

• 通信与信息工程 •

一种对负载不敏感的高功率平衡功率放大器

章国豪, 郑耀华, 李思臻, 林俊明, 陈思弟

(广东工业大学信息工程学院 广州 510006)

【摘要】针对卫星通信终端, 采用功率合成架构设计了一个高输出功率的平衡功率放大器。功率合成架构通过在两路放大器的输出匹配网络中引入 $\pm 45^\circ$ 的相移, 可使该平衡功率放大器具有对负载失配容忍度更高和对负载变化不敏感等特性。该平衡功率放大器采用InGaP/GaAs HBT工艺, 工作电压为5 V。测试结果表明: 在1.5~1.7 GHz频段内的增益为32 dB左右, 饱和输出功率为38 dBm, 功率附加效率为43%, 当负载失配时仍能保持良好的射频特性。

关键词 高功率; 磷化铟镓/砷化铟镓异质结晶体管; 功率放大器; 功率合成; 卫星通信
中图分类号 TN927 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.02.001

A Load Insensitive High-Power Balanced Power Amplifier

ZHANG Guo-hao, ZHENG Yao-hua, LI Si-zhen, LIN Jun-ming, and CHEN Si-di

(School of Information Engineering, Guangdong University of Technology Guangzhou 510006)

Abstract A high-output-power balanced power amplifier is designed with power-combining architecture for satellite communication terminals. The power-combining architecture introduces a $\pm 45^\circ$ phase shift in the output matching network of two amplifiers, which makes the balanced power amplifier more tolerant to load mismatch and less sensitive to load variation. This balanced power amplifier is implemented with InGaP/GaAs HBT process. Under the band of 1.5 GHz to 1.7 GHz and the supply voltage of 5 V, the measured results show that 32 dB of the gain, 38 dBm of the saturated output power and 43% of power added efficiency (PAE) are achieved, and a good radio frequency performance can be maintained under load mismatch conditions.

Key words high-power; InGaP/GaAs HBT; power amplifier; power combining; satellite communication

近年来, 随着经济的发展, 卫星通信和导航系统被广泛地应用于电子和汽车产业, 市场对手持式终端发射机的功率放大器的需求量越来越大。这些功率放大器需要更大的功率输出和更好的稳定性, 才能满足卫星通信和导航系统所要求的性能指标。因此, 对应用于卫星通信和导航系统的手持式终端中实用可靠的高功率集成功率放大器的研究有着重要意义。

传统单端多级的集成功率放大器由于受自身半导体物理特性的影响及加工工艺、散热、阻抗匹配等问题的限制导致其不仅输出功率低, 而且随着频率的增加输出功率将迅速减小^[1]。为了提高输出功率, 功率合成技术是一种实用且易于实现的方法^[2]。同时, 在各种功率合成技术中, 由于平衡功率放大器具有负载不敏感和比单端设计的功率放大器更宽

的带宽^[3-4]等优点, 因此在功率合成方案中被广泛采用。文献[5]利用平衡合成的方式实现高线性高效率的功率放大器, 该功率放大器在宽频带内具有平坦的增益特性和比对应的单端放大器具有更加稳定等优势, 但是在输入和输出端引入的正交3 dB耦合器使得该功率放大器需要较多的分立器件, 不利于小型化和集成化。文献[6]采用一种新的平衡合成架构设计了一个对负载变化不敏感的功率放大器。这种功率放大器在上下两路输入和输出端分别加入 $\pm 45^\circ$ 相移网络, 最终在输出端通过威尔金森合成器将两路功率合成起来, 该设计获得高效率和高线性度, 并且当负载变化时, 具有较好的稳定性, 广泛应用于3G WCDMA移动通信手机终端中, 但是由于威尔金森合成器的加入带来了许多弊端, 如有较大的插入损耗, 增加了集成成本和复杂性。文献[7]在文献

收稿日期: 2014-12-25; 修回日期: 2015-05-28

基金项目: 广东省领军人才专项资助(400130002); 国家自然科学基金(61404032)

