

“九五”规划国家级重点教材

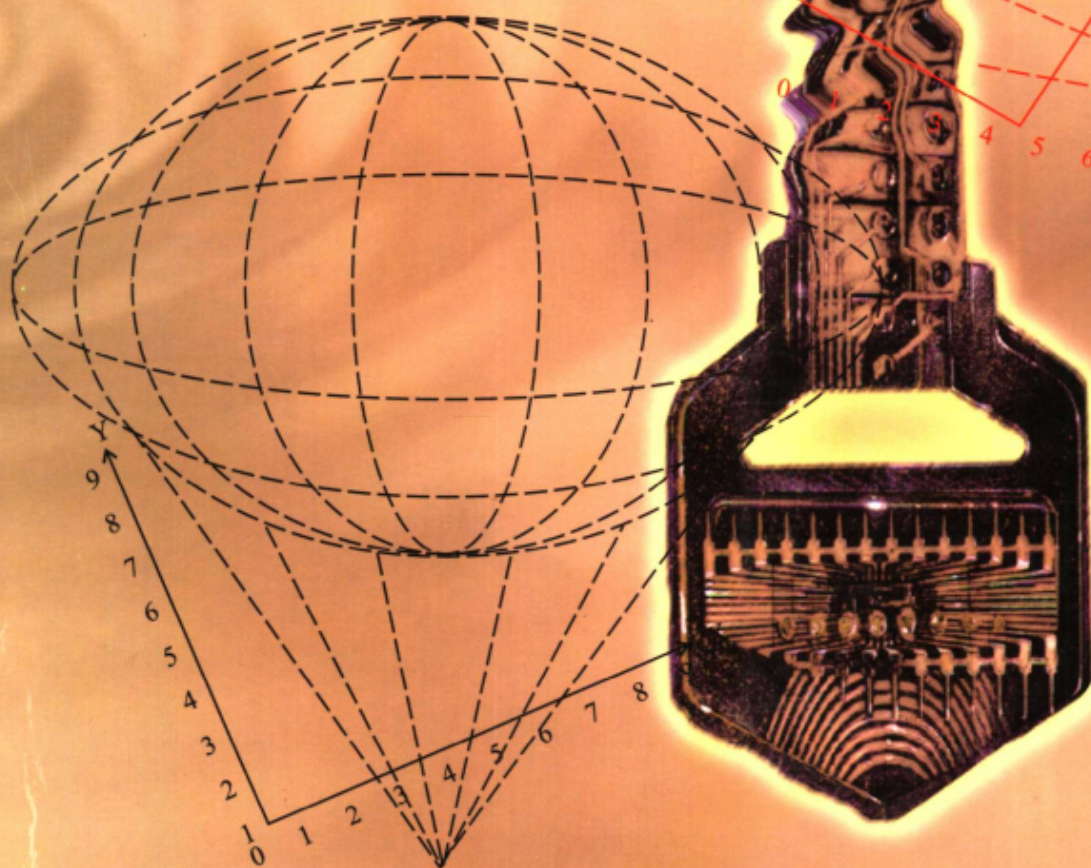


高等学校  
电子信息类 规划教材

# 毫米波 理论与技术

阮成礼 编著

Millimeter-Wave  
Theory and Technology



电子科技大学出版社

责任编辑：朱 丹  
版式设计：朱 丹  
封面设计：文绍安

“九五”规划国家级重点教材

# 毫米波 理论与技术

Millimeter-Wave  
Theory and Technology

ISBN 7-81065-575-2



9 787810 655750 >

ISBN 7-81065-575-2 / TN · 26

定价：39.00元

高等学校  
电子信息类

规划教材

# 毫米波理论与技术

阮成礼 编著

电子科技大学出版社

## 内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了毫米波的传播特性、毫米波波导和传输线、毫米波源、毫米波混频器、毫米波固态电路和无源电路、毫米波天线、毫米波测量及应用,书中内容尽可能反映了毫米波研究的最新成就。本书是电磁场与微波技术专业的研究生规划教材,也可供同行研究人员和感兴趣的读者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

毫米波理论与技术/阮成礼编著. —成都:电子科技大学出版社, 2000. 12

ISBN 7-81065-575-2

I. 毫... I. ①阮... III. 极高频 N. 0452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 59723 号

高 等 学 校  
电 子 信 息 类

规 划 教 材

## 毫米波理论与技术

阮成礼 编著

出 版:电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号,邮编:610054)

