



普通高等教育“十一五”
国家级规划教材

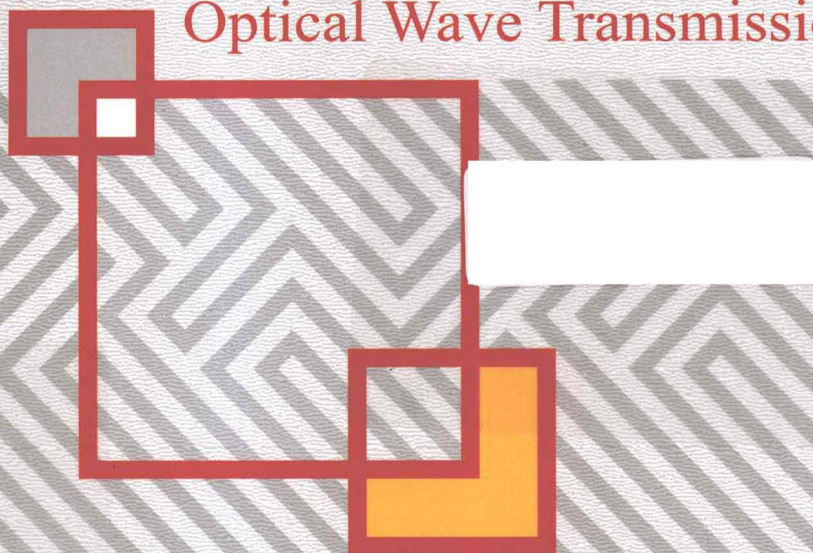
卢春兰 杨涛 余同彬 朱卫刚 编著

李玉权 主审

电波与光波 传输技术

21 世纪高等院校信息工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Electromagnetic Wave and
Optical Wave Transmission Technology



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

精品系列



普通高等教育“十一五”
国家级规划教材

卢春兰 杨涛 余同彬 朱卫刚 编著
李玉权 主审

电波与光波 传输技术

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Electromagnetic Wave and
Optical Wave Transmission Technology



人民邮电出版社
北京



图书在版编目(CIP)数据

电波与光波传输技术 / 卢春兰等编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2013. 2
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-26293-6

I. ①电… II. ①卢… III. ①电波传播—高等学校—
教材②光通信—高等学校—教材 IV. ①TN011
②TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第192087号

内 容 提 要

本书在电磁场理论的基础上,从传输信道的角度系统完整地阐述了电波与光波信道的传输规律。全书共分7章,内容包括:传输线理论,金属波导与微带线,介质波导和光波导,天线基础知识,线天线,口径天线,电波传播概论。书中主要介绍导行电磁波以及光纤中光波的传输规律,还介绍了天线转换辐射电磁波的基本原理以及自由电磁波传播的基本规律。鉴于近几年无线光通信技术的快速发展,本书还涉及到无线光通信知识。全书条理清晰,重点突出,抽象概念形象化,场分布图示形象直观,数学推导严谨。书中安排有较多例题,每章末配有适量的习题。

本书可作为电子信息类和通信类专业的本科生教材,也可作为电磁场与微波技术学科研究生入学考试参考书,适当删减内容还适合相关专业不同教学层次的教学需求。

普通高等教育“十二五”国家级规划教材
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
电波与光波传输技术

◆ 编 著 卢春兰 杨涛 余同彬 朱卫刚
主 审 李玉权
责任编辑 董楠

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京昌平百善印刷厂印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 24.5
字数: 602千字
2013年2月第1版
2013年2月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-26293-6

定价: 49.80元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

无线电波频谱是一种资源,微波与光波在其中各占有十分重要的地位。微波与光波的传输辐射接收技术在现代通信系统中占据着举足轻重的地位。本书所涉及的知识模块是培养通信工程人才不可或缺的必备模块,本课程是通信类专业本科生必须具备的知识结构的重要组成部分。

目前,国内高校开设的相关课程有《微波技术》、《天线与电波传播》、《光通信原理》等,总学时数应在 100 左右,甚至更多。但现代教育理念对本科的学历教育要求是“厚基础,宽口径”,由此专业课程的设置很受学时数的制约,大多数时候只能选择开设一门或两门课程,这对通信类学生建立系统完整的相关知识体系只能留有缺憾。

近年,我校对相关课程设置大胆改革和创新,将传统意义上的“微波技术基础”、“天线与电波传播”、“光通信基础”3 门课程涉及的主要知识点进行整合,开设出 60 学时的主干核心课程“电波与光波传输技术”。它是通信工程专业的一门核心必修专业课程,其先修课程为“电磁场理论”。经过 4 年的课程建设,该课程已成为优质课程。微波、光波、天线与电波传播的共同基础是电磁场理论,它们都是电磁场在不同边值条件下的应用。课程以电磁场麦克斯韦方程为基础,从物理层传输信道的角度系统地介绍电波与光波信道的传输规律。该课程这样设置,教学内容安排既系统又完整而且高效率,可以缓解内容多、课时少的矛盾。

本书的参考学时为 70 学时,全书内容共分为 7 章。第 1 章讲述均匀传输线理论;第 2 章讲述包括微带线等平面传输线在内的微波传输线;第 3 章讲述介质波导和光波导,以光纤的传输原理与传输特性为主;第 4 章讲述天线的基本概念与基本分析方法;第 5 章介绍常用的线天线;第 6 章介绍包括光学天线在内的口径天线;第 7 章则讲述各个频段的电波传播特点。倘若课程学时数不足,可以根据不同专业方向以及不同层次的具体要求有所侧重,有所取舍。

本书内容涵盖了传统意义上的微波技术、天线、电波传播和光传输 4 个部分的基础内容。本书尝试着在物理层上以电磁波传输信道为主轴将 4 大部分内容有机结合,形成一本系统完整描述电波与光波信道(无线信道、有线信道)传输规律的教材。鉴于近几年无线光通信技术的快速发展,本书还将涉及无线光通信知识,包括激光在大气及海水信道中的传播特性。

