

矢网在脉冲行波管增益测试中的应用研究

刘新爱^{1*} 邹峰¹ 端木丹丹² 王刚¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 101400; 2. 北京遥测技术研究所 北京 100076)

Pulse Travelling Wave Tube Gain Measurement Using VNA

LIU Xin'ai^{1*}, ZOU Feng¹, DUANMU Dandan², WANG Gang¹

(1. Aerospace Information Research Institute Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China;

2. Beijing Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract In this paper, the frequency domain characteristics of the traveling wave tube(TWT)output signal based on pulse modulation are analyzed, and the application of the vector network analyzer in pulse-modulated signal testing is discussed. Two methods of wideband detection and narrowband detection can be realized by setting the receiver bandwidth of the vector network analyzer; the pulse desensitization effects of the two detection methods are compared with the analysis of typical pulse modulation signals, the gain characteristics of pulsed TWT under different test methods are analyzed, and the wideband detection method is established as the test method of gain fluctuation of the TWT. The actual test results show that the wideband detection method of the vector network analyzer is more suitable for measuring the gain fluctuation of pulsed TWT.

Keywords Vector network analyzer, Pulsed traveling wave tube, Gain fluctuation, IF bandwidth

摘要 分析了脉冲调制下行波管输出信号频域特性,探讨了矢量网络分析仪在脉冲调制信号测试中的应用,设置矢量网络分析仪接收机带宽可实现宽带检测和窄带检测两种测试方法,结合典型脉冲调制信号分析对比了两种检测方法的脉冲退敏效应,分析了脉冲行波管在不同测试方法下的增益特性,最终确立了宽带检测法作为脉冲行波管增益波动的测试方法,实际测试结果验证了矢量网络分析仪宽带检测法更适合测试脉冲行波管增益波动测试。

关键词 矢网 脉冲行波管 增益波动 中频带宽

中图分类号: TN98

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202308011

行波管(Travelling Wave Tubes)是一种针对高频信号进行功率放大的真空电子器件^[1],基于脉冲调制射频(Pulsed-RF)工作模式的行波管广泛应用于通信和雷达领域,这时它们表现出的特性与连续波条件下的特性可能不同,对于脉冲调制信号的测量是各项研究工作的基础。

行波管作为功率放大器,其增益是重点考核指标,带内的增益一致性对系统的信噪比、误码率等指标产生影响,准确测量脉冲调制模式下行波管频带内的增益特性,有利于信号调制、发射系统的设计和使用。传统测试行波管增益特性曲线多采用矢量网络分析仪,在不同的中频带宽下测试,增益特性曲线幅值会出现明显不同,占空比不同,幅

度差值也不尽相同,严重影响脉冲状态下行波管功率增益的评估。本文针对上述问题分析了脉冲调制信号频域特征,通过对比矢量网络分析仪(以下简称矢网)宽带中频和窄带中频测试原理,提出了采用宽带检测法进行脉冲行波管增益曲线测试,通过实验再次论证了该方法的有效性。

1 脉冲调制下测试技术

当射频信号作为载波,被连续的周期矩形脉冲信号调制后,得到的信号即为脉冲调制射频信号,其时域和频域图形如图1所示,PRF为脉冲重复频率, f_0 为中心频率, τ 为脉冲宽度,谱线包络幅度变化具有 $(\sin\theta/\theta)$ 的形式^[2-4],由于能量散布到各频谱分量,

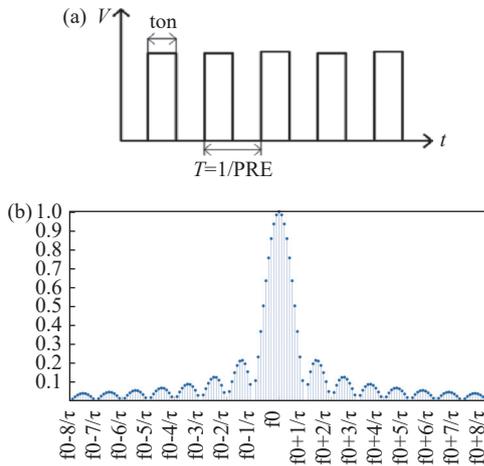


图1 时域和频域的脉冲。(a)时域, (b)频域

Fig. 1 Pulse in time domain and frequency domain. (a) Time domain, (b) frequency domain