作者简介: 章国豪(1964-), 男, 教授, 主要从事射频、微波及毫米波单片电路和组件等方面的研究。

[6]的基础上, 对该功率放大器输出端中的 $\pm 45^\circ$ 相移网络进行改进和优化, 并去掉威尔金森合成器, 在实现高效率和高线性的同时, 也使得功率放大器性能对负载的变化不敏感。该设计减少了集成的器件, 降低了成本, 被广泛应用于现代的3G智能手机终端中。

本文在综合考虑功率放大器的输出功率和性能稳定的基础上, 采用平衡合成架构方案设计了一个基于InGaP/GaAs HBT工艺^[8], 工作在1.5~1.7 GHz频段的高功率平衡功率放大器。测试结果表明, 该平衡功率放大器具有较高输出功率和功率附加效率(PAE), 并且当负载失配时, 该电路仍能保持良好的射频性能。

1 平衡功率放大器的设计与分析

1.1 整体电路设计

由于HBT工艺在射频集成电路设计中有优越的线性性能和较高的效率^[9], 因此本文采用InGaP/GaAs HBT工艺, 设计一个工作在1.5~1.7 GHz频段的平衡功率放大器。整体电路结构如图1所示。该平衡功率放大器电路包括完全一样的上下两

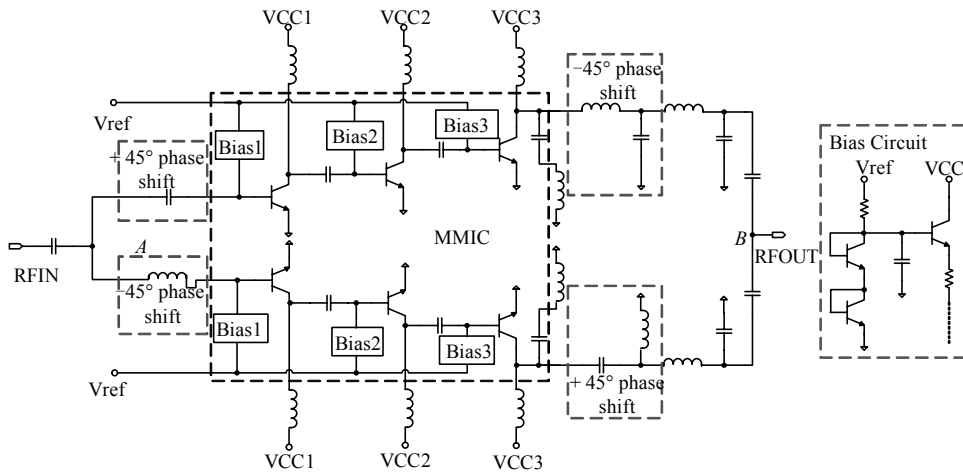


图1 一种平衡功率放大器电路

1.2 电路分析

该平衡功率放大器工作时, 输入信号通过隔直电容耦合到A节点, 并在A节点分离出两路信号分别流入到上下支路, 由于上下支路的三级放大器完全一样, 它们具有相等的输入阻抗, 因此在A节点分离出来两路信号的功率是均等的。分离出来的两路信号分别经过上下支路相反的 45° 相位变化送到放大器的输入端, 然后正交的信号经过上下两支路的三级放大器进行功率放大。上下支路正交的信号在输