责任编辑:朱 丹

发 行:新华书店经销

印 刷:四川导向印务有限公司

开 本:787×1092 1/16 印张 30.5 字数 739 千字

版 次:2001 年 3 月第一版

印 次:2001 年 3 月第一次印刷

书 号:ISBN 7-81065-575-2/TN·26

印 数:1—2000 册

定 价:39.00 元

## 出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社、各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办协商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

## 序

20 世纪是科学技术飞速发展的时期,电子信息技术是 20 世纪科技进步的典型代表。从 19 世纪麦克斯韦创立经典电磁理论以来,特别是 20 世纪 50 年代以来,电子信息技术的每一个进步无不伴随着电磁频谱的不断开拓。毫米波则是继微波和光波之后得到开发利用的电磁波频谱资源。由于关键技术的突破,毫米波技术在 20 世纪最后 30 年里得到了长足发展和广泛应用。

毫米波是整个电磁频谱中不可或缺的一段,但是,大气传播中的严重衰落使毫米波频谱的开拓走过了一段曲折历程。毫米波以其频带宽、波长短为特征,与微波和红外电子系统相比,毫米波系统兼有微波系统和红外系统的特点。由于在大气中的衰减大,毫米波主要用于短程电子系统,例如短距离通信、战场侦察雷达、导弹末制导和引信等方面。与红外系统相比,它又具有在恶劣环境下全天候工作的能力。毫米波功率合成和毫米波电真空器件的研制成功大大提高了毫米波源的功率电平,进一步扩展了毫米波的应用领域。

毫米波在通信、雷达、制导、遥感、射电天文等许多领域具有广泛的应用价值。当前,毫米波技术还处于成长发展时期,新的元件和器件、新型传输线和毫米波集成电路、新的分析和计算方法不断涌现。高等教育是培养高级科研人才的主力军,为了促进毫米波技术的发展,为了在新世纪更好地培养毫米波技术的高级科技创新人才,迫切需要一本关于毫米波技术的研究生教材。这本教材要能系统地、深刻地、清晰地论述毫米波基础理论,同时又能把握前沿研究方向;既能从中学习基础知识,又有启发性并活跃创新思维。

阮成礼教授从 1981 年开始从事毫米波技术的研究工作,1983 年为研究生开设了毫米波技术课程,他关于毫米波理论与技术的研究成果已在国内外许多学术刊物发表,并获得国家科技进步三等奖。长期的科研和教学积累使作者对毫米波信号的产生、辐射、传播、接收、处理、测量和应用有深刻理解,为作者编著《毫米波理论与技术》一书打下了坚实的理论和实验基础。《毫米波理论与技术》一书有着如下显著的特点:

①该书内容新颖,系统地概括了到目前为止几十年来国内外毫米波技术的研究成果;

②书中包含了作者在毫米波固态源、混频器理论、TEM 传输线、毫米波天线和测量技术等方面的创造性劳动;

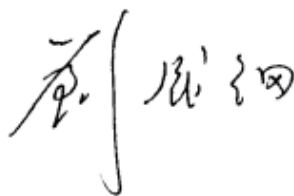
③全书着重于对毫米波的基本理论、概念和电路原理进行讲述,条理清楚,层次分明,强调了理论的思想基础,具有启发性;

④针对教学对象是研究生的具体情况,特别对毫米波的历史发展、与微波理论的关系以及进一步向亚毫米波的拓展作了全面阐述,每一章都给出了大量参考文献,便于研究生进一步深入研究;

⑤全书结构完整,有理论,有例子,有习题,并指出了尚待研究的问题。

本书对从事毫米波开发和应用的专业技术人员也很有参考价值。

相信本教材的出版对高等院校培养毫米波高级研究人才,对推进毫米波技术的研究和毫米波技术的工程应用将起到很好的推动作用。



中国科学院院士  
IEEE Fellow  
电子科技大学校长

# 前 言

本教材按照电子工业部《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由电磁场与微波专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由电子科技大学阮成礼编著，主审、责任编辑为毛钧杰。

电磁波资源分为两大类：一类是频域电磁波资源，另一类是时域电磁波资源。毫米波是频域电磁波资源中极其重要、不可缺少的一段频谱。100多年来电磁波频谱的开拓发展史显示，开拓电磁波资源是一个漫长的过程，毫米波频谱的开拓尤其如此。

