

高等学校电子信息类教材

现代微波工程测量

王培章 朱卫刚 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息类教材

现代微波工程测量

王培章 朱卫刚 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书从微波信号的产生、微波信号的特性分析、微波网络和阻抗参数的测量,以及天线的辐射特性参数的测量四个方面,系统地介绍了微波测量的主要内容。全书共分11章,内容涉及微波测量的意义和特点、微波信号源、矢量信号源和分析仪、微波信号频谱分析仪、微波信号特性测试、微波信号频率测量、微波信号的功率测量、微波噪声测量、微波网络散射参数测量、微波电路测量、微波阻抗与网络参数、天线测量、微波电缆及连接头等。

本书取材新颖,内容广泛,反映了当前微波测试技术的新成就。既可以作为高等工科院校通信工程、电子工程等专业学生的教学用书,也可作为从事电子工程的技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代微波工程测量 / 王培章, 朱卫刚编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.5

高等学校电子信息类教材

ISBN 978-7-121-23081-3

I. ①现… II. ①王… ②朱… III. ①微波测量—高等学校—教材 IV. ①TM931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 083922 号



策划编辑: 窦 昊

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 北京季峰印刷有限公司

装 订: 北京季峰印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.5 字数: 423 千字

印 次: 2014 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

“现代微波工程测量技术”是本科电类各专业的一门技术实践基础课。各类无线通信设备从研究、设计、制造到调试、维修的各个阶段，都需要测量许多电参数，微波工程测量技术是现代无线通信的关键技术之一，在现代无线电子系统中占据举足轻重的地位。本书的任务是使学生掌握微波工程测量的原理和方法，掌握常用微波仪器的工作原理和测量方法，为今后从事科学研究和工程实践打下坚实的基础。本书综合了微波测量和天线测量技术，着力培养学生综合运用所学知识解决微波工程测量问题的能力，提高读者发现、分析、解决问题和实践动手能力，突出增强利用现代信息技术，并为读者向其他学科领域扩展打下基础。

“现代微波工程测量技术”这门课具有较强的理论性和实践性，其目的是使学生掌握现代微波测量的基础理论和微波测量仪器的原理与应用，在科学实验或生产实践中能制定先进的测试方案，合理选用测量仪器，正确处理测量数据，培养学生实验和工程应用的方法和技能。

本教材的主要内容是微波信号参数测量和天线参数测量的基本原理和方法。主要内容有：微波信号源、微波信号频率测量、微波信号的功率测量、微波信号频谱分析、微波噪声测量、微波网络散射参数测量、微波阻抗与网络参数、天线测量、无源互调测量；介绍的仪器有矢量信号分析仪、频谱分析仪、矢量网络分析仪、噪声系数分析仪、微波功率计、移动通信综合测试仪、计算机网络协议测试仪、网络线缆综合测试仪等。具体内容包括对仪器的功能、用途的总体概述，仪器的基本工作原理和关键的技术概念，主要技术性能和指标，操作使用方法及使用维护注意事项等。由于微波与天线测量技术综合应用了电子、计算机、通信、控制等技术，因此在内容安排上注意经典测试理论与现代测试方法相结合、传统测试技术与最新的信息科学技术相结合。同时，与其他相关课程内容（电磁场与微波技术、天线原理等）的处理上，充分体现出它们的有机联系和综合应用。本书对测量原理的讲解力求深入浅出，突出基本概念；对测量方法的讨论侧重于比较、总结，突出实用性；对误差分析力求避免烦琐的数学推导，突出对公式的理解和具体应用。

本书内容丰富，叙述精练，注重基础理论与实际应用的结合，经典内容与最新前沿动态的结合，适应当前教学的需要，适应人才培养的需要。为适应教学的需要，大部分章后附有习题。本书可指导和帮助测量使用与维修人员进行正确的操作，同时也可供院校教学、科研、实验及技术人员学习参考。书中所收录的仪器均为最新的常用微波测量仪器，具有一定的先进性和代表性。

