

一种带有温度补偿电路的射频功率放大器

黄亮, 章国豪, 张志浩, 李思臻

(广东工业大学信息工程学院 广州 510006)

【摘要】针对无线通信应用的射频功率放大器, 提出了一种新颖的温度补偿电路。应用该温度补偿电路, 设计了一款基于InGaP/GaAs HBT工艺的两级F类功率放大器。该功率放大器采用了带温度补偿特性的有源偏置电路, 能有效地提高线性度, 补偿温度引起的性能偏差; 输出匹配网络采用F类功率放大器谐波理论而设计。在1 920~1 980 MHz频段和电源电压3.4 V条件下, 测得常温状态该功率放大器增益为27 dB; 输出功率在28 dBm时功率附加效率达到42%, 邻信道功率比为-36 dBc; 在-20 °C~80 °C之间功率附加效率和邻信道功率比基本不变。

关键词 有源偏置; F类; 谐波抑制; 功率放大器; 温度补偿

中图分类号 TN958 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.06.003

RF Power Amplifier with Temperature Compensation Circuit

HUANG Liang, ZHANG Guo-hao, ZHANG Zhi-hao, and LI Si-zhen

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

Abstract A novel temperature compensation circuit for an RF power amplifier of wireless communication applications is presented. A two stage class F power amplifier with this temperature compensation circuit based on InGaP/GaAs HBT technology is also designed. The active bias network with the temperature compensation circuit can effectively improve the linearity and thermal characteristics, which allowing the power amplifier with little degradation in performance under temperature variation. The output matching network is designed to realize a class F power amplifier. The fabricated power amplifier shows 42% power added efficiency (PAE) with -36 dBc adjacent channel power ratio (ACPR) at 28 dBm output power, and 27 dB gain, respectively, measured with WCDMA signals at a supply voltage of 3.4 V in a frequency range from 1 920 MHz to 1 980 MHz. The power added efficiency (PAE) and ACPR are well compensated over the temperature from -20 °C to 80 °C.

Key words active bias; class F; harmonic suppression; power amplifier; temperature compensation

手持移动通讯系统中, 功率放大器是非常关键的元件, 也是主要的耗能部分。而功率放大器的效率和线性度都直接影响通讯终端的通信质量和时长。因此功率放大器在满足严格的线性特性外还要满足效率的要求^[1]。应用于功率放大器设计的工艺主要采用III-V族化合物和硅工艺技术。而为了能够实现高性能射频功率放大器的设计多采用砷化镓异质结双极型晶体管(GaAs HBT), 通过对HBT的非线性特性的补偿可以获得优异的线性性能^[2]。高性能GaAs HBT功率放大器的设计除了考虑线性度、效率等基本指标, 还有温度补偿等。

双极性晶体管与场效应晶体管不同, 需要直流电流加到输入端口。为了得到高线性度和高功率附加效率(PAE), 射频前端功放常常偏置在AB类。AB

类放大与从电源拉取的平均电流与输入信号强度有关。随着输入的功率信号增大, 由于基-发射结的整流特性, 大的负电流信号和大的正电压信号会被削减。因此, 流过基-发射结的电流增加, 而两端的电压减小。而且基-发射结电压(V_{be})的减小将引起跨导的减小, 最终导致更早的增益压缩和失真^[3]。为了补偿增益压缩和失真, 最有效的方式就是补偿 V_{be} , 而这可以通过采用有源偏置电路偏置提升技术实现^[4]。一般地, 功放的效率可以通过低静态电流的有源偏置电路改善。但是在保证增益和输出功率的同时, 静态电流只能减小到一定程度。此外, 由于AB类放大器较小的集电极电流或者小的 V_{be} , 如果有一个合适的负载匹配网络就能达到一定的增益扩张及效率提升。实际上, F类负载匹配网络^[5]是很好

收稿日期: 2014-06-09; 修回日期: 2015-01-07

基金项目: 广东省领军人才专项资助项目(400130002)

作者简介: 黄亮(1990-), 男, 博士生, 主要从事射频集成电路方面的研究。

的选择。

HBT有很强的热敏感性, 器件性能受外部环境温度以及自热效应的影响明显^[6]。因此, 对HBT进行温度补偿能提高线性度^[7], 而片上温度补偿多基于偏置电路。文献[8]研究了反馈偏置电路对温度补偿, 取得了一定的效果; 文献[9]通过对偏置电路加一个电压补偿电路实现温度补偿, 在极低静态电流下补偿效果明显; 文献[10]也对温度补偿进行研究。

