

微波扫频测量技术

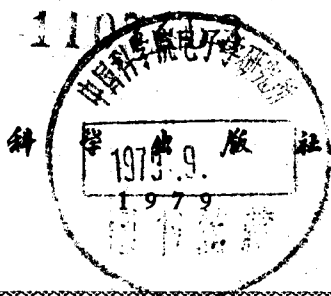


科学出版社

73.4598
S86
=3

微波扫频测量技术

张 伦 李镇远 编译



0039/17 -

内 容 简 介

本书介绍了扫频技术在微波测量中的应用。论述了微波扫频测量技术的原理、测量系统和测量方法,详细介绍了对测量系统所用仪器和元件的要求、实现各种测量的步骤以及误差分析。书中分别讨论了阻抗、传输、功率、频率、Q值、噪声系数和群时延这几个常用参量的扫频测量方法以及实际进行扫频测量时应当注意的一些问题,并列了若干实例。

本书可供从事微波测量技术工作的广大工程技术人员及大专院校师生参考。

微波扫频测量技术

张 伦 李镇远 编译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年7月第一版 开本:787×1092 1/32

1979年7月第一次印刷 印张:4 1/4

印数:0001—30,400 字数:95,000

统一书号:15031·240

本社书号:1458·15-7

定价: 0.45 元

序

本书主要根据美国休利特-帕卡德公司(Hewlett Packard) 1975年出版的《高频扫频测量》(Application Note 183. High Frequency Swept Measurements)一书编译而成。

微波扫频测量技术是近十余年发展起来的一门新技术,迄今已发展到相当成熟的阶段。采用扫频技术不仅能快速、连续、自动地显示出被测器件的宽带特性,大大加速测试过程,而且测量的精确度与单频测量也大致相当。因此,目前微波扫频测量技术已在生产和科研中获得广泛应用,并为实现测试过程的自动化奠定了良好的基础。

尽管扫频测量技术已在实际工作中应用多年,但是,有关这门技术的书籍还不多见,许多成果仅散见在各种期刊文献中。《高频扫频测量》一书则是较全面介绍这一技术的新著。原书简要介绍了微波扫频测量技术的原理、测量系统和测量方法,对测量系统所用仪器和元件的要求也做了具体说明,并分别论述了阻抗、传输和功率的扫频测量方法及实验步骤。然而,从扫频测量技术的应用来看,该书还有一些欠缺之处。为了弥补这个不足,我们又从有关文献中选译了有关频率、 Q 值、噪声系数和群时延的扫频测量方法,分为两章列出,与原书的内容结合为一个整体。期望读者通过阅读本书能够对微波扫频测量技术有一个较全面的了解,进而初步具备独立从事扫频测量工作的能力。

必须指出,《高频扫频测量》一书原是HP公司的一本内部读物,因此在叙述以及用词上都比较随便、很不统一,缺乏

严谨性。尽管我们在编译过程中对文字叙述的统一作了努力,但仍难免有所遗漏。

此外,对原文中一些牟利色彩很浓的词句以及带有吹嘘和夸张的叙述也作了必要的删节,对于原文介绍测量系统时列举的外国公司所生产的仪器,我们仍留了原来的型号,目的是使读者便于查找这些仪器的性能指标,从中了解整个系统对它们的要求,从而取得借鉴。但这并不意味着在建立自己的测量系统时一定要使用这种型号的仪器。恰恰相反,我们认为读者应当在“洋为中用”思想的指导下,结合自己的工作实践,创造和建立自己的扫频测量系统。

