

采用 PIN 二极管反馈的射频可变增益放大器

张良浩, 谢红云, 赵彦晓, 张万荣, 江之韵, 刘 硕

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

摘 要: 射频可变增益放大器大多基于 CMOS 工艺和砷化镓工艺, 通过改变晶体管的偏置电压或建立衰减器增益控制结构实现增益可调. 本文采用高性能的射频锗硅异质结双极晶体管, 设计并制作了一款射频可变增益放大器. 放大器的增益可控性通过改变负反馈支路中 PIN 二极管的正向偏压来实现. 基于带有 PIN 二极管反馈的可变增益放大器的高频小信号等效电路, 本文详细分析了增益可控机制, 设计并制作完成了 1.8GHz 的可变增益放大器. 测试结果表明在频率为 1.8GHz 时, 控制电压从 0.6V 到 3.0V 的变化范围内, 增益可调范围达到 15dB; 噪声系数低于 5.5dB, 最小噪声系数达到 2.6dB. 整个控制电压变化范围内输入输出匹配均保持良好, 线性度也在可接受范围内.

关键词: 可变增益放大器; PIN 二极管; 小信号等效电路; 锗硅异质结双极晶体管; 射频

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)01-0206-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.01.030

Radio Frequency Variable Gain Amplifier with Variable Feedback of PIN Diode

ZHANG Liang-hao, XIE Hong-yun, ZHAO Yan-xiao, ZHANG Wan-rong, JIANG Zhi-yun, LIU Shuo

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Most of the radio frequency (RF) variable gain amplifiers (VGA) are fabricated in CMOS process and GaAs process. The gain variability is usually realized when the biased voltage/current of transistors is changed or an attenuator in VGAs is built. A RF VGA variable gain amplifier based on high performance RF SiGe heterojunction bipolar transistor (HBT) is presented. The designed VGA consists of a feedback path with a PIN diode. The PIN diode forward resistance is controlled by its forward biased voltage, and hence the dB-linear variable gain is realized when the PIN diode forward biased voltage is altered. After the high-frequency small-signal equivalent circuit of the VGA with the PIN diode feedback is built, the gain controlling mechanism is analyzed. A complete design and implementation of a 1.8GHz VGA with the proposed VGA topology was demonstrated. The test results show that the dynamic gain scope reaches 15dB at the frequency of 1.8GHz when the controlling voltage changes from 0.6V to 3.0V. The noise figure is lower than 5.5dB and the minimum noise figure achieves 2.6dB. The input and output matching keeps well and the linearity is also acceptable in the whole voltage variable range.

Key words: variable gain amplifier; PIN diode; small-signal equivalent circuit; SiGe heterojunction bipolar transistor; radio frequency

1 引言

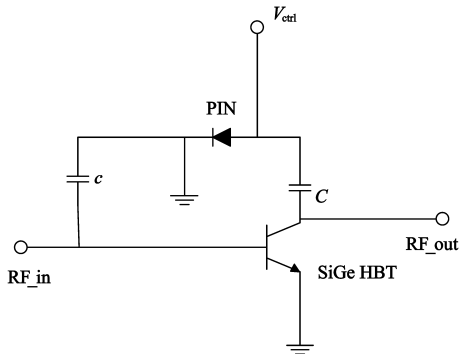
无线通信系统的传输环境复杂多变, 并存在不可避免的电磁干扰, 因此数据信号传输时存在的传播路径不同、功率损耗不同等因素会导致传输信号幅度变化很大. 为保证数据传输的准确性, 需要无线接收机中

采用可变增益放大器对接收到的不同幅度的信号进行处理, 保持接收机稳定的信号输出.

