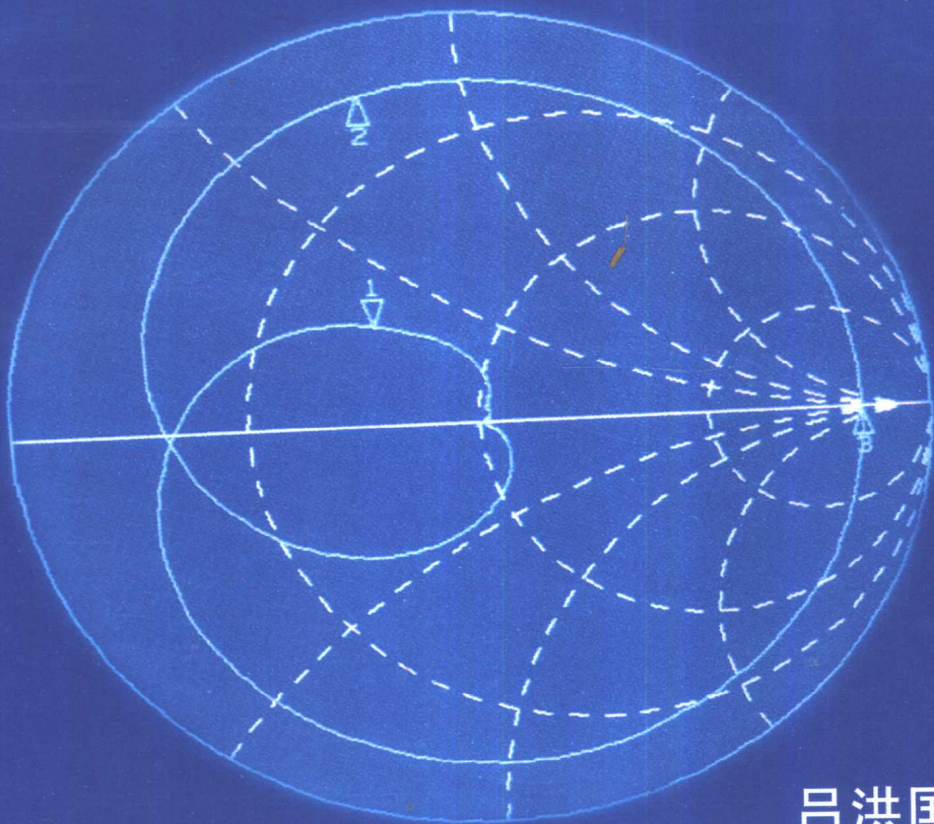
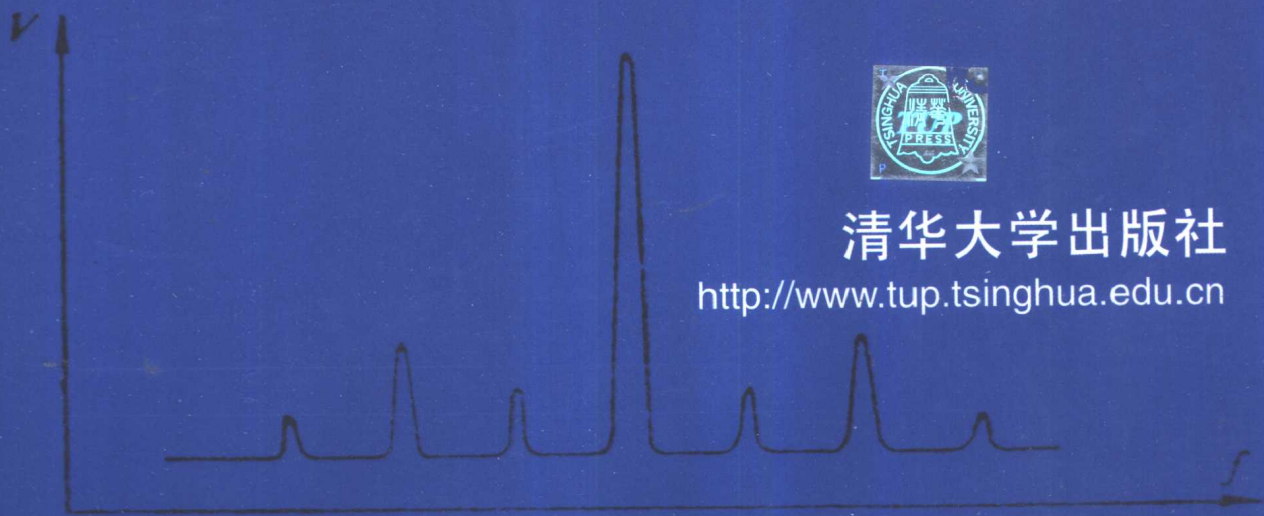




