

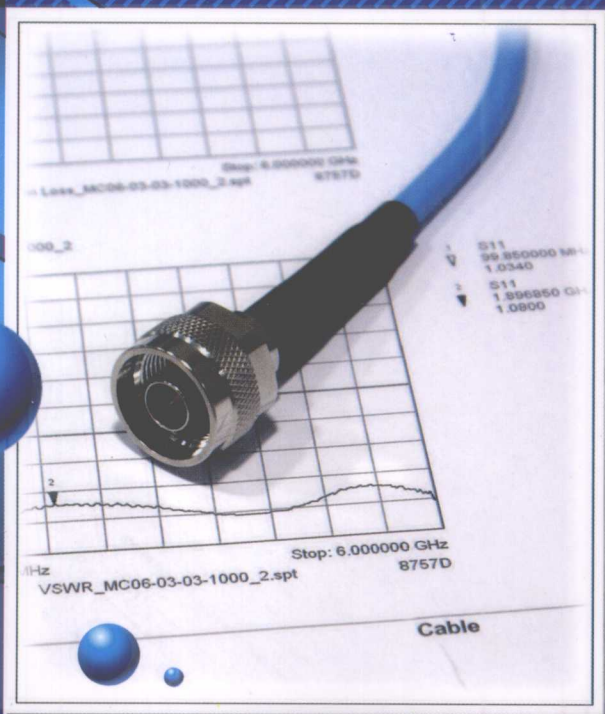


IT工程师宝典·通信

实用射频测试和测量

SHIYONG SHEPIN CESHI HE CELIANG

朱辉 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



IT 工程师宝典·通信

实用射频测试和测量

朱 辉 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书基于作者多年来从事射频测试和测量的经验和实验结果,从工程应用的角度,深入探讨了各种射频器件和射频系统的测试和测量问题,并列举了一些典型的测试案例。本书分为12章,其中第1~6章(器件篇)介绍了应用于射频测试和测量的各种无源和有源器件的测试和测量,包括电缆、连接器、衰减器、负载、功率分配/合成器、定向耦合器、滤波器、环流器、隔离器、低噪声放大器和功率放大器;第7~12章(系统篇)介绍了射频功率、大信号 S 参数、天馈系统、互调、杂散以及功率放大器的测量。

本书适合从事射频测试和测量的工程师们阅读,也可作为高等学校相关专业的参考书。

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

实用射频测试和测量 / 朱辉著. —北京: 电子工业出版社, 2010.1

(IT 工程师宝典·通信)

ISBN 978-7-121-10024-6

I. 实… II. 朱… III. 无线电信号—射频—信号识别 IV. TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 225184 号

责任编辑: 张来盛(zhangls@phei.com.cn) 特约编辑: 邢淑琴

印 刷: 北京智力达印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

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: 787×980 1/16 印张: 15.75 字数: 350 千字

印 次: 2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 41.80 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

一直有念头要写一本关于射频测试和测量方面的书，整理和总结多年来所积累的经验 and 心得。最终促使笔者动笔的主要原因乃是对射频和微波技术的浓厚兴趣。

从射频和微波技术的发展历史看，在第二次世界大战期间，出现了许多重大发明，如雷达技术和 N 型连接器，这些发明为人类在许多领域引入了现代科技的手段。如今雷达技术已经被广泛应用于民航管制、地形测量、水利、气象和航海等众多领域，而 N 型连接器的发明则为射频和微波的发展修建了一条“高速公路”。今天，N 型连接器已成为 18 GHz 以下射频和微波系统中最常用的连接纽带。在近 20 年来，移动通信的高速发展同样为射频和微波技术的创新和发展创造了条件，如 QN 型连接器和无源互调测量技术。QN 连接器的出现减少了通信基站的安装时间和空间，而无源互调测量技术则为解决通信系统中的干扰问题提供了依据。

上述案例告诉我们，市场需求是推动技术创新和发展的主要动力。笔者从事射频和微波工作已有 20 多年，而对市场需求和技术创新的关系，则是在创办公司后才有了一些理解和体会。尤其是近五六年来，接触到了很多前沿的射频测量技术和需求，也就是在这些需求的推动下，笔者才有条件进行了大量的射频测试和测量的实验工作，并得到了市场的一定认可。在此基础上，笔者对各类射频测试和测量器件、测量系统和测量方法有了新的认识，而这些经验和体会在教科书上是无法获取的。

