

文章编号: 2095-4980(2018)06-1058-04

一种 Ku 频段新型宽带幅相可调谐模拟预失真器

吕俊杰, 夏 雷

(电子科技大学 极高频复杂系统国防重点学科实验室, 四川 成都 611731)

摘 要: 采用模拟预失真技术设计一款 Ku 波段预失真器, 使用 2 个 MA4E2037 肖特基势垒二极管和 3 段无源传输线产生预失真信号, 通过调节偏置电压实现幅度和相位可调; 同时结合平衡式结构, 改善单支路非线性器件增益扩张曲线斜率不足问题, 改善输入驻波比。仿真结果表明, 在 14 GHz 处, 增益补偿和相位补偿可分别达到 17 dB 和 60° 以上; 在频率 12~16 GHz, 增益扩张和相位扩张可达到 15 dB 和 50° 以上, 整个频带内预失真器 S_{11} 小于 -17 dB。该预失真器适用频带宽, 结构简单, 功能实用。

关键词: 模拟预失真; 宽带; 幅相可调; 平衡式

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.1058

A novel balanced wideband amplitude and phase-adjustable analog predistorter for Ku band

LYU Junjie, XIA Lei

(Fundamental Science on EHF Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: A Ku band predistorter based on the analog predistortion technology is presented. Two Schottky diodes and three transmission lines are employed to generate pre-distortion signal. The adjustable amplitude and phase are realized by changing the bias voltage. At the same time, the slope of amplitude characteristic together with input Voltage Standing Wave Ratio(VSWR) is improved with the help of the balanced structure. It can be concluded from the simulation results that the predistorter can provide 17 dB gain expansion and 60° phase expansion at 14 GHz. In 12~16 GHz, it provides more than 15 dB gain expansion and 50° phase expansion, and the S_{11} is below -17 dB. The predistorter bears the advantages of wide band, simple structure and it is practical in use.

Keywords: analog pre-distortion; wideband; adjustable amplitude and phase; balanced

功率放大器工作于大信号状态时, 其非线性失真较为严重, 产生幅度压缩和相位偏移, 导致信号失真。随着通信技术的发展, 对功率放大器线性度的要求日益提高, 这就要求引入线性化技术改善功率放大器的线性度。预失真技术^[1]基本设计思路是让输入信号在进入功率放大器之前, 先经过一个与功放非线性特性相反的模块, 以此补偿功放所产生的非线性失真, 使传输的信号最终呈现为线性状态。预失真技术实现比较容易, 结构简单, 频带宽, 成本低, 调试方便, 综合性能好, 目前在功率放大器线性化中运用十分广泛^[2-7]。

本文在传统并联二极管预失真器基础上进行改进, 结合两路平衡式结构, 设计了一款 12~16 GHz 宽带预失真线性化器, 其增益扩张和相位扩张可达到 15 dB 和 50°, 同时通过调节二极管偏置电压, 实现增益和相位调谐, 整个预失真器具有较低的反射系数。

1 新型模拟预失真器原理分析

新型平衡式预失真电路结构包括由 2 个肖特基势垒二极管、3 段无源传输线、2 个隔直电容、1 个偏置电阻、1 个直流电压源和 1 个射频扼流圈组成的单支路和 2 个 90°电桥, 见图 1。由于是平衡式结构, 只需对单支路进行理论分析。

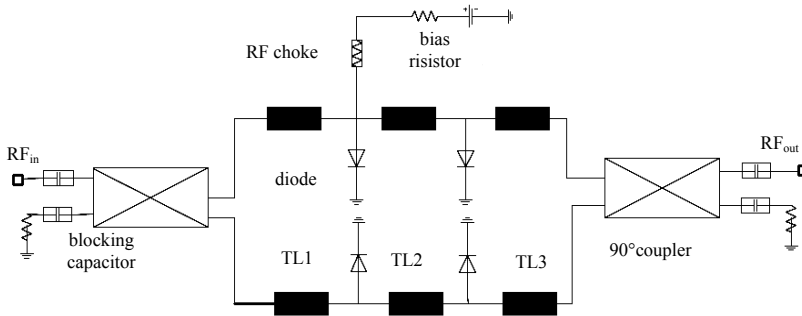


Fig.1 Block diagram of new analog predistorter
图1 新型模拟预失真器框图

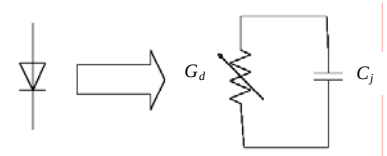


Fig.2 Equivalent circuit of Schottky diode
图2 肖特基二极管等效电路

在传统并联二极管预失真器基础上,该单支路结构引入2个并联二极管与三段无源传输线级联的形式。若不考虑肖特基二极管封装引起的寄生效应,二极管可以等效为非线性电导 $G_{d1,2}$ 和电容 $C_{j1,2}$ 的并联,见图2,则2个二极管的传输矩阵如下:

$$T_{D1,2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ G_{d1,2} + j\omega C_{j1,2} & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

