

# 微波功率放大器 AM-PM 转移系数测试方法研究<sup>①</sup>

李新雷,张进仓,秦臻,高妍,林卓,张琳

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

**摘要:**针对星载微波功率放大器 AM-PM 转移系数指标缺乏考核方法的问题,文章根据多载波非线性工作原理,通过输入放大器双载波信号、调整输入信号幅度变化、分析输出信号相位变化情况的测试方法,设计了通过矢网进行测试的方案。根据方案所搭建的测试系统,完成了放大器的测试验证,测试精度可达 0.1(deg/dB)。研究结果表明,文章给出的这种 AM-PM 转移系数测试方法,是有效、可行、实用的,为全面评估国产化星载微波功率放大器提供了具体的测试方法。

**关键词:**放大器;AM-PM;转移系数;测试

**中图分类号:** V474 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7135(2019)02-0001-04

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-7135.2019.02.001

## Study on Test of AM-PM Transfer Coefficient of Spatial Microwave Amplifier

LI Xinlei, ZHANG Jincang, QIN Zhen, GAO Yan, LIN Zhuo, ZHANG Lin

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the spaceborne microwave power amplifier AM-PM transfer coefficient index lacks the assessment method, this paper is based on the principle of multicarrier nonlinear operation. By adjusting the amplitude of the input dual-carrier signal, analysis of the change of the output signal phase, based on this method it designed the scheme for testing through the vector network analyzer. According to the test system built by the scheme, the test verification of the amplifier is completed. Test accuracy up to 0.1(deg/dB). The research results show that the AM-PM transfer coefficient test method given in the paper is effective, feasible and practical, and it provides a specific test method for comprehensive evaluation of localized spaceborne microwave power amplifiers.

**Key words:** Amplifier; AM-PM; Transfer coefficient; Test

### 0 引言

微波功率放大器在航天器中被广泛应用,但其功能复杂,是航天器微波有源产品中很有代表性的一类产品。它不仅能够完成微波信号的功率放大,同时还可以具备控制增益、相位等功能。目前的星载微波功率放大器主要有两类:一类是固态功率放大器(SSPA),另一类是行波管放大器(TWTA)。这两类放大器在卫星中均有应用,常用于通信卫星转

发器,导航卫星、中继卫星、遥感卫星高速数据传输系统及微波遥感器等系统中,是星载有效载荷系统中的一类关键设备<sup>[1,2]</sup>。

国外在星载微波功率放大器设计、制造、测试方面已经比较全面和成熟,但是,针对多载波工作时的非线性参数、调幅调相转移系数(AM-PM 转移系数)的理论研究和测试方法所公开发表的论文等资料较少。随着国产化放大器的全面应用,对于放大器性

<sup>①</sup> 收稿日期:2018-08-01;修回日期:2018-12-13。

作者简介:李新雷(1984—),高级工程师,主要研究方向为卫星、飞船单机产品的测试工艺研究。

E-mail:lixinlei321@163.com

能的全面掌握,也是设计人员的实际需求,这就需要对放大器进行全面测试。对于像 AM-PM 转移系数这类参数的测试,国外公开发表的相关文章内容很少,更无详细的测试方法描述。而国内目前可查阅的资料,多集中在非线性参数等指标上,对于 AM-PM 转移系数测试方法的研究几乎无资料可查。文章也是针对目前的现状,对开展的研究做了较详细的描述性总结<sup>[3]</sup>。

## 1 AM-PM 转移系数测试原理

卫星在通信工作过程中,为获得良好的系统通信能力,提高系统工作效率,应使转发器分系统中的功率放大器工作在非线性失真区,此时,放大器处于饱和点或接近于饱和点状态。转发器信号在非线性系统中工作时,由于非线性特性,其信号的幅度变化也会引起相位的变化和新的频率分量,对于双载波信号可用失真模型表示。

非调制激励信号分别为  $f_1$  和  $f_2$ ,使用表达式,输入信号可写为:

$$V_i = V_1 \cos(2\pi f_1 t) + V_2 \cos(2\pi f_2 t) \quad (1)$$

非线性器件的传输函数可用 1 个  $n$  阶幂级数表示:

$$V_0 = \alpha_0 + a_1 V_i + a_2 V_i^2 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k V_i^k \quad (2)$$

将输入信号代入非线性器件传输函数,就可得到  $V_0$  的谱,输出谱中包括了失真产生的各阶谐波和互调产物<sup>[4]</sup>。图 1 所示为行波管放大器转移特性曲线<sup>[5]</sup>。

