

刘培国 毛钧杰 编

电波与天线

*Radio Propagation
and Antenna*

国防科技大学出版社

电 波 与 天 线

刘培国 毛钧杰 编

国防科技大学出版社

· 长沙 ·

内 容 简 介

本书包括电波传播和天线两方面的基本内容,全书共分八章。前两章介绍了电波传播的基础知识,介绍了地波传播、天波传播和视距传播这三种主要的电波传播方式。第三至第六章研究了线天线和面天线辐射的基本原理和基本分析方法,第七章介绍了十余种典型常用天线的结构、工作原理与应用。第八章作为扩展内容介绍了移动通信和卫星通信中的电波传播以及天线新技术。

本书可作为信息与通信工程、电子科学与技术这两个一级学科中本科各专业的教材,也可供从事这些专业工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电波与天线/刘培国,毛钧杰编. —长沙:国防科技大学出版社,2004. 10
ISBN 7-81099-135-3

I. 电… II. ①刘…②毛… III. ①电波传播—基本知识②天线—基本知识 IV. ①TN011 ②TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 094665 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073
E-mail:gfkdcbs@public.cs.hn.cn
责任编辑:张 静 责任校对:耿 筠
新华书店总店北京发行所经销
国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:341千
2004年10月第1版第1次印刷 印数:1—3000册
ISBN 7-81099-135-3/TN·12

*

定价:22.00 元

前 言

根据教育部新编制的本科专业目录,许多高等学校都将原有的本科专业进行了调整与合并,并相应调整了培养方案和课程设置,使专业口径面更加宽广。据此,我们在多年本科教学实践的基础上,深入研究了信息与通信工程、电子科学与技术这两个一级学科中本科各专业的内涵,编写了《电波与天线》一书,作为信息与通信工程、电子科学与技术这两个一级学科中各专业的本科生教材。各专业可根据自身的特点对教材中的内容作适当取舍,教学时数以40~60学时为宜。

本书的主要内容是电波传播的基础知识和电波传播的方式,天线辐射和接收的基本原理,线天线和面天线的基本分析方法,典型常用天线的工作原理和基本特性。针对移动通信、卫星通信的电波传播和天线新技术的发展,本书还增加了移动通信、卫星通信中的电波传播和天线新技术的内容。在编写过程中作者力求突出基本原理、基本分析方法和应用。

全书共分八章。第一章电波传播的基础知识,介绍了自由空间的电波传播、媒质对电波传播的影响、粗糙表面的散射等问题。第二章电波传播的方式,研究了地波传播、天波传播和视距传播这三种主要的电波传播方式。第三章基本辐射原理和基本辐射元,介绍了由天线上的电流、电荷求空间电磁场分布的矢量位法和叠加原理,重点研究了基本电振子、基本磁振子和基本组合振子的辐射,同时也介绍了对分析天线辐射有用的对偶性原理、镜像原理和等效原理。第四章对称振子、天线电参数与接收天线,用矢量位法和叠加原理重点分析了对称振子天线的辐射,并由此出发介绍了天线的电参数和接收天线。第五章阵列天线分析,重点分析了二元阵、均匀直线阵和方向图相乘定理,介绍了电扫天线、频扫天线和连续元直线阵。第六章面天线分析,研究了惠更斯元和惠更斯原理,以此为基础研究了口径场绕射公式,从口径场绕射公式出发,讨论了矩形口径和圆形口径的辐射,讨论了口径场相位分布对平面口径辐射的影响。第七章典型天线分析,介绍了工程上用

得较多的振子天线、引向天线、背射天线、等角螺旋天线、对数周期天线、微带天线、喇叭天线、旋转抛物面天线、卡塞格伦天线、单脉冲天线和合成孔径天线的结构、工作原理及应用。第八章为选修内容,主要介绍了移动通信、卫星通信中的电波传播以及天线新技术,包括陆地移动通信和卫星通信中的电波传播、移动通信中的智能天线、超宽带天线技术。

本书各章均由刘培国执笔,毛钧杰统编全稿。在编写过程中,刘克成、宋学诚教授和刘继斌讲师对本书的编写给予了大力支持和帮助,唐朝京教授和电磁场与微波技术教研室的各位老师也对本书的编写给予了支持和鼓励,在此对所有支持、帮助本书编写工作的同志们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