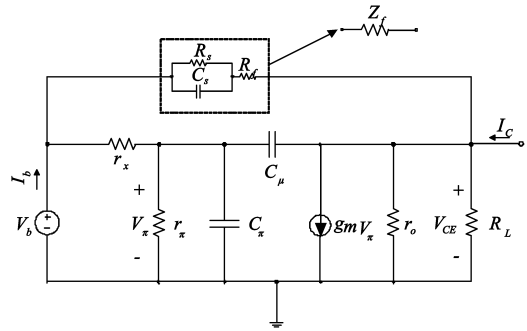
国内外对于可变增益放大器 (Variable Gain Amplifier, VGA) 的研究大多用砷化镓 (GaAs) 工艺^[1]与 CMOS 工艺^[2]实现. 然而 GaAs 工艺不能与成熟的 Si 平面工艺兼容, 不利于集成且成本较高. CMOS 工艺成熟, 器件成

本低,但适合于低频段工作.与 CMOS 器件相比,价格相当的情况下 SiGe 器件具有更好的高频特性和噪声性能.因此本文基于高性能射频锗硅异质结双极晶体管(Radio Frequency SiGe Heterojunction Bipolar Transistor, RF SiGe HBT)展开采用 PIN 二极管反馈的 VGA 设计.

近年来,对 SiGe HBT VGA 的研究越来越多,但是文献[3]没有实物测试结果;文献[4]中增益可变范围仅有 10dB,不能更好的满足无线接收系统的需求;而且从高频小信号等效电路的角度对设计进行分析验证的文献也很少^[1-5],设计过程会有一些盲目性.本文设计采用 PIN 二极管反馈的射频可变增益放大器,利用 PIN 二极管在正向偏置下等效电阻阻值随偏压变化而变化的特性实现增益可调.从 SiGe HBT 的小信号等效电路



(a) 负反馈增益可控电路拓扑图



(b) 负反馈增益可控电路的高频小信号等效电路

图 1 采用 PIN 二极管反馈的可变增益放大器电路拓扑及高频小信号等效电路

图 1(b)给出了 PIN 二极管处于正向偏置条件时,负反馈增益可控电路的小信号等效电路.其中 R_f 为二极管的等效正向电阻,阻值一般随着正向偏压 V_{ctrl} 的增大而减小^[6], R_s 和 C_s 是 PIN 二极管的寄生电阻和寄生电容. PIN 二极管正向偏压时的等效阻抗可以表示为

$$Z_f, \text{ 且 } Z_f = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + sC_s}$$

频率范围内, R_s 约为 7Ω , C_s 取值在 0.25pF 左右^[7]. g_m 是 HBT 的跨导, C_π 和 C_μ 分别为发射结电容和集电结电容^[8], r_x 为基区电阻, r_π 为发射结间电阻, 输出电阻 r_o 远大于负载电阻 R_L , 所以其对增益的影响可以忽略不计^[9].

如图 1(b)所示,集电极电流 I_c 为:

$$I_c = g_m V_\pi + sC_\mu (V_{CE} - V_\pi) + \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f} + \frac{V_{CE}}{R_L} \quad (1)$$

基极电流 I_b 为:

$$I_b = \frac{V_\pi}{R_\pi} + V_\pi sC_\pi - (V_{CE} - V_\pi) sC_\mu - \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f} \quad (2)$$

电流增益 G_A 可以表示为:

模型参数出发,建立包含反馈 PIN 二极管的高频小信号等效电路模型,分析得出了增益与控制电压的关系.采用 Infineon BFP 740 SiGe HBT 和 Hitachi HVM14S PIN 二极管完成了采用 PIN 二极管反馈的 VGA 的制作与测试.结果表明此设计具有良好的动态增益变化范围和良好的噪声特性,并且输入输出匹配良好.

2 增益控制电路设计与分析

本文采用负反馈支路调控方法实现 VGA 的增益可控,电路拓扑如图 1(a)所示. SiGe HBT 是 VGA 的核心元件, VGA 反馈支路由 PIN 二极管构成, V_{ctrl} 控制 PIN 二极管的偏置,隔直电容位于负反馈支路中消除直流信号的影响.

$$G_A = \frac{I_c}{I_b} = \frac{g_m V_\pi + sC_\mu (V_{CE} - V_\pi) + \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f} + \frac{V_{CE}}{R_L}}{\frac{V_\pi}{r_\pi} + V_\pi sC_\pi - (V_{CE} - V_\pi) sC_\mu - \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f}} \quad (3)$$