本教材的教学参考学时为 20~40 学时，在实际授课时，可根据具体情况对内容进行选取。使用本教材时应加强实践环节，需要开设相应的实验课程，有条件的学校可由学生自拟实验方案，开出若干实验选题或开放性实验，以进一步提高学生解决生产和科研实践中微波测量问题的能力。

在本书的编写过程中，参考、引用了同类教材的相关内容，以及同行们的部分科研成果，参考了美国安捷伦公司、青岛 41 所的有关技术资料和其他相关技术资料，除在参考文献列出外，在此向这些书刊资料的作者和科研成果的获得者致以深深的感谢。

本教材由王培章教授编写第 1~8 章和第 11 章并负责统稿全书，朱卫刚编写了第 9、10 章，由于编者水平有限，错漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 微波测量概论	1
1.1 微波测量的意义	1
1.2 微波测量的特点	1
1.3 微波与天线测量的基本任务	2
1.4 微波测量仪器分类	4
1.5 微波毫米波信号分析仪发展现状	5
1.6 现代微波测量技术发展的新趋势	8
1.7 分贝表示法	11
第 2 章 微波信号源	14
2.1 微波信号源的分类	14
2.2 模拟式微波扫频信号源	15
2.2.1 扫频信号源的基本概念	15
2.2.2 微波扫频信号的产生	15
2.2.3 微波扫频信号源的控制	17
2.3 微波合成扫频信号源	19
2.4 频率捷变信号发生器	22
2.4.1 频率捷变信号发生器的基本概念	22
2.4.2 频率捷变信号发生器的主要实现方法	22
2.5 频率捷变信号发生器的基本工作原理	24
2.5.1 单环宽带锁相环路技术	24
2.5.2 宽带锁频环路技术	25
2.5.3 跳频输出时的幅度控制技术	27
2.5.4 利用全数字合成技术的捷变信号发生器	27
2.6 微波信号源的性能指标	30
2.7 微波信号发生器的典型产品	32
2.8 典型产品 AV1450C 系列微波信号发生器	36
2.9 微波信号发生器的典型应用	38
本章小结	43
习题	43
第 3 章 矢量信号源和分析仪	44
3.1 数字调制信号源	44
3.1.1 基本工作原理	44
3.1.2 I/Q 调制基础	45
3.1.3 数字调制模块	48

3.1.4	频率合成模块	51
3.1.5	射频变换模块	51
3.1.6	整机软件模块	53
3.2	矢量信号分析的技术背景	54
3.3	矢量信号分析基本工作原理	57
3.3.1	矢量信号分析基本模型	57
3.3.2	观测数字调制信号的几种方法	57
3.3.3	矢量信号误差分析	59
3.3.4	硬件总体方案及主要工作原理	60
3.3.5	整机软件总体方案	62
3.3.6	射频/微波变频模块	63
3.3.7	中频数字化模块方案和工作原理	64
3.3.8	数字中频 I/Q 解调模块方案和工作原理	65
3.3.9	矢量信号分析算法	66
3.4	主要技术性能和指标	67
3.5	典型产品介绍	68
本章小结		71
习题		71
第 4 章	微波信号频谱分析仪	72
4.1	概述	72
4.2	信号的频谱	73
4.2.1	频谱分析的基本概念	73
4.2.2	周期信号的频谱	73
4.2.3	非周期信号的频谱	76
4.2.4	离散时域信号的频谱	77
4.3	频谱分析仪原理	78
4.3.1	频谱分析仪概述	78
4.3.2	快速傅里叶变换分析仪	79
4.3.3	相位噪声在射频通信中的影响	80
4.3.4	整机工作原理	84
4.3.5	频谱分析仪的主要技术性能和指标	88
4.4	微波频谱仪的典型应用	93
4.5	频谱分析仪毫米波扩频测量原理	100
4.5.1	谐波混频与外扩频技术概述	100
4.5.2	扩频频谱分析仪结构与原理	100
4.5.3	外扩频关键技术实现	102
4.5.4	实时频谱分析仪	103
4.6	毫米波信号分析仪新技术与发展趋势	104

