

一种用于预失真线性化器的宽带匹配技术*

汪永飞¹, 韩培胜¹, 胡 卿^{1,2}, 陈欣鹏^{1,3}, 周东方¹

(1. 信息工程大学, 郑州 450001; 2. 北方计算研究所, 北京 100161;

3. 陆军炮兵防空兵学院士官学校, 沈阳 110000)

摘 要: 由于放大链路的增益波动以及不同频点之间非线性特性的差异, 预失真器难以在不同的频点同时实现非线性特性匹配, 即令整个频带内不同频点的线性度指标同时满足要求。由于预失真器和放大器之间的非线性失配, 放大器在某些频点的非线性特性还会恶化。本文从线性化器与预失真器的宽带匹配出发, 讨论了预失真线性化器与行波管放大器宽带匹配的条件以及非线性失配所带来的影响, 当增益失配误差不大于 1 dB 时, 在行波管放大器自身的三阶交调值不大于 40 dB 的非线性动态范围内, 三阶交调下降幅度最大值为 4.1 dB; 通过采用级联增益补偿电路的方式, 降低链路增益波动, 实现预失真器和放大器的非线性匹配, 真正拓展预失真线性化器的工作带宽。

关键词: 预失真; 行波管放大器; 非线性匹配; 宽带匹配; 级联增益补偿

中图分类号: TN830.6

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB201931.190128

Wideband matching technology used for predistortion linearization

Wang Yongfei¹, Han Peisheng¹, Hu Qing^{1,2}, Chen Xinpeng^{1,3}, Zhou Dongfang¹

(1. Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. The North Institute of Computing, Beijing 100161, China;

3. Warrant Officer School, Army Artillery Air Defense Academy, Shenyang 110000, China)

Abstract: Due to the gain fluctuation and nonlinear characteristic variation of the TWT amplifier chain, predistorter cannot compensate the nonlinearities at different frequencies within the working band, thus nonlinear mismatch might occur and nonlinearity of TWTA could get worse at some frequencies. The wideband linear match theory of predistorter with TWTA is put forward, and the influence of nonlinear mismatch is discussed. Predistorter cascaded with gain compensation unit can flatten the gain fluctuation and match the nonlinearity of TWTA, truly broaden the linear working band of LTWTA.

Key words: predistortion; travelling wave tube amplifier; nonlinearity match; wideband match; cascade gain compensation

PACS: 84.40.Ua; 84.40.Fe; 84.30.Le

线性化是一种通过系统级的方法解决放大器的失真问题的技术。在行波管放大器的非线性补偿中, 线性化技术并非通过改变行波管放大器的内部结构从而减小其非线性失真分量的产生, 而是在线性化器非线性失真存在的前提下, 将行波管放大器视为放大系统的一个组成部分, 通过外加线性化器的方法, 提高整个放大系统的线性度指标。这个线性放大系统由线性化器和行波管放大器以及调节组件构成, 称为线性化行波管放大器(LTWTA)。能够提高行波管放大器线性度的技术有很多, 在众多技术中, 预失真技术具有较宽的工作带宽^[1-2]。

基于 DSP 的数字预失真和基于非线性器件的模拟预失真是实现预失真线性化技术的两种主要手段^[3-11]。然而, 在宽带应用中, 数字预失真却具有非常明显的劣势, 除了成本高昂、功率消耗大、工作带宽窄之外, 限制数字预失真技术应用于宽带预失真技术的主要原因在于, 当行波管的非线性特性随着频率发生改变, 数字预失真无法进行相应的调整, 提供合适的非线性特性补偿。模拟预失真具有能够产生复数传输函数的优势, 这令其在指定的工作频带内更好地拟合行波管放大器所需要的非线性特性, 从而为行波管放大器带来较佳的线性度改善。

模拟预失真技术能够在较宽的工作频带内提供放大器所需的非线性特性^[12-14]。但是由于链路的增益波动以及

* 收稿日期: 2019-04-24; 修订日期: 2019-08-15

基金项目: 国家核高基重大科技专项 (201501010101-003)