无论是频域电磁波还是时域电磁波，它们的共同点是其能量特征、信息特征和资源特征，这是研究电磁波的原动力。频域电磁波和时域电磁波之间的差别在于信号的产生、辐射、传播、散射、接收和处理等方面有显著不同。

毫米波的频率范围通常指的是30GHz~300GHz，有时也把到1000GHz的亚毫米波包含在内。在电磁波频谱图中，与毫米波相邻的有两个频段：比毫米波频率低的是微波频段，比毫米波频率高的是红外线频段。毫米波的特点是波长短，频带宽，在媒质中传播损耗大，这在很大程度上决定了毫米波器件、电路、系统的特点和它的应用领域。在许多应用中，毫米波系统兼有微波和红外线系统的特点，然而由于其在大气中的传播衰减大，通常毫米波系统总是用在分辨率很高的短程系统中；在卫星通信和外层空间应用中，毫米波、亚毫米波以其波长短、频带宽占有独特的优势。微波、毫米波和红外线以其各自的特点在电子科学技术中占有它们相应的地位，谁也不可能代替谁。

从大微波的观点来看，毫米波应归于微波范畴，所有微波频段的理论及其分析方法，原则上都可用于毫米波，反之亦然。微波和毫米波在理论与技术上的发展必然是互相促进、互相补充的，在研究时应当充分注意由于它们的波长不同、在媒质与传输线中的损耗不同、半导体器件特性的差异所面临的新问题，以及由此产生的分析及处理方法的不同。同时，毫米波技术的发展也离不开计算机、激光、半导体及其他科学技术的进步。

在20世纪30年代人们已经产生出毫米波信号，由于其传播特性及关键技术上的困难，毫米波技术长期得不到发展。直到20世纪70年代以后，毫米波技术才有了长足进步。我国科研人员在20世纪70年代末80年代初从元件、器件和电路开始研究，到现在毫米波技术的研究成果已经在通信、雷达、末制导、射电天文、遥感及民用工程中得到了广泛应用，对毫米波理论与技术作出了重要贡献。国内各高校开设毫米波技术课程已有十几年的历史，已经培养了一批从事毫米波技术研究的人才，但是所用教材散见于国内外学术刊物，到目前为止尚未见到一本正式的、系统化的研究生教材。为了推动毫米波技术的研究，满足进一步培养高级毫米波技术研究人才的需要，在电子工业部的统一安排下，作者撰写了这本“毫米波理论与技术”一书。在本教材中，作者努力尽可能全面反映到目前为止毫米波理论及技术的最新研究成果，包括国内学者所作的贡献，然而，一方面毫米波技术的研究成果非常丰富，另一方面限于作者的学识水平，挂一漏万在所难免，衷心希望同行专家、教授批评指正。

全书共分十章。第一章是绪论，对毫米波技术的发展历程、毫米波的特点及应用作了简

要介绍。第二章讲述毫米波在大气媒质中的传播特性,着重讲述大气成分对毫米波的吸收,降雨对毫米波的衰减、散射和去极化等。第三章和第四章介绍毫米波的传输媒介,包括波导和传输线。本书把不能传输 TEM 模式的传输媒介统称为波导,放在第三章中讲解。在第四章中专门讲述了 TEM 传输线,特别用共形映射技术给出了多种新型集成传输线的严格公式。第五章介绍毫米波源,重点是毫米波固态源。电子管毫米波源的内容十分丰富,必须用专门的著作来研究,在本书中只是简略提到。第六章详细介绍了毫米波混频器的理论、技术、电路及其测试方法,特别给出了实际混频器中的能量关系,从理论上解决了混频器中的参量效应问题。第七章讲解毫米波固态电路,包括放大器、检波器、开关电路、半导体移相等。除了毫米波源和毫米波混频器外,它们是毫米波电子系统所不可缺少的电路。第八章讲述毫米波无源器件:定向耦合器、阻抗变换器、滤波器、环行器和隔离器、毫米波多端口网络等。多端口网络在功分器及微波、毫米波测量中用得很多。第九章讲述毫米波天线,主要有反射面天线、喇叭天线、漏波天线、微带天线、超宽带天线。微带天线具有剖面小、共形、成本低、可大规模生产等良好的性能,非常适合毫米波频段的应用。针对毫米波频谱很宽的特点,特别介绍了几种超宽带天线。第十章讲述毫米波的测量及系统应用,重点讲述了毫米波的六端口测量技术、RCS 的成像测量、毫米波的时域测量以及毫米波在通信和雷达中的应用。

