

文章编号: 1001 - 893X(2011)02 - 0094 - 04

毫米波线性化固态功放的研制*

李 凯¹, 黄 建¹, 李 培²

(1. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036; 2. 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

摘 要: 研制了工作于 Ka 频段的 10 W 线性化固态功放。采用预失真技术的线性化单元主要由一个肖特基二极管和一个电容并联构成, 具有增益扩展和相位延迟的特性, 并且其增益和相位特性具有可调性。将其应用于工作频率为 30 GHz、输出功率为 10 W 的功放, 双音激励信号频率间隔为 5 MHz, 三阶互调(IMD3)可以改善 15 dBc。

关键词: 毫米波; 固态功放; 三阶互调; 预失真; 线性化器

中图分类号: TN802 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.02.019

Development of Linearizer for Millimeter-Wave Solid State Power Amplifier

LI Kai¹, HUANG Jian¹, LI Pei²

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China; 2. Institute of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A linearizer for 10 W Solid State Power Amplifier(SSPA) in Ka-band is developed. The millimeter-wave(MMW) predistortion linearizer, which is composed of a Schottky diode and a parallel capacitor, has gain expansion and phase shift characteristics, and its characteristics can be controlled. By applying this linearizer to a 30 GHz-power amplifier with 10 W output power, and using a two-tone prompting signal with 5 MHz spacing, the improvement of IMD3 is 15 dBc.

Key words: millimeter-wave(MMW); solid state power amplifier(SSPA); three order intermodulation; predistortion; linearizer

1 引 言

随着毫米波技术广泛应用于各种系统平台, 毫米波系统对大功率固态发射机的需求日益迫切。电子战、卫星通信、地面测控站等均需要高可靠性的大功率毫米波固态发射机, 其发射功率需求为几瓦至几百瓦不等。

作为毫米波发射系统的关键部件, 功率放大器对工作效率和输出线性度的要求也越来越高, 尤其是在航天测控、卫星通信等领域, 为达到较好的通信质量和测控精度, 对具有高线性度的毫米波固态功

放的需求越来越迫切。而目前毫米波固态功放自身的线性度通常不能满足系统要求, 需要采用相应的线性化技术来达到指标要求。

虽然在较低的频段, 如 L、S、C、X 等频段, 诸如预失真^[1]、负反馈^[2]、前馈^[3]等功放线性化技术应用已较为成熟, 但在毫米波频段, 国内对于大功率功放线性化技术的研究几乎没有。目前在毫米波频段最常用的线性化技术是功率回退法, 该方法原理简单、易于实现, 但线性度的提升范围有限, 同时也带来了成本上升、效率降低、功耗增大等缺点。

本文采用模拟预失真线性化技术, 在不降额使

* 收稿日期: 2010 - 09 - 05; 修回日期: 2010 - 12 - 06

用并满足功率需求的前提下,不仅可以达到通信测控系统对线性度指标的要求,与功率回退法相比,该技术在满足相同的指标前提下,可节约大量成本,并成倍降低功耗。

本文首先介绍了毫米波线性化固态功放的方案设计原理和研制过程,然后给出了仿真结果,最后给出了实验测试结果。

2 方案设计及工作原理

如图 1 所示,Ka 频段线性化固态功放主要由前端可调放大模块、线性化模块和末级功放单元三部分组成,各单元之间用波导连接。

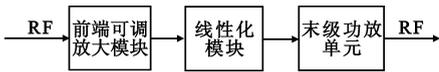


图 1 Ka 频段线性化固态功放设计框图
Fig.1 Block diagram of linearizer for solid state power amplifier in Ka-band

前端放大模块主要由可调增益放大器组成,可调增益放大器的作用是提供使线性化模块工作在最佳工作点的功率。在本项目中,可调增益放大器由一个固定增益放大器和一个电调衰减器组成。

线性化模块由非线性电路单元、射频输入输出匹配电路、调谐电路、直流馈电单元等组成。线性化模块用以补偿末级功放的非线性失真,提高功放的线性度。非线性电路单元产生的非线性特性与功放的非线性特性呈现相反的趋势,与功放级联后,可一定程度补偿功率放大器的非线性,如图 2 所示。加入线性化模块以后,可在一定范围内提高功放的线性度,三阶互调指标一般可提高 4~20 dBc。