2004年8月

于国防科技大学

目 录

第一章 电波传播的基础知识

§ 1.1 概述	(1)
§ 1.1.1 电磁波谱	(1)
§ 1.1.2 电波传播方式	(2)
§ 1.1.3 无线电信道及其传播效应	(3)
§ 1.2 自由空间电波传播	(5)
§ 1.3 媒质对电波传播的影响	(6)
§ 1.3.1 传输损耗	(6)
§ 1.3.2 衰 落	(7)
§ 1.3.3 传输失真	(8)
§ 1.3.4 电波的折射、反射与绕射现象	(9)
§ 1.4 粗糙表面的散射与瞬态电磁波传播	(9)
§ 1.4.1 粗糙表面的散射	(9)
§ 1.4.2 瞬态电磁波特性及传播	(11)
§ 1.5 干扰与噪声	(14)
§ 1.5.1 电磁噪声的分类及表述方法	(14)
§ 1.5.2 无线电背景噪声特性	(16)

第二章 电波传播方式

§ 2.1 地波传播	(18)
§ 2.1.1 地球表面的电特性	(18)
§ 2.1.2 地波传播特性	(20)
§ 2.1.3 地波绕射场	(21)
§ 2.1.4 不均匀不平坦地面的地波传播	(22)
§ 2.1.5 向地下或海水的渗透传播	(26)
§ 2.2 天波传播	(27)
§ 2.2.1 电离层	(27)
§ 2.2.2 短波天波传播	(30)
§ 2.2.3 最高和最低可用频率	(35)
§ 2.2.4 天波传输特性	(36)
§ 2.2.5 短波传播的基本特点	(42)
§ 2.3 视距传播	(43)
§ 2.3.1 自由空间电波传播的费涅耳区	(43)

§ 2.3.2	地面对电波传播的影响	(46)
§ 2.3.3	低空大气层对电波传播的影响	(53)

第三章 基本辐射原理和基本辐射元

§ 3.1	天线及天线方向图	(63)
§ 3.1.1	天线的作用	(63)
§ 3.1.2	天线的方向性	(63)
§ 3.1.3	天线的分类	(65)
§ 3.1.4	天线的分析方法	(65)
§ 3.2	矢量位法和叠加原理	(66)
§ 3.2.1	矢量位法	(66)
§ 3.2.2	叠加原理	(69)
§ 3.3	基本电振子	(69)
§ 3.3.1	基本电振子的空间场	(69)
§ 3.3.2	基本电振子的远区辐射场特性	(71)
§ 3.3.3	其他放置形式的基本电振子的远区辐射场	(73)
§ 3.4	对偶性原理与基本磁振子	(73)
§ 3.4.1	对偶性原理	(73)
§ 3.4.2	基本磁振子的场解	(74)
§ 3.4.3	基本磁振子的物理模型	(75)
§ 3.5	基本振子的组合——单向辐射元和基本圆极化天线	(76)
§ 3.5.1	单向辐射元	(76)
§ 3.5.2	基本圆极化天线	(77)
§ 3.6	镜像原理和等效原理	(80)
§ 3.6.1	镜像原理	(80)
§ 3.6.2	等效原理	(81)

第四章 对称振子、天线电参数与接收天线

§ 4.1	对称振子的电流分布与辐射场	(84)
§ 4.1.1	对称振子的电流分布	(84)
§ 4.1.2	对称振子的辐射场	(85)
§ 4.1.3	对称振子的方向图	(86)
§ 4.1.4	对称振子的辐射电阻	(88)
§ 4.2	天线电参数	(89)
§ 4.2.1	有效长度	(89)
§ 4.2.2	线天线辐射场的统一表达式	(90)
§ 4.2.3	方向性系数	(90)
§ 4.2.4	天线效率	(91)
§ 4.2.5	增益	(92)

§ 4.2.6	天线的极化和带宽	(92)
§ 4.3	接收天线	(93)
§ 4.3.1	接收天线的电参数	(94)
§ 4.3.2	接收天线的噪声	(96)
§ 4.4	弗利斯(Friis)传输公式	(97)
§ 4.4.1	弗利斯(Friis)传输公式	(97)
§ 4.4.2	天线增益测量	(98)
§ 4.4.3	雷达目标散射截面和雷达方程	(100)