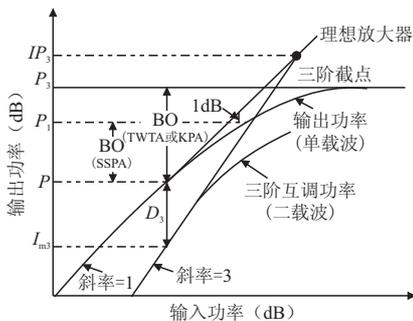


图 1 行波管放大器转移特性<sup>[5]</sup>

Fig. 1 TWTA transfer characteristic

图中,  $IP_3$  为三阶截点功率;  $P_s$  为单载波饱和功率;  $P_1$  为 1dB 压缩点输出功率;  $P$  是工作点功率;  $I_{m3}$  为三阶互调功率; BO 为输出回退; SSPA 为半导体固态放大器; TWTA 为行波管功率放大器; KPA 为速调

管功率放大器

在卫星转发器通信工作过程中,通常情况下,转发器分系统可以同时多个载波进行放大,此时,转发器系统中的放大器会将 2 个或者多个载波同时放大。当其中一个输入载波信号的幅度发生变化时,会导致其他载波信号经过该放大器后,其相位产生变化,这种变化称为调幅调相转移 (AM-PM 转移系数),用系数  $K_t$  表示,单位为 (deg/dB),即:

$$\Delta\varphi_q = K_t \cdot (\Delta A_p / A_p) \quad (3)$$

其中,  $K_t$  定义为多个载波中载波  $p$  对于载波  $q$  的调幅调相转移系数;  $\Delta\varphi_q$  为被影响的载波  $q$  的相位变化;  $\Delta A_p / A_p$  为幅度为  $A_p$  的载波信号  $p$  的幅度变化  $\Delta A_p$ <sup>[1,6,7]</sup>。

## 2 AM-PM 转移系数测试方法

从图 1 的特性曲线中看出,进入非线性区,放大器失真现象更加严重。在测试 AM-PM 转移系数参数值时,所考量的放大器工作区间(在线性区至非线性区均会进行考量),转移系数数值也会有不同的变化情况,取过程中的最大值作为单机的考核数值<sup>[8]</sup>。

由以上测试定义、信号传输测试原理可知,进行 AM-PM 转移系数测试时,首先设置双载波输入信号。根据技术文件的具体要求设置双载波信号,其信号的幅度可以是幅度相等的双载波,也可以是由技术文件规定的相差一定功率的双载波;设置两个频率信号  $f_1$  和  $f_2$ ,设置载波  $f_1$  功率幅度不变,改变载波信号  $f_2$  的幅度,使用专用测试仪器分析载波  $f_1$  的相位变化情况。设计验证测试系统,其测试系统搭建情况如图 2 所示。

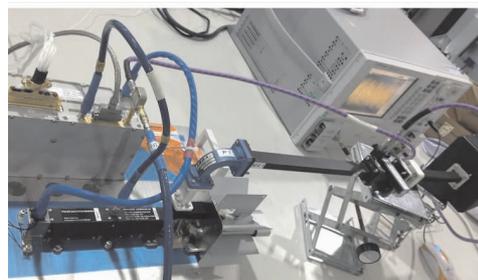


图 2 测试系统搭建

Fig. 2 The building of the test system

具体测试步骤如下:

(1) 根据测试原理设计测试系统,对测试系统进行校准;

- (2) 设置信号  $f_1$  由矢量网络分析仪内部输出, 作为其中一个激励信号, 其功率不变;
- (3) 从信号源输出激励信号  $f_2$ , 其功率可变;
- (4) 设置信号  $f_1, f_2$  为幅度相等的信号, 且保证两路信号的合成功率率为被测件饱和输入功率;
- (5) 将合成后的等幅双载波输入被测件, 确保被测件工作于饱和状态;
- (6) 调整信号源, 以改变信号  $f_2$  的功率幅度;
- (7) 将矢网测试参数设置为  $S_{21}$  状态, 选择 phase 测量参数, 使用矢网归一化功能观察和分析信号  $f_1$  的相位变化, 当信号  $f_2$  的功率变化 1dB 时,  $f_1$  的相位随幅度变化的变化量为 AM-PM 的转移系数;
- (8) 当测量不等幅度信号的 AM-PM 转移系数时, 其方法与等幅双载波测量方法一致, 测试步骤重复(4)~(8)。