4.6.1 微波毫米波信号分析仪发展现状	104
4.6.2 新的测试分析技术不断涌现	105
本章小结	107
习题	107
第 5 章 矢量网络分析仪	108
5.1 微波网络的散射参数——S 参数	108
5.1.1 S 参数的概念	108
5.1.2 S 参数的定义	111
5.2 矢量网络分析仪的基本原理	112
5.3 网络分析仪的基本结构	115
5.4 主要技术性能和指标	121
5.5 典型产品介绍	124
5.6 微波矢量网络仪的典型应用	126
5.6.1 滤波器的测试	127
5.6.2 放大器的测试	129
5.6.3 相位测量	130
5.6.4 放大器参数说明	131
5.6.5 增益压缩	132
5.6.6 线性相位偏离	133
5.6.7 反向隔离	133
5.6.8 小信号增益和平坦度	134
5.6.9 微波混频器的测试	135
5.6.10 嵌入网络 S 参数的测试	135
5.6.11 网络分析仪使用技巧——灵活的扫描方式	136
本章小结	137
习题	137
第 6 章 噪声系数分析仪	138
6.1 概述	138
6.2 相关基础知识	138
6.3 基本工作原理	143
6.4 AV3984 微波噪声系数分析仪整机工作原理	146
6.5 典型产品介绍	149
本章小结	151
习题	151
第 7 章 微波功率计	152
7.1 微波功率计概述	152
7.2 微波功率测量原理	153

7.2.1	功率的基本定义	153
7.2.2	功率测量的度量单位	154
7.2.3	微波功率测量原理	155
7.2.4	功率探头的校准	156
7.3	微波功率计的工作原理	158
7.3.1	传感微波功率的三种方法	158
7.3.2	热敏电阻功率探头及其功率	158
7.3.3	热电偶功率探头及其功率计	159
7.3.4	二极管功率探头及其功率计	161
7.4	微波功率分析仪整机工作原理和特点	163
7.4.1	整机工作原理及框图	163
7.4.2	整机特点和主要功能	164
7.5	主要技术性能和指标	165
7.6	典型产品介绍	168
	本章小结	170
	习题	170
第 8 章	微波电路参数测试	171
8.1	无源互调测量	171
8.2	双工器和多工器	171
8.3	低噪声放大器	172
8.4	功率放大器	175
8.4.1	功率放大器的基本指标	175
8.4.2	功率放大器的谐波测量	180
8.4.3	放大器的正向互调失真测量	181
8.5	射频功率的测量	182
8.5.1	终端式测量法	182
8.5.2	数字调制信号功率的测量	182
8.6	变频器和混频器测试技术方案	185
8.7	微波电路系统级参数测试	186
8.8	微波频率源测试	186
第 9 章	微波信号特性测试	188
9.1	测量线法测量微波网络参数	188
9.1.1	测量线的基本结构及测量线测量系统的组成	188
9.1.2	测量线测量反射参数	190
9.2	晶体定标	190
9.3	用测量线测量驻波分布与波长	194
9.3.1	实验目的和实验内容	194
9.3.2	实验原理和方法	195

9.3.3 实验步骤	197
9.4 驻波测量	199
9.4.1 驻波测量实验原理和方法	199
9.4.2 驻波测量步骤	203
习题	205
第 10 章 微波天线特性测试	206
10.1 概述	206
10.2 天线测试场	207
10.2.1 自由空间测试场	207
10.2.2 微波屏蔽室	209
10.3 天线方向图测量	210
10.3.1 振幅方向图测量	210
10.3.2 八木天线方向图的测试	212
10.3.3 抛物面天线方向性的测量	215
10.4 天线增益测量	216
10.4.1 天线增益测量概述	216
10.4.2 天线增益测量方法	217
10.5 天线的极化测量	220
10.6 采用频谱分析仪的测量系统	227
10.7 采用网络分析仪的天线幅-相测量系统	227
10.8 天线近场测试系统	231
10.8.1 近场测量技术	231
10.8.2 天线近场测试系统组成	233
10.8.3 硬件分系统	234
10.8.4 软件分系统	236
10.9 毫米波天线测试系统	237
习题	238
第 11 章 射频同轴电缆和连接器	239
11.1 射频同轴电缆的构造、类型和特性	239
11.1.1 同轴电缆的特性	239
11.1.2 射频电缆类型	240
11.2 射频同轴连接器的构造、类型和特性	243
11.2.1 连接器的选择	243
11.2.2 射频连接器	245
11.2.3 射频转接头	247
本章小结	252
参考文献	253