要完成一次准确的射频测试和测量工作，经验十分重要。比如说，一个有经验的测试工程师在挑选测试电缆时，会抖动电缆并观察其插入损耗的变化；而在使用这条电缆进行测试时，则会尽量保持测试系统的静止状态以保证测试结果的可信度。为了减少测试系统的失配损耗，可以在测试系统中采用高精度的衰减器。在无源互调测量中，即使没有力矩扳手，有经验的测试者也能依靠手感来掌握连接器的配接力度，从而得到准确的测试结果。这些例子说明，射频测试工程师必须了解各类器件的特性，并且要从系统角度来对待射频测试和测量，更为重要的是实际操作经验。本书就试图从这些角度来讨论射频测试和测量问题。

本书可分为上、下两篇。上篇（第 1~6 章）为器件篇，介绍测试和测量应用的射频和微波器件，包括测试电缆和连接器、负载和衰减器、定向耦合器、功率分配/合成器、滤波器和双工器、环流器和隔离器、低噪声放大器和功率放大器等；下篇（第 7~12 章）为应用篇，讨论各种射频测试和测量方法，包括通过式功率测量技术、射频大功率测量、天

线和馈线测量、无源互调测量、发射机的输出频谱和传导杂散测量等。

需要说明的是，本书冠以“实用”二字，就决定了本书具有以下特点：

(1) 没有填补哪项“空白”，还是那些老话题，如匹配、功率、连接器等，只是换了一个角度，即从工程应用角度来讨论问题。

(2) 从测试和测量角度来讨论各种射频和微波器件及系统。比如，同样是一条射频电缆组件，作为设备互联应用时，插入损耗、VSWR、抗腐蚀性和成本是要优先考虑的；但作为测试电缆，要考虑连接器的插拔寿命和柔软性等，而插入损耗并不非常重要，因为它可以被校准掉。本书侧重于后者的讨论。

(3) 没有理论推导，更多的是拿来就可以用的结论。理论研究是高校要做的事（虽然近年来很多高校取消了微波专业，笔者所听到的其中一个理由是微波专业的适应面很窄，这让人有些不解）；工程上，只关心结论。

(4) 下篇（系统篇）中的很多内容，在以往的射频和微波书籍中是较为少见的，至少笔者还没有发现系统性讨论射频和微波测量系统和方法的专著，下篇中的大部分内容都是笔者在近5年来的各种实验结果。

在本书编写过程中，崔萍、孙祥华、朱虹宇、王晶、张金兴、黄丽平、李小江、吴楚江、张风英和张强等参加了部分内容的编写和书稿整理工作。

本书适合正在从事射频测试和测量的工程师们阅读，也可作为高等学校相关专业的参考书。

由于水平有限，书中一定存在错误和疏漏，敬请读者批评指正。

朱 辉

2009年10月19日于福州

目 录

绪论	(1)
第 1 章 射频同轴电缆和连接器	(9)
1.1 射频同轴电缆	(10)
1.1.1 性能和指标	(10)
1.1.2 同轴电缆的分类和选择	(23)
1.1.3 同轴电缆的执行标准	(25)
1.1.4 小结——测试电缆组件的选择	(26)
1.2 射频同轴连接器	(27)
1.2.1 射频同轴连接器的基本结构	(28)
1.2.2 射频同轴连接器的设计参数	(29)
1.2.3 射频同轴连接器的主要指标	(30)
1.2.4 射频连接器介绍	(31)
1.2.5 射频连接器的无源互调特性	(40)
1.2.6 射频连接器的寿命	(40)
参考文献	(44)
第 2 章 衰减器和负载及其在射频测试和测量中的应用	(45)
2.1 衰减器	(46)
2.1.1 射频衰减器的主要指标和定义	(46)
2.1.2 衰减器的分类	(50)
2.1.3 进一步讨论射频衰减器的功率系数	(54)
2.1.4 衰减器的应用	(58)
2.2 负载	(62)
2.2.1 负载的主要指标和定义	(62)
2.2.2 负载的分类	(64)
2.2.3 负载的应用	(65)
参考文献	(66)
第 3 章 Wilkinson 功率分配/合成器和定向耦合器	(67)
3.1 Wilkinson 功率分配/合成器	(68)
3.1.1 概述	(68)
3.1.2 基本指标和定义	(69)