第五章 阵列天线分析

§ 5.1	二元阵和方向图相乘定理	(102)
§ 5.1.1	二元阵的辐射场	(103)
§ 5.1.2	方向图相乘定理	(103)
§ 5.1.3	地面对天线方向性的影响	(104)
§ 5.1.4	有源反射器和引向器	(106)
§ 5.2	均匀直线阵	(107)
§ 5.2.1	均匀直线阵的辐射	(107)
§ 5.2.2	侧射阵(垂射阵、边射阵)	(108)
§ 5.2.3	端射阵(顶射阵)	(110)
§ 5.2.4	斜射阵	(111)
§ 5.2.5	可见区与非可见区,栅瓣及其抑制	(111)
§ 5.3	电扫天线——相控阵和频率扫描阵	(113)
§ 5.3.1	波束扫描的分类	(113)
§ 5.3.2	相控阵天线	(114)
§ 5.3.3	频率扫描天线	(118)
§ 5.4	连续元直线阵	(119)
§ 5.5	超阵	(121)

第六章 面天线分析

§ 6.1	惠更斯元和惠更斯原理	(123)
§ 6.1.1	惠更斯元	(123)
§ 6.1.2	惠更斯原理	(123)
§ 6.2	口径场绕射公式与天线的场区划分	(124)
§ 6.2.1	口径场绕射公式	(124)
§ 6.2.2	天线的场区划分	(125)
§ 6.3	面天线的方向性系数和有效面积	(128)
§ 6.4	矩形口径辐射	(130)
§ 6.4.1	矩形平面口径辐射场的一般讨论	(130)
§ 6.4.2	矩形口径同相场的辐射	(131)
§ 6.5	圆形口径的辐射	(133)

§ 6.6	相位分布对平面口径辐射的影响	(134)
§ 6.6.1	线性相位偏移	(135)
§ 6.6.2	平方律相位偏移	(136)
§ 6.6.3	立方律相位偏移	(137)
§ 6.7	平面口径辐射规律的综合讨论	(138)
§ 6.7.1	典型口径辐射的一般规律	(138)
§ 6.7.2	非对称幅度分布口径场的辐射特性	(139)
§ 6.7.3	面天线与离散元天线阵的比较	(139)
第七章 典型天线分析		
§ 7.1	振子天线	(141)
§ 7.1.1	垂直接地振子	(141)
§ 7.1.2	折合振子	(143)
§ 7.2	引向天线与背射天线	(144)
§ 7.2.1	引向天线	(144)
§ 7.2.2	背射天线	(146)
§ 7.3	等角螺旋天线	(148)
§ 7.3.1	平面等角螺旋天线	(149)
§ 7.3.2	圆锥等角螺旋天线	(150)
§ 7.3.3	阿基米德螺旋天线	(150)
§ 7.4	对数周期天线	(151)
§ 7.5	微带天线	(155)
§ 7.5.1	微带天线的辐射机理	(155)
§ 7.5.2	微带天线的分析方法	(156)
§ 7.5.3	微带天线阵	(158)
§ 7.6	喇叭天线	(160)
§ 7.6.1	矩形角锥喇叭的口径场和方向性	(160)
§ 7.6.2	最佳尺寸喇叭	(161)
§ 7.6.3	其他形式的喇叭	(164)
§ 7.7	旋转抛物面天线	(164)
§ 7.7.1	旋转抛物面天线的口径场	(165)
§ 7.7.2	旋转抛物面天线的方向性	(166)
§ 7.7.3	抛物面天线的馈源	(169)
§ 7.7.4	影响抛物面天线辐射的因素	(170)
§ 7.7.5	抛物面反射场对馈源的影响	(171)
§ 7.7.6	抛物面馈源偏焦	(172)
§ 7.8	卡塞格伦天线	(173)
§ 7.8.1	卡塞格伦天线的特点和几何参量	(173)
§ 7.8.2	卡塞格伦天线的等效抛物面	(174)
§ 7.8.3	口径遮挡	(175)
§ 7.9	单脉冲天线	(176)

