



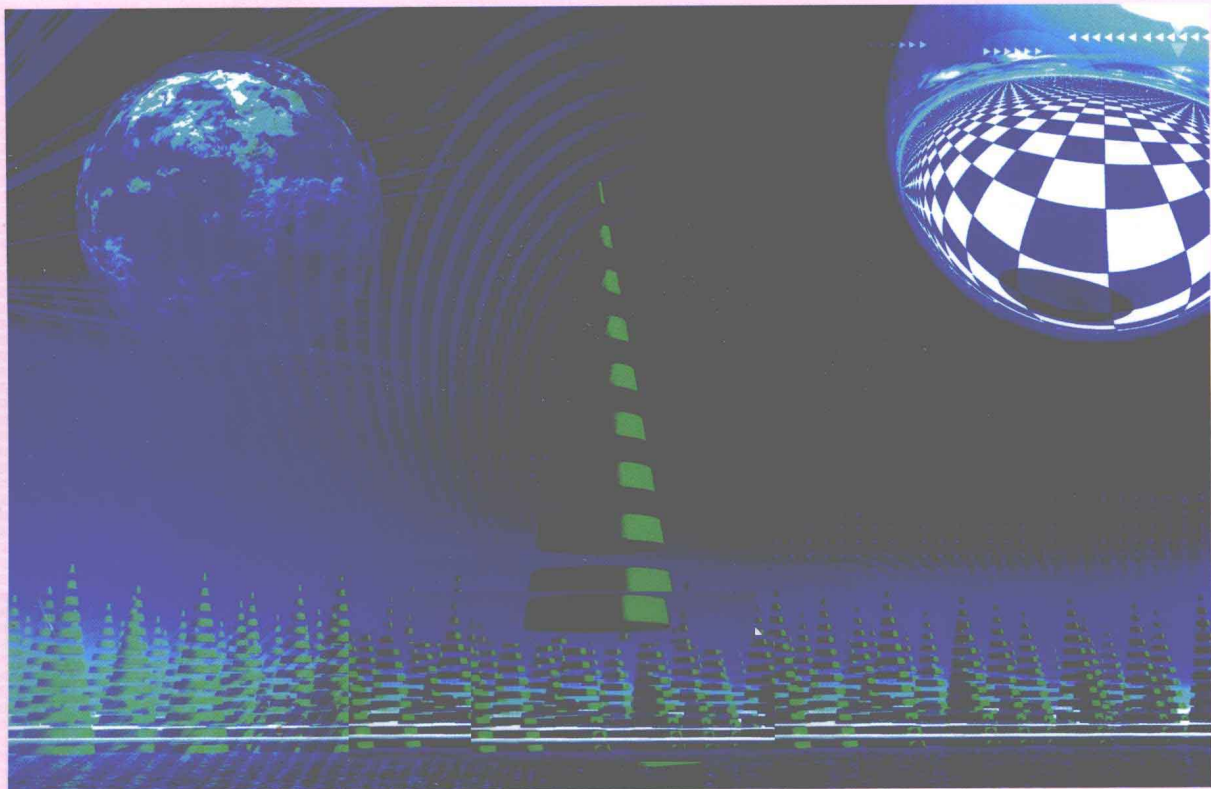
教育部高等职业教育示范专业规划教材

(通信类专业)

基站与无线覆盖技术

JIZHAN YU WUXIAN FUGAI JISHU

朱里奇 主编



- 系统地介绍了无线技术的基础理论和现代移动通信中无线技术的具体应用
- 共分8章，分别介绍了电磁场基本理论、电磁波特性和电磁波传播等基本理论知识，同时结合移动通信网络，特别是第三代移动通信网络，从天线、基站、直放站和无线覆盖技术四个方面详细论述了无线技术使用中的关键问题



赠电子课件
思考题与习题答案等



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

教育部高等职业教育示范专业规划教材
(通信类专业)

基站与无线覆盖技术

主 编 朱里奇
副主编 宋烈武 罗文兴
参 编 刘正波 余 东 鄢江艳 蒋 喆
主 审 强世锦



机械工业出版社

本书系统地介绍了无线技术的基础理论和现代移动通信中无线技术的具体应用。全书共分8章,分别介绍了电磁场基本理论、电磁波特性和电磁波传播等基本理论知识,同时结合移动通信网络,特别是第三代移动通信网络,从天线、基站、直放站和无线覆盖技术四个方面详细论述了无线技术使用中的关键问题。

本书内容新颖,紧密结合最新技术成果;理论和实际紧密结合,具有很强的实用性;编写风格平实易懂,详略安排得当。

本书可作为高等职业技术教育通信技术和电子信息工程技术等专业的教材,也可作为通信工程及相关领域技术人员的参考书。

为方便教学,本书配有免费电子课件、思考题与练习题答案等,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电(010-88379564)或邮件(cmpqu@163.com)索取。有任何技术问题也可通过以上方式联系。

图书在版编目(CIP)数据

基站与无线覆盖技术/朱里奇主编. —北京:机械工业出版社, 2011.8
教育部高等职业教育示范专业规划教材. 通信类专业
ISBN 978-7-111-34447-6

I. ①基… II. ①朱… III. ①码分多址移动通信-通信设备-高等职业教育-教材 IV. ①TN929.533

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第172908号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:曲世海 责任编辑:曲世海 常建丽 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:马精明 责任印制:李妍

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2011年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.5印张·376千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-34447-6

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着通信技术，特别是移动通信技术的高速发展，以天线、基站、直放站和无线覆盖等为代表的无线技术得到了广泛的应用，取得了重要成果。现代移动通信从第一代（1G）到第二代（2G），再到第三代（3G），均是人们采用新的技术手段，将无线资源的利用提高到了一个新的水平。

