

一种场效应管预失真电路对改善行波管非线性性的作用

胡欣^{*①③} 王刚^② 王自成^② 罗积润^①

^①(中国科学院电子学研究所中国科学院高功率微波源与技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院电子学研究所中国科学院空间行波管研发中心 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文利用场效应管的非线性作用, 替代通常预失真线性化电路中的衰减器和移相器, 使这种预失真器在相位扩张量变化较小的同时, 可以对增益扩张量进行调节控制, 有效提升了预失真电路改善行波管非线性性的作用。实际设计电路实验表明, 在频率为 8.38~8.58 GHz 和额定输入功率范围内, 设计了实际电路并完成相应的实验, 获得了 6 dB 和 45° 的增益和相位扩张以及 15.4 dB 的载波与交叉调制分量比值的改善。

关键词: 行波管功率放大器(TWTA); 非线性失真; 预失真器; 增益和相位扩张量

中图分类号: TN830.6; TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-0951-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00789

Improvement of TWT Nonlinearity with a Field Effect Transistor Predistortion Circuit

Hu Xin^{*①③} Wang Gang^② Wang Zi-cheng^② Luo Ji-run^①

^①(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Space Traveling Wave Tube Research and Development Center, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In this paper, a Field Effect Transistor (FET) operating in close to cut off frequency is used to replace the attenuator and the phase-shifter in most TWT predistortion circuit, which can realize good control for the amount of gain expansion with little phase expansion variation. The experiments with practically designed circuit show that, in the frequency range of 8.38~8.58 GHz, about 6 dB gain expansion and 45 degrees phase shift can be compensated for the TWTA saturation response in input power dynamic range, and the improvement of about 15.4 dB Carrier to Intermodulation (C/IM) at TWTA Output Power Back Off (OPBO) of only -3 dB can be reached with the linearizer.

Key words: Traveling Wave Tube Amplifier (TWTA); Nonlinear distortion; Predistortion linearizer; Expansion of gain and phase

1 引言

随着通信技术的发展, 高线性度和高效率的功率放大器才能够满足大容量、高速率的信息传输要求。目前行波管功率放大器在大部分通信电路(例如: 卫星转发器)中起着重要作用^[1]。在饱和状态下, 行波管可以保证较高的功率输出, 但此时线性特性较差。对于单独的行波管来说, 为了防止传输信号在功率放大时的非线性失真, 可以利用功率回退的方法来避免非线性失真现象, 但这会降低效率, 因此单独的行波管很难同时满足高线性和高效率的条

件。而线性化器件的引入可以一定程度上改善行波管的非线性失真, 在保证良好线性度的同时具有较高的效率^[2-4]。通常行波管输出功率回退 7 dB 以上^[5,6]时, 载波与交叉调制分量比值(C/IM)才能有大于 15 dB 的明显改善, 相关文献介绍^[7-9], 如果使用预失真器, 行波管输出功率只需回退大约 3 dB, C/IM 就能有大于 15 dB 的明显改善。也就是说保证满足线性化指标的同时可以将行波管输出功率提高约 4 dB, 一定程度上提高了行波管的应用能力^[6]。不过这种预失真器在调节过程中增益和相位扩张量的调节相互影响, 很难保证增益和相位同时满足线性化指标的要求, 给线性化带来一定的困难。本文介绍一种预失真电路, 希望在对增益扩张量进行调

节控制的同时对其相位扩张量影响较小,结合 ADS 仿真软件以及实际电路与行波管链接的实验验证这种预失真电路对行波管增益和相位非线性改善的效果。

2 预失真器的设计方案与理论分析

通常预失真电路无论电路结构简单^[8]还是复杂^[9],大都会使用肖特基二极管。因为这类二极管工作在饱和区的非线性失真可以作为预失真电路中的非线性器件实现对行波管的增益和相位补偿。与以往预失真电路中利用肖特基二极管饱和区的作用有所不同,本文利用工作在线性区肖特基二极管 SMS7621-006 和工作在截止区的场效应管 NE3210S01 实现增益扩张^[10]以及在额定输入功率范围内场效应管和肖特基二极管产生的钝角相位差完成预失真电路的功能,同时通过改变偏置电压来调节场效应管的增益特性。也就是说,利用场效应管替代以往预失真电路中的可调移相器和可调衰减器,构建如图 1(a)所示的预失真器电路框图,其具体的电路原理图如图 1(b)所示。

