

文章编号:1001-893X(2012)04-0600-04

毫米波固态功放的现状与展望^{*}

朱海帆

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:毫米波高功率功放是毫米波系统发射信道中的核心设备,固态功放因其高可靠性等优点将逐步取代传统的行波管功放。总结了毫米波固态功放的国内外研究现状;针对毫米波功率合成、固态功放线性化等关键技术,分析了不同技术途径的各自特点,并总结出一些具有实用价值的技术方法;最后指出了毫米波固态功放技术今后的重点研究方向。

关键词:毫米波;固态功放;功率合成;自适应线性化;预失真

中图分类号:TN72 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.04.036

Current Status and Expectation of Millimeter-wave Solid-state Power Amplifiers

ZHU Hai-fan

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: As the core equipment of millimeter-wave (MMW) system TX channels, solid-state power amplifier (PA) has been gradually replacing traditional Traveling-wave Tube (TWT) PA due to its superiorities including high reliability. This paper introduces the domestic and foreign development of MMW solid-state PA researches. Aiming at some key techniques such as power-combining, solid-state PA linearization etc., it analyses each feature of distinct technical approaches and summarizes some practical technical methods. The key directions of the future work are also investigated.

Key words: millimeter-wave (MMW); solid-state power amplifier; power-combining; adaptive linearization; predistortion

1 引言

随着技术的日益发展,目前测控、通信、雷达及电子对抗系统的工作频率已上移至毫米波频段。位于发射信道末端的高功率功放对系统性能至关重要,对系统的测控精度、通信质量、作用半径、抗干扰能力等方面有决定性影响。

由于毫米波固态功率器件的输出功率有限,长久以来,都是采用行波管 (Traveling-wave Tube, TWT) 等电真空放大器获取高功率输出。随着半导体工艺水平的不断提高,采用 GaAs 材料工艺的毫米

波功率器件的输出功率得以大幅提升,而通过功率合成技术^[1]可将多个功率器件的输出功率叠加,突破单个功率器件输出不足的限制。在以上技术基础之上,目前毫米波固态功放技术发展迅速,输出功率已可达到行波管功放的水平。

相比行波管放大器,固态功放在工作电压、可靠性及环境适应性等方面都有明显的优势,在系统应用中受到更多的青睐。

2 毫米波固态功放研究现状

毫米波频段是指波长介于 1~10 mm 的一段电磁

^{*} 收稿日期:2011-09-30;修回日期:2012-03-26

频谱,其应用频率主要集中在 Ka 频段(26 ~ 40 GHz)、U 频段(40 ~ 60 GHz)及 W 频段(70 ~ 110 GHz)。

在上述应用频段中,Ka 频段固态功放的发展尤为迅速,已广泛应用于通信、测控、雷达及电子对抗多个领域。国外已形成成熟的产业链,多家商用公司均在开发固态功放产品,其代表为美国 Sophia 公司和加拿大 Advantech 公司,查阅公开产品资料得知,其连续波输出功率可达100 W,工作频率覆盖 25 ~ 31 GHz。从所掌握的技术资料推测,其军用装备系统中所使用的固态功放输出功率超过200 W。

在国内,目前已有多家科研机构推出了相应的 Ka 频段固态功放产品,输出功率一般在50 W以内,部分已正式投入工程应用。

在技术难度更大的百瓦级功放方面,国内也有所突破。文献[2]采用波导功率合成技术研制了工作频段为 35 ~ 35.4 GHz 的脉冲固态功放,输出功率可达100 W。中国西南电子技术研究所于 2010 年研制了 Ka 频段200 W连续波固态功放,工作频段为 27 ~ 31 GHz,输出功率可达250 W,填补了国内的相关技术空白,达到国外先进水平。

U 频段的固态功放主要用于军用卫星通信系统,如美国先进极高频(AEHF)卫星系统的上行链路工作频率为 43.5 ~ 45.5 GHz,其输出功率可达百瓦以上。

在波长极短的3 mm频段(如 W 频段),由于器件工艺的限制,以往多采用雪崩二极管注入锁定放大的方式获取高功率输出。但随着极高频功率器件的发展,W 频段的固态功放也取得了突破性的进展。2010 年 HRL 试验室研制的固态功率合成放大器输出功率可达5.2 W^[3]。

