



超宽带桥 T 型模拟线性化器设计

周丽*, 王超杰, 揭海, 姚瑞林

(中国电子科技集团公司第29研究所 成都 610036)

【摘要】 该文设计了一种超宽带桥 T 型模拟线性化器, 对其进行了详细的理论分析和模型仿真。该模拟线性化器的核心电路由 T 型衰减器和 PIN 二极管构成, 可以实现幅度扩张和相位压缩, 具有偏置电路简单、输入输出端口驻波良好等优点。结合理论分析和仿真设计, 设计制作的 0.8~2 GHz 桥 T 型模拟线性化器能够实现幅度扩张约 5 dB, 相位压缩 18°。

关键词 模拟线性化器; PIN 二极管; 预失真; T 型衰减器

中图分类号 TN710 **文献标志码** A **doi:**10.12178/1001-0548.2019044

The Design of an Ultra-Broadband Bridge T Analog Linearizer

ZHOU Li*, WANG Chao-jie, JIE Hai, and YAO Rui-lin

(CETC 29th Research Institution Chengdu 610036)

Abstract This paper presents the design of an ultra-broadband T-type analog linearizer with detailed analysis and simulation. The proposed structure, which is mainly composed of tee-attenuator and PIN diode, can achieve the amplitude expansion and phase compression. Featuring a simple bias circuit and good return loss of both two ports, the designed linearizer operates in the 0.8 GHz to 2 GHz frequency range. The test results confirm that 5 dB amplitude expansion and 18° phase compression can be achieved respectively in this way.

Key words analog linearizer; PIN diode; pre-distortion; T-attenuator

随着电子对抗技术的发展, 精确干扰、灵巧干扰已经是电子对抗主流技术之一, 电子对抗系统精确干扰的成功应用很大程度上取决于发射功率的线性化特性^[1]。电子对抗发射通道的线性化特性主要受其末端的高功率放大器压缩程度影响, 常用的 GaAs、GaN 固态功率放大器高功率输出时存在严重的非线性失真特性^[2]。因此, 为实现电子对抗系统的精确干扰, 必须解决固态功率放大器高功率输出时非线性化问题。

对于超宽带固态功放幅度线性化, 主要采用模拟预失真技术。模拟预失真技术主要有反射型并联肖特基二极管、反射型串联肖特基二极管等技术^[3-6]。以上技术利用了肖特基二极管检波特性和偏置反馈电路实现预失真性能, 对大信号存在“削波”的可能, 会产生很多高次谐波信号; 同时该技术对偏置电路稳定性要求较高, 还存在输入输出驻波较差的缺点。

本文基于 PIN 二极管开发了一款超宽带桥 T 型模拟线性化器, 利用微波功率对 PIN 管微波阻抗的调制特性, 实现微波信号幅度扩张和相位压缩特性。和

传统基于肖特基二极管的线性化器相比, 该线性化器具备偏置电路简单、不存在大信号“削波”可能和输入输出驻波性能良好等优点。该电路结构能够在 0.8~2 GHz 频率范围内增益扩张 5 dB、相位压缩 18° 的预失真特性, 并具备良好的宽带驻波特性。

1 电路结构与原理分析

1.1 电路结构

桥 T 型模拟线性化器电路由 T 型衰减器和 PIN 二极管并联组成, 其中 T 型衰减器主要实现线性化器的阻抗近似匹配, 改善输入输出驻波, 具体电路结构见图 1。

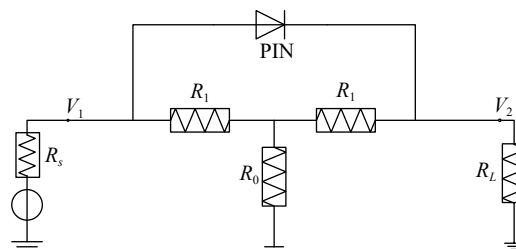


图 1 桥 T 型模拟线性化器电路结构图

收稿日期: 2019-02-11; 修回日期: 2019-09-10

作者简介: 周丽(1980-), 女, 高工, 主要从事射频组件方面的研究. E-mail: 17483748@qq.com

1.2 原理分析

在 PIN 二极管非导通 (零偏置或正偏置) 状态下, 其微波阻抗随 PIN 二极管加载的射频功率增大而减小^[7-8]。本文中的桥 T 型模拟线性化器正是利用 PIN 二极管的微波阻抗受射频功率调制这一特性而实现幅度扩张和相位压缩。