本书的第 3 章等光波传输部分由李玉权教授执笔,第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章、

第 6 章由卢春兰执笔，第 7 章由杨涛、朱卫刚、余同彬副教授执笔。这里要特别感谢前辈王元坤教授、王增和教授对作者多年的关心和支持以及在本书的撰写过程中所给予的帮助；感谢杨涛、余同彬、朱卫刚、李占猛、贾建新、彭川、张云龙和马金标为本书所做的大量插图和文字工作；还要感谢微波教研室全体同仁的关心和帮助。作者在编写过程中借鉴了有关参考文献，在此对参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不足，甚至错误，敬请广大读者批评指正。作者电子邮件为 Luchlan @ 126.com。

作 者
2011 年 7 月

目 录

绪 论	1	2.1.3 纵向场法分析步骤	54
第 1 章 传输线理论	9	2.1.4 空腔金属波导内不存在 TEM 模	55
1.1 微波传输线	9	2.2 波导中电磁波的传输特性	55
1.1.1 导波的分类	10	2.2.1 波导的截止现象和截止波长	55
1.1.2 传输线的分布参数和等效电路	11	2.2.2 TE 模和 TM 模的相速、群速、波导波长	56
1.2 均匀传输线方程及其解	12	2.3 矩形波导	58
1.2.1 均匀传输线方程	12	2.3.1 矩形波导中的 TE 模和 TM 模	58
1.2.2 均匀传输线方程解	13	2.3.2 矩形波导中电磁波的传输特性	62
1.3 均匀传输线的传输特性和特性参数	15	2.3.3 矩形波导中的主模 TE_{10} 模	63
1.3.1 均匀传输线上行波的传输特性	15	2.3.4 波导的衰减	65
1.3.2 均匀传输线的 3 个重要参数	17	2.3.5 TE_{10} 模的激励方法	67
1.4 传输线的传输功率、效率和损耗	21	2.4 圆形波导	68
1.4.1 传输功率与效率	21	2.4.1 圆波导中的 TE 模和 TM 模	68
1.4.2 传输线损耗	22	2.4.2 圆波导中电磁波的传输特性	72
1.5 无耗传输线的 3 种工作状态	22	2.4.3 圆波导中的 3 种常用波型	73
1.5.1 行波状态	23	2.5 同轴线的高阶模及单模传输条件	74
1.5.2 驻波状态	24	2.5.1 同轴线中的高次模	74
1.5.3 行驻波状态	27	2.5.2 同轴线单模传输条件	76
1.6 史密斯 (SMITH) 圆图	29	2.6 微带线	77
1.6.1 阻抗圆图	29	2.6.1 带状线	79
1.6.2 导纳圆图	35	2.6.2 微带线	81
1.7 无耗传输线的阻抗匹配	38	2.7 新型微波毫米波传输线	86
1.7.1 阻抗匹配概念	38	习题	88
1.7.2 四分之一波长阻抗变换器	40	第 3 章 介质波导和光波导	90
1.7.3 单支节调配器	40	3.1 介质波导	90
1.7.4 双支节调配器	45	3.1.1 圆形介质波导	90
习题	47	3.1.2 介质镜像线	97
第 2 章 金属波导与微带线	51	3.2 薄膜光波导	98
2.1 分析规则金属波导的纵向场方法	51	3.2.1 薄膜光波导的几何光学分析	98
2.1.1 TE 模	53	3.2.2 薄膜光波导的模式理论	100
2.1.2 TM 模	54	3.3 光纤中光线的传播	105

3.3.1 阶跃光纤和梯度光纤	105	4.4.1 方向函数	147
3.3.2 阶跃光纤中光线的传播	106	4.4.2 方向图	150
3.3.3 梯度光纤中光线的传播	109	4.4.3 方向系数	154
3.4 光纤中的传输模式	112	4.5 天线的电参数	156
3.4.1 光纤中的电磁场解	112	4.5.1 方向特性	157
3.4.2 特征方程	114	4.5.2 阻抗特性	158
3.4.3 模式的传播条件及截止参数	114	4.5.3 带宽特性	160
3.4.4 LP_m 模的场分布及功率分布	115	4.5.4 极化特性	161
3.4.5 理想光纤中模式的正交性和完备性	116	4.5.5 最佳接收条件	163
3.5 单模光纤	117	4.6 接收天线理论	163
3.5.1 单模传输条件和截止波长	117	4.6.1 有效面积与有效长度	164
3.5.2 工作模特性	118	4.6.2 弗利斯传输公式	166
3.5.3 单模光纤中的双折射	119	4.7 短振子与半波振子	167
3.6 光纤的传输损耗	121	4.7.1 短振子	168
3.6.1 石英玻璃光纤的损耗	121	4.7.2 半波振子	169
3.6.2 其他类型光纤的损耗	123	4.8 天线阵的方向特性	172
3.6.3 弯曲损耗	123	4.8.1 方向图乘积定理	172
3.7 光纤的色散	124	4.8.2 远区条件	173
3.7.1 色散概念与色散分类	124	4.8.3 二元阵	174
3.7.2 波长色散	124	4.8.4 均匀直线阵	180
3.7.3 模式色散	125	4.8.5 非均匀直线边射阵	191
3.7.4 色散对通信的影响	126	4.9 天线阵的辐射阻抗	194
3.7.5 单模光纤的色散及单模光纤的分类	127	4.9.1 二元阵的 4 端网络模型	195
3.8 光纤的制作和光缆	129	4.9.2 感应电动势法简介	197
3.8.1 预制棒的制备	129	4.9.3 半波振子间的互阻抗曲线	198
3.8.2 光纤的拉制	130	4.9.4 互阻抗理论及其曲线的应用	200
3.8.3 光缆	131	4.10 理想导电地对天线的影响	206
习题	132	4.10.1 镜像理论	206
第 4 章 天线基础知识	134	4.10.2 单极天线	208
4.1 概述	134	习题	210
4.2 电基本振子	136	第 5 章 线天线	214
4.2.1 近区场	138	5.1 双极天线	214
4.2.2 远区场	139	5.1.1 对称振子天线	214
4.3 磁基本振子	141	5.1.2 理想导电平面地上的对称振子	222
4.3.1 对偶原理法	141	5.2 折合振子	224
4.3.2 直接积分法	144	5.3 线天线的馈电	226
4.4 天线的方向性	147	5.4 八木一字田天线	229