支路放大器, 以及 $\pm 45^\circ$ 相移网络的输入和输出匹配电路。为了获得较高的增益, 设计的上下支路均采用三级功率放大的结构, 其中第一级工作于A类状态, 以获得高线性度; 为了兼顾整体功率放大器的线性度和效率, 第二、第三级工作于AB类^[10]。为了在效率和线性度之间取得良好的折中, 偏置电路采用自适应线性化偏置^[11]。该平衡功率放大器通过在上下支路的输入匹配电路中分别加入一个电感和电容对输入信号产生 $\pm 45^\circ$ 相移, 从而实现上下两路的放大器工作处于正交的状态。电路在输出匹配中加入一个谐振频率为 $2\Omega_0$ 的LC谐振网络, 其中 Ω_0 为基波频率, 相当于在该处得到一个二次谐波短路的负载, 从而实现二次谐波的抑制。该结构类似于F类功率放大器^[12-14], 有利于获得较高的效率。本文电路最大的特点在于上下两路的输出匹配电路中加入了 $\pm 45^\circ$ 相移网络, 上支路加入一节低通滤波器结构的 -45° 相移网络, 下支路加入一节高通滤波器结构的 $+45^\circ$ 相移网络, 利用这种合成架构设计的平衡功率放大器, 占用空间小, 结构简单, 易于实现, 同时可使该平衡功率放大器对负载失配的容忍度更高和对负载的变化不敏感。

出匹配网络经过相反的 45° 相位变化, 最终在B点实现同相、同幅度的相同信号, 故B点输出的功率为两路放大器的输出功率之和, 因此该平衡功率放大器可获得较高的输出功率。

将该平衡功率放大器等效为如图2所示的三端口网络。由于上下支路放大器是完全一样的, 可认为上下两支路的放大器具有相同的输出反射系数 Γ_{PA} , 上下两支路 Γ_{PA} 经过 $\pm 45^\circ$ 相移网络后分别得到 $\Gamma_{PA}e^{-j2\Delta\phi}$ 和 $\Gamma_{PA}e^{+j2\Delta\phi}$, 因此从图2中的ab面向左看进去的上下两支路的等效输出阻抗分别如下:

$$Z_{L1} = \frac{1 + \Gamma_{PA} e^{-j2\Delta\phi}}{1 - \Gamma_{PA} e^{-j2\Delta\phi}} \times 2Z_O \quad (1)$$

$$Z_{L2} = \frac{1 + \Gamma_{PA} e^{+j2\Delta\phi}}{1 - \Gamma_{PA} e^{+j2\Delta\phi}} \times 2Z_O \quad (2)$$

从终端向左看进去网络的等效输出阻抗 Z_L 可由 Z_{L1} 和 Z_{L2} 并联所得:

$$Z_L = \frac{Z_{L1} * Z_{L2}}{Z_{L1} + Z_{L2}} \quad (3)$$

而节点 B 的输出反射系数为:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_O}{Z_L + Z_O} \quad (4)$$

将式(1)~式(3)代入式(4)并化简, 可得该平衡功率放大器的输出反射系数为:

$$\Gamma = \Gamma_{PA} \frac{\Gamma_{PA} + \cos(2\Delta\phi)}{1 + \Gamma_{PA} \cos(2\Delta\phi)} \quad (5)$$

当 $\Delta\phi=45^\circ$ 时, 可得:

$$\Gamma = \Gamma_{PA}^2 \quad (6)$$

式(6)表明该平衡功率放大器输出的反射系数和电压驻波比(VSWR)是单支路功率放大器的两倍。因此, 当负载发生失配时, 该平衡功率放大器在引入 $\pm 45^\circ$ 相移的输出匹配网络后比单支路功率放大器对负载失配的容忍度更高。

