doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2020.02.010

一种用于 GSM/WCDMA/LTE 的宽带功率放大器

潘茂林,刘蕾蕾

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院,江苏 南京 210046)

摘要:基于 GaAs HBT 工艺设计了一款高线性、全集成的宽带功率放大器(PA)。芯片采用倒扣的装配方式。该功率放大器包括驱动级和功率级,工作频率为 1.71 ~ 2.05 GHz。通过多级匹配增大带宽,实现了对 GSM/WCDMA/LTE 中多个上行频段的覆盖。测试结果表明,在整个工作频带内功率增益约为 30 dB。工作电压为 3.5 V,输出功率为 28 dBm,采用 10 MHz 50RB QPSK LTE 信号测试时,功率附加效率(PAE)约为 37%,邻信道泄漏比(ACLR)约为 -38 dBc。芯片尺寸为 0.755 mm × 0.8 mm。

关键词:功率放大器;偏置电路;射频前端

中图分类号:TN431.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-5439(2020)02-0062-04

Broadband power amplifier for GSM/WCDMA/LTE

PAN Maolin, LIU Leilei

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: A highly linearized and fully integrated broadband power amplifier (PA) based on GaAs HBT process is presented. The chip is assembled using a flip method. The PA, including a driver stage and a power stage, operates from 1.71GHz to 2.05GHz. To coverage of multiple uplink bands, multi-stage matching networks are used. The measurement results show that the power amplifier exhibits a linear power gain of 30 dB. Besides, when the operating voltage is 3.5 V, the output power is 28 dBm, and a 10 MHz 50 RB QPSK LTE signal is chosen as the input signal, the power added efficiency (PAE) and the adjacent channel leakage ratio (ACLR) of PA are about 37% and -38 dBc, respectively. The PA chip size with an on-chip bias circuit is only 0.755 mm × 0.8 mm.

Keywords: power amplifier (PA); bias circuits; radio frequency front-end

射频功率放大器是现代移动通信设备的关键组件之一,在一定程度上决定着设备的尺寸、功耗以及工作电压[1]。通信制式和标准的不断演进以及信号调制方式的复杂化要求功率放大器要适应更宽的带宽、更高的线性和更快的数据传输速率。高端蜂窝移动设备要求同时覆盖 GSM/EDGE(2G)、UMTS(3G)和 LTE(4G)等多个频段,这就表明设备必须同时支持至少四种模式,覆盖七个工作频段[2]。因此,同时适用于 GSM/WCDMA/LTE 的宽带的高线性射频功率放大器成为当下的研究热点。为了满足这些需求,近年来提出了许多设计新颖的射频功率放大器[3-8]。众所周知,与 GaAs HBT 工艺相比,Si CMOS 工艺更容易实现全集成和复杂的逻辑控制功能。有很多研究集中在用于移动设备和无线局域网

收稿日期:2019-07-25;**修回日期**:2019-09-10 **本刊网址**:http://nyzr.njupt.edu.cn

作者简介:潘茂林,男,硕士研究生;刘蕾蕾(通信作者),女,博士,教授,liull@njupt.edu.cn

引用本文:潘茂林,刘蕾蕾. 一种用于 GSM/WCDMA/LTE 的宽带功率放大器[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2020,40(2):62-65.

的全集成 CMOS 功率放大器[6-8]。然而,采用 GaAs HBT 工艺的功率放大器具有更高的功率密度,可以实现更高的效率和更低的非线性失真。因此,目前大多数商用的功率放大器采用 GaAs HBT 工艺设计制造[3-5]。

为了实现高线性、宽带宽和低成本的要求,本文设计并制造了一种用于 GSM/WCDMA/LTE 的宽带功率放大器。

1　电路设计和制造

1.1　偏置电路

当大功率的射频信号加在 HBT 功率放大器的基极时,基极-发射极结二极管偏置点由于整流平均直流电流的增加而减小。因此 HBT 功率放大器的基极-发射极电压降低导致跨导减小,使得功率放大器增益压缩、线性度恶化[9]。