§ 7.9.1	单脉冲天线的主要类型	(176)
§ 7.9.2	单脉冲跟踪原理	(177)
§ 7.9.3	单脉冲天线的电参数	(178)
§ 7.9.4	单脉冲天线的和差矛盾	(179)
§ 7.10	合成孔径天线	(180)
§ 7.10.1	不聚焦合成孔径天线	(181)
§ 7.10.2	聚焦合成孔径天线	(182)

第八章 移动通信、卫星通信中的电波传播以及天线新技术

§ 8.1	陆地移动通信中的电波传播	(183)
§ 8.1.1	陆地移动通信电波传播特点	(183)
§ 8.1.2	幂定律传播机制	(185)
§ 8.1.3	阴影遮挡	(188)
§ 8.1.4	多径衰落	(189)
§ 8.2	卫星通信中的电波传播	(192)
§ 8.2.1	卫星链路中的路径损耗	(192)
§ 8.2.2	降雨损耗	(193)
§ 8.2.3	树木遮挡损耗	(193)
§ 8.2.4	大气影响	(194)
§ 8.2.5	电离层闪烁	(194)
§ 8.2.6	法拉第旋转	(196)
§ 8.2.7	多普勒频移	(197)
§ 8.3	移动通信中的智能天线技术	(197)
§ 8.3.1	智能天线优点和应用	(198)
§ 8.3.2	智能天线技术	(200)
§ 8.3.3	波束转换天线	(201)
§ 8.3.4	自适应天线	(204)
§ 8.3.5	宽带智能天线	(206)
§ 8.4	超宽带天线技术	(208)
§ 8.4.1	超宽带天线的技术要求	(208)
§ 8.4.2	超宽带天线的性能描述	(209)
§ 8.4.3	超宽带天线类型及特性	(212)
§ 8.4.4	超宽带平面 TEM 喇叭天线	(214)

习 题	(217)
-----	-------

电波传播部分	(217)
--------	-------

天线部分	(219)
------	-------

参考文献	(225)
------	-------

第一章 电波传播的基础知识

§ 1.1 概 述

从几十赫兹到上千吉赫兹(10^9 Hz)频谱范围内的电磁波称为无线电波。无线电波在媒质中的传播过程就称为无线电波传播。由于电磁波可以携带能量和信息,所以在激励源或散射源的作用下,电磁波可以将能量和信息从一个地方传送到另一个地方。当今社会,人们广泛应用各种通信、广播、雷达和遥感等电子系统进行信息传递和科学研究。

§ 1.1.1 电磁波谱

人类正在观测和利用的电磁波,频率从低至千分之几赫兹(地磁脉动)到高达 10^{30} 赫兹(宇宙射线),相应的波长从 10^{11} m 到 10^{-20} m(小于电子半径: 10^{-11} m)。通常所指的无线电波谱范围则比这小得多。表 1.1 给出了常用的无线电波谱各波段的波长和频率范围。

表 1.1 无线电波谱

波段号	频段	波段	频率	波长
1	极低频(ELF)	极长波	<30 Hz	$>10^4$ km
2	超低频(SLF)	超长波	(30~300)Hz	($10^4 \sim 10^3$)km
3	特低频(ULF)	特长波	(300~3000)Hz	($10^3 \sim 10^2$)km
4	甚低频(VLF)	甚长波	(3~30)kHz	($10^2 \sim 10$)km
5	低频(LF)	长波	(30~300)kHz	($10^4 \sim 10^3$)m
6	中频(MF)	中波	(0.3~3)MHz	($10^3 \sim 10^2$)m
7	高频(HF)	短波	(3~30)MHz	($10^2 \sim 10$)m
8	甚高频(VHF)	超短波	(30~300)MHz	(10~1)m
9	特高频(UHF)	分米波	(0.3~3)GHz	(1~0.1)m
10	超高频(SHF)	厘米波	(3~30)GHz	(10~1)cm
11	极高频(EHF)	毫米波	(30~300)GHz	(10~1)mm
12	超极高频	亚毫米波	(300~3000)GHz	(1~0.1)mm