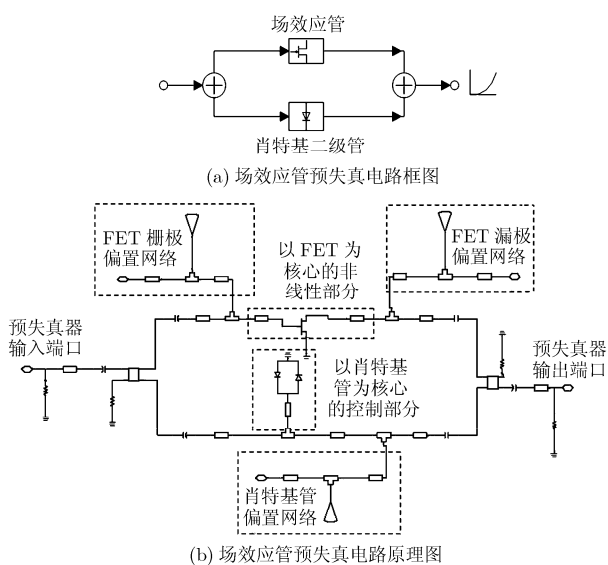


图1 场效应管预失真器电路图

在本文提出的这种预失真电路中,射频输入信号 $v_{in}e^{j\omega t}$ 功率等分后分别通过场效应管路径和肖特基二极管路径,对应路径的增益分别是 G_1 , G_2 。两路矢量信号的相位差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 为钝角且随功率增大变化不大。令 $\alpha = \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ ($-1 < \alpha < 0$), $v_1 = (1/2)v_{in} \cdot G_1$, $v_2 = (1/2)v_{in} \cdot G_2$, 则该电路的总增益 G 和相位改变量 $\Delta\varphi$ 可以表示为

$$G = |v_{out}| / |v_{in}| = \sqrt{\frac{1}{4}(G_1 - G_2)^2 + \frac{1}{2}(1 + \alpha)G_1 \cdot G_2} \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = \angle v_{out} - \angle v_{in} = \arctg\left(\frac{v_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{v_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + v_2}\right) + \varphi_2 = \arctg\left(\frac{G_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{G_1 \cdot \alpha + G_2}\right) + \varphi_2 \quad (2)$$

随着输入功率的增大,场效应管的非线性状态使增益 G_1 逐渐增大。在另一路中合理设置偏置电压 V_{b1} 使肖特基二极管工作在增益线性区, G_2 保持不变。在功率增大的过程中两路矢量信号的相位差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 保持为较大的钝角,此时 $\Delta\varphi$ 介于 φ_1 与 φ_2 之间,亦即, $0 < (\Delta\varphi - \varphi_2) < (\varphi_1 - \varphi_2)$, 对应式(2)中的 $\arctg(x) \in (0, \pi)$ 。增益 G_2 保持不变时,随着场效应管路径增益 G_1 的增大,式(1)中 $(1/4)(G_1 - G_2)^2$ 和 $(1/2)(1 + \alpha)G_1 \cdot G_2$ 都是正值,于是增益 G 会增大。式(2)中 $G_1 \cdot \alpha + G_2$ 会随着 G_1 的增大由正值变为负值,但 $\arctg(x)$ 始终在区间 $(0, \pi)$ 内是单调增加。