为了减少非线性失真,降低电路的温度敏感性,该功率放大器采用了如图 1 所示的有源偏置电路。

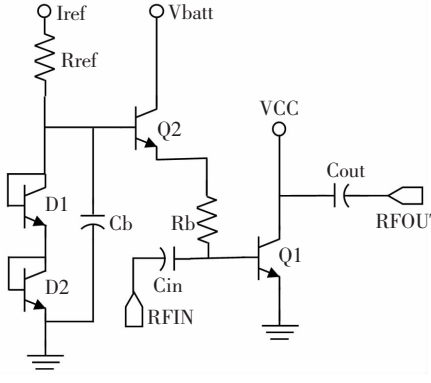


图 1　偏置电路示意图

该偏置电路由晶体管 Q2、整流电阻 Rb、旁路电容 Cb 和发射极-基极二极管 D1、D2 组成。当输入功率增大时,该偏置电路的存在会使功率管 Q1 的基极-发射极电压以及集电极电流增加,从而改善功率放大器的增益压缩和线性失真。Q2 和 D1 形成了一个电流镜,为 Q1 提供偏置。两个相同尺寸的结二极管 D1、D2 串联使 Q2 的基极-发射极电压翻倍,从而为功率管 Q1 提供足够的偏置电压。另外,当功率管的温度快速上升时,Rref 和 Rb 的存在可以抑制电流随温度的升高不断增大,对降低电路的热敏感性有很大帮助。

1.2　宽带输出匹配设计

宽带输出匹配对多频段覆盖的功率放大器至关重要。其主要设计目标是实现对工作频段的高效率、低失真传输和对高次谐波的抑制[10]。基于以上论述,我们采用了如图 2 所示的一种带有二次谐波抑制作用的两级低通输出匹配电路。

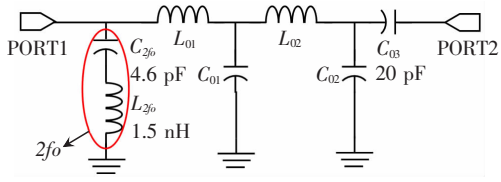


图 2　输出匹配示意图

图 2 中串联到地的 C_{2fo} 和 L_{2fo} 谐振在二次谐波,对二次谐波呈现出低阻抗,实现了谐波抑制作用,其中 C_{2fo} 通过 GaAs HBT 芯片上的 MIM 电容实现,L_{2fo} 由基板的传输线实现。此外,电感 L_{01}、L_{02} 和贴片电容 C_{01}、C_{02} 组成了两级低通匹配电路。需要特别指出的是电感 L_{01}、L_{02} 未使用贴片元件,而同样是由基板上宽度为 150 μm、电感值约为 0.5 nH 和1.2 nH 的传输线来实现。相比于贴片电感,传输线电感具有更高的 Q 值(大约可以达到40),可以尽可能降低输出匹配的损耗,同时,省去两个昂贵的贴片电感也降低了芯片制造成本。

图 3 给出了输出匹配电路损耗仿真结果。考虑到实际的基板会引入额外插损,仿真电路中添加了 0.15 dB 的衰减器。仿真结果显示该宽带匹配电路在工作频率范围内的损耗为 0.5 ~ 0.6 dB。由于 2*fo* 电路的存在,在整个二次谐波范围内展现出了很好的频率抑制效果。可以看出,正如我们期待的那样,该宽带输出匹配电路同时实现了基频范围内的低插入损耗和高次谐波的良好抑制效果,达到了设计目的。

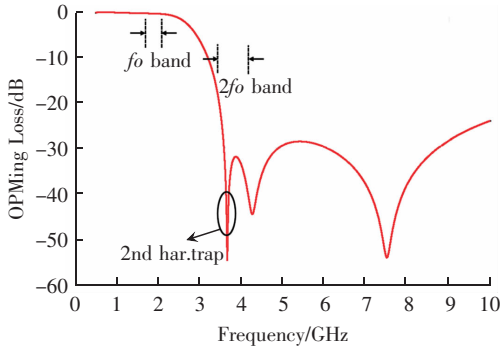


图 3　输出匹配电路损耗仿真图

1.3　功率放大器电路

一种覆盖 GSM/WCDMA/LTE 通信中 Band-1/2/3/4/34/39 频段的功率放大器电路如图 4 所示。电路采用两级设计,其中 Q1 为驱动级,Q2 为功率级,输入匹配为高通结构,输出匹配为低通结构,

级间采用类 Π 型匹配结构来增大线性带宽。此外,驱动级 Q1 的集电极和基极之间添加了 RC 串联负反馈来增加电路稳定性。为了使仿真结果更加准确,设计引入了并联到地的电容 Cp1 和 Cp2 来模拟版图布局中集电极到输出端路径上的寄生电容。