科学技术总是不断地遇到新课题,不断地解决新问题,不断地取得新成就,这样一步一步向前发展,毫米波技术也不例外。本教材的目的在于引导研究生进入毫米波研究领域,在他们开始新的征程时,本书若能起到些许作用,作者就很欣慰了。

阮成礼

2000 年 9 月



阮成礼教授，1944年5月生，湖北红安人。1967年大学毕业，1981年获硕士学位，1984年获博士学位。1988年任教授，1993年任博士生导师。

多年来主要从事电磁场微波技术和超宽带电磁学（电磁导弹）的科研和教学工作。在国内发表学术论文180余篇；著有专著一部——《电磁导弹概论》（人民邮电出版社，1994年），为全国高科技重点图书，并获1995年全国优秀科技图书奖；编著国家级重点教材一本——《毫米波理论与技术》（电子科技大学出版社，2001年）。其科研成果获国家科技进步奖一项、部级科技进步奖五项。1991年被评为中国有突出贡献的博士学位获得者并获政府特殊津贴，1992年获光华科技基金二等奖，1996年被评为电子部有突出贡献的专家。目前正在从事超宽带电磁学的理论及其在雷达、通信等领域里的应用研究。

## 目 录

|                |    |
|----------------|----|
| 第一章 绪论         | 1  |
| 1.1 毫米波频谱的拓展   | 1  |
| 1.2 毫米波的特点     | 3  |
| 1.3 毫米波的应用及发展  | 4  |
| 1.3.1 导弹制导     | 4  |
| 1.3.2 雷达       | 5  |
| 1.3.3 毫米波通信    | 5  |
| 1.3.4 辐射计及其他应用 | 5  |
| 1.3.5 毫米波的发展   | 6  |
| 习题一            | 7  |
| 参考文献           | 7  |
| 第二章 毫米波的传播特性   | 8  |
| 2.1 大气的吸收      | 8  |
| 2.2 降水引起的毫米波衰减 | 12 |
| 2.2.1 雨衰减      | 12 |
| 2.2.2 雾        | 17 |
| 2.2.3 雪、雹和极化   | 19 |
| 2.3 其他大气效应     | 20 |
| 2.3.1 晴空效应     | 20 |
| 2.3.2 大气热噪声    | 21 |
| 2.3.3 雨、雾、云的反射 | 22 |
| 2.4 烟、尘和多径效应   | 23 |
| 2.4.1 烟、尘引起的衰减 | 23 |
| 2.4.2 植被       | 25 |
| 2.4.3 多径效应     | 25 |
| 2.5 系统设计考虑     | 27 |
| 2.5.1 雷达       | 27 |
| 2.5.2 毫米波链路    | 29 |
| 习题二            | 33 |
| 参考文献           | 34 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第三章 毫米波波导 .....             | 37  |
| 3.1 金属波导 .....              | 37  |
| 3.1.1 矩形波导 .....            | 37  |
| 3.1.2 非均匀填充波导 .....         | 44  |
| 3.1.3 圆波导 .....             | 51  |
| 3.1.4 过模波导 .....            | 53  |
| 3.2 介质波导 .....              | 58  |
| 3.2.1 介质柱波导 .....           | 58  |
| 3.2.2 过模介质 O-波导 .....       | 62  |
| 3.2.3 等离子体波导 .....          | 71  |
| 3.3 介质镜像线 .....             | 76  |
| 3.3.1 介质镜像线的近似分析 .....      | 76  |
| 3.3.2 介质波导的全波分析法 .....      | 81  |
| 3.4 鳍线-E 面传输线 .....         | 89  |
| 习题三 .....                   | 93  |
| 参考文献 .....                  | 95  |
| 第四章 毫米波 TEM 传输线 .....       | 99  |
| 4.1 平面传输线 .....             | 99  |
| 4.2 共面波导 .....              | 100 |
| 4.2.1 悬置共面波导 .....          | 100 |
| 4.2.2 带上屏蔽板的共面波导 .....      | 105 |
| 4.2.3 接地板宽度为有限值的共面波导 .....  | 107 |
| 4.2.4 有限尺寸介质基片上的共面波导 .....  | 109 |
| 4.3 共面带线 .....              | 112 |
| 4.3.1 基本的共面带线 .....         | 112 |
| 4.3.2 多层介质基片上的非对称共面带线 ..... | 114 |
| 4.3.3 有限尺寸介质基片上的共面带线 .....  | 118 |
| 4.4 微带线 .....               | 122 |
| 4.4.1 微带类传输线分析 .....        | 122 |
| 4.4.2 微带线的参数 .....          | 126 |
| 4.4.3 微带线的一般解 .....         | 132 |
| 4.4.4 微屏蔽线 .....            | 139 |
| 习题四 .....                   | 146 |
| 参考文献 .....                  | 146 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第五章 毫米波源                 | 149 |
| 5.1 毫米波固态源               | 149 |
| 5.1.1 基本理论               | 149 |