吕洪国 编著

现代网络频谱测量技术



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

现代网络频谱测量技术

吕洪国 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书介绍用网络分析仪精确测量网络 S 参数以及用频谱分析仪观察、分析信号频谱结构特性的原理与方法。全书共分 6 章。第 1 章介绍了矢量网络分析仪的原理, S 参数的测量方法及误差修正技术。第 2 章介绍了频谱分析仪的组成原理、性能参数及其在实际使用中的若干问题。第 3 章和第 4 章介绍频谱分析仪的具体应用, 具体讲述了测量电磁干扰及有线电视系统的频谱分析法。第 5 章和第 6 章介绍了电子测量仪器中的 IEEE—488 总线和 VXI 总线。

本书可供从事电子仪器 and 测量工作的工程技术人员及科技工作者学习与参考, 也可作为电子类各专业的电子测量教学参考书。

书 名: 现代网络频谱测量技术

作 者: 吕洪国 编著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研楼, 邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 清华大学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 11 字数: 252 千字

版 次: 2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-00770-5/TN·109

印 数: 0001~3000

定 价: 17.00 元

前 言

电子测量应用广泛,发展迅速,已成为推动现代科学技术发展的独立学科,从事电子工程的技术人员必须牢固地掌握并熟练运用这门基本技术。现代网络频谱测量是一项关于精确地测量高频网络的 S 参数,分析各种信号的频谱结构的专门技术,是电子测量技术中的重要内容。

网络分析仪系统是精确测量网络 S 参数的专用设备,它出现于 20 世纪 60 年代。几十年来,在测量精度方面不断发展,形成了一套完整的理论和方法。频谱分析仪则是观察和分析各种信号的频谱结构特性的有力工具,它的功能也越来越完善。

本书第 1 章介绍精确测量网络 S 参数的原理和方法,特别对为提高测量精度而采用的误差模型理论和误差修正技术作了比较详细的论述。第 2 章着重讨论频谱分析仪的组成原理以及在使用中经常遇到的若干问题,对频谱分析仪在电磁干扰和有线电视测量方面的应用则在第 3 章和第 4 章作了专门介绍。

随着计算机技术的快速发展,网络分析仪和频谱分析仪也同其他的电子仪器一样,向自动化和集成化的方向发展。IEEE—488 总线已经成为现代电子仪器必不可少的基本配置,而 VXI 总线标准则代表了未来仪器向集成化发展的方向。因此,本书在第 5 章和第 6 章分别对这两种仪器接口总线作了简要介绍。

作者根据多年来从事现代电子测量技术工作的体会和经验,并参考近年来国内外有关资料,写成此书。该书内容新颖,并与实际应用紧密结合,可供从事电子测量工作的工程技术人员参考。

在本书的编写过程中,得到了中国惠普公司和泰克公司的大力支持和帮助,特此致谢。对本书中存在的缺点和错误,诚恳地希望读者批评指正。

编 者

1999 年 12 月

目 录

第 1 章 微波网络 S 参数测量	1
1.1 微波 S 参数	1
1.1.1 微波网络的 S 参数	1
1.1.2 S 参数的定义及物理意义	2
1.1.3 S 参数的实际应用	2
1.2 S 参数的流图表示及计算	3
1.2.1 用流图法表示 S 参数	3
1.2.2 用 Mason 法则分析计算网络参数	5
1.3 S 参数的测量原理及系统	6
1.3.1 反射参数测量系统	6
1.3.2 传输参数测量系统	7
1.3.3 辐相接收机	8
1.3.4 反射参数和传输参数测量系统	9
1.4 S 参数测量中的误差及修正	10
1.4.1 反射参数测量中的系统误差	10
1.4.2 反射参数测量系统的误差模型	12
1.4.3 相位误差	12
1.4.4 反射参数测量时系统误差的确定及修正	13
1.4.5 传输参数测量中的系统误差及其修正	14
1.4.6 S 参数的全面测量	16
1.4.7 误差修正的效果	18
1.5 S 参数的自动测量	19
1.5.1 系统的组成	19
1.5.2 数据采集及输出	20
1.5.3 系统测试软件	22
第 2 章 频谱分析仪	23
2.1 引言	23
2.1.1 什么是频谱	23
2.1.2 为什么要测量频谱	24
2.2 超外差式频谱分析仪	25
2.3 调谐方程	26
2.4 分辨率	29

