



经典译丛

WILEY

微波与射频技术

Handbook of Microwave Component Measurements
with Advanced VNA Techniques

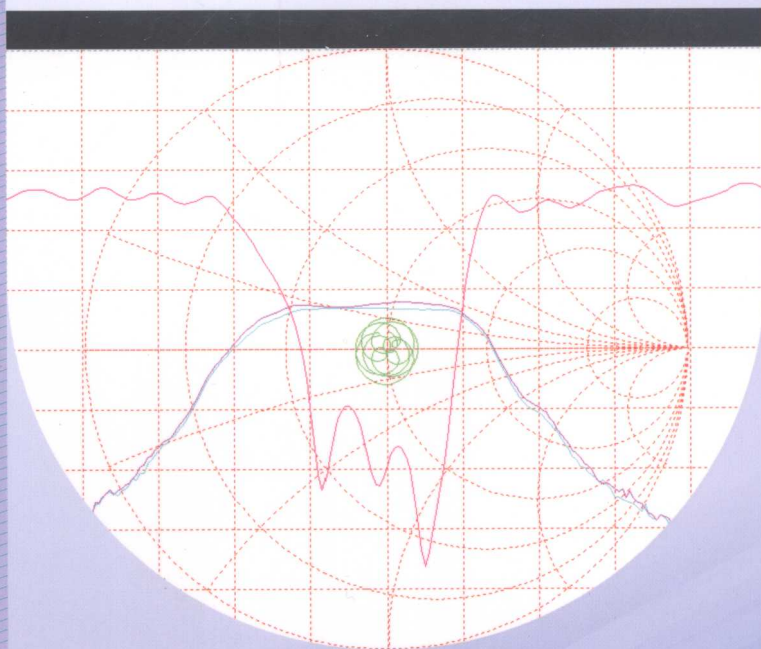
微波器件 测量手册

——矢量网络分析仪高级测量技术指南

**Handbook of Microwave
Component Measurements
with Advanced VNA Techniques**

【美】 Joel P. Dunsmore 著

陈新 程宁 胡雨辰 刘娜 译
吴昊 杨洋 张亚平



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

014035863

TN61
16

经典译丛·微波与射频技术

微波器件测量手册

——矢量网络分析仪高级测量技术指南

Handbook of Microwave Component Measurements
with Advanced VNA Techniques

[美] Joel P. Dunsmore 著

陈 新 程 宁 胡雨辰 刘 娜 译
吴 昊 杨 洋 张亚平



TN61/16

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry



北航

01723260

内 容 简 介

本书是当今射频和微波器件测量领域的一本实用参考手册和工具书,讨论了最先进的射频微波器件测量技术及最佳的测量实践。本书前面的章节先引入一些基本概念,接着在后续章节深入探讨各种有源和无源器件的测量与应用案例,让读者能够全面了解微波器件测量的重要细节,向用户提供了一套全新的见解,指引用户通过实践了解被测器件的真实特性。它的实用性还在于向读者介绍了如何找到最优化的测量设置方法、如何把现代化矢量网络分析仪的强大功能应用到最大的极限,以及如何在测量结果中去除测量设备可能对被测器件特性的影响。

本书适合从事射频和微波器件研发与生产测试的工程技术人员,特别是在航空航天和国防电子设备的研究和制造领域、现代无线通信设备的研究和制造领域的工程技术人员作为参考资料。本书也可以作为高等学校中研究微波设计和理论的学生的最佳测量指导书籍。

Handbook of Microwave Component Measurements: with Advanced VNA Techniques, 9781119979555, Joel P. Dunsmore
Copyright ©2012, John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under license.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, Ltd.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Ltd.

本书简体中文版专有翻译出版权由英国 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社。

未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2012-6770

图书在版编目(CIP)数据

微波器件测量手册: 矢量网络分析仪高级测量技术指南/(美)敦思摩尔(Dunsmore, J. P.)著; 陈新等译.

