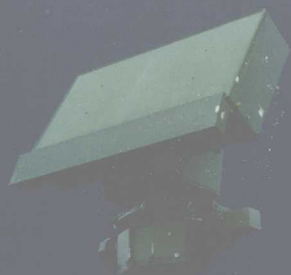


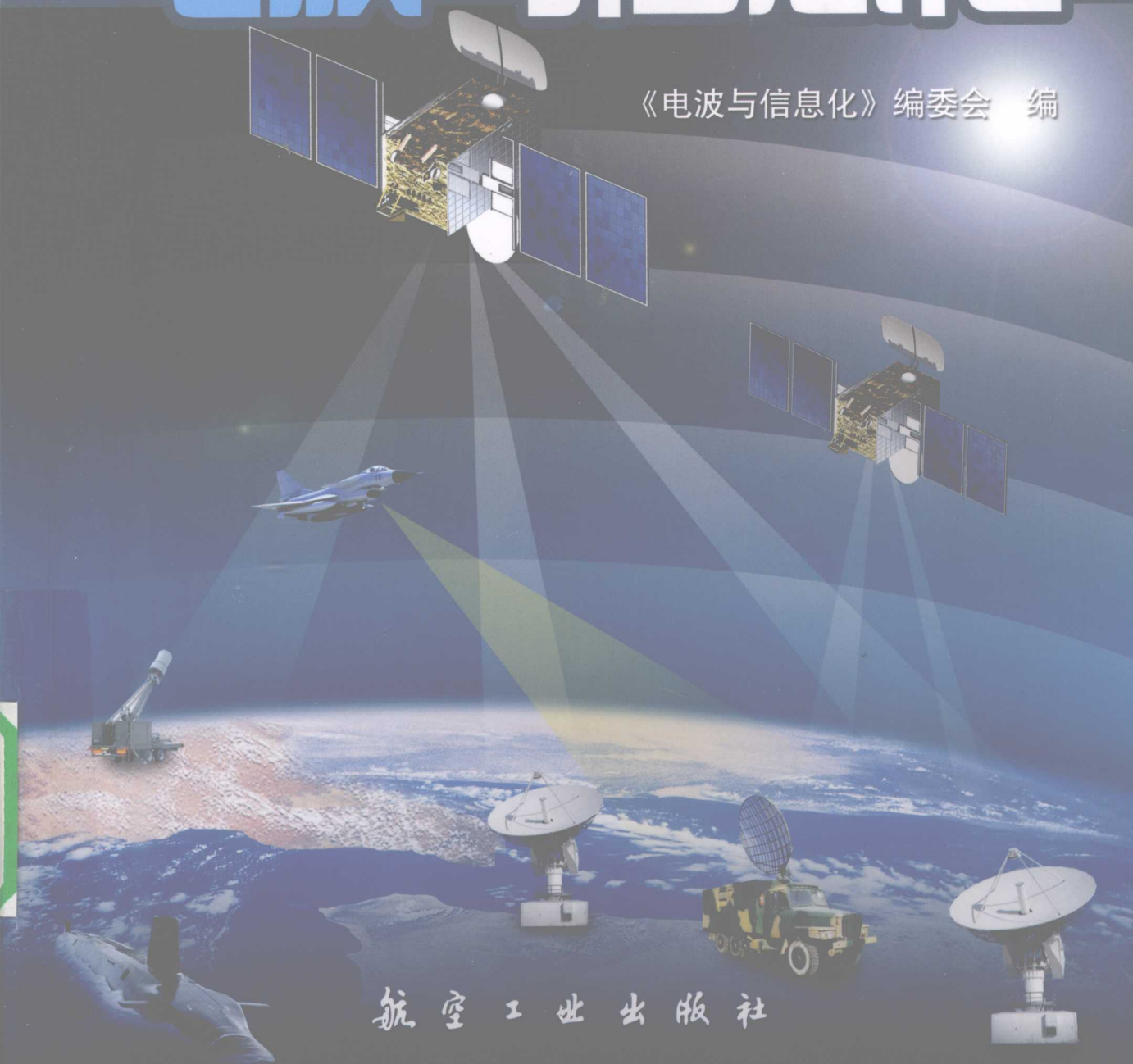
现代武器
知识丛书
MODERN WEAPONS

本书是一本介绍电波传播知识的科普读物。它集知识性的文字和图表于一体，生动描述了电波在各种环境媒质中是如何传播和作用的。它如何给人们的日常工作和生活带来方便，又创造了怎样的奇迹。本书可供无线电、电波传播、信息技术爱好者及相关专业的管理人员、大专院校师生阅读。



