馈量的积累, 而产生自激。为了抑制自激现象, 保证放大器的正常工作, 设计微波宽带 LNA 必须考虑稳定性。

根据微波网络的理论, 晶体管放大器有 2 种稳定条件: 绝对稳定和条件稳定。

对于二端口网络的稳定性, 通常用 Rollett 稳定系数 $K-\Delta$ 来判定^[5]:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|}{2|S_{12}S_{21}|} \quad (3)$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (4)$$

同时满足 $K > 1$ 和 $|\Delta| < 1$ 时, 放大电路绝对稳定。如果不能同时满足这 2 个条件, 该电路将处于潜在条件稳定状态。为避免可能发生的自激振荡, 可以通过采取一定的措施, 使得整个工作频率范围内计算的 Rollett 稳定系数满足绝对稳定条件, 确保电路绝对稳定。

2.3 增益及驻波

放大器的级数是由实际所需求的电路增益决定的。当一级电路设计不能满足增益要求时, 可选择多级级联放大电路结构。从前面 NF 的分析中可知, 多级 LNA 的设计中, 由于前级电路的噪声对整体噪声起决定性影响, 设计时应更注重低的 NF。所以, 在后级电路设计中可更偏重增益指标的实现, 从而达到兼顾高增益、低噪声的指标要求。

如果放大器的工作频带很宽, 为满足增益要求, 就不能仅仅利用匹配网络来对电路进行增益补偿。可以通过应用有耗匹配技术和负反馈技术等, 获得较宽的工作频段和增益平坦度。

并联负反馈和串联负反馈是最常用的负反馈放大器结构。极间并联负反馈可以调整放大器增益^[6-7], 拓展工作频带。源极串联负反馈会减小增益, 增加放大器的稳定性、线性度和输入、输出驻波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)^[8], 其电路见图 2。

但是, 由于微波晶体管自身具有 6 dB/倍频程的增益滚降, 为了满足增益指标, 必然要牺牲一定的噪声性能, 输入、输出端口的失配也会导致端口驻波性能恶化。

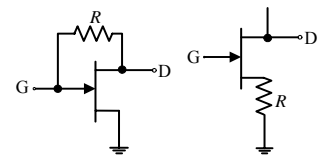


Fig.2 Parallel and series circuit of negative-feedback amplifier
图2 并联、串联负反馈放大器电路

3 电路结构设计

超宽带 LNA 的实现, 最关键的就是采用合理的措施补偿 6 dB/倍频程的增益滚降。宽带放大器目前主要有: 分布放大器、平衡放大器、有耗匹配放大器、负反馈放大器^[9]。而负反馈放大器相比于前几种, 以增加少量噪声为代价, 在宽频带内能获得较好的增益平坦度和端口驻波系数, 因而得到了广泛的应用。

3.1 器件选取

放大电路的第1级选用 Avago 公司的 ATF54143 晶体管, 它的静态工作点为 3 V, 60 mA, V_{dd} 设置为 +5 V。除具有很低的噪声之外, 它还具有高增益、高线性度等特性。与耗尽型管相比, 它不需要负栅极电压, 可以简化布板的复杂性, 适用于本设计。

第2级选用的放大器为 RFMD 公司的 SBB-4089Z, 它在 50 MHz~6 000 MHz 频率范围内可以使用。当对其提供 +5 V 电压时, 工作电流为 80 mA。在 3.5 GHz 以下, 增益为 15.5 dB, 增益波动小于 2 dB, S_{11} 和 S_{22} 均优于 -10 dB, P1dB 均大于 17 dB, 其 $NF < 5$ dB。由于其处于电路第2级, 只要前级 NF 设计良好且有一定的增益, 放大器整体指标可以满足要求。

3.2 稳定性设计

稳定性是设计放大器必须首先考虑的问题。为提高稳定性, 腔体的横向宽度要小于最高频率的半波长, 且尽量减小腔体尺寸^[10], 避免产生波导传输效应。可用 CST 软件仿真, 优化腔体尺寸。