5.5 行波线天线.....	233	7.2 地波传播.....	317
5.6 双锥天线.....	237	7.2.1 地球表面的电特性.....	317
5.6.1 无限双锥天线.....	237	7.2.2 地波传播特性.....	318
5.6.2 有限双锥天线.....	239	7.3 天波传播.....	321
5.7 非频变天线原理.....	240	7.3.1 电离层.....	321
5.8 平面螺旋线天线.....	242	7.3.2 无线电波在电离层中的传播.....	324
5.8.1 等角螺旋线天线.....	242	7.3.3 短波天波传播.....	327
5.8.2 阿基米德螺旋线天线.....	243	7.4 视距传播.....	333
5.9 对数周期天线.....	245	7.4.1 自由空间电波传播的菲涅耳区.....	334
习题.....	254	7.4.2 地面对电波传播的影响.....	337
第6章 口径天线.....	255	7.4.3 低空大气层对电波传播的影响.....	343
6.1 口径天线的基本原理.....	256	7.5 移动通信中的电波传播.....	349
6.1.1 惠更斯元的辐射.....	256	7.5.1 光滑地面上的亮区场.....	350
6.1.2 平面口径辐射积分公式.....	259	7.5.2 光滑球面地上的电波绕射.....	352
6.1.3 矩形、圆形口径的辐射特性.....	261	7.5.3 山峰绕射.....	353
6.1.4 增益的计算.....	274	7.5.4 地面移动通信电波传播的特点.....	355
6.2 喇叭天线.....	278	7.6 卫星通信系统中的电波传播.....	356
6.2.1 H面扇形喇叭天线.....	279	7.6.1 传输损耗.....	357
6.2.2 E面扇形喇叭天线.....	284	7.6.2 去极化现象.....	360
6.2.3 角锥喇叭天线.....	287	7.6.3 大气折射与对流层闪烁.....	361
6.2.4 最优喇叭天线的设计.....	289	7.6.4 电离层闪烁.....	362
6.3 反射面天线.....	290	7.7 激光在大气信道中的传输.....	363
6.3.1 抛物面天线.....	290	7.7.1 大气对激光束传播的影响.....	363
6.3.2 卡塞格伦天线.....	300	7.7.2 大气信道模型.....	366
6.3.3 反射面天线的馈源.....	306	7.8 激光在海水信道中的传输.....	369
6.4 光学天线.....	308	7.8.1 海水的透射光谱特性.....	369
6.4.1 光学天线增益.....	308	7.8.2 海水对激光束传播的影响.....	370
6.4.2 卫星间激光通信中的光学天线.....	308	7.8.3 海水信道特性.....	371
习题.....	310	7.9 复杂电磁环境的构成与特征.....	374
第7章 电波传播概论.....	311	习题.....	380
7.1 基础知识.....	311	参考文献.....	384
7.1.2 传输媒质对电波传播的影响.....	313		
7.1.3 干扰与噪声.....	315		

人类在经历了几千年的农业文明和几百年的工业文明以后,终于在 20 世纪末、21 世纪初迎来了信息通信文明。信息通信文明赖以生存的基础是遍布全球的信息基础设施,即所谓信息高速公路及其庞大的接入系统。在这个全球性的信息高速公路中承载海量信息的载体,无一例外地都是不同频段的电磁波。本书将全面介绍各个频段电磁波的发送、接收技术以及在信道中的传播特点,为进一步学习相关专业知识打下基础。

1. 电磁波谱

19 世纪中叶,伟大的物理学家 J.C.麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1834~1879) 建立了经典电磁理论。他将电磁现象所遵从的规律概括为一组偏微分方程,后人称之为麦克斯韦方程组,即

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= \rho(\mathbf{r}, t) \\ \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= \varepsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \\ \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= \mu \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)\end{aligned}\tag{x-1}$$

式中后两个方程称为各向同性媒质的本构关系,或物质特性方程。如果 ε 、 μ 为实数,则这类媒质将呈各向同性、无损耗的特性,可称为简单媒质。

在无界的简单媒质中由 (x-1) 式可以得到波动方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0\tag{x-2a}$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0\tag{x-2b}$$

(x-2) 式的解是以速度 c/n 传播的电磁波, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$, n 是媒质的折射率,对于自由空间, $n=1$ 。

1887 年,德国物理学家 H.R.赫兹 (Heinrich Hertz, 1857~1894) 用实验方法证实了电磁波的存在。

按照电磁波的频率从低到高，可以将其划分为无线电波、红外光波、可见光波、紫外光波、x 射线等。其中的无线电波又可细分为甚低频（超长波）、低频（长波）、中频（中波）、高频（短波）、甚高频（米波或超短波）、超高频（分米波）、特高频（厘米波）、极高频（毫米波）等波段。电磁波谱中介于超短波和亚毫米波之间的波段，即分米波、厘米波、毫米波又称为微波，它属于无线电波中波长最短（频率最高）的波段，其频率范围从 300MHz（波长 1m）~300GHz（波长 1mm）。亚毫米波（波长 1~0.1mm）则是介于无线电波和红外光波之间的一个过渡频段，其频率范围在 300GHz~3THz 之间，属于太赫兹频段的低端，现在许多教科书也将其归入微波频段。红外光波段又可分为远红外、中红外和近红外频段，远红外频段则视为太赫兹频段高端。电磁波的频谱划分如图 x-1 所示。