第1章 微波测量概论

射频微波电路是构成通信系统、雷达系统和其他微波应用系统中的发射机和接收机的关键部件。经过半个多世纪的发展,各种电路的原理日趋成熟,结构形式多样。现代微电子技术和电子材料的不断进步,使得各类接收机和发射机的体积越来越小,功能越来越强。最典型的是个人无线通信,也就是手机。可以说,手机代表了当今世界科学领域的各种成就。在这个小小的塑料盒内,集中反映了在电源及电源使用效率、数字电路、模拟电路、半导体技术、信号处理、材料科学、结构工艺等领域的人类智慧,这些内容的核心是射频微波模拟电路。

1.1 微波测量的意义

各类无线通信设备从研究、设计、制造到调试、维修的各个阶段,都需要测量许多电参数,微波工程测量技术是现代无线通信的关键技术之一,在现代无线通信中占据举足轻重的地位。本书有机综合了微波测量和天线测量技术。一定程度上拓展了通信类各专业学生测量知识并提高了实践技能。通过本书的学习,可使学生掌握微波工程测量的基本原理,掌握常用微波仪器的工作原理和测量方法,提升工程意识,开阔视野和思路,提高发现、分析、解决问题和实践动手能力,突出增强利用现代信息技术,并为学生向其他学科领域扩展打下基础。

微波与天线测量技术是电磁场与微波技术学科的重要组成部分,它与微波理论和天线理论相辅相成,并与其他工程技术一样,随着科学技术的发展而日趋重要;即使在微波理论和天线理论已趋于成熟的今天,在进行理论研究、设计和研制过程中,往往都要根据实际测量结果来解决有关技术问题,所以微波与天线测量技术依然是解决微波技术和天线问题的重要途径,特别是微波与天线技术中某些理论上难以进行定量分析的新课题,更依赖于实验数据和曲线进行分析研究。

1.2 微波测量的特点

在频率低于微波的频段,电路的几何尺寸通常远小于波长,属于集中参数电路,便于测量的电压、电流及频率是研究低频和高频电路的基本测试量。

但是天馈系统和微波元器件的几何尺寸通常和工作波长相比拟,从电路观点看它们均属于分布参数电路,其电压、电流的概念已失去原来的物理意义。馈线和微波元器件必须用场的概念逐点、连续地描述它们所在空间场的分布规律,所以便于计量的场分布(驻波)、功率和频率就成了最基本的三个测试量,并通过这三个基本量的测试可以导出其他有用参量。当然,测量空间每一点场强的绝对值仍然是困难的,但测量其相对值比较方便而且也是实际所需要的,因此表征场分布规律的反射系数或驻波比,以及方向图和增益就成了微波和天线测量中非常重要的参数。

由于微波波段本身的特点使得它们无论在测量任务和测量方法,还是所用的测量仪器方

面都有一些与低频和高频测量不同的地方。例如信号的产生使用专用的真空管器件，如磁控管及微波固态器件等；一般测试所用的辅助元器件多是分布参数的元器件，如隔离器、衰减器、移相器、定向耦合器、阻抗变换器及谐振腔等；而电磁波的检测一般采用晶体检波器。因此，在测量中对微波仪器及辅助元器件特性的了解和正确使用与测量准确度有很大关系。

1.3 微波与天线测量的基本任务

射频微波电路可分为以下三大类。

(1) 微波无源电路：如金属谐振腔滤波器、介质腔滤波器、微带滤波器、功率分配器、耦合器、程控衰减器等。

(2) 微波有源电路：如微波放大器、微波振荡器、微波调制解调器、开关、移相器、混频器、倍频器、频率合成器，功率放大器等。

(3) TR 组件：由上述多种元器件构成的微波发射接收功能模块，或称 TR 组件。

随着半导体技术的发展，MMIC 已大量进入工程使用阶段。在元器件体积足够小的情况下，射频微波的概念可以适当淡化，像普通低频电路一样进行电路设计，但要使用微波印制板。设计 MMIC 的偏置电路时，在射频微波引线段考虑匹配。新型微波材料主要特点是环境适应性强、高介电常数、低损耗介质。高介电常数介质的使用，可以缩小微带电路的结构尺寸。为了实现上述各个电路的功能，需要解决的核心问题有三大主要方面：频率、阻抗和功率。