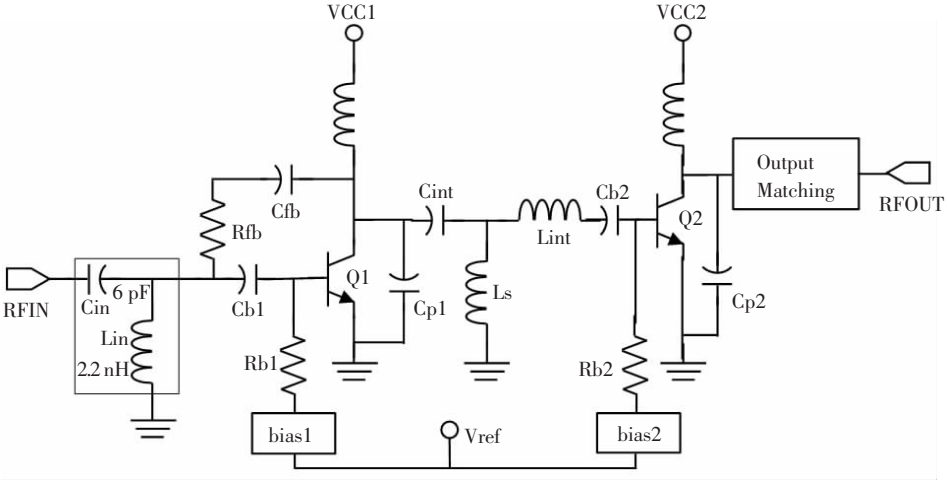
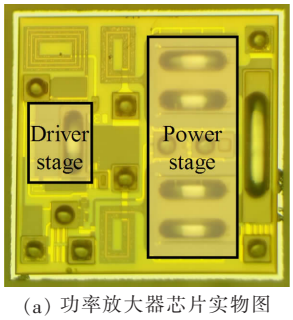
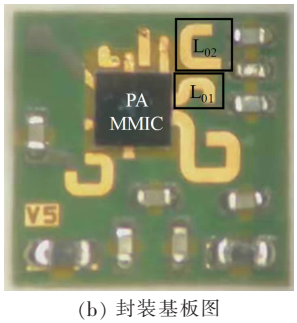


图 4 宽带功率放大器电路图

为了验证芯片设计性能,本文用 GaAs HBT 工艺完成了该宽带功率放大器的流片。图 5(a)所示为芯片的实物图,其中,驱动级的发射极面积为 342 μm^2,功率级的发射极面积为 3 456 μm^2,芯片的总面积为 0.755 mm × 0.800 mm(包含输入匹配,部分级间匹配和完整的偏置电路)。如图 5(b)所示为带有封装基板的芯片实物图,该芯片的封装尺寸为 3 mm × 3 mm。



(a) 功率放大器芯片实物图



(b) 封装基板图

图 5 功率放大器芯片实物图

2 功率放大器测量结果

如图 6 所示为芯片评估板实物图,使用罗杰斯板材设计评估板对功率放大器进行了测试。工作电压 3.5 V,静态电流为 110 mA,测试调制信号为 10 MHz 50RB QPSK LTE 信号。图 7 所示为小信号 *S* 参数的测量结果。由图 7 可见,功率放大器的小信号增益 S21 在 1 710 ~ 2 050 MHz 的工作频率内约 30 dB,输入、输出回波损耗 *S*11、*S*22 分别约为 −10 dB和 −13 dB,在二次谐波 3 420 ~ 4 100 MHz 的频率范围内实现了良好的谐波抑制效果。

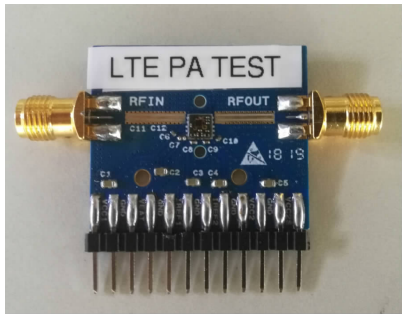


图 6 芯片评估板实物图

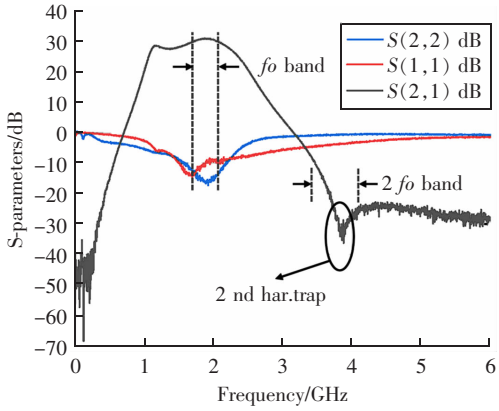


图 7 小信号 *S* 参数测量结果图

图 8 和图 9 给出了 LTE(4G)模式下功率放大器的大信号测试结果。图 8 为功率增益和功率附加效率的对比图,由图 8 可知,当输出功率为28 dBm时,该功率放大器在 1 710 MHz、1 900 MHz 和 2 050 MHz 三个频率的功率增益分别为 29.95 dB、29.94 dB和 29.14 dB,功率附加效率分别为37.2%,36.6% 和 35.6%。图 9 为邻信道泄露比(ACLR)的测试图,由图 9 可知,当输出功率为28 dBm时,该功率放大器在 1 710 MHz,1 900 MHz 和2 050 MHz三个频率的 ACLR 分别为 -37.7 dBc, -39.8 dBc和 -37.1 dBc。另外,在输出功率回退时,功率放大器的 ACLR 都小于 -38 dBc。表 1 总结了本文与参考文献设计的测试结果对比。由表 1 可知,该功率放大器在牺牲了较小的功率附加效率下,实现了更高的输出功率和更好的线性度。