北京: 电子工业出版社, 2014.3

(经典译丛·微波与射频技术)

书名原文: Handbook of Microwave Component Measurements: with Advanced VNA Techniques

ISBN 978-7-121-13926-0

I. ①微… II. ①敦… ②陈… III. ①微波元件-测量-手册 IV. ①TN61-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 037532 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 李秦华

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 32 字数: 819 千字

印 次: 2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 89.00 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 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

译者简介



陈新 2003年毕业于成都电子科技大学，同年加入安捷伦科技担任计量软件工程师，2006年开始担任PNA固件工程师，是脉冲测量、增益压缩、差分测试等应用的主要开发者。与Joel合作在IEEE ARFTG年会上发表论文一篇。



程宁 2007年毕业于北京邮电大学电信工程学院，加入安捷伦科技后担任软件研发工程师，有六年的时间负责安捷伦物理层测试系统(PLTS)的研发工作。期间曾和Joel Dunsmore一同在ARFTG, Design-Con上发表过多篇与夹具移除相关的文章。现在安捷伦元器件测试部担任应用工程师。



胡雨辰 分别于1999年和2001年获得清华大学电机工程系本科和硕士学位。2006年9月加入安捷伦科技公司，负责物理层测试系统(PLTS)的研发工作，以及和安捷伦元器件测试部团队一起共同研发安捷伦网络分析仪的固件和应用软件。2008年获得安捷伦科技创新最高奖Barnholt Award。目前负责非线性矢量网络分析仪(NVNA)的软件研发和材料测试软件的研发指导工作。



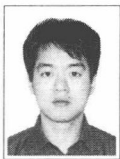
刘娜 2009年毕业于北京邮电大学，同年加入安捷伦公司，主要负责阻抗分析仪和网络分析仪的应用支持，目前担任元器件事业部市场应用工程师。



吴昊 2012年7月毕业于清华大学电子工程系，随后加入安捷伦科技软件有限公司并担任软件研发工程师至今，主要从事安捷伦材料测试软件的研发工作。



杨洋 2010年毕业于北京邮电大学信息与通信工程学院，2010年3月加入安捷伦科技软件有限公司，担任软件研发工程师至今。负责网络分析仪Firmware的研发工作。



张亚平 2004年毕业于北京科技大学机械工程学院，2006年加入安捷伦公司元器件测试部门，负责PNA应用软件(PLTS, AFR)的设计与开发工作，至今。与Joel Dunsmore及程宁共同申请了一项关于测量夹具自动去除的专利。

推 荐 序

电子元器件的不断发展和进步带动了整个产业的升级和变革。无处不在的高速无线互联网，多模多频段的智能终端，大规模 MIMO 天线阵列……无不依赖于元器件性能的提升，新型材料的采用，集成和互连工艺的进步，以及大批量，小型化和低成本带来的精益生产制造管理。作为支撑产业创新发展的基础，电子测试和测量仪器为元器件建模、特征参数提取、设计性能优化，以及质量管理和控制都起到至关重要的作用。现在我非常高兴能向国内同仁介绍乔尔·敦思摩尔(Joel Dunsmore)博士最新推出的专著，相信这本微波器件测量手册能为广大从事射频、微波以及高速数字设计和测试的工程师，电子工程专业的学生，及其他业内专业人士提供最新的测量理论和技术。相信集 30 年微波测试经验于大成的本手册一定能成为广大电子工程师手边的工具书。

我在 7 年前安捷伦中国研发中心启动差分器件测量项目时认识了乔尔博士。作为安捷伦矢量网络分析仪的主要设计者之一，乔尔在测量应用算法设计、测试流程及用户体验，以及产品质量总体把控等诸方面都做出了卓越贡献。作为安捷伦最高级别的技术人员，乔尔用他深厚的微波理论功底和纯熟的器件测量知识而成为众多年轻工程师的偶像；他多年来行走于世界各地最先进的射频和微波技术开发中心，热忱为用户解决最具挑战的测试问题，毫无保留地分享他的经验，从而赢得了众多用户的喜爱与尊敬。在过去 7 年间，通过与乔尔和其他国外同事合作，安捷伦中国通信产品中心在网络分析仪上开发了很多创新软件产品。作为业界翘楚，安捷伦电子测量仪器以高性能、高精度和高可靠性赢得信任。通过把先进的测量方法集成于仪器平台，以系列化应用软件来帮助工程师解决最棘手的测试问题，安捷伦为电子测试和测量行业设立了新的标杆。作为网络分析仪最好的应用指南，这本微波器件测量手册不仅全面系统地阐述了支持高精度测量背后的理论，还将其付诸实际测量，诸如对各种器件测试方法的利弊取舍，仪器设置如何保证符合真实场景，连接和夹具如何影响测量结果……这些对获得完整、可信和有效的测试数据尤为重要。

