

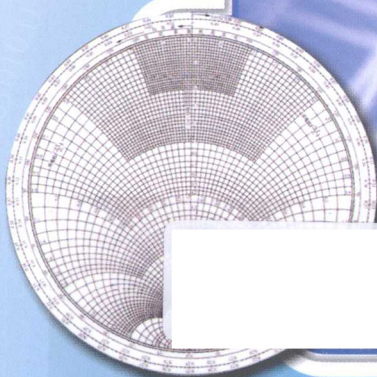


21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

微波技术基础及其应用

MICROWAVE TECHNOLOGY BASIS AND APPLICATIONS

李泽民 编 著
黄 卉



数学描述清晰透彻
基础概念合理派生
教学动画生动活泼



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

微波技术基础及其应用

编 著 李泽民 黄 卉
主 审 顾宝良



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书力求以简明的方式介绍实(常)用微波技术基础所涉及的数学描述,使学生从大篇幅的数学推演中跳出来而将思路集中于对结论数学表达式的认识;从数学描述中派生出许多实用的基础概念,这些概念用于指导实际工作时可带来许多方便。本书计划授课时数为48学时(3学分),具体授课内容为以下7章:第1章均匀双线传输线的基本理论;第2章规则金属波导;第3章微带传输线介质波导和光纤综述;第4章实际中常用的线性无源微波元器件;第5章实际中常用的有损耗非互易微波元器件;第6章微波技术中的微波选频器件;第7章微波工程仿真设计简介。上述7章内容,基本可以满足近代微波专业工作所需的基础知识和基本设计要求。

本书适合大学本科电子信息和通信等相关专业使用,也可以供从事通信和电子信息行业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术基础及其应用/李泽民,黄卉编著. —北京:北京大学出版社,2013.3

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-21849-5

I. ①微… II. ①李… ②黄… III. ①微波技术—高等学校—教材 IV. ①TN015

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第308909号

书 名:微波技术基础及其应用

著作责任者:李泽民 黄 卉 编著

策 划 编 辑:程志强

责 任 编 辑:程志强

标 准 书 号:ISBN 978-7-301-21849-5/TN·0093

出 版 发 行:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路205号 100871

网 址:<http://www.pup.cn> 新浪官方微博:@北京大学出版社

电 子 信 箱:pup_6@163.com

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者:北京世知印务有限公司

经 销 者:新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 26.5印张 615千字

2013年3月第1版 2013年3月第1次印刷

定 价:49.00元

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

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

前言

在人类近 5 万年的历史长河中科学技术发展也不过是近百年的事情，而通信科学技术也只是在近代才获得飞速发展和进步。事实上，这是在不断发展的电路理论和电磁场理论的基础上才得以实现的。

1831 年法拉第提出了电磁感应定律、1873 年麦克斯韦尔提出了电磁场理论、1888 年赫兹实验证明了电磁波的存在、1895 年波波夫和马可尼先后设计了火花发报机电路并发明了简单的火花发报机等，为近代通信科学技术奠定了最早期的基础，为人类迈入通信科学技术领域进行了前期探索，并提供了方便快捷的信息交流手段；当然，也为人类战争对抗提供了隐形手段。

在第二次世界大战中人们将电磁波谱应用拓展到了微波波段，随后由于通信和对抗的需要微波技术也逐步进入了应用领域，并在之后的近一个世纪获得了飞速发展和进步。微波技术所涉及的技术和理论领域十分广泛而且仍在不断发展，几乎无法用一本“书”或是“教材”将其涵盖。20 世纪国内外众多学者编著了许多关于微波技术领域的书籍，几乎均是从原理、基础和应用层面进行论述。例如黄宏嘉教授编著的《微波原理》（科学出版社，1963 年），叶培大教授编著的《微波技术基础》（人民邮电出版社，1976 年），叶培大和吴彝尊教授编著的《光波导技术基本理论》（人民邮电出版社，1984 年），廖乘恩教授编著的《微波技术基础》（国防工业出版社，1984 年），鲍家善教授编著的《微波原理》（高等教育出版社，1965 年），R·E·柯林著、侯元庆译的《导波场论》（上海科学技术出版社，1966 年），Om p. Gandhi 编著的 *Microwave Engineering and Application*（Pergamon Press，1981 年），R·A·瓦尔特朗著、徐鲤庭译的《波导电磁波原理》（人民邮电出版社，1977 年），等等。即便如此，由于上述书籍过于偏重理论不适合当代大学本科教学的需要，为此笔者根据在东南大学成贤学院的教学实践，初步尝试编写本书并冠名为《微波技术基础及其应用》，以避免过多理论讲授而又不损伤最基本的实用理论。

本书是东南大学成贤学院“十二五”规划教材，本书力求以简明方式介绍实(常)用微波技术基础所涉及的数学描述，使学生从大篇幅的数学推演中跳出来而将思路集中于对结论数学表达式的认识，从而派生出许多实用的基础概念，这些概念可为实际工作带来许多方便。本书计划授课时数为 48 学时(3 学分)，授课内容为 7 章。第 1 章均匀双线传输线的基本理论 主要围绕以下思路进行讨论：以均匀传输线方程(电报方程)为核心、以阻抗圆图和导纳圆图为归属，较全面地为后续各章奠定理论概念和技术基础；单就理论层面而论，本章是“路”向“场”概念认识的过渡。第 2 章规则金属波导主要围绕以下思路进行讨论：以无源麦克斯韦方程为核心、以金属矩形波导和金属圆波导中导波场为归属，较全面地讨论规则金属波导的传输特性，为设计和正确使用规则金属波导提供依据；单从理论层面上而论，本章纯属是对“场”概念的认识。第 3 章微带传输线介质波导和光纤综述所涉及的内容是介质传输线中的导波场及其传输特性和微带传输线的设计计算方法。微带传