3.1.3	隔离度和插入损耗的失配效应	(71)
3.1.4	功率容量的限制	(71)
3.1.5	Wilkinson 功率分配/合成器的应用	(72)
3.2	定向耦合器	(75)
3.2.1	概述	(75)
3.2.2	基本指标和定义	(75)
3.2.3	定向耦合器应用	(77)
3.2.4	进一步讨论定向耦合器的方向性	(80)
第 4 章	滤波器	(83)
4.1	概述	(84)
4.2	滤波器的指标	(85)
4.3	双工器和多工器	(90)
4.4	可调滤波器	(91)
4.5	滤波器在测试和测量应用中的基本方法	(92)
4.5.1	反射式测量法	(92)
4.5.2	吸收式测量法	(93)
第 5 章	环流器和隔离器	(95)
5.1	概述	(96)
5.2	环流器及隔离器的基本指标及定义	(96)
5.3	环流器和隔离器的非线性特性	(99)
5.4	环流器和隔离器的应用	(102)
第 6 章	低噪声放大器和功率放大器及其应用	(105)
6.1	低噪声放大器	(106)
6.1.1	低噪声放大器的基本指标	(106)
6.1.2	低噪声放大器在射频测试和测量中的应用	(109)
6.2	功率放大器	(111)
6.2.1	功率放大器的基本指标	(111)
6.2.2	多载频环境下的功率放大器	(118)
6.2.3	固态功率放大器的故障弱化	(119)
6.2.4	功率放大器在射频测试和测量中的应用	(121)
	参考文献	(122)
第 7 章	射频功率测量	(123)
7.1	概述	(124)
7.2	射频功率的定义	(125)

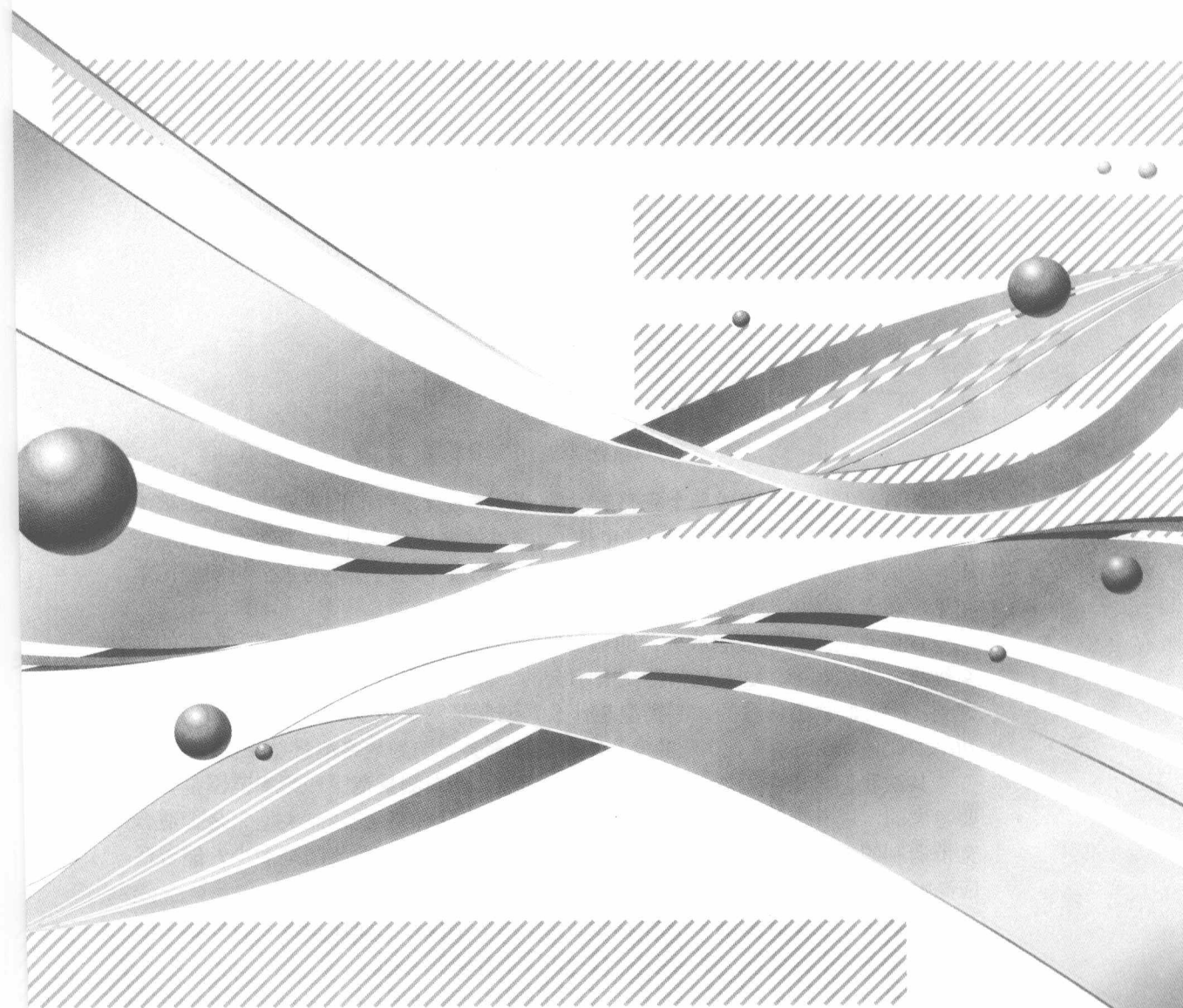
7.3	功率电平的计量单位——dB (分贝)	(125)
7.4	射频功率的测量方法	(126)
7.4.1	频谱分析法	(127)
7.4.2	终端式测量法	(129)
7.4.3	量热式测量法	(129)
7.4.4	通过式测量法	(130)
7.5	通过式功率测量技术	(130)
7.5.1	THRULINE®——通过式功率测量技术的先驱	(131)
7.5.2	通过式功率测量原理	(131)
7.5.3	通过式功率测量法的特点	(133)
7.6	数字调制信号——通过式功率计如何应对?	(134)
7.6.1	无源二极管检波器的局限	(134)
7.6.2	数字调制信号功率的定义	(135)
7.7	通过式功率测量技术的应用	(138)
7.7.1	测量发射机的输出功率以及与天线的匹配	(138)
7.7.2	测量功率放大器的输出功率和设定 VSWR 保护门限	(139)
7.7.3	测量无源器件的插入损耗	(140)
7.8	射频大功率测量——终端式还是通过式?	(144)
7.9	误差分析	(145)
7.10	深入讨论定向耦合器的方向性误差	(147)
7.10.1	定向耦合器的方向性及其测量	(148)
7.10.2	方向性误差	(150)
7.10.3	功率和电压	(150)
7.10.4	电压驻波比和回波损耗	(151)
7.10.5	方向性误差的计算	(152)
7.10.6	关于方向性误差的总结	(155)
	参考文献	(156)
第 8 章	大信号 S 参数测量	(157)
8.1	概述	(158)
8.2	为什么要测量射频器件的大信号 S 参数?	(160)
8.2.1	无源器件的“功率系数”—— S_{21} 的变化	(160)
8.2.2	功率放大器的“Hot S_{22} ”指标	(161)
8.3	大信号 S 参数的测量方法	(161)
8.3.1	大信号 S 参数测量——网络分析仪能做点什么?	(161)