在上述基础上,当肖特基管上的偏置电压增大到合适偏压 V_{b2} ($V_{b2} > V_{b1}$) 时,由 ADS 软件仿真不同的偏置电压下肖特基二极管路径的增益和相位特性如图 2 所示。图 2(a)中曲线 1 代表偏置电压 V_{b1} 的肖特基二极管路径的增益曲线,曲线 2 代表偏置电压 V_{b2} 的增益曲线。在射频功率较小时,分别加有偏置电压 V_{b1} 与 V_{b2} 的肖特基二极管路径增益基本恒定。随着输入功率增大,加有偏置电压 V_{b1} 的肖特基二极管路径增益为 G_2 , 而此时由于偏置电压增加的影响,加有偏置电压 V_{b2} 的肖特基二极管增益压缩为 $G_2 - \Delta G_2$ 。图 2(b)中曲线 1 代表偏置电压 V_{b1} 的肖特基二极管路径的相位曲线,曲线 2 代表偏置电压 V_{b2} 的相位曲线。随着输入功率增大,偏置电压由 V_{b1} 到 V_{b2} 的变化对肖特基管路径的相位影响较小在 4° 以内。

当肖特基二极管偏置电压为 V_{b2} 时,预失真电路输出增益可以表示为

$$\begin{aligned} G &= \left(\frac{1}{4}G_1^2 + \frac{1}{4}(G_2 - \Delta G_2)^2 + \frac{1}{2}G_1(G_2 - \Delta G_2)\cos(\varphi_1 - \varphi_2)\right)^{1/2} \\ &= \left(\frac{1}{4}(G_1 - G_2)^2 + \frac{1}{2}(1 + \alpha)G_1 \cdot G_2 + (\Delta G_2)^2 - \frac{1}{2}\Delta G_2 \cdot G_2 - \frac{1}{2}\alpha\Delta G_2 \cdot G_1\right)^{1/2} \\ &= \left(\frac{1}{4}(G_1 - G_2)^2 + \frac{1}{2}(1 + \alpha)G_1 \cdot G_2 + (\Delta G_2)^2 + \frac{1}{2}\Delta G_2 \cdot (G_1 \cdot (-\alpha) - G_2)\right)^{1/2} \quad (3) \end{aligned}$$

可以用式(1)来表示偏置电压 V_{b1} 时的预失真电路增益表达式。式(3)和式(1)相比,由于偏置电压的

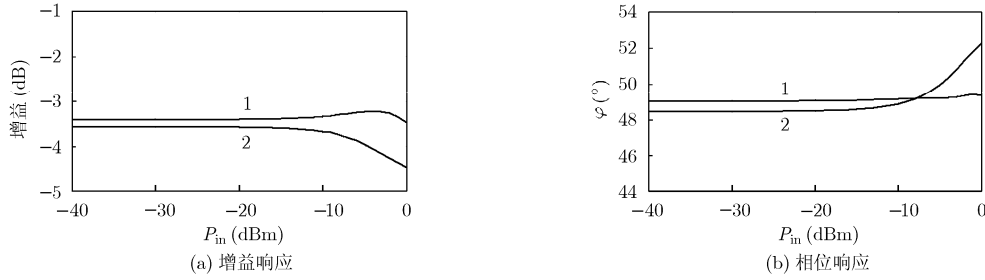


图 2 不同偏置下的肖特基管路径增益、相位特性 (1: 偏置电压 V_{b1} 2: 偏置电压 V_{b2})

增大多了两项 $(\Delta G_2)^2 + (1/2)\Delta G_2 \cdot (G_1 \cdot (-\alpha) - G_2)$ 。当输入功率大于 -10 dBm 时，场效应管的增益扩张 G_1 明显大于 G_2 ，会使 $G_1(-\alpha)$ 大于 G_2 从而使这两个增加项都是正值，且它们的和会越来越大。在本文研究的预失真电路中，同一输入功率范围内偏置电压 V_{b2} 的增益扩张量较 V_{b1} 时会明显增大，而由式(2)可知相位扩张量受 ΔG_2 的影响不大，即控制肖特基二极管上的偏置电压可以在保证相位扩张量变化不大的前提下对增益扩张量进行调节控制以确保行波管的增益和相位压缩得到更好补偿。