电波与信息化

《电波与信息化》编委会 编



航空工业出版社

现代武器知识丛书

电波与信息化

《电波与信息化》编委会 编

主 编 董庆生

副主编 原 普

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书是一本介绍电波传播知识的科普读物,它集知识性的文字和图表于一体,生动描述了电波在各种环境媒质中是如何传播和作用的,它如何给人们的日常工作和生活带来方便,又创造了怎样的奇迹。全书共分七个章节,其中,第一~第三章、第五章、第六章介绍了无线电波的基本概念和电波传播在地(海)下一地(海)面—低层大气—平流层—电离层—太空传播的特性;各种传播效应模式及在各领域中的应用。第四章介绍了频谱管理技术和系统的应用、发展。第七章介绍了天线的基础知识和常用的几种天线系统。

本书可供无线电、电波传播、信息技术爱好者及相关专业的管理人员,大专院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电波与信息化/《电波与信息化》编委会编. —北京:
航空工业出版社, 2009. 5

(现代武器知识丛书)

ISBN 978 - 7 - 80243 - 248 - 2

I. 电… II. 电… III. 电波传播—基本知识 IV. TN011

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 030516 号

电波与信息化

Dianbo yu Xinxihua

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京凯达印务有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2009 年 5 月第 1 版

2009 年 5 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 14.375

字数: 356 千字

印数: 1—5000

定价: 50.00 元

《电波与信息化》编委会

主 任 董庆生

副主任 原 普 吴 健 刘小国

委 员 赵振维 李清亮 甄为民 王先义 刘新年 邓素云

主 编 董庆生

副主编 原 普

撰 稿 (按姓氏笔画为序)

王春和 王晓宾 卢昌胜 冯 健 刘 昆 刘 钝

刘玉梅 许正文 孙 方 何绍林 张 蕊 张玉生

张红波 陈丹俊 陈林如 陈金松 林乐科 赵远山

曹 冲 黄昌理 焦培南 潘威炎

总编辑 邓素云

前 言

电波科学是一个古老而又年轻的基础学科，说它古老，是因为从 19 世纪麦克斯韦方程建立起已奠定了学科基础；说它年轻，是当今随着信息化建设的迅猛发展，电波科学的内涵和外延、学科研究自身的手段、能力和水平、研究成果应用的范围和程度、学科的重要性、被依赖程度和被重视程度都呈现了前所未有的变化和发展。

自 20 世纪 90 年代初的海湾战争和随后的科索沃、阿富汗、伊拉克战争以来，随着信息技术的飞速发展，军事领域发生了一系列重大变化，以信息技术为核心的现代战争巨大威力使每一耳闻目睹者都禁不住感到震惊！电波，又称电磁波，是当今先进信息技术得以实现的主要载体。无论是太空轨道运行的卫星、天上飞翔的战机、地上奔驰的坦克、兵营、建筑、地下屯兵掩体，还是海上疾驶的军舰，深海隐藏的潜艇都需要电波传递信息。在一场惊心动魄的现代战争中，战争环境越复杂，规模越庞大，精密协同军事行动要求越高，就越需要一套准确、可靠、快速反应的探测、通信、指挥、控制系统，为统帅部、军事部门提供确切的信息，保证有效地使用各种武器，合理地使用人力物力，确保战争的胜利。要实现这一点，就必须依靠电波传播的支撑；换句话说，没有电波传播，现代战争寸步难行。

电波不仅存在于地球及其表面，而且充满整个宇宙空间。电波是物质的一种表现形式，具有能量和动量，能同其他形式的物质进行能量和动量交换。电波有很宽的频谱，覆盖的频段从极低频一直到毫米波亚毫米波。电波除能传送能量外，更重要的是能以光的速度携带和传递信息，在当今信息时代，这一功能和特点就足以使人们明白电波传播研究为何这样引人关注和重视！