为数不少的中国工程师曾有机会参加乔尔的技术讲座，他也曾多次拜访国内的多个无线通信研发中心和电子器件设计院所。在北京的一次研讨会后，我曾询问有否可能把他近几年的工作成果集结成册。未曾料想，他已经利用周末和出差间歇开始写作。于是我们国内的同事开始筹措翻译工作，争取尽早推出中文版本。为了高质量地完成这一专业翻译工作，众多研发和应用工程师投入了大量的个人时间。每一位译稿参与者都有幸与乔尔合作。陈新和杨洋是平衡器件测量、脉冲测量、器件控制协同测试软件的主要开发人员；胡雨辰独立完成了非线性 X 参数应用软件的设计和开发；张亚平和程宁是物理层测试应用软件的主要开发者，并在测量夹具自动去除上很有创新；新加入团队的吴昊为材料测试软件的最新发布做出了贡献。刘迪作为应用工程师曾为很多用户在放大器参数提取和测试夹具设计等方面提供技术支持和服务……

完成一本技术专著翻译的挑战大大超越了我们的预想。在此感谢作为翻译项目管理和总协调者的应用工程师刘娜，以及其他为本书能顺利出版做出贡献的同事。希望这本书能为业界同仁提供切实的帮助。

安捷伦科技中国通信产品中心总经理

A handwritten signature in black ink, reading '魏向东' (Wei Dong), the General Manager of the Agilent Technology China Telecommunications Product Center.

译 者 序

本书是由安捷伦科技公司院士级专家 Joel Dunsmore 博士编写的关于微波测量的理论与应用著作。自 1983 年从俄勒冈州立大学毕业以后, Joel 先生在惠普/安捷伦已经工作了 30 多年, 在射频微波测试领域积累了丰富的理论和实践经验。本书的译者全部为安捷伦元器件测量部门在中国的资深研发工程师和市场工程师, 在国内射频微波领域也有着丰富的经验。各位译者在通读了各章之后深切体会到本书的博大精深和其对微波测量的实用性, 以及 Joel 博士对微波测量的深刻理解和见地。本书的各种公式图表都有助于理解实际测量中的问题, 同时文字表述上尽量不用复杂的定义。本书第 1 章中有对常用概念的回顾, 但是后面的大部分内容都是偏向应用的, 适合对射频微波测量有一定基础的工程师进行阅读。

在翻译过程中, 译者对全文中的极少数笔误和疏漏之处进行了修正, 并尽量使用业内常用语言进行描述和解释, 力求中文版与英文原版一样体现出内容的实用性和易读性, 使读者真正理解并受益。

全书的翻译分工为: 前言和第 1 章由刘娜翻译, 第 2 章由杨洋翻译, 第 3 章由杨洋和程宁共同翻译, 第 4 章由吴昊翻译, 第 5 章由吴昊和胡雨辰共同翻译, 第 6 章由胡雨辰和陈新共同翻译, 第 7 章由陈新和张亚平共同翻译, 第 8 章由张亚平翻译, 第 9 章由程宁翻译。参与全书校对工作的除上述翻译工作人员之外, 还有刘迪、石会敏和曹旭等。

本书的翻译工作得到了安捷伦科技中国通信产品中心总经理魏向东的大力支持、鼓励和帮助, 在此我们深表感谢! 同时也由衷地感谢元器件测量部门市场部经理李坚, 研发部经理张拥勋, 以及现 Maury 公司中国区总经理张念民先生对此书翻译工作和成功出版所付出的时间与努力!

由于时间仓促, 其中的错误和不妥之处在所难免, 恳请各位读者进行批评指正, 共同进步。

序

电子行业在过去的 20 年里发生了翻天覆地的变化：系统性能有了巨大的改进，硬件尺寸越来越小，质量和可靠性都有了很大提高，制造的成本也越来越低。在这种形势下，其底层的射频测试与测量技术也同时飞速发展着。现在的很多射频测试设备可以毫秒级的速度来测量 -100 dBm 以下的信号。更令人称奇的是，测量仪表的射频测量功能与计算机的软件分析功能相结合，可以构建被测件的线性与非线性模型，大大缩短了设计人员的设计周期。