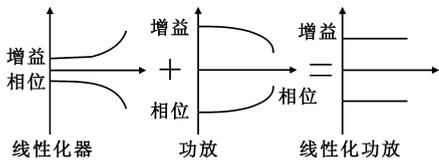


图 2 预失真技术的工作原理图
Fig.2 Schematic diagram of predistortion

末级功放由波导微带探针过渡、功率分配合成网络、末级功率放大器、直流馈电电路等几部分组成。在本项目中,线性化的主要目标是针对目前已经应用于通信测控等工程中的 Ka 频段 10 W 固态功放模块。

3 各级电路单元的研制

3.1 毫米波功放单元的研制

通过对毫米波大功率固态功放合成技术的研究,突破了微带与波导相结合的混合式合成网络的功率合成关键技术(如图 3),研制出了 Ka 频段的 5 W、10 W、20 W、50 W、200 W 等系列化毫米波固态功放,并已成功应用于航天测控、卫星通信等多个领域。

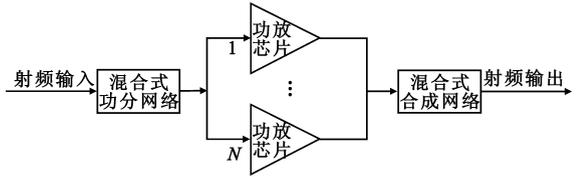


图 3 末级单元功率模块原理图
Fig.3 Schematic diagram of solid state power amplifier

3.2 线性化单元的研制

(1)末级功放单元的非线性参数测试

首先,需要得到末级功放单元的非线性特性参数。通过测试方法得到功放的输入功率-增益特性、输入功率-传输相移特性。

(2)毫米波固态功放非线性特性软件建模及优化

通过实验手段得到的一些功放非线性特性参数,在 ADS 中建立固态功放单元的大信号非线性仿真模型,可以对功放的实际情况进行模拟,这样就可以在软件仿真平台中将功放与预失真器一起协同仿真,从而得到相对比较准确的仿真结果。

(3)线性化单元设计

线性化单元的基本电路原理如图 4 所示。

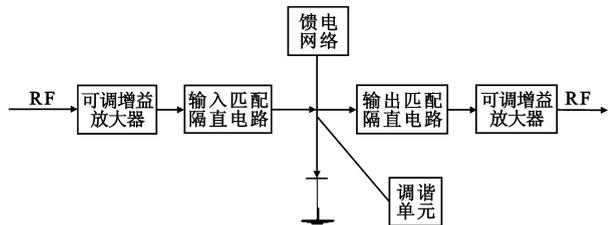
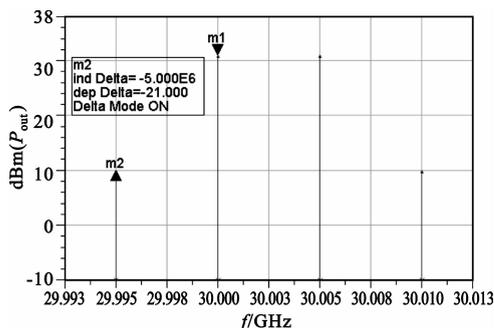


图 4 采用单个二极管并联的预失真器电路原理图
Fig.4 Schematic diagram of predistortion linearizer with a parallel Schottky diode

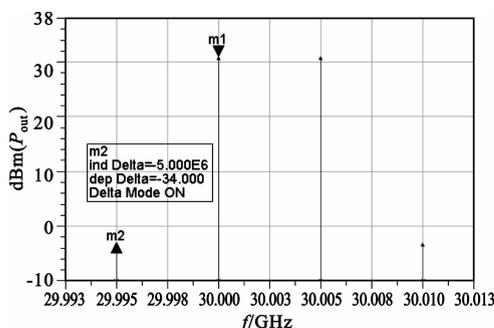
在软件中,建立二极管的理想模型,通过调节电路的偏置电压,可以改变增益扩展性能;通过调节二极管的并联电容,可以改变相位扩展性能^[4,5]。加入输入输出匹配电路可以使得整个预失真器的插损

减小,输入可调增益放大器可以使得二极管工作在最佳工作点上,输出可调增益放大器不仅可以使得输出功率满足指标要求,而且可以隔离末级功放反射回来的能量,保护二极管。通过调谐馈电电压和调试调谐单元,可以使得电路工作在最优。

