

基于 PIN 二极管的动态信号反馈增益调控电路

谢红云, 吴佳辉, 刘 芮, 高 杰, 马 佩, 张万荣
(北京工业大学信息学部微电子学院, 北京 100124)

摘 要: 为了实现超宽带可变增益放大器在超宽频带内增益变化的一致性和增益平坦度, 需要一个增益调控单元在保证其大的增益变化范围的同时对平坦度进行调节. 为此, 提出一款基于 PIN 二极管的动态信号反馈增益调控电路, PIN 二极管作为增益反馈的可变阻抗实现动态信号增益调控, 串联电感与电容构成带通滤波器选择增益需要调整的频带. 建立了 PIN 二极管的等效电路模型, 并采用 e 函数形式拟合确定其不同频率时的等效阻抗参数. 利用包含 PIN 二极管的动态信号反馈电路的高频小信号等效模型, 分析了调控电路的动态反馈调节机制, 研究结果表明: 该动态信号反馈增益调控电路能够对可选频带范围内变化较大的增益进行调节, 使整个频带保持一致的变化范围, 同时对于每一个变化增益, 都保持良好的增益平坦度.

关键词: 超宽带; PIN 二极管; 增益调控; 可变增益; 增益平坦度; 反馈控制

中图分类号: TN 721.5

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2018)11-1391-05

doi: 10.11936/bjtxb2017120019

Dynamic Signal Feedback Gain Control Circuit Based on PIN Diode

XIE Hongyun, WU Jiahui, LIU Rui, GAO Jie, MA Pei, ZHANG Wanrong

(Microelectronics Institute, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To achieve the gain consistency and gain flatness of an ultra wideband variable gain amplifier in ultra wideband, a gain control unit is required to ensure the wide gain variation range mean and adjust the gain flatness. In this paper, a dynamic signal feedback gain control circuit based on PIN diode was proposed and the PIN diode was used as the variable impedance of the gain feedback to implement dynamic signal gain control. The serial inductor and capacitor formed the band-pass filter to select the frequency band needed to adjust its gain. Furthermore, the equivalent circuit model of PIN diode was established and the equivalent impedance parameter under different frequencies was determined by e-function fitting. The dynamic feedback adjustment mechanism of the control circuit was analyzed by using the high frequency equivalent small signal model of the dynamic signal feedback circuit. Result shows that the dynamic gain feedback control circuit can adjust the gain of the frequency band, which has large gain fluctuation to keep the whole frequency band in a consistent range. As the same time, the dynamic gain feedback can maintain a good gain flatness for each variable gain.

Key words: ultra-wideband; PIN diode; gain control; variable gain; gain flatness; feedback control

收稿日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61574010,61604106,61774012); 北京市未来芯片技术高精尖创新中心科研基金资助项目(KYJJ2016008); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014FL025); 北京市自然科学基金资助项目(4122014, 4142007)

作者简介: 谢红云(1978—), 女, 副教授, 主要从事半导体高速光电器件与光电集成电路、半导体射频器件与射频集成电路方面的研究, E-mail: xiehongyun@bjut.edu.cn

超宽带 (ultra-wideband, UWB) 系统作为一种低功耗、高传输速率的无线通信技术, 被广泛地应用于个人局域网、雷达定位和智能交通等各个领域^[1], 而作为 UWB 系统中自动增益控制部分关键模块的 UWB 可变增益放大器, 如何使其在拥有大的增益变化范围的同时又保证其在整个频带内的增益平坦度则越来越成为研究的热点. 可变增益放大器增益调控多采用改变跨导或输出电阻的方法来实现增益变化^[2]. 文献[3]所设计的可变增益放大器可以实现最大 84 dB 的增益变化, 通过文中所提出的增益平坦电容技术可以实现良好的增益平坦度, 但其频带范围从 1 MHz 到 1 GHz, 无法满足射频接收器的基本要求; 文献[4]由三级放大器与缓冲器共同组成了一个可变增益放大器, 增益平坦度良好且增益变化范围可达 48 dB, 但是其频带太窄, 仅为 400 MHz; 文献[5]采用保持输入阻抗不变, 调整输出电阻的方式进行增益调控, 但其设计方式较为复杂, 且频带范围太窄, 仅从 470 MHz 到 870 MHz.