为了帮助读者更好地理解某些技术细节,我们在书末分类列出了部分较有价值的参考文献。

目前,扫频测量技术正在我国获得愈来愈广泛的应用,我们希望本书的出版能为促进这门技术的推广起一点积极作用。

由于我们的水平有限,在翻译和编辑方面肯定存在着不少缺点和错误,切望读者批评指正。

目 录

第一章	概述	1
1.1	历史回顾	1
1.2	测量基础	2
1.3	扫频信号源	3
1.4	检波器和检测器	16
1.5	显示器	22
1.6	信号分离器件	26
第二章	阻抗测量	30
2.1	同轴反射计测量	31
2.2	波导反射计测量	39
2.3	采用射频替代的波导反射计测量	42
2.4	反射计的精确度	45
2.5	扫频开槽线测量	47
2.6	扫频开槽线的精确度	52
2.7	方向性测量	53
2.8	信号源的驻波比测量	57
第三章	传输测量	60
3.1	采用定向耦合器的同轴传输测量	61
3.2	采用分功器的同轴传输测量	68
3.3	同轴传输测量小结	71
3.4	同轴比较测量	74
3.5	波导传输测量	78
3.6	采用射频替代的波导传输测量	80
3.7	传输测量的精确度	82
3.8	传输-反射的同时测量	84

第四章	功率测量	89
4.1	绝对功率测量	89
4.2	输入功率与输出功率或增益的关系	91
4.3	功率测量的精确度	93
第五章	频率和 Q 值测量	95
5.1	概述	95
5.2	波长计的校准	96
5.3	系统的精确度	103
5.4	Q 值测量	103
第六章	其它参量的扫频测量	109
6.1	噪声系数测量	109
6.2	群时延测量	111
附录 A	稳幅或比值系统的源匹配及定向耦合器与双电阻、 三电阻分功器的比较	116
附录 B	反射测量的误差	121
附录 C	传输测量的误差	125
参考文献	129

第一章 概 述

当工程人员从事设计和测试一些比较复杂的高频网络时,对更精确的宽带数据的需要就变得愈益重要了。通常,这些数据是通过对两个主要的网络参量——阻抗和传输系数进行扫频测量来迅速而精确地满足的:

本书的目的,主要是研究对阻抗(反射系数)和传输系数进行扫频测量的一些专门技术。此外,还讨论了功率、波长、 Q 值、噪声系数和群时延的扫频测量问题。

从最一般的意义上说,阻抗和传输数据不但有幅度特性,而且还有相位特性。然而,在通常的情况下,相位信息是不需要的,故本书所讨论的方法将集中在幅度特性上。除提出一些专门技术之外,书中还介绍了有关各种测量技术的精确度和特殊应用的若干知识。

1.1 历史回顾

早先,阻抗和传输测量是在固定频率上逐点地进行。这种测量很烦琐、费时,而且往往会给出片面的结果。例如,测量点之间的谐振现象常常被漏掉,或者会不适当地确定滤波器和放大器的边缘响应。

自1952年第一个宽带、高方向性的定向耦合器问世之后,便开始了克服上述困难的进程。在宽频带上对正向行波和反向行波分隔的能力,加速了固定频率的反射和传输测量的过程。1954年,随着扫频信号源(用一个马达带动的机械

调谐速调管)的诞生,扫频测量便成为可能。扫频信号源与比值计和宽带检波器相结合,使扫频测量成为网络设计最佳化的一种强有力的新方法。

到了1957年,由于使用了电压调谐返波振荡管(BWO)作为射频扫频信号源所以机械调谐的速调管被淘汰。电压调谐返波振荡管具有较快、较精确的扫描时间,速调管所存在的模式和统调问题在这里也不太严重。然而,返波振荡管是一种真空器件,经长时间使用后便会烧坏。为了克服返波振荡管寿命有限的这个困难,六十年代后期便研制出了固态微波扫频信号源。往后的发展又出现了能在好几个倍频程内连续进行扫频测量的多倍频程固态信号源。

扫频信号源的发展促进了扫频测量技术其它一些方面的革新。例如,已研制出工作频率直到18GHz的多倍频程高方向性同轴定向耦合器。灵敏度更高的新型二极管检波器与适当的比值计显示相结合,可以得到更大的量程并在宽频带内提高测量的置信度。