作者简介: 汪永飞 (1986—), 男, 博士, 从事微波电路理论与技术研究; 18618102902@163.com。

不同频点之间非线性特性的差异, 预失真器难以在不同的频点同时实现非线性特性匹配, 即令整个频带内不同频点的线性度指标同时满足要求。更甚的, 由于预失真器和放大器之间非线性失配, 放大器在某些频点的非线性特性还会恶化。本文从线性化器与预失真器的宽带匹配出发, 主要讨论预失真线性化器与行波管放大器宽带匹配的条件以及非线性失配所带来的影响, 并对宽带预失真技术展开研究。

1 预失真器的工作原理

预失真器工作带宽宽、功率消耗低、可以作为独立部件工作的特点是其能够广泛应用于微波毫米波频段的最大优势, 其工作原理见图 1。

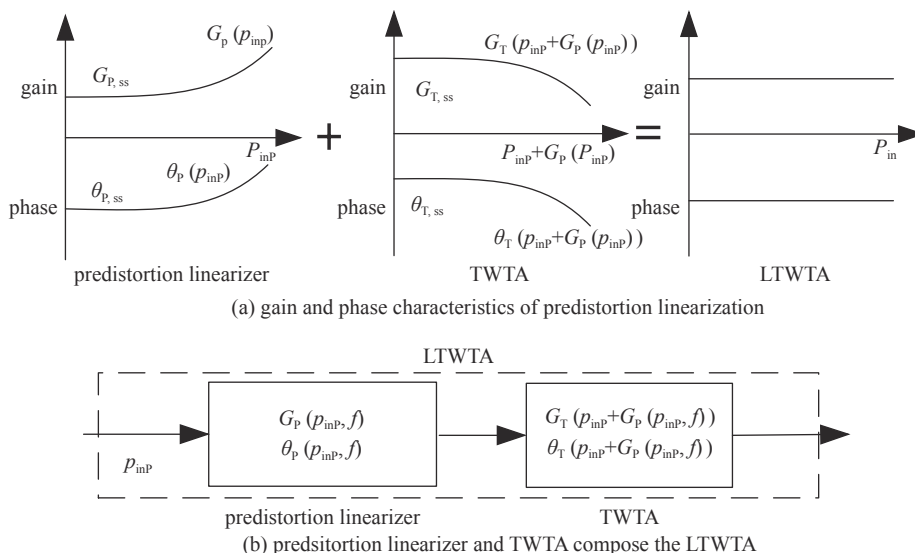


Fig. 1 Theoretical model of predistortion linearizer

图 1 预失真线性化模型

预失真器的工作原理是工作频带内传输特性与拟优化放大器相反, 这种相反同时体现在幅度和相位上。预失真器的增益与行波管放大器的关系为

$$[G_P(P_{inP}) - G_{P,ss}] - [G_T(P_{inP} + G_P(P_{inP})) - G_{T,ss}] = 0(\text{dB}) \tag{1}$$

式中: G 表示增益; 下标 P, T 分别表示预失真器和行波管放大器; 下标 ss 表示线性小信号; 下标 inP 则表示输入端; $G_{P,ss}, G_{T,ss}$ 是预失真器和行波管放大器的小信号增益; $G_P(P_{inP}), G_T(P_{inP} + G_P(P_{inP}))$ 则是预失真器和行波管放大器的增益相对于各自输入功率的函数。在具体的输入功率下, 行波管放大器的增益压缩量即为预失真器的增益的扩张量。

预失真器的相位与行波管放大器相位的关系为

$$\theta_P(P_{inP}) - \theta_{P,ss} = -[\theta_T(P_{inP} + G_P(P_{inP})) - \theta_{T,ss}] \tag{2}$$

行波管放大器的相移随着输入功率增加时的变化规律需要视情况而定, 但是当行波管放大器的相位改变量即为预失真器的相位改变量时则仍然适用。只有当式 (1), (2) 同时得到满足时, 预失真器改善行波管放大器的线性度才具有最佳的效果。需要指出的是, 式 (1), (2) 中的变量是预失真器 (行波管放大器) 的输入信号功率, 当行波管放大器是窄带系统时, 其非线性随着频率的改变是很小的, 但是在宽带系统中, 行波管放大器的 AM/AM 和 AM/PM 特性均会随着频率发生变化。因此, 在公式 (1) 和 (2) 中, 线性化器的 AM/AM 和 AM/PM 特性也应当随着频率发生改变, 此时公式 (1) 和 (2) 中 $G_P(P_{inP}), \theta_P(P_{inP})$ 应当改为 $G_P(P_{inP}, f), \theta_P(P_{inP}, f)$ 。