本文介绍了一个工作在1 920~1 980 MHz频段基于GaAs HBT工艺的两级功率放大电路。该放大电路包括具有提高线性度与温度补偿的有源偏置电路以及一个F类工作模式的输出匹配。该温度补偿电路通过调节基极静态偏置电流实现温度补偿。这些技术的使用, 能使功率放大器在较大的温度范围下, 保证高线性度的同时具有高的效率。

1 偏置电路

为了提高线性度及饱和抑制输出功率区域的增益压缩, 基于二极管线性化技术设计的失真补偿有源偏置电路如图1所示。

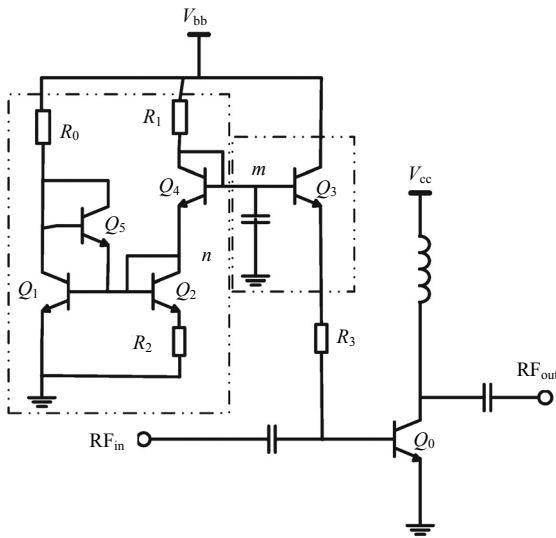


图1 偏置电路

当输入功率增加, 功率管 Q_0 的直流电流增加, 由于二极管整流的特性, Q_0 的基极电位 V_{b0} 会减小; 泄露进偏置电路的射频信号, 经过 Q_3 , 然后由电容 C 旁路到地, 从而保持了 Q_3 的基极电位 V_{b3} 不变; 而 Q_3 的基-射级二极管因为整流作用, 其基-射电压 V_{be3} 会下降, 因此补偿了 V_{b0} 的下降, 使得 Q_0 的偏置点在高功率保持不变, 从而抑制增益压缩。

通过一个反馈环路, 可以将HBT内部的热电反馈用环路增益表达。当基极偏置由一个电压源和一个整流电阻 R_b 串联组成时, 最终的环路增益为^[11]:

$$f = \frac{a}{kT_0/q + I_b R_b} R_{th} I_c V_c - \frac{\Delta E}{kT^2} R_b I_p R_{th} I_c V_c$$

式中, R_{th} 是热阻; T 是器件内部的温度; a 是热电反馈系数; I_p 是空穴电流; ΔE 是有效的空穴与电子的能带差; 右边第一项和第二项分别代表HBT内部的正反馈和负反馈, 第一项表示发射结开启电压随温度减小, 第二项表示发射极注入效率随温度减小。假设 $f=0$, 可以计算出正反馈和负反馈刚好平衡时的镇流电阻阻抗(R_T)。当基极整流电阻 $R_b=R_T$ 时, 正负反馈刚好抵消。由于有源偏置电路的直流提升效应, 功率放大器整流电阻 R_b 的选择也需要PAE与线性度的折中, 最终整流电阻 R_b 的数值基本不可能等于 R_T 。因此需要额外的温度补偿电路。

偏置电路中 Q_1 、 Q_2 、 R_0 、 R_2 构成一个温度补偿模块。当温度变化时, 假设所有晶体管基-发射级电压变化为 $-\Delta V_{be}$, 则流过晶体管 Q_1 的电流变化量为:

$$\Delta I_1 = \Delta V_{be} / R_0 \tag{1}$$

由于 Q_1 、 Q_2 构成镜像电路, 流经 Q_2 的电流变化量为:

$$\Delta I_2 = k \Delta I_1 \tag{2}$$

式中, k 为镜像放大倍数。因此, 结点 n 的电位变化量为:

$$\Delta V_n = R_2 \Delta I_2 \tag{3}$$

结点 m 的电位变化量为:

$$\Delta V_m = \Delta V_n \tag{4}$$

该变化量与 $-\Delta V_{be}$ 变化趋势相反, 从而温度补偿模块在温度变化时补偿了静态偏置电流。

令式(4)等于 ΔV_{be} , 由式(3)得:

$$\Delta V_{be} = R_2 \Delta I_2 \tag{5}$$

将式(1)和式(2)代入式(5), 可得:

$$R_0 = k R_2 \tag{6}$$

通过以上等式关系, 可以确定温度补偿电路各个器件的参数。

2 功率放大器的设计

一个基于Wavetek InGaP/GaAs HBT工艺, 工作在1.95 GHz的两级线性功率放大器的原理图如图2所示。

虚线框P1是功率放大器的MMIC部分, 为了方便调试, 其他部分都在PCB板上实现。扼流电感及输出匹配在PCB上。两级都是先分开设计, 然后通过合适的级间匹配网络连接在一起。偏置电路如图1所示, 为了高效率与高线性度的折中, 两级电路都

是偏置在AB类。考虑到HBT热效应引起的电流坍塌,镇流电阻(如图1的 R_3)需要兼顾该电阻引起的增益扩张及对HBT热效应的抑制作用。输入高通匹配网络是为了第一级获得高增益,输出匹配是为了获得高功率、高效率。输出匹配电路的 C_1 、 L_1 构成2阶谐波抑制电路, C_2 、 L_3 构成3阶谐波抑制电路。如图3所示,整个输出匹配电路是选择合适的谐波阶次,并考虑F类的效率与近似实现而设计^[12], i_1 、 i_2 、 i_3 和 V_1 、 V_2 、 V_3 分别表示3种不同输出匹配配置下的集电极电流和电压。

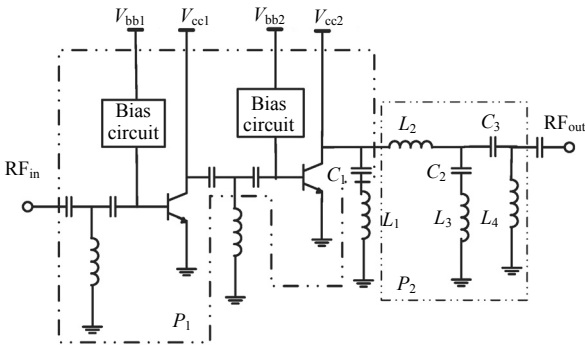


图2 原理图

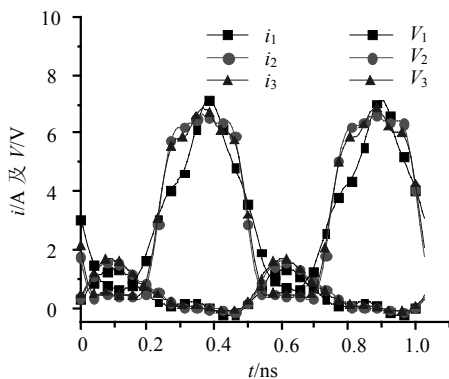


图3 输出集电极电流和电压时域图

该电路两级的发射极面积大小分别为 $798 \mu\text{m}^2$ 和 $3\ 948 \mu\text{m}^2$, 静态电流分别为 19 mA 和 52 mA, 电路的工作电压为 3.4 V。芯片 die 如图4所示, 大小为 $610 \mu\text{m} \times 750 \mu\text{m}$, 最终实现芯片大小为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。

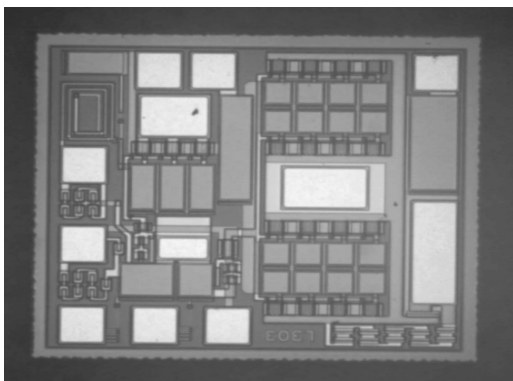


图4 芯片照片

3 放大器的性能与分析

使用安捷伦的网络分析仪E5071C测得功率放大器的小信号 S 参数 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 如图5所示, 在 $1\ 920 \sim 1\ 980 \text{ MHz}$ 频段范围内 S_{21} 超过 27 dB, 变化小于 1 dB; S_{11} 基本在 -10 dB 以下。通过 S_{21} 可看出谐波也有较好的抑制。