无线电波谱中,应用较多的是微波波段,表 1.2 给出了微波各波段的波长和频率范围。微波的主要特点是:波长短,与电路尺寸可比拟;频率高、频带宽、信息容量大;能穿透

电离层。

表 1.2 微波频段

波段符号	频率(GHz)
UHF	0.3~1
L	1~2
S	2~4
C	4~8
X	8~12
Ku	12~18
K	18~26
Ka	26~40

§ 1.1.2 电波传播方式

不同频段的电波在媒质中传播的物理过程不一样,电波传播方式分为:

1. 地波传播

无线电波沿着地球表面的传播称为地波传播。主要用于低频及甚低频远距离无线电导航、标准频率和时间信号的传播及对潜通信等业务。其主要的传播特点是:传输损耗小,作用距离远;受电离层扰动影响小,传播稳定;有较强的穿透海水及土壤的能力;大气噪声电平高,工作频带窄。

2. 对流层电波传播

无线电波在低空大气层——对流层中的传播就称为对流层电波传播。按传播机制,又可分为:

(1) 视距传播

当收、发天线架设高度较高(远大于波长),电波直接从发射天线传播至接收点(有时有反射波到达),称为视距传播,亦称为直射波传播。主要用于微波中继通信、甚高频和超高频广播、电视、雷达等业务。主要传播特点是:传播距离限于视线距离以内,一般为(10~50)km;频率愈高,受地形地物影响愈大;微波衰落现象严重;10GHz以上电波的大气吸收及雨衰减严重。

(2) 散射传播

利用对流层中介质的不均匀性对电波的散射作用,实现超视距传播,常用频段为200MHz~5GHz。由于散射波相当微弱,传输损耗大,需使用大功率发射机、高灵敏度接收机及高增益天线等设备。单跳跨距可达(300~800)km,特别适用于无法建立微波中继站的地区,例如海岛之间或需跨越湖泊、沙漠、雪山等地区。

3. 电离层电波传播

无线电波经电离层反射或散射后到达接收点的一种传播方式。依照传播机制又可分为:

(1) 电离层反射传播

主要用于中、短波远距离广播、通信,船岸间航海移动通信,飞机地面间航空移动通信等业务。其传播特点是:传播损耗小,能以较小功率进行远距离传播;衰落现象严重;短波传播受电离层扰动影响大。

(2) 电离层散射传播

利用电离层中电子浓度不均匀性(通常发生在离地面高度(90~110)km处)对电波的散射作用完成远距离通信。常用的频段为(35~70)MHz。其主要传播特点是:传输损耗大;允许传输频带窄,一般为(3~5)kHz;衰落现象明显。单跳跨距可达(1000~2000)km。当电离层受到骚扰时,仍可保持通信。

(3) 流星电离余迹反(散)射传播

利用发生在(80~120)km处流星电离余迹对电波的反(散)射作用,可实现2000km以内的远距离传播。常用频段为(30~70)MHz。由于流星电离余迹持续时间短,但出现频繁,可利用它建立瞬间通信,在军事上应用较多。

4. 地—电离层波导传播

电波在以地球表面及电离层下缘为界的地壳形空间内传播,主要应用于低频、甚低频远距离通信及标准频率和时间信号的传播。其主要传播特点是:传输损耗小,受电离层扰动影响小,传播相位稳定,有良好的可预测性,大气噪声电平高,工作频带窄。

5. 外大气层及行星际空间电波传播

电波传播的空间主要是在外大气层或行星际间,并且是以宇宙飞船、人造地球卫星或星体为对象,在地—空或空—空之间传播。目前主要用于卫星通信、宇宙通信及无线电探测、遥控等业务中。其传播的主要特点是:距离远,自由空间传输衰减大;在地—空信道中要受对流层、电离层、地球磁场以及来自宇宙空间的各种辐射波和高速离子的影响,例如10GHz以上电波的大气吸收和降雨衰减很严重。

以上介绍的几种主要的电波传播方式,实际工作中往往取其一种作为主要的电波传播途径,在某些条件下可能几种传播途径并存,例如中波广播业务,某些地区既可收到经电离层反射的天波信号,同时又可收到沿地表传播的地波信号。通常根据不同频段电波传播的特点,利用天线的方向性来限定一种主要的传播方式。

在利用电波传递信息,完成无线电通信、广播电视、导航、遥控、遥测、雷达等业务中,掌握电波传播的特点及其规律的同时,进行必要的传输特性的估算(传输损耗、干扰信号及噪声电平、衰落、时延、交叉极化特性等),是研究各种无线电信道特性和正确论证、设计、组织使用各种无线电系统的重要依据。