2 宽带匹配的理论分析

2.1 宽带匹配的一般性原理

在宽带条件中, 行波管放大器的小信号增益和相移也是影响预失真器工作性能的重要因素。当预失真器和行波管放大器级联时, 预失真器发挥最佳性能的条件是, 预失真器的插入并未改变行波管放大器的饱和点的工作状态, 即

$$\begin{cases} P_{\text{inT}}^{\text{sat}} = P_{\text{inP+T}}^{\text{sat}} \\ P_{\text{outT}}^{\text{sat}} = P_{\text{outP+T}}^{\text{sat}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： P^{sat} 表示饱和点的功率；下标 inT, inP+T 分别表示 TWTA 和 LTWTA 的输入端，outT, outP+T 则表示 TWTA 和 LTWTA 的输出端。

将公式 (3) 和 (1) 联立，若在 TWTA 的饱和点，预失真器的输入功率 P_{inP} 和增益 $G_P(P_{\text{inP}})$ 之和即 TWTA 的输入功率无法令 TWTA 达到饱和输出，即

$$P_{\text{inP}} + G_P(P_{\text{inP}}) \neq P_{\text{inT}}^{\text{sat}} \quad (4)$$

为了保证预失真器与行波管放大器的良好配合，需要在二者之间接入增益调节模块，增益值为 G_b ，则放大链路的增益应满足如下关系

$$P_{\text{inP}} + G_P(P_{\text{inP}}) + G_b + G_T(P_{\text{inP}} + G_P(P_{\text{inP}}) + G_b) = P_{\text{outT}} \quad (5)$$

$G_T(\cdot)$ 为 TWTA 的增益，当行波管放大器饱和时，则有

$$P_{\text{inP}}^{\text{sat}} + G_P(P_{\text{inP}}^{\text{sat}}) = P_{\text{outP}}^{\text{sat}} \quad (6)$$

$$P_{\text{outP}}^{\text{sat}} + G_b = P_{\text{inT}}^{\text{sat}} \quad (7)$$

$$P_{\text{inT}}^{\text{sat}} + G_T^{\text{sat}}(P_{\text{inT}}^{\text{sat}}) = P_{\text{outT}}^{\text{sat}} \quad (8)$$

根据公式 (5)，有

$$P_{\text{inP}}^{\text{sat}} + G_P(P_{\text{inP}}^{\text{sat}}) + G_b + G_T(P_{\text{inP}}^{\text{sat}} + G_P(P_{\text{inP}}^{\text{sat}}) + G_b) = P_{\text{outT}}^{\text{sat}} \quad (9)$$

令 ΔG 表示饱和点增益和小信号增益的差，则

$$G_P(P_{\text{inP}}^{\text{sat}}) = G_{P,ss} + \Delta G \quad (10)$$

$$G_T^{\text{sat}}(P_{\text{inT}}^{\text{sat}}) = G_{T,ss} - \Delta G \quad (11)$$

所以，有

$$P_{\text{inP}}^{\text{sat}} + [G_{P,ss} + \Delta G] + G_b + [G_{T,ss} - \Delta G] = P_{\text{outT}}^{\text{sat}} \quad (12)$$

联立式 (12) 和式 (3)，可得

$$P_{\text{inT}}^{\text{sat}} + [G_{P,ss} + \Delta G] + G_b + G_b + [G_{T,ss} - \Delta G] = P_{\text{outT}}^{\text{sat}} \quad (13)$$

$$P_{\text{inT}}^{\text{sat}} + G_{P,ss} + G_b + G_{T,ss} = P_{\text{outT}}^{\text{sat}} \quad (14)$$

$$G_T^{\text{sat}}(P_{\text{inT}}^{\text{sat}}) = P_{\text{outT}}^{\text{sat}} - P_{\text{inT}}^{\text{sat}} \quad (14)$$

$$G_b = P_{\text{outT}}^{\text{sat}} - P_{\text{inT}}^{\text{sat}} - G_{T,ss} - G_{P,ss} \quad (15)$$