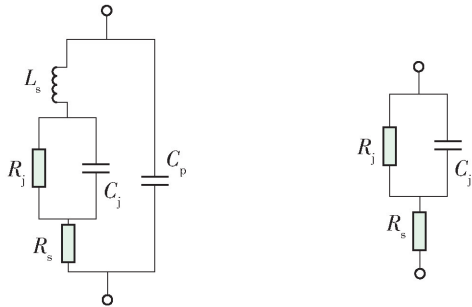
针对上述文献设计中的不足, 本文提出了一款动态信号反馈增益调控 (dynamic signal feedback gain-control, DSFG) 电路. 该电路中利用 PIN 二极管不同偏置下的可变阻抗对 UWB 可变增益放大器的增益进行动态调控, 反馈电感 L_f 和电容 C_1 、 C_2 串联形成带通滤波器用来选择增益需要调整的频带, 电阻 R 用以提高调控精度, 最终实现增益平坦度的可调节性. 文章采用 e 指数函数拟合的形式建立了 PIN 二极管等效阻抗表达式, 并修正了不同频率时表达式中的系数. 将该 DSFG 电路应用到 UWB 射频放大器中, 建立高频小信号等效模型, 分析了 DSFG 电路动态反馈调节机制. 结果表明, 该动态信号反馈增益调控电路能够对可选频带范围内变化较大的增益进行调节, 使整个频带保持一致的变化范围, 同时对于每个变化增益都保持良好的增益平坦度.

1 PIN 二极管的特性分析

图 1(a) 为 PIN 二极管的等效电路图^[6]. 其中: L_s 为电极引线电感; C_p 为管壳寄生电容; C_j 为 PIN 的结电容; R_j 为结电阻; R_s 代表了串联损耗, 包括 P 层和 N 层体电阻与接触电阻. 在正向偏置下, 因为 C_p 和 L_s 都比较小, 所以可忽略二者对电路的影响, 因此 PIN 二极管最终可以等效为如图 1(b) 的形式. PIN 二极管等效阻抗表达式为

$$Z_f = \frac{1}{\frac{1}{R_j} + j\omega C_j} + R_s \quad (1)$$

PIN 结与普通 PN 结有诸多相似之处, 因此, 首先借用 PN 结的结电阻和结电容的表达式对 PIN 等效阻抗进行分析.



(a) 二极管未简化等效电路 (b) 二极管简化等效电路

图 1 PIN 二极管等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of PIN diode

PN 结电阻与结电容表达式^[7]分别为

$$R_j = \frac{V}{I} = \frac{V}{AJ_s} \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) \quad (2)$$

$$C_j = \left[Aq^2 \frac{n_{p0}L_n + p_{n0}L_p}{k_0T} \right] \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) \quad (3)$$

将式(2)(3)代入式(1)可得 PIN 的等效阻抗近似表达式为

$$Z_f = \frac{1}{\frac{1}{\frac{V}{AJ_s} \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right)} + j\omega \left[Aq^2 \frac{n_{p0}L_n + p_{n0}L_p}{k_0T} \right] \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)} + R_s \quad (4)$$

整理可得 PIN 等效阻抗为

$$Z_f = \frac{1}{\left(\frac{AJ_s}{V} + j\omega Aq^2 \frac{n_{p0}L_n + p_{n0}L_p}{k_0T}\right) \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right)} + R_s \quad (5)$$