为方便计算,假设2个二极管偏置状态一样,则2个二极管等效电导有 $G_{d1}=G_{d2}=G_d$,等效电容有 $C_{j1}=C_{j2}=C_j$ 。单支路三段无源传输线的传输矩阵 $T_{L1,2,3}$ 为:

$$T_{L1,2,3} = \begin{pmatrix} \cos \beta l_{1,2,3} & jZ_{1,2,3} \sin \beta l_{1,2,3} \\ jY_{1,2,3} \sin \beta l_{1,2,3} & \cos \beta l_{1,2,3} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $l_{1,2,3}$ 为三段传输线长度; $Z_{1,2,3}$ 和 $Y_{1,2,3}$ 为三段传输线特效阻抗和特效导纳。由2个二极管和三段无源传输线组成的二端口网络总的传输矩阵 T 可以表示为:

$$T = T_{L1} * T_{D1} * T_{L2} * T_{D2} * T_{L3} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: T_{D1} 和 T_{D2} 为2个二极管传输矩阵; T_{L1} , T_{L2} 和 T_{L3} 为3段传输线传输矩阵。根据传输矩阵与散射矩阵之间的关系,整个二端口网络的散射矩阵 S_{21} 为:

$$S_{21} = \frac{2}{X + jY} \quad (4)$$

式中: X, Y 均和 $G_d, C_j, Z_{1,2,3}$ 及 $l_{1,2,3}$ 相关。传输系数的幅值 $|S_{21}|$ 与相值 $\angle S_{21}$ 分别表示为:

$$|S_{21}| = \frac{2}{\sqrt{X^2 + Y^2}}; \angle S_{21} = \tan^{-1} \left[-\frac{Y}{X} \right] \quad (5)$$

S_{21} 受2个二极管导纳及三段无源传输线特性阻抗和电长度的影响。非线性电导 G_d 随着输入功率的增大而减小,使得传输系数幅度随着输入功率的增加而增加。无源传输线特性阻抗和电长度对预失真器相位影响很大,通过调节无源传输线电长度和特性阻抗,可以获得所需要的幅相预失真特性曲线,用于改善两类功放失真现象。采取90°分支线电桥,两支路反射回来的能量再经过电桥,在输入端相位相差180°相互抵消,减小了输入端反射能量,从而改善输入驻波比。

2 新型模拟预失真器设计

使用 ADS 进行谐波平衡法仿真,将设计的两路平衡式预失真器进行版图-原理图联合仿真,二极管型号为 MA4E2037,基板选用厚度 0.254 mm 的 RT/duroid5880,2个电桥为 3 dB 分支线电桥。为方便优化调节,第1段传输线和第3段传输线参数完全一样。

二极管偏置电流对预失真器非线性补偿特性影响很大,一般偏置电流越大,补偿特性越明显^[8]。选取合适偏置电阻 $R=660 \Omega$,调节三段传输线特性阻抗和电长度,在 14 GHz 时,偏置电压选取 0.6~3 V 下进行扫描仿真,见图3,在不同偏置电压下,相位补偿和增益补偿也不同,实现幅度和相位增益电压可调谐;在偏置电压 $U=2.4$ V 下,增益补偿和相位补偿分达到 17 dB 和 60°以上。该预失真器宽带特性见图4,在偏置电压 $U=2.6$ V 时,整个 12~16 GHz 的频带范围内,增益扩张为 15 dB,相位扩张维持在 50°以上,工作频带内补偿一致性较好,实现对宽带功放行波管失真补偿。

