



·高功率微波技术·

Ka 波段宽频带行波管放大器线性化研究^{*}

韩 飞¹, 夏 雷², 李宝建¹

(1. 中国电子科技集团公司第十二研究所, 北京 100015; 2. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 611731)

摘 要: 线性化器是毫米波通信系统中的关键器件, 在改善放大器的线性指标及提高通信质量等方面起着至关重要的作用。现阶段国内行波管放大器(TWTA)线性化技术尚不完善, 无法满足通信技术发展的应用需求, 因此线性化技术的研究刻不容缓。本文提出了一种新的宽频带模拟预失真线性化器结构, 用来改善 Ka 波段 TWTA 的非线性特性。仿真结果表明, 在 26~30 GHz 频率范围内, 输入功率为 -20~10 dBm, 线性化器的增益扩张 ≥ 5.08 dB, 相位扩张 $\geq 64.81^\circ$ 。将线性化器与 TWTA 进行级联测试, 中心频率的增益压缩 ≤ 3.12 dB, 相位压缩 $\leq 2.31^\circ$, 三阶互调(IMD3)显著提高。

关键词: 线性化; 毫米波; 宽频带; 模拟预失真; 行波管放大器

中图分类号: TN402

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.200353

Study on linearization of Ka-band wideband traveling-wave tube amplifier

Han Fei¹, Xia Lei², Li Baojian¹

(1. The Twelfth Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Linearizer is a key component in the millimeter-wave communication system, it plays an important role in improving the linearity performance of amplifier and communication quality. At present, the development of traveling-wave tube amplifier (TWTA) linearization technology cannot meet the application requirements of communication technology, therefore, the research of linearization technology is very important. In this paper we propose a kind of a new wide-band analog pre-distortion structure used to improve the nonlinear characteristics of Ka-band TWTA. The simulation results show that when the input power changes from -20 to 10 dBm in the frequency range of 26-30 GHz, the gain expansion of the linearizer is greater than 5.08 dB, and the phase expansion exceeds 64.81°. The linearizer and the TWTA are cascaded for testing. The test results show that the gain compression and phase compression of center frequency is less than 3.12 dB and 2.31° respectively, and the third-order intermodulation (IMD3) improves significantly.

Key words: linearization; millimeter-wave; broadband; analog predistortion; traveling-wave tube amplifier

随着无线与卫星通讯技术的飞速发展,对 TWTA 性能提出了更高的要求,改善 TWTA 的非线性输出是重中之重,线性化调制技术得到越来越广泛的关注^[1]。工作在饱和状态的 TWTA 可以保持高功率和高效率的输出,但此时的线性度较差,会引起被调制信号非常严重的失真,最终造成码间串扰和邻近信道间干扰^[2-4]。针对此问题,研发人员提出了功率回退法、前馈法、负反馈法和预失真等线性化方法^[5]。其中模拟预失真方法具有电路结构简单、成本低廉、工作频段宽、稳定性强等优点^[6],近些年得到了很好的发展。目前,国内外对 Ka 波段 TWTA 的线性化器研制还不够成熟,研制机构有电子科技大学、解放军信息工程大学、LTI 公司和 Thales 公司等,带宽局限于 2 GHz,非线性指标改善较差,体积和重量过大^[7]。无法满足 TWTA 对宽频带、小体积、轻量化的线性化器特性需求^[8]。本文提出了一种新型 3 dB 90°分支电桥结构,应用此结构研制 Ka 波段宽频带模拟预失真线性化器。

* 收稿日期:2020-12-28; 修订日期:2021-03-04

基金项目:预研基金项目(2019-JC1Q-JJ-57X)