不同频段的电磁波在媒质中呈不同的传播特性，在现代信息系统中扮演不同的角色。后面将简要介绍无线电频段和光频段电磁波的特点和应用。

2. 无线电波的特点及应用

无线电波是指频率在 3kHz~300GHz 之间的电磁波。按照图 x-1 的波段划分，无线电波又可以分为多个频段，不同的频段具有不同的特性和不同的应用场合。承载信息的无线电波可以利用传输线，使其以导行电磁波的形态传播；也可以利用发射天线将其发射至空间，以自由电磁波的形态传播。

3~30kHz 频段称为甚低频段（Very Low Frequency, VLF），其波长范围为 $10^5 \sim 10^4$ m，又称为超长波段。这个频段的电磁波频率低、波长很长，可以以地面波的形态传播到很远的接收点。电磁波在有损耗的媒质中的传播损耗因子与频率的平方根成比例，所以甚低频无线电波在海水这样的媒质中损耗较小，有较长的穿透深度。发射甚低频无线电波需要庞大的天线系统，而这样的天线系统造价昂贵；加之其频率很低，可以承载的信息量很小，所以用甚低频无线电波作为信息系统的载波是不合适的。但是甚低频无线电波并非没有用武之地，海军的对潜艇通信就必须使用甚低频无线电波。这是因为甚低频无线电波在海水中衰耗较小，有较长的穿透深度，可以与潜行于水下一定深度的潜艇实现通信。利用超长波实现对潜通信的主要问题除了天线系统过于庞大以外，就是受频带限制，其通信容量太小。探求新的对潜通信技术成为近年的研究热点。

30~300kHz 频段称为低频段（Low Frequency, LF），其波长范围为 $10^4 \sim 10^3$ m，又称为长波段。这个频段的无线电波的传播特性与甚低频段电磁波类似，也以地波的形态传播，主要用于无线电导航。

300kHz~3MHz 频段称为中频段（Medium Frequency, MF），其波长范围为 1 000~100m，

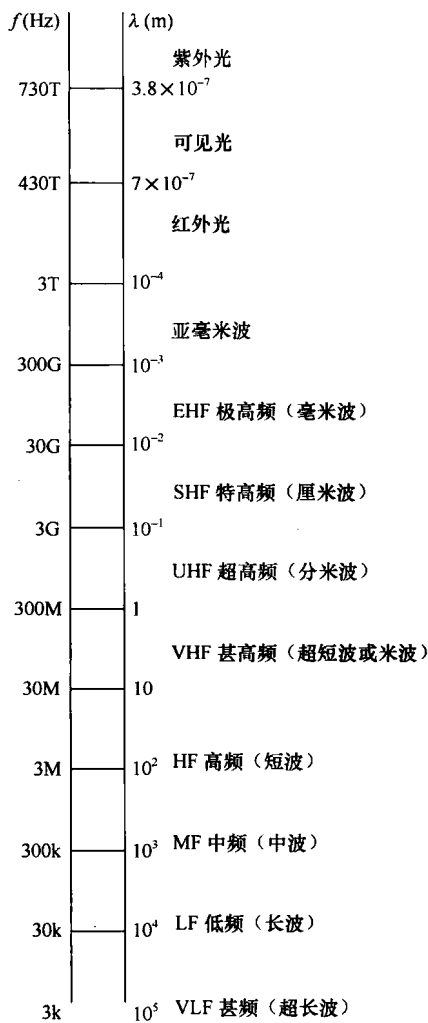


图 x-1 电磁波频谱

又称为中波段。中波段无线电波可以以地面波形态传播，也可以经大气外层的电离层反射远距离传播。中波段无线电波主要用于调幅无线电广播、海上无线电导航、无线电测向等业务。中波的特点是信号稳定，所以中波无线电广播很受欢迎，但其缺点是覆盖面不大。

3~30MHz 频段称为高频段 (High Frequency, HF)，其波长范围为 100~10m，又称为短波段。短波不能穿透电离层，经电离层反射可以实现远距离传播，而且所需发射功率不大。短波无线电有极为广泛的应用，在早期的无线电通信中扮演着极为重要的角色。短波段的主要应用领域包括无线电广播、短波通信等，业余无线电爱好者也使用这一频段。短波通信是舰船对陆上基地、对飞行器的重要通信手段，同时也是军事通信的重要手段。由于电离层的电参数不稳定，所以经过电离层反射到达接收点的短波信号极不稳定，这是短波通信的主要缺点。由于这一缺点，短波通信沉寂了一段时间。近年由于自适应选频技术的发展，已经可以有效地克服短波通信的这一缺点，所以短波通信又重新受到了青睐。短波通信是军事通信中最重要通信手段之一。

30~300MHz 频段称为甚高频段 (Very High Frequency, VHF)，其波长范围为 10~1m，又称为超短波或米波频段。电离层不能反射超短波，所以超短波信号以视距传播的方式传播。视距传播是指收发双方的天线可以相互“看得见”。超短波频段主要用于电视广播、调频 (FM) 广播、空中交通管制等领域。由于超短波信号以视距方式传播，而地球表面又是一球面，为了尽可能有大的覆盖范围，超短波信号的发射天线应尽可能高一些，这就是我们看到各个城市的电视发射塔总是高耸入云的道理。超短波通信作为战术通信手段，在军事通信中有重要应用。

300MHz~3GHz 频段称为超高频频段 (Ultra High Frequency, UHF)，其波长范围为 1m~10cm，所以又称为分米波段。UHF 频段的电波以视距方式传播。主要用于移动通信、电视广播、卫星通信、警戒雷达、导航等领域。