而

$$P_{\text{inT}}^{\text{sat}} = P_{\text{inP}}^{\text{sat}} + G_P(P_{\text{inP}}^{\text{sat}}) + G_b \quad (16)$$

所以

$$G_b = G_T^{\text{sat}}(P_{\text{inT}}^{\text{sat}}) - G_{T,ss} - G_{P,ss} \quad (17)$$

公式 (17) 表明，增益调节模块的增益值与预失真器和行波管放大器均有关系。如果行波管放大器在工作频带内存在增益波动，则 G_b 也应随之调整。即

$$G_b(f) = G_T^{\text{sat}}(P_{\text{inT}}^{\text{sat}}, f) - G_{T,ss}(f) - G_{P,ss}(f) \quad (18)$$

2.2 增益调节误差对行波管放大器线性度的影响

当输入信号的幅度为 A_0 时，假设预失真器与线性化器之间良好匹配，满足式 (1)，此时行波管放大器的增益为 $G_T(A_0)$ ，行波管放大器自身的三阶交调为 $M_3(A_0)$ 。则预失真产生的三阶交调补偿分量为

$$B_{A_0} = \frac{M_3(A_0)}{G_T(A_0)} \quad (19)$$

由于增益调节模块失配 ΔG_b ，因而在相同的输入信号下，行波管放大器的增益为 $G_T(A_0')$ ，此时行波管放大器自

身三阶交调为 $M_3(A'_0)$ 。则有

$$\Delta G_b = G_p(A'_0) - G_p(A_0) \quad (20)$$

$$\Delta_{IM3} = B_{A_0} = \frac{M_3(A_0)}{G_T(A_0)} G_T(A'_0) - M_3(A'_0) \quad (21)$$

式中： Δ_{IM3} 表示由于增益调节模块失配误差导致的三阶交调分量改变值。式中(20)表示增益波动值等价于预失真器在 A'_0 与 A_0 两个值之间的增益差；

根据公式(21)可以计算出三阶交调下降值与增益调节模块失配误差之间的关系，详见图2。可以看出，三阶交调下降值与行波管放大器自身的非线性程度有关，非线性越严重，增益调节模块失配导致的线性度下降越严重。当增益模块失配误差不大于1 dB时，在行波管放大器自身的三阶交调值不大于40 dB的非线性动态范围内，三阶交调下降幅度最大值为4.1 dB。

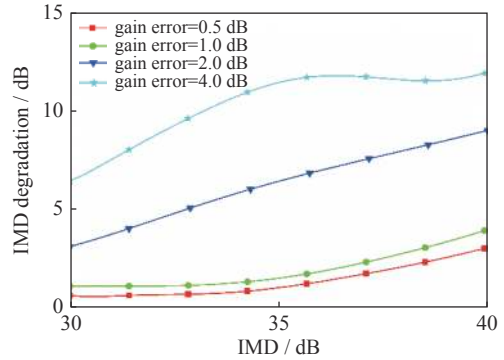


Fig. 2 Relationship between third-order intermodulation degradation and gain error

图 2 三阶交调下降值与增益波动误差的关系

3 测试验证

图3给出了行波管放大器的三个工作频点的AM/AM特性曲线，可以看出：该行波管放大器的小信号增益在三个频点并不相同；三个频点的AM/AM转换特性也不相同，其1 dB压缩点和饱和点具有很大差异。

图4给出了预失真器和行波管放大器不能良好匹配时，LTWTA的AM/AM特性曲线，可以看出，在等功率信号驱动下，当增益调节模块的增益值为常数时，行波管放大器在下边频处的线性化改善效果明显，而在中心频点和上边频，行波管放大器和预失真器出现失配。