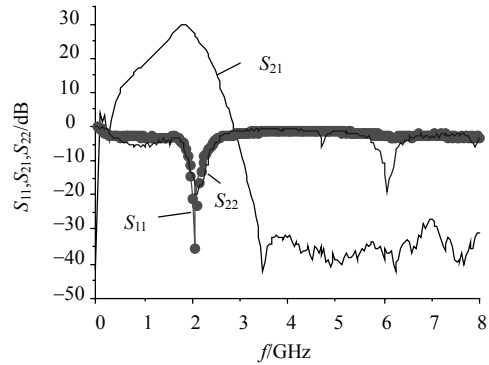


图5 小信号 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 参数图

用安捷伦的信号发生器N5182A和信号分析仪N9030A搭建测试平台, 采用WCDMA调制信号输入, 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 测得该功率放大器性能如图6和图7所示。从图6可以看出, 常温下增益(Gain)为 27 dB, 输出功率(P_{out})为 28 dBm 的时候功率附加效率(PAE)达到了 42%。从图7中可以看出, 常温下输出功率为 27 dBm 时也能满足WCDMA的标准; 输出 28 dBm 时, 邻信道功率比(ACPR)为 -36 dBc。而在高温和低温情况下, PAE和ACPR变化较小, 增益的波动也小于 $\pm 2 \text{ dB}$ 。此外, 静态电流会随温度的增加而增加, 变化量也小于 5 mA。

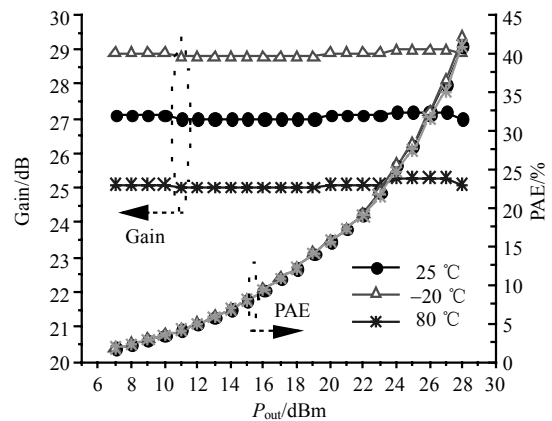


图6 不同温度环境下的增益和功率附近效率

从表1中静态电流变化量可以看出, 本文的温度补偿电路有较好的温度补偿性能, 而且对功率放大器的主要性能随温度变化也有较好的抑制。此外, 文献[9]的静态电流变化量最低, 是其静态电流工作在 12.5 mA 的极低状态。表2为工作在同一个频率范

围的不同功放设计的对比。

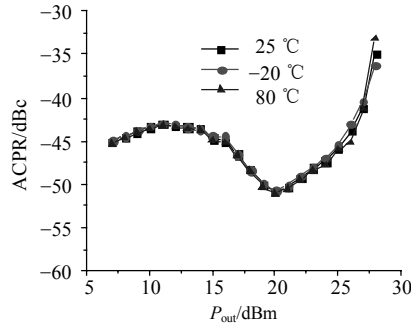


图7 不同温度环境下的邻信道功率比

表1 温度补偿性能对比

	温度范围 /°C	ICQ变化 /mA	Gain变化 /dB	PAE变化 /%	ACPR变化 /dBc
文献[8]	-25~85	6	—	—	—
文献[9]	-30~85	4	—	—	>5
文献[13]	-20~80	—	1.1	—	—
本文方法	-20~80	5	3.8	1.5	3

表2 功率放大器主要性能对比

常温	Process	ICQ /mA	Gain /dB	PAE/% @P _{out} /dBm	ACPR/dBc @P _{out} /dBm
文献[14]	HBT	37	20.6	45.7@29.3	-32.7@27
文献[15]	BiFET	100	27.5	42@28.5	-40@28.5
文献[16]	pHEMT	110	27	42@28.5	-40@28.5
本文方法	HBT	71	27	42@28	-36@28