势必会引起载波分量幅度的下降,称为“脉冲退敏效应”,脉冲退敏因子用 α 表示。

从信号检测的角度来看,矢网本质上是一个窄带的外差式接收机,它将含有被测件幅度与相位信息的微波连续信号变频到一固定的中频,通过信号的分析处理得到最终的测试结果。脉冲行波管输出信号为脉冲调制信号,矢网需要采取特殊的检测技术,视被测信号调制脉冲的宽度而定,矢网可采取宽带检测和窄带检测两种技术^[5]。

1.1 宽带检测法

宽带检测法是指采用宽带中频,从而保证矢网内部接收机能够获取脉冲调制信号主要频谱分量,信号所携带的幅相信息基本没有畸变和损失地通过中放,就和连续波时情况一样。典型的中频带宽至少是脉宽倒数的 1.5 倍,这样才能保证即使是有时序误差和脉冲时延的情况下,绝大部分的频谱分量都被测量,由于中频滤波器自身特性的影响,仍有少部分频谱分量损失,在分辨带宽与脉宽乘积小于 0.2^[2] 时,脉冲退敏因子 α 表示如下:

$$\alpha = 20 \times \lg(\tau * B) \quad (1)$$

式中 B 为冲击带宽,一般情况下 B 与分辨带宽不同,引入系数 K 进行修正计算。

宽带检测法,除脉宽要求外,另一个关键问题是脉冲流与矢网工作的起始时刻必须同步,这样在脉冲导通时间内矢网才会随着脉冲信号的出现进行数据采集,因此,测试系统中需要为矢网采集数据提供一个脉冲同步信号,该信号频率和脉冲重复

频率(PRF)保持一致。为了保证脉冲状态矢网能正常工作,不仅需要矢网的取样时间外,还要预留硬件电路对信号响应的稳定时间,这些时间的总和决定了被测脉冲调制信号的最小可测脉冲宽度,因此,宽带检测技术又称为同步数据采集模式,宽带检测技术如图 2 所示。当中频带宽足够宽时,足够多的脉冲频谱分量能落在测试接收机带宽之内,宽带检测是测试脉冲调制射频信号的首选方法。

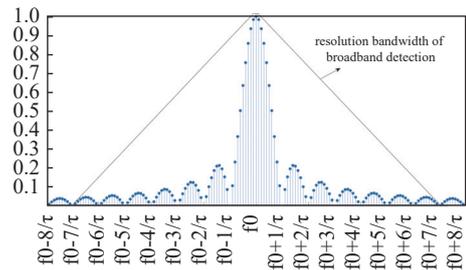


图2 宽带检测技术示意图

Fig. 2 Broadband detection technology

1.2 窄带检测法

当矢网接收机的带宽太窄,导致脉冲调制信号的大部分频谱分量并不能落在接收机内,此时需要通过窄带检测完成脉冲测试。这种情况下,矢网不能完全捕获脉冲调制射频信号,便采用了一种极端方式,即只保留频谱主瓣的中心载波频率分量,将其他频率分量全部滤掉。滤除旁瓣信号后,极窄带宽内的脉冲调制射频信号成为连续波信号,在不考虑矢网数据取样与输入脉冲信号同步的前提下,可依据连续波测试方法完成测试。由于窄带检测不需要数据采集同步信号,因此这种技术也称为异步数据采集方式。窄带检测技术如图 3 所示。

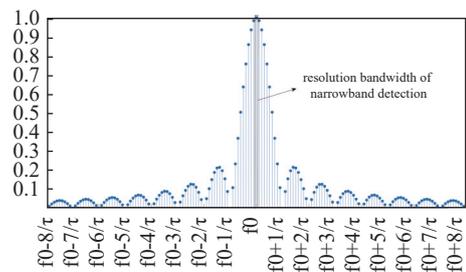


图3 窄带检测技术示意图

Fig. 3 Narrowband detection technology

窄带检测技术的主要优点是对测试信号脉冲宽度最小值无特殊要求,因为大部分频谱分量都会被滤掉,只剩下中心频率分量。但随之带来一些新

问题,当所测信号的重复频率很小时,测试扫描时间会很长,中频带宽也不可能无限调低。此外由于频谱分量的分散,使得载波频率分量的幅度降低,导致测量动态范围变小,窄带检测时脉冲退敏因子表示如下:

$$\alpha = 20 \times \lg(\tau/T) \quad (2)$$

根据 α 分析可得,窄带检测技术的动态范围受制于脉冲的工作比(τ/T),随着脉冲变窄或脉冲间的时间间隔变大,接收机测得的脉冲平均功率降低,导致信噪比降低,动态范围也相应减小。