作者简介:韩 飞(1994—),男,硕士研究生,工程师,主要从事行波管线性化理论与技术研究;741914151@qq.com。

1 线性化器非线性分析

模拟预失真技术的原理是在 TWTA 前端放置模拟预失真器。射频信号通过模拟预失真器后,形成与 TWTA 增益压缩及相位压缩互补的信号,再输入 TWTA 内,达到补偿 TWTA 非线性的目的^[9-10],如图 1 所示。本文应用反射式电桥结构,结合肖特基二极管,可以产生与 TWTA 非线性互补的信号^[11-12]。电路原理如图 2 所示。运用 ABCD 矩阵进行分析,结合肖特基二极管小信号伏安特性关系。在一定输入功率动态范围内,随着输入功率的增大,增益和相位呈现出非线性扩张的趋势^[13]。

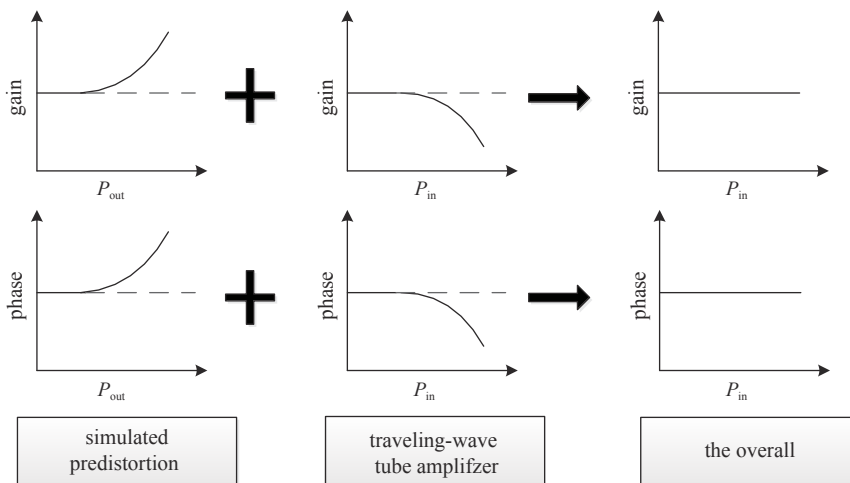


Fig. 1 Schematic diagram of simulated pre-distortion technique

图 1 模拟预失真技术原理图

2 微带电路结构与仿真

本文应用三维电磁场仿真软件对线性化器中的无源结构进行三维电磁仿真。应用微波电路仿真软件对有源结构及整体进行微波电路联合仿真,分析预失真电路整体特性。射频基板设计选用 Rogers 公司 DuriodRT5880 软基板,厚度为 0.254 mm,介电常数为 2.2。国内外同类型射频基板中,该型号的损耗角正切最小,可达到 0.0009。肖特基二极管采用 MACOM 公司的 MA4E2037。本文研究的频率为 26~30 GHz,总带宽 4 GHz,以下是对微带电路的设计与仿真。

2.1 3 dB 90°分支电桥

理论上,分支电桥分支数越多,其稳定性越强,同频段内带宽越宽^[14]。但由于制作工艺及线性化器要求小体积、轻重量等因素,微带多分支电桥受到了限制。国内外反射式预失真电路多采用微带二分支或三分支电桥,仿真结果如图 3 和图 4 所示。