2.4.1	模拟滤波器	29
2.4.2	数字滤波器	32
2.4.3	本振的剩余调频	32
2.4.4	本振的相位噪声	33
2.5	扫描时间	34
2.5.1	模拟分辨滤波器对扫描时间的影响	34
2.5.2	数字式分辨滤波器对扫描时间的影响	36
2.5.3	包络检波	36
2.6	显示平滑技术	37
2.6.1	视频滤波	37
2.6.2	视频平均	38
2.7	显示方式	39
2.7.1	模拟 CRT 显示	39
2.7.2	数字式显示	40
2.8	幅度与频率测量	42
2.8.1	相对不准确性	42
2.8.2	绝对精度	43
2.8.3	改善整体不准确性	43
2.8.4	灵敏度	44
2.8.5	噪声系数	45
2.8.6	前置放大器	47
2.8.7	噪声信号	48
2.8.8	频率测量	51
2.9	动态范围	52
2.9.1	定义	52
2.9.2	动态范围和内部失真	52
2.9.3	动态范围和噪声门限	55
2.9.4	动态范围和测量的不准确性	56
2.9.5	显示范围和测量范围	57
2.10	扩展频率范围	58
2.10.1	谐波混频	58
2.10.2	幅度校准	61
2.10.3	相位噪声	61
2.10.4	信号识别	62
2.10.5	信号预选	64
2.10.6	动态范围的改善	65
2.10.7	多波段调谐	66
2.10.8	预选器的优点和缺点	67

2.10.9	宽带基波混频	67
第3章	电磁干扰的测量——频谱分析法	70
3.1	电磁干扰概述	70
3.1.1	频谱分析仪用于EMI测量	71
3.1.2	EMI来源于数字式产品	71
3.1.3	干扰路径	73
3.1.4	宽带与窄带信号	74
3.1.5	峰值与准峰值	75
3.2	频谱分析仪的校准及其基本测量	76
3.2.1	幅度校准	77
3.2.2	频率校准	77
3.2.3	混频器过载检查	78
3.2.4	灵敏度测试	80
3.2.5	带宽测量	80
3.3	单位转换、天线系数和距离修正	81
3.3.1	转换成电压 $U(\text{dB}\mu\text{V})$	81
3.3.2	转换成辐射场强 $E(\text{V/m})$ 及天线系数	82
3.3.3	距离修正	82
3.4	按FCC的规定测试	84
3.4.1	传导放射测试	84
3.4.2	辐射放射测试	87
3.4.3	FCC规定及举例	88
3.4.4	天线的选择和测量距离	90
3.4.5	周围有其他信号时的测试	91
3.5	按VDE和CISPR规定测试	91
3.5.1	规定的容限	92
3.5.2	传导放射测试和规定指标	92
3.5.3	辐射测试	95
3.5.4	峰值与准峰值的关系	95
3.6	开放场地的测量	96
3.6.1	测量场地周围的放射电平	97
3.6.2	场地衰减测量	97
3.7	自动测量	100
第4章	有线电视系统的测量	101
4.1	引言	101
4.2	信号与频谱分析仪的连接	101

4.3	基准单位	102
4.4	测量中的若干问题	103
4.4.1	扫描速率误差	103
4.4.2	场扫描频谱滚动	104
4.4.3	第一级混频器过载造成的失真	104
4.4.4	信号比频谱仪的噪声门限低	106
4.4.5	信号低于系统噪声	107
4.4.6	信号幅度和噪声电平非常接近	107
4.4.7	不正确的分辨带宽	108
4.4.8	强电场	108
4.5	复合二次和三次差拍	109
4.6	交叉调制	111
4.7	同频道干扰	111
4.8	外部信号侵入	112
4.9	载噪比	113
4.10	回波损耗和传输特性	114
4.11	测试卫星下行线路	115
4.12	泄漏	118
4.13	频率调制	120
4.13.1	直接观察法	120
4.13.2	Bessel 零值法	120
4.14	机上变换器	123
4.14.1	RF 式变换器	123
4.14.2	基带变换器	124
第 5 章	IEEE—488 总线	125
5.1	IEEE—488 接口概述	125
5.1.1	历史背景	125
5.1.2	目前的状况	125
5.2	IEEE—488 接口系统	126
5.2.1	接口系统的构成	126
5.2.2	标准之间的差别	126
5.2.3	IEEE—488/ANSI MC 1.1 的技术概况	127
5.2.4	功能简介	127
5.2.5	接口功能	128
5.2.6	信号线	129
5.2.7	命令方式	133
5.2.8	数据方式	137

