

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005009

基于大功率扩频的功率放大器测试方法

邢荣欣¹ 王文娟¹ 黄英龙¹ 郭方金² 郭守君¹

(1. 中国电子技术标准化研究院 北京 100176; 2. 南京电子器件研究所 南京 210016)

摘要: 随着毫米波雷达在自动驾驶、机场异物探测等领域的应用,(92~96) GHz频段(W波段)功率放大器的性能评价备受关注。为解决该频段功率放大器的测试问题,给出了一种基于功放集成型大功率网分扩频的测试方案。该方案采用专用网分扩频模块,该模块具备网分扩频和信号功率放大两项功能,可实现在一套测量系统中完成全部功率参数和小信号S参数的测量。与传统测量方式相比较,具有系统集成度高、测量连接方式简单、测试效率高、测量重复性好等特点。通过试验验证,所提出方法可有效解决W频段功率放大器的测试任务,并显著提高功率放大器的测试效率。

关键词: (92~96) GHz;功率放大器;大功率扩频;测试

中图分类号: TB97 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.3

Test method of PA based on high-power frequency extender

Xing Rongxin¹ Wang Wenjuan¹ Huang Yinglong¹ Guo Fangjin² Guo Shoujun¹

(1. China Electronic Standardization Institute, Beijing 100176, China;

2. Nanjing Electronic Device Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the application of millimeter wave radar in auto pilot, FOD detection and other fields, the performance of (92~96) GHz (W-band) PA has attracted much attention. In order to solve the measurement of W-band PA, the paper presents a test scheme based on high-power frequency extender of VNA. Compared with other extenders, the high-power extender contains a build-in PA. The scheme can complete the measurement of all parameters in one measurement system. Compared with the traditional measurement of power parameters and small signal S parameters, it has the advantages of high system integration, simple measurement connection, one-time calibration to achieve all parameters measurement. It also can improve the repeatability of measurement. The paper presents the principle diagram of measurement setup, measurement procedure and some tips for measurement.

Keywords: (92~96) GHz; PA; high-power frequency extender; test

0 引言

随着半导体材料技术和半导体制造工艺水平的发展,以氮化镓(Gallium Nitride, GaN)、碳化硅、金刚石等为代表的第三代半导体材料应用越来越广泛。第三代半导体材料具有高击穿电场、高饱和电子速度、高热导率、高电子密度、高迁移率等特点,成为制造大功率密度、抗辐照、耐高温微波放大器的重要半导体材料^[1]。

功率放大器是一种重要的微波元器件,为信号提供放大和阻抗匹配等,广泛应用于无线通信、导航制导、电子对抗、遥感遥测等领域。功率放大器性能指标的测试与评价备受关注,尤其是对毫米波频段的功率放大器,提出了高增益、高线性度和高输出功率等要求。(92~

96) GHz毫米波放大器,主要用于制导、机场跑道异物检测等领域,其性能指标的精确测量是其评价和应用的基础^[2-3],其主要技术参数功包括小信号S参数和功率参数两大类。目前,国内外相关机构对(92~96) GHz功率放大器指标测试普遍采用的方式是:矢网及扩频模块测量小信号S参数、信号源及扩频、频谱仪及扩频、功率计等测量功率参数。这种测试方式存在测试设备多、测试连接次数多、需多次进行校准等问题,降低了测试效率和测试结果一致性。

本文提出了一种大功率矢网扩频进行(92~96) GHz功放参数测量的方法。该方法可在一套测试装置上完成全部参数测试,简化了测试流程、降低了连线复杂度、减少了系统校准次数,提高了测试效率和测试准确度^[4-6]。

收稿日期:2020-08-28

• 184 •

1 主要技术参数

3 mm GaN 功率放大器的主要技术参数包括:工作频带、线性功率增益及平坦度、大功率增益增益及平坦度、输入电压驻波比、饱和输出功率、1 dB 压缩点输出功率、杂波抑制度、功率附件效率、噪声系数等^[7-11]。主要技术指标及参数范围如表 1 所示。