1.2 测量基础

有四种基本部件是为整个扫频测量技术所共有的。这些部件是

- (1) 扫频信号源;
- (2) 检波器 (Det*);
- (3) 显示器;
- (4) 信号分离器件。

对一些重要参量(这些参量影响上述几种部件在扫频测

* Det 是 detector 一词的缩写。——译注

量系统中的运用)的理解,对于理解扫频技术的原理、验证系统的精确度是否合格以及组成新的测量系统都是至为重要的。本章的以下几节,将扼要说明扫频信号源、检波器(Det)、显示器和信号分离器件的主要特性。

1.3 扫频信号源

扫频仪是测量网络阻抗特性和传输特性的系统中最普通的射频扫频信号源。扫频仪的主要技术特点及其在鉴定测量(qualifying measurement)中的重要性体现在以下几个方面:

(1) 能够在整个扫频范围内维持恒定的(稳幅)、足够大的功率输出,这样就可以得到大的动态范围。稳幅对于在各种各样的负载状态下维持良好的源阻抗匹配也是重要的;

(2) 精确的线性扫频和经校准的频标对于确定频率以及对于示波器和 X-Y 记录仪的水平校准是重要的;

(3) 当使用宽带检波器时,为了使测量误差最小,必须使用寄生信号和谐波均很小的射频信号(RF);

(4) 为了进行精确的单频(连续波)测量和窄带测量,必需使频率稳定;

(5) 为了有效地进行校准和测量,必须具备一些基本的工作功能。对于扫频测量来说,几个重要的功能是:各种扫描方式,可变的扫描速度、频标、稳幅和调制。目前,已研制出覆盖频率范围从 400kHz 到 40GHz 的扫频信号源。图 1 示出 8620A 型固态扫频信号源和它的一些主要特点。

1.3.1 稳幅扫频信号源

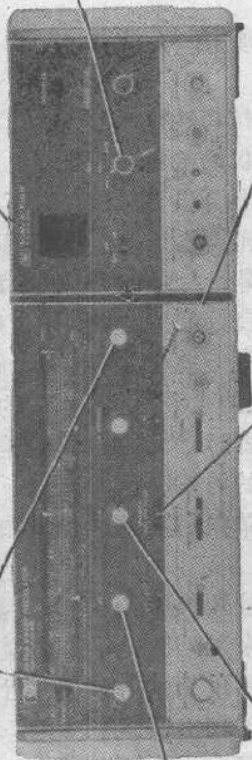
稳幅的概念由图 2a 和 2b 中的扫频信号源的未稳幅输出和稳幅输出的图片来具体说明。

插入单元,能完成多频段工作。

起止旋钮,用于宽带连续扫描,
分别调节起始频率和终止频率。

ΔF 旋钮,用于窄带扫描,
可以连续波旋钮的位置为
中心,进行已校对称扫描。

自动稳幅旋钮,可对
输出功率进行内稳幅。
(选购)或用一个二极管
管稳幅器(或功率计)
进行外稳幅。



连续波旋钮,在单频测量时,用来调节扫描源,
此旋钮还调节频率和 ΔF 的中心频率。

标记开关,可产生幅度标记或强度标记,
频率由连续波细调旋钮指出。

灵敏的扫描座,包括扫描方式、
触发和扫描速度的选择。

图1 8620A 型固态扫描信号源. 用于 8620A 型主机的各个插件振荡器,频率范围为 3MHz 到 18GHz, 86290A 型射频频插件(上方)单次扫描覆盖 2—18GHz 频段

稳幅扫频信号源(SWP*)的输出完成以下两个主要任务:

- (1) 当频率变化时,输出功率维持恒定不变;
- (2) 当负载阻抗改变时,输出功率维持恒定不变,因为源匹配获得了改善。

输出功率平坦及匹配良好的信号源是由自动稳幅电路(ALC**)来实现的。自动稳幅电路是 8620 系列和 8690 系列

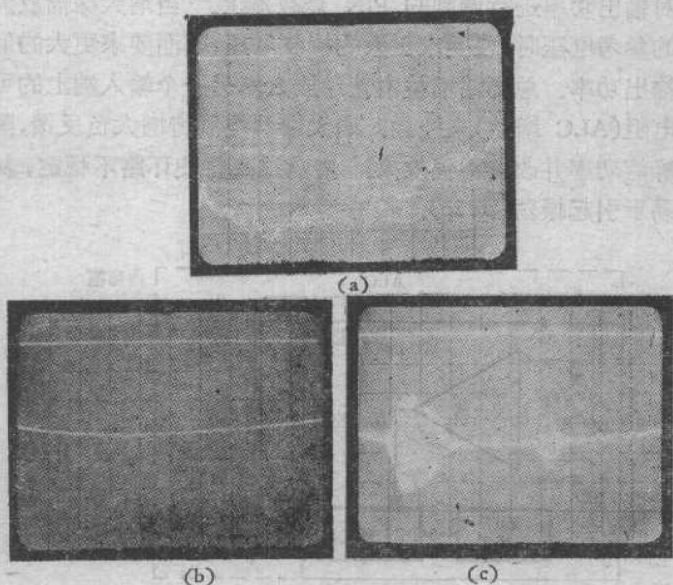


图2 示波器显示:(a)当 ALC 增益不够高时,未稳幅的扫频信号源输出;(b)最大的稳幅扫频信号源输出;(c)由于稳幅反馈环路中 ALC 增益过高引起的振荡。从显示中可以明显看出,最大稳幅功率实际上与最小未稳幅功率相同。稳幅输出中的剩余波动是由耦合度随频率变化引起的。注意:由于使用了负压二极管检波器,故向下方表示功率增大

* SWP 为 sweep 一词的缩写,在下文及图注中,用以表示扫频输出。
——译注

** ALC 为 Automatic Leveling Circuit 一词的缩写。——译注

返波管扫频信号源的标准电路(见图3)。直流反馈电压取自一个检波器,这个检波器接在定向耦合器或类似的取样器的一个臂上,用以监控扫频信号源的输出。定向耦合器是按这样的要求来接:使正向功率在频率和负载阻抗变化时维持恒定不变。稳幅放大器是一个将直流反馈电压与参考电压进行比较的差动放大器。放大器的直流输出馈至一个按照外加电压对输出功率进行调制的 PIN 衰减器上。当增大稳幅放大器的参考电压时,便要求更大的检波电压,因而要求更大的射频输出功率。总环路增益由差动放大器另一个输入端上的可变电阻(ALC 增益)来控制。增大增益控制将增大负反馈,降低峰值功率并改善稳幅效果。增益过高将使环路不稳定,从而易于引起振荡(图2c)。

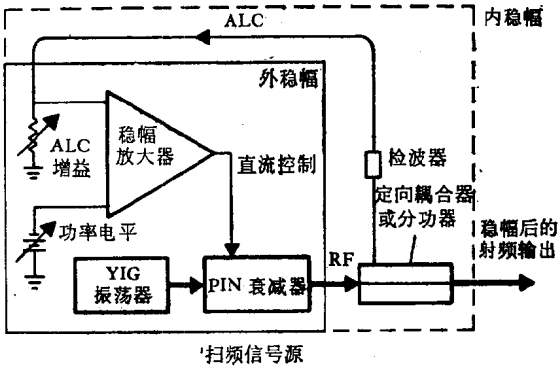


图3 基本的自动稳幅电路。内稳幅扫频信号源包含一个由定向耦合器和检波器(点接触二极管)组成的内稳幅环路。外稳幅扫频信号源可以使用带有点接触二极管(或热敏电阻检测器)的定向耦合器或双电阻分功器*