全书共分8章。第1章为绪论，介绍了无线技术的发展和應用；第2章为电磁场基本理论，系统讨论了静电场、恒定电场、恒定磁场和时变电磁场的基本规律，建立了麦克斯韦方程组；第3章为电磁波特性，讨论了平面正弦电磁波在不同媒质中的传播特性；第4章为电磁波传播，讨论了电磁波的自由空间传播，在地球环境下的地面波、电离层波和直射波形式，以及有线传输方式；第5章为天线，介绍了基本振子的辐射、对称振子天线和天线阵、发射天线和接收天线；第6章为基站，介绍了基站系统的基本工作原理和天馈线系统、电源系统、环境系统三个主要组成部分；第7章为直放站，介绍了直放站的基本工作原理和其在GSM系统、CDMA系统等的具体应用，以及直放站的工程设计、调测和工程安装；第8章为无线覆盖技术，讨论了在室内、室外和特殊条件下的多种覆盖技术。各部分内容既相互联系又各自独立，可以根据不同的要求进行取舍。

全书由朱里奇任主编，并编写了第1、2章和附录。第3章由刘正波编写，第4章由余东编写，第5章由宋烈武编写，第6章由罗文兴编写，第7章由鄢江艳编写，第8章由蒋喆编写。强世锦教授对本书进行了详细的审阅。本书在编写过程中得到中国联通武汉分公司黄小青经理、武汉虹信通信技术有限责任公司杨军工程师的大力支持，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，敬请广大专家和读者予以指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论 1