3 关键技术分析

3.1 功率合成技术

由于单个固态功率器件的输出功率不足,功率合成技术是目前研制毫米波高功率固态功放的唯一技术途径。

在毫米波频段,由于介质损耗导致平面合成电路的插损急剧上升,无法实现多路高效合成,因而在合成电路设计中一般大量采用低损耗的矩形波导或同轴腔体结构来提高合成效率。

目前毫米波频段功率合成的方式较多,各自特点不一而同,下面分别介绍并分析几种代表性的合

成方式。

(1)二进制式功率合成

由 2^n (n 为合成级数) 个功分/合成级联,构成合成网络,并将多个功率器件加以合成,是目前应用最多的一种合成方式。为降低损耗,通常先由波导与平面电路混合构成的合成网络将多个芯片合成于单个腔体之内,构成单元功率模块。再由低损耗的波导网络将多个功率模块再次合成,进一步扩展输出功率。这种合成原理简单,易于实现,在上百的合成路数下仍具有较高的合成效率和工作带宽。但随着合成级数的继续增加,引入的插损也随之增大,合成效率会逐步降低,其合成路数一般限制在 256 路以内。

(2)波导裂缝阵功率合成

利用裂缝阵将波导内部的传输功率等分耦合,经放大后同理合成于波导之内,可分为行波式^[4]或驻波式^[5]。理论上其合成路数不会影响合成效率,并可进行任意路数功率合成。其电路精度要求极高,不易加工,并且由于电路结构非中心对称,使其工作带宽会随合成路数增加而变窄,造成其合成规模有限。

(3)同轴波导功率合成

与上面提到的基于矩形波导的合成方式类似,同轴波导功率合成^[6]则是利用同样具有低损耗特性的同轴腔来完成功率合成,目前主要有径向波导合成^[7]与过模同轴波导合成^[8]两种方式。因其合成电路为并联方式,不会像二进制级联结构那样因为合成路数多而导致合成效率下降。由于同轴波导的工作主模是 TEM 模,没有截止频率的限制,其工作带宽可达倍频程以上,适合用于要求宽带输出的固态功放。但这类电路结构无法消除各路中有源器件的驻波和不一致性对合成效率的影响,电路结构决定其散热困难,对加工工艺要求也较高,通常有源指标与理论设计值有较大差距。

对比以上几种合成技术的特点可以发现,二进制式功率合成原理简单,可行性高,合成电路的综合性指标良好,具有较高的工程实用价值。

3.2 毫米波功放线性化技术

在航天测控、卫星通信等应用领域中,除了要求高功率输出外,还要求功放有良好的线性度。而目前毫米波固态功率器件自身的线性度通常不能满足系统要求,尤其是三阶互调指标差距较大,需要采用线性化技术来优化其指标。

常用的线性化技术方案有预失真、负反馈、前馈法等几种方式,这些方法在诸如移动通信等工作频率较低的微波信道设计中均有成熟应用。但在毫米波频段中,负反馈法和前馈法的电路过于复杂,精度难以保证,有源器件的性能也有所欠缺,使其应用受到限制。而预失真法由于电路原理简单,对有源器件的要求也相对较低,因而比较常见地应用到 Ka 及以上频段,在改善三阶互调的效果上,也能达到更好的效果。

文献[9]根据有源 RC 网络设计方法,用 FET 设计了一种预失真器,用于工作带宽为 27 ~ 30 GHz 的毫米波功放,三阶互调可改善 8.6 dB。

文献[10]中采用基于单管并联二极管的射频预失真器,研制了 Ka 频段的线性化固态功放(图 1),其三阶互调优化幅度达到 15 dBc,并已投入工程使用。

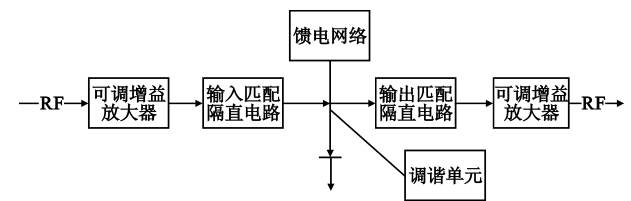


图 1 采用单个二极管并联的预失真器电路原理图
Fig.1 Schematic diagram of predistortion linearizer using a parallel Schottky diode