由于 PIN 结与普通的 PN 结相比多了本征的 I 层, 因此式(5)并不能准确表达其等效阻抗. 由式(5)可以看出其形式为如式(6)所示的 e 函数, 其中, V 代表调控电压 V_{ctrl} , A 、 t 和 y 为需要拟合的系数. 因此可以通过 e 函数拟合对超宽频带范围内不同频率时的系数进行修正, 即

$$Z_f = A \exp\left(-\frac{V}{t}\right) + y \quad (6)$$

选择设计中所采用的 Hitachi HVM14S PIN 二极管作为分析对象, 根据不同频段下 PIN 阻抗的实测值随调控电压变化的曲线可以确定 PIN 等效阻抗

中的拟合系数. 图 2 是 4 GHz 下正偏 PIN 二极管等效阻抗及拟合函数曲线. 当 V_{ctrl} 从 1 V 增大到 5 V 时, 等效阻抗 Z_f 随之从 210 变化到 42, 对此变化曲线进行 e 函数拟合, 可得 4 GHz 下正偏 PIN 二极管的等效阻抗为

$$Z_{t_2} = 1\,708.9 \exp\left(-\frac{V_{ctrl}}{0.545\,8}\right) + 42.832 \quad (7)$$

3 个拟合系数分别为: $A_2 = 1\,708.9$ 、 $t_2 = 0.545\,8$ 、 $y_2 = 42.832$, 拟合度达 0.992 1.

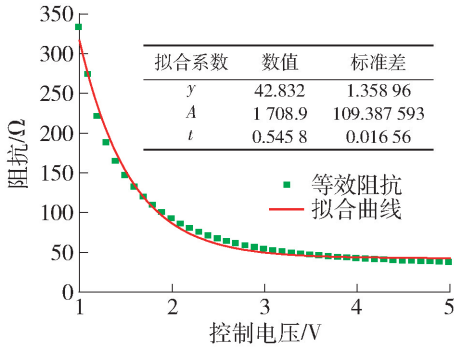


图 2 4 GHz 下正偏 PIN 二极管等效阻抗及拟合函数曲线

Fig. 2 Equivalent impedance and fitting function curve of forward biased PIN diode at 4 GHz

同理, 对 2、6 GHz 频率下阻抗进行拟合, 其结果分别为

$$Z_{t_1} = 3\,033.6 \exp\left(-\frac{V_{ctrl}}{0.467\,1}\right) + 149.281 \quad (8)$$

$$Z_{t_3} = 2\,568.2 \exp\left(-\frac{V_{ctrl}}{0.338\,1}\right) + 24.601 \quad (9)$$

2 GHz 下 3 个拟合系数分别为: $A_1 = 3\,033.6$ 、 $t_1 = 0.467\,1$ 、 $y_1 = 149.281$, 拟合度达 0.999 4.

6 GHz 下 3 个拟合系数分别为: $A_3 = 2\,568.194$ 、 $t_3 = 0.338\,14$ 、 $y_3 = 24.601\,41$, 拟合度达 0.980 9.

2 动态信号反馈增益调控电路控制机制分析

图 3 为基于 DSFG 调控电路设计的 UWB 射频放大器. 选取 Infineon BFP740 作为电路中的双极晶体管; Hitachi HVM14S 作为电路中的 PIN 二极管. 电容 C_1 、 C_2 将部分交流信号耦合入 PIN 二极管; 同时, 二者与反馈电感 L_f 串联共同构成带通滤波器来选择增益需要调整的频带; 电阻 R 通过对调控电压进行分压, 放大调控电压的变化范围, 用来提高调控精度. 如前文所述, 在正偏情况下, PIN 二极管阻抗会随着偏置电压的增大而减小, 并且由于高频情况下分布参数的影响, 不同频率下阻抗值也不尽相同, 在 2、4、6 GHz 时, 其等效阻抗如式(7)(8)(9)所示.