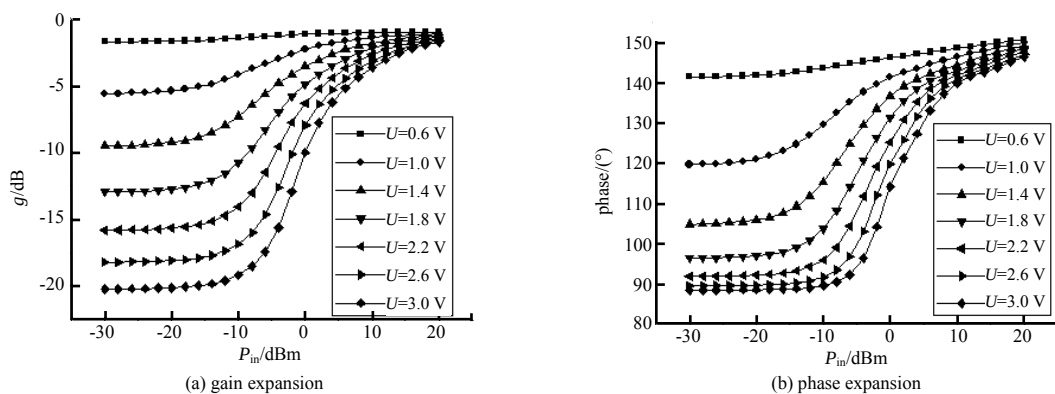
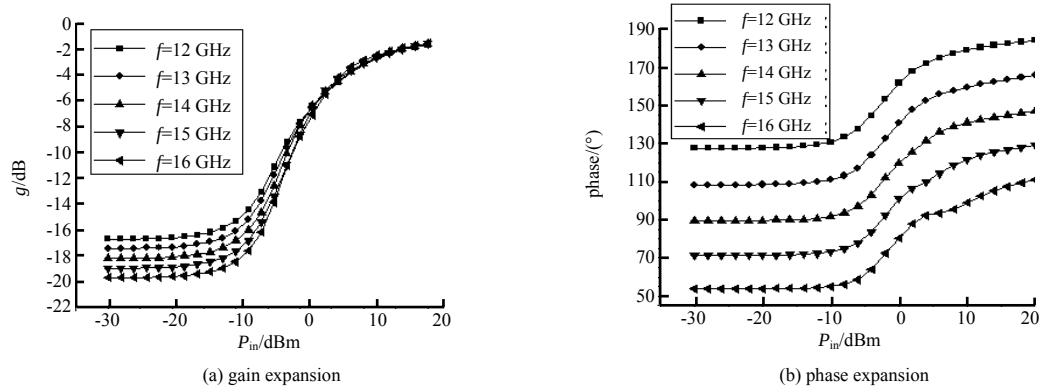


Fig.3 Suitable for TWTa, performance of predistorter at different bias voltages

图 3 适用于行波管, 不同偏置电压下预失真器特性

Fig.4 Suitable for TWTa, performance of predistorter at $U=2.6$ V图 4 适用于行波管, $U=2.6$ V 预失真器宽带特性

传统的单支路预失真器发射系数很大, 会对整个系统电路带来不稳定影响。新型平衡两路预失真器 S_{11} 见图 5, 整个工作频带内 S_{11} 小于 -17 dB, 反射小, 输入驻波比好。减小了预失真器输入端反射能量, 降低对其他连接器件干扰, 也便于与其他器件进行级联。

调节传输线(主要是中间传输线)特性阻抗和电长度, 在一定偏置电阻 $R=350 \Omega$ 下, 该预失真器也能够补偿固态功放的非线性失真, 见图 6。对偏置电压进行扫描, 扫描范围为 $0.8 \sim 3.2$ V, 产生增益扩张和相位压缩, 电压越大, 补偿特性越明显, 实现增益和相位电压可调谐。在偏置电压 $U=2.0$ V 下, 增益扩张有 14 dB 以上, 相位压缩达到 30° , 见图 7。偏置电压 $U=2$ V, 在 $12 \sim 16$ GHz 频带内, 频率一致性也维持不错, 能够用于宽带固态功放失真补偿。