8.3.2	定向耦合器法可以测量 S_{22} 吗?	(163)
8.3.3	通过式功率计可以测量放大器的 S_{22} 吗?	(164)
8.3.4	放大器大信号 S_{22} 的正确测量方法	(164)
8.4	功率放大器的大信号 S 参数测量	(165)
8.5	无源器件的大信号 S 参数测量	(166)
8.6	结束语	(167)
第 9 章	天馈系统的测量	(169)
9.1	概述	(170)
9.2	天馈系统的描述	(171)
9.3	天馈系统的输入匹配测量	(174)
9.3.1	用网络分析仪法测量输入匹配	(174)
9.3.2	用通过式法测量输入匹配	(175)
9.4	天馈系统的故障定位测量	(176)
9.5	天馈系统的反射互调测量	(177)
9.6	天线的隔离测量	(178)
第 10 章	无源互调测量	(179)
10.1	概述	(180)
10.2	无源互调的定义和表达方式	(181)
10.3	无源互调的类型	(183)
10.4	无源互调的产生原因和条件	(184)
10.5	无源互调的危害及测量的意义	(185)
10.6	无源互调的测量方法 (IEC 建议)	(187)
10.6.1	正向 (传输) 互调的测量	(188)
10.6.2	反射互调的测量	(190)
10.7	新的无源互调问题	(191)
10.7.1	反向互调及其测量	(191)
10.7.2	跨频段互调测量	(194)
10.7.3	谐波测量	(195)
10.7.4	其他需要关注的无源互调测量问题	(196)
10.8	你需要什么样的无源互调测量系统?	(197)
10.9	保证无源互调的测量精度	(198)
10.10	无源互调测量系统介绍	(202)
10.11	结束语	(203)