如图 1 所示, 当端口 1 输入射频小信号时, PIN 管为高阻抗状态, 可视为开路, 模拟线性化器插损为 T 型衰减器的插损。随着射频信号功率的增大, PIN 管的微波阻抗逐渐减小, 桥 T 型模拟线性化器插损也逐渐减小, 从而实现线性化器的幅度扩张特性。相位压缩特性的说明相对复杂, 下面通过理论推导详细说明桥 T 型模拟线性化器实现幅度扩张和相位压缩的原理。

为简化分析, 零偏置和正偏置状态下, PIN 二极管等效电路^[9-10]如图 2 所示。

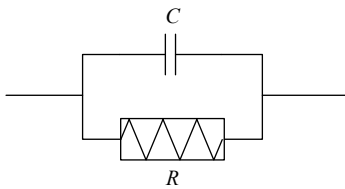


图 2 PIN 二极管零偏置或正向偏置状态下的微波等效电路图

整个桥 T 型模拟线性化器的等效电路见图 3。

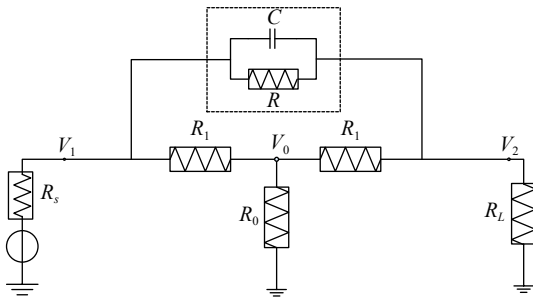


图 3 桥 T 型模拟线性化器等效电路图

结合等效电路, 由基尔霍夫电压定律可知方程:

$$\left(\frac{V_2}{R_L} - \frac{V_1 - V_2}{Z} \right) R_1 + V_2 = V_0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{V_0}{R_0} + \frac{V_2}{V_L} - \frac{V_1 - V_2}{Z} \right) R_1 = V_1 - V_0 \quad (2)$$

将式 (1) 与式 (2) 联立, 令 $R_L = R_1 = Z_0$, 求解得:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_0 + \frac{R_1^2 + 2R_1R_0}{Z}}{2R_1 + 3R_0 + \frac{R_1^2 + 2R_1R_0}{Z}} \quad (3)$$

式中, Z 为 PIN 二极管的等效阻抗, Z_0 为系统参考特性阻抗, 将 $Z=1/(Y+j\omega C)$ 代入式 (3), 得到该网络的传输系数为:

$$S_{21} = \frac{\frac{R_0}{R_1} + (2R_0 + R_1)(Y + j\omega C)}{2 + \frac{3R_0}{R_1} + (2R_0 + R_1)(Y + j\omega C)} \quad (4)$$

式中, Y 为 PIN 二极管并联等效电阻的导纳; C 为并联等效的电容。

由 S_{21} 的表达式可知, 当射频信号较小时, PIN 二极管的等效导纳较小, 桥 T 型模拟线性化器的插损主要由 T 型衰减器的电阻 R_0 和 R_1 决定。随射频功率的增加, PIN 二极管的等效导纳逐步增大, S_{21} 的幅度也逐步增加, 因而实现幅度扩张的功能。

由式 (4) 可知, S_{21} 的相位表达式为:

$$\angle S_{21} = \text{tg}^{-1} \frac{2\omega C}{R_1 + 2R_0} \left[\frac{R_0}{R_1(R_1 + 2R_0)} + Y \right] \left[\frac{2R_1 + R_0}{R_1(R_1 + 2R_0)} + Y \right] \quad (5)$$