表 1 (92~96)GHz 功率放大器技术指标

符号	参数	测试条件	典型值
工作频率范围/GHz	f		92~96
小信号增益/dB	$Gain$		13
小信号增益平坦度/dB	$\Delta Gain$		0.5
输入电压驻波比	V_{SWR}_i	$V_d = 15 \text{ V}$,	1.3
功率增益/dB	G_P	$I_{dq} = 0.6 \text{ A}$,	10
功率增益平坦度/dB	ΔG_P	$f: 92 \sim 96 \text{ GHz}$	0.6
1 dB 压缩输出功率/dBm	$P_{O(1dB)}$		30
杂波抑制度/dB	P_{out}		-45
功率附加效率/%	PAE		15

由于(92~96) GHz 高于目前网络分析仪、频谱分析仪等主机的测量频率范围,因此对于(92~96) GHz 功率放大器的参数测试,需要通过扩频系统进行上下变频才能用仪表进行测试测量。

根据被测器件的功率增益和 1 dB 压缩输出功率的技术

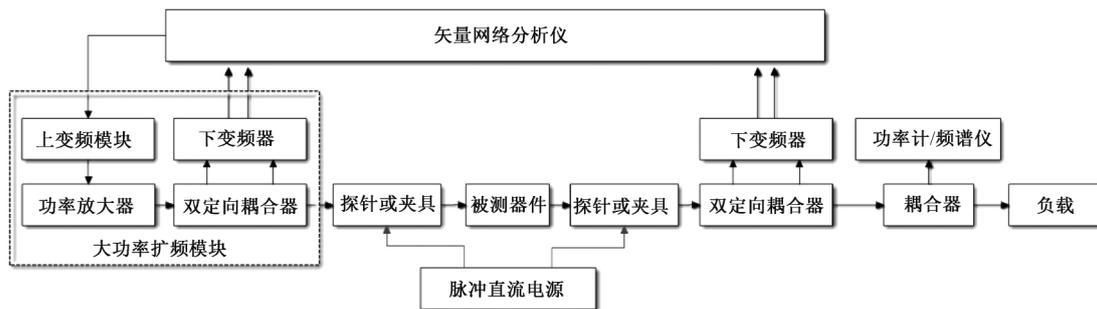


图 1 (92~96) GHz 功放测试装置

系统中大功率扩频模块可以是定制型的功放集成型网络分析仪扩频模块,也可以用分立模块实现大功率网络分析仪扩频的功能。

测试系统的基本原理是:矢量网络分析仪输出测试信号经上变频或倍频变换到 W 频段;变频模块的输出信号经功率放大器,得到大功率的 W 波段微波信号;经功率放大器放大的大功率信号经双定向耦合器,通过夹具或者探针与被测器件的微波输入端相连接,为被测器件提供激励信号;同时,被测器件前的双定向耦合器,将被测器件输入端的输入功率和反射功率以一定比例耦合至耦合输出端,经下变频器后,分别连接到网络分析仪源端的参考接收机和

指标,进行 1 dB 压缩输出功率参数测试时要求被测器件输入功率 ≥ 20 dBm。目前,覆盖(92~96) GHz 频段内的商品化网络分析仪扩频模块,以高功率输出的 WR10VNAX 为例,其典型输出功率为 11 dBm;同频段的信号源扩频模块,以 WR10SGX 为例,其典型输出功率为 14 dBm。因此,利用商用仪表进行测试时需要配置测试频段范围内输出功率不小于 20 dBm 的功率放大器进行信号放大,同时输入端也要接入适合的衰减器,以解决被测器件输入功率和输出功率与通用网分不匹配的问题。导致小信号 S 参数测量和大信号功率参数测量之间需要重新连接仪表,不能共用同一套测试系统连接,增加了系统二次连接和重新校准对测试结果造成的不确定性,同时降低了测试效率。本文给出了一种基于功放集成型大功率网分扩频模块的测试方法,该方法一次连接和校准,即可完成全部参数的测量^[12-15]。