电波在传播过程中会与周围自然环境相互影响和相互作用，电波传播就是研究这种影响和作用的一门科学。它研究空域为地（海）—地（海）面—低层大气—平流层—电离层—太空；它研究的环境对象与人类活动密切相关，涉及到国防建设和国民经济建设的方方面面，如通信、雷达、广播电视、导航、定位、遥测、遥控、遥感、航空航天等。电波传播，它到底在国防和国民经济建设中扮演着什么重要的角色？电波传播又是如何进行的呢？本书将尽可能全面系统地加以描述，以满足广大科技爱好者和科技人员的需求。

董庆生

2007年10月于青岛

目 录

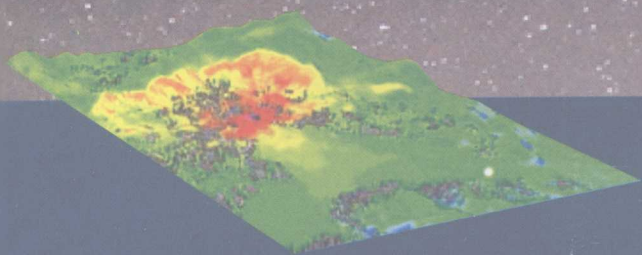
第一章 对流层电波传播及对信息系统的影响	1
第一节 无线电气象	4
一、大气吸收	6
二、大气折射和电波修正	6
三、大气波导传播及其应用	7
四、对流层散射传播及散射通信	8
五、降雨及其对电波传播的影响	10
六、多径传播	12
第二节 移动通信中的电波传播	13
第三节 对流层大气参数的测量和遥感	14
一、大气折射率的测量	14
二、大气辐射与微波被动遥感	15
三、GPS 大气遥感	16
四、其他大气遥感手段	17
第四节 对流层电波环境在信息化作战中的应用	18
第二章 电离层电波传播及应用	21
第一节 电离层天气对无线电系统的影响	24
一、电离层天气对通信系统的影响	24
二、电离层天气对导航系统的影响	27
三、电离层天气对其他无线电技术系统的影响	29
第二节 天波超视距雷达	31
一、电离层传播应用	31
二、“超级千里眼”——一种波束会拐弯的“千里眼”	32
三、电离层是天波超视距雷达的组成部分	33
四、天波超视距雷达系统简介	34
五、电离层散射通信	37
第三节 流星与流星余迹无线电通信	38
一、流星、流星雨及陨石	38
二、流星余迹和流星通信	43
第四节 极光与电波观测	45
一、极光神话	45

二、极光科学迈开新步伐·····	50
三、20 世纪的极光科学·····	52
四、极光与等离子体·····	55
五、磁层·····	56
六、极光与无线电通信·····	58
七、极光亚暴与电缆通信和长线、长管道工程·····	59
八、极光和地磁扰动对导航和地质勘探的影响·····	60
九、极光粒子和辐射环境对飞行器和空间系统的危害·····	61
十、极光与天气·····	61
十一、极光——太阳和磁层活动的一种电视图像·····	63
十二、科学的今天和明天——极光是一种放电现象·····	65
十三、当前国际上极光研究的特点·····	67
十四、极光科学的将来·····	69
第三章 长波、超长波、极长波传播及其应用·····	71
第一节 LF 波传播特性及其应用·····	73
一、LF 电波传播机理及特点·····	73
二、长波传播在导航与授时系统中的应用·····	76
第二节 VLF/SLF 传播特性及其应用·····	77
一、VLF/SLF 波传播·····	77
二、VLF/SLF 频段的大气噪声·····	80
三、VLF/SLF 波在对潜通信中的应用·····	81
四、ELF 波传播与舒曼谐振·····	85
第三节 雷暴脉冲传播与雷暴定位·····	86
一、闪电的放电电流及其辐射频谱·····	86
二、闪电脉冲的传播特性·····	87
三、闪电的测向·····	88
四、方位交汇定位·····	89
五、时差定位·····	89
六、雷电单站定位·····	90
第四章 电波传播与频谱管理技术·····	91
第一节 频谱管理概述·····	93
一、无线电频谱的特点·····	93
二、频谱管理的主要任务及流程·····	95
三、战场频谱管理的特点·····	95
四、频谱管理在现代战争中的地位·····	97
第二节 频谱管理技术及系统·····	98
一、短波探测技术·····	99



