

面向 **21** 世纪

高等学校信息工程专业系列教材

天线与电波传播

Antennas and Radio Wave Propagation

宋 铮 张建华 黄 冶 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校信息工程专业系列教材

天线与电波传播

Antennas and Radio Wave Propagation

宋铮 张建华 黄冶 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书围绕天线与电波传播两大内容展开。全书共 12 章,前 7 章为天线部分,各章内容分别为:天线基础知识、简单线天线、行波天线、非频变天线、缝隙天线与微带天线、面天线、智能天线;后 5 章为电波传播部分,各章内容分别为:电波传播的基础知识、地面波传播、天波传播、视距传播、地面移动通信中接收场强的预测。

本书力求兼顾信息量大、行文简洁的特点,追踪当前热点技术及应用,介绍了智能天线等新技术;书中的大量图表体现了 MATLAB 在天线与电波传播领域中的有效应用,附录给出了典型的 MATLAB 程序;关键词附有英文注释;各章配有习题。

本书的适用对象为电子工程、通信工程专业的大学本科学士;此书也可供其它专业选用以及通信及天线工程技术人员参考。

为了充分利用多媒体教学手段,本教材配有多媒体课件,以辅导该课程的教学。

图书在版编目(CIP)数据

天线与电波传播=Antennas and Radio Wave Propagation/宋铮等编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2003.7

(面向 21 世纪高等学校信息工程专业系列教材)

ISBN 7-5606-1250-4

I. 天… II. 宋… III. ① 天线-高等学校-教材 ② 电波传播-高等学校-教材

IV. ① TN82 ② TN011

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 042884 号

策 划 马乐惠

责任编辑 夏大平

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828 8201141 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfb001@163.com xdupfb001@sina.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安兰翔印刷厂

版 次 2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.875

字 数 392 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 24.00 元(含光盘)

ISBN 7-5606-1250-4/TN·0226(课)

XDUP 1521001-1

* * * 如有印制问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版

序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应地教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入21世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、深圳大学、解放军电子工程学院等10余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大类的教学计划和课程大纲,目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人,这套教材预计在2004年全部出齐。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、优中选优、以质取胜。教材内容要反映21世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用。体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会
2002年8月

高等学校计算机、信息工程类专业

系列教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电学院副院长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电学院通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑、教授）

计算机组

组长：韩俊刚（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子工业学院计算机分院副院长、副教授）

孙力娟（南京邮电学院计算机系副主任、副教授）

李秉智（重庆邮电学院计算机学院院长、教授）

孟庆昌（北京信息工程学院教授）

周娅（桂林电子工业学院计算机系副主任、副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

信息工程组

组长：张德民（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

方强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、副教授）

胡建萍（杭州电子工业学院电子信息分院副院长、副教授）

徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐宁（桂林电子工业学院通信与信息工程系副主任、副教授）

章坚武（杭州电子工业学院通信工程分院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电学院电子工程系副主任、副教授）

总策划：梁家新

策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

前 言

从“重基础，宽口径”的培养方针出发，目前高校课程体系作了较大的改革，一是课时减少，二是注重培养学生的创新素质及能力。“天线与电波传播”课程的教学时数减为60以下，但这个领域内的新知识却由于科学技术的飞速发展而不断涌现，为了适应这种变化和现代化教学的需要，我们编写了本书。

本教材的参考学时数为50~60学时。全书围绕天线与电波传播两大内容展开，共分为12章。第1~7章为天线部分，介绍天线的基本理论，对典型线天线和面天线进行了分析并介绍了其工作原理及电特性；为了拓宽学生的知识面以适应宽口径培养的需要，结合当前的科研动态介绍了相应的技术。第8~12章介绍电波传播的基本理论和分类，包括地面波传播、天波传播、视距传播以及地面移动通信中的接收场强预测。大部分章节相对独立，可根据不同的教学需求自由取舍。

本书在保持基本理论的严谨和完整的基础上，力图体现简洁、实用并跟踪学科发展动态的风格。针对“天线与电波传播”课程的理论分析较为繁琐且空间概念不易建立的特点，作者运用高性能计算软件MATLAB，以大量图表形象化地显示了分析结果。附录列出了有关典型计算程序。