第 11 章 发射系统的杂散测试	(205)
11.1 概述	(206)
11.2 杂散辐射对通信系统所产生的干扰	(208)
11.3 发射系统产生杂散的原因	(210)
11.4 发射系统杂散测试的关键	(213)
11.5 蜂窝基站的杂散和互调干扰测试	(218)
11.5.1 发射机 BTS 发射带内的传导杂散测试	(218)
11.5.2 发射机 BTS 发射带外的传导杂散的测试	(219)
11.5.3 BTS 系统内部接收带内杂散和互调的测试及系统间的干扰测试	(220)
11.5.4 与其他系统共存或共址时干扰的测试	(222)
11.5.5 BTS 的互调衰减测试	(223)
参考文献	(225)
第 12 章 功率放大器的测量	(227)
12.1 功率放大器的谐波测量	(228)
12.2 放大器的正向互调失真测量	(229)
12.3 放大器的反向互调失真测量	(230)
12.4 放大器的输出匹配测量	(231)
附录 A 常用数据和公式	(233)
A.1 VSWR 和回波损耗、反射系数、失配损耗、匹配效率之间的关系	(234)
A.2 dBm 和 mW (W) 之间的关系	(235)
A.3 常见射频同轴电缆	(235)
A.4 方向性误差	(237)

绪 论

—— 提高射频和微波测量的精度



射频和微波测量的内容可谓丰富多彩。虽然被测对象从器件角度来分可以简单地分为无源和有源器件两大类，整机则可以简单地分为发射机和接收机，但是由于测量环境和条件的不同，测量要求的不同，甚至测试者对测量方法的理解不同，得出的结果也不尽相同，这就给射频和微波测量带来了挑战。通过对射频和微波测量的深入研究，不但可以掌握测量结果的准确性，而且你会发现射频和微波测量并不是一件枯燥无味的工作，恰恰相反，而是充满了挑战和乐趣。

要完成一次准确的射频和微波测量，最主要的秘诀就是从系统角度来考虑问题。这种系统性的思维方式并非一日之功，而是需要在日常工作中的不断积累。下面从系统角度，从 DUT（被测器件）、测试仪器、测试系统和附件等各方面考虑，综合分析如何保证射频和微波测量的准确性。

从系统角度来看待射频和微波测量

一个典型的射频和微波测量系统是由被测器件（DUT）、测试路径、测试仪器和测试环境四大要素组成的。下面我们从一个简单的射频功率测量系统（见图 0.1）着手，讨论一个完整的射频和微波测量系统是如何组成的。

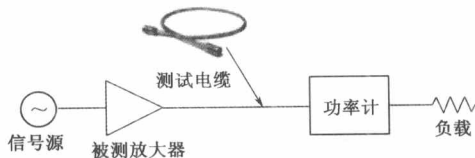


图 0.1 典型的功率测量系统

图 0.1 中包含了组成一个完整的射频和微波测量系统的四大要素，包括被测放大器（AUT）、测试路径（测试电缆）、测试仪器（功率计），当然不能忽略的还有测试系统所处的环境；测量目标是放大器的真平均功率。为了分析问题简单起见，假设系统中没有加入任何射频转接器。

首先我们来分析被测放大器的输出信号特性，最容易想到的就是发射机的功率等级、载频频率，这是任何测试者都会的。然而接下来的问题并非人人都会考虑到：放大器输出信号的调制类型是什么？调制带宽是多少？峰值功率和平均功率的比值（峰均功率比）是多少？所有这些都影响到最终测量结果的准确性。

其次我们再来看看如何选择功率计。当然，功率测量范围和频率范围是首先要考虑的，进一步要考虑的是：功率计是否支持被测信号的调制类型？是否适合宽带调制的功率测量？如果是二极管检波的功率计，其线性范围是多少？能否适应高峰均功率比的测量？

选择好了功率计以后，最后来看看那条测试电缆，这往往是最容易被忽略的

环节，而恰恰就是这个看似最简单的环节，会大大影响测量结果的准确性！除了选择与 AUT 相对应的频率和功率范围以外，驻波比是在任何测量系统中都要十分强调的，在本案例中也不例外。在功率测量中，失配误差是最终测量误差的主要组成部分；测试电缆还存在插入损耗，这个插入损耗必须在最终测量结果中加以校准。在有些功率计中，补偿（Offset）功能可以将电缆的插入损耗加以补偿，就好像把测试点从电缆端口直接移到发射机输出口一样，如果没有这项功能，则必须人为地加以修正。