在这种革命性的发展变化中，射频与微波器件起着非常重要的作用。由于器件的尺寸越来越小，塑料的使用减少了，对质量的要求越来越高，成本也大大减少。同时，测试夹具和互连器件经过定性分析与产线测量，其精度也达到了前所未有的高度。与这种发展趋势相呼应的是，测量设备能够对射频微波器件进行快速精准的测量。射频微波器件制造商的成功与否已经与器件设计、验证和生产阶段的测量质量和测量能力直接相关。从实际的角度讲，测试必须是快速的(1~2 s)，精度必须很高(百分之一 dB)并且重复性非常好。器件生产周期的每一步都对测量精度和数据收集有着独特的要求。

在设计阶段，必须全面地表征元器件的性能(包括幅度和相位)来为以后的制造环节做一个参考。因此需要在实际测试时对整个测试的配置进行测量，以去除测试设置和夹具的影响，保证测试得到的最终数据只包含被测器件的特性。因此，设计阶段得到的性能数据是未来产线中进行批量测试统计评估的黄金参考。根据统计数据定义产线产品为合格和不合格，通常来说其标准偏差就是测试或质检工程师为了评估产品通过率而密切监测的数据。

当给一个器件公布其指标数据时，我们需要知道这个数据只是该器件总体性能的一个描述。只有提供了所有参数的数据和图表(包括幅度和相位)，才能知道这个器件的真实性能。除此之外，当用户测试这些器件的性能时，不仅要提供标定值以内(合规)的数据，也需要提供标定值以外(不合规)的数据。

对于一个非线性器件来说(如混频器)，射频和本振会产生高阶谐波，同时由于指定频率以外的负载阻抗影响，高阶谐波会反射回混频器，导致期望信号和谐波之间互相作用。值得庆幸的是，目前的网络仪可以快速容易地测量这些谐波。Dunsmore 先生抓住了这些现代测量方法的精髓，通过这本书他告诉测试工程师不仅要测量，更要了解测量中的基本概念，对测量的结果进行预估，以及考虑到测试环境中的各种潜在的误差，如何去除测试设置影响而得到真实有效的 DUT 测量结果。我非常相信这本书会作为了解测量方法、测试框图和测量局限性的一本参考读物，并在制造商和测量用户之间搭起一座桥梁。我相信本书在射频微波界未来的发展中具有不可估量的参考价值。

Harvey Kaylie

Mini-Circuits 公司创始人兼总裁

前 言

本书内容的难度介于基础与高级之间，同时也兼顾理论与实际应用。但是其间的界限并非丝丝分明，如果读者的培训或测量经验比较多，也许能察觉一二。本书大部分内容是关于测量技术的，但为了便于设计和测试人员理解，也有相当的内容是有关器件属性的，因为测试的目的就是为了确保测量参数符合器件的简化模型。在实际应用中，一些预期之外的事件可能会占掉测量和查错的大部分时间，尤其是测量放大器、混频器等有源器件时。

测量微波器件的基本仪器就是矢量网络分析仪，而近期的一些技术改进也使得网络分析仪可以测试比简单的增益和匹配复杂百倍的情况。作为一个有 30 多年经验的网络分析仪设计工程师，我曾给大量的微波测试做过顾问，从简单的手机电话，到复杂的雷达多工器等。而本书的出发点和目标是给读者分享一些我多年积累的经验，以帮助研发人员和测试工程师改善测试质量和效率。本书的核心是现代测量方法，也会分享一些随着仪器发展的传统方法与新技术之间的区别。

本书第 1 章是微波理论与微波器件的概述。前半部分介绍了射频和微波的一些通用概念，列举了一些重要的数学结论，这些数学公式非常有助于对后续章节的理解。后半部分介绍了一些常见的微波连接器，传输线和器件，还介绍了基本的微波测量仪器。本章对射频微波测试的新手是非常有用的。

第 2 章介绍了目前常用矢量网络分析仪的结构和组成，以及其局限性。对于有些用户来说这方面的内容不需要知道太多，但对于想深入准确地理解测试结果的测试工程师来说，这部分内容是非常实用的，可以帮助他们发现矢量网络分析仪自身配置对整体测量结果的影响。目前的现代矢量网络分析仪可以进行相当广泛的测量，包括失真、功率和噪声系数等，但究其根本都是一般的 S 参数测量(本章的第二部分将给出由 S 参数计算得到的各种有用参数)。

在使用矢量网络分析仪时最神秘的部分也许就是校准和误差校正了。第 3 章介绍矢量网络分析仪的误差源模型、校准方法，讨论不确定度和校准残留误差。本章还介绍了源功率校准和接收机功率校准技术，这些内容目前在其他的书籍上很难找到。最后给出了一些影响矢量网络分析仪校准效果的因素和实例分析。