观察图 2a 和 2b 便可看出,最大稳幅功率与最小未稳幅

* 原文为 power splitter, 亦可译为功率等分器。——译注

功率十分接近。当自动稳幅电路工作在给出最大稳幅功率状态时，PIN 衰减器必须吸收超过稳幅功率电平的任何扫频信号源输出*。

现在，很容易看出，稳幅过程是如何改善源匹配的：由于反馈环路内的定向耦合器仅耦合往正方向传输的功率，故自动稳幅电路只对正向功率的变化产生响应。因此，无论什么形式的负载接到稳幅扫频信号源的输出端，它所引起的反向功率都不会影响自动稳幅电路或扫频信号源的输出。在环路内，因电缆、接头等产生的反射也由自动稳幅电路加以补偿。

根据应用情况，对扫频信号源进行稳幅有多种方法。实质上，一台扫频信号源可以用点接触二极管检波器进行内稳幅，也可以用点接触二极管检波器(或功率计)进行外稳幅。图 4 至图 6 给出了几种最普通的稳幅电路布置。下面将扼要讨论获得最大稳幅功率的方法以及每种稳幅电路的应用。

1.3.2 二极管检波器稳幅

内稳幅和外稳幅的比较 内稳幅的主要优点是简单。它无需进行外部连接，对扫频信号源的调节也最少。其主要缺点是：与外稳幅相比，通常它离测量点较远，因此，电缆损耗和接头失配反射将给测量带来误差。而在外稳幅环路中，则这两者均能被补偿。对于大多数内稳幅的微波扫频信号源来说，在输出端测得的输出功率的平坦度一般是在 $\pm 0.5\text{dB}$ 与 $\pm 1\text{dB}$ 之间。

为了得到最大的稳幅功率，将自动稳幅电路开关打到内部位置，将功率电平旋钮沿顺时针方向旋到头。再将功率电

* 在自动稳幅电路中，PIN 衰减器起着电平箝制作用。当稳幅环路工作时，PIN 衰减器通过改变偏流来改变其对传输功率的衰减作用，从而实现自动调整扫频信号源的输出电平使之维持恒定的目的。——译注

平旋钮往回旋,直到未稳幅指示灯熄灭为止,这表示扫频信号源调节到了最大稳幅功率的状态。

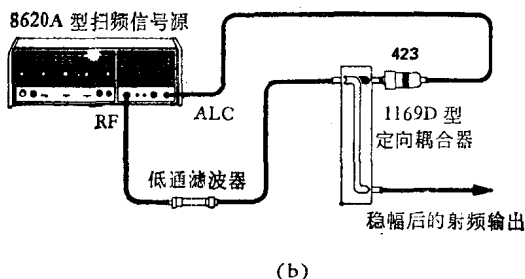
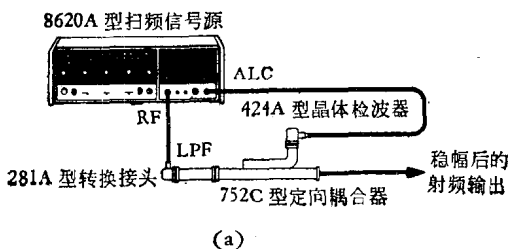


图 4 用定向耦合器和点接触二极管检波器进行外稳幅的扫频信号源的电路布置。(a) 波导系统 (2.6—40GHz);(b) 同轴系统 (0.1—18GHz)。注意: 低通滤波器用来消除由谐波引起的误差。应当用示波器和点接触二极管来监视稳幅输出端出现的环路振荡

图 4a (波导系统)和图 4b (同轴系统)示出了使用点接触二极管检波器的外稳幅扫频信号源。获得最大稳幅功率的步骤如下:

(1) 按图所示布置仪器。调节扫频信号源,使在所需的频率范围内作快速扫描。用示波器和点接触二极管检波器监视稳幅源输出端出现的环路振荡;