输线可以将微波领域中使用的电路集成在基片上构成平面电路,电路生产重复性好且便于构成各种有源电路,正是微带传输具有上述特点使其在微波技术中获得广泛应用。若将微带传输线用于毫米波和亚毫米波段,其设计将非常复杂。人们曾一度将金属波导应用于毫米波段构成各种传输器件,但终因尺寸太小难以实现,最后又将目光转向介质传输线。目前,介质波导在毫米波段和亚毫米波段获得广泛应用。毫米波和亚毫米波在实用中具有测量精度高、分辨能力强、载送信息容量大、设备设计尺寸小、重量轻和能穿透等离子等优点,使其在通信、雷达、导弹制导、射电天文学、原子和分子结构研究和超导现象研究和等离子体密度测量等方面都具有非常好的实用价值。光纤又称为光导纤维,它也是一种介质传输线。考虑到求解光纤导波场与求解圆形介质波导导波场的方法基本近似,因而本书避开了对于光纤冗长的数学描述而直接引用圆形介质波导的某些概念,而将重点放在对光纤实用问题综述性的讨论上,这无疑是初学者所希望的。20世纪60年代人们将特大容量通信寄希望于金属圆导的 H_{01} 模,但因其有难以克服的缺点致使各国进行的试验均以失败告终。1966年7月英国标准电信研究所英籍华人K. C. Kao和G. A. Daves撰文明确提出可以用玻璃制作衰减为20dB/km的光导纤维,并指出光导纤维可以用作通信的早期预见,1968年两人又撰文宣称他们在 $0.85\mu\text{m}$ 波长上测量 SiO_2 玻璃折算光纤衰减为5dB/km。1970年美国康宁公司宣布研制成功衰减为20dB/km的光纤,从此为特大容量通信找到了传输手段,继而产生了光纤通信。光纤通信的出现被认为是通信史上一次根本性的变革。目前光纤在医疗和国防等领域也获得广泛应用。第4章实际中常用的线性无源微波元器件介绍实际中常用的线性无源微波元器件,在讨论中为了获得一种贴近实际的分析方法,有必要首先介绍微波网络理论的相关概念;为此,建立微波网络的概念和介绍相关的网络参数,并用散射矩阵 S 参数描述和测量微波网络,为使用“路”的观念描述常见的线性无源微波元器件提供一种有力的数学方法,使其具有可测量性和避开烦琐的数学论述而具有实用性。实际中常用的线性微波元器件主要介绍以下内容:在微波电路中几种实现常见功能的微波元器件、微波电路中实现分支连接使用的微波元器件和匹配连接的微波器件等;这类微波元器件在组成微波电路时,是必不可少的。第5章实际中常用的有损耗非互易微波元器件主要介绍微波铁氧体的物理性能和利用它构成的微波铁氧体非互易器件(单向器和环行器);在微波电路中若要使微波信号单向传输,就需要使用微波铁氧体非互易器件,它可以构成微波电路中的“级间隔离”和“分路隔离”而保证电路“级间稳定”而不互相牵引,并保证微波信号“分路隔离”而不互相影响;在组成微波电路时,微波铁氧器件是必不可少的。第6章微波技术中的微波选频器件使用微波选频器件的题名,介绍微波技术中常用的微波谐振腔(器)和微波滤波器,这样做可以将上述两种器件和实际应用结合起来考虑而减少“就事论事”的感觉。对于具体内容的介绍方面,本章主要讨论在微波技术实际中常用的谐振腔(器)和以归一化低通原型滤波器为基础的微波滤波器的设计思想;由于实际微波滤波器种类很多,本章只能结合内容需要做一些简单的设计介绍。第7章微波工程仿真设计简介主要介绍ADS2009的基本工作界面,用具体实例说明如何利用ADS2009实现微波电路匹配仿真设计。

本书绪论和第1~6章由李泽民编写,第7章由东南大学成贤学院黄卉编写,全书由李泽民统编修改定稿,并由东南大学信息科学与工程学院顾宝良教授主审。顾宝良教

授详细地审阅了所有书稿，并对本书的内容设置和章节安排提供了宝贵的意见和建议。

本书适合大学本科电子信息、通信等相关专业使用，也可以供从事通信和电子信息行业的技术人员参考。

编者

2012年11月

推荐出版说明

通信和信息科学技术是近代飞速发展和进步的一门极为重要的学科，而电磁场理论和微波技术是通信和信息科学技术发展的基础。因此，作为电子信息专业本科应用型人才培养，电磁场理论和微波技术两门课程是极为重要的专业基础课程，也可以说是两门看家课程。