2 测试方法与装置搭建

2.1 测试装置与测试原理

根据各项参数的定义和仪器仪表的功能、性能,搭建如图 1 所示的(92~96)GHz 功放测试装置。该测试装置由矢量网络分析仪、大功率扩频模块、功率计、频谱分析仪、脉冲直流电源、终端负载、探针台或者测试夹具等测试仪器组成。与传统测量方式中采用信号源扩频、功率计、功率放大器测量功率参数,矢量网络分析仪测量小信号 S 参数相比,具有系统集成度高、测量连接简单、一次校准实现全部参数测量、测量重复性好等特点。

测量接收机输入端,通过对耦合器耦合度、变频器变频损耗的标定,就可以实现对被测器件输入端输入功率和反射功率的测量。

被测器件的输出信号经探针或者夹具,连接到双定向耦合器后,经耦合器连接到终端式负载;双定向耦合器的耦合输出信号经下变频器变换到中频,分别连接到网络分析仪测量端的参考接收机和测量接收机,通过耦合度和变频损耗等的标定,可实现功放输出功率和反射功率测量。

同时,负载前的耦合器可将耦合后的信号送至频谱分析仪或功率计,实现功率参数或杂散抑制等参数的测量。同时,频谱分析仪还可用于在调试、测试过程中观察是否

产生自激等情况。

在进行放大器参数测试前,应对测试系统进行功率参数和网络参数的校准,以消除放大器、耦合器、线缆、夹具等各部件差损、反射等对测量结果的影响。测试过程中,通过改变网络分析仪输出功率和/或放大器的增益,在被测器件输入端施加指定的功率;通过改变网络分析仪输出频率和/或上变频模块的变频系数,在被测器件输入端施加特定频率的激励信号;通过改变下变频器的变频系数,将器件测试频率下变频到矢量网络分析仪接收机能够测量的中频范围内,实现网络分析仪对被测器件输入、输出端入射和反射功率的测量,进而完成特定参数的测量。

2.2 测试装置搭建与测试装置关键技术

根据上述测试装置原理,搭建了基于大功率扩频的毫米波功放测试装置,如图 2 所示。

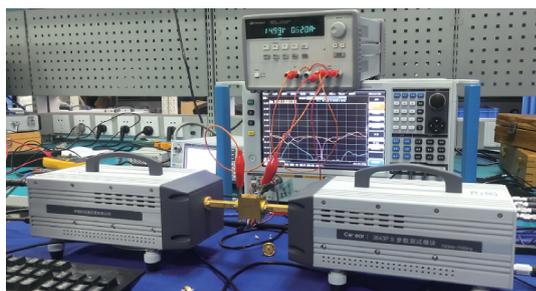


图 2 基于大功率扩频器的功放测试装置

该装置可在 90~100 GHz 频段内,实现大功率增益、1 dB 压缩输出功率、饱和输出功率等参数的扫描,比传统测试方式测试时间降低了数倍。

该测试装置的关键技术在于将功率放大器集成到网分扩频模块中,原理如图 3 所示。该方案大大提高了网络分析仪的测试功率,满足了 W 频段放大器功率参数的测试要求,将小信号 S 参数和功率参数测试在同一台设备中进行测量,提高了测试效率和测试准确度。