2 脉冲调制下增益测试方法

2.1 测试原理及系统

本文选取 Ku 波段 500 W 脉冲空间行波管开展增益测试方法的研究,行波管的脉冲宽度为 45 us, 占空比 25%。

组建 Ku 波段脉冲空间行波管增益测试系统,原理框图见图 4,矢量网络分析仪为行波管提供激励信号,同时接收机检测输出信号,所得对数幅度参数比 S21 即为增益,脉冲信号发生器一方面使能高压电源工作在脉冲模式,另一方面为矢量网提供与脉冲流同步的触发信号。

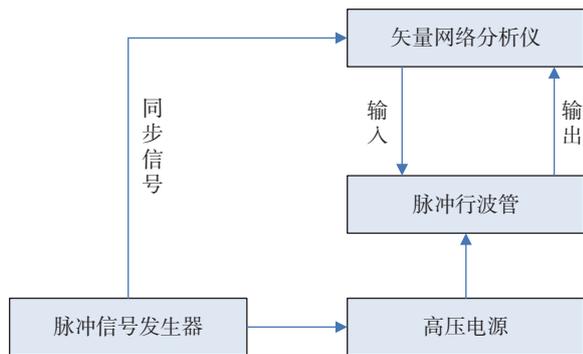


图4 脉冲行波管增益测试原理图

Fig. 4 Schematic diagram of Pulse TWT gain test

测试前设置脉冲信号发生器输出波形为 Pulse, 设置脉冲宽度 45 us 和占空比 25%, 按照正常加电流程使行波管工作在脉冲状态下。在频率扫描模式下,以等激励方式测试增益波动曲线,选取工作带宽中心频率的饱和和工作点为激励设定值,分别采用宽带法和窄带法测试 S21 曲线。

2.2 测试结果分析

2.2.1 宽带检测和窄带检测测增益

利用宽带检测技术进行脉冲行波管增益波动

测试,所用矢网为 Keysight 的 N5244A, 经查阅,该矢网中频带宽最大为 600 kHz, 行波管重复频率约为 22 kHz, 中频带宽远大于重复频率,能保证脉冲调制信号主要频谱落在接收机带宽内。根据 1.1 中所述,宽带检测时中频带宽至少是脉冲宽度倒数的 1.5 倍,因此设置矢网中频带宽为 35 kHz,测得脉冲空间行波管增益曲线如图 5 所示,测试增益值为 47.3 dB ~ 47.9 dB。

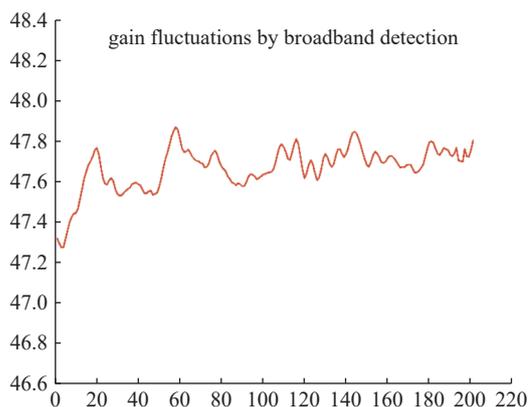


图5 宽带检测增益测试曲线

Fig. 5 Gain test curve in broadband

按照窄带检测法设置矢网中频带宽为 1 kHz, 远小于脉宽的倒数,矢网接收机只能检测到主瓣的主峰信号。窄带检测不需要脉冲同步信号,测得脉冲空间行波管增益曲线如图 6 所示,增益值为 35.10 dB ~ 35.70 dB。