由于频率、阻抗和功率是贯穿射频微波工程的三大核心指标，将其称为“射频铁三角”能够形象地反映射频微波工程的基本内容。这三个方面既有独立特性，又相互影响。这就是射频微波工程的核心问题。三者的关系可以用图 1.1 表示。

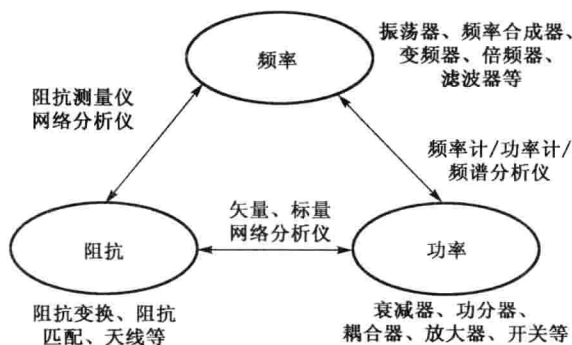


图 1.1 射频铁三角

这三个方面涵盖了射频微波工程中全部内容，下面给出对它们的解释。

1. 频率

频率是射频微波工程中最基本的一个参数，对应于无线系统所工作的频谱范围，也规定了所研究的微波电路的基本前提，进而决定微波电路的结构形式和器件材料。直接影响频率的射频微波电路如下：

(1) 信号产生器，用来产生特定频率的信号，如点频振荡器、机械调谐振荡器、压控振荡器、频率合成器等。

(2) 频率变换器, 将一个或两个频率的信号变为另一个所希望的频率信号, 如分频器、变频器、倍频器、混频器等。

(3) 频率选择电路, 在复杂的频谱环境中, 选择所关心的频谱范围。经典的频率选择电路是滤波器, 如低通滤波器、带通滤波器、高通滤波器和带阻滤波器等。近年发展起来的高速电子开关由于体积小, 在许多方面取代了滤波器实现频率选择。

在射频微波工程中, 这些电路可以独立工作, 也可以相互组合, 还可以与其他电路组合, 构成射频微波电路子系统。这些电路的测量仪器有频谱分析仪、频率计数器、功率计、网络分析仪等。

2. 功率

功率用来描述射频微波信号的能量大小, 所有电路或系统的设计目标都是实现射频微波能量的最佳传递。对射频微波信号功率产生影响的主要电路有:

(1) 衰减器, 控制射频微波信号功率的大小。通常由有耗材料(电阻性材料)构成。有固定衰减量和可调衰减量之分。

(2) 功分器, 将一路射频微波信号分成若干路的组件, 可以是等分的, 也可是按比例分配的, 希望分配后信号的损失尽可能小。功分器也可用做功率合成器, 在各个支路口接同频同相等幅信号, 在主路叠加输出。

(3) 耦合器, 定向耦合器是一种特殊的分配器。通常是耦合一小部分功率到支路, 用以检测主路信号工作状态是否正常。分支线耦合器和环形桥耦合器实现不同相位的功率分配合成, 配合微波二极管, 完成多种功能微波电路, 如混频、变频、移相等。

(4) 放大器, 提高射频微波信号功率的电路。在射频微波工程中地位极为重要。用于接收中是小信号放大器, 低噪声高增益贯穿设计任务的始终。用于发射中是功率放大器, 为了满足要求的输出功率, 不惜器件和电源成本。用于测试仪器中的放大器, 完善和丰富了仪器的功能。