到此为止，我们已经考虑了各项相关的因素，这些因素足够保证测量结果的准确性了吗？答案是否。还要考虑到测试电缆的幅度稳定性，因为在这种测试环境下，通常采用柔性测试电缆，也就是编织电缆。电缆在不同的弯曲半径时，插入损耗是有所变化的。此外，还要考虑测试环境，有没有大功率的干扰信号从各个环节串入测量系统。可能在工程测量中，某些因素可以忽略不计，但是我们在分析一个测量系统是否完善时，所有问题都必须考虑到。

在以上的分析中，我们已经大致了解了射频和微波测量系统，下面我们将针对测量系统中的四大要素进行逐一分析。

被测器件 (DUT)

虽然被测器件可以简单地分为无源和有源两大类，但是在测量之前必须对被测器件的各项本质和特性进行仔细的审视。

无源器件又可以分为路由器件和调控器件。路由器件的主要功能是提供射频和微波通路，如电缆、连接器、功率分配器等；调控器件则是控制射频和微波信号的幅度大小，如定向耦合器、衰减器等。

无源器件比较容易处理，在整个工作频率范围内和容许的最大输入功率条件下，无源器件的插入损耗和相位偏移都是比较稳定的。需要特别注意的是，所有的无源器件在被注入大功率时都会产生无源互调产物，这个问题在近年来越来越受到重视。无源互调产物会落入本系统的接收或发射频段，有时也会落入到其他通信系统的工作频段内，从而严重影响到通信系统的正常工作。无源互调产生的原因很多，如采用镍和铁材料、表面接触不良等。有关无源互调的问题，将在第 10 章中详细讨论。此外，有些调控器件（如大功率衰减器）则需要考虑功率系数和温度系数，这些指标意味着在不同的功率和温度条件下，衰减量会发生一定的变化，这些变化将会影响到放大器的输出功率和增益的测量精度，所以在测量中应该予以充分考虑并加以修正。

当被测器件是有源器件时，需要格外小心谨慎。有源器件（如放大器）具有一定的线性工作范围，对输入功率非常敏感，在不同的输出电平下，会产生不同

的测量结果。通常对放大器的输出电平定义为 1 dB 压缩点功率。为了将放大器的电平调控到检测仪器（如频谱分析仪）的适合输入电平，需要增加一个衰减器或者定向耦合器。至于衰减器的衰减量或者定向耦合器的耦合度大小，则需要从频谱分析仪的线性输入电平加以考虑；而衰减器的功率容量的选择则需要考虑其功率系数和温度系数指标。此外，衰减器自身的无源互调性能也是需要考考虑的重要因素。

可见，要正确完成一项射频和微波测量，各项因素环环相扣，任何一个环节的不合理设置都会直接影响到最终测量结果的准确性，这和生活中的木桶原理有着异曲同工之妙。

收发信机的测量则与器件有很大的不同，整机和器件的测量有着不同的观察角度。在整机中，各种器件的性能指标和系统的互联已经被调节到最佳状态，而测试者主要关心的是整机指标而不是器件指标。以无线电监测站为例，其中所配置的仪表基本上是基于整机测量考虑的，如宽带的信号发生器和频谱分析仪等；而器件制造商则主要以矢量网络分析仪为主。

测试路径（测试附件和系统）

任何一个被测器件都位于信号发生器和分析仪之间，而连接被测器件和仪器之间的桥梁就是测试附件或测试系统。千万不要忽视这些测试附件，有条件时最好能固化这些测试附件，使之成为一个标准化的测量系统。仪器供应商在提供整机时，最多会提供与仪器的最高工作频率相符的测试电缆。而在真正的测试过程中，会遇到各种不同的情况而需要采用不同的附件，所有这些附件都会影响到测量结果的准确性，这就需要测试者对相关的测试附件有深入的了解。常用的测试附件也有路由器件和调控器件两大类。

选择正确的测试电缆和连接器

在选择测试系统中电缆的规格时，除了要考虑插入损耗和 VSWR 以外，电缆的稳定性一定要好。在射频和微波频段，常用的电缆分为半刚性电缆、半柔性电缆和柔性编织电缆等三种。

半刚性电缆不容易被轻易弯曲成形，其外导体采用铝管或铜管制成，射频泄漏非常小（小于 -120 dB），在测试系统中造成的信号串扰可以忽略不计，而且无源互调特性也非常理想，因而在标准化的测试系统中被大量采用。