通过调整偏置电压 V_{ctrl} , 可以调控 DSFG 调控电路的反馈阻抗 Z_f , 从而改变选择频带内反馈信号的幅度, 最后实现超宽频带内动态信号一致的增益变化范围和增益平坦度.

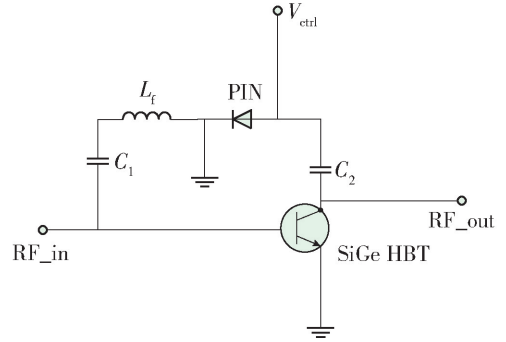


图 3 基于 DSFG 调控电路的 UWB 射频放大器

Fig. 3 UWB radio frequency amplifier based on DSFG control circuit

图 4 是基于 DSFG 调控电路的 UWB 射频放大器的高频小信号等效模型, 其中 Z_f 是正偏 PIN 二极管的等效阻抗, g_m 是 SiGe HBT 的跨导, C_π 和 C_μ 分别为 SiGe HBT 的发射结电容和集电结电容, r_x 和 r_π 分别为 SiGe HBT 基区电阻和发射结电阻. 由于通常 r_x 远小于 r_π , HBT 的输出电阻 r_o 远大于其负载电阻 R_L [8], 因此, 在分析中, 二者对增益的影响可以忽略不计.

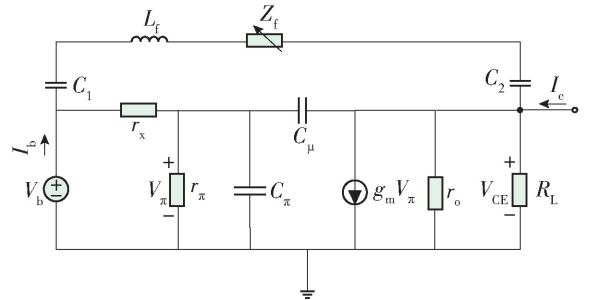


图 4 基于 DSFG 调控电路的 UWB 射频放大器高频小信号等效模型

Fig. 4 High frequency small signal equivalent circuit of UWB radio frequency amplifier based on DSFG control

由图 4 推导出的电流增益 G_A 为

$$G_A = \frac{g_m V_b + \frac{1}{j\omega C_\mu} (V_{CE} - V_b) + \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f + j\omega L_f + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}} + \frac{V_{CE}}{R_L}}{\frac{V_b}{r_\pi} + \frac{V_b}{j\omega C_\pi} - \frac{(V_{CE} - V_b)}{j\omega C_\mu} - \frac{V_{CE} - V_b}{Z_f + j\omega L_f + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}}} \quad (10)$$

式中:有源器件 PIN 二极管的阻抗值 Z_f 由前面拟合得出的不同频率下的等效阻抗给出;无源器件 C_1 、 C_2 均为 0.2 pf; L_f 为 1.3 nH. 参考文献[9]以及 BFP740 Data sheet 中提供的 SiGe HBT 在不同偏置下高频等效参数值,其在直流偏置为 $V_{CE} = 1.5$ V、 $I_b = 66 \mu\text{A}$ 、 $I_c = 9.7$ mA 时小信号等效电路参数值为: $R_L = 50$ 、 $g_m = 0.3649$ S、 $C_{\pi} = 0.8854$ pF、 $C_{\mu} = 12.633$ fF、 $r_{\pi} = 400 \Omega$.