5.2.9 查询	137
5.3 机械连接	138
5.4 数据格式	139
5.5 IEEE—488.2 标准和 NI 488.2 软件	140
第 6 章 VXI 总线	150
6.1 VXI 总线简介	150
6.2 VXI 总线的构成、环境和电气性能	151
6.2.1 VXI 总线标准规定	151
6.2.2 连接插座	152
6.2.3 本地总线	158
6.2.4 电磁相容性	159
6.2.5 冷却	159
6.2.6 电源	160
6.3 VXI 总线的通信	161
6.3.1 VXI 总线设备类型	161
6.3.2 寄存器基的设备及其通信方式	161
6.3.3 消息基的设备及其通信方式	162
6.4 VXI 总线的寻址	162
6.5 VXI 即插即用	163
6.5.1 即插即用框架、VISA 库和仪器驱动程序	163
6.5.2 应用程序开发环境	165
参考文献	166

第 1 章 微波网络 S 参数测量

S 参数被广泛地用来表示微波网络的特性,微波 S 参数及其测量是微波专业教学、科研和实验中的重要内容之一。随着计算机在微波领域的推广应用和微波电路计算机辅助设计(CAD)的不断发展,网络的 S 参数成为微波 CAD 的重要依据。因此,微波 S 参数的精确测量已经成为微波领域里所面临的重要课题和方向。 S 参数的测量系统已经成为教学和科学研究中不可缺少的工具, S 参数的测量原理和方法也是微波专业学生必不可少的基础知识之一。

以前,微波 S 参数的测量主要采用传统的测量线方法,这种方法陈旧,不仅速度慢而且精度也低。网络分析仪和六端口技术的出现,使 S 参数的测量发生了根本性的变革,不仅使用方便,测量的结果准确可靠,而且测量的范围也大大拓展,特别是由于计算机在测量中的应用以及测量仪器的智能化,为测量系统的自动化创造了必要条件,从而使 S 参数的测量真正做到了自动、快速、准确。

微波网络可以是单口网络,也可以是双口网络或多口网络。网络本身可以是无源的,也可以是有源的。一个负载是单口网络,而一个微波晶体管则属于双口有源网络。

本章讨论微波网络 S 参数及其测量的原理与方法。

1.1 微波 S 参数

1.1.1 微波网络的 S 参数

在频率较低时,网络的特性常用阻抗参数 Z 或者导纳参数 Y 来描述其端口特性,这些参数的定义是基于电压电流的概念,因而测量时需要在一定的端口条件下,如开路或短路,测出特定的电压或电流来确定各个参数。但在微波频率下,这种测量方法不再适用,因为在高频下,电压和电流很难测量;再者,将网络端口人为地开路或短路有时是不允许的,例如某些有源器件,开路或短路容易引起振荡或损坏器件。

在微波频段,因为采用了波的概念,所以微波网络常用 S 参数表示。任何双口网络都可以用 4 个 S 参数来表示其端口特性,如图 1.1。图中的 DUT(device under test)代表待测件,为一双端口网络。外面带有箭头的条线表示在 DUT 的两个端口信号加入及信号流

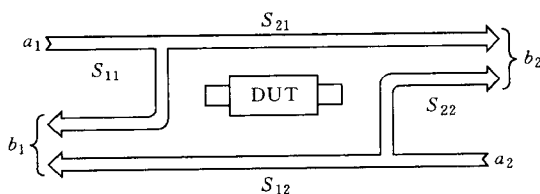


图 1.1 微波 S 参数

动的情况。当在端口 1 加有入射波 a_1 时,其中一部分由于该口的失配而被反射回来,成为该端口出射波的一部分,大小为 $S_{11}a_1$; a_1 的其余部分经网络传输到端口 2,成为端口 2 的出射波,其大小为 $S_{21}a_1$ 。同样,若在端口 2 也有入射波 a_2 加入,则其中一部分也会因端口 2 的失配而被反射回去,成为端口 2 出射波的另一部分,大小为 $S_{22}a_2$,其余的部分则经网络的反向传输成为端口 1 的出射波,大小为 $S_{12}a_2$ 。把端口 1 的两股出射波合在一起用 b_1 表示,把端口 2 的两股出射波合在一起用 b_2 表示,则有

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

其中 S_{11} , S_{21} , S_{12} 和 S_{22} 即为表示网络特性的 4 个 S 参数,称为散射参量,式(1.1)也称为散射方程组。

1.1.2 S 参数的定义及物理意义

为了确定双口网络的 4 个 S 参数,可以用一个匹配负载 Z_0 (其反射系数为零),接在端口 2,这样,当端口 2 的入射波 $a_2=0$ 时,由式(1.1)有

$$S_{11} = \frac{\text{反射波}}{\text{入射波}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

$$S_{21} = \frac{\text{传输波}}{\text{入射波}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