半柔性电缆的性能指标接近于半刚性电缆，而且可以手工成形，但其稳定性略差。由于这种电缆很容易成形，也就容易变形，尤其是在长期使用的情况下。

柔性电缆是一种“测试级”的电缆，但成本十分昂贵。柔性电缆要易于多次弯曲而且还能保持性能，这是作为测试电缆的最基本要求。

柔性电缆必须保持在弯曲条件下幅度和相位的稳定。通常，单股内导体的电缆有利于幅度的稳定，多股内导体的电缆有利于相位的稳定，可见仅这两项指标就难以两全了。无论弯曲性能多好，电缆制造商总是不希望操作者在过度弯曲的情况下使用柔性测试电缆，通常推荐的弯曲半径不应该小于电缆直径的 10 倍。

柔性电缆的设计从某种程度上违背了低无源互调的设计原则，所以柔性电缆少有低无源互调型号的。此外，过度弯曲也会导致其无源互调指标的更加恶化。

为了便于弯曲，柔性电缆采用编织层作为外导体，在这种结构下，电磁波会从缝隙中泄漏出来，虽然有些高端的微波测试电缆采用箔状材料作为外导体，其射频泄漏指标仍然不如半刚性电缆。不过作为射频和微波测量应用， -90 dB 到 -100 dB 的泄漏指标已经足够了，大部分的微波电缆都可以做到这个水平。

为了降低电缆的插入损耗和提高截止频率，高端的微波电缆几乎都采用低密度的聚四氟乙烯介质，这也是影响电缆成本的原因之一。由于加工的原因，可以发现并不是每一批次出厂的电缆的介电常数都是一致的。不过笔者认为，在选择测试电缆时，并不需要一味地追求低损耗，因为测试电缆的损耗是可以被校准的，很多仪器都有补偿功能，可以直接将电缆的插入损耗输入仪器，即使没有，用人工方法也很容易做到这一点。倒是有一点需要注意，在宽带或者自动化测试场合，电缆的频响特性会直接影响到测试结果的幅度精度，有条件必要时可以采用均衡技术加以补偿。

要注意观察接头和电缆连接部位的工艺，这会影响到电缆的使用寿命。在这个部位，电缆和接头之间有一个硬接触点，很容易造成电缆的断裂。这并不是简单采用普通的热缩套管就可以解决问题的。接头的材料也是决定测试电缆寿命的主要因素，一般来说，采用铜外导体接头的使用寿命小于不锈钢材料。在满足规定力矩的前提下，前者的寿命是 500 次，后者是 1 000 次。这项指标的定义是在到了寿命后，接头的出厂指标开始下降，而不是说这个接头就要报废了。正常情况下，电缆接头的寿命要远大于上述指标。笔者做过试验，当连接器插拔 2 400 次时，其插入损耗和 V_{SWR} 指标仍在出厂指标规定的范围内（详见第一章）。

总的来说，柔性测试电缆的各项指标都要考虑到，选择一条柔性测试电缆要兼顾频率、损耗、 V_{SWR} 、接头材料、使用寿命、射频泄漏、无源互调和成本等诸方面因素，而不是单纯从价格来考虑。所幸的是，通过不断的技术创新，现在已经有低成本的微波测试电缆面世以满足生产线大规模测试应用。

并不是每条测试电缆组件都能适合被测器件的接口，所以经常需要用到射频转接器来完成转接。通常， V_{SWR} 指标是射频转接器选择的主要依据，无论怎样强调射频转接器的 V_{SWR} 指标都不为过。以 S 参数测量为例，当一个矢量网络分析仪经过校准后，通常可以将内置定向电桥的方向性校准到 40 dB 以上。在测

试时，如果在仪器和被测器件之间插入一个 $V_{SWR}=1.06$ 的转接器，则系统的方向性会降低到 28 dB。如果被测器件的真实 $V_{SWR}=1.5$ ，则最终测试结果可能在 1.378~1.638 之间。这个例子可以充分说明射频转接器的重要性。

用衰减器和放大器来修正测试通路

在射频和微波测量中，衰减器可能是除了电缆以外应用最广泛的器件了。在前面，我们已经提到了固定衰减器的一些应用。为了精确控制信号幅度的大小，可调衰减器是一种比较理想的选择。可调衰减器分为手动步进衰减器和可编程衰减器两种。手动步进衰减器的步进量是 0.1, 0.5, 1 和 10 dB，功率容量通常可以做到 2 W，衰减量范围可做到 0~110 dB，可以满足大动态范围的测量。而可编程衰减器的功率比较小，采用 PIN 二极管转换型的可编程衰减器的线性也不如手动步进衰减器。需要特别说明的是，可调衰减器的功率容量通常都比较小，这是因为在转换衰减量程时，衰减器处于失配状态，发射机的保护电路往往会由此而触发。当然大功率的可调衰减器也并非不能实现，可以采用一些高速开关和负载及固定衰减器来组合实现，但是这种大功率衰减器的造价相当高，这成为了推广应用的瓶颈。通常推荐采用固定和可调衰减器配合使用的方法，而在自动化测量系统中，则需要采用可编程衰减器。