本书配有多媒体课件。课件通过对各个动画、图表、数学公式、原理图和文字解说等进行合理编排，为读者提供了一个图文并茂、生动有趣的学习环境，在诠释课程中难点的同时展现了现代教育技术的魅力。

本书的适用对象为电子工程、通信工程专业的大学本科学生，也可供其它专业选用和通信及天线工程技术人员参考。

本书由宋铮、张建华、黄冶合作编著，其中，绪论、第1章、第5~8章、第11章由宋铮撰写，第2~4章、第9~10章由张建华撰写，第2章中的引向天线和第4章中的对数周期天线由黄冶撰写，第12章由宋铮和黄冶共同编写。

苏州大学电子信息学院的郭辉萍老师主审了全书，审阅人及责任编辑对本书提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。同时，作者对西安电子科技大学出版社的大力支持表示感谢。天线与电波传播领域的研究兼具传统性和新颖性，本书直接参考和引用了大量的国内外文献，这些文献均在书末一一列出，在此对被参考和引用的作者表示诚挚的谢意，如果没有他们发表的这些成果，本书无法完成。

由于作者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

天线与电波传播理论及技术作为电子学中的专门学科，有许多急需研究和尚待探索的新课题，同时也存在许多机遇和挑战，希望本书能为此做一点贡献。

作 者

2003年3月于合肥

目 录

绪论	1
第 1 章 天线基础知识	1
1.1 基本振子的辐射	1
1.1.1 电基本振子的辐射	1
1.1.2 磁基本振子的辐射	6
1.2 发射天线的电参数	7
1.2.1 方向函数	8
1.2.2 方向图	8
1.2.3 方向图参数	9
1.2.4 方向系数	10
1.2.5 天线效率	12
1.2.6 增益系数	12
1.2.7 天线的极化	13
1.2.8 有效长度	14
1.2.9 输入阻抗与辐射阻抗	15
1.2.10 频带宽度	16
1.3 互易定理与接收天线的电参数	16
1.3.1 互易定理	16
1.3.2 有效接收面积	17
1.3.3 等效噪声温度	18
1.4 对称振子	19
1.4.1 电流分布	20
1.4.2 对称振子的辐射场	21
1.4.3 对称振子的输入阻抗	23
1.5 天线阵的方向性	25
1.5.1 二元阵的方向性	26
1.5.2 均匀直线阵	31
1.6 对称振子阵的阻抗特性	38
1.6.1 二元阵的阻抗	38
1.6.2 直线阵的阻抗	43
1.7 无限大理想导电反射面对天线电性能的影响	44
1.7.1 天线的镜像	44
1.7.2 无限大理想导电反射面对天线电性能的影响	45
习题一	48
第 2 章 简单线天线	54
2.1 水平对称天线	54
2.1.1 双极天线	54
2.1.2 笼形天线	61
2.1.3 V 形对称振子	63

2.1.4	电视发射天线	64
2.2	直立天线	67
2.2.1	鞭状天线	68
2.2.2	T形天线、Γ形天线及斜天线	73
2.2.3	螺旋鞭状天线	76
2.2.4	中馈鞭状天线	77
2.2.5	宽频带直立天线	79
2.3	环形天线	82
2.3.1	小环天线	82
2.3.2	电流非均匀分布的大环天线	84
2.3.3	加载圆环天线	89
2.4	引向天线与背射天线	91
2.4.1	引向天线的工作原理	91
2.4.2	引向天线的电特性	96
2.4.3	半波折合振子	99
2.4.4	平衡器—对称天线的馈电	101
2.4.5	环形元引向天线	104
2.4.6	背射(返射)天线概述	105
	习题二	107
第3章	行波天线	108
3.1	行波单导线及菱形天线	108
3.1.1	行波单导线	108
3.1.2	菱形天线	110
3.1.3	行波V形天线(Traveling-Wave Vee Antenna)	114
3.1.4	低架行波天线	115
3.2	螺旋天线	117
3.2.1	圆极化波及其应用	118
3.2.2	螺旋天线的工作原理	118
3.2.3	螺旋天线电参数的估算	120
	习题三	123
第4章	非频变天线	124
4.1	非频变天线的基本概念	124
4.2	平面等角螺旋天线	125
4.2.1	平面等角螺旋天线的结构和工作原理	125
4.2.2	平面等角螺旋天线的电性能	126
4.3	阿基米德螺旋天线	127
4.4	对数周期天线	128
4.4.1	对数周期振子阵天线的结构	128
4.4.2	对数周期振子阵天线的工作原理	129
4.4.3	对数周期振子阵天线的电特性	132
4.4.4	对数周期振子阵天线的实际结构与应用	136
4.4.5	其它形式的对数周期天线	137
	习题四	139