由于 r_x 远小于 r_π , 所以 V_π 近似等于 V_b , G_A 表示为:

$$G_A = \frac{I_c}{I_b} = \frac{g_m V_b + sC_\mu (V_{CE} - V_b) + \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f} + \frac{V_{CE}}{R_L}}{\frac{V_b}{r_\pi} + V_b sC_\pi - (V_{CE} - V_b) sC_\mu - \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f}} \quad (4)$$

文献[10]提供了 SiGe HBT 高频小信号等效电路模型参数的精确测试方法并提取了 SiGe HBT 不同偏置下高频等效参数值.本文设计中 HBT 的直流偏置为 $V_{CE} = 1.5\text{V}$, $I_c = 9.7\text{mA}$, $I_B = 66\mu\text{A}$, 参考给出的小信号等效电路参数值: $r_\pi = 400\Omega$, $g_m = 0.3649\text{S}$, $C_\mu = 12.633\text{fF}$, $C_\pi = 0.8854\text{pF}$, 结合设计电路的元器件值 $V_b = 0.8\text{V}$, $R_L = 50\Omega$. 对表达式(4)进行分析与计算, 所得结果如图 2 所示. 随着负反馈支路的等效电阻 R_f 的增大, VGA 的增益 G_A 呈增大的趋势, 当 R_f 为 0Ω 时, 增益 G_A 为 3 左右, R_f 增大到 180Ω 时, G_A 也随之增大到 38 左右, 而随着电阻 R_f 继续增大, G_A 趋于平缓. 反馈支路等效电阻 R_f 的大小取决于 PIN 二极管的正向偏置下的等

效电阻. 随着控制电压 V_{ctrl} 的增大, PIN 二极管的等效电阻逐渐减小. 因此, 可以通过控制电压 V_{ctrl} 来控制反馈支路等效电阻 R_f 的大小, 从而实现可变增益 VGA 的增益可调.

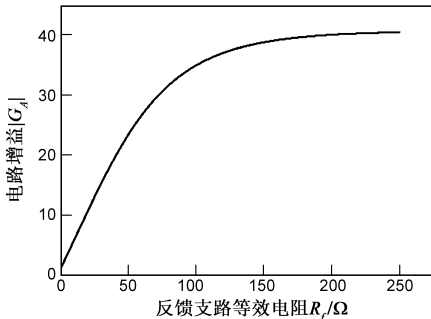


图2 不同负反馈支路等效电阻 R_f 下的 $|G_A|$

3 采用 PIN 反馈的 VGA 设计与制作

采用 PIN 二极管反馈的 VGA 的电路结构如图 3 所示. 电路核心放大元件采用 Infineon BFP 740 SiGe HBT, 负反馈支路中采用 Hitachi HVM14S PIN 二极管. C_1, C_2, C_3 和 C_4 均为隔直电容, C_1 和 C_2 分别位于 VGA 的输入和输出端, C_3 和 C_4 位于负反馈支路. 电阻 R_1, R_2 和直流源 V_{cc} 为 Q_1 提供合适直流偏置, 电阻 R_3 与直流源 V_{ctrl} 共同为 PIN 二极管 D_1 提供直流偏置. R_{m1} 和 R_{m2} 是在频率为 1.8GHz 时的输入输出匹配电阻. 电感 L_f 和 PIN 二极管 D_1 共同组成负反馈支路, 反馈电感 L_f 用以降低 VGA 增益降低时的噪声. 图 4(a) 所示为 VGA 噪声性能的仿真结果, 并对比给出了有无反馈电感 L_f 时, 噪声系数随控制电压 V_{ctrl} 的变化情况. 当控制电压 V_{ctrl} 为 0.6V 时, 两种情况下 NF 均为 2.6dB, 当 V_{ctrl} 变化到 3.0V 时, 存在反馈电感 L_f 时 NF 为 5.5dB, 而不存在反馈电感 L_f 时, NF 则达到了 7.6dB. 可见, L_f 在 VGA 增益降低时有助于减少系统的噪声. 但 VGA 的噪声在增益较低时仍然偏高, 这是由于输入匹配是由电阻 R_{m1} 来实现, 在输入端引入了大的噪声. 若采用电容电感匹配或者微带线匹配进行改进, 我们相信电路的噪声会进一步减小.