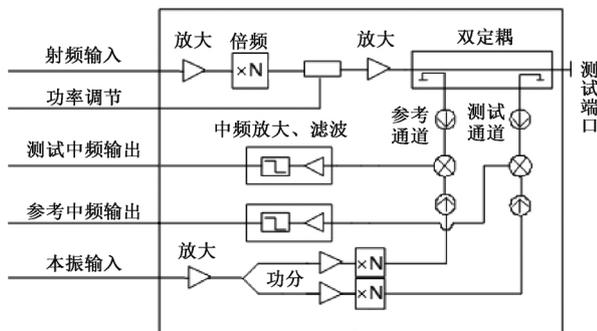


图 3 大功率网分扩频器原理

2.3 参数测试方法

以下分别对各种参数的测试方法进行说明。

1) 工作频率范围测试

工作频率是指工作在线性区内功率放大器,当改变工

作频率导致线性增益下降 3 dB 对应的高低频率点即为功率放大器的工作频率范围,如图 4 所示。其中 f_L 对应的是下限频率, f_H 对应的是上限频率。

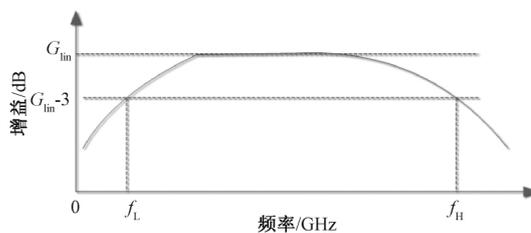


图 4 工作频带示意图

进行工作频率测试时,利用扩频后网络分析仪进行功率放大器线性增益参数的测量,通过频率扫描找到线性增益下降 3 dB 对应的上限和下限频率,下限频率和上限频率之间的频率宽度即为被测功率放大器的工作频率范围。

2) 小信号增益测试

小信号增益是指在放大器在规定或约定小信号激励下的增益。

进行小信号增益参数测试时,将网分的输出信号设定到规定或约定的幅值下,在工作频率范围内利用网分进行增益参数的测量作为小信号增益测试值,并记录此时的输入功率值。

3) 小信号增益平坦度测试

小信号增益平坦度是指在工作频带范围内,小信号增益参数的波动性,如图 5 所示。

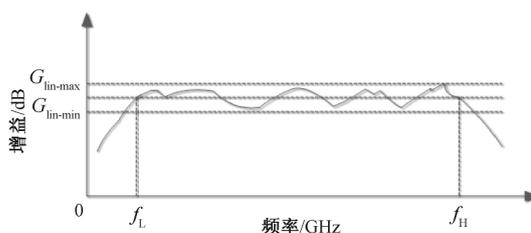


图 5 线性增益平坦度示意图

测试时,在线性增益对应的输入功率下,扫描工作频带宽度内的增益曲线,根据式(1)计算线性增益平坦度测试值。

$$\Delta Gain = (Gain_{max} - Gain_{min}) / 2 \quad (1)$$

式中: $\Delta Gain$ 为小信号增益平坦度; $Gain_{max}$ 为在规定的输入功率下和规定的频率范围内所测得小信号增益的最大值, dB; $Gain_{min}$ 为在规定的输入功率下和规定的频率范围内所测得小信号增益的最小值, dB。

4) 输入电压驻波比测试

输入电压驻波比是指被测器件输入端的驻波波腹电压与波谷电压幅度之比,该参数是衡量器件输入阻抗匹配的重要参数。

进行输入电压驻波比测试时,在规定功率、频率范围内,利用网络分析仪测量被测器件的 S11 参数,并将测量

参数的显示设置为 VSWR 方式,即可得到输入电压驻波比的测量值。

5) 饱和输出功率测试

饱和输出功率是指不断增大器件的输入功率,直至输出功率不随输入功率的增加而增加时,功率放大器的输出功率,如图 6 所示。饱和输出功率是衡量一个放大器最大输出功率的重要参数。

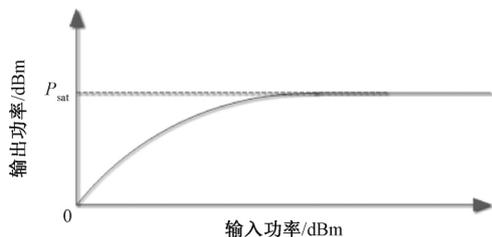


图 6 饱和输出功率示意图

进行饱和输出功率测试时,利用网络分析仪输出功率调节和扩频模块增益调节,不断增大被测器件的输入功率,同时利用功率计监测输出功率。当输出功率不再随输入功率的增加而变化时,测得的输出功率值即为饱和输出功率。