第 4 章是与数学公式相关最多的，讨论了一些用网络分析仪进行时域转换时比较实用的问题，特别介绍了“门选通”(gating)的作用和补偿方法。本书的前四章不仅包含了引导性的信息，也覆盖了一些微波器件测量的方法。

其他的章节都是针对特定微波器件的应用实例来进行讨论的。第 5 章是无源微波器件，如电缆和转接头，传输线，滤波器，隔离器和耦合器，等等。对于每一种器件，书中都介绍了一些测量的最佳实践和常见问题的解决方法。

第 6 章的内容是测量放大器，为了更好地理解放大器的特性，中间还穿插了一些必

须理解的概念。其间还特别提到了测量高增益和大功率放大器时遇到的一些问题，包括脉冲射频测试。对于非线性测试，如谐波和双音互调测试，失真和噪声测量，无论是用频谱仪还是网络分析仪来测量，其概念都是一致的。

第7章将有源器件的讨论扩展到混频器的范围。由于缺乏混频器的测量经验，有些工程师对于混频器测量的知识大多从比较浅显的课程中获得。本章先是详细讨论了混频器和频率转换器件的模型与主要特性。混频器的测量方法可能会非常复杂，尤其是相位和时延响应测量。本章对几种主要的测量方法进行了讨论，包括校准、使用相位参考件等，这些信息都是第一次展现给读者。除了幅度和相位的频率响应，本章也介绍了混频器特性和射频，本振功率，还有失真和噪声的测量。对于混频器和频率转换器件相关的测试工程师来说，本章是绝佳的阅读参考文献。

第8章引入了差分与平衡器件的概念，并给出了较为详细的差分器件的分析和测量方法，包括非线性响应、噪声系数与失真等。

第9章介绍了一些对测试工程师非常有用的技术与概念，尤其是与测量夹具相关的，例如创建夹具内校准件等。

致 谢

感谢我的同事在本书的编写和检查过程中所给予的帮助。感谢研发经理 Henri Komrij 和元器件测量部门总经理 Greg Peters 从本书的初始规划之时就给予的大力支持。衷心感谢我们实验室的以下研发工程师在原稿内容检查时给予的各自专业领域的意见：Keith Anderson, Dara Sarislani, Dave Blackham, Ken Wong, Shinya Goto, Bob Shoulders, Dave Ballo, Clive Barnett, 程宁, 陈新, Mihai Marcu 和 Loren Betts 等。感谢他们对于本书的成功完成所给予的巨大帮助。如果书中还残存其他的错误, 我表示很抱歉并且承担全部责任。

书中所列举的诸多较新的测量技术和方法都依赖于其复杂但精确的实现, 因此在这里我要感谢我们的软件设计组成员: Johan Ericsson, SueWood, Jim Kerr, Phil Hoard, Jade Hughes, Brad Hokkanen, Niels Jensen, Raymond Taylor, Dennis McCarthy, Andy Cannon, Wil Stark, 胡雨辰, Zhi-Wen Wong 和杨洋等, 以及他们的经理 Sean Hubert, Qi Gao 和 Dexter Yamaguchi, 感谢他们几年来对于我们产品的实现所给予的所有帮助。

最后我想纪念一下我在英国利兹大学的博士生顾问, 并且同时也是我在 HP 和安捷伦公司的同事 Roger Pollard 博士, 感谢他的意见、指导以及对我的友谊。我会永远怀念他。

Joel P. Dunsmore
于 Sebastopol, CA

目 录

第 1 章 微波测量简介	1
1.1 一般的测量流程	1
1.2 实际的测量重点	2
1.3 微波参数的定义	3
1.3.1 初步认识 S 参数	3
1.3.2 网络的相位响应	9
1.4 功率参数	10
1.4.1 入射功率和反射功率	10
1.4.2 资用功率(available power)	10
1.4.3 负载功率	11
1.4.4 网络资用功率	11
1.4.5 资用增益	11
1.5 噪声系数和噪声参数	12
1.5.1 噪声温度	13
1.5.2 有效输入噪声温度(超噪温度)	13
1.5.3 超噪功率与工作温度	14
1.5.4 噪声功率密度	14
1.5.5 噪声参数	14
1.6 失真参数	15
1.6.1 谐波	15
1.6.2 二阶截断点	15
1.6.3 双音互调失真	16
1.7 微波元器件的特性	18
1.8 无源微波器件	18
1.8.1 电缆, 连接器和传输线	18
1.8.2 连接器	22
1.8.3 非同轴传输线	29
1.9 滤波器	32
1.10 定向耦合器	34
1.11 环形器和隔离器	35
1.12 天线	36
1.13 PCB 组件	36
1.13.1 SMT 电阻	36