3.3 负反馈电路设计

在漏极和栅极之间并联反馈电阻、电容和电感, 并联负反馈放大器的增益由 R_{fb} 决定, 而不是由晶体管的参数决定^[6,11]。负反馈以牺牲放大器的增益为代价, 可以减小晶体管两端口的 S_{11} 和 S_{22} 的幅度, 使得宽带匹配更容易实现, 增强低频稳定性。可以通过负反馈来提高增益平坦度, 其作用主要是调节 NF 和端口驻波。为达到更好的负反馈性能, RC 反馈回路应使用 0402 小封装器件, 焊盘尺寸尽可能小, 距离尽可能近。为提高稳定性, 可以在源极串联一个电阻或电感形成电流串联负反馈。用一段短路微带线实现电感负反馈^[4], 可以避免串联电阻引入热噪声。电路拓扑结构见图 3。

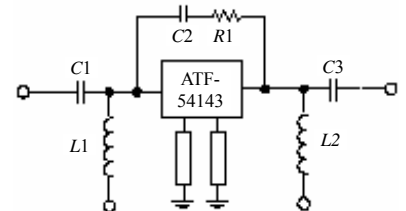


Fig.3 Negative-feedback and matching structure of ATF54143
图3 ATF54143负反馈及匹配结构

3.4 匹配电路设计

LNA 的主要技术指标 NF、驻波系数、增益及增益平坦度主要由电路的匹配决定。两级低噪声放大电路的输入匹配应按最佳噪声设计, 输出匹配电路匹配到 50Ω , 实现最佳功率匹配。同时, 应考虑到增益平坦度的要求。本文在匹配电路中设计了一种幅度均衡电路^[12]。这实际上是一个带有负载的高通网络, 把低频段多余的功率送到电阻上, 而让高频信号无损耗地通过, 从而达到补偿每倍频程 6 dB 的增益损耗, 得到平坦的增益。

4 仿真与实际测试结果

对 PHEMT 晶体管 ATF-54143 和 SBB-4089Z 单片放大芯片组成的 LNA, 用 ADS2009 软件对 S 参数和噪声参数进行仿真。为兼顾增益、平坦度、噪声和 VSWR 等指标, 应对 S_{21}, S_{11}, S_{22} 和 NF 进行设置。优化的对象应包括主要电路的分布参数、金属化通孔、不连续节点和集总参数元件值等。仿真电路拓扑结构见图 4。

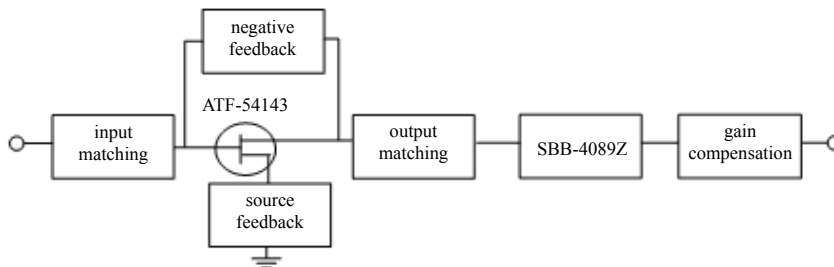


Fig.4 Structure of simulation circuit
图4 仿真电路结构

从仿真电路结构可以看出, 电路主要由1个串联接地负反馈、1个极间并联负反馈以及1个增益补偿网络组成。考虑到面积和性能因素, 所用电阻、电容均采用微波片状元件。为了防止传输线效应, 电阻、电容的尺寸应该尽可能选择小封装且紧贴于放大器管脚根部。串联接地负反馈用于增加放大器的稳定性; 并联负反馈所选用的电阻

决定了放大电路增益的大小;末级的增益补偿网络用于拓展带宽,增加增益平坦度。通过以上设计,达到衰减低频段增益以改善平坦度,调整驻波和噪声的目的。

经过计算,得到所用电阻、电容、电感值的初步结果后,用较精确的 MuRata 电容、电感模型代替 ADS2009 自带的理想化模型。经过仿真优化,该放大器在 0.2 GHz~3.2 GHz 频率范围内,输入、输出匹配 S_{11} 和 S_{22} 基本优于 -10 dB,增益大于 27 dB,增益平坦度为 1.5 dB, $NF < 1.6$ dB,仿真结果的各项指标均达到预期设计要求。各参数仿真结果见图 5 和图 6。