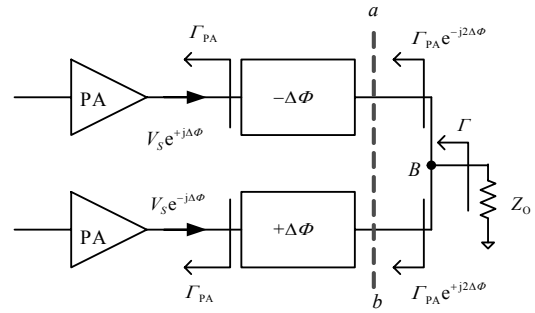


图2 电路等效图

为了分析该平衡功率放大器在负载失配情况下的工作性能, 对图2的等效电路进行仿真分析。当负载失配(如VSWR=3:1)时, 上下支路放大器的负载阻抗(归一化)是随着反射系数 Γ 的相位 ψ 变化的, 如图3所示。通过上下支路的负载阻抗对比可知它们存在 180° 的相位差。由于上下支路负载阻抗的变化, 引起了相应的电流发生变化, 同时两者存在 180° 的相位差。该平衡功率放大器上下支路两个第三级放大器的集电极是单一供电的, 因此上下支路的电流互相补偿, 造成总的电流变化不大, 如图4所示。所以该平衡功率放大器在负载失配时, 工作电流变化比较小, 即对负载的变化不敏感。利用这种平衡架构产生负载不敏感的效果与利用正交3 dB耦合器实现的经典平衡功率放大器^[3]相类似。