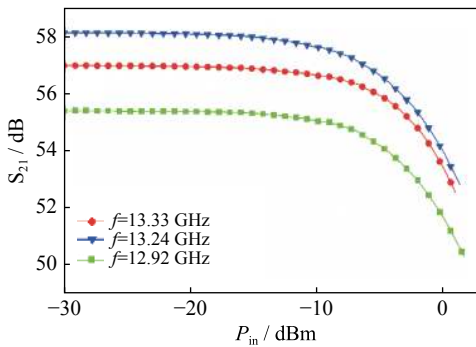


Fig. 3 Curves of AM/AM characteristic of TWTA

图 3 某行波管放大器的 AM/AM 特性曲线

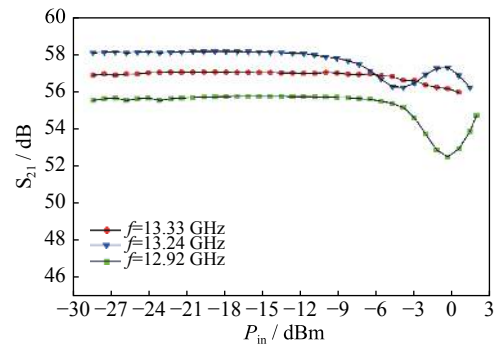


Fig. 4 Curves of AM/AM characteristic of LTWTA when PD and TWTA is not well matched

图 4 预失真器和行波管放大器不能良好匹配时，LTWTA 的 AM/AM 特性曲线

本文所需要匹配行波管放大器的幅频特性曲线见图5。该行波管放大器在工作频带范围(12.92~13.42 GHz)内的饱和点增益波动在1 dB以内，其在下边频12.92 GHz以及两个增益波动点13.24, 13.33 GHz的增益压缩曲线见图3。

该预失真器在12.92~13.42 GHz的工作频带内，增益波动不超过1 dB，具有5.2 dB的增益和45°(如图6所示)的相位扩张能力，可以根据行波管线性化器的需求进行调整。

与行波管线性化器的联测时，分别测量了前文所述三个频点的增益和相位非线性特性，结果见图7，可以看出，由于采用了增益均衡器，预失真器和行波管线性化器在不同的频点能够实现良好匹配，1 dB压缩点均向饱和功率点靠近，改善值不小于4 dB，相移压缩量从30°左右减小到不超过10°。当进行双音测试时，在整个频带内的载波三阶