3 仿真及实验

利用 ADS 电路仿真软件对本文提出的预失真电路进行增益和相位扩张量调节效果仿真模拟。首先利用 ADS 仿真软件对 X 波段行波管进行建模，在 -40 dBm 到 -14 dBm 的输入功率范围内，TWTA 增益、相位响应如图 3 所示。TWTA 的增益、相位压缩主要发生在 -36 dBm 到 -14 dBm 的输入功率范围内，其中 -14 dBm 对应行波管的最大饱和输入功率点。

在 -40 dBm 到 -7 dBm 的输入功率范围内，通过改变预失真器中肖特基二极管上的偏置电压来调节预失真器的增益和相位响应特性。图 4 是偏置电压 V_{b1} 时所得的仿真结果，图 5 是偏置电压 V_{b2} 的仿真结果。通过图 4 和图 5 的效果对比，在一定输入功率范围内，通过适当调节预失真器增益补偿量使行波管功率放大器在所需额定功率范围内相位变化 10° 以内(满足线性化指标)，行波管的增益压缩能够得到进一步改善，从偏置电压 V_{b1} 时的 3 dB 改善到偏置电压 V_{b2} 时的 1 dB 以内。

结合以上的理论和仿真分析，设计制作了预失真线性化器，该电路工作在 $8.38\sim 8.58$ GHz 的频段内，本文的 X 波段线性化器的实际电路板采用型号 F₄B-1/2 的聚四氟乙烯玻璃覆铜箔层压板，基板厚度 0.254 mm，介电常数 2.55 。对于通常应用于工程的行波管功率放大器，当从线性状态到最大饱和功率输出时，行波管输入功率的动态范围大约在 22 dB 左右^[10,11]，如果行波管放大器输入端的预失真信号能够在这 22 dB 的动态范围内对行波管进行非线性