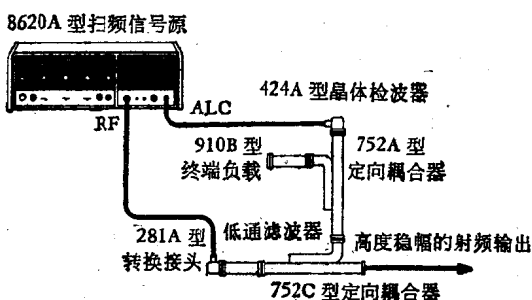
(2) 将自动稳幅电路开关置于外部位置,将功率电平旋钮和自动稳幅电路增益旋钮调到最大位置(顺时针旋到头);

(3) 将功率电平旋钮往回旋动, 直到未稳幅指示灯熄灭或示波器上出现振荡时为止。如果出现振荡, 则将自动稳幅电路增益旋钮往回旋动, 直到振荡消失;

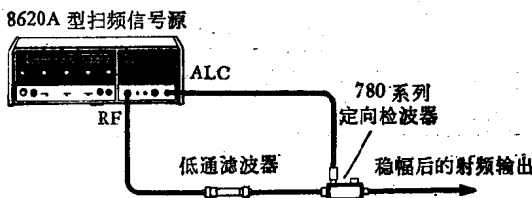
(4) 重复步骤(3), 直到功率电平旋钮可以连续从最小位置调到未稳幅指示灯刚发亮而又不出现振荡时为止;

(5) 将功率电平旋钮调到未稳幅指示灯刚发亮, 这时, 扫频信号源便工作在最佳反馈增益和最大稳幅功率状态。

在图 5a 中, 一个侧臂接有终端负载的 3dB 定向耦合器



(a)



(b)

图 5 高度稳幅的波导系统(2.6—40GHz)和定向检波器(1—12.4GHz)的同轴系统的电路布置。在高度稳幅的波导系统中, 两个耦合器的配置使耦合度随频率的变化相互补偿, 从而改善了稳幅性能。定向检波器是定向耦合器和点接触二极管的组合物, 它使耦合度变化和检波器的频率响应最佳, 以改善稳幅的平坦度

被放置在 10dB 定向耦合器和自动稳幅电路检波器之间,从而构成一个高度稳幅的波导系统. 3dB 耦合器主臂的反向耦合特性能够对 10dB 耦合器侧臂的耦合度变化进行补偿. 其最终结果是耦合度变化相互抵消. 否则,耦合度的变化将影响自动稳幅电路的反馈电平. 应当注意,为了使耦合度的变化相互抵消,3dB 定向耦合器和 10dB 定向耦合器在设计和制造方面必须相似.

同轴系统的最佳稳幅平坦度可以利用 780 系列的定向检波器来实现,如图 5b 所示. 定向检波器(耦合器和点接触二极管检波器的组合体)在耦合度变化方面和检波器的频率响应方面都调到最佳状态,以得到平坦的射频输出. 定向检波器和高度稳幅的波导系统都是采取与图 4a 和图 4b 所示系统相同的步骤来进行稳幅的.

1.3.3 功率计稳幅

由于热敏电阻具有良好的频率响应,所以,图 6a 和 6b 所示的功率计稳幅装置能在整个微波频率范围内给出一致的平坦输出. 然而,热敏电阻本身具有较大的热时间常数,这就使得功率计稳幅环路的有效带宽与二极管稳幅环路的有效带宽相比要窄一些. 因此,为要使热敏电阻对功率的峰值产生响应以及使稳幅有效,就要求扫描时间要长(20—30 秒/倍频程).

功率计稳幅的基本步骤如下:

(1) 按图 6 所示布置仪器并对 432 系列功率计调零. 这样便建立起零点转移能力* (Zero Carry-Over);

* 所谓零点转移能力是指在要使用的最灵敏的量程上进行初始调零之后,开关从一个量程转换到另一个量程时,功率计零点维持不变的能力.

——译注