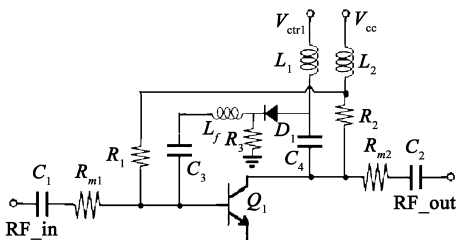
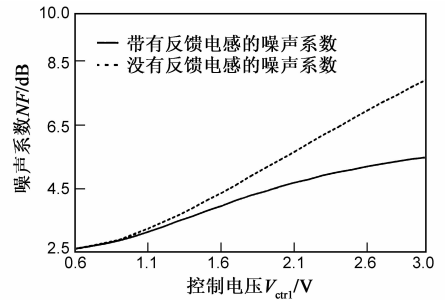


图3 采用PIN二极管反馈的VGA电路结构

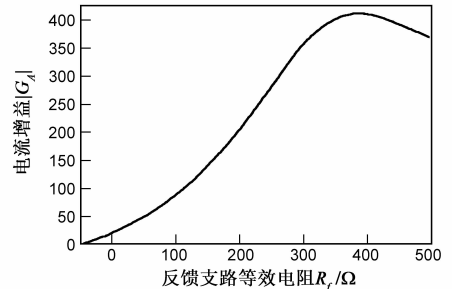
由于反馈支路中存在电感 L_f , 表达式(4)改写为:

$$G_A = \frac{I_C}{I_b} = \frac{g_m V_b + sC_\mu (V_{CE} - V_b) + \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f + L_f} + \frac{V_{CE}}{R_L}}{\frac{V_b}{r_\pi} + V_b sC_\pi - (V_{CE} - V_b) sC_\mu - \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f + L_f}} \quad (5)$$

同样对表达式(5)进行分析与计算, 所得结果如图 4(b). 随着负反馈支路的等效电阻 R_f 的增大, VGA 的增益 G_A 呈先增大后减小的趋势, 当 R_f 为 0Ω 时, 增益 G_A 为 5 左右, R_f 增大到 350Ω 时, G_A 也随之增大到 380 左右, 而随着电阻 R_f 继续增大, G_A 反而减小. 在 R_f 小于 350Ω 范围内, 图 4(b) 中曲线斜率大于图 2 中曲线斜率, 说明 L_f 在降低 VGA 噪声的同时也有助于增大 VGA 的动态增益.



(a) 不同控制电压下的噪声系数



(b) 带有反馈电感 L_f 的 VGA 中不同 R_f 下的 G_A

图4 反馈电感 L_f 对 VGA 的噪声和增益的影响

图 5 给出了采用 PIN 二极管反馈的 VGA 的仿真结果. 图 5(a) 所示为控制电压 V_{ctrl} 在 0.6V 到 3.0V 范围内 S_{21} 的变化曲线. 线性增益范围达到 22dB, 当 V_{ctrl} 为 0.6V 时, VGA 具有最大增益为 19dB. 图 5(b) 是输入与输出电压驻波比与 V_{ctrl} 的关系, 随着 V_{ctrl} 的变化, 输入和输出电压驻波比分别保持在 2.6 和 2.7. 显而易见, VGA 的输入输出匹配基本没有受到控制电压变化的影响. 因此负反馈支路对输入输出匹配的影响可以忽略.

图 6 为制作完成的 PIN 反馈 VGA, PCB 板的大小为 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$, PCB 板介质层厚度为 1.0mm, 介电系数大约为 2.56. 顶层包括所有的元件, 电源和传输线, 底层为固定接地层. 电路板的传输线是宽度为 0.418mm 共平面型波导, 特征阻抗为 50Ω , 接地性能良好. 为了确保 PCB 板的良好接地, 信号线旁边均匀放置了接地通孔. 同时采用 SMA 适配器连接输入和输出端, 保证射频信号无损传输.