图5为由式(10)计算得到的不同反馈增益调控电压 V_{ctrl} 下 UWB 射频放大器的电流增益 G_A . 当 V_{ctrl} 从 1 V 增大到 5 V 时,2 GHz 时增益变化约 13.96 dB,4 GHz 时增益变化约 13.85 dB,6 GHz 时增益变化约 13.73 dB,增益变化范围始终保持在 13 ~ 14 dB. 图6为计算得到的 UWB 射频放大器在整个频带范围内的电流增益 G_A . 当频率从 2 GHz 增加到 6 GHz 时,在每个不同的调控电压 V_{ctrl} 下,整个频带范围内增益的平坦度均保持 ± 2.5 dB 的变化,增益平坦度良好.

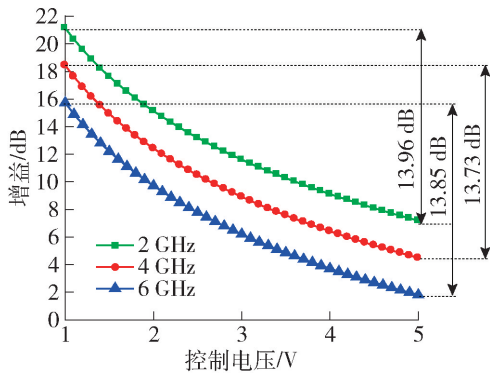


图5 不同增益调控电压 V_{ctrl} 下 UWB 射频放大器的电流增益 G_A 计算结果

Fig.5 Results of current gain G_A calculation of UWB radio frequency amplifier with different gain control voltages V_{ctrl}

图7为所设计的 UWB 射频放大器利用 ADS 仿真软件而得到的不同反馈增益调控电压 V_{ctrl} 下的电流增益 G_A . 仿真过程中,有源器件 SiGe HBT 和 PIN 二极管均从仿真库中直接调用,无源器件电容、电感、电阻等均选取理想器件,并赋值计算中所采用的数值^[10]. 结果表明,当 V_{ctrl} 从 1 V 增大到 5 V 时,2 GHz 时增益变化约 10.9 dB,4 GHz 时增益变化约 10.43 dB,6 GHz 时增益变化约 10.29 dB,增益变化范围始终保持在 10 ~ 11 dB,与式(10)计算结果相吻合. 图8为利用 ADS 仿真软件所得到的超宽频频带放大器在整个频带范围内的电流增益 G_A . 仿真

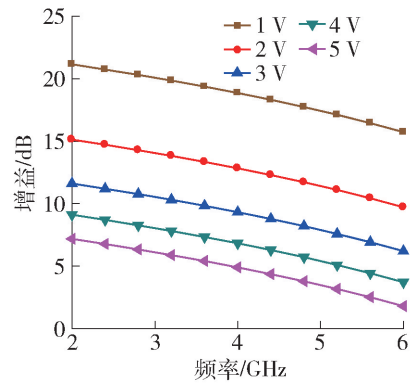


图6 整个频带内 UWB 射频放大器的电流增益 G_A 计算结果

Fig.6 Calculation results of current gain G_A for UWB radio frequency amplifier in the whole band

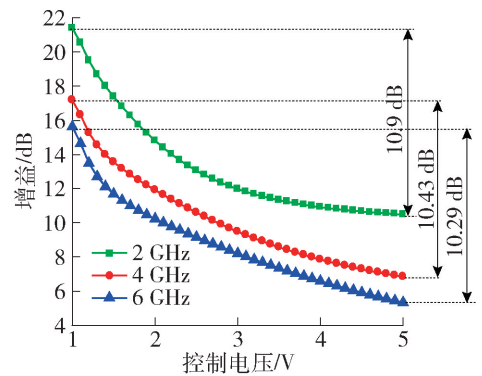


图7 不同增益调控电压 V_{ctrl} 下 UWB 射频放大器的电流增益 G_A 仿真结果

Fig.7 Results of current gain G_A simulation of UWB radio frequency amplifier with different gain control voltages V_{ctrl}