第 5 章 缝隙天线与微带天线	140
5.1 缝隙天线	140
5.1.1 理想缝隙天线	140
5.1.2 缝隙天线	142
5.1.3 缝隙天线阵	145
5.2 微带天线	147
5.2.1 矩形微带天线	148
5.2.2 双频微带天线(Dual-Band Microstrip Antenna)	151
习题五	153
第 6 章 面天线	154
6.1 等效原理与惠更斯元的辐射	154
6.2 平面口径的辐射	156
6.2.1 一般计算公式	156
6.2.2 同相平面口径的辐射	158
6.2.3 同相平面口径方向图参数	161
6.2.4 相位偏移对口径辐射场的影响	162
6.3 喇叭天线	163
6.3.1 矩形喇叭天线的口径场与方向图	164
6.3.2 圆锥喇叭	167
6.3.3 馈源喇叭	168
6.4 旋转抛物面天线	171
6.4.1 几何特性与工作原理	171
6.4.2 抛物面天线的口径场	172
6.4.3 抛物面天线的辐射场	174
6.4.4 抛物面天线的方向系数和增益系数	175
6.4.5 抛物面天线的馈源	177
6.4.6 抛物面天线的偏焦及应用	177
6.5 卡塞格伦天线	177
6.6 喇叭抛物面天线	179
习题六	180
第 7 章 智能天线	182
7.1 智能天线的基本原理	182
7.2 自适应数字波束形成	184
7.3 多波束天线	185
习题七	186
第 8 章 电波传播的基础知识	187
8.1 概述	187
8.1.1 电磁波谱	187
8.1.2 几种主要的电波传播方式	188
8.2 自由空间电波传播	189
8.3 电波传播的非涅尔区	192
习题八	195

第 9 章 地面波传播	196
9.1 地球表面电特性	196
9.2 地面波的传播特性	198
9.2.1 波前倾斜现象	198
9.2.2 地面波传播的场分量	199
9.2.3 地面波传播特性	200
9.3 地面波场强的计算	201
9.4 地面不均匀性对地面波传播的影响	203
习题九	205
第 10 章 天波传播	206
10.1 电离层概况	206
10.1.1 电离层的结构特点	206
10.1.2 电离层的变化规律	208
10.1.3 电离层的等效电参数	211
10.2 无线电波在电离层中的传播	212
10.2.1 反射条件	212
10.2.2 电离层的吸收	215
10.3 短波天波传播	216
10.3.1 传输模式	216
10.3.2 短波天波传播工作频率的选择	217
10.3.3 短波天波传播的几个主要问题	218
10.3.4 传输损耗的估算	222
10.3.5 短波天波传播的特点	224
10.4 中波天波传播的介绍	224
习题十	225
第 11 章 视距传播	227
11.1 地面对视距传播的影响	227
11.1.1 光滑平面地情况	227
11.1.2 光滑球面地情况	232
11.2 对流层大气对视距传播的影响	234
11.2.1 电波在对流层中的折射	234
11.2.2 大气衰减(Attenuation by Atmospheric Gases)	237
习题十一	238
第 12 章 地面移动通信中接收场强的预测	239
12.1 地面移动通信中电波传播的基本特点及其研究方法	239
12.2 Okumura 预测方法	240
12.2.1 场强测试情况和数据处理方法	240
12.2.2 传播路径分类	240
12.2.3 准平坦地形市区场强中值曲线	241
12.2.4 准平坦地形市区相对于自由空间的基本传输损耗中值曲线	244
12.2.5 各种校正因子	244
12.2.6 Hata 公式	250