3. 阻抗

阻抗是在特定频率下, 描述各种射频微波电路对微波信号能量传输影响的一个参数。构成电路的材料和结构对工作频率的响应决定电路阻抗参数的大小。工程实际中是设法改进阻抗特性, 实现能量的最大传输。所涉及射频微波电路有:

(1) 阻抗变换器, 增加合适的元件或结构, 实现一个阻抗向另一个阻抗的过渡。

(2) 阻抗匹配器, 是一种特定的阻抗变换器, 实现两个阻抗之间的匹配。

(3) 天线是一种特定的阻抗匹配器, 实现射频微波信号在封闭传输线和空气媒体之间的匹配传送。

射频铁三角渗透到了射频微波工程的各个角落。利用网络的概念, 保证加工工艺, 借助性能优越的测量仪器, 设计调试电路单元, 是解决射频微波工程问题的唯一途径, 射频微波工程的核心问题就是建立稳定可靠的铁三角。无论电磁场理论的方法还是等效网络的方法都可归结为折中处理频率、阻抗和功率的关系。

微波与天线的测量任务是很广泛的, 但按照待测参数可分为以下三个方面。

(1) 信号特性参数的测量: 包括信号的频率和波长、场强和功率、波形与频谱、振荡器的振荡特性和接收机的噪声系数等。

(2) 网络特性参数的测量：主要有反射特性参数和传输特性参数。前者包括网络散射参数反射系数、阻抗以及反射系数模有关的插入损耗和驻波比等；后者包括网络散射参数以及决定的衰减和相移等。

(3) 天线特性参数的测量：天线主要有两方面的特性，即电路特性和辐射特性。前者与馈电电路特性有关，包括输入阻抗、频率特性、效率和匹配等；后者与辐射特性有关，包括方向图、主瓣宽度、副瓣电平、增益、方向性系数、极化、相位特性，以及有效面积、有效高度等。

1.4 微波测量仪器分类

稳态信号测量：功率，频率，频谱。

瞬态信号测量：复杂电磁环境、调制样式、跳变模式、信息含量等参数测量。

图 1.2 为微波测量仪器分类。

1. 信号分析仪

信号分析仪包括频谱分析仪、矢量信号分析仪、调制域分析仪、调制度分析仪、动态信号分析仪、EMC 分析仪。

信号分析仪主要用于射频信号特征、质量的分析，频谱分析仪的本振是高性能频率合成源。

预选频混频技术：26.5 GHz 以下采用单 YIG，26.5 GHz 以上采用双 YIG，毫米波波导频谱仪采用外加混频器模块。

微波毫米波相位噪声的两种测试方法包括：① 直接频谱分析法（频谱分析仪）；② 先解调，后分析法（相位噪声测试仪）。

相位噪声测试仪的关键技术包括：① 频率变换技术；② 相位解调技术；③ 相位噪声特性曲线的测试。

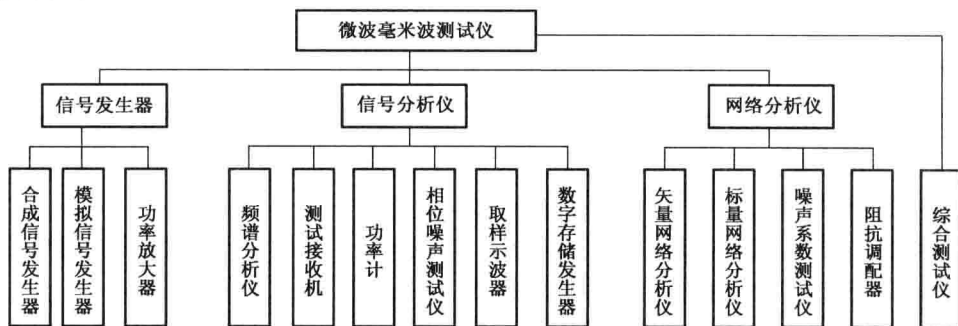


图 1.2 微波测量仪器分类

2. 测量接收机

测量接收机包括场强接收机、EMI 测试接收机、瞬时测频接收机、测向接收处理机、TEMPEST 接收机。

3. 信号源

一般经济型扫频发生器将退出历史舞台，取而代之的是频率合成技术——频率合成器：已有专用集成块，且具有高分辨率。

锁相式频率合成器、DDS 频率合成器、YIG 振荡器+倍频方案、双 YIG 振荡器+倍频方案。倍频方案的相位噪声有恶化趋势，在 3 mm 或更高频段也可直接采用基波振荡器（宽带速调管，窄带固态振荡器），可提高功率输出，抑制杂波。