§ 1.1.3 无线电信道及其传播效应

电波传播特性同时取决于媒质结构特性和电波特征参量。一定频率和极化的电波与特定媒质条件相匹配,将具有某种占优势的传播信道和传播模式。媒质的时空特性是电波传播特性时空变化的根源。在各种信道中,媒质复折射指数(包括介电常数,磁导率与电导率)的空间分布和时间变化及边界状态,是传播特性的决定性因素。

从电波传播特性出发,并考虑到系统技术问题,将各频段的信道模式与典型应用简述

如表 1.3。

表 1.3 各频段的主要信道模式和典型应用及有关传播效应

频段	信道模式	典型应用	传播特性
极低频 ELF	地下与海水传播;地—电离层波导、地—电离层谐振;沿地磁力线的哨声传播。	对潜通信,地下通信;极稳定的全球通信;地下遥感,电离层与磁层研究。	在 3kHz 左右频段为 TM 波导模的截止频段,不利于远距离传播,而 TE 模激励效率低。
超低频 SLF 特低频 ULF	地下与海水传播;地—电离层谐振;沿地磁力线的哨声传播。	地质结构探测;电离层与磁层研究;对潜通信;地震电磁辐射前兆检测。	传播主区大,难以获得高的检测精度。
甚低频 VLF	地下与海水传播;地—电离层波导;沿地磁力线的哨声传播。	Omega(美)、α(俄)超远程及水下相位差导航系统,全球电报通信及对潜指挥通信,时间频率标准传递,地质探测。	10kHz 电波在海水中的衰减约为 3dB/m,大深度通信导航受限;远程传播只适于垂直极化波;中近距离存在多模干涉。
低频 LF	地表面波;天波;地—电离层波导。	Loran—C(美)及我国长河二号远程脉冲相位差导航系统;时频标准传递;远程通信广播。	采用载频为 100kHz 的脉冲可区分天地波,高精度导航主要使用稳定性好的地波,陆地 1000km,海上 2000km 以内。
中频 MF	地表面波;天波。	广播,通信,导航。	近距离和较低频率主要为地波;远距离和较高频率为天波,夜间天波较强,甚至在较近距离可能成为地波的干扰。
高频 HF	地表面波;天波;电离层波导传播;散射波。	远距离通信广播,超视距天波及地波雷达,超视距地一空通信。	主要天波传播,近距离上用地波。最高可用频率随太阳黑子周期、季节、昼夜及纬度变化。
甚高频 VHF	直接波、地面和对流层的反射波;对流层折射及超折射波导;散射波。	语音广播,移动通信,接力通信,航空导航信标。	对流层、电离层的不均匀性导致多径效应和超视距异常传播,地空路径的法拉第效应与电离层的闪烁效应。地面反射引起多径及山地遮蔽效应。
分米波 UHF	直接波、地面和对流层的反射波;对流层折射及超折射波导;散射波。	电视广播,飞机导航,警戒雷达;卫星导航;卫星跟踪、数传及指令网,蜂窝无线电。	大气折射效应,山地遮蔽与建筑物聚焦效应,超折射波导引起异常传播。
厘米波 SHF	直接波、地面和对流层的反射波;对流层折射及超折射波导;散射波。	多路语音与电视信道,雷达,卫星遥感,固定及移动卫星信道。	雨雪吸收、散射及折射指数起伏导致的闪烁。建筑物的散射与反射及绕射传播。山地遮蔽。
毫米波 EHF	直接波。	短路径通信,雷达,卫星遥感。	雨雪衰减和散射严重,云雾尘埃、大气吸收,折射起伏引起闪烁以及建筑物等的遮蔽。
亚毫米波	直接波。	短路径通信。	大气及雨雪、烟雾、尘埃等吸收严重;大树及数米高的物体产生遮蔽效应。

§ 1.2 自由空间电波传播

所谓自由空间,严格来说应指真空,实际上不可能满足此条件。通常是指充满均匀、无耗媒质的无限大空间,且该空间媒质具有各向同性、电导率 $\sigma=0$ 、相对介电常数 $\epsilon_r=1$ 及相对磁导率 $\mu_r=1$ 的特点。因此自由空间是一种理想情况。为了提供一种传播方式的比较标准和简化电波传输损耗的计算,下面引出自由空间传播的概念。