用同样的办法在端口 1 接匹配负载 Z_0 ,又有

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

可以看出, S_{11} 是在端口 2 匹配情况下端口 1 的反射系数, S_{22} 是在端口 1 匹配情况下端口 2 的反射系数, S_{21} 是在端口 2 匹配情况下的正向传输系数, S_{12} 是在端口 1 匹配情况下的反向传输系数。它们都是复数,即包含幅度和相位。一般来说, S_{11} 和 S_{22} 的模均小于 1,对于有增益的器件,如微波晶体管, S_{21} 的模大于 1, S_{12} 的模小于 1。对于有衰减的器件, S_{21} 和 S_{12} 的模均小于 1。

S 参数的两个数字下标中,第 1 个表示波出现的端口,第 2 个表示波进入的端口。如 S_{21} 表示在端口 2 出现的波和端口 1 的入射波之比。

S 参数都是在端口匹配的情况下定义的,或者说它们都是以系统的特性阻抗 Z_0 为参考阻抗,通常 $Z_0=50\Omega$ 。因此,测量 S 参数时必须把网络置于 50Ω 的测试系统中进行。如果不是 50Ω 的测试系统,则要对系统加以转换,或者对测出的 S 参数用一定的公式进行变换。

1.1.3 S 参数的实际应用

在实际工作中,人们经常用不同的物理量来描述网络的特性,这些不同的物理量往往含有更具体的物理意义。归纳起来可分为反射参数和传输参数。

反射参数有驻波比、反射系数、阻抗、回波损耗等,其表达式如下:

$$\text{驻波比} \quad \text{SWR} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad \text{或} \quad \text{SWR} = \frac{1 + |S_{22}|}{1 - |S_{22}|}$$

$$\text{反射系数} \quad \text{输入端} \quad \Gamma = S_{11}$$

$$\text{输出端} \quad \Gamma = S_{22}$$

$$\text{阻抗} \quad \text{输入端} \quad Z = R + jx = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$$

$$\text{输出端} \quad Z = Z_0 \frac{1 + S_{22}}{1 - S_{22}}$$

$$\text{回波损耗} \quad \text{输入端} \quad RL = 20 \lg \frac{1}{|S_{11}|}$$

$$\text{输出端} \quad RL = 20 \lg \frac{1}{|S_{22}|}$$

传输参数有增益、衰减、传输系数、传输相移、时延等,其表达式如下:

$$\text{增益} \quad G = 20 \lg |S_{21}|$$

$$\text{衰减} \quad L = 20 \lg \frac{1}{|S_{21}|}$$

$$\text{传输系数} \quad \text{正向} \quad T = S_{21} \quad \text{反向} \quad T = S_{12}$$

$$\text{传输相移} \quad \text{正向} \quad \varphi = \arctan S_{21} \quad \text{反向} \quad \varphi = \arctan S_{12}$$

$$\text{时延} \quad \tan = -\frac{d\varphi}{d\omega} \quad (\text{其中 } \omega \text{ 为角频率})$$

可见,这些习惯上经常用来描述网络特性的物理量和网络的 S 参数有着非常密切的关系。

在微波频率下,选用 S 参数主要有以下的优点:

(1) S 参数和习惯上经常使用的增益、衰减、反射系数等物理量有着非常密切的关系;

(2) 在微波 CAD 或 CAE(计算机辅助测试)中,对微波电路进行分析或设计时, S 参数能全面而严格地表示网络的特性,而且便于使用;

(3) S 参数容易测量,只要采用一般的反射和传输测量系统或设备就可以很方便地测出网络的 S 参数;

(4) 网络的 S 参数本身很容易用信号流图表示,对于复杂的组合网络系统,用信号流图法进行分析非常简便。这一点从 1.2 节中就可以看到。

1.2 S 参数的流图表示及计算

1.2.1 用流图法表示 S 参数

任何一个网络都对应一组 S 参数方程,它们都可以用信号流图法表示。

一个无源负载,是一个单口网络,它只有一个 S 参数,可用信号流图法表示为图 1.2(a)。图中用线条表示信号流通的路径,用线上的箭头表示信号流通的方向,在支路的旁边标上相应的 S 参数,用以表示信号的大小。对于单口的无源负载: $S_{11} = b_1/a_1 = \rho_L \angle \varphi_L, a_1$