6) 1 dB 压缩输出功率测试

1 dB 压缩输出功率是指工作在线性区的放大器,当输入功率不断增加时,输出功率也会随之增加。当工作区域到达非线性区后,功率放大器的增益将随着输入功率的增加而减小。当功放增益减小到比线性增益小 1 dB 时,对应的输出功率即为 1 dB 压缩输出功率,如图 7 所示。1 dB 压缩输出功率是衡量一个放大器工作线性区的重要参数。

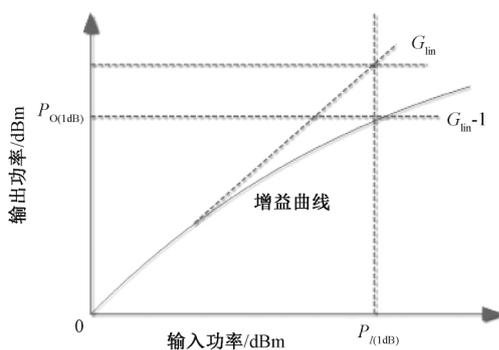


图 7 1 dB 压缩输出功率示意图

1 dB 压缩输出功率的测试与饱和输出功率测试基本相同,区别是 1 dB 压缩点输出功率对应的是增益下降 1 dB 处的输出功率。

7) 功率增益测试

功率增益是指在放大器工作频段内,增益未发生压缩条件下的增益。与小信号增益不同,功率增益一般在大功率下的增益值。

进行功率增益参数测试时,应在不断增大输入功率下

进行增益参数扫描,以增益未发生压缩的最大输入功率下的增益值作为功率增益测试值,并记录此时的输入功率值。

8) 功率增益平坦度测试

功率增益平坦度是指在工作频段范围内,功率增益参数的波动性。

功率增益平坦度的测试与计算,与小信号增益平坦度基本相同,差别在于输入功率的不同。功率增益平坦度是在未发生压缩的最大输入功率下测得的。

9) 功率附加效率测试

功率附加效率是指射频输出功率与耗散的直流功率之比,是衡量功率放大器能效的重要参数。功率附加效率计算如式(2)所示。

$$PEA = \frac{q(10^{P_o/10} - 10^{P_i/10})/1000}{|VI|} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_o 为被测放大器的输出功率, dBm; P_i 为被测放大器的输入功率, dBm; q 为占空比,对于连续波,占空比为 1; V 为峰值电压,由电源提供给放大器, V; I 为峰值电流,由电源提供给放大器, A。

进行功率附加效率测试时,在规定功率、频率范围内,利用脉冲信号源测量施加到被测器件的直流电压和电流,利用网络分析仪和功率计分别测量被测器件的输入、输出功率。根据式(2)即可计算规定条件下功率附加效率值。

10) 输出杂波抑制比测试

输出杂波抑制比是指在规定输入(或输出功率)、频率下,功率放大器输出信号功率与杂波信号功率之比,输出杂波抑制比如式(3)所示。

$$R_{SP} = P_o - P_{SP} \quad (3)$$

式中: R_{SP} 为杂波抑制比, dB; P_o 为功放输出信号的基波功率值, dBm; P_{SP} 为功放输出信号最大杂波(不包括谐波)功率, dBm。

进行输出杂波抑制比测试时,将大功率网络分析仪扩频模块作为被测器件的输入激励信号,通过调节网络分析仪输出功率或扩频模块功率放大器增益,将输入信号调整到规定频率、输入功率(或输出功率)。利用频谱分析仪进行输出信号的测量,设置频谱分析仪的频率跨度、分辨率带宽、参考电平参数到适合的数值,保证基波信号完整显示在频谱分析仪上,改变频谱分析仪的频率跨度、分辨率带宽等,利用频谱分析仪分别读取最大杂散幅度 P_{SP} 、基波幅度 P_o 。利用式(3)即可得到输出杂波抑制比的测试值。