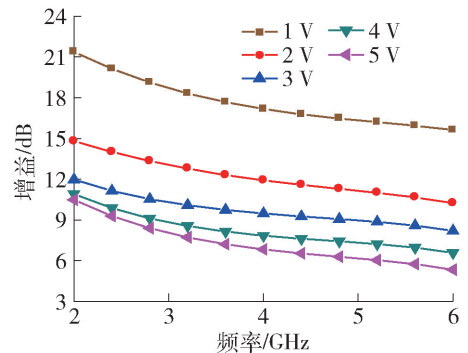


图8 整个频带内 UWB 射频放大器的电流增益 G_A 仿真结果

Fig.8 Simulation results of current gain G_A for UWB radio frequency amplifier in the whole band

过程采取和上文一致的方式,结果表明,当频率从 2 GHz 增加到 6 GHz 时,随着调控电压的增大,频带

范围内增益保持 ± 2.5 dB 的变化,增益平坦度良好。

3 结论

1) 本文所使用的 PIN 二极管阻抗值随外加偏压的变化呈现出 e 函数的递减趋势,且由于自身的耦合效应,在不同频率下,其递减趋势也不相同。

2) 基于 PIN 二极管的动态信号反馈增益调控电路在 2~6 GHz 频带范围内具有良好的增益调控能力,能够对可选频带范围内变化较大的增益进行调节,使整个频带保持一致的变化范围。

3) 随着 V_{ctrl} 从 1 V 增大到 5 V,增益变化范围始终保持在 10~11 dB,同时在每个不同的调控电压 V_{ctrl} 下,整个频带范围内增益的平坦度均保持 ± 2.5 dB 的变化,增益平坦度良好。

参考文献:

- [1] 姚望,李巍,李宁,等. 应用于 OFDM 超宽带系统中的 $0.18 \mu\text{m}$ G_m -C 滤波器和可变增益放大器的设计[J]. 复旦学报(自然科学版), 2008, 47(6): 755-762.
YAO W, LI W, LI N, et al. $0.18 \mu\text{m}$ G_m -C filter and VGA for OFDM UWB systems [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2008, 47(6): 755-762. (in Chinese)
- [2] 王自强,池保勇,王志华. CMOS 可变增益放大器设计概述[J]. 微电子学, 2005, 35(6): 612-617.
WANG Z Q, CHI B Y, WANG Z H. An overview of CMOS variable gain amplifiers [J] Acta Electronica Sinica, 2005, 35(6): 612-617. (in Chinese)
- [3] KITAMURA R, TSUKIZAWA T, SAITO N, et al. An 84 dB-gain-range and 1 GHz-bandwidth variable gain amplifier using gain flattening capacitors for multi-gigabit radio

[C]//Radio and Wireless Symposium. Piscataway: IEEE, 2013: 220-222.

- [4] ABDEL-HAFEZ I L, KHALAF Y A, FARAG F A. Design of wide band PVGA for UWB applications [C] // Electronics Communications and Photonics Conference. Piscataway: IEEE, 2011: 1-4.
- [5] XIAO J, MEHR I, SILVA-MARTINEZ J. A high dynamic range CMOS variable gain amplifier for mobile DTV tuner [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2007, 42(2): 292-301.
- [6] 丁家峰. PIN 二极管的物理机制、仿真模型及其应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2001.
DING J F. Studies on mechanism, simulation models and applications of the PIN diode abstract [D]. Changsha: Central South University, 2001. (in Chinese)
- [7] 刘恩科. 半导体物理学[M]. 北京:电子工业出版社, 2013: 168.
- [8] 童诗白. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2010: 226-227.
- [9] 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.
- [10] 张万荣,黄鑫,金冬月,等. 一种增益可多重调节的低功耗双频段低噪声放大器[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(4): 566-573.
ZHANG W R, HUANG X, JIN D Y, et al. Dual-band low noise amplifier with multiple gain-tunability and low power consumption[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(4): 566-573. (in Chinese)

(责任编辑 吕小红)