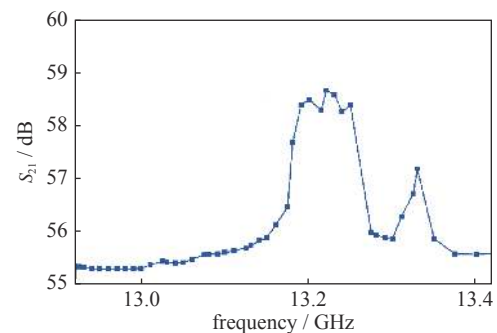


Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic of TWTA

图 5 行波管放大器的幅频特性曲线

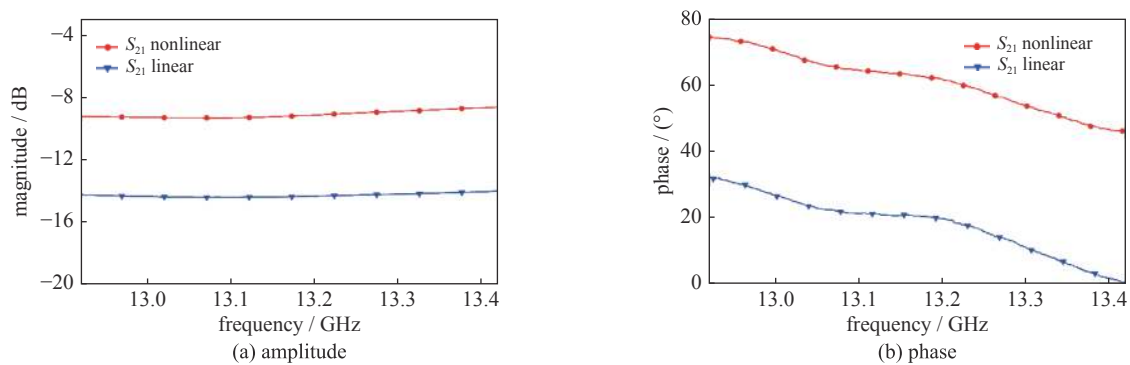


Fig. 6 The amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of PD

图 6 预失真线性化器的幅频特性和相频特性

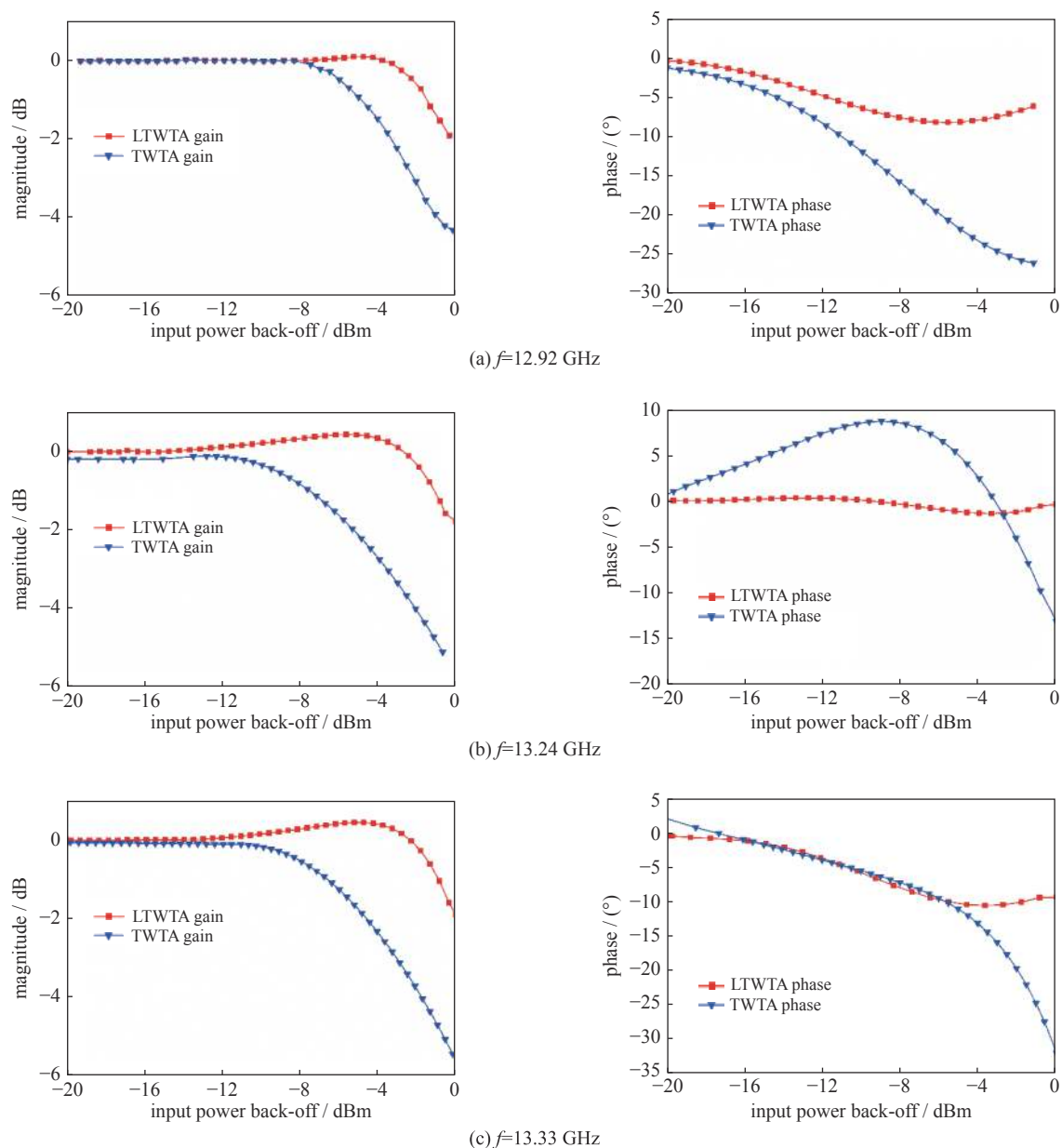


Fig. 7 Gain and phase characteristics of TWTA and LTWTA at three frequencies

图 7 行波管放大器线性化前后的增益和相位特性

交调比均有较大程度的改善,图 8 给出了整个频带范围内的载波三阶交调比的改善值,可以看出,在 500 MHz 的工作频带内,载波三阶交调比最大改善量为 3.5 dB。