微波技术所涉及的理论和技术领域十分广泛而且仍在不断发展，几乎无法用一本“书”或是“教材”将其涵盖。上世纪国内外众多学者编著了许多关于微波技术领域的书籍或教材，几乎均是从原理、基础和应用层面进行论述。这些教材和书籍中理论分析推导过于偏重，实用基础概念偏少，不适合当代大学本科教学需要。为此，李泽民教授根据在东南大学成贤学院三年的教学实践和他多年的科研实践经验体会，主持编写了这本冠名为《微波技术基础及其应用》、适合于东南大学成贤学院应用型人才培养的教材。该教材避免了过多理论讲授但又不损伤最基本的实用理论，力求以简明方式(部分采用流程图方式)介绍实(常)用微波技术基础所涉及的数学描述且不拘泥于书写形式，使学生从大篇幅的数学推演中跳出来，将思路集中于对结论数学表达式的认识，从而派生出许多实用基础概念，这些概念用于实际工作可带来许多方便。

李泽民教授和黄卉老师合作编著的《微波技术基础及其应用》教材是在不断发展的电路基础和电磁场理论基础上，应用“路”和“场”概念以简明通俗的语句，力求理论结合实际，写出应用型教材。该教材共有7章。第1章均匀传输线基本理论以均匀传输线方程(电报方程)为核心，阻抗圆图和导纳圆图为归属，较全面地为后续各章奠定理论概念和技术基础，本章是“路”向“场”概念认识的过渡。第2章规则金属波导以无源麦克斯韦方程为核心，以金属矩形波导和金属圆波导中导波场为归属，较全面地讨论规则金属波导的传输特性，为设计和正确使用规则金属波导提供依据，这是“场”概念的认识。第3章微带传输线介质波导和光纤综述微带传输线可以将微波领域中使用的电路集成在基片上构成平面电路，电路生产重复性好且便于构成各种有源电路。正是微带传输具有上述特点，才使其在微波技术中获得广泛应用。若将微带传输线用于毫米波和亚毫米波段，则因其尺寸太小，设计非常复杂而难以实现。目前在毫米波和亚毫米波段广泛应用介质波导作为传输媒体。毫米波和亚毫米波在实用中具有测量精度高、分辨能力强、载送信息容量大、设备设计尺寸小、重量轻和能穿透等离子等优点，使其在通信、雷达、导弹制导、射电天文学、原子和分子结构研究、超导现象研究和等离子体密度测量等方面都具有非常好的实用价值。光纤又称为光导纤维，它也是一种介质传输线。考虑到求解光纤导波场与求解圆形介质波导导波场的方法基本近似，因而该教材避免了对于光纤冗长的数学描述，而直接引用圆形介质波导的某些概念，并将重点放在对光纤实用问题综述性的讨论。光导纤维的诞生为特大容量通信找到了传输媒体，从而出现了光纤通信。光纤通信的出现被认为是通信史上一次根本性的变革。第4章实际中常用的线性无源微波元器件介绍实际中常用的线性无源微波元器件，可以采用一种贴近实际的分析方法进行分析。该章首先介绍微波网络理论的相关概念，并建立微波网络的概念和相关的网络参数，用散射矩阵S参数描述和测量



微波网络。这为使用“路”的观念描述常见的线性无源微波元器件提供一种实用的数学方法，从而使其具有可测量性和避开烦琐的数学论述。实际中常用的线性微波元器件主要有：在微波电路中几种常见功能的微波元器件、微波电路中分支连接使用的微波元器件和匹配连接的微波器件等。第5章实际中常用的有损耗非互易微波元器件主要介绍根据微波铁氧体的物理性能，它可以构成微波铁氧体非互易器件(单向器和环行器)；在微波电路中若要使微波信号单向传输，就需要使用微波铁氧体非互易器件，它可以构成微波电路中的“级间隔离”和“分路隔离”，从而保证电路“级间稳定”而不互相牵引，保证微波信号“分路隔离”而不互相影响。第6章微波技术中的微波选频器件主要讨论在微波技术实际中常用的谐振腔(器)，和以归一化低通原型滤波器为基础的微波滤波器的设计思想；由于实际微波滤波器种类很多，因此只能结合内容需要对几种重要的常用微波滤波器作简单设计介绍。第7章微波工程仿真设计简介主要介绍 ADS2009 的基本工作界面，以具体实例说明如何利用 ADS2009 实现匹配电路设计。

在该教材中涉及的基础知识和基本分析方法能做到尽量阐述详尽，不仅重视教而且更重视读，能做到力求增加可读性。该教材中的各章节还列举了足够的例题，帮助学生加深对基础知识的理解，以减少学生阅读和自学的困难。

《微波技术基础及其应用》是东南大学成贤学院的“十二五”规划教材，该教材可作为电子信息专业本科应用型人才培养的实用性教材，同时也可供与电子通信等相关专业的学生使用，还可作为电子通信和电子信息技术相关工程技术人员的一本很有用的参考书。