12.3 GB/T 14617.1-93 预测方法	250
习题十二	252
附录 典型的 MATLAB 程序	253
参考文献	257

绪 论

自从 1873 年麦克斯韦(Maxwell)从理论上预言电磁波的存在,并于 1897 年由马可尼(Marconi)首次获得一个完整的无线电报系统专利以来,伴随着科学技术的不断进步,人类对自然界广泛存在的电磁波这一物质形态的认识在不断深化,创造了多种多样的电磁波工程系统——无线电通信系统。从电视、广播、移动通信,到雷达、导航、气象、定位、卫星,再到军事领域中的制导武器、电子对抗等应用领域,取得了极为丰硕的研究成果。

任何无线电电子系统的信息传输既包含有电波能量的发射和接收,也包含有电磁波在空间的传播过程。天线与电波传播的理论和技术研究作为无线电科学重要组成的分支学科,是具有广泛实用意义与科学意义的应用基础学科和交叉学科,其研究成果将直接影响着电磁波工程系统的整体水平。

天线是任何无线电通信系统都离不开的重要前端器件。尽管设备的任务并不相同,但天线在其中所起的作用基本上是相同的。在图 0-1 所示的通信系统示意图中,天线的任务是将发射机输出的高频电流能量(导波)转换成电磁波辐射出去,或将空间电波信号转换成高频电流能量送给接收机。为了能良好地实现上述目的,要求天线具有一定的方向特性,较高的转换效率,能满足系统正常工作的频带宽度。天线作为无线电系统中不可缺少且非常重要的部件,其本身的质量直接影响着无线电系统的整体性能。

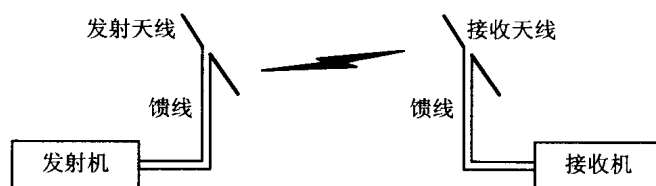


图 0-1 通信系统示意图

无线通信的技术及业务的迅速发展既对天线提出许多新的研究方向,同时也促使了许多新型天线的诞生。例如多频多极化的微带天线,由于其体积小,剖面低,适应了微型和集成电路的进展;电扫描和多波束天线能同时跟踪多目标,适应了现代化军事技术的发展;在通信环境日益复杂的情况下,具有抗干扰能力的自适应天线能大大地提高接收信号的信噪比;尤其是实现第三代移动通信的关键技术——智能天线,更是一改传统天线作为能量转换器的主要功能,能够智能化地进行来波到达角度(DOA)估计以及具有预定空域特征的数字波束形成(DBF),目前智能天线技术已成为移动通信领域的研究热点。

无线电通信系统的多样性使得天线的种类也多种多样。按照用途的不同,可将天线分为通信天线、广播和电视天线、雷达天线、导航和测向天线等;按照工作波长,可将天线分

为长波天线、中波天线、短波天线、超短波天线以及微波天线等；按照天线的特色，可将天线分为圆极化天线、线极化天线、窄频带天线、宽频带天线、非频变天线以及数字波束天线等。为了理论分析的方便，通常将天线按照其结构分成两大类：一类是由导线或金属棒构成的线天线，主要用于长波、短波和超短波；另一类是由金属面或介质面构成的面天线，主要用于微波波段。本书有关天线的章节划分基本上采用后一种分类方法。

天线的理论分析是建立在电磁场理论分析的基础上的，求解天线问题实质上就是求解满足特定边界条件的麦克斯韦方程的解，其求解过程是非常繁琐和复杂的。针对实际的天线工程中的设计，具体采用的思路是既有严格的概念，也有近似的处理，甚至依靠数值分析软件进行计算机辅助设计。

电波传播的主要研究领域是电磁波与传播媒质的相互作用及其在有关电子系统工程和环境探测研究中的应用。电波传播研究的基本问题是不同频段的电波通过各种自然环境（包括某些人为环境）媒质的传播效应及其在时、空、频域中的变化规律。电波传播在很大程度上也是一门实验性科学，需要在长期大量的实测积累和应用实践中不断完善和发展，研究应用的领域和问题也将日益广泛和深入。