和 b_1 分别表示入射波和反射波, ρ_L 为 S_{11} 的模, φ_L 为其相角。

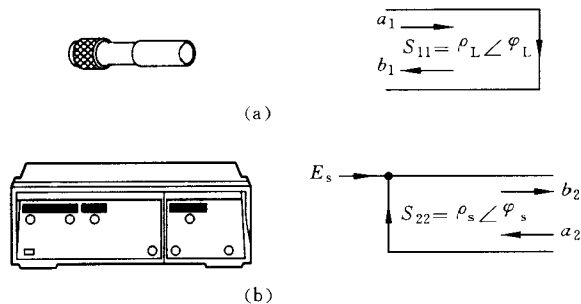


图 1.2 用流图表示单口网络

一个信号源也可以用信号流图表示,如图 1.2(b),其中信号源的出射波为 E_s ,源反射系数为 $S_{22} = \frac{b_2}{a_2} = \rho_s \angle \varphi_s$ 。单口网络只有一个 S 参数—— S_{11} 或 S_{22} ,用信号流图很清楚地表示了入射波 a_1 或 a_2 与反射波 b_1 或 b_2 之间的关系。这种关系就是单口网络的反射特性。

双口网络有 4 个 S 参数,用信号流图表示如图 1.3。

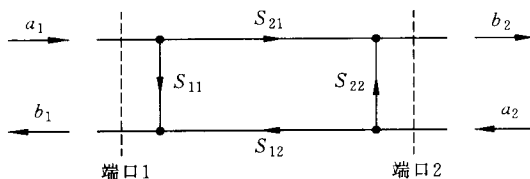


图 1.3 用流图表示双口网络

请注意信号流图中箭头的方向,它必须和 S 参数的定义及物理意义一致。

三端口网络有 9 个 S 参数。例如一个定向耦合器,用信号流图表示如图 1.4。其中 S_{21}

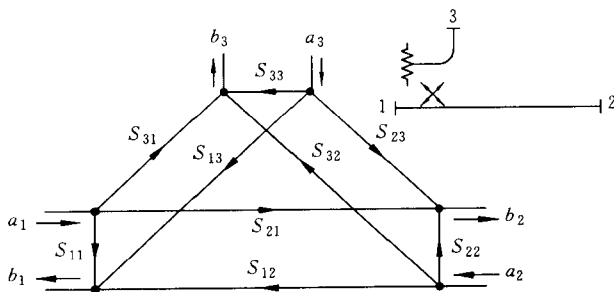


图 1.4 用流图表示三口网络

和 S_{12} 为端口 1 和端口 2 之间主传输通路的传输系数; S_{31} 和 S_{13} 为端口 1 和端口 3 (耦合口) 之间的耦合系数; S_{23} 和 S_{32} 为端口 2 和端口 3 之间的隔离系数; S_{11} , S_{22} 和 S_{33} 分别为三个端口的反射系数。对于理想的定向耦合器,应有

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0$$

$$S_{32} = S_{23} = 0$$

$$S_{31} = S_{13} = \text{常数}$$

但实际的定向耦合器都有一定的指标,其中一项很重要的指标是等效方向性 D (directivity),其定义为

$$D = \frac{S_{32}}{S_{31}}$$

它表示了定向耦合器正向和反向传输时,在耦合端口的信号的差别。

对于 n 口网络,需要用 n^2 个 S 参数来描述其特性。

网络之间互相连接时,也可以用信号流图表示出组合网络中各信号之间的关系。比如一个双口网络,其 S 参数为 S_{11}, S_{21}, S_{12} 和 S_{22} ,和一个负载连接,负载的反射系数为 Γ_L ,则用信号流图表示如图 1.5。

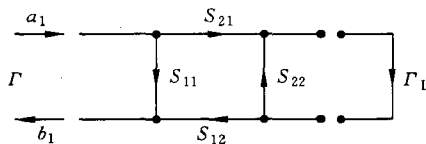


图 1.5 用流图表示组合网络

信号流图表示法简便、直观且便于分析计算组合网络的特性参量。以图 1.5 为例,组合网络的反射系数

$$\Gamma = \frac{\text{反射波}}{\text{入射波}} = \frac{b_1}{a_1}$$

根据信号流图的 Mason 不接触环路法则(此法则在 1.2.2 节中介绍),可以直接写出 Γ 的表达式,即有

$$\Gamma = S_{11} + \frac{S_{21}S_{12}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (1.2)$$

1.2.2 用 Mason 法则分析计算网络参数

用信号流图分析计算组合网络特性时要用到 Mason 不接触环路法则,该法则可简述如下:

$$T = \frac{\sum_m P_m \Delta_m}{\Delta}$$

其中, T 为输出点信号与输入点信号之比,称为信号流图的增益或传输量; Δ 为原图的行列式, $\Delta = 1 - \sum L_k + \sum L_k^2 - \sum L_k^3 + \dots$, 而 L_k, L_k^2 和 L_k^3 分别为一阶、不相接触的二阶和三阶环路增益; P_m 是从输入点到输出点的第 m 条路径上各支段系数的乘积; Δ_m 是和第 m 条路径不相接触的子图行列式。