主审 东南大学信息科学与工程学院教授 顾宝良

2011年11月1日于南京

目 录

绪论	1	1.5.3 阻抗圆图和导纳圆图应用 举例	57
0.1 微波的特点	1	练习题	61
0.2 课程特点及学习方法	6	第2章 规则金属波导	66
练习题	8	2.1 基本概念和起步数学表达方式	67
第1章 均匀双线传输线的基本理论	9	2.1.1 金属矩形波导中的部分波 概念	67
1.1 基本概念和起步数学表达方式	10	2.1.2 怎样用部分波的概念分析 矩形波导中的 TE_{10} 波	68
1.1.1 均匀双线传输线的电信号传输 及其传输波型	10	2.2 金属矩形波导	71
1.1.2 描述均匀双线传输线数学表达 方式	11	2.2.1 金属矩形波导中的 TE_{mn} 波 和 TM_{mn} 波	71
1.2 均匀无损耗双线传输线	14	2.2.2 金属矩形波导中 TE_{mn} 模 和 TM_{mn} 模的纯数学描述	73
1.2.1 均匀无损耗双线传输线方程的 解(答)及其研究	14	2.2.3 金属矩形波导的传输特性	77
1.2.2 均匀无损耗双线传输线的输入 阻抗、相速及线内波长	18	2.2.4 关于标准金属矩形波导	93
1.3 均匀无损耗传输线的实际工作状况 分析	21	2.3 金属圆形波导	98
1.3.1 均匀无损耗传输线上的反射 系数和反射系数圆	21	2.3.1 金属圆形波导中的导波模	98
1.3.2 均匀无损耗传输线的输入 阻抗与反射系数的关系	23	2.3.2 金属圆形波导的传输特性	105
1.3.3 均匀无损耗传输线在实际 工作中可能出现的几种工作 状态	24	2.3.3 金属圆形波导的用途	110
1.3.4 具体分析均匀无损耗传输线的 3种工作状态	24	2.4 同轴传输线中的高次模和如何设计 同轴线的尺寸	115
1.4 均匀传输线的阻抗匹配问题	38	2.4.1 同轴传输线中的导波模及其 截止波长	115
1.4.1 为什么传输线需要阻抗 匹配	38	2.4.2 如何设计同轴传输线的 尺寸	120
1.4.2 传输线的阻抗匹配问题的 提出	43	练习题	123
1.4.3 如何实现(或获得)传输线的 阻抗匹配	46	第3章 微带传输线介质波导和光纤 综述	126
1.5 阻抗圆图和导纳圆图	49	3.1 微带传输线及其基本应用	127
1.5.1 归一化阻抗圆图	50	3.1.1 微带传输线	127
1.5.2 归一化导纳圆图	55	3.1.2 带状线(对称微带线)	131
		3.1.3 微带线(标准微带线)	141
		3.1.4 耦合带状线及耦合微带线	159
		3.1.5 应用在微波集成电路中的 其他微带传输线	172



3.1.6 各种微波集成电路(MIC)	
传输线的性能比较	174
3.2 介质波导和光纤综述	175
3.2.1 介质波导简介	175
3.2.2 光导纤维综述	184
练习题	197

第4章 实际中常用的线性无源微波 元器件

4.1 微波网络的基本概念	202
4.2 关于微波网络的 Z 、 Y 和 A 参数	203
4.2.1 参考面开路阻抗参数	203
4.2.2 参考面短路导纳参数	204
4.2.3 参考面短路或开路的链接 参数	204
4.2.4 二端口网络的特性阻抗的 概念及确定方式	206
4.2.5 归一化网络和归一化网络 参数	207
4.3 关于微波网络的 S 参数	209
4.3.1 如何定义 S 参数	210
4.3.2 多端口网络的 $[S]$ 矩阵及 S 参数的重要特性	212
4.3.3 怎样测量 S 参数	215
4.3.4 二端口网络的传输 $[S]$ 矩阵	216
4.4 在微波电路中几种实现常见功能的 微波元器件	218
4.4.1 实现金属波导连接的微波 元器件	218
4.4.2 实现衰减和相移的微波 元器件	219
4.4.3 实现不同类型波型转换连接的 微波元器件	221
4.5 微波电路中实现分支连接使用的 微波元器件	225
4.5.1 实现分支连接微波元器件的 网络特性	225
4.5.2 实现功率定向分支连接的 定向耦合器	231
4.5.3 实现功率分支分配连接的 三端口功率分配器	241
4.6 微波电路中实现阻抗匹配所使用的 微波元器件	243

4.6.1 阶梯阻抗变换器	244
4.6.2 指数渐变线阻抗变换器	249
4.6.3 切比雪夫阻抗变换器简介	251
4.6.4 螺钉(调整)匹配器	254
练习题	260

第5章 实际中常用的有损耗非互易微波 元器件

5.1 泛谈有损耗非互易微波元器件	266
5.1.1 常用的有损耗非互易微波元 器件——铁氧体器件	266
5.1.2 实际中使用铁氧体器件的 领域	267
5.1.3 铁氧体的概念及其特性	271
5.2 微波铁氧体单向器	276
5.2.1 微波铁氧体单向器产品技术 指标	276
5.2.2 谐振式铁氧体单向器	277
5.2.3 场移式铁氧体单向器	280
5.3 微波铁氧体环行器和相移器	281
5.3.1 微波铁氧体环行器产品技术 指标	281
5.3.2 环行器的种类及其分析方法 概述	282
5.3.3 微波铁氧体 Y 形结环行器	284
5.3.4 带状线集中参数环行器 简介	288
5.3.5 铁氧体相移器	290
练习题	292

第6章 微波技术中的微波选频器件

6.1 泛谈微波选频器件	294
6.1.1 泛谈选频技术	294
6.1.2 泛谈微波谐振腔和微波 滤波器	295
6.2 微波谐振腔(器)	298
6.2.1 固有谐振频率和品质因素	298
6.2.2 介绍几种谐振腔(器)	301
6.3 微波滤波器	324
6.3.1 滤波器	324