在众多的可用于数值计算的应用软件中，MATLAB 以强大的数值计算能力、编程可视化、高级图形处理以及具有涉及各学科专业内容的极为丰富的工具箱，已经成为应用学科计算机辅助分析、设计、仿真等不可缺少的基础软件。由于天线与电波领域中的电磁理论分析复杂且空间概念难以想象的特点，MATLAB 的应用显得更为迫切。MATLAB 的具体应用也将贯穿于全书中，全书的绝大部分图表均用 MATLAB 软件计算而得。为了帮助读者掌握 MATLAB 的应用，附录列出了有关典型程序。

第1章 天线基础知识

1.1 基本振子的辐射

尽管各类天线的结构、特性各有不同，但是分析它们的基础却建立在电、磁基本振子的辐射机理上。电、磁基本振子作为最基本的辐射源，它们的基本性质已在“电磁场”课程中作过介绍。为了本书的系统性，此处再给予简要的回顾。

1.1.1 电基本振子的辐射

电基本振子(Electric Short Dipole)又称电流元，它是指一段理想的高频电流直导线，其长度 l 远小于波长 λ ，其半径 a 远小于 l ，同时振子沿线的电流 I 处处等幅同相。用这样的电流元可以构成实际的更复杂的天线，因而电基本振子的辐射特性是研究更复杂天线辐射特性的基础。

如图 1-1-1 所示，在电磁场理论中，已给出了在球坐标系原点 O 沿 z 轴放置的电基本振子在无限大自由空间中场强的表达式为

$$H_r = 0$$

$$H_\theta = 0$$

$$H_\varphi = \frac{Il}{4\pi} \sin\theta \left(j \frac{k}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-jkr}$$

$$E_r = \frac{Il}{4\pi \omega \epsilon_0} \cos\theta \left(\frac{k}{r^2} - j \frac{1}{r^3} \right) e^{-jkr}$$

$$E_\theta = \frac{Il}{4\pi \omega \epsilon_0} \sin\theta \left(j \frac{k^2}{r} + \frac{k}{r^2} - j \frac{1}{r^3} \right) e^{-jkr}$$

$$E_\varphi = 0$$

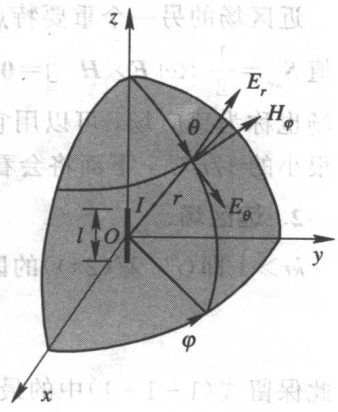


图 1-1-1 电基本振子的坐标

$$(1-1-1)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E} &= E_r \mathbf{e}_r + E_\theta \mathbf{e}_\theta \\ \mathbf{H} &= H_\varphi \mathbf{e}_\varphi \end{aligned} \right\} (1-1-2)$$

式中， \mathbf{E} 为电场强度，单位为 V/m ； \mathbf{H} 为磁场强度，单位为 A/m ；场强的下标 r, θ, φ 表示球坐标系中矢量的各分量； $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\varphi$ 分别为球坐标系中沿 r, θ, φ 增大方向的单位矢量； $\epsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi) (\text{F/m})$ ，为自由空间的介电常数； $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$ ，为自由空间导磁

率; $k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 2\pi/\lambda$, 为自由空间相移常数, λ 为自由空间波长。式中略去了时间因子 $e^{j\omega t}$ 。

由此可见, 电基本振子的场强矢量由三个分量 H_φ , E_r , E_θ 组成, 每个分量都由几项组成, 它们与距离 r 有着复杂的关系。根据距离的远近, 必须分区讨论场量的性质。

1. 近区场

$kr \ll 1$ 即 ($r \ll \lambda/(2\pi)$) 的区域称为近区, 此区域内

$$\frac{1}{kr} \ll \frac{1}{(kr)^2} \ll \frac{1}{(kr)^3}$$

因此忽略式(1-1-1)中的 $1/r$ 项, 并且认为 $e^{-jkr} \approx 1$, 电基本振子的近区场表达式为

$$\left. \begin{aligned} H_\varphi &= \frac{Il}{4\pi r^2} \sin\theta \\ E_r &= -j \frac{Il}{4\pi r^3} \frac{2}{\omega\epsilon_0} \cos\theta \\ E_\theta &= -j \frac{Il}{4\pi r^3} \frac{1}{\omega\epsilon_0} \sin\theta \\ E_\varphi &= H_r = H_\theta = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-3)$$