1.1 电磁场理论的建立 1

1.2 电磁场理论的应用范围 2

1.3 电磁场理论与现代电子信息技术 3

1.3.1 无线通信系统 3

1.3.2 雷达系统 4

1.3.3 电子对抗 4

1.3.4 电磁兼容 5

1.4 电磁场理论与电路的关系 6

思考题与练习题 7

第2章 电磁场基本理论 8

2.1 电磁场中的基本物理量和基本实验定律 8

2.1.1 电荷及电荷密度 8

2.1.2 电流及电流密度 9

2.1.3 库仑定律和电场强度 10

2.1.4 安培定律和磁感应强度 12

2.2 静电场 14

2.2.1 真空中静电场的基本方程 14

2.2.2 电位函数 16

2.2.3 电介质中的高斯定理及边界条件 18

2.2.4 静电场的能量 21

2.2.5 唯一性定理及镜像法 22

2.3 恒定电场 23

2.3.1 恒定电场的基本方程 23

2.3.2 导电媒质中的传导电流 24

2.3.3 恒定电场与静电场的比较 27

2.4 恒定磁场 27

2.4.1 真空中恒定磁场的基本方程 27

2.4.2 矢量磁位 29

2.4.3 磁介质中的安培定律及边界条件 30

2.4.4 恒定磁场的能量 32

2.5 时变电磁场 32

2.5.1 法拉第电磁感应定律 33

2.5.2 位移电流 34

2.5.3 麦克斯韦方程和边界条件 35

2.5.4 坡印廷定理 37

2.5.5 波动方程 38

思考题与练习题 38

第3章 电磁波特性 40

3.1 时间简谐场 40

3.1.1 时间简谐场的复数表示法 40

3.1.2 麦克斯韦方程的复数形式 41

3.1.3 波动方程的复数表示法 41

3.1.4 平均坡印廷矢量 41

3.2 平面正弦电磁波在理想介质中的传播 42

3.2.1 波动方程及其求解方法 42

3.2.2 平面电磁波 43

3.2.3 平面正弦电磁波 43

3.2.4 平面正弦电磁波的特性 45

3.3 平面正弦电磁波在导电介质中的传播 46

3.3.1 复介电常数 46

3.3.2 导电介质中的电场强度 47

3.3.3 导电介质中的磁场强度 48

3.3.4 关于导电介质的讨论 48

3.4 电磁波的极化 49

3.5 平面正弦电磁波对平面分界面的垂直入射 52

3.5.1 对理想导体平面分界面的垂直入射 52

3.5.2 对理想介质平面分界面的垂直入射 54

3.6 平面正弦电磁波对平面分界面的斜入射 56

3.6.1 对理想导体平面分界面的斜入射 56

3.6.2 对理想介质平面分界面的斜入射 58

3.6.3 全反射和全折射 60

思考题与练习题	61	第 6 章 基站	119
第 4 章 电磁波传播	63	6.1 基站系统	119
4.1 电磁波传播的基本概念	63	6.1.1 基站系统概述	119
4.1.1 电磁波的频谱	63	6.1.2 BSC/TRC 的功能与实现	123
4.1.2 电磁波传播的方式	64	6.1.3 无线基站	124
4.1.3 自由空间的电磁波传播	66	6.1.4 基站的维护	125
4.1.4 媒质对电磁波传播的影响	67	6.1.5 移动通信基站的防雷	127
4.2 地面波	69	6.2 天馈线系统	128
4.2.1 地球表面的电磁特性	69	6.2.1 天馈线系统概述	128
4.2.2 地面波的场结构与传播特性	70	6.2.2 天线类型	130
4.3 电离层波	72	6.2.3 天线性能参数	133
4.3.1 电离层	72	6.2.4 天线的选择方法	134
4.3.2 无线电磁波在电离层中的传播	74	6.3 基站电源系统和环境系统	135
4.4 直射波	76	6.3.1 基站电源系统	135
4.4.1 地面对电磁波传播的影响	76	6.3.2 基站环境系统	138
4.4.2 大气对电磁波传播的影响	79	6.4 基站天线参数的调整	138
4.5 电磁波的有线传输	80	6.4.1 天线高度	138
4.5.1 导行电磁波	80	6.4.2 天线俯仰角	139
4.5.2 传输线理论	85	6.4.3 天线方位角	140
4.5.3 平面传输线	89	6.4.4 天线位置	140
思考题与练习题	91	思考题与练习题	141
第 5 章 天线	93	第 7 章 直放站	143
5.1 天线辐射的基本原理	93	7.1 直放站概述	143
5.1.1 赫兹对称振子的辐射	93	7.1.1 直放站的结构、工作过程和 分类	143
5.1.2 电基本振子的辐射	94	7.1.2 直放站的应用	145
5.1.3 磁基本振子的辐射	97	7.2 GSM 直放站	148
5.2 对称振子天线和天线阵	99	7.2.1 GSM 直放站的特点和分类	148
5.2.1 对称振子天线	99	7.2.2 GSM 直放站的主要技术指标和 要求	153
5.2.2 天线阵	102	7.2.3 GSM 直放站的应用	157
5.3 面天线	104	7.2.4 无线直放站工程参数计算	159
5.4 发射天线的主要特性参数	106	7.3 CDMA 直放站	163
5.4.1 天线的方向特性及方向图	106	7.3.1 CDMA 直放站概述	163
5.4.2 天线的效率与增益	108	7.3.2 CDMA 直放站的应用和优化	165
5.4.3 天线的阻抗特性	110	7.4 WCDMA 直放站	170
5.4.4 天线的有效长度	111	7.4.1 WCDMA 直放站概述	170
5.4.5 天线的极化特性	112	7.4.2 直放站扩大基站覆盖区的分析	171
5.4.6 天线的频带宽度	113	7.5 CDMA 2000 直放站	173
5.5 接收天线的基本原理	114	7.5.1 CDMA2000 直放站应用的要求	173
5.5.1 天线接收无线电磁波的基本 原理	114	7.5.2 CDMA2000 直放站的主要技术 指标	173
5.5.2 接收天线与发射天线的互易性	115	7.5.3 CDMA2000 直放站的应用	176
5.5.3 接收天线的某些特殊要求	116		
思考题与练习题	117		

7.6 TD-SCDMA 直放站	177	8.3.1 边际网覆盖的基本概念	209
7.6.1 TD-SCDMA 直放站的特点和 分类	177	8.3.2 隧道覆盖技术	213
7.6.2 TD-SCDMA 直放站的主要技术 指标	179	8.3.3 公路覆盖技术	216
7.6.3 TD-SCDMA 直放站同步方式	180	8.3.4 铁路覆盖技术	217
7.7 直放站工程设计和噪声分析	181	8.3.5 郊区、村镇及山区行政村覆盖 技术	219
7.7.1 直放站工程设计与调测	181	8.4 覆盖延伸技术	220
7.7.2 直放站引入的噪声分析	186	8.4.1 基站塔顶放大器	220
思考题与练习题	187	8.4.2 超远距离覆盖	224
第8章 无线覆盖技术	188	8.4.3 数字射频拉远技术	229
8.1 微蜂窝	188	8.4.4 一体化基站远端天线系统	230
8.1.1 微蜂窝的特点	188	8.4.5 载波池技术	231
8.1.2 微蜂窝的应用	189	8.5 特殊覆盖技术	231
8.1.3 微蜂窝的优化控制	190	8.5.1 天线分裂技术	232
8.2 深度覆盖技术	191	8.5.2 高层覆盖技术	232
8.2.1 室内覆盖系统	191	8.5.3 多点覆盖技术	233
8.2.2 居民小区室外覆盖技术	201	8.5.4 综合室内覆盖系统	234
8.2.3 室内/室外整体覆盖	205	思考题与练习题	238
8.3 边际网覆盖技术	209	参考文献	239

第 1 章 绪 论

1.1 电磁场理论的建立

电学、磁学、光学的发展是从古代开始的。在古代，人们已经发现某些东西与琥珀之类的物体摩擦就能吸引物品，有的矿石能吸铁等不可思议的现象。希腊的学者对这种现象进行过多次研究。古代的中国就认识到磁铁能指示南北方向，并将其应用于实践。此外，光是比电、磁更常见的现象，古人对它的直线传播性质、反射与折射现象都进行过详细的探索。

近代的电磁学是从 1600 年出版吉尔伯特 (W. Gilbert) 的著作开始的。但是，在 17 世纪未见明显的进展。与此相反，光学却得到了引人注目的发展，如发明了望远镜，发现了有关折射的斯涅耳定律，观察到衍射及干涉现象，提出光的粒子学说与波动学说等。

18 世纪以来，电学、磁学得到了发展，发明了可存储大量电荷的莱顿瓶；逐渐了解当两种电荷相遇时，同种电荷相斥、异种电荷相吸的现象；导体与绝缘体的区别等重要知识。其中最重要的是著名的库仑定律。1785 年，库仑 (C. A. Coulomb) 通过精密测量，揭示了带电粒子之间的作用力与电荷量的乘积成正比，与距离的平方成反比的规律。它成为后来电磁学的出发点。

1800 年，在前人研究成果的基础上，伏特 (A. Volta) 终于制成了蓄电池。由此得到最初的持续电流 (稳定电流)，促进了电磁学的进一步发展，可以说，这是人类应用电的开端。

19 世纪后，电磁学得到迅速的发展。1820 年，奥斯特 (H. C. Oersted) 发现了电流的磁效应。当铜线上流过电流时，可以被置于附近的磁针探测出来。这就是把电与磁联系起来的重大发现。以前也曾研究过电与磁两者之间是否有某种联系，但在此之前，尚未得到能支持此观点的实验结果。根据奥斯的发现，电与磁之间的关系开始得到了实验的证实。