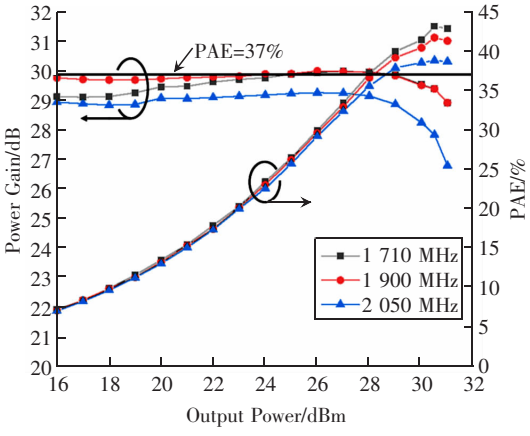


图 8　功率增益和效率测量结果图

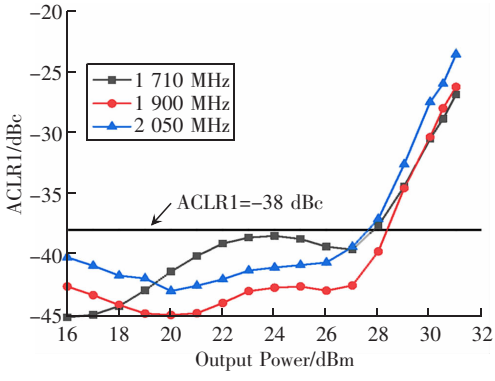


图 9　邻信道泄漏比(ACLR)测量结果图

表 1　测试结果对比

Ref	Mode	Freq/GHz	Pout/dBm	PAE/%	ACLR/dBc	Size/mm^2
文献[3]	CW	1.71~1.95	30.0	>40	—	1.000 0
文献[4]	Wireless	5~6	22.0	16~17	—	1.320 0
文献[5]	LTE	1.71~1.98	26.5	35.2~38.2	≤-33.4	0.921 5
This work	LTE	1.71~2.05	28.0	35.5~37.1	-37.1~39.7	0.604 0

3　结束语

本文利用 GaAs HBT 工艺设计并制造了一种适用于 GSM/WCDMA/LTE 通信 Band-1/2/3/4/34/39 的宽带功率放大器。通过采用级间多级匹配技术和输出匹配二次谐波抑制设计实现了良好的带宽和线性性能。该功率放大器具有封装尺寸较小、成本低廉、单芯片覆盖多频段等众多优点,可用于移动通信设备的射频前端模块。

参考文献:

[1] LARSON L. RF and microwave hardware challenges for future radio spectrum access[J]. Proceedings of the IEEE, 2014,102(3):321 - 333.

[2] MCCUNE E. High-efficiency, multi-mode, multi-band terminal power amplifiers[J]. IEEE Microwave Magazine, 2005,6(1):44 - 55.

[3] ZHANG H, GAO H, LI G P. Broad-band power amplifier with a novel tunable output matching network[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(11):3606 - 3614.

[4] OKA T, HASEGAWA M, HIRATA M, et al. A high-power low-distortion GaAs HBT power amplifier for mobile terminals used in broadband wireless applications[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, 42(10):2123 - 2129.

[5] KANG S, KIM U, KIM J. 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.

[6] QIAN H, LIU Q, SILVA-MARTINEZ J, et al. A 35 dBm output power and 38 dB linear gain PA with 44.9% peak PAE at 1.9 GHz in 40 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51(3):587 - 597.

[7] AFSAHI A, LARSON L E. Monolithic power-combining techniques for watt-level 2.4 GHz CMOS power amplifiers for WLAN applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(3):1247 - 1260.

[8] KAYMAKSUT E, REYNAERT P. A dual-mode transformer-based Doherty LTE power amplifier in 40nm CMOS[C]// IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC). 2014:64 - 65.

[9] WEN J C, SUN L L. A GaAs HBT power amplifier with a newly active bias linearizer for W-CDMA terminals[C]// International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. 2006:1727 - 1729.

[10] YAMAMOTO K, MIYASHITA M, MAKI S, et al. A WCDMA multiband power amplifier module with Si-CMOS/GaAs-HBT hybrid power-stage configuration[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(3):810 - 825.