4. 网络分析仪

网络分析仪包括矢量网络分析仪和标量网络分析仪。

表 1.1 为微波毫米波测试用传输线和射频连接。

表 1.1 微波毫米波测试用传输线和射频连接

同轴测试仪器		波导测试仪器	
同轴连接器	频率范围	波导	频率范围
N 型	DC~18 GHz	WR-42	18~26.5 GHz
7 mm	DC~18 GHz	WR-28	26.5~40 GHz
SMA (3.5 mm)	DC~26.5 GHz	WR-22	33~50 GHz
K (2.95 mm)	DC~40 GHz	WR-19	40~60 GHz
2.4 mm	DC~50 GHz	WR-15	50~75 GHz
V (1.85 mm)	DC~60 GHz	WR-10	75~110 GHz
1.0 mm	DC~110 GHz	WR-6	110~170 GHz

1.5 微波毫米波信号分析仪发展现状

随着微波毫米波技术的快速发展，现代雷达系统和各种军民用通信网络等为了防止干扰、改善系统容量和性能而变得日益复杂。其中生成和分析信号的复杂性正以指数方式增长，频段越来越高，带宽越来越宽，调制方案越来越复杂。面对射频微波毫米波技术的不断发展，对应的测试测量设备也必须与之保持同步，才能满足不同用户的多种测试需求。

作为信息源头测试的微波毫米波信号分析仪是射频微波领域应用最广泛的仪器之一。典型的微波信号分析仪有频谱分析仪、矢量信号分析仪、调制域和时频分析仪等。过去，频谱分析仪可以观察到功率与频率之间的相关信息，有时还能对 AM、FM 和 PM 之类的模拟格式进行解调，对于大多数一般性应用来讲已经足够。矢量信号分析仪可分析宽带波形并从感兴趣的信号中捕获有关时间、频率和功率方面的数据。调制域和时频分析仪可以分析信号频率随时间的变化与分布等。虽然现在大多数新的分析仪在仪器中同时内置了频谱分析和矢量调制分析等多种功能，但是面对越来越复杂的测试需求已经开始显得力不从心。例如，瞬变信号测试、微弱信号测试、复杂调制信号测试和混叠信号测试等，这给现代的信号分析仪器和设备提出了新的挑战。

对于射频与微波频段阻抗匹配、信号的串扰等问题，数字电路中万用表和示波器能满足大多数工程测试要求，但在射频与微波频段，这两种常用仪表却无用武之地，取而代之的是信号源、频谱分析仪、网络分析仪、噪声系数测试仪、功率计和频率计六大类测试仪器。其中，频谱分析仪、信号源和网络分析仪复杂程度最高，技术难度最大。从测试原理上讲，六大类测试仪器中各类仪器之间是互相独立、不可替代的。随着测量仪器综合化的发展，各类测试仪器都在不断地扩展功能、提高性能指标，应用范围已开始出现交叉，各类仪器之间的界限也开始变得模糊。

矢量网络分析仪将激励源、S 参数测试装置和幅相接收机有机地结合在一起，对微波传输、反射测量中的误差进行修正，实时数据处理，实现了同轴频率范围 40 MHz~60 GHz、频率分

分辨率 1 Hz、幅度准确度 0.1 dB、相位准确度 0.5° 。具有 USB 控制的电校准 (ECal) 带有为 TRM/LRM 校准提供的高稳定度接收器, 以及提供扩展动态范围的标准直接接收机接入。波导测量系统频率上限达到 178 GHz, 在波导测试系统中也实现了双向 S 参数测量。