将上式和静电场中电偶极子产生的电场以及恒定电流产生的磁场作比较, 可以发现, 除了电基本振子的电磁场随时间变化外, 在近区内的场振幅表达式完全相同, 故近区场也称为似稳场或准静态场。

近区场的另一个重要特点是电场和磁场之间存在 $\pi/2$ 的相位差, 于是坡印廷矢量的平均值 $S_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = \mathbf{0}$, 能量在电场和磁场以及场与源之间交换而没有辐射, 所以近区场也称为感应场, 可以用它来计算天线的输入电抗。必须注意, 以上的讨论中我们忽略了很小的 $1/r$ 项, 下面将会看到正是它们构成了电基本振子远区的辐射实功率。

2. 远区场

$kr \gg 1$ 即 ($r \gg \lambda/(2\pi)$) 的区域称为远区, 在此区域内

$$\frac{1}{kr} \gg \frac{1}{(kr)^2} \gg \frac{1}{(kr)^3}$$

因此保留式(1-1-1)中的最大项后, 电基本振子的远区场表达式为

$$\left. \begin{aligned} H_\varphi &= j \frac{Il}{2\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} \\ E_\theta &= j \frac{60\pi Il}{\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} \\ H_r &= H_\theta = E_r = E_\varphi = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-4)$$

由上式可见, 远区场的性质与近区场的性质完全不同, 场强只有两个相位相同的分量 (E_θ , H_φ), 其电力线分布如图 1-1-2 所示, 场矢量如图 1-1-3 所示。

远区场的坡印廷矢量平均值为

$$S_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = \frac{15\pi I^2 l^2}{\lambda^2 r^2} \sin^2\theta \mathbf{e}_r \quad (1-1-5)$$

有能量沿 r 方向向外辐射, 故远区场又称为辐射场。该辐射场有如下性质:

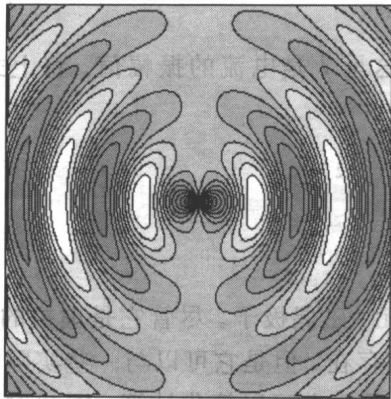


图 1-1-2 电基本振子电力线

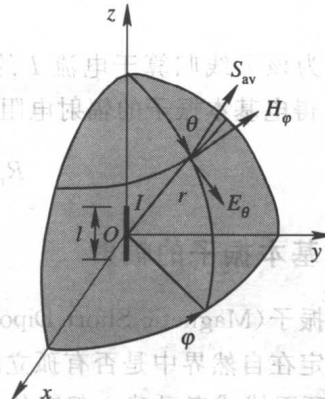


图 1-1-3 电基本振子远区场

(1) E_θ 、 H_ϕ 均与距离 r 成反比，波的传播速度为 $c=1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ ， E_θ 和 H_ϕ 中都含有相位因子 e^{-jkr} ，说明辐射场的等相位面为 r 等于常数的球面，所以称其为球面波。 E 、 H 和 S_{av} 相互垂直，且符合右手螺旋定则。

(2) 传播方向上电磁场的分量为零，故称其为横电磁波，记为 TEM 波。

(3) E_θ 和 H_ϕ 的比值为常数，称为媒质的波阻抗，记为 η 。对于自由空间

$$\eta = \frac{E_\theta}{H_\phi} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \Omega \quad (1-1-6)$$

这一关系说明在讨论天线辐射场时，只要掌握其中一个场量，另一个即可用上式求出。通常总是采用电场强度作为分析的主体。

(4) E_θ 和 H_ϕ 与 $\sin\theta$ 成正比，说明电基本振子的辐射具有方向性，辐射场不是均匀球面波。因此，任何实际的电磁辐射绝不可能具有完全的球对称性，这也是所有辐射场的普遍特性。