奥斯的发现给了研究者们极大的激励，仅仅在三个月内，通过安培 (A. M. Ampere)、毕奥 (J. B. Biot) 与萨伐尔 (F. Savart) 等的研究，逐渐发现有关电流与磁的重要定律。电磁铁也几乎在同一时期被制成。

弄清从电流产生磁的现象后，自然就出现了从磁产生电的问题。但是，仅仅在磁铁上绕线圈是不能产生电流的。之后，几乎过了 10 年，到 1831 年，法拉第 (M. Faraday) 发现了通过在时间上变化的磁的东西 (磁通)，产生了电的东西 (电动势)，这就是电磁感应定律。其关键是磁通随时间变化，而移动磁铁或使电流变化均可以实现磁通随时间变化。这一发现成了电磁学飞跃发展的起点。

库仑定律和万有引力定律有同样的形式，它们都把力作为两个带电粒子之间的直接作用 (远距离作用) 来考虑。与此对照，在法拉第所引入的力线概念中，力是被考虑为通过介质起作用 (近距离作用) 的。

尽管光的微粒说与波动说是长期对立的，但在 18 世纪，总的来讲，微粒说要占优势。然而，进入 19 世纪，杨 (T. Young) 与菲涅耳 (A. J. Fresnel) 等人按照波动说成功地解释

了光的主要性质，这就是直线传播性，反射、折射的定律与干涉、衍射以及双折射等现象。得出光是一种横方向振动的进行波（横波）。

搞清了从电产生磁、从磁产生电之后，就期待着综合电与磁的统一理论。但是，仅仅从当时归纳推理所得到的种种见解来看，还是与当时根据经验所了解的电荷守恒定律有矛盾。麦克斯韦（J. C. Maxwell）以近距离作用的观点，通过引入“位移电流”这一新的概念，解决了这个矛盾。可与普通电流作同样的考虑，通过随时间变化所表现出来的位移电流也可以建立磁场。这也可以看成是由于磁场随时间变化而产生电动势，即电磁感应定律的可逆现象。根据麦克斯韦的理论，得到了处理电磁现象的基本定理，建立了电磁学的新起点。需要说明的是，今天大家所知道的麦克斯韦方程式，是后来经过赫兹（H. Hertz）整理麦克斯韦理论之后所描述的方程式。

由麦克斯韦理论所得到的重要结论是确实存在电与磁的波动（电磁波），并且经过测量所得到的波的速度与光的速度一致。据此，麦克斯韦 1871 年发表了光只是电磁波的一种的见解，即“光的电磁波说”。此后，赫兹的一系列实验（1888 年）证实了电磁波的存在，并揭示了电磁波与光同样具有直线传播、反射、折射等性质。19 世纪末，通过麦克斯韦方程式得到了能统一解释电、磁、光等各种现象的电磁学。

1.2 电磁场理论的应用范围

电磁场理论在当今科学技术发展的进程中得到了广泛应用。无线电系统中的电磁波辐射、传播及接收均需要用电磁场理论来解释。

无线电系统中的天线是用来发射和接收携带信息的电磁波的设备，是极其重要的部件，其基本原理只能通过电磁场理论的知识来解释。电磁波由波源产生，进而脱离波源传播的现象被称为电磁波的辐射；当电磁波产生后，即使波源不复存在，已产生的电磁波仍可继续传播；而通过天线接收空间传播的携带信息的电磁波被称为接收。

所有无线电系统的工作原理与工程设计，均依赖于电磁波在空间的传输路径，而电磁波在空间的传播不仅与工作频率有关，而且还与收发天线的形状以及传播环境等有很大关系。

电磁波在空中的传播很大程度上受频率的影响。从理论上来说，有关电磁波的讨论更耐人寻味，这是因为电磁波作为基本场定律的解，应该同样适用于经典电磁场理论所研究的整个频率范围。到目前为止，实验上已经观察到的电磁波频谱如图 1-1 所示，它能够连续地从低至直流的零赫兹到无线电长波，然后再一直延伸到在宇宙线中观察到的能量很高的 γ 射线。无线电长波的频率约为 10Hz，波长为 $3 \times 10^4 \text{m}$ ；而后者频率的数量级为 10^{24} （或者更高），波长的数量级为 10^{-16} （或者更短）。已知的频谱覆盖了 20 多个数量级。由于无线电、光波、X 射线和 γ 射线等频率相差几个数量级，因此辐射源、探测方法以及与物质的相互作用方式均有显著的差别。

图 1-1 中，用阴影区表示的界限只是近似的。能量 hf 是一个光子或辐射量子的能量，其中 h 是普朗克常数 ($6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$)， f 是频率。

这些电磁波的同源性，是由在它们频谱的重叠部分上进行的大量实验所证实的。此外，在自由空间中，它们都是以共同的速度 c 传播的横波，也是一个证明。例如，同时用无线电方法和光学方法观察耀星，证明了当波长相差 6 个数量级时，传播速度在实验误差范围内确实一致。