测试流程框图如图 3 所示。在进行测试前, 根据系统的需求进行测试附件的检查准备, 测量诸如耦合器、电缆、合路器的插入损耗。在测试用的仪器附件准备完毕后, 进行系统的搭建, 待系统各通路正常工作后, 对系统进行校准, 比如, 对测量相位的矢量信号分析仪校准、对输入信号的标校等。校准完成后, 根据测试原理对被测件进行测量, 计算相位随功率变化情况, 得出 AM-PM 转移系数。

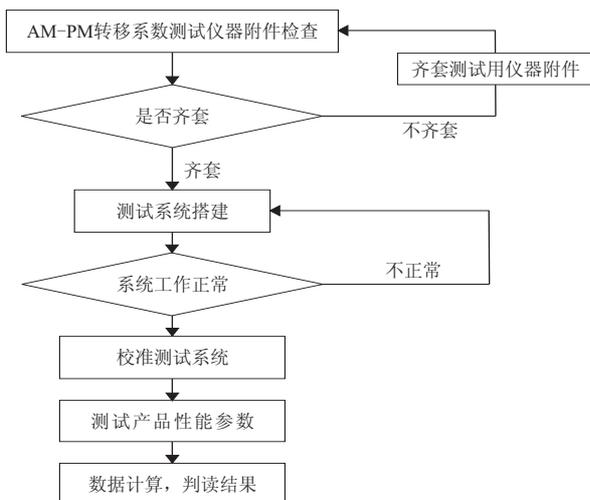


图 3 测试流程图  
Fig. 3 Test flow chart

### 3 AM-PM 转移系数测试验证

#### 3.1 测试验证情况

经过以上的原理分析, 课题组选取某型号备份

外购件进行系统搭建, 按照测试流程进行测试, 并对测试验证结果做出如下总结:

放大器在等幅双载波输入情况下, 其 AM-PM 转移系数要求小于  $3.5^\circ/\text{dB}$ , 在该电平输入情况下, 验证件原始记录最差值均小于  $1.5^\circ/\text{dB}$ , 使用本课题测量系统测量得到的测量结果, 其最差值小于  $1.8^\circ/\text{dB}$ , 测试结果如图 4 所示。图 5 为非等幅信号的情况下, 当幅度可变信号与被测信号相差 15dB 时, 使用本课题测量系统对验证件测量的实测结果。图 6 为该验证件提供的原始测试曲线。

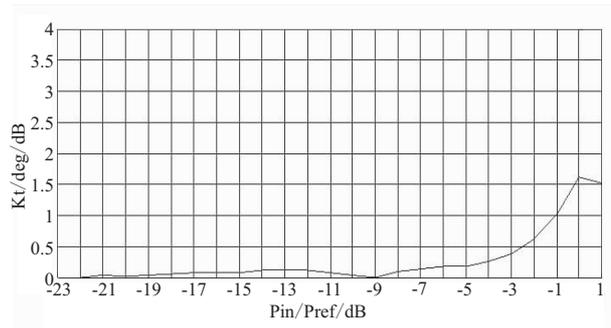


图 4 双载波测试结果  
Fig. 4 Dual carrier test result

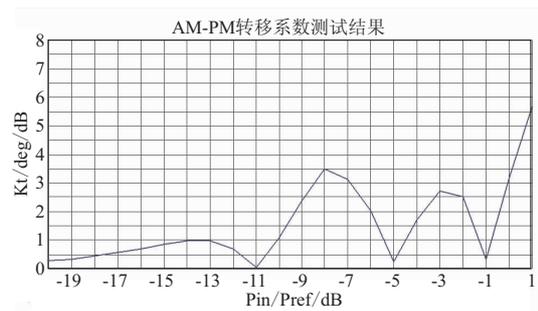


图 5 双载波相差 15dB 测试结果  
Fig. 5 Dual carrier difference 15dB test result

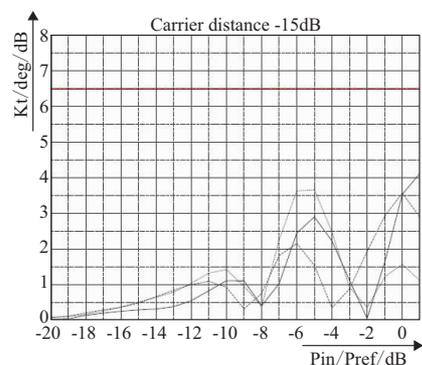


图 6 引进被测件测试数据  
Fig. 6 Outsourcing components test result

放大器在非等幅情况下, 其 AM-PM 转移系数要

求小于  $6.5^\circ/\text{dB}$ , 验证件原始曲线显示, 最差值均小于  $4.5^\circ/\text{dB}$ , 使用本课题测量系统测量得到的测量结果, 其最差值小于  $5.7^\circ/\text{dB}$ , 与验证件的非线性特性曲线趋势规律相吻合。