1.13.2	SMT 电容	38
1.13.3	SMT 电感	39
1.13.4	PCB 过孔	39
1.14	有源微波器件	40
1.14.1	线性和非线性	40
1.14.2	放大器: 系统放大器, 低噪声放大器和大功率放大器	40
1.14.3	混频器和变频器	41
1.14.4	N 倍频器, 限幅器和分频器	43
1.14.5	振荡器	43
1.15	测量仪表	44
1.15.1	功率计	44
1.15.2	信号源	45
1.15.3	频谱分析仪	46
1.15.4	矢量信号分析仪	46
1.15.5	噪声系数分析仪	47
1.15.6	网络分析仪	47
	参考文献	49
第 2 章	矢量网络分析仪测量系统	51
2.1	矢量网络分析仪测量系统简介	51
2.2	矢量网络分析仪的结构框图	52
2.2.1	矢量网络分析仪源	54
2.2.2	理解源匹配	56
2.2.3	矢量网络分析仪测试装置	60
2.2.4	定向器件	62
2.2.5	矢量网络分析仪接收机	67
2.2.6	IF 和数据处理	71
2.2.7	多端口扩展	72
2.2.8	大功率测试系统	76
2.3	线性微波参数的矢量网络分析仪测量	77
2.3.1	S 参数的线性测量方法	77
2.3.2	使用矢量网络分析仪进行功率测量	79
2.3.3	矢量网络分析仪的其他测量限制	81
2.3.4	由外部元件引起的测量局限	84
2.4	由 S 参数引申出的测量	85
2.4.1	史密斯圆图	85
2.4.2	将 S 参数变换成其他阻抗	90
2.4.3	级联电路和 T 参数	90
2.5	使用 Y 变换和 Z 变换的模型化电路	92

2.5.1	反射变换	92
2.5.2	传输变换	93
2.6	其他线性参数	93
2.6.1	Z 参数或开路电路阻抗参数	93
2.6.2	Y 参数或短路导纳参数	95
2.6.3	ABCD 参数	95
2.6.4	H 参数或混合参数	96
2.6.5	复数变换和非等值参考阻抗	96
	参考文献	97
第 3 章	校准和矢量误差修正	98
3.1	引言	98
3.2	S 参数的基本误差修正: 校准应用	99
3.2.1	12 项误差模型	99
3.2.2	单端口误差模型	101
3.2.3	8 项误差模型	101
3.3	确定误差项: 12 项模型的校准采集	103
3.3.1	单端口误差项	104
3.3.2	单端口标准件	105
3.3.3	二端口误差项	111
3.3.4	12 项误差模型转换成 11 项模型	114
3.4	确定误差项: 8 项模型的校准采集	114
3.4.1	TRL 标准和原始测量结果	114
3.4.2	TRL 校准的特殊情况	118
3.4.3	未知通路或 SOLR(互逆通路校准)	118
3.4.4	未知通路校准的应用	120
3.4.5	QSOLT 校准	121
3.4.6	电子校准或自动校准	121
3.5	波导校准	124
3.6	源功率校准	125
3.6.1	为源频率响应进行源功率校准	126
3.6.2	功率计失配校准	127
3.6.3	源功率线性度校准	128
3.7	接收机功率校准	130
3.7.1	一些历史回顾	130
3.7.2	现代接收机功率校准	131
3.7.3	传输测试接收机的响应校正	134
3.8	退化的校准	136
3.8.1	响应校准	136