4 结 论

本文设计了一种有温度补偿特性的功率放大器。其中温度补偿电路结构简单,能跟功率放大器集成为单一芯片。该放大器的工作电压为3.4 V,输入输出级静态电流很低,分别为19 mA和52 mA,常温下该放大器增益有27 dB;输出功率为28 dBm时功率附件效率(PAE)达到了42%,ACPR为-36 dBc。在-20 °C到80 °C之间PAE和ACPR在低功率输出时基本不变。可见该电路利用有源偏置电路有效地提高了线性度,并且降低了放大器对温度的敏感性。放大器采用F类的工作模式设计也获得了较高的效率和较好的谐波抑制。

参 考 文 献

[1] ZHANG G, KHESBAK S, AGARWAL A, et al. Evolution of RFIC handset PAs[J]. IEEE Microwave Magazine, 2010, 11(1): 60-69.
 [2] CHUNG Y. Distortion-cancellation of GaAs-HBT amplifier using bias-voltage droop control[J]. Electronics Letters, 2012, 48(18): 1134-1136.
 [3] JANG J S, LEE K H. Implementation of InGaP/GaAs HBT MMIC PA with gain-expansion drive-amplifier and dohertry structure[C]//International Conference on Information Science and Applications. Suwon: IEEE Press, 2013: 1-3.
 [4] MEDINA J F M, OLAVSBRAATEN M, GJERTSEN K M.

Biassing an HBT MMIC transistor for efficiency and output power enhancement[C]//Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits. Ireland Dublin: IEEE Press, 2012:1-3.
 [5] GREBENNIKOV A. Load network design technique for class F and inverse class F PAs[J]. High Frequency Electronics, 2011, 10(5): 58-76.
 [6] SEVIMLI O, PARKER A E, FATTORINI A P, et al. Measurement and modeling of thermal behavior in InGaP/GaAs HBTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(5): 1632-1639.
 [7] ISHIKAWA R, KIMURA J, HONJO K. Analytical design method for a low-distortion microwave InGaP/GaAs HBT amplifier based on transient thermal behavior in a GaAs substrate[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2013, 3(10): 1705-1712.
 [8] JARVINEN E, KALAJO S, MATILAINEN M. Bias circuits for GaAs HBT power amplifiers[C]//Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International. Phoenix: IEEE Press, 2001: 507-510.
 [9] JEON J, KIM J, KWON Y. Temperature compensating bias circuit for GaAs HBT RF power amplifiers with stage bypass architecture[J]. Electronics Letters, 2008, 44(19): 1141-1143.
 [10] 李诚瞻, 陈志坚, 王永平, 等. InGaP/GaAs HBT射频功率放大器在片温度补偿电路研究[J]. 中国集成电路, 2010(11): 57-61.
 LI Cheng-zhan, CHEN Zhi-jian, WANG Yong-ping, et al. An on chip temperature compensation circuit research on InGaP/GaAs HBT power amplifier[J]. China Integrated Circuit, 2010(11): 57-61.
 [11] ZHU Y, TWYNAM J K, YAGURA M. Self-heating effect compensation in HBTs and its analysis and simulation[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(11): 2640-2646.
 [12] KIM J H, JO G D, OH J H, et al. Modeling and design methodology of high-efficiency Class-F and Class-F⁻¹ power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(1): 153-165.
 [13] LI Cheng-zhan, CHEN Zhi-jian, HUANG Ji-wei, et al. An on-chip temperature compensation circuit for an InGaP/GaAs HBT RF PA[J]. Journal of Semiconductors, 2011(13): 131-134.
 [14] JI H K, KI Y K, CHUL S P. Linearity improvement of a power amplifier using a series LC resonant circuit[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(5): 332-334.
 [15] HAU G, SINGH M. Multi-mode WCDMA power amplifier module with improved low-power efficiency using stage-bypass[C]//IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). Anaheim, California: IEEE Press, 2010: 163-166.
 [16] HAU G, HUSSAIN A, TURPEL J, et al. A 3×3 mm² LTE/WCDMA dual-mode power amplifier module with integrated high directivity coupler[C]//IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). Atlanta: IEEE Press, 2011: 138-141.

编辑 税红