3~30GHz 频段称为特高频频段 (Super High Frequency, SHF)，其波长范围为 10~1cm，所以又称为厘米波段。SHF 频段的电波以视距方式传播，主要用于卫星通信、微波接力通信、机载雷达等领域。工作在分米波和厘米波频段的微波通信是现代通信系统中最重要通信手段之一，其主要特点是通信容量大，通过中继可以实现远距离传输。采用人造卫星作为中继器的卫星通信，是构建全球大容量通信系统的重要手段。在军事信息系统中，卫星通信更是扮演了极为重要的角色。

30~300GHz 频段称为极高频频段 (Extremely High Frequency, EHF)，其波长范围为 1cm~1mm，所以又称为毫米波频段。广义地说，毫米波频段也可以归入微波频段。毫米波以视距方式传播，但是大气中的一些成分，主要是水蒸气对毫米波有强烈的吸收作用，所以在远距离通信中毫米波尚未得到应用。但是由于毫米波段巨大的可用带宽极具诱惑力，开发利用毫米波段是研究热点。例如，毫米波雷达、毫米波通信、毫米波遥感、射电天文等领域。毫米波雷达与微波雷达相比，在天线口径相同的条件下具有更窄的波束，可以用于导弹制导、目标监测、炮火控制和跟踪等。

为了方便微波波段的开发利用，学界又将微波波段细分为多个子波段，并用特殊的符号表示。而且这些子波段的符号还有新老之分，表 x-1 列出了微波波段的划分和相应的新老代号。

表 x-1 微波波段的划分和代号

频率范围	老代号	新代号
500~1 000MHz	UHF	C
1~2GHz	L	D
2~3GHz	S	E

续表

频率范围	老代号	新代号
3~4GHz	S	F
4~6GHz	C	G
6~8GHz	C	H
8~10GHz	X	I
10~12.4GHz	X	J
12.4~18GHz	Ku	J
18~20GHz	K	J
20~26.5GHz	K	K
26.5~40GHz	Ka	K

注意：在表 x-1 中将微波频段的频率范围定义为 500MHz~40GHz。表中的老代号实际上至今还在应用。超过 30GHz 的电磁波的波长已短于 1cm，所以 30~300GHz 频段又称为毫米波段。而频率在 300GHz~3THz 的亚毫米波段可以归入微波频段，也可以归入远红外光波范畴。1THz 附近的电磁波频段是一个特殊的频段，称为太赫兹（THz）频段。太赫兹频段的电磁波的产生、传播特点、探测技术及应用是近年的研究热点，其可能的应用前景引起了科学家的高度关注。

低于微波频率的无线电波，其波长远远大于电子系统的实际尺寸，可用集总参数的理论进行分析，即可采用电路分析法；频率高于微波波段的光波、X 射线、 γ 射线等，其波长远小于电子系统的实际尺寸，甚至可与分子、原子的尺寸相比拟，因此可用光学理论和量子理论进行分析；而微波则由于其波长与电子系统的实际尺寸相当，故不能用普通的电子学中电路的方法研究或用光学方法直接去研究，而必须用场的观点去研究：即由麦克斯韦方程组出发，结合边界条件来研究系统内部的结构，这就是场分析法。

由于微波的特殊性及其在现代通信和雷达技术中重要性，所以对它的特性作更为详细的归纳如下。

似光性。微波具有类似光一样的特性，主要表现在反射性、直线传播性及集束性等几个方面，即：由于微波的波长与地球上的一般物体（如飞机、轮船、汽车等）的尺寸相比要小得多，或在同一数量级，因此当微波照射到这些物体时会产生强烈的反射，基于此特性人们发明了雷达系统；微波如同光一样在空间传播，如同光可聚焦成光束一样，微波也可以通过天线装置形成定向辐射，从而可以定向传输或接受由空间传来的微弱信号，实现微波通信或探测。

穿透性。微波照射到介质时具有穿透性，主要表现在云、雾、雪等对微波传播的影响较小，这为全天候微波通信和遥感打下了基础；微波能穿透生物体，这为微波生物医学打下基础。另一方面，微波具有穿越电离层的透射特性，实验证明，微波频段的几个分段如 1~10GHz、20~30GHz 及 91GHz 附近受电离层的影响较小，可以较为容易地由地面向外层空间传播，从而形成人类探测外层空间的“无线电窗口”，它为空间通信、卫星通信、卫星遥感和射电天文学的研究提供了难得的无线电通道。

宽频带。任何通信系统为了传递一定的信息必须占有一定的频带，为传输某信息所需的频带宽度叫做带宽。例如，电话信道的带宽为 4kHz，广播的带宽为 16kHz，而一般电视信道的带宽为 8MHz。显然，要传输的信息越多，所用的频带越宽。一般一个传输信道的相对带宽（即频带宽度与中心频率之比）不能超过百分之几，所以为了使多路电视、电话能同时在一条线路上传

送,就必须使信道中心频率比所要传递的信息总带宽高几十至几百倍。而微波具有较宽的频带,其携带信息的能力远远超过中短波及超短波,因此现代多路无线通信几乎都工作在微波频段。随着数字技术的发展,单位频带所能携带的信息更多,这为微波通信提供了更为广阔的前景。

热效应。当微波电磁能量传送到有耗物体的内部时,就会使物体的分子相互碰撞、摩擦,从而使物体发热,这就是微波的热效应特性。利用微波的热效应特性可以进行微波加热。由于微波加热具有内外同热、效率高、加热速度快等特点,因而被日益广泛应用于粮食、茶叶、卷烟、木材、纸张、皮革、食品等各种行业中。另外,微波对生物的热效应也是微波生物学的基础。