6.3.2 设计滤波器的插入损耗方法简介	326	7.2 ADS 主要操作窗口	363
6.3.3 怎样综合最平低通原型滤波器	329	7.3 匹配电路设计	366
6.3.4 怎样综合等波纹低通原型滤波器	333	7.3.1 Smith Chart Utility Tool ...	366
6.3.5 关于线性相位低通原型滤波器	335	7.3.2 短路线分支阻抗匹配网络设计	373
6.3.6 利用阻抗变换将低通原型滤波器转换成适用的低通滤波器	338	练习题	382
6.3.7 利用频率变换和低通原型滤波器设计其他适用的滤波器	340	附录 A Smith 圆图和绘制史密斯圆图的程序简介	383
6.3.8 关于微波滤波器设计的实现	346	附录 B 贝塞尔函数和几个常用的贝塞尔函数公式	392
练习题	358	附录 C 标准矩形波导和射频同轴电缆的型号及参数	396
第 7 章 微波工程仿真设计简介	361	附录 D 网络分析仪简单原理方框图 ...	399
7.1 ADS 简介	362	附录 E 计算低通原型滤波器元件值的程序	401
		附录 F 课程学时分配表	406
		参考文献	407

绪 论

信息技术发展过程是基于对电磁波谱的开拓使用的过程，图 0-1 所示是电磁波谱图。在图 0-1 中，按照频率的高低(波长的短长)将电磁波谱划分为以下各种波段：超长波、长波、中波、短波、米波、分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波等波段，20 世纪 70 年代又进一步开拓使用了微米波波段。在很长一段时间内仅使用长波、中波和短波，即仅限于利用于 0.3~30MHz 这样一段很窄的波谱，但这段波谱很快就被无线电广播、通信、导航、气象等业务“占满”了，真可以说是“拥挤不堪”。之后不久人们就对波长短于 10m 的波段技术进行研究，但当时并未获得广泛应用。直到第二次世界大战及战后，由于雷达、电视广播和数字通信等技术、特别是近代移动通信技术的发展，才使微波技术获得广泛的应用。与此同时微波技术理论也日渐成熟，20 世纪 50 年代起逐渐形成“微波技术基础”课程。

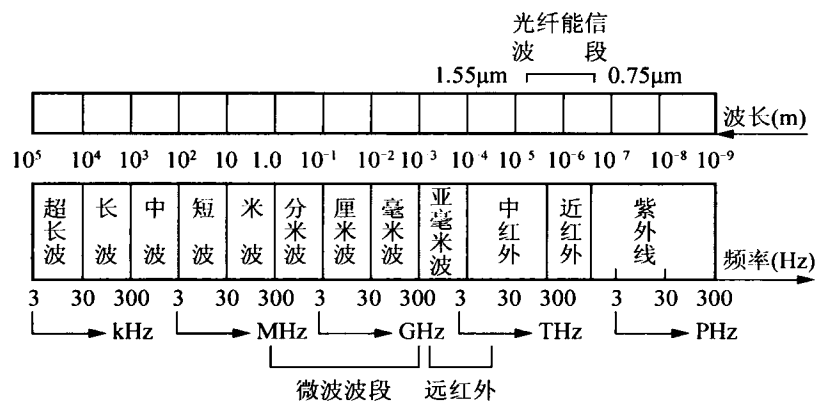


图 0-1 电磁波波谱图

本书将分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波通称为“微波”，即将电磁波谱中的 300MHz~3.0THz 的电磁波波段通称为“微波波段”；但也有人将 1000MHz~3.0THz 的电磁波波段称为“微波波段”。本书所涉及的微波技术基础含微米波(0.75~1.55 μ m 光波段)技术基础，即含光纤技术基础。

0.1 微波的特点

微波具有许多特点，为了正确地使用微波和对微波技术进行理论分析，必须掌握微波的以下主要特点。

1. 微波是以直线方式传播的

图 0-2 所示是电磁波的几种主要传播方式, 由该图看出: 中、长波可以绕地球曲面绕射传播到地球的任何一个地区、角落, 地球上的大尺寸障碍物(如高山、森林、高大建筑物等)都不会对中长波的传播构成明显影响, 这是由于中、长波的波长 $\lambda=10^2\sim 10^4\text{m}$ 大于地球上障碍物尺寸的缘故; 因此, 地球上的障碍物只对波长短的“短波”特别是“微波”传播产生阻挡损耗。中、长波的传播方式被称为“地波”传播, 而短波则是在“地球表面”和“电离层”之间以地球表面为“波导”进行“跳跃”式的传播, 这种传播方式被称为“天波”传播。

天波传播的最大可用频率由下式确定:

$$f_{\max} = \sqrt{80.8 N_{\max}} \sec \theta_0 \quad (0-1)$$

式中: $N_{\max}$ 为电离层中的最大电子密度; θ_0 为电磁波射入电离层的人射角。

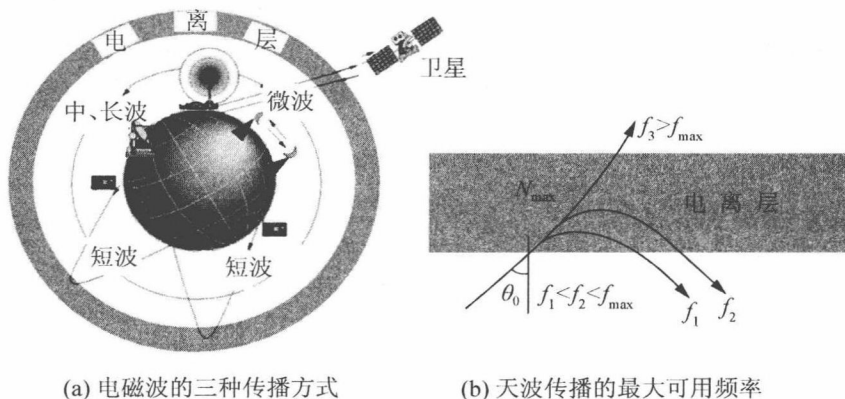


图 0-2 电磁波的几种传播方式

由图 0-2(b)可以看出: 当入射角 θ_0 一定、电磁波的频率 $f > f_{\max}$ 时, 将“穿透”电离层射向“太空”。以天波传播的短波通信频率不能高于最大可用 $f_{\max}$, 通常短波通信所使用的频率必须精心设计安排。