我们以图 1.5 的组合网络为例来说明 Mason 法则的用法。由图 1.5 有

$$\Gamma = \frac{b_1}{a_1}$$

整个图中只有一个环路 $S_{22}\Gamma_L$, 所以

$$\Delta = 1 - S_{22}\Gamma_L$$

从输入点到输出点共有两条路径, 即有

$$\begin{aligned} P_1 &= S_{11}, & \Delta_1 &= 1 - S_{22}\Gamma_L \\ P_2 &= S_{21}S_{12}\Gamma_L, & \Delta_2 &= 1 \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{S_{11}(1 - S_{22}\Gamma_L) + S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \\ &= S_{11} + \frac{S_{21}S_{12}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \end{aligned}$$

这就是 1.2.1 节中的式(1.2)。

1.3 S 参数的测量原理及系统

由以上的讨论可知, 任何网络都可以用 S 参数来表示其特性。因此, 为了全面地了解一个网络, 必须测出它的 S 参数。由于 S 参数为复数量, 所以需要测出 S 参数的幅度和相位。此外, 由于微波 CAD 的要求, 测出的 S 参数要有一定的精确度。例如, 设计一个微波放大器时, 必须具有微波晶体管在某个频段内的准确的 S 参数数据, 才能设计出输入输出匹配的网络。在微波通信系统中, 为了保证传输系统无失真地传输信息, 对系统中的各个部件或分机的频率特性, 包括幅度特性和相位特性, 必须有详尽的了解, 这就需要对这些部件进行测量。

S 参数是频域里的量, 一旦测出了网络在若干频率下的 S 参数, 就可以用数学的方法变换到时域, 得到时域里的量, 从而获得关于网络的更多信息。

常用来测量 S 参数的设备称为网络分析仪(network analyzer), 因为测量 S 参数时不仅要测幅度, 而且还要测相位, 因此又称之为矢量网络分析仪(vector network analyzer), 而只能测幅度的网络分析仪称为标量网络分析仪(scalar network analyzer)。

下面的 1.3.1 节讨论 S 参数测量的基本原理及系统。

1.3.1 反射参数测量系统

S 参数中的 S_{11} 和 S_{22} 用来描述网络端口的反射特性, 对 S_{11} 和 S_{22} 的测量要使用反射参数测试系统, 图 1.6 为其组成框图。由图可见, 信号经二电阻式功率分配器分为两路, 一路为参考信号 R , 另一路则通过一个定向耦合器的主传输线加于待测件(DUT, device under test), 由 DUT 端口反射回来的信号则经耦合端口作为测试信号 T 。

设信号源的出射波为 E_s , 电阻式功率分配器的分配系数分别为 c_1 和 c_2 , 投向 DUT 的入射波为 a_1 , 参考通道的信号为 R 。定向耦合器将负载反射波 b_1 耦合到测试通道, 信号为 T , 耦合系数为 c_3 。于是可以写出

$$R = c_1 E_s, \quad a_1 = c_2 E_s, \quad b_1 = \Gamma_L a_1, \quad T = c_3 b_1$$

因而

$$\frac{T}{R} = \frac{c_3 b_1}{c_1 E_s} = \frac{c_3 c_2}{c_1} \Gamma_L$$

可见,只要设法测出 T/R 的复数比值,便能得出 DUT 的反射系数 Γ_L ,而系数 $c_2 c_3 / c_1$ 为常数,可通过校准而消除之。图 1.6 中的幅相接收机便是求矢量信号 T 与 R 比值的设备。

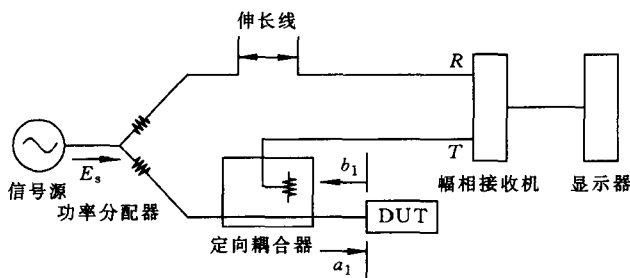


图 1.6 反射参数测量系统

幅相接收机对输入的两路射频信号 R 和 T 先进行混频,然后在低频下进行幅度比较和相位比较,结果在显示器上示出。

该系统中使用的功率分配器和定向耦合器是两个重要的微波部件,前者的作用是把信号源的输出信号分成两路,分别作为参考信号和测试信号;后者的作用是把测试信号加于 DUT 的测试端口,并取出反射信号。