设天线置于自由空间,在其最大辐射方向上距离为 d 的接收点处产生的场强振幅为

$$|E_0| = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} \text{ (V/m)} \quad (1-1)$$

式中 P_t 为发射天线输入功率(W), G_t 为发射天线增益, d 为距离(m)。为便于实用,写成

$$|E_0| = \frac{245\sqrt{P_t(\text{kW})G_t}}{d(\text{km})} \text{ (mV/m)} \quad (1-2)$$

有时,还需要计算接收天线的输出功率。由接收天线的理论可知,当接收天线与来波极化匹配并与负载阻抗匹配时,其接收功率为

$$P_r = SA_r = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 P_t G_t G_r \text{ (W)} \quad (1-3)$$

式中 S 为坡印廷矢量模值(W/m^2), A_r 为接收天线的有效面积(m^2), P_t 为发射天线的输入功率(W), G_t 、 G_r 分别是发射天线和接收天线的增益, λ 为自由空间内电磁波的波长(m)。

在实际工作中,例如设计一条通信电路,为了对发射机功率、天线增益、接收机灵敏度等诸项技术指标提出合理要求,一般要进行信道计算,其中重要内容之一就是计算信道的传输损耗——用以度量电波在传输过程中信号电平衰减的程度。就自由空间而言,电波的衰减情况可用“自由空间传输损耗” L_{bf} 来表示。设自由空间内相距为 d 的两个理想点源天线($G=1$)作收发天线,若发射天线的输入功率为 P_t 、接收天线的输出功率为 P_r , L_{bf} 定义为

$$L_{bf} = \frac{P_t}{P_r} (G_t = G_r = 1) \quad (1-4)$$

将式(1-3)代入上式,得

$$L_{bf} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (1-5)$$

若以分贝(dB)表示,则有

$$L_{bf} = 10\lg \frac{P_t}{P_r} = 20\lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \text{ (dB)} \quad (1-6)$$

或

$$L_{bf} = 32.45 + 20\lg f(\text{MHz}) + 20\lg d(\text{km}) \text{ (dB)} \quad (1-7)$$

由于自由空间是个理想介质,不吸收电磁能量,显然自由空间的传输损耗是球面波在传播过程中随传播距离的增大能量的自然扩散而引起的损耗,它反映了球面波的扩散损耗。从式(1-7)可见,当电波频率提高一倍或传播距离增加一倍时,自由空间传输损耗增

加 6dB。

§ 1.3 媒质对电波传播的影响

实际上电波是在各种空间场所(如沿地表或在低空大气层、电离层)内传播的,实际环境总是涉及各种各样的媒质,在一般情况下,电波传播的过程就是电磁波与媒质相互作用的物理过程。在电磁波的作用下,媒质中产生极化、磁化及传导等各种电磁效应,这些效应反过来又对传播中的电磁波施加各种影响。在传播过程中,媒质吸收电磁能量使信号衰减,媒质的不均匀性、地貌地物的影响、多径传输等都会使信号畸变、衰落或电波传播方向改变等。总之,电波传播特性既与媒质特性参数(介电常数,磁导率和电导率及其时空变化)有关,又与电波特征参数(最主要的是频率和极化)有关,后者可使同样的媒质表现出极不相同的特性和边界条件。在实际媒质中的电波传播问题主要涉及以下三个方面:

- 媒质的电磁性质、空间结构与边界特性以及时空变化

各种媒质的特性差异很大,其中包括损耗、色散、各向异性和非线性,不均匀的空间变化以及非平稳的随机时间变化过程等复杂现象,是电波传播的时、空、频域效应的根源。

- 电波传播的物理机制与传播模式

电磁波在各种特性媒质中的传播可能涉及吸收、折射、反射、散射、绕射、导引和谐振以及多径干涉和多普勒频移效应等一系列物理过程。这些过程既取决于媒质的特性,也与波的特性密切相关。同一媒质对于不同频段的电磁波,可表现出极不相同的特性,如电离层对低于 30MHz 的电波产生强烈的反射,而对甚高频段以上电波则是透明的;对于甚高频段为粗糙边界的实际地面,对甚低频段则可能被视为平滑的球面等等。电波传播的状况,取决于电波特性参数与媒质特性及边界条件的匹配,在特定条件下可能出现一些传播特性较好的波型,即所谓占优势的传播模式。