经过第1和第2步,在ADS软件中将功放与整个线性化电路协同仿真。末级功放的三阶互调指标的仿真结果如图5所示。



(a)优化前



(b)优化后

图5 预失真电路与功放级联仿真结果
Fig.5 Simulated IMD3 of linearizer for solid state power amplifier

3.3 前端可调放大模块的研制

前端可调放大模块主要由电调衰减器和固定增益放大器组成(如图6所示),可以满足整机的增益指标要求、电调控制整机系统的增益,并可使得线性化单元工作在最佳工作点上。

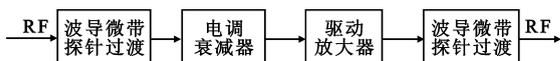


图6 前端可调放大模块设计框图
Fig.6 Block diagram of driving amplifier

研制出的10 W Ka频段线性化固态功放的实物如图7所示。

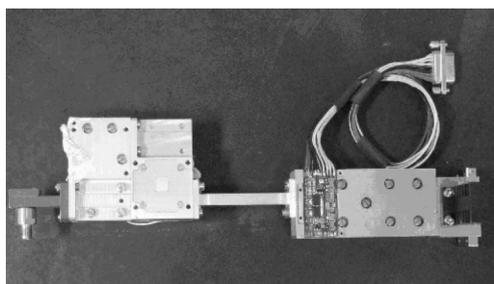


图7 Ka频段10W线性化固态功放实物照片
Fig.7 Photo of linearizer for 10 W solid state power amplifier in Ka-band

4 试验情况

图8为毫米波线性化固态功放测试系统框图。如图所示,双音信号由2个信号源(频率间隔为5 MHz的点频信号)同时馈入等功率合路器,然后经由放大驱动模块进入线性化单元最终进入末级功放单元。输出信号经过一个双耦合器分别输出到功率计和频谱仪,可以分别对输出信号的频谱和功率进行监测。

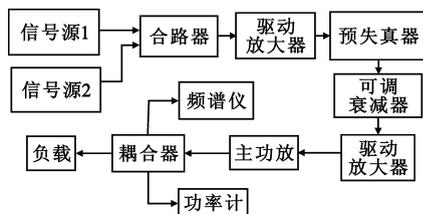


图8 线性化单元级联功放的整体测试系统框图
Fig.8 Block diagram of testing system

测试是在功放从1 dB压缩点回退3 dB,即输出功率为37 dBm时进行的。双音激励信号频率间隔为5 MHz,测试频段为29.5~30 GHz。

图9和图10分别给出了功放加入线性化单元前后的三阶互调(IMD3)指标比较。

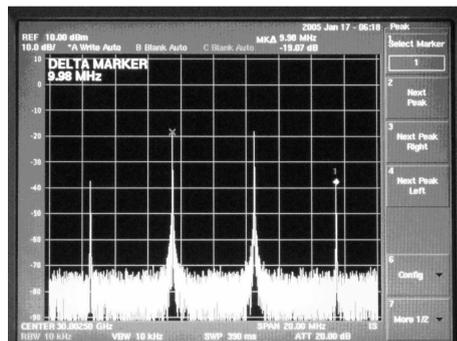


图9 功放未加线性化单元的三阶互调
Fig.9 Measured IMD3 without predistortion linearizer

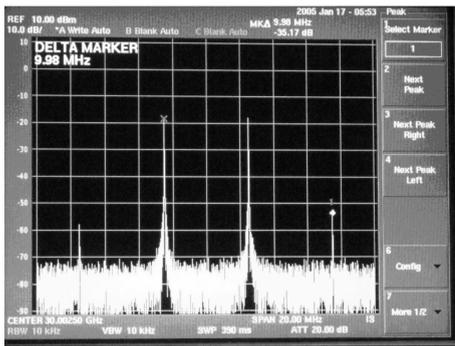


图10 功放加入线性化单元后的三阶互调
Fig.10 Measured IMD3 with predistortion linearizer

由测试结果可知,在工作频率为30 GHz时,未加线性化单元前,功放三阶互调为 -19 dBc;加入线性化单元后,功放三阶互调为 -35 dBc。因此,该线性化单元对Ka频段10 W功放的三阶互调改善了15 dBc以上。