二、频谱监测测向技术·····	102
三、电磁兼容性分析技术·····	106
四、频率指配技术·····	108
五、频谱管理新技术·····	111
第三节 几种频谱管理自动分析系统介绍·····	115
一、自动战场频谱管理工程 (ABSME) ·····	115
二、瑞典频谱管理软件 WRAP ·····	116
三、修订本电子通信电子操作指令系统 (RBECS) ·····	119
四、德国 L/S 公司频谱管理系统 ·····	119
五、以色列 IRIS 频谱管理系统 ·····	120
第四节 频谱管理系统技术体系框架·····	121
一、系统的体系结构·····	121
二、系统的信息关系·····	122
三、系统软件技术体制·····	123
第五节 频谱管理的发展·····	124
第五章 电波传播与卫星导航·····	127
第一节 卫星导航系统·····	129
一、卫星导航原理概述·····	130
二、现有卫星导航系统·····	130
第二节 电波环境对卫星导航系统的影响·····	134
一、电离层折射延迟·····	135
二、对流层折射延迟·····	136
三、电离层闪烁效应·····	136
四、多路径效应·····	137
第三节 卫星导航中的电波传播修正·····	138
一、卫星导航接收机电波传播修正模型·····	138
二、广域差分系统·····	139
三、卫星高精度单点定位·····	142
第四节 基于卫星导航系统的电波传播研究·····	143
一、基于卫星导航系统的大气监测·····	144
二、基于卫星导航系统的空间环境监测·····	145
第五节 卫星导航战技术·····	146
一、卫星导航干扰与抗干扰技术·····	146
二、电波传播在卫星导航对抗中的应用·····	148
第六章 地下电波传播及应用·····	151
第一节 地下电波传播与地下目标探测·····	153
一、地球物质的介质特性和电波传播的特点·····	153
二、探地雷达原理及其应用·····	155

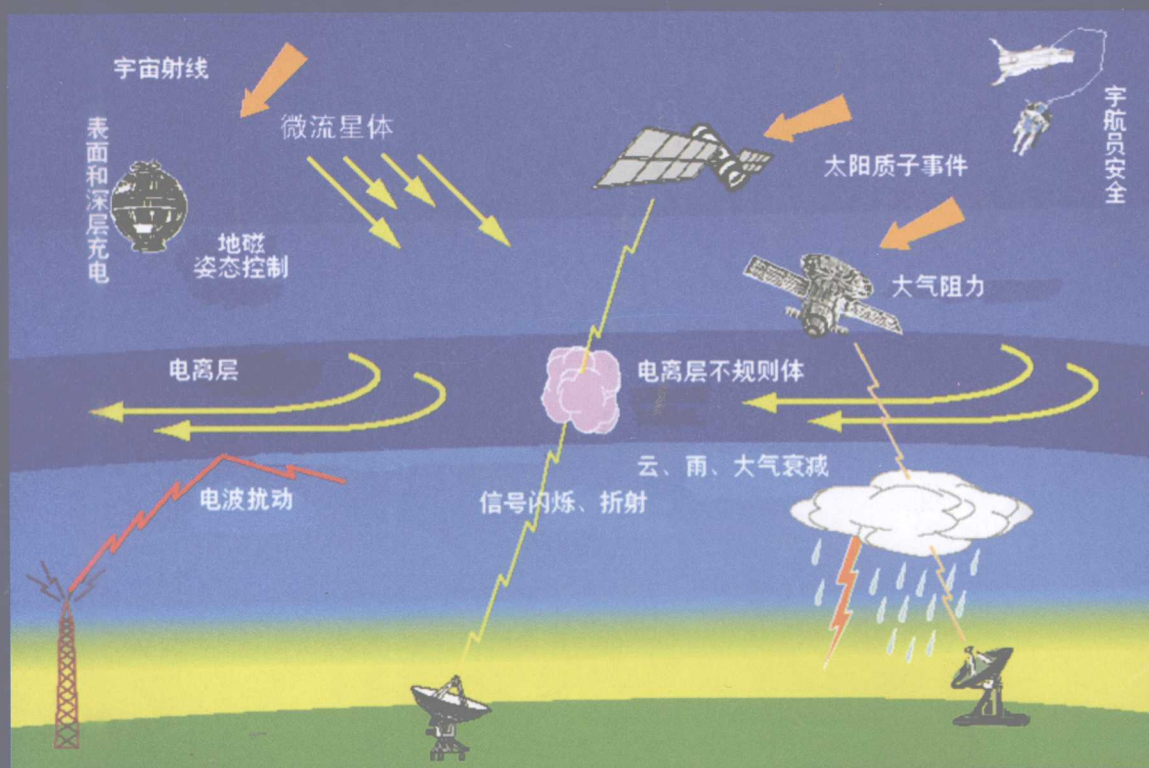
三、正在形成武器装备的地雷探测新技术·····	160
四、超宽带穿墙侦察雷达系统·····	164
第二节 电波传播在石油测录井中的应用·····	168
一、中国电波传播研究所与石油电子·····	169
二、SDZ-5000 快速测井平台系统·····	170
三、ACE 智能录井系统·····	171
第三节 电波传播在地震监测中的应用·····	177
第四节 ELF 波在海底地质结构大面积调整中的应用·····	180
第七章 电波与天线·····	181
第一节 概述·····	183
一、天线的发展·····	183
二、天线的应用和分类·····	183
三、电波和天线·····	185
第二节 天线的基本电参数·····	187
一、方向函数和方向图·····	187
二、方向性系数·····	188
三、增益系数·····	188
四、输入阻抗·····	188
五、极化·····	189
六、频带宽度·····	189
七、驻波系数·····	189
第三节 常用观测天线·····	190
一、水平对称振子·····	190
二、宽带对称振子型天线·····	192
三、直立天线·····	196
四、宽带单极子型天线·····	198
五、宽带天线·····	200
六、天线阵列·····	203
七、反射面天线·····	207
参考文献·····	213
后记·····	216