图 1.6 中,在参考通道内接有一伸长线。所谓伸长线就是一段长度可变的传输线,其用途是补偿两个通道的传输路径差。在系统校准时,起相位补偿的作用。

参考信号不经过 DUT,直接到了幅相接收机,而测试信号则由于定向耦合器的作用,经过 DUT 的端口反射,因而其幅度和相位均与 DUT 的反射特性有关。接收机对两路信号进行幅度和相位比较的结果就反映了 DUT 的端口反射特性。

1.3.2 传输参数测量系统

表征网络传输特性的参量是 S_{21} 和 S_{12} ,对它们的测量要使用传输参数测量系统,如图 1.7。传输参数测量的原理和反射参数测量的原理相同,不再详述。不同之处是待测件 DUT 串接在测试信号通路之中(图 1.7),这是测传输特性所必须的。

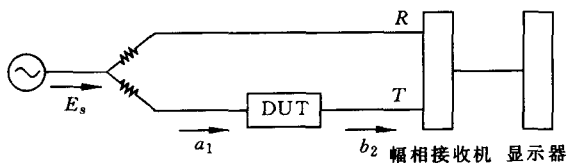


图 1.7 传输参数测量系统

以图 1.7 为例,设功率分配器的功率分配系数分别为 c_1 和 c_2 ,DUT 的传输系数为 S_{21} ,由图可以写出

$$R = c_1 E_s, \quad a_1 = c_2 E_s, \quad b_2 = S_{21} a_1 = c_2 E_s S_{21} = T$$

于是有

$$\frac{T}{R} = \frac{c_2}{c_1} S_{21}$$

因此,只要测出 T/R ,即可得到 DUT 的传输系数 S_{21} 。可见,在反射测量和传输测量系统中,都要使用功率分配器(电阻式或定向耦合器式)和定向耦合器等微波部件,以及微波幅相接收机。功率分配器的作用是把信号分为两路,一路为参考信号 R ,直接进入接收机,另一路要经过 DUT 的反射或传输成为测试信号 T 。接收机的作用是测出两路信号的幅度之比和相位之差,这种接收机称为双通道的幅相接收机,也称求比值系统。

1.3.3 幅相接收机

幅相接收机由两个通道,即参考通道和测试通道组成,输入到两个通道的射频信号 RF 分别为参考信号 R 和测试信号 T 。幅相接收机的作用就是测出这两路信号的幅度之比和两路信号的相位之差。幅相接收机中幅度测量的原理如图 1.8。

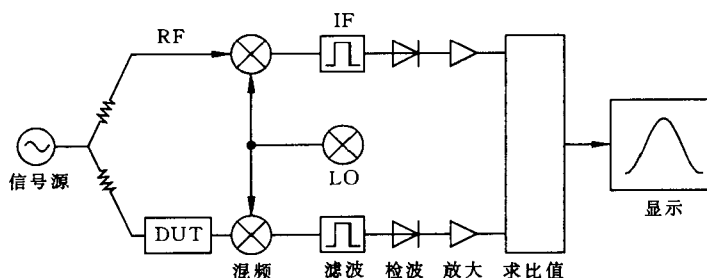


图 1.8 幅度测量

频率较高的 RF 参考信号和测试信号分别和本地振荡信号 LO 进行混频,下变频到频率较低的中频(IF),经过 IF 滤波、检波、放大和求比值电路,求出两个幅度之比值,然后在显示器上示出。

相位测量的原理如图 1.9,与幅度测量不同的是两路信号在经过 IF 滤波后直接送到相位检波器,求出两路信号的相位之差。相位显示的范围是 $\pm 180^\circ$ 。

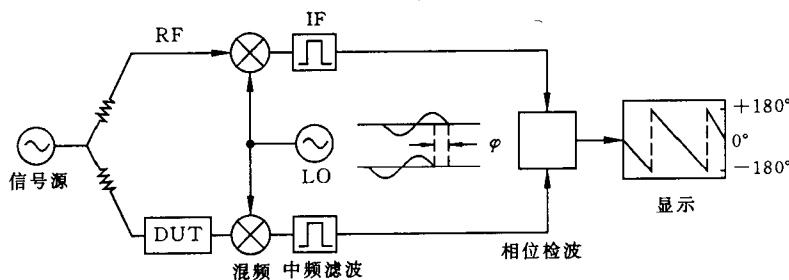


图 1.9 相位测量

综上所述,幅相接收机有以下特点:

(1) 在接收机中,先对 RF 变频,移频到低端,保留幅度和相位信息,然后在固定的低