最终,Ka频段10 W线性化固态功放原理样机主要技术指标测试结果如表1所示。

表1 Ka频段10 W线性化固态功放技术指标测试结果

Table 1 Measured results of linearizer for 10W solid state power amplifier in Ka-band

测试项目	指标要求	实测值
工作频段/GHz	29.5 ~ 30	29.5 ~ 30
工作方式	连续波工作	连续波工作
输出功率 (P_{-1dB})/dBm	≥ 40	≥ 40.4
线性增益/dB	≥ 40	≥ 47.5
增益平坦度	≤ 2 dB p-p/ (全频段)	1.1 dB p-p/ (全频段)
三阶互调/dBc	≤ -29 (全频段, 总输出功率 37 dBm)	≤ -33 (全频段, 总输出功率 37 dBm)
输入、输出 驻波比	≤ 1.5	≤ 1.35
功耗/W	≤ 100	≤ 94

5 结论

本文针对Ka频段10 W固态功放的非线性进行了研究,采用模拟预失真技术,具有稳定性好、成本低、实用性广等优点,突破了毫米波预失真电路设计的关键技术;在国内首次完成了Ka频段线性化大功率固态功放原理样机研制,对功放的三阶互调指标可以改善15 dBc,验证了本方案切实可行;已为多家单位配套小批量生产20余套产品,其市场前景广阔。

在工程应用中,功放的实际工作状态复杂多变,

需要大量的调试工作使得线性化单元与功放实现良好匹配。因此,具有自适应性能的线性化技术将是一个重要的研究方向。

参考文献:

- [1] Jeng-Han Tsai, Tian-Wei Huang. A Novel SiGe BiCMOS Variable-Gain Active Predistorter Using Current Steering Topologies[C]//Proceedings of IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Forth Worth, TX: IEEE, 2004: 559 - 562.
- [2] Jose Carlos Pedro, Jorge Perez. An MMIC Linearized Amplifier Using Active Feedback[C]//Proceedings of IEEE MTT - S International Microwave Symposium Digest. Atlanta, CA, USA: IEEE, 1993: 95 - 98.
- [3] Hickson M T, Paul D K, Gardner P, et al. High Efficiency Feedforward Linearizers[C]//Proceedings of the 24th European Microwave Conference. Cannes, France: IEEE, 1994: 819 - 824.
- [4] Kazuhisa Yamauchi, Kazutomi Mori, Masatoshi Nakayama, et al. A Microwave Miniaturized Linearizer Using A Parallel Diode[C]//Proceedings of IEEE MTT - S International Microwave Symposium Digest. Denver, CO, USA: IEEE, 1997: 1199 - 1202.
- [5] Kazuhisa Yamauchi, Masatoshi Nakayama, Yukio Ikeda, et al. An 18 GHz-Band MMIC Linearizer Using A Parallel Diode with A Bias Feed Resistance and A Parallel Capacitor[C]//Proceedings of IEEE MTT - S International Microwave Symposium Digest. Boston, MA, USA: IEEE, 2000: 1507 - 1510.

作者简介:

李凯(1982-),男,四川内江人,分别于2005年和2008年获学士学位和硕士学位,现为助理工程师,主要从事功率放大器、微波毫米波电路等方面的研究;

LI Kai was born in Neijiang, Sichuan Province, in 1982. He received the B.S. degree and the M.S. degree from University of Electronic Science and Technology of China(UESTC) in 2005 and 2008, respectively. He is now an assistant engineer. His research interests include power amplifier and millimeter-wave circuit research.

Email: likaizi@163.com

黄建(1971-),男,四川邻水人,研究员级高级工程师,主要从事毫米波技术等方面的研究;

HUANG Jian was born in Lingshui, Sichuan Province, in 1971. He received the B.S. degree and the M.S. degree from UESTC in 1993 and 1996, respectively. He is now a senior engineer of professor. His research concerns millimeter-wave technology.

李培(1984-),男,河南南阳人,分别于2007年和2010年获学士学位和硕士学位,主要从事电磁场与微波技术等方面的研究。

LI Pei was born in Nanyang, Henan Province, in 1984. He received the B.S. degree and the M.S. degree from UESTC in 2007 and 2010, respectively. His research interests include electromagnetic field and microwave-wave technology.