随 PIN 二极管加载射频功率的增大, 零偏或正偏状态下 PIN 管微波等效电路中的电阻导纳 Y 逐渐增大, 而电容 C 逐渐减小, 因此可以实现相位压缩的功能。

综上所述, 随 PIN 二极管加载射频功率的增大, 零偏或正偏状态下 PIN 管微波等效电路中的电阻 R 和电容 C 逐渐减小, 桥 T 型模拟线性化器可以实现幅度扩张和相位压缩的预失真特性。

2 模拟线性化器的仿真设计

在实际的系统应用中, 某微波宽带综合系统需要 0.8~2 GHz 带宽模拟线性化器, 要求幅度扩张 5 dB, 相位压缩 20°。

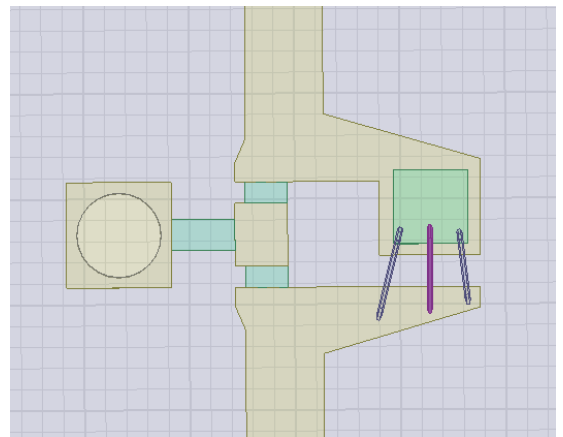


图 4 模拟线性化器的仿真模型

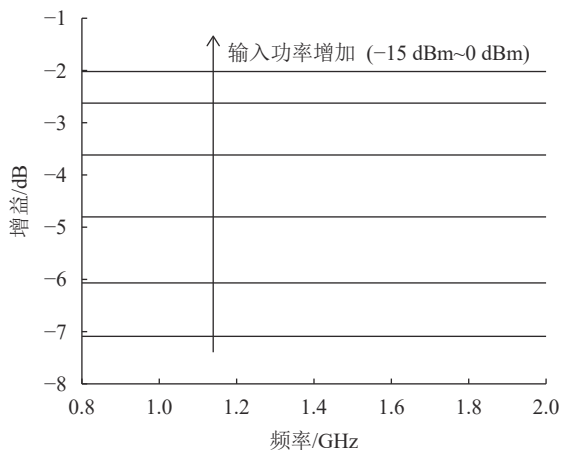


图 5 模拟线性化器幅度扩张特性

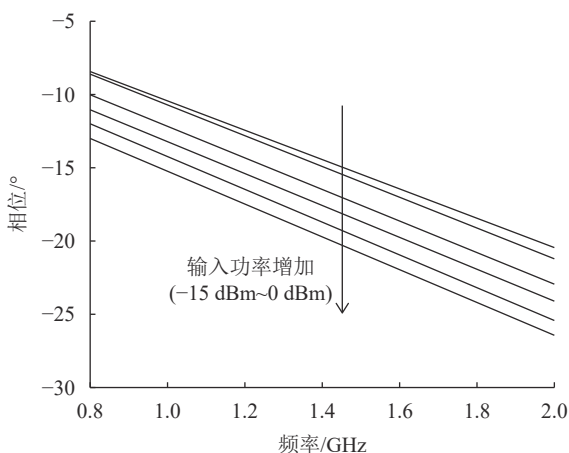


图 6 模拟线性化器相位压缩特性

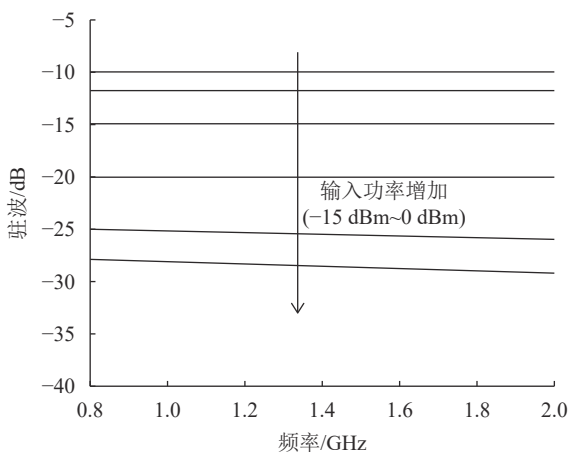


图 7 模拟线性化器输入输出驻波特性

根据应用需求, 确定 T 型衰减器部分小信号插损 11 dB 左右, 驻波比 2.5 左右, 因此可以确定 $R_1 = 50 \Omega$, $R_0 = 150 \Omega$ 。