3.8.2	增强型响应校准	138
3.9	确定残余误差	140
3.9.1	反射误差	140
3.9.2	使用空气线确定残余误差	142
3.10	计算测量不确定度	151
3.10.1	反射测量的不确定度	151
3.10.2	源功率的不确定度	151
3.10.3	测量功率的不确定度(接收机不确定度)	152
3.11	S_{21} 或传输不确定度	153
3.12	相位误差	156
3.13	实际校准的限制	157
3.13.1	电缆弯曲	157
3.13.2	在校准后改变功率	158
3.13.3	补偿步进衰减器的变化	159
3.13.4	连接器的一致性	162
3.13.5	噪声效应	162
3.13.6	短期和长期漂移	163
3.13.7	误差项的内插	164
3.13.8	校准质量:电子校准和机械校准件	167
参考文献		167
第4章	时域变换	169
4.1	引言	169
4.2	傅里叶变换	169
4.2.1	连续傅里叶变换	170
4.2.2	奇偶函数与傅里叶变换	170
4.2.3	调制(频移)定理	171
4.3	离散傅里叶变换	171
4.3.1	快速傅里叶变换和快速傅里叶逆变换	172
4.3.2	离散傅里叶变换	173
4.4	傅里叶变换(解析形式)与矢量网络分析仪的时域变换	173
4.4.1	定义傅里叶变换	174
4.4.2	离散采样的影响	174
4.4.3	频率截断的影响	175
4.4.4	减小截断效应的方法——加窗	177
4.4.5	尺度变换和重归一化	178
4.5	低通和带通变换	179
4.5.1	低通冲激模式	179
4.5.2	直流外插	179

4.5.3	低通阶跃模式	179
4.5.4	带通模式	181
4.6	时域选通	182
4.6.1	选通损耗和重归一化	182
4.7	不同网络的时域变换示例	184
4.7.1	传输线阻抗变化的时域变换	184
4.7.2	离散不连续性的时域响应	185
4.7.3	不同电路的时域响应	186
4.8	掩蔽和选通对测量准确性的影响	187
4.8.1	对传输线阻抗变化的补偿	187
4.8.2	离散不连续性的补偿	187
4.8.3	时域选通	188
4.8.4	估计掩蔽响应造成的不确定性	191
4.9	小结	192
	参考文献	192
第5章	线性无源器件的测量	193
5.1	传输线、电缆和接头	193
5.1.1	带接头的低损耗器件的校准	193
5.1.2	测量长电长度器件	195
5.1.3	衰减测量	198
5.1.4	回波损耗测量	211
5.1.5	电缆长度和时延	220
5.2	滤波器和滤波器测量	221
5.2.1	滤波器分类和困难	221
5.2.2	双工器 (Duplexer) 与同向双工器 (Diplexer)	222
5.2.3	测量可调谐高性能滤波器	222
5.2.4	测量传输响应	224
5.2.5	高速与动态范围	228
5.2.6	极大动态范围测量	229
5.2.7	校准注意事项	237
5.3	多端口器件	237
5.3.1	差分电缆和传输线	238
5.3.2	耦合器	238
5.3.3	电桥 (Hybrid)、功分器和分频器	240
5.3.4	环形器和隔离器	243
5.4	谐振腔	244
5.4.1	谐振腔响应的史密斯图	244
5.5	天线测量	246

5.6 小结	247
参考文献	248
第6章 放大器测量	249
6.1 放大器的线性特性	249
6.1.1 放大器的预测试	250
6.1.2 优化矢量网络分析仪的校准设置	251
6.1.3 放大器测量的校准	252
6.1.4 放大器测量	255
6.1.5 对放大器的测量进行分析	259
6.1.6 保存放大器测量结果	267
6.2 增益压缩测量	270
6.2.1 压缩的定义	271
6.2.2 调幅-调相或相位压缩	274
6.2.3 全频段增益和相位压缩	275
6.2.4 增益压缩解决方案, 智能扫描和安全模式	276
6.3 测量高增益放大器	281
6.3.1 高增益放大器设置	282
6.3.2 校准注意事项	283
6.4 测量大功率放大器	285
6.4.1 产生大驱动功率的配置	285
6.4.2 接收大功率的配置	287
6.4.3 功率校准以及预/后稳幅	289
6.5 脉冲调制下的射频测量	289
6.5.1 脉冲测量的背景	289
6.5.2 脉冲包络测试	292
6.5.3 脉冲到脉冲测量	294
6.5.4 对脉冲射频激励的直流测量	295
6.6 失真测试	297
6.6.1 放大器的谐波测量	297
6.6.2 双音测量, IMD 和 TOI 的定义	300
6.6.3 双音三阶交调失真的测量技术	303
6.6.4 扫描模式下的 IMD 测量	304
6.6.5 优化测量结果	306
6.6.6 误差修正	309
6.7 噪声系数测量	310
6.7.1 噪声系数的定义	310
6.7.2 噪声功率测量	311
6.7.3 通过噪声功率计算噪声系数	313