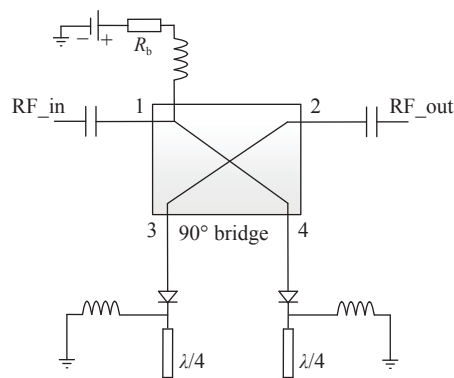


Fig. 2 Schematic diagram of reflection circuit

图 2 反射式电路原理图

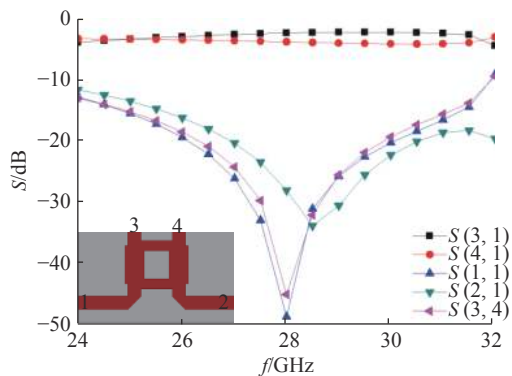


Fig. 3 Simulation results of two-branch bridge structure

图 3 二分支电桥结构仿真结果

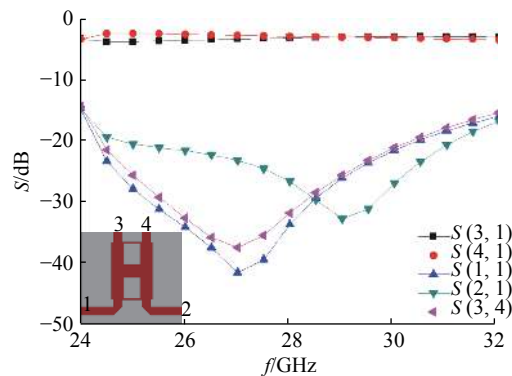


Fig. 4 Simulation results of three-branch bridge structure

图 4 三分支电桥结构仿真结果

本文选用的射频基板加工线宽最小为 0.1 mm, 理论上不满足五分支及以上电桥结构制作, 因此基于微带四分支电桥设计新的结构。采用阻抗变换原理缩小微带线尺寸, 但是由于间距较近, 会出现强耦合效应。为消除此效应, 并扩宽频带, 引入两种新概念, 即波导分支电桥和矩形金属屏蔽腔。将微带分支电桥与波导分支电桥相结合, 可减小强耦合效应, 并扩展带宽^[15]。调整金属屏蔽腔结构, 可以有效抑制高次模传输, 并且可以改变传输损耗^[16]。经过大量仿真调整, 电桥结构如图 5 所示。

三种电桥的仿真数据如表 1 所示, 在 26~30 GHz 频带内, 四分支电桥的 $S(3, 1)$ 与 $S(4, 1)$ 数据无交叉, 且最接近 -3 dB, $S(1, 1)$, $S(2, 1)$ 和 $S(3, 4)$ 的数据均小于 -17 dB。从图 6 可以看出, 3 端口与 4 端口相位相差近似 90°, 因此满足 3 dB 90°电桥应用要求。

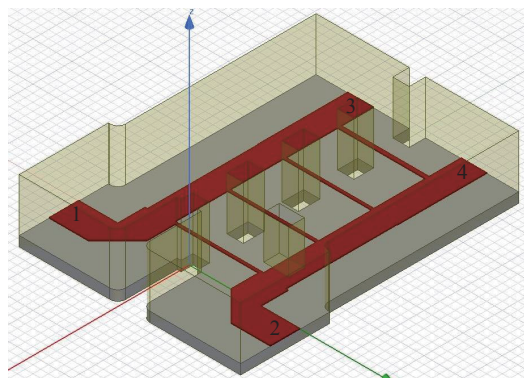


Fig. 5 Simulation model of four-branch bridge structure

图 5 四分支电桥结构仿真模型

表 1 电桥的仿真数据

Table 1 Simulation data of the bridge

f/GHz	$S(3, 1)$ /dB			$S(4, 1)$ /dB			$S(1, 1)$ /dB			$S(2, 1)$ /dB			$S(3, 4)$ /dB		
	two-branch bridge	three-branch bridge	four-branch bridge	two-branch bridge	three-branch bridge	four-branch bridge	two-branch bridge	three-branch bridge	four-branch bridge	two-branch bridge	three-branch bridge	four-branch bridge	two-branch bridge	three-branch bridge	four-branch bridge
26	-2.97	-3.63	-3.31	-3.51	-2.68	-3.02	-19.32	-33.79	-24.42	-16.17	-21.46	-18.88	-18.46	-32.36	-19.59
28	-2.42	-3.23	-3.18	-3.85	-2.99	-3.15	-48.48	-33.38	-28.18	-27.92	-26.41	-17.81	-44.82	-31.55	-24.14
30	-2.32	-3.03	-3.31	-4.17	-3.26	-3.07	-20.20	-21.40	-21.27	-22.19	-26.73	-18.47	-19.25	-21.00	-26.81