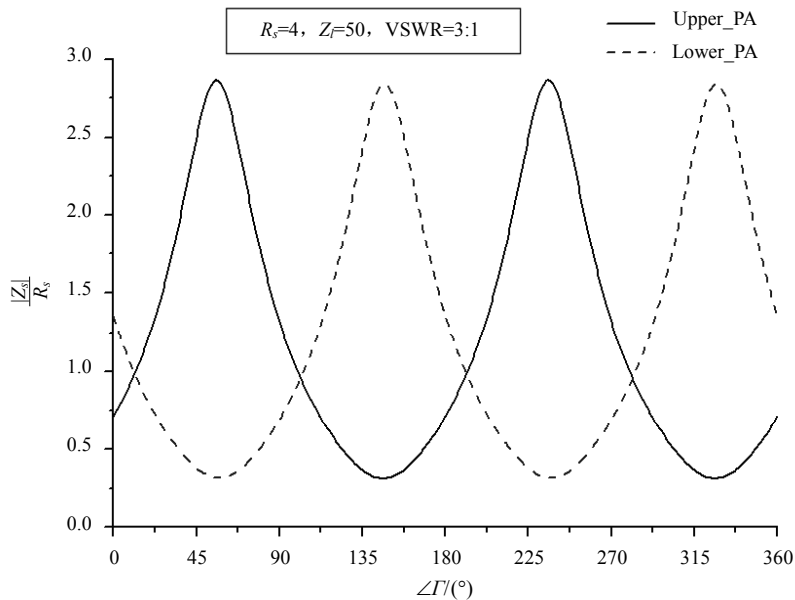


图3 当VSWR=3:1时, 该结构负载(归一化)的变化

在终端失配状态下(VSWR=3:1), 单端电路架构和本文平衡架构在同样的输出功率(38 dBm)的情况下对比如图5所示, 从图5可看出, 单端电路架构的

输出功率随着反射系数 Γ 的相位 ψ 变化的波动较大, 而本文平衡架构输出功率较为平坦。同时, 本文平衡架构与不产生相移情况下的电路架构(同相电路

架构)相对比,虽然同相电路架构比单端电路架构较有优势,但平衡架构的输出功率最平坦,可稳定地工作。

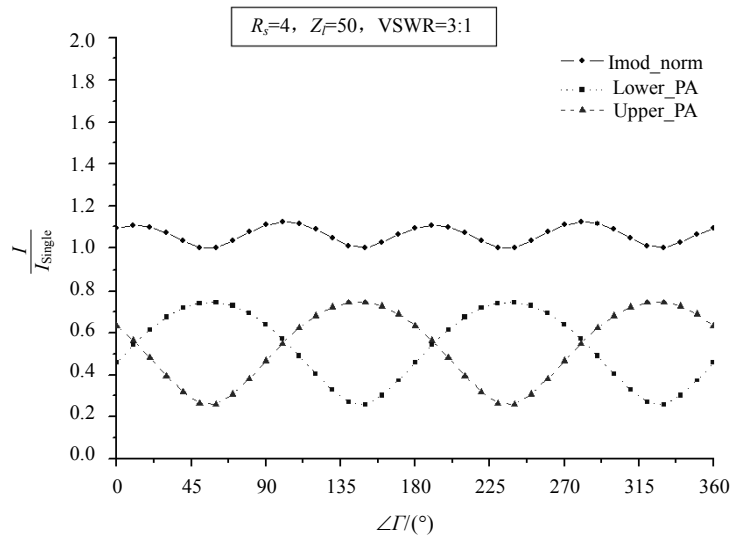


图4 当VSWR=3:1时,该结构电流(归一化)的变化

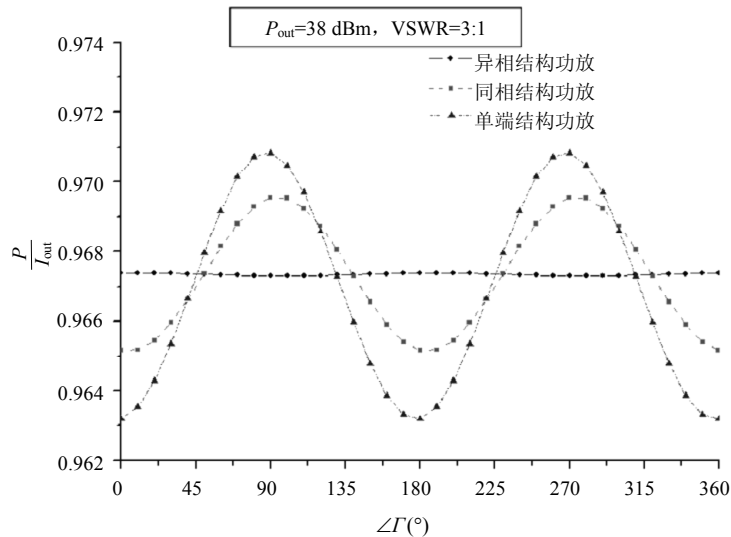


图5 当VSWR=3:1时,3种电路架构输出功率(归一化)变化的对比

2 测试结果

本文的平衡功率放大器采用InGaP/GaAs HBT工艺制作,上下支路的三级放大器和偏置电路在片内实现,DIE面积为 $0.9\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$,扼流电感、输入匹配和输出匹配电路在片外实现,考虑功率放大器的散热问题,最终整体集成在面积为 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的Fr4基板上,图6为该电路的实物图。

该平衡功率放大器的工作电压为5 V,总的静态电流约为310 mA。使用安捷伦的网络分析仪E5071C测得该平衡功率放大器的小信号S参数S21、S11、S22如图7所示,在1.5~1.7 GHz频段范围内S21>31 dB,

变化小于1 dB; S11<-12 dB; S22<-10 dB,该测试结果表明本设计具有很好的小信号性能。使用安捷伦的信号发生器N5182A和频谱仪N9030A搭建测试平台,输入连续波(CW)信号,分别在1.5、1.616、1.7 GHz测得该平衡功率放大器的性能,如图8所示。从图可看出,该平衡功率放大器在频段内的增益为32 dB左右,带内增益平坦度为 $\pm 0.3\text{ dB}$,饱和功率均超过38 dBm (6.3 W),功率附加效率(PAE)大于43%。同时,从各个频点的增益曲线看,该平衡功率放大器有较好AM-AM特性,1 dB压缩点在37 dBm左右。利用偏差为2 MHz的双音信号测得该平衡功率放大器的三阶互调失真(IMD3)和五阶互调失真(IMD5)