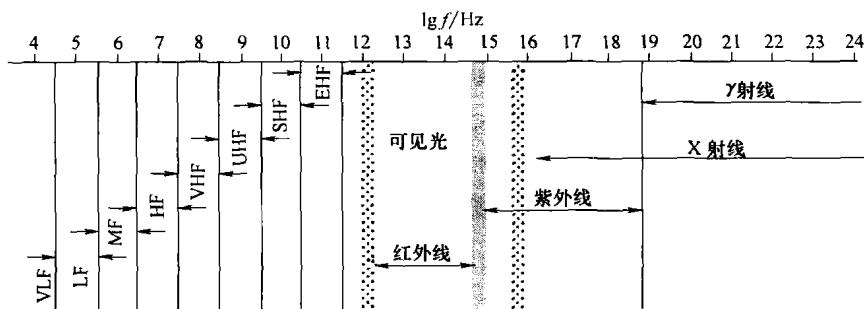


图 1-1 电磁波频谱

注：图 1-1 中 VLF 等的具体含义详见表 4-1。

自从赫兹在 1888 年验证了电磁波的存在之后，电磁场和电磁波应用到了人们生活的方方面面。如果按照图 1-1 所示的频段来划分，在静场范围内有磁性水雷、磁法探矿及预报地震等方面的应用，而电磁探测法是利用电磁波与地层的反射时间及强度来探测地层状况的，主要应用于地下水、海水入侵、断层破碎带、地层构造及地下管线探测、钻孔电磁波法和坑道电磁波法的勘探应用等方面。在几十赫兹范围内的电磁波，应用于电力与电机方面。在甚低频及低频波段范围内的电磁波，用于与潜艇的长波通信。在中频及高频波段范围内的电磁波，用于广播和电视的发射及接收。在高频、甚高频和特高频波段范围内的电磁波，应用于移动通信、短波通信和无线互联网等方面。在极高频和至高频波段范围内的电磁波，应用于卫星通信、高速数据传输、雷达、电子对抗（其中包括隐身和反隐身、假目标、诱饵等技术）、导航、雷达成像及射电望远镜等方面。红外线波段范围内的电磁波，应用于近程数据传输、防盗监视系统等方面。在可见光波段范围内的电磁波，应用于光纤传输及数据交换等方面。随着技术的发展与进步，光纤已经逐渐变成一种比较廉价的传输媒质。激光武器是将激光的能量高度集中，比太阳光亮 200 亿倍，足以摧毁任何坚固的目标。激光射击时几乎没有后坐力，可随意变换射击方向，精确打击目标的要害部位。海洋激光探测是一种可脱离水面、可遥测垂直剖面参数的新型海洋探测方法和技术。激光治疗仪可进行美容。另外，X 射线、红外线、热成像、核磁共振等成像诊断设备，生物电信号检测及临床监护设备，γ 射线、超声、激光、电磁波等治疗装置，以及新型中医诊断与治疗仪器，均在医疗卫生系统及行业中得到应用。在紫外线波段范围内的电磁波，应用于医疗消毒。总之，电磁波已经深入到人们日常生活的各个方面。

1.3 电磁场理论与现代电子信息技术

自麦克斯韦创立了麦克斯韦方程组理论以来，特别是进入 20 世纪，与电、磁紧密相关的技术和设备大量涌现，如无线电广播、导航、移动通信、电视、雷达、遥控、遥感、遥测、卫星通信和射电天文等。从而给整个物质世界的面貌带来了深刻变化，进一步促进了人类社会的发展。

1.3.1 无线通信系统

近年来，随着技术的进步和市场需求的推动，促进了移动通信系统、无线局域网、本地

多点分配业务等的飞速发展，极大地改变了人们的生活状态。

图 1-2 显示了一个典型的数字无线通信系统的基本结构。由于无线通信系统要求能够提供各种综合业务，因此这里的信源也就包含了话音、数据、图形以及活动图像等。通过编码器将这些信源转换成数字形式的信息。然后通过信号处理部分将数字信息进行编码以抵抗各种信道衰减的影响，并由众多的用户共享所给定的频谱。调制功能是通过调制器、混频器、滤波器、射频放大器等将基带信号转换成能够经由发射机天线发送的射频信号。另一方面，在接收端，接收机天线接收射频信号。首先，射频（RF）信号通过低噪声放大器、混频器、带通滤波器、放大器及检波器等解调为基带信号；然后，在基带信号处理部分将不同的用户从共享的特殊频谱中分离出来，并且解码功能将试图修正无线信道所引入的误差；最后，解码功能将基带信号转换回原来的信源信号。

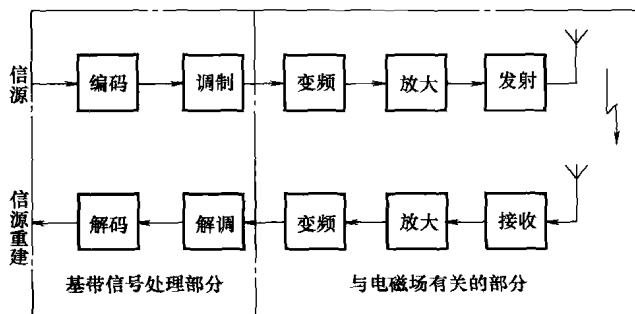


图 1-2 数字无线通信系统的基本结构

其中，从混频器、射频放大器、发射天线、电磁波在空间的传播路径、接收天线、低噪声放大器到滤波器等都要涉及到电磁场理论的知识。

1.3.2 雷达系统

目前雷达已经广泛地用于探测地面、海面、空中、太空甚至地下的目标。雷达的应用范围主要包括以下几个方面：军事应用、遥感、遥测、航空交通控制、法律强制执行、高速公路安全、空中交通安全和导航、石油和天然气的探测、轮船安全、太空探测，以及在工业中用于速度和距离的非接触性探测等。