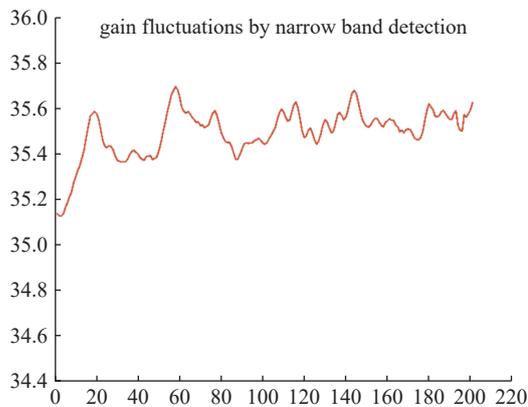


图6 窄带检测测试曲线

Fig. 6 Gain test curve in narrow bandwidth

2.2.2 两种检测方法对比

根据宽带检测和窄带检测试验结果对比,见图 7 所示,两种测试方法所得的增益曲线随频率变化趋势几乎一致,但是窄带检测增益幅度较宽带检

测增益幅度降低了 10 dB 多, 窄带检测所得信号只包含了被测信号主瓣的中心频率分量, 遗漏了旁瓣频率分量, 即产生了严重的“脉冲退敏效应”。

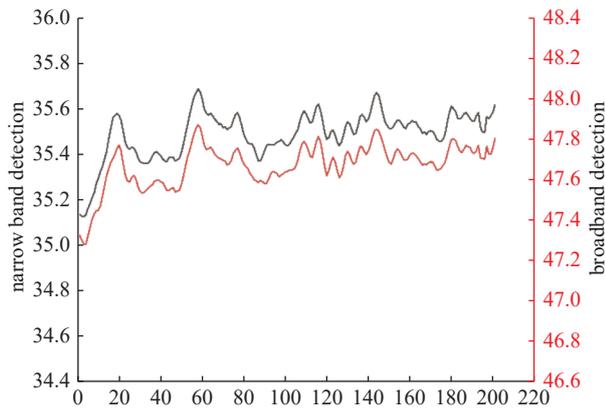


图7 两种检测法增益测试曲线

Fig. 7 The gain curve by two test methods

3 结论

本文通过理论分析和实际测试结合的方法, 开展了矢量网络分析仪在脉冲空间行波管增益测试中的技术研究。通过对比宽带检测法和窄带检测法的优缺点, 明确两种测试方法的应用条件, 结合矢网最大中频带宽和脉冲调制信号脉宽, 确定了宽带检测法为测试脉冲空间行波管的有效方法^[6-11]。在相同的脉冲宽度和占空比下, 实际测试了 Ku500W 脉冲行波管的增益曲线, 宽带检测法能降低脉冲退敏效应, 而窄带检测法出现了严重的脉冲退敏效应, 绝大部分频率分量丢失, 同时窄带检测对中频滤波器带宽要求高, 在脉冲调制信号小占空比时测试动态范围小, 综合分析可知宽带检测法更适合测试行波管增益波动。

参 考 文 献

- [1] Liu Qijia. Research on the measurement technology of the nonlinear parameters of the travelling wave tubes[D]. Chengdu, School of Electronic Engineering, 2015 (刘奇佳. 行波管微波非线性参数测试技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015(in Chinese))
- [2] Li Zhenyuan, Feng Jinjun, Liang Youhuan. Microwave measurement technologies for travelling wave tubes[M]. Beijing: National Defense Industry Press 2013.12 (李镇远, 冯进军, 梁友焕. 行波管中的微波测量技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.12(in Chinese))
- [3] Su Jinshui, Xu Li. High speed pulse high power amplifier pulse parameter test method[A]Measurement and Equipment, 2018, 1000-0771 (苏金水, 徐力. 高速脉冲高功率放大器脉冲参数测试方法 [A] 测量与设备, 2018, 1000-0771(in Chinese))
- [4] Zhang Yichi, Huang Jianming, He Zhao. Frequency-domain measurement technique for pulsed RF signals based on phase spectrum measurement[A]Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2508-2514 (张亦弛, 黄见明, 何昭. 基于相位谱测量的脉冲调制信号频域测量方法 [A] 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2508-2514(in Chinese))
- [5] Chen Xin, Cheng Ning. Dunsmore J P. Handbok of Microwave Component Measurements with Advanced VNA Techniques[M]. Bei Jing: Publishing House of Electonics Industry, 2014: 52-55 (陈新, 程宁. Dunsmore J P. 微波器件测量手册: 矢量网络分析仪高级测量技术指南 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 52-55(in Chinese))
- [6] WONG K H, Characterization of calibration standards by physical measurement[J]. 39th ARFTG Conference Digest, Volume 21, June 1992: 53-62
- [7] David Blackham, Ken Wong. Lates advances in VNA accuracy enhancements[J], Microwave Journal, 2005, 48(7): 78: 94
- [8] Stumper U, Influence of TMSO calibration standards uncertainties on VNA S-parameters[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2003, 50(2): 311-315
- [9] Zhu Xiangwei, Li Yuangling, Yong Shaowei, et al. A novel derfinition and measurement method of group delay and its application[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2009, 58(1): 229-233
- [10] Henrie J, Christianson A, Chappell W J. Prediction of passive intermodulation from coaxial connectors in microwave networks[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(1): 209-216
- [11] Wollensack M, Hoffmann J, et al. VNA Tools II: S-parameter uncertainty calculation[A]. Microwave Measurement Conference(ARFTG), 2012 79th ARFTG[C]. IEEE, 2012.1-5