| 5.1.2 IMPATT 振荡器         | 152 |
| 5.1.3 Gunn 振荡器           | 162 |
| 5.1.4 隧道二极管振荡器           | 173 |
| 5.1.5 TUNNETT 二极管        | 176 |
| 5.2 毫米波功率合成              | 178 |
| 5.2.1 功率合成的分类            | 178 |
| 5.2.2 谐振腔合成技术            | 178 |
| 5.2.3 混合功率合成技术           | 181 |
| 5.2.4 准光功率合成             | 186 |
| 5.3 毫米波电子管               | 194 |
| 5.3.1 行波管(TWT)           | 194 |
| 5.3.2 回旋管                | 200 |
| 习题五                      | 205 |
| 参考文献                     | 206 |
| 第六章 毫米波混频器               | 211 |
| 6.1 引言                   | 211 |
| 6.2 金属半导体结               | 213 |
| 6.2.1 电流传输机理和电流-电压特性     | 213 |
| 6.2.2 结电导                | 215 |
| 6.2.3 结电容                | 215 |
| 6.2.4 串联电阻               | 216 |
| 6.3 基本能量关系               | 216 |
| 6.3.1 非线性电抗中的基本功率关系      | 216 |
| 6.3.2 非线性电阻中的一般功率关系      | 218 |
| 6.3.3 含有寄生电容的非线性电阻中的能量关系 | 220 |
| 6.4 大信号分析                | 223 |
| 6.4.1 分析方法               | 223 |
| 6.4.2 大信号等效电路            | 224 |
| 6.4.3 多次反射技术             | 226 |
| 6.5 小信号分析                | 228 |
| 6.5.1 边带频率表示             | 228 |
| 6.5.2 变频导纳矩阵             | 228 |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 6.5.3 混频器端口阻抗 .....      | 229        |
| 6.5.4 变频损耗 .....         | 230        |
| 6.6 混频器的噪声理论 .....       | 231        |
| 6.6.1 噪声等效电路 .....       | 232        |
| 6.6.2 散粒噪声 .....         | 232        |
| 6.6.3 热噪声 .....          | 233        |
| 6.6.4 混频器的总噪声 .....      | 234        |
| 6.7 非线性结电容的变频作用 .....    | 235        |
| 6.7.1 频率平面 .....         | 235        |
| 6.7.2 四频率参量下变频器 .....    | 235        |
| 6.7.3 增益条件 .....         | 237        |
| 6.7.4 输出阻抗及稳定工作条件 .....  | 240        |
| 6.7.5 谐振条件 .....         | 241        |
| 6.8 混频器电路 .....          | 242        |
| 6.8.1 混频器的分类与参数 .....    | 242        |
| 6.8.2 悬置带线平衡混频器 .....    | 245        |
| 6.8.3 分谐波混频器 .....       | 246        |
| 6.9 混频器参数的测量 .....       | 248        |
| 6.9.1 变频损耗的测量 .....      | 248        |
| 6.9.2 混频器输出阻抗的测量 .....   | 249        |
| 6.9.3 噪声温度的测量 .....      | 249        |
| 习题六 .....                | 251        |
| 参考文献 .....               | 251        |
| <b>第七章 固态电路</b> .....    | <b>254</b> |
| 7.1 放大器 .....            | 254        |
| 7.1.1 放大器的参数 .....       | 254        |
| 7.1.2 负阻放大器 .....        | 256        |
| 7.1.3 GaAs 场效应管放大器 ..... | 258        |
| 7.1.4 HEMT 小信号分析 .....   | 261        |
| 7.1.5 HEMT 的非线性分析 .....  | 265        |
| 7.1.6 HEMT 放大器 .....     | 268        |
| 7.2 检波器 .....            | 270        |
| 7.2.1 检波用器件 .....        | 270        |
| 7.2.2 检波器的性能 .....       | 273        |
| 7.2.3 检波器的噪声与灵敏度 .....   | 274        |
| 7.2.4 检波器电路 .....        | 275        |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 7.3 开关电路 .....                        | 276 |