- 信号的媒质效应和传播特性

电磁信号在各种媒质传播的过程中,可能遭受衰减、衰落、极化偏移和时、频域畸变等效应,并因此而具有复杂的时空频域变化特性。这些媒质效应对信息传输的质量和可靠性常常产生严重的影响;但在有些情况下,媒质效应也被用以作为信息传输的支撑,比如电离层反射和对流层散射,相应地构成了短波和超短波超视距通信的基础。

各频段不同特性的电磁信号在各种媒质和各种边界条件下的传播模式和传播特性,是电波传播在工程应用中的基本问题;同时,电波在不同媒质中传播,必将携带有关媒质特性的信息,这是对环境进行电磁波探测的基础。因此,电波传播研究的主要对象是各种媒质中各频段电磁波的传播效应。

§ 1.3.1 传输损耗

电波在有耗媒质中传播时接收点的场强小于它在自由空间传播时的场强。设实际情况下接收点场强 E 表示为

$$|E| = |E_0| A = \frac{\sqrt{60P_t(W)G_t}}{d(m)} A(V/m) \quad (1-8)$$

式中 $A = |E|/|E_0|$, 称为衰减因子, 它与工作频率、传播距离、媒质电参数、地貌地物、传播方式等因素有关。相应的坡印廷矢量模值和接收功率分别为

$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} A^2 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1-9)$$

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 A^2 G_r P_t \text{ (W)} \quad (1-10)$$

对于某一传输电路, 发射天线输入功率与接收天线(满足匹配条件)输出功率之比, 定义为该电路的传输损耗 L , 即

$$L = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \cdot \frac{1}{A^2 G_r G_t} \quad (1-11a)$$

若用 dB 表示, 则为

$$L = 20\lg\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) - A(\text{dB}) - G_t(\text{dB}) - G_r(\text{dB}) \quad (1-11b)$$

式中

$$A(\text{dB}) = 10\lg A^2 = 20\lg \frac{|E|}{|E_0|}$$

由于 $0 < A < 1$, 因此 $A(\text{dB})$ 是一负值, 它反映了媒质对电波能量的吸收, 因而使电路的传输损耗增加。

注意, 若式(1-11b)中舍去设备因素的影响, 令

$$G_t = G_r = 0\text{dB}$$

即仅考虑第一、二项, 则有

$$L_b = 20\lg\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) - A(\text{dB}) = L_{bf} - A(\text{dB}) \quad (1-12)$$

显然 L_b 描述的仅是信道(即传输媒质)中功率的传输情况, 故称为“路径传输损耗”或“基本传输损耗”。由于衰减因子 A 随不同的传播方式、不同的传播情况而异, 因此 A 的计算将结合各种传播方式, 在以下各有关章节分别介绍。

§ 1.3.2 衰 落

衰落, 一般是指信号电平随时间而随机起伏的现象。信号电平有在几秒或几分钟内快速的变化, 也有在几十分钟或几小时以至几天、几个月内的缓慢变化。根据引起衰落的原因分类, 可分为吸收型衰落和干涉型衰落。

吸收型衰落主要是由传输媒质电参数的变化, 使得信号衰减发生相应的改变而引起的。例如电离层的电子浓度有明显的日变化、月变化、年变化等, 使得电离层的等效电参数也发生改变, 经电离层反射的信号电平亦相应起伏变化。由于媒质的变化是随机的、缓慢的, 因此由这种机理形成信号电平的变化也是缓慢的, 故吸收型衰落是慢衰落。

干涉型衰落是由随机的多径传输引起的。接收点场强是不同传输路径上场的叠加, 只要各路径的相对时延稍有变化, 合成信号电平就会有明显的快速起伏, 表现出快衰落的特征, 故干涉型衰落又称为多径衰落。

事实上, 信号的快衰落与慢衰落兼而有之, 快衰落往往叠加在慢衰落之上, 只不过在