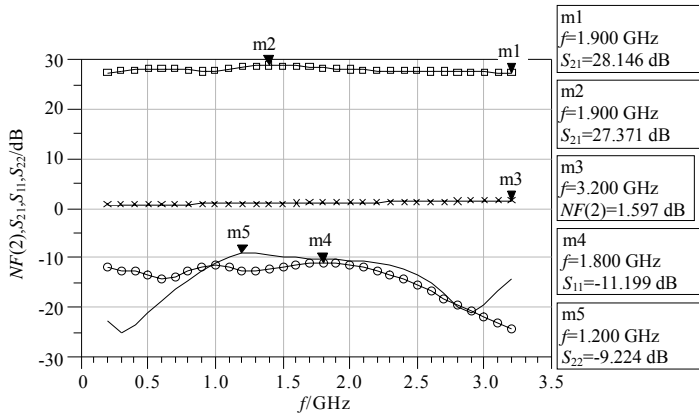


Fig.5 Simulation results of NF and parameter S
图5 NF和S参数仿真结果

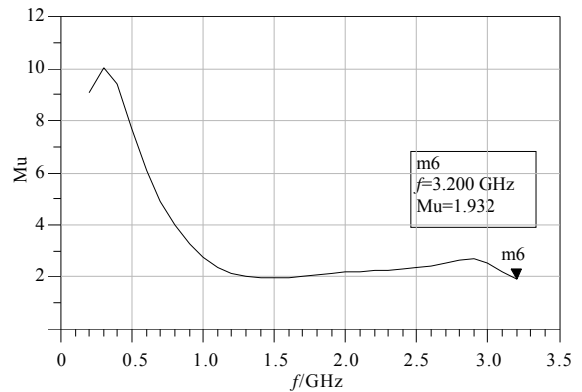


Fig.6 Simulation result of stability factor
图6 稳定性因子(Mu)仿真结果

选用厚度为 1 mm,介电常数 $\epsilon_r = 9.2$,其表面的金属层厚度为 0.037 5 mm 的 TMM10 介质基片加工该放大器。对应于 50 Ω 的标准阻抗,微带线宽度为 1 mm。装配好的 LNA 实物见图 7。

使用噪声测试仪 Agilent N8975A 及 Anritsu 公司的矢量网络分析仪 MS4623B 进行测试。表 1 列出了部分最终测试结果。测试结果表明,在 0.2 GHz~3.2 GHz 的超宽带范围内,增益均大于 24 dB,增益平坦小于 ± 2 dB, $NF < 2$ dB,输入、输出驻波系数大部分在 2 以下,实际测试结果与仿真设计结果比较吻合。

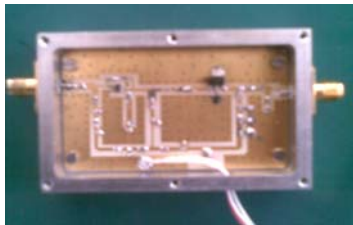


Fig.7 Fabricating circuit of LNA
图7 LNA实际电路

表1 超宽带LNA测试结果

Table1 Measurement results of ultra-broad band LNA				
f/GHz	NF/dB	gain/dB	VSWR(S_{11})/dB	VSWR(S_{22})/dB
0.2	1.2	24.1	1.3	1.6
0.5	1.0	25.1	1.1	1.9
0.8	1.1	25.2	2.0	2.0
1.1	1.1	28.1	1.7	2.1
1.4	1.0	27.3	2.1	1.9
1.7	1.0	26.5	3.1	1.2
2.0	1.1	26.4	2.7	1.2
2.3	1.4	27.4	1.8	1.1
2.6	1.5	27.1	1.6	1.1
2.9	1.8	27.0	1.4	1.2
3.2	2.0	26.8	1.5	2.6