综上所述可见: 因为微波的波长太短, 若以“地波”方式传播, 将受地面障碍物阻挡; 若试图以“天波”方式传播则因微波频率太高将穿透电离层射向太空而形不成“天波”, 故微波在地面上只能在视距范围(通常为 50km 左右)以直线方式传播, 这种传播方式称之为“空间波”。地面微波中继通信使用的是微波空间波传播方式, 每隔 50km 左右设置一个“中继站”采用接力的方式传送微波信号进行地面长途通信; 若将微波穿透电离层直射太空, 则可进行卫星通信和进行太空探索业务(图 0-2)。

2. 微波波段占有非常宽的频谱资源可供使用

电磁波是以一种物质形态存在的, 当今它是一种不可替代和缺少的物质资源。人们使用电磁波的频率资源时都要经过精心设计, 各国都制定了相应的管理规范、设有相应的管理机构对电磁波的频率资源进行管理。我国电磁波的频率资源由“无线电管理委员会”管理, 以做到“物尽其用”。由图 0-3 可以看出: 微波波段占有的频谱资源

$\Delta f_1 = 2999.7 \text{ GHz}$, 它是中波、短波和米波占有的总频谱资源 $\Delta f_2 = 2999.7 \times 10^{-4} \text{ GHz}$ 的 10000 倍。微波波段占有如此宽广的频谱资源, 为信息产业业务发展提供了广阔的频率使用空间。例如, 国际无线电咨询委员会 CCIR (Consultative Committee International) 建议 $1 \sim 40 \text{ GHz}$ 的频段作为微波通信和卫星通信使用频段, 它仅占有 39 GHz 宽的频段; 而这 39 GHz 的频宽只占微波波段占有的频谱资源 $\Delta f_1 = 2999.7 \text{ GHz}$ 的 98% , 真是微不足道。显然, 这 39 GHz 的频宽在微波波段以下的波段则无法安插。

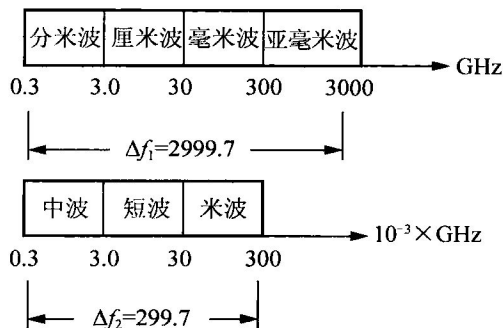


图 0-3 微波波段广阔的频谱资源

我国目前使用 $2、4、6、7、8、11 \text{ GHz}$ 频段作为数字微波通信的频段, 以 11 GHz 频段为例粗略估算它所具有的频宽为

$$\Delta f_{11\text{GHz}} = \frac{10}{100} \times 11 \text{ GHz} \approx 1 \text{ GHz}$$

根据 CCIR 的建议, 在宽 $\Delta f_{11\text{GHz}} \approx 1 \text{ GHz}$ 的频道内可以安排 12 个标准 1920 路“数字电话”信道, 具体微波频谱安排如图 0-4 所示。图中共安排 24 个微波载频 $f_1 \sim f_{24}$ 构成 24 个微波波道, 其中收、发各占 12 个微波波道, 每个波道载送 1920 路数字电话。在 $\Delta f_{11\text{GHz}} \approx 1 \text{ GHz}$ 的频谱中应扣除两种必要的频段“开销”(收、发波道间隔开销 90 MHz , 和边缘保护间隔开销 15 MHz), 共用去 105 MHz , 还剩 895 MHz 频段。在 895 MHz 频段内可容纳 $12 \times 1920 = 23040$ 个“数字电话”的通信容量; 若用一个微波波道做备用还可容纳 $11 \times 1920 = 21120$ 个“数字电话”的通信容量。可见, 微波波段占有如此宽广的频谱资源确实为信息产业的业务发展提供了广阔的频率使用空间。

3. 微波领域使用的传输线和元器件的参数是分布的

下面以双线传输为例来说明这样一个概念: 在低频领域所使用的传输线和元器件的参数是集中的, 而微波领域使用的传输线和元器件的参数则是分布的。例如, 如果将低频领域通常使用的等长度 l 的双线传输线使用在高频领域, 将呈现出由图 0-5(a) 转换成 0-5(b) 所示的图像; 这是因为根据频率 $f = c/\lambda$ (c 是光速) 可知: 图 0-5(b) 的工作频率 f_2 是图 0-5(a) 的工作频率 f_1 的 10^8 倍, 即 $f_2 = 10^8 f_1$; 如果相对于 λ 而言来观察长度为 l 的双线传输线, 将会有以下两种感觉: ① 图 0-5(a) 的传输线长度 l 仅为波长 λ_1 的“万分之一”, 故在传输线上感觉不到信号的“交变”而近似等效于直流工作状态; ② 对于图 0-5(b) 的传输线长度 l 为波长 λ_2 的“一万倍”(相当于“长线”传输线), 故感觉到传输线处于高频交流工作状态。因此, 在图 0-5(b) 中交流参数电感 L 和电容 C 就体现出来了, 同时损耗电阻 R