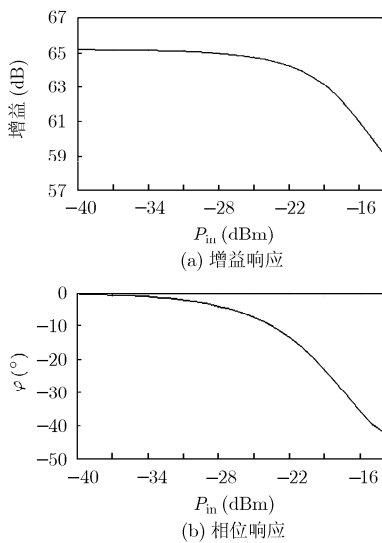


图 3 TWTA 模型的增益、相位响应

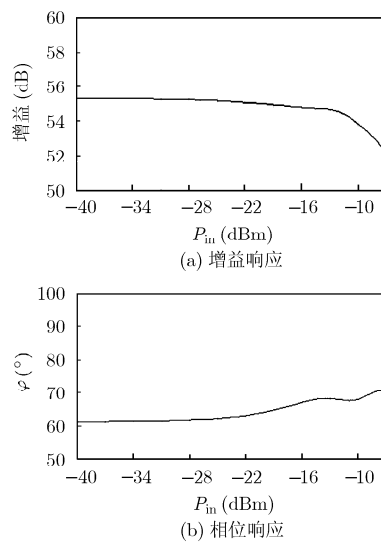


图 4 偏置电压 V_{b1} 时线性化的 TWTA 的增益、相位响应

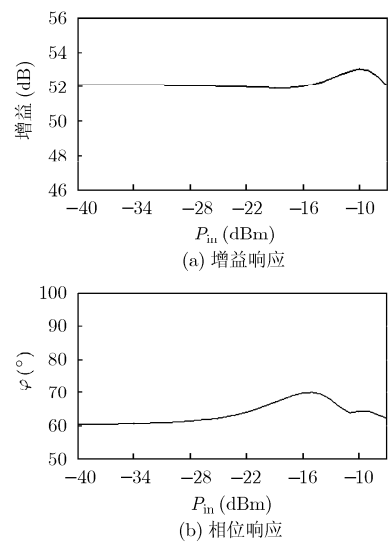


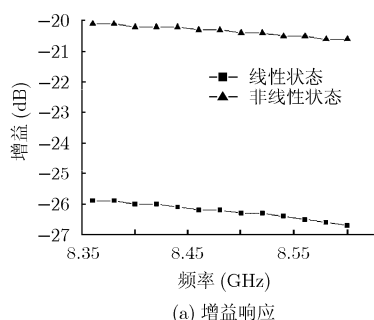
图 5 偏置电压 V_{b2} 时线性化的 TWTA 的增益、相位响应

性补偿,则可以很好地补偿行波管的非线性失真现象。在 8.38~8.58 GHz 频率范围内,对本文预失真器进行不同输入功率条件下的实际频率扫描测试。测试结果表明,从-22.96 dBm(线性状态)到-6.92 dBm(非线性状态),各个频点处的增益扩张量都可以保持在 6 dB 左右,如图 6(a),且工作频带内增益平坦度在 1 dB 以内,相位扩张基本保持在 45° 左右,如图 6(b),满足工程需求。

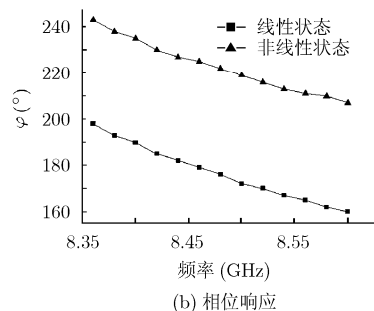
本文设计的预失真器在 16.04 dB 的输入功率动态范围内有 6 dB 和 45° 左右的增益和相位扩张量,预失真器输出功率范围有 22.04 dB,满足行波管输入端的预失真信号功率动态范围要求,可以对一般工程上的行波管功率放大器进行线性化补偿。鉴于该预失真器具有的良好频率响应特性,在实验平台上利用 X 波段行波管功率放大器与本文提出的预失真器进行联合实验。图 7,图 8 是预失真器与行波管功率放大器联合实验的功率扫描测试结果。图 7 中,在-30 dBm 到-13.96 dBm 的输入功率范围内

(-13.96 dBm 的输入功率对应行波管的最大饱和输出功率,如图 7(a),7(b)中的标记 M1 所示),行波管功率放大器增益压缩 6 dB,相位压缩 45.8°,最大功率输出对应图 7(a)中 M1 处为 45.316 dBm。由图 8 可以看出,在-30 dBm 到-6.92 dBm 的输入功率范围内(-6.92 dBm 的输入功率对应线性化后行波管的最大饱和输出功率,如图 8(a),8(b)中的标记 M1 所示),线性化后的行波管功率放大器的非线性失真现象得到了较好的改善,增益和相位变化分别在 1 dB 和 5° 以内,最大功率输出对应图 8(a)标记 M1 处为 45.091 dBm。

在实际工程应用中,预失真电路的前端有可调衰减器和增益模块,用来调节输入功率范围,本实验里将-30 dBm~-13.96 dBm 的输入功率范围调节到-22.96 dBm~-6.92 dBm。然后通过处理实验数据得到图 9 所示,输入功率-30 dBm~-13.96 dBm 下的线性化前后行波管功率放大器输入输出功率特性,横坐标表示输入功率大小,纵坐标表示行波管