一个超外差式常规脉冲雷达系统结构图如图 1-3 所示。发射机既可以是诸如速调管、行波管或晶体管放大器等功率放大器，也可以是一个诸如磁控管那样的功率振荡器。发射机的输出通过波导管或其他类型的传输线传送到天线，然后发射到空中。天线包括能够机械扫描的抛物面天线、平面天线阵列或电子扫描的相控阵天线。双工器允许发射机和接收机同时共享同一个天线。天线和双工器接收射频信号后，首先由双工器后面的低噪声放大器进行放大处理，接着由混频器和本振（LO）转换为中频（IF）信号，然后由中频（IF）放大器进一步放大。紧跟着的是一个通常被称为检波器或解调器的半导体二极管，其目的是从载频中提取调制信号。在接收机的输出端进行判决，以确定是否有目标存在。

其中，从功率放大器、发射天线、双工器、电磁波在空间的传播路径、接收天线、低噪声放大器、混频器到匹配滤波器等都要涉及到电磁场与电磁波理论的知识。

1.3.3 电子对抗

电子对抗也称电子战，是指利用电磁能量、电磁频谱进行的军事对抗，包括电子侦察（如利用卫星和预警飞机等）、电子攻击（如电磁干扰、电磁脉冲武器、大功率微波武器和石墨炸弹等）、电子防护（抗干扰技术）。

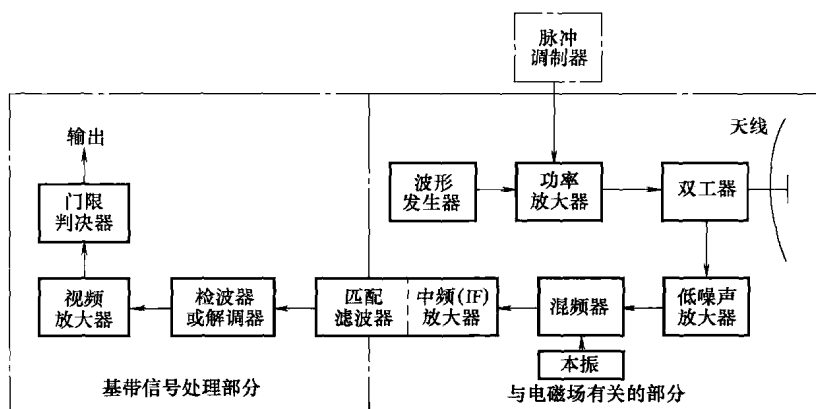


图 1-3 超外差式常规脉冲雷达系统结构图

1991 年的海湾战争是美军大规模实施电子对抗技术的战例，如美军充分利用了电磁干扰技术和隐身技术。首先利用隐形飞机、巡航导弹摧毁了伊军的指挥通信系统，然后利用电磁干扰飞机发射强大的电磁干扰信号，覆盖了伊拉克军用通信信号的整个频段，使伊军的通信设备完全瘫痪。隐身技术是利用电磁波吸收涂料和特殊的外形设计对电磁波的吸收、散射作用，使雷达接收不到飞机的回波信号。庞大的 B-2B 轰炸机的雷达截面仅和天空中的一个小鸟相当，以至于眼睛都看到飞机了，雷达还找不到。

海湾战争后，电子对抗技术在世界上引起很大的震动，我国也非常重视，投入很大的人力、物力进行研究，现在已经具备了进行大规模电子战的能力。

1.3.4 电磁兼容

随着科学技术的发展,越来越多的电子、电气设备进入了人们生活和生产的各个领域,这些设备在正常运行的同时也向外辐射电磁能量,可能对其他设备产生不良的影响,甚至造成严重的危害,这就是电磁干扰。

据统计,全世界空间电磁能量平均每年增长 7% ~ 14%。在有限的空间和有限的频率资源条件下,由于各种电子、电气设备的数量与日俱增,使用的密集程度越来越大,电磁干扰的严重性也就越来越突出,这方面出现过大量的实例。

在电视机旁使用电吹风，会对电视机产生干扰。收音机放在计算机旁，收音机会受到明显的干扰。

美国研制 B1 轰炸机时也遇到过电子设备之间的电磁干扰问题。B1 轰炸机的机头上装有大量的电子设备，分离试验时这些设备都符合技术标准，但把这些设备装上机头再测试，许多设备的性能大幅度下降，经过专家大量的试验和分析，发现是由这些设备之间相互的电磁干扰造成的。

1962年，美国民兵I导弹进行实弹飞行试验时，前两次都失败了，故障现象相似，都是在第I级发动机关机前炸毁了，炸毁前，用于制导的计算机都受到了脉冲干扰。经过分析和试验，发现故障是由于导弹飞行到一定高度时，在相互绝缘的弹头和弹体之间发生了静电放电，使导弹提前爆炸。

采用一定的技术手段,使同一电磁环境中的各种电子、电气设备都能正常工作,并且不

干扰其他设备的正常工作，这就是电磁兼容。

电磁兼容学科研究的对象不仅限于各种电子、电气设备，而且包括各种电磁环境（如自然电磁干扰、核电磁脉冲、静电放电和人为电磁辐射等）对人体的生态效应、信息处理设备因电磁泄漏造成的泄密等。电磁兼容涉及的领域十分广泛，通信、广播电视、科学仪器、信息设备、航空、航天、机车、舰船、电力、军工、医疗设备、计算机、家用电器等领域中都存在电磁干扰和电磁兼容问题。

1.4 电磁场理论与电路的关系

电子信息工程技术、通信技术等专业的基础课和专业基础课可以分为两大类：①与场有关的课程，如电磁学、电磁场与电磁波、微波、天线和电磁波传播等。②与路有关的课程，如电路分析、模拟电路、数字电路和高频电路等。这两类课程都是研究电磁现象的，方法不同。场的方法是利用麦克斯韦方程组，在给定的边界条件和初始条件下，求解空间各点电磁场量（如 E 、 B 、 W 等）的变化规律，逐点研究某一系统中的电磁过程。路的方法是引入电压、电流、电阻、电容、电感等概念，在某些条件下，利用等效电路来研究一个系统的电磁现象，而电阻、电容、电感等参数是由媒质的电磁参数（如 σ 、 ε 、 μ 等）确定的。