所选 PIN 二极管参数零偏置条件下并联电容 0.2 pF, 微波阻抗 $10 \Omega \sim 500 \Omega$ (随加载功率可变)。微波基板选用氧化铝陶瓷, 厚度为 0.254 mm。按图 1 所示电路结构, 桥 T 型模

拟线性化器的 HFSS 模型如图 4 所示。

仿真结果如图 5~图 7 所示, 该模拟线性化器在 $-15 \sim 0$ dBm 激励下, 幅度扩张 5 dB, 相位压缩约 7° 。其中相位压缩仿真结果与实际需求有一定差距, 原因是 PIN 二极管仿真模型采用的是集总参数模型, 与 PIN 管实际电路存在差距, 对相位特性影响较大, 可通过后期的实物测试来修正。

3 模拟线性化器制作与测试

桥 T 型模拟线性化器的实物制作采用薄膜技术制造, 基片为氧化铝陶瓷, 电路采用镀金薄膜, 固定电阻采用 TaN 薄膜电阻, 阻值精度 $\pm 5\%$, 实物如图 8 所示。

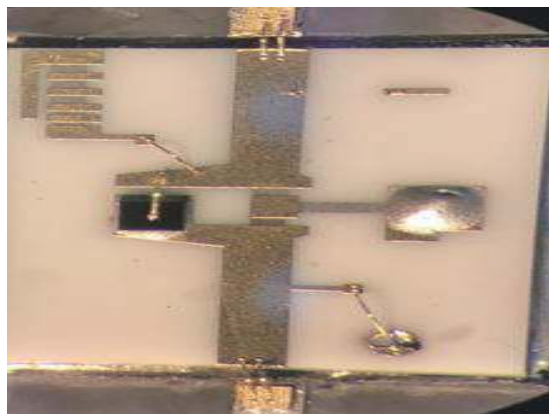


图 8 模拟线性化器实物

该线性化器经调试后的测试结果如图 9~图 11 所示。在 2 GHz 处幅度扩张为 3 dB, 相位压缩 18° ; 在 0.8 GHz 处幅度扩张 5 dB, 相位压缩 15° 左右。该测试结果与需求指标相一致, 能够满足实际应用需求, 达到预期效果。