基于微波二极管的射频预失真器可直接工作于毫米波频段,并且线性度优化效果明显,是目前在毫米波频段可行的一种线性化方法。

4 发展趋势展望

总的来看,固态功放技术将向着高效率、高线性度和极高频段(3 mm 频段及以上)应用几个方向发展,研究热点主要集中在以下几个方面。

(1)高效率固态功放

由于半导体工艺的限制,目前毫米波功放单片的效率偏低,使得高功率的毫米波固态功放整机功耗大,对配电和散热的要求较高,在一些特定平台的应用受到限制。

毫米波功放芯片的性能直接决定了固态功放的工作效率,因而从芯片材料生长和制作工艺上来提高单片功放的效率是最为直接的途径。目前所使用的砷化镓(GaAs PHEMT)功放芯片其最高效率可达 20%,而采用第三代半导体材料氮化镓(GaN HEMT)则具有更高的功率特性、更好的高频性能和低噪声

性能^[11]。

目前在毫米波器件方面,采用氮化镓工艺的 Ka 频段功放芯片输出功率最高达 11 W,效率最高可到 55%;工作于 W 频段的功放芯片输出功率达到 842 mW。在不远的将来,就将全面取代目前占主导地位的砷化镓功率器件,毫米波固态功放的效率也将随之大幅提升。

设计合理外围电路也是提高效率的一种技术途径,如包络跟踪技术^[12]和自适应可调匹配网络技术^[13]以及电流堆栈馈电技术^[14]均有较强的参考价值。

(2)自适应线性化技术

射频预失真技术目前成为优化毫米波固态功放线性度的主要技术途径,国内外在此方面都开展了研究,并取得一定成果。由于一些关键技术尚未突破,现阶段的毫米波预失真电路均为开环电路,在相对固定的条件下可较好地改善功放的线性度,但对变化较大的使用环境,如功率范围、工作频段及温度等方面适应性不强。

在现有的技术基础之上,如能精确提取功放的非线性参数,并反馈给自适应控制单元,结合检测控制电路的优化算法,闭环控制预失真器的工作状态,以自动适应多变的工作环境及使用条件,则可大幅提升线性化电路对功率、温度和载波参数的适应能力,提升功放的性能和系统的稳定性。

(3)空间功率合成

传统的二进制功率合成由于随着合成级数增加会导致合成效率下降,使得其合成数量会受到一定限制,一般不超过 256。而目前更高频段(如 W 频段)的功放单片输出功率极小,如要获取大功率输出,需要更大的合成规模。

空间功率合成是将有源部件的功率耦合到大直径(过模)的导行波束或波导模,利用截面积大的波束可以将许多器件集中在一个合成级。由于所有器件并联工作,损耗基本上与器件数无关,系统中的欧姆损耗最小,在海量功率器件合成和高频段应用中优点突出。

由于空间功率合成的物理模型复杂,设计制造困难,国内外均处于研究阶段,目前亦取得一定的突破。文献[15]和文献[16]介绍了利用透镜天线和有源阵面组成的空间功率合成系统,其合成数量分别为 512 和 272。国内则针对准光功率合成^[17]开展了研究,并取得了相应的研究成果^[18]。

随着 W 频段及更高频段的毫米波系统的发展,

发射信道将需求更高的输出功率,空间功率合成技术作为解决输出功率难题的主要途径,将受到更多的关注。

5 结 论

随着半导体工艺的提升和功率合成技术的发展,毫米波固态功放的输出功率已突破百瓦,行波管功放不再是毫米波高功率发射信道的唯一选择,固态功放相比行波功放有着多方面的技术优势,已成为毫米波高功放发展的主流趋势。

目前毫米波固态功放技术正处于高速发展时期,工程需求十分旺盛。本文结合国内外一些典型的产品,介绍了毫米波固态功放的研究现状,并分析了固态功放设计中的一些关键技术的特点,归纳出一些具有工程实用价值的技术途径,指出了毫米波固态功放将来发展的一些热点研究方向,希望对毫米波固态功放的设计研究起到一定的参考作用。

参考文献:

- [1] Chang K, Sun C. Millimeter-wave power-combining techniques[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 1983, 31(2): 91-107.
- [2] 徐建华, 蔡昱, 汪珍胜, 等. Ka 频段 100W 固态功率合成器[J]. 电子与封装, 2010, 10(9): 5-7.
XU Jian-hua, CAI Yu, WANG Zhen-sheng, et al. Ka-band 100W Solid Power Combiner[J]. Electronics & Packaging, 2010, 10(9): 5-7. (in Chinese)
- [3] Schellenberg J, Watkins E, Micovic M, et al. W-band, 5W solid-state power amplifier/combiner[C]//Proceedings of 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium on Digest. Anaheim, CA: IEEE, 2010: 240-243.
- [4] Jiang Xin, Ortiz S C, Mortazawi A, et al. A Ka band power amplifier based on the traveling wave power dividing/combining slotted waveguide circuit[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2004, 52(2): 633-639.
- [5] Jiang Xin, Liu Li, Ortiz S C. A Ka-band power amplifier based on a low-profile slotted-waveguide power-combining/dividing circuit[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2003, 51(1): 144-147.
- [6] Alexanian A, York R A. Broadband Waveguide-Based Spatial Combiner[C]//Proceedings of 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium on Digest. [S. l.]: IEEE, 1997: 1139-1142.
- [7] de Villiers D I L, van der Walt P W, Meyer P, et al. Design of a Ten-Way Conical Transmission Line Power Combiner[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2007, 55(2): 302-308.
- [8] Jia Pengchen, Chen Lee-Yin, Alexanian A, et al. Broad-band high-power amplifier using spatial power-combining technique[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2003, 51(12): 2469-2475.
- [9] Bai Dafu, Haigh D G. Derivation of Power Amplifier Predistortion Circuits by Frequency to Signal Amplitude Transformation[C]//Proceedings of 18th European Conference on Circuit Theory and Design. Seville: IEEE, 2007: 583-586.
- [10] 李凯, 黄建, 李培. 毫米波线性化固态功放的研制, 电讯技术, 2011, 51(2): 94-98.
LI Kai, HUANG Jian, LI Pei. Development of Linnarizer for Millimeter Wave Solid State Power Amplifier[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(2): 94-98. (in Chinese)
- [11] Mishra U K, Shen Likun, Kazior T E, et al. GaN-based RF power devices and amplifiers[J]. Proceedings of the IEEE, 2008, 96(2): 287-305.
- [12] Suebsombut P, Koch O, Chalemmwisutkul S, et al. Development of a GaN HEMT Class-AB Power Amplifier for an Envelope Tracking System at 2.45 GHz[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Elecommunications and Information Technology. Chaing Mai: IEEE, 2010: 561-565.
- [13] Draskovic D, Budimir D. Optically Reconfigurable Matching Networks. Microwave Photonics[C]//Proceedings of 2008 International Topical Meeting on Microwave Photonics - Jointly held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference. Gold Coast, Qld: IEEE, 2008: 135-137.
- [14] Pornpromlikit S, Jeong J. A 33-dBm 1.9-GHz Silicon-on-Insulator CMOS Stacked-FET Power Amplifier[C]//Proceedings of 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium on Digest. Boston, MA: IEEE, 2009: 533-536.
- [15] Deckman B, Deakin D S, Sovero E, et al. A 5-watt, 37-GHz monolithic grid amplifier[C]//Proceedings of 2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium on Digest. Boston, MA: IEEE, 2000: 805-808.
- [16] Sowers J J, Pritchard D J, White A E, et al. A 36-W V-band, solid-state source[C]//Proceedings of 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium on Digest. Anaheim, CA: IEEE, 1999: 235-238.
- [17] Mink J W. Quasi-optical power combining of solid-state millimeter-wave sources[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 1986, 34(2): 273-279.
- [18] Li Guang, Huang Jian, Pei Naichang. A Ka-Band Quasi-Optical Power-Divider Based On Talbot Effect of Phase Grating[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(6): 1331-1336.

作者简介:

朱海帆(1977—),男,四川成都人,2000年和2004年于电子科技大学分别获学士学位和硕士学位,现为工程师,主要从事毫米波固态功率放大器及功率合成技术等方面的研究。

ZHU Hai-fan was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1977. He received the B.S degree and the M.S. degree from the University of Electronic Science and Technology of China in 2000 and 2004, respectively. He is now an engineer. His research interests include millimeter-wave solid-state power amplifier and power-combining techniques.

Email: zhuhf10@yahoo.cn