如图9所示, 结果表明该平衡功率放大器具有较好的线性度。总的来说, 该平衡功率放大器不但具有较高的增益、输出功率和效率, 而且也具有较好的线性性能。

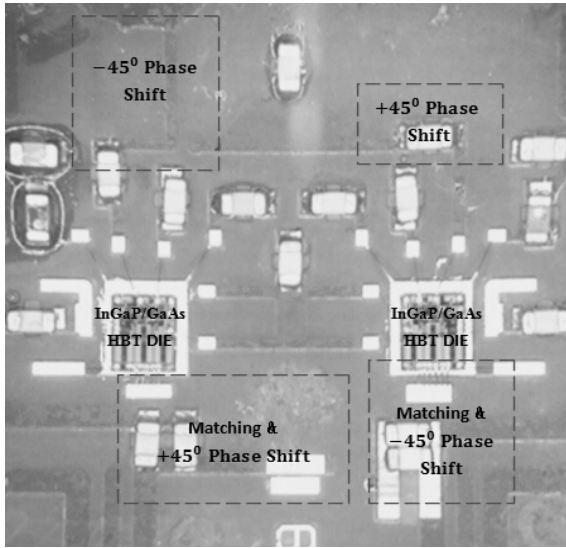


图6 芯片实物图

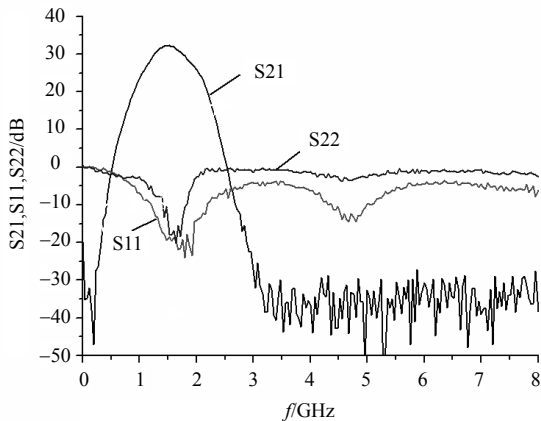


图7 S参数测试结果

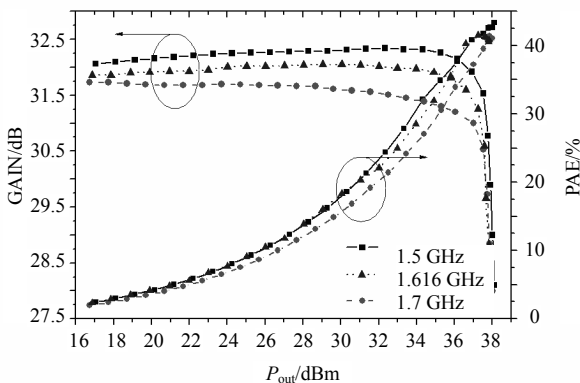


图8 输入CW信号时, 频段内的测试性能

为了验证该平衡功率放大器对负载失配的容忍程度和负载不敏感特性, 在功率放大器的输出端接上微波手动调谐器, 该平衡功率放大器在负载失配情况下, 负载的VSWR=20:1时也能正常工作。而当

在工作频率为1.616 GHz, 输入功率 $P_{in}=10$ dBm和电压驻波比VSWR=3:1时, 该平衡功率放大器的输出功率随着反射系数相位的变化如图10所示, 从图可知输出功率为35.7 dBm左右, 变化为 ± 0.7 dBm, 变化范围不大。因此, 该平衡功率放大器的负载在一定失配时, 工作性能比较稳定。