2.2 总体预失真结构仿真

供电结构采用直流偏置高阻线和扇形结滤波电容结合的形式, 隔直结构采用微带交指电容形式。为简化装配工艺, 减少不确定因素, 将无源结构整合。经过大量的仿真调试工作, 结构如图 7 所示。将无源结构仿真数据代入 Advanced Design System(ADS)原理图中进行联合仿真, 结构如图 8 所示。

观察所需频带内的增益及相位非线性扩张情况, 结果如图 9 所示。在 26~30 GHz 频带内, 选取输入功率为 -20~10 dBm, 增益扩张 ≥ 5.08 dB, 相位扩张 $\geq 64.81^\circ$ 。带内增益扩张平稳, 相位扩张随频率增加而增大, 这与 TWTA 的增益压缩及相位压缩趋势相吻合。

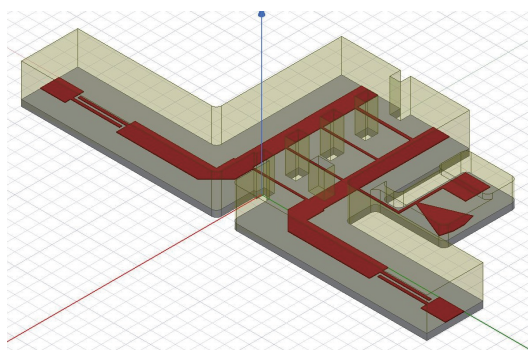


Fig. 7 Simulation model of the pre-distorted structure

图 7 预失真结构仿真模型

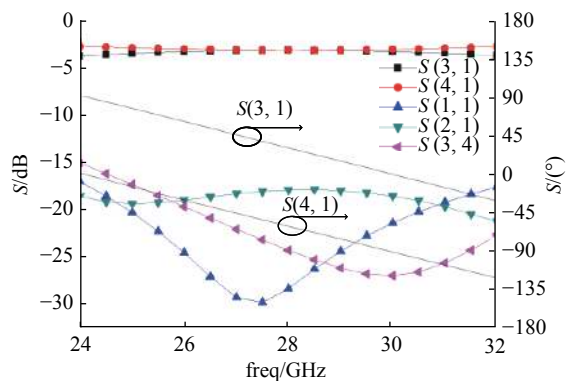


Fig. 6 Simulation results of four-branch bridge structure

图 6 四分支电桥结构仿真结果

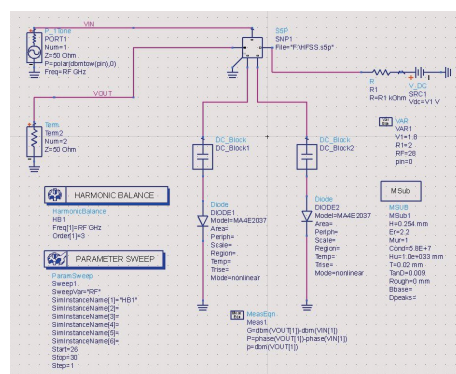


Fig. 8 ADS simulation structure diagram