| 7.3.1 PIN 二极管 .....                   | 276 |
| 7.3.2 开关电路 .....                      | 276 |
| 7.3.3 准光 PIN 开关 .....                 | 278 |
| 7.4 半导体移相器 .....                      | 282 |
| 7.4.1 传输式移相器 .....                    | 282 |
| 7.4.2 反射式移相器 .....                    | 284 |
| 7.4.3 Schiffman 移相器 .....             | 285 |
| 7.4.4 移相器的综合 .....                    | 289 |
| 习题七 .....                             | 296 |
| 参考文献 .....                            | 297 |
| 第八章 毫米波无源电路 .....                     | 302 |
| 8.1 定向耦合器 .....                       | 302 |
| 8.1.1 TEM 传输线定向耦合器 .....              | 304 |
| 8.1.2 宽带 3dB 定向耦合器 .....              | 308 |
| 8.1.3 孔耦合定向耦合器 .....                  | 310 |
| 8.2 阻抗变换器 .....                       | 316 |
| 8.2.1 $\frac{\lambda}{4}$ 阻抗变换器 ..... | 316 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第九章 毫米波天线</b> .....        | 368 |
| 9.1 反射面的天线 .....              | 368 |
| 9.1.1 反射面的分析 .....            | 368 |
| 9.1.2 抛物反射面天线 .....           | 370 |
| 9.1.3 双反射面天线 .....            | 372 |
| 9.1.4 偏置反射面天线 .....           | 374 |
| 9.1.5 介质层的影响 .....            | 377 |
| 9.2 喇叭天线 .....                | 379 |
| 9.2.1 角锥喇叭 .....              | 379 |
| 9.2.2 多模喇叭 .....              | 386 |
| 9.2.3 波纹喇叭 .....              | 388 |
| 9.2.4 介质加载多张角喇叭 .....         | 390 |
| 9.2.5 TEM 喇叭 .....            | 393 |
| 9.3 漏波天线 .....                | 395 |
| 9.3.1 快波型漏波天线 .....           | 395 |
| 9.3.2 慢波型漏波天线 .....           | 399 |
| 9.3.3 周期性漏波天线 .....           | 403 |
| 9.4 微带天线 .....                | 406 |
| 9.4.1 微带天线的分析方法 .....         | 408 |
| 9.4.2 多端口网络分析法 .....          | 411 |
| 9.4.3 微带天线的频带展宽 .....         | 417 |
| 9.4.4 微带天线阵列 .....            | 418 |
| 9.5 超宽带天线 .....               | 419 |
| 9.5.1 V 锥天线 .....             | 419 |
| 9.5.2 椭圆 V 锥天线 .....          | 424 |
| 9.5.3 双圆锥天线 .....             | 426 |
| 习题九 .....                     | 427 |
| 参考文献 .....                    | 428 |
| <b>第十章 毫米波的测量及其系统应用</b> ..... | 431 |
| 10.1 毫米波的六端口测量技术 .....        | 431 |
| 10.1.1 一般理论 .....             | 431 |
| 10.1.2 双六端口网络分析仪的校准与测量 .....  | 435 |
| 10.1.3 三-六端口网络分析仪的校准与测量 ..... | 436 |
| 10.1.4 多端口网络及多六端口网络分析仪 .....  | 439 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 10.2 毫米波的成像测量.....     | 440 |
| 10.2.1 电磁相似性原理.....    | 440 |
| 10.2.2 成像测量.....       | 444 |
| 10.3 毫米波的时域测量.....     | 447 |
| 10.3.1 毫米波的光导测量技术..... | 447 |
| 10.3.2 毫米波时域反射计.....   | 453 |
| 10.4 毫米波雷达.....        | 456 |
| 10.4.1 雷达方程.....       | 456 |
| 10.4.2 制导雷达.....       | 457 |
| 10.5 毫米波通信.....        | 463 |
| 10.5.1 地面通信.....       | 464 |
| 10.5.2 卫星通信.....       | 465 |
| 习题十.....               | 468 |
| 参考文献.....              | 469 |