与衰减器相反，在某些微弱信号的检测场合下，需要用低噪声放大器来提高被测信号的电平。在放大器的应用中需要特别注意以下 3 个问题： V_{SWR} 、互调产物和杂散。

低噪声放大器最大的问题是 V_{SWR} 指标不佳，为了补偿这方面的不足，可以在放大器的输出端接一个小衰减量的衰减器。注意尽量不要将衰减器接在放大器的输入端，那样会使其噪声系数恶化。

要选择三阶截获点 (OIP3) 指标高的放大器作为测量放大器，同时要注意最大工作电平在 1 dB 压缩点以下，这样有利于降低放大器的谐波和杂散。

正确理解和使用测试滤波器

在测试和测量中，滤波器的基本作用是保留需要的信号，滤除不需要的信号。从发射端来看，滤波器可以保证输出信号的频谱纯度，如滤除信号源或放大器的输出谐波和杂散；而从接收端来看，滤波器可以滤除不需要的信号，从而提高测试设备（如频谱分析仪）的动态范围，保证其工作在最佳的输入电平下。根据不同的测试要求，可以采用低通、高通、带通或带阻滤波器来完成。

与其他无源器件不同的是，滤波器在阻带频段内是失谐的，其 V_{SWR} 的理论值为无穷大，所以在使用时要特别小心，尤其是在大功率状态下。首先要注意的是假设滤波器直接接在发射机输出端时，需要在滤波器和发射机之间采取匹配

措施, 因为假设发射机工作在滤波器的阻带范围内时, 会引起发射机的失配保护。如果要在一个很宽的频率范围内测量传导杂散, 最好是先用网络分析仪校准一下测试范围内的 S_{21} 参数, 因为滤波器的设计中, 由于分布参数频率相关的周期性, 使得在设计通带一定距离处又产生了通带 (与通带中心频率呈整倍数关系), 这就是所谓的滤波器的寄生通带。一般来说, 寄生通带所产生的响应与主通带的相差甚远, 无需特别考虑, 但如果需测量的频率正好落在寄生通带内, 则需特别考虑。不正确的理解认为带阻滤波器在阻带以外的响应都是平坦的, 这会导致传导杂散的测量误差。

如果要在频谱分析仪前面采用可调滤波器 (这种方法因为有很大的灵活性而被广泛使用), 一定要注意频谱分析仪的安全电平, 以免由于误动作而造成频谱分析仪的故障。

测试仪器

常用的射频和微波测量仪器有信号发生器、功率计、频谱分析仪和网络分析仪等。

信号发生器分为连续波信号发生器和矢量信号发生器, 视测试需要选择。信号发生器的主要指标有相位噪声、输出信号的幅度精度、频谱纯度和频率精度等。

功率计分为通过式和终端式两大类, 前者可以在线测量大功率 $VSWR$, 但是精度却不如终端式功率计, 通过式功率计的精度通常为 $\pm 5\%$, 而终端式功率计则可以达到 $\pm 1\%$ 的精度。所以通常用终端式功率计来校准信号发生器和频谱分析仪, 以提高系统的测量精度。

频谱分析仪的幅度测量精度目前已经可以做到 ± 0.5 dB, 但即使如此, 要准确测量发射机的输出功率还是要由功率计来完成。频谱分析仪的指标很多, 其中一项重要的衡量指标就是显示平均噪声电平 (DANL), 它决定了频谱分析仪测量微弱信号的能力。

有关测试仪器的选择可以参照相关制造商的产品目录, 在此不予赘述。

测试环境

前面从被测器件、测试路径和测试仪器的本质和特性方面谈到了如何保证射频和微波测量的准确性, 仅仅掌握这些还不足以完成一项正确的射频和微波测量, 测试环境也是需要考虑的因素。这里所说的测试环境是指测试中的电磁兼容性、测试通路的设计和具体的连接操作这几方面。

测试通路的设计要考虑三个问题: 从哪里取被测信号? 取多大幅度的信号? 取样信号的带宽又是多少? 以蜂窝基站测试为例, 对于运营商而言, 他们最关心的是频道内和频带内的指标, 所以, 在每个发射机的输出口, 通常都接有一个定