散射效应。当电磁波入射到某物体上时,会在除入射波方向外的其他方向产生散射。散射是入射波与该物体相互作用的结果,所以散射波携带了大量关于散射体的信息。打个比方,早晨,当太阳还没有升起的时候,我们虽然无法直接看到太阳,但当我们看到天空被染成鱼肚白或云被染成红色时,我们就知道太阳在地平线下不远的地方了。这个信息就是通过大气或云对太阳的散射作用而传递给我们的。由于微波具有频域信息、相位信息、极化信息、时域信息等多种信息,人们通过对不同的物体的散射特性的检测,从中提取目标特征信息,从而进行目标识别,这是实现微波遥感、雷达成像的基础。另一方面,还可利用大气对流层的散射来实现远距离微波散射通信。

抗低频干扰。地球周围,充斥着各种各样的噪声和干扰,主要归纳为:由宇宙和大气在传输信道上产生的自然噪声,各种电气设备工作时产生的人为噪声。由于这些噪声一般在中低频区域,与微波波段的频率成分差别较大,它们在微波滤波器的阻隔下,基本上不会影响微波通信的正常工作,这就是微波的抗低频干扰特性。

除了具有以上特性外,对于通信应用还应特别注意微波的以下特点。

微波的视距传播特性。由于地球表面的弯曲和障碍物(高山、建筑物等)的阻拦,微波不能直接传播到很远的地方(一般不超过 50km),因此在地面上利用微波进行远距离通信时,必须建立中继接力站,并使站与站之间的距离不超过视距,微波信号就像接力棒一样一站一站地传递下去。这样显然增加了通信系统的复杂程度。

分布参数的不确定性。在低频情况下,电子系统的元器件尺寸远远小于电波的波长,因此稳定状态的电压和电源的效应可以被认为是整个系统各处同时建立起来的,系统各种不同的元件可以用既不随时间、也不随空间变化的参量来表征,这就是集总参数元件。而微波的频率很高,电磁振荡周期极短,与微波电路中从一点到另一点的电效应的传播时间相比是可比拟的,因此就必须用随时间、空间变化的参量,即分布参量来表征。由于分布参量的不确定性,增加了微波理论与技术的难度,从而增加了微波设备的成本。

电磁兼容与电磁环境污染。随着无线电技术的不断发展,越来越多的无线设备在相同的区域工作,势必会引起相互干扰,尤其是在飞行器、舰船上不同通信设备之间的距离极小,就会产生相互干扰;另外在十分拥挤的公共场所,众多的移动用户之间的相互影响也是显而易见的,这就必须考虑电磁兼容的问题。另一方面,越来越多的无线信号充斥于人们生活的空间,必然对人体产生影响。因此从某种意义上说,电磁环境污染已成为新的污染源,这方面已引起各国政府和科技界的广泛重视。

3. 光波的特点及应用

19 世纪中叶,麦克斯韦指出光是电磁波。在此之前,牛顿提出了光的粒子说,认为光束是

由极小的粒子流构成的。粒子说可以解释光的直线传播、反射等现象,但是对于光的干涉与衍射等现象则无法解释。后来惠更斯提出了光的波动说,认为光是一种波动。波动说可以很好地解释有关光传播过程中的各种现象,并逐步得到公认。但是光究竟是什么波?这一问题并未解决。麦克斯韦的论断给这一持续了多年的争论画上了句号。19 世纪末,人们认为只要按照麦克斯韦的理论就可以解决光学中的所有问题。但是到了 20 世纪初,麦克斯韦电磁理论在解释光电效应时却遇到了难以逾越的困难。人们无法解释为什么光的波长长于一个特定值以后无论光强多强也无法从金属表面打出电子这一事实。伟大的物理学家爱因斯坦提出的光量子学说圆满地解决了光学中的这一困难。按照光量子理论,光束是具有基本能量 $h\nu$ 的光量子或光子的集合, h 是布朗克常量, ν 是光的频率。光量子理论将光的波动说和粒子说很好地结合起来。这就是说,光跟其他粒子例如电子一样具有波粒二象性。这里只是对光的波动特性作一个简要介绍。

根据光的波长或频率,可以将光波分成红外光、可见光、紫外光和 x 射线等。

频率在 $3000\text{GHz}\sim 430\text{THz}$ 的电磁波称为红外光,其波长范围为 $0.1\text{mm}\sim 0.70\mu\text{m}$ 。接近 0.1mm 的红外波段低端又称为远红外波段,接近可见光的红外波段高端又称为近红外波段,而中间的一段则称为中红外波段。在光谱学中,对红外波段的划分尚无统一的标准。一般可以认为 $0.70\sim 3\mu\text{m}$ 、 $3\sim 40\mu\text{m}$ 、 $40\sim 1\,000\mu\text{m}$ 分别为近红外、中红外、远红外波段的波长范围。如前所述,光的发射与吸收要用量子理论解释,波长越短,量子特点越明显,根据量子理论所得结果越精确。射频电磁波的发射、传播都可以用经典的电磁波理论圆满解释。远红外波由于其在电磁波谱中的特殊位置,采用经典电磁理论解释,则因其频率过高,已具有一定的量子特性,因而有一定的困难。如果用量子理论,则嫌其频率还不够高,也有困难。所以远红外波段电磁波的产生、传播以及应用领域都还有很多有待研究的处女地。近年产生的太赫兹 (THz) 科学与技术就是这一领域的研究成果。

研究红外辐射的产生、传播、探测与应用,已经形成了一门专门的技术科学,就是红外技术。红外辐射是 1800 年由英国天文学家 F.W.赫歇耳发现的。任何处于绝对零度以上的物体都会产生红外辐射,所以都可以称之为红外辐射源。但是红外技术中所应用的红外辐射源是指那些具有较强的红外辐射或较高的红外辐射效率的器件,例如红外灯、红外激光器。在信息技术中最常用的红外辐射源是半导体发光器件,例如发光二极管、半导体激光器等。红外探测器是将红外辐射转换为电信号的器件。现代红外探测器主要可分为热敏型和光电型两大类。现代光通信系统主要工作在近红外波段,其主要的探测器就是基于光电效应制作的半导体光电二极管。红外技术在军事领域和民用领域都有广泛的应用。在军用领域,红外技术主要用于目标的探测与跟踪。基于热成像的红外夜视仪是夜间军事行动的重要设备。在民用领域,红外技术广泛应用于加热干燥、红外遥感、热探测以及医学中的无损探测等领域。