4 结论

本文从线性化器与预失真器的宽带匹配出发,讨论了预失真线性化器与行波管放大器宽带匹配的条件以及非线性失配所带来的影响,并通过级联增益补偿电路的方式,降低链路增益波动,实现预失真器和放大器的宽带非线性匹配。与行波管放大器的级联测试表明,采用本文提出的方法进行增益调节,能够改善预失真线性化器的工作带宽,且令行波管放大器在工作频带内的 1 dB 压缩点改善不小于 4 dB,非线性相移不大于 10° ,载波三阶交调比指标最大改善量为 3.5 dB。

参考文献:

- [1] Katz A, Wood J, Chokola D. The evolution of PA linearization: From classic feedforward and feedback through analog and digital predistortion[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2016, 17(2): 32-40.
- [2] Tripathi G C, Rawat M. R_{Fin} - R_{Fout} linearizer system design for satellite communication[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2018, 65(6): 2378-2384.
- [3] 刘颖. 宽带无线通信数字预失真关键技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 6-37. (Liu Ying. Research on key technologies of broadband wireless digital predistortion. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 6-37)
- [4] 李文朝, 周东方, 张德伟, 等. 基于二极管Ka波段的新颖可调预失真器[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 113004. (Li Wenchao, Zhou Dongfang, Zhang Dewei, et al. A novel diode-based Ka-band adjustable predistortion linearizer. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 113004)
- [5] Hu B X, Wang G, Hao B L, et al. Analog predistortion linearizer on reducing corrected amplitude overshoot[J]. *Journal of Electronics*, 2014, 31(6): 597-602.
- [6] 邓海林, 张德伟, 周东方, 等. 一种双路矢量合成式毫米波预失真线性化器[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 123006. (Deng Hailin, Zhang Dewei, Zhou Dongfang, et al. A dual-branch vector synthesis millimeter-wave predistortion linearizer. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 123006)
- [7] 虞崇志, 胡波雄, 唐康淞, 等. 一种用于毫米波行波管的微带预失真电路[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(2): 474-481. (Yu Chongzhi, Hu Boxiong, Tang Kangsong, et al. Micro-strip predistortion circuit for millimeter-wave travelling wave tube. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(2): 474-481)
- [8] Zhang Dawei, Xu Xin, Yu Hongxi, et al. Predistortion linearizer for wideband AM/PM cancelation with left-handed delay line[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(9): 794-796.
- [9] 鲍鑫, 张德伟, 邓海林, 等. 不同位置二极管串并联方式对射频电路的影响[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 073009. (Bao Xin, Zhang Dewei, Deng Hailin, et al. Influence of series and parallel diodes in different positions on RF circuit. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 073009)
- [10] 邓海林, 陈会超, 周东方, 等. 一种补偿量可调的反射式预失真线性化器[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(8): 657-662. (Deng Hailin, Chen Huichao, Zhou Dongfang, et al. Design and evaluation of modified reflective predistortion linearizer with tunable compensation. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(8): 657-662)
- [11] Deng H, Zhang D, Lv D, et al. Analog predistortion linearizer with independently tunable gain and phase conversions for Ka-band TWTA[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2019, 66(3): 1533-1539.
- [12] Katz A, Gray R, Dorval R. Wide/multiband linearization of TWTAs using predistortion[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2009, 56(5): 959-964.
- [13] Katz A, Chiappetta M, Dorval R. Predistortion linearization to 100 GHz[C]//Proceedings of IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications. 2013: 34-36.
- [14] Villenmaret J F, Hissa Y, Azzara J C, et al. 1 GHz instantaneous wide-band analog predistortion linearizer for new telecom satellite transmit section[C]//IEEE Thirteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2012: 425-426.

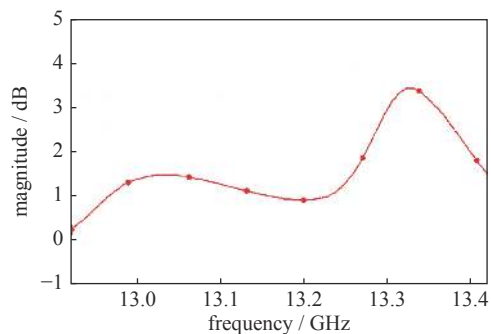


Fig. 8 C/IM3 improvement of TWTA with predistortion linearization

图 8 行波管放大器线性化前后的载波三阶交调比改善量