在突破扫频测量与误差修正等关键技术后, 矢量网络分析仪 (VNA) 在高效、快速和多参数测量方面取得了显著进步。分体式 VNA 20 世纪 90 年代趋于成熟并一直作为工业标准使用, 虽然分体式 VNA 的构成比较繁杂, 但频段覆盖很宽, 达到 0.045~110 GHz, 测量精度也很高。一体化结构的 VNA 集成了激励信号源、S 参数测试装置和多通道高灵敏度幅相接收机, 实现了高性能和超宽带分析 (见图 1.3)。全新的硬件设计方案使测量速度和性能有了极大的提高, 具有奔腾芯片的嵌入式计算机和 Windows 操作系统的引入, 使互连性和自动化程度有了质的飞跃。在测量速度、测试精度、动态范围、人机界面、智能化程度、稳定性、可靠性和重复性等方面具有明显的优势。二端口 VNA 的指标达到: 频率范围 10 MHz~20/40/67/110 GHz (可扩到 325 GHz)、频率分辨率 1 Hz、动态范围 61~122 dB、迹线噪声 0.006 dB/0.1, 具有频域和时域测试能力。67~110 GHz 还是分体式, 但已大大简化了系统结构。

频率合成信号发生器的同轴频率覆盖范围可从 10 MHz 到 50 GHz, 配合倍频器模块, 波导上限频率可达 110 GHz。综合采用了频率合成、小数分频 API 补偿、 $\Sigma-\Delta$ 调制、YIG 调谐倍频、软件平坦度补偿等先进技术, 并在“锁滚”式合成扫频的基础上采用了终止频率校准。分辨率为 0.01 Hz, 开关时间为 5 ms, 单边带相噪为 -98 dBc/Hz (载波 10 GHz, 1 kHz 频偏), 最大输出功率为 +20 dBm (20 GHz) 和 +14 dBm (40 GHz)。在追求高功率、大范围、低谐波的同时, 综合优化了频率转换时间、调制功能和功率平坦度等技术指标。频谱分析仪解决了宽带预选器、变频组件、程控步进衰减器、采样器、YIG 振荡器和 YIG 滤波器等宽带微波件的设计制造技术 (见图 1.4)。已经实现频率范围 3 Hz~60 GHz, 灵敏度 -153/-166 dBm, 幅度准确度 0.62 dB, 平坦度 ± 0.38 dB, 对数线性误差 +0.07 dB 和 1 ms 的扫描时间。运用了数字中频、内置校准信号源、自动校准程序 (含温度变化)、分挡 PAD 校准补偿等先进技术。可以测量移动通信中使用的调制信号的平均功率及总功率, 还可以进行邻信道泄漏功率测试。

毫米波基波频率合成信号发生技术

实现毫米波、亚毫米波频段的扩展通常采用倍频方案或基波方案。目前, 同轴频率覆盖达到 250 kHz~67 GHz, 配合倍频器模块, 上限频率可扩展到 110 GHz (波导口输出)。以返波管 (BWO) 作为主振单元实现基波输出具有明显的大功率特色。国外的 BWO 信号源系列已经从 30 GHz 覆盖到 1000 GHz。我国在理论设计、HFSS 高频结构仿真和精密机械加工技术等方面都有显著的进展, 已经突破 2 mm 器件设计制造技术、2 mm 基波锁相与电平自适应技术、锁相跟踪扫频技术等关键技术。实现了 110~170 GHz 的 2 mm 波段基波频率覆盖, 6 dBm 大输出功率、1 Hz 频率分辨率和 -75 dBc/Hz (频偏 10 kHz) 单边带相噪。

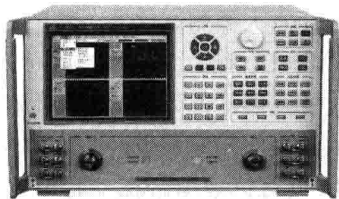


图 1.3 AV3629 型射频一体化矢量网分析仪

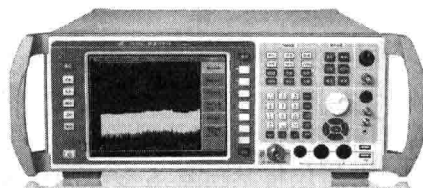


图 1.4 AV4036 频谱分析仪