例如，在稳压、低频条件下（ $\lambda \gg l$ ，其中， λ 为电磁波波长，而 l 为电路的尺寸），电路如图 1-4 所示，电路中的电阻可用等效电阻代替，电场的能量都集中在电容中，磁场的能量都集中在电感中， R 、 C 、 L 都是集中参数，所以这类问题可用电路的方法研究。

对一些高频、微波问题（ λ 与电路的尺寸 l 可比，或 $\lambda < l$ ），沿导线电压、电流的振幅、相位是不同的，沿导线处处都存在电阻、电容、电感（见图 1-5），不能用集中的电阻、电容、电感代替，称为分布电阻、分布电容、分布电感。可用分布系数电路计算，而这些分布系数需要用场的方法计算，所以这类问题需要把场和路的方法结合起来研究。

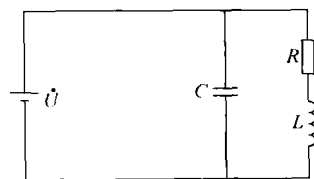


图 1-4 稳压、低频电路

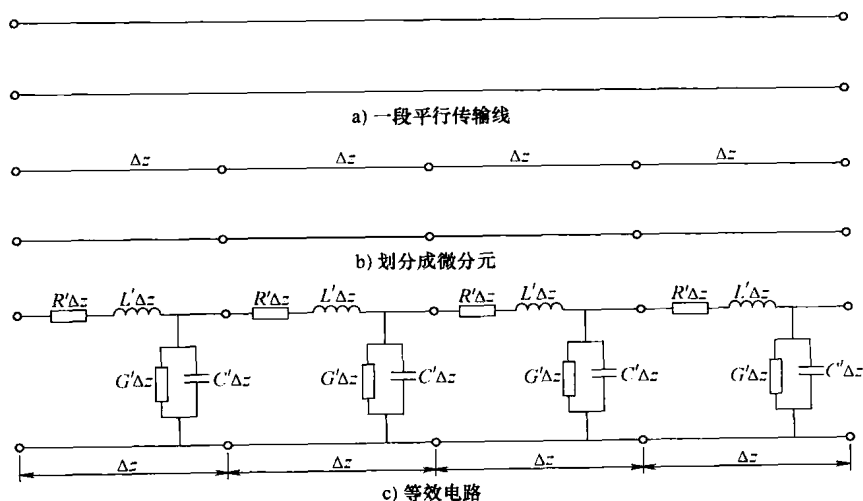


图 1-5 高频、微波电路

然而，研究天线、电磁波传播、波导、谐振腔、光纤等问题时，电压、电流等概念就失去了确切的意义，只能用场的方法研究。

思考题与练习题

- 1-1 电磁场理论建立的基础是什么？
- 1-2 电磁场理论建立的历史意义是什么？
- 1-3 电磁波频谱是如何划分的？
- 1-4 在一个无线通信系统中，哪些子系统将涉及电磁场与电磁波理论的知识？
- 1-5 在一个雷达系统中，哪些子系统要涉及到电磁场与电磁波理论的知识？
- 1-6 电子战是通过什么形式进行的？
- 1-7 什么是电磁兼容？它有哪几方面的内容？

第2章 电磁场基本理论

电磁场基本理论分为静电场、恒定电场、恒定磁场和时变电磁场四部分，其中静电场、恒定电场和恒定磁场是静态场，它们只是空间位置的函数，不随时间变化，这时电场和磁场虽然可以共处一个空间，但它们却是各自独立存在的。时变电磁场既是空间的函数，也是时间的函数，这时变化的电场可以产生磁场，变化的磁场可以产生电场，电场与磁场不再独立，它们同时存在，形成统一的电磁场。

2.1 电磁场中的基本物理量和基本实验定律

2.1.1 电荷及电荷密度

微观上看，电荷是以离散的方式出现在空间中的。物体所带电荷数量的多少，称为电量。电量有基本单元，一个质子所带电量为 e ，一个电子所带电量为 $-e$ 。任何带电体的电荷量 q 都是以 e 的整数倍数值出现的。电量的单位是 C（库[仑]），基本电荷 e 带的电量为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

在讨论宏观电磁现象时，由于大量带电粒子密集地出现在某空间，可以假定电荷是连续分布的，并用电荷密度描述这种分布。在电磁理论研究中，通常引入以下四种电荷源分布。

1. 体电荷分布

连续分布于一个体积 τ 之内的电荷，称为体电荷。通常用体电荷密度描述电荷在空间的分布。设体积元 $\Delta\tau$ 内有 Δq 的带电量，则体电荷密度 ρ 定义为

$$\rho(\mathbf{r}) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta\tau} \quad (2-1)$$

式中， ρ 的单位是 C/m^3 （库[仑]/米³）， $\rho(\mathbf{r})$ 表示体电荷密度是空间位置的函数。

要计算某一体积内的电荷总量 q ，可以用体积分的方法求得，即

$$q = \int_{\tau} \rho(\mathbf{r}) d\tau \quad (2-2)$$

2. 面电荷分布

连续分布于一个几何曲面上的电荷，称为面电荷。设面积元 ΔS 内有 Δq 的带电量，则面电荷密度 ρ_s 定义为

$$\rho_s(\mathbf{r}) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} \quad (2-3)$$