在图4的横坐标中, “0”为饱和点位置, 其余点为输入信号相对饱和点的变化情况; 纵坐标为转移系数值随输入功率的变化情况。

### 3.2 测试结果分析

从以上测试数据分析可以看出放大器具有以下特性:

(1) 放大器在小信号区可以近似认为是线性区, 其非线性失真相对于严重失真的饱和状态会小很多(由测量验证结果的曲线均可明显看出);

(2) 在等幅双载波输入情况下, AM-PM 转移系数小于非等幅双载波输入的 AM-PM 转移系数, 也就是说, 不等幅信号相互之间的影响大于等幅双载波相互之间的影响;

(3) 高幅度信号对于低幅度信号的影响要更大, 随着高幅度信号功率的降低, 影响也会逐渐降低。

测量结果都是存在误差的, 主要的误差来源来自测试仪器的测量误差, 同一台测量仪器, 在不同的温度、湿度及测量时间内, 测量的不确定度也不同; 仪器不同的参数设置和测量状态也会引入不同大小的测量误差。以此次验证件测量使用的矢量网络分析仪进行测量不确定度分析, 其结果趋势如图7所示。

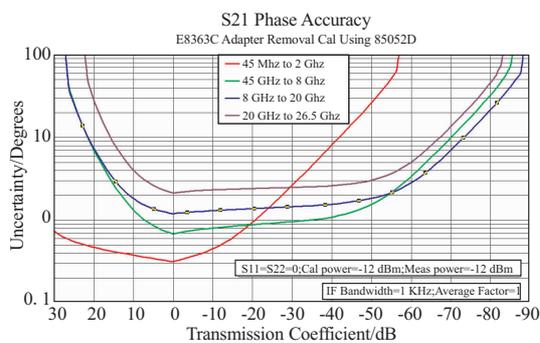


图7 测试仪器的测量不确定度

Fig. 7 Test instrument Measurement uncertainty

从图中可以看出, 测量参数相位的测量结果主要受到仪表型号、校准件的校准模型选择、测量系统的连接方式以及校准功率设置、不同的中频带宽设置、不同的测量结果处理(如平均、平滑等)等多方面因素的影响。为保持测试数据的一致性, 便于分

析被测件性能变化情况, 一般情况下, 测试仪器的参数设置应保持一致。

## 4 结论

文章从多载波信号工作原理进行分析, 根据信号特点, 提出测试放大器多载波工作情况下的 AM-PM 转移系数测试方法, 并根据测试原理, 设计了测试流程及具体的测试方案, 搭建了测试系统并进行实际验证。分析所得结果数据, 其精度满足该方法设计需求, 与国外同类产品进行了数据比对, 其结果趋势一致, 证明了该方法的有效性。

本课题所研究的 AM-PM 转移系数的测试方法, 是对新方法的尝试。目前, 国内缺乏系统的方法研究, 对 AM-PM 转移系数测试一直缺乏简洁、高效、准确的手段; 而本研究成果完善了微波功率放大器非线性参数的测试手段, 为更好地考核微波功率放大器提供了测试方法, 但对于更加深入的理论研究尚有所缺乏, 在后续工作中还需进行深入研究。文中所述方法目前已在分院在研的微波功率放大器中开始应用, 可应用在行波管放大器类产品, 也可应用于固态功率放大器。

## 参考文献:

- [1] 李新雷. 星载微波功率放大器测试方法及自动化研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [2] 康瑞媛, 汪蕾, 刘萌萌. 星用 S 频段 3W 功率放大器设计 [J]. 空间电子技术, 2012, 3: 44-47.
- [3] 牛亚南. 微波大功率系统非线性参数分析方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [4] [美] 罗伯特. A. 威特, 著. 李景威, 张伦, 译. 频谱和网络测量 (第一版) [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1997.
- [5] 陈道明, 汪一飞, 李力田, 等. 通信卫星有效载荷技术 [M]. 北京: 宇航出版社, 2001.
- [6] Stette G. Intelligible Crosstalk in Nonlinear Amplifiers: Calculation of AM-PM Transfer [M]. IEEE Trans. on Communications, 1975, 23(2): 265-269.
- [7] 南京长江机器制造厂. GB11299. 10-89. 卫星通信地球站无线电设备测量方法.
- [8] Sen S, Devarakond S. Phase Distortion to Amplifiers Conversion-Based Low-Cost Measurement of AM-AM and AM-PM Effects in RF Power Amplifiers [J]. IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) System, 2012, 20(9): 1602-1614.