图 8 ADS 仿真结构图

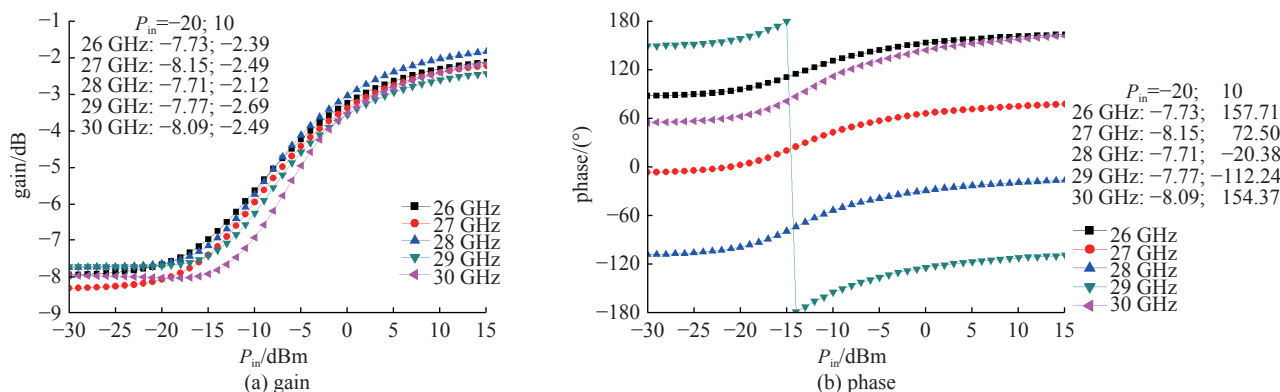


Fig. 9 Nonlinear characteristics of pre-distortion circuits

图 9 预失真电路非线性特性

3 线性化器装配与级联测试

3.1 线性化器装配事项

单独预失真部分的输出功率不足以匹配 TWTA 的输入功率,为增大可调节性,在其后面加装一个增益可调节的功率模块,此模块由低噪声放大器及压控可调节衰减器组成。在国产化替代的大背景下,综合考虑线性化器及 TWTA 的相关参数,我们选用的芯片是芯谷微电子有限公司 GaAs MMIC 低噪声放大器 ILA-1840I 和 GaAs MMIC 压控衰减器 IVA-0545。低噪声放大器小信号增益为 16 dB,压控衰减器的衰减量为 0~40 dB。

线性化器的腔体材料选用硬铝,表面镀镍。首先,将总体软基片装配到腔体内部;其次,采用共晶焊工艺装配放大器和衰减器芯片;最终,通过金丝键合工艺安装肖特基二极管及连接器。实物如图 10 所示。

3.2 预失真部分测试

采用矢量网络分析仪对单独预失真部分进行测试,测试结果如图 11 所示。在 26~30 GHz 频带内,选取输入功率为 -20~10 dBm,增益扩张 ≥ 4.62 dB,相位扩张 $\geq 65.96^\circ$ 。由于存在加工及装配误差,因此测试数据与仿真数据略有差别,但已满足与行波管级联测试需求。