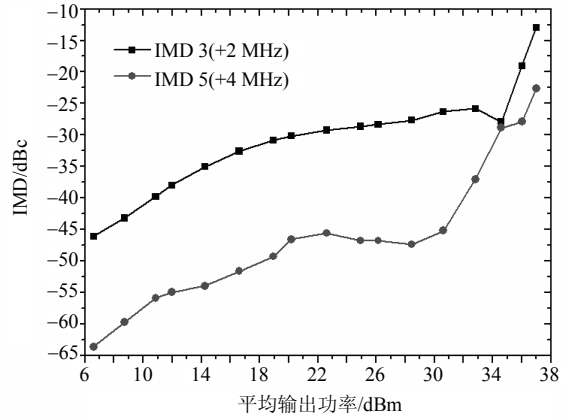


图9 IMD3和IMD5的测试性能

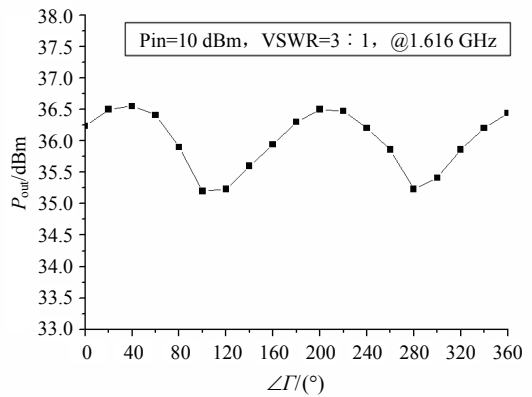


图10 当VSWR=3:1时, 输出功率的变化

3 结束语

本文利用平衡架构设计了一个高功率的平衡功率放大器, 采用InGaP/GaAs HBT工艺制作, 最终芯片面积为8 mm×8 mm。该平衡功率放大器在5 V工作电压下, 总的静态电流约为310 mA, 当输入CW信号时, 在1.5~1.7 GHz频段内增益可达32 dBm; 饱和输出功率 $P_{sat}=38$ dBm, 功率附加效率为43%; 并且当负载发生失配时也能稳定工作。该平衡功率放大器实用且工作性能可靠, 可应用于卫星通信和导航系统的手持式终端中。

参考文献

[1] CRIPPS S C. RF power amplifier for wireless communications[M]. Massachusetts: Artech House Publishers, 2006.
 [2] 陈昌明, 徐军, 王天宝. Ka频段6W固态集成功效的热分

- 析与设计[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(4): 713-719.
- CHEN Chang-ming, XU Jun, WANG Tian-bao. Design and analysis of thermal performance of a 6W solid-state integrated power amplifier at Ka-Band[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(4): 713-719.
- [3] EISCLE K M. Balanced transistor amplifier for precise wideband microwave applications[J]. IEEE ISSCC Digest of Technical Papers, 1965, 3: 18-19.
- [4] 冷永清, 张立军, 曾云, 等. 基于GaN HEMT的1.5-3.5 GHz宽频平衡功率放大器设计[J]. 电子学报, 2013, 41(4): 815-820.
- LENG Yong-qing, ZHANG Li-jun, ZENG Yun, et al. Design of a 1.5-3.5 GHz octave bandwidth balanced power amplifier in GaN HEMT technology[J]. Chinese Journal of Electronics, 2013, 41(4): 815-820.
- [5] BERRETTA G, CRISTAUDO D, SCACCIANOCE S. A balanced CDMA2000 SiGe HBT load insensitive power amplifier[C]//2006 IEEE Radio and Wireless Conference. California: IEEE Press, 2006: 523-526.
- [6] ZHANG G, CHANG S, WANG A. WCDMA PCS handset front end module[C]//2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. California: IEEE Press, 2006: 304-307.
- [7] ZHANG G, CHANG S, CHEN S, et al. Dual mode efficiency enhanced linear power amplifiers using a new balanced structure[C]//2009 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Massachusetts: IEEE Press, 2009: 245-248.
- [8] AHMAD A, CHRISTOPHE J, MICHEL P. Comprehensive analysis of traps in InGaP/GaAs HBT by GR noise[C]//2014 10th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronic. Grenoble: IEEE Press, 2014: 1-4.
- [9] KIM W, KANG S, LEE K, et al. Analysis of nonlinear behavior of power HBTs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50: 1714-1722.
- [10] LEE T. The design of CMOS radio-frequency integrated circuits[M]. London: Cambridge university press, 2004.
- [11] NOH Y S, PARK C S. PCS/W-CDMA dual-band MMIC power amplifier with a newly proposed linearizing bias circuit[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2002, 37(9): 1096-1099.
- [12] MOON J, KIM J, KIM J, et al. Behaviors of class-F and class-F⁻¹ amplifier[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(6): 1937-1951.
- [13] CHO Y, KANG D, KIM J. A dual power-mode multi-band power amplifier with envelop tracking for handset applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(4): 1608-1619.
- [14] NIKANDISH G, BABAKRPUR E, MEDI A, et al. A harmonic termination technique for single- and multi-band high-efficiency class-F MMIC power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(5): 1212-1220.

编辑 税红