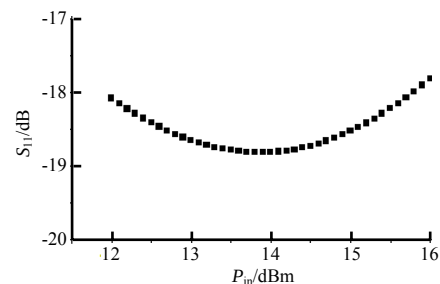
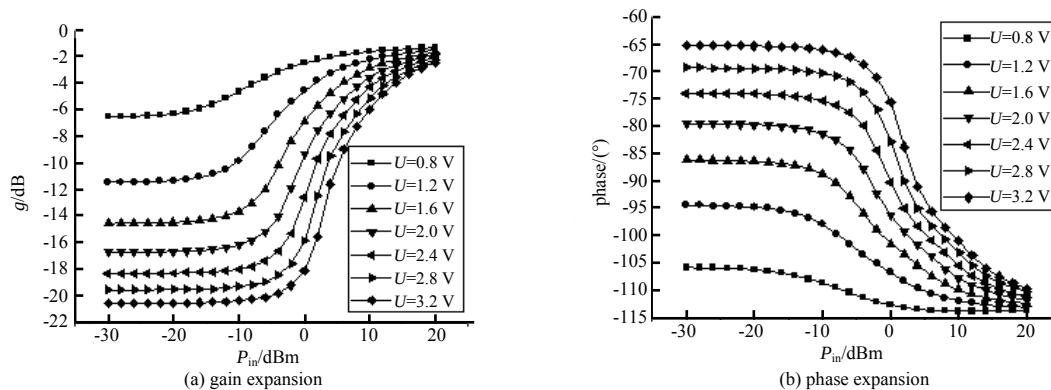
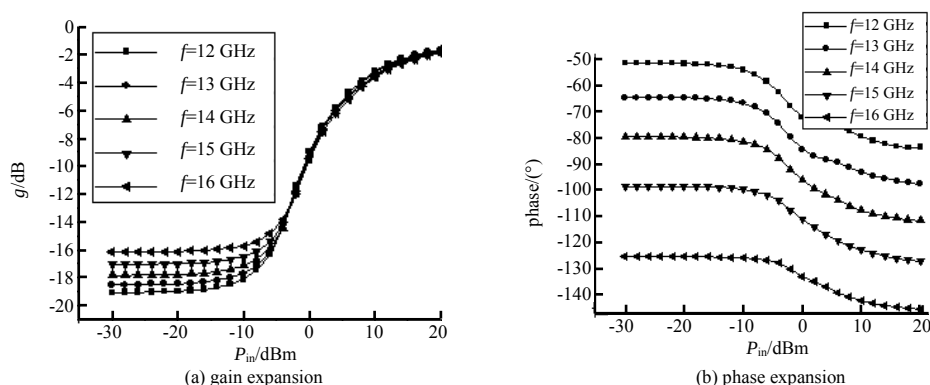
Fig.5 S_{11} of wideband predistorter图 5 宽带预失真器 S_{11} 

Fig.6 Suitable for SSPA, performance of predistorter at different bias voltages

图 6 适用于固态功率放大器, 不同偏置电压下预失真器特性

Fig.7 Suitable for SSPA, performance of predistorter at $U=2$ V图 7 适用于固态功率放大器, $U=2$ V 预失真器宽带特性

3 结论

本文设计的模拟预失真线性化器能够补偿功放的非线性失真且频率一致性很好。相比环路式,结构简单,调试简单,成本低,实用性强;相比于传统单支路,增大了预失真器的功率承受能力,改善了线性化器的输入输出驻波比,也改善了单支路非线性器件增益扩张曲线斜率不足的问题。这种新型模拟预失真器既可以改善行波管功放非线性失真,又适用于固态功放,为模拟预失真器的设计提供了一种可行的方案。

参考文献:

- [1] YI Jaehyok, YANG Youngoo, PARK Myungkyu, et al. Analog predistortion linearizer for high-power RF amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2001, 48(12):2709–2713.
- [2] 刘洁, 胡波雄, 王刚, 等. 一种适用于 Ku 波段行波管放大器的预失真线性化器[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10):2515–2520. (LIU Jie, HU Boxiong, WANG Gang, et al. A predistortion linearization device for Ku band traveling wave tube amplifiers[J]. Journal of Electronics and Information, 2014, 36(10):2515–2520.)
- [3] ZHU R, ZHANG X, HRAIMEL B, et al. Broadband pre-distortion circuit using zero bias diodes for radio over fiber systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(21):2101–2104.
- [4] CHUNG Y, DECKMAN B C, DELISIO M P. Linearization of a spatially-combined X-band 100 W GaAs FET power amplifier system with predistortion linearizer[C]// 2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). La Jolla, CA, United States: IEEE, 2012:1–4.
- [5] 李大伟. 毫米波预失真线性化技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (LI Dawei. Research on millimeter wave predistortion linearization technology[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [6] 邓海林, 张德伟, 白维达, 等. 一种行波管用毫米波射频预失真线性化器[J]. 电子学报, 2017, 45(7):1784–1791. (DENG Hailin, ZHANG Dewei, BAI Weida, et al. A millimeter wave radio frequency predistortion linearization apparatus for traveling wave tubes[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(7):1784–1791.)
- [7] 杨卅男, 徐锐敏, 王志刚. 一种带有温度补偿特性的模拟预失真线性化器[J]. 微波学报, 2016, 32(S2):337–339. (YANG Sanan, XU Ruimin, WANG Zhigang. An analog predistortion linearization device with temperature compensation characteristics[J]. Journal of Microwave Society, 2016, 32(S2):337–339.)
- [8] BERA S C, SINGH R V, GARG V K, et al. Optimum bias load-line compensates temperature variation of junction diode's RF resistance[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2007, 55(2):215–221.

作者简介:



吕俊杰(1991–), 男, 湖北省黄冈市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波集成电路与系统. email: 897596882@qq.com.

夏雷(1976–), 男, 天津市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为微波毫米波固态电路与太赫兹技术。