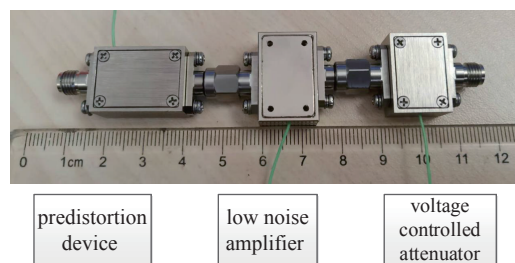


Fig. 10 A picture of the linearizer

图 10 线性化器实物图

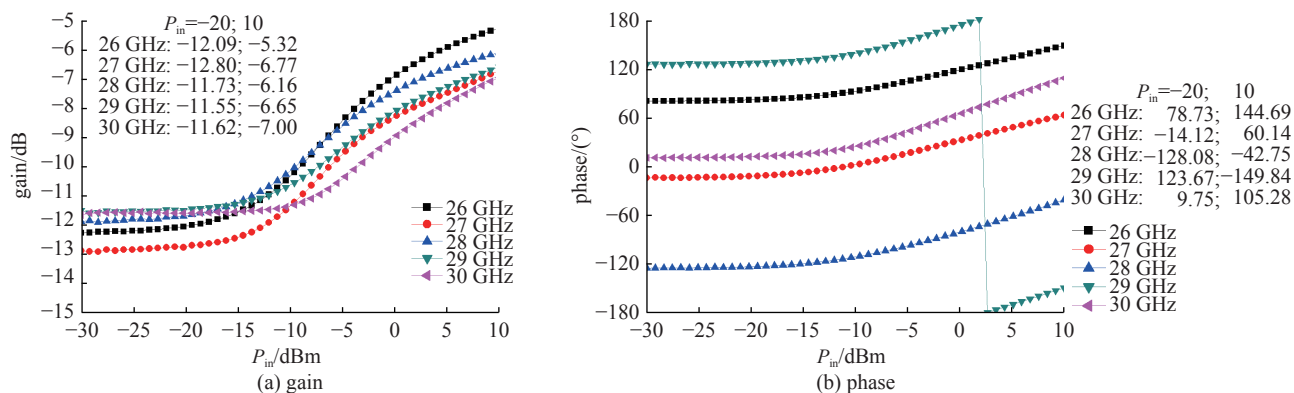


Fig. 11 Test diagram of pre-distortion circuits

图 11 预失真电路测试图

3.3 级联测试

采用矢量网络分析仪对行波管线性化前后的增益压缩、相位压缩及三阶互调指标进行测试。通过调节偏置电压,将带内增益压缩及相位压缩调节到最小。饱和点为输出功率饱和点,输入功率回退(IPBO)为自饱和点对应的输入功率回退,增益压缩为 IPBO 与 IPBO 20 dB 的增益差值,无特殊标注,则增益压缩为 IPBO 20 dB 内差值的最大绝对值,相位压缩同理。三阶互调(IMD3)的双音信号间隔为 5 MHz。中心频率测试结果如表 2、表 3、表 4 所

表 2 增益压缩测试数据

Table 2 Test data of the gain compression

IPBO/dB	gain compression of TWTA/dB	gain compression of linearized TWTA/dB
0	-5.81	-3.12
3	-3.31	-1.06
6	-1.77	-0.36
9	-0.92	-0.18
13	-0.34	-0.10
15	-0.19	-0.07

表 3 相位压缩测试数据

Table 3 Test data of the phase compression

IPBO/dB	phase compression of TWTA/(°)	phase compression of linearized TWTA/(°)
0	-33.31	-0.81
3	-23.88	+1.6
6	-14.77	+2.31
9	-8.39	+1.52
13	-3.5	+0.79
15	-2.03	+0.42

表 4 IMD3 测试数据

Table 4 Test data of IMD3

IPBO/dB	IMD3 of TWTA/dB	IMD3 of linearized TWTA/dB
3	-10.75	-12.30
4	-11.74	-14.39
6	-13.94	-20.08
9	-17.97	-32.36
13	-24.11	-35.12

示,增益压缩从 ≤ 5.81 dB改善至 ≤ 3.12 dB,相位压缩从 $\leq 33.31^\circ$ 改善至 $\leq 2.31^\circ$,IMD3显著提高。

低频点测试结果:增益压缩从 ≤ 4.78 dB改善至 ≤ 2.17 dB,相位压缩从 $\leq 20.61^\circ$ 改善至 $\leq 10.64^\circ$,IMD3显著提高。高频点测试结果:增益压缩从 ≤ 5.99 dB改善至 ≤ 3.49 dB,相位压缩从 $\leq 44.10^\circ$ 改善至 $\leq 8.6^\circ$,IMD3显著提高。