红外光的传播特点是红外技术的研究重点。在大气中,红外光会受到严重的衰减。大气对红外光波的衰减主要是由大气的吸收和散射引起的。大气中的水蒸气是红外光的主要吸收源,其次是二氧化碳。不同的大气成分有不同的吸收带,吸收带之间的空隙就形成了红外光波在大气中的传输“窗口”。这些“窗口”为实现大气激光通信提供了可能的传输信道。大气对红外光波的散射主要是由大气中的微粒产生的。尺寸远小于波长的微粒产生的散射称为瑞利散射,其强度与波长的 4 次方成反比,所以瑞利散射成为短波长段应用的主要障碍。大气激光通信受天气的影响极为严重,遇到雨雾等恶劣天气,通信质量会明显下降,甚至会导致通信中断。光在空间直线传播,这就意味着通信双方必须处在相互看得见的位置,这也限制

了大气激光通信的应用。在外层空间，没有大气的吸收和散射，也没有遮挡物，是空间光通信的理想应用环境。当然外层空间，例如卫星之间实现激光通信还有许多问题需要研究，但是其前景美好，是各国竞相研究、试验的热门领域。

利用许多对光波透明的材料制作成光波导可以实现红外光信号的远距离传输。石英玻璃是理想的近红外透明材料，利用石英玻璃制作成低损耗的光导纤维（光纤）一直是人们追求的目标。但是直到 20 世纪 60 年代，即使利用最好的光学玻璃制作的光纤的损耗也超过了 1000dB/km。1966 年华裔科学家高锟博士从理论上解决了石英材料的损耗机理，指出自然界的石英对光的损耗主要是由其中的杂质吸收引起的，只要将石英玻璃做得足够干净就可以将其损耗降下来，并给出了可用于通信的光纤的结构设想。1970 年美国康宁玻璃公司根据高锟理论，采用特殊工艺，研制成了世界上第一根低损耗光纤，其损耗降到 20dB/km。此后不久，石英光纤的损耗进一步下降到 1dB/km 以下，现在在 1.55 μm 附近已接近到其理论极限，低于 0.2dB/km。低损耗光纤的问世成为现代光通信技术发展的催化剂。高锟博士的理论奠定了此后数十年光纤通信高速发展的基础，为人类的信息通信文明做出了巨大贡献，被尊为光纤通信之父，2009 年他因此获得了诺贝尔物理学奖。

在低损耗光纤问世的同时，适于光纤通信的半导体激光器也研制成功。20 世纪 70 年代是光纤通信的诞生时期，由于光纤通信无与伦比的优越性，此后得到了飞速发展，到了 20 世纪 90 年代就几乎完全取代了铜缆，成为现代通信网中最主要的传输手段。据统计，当今世界的海量信息有 80% 以上是通过光纤传输的。

频率在 430~730THz 的电磁波即为可见光，其波长范围为 700~380nm。可见光是早期光学的主要研究对象，工作在可见光区域的光学系统在各行各业都有广泛的应用，这不属于本书的讨论范畴。人类最早的远距离快速通信就是利用可见光波作为信息载体实现的。3000 年前中国的西周时期就发明了烽火台，边关一旦有紧急军情，就可以在就近的烽火台举火，在其视距范围内的下一个烽火台跟着举火，这样很快就可以将军情传至指挥中心。烽火台通信已经孕育了现代通信的两个重要概念，其一是光通信，其二就是接力通信。近代，由法国人切普发明的扬旗通信，也是利用可见光作为信息载体的通信方式。扬旗通信已经具有现代数据通信（编码通信）的雏形，这种通信方式在拿破仑时代达到了鼎盛时期。无论是烽火台通信还是扬旗通信，都是以可见光作为信息载体，以人的眼睛作为接收器，所以称为目视光通信。目视光通信固有的缺点是通信容量极低，传输受多种因素影响。1837 年美国人莫尔斯发明电报，从此进入电信时代，扬旗通信退出了历史舞台，但是这种通信至今还有用武之地，在舰船之间的旗语、交通警察使用的手势中都可以看到这种通信方式的遗迹。大气对于可见光几乎是透明的，但是可见光在大气中传输时也会被吸收、被散射。瑞利散射是大气分子对光的重要影响，由于瑞利散射的强度与波长的 4 次方成反比，所以可见光中短波长成分蓝光比起长波长成分红光受到更强烈的散射，这就是晴朗的天空总是呈蔚蓝色的原因。可见光在海水中会受到严重的衰减，在海水中不可能远距离传播。近年的研究表明，蓝绿激光在海水中受到的衰减相对较小，可以传播一定的距离，这就为实现对潜行于水下的潜艇通信提供了新的通信窗口。传统的对潜通信系统都是工作在超长波段，如前所述，这种系统天线系统庞大，通信容量极低，如果采用蓝绿激光通信实现对潜通信，就可以从根本上解决超长波通信系统的困难。蓝绿激光水下通信技术是近年各国军方竞相研究的课题。

波长短于 380nm 的电磁辐射即属于紫外线。大气对紫外线有强烈的吸收作用，所以利用紫

外光作为信息载体达成通信,尤其是远距离通信几乎是不可能的。但是在 200~400nm 频段,太阳的强烈的紫外辐射被大气层吸收,因而背景光噪声较弱,同时近地大气对紫外光产生散射,使得可以在非视距范围接收紫外光信号。由于这一特性,利用波长 200 多纳米的紫外光作为信息载体实现近距离通信受到关注。紫外光通信保密性能好、抗干扰能力强、可非视距接收,因而受到军方的重视。美军已有的紫外光通信设备可以实现数千米的视距与非视距通信。