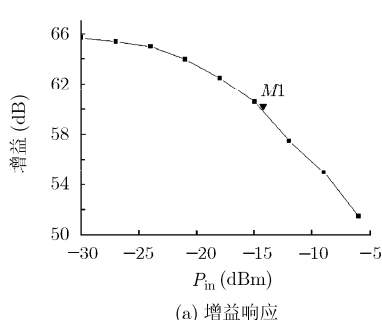


(a) 增益响应

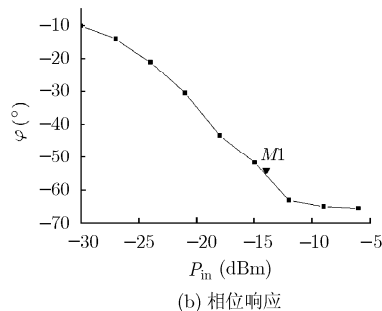


(b) 相位响应

图 6 预失真器工作带宽内的频率响应

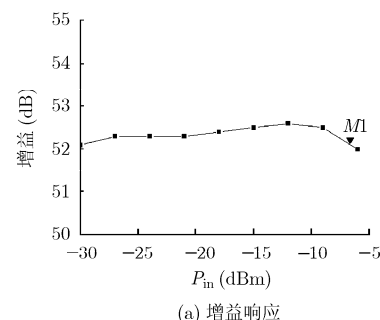


(a) 增益响应

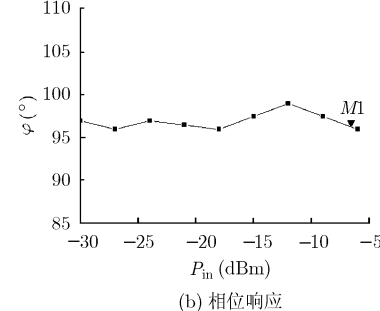


(b) 相位响应

图 7 线性化前行波管增益、相位响应



(a) 增益响应



(b) 相位响应

图 8 线性化后 TWT 增益、相位响应

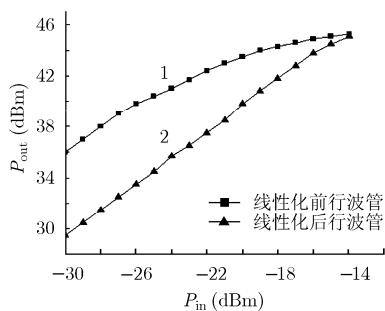


图 9 TWT 输入输出功率特性

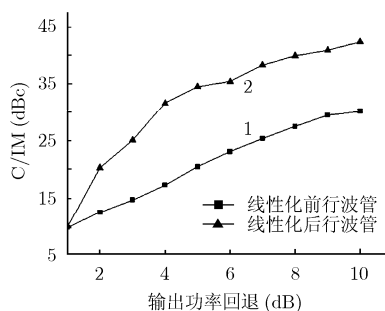


图 10 TWT 线性化前后的 C/IM 对比

总输出功率大小。曲线 1 是线性化前行波管的输入输出功率曲线,曲线 2 是线性化后行波管的输入输出功率曲线。在 $-30\text{ dBm}\sim-13.96\text{ dBm}$ 的输入功率范围内,曲线 1 的斜率逐渐减小,曲线 2 的斜率几乎不变。随着输入功率的进一步增大,曲线 1 的斜率进一步减小,曲线 2 的斜率也开始略有减小。通过对比曲线 1,曲线 2,在相同的输入功率范围内,曲线 2 的线性化效果明显优于曲线 1,可以说线性化后的 TWTA 在保证高的输出功率同时还能保证较好的线性化度。