5 结论

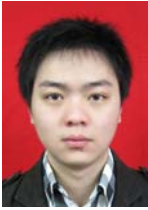
本文介绍了一种超宽带 LNA 的研制。首先分析了 LNA 的主要特性指标,然后应用 ADS2009 进行了仿真和优化设计,设计了工作频率为 0.2 GHz~3.3 GHz 的超宽带 LNA。该放大器采用负反馈技术,在 4 个倍频程内,放大电路具有较小的 NF、较高的增益,增益平坦度也较优,实现了带宽、增益、驻波及噪声特性的折中。宽带 LNA 均达到了较高的性能指标,满足设计要求。

参考文献:

[1] 陈邦媛. 射频通信电路[M]. 北京:科学出版社, 2006. (CHEN Bangyuan. RF Communications Circuits[M]. Beijing:Science Press, 2006.)
 [2] 郭桂美,邓磊,唐高弟. Ka 波段低噪声放大器的研制[J]. 信息与电子工程, 2008,6(4):245-248. (GUO Guimei,DENG Lei, TANG Gaodi. Design of Ka Band Low Noise Amplifier[J]. Information And Electronic Engineering, 2008,6(4):245-248.)
 [3] 刘长军,黄卡玛. 射频通信电路设计[M]. 北京:科学出版社, 2005. (LIU Changjun,HUANG Kama. RF Communication Circuit Design[M]. Beijing:Science Press, 2005.)
 [4] Dale D Henkes. LNA Design Uses Series Feedback to Achieve Simultaneous Low Input VSWR and Low Noise[J]. Applied

- Microwave & Wireless, 1998,10(8):26-32.
- [5] [美]Reinhold Ludwig,Pavel Bretchko. 射频电路设计[M]. 王子宇,张肇仪,徐承和,等译. 北京:电子工业出版社, 2002. (Reinhold Ludwig,Pavel Bretchko. RF circuit design[M]. Translated by WANG Zhiyu,ZHANG Zhaoyi,XU Chenghe,et al. Beijing:Electronic Industry Press, 2002.)
- [6] Bal S Virdee,Avtar S Virdee,Ben Y Banyamin. Broadband Microwave Amplifiers[M]. London:Artech House, 2004.
- [7] Niclas K B,Wilser W T,Gold R B. The Matched Feedback Amplifier:Ultrawide-Band Microwave Amplification with GaAs MESFET's[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1980,28(4):285-294.
- [8] 王惠功. 非线性微波毫米波电路分析与设计[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 1991:127-129. (WANG Huigong. Nonlinear Microwave and Millimeter Wave Circuit Analysis and Design[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1991:127-129.)
- [9] 钱可伟. 0.1~2.8 GHz 超宽带低噪声放大器的研制[J]. 电子元件与材料, 2008,27(8):62-64. (QIAN Kewei. Development of ultra-broad band LNA in 0.1-2.8 GHz[J]. Electronic Components And Materials, 2008,27(8):62-64.)
- [10] 《中国集成电路大全》编委会. 微波集成电路[M]. 北京:国防工业出版社, 1995. (*The Chinese IC daqo* editorial board. Microwave Integrated Circuits[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1995.)
- [11] 郑磊. 微波宽带低噪声放大器的设计[D]. 成都:电子科技大学, 2006. (ZHENG Lei. Microwave Broadband Low Noise Amplifier Design[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2006.)
- [12] Cotter W Sayre. Complete Wireless Design[M]. New York:McGraw-Hill Professional, 2001.

作者简介:



肖勇(1984-),男,四川省南充市人,硕士,主要从事射频与微波电路设计方面的研究.email:xywin2003@yahoo.com.cn.

吴中川(1973-),男,沈阳市人,工程师,从事核电子方面的研究.

白波(1976-),男,四川省绵阳市人,工程师,从事电子工程方面的研究.

刘杰(1981-),男,江西省赣州市人,助理研究员,从事电磁场数值计算方向的研究.