式中， ρ_s 的单位是 C/m^2 （库[仑]/米²）。

要计算某一面积内的电荷总量 q ，可以用体积分的方法求得

$$q = \int_S \rho_s(\mathbf{r}) dS \quad (2-4)$$

3. 线电荷分布

连续分布于一条线上的电荷,称为线电荷。设线元 Δl 内有 Δq 的带电量,则线电荷密度 ρ_l 定义为

$$\rho_l(r) = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} \quad (2-5)$$

式中, ρ_l 的单位是 C/m (库[仑]/米)。

要计算某一线上的电荷总量 q , 可以用体积分的方法求得

$$q = \int_l \rho_l(r) d\tau \quad (2-6)$$

4. 点电荷分布

当某一电荷量被集中在一个几何点上时,这样的电荷称为点电荷。

2.1.2 电流及电流密度

电荷的宏观定向运动称为电流。电流的定义是单位时间内通过某一横截面的电荷,表示为

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (2-7)$$

式中,电流 I 的单位是 A (安[培])。电流的分布用体电流、面电流和线电流三种形式描述。

1. 电流密度

(1) 体电流密度 电荷在某一体积内定向运动所形成的电流称为体电流。体电流的分布情况用体电流密度 $\mathbf{J}$ 表示。 $\mathbf{J}$ 是一个矢量,定义为通过垂直于某点的单位面积上的电流强度,如图 2-1 所示。其矢量表示式为

$$\mathbf{J} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad (2-8)$$

式中, $\mathbf{J}$ 的单位是 A/m²。

设导体内的体电荷密度为 ρ , 平均漂移速度为 v , 在导体内通过某一点选一个与 v 垂直的截面 $dS_{\perp}$, 如图 2-1 所示, 则 Δt 内通过 $dS_{\perp}$ 的电量为

$$\Delta q = \rho v \Delta t dS_{\perp}$$

通过 $dS_{\perp}$ 的电流为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \rho v dS_{\perp}$$

通过该点的体电流密度为

$$\mathbf{J} = \frac{dI}{dS_{\perp}} = \rho \mathbf{v}$$

$\mathbf{J}$ 用矢量可以表示为

$$\mathbf{J} = \rho \mathbf{v} \quad (2-9)$$

(2) 面电流密度 电流在厚度可以忽略的薄层内流动所形成的电流称为面电流。面电流的分布情况用面电流密度 $\mathbf{J}_s$ 表示。 $\mathbf{J}_s$ 定义为通过某点表面的垂直单位线上的电流,如图 2-2 所示。其矢量表示式为

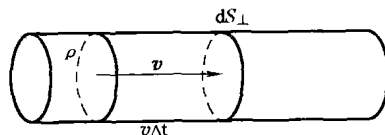


图 2-1 体电流密度

$$J_s = \frac{dI}{dl_{\perp}} \quad (2-10)$$

式中, J_s 的单位是 A/m。

设导体表面的面电荷密度为 ρ_s , 平均漂移速度为 v , 在导体内通过某一点选一个与 v 垂直的截线 $dl_{\perp}$, 如图 2-2 所示, 则 Δt 内通过 $dl_{\perp}$ 的电量为

$$\Delta q = \rho_s v \Delta t dl_{\perp}$$

通过 $dl_{\perp}$ 的电流为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \rho_s v dl_{\perp}$$

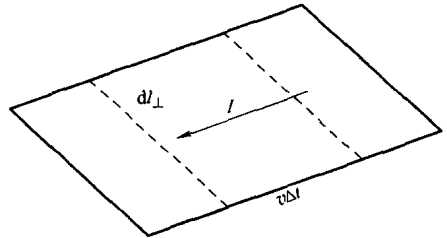
通过该点的面电流密度为

$$J_s = \frac{dI}{dl_{\perp}} = \rho_s v$$

J 用矢量可以表示为

$$J_s = \rho_s v \quad (2-11)$$

图 2-2 面电流密度



(3) 线电流密度 电荷在一个横截面可以忽略的细线中流动所形成的电流称为线电流。由于横截面趋近为 0, 通过某点的电流值 I 即为该点的线电流密度。设导体表面的线电荷密度为 ρ_l , 平均漂移速度为 v , 如图 2-3 所示, 则 Δt 内通过某一点的电量为

$$\Delta q = \rho_l v \Delta t$$

线电流为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \rho_l v \quad (2-12)$$

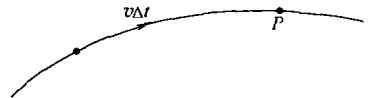


图 2-3 线电流密度

2. 电流元

电荷定向运动形成电流, 电荷元 dq 以速度 v 运动, $v dq$ 称为电流元。常用的体电流元为

$$v dq = \rho v dV = J dV \quad (2-13)$$

面电流元为

$$v dq = \rho_s v dS = J_s dS \quad (2-14)$$

线电流元为

$$v dq = \rho_l v dl = I dl \quad (2-15)$$

2.1.3 库仑定律和电场强度

两个带电体之间有相互作用力。带电体之间没有相互接触, 却有相互作用力, 是因为带电体在周围的空间产生了电场, 带电体之间的相互作用力是通过电场传递的。也就是说, 一个带电体在周围产生的电场对另一个带电体有作用力。假设在电场中引入一个足够小的实验电荷 q_0 , 则实验电荷必然受到作用力 F 。将电场强度定义为

$$E = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{F}{q_0} \quad (2-16)$$

式中, E 的单位是 V/m (伏[特]/米)。取极限 $q_0 \rightarrow 0$ 是为了使引入实验电荷不致影响原电场。

库仑于 1785 年从实验中总结出, 两个静止点电荷 q_1 和 q_2 距离为 R 时, q_2 受到 q_1 的作