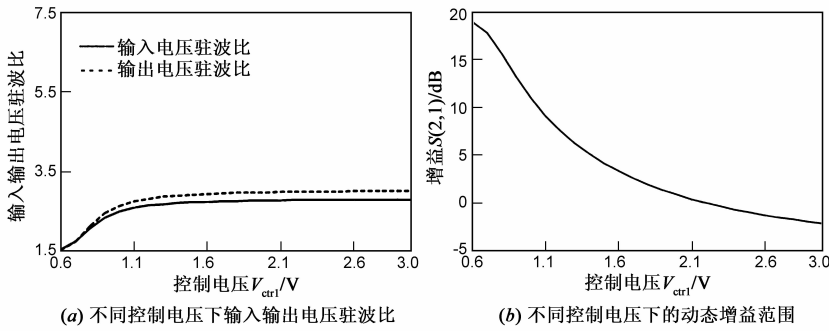


图5 不同控制电压下VGA的增益和电压驻波比

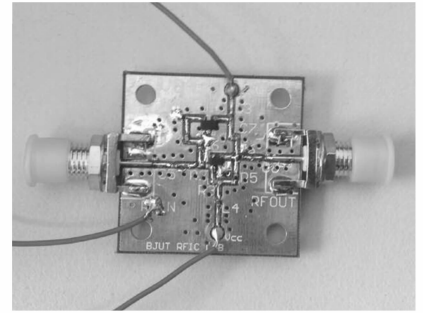


图6 采用PIN二极管反馈的VGA

图 7(a) 为不同控制偏压下的增益测试结果, 直流电源 V_{cc} 为 3V, 为 HBT 集电极提供 7mA 的偏置电流. 测试频率为 1.8GHz, 控制电压 V_{ctrl} 变化范围为 0.6V 到 3V. 当控制电压为 0.6V 时, 获得最大增益为 17.745dB; 当控制电压逐渐增加到 3V 时, 增益也逐渐降低到 3.8dB, 增益的动态变化范围为 15dB. 对比图 5 (a) 和图 7(a) 的数据, 由于仿真时没有考虑输入端和输出端的射频信号损失, 信号传输损耗等原因, 仿真和测试结果存在一些差异.

图 7(b) 为 VGA 的输入反射系数 S_{11} 和输出反射系数 S_{22} 与控制电压 V_{ctrl} 的关系. 随着 V_{ctrl} 的变化, S_{11} 和 S_{22} 均保持在 -28 dB 左右, 说明 VGA 的输入输出匹配良好, 并且不受控制电压影响. 图 7(c) 为 VGA 的 1dB 压缩点和三阶交调点与控制电压 V_{ctrl} 的关系. 随着 V_{ctrl} 的变化, 1dB 压缩点从 -28.8 dBm 变化到 -19.8 dBm, 三阶交调点从 -22.3 dBm 变化到 -11 dBm. 可以看出, 在增益较低时, VGA 的线性度适合于射频接收机前端应用. 随着增益增大, VGA 处理的信号功率也会增大, VGA 线性度有所下降.