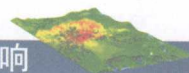


第一章

对流层电波传播及 对信息系统的影响







人类已进入信息化时代,无线电波作为信息的载体,看不见,摸不着,但我们每天通过听广播、看电视、使用手机等都能感受到无线电波带给我们的便利和对我们生活的影响。无线电波拓宽了人类的视野,增添了生活的色彩,缩短了人与人之间的距离。

我们生活的地球被厚厚的大气层所包围,大气层分为对流层、平流层等(如图 1-1 所示),对流层在地球的不同地区高度是不一样的。对流层里集中了大气质量的 3/4 和几乎全部水汽,有强烈的垂直运动,并且是具有明显气流运动的大气层。在对流层中发生着我们所熟悉的各类天气现象,云雪雨雾、闪电雷鸣、冷热交替。主要的天气现象和过程都发生在这一层。在中纬度地区,对流层顶的高度为 12km 左右,在赤道地区可达 18km,而在极区只有 8km 左右。图 1-2 示意了对流层的分布。对流层发生的这些气象现象与无线电波有什么关系?对无线电系统会产生什么影响呢?对流层对光波的影响为我们所熟知,天空之所以通常是蓝色的,就是由于大气分子对蓝光散射比较强造成的;雾天能见度降低是由于雾滴对光波的衰减造成的。同样,对流层也会无线电波产生影响,其影响主要分为两个部分。

一是对对流层大气本身对无线电波的影响。由于对流层大气的折射指数是空气的温度、压力(压强)和湿度的函数,而对流层中发生的各种天气过程使得温度、湿度、压力(压强)参数随时间和空间发生十分复杂的变化,导致无线电波经对流层传播折射指数随时间和空间复杂变化,这些变化导致各种各样的电波传播现象,如电波射线的弯曲、电波出射角和到达角的变化、传播时延、波导传播、散射传播、多径传播、信号的衰落、去极化和信号的起伏等。

二是对对流层大气中的沉降物,如降雨、降雪、云、雾、冰雹和沙尘暴等均对无线电波产生衰减、散射、去极化等传播效应。对流层引起的各种无线电波传播效应,对不同频段工作的无线电信息系统如卫星通信系统、移动通信系统、导航定位系统、雷达系统等产生不同的影响,如信号中断、系统间的同频干扰、定位误差等。而人们利用这些传播现象也可对大气环境进行监测和遥感,提高人类社会对大气环境变化的感知能力,造福于人类社会。图 1-3 给出了对流层电波环境对信息系统的部分影响。