和电导 G 也随频率升高而增加。上述 L 、 C 、 R 和 G 将沿线按照“微分线段 Δz ”一段接一段地均匀分布，形成沿传输线单位长度上的参数(对于均匀传输线)，从而形成图 0-5(b)的图像。在第一章中将对图 0-5(b)的情况作详细讨论，它将是微波技术的“核心”基础之一。

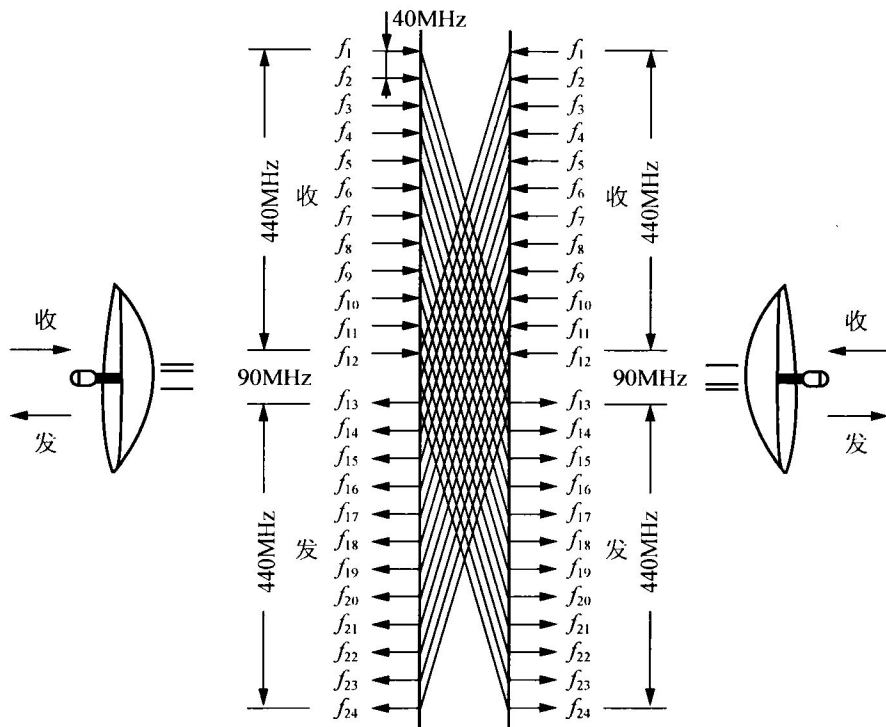
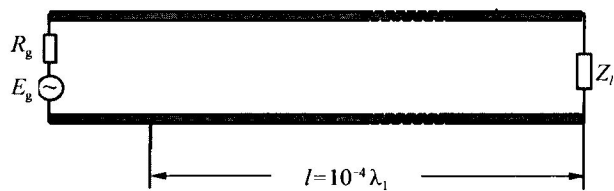
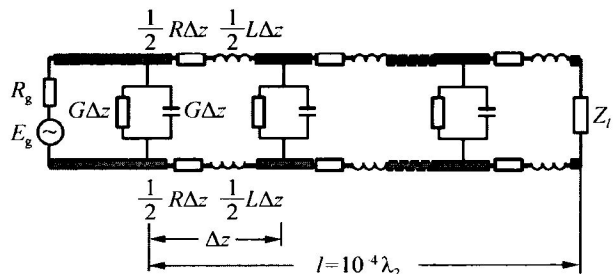


图 0-4 数字微波(11GHz)接力通信中继站收、发频率排列



(a) 在低频领域使用



(b) 在高频领域使用

图 0-5 双线传输线在不同频率领域的图像

在微波领域工作的元器件的几何尺寸都能和微波波长 λ 相比拟, 沿微波元器件上的任何一个“几何方向”都能感觉得到“信号”的“交变”, 因而根据图 0-5(b)情况可以作以下一般性的推论: 微波领域使用的传输线和元器件的参数是分布的, 沿几何尺寸方向分布。因而, 如果说低频电路是“集中参数电路”, 那么微波电路就是“分布参数电路”; 在微波分布参数电路中包括电流(磁场)、电压(电场)和阻抗在内的微波电路所有参数都是分布的, 它们都是空间变量 x 、 y 、 z 的函数; 而电流(磁场)和电压(电场), 还应该是时间的函数。

以上推论非常重要, 对于习惯研究低频电路的初学者必须作以上“观念”转变, 或者说必须将“路”的观念转换为“场”的观念。否则, 就会妨碍初学者对微波领域的问题的正常思考。