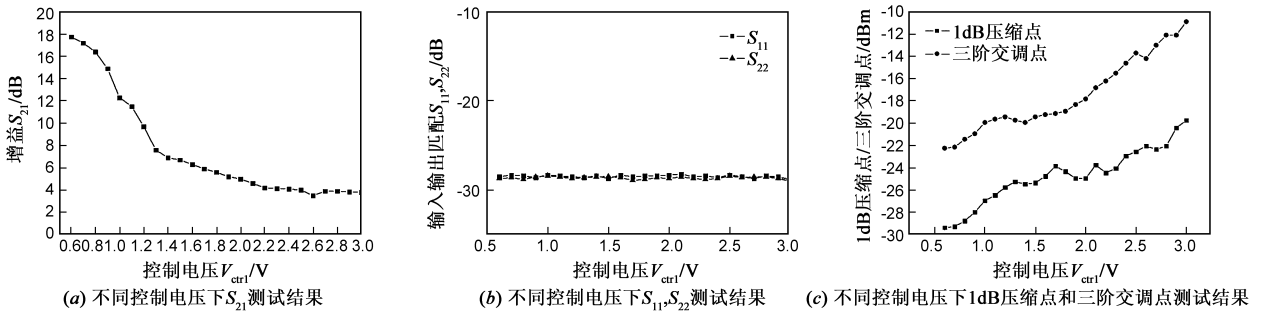


图7 不同控制电压下VGA的测试结果

4 结论

为了实现良好的动态增益变化, 本文设计了一种基于负反馈的增益可控结构, 采用 VGA 高频小信号等效电路模型, 对增益可变机制进行了理论分析. 通过分析发现改变控制电压可以引起反馈支路中 PIN 二极管等效电阻的变化, 从而引起 VGA 增益的变化. 本文完成了工作于 1.8GHz 的射频 VGA 的设计, 并在反馈支路中串联反馈电感 L_f 来抵消噪声. 采用 Infineon BFP 740 SiGe HBT 和 Hitachi HVM14S PIN 二极管完成了 VGA 的制作与测试. 结果表明, 控制电压从 0.6V 到 3.0V 的变化范围内, VGA 获得了 15dB 的线性动态增益变化范围, S_{11} 和 S_{22} 都稳定在 -28 dB 左右, 噪声系数低于 5.5dB.

参考文献

[1] Zhou L, Wu D, Wu J, et al. Design of a 10GHz bandwidth

variable gain amplifier using a GaAs HBT technology [A]. Proceedings of 2012 International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology [C]. Chengdu: IEEE, 2012. 1 - 4.

[2] Le H V, Duong H T, Huynh A T, et al. A CMOS wideband highly linear variable gain amplifier [A]. 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings [C]. Seoul: IEEE, 2013. 694 - 696.

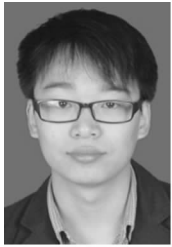
[3] Gan J N, Zhang W R, Xie H Y, et al. A high dynamic range SiGe HBT variable gain amplifier for WCDMA applications [A]. Proceedings IEEE INDIN 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics [C]. Daejeon: IEEE, 2008. 610 - 613.

[4] Lin K C, Chiou H K, Wu P C, et al. Variable gain active predistorter with linearity enhancement for a 2.4 GHz SiGe HBT power amplifier design [A]. 2012 International Symposium on VLSI Design, Automation, and Test [C]. Hsin-

chu; IEEE, 2012. 1 - 4.

- [5] Kumar T B, Ma K, Yeo K S. Temperature-compensated dB-linear digitally controlled variable gain amplifier with DC offset cancellation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(7): 2648 - 2661.
- [6] 杨祥林, 等. 微波器件原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1994. 359 - 360.
- [7] Hitachi. HVM14S Silicon Epitaxial Planar PIN Diode for High Frequency Attenuator [OL]. <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/64338/HITACHI/HVM14S.html>, 2014.
- [8] 丁家峰. PIN 二极管的物理机制仿真模型及其应用研究 [D]. 广州: 中南大学, 2001.
- [9] Sedra A S, Smith K C. 微电子电路 [M]. 周玲玲, 等, 译. 第五版. 北京: 电子工业出版社, 2006. 417 - 420.
- [10] Xia K, Niu G, Sheridan D C, et al. Frequency and bias-dependent modeling of correlated base and collector current RF noise in SiGe HBTs using quasi-static equivalent circuit [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2006, 53(3): 515 - 522.

作者简介



张良浩 男, 1989 年生于河北沧州. 现为北京工业大学电子信息与控制工程学院硕士研究生, 主要研究方向为射频集成电路.

E-mail: zhanglianghao@emails.bjut.edu.cn

谢红云 (通讯作者) 女, 1978 年生于河北石家庄, 现为北京工业大学电子信息与控制工程学院副教授, 硕士生导师. 研究方向为半导体高速光电器件与光电集成电路; 半导体射频 (RF) 器件与射频 (RF) 集成电路.

E-mail: xiehongyun@bjut.edu.cn