在实验平台上利用实际预失真电路和一个 X 波段行波管在 $8.38\sim 8.58\text{ GHz}$ 频率范围进行双音测试,双音间隔选择 10 MHz 。当双音信号经过预失真器后,部分奇阶交叉调制分量的频率距离双音信号频率较近不能通过滤波器滤除,而其他失真分量可以容易地用滤波器滤除,预失真器的带内输出信号主要是三阶、五阶交调分量信号和双音信号。而行波管功率放大器的非线性失真信号也是由距离双音信号频率最近的三阶、五阶信号引起的。因此预失真器的带内输出信号可以一定程度上改善行波管非线性状态下的输出信号载波交调比,测试结果如图 10 所示,横坐标以功率回退的方式来表示行波管输出功率大小,纵坐标表示 C/IM 大小。曲线 1 是线性化前行波管的 C/IM,曲线 2 是线性化后行波管的 C/IM。随着输出功率的回退,曲线 1 的 C/IM 有了明显的改善,但是改善的效果远不及曲线 2 的明显。输出功率回退 1 dB 处,线性化前后行波管的 C/IM 均在 10.1 dBc 左右。曲线 2 中,在输出功率回退 3 dB 处 C/IM 就可以有 15.4 dB 改善,即线性化后行波管的 C/IM 改善到 25.5 dBc ;而曲线 1 中,在输出功率回退约 7 dB 处才能使 C/IM 改善 15.4 dB 。鉴于 C/IM 恶化会引起系统载波噪声比(CNR)的恶化,因此改善 C/IM 可以在一定程度上改善通信质量。

使用本文的预失真器后,输出功率在较线性化前回退较少的前提下,保证高输出功率的同时可以极大的改善 C/IM 的指标,有力提升了放大器在通信应用中的能力。

4 结论

本文利用以砷化镓场效应管和肖特基二极管作为非线性器件,在 X 波段,设计了一种结构相对简单的行波管预失真线性化器电路。在额定输入功率范围内,通过调节肖特基二极管偏压,这种预失真电路能够在相位变化不大的情况下实现增益的调整。通过预失真器与行波管的联合实验,在频率为

$8.38\sim 8.58\text{ GHz}$ 和额定输入功率范围内,行波管增益、相位压缩分别有 6 dB 和 45° 的改善;在双音测试中,当行波管输出功率回退 3 dB 时,C/IM 可以改善到 25.4 dBc ,有力提升了行波管放大器在通信应用中的能力。

参考文献

- [1] Weekley J and Mangus B. TWTA versus SSPA: a comparison of on-orbit data. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, 52(5): 650-652.
- [2] Gray R, Katz A, and Dorval R. Advances in millimeter-wave linearization. Proceedings 13th Ka Broadband Communication Conference, Torino, Italy, 24-26 Sep., 2007, Vol.5: 76-79.
- [3] Qin Chuan, Chang Tianhai, and Liu Lin-tong. A modified adaptive pre-distorter for power amplifier in OFDM system. 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing, Shenzhen, China, 12-14 April., 2010, Vol.2: 393-397.
- [4] Abdussalam Nuri Baryun. Performance evaluation of APK modulation for nonlinear satellite communication channel. 2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, Dubai, UAE, 28-30 Dec., 2009, Vol.2: 524-528.
- [5] Kenington P B. High-Linearity RF Amplifier Design, Boston: Artech House, 2000: 33.
- [6] Katz A. TWTA linearization[J]. *Microwave Journal*, 1996, 39(4): 78-90.
- [7] Katz A, Gray R, and Dorval R. Wide/multiband linearization of TWTAs using predistortion. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(5): 959-964.
- [8] Yamauchi K, Mori K, Nakayama M, Mitsui Y, and Takagi T. A microwave miniaturized linearizer using a parallel diode with a bias feed resistance. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Technology*, 1997, 45(12): 2431-2435.
- [9] Zhang W M and Yuen C. A broadband linearizer for Ka-band satellite communication. ARFTG Cconference Digest-Spring 51st, 1998, Vol. 33: 135-138.
- [10] Pozar D M. *Microwave Engineering*, Third Edition, New York: John Wiley & Sons, 2006: 533.

胡欣:男,1985年生,博士生,研究方向为行波管功率放大器的预失真技术。

王刚:男,1971年生,研究员,研究方向为微波电子信息系统与电路。

王自成:男,1966年生,研究员,硕士生导师,研究方向为宽带微波功率放大器模块。

罗积润:男,1957年生,研究员,博士生导师,研究方向为高功率毫米波的产生与应用。