3 测试中需要注意的问题

利用大功率扩频方法进行(92~96) GHz 功率放大器参数测试时,为了防止设备、器件烧毁或对测试数据造成影响,需重点注意以下问题。

1) 各仪器仪表均应接地良好,操作者须佩戴静电手环等。

2) 参数设置前,应根据测试系统中各设备、部件等的增益、插损和耦合度等参数,设置网络分析仪输出功率、功放增益等,以保证被测器件及测试系统中各仪器设备、部件、探针等不会产生过载现象。必要时,可配置衰减器等部件。

3) 按被测器件手册要求,对被测器件顺序施加规定的栅极、漏极偏置电压;如手册没有特殊要求,只加漏极脉冲信号。参数具体需要在连续波下或者脉冲下测试,以及脉冲宽度的要求需根据器件手册确定。在脉冲测试条件下,矢量网络分析仪、频谱分析仪、功率计等测量窗口应包含在漏极脉冲之内,且处于漏极脉冲中间位置。

4) 测试过程中如出现自激等异常现象,应先消除自激后,再进行测试。

5) 测试时,应详细记录相关参数设置条件,如偏置条件、工作频率、输入功率、环境条件等信息,以保证测试结果的复现性。

4 结 论

本文给出了一种基于大功率扩频的(92~96) GHz 功率放大器测试方法,给出了参数的测量方法和测量注意事项。该方法特点是将 3 mm 扩频与功率放大相结合,利用网络分析仪即可完成小信号增益及平坦度、功率增益及平坦度、饱和功率、功率附加效率等参数的扫描测量。与传统测试方式相比,测试效率可提高数倍。同时,配合频谱分析仪及扩频模块等设备可完成杂波抑制参数等的测量。对于相关器件的测试和测试系统的搭建具有一定参考价值。该系统也存在一定局限性,即输出功率可调范围 ≤ 22 dB,对于输入动态范围大的被测器件,无法满足同时测量小信号 S 参数和饱和功率参数的要求。如何提高系统的输出功率调节范围,是下一步系统优化的重点。

参考文献

[1] 王利斌. 一种基于 GaN 的宽带功率放大器的设计与分析[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 96-99.

- [2] 牧凯军,张振伟,张存林. 太赫兹科学与技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 6(3): 221-230.
- [3] 郭方金, 王维波, 陈忠飞, 等. 太赫兹固态放大器研究进展[J]. 电子技术应用, 2019, 45(8): 19-25.
- [4] 申伯纯, 周进. 一种高增益级联微波放大器设计与实现[J]. 电子测量技术, 2019, 42(8): 28-31.
- [5] 张翠翠, 王益, 王建忠. 一种新的基于特征值法的六端口自校准方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 40-47.
- [6] 李世伟, 韩军, 杨作成. 基于数字预失真技术的功放线性化方法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 15(3): 56-62.
- [7] 金智, 苏永波, 张毕禅, 等. InP 基三端太赫兹固态电子器件和电路发展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1): 43-49.
- [8] 陆宇. 3 mm 波 MMIC 功率放大器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [9] 李玥. 功放自动测试系统的组建[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(5): 45-47.
- [10] 沈林泽. 基于 GaN HEMT 的宽带线性功率放大器[J]. 半导体技术, 2020, 45(3): 195-199, 235.
- [11] 黄志芳, 罗宏伟. 基于频谱仪和矢网的混频器变频损耗测量技术[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 85-87.
- [12] 王尊峰. 微波放大器输出端热态网络参数测量方法研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5): 189-192.
- [13] FUNG A. Gallium nitride amplifiers beyond W-band[C]. 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Anaheim, CA, 2018: 150-153.
- [14] 王兵. GaN 基高效率功率放大器的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [15] 叶川. GaN HEMT 非线性模型和微波功率放大器设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

作者简介

邢荣欣, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为固态微波元器件测试及测量仪表校准。

E-mail: 15901519692@139.com