4. 微波抗干扰能力强

工作在微波波段的传输线和元器件可以避免外界工业干扰和雷电干扰, 这是因为微波具有强抗干扰能力的缘故。工业“电火花”干扰和雷电干扰, 通常表现为一个如图 0-6(a)中“实线”所示的“单个脉冲”; 为讨论简单起见, 不妨近似将它看成是一个如“虚线”所示的“矩形脉冲”。而矩形脉冲的频谱函数为

$$F(\omega) = 2 \frac{A}{\omega} \sin \frac{\omega\tau}{2} \quad (0-2)$$

图 0-6(b)是它的频谱分布图。根据图 0-6(b)可以近似看出: 工业干扰和雷电干扰的强度(能量)主要集中在低频区域, 根本覆盖不到微波波段, 因而微波抗干扰能力强。试验表明: 当 $f > 120\text{MHz}$ 时已经察觉不到工业干扰和雷电干扰。

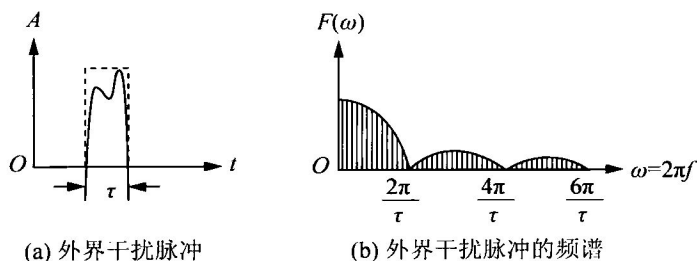


图 0-6 外界干扰脉冲及其频谱

5. 微波穿入金属和非金属物质及人体时的表现

根据电磁场理论, 电磁波穿入物质的深度 δ 可近似用下式计算, 即

$$\delta \approx \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (0-3)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为电磁波的角频率; σ 为物质的电导率; $\rho = 1/\sigma$ 为物质的电阻率; μ 为物质的磁导率。

由式(0-3)可以看出: 物质的电导率 σ 越高, 电磁波穿入物质的深度 δ 就越深; 电磁波频率 f 越高, 趋表深度 δ 就越浅。因此, 微波频率 f 太高, 很难穿入到物质内部而只趋于金属导体表面。例如, 金属铜在中波频率 $f = 1\text{MHz}$ 时的趋表深度 $\delta = 0.0667\text{mm}$; 而在



微波 $f=400\text{MHz}$ 时的趋表深度 $\delta=0.003335\text{mm}$ 。因此,金属导体中的微波电流是趋表电流,也正是这种趋表电流使导线发热而产生了图 0-5(b)中的分布电阻 R ; 如果利用微波金属波导中的趋表电流,则可以制造雷达中使用的“隙缝天线”。为了某种需要必须使微波深深地穿进物质内部产生效应,就必须选择电阻率 ρ 高的物质,例如,制造微波铁氧体器件就是根据这一思路。铁氧体是一种绝缘材料其电阻率 $\rho\approx 10^6\sim 10^8\Omega/\text{cm}$ (比金属钢的 ρ 大 $10^{11}\sim 10^{13}$ 倍),电磁场深入其内部控制因电子“自转”(电子围绕原子核旋转为“公转”)产生的“自旋磁场”使之变成为各向异性物质。铁氧体对不同极化方向旋转的微波磁场提供不同的导磁率 μ ,利用这一特性可制造如图 0-7 所示的微波铁氧体“环行隔离器”和微波铁氧体单向器件。图 0-7 的“环行隔离器”中的微波信号沿①→②→③端口单向环行传输由②端口输出到负载 Z_L ,而负载方向反送过来的反射信号将被③端口的吸收负载吸收;这样就隔离了负载 Z_L 的变化对信号源的影响,使之获得稳定的输出。

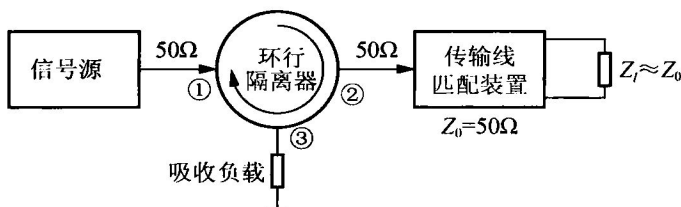


图 0-7 微波铁氧体“环行隔离器”实际应用框图



注意

微波电子电路中的“振荡器电路”都应采用“环行隔离器”加以隔离保护,以免受负载变化的影响造成“停振”或输出不稳定,这时的“环行隔离器”相当于低频电路中的“射极跟随器”。

关于微波铁氧体“环行隔离器”和单向器件,将在第 5 章作详细讨论。

利用控制微波穿入“人体”可以对人的某些器官进行治疗或理疗;微波穿入“人体”必须加以控制,否则将对“人体”造成极大的伤害。微波工作人员特别要警惕 2GHz 微波波段的长期照射(人体 100%吸收 2GHz 波段的微波),即便 1W 左右的小功率长期照射也要注意,已有造成人眼失明的案例。一般而言,微波工作人员接受微波波段的长期照射都要加以保护,应享受专项津贴补助。利用控制微波穿入“食物”可以煮、蒸食物,这就是“微波炉”的原理。

0.2 课程特点及学习方法

“微波技术基础及其应用”是一门基础应用课程,本课程对电子工程专业的学生很重要。从认识论的观点看,它是继“电磁场理论”之后实际运用“场”的观点培养学生思维方法的一种手段(或方法)。大学 4 年的培养,学生本地地学习一些具体课程以获得所需立足于现代社会的知识和技能固然重要,但更重要的应该透过课程学习,培养学生的思维方法以在专业上“与时俱进”而具有更新知识的基础和创新的潜能。从专业技能培养观点