4. 本书的主要内容

电磁波频谱是一种资源,微波与光波在其中各占有十分重要的地位。微波可以穿透对流层、电离层,许多电子信息系统都采用微波作载体。近年来,以光波作为信息载体的光通信技术蓬勃发展,光纤通信与微波技术紧密结合。天线可将导行波转换为向空间定向辐射的电磁波,或将在空间传播的电磁波转换为接收设备中的导行波,在无线通信系统中发挥着不可替代的作用。微波与光波的发射、传输及接收技术在现代通信系统中占据着举足轻重的地位。

对微波、光波与天线的分析涉及到的数学知识较多,公式冗长,计算繁琐,还常用到多种特殊函数,借助计算机既可以省时省力,还可以形象直观。例如,在天线分析中如果了解天线的辐射电阻,借助计算机软件不仅可以计算其辐射阻抗,还可以画出辐射特性曲线;如果了解天线的方向特性,借助计算机软件可以计算方向系数,还可以画出主平面方向图及全空间立体方向图。在天线优化设计中,由于天线的一些参数(如天线增益与工作带宽、主瓣宽度与旁瓣电平)往往是相互矛盾的,借助计算机软件更显示其优越性。目前常用的电磁场数值计算方法主要有:时域有限差分(FDTD)方法、矩量法(MOM)和有限元法(FEM)。以上述算法为理论基础的电磁仿真软件也很多,深受天线设计者及研究人员青睐的仿真软件有 Ansoft HFSS、CST Microwave Studio、Zeland IE3D、IMST Empire、XFDTD、FEKO 等。

微波、光波、天线与电波传播是现代通信系统的重要组成部分,它们研究的对象和目的有所不同。微波主要研究如何导引电磁波在微波传输系统中有效传输,它的特点是:希望电磁波能按一定要求沿微波传输系统无辐射传输。光纤中传播的光波也是一种导行电磁波,对光纤传输的基本要求就是:尽可能低的传输损伤。天线的任务是将导行波变换为向空间定向辐射的电磁波,或将在空间传播的电磁波变换为通信设备中的导行波,因此天线有两个基本的作用:一个是有效地辐射或接受电磁波,另一个是无线电波能量与导行波能量之间的转换。电波传播则是分析和研究无线电波在空间的传播方式和特点。微波、光波、天线与电波传播的共同基础是电磁场理论,它们都是电磁场在不同边值条件下的应用。

本书主要从物理层传输信道的角度上介绍导行电磁波及光纤传输的基本规律。传输信道总体上可以分为两大类,即无线信道和有线信道。在无线信道中,无论是无线电波还是光波都以自由电磁波的形态传播;在有线信道中,无论是双导线、金属波导还是介质波导,都以导行电磁波的形态传播。本书还将介绍天线转换导行电磁波与自由电磁波的机理以及自由电磁波、导行电磁波的传播规律。受篇幅的限制,这里将微波、天线的分析和基本概念作为讲授重点:全书共有 7 章,第 1 章讲述均匀传输线理论;第 2 章讲述包括微带线等平面传输线在内的规则微波传输波导;第 3 讲述光波导基础理论,以光纤的传输原理与传输特性为主;第 4 章讲述天线的基本概念与分析方法;第 5 章介绍常用线天线;第 6 章介绍包括光学天线在内的面天线;第 7 章则讲述各个频段的电波传播特点,包括光波在大气及水下信道中的传播特性。

引导电磁波能量向一定方向传输的各种传输系统都被称为传输线，这些传输线起着引导能量和传输信息的作用，其所引导的电磁波称为导波，因此，传输线也被称作导波系统。

在微波工程中，对传输线的分析方法通常有两类：一是“场”的方法，即从麦克斯韦方程出发，求出满足边界条件的波动解，得出传输线上电场和磁场的表达式，进而分析传输线的传输特性；二是“路”的方法，即从传输线方程出发，求出满足边界条件的电压和电流波动方程解，得出传输线上等效电压和等效电流的表达式，进而分析传输线的传输特性。这两种方法有着密切的联系，相互补充，交替使用。前一种方法较为严格，但数学上比较繁琐；后一种方法实质上是“化场为路”方法，数学上较为简便，在微波的低频段有足够的精度，被广泛采用。而工作于毫米波的传输线只能采用“场”的分析方法。为了掌握好这门技术必须牢固地树立起场和波的概念，对于低频电路中的许多概念和术语应用场和波的概念重新加以认识。

本章从“场”的观点出发，求出传输线的分布参数，再将传输线等效为分布参数电路，以“路”的观点建立起传输线方程，导出传输线方程的解；然后分析传输线的传输特性及其参量——传播常数、阻抗、反射系数及驻波比；最后介绍如何利用史密斯（SMITH）圆图进行传输线的阻抗计算和匹配。

这一章里，最重要的是建立起分布参数的概念，同时还要充分理解史密斯圆图的设计思想。因为本章分析的是传输 TEM 模的均匀传输线，由此得到的结果也同样适用于其他形式的 TEM 模均匀传输线。

1.1 微波传输线

在微波工程中使用着各种类型的传输线，称作微波传输线，如平行双线、同轴线、矩形波导、圆波导、介质波导、带状线、微带线等，如图 1-1 所示。根据所选用的工作频段和微波工程系统中的要求可以选用不同类型的传输线。研究各种类型的传输线都要涉及到以下一些概念和电特性，诸如传播常数、特性阻抗、场结构、临界波数、波阻抗、等效阻抗、功率容量、衰减损耗、工作频带、结构尺寸、制造工艺等。