4 结 论

本文简单介绍了国内外 Ka 波段行波管线性化器的研究现状,分析了模拟预失真技术原理和反射式电路结构。研制了一款新型 Ka 波段宽频带模拟预失真线性化器,带宽可达 4 GHz。仿真结果表明,在 26~30 GHz 频率范围内,输入功率为-20~10 dBm,线性化器的增益扩张 ≥ 5.08 dB,相位扩张 $\geq 64.81^\circ$ 。该线性化器由模拟预失真部分、低噪声放大器及压控衰减器三部分组成,将线性化器加工、装配并与 TWTA 进行级联。中心频率测试结果表明,增益压缩 ≤ 3.12 dB,相位压缩 $\leq 2.31^\circ$,IMD3 显著提高。

参考文献:

- [1] 王晓海. 毫米波通信技术的发展与应用[J]. 电信快报, 2007(10): 19-21. (Wang Xiaohai. Millimeter wave communication technology and its development and application[J]. Telecommunications Information, 2007(10): 19-21)
- [2] Pozar D M. 微波工程[M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006. (Pozar D M. Microwave engineering[M]. Zhang Zhaoyi, Zhou Lezhu, Wu Deming, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006)
- [3] Bahl I J. 射频与微波晶体管放大器基础[M]. 鲍景富, 孙玲玲, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013. (Bahl I J. Fundamentals of RF and microwave transistor amplifiers[M]. Bao Jingfu, Sun Lingling, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013)
- [4] 李少岚, 延波, 李晨飞, 等. 采用二极管的模拟预失真毫米波功率放大器[J]. 微波学报, 2012, 28(1): 70-72. (Li Shaolan, Yan Bo, Li Chenfei, et al. Design of an analog pre-distortion linearizer using Schottky diodes for millimeter-wave power amplifier[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(1): 70-72)
- [5] 李晨飞. 毫米波频段预失真技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 50-55. (Li Chenfei. Linearization technology of millimeter wave power amplifier[D].

- Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011: 50-55)
- [6] Yamauchi K, Mori K, Nakayama M, et al. A microwave miniaturized linearizer using a parallel diode with a bias feed resistance[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, 45(12): 2431-2435.
- [7] 杨金榜. 毫米波线性化技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 39-44. (Yang Jinbang. The research of millimeter-wave linearization technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2017: 39-44)
- [8] 周斌, 黄微波, 贺彬, 等. 行波管放大器在通信、导航卫星中的应用[C]//2016真空电子学会第二十届学术年会论文集(上). 2016. (Zhou Bin, Huang Weibo, He Bin, et al. Application of TWT amplifier in communication and navigation satellite[C]//Proceedings of the 20th Annual Conference of Vacuum Electronics Branch (Part 1). 2016)
- [9] Zhang W M, Yuen C. A broadband linearizer for Ka-band satellite communication[C]//Proceedings of the 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Baltimore: IEEE, 1998, 3: 1203-1206.
- [10] 张旭阳. 毫米波预失真技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 41-76. (Zhang Xuyang. Millimeter-wave predistortion technology research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2014: 41-76)
- [11] Katz A, Sudarsanam R, Aubert D. A reflective diode linearize for spacecraft applications[C]//Proceedings of the 1985 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. St. Louis: IEEE, 1985.
- [12] Zhou Rui, Xie Xiaoqiang, Yan Bo, et al. A millimeter-wave predistortion linearizer for traveling wave tube amplifiers[C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Shenzhen: IEEE, 2012.
- [13] 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[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(8): 657-662)
- [14] 清华大学《微带电路》编写组. 微带电路[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 179-191. (Writing Group of "Microstrip Circuit" of Tsinghua University. Microstrip circuit[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 179-191)
- [15] 秦志飞. 毫米波模拟线性化器设计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 40-42. (Qin Zhifei. Research and design of millimeter-wave analog linearizer[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020: 40-42)
- [16] 邱诗浩. 基于HFSS的金属箱体屏蔽效能的研究[J]. *电子技术与软件工程*, 2017(8): 111. (Qiu Shihao. Research on shielding effectiveness of metalbox based on HFSS[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2017(8): 111)