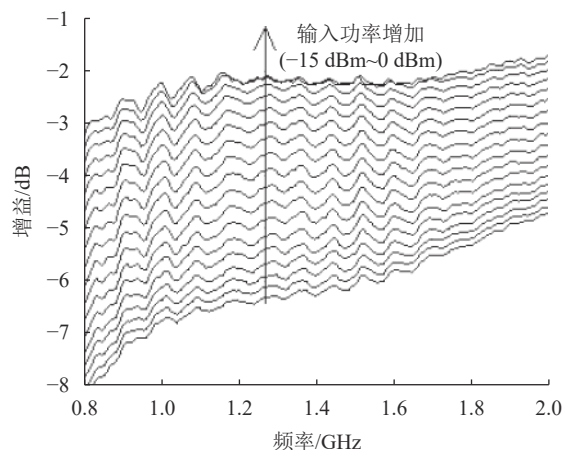


图 9 模拟线性化器幅度扩张特性测试结果

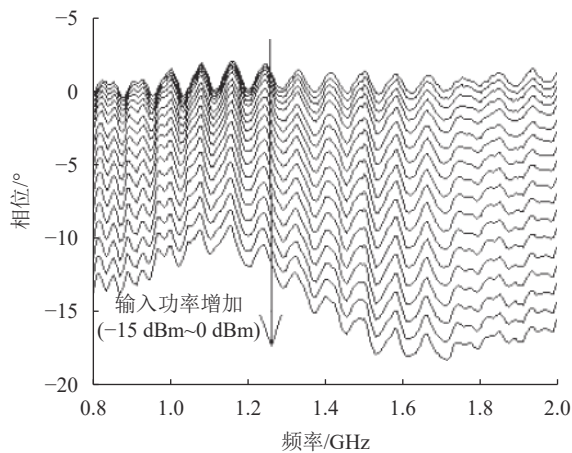


图 10 模拟线性化器相位压缩特性测试结果

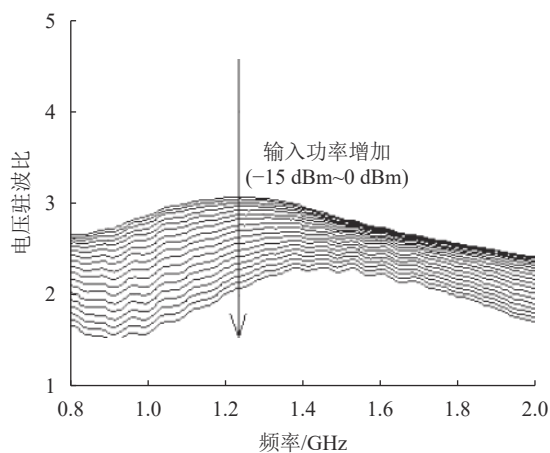


图 11 模拟线性化器输入输出驻波特性测试结果

4 结 论

本文采用模拟预失真技术, 用 PIN 二极管试制了一款超宽带桥 T 型模拟线性化器, 验证了此技术的可行性和实用性。文中采用的设计方法可广泛应用于超宽带模拟线性化器设计中, 具有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

[1] 代大海, 王雪松, 李永祯, 等. 交叉极化干扰建模及其欺骗效果分析[J]. *航天电子对抗*, 2004, 3: 21-25.

DAI Da-hai, WANG Xue-song, LI Yong-zhen, et al. Modeling of cross polarization jamming and deception performance analysis[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2004, 3: 21-25.

[2] 张书敬, 杨瑞霞, 高学邦, 等. GaAs HFET/PHEMT 大信号建模分析[J]. *半导体学报*, 2007, 28(3): 439-443.

ZHANG Shu-jing, YANG Rui-xia, GAO Xue-bang, et al. Large signal modeling of GaAs HFET/PHEMT[J]. *Chinese Journal of Semiconductor*, 2007, 28(3): 439-443.

[3] 李少岚. 毫米波功率放大器线性化技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

LI Shao-lan. Millimeter-wave power amplifier linearization techniques research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.

[4] 张云华. Ku 波段功放预失真线性化技术 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

ZHANG Yun-hua. Millimeter-wave power amplifier linearization techniques research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

[5] JEONG H Y, PARK S K, RYU N S. A design of K-band predistortion linearizer using reflective schottky diode for satellite TWTAs[C]//Microwave Conference. [S.l.]: IEEE, 2005: 10.1109/EUMC.2005.1610246.

[6] TSAI J H, HUANG Tian-wei. A 38-46 GHz MMIC doherty power amplifier using post-distortion linearization[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(5): 388-390.

[7] WHITE J F. Microwave semiconductor control circuits[M]. Beijing: Science Press, 1983.

[8] BROWN N J. Design concepts for high-power PIN diode limiting[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 1968, 15(12): 732-742.

[9] 《中国集成电路大全》编委会. 微波集成电路 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

Editorial Board of "China Integrated Circuits". *Microwave integrated circuits*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.

[10] 王蕴仪, 苗敬峰, 沈楚玉. 微波器件与电路 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1986.

WANG Yun-yi, MIAO Jing-feng, SHEN Chu-yu. *Microwave devices and circuits*[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1986.

编辑 叶芳