电偶极子向自由空间辐射的总功率称为辐射功率 P_r ，它等于坡印廷矢量在任一包围电偶极子的球面上的积分，即

$$\begin{aligned} P_r &= \oiint_S \mathbf{S}_{av} \cdot d\mathbf{s} \\ &= \oiint_S \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot d\mathbf{s} \\ &= \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \frac{15\pi I^2 l^2}{\lambda^2} \sin^3\theta d\theta \\ &= 40\pi^2 I^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \text{ W} \end{aligned} \quad (1-1-7)$$

因此，辐射功率取决于电偶极子的电长度，若几何长度不变，频率越高或波长越短，则辐射功率越大。因为已经假定空间媒质不消耗功率且在空间内无其它场源，所以辐射功率与距离 r 无关。

既然辐射出去的能量不再返回波源，为方便起见，将天线辐射的功率看成被一个等效电阻所吸收的功率，这个等效电阻就称为辐射电阻 R_r 。类似于普通电路，可以得出：

$$P_r = \frac{1}{2} I^2 R_r \quad (1-1-8)$$

其中, R_r 称为该天线归算于电流 I 的辐射电阻, 这里 I 是电流的振幅值。将上式代入式 (1-1-7), 得电基本振子的辐射电阻为

$$R_r = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \Omega \quad (1-1-9)$$

1.1.2 磁基本振子的辐射

磁基本振子 (Magnetic Short Dipole) 又称磁流元、磁偶极子。尽管它是虚拟的, 迄今为止还不能肯定在自然界中是否有孤立的磁荷和磁流存在, 但是它可以与一些实际波源相对应, 例如小环天线或者已建立起来的电场波源, 用此概念可以简化计算, 因此讨论它是必要的。

如图 1-1-4 所示, 设想一段长为 l ($l \ll \lambda$) 的磁流元 $I_m l$ 置于球坐标系原点, 根据电磁对偶性原理, 只需要进行如下变换:

$$\left. \begin{aligned} E_e &\Leftrightarrow H_m \\ H_e &\Leftrightarrow -E_m \\ I_e &\Leftrightarrow I_m, Q_e \Leftrightarrow Q_m \\ \epsilon_0 &\Leftrightarrow \mu_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-10)$$

其中, 下标 e, m 分别对应电源和磁源, 则磁基本振子远区辐射场的表达式为

$$\left. \begin{aligned} E_\phi &= -j \frac{I_m l}{2\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} \\ H_\theta &= j \frac{I_m l}{2\lambda r} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sin\theta e^{-jkr} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-11)$$

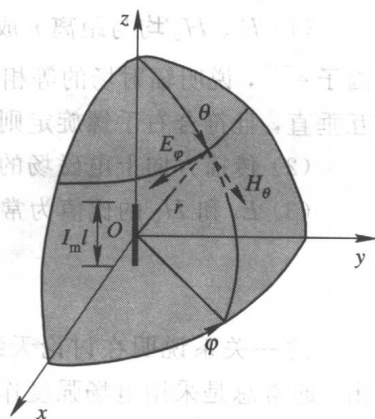


图 1-1-4 磁基本振子的坐标

比较电基本振子的辐射场与磁基本振子的辐射场, 可以得知它们除了辐射场的极化方向相互正交之外, 其它特性完全相同。

磁基本振子的实际模型是小电流环, 如图 1-1-5 所示, 它的周长远小于波长, 而且

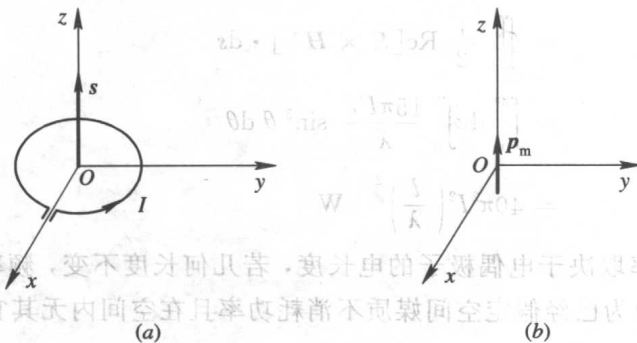


图 1-1-5 小电流环与其等效的磁矩