无线电波在对流层各种传播规律的研究,对提高无线电信息系统的工作可靠性和人类对大气环境的感知均具有重要的应用价值。无线电波在对流层传播的预测是

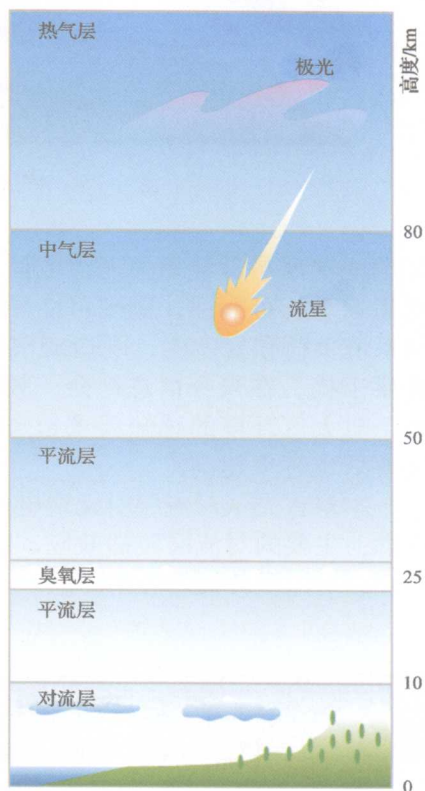


图 1-1 大气随高度的分布

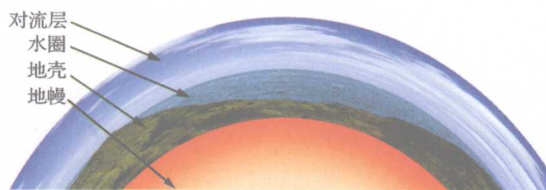


图 1-2 大气对流层

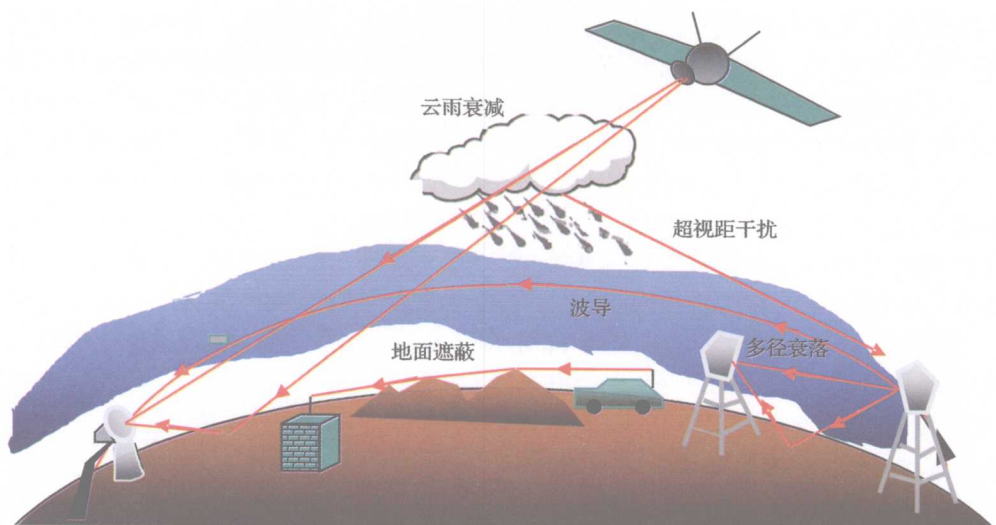


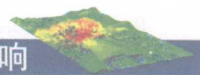
图 1-3 对流层电波环境对信息系统的部分影响

科学地规划与设计相关无线电信息系统的必要环节，如果低估了电波传播的影响，轻则影响系统可靠性，重则可能导致系统失效。但如果高估了电波传播的影响，就会增加系统负荷和复杂度，既造成浪费，也增加技术难度，同时也会造成对其他系统的不必要干扰。在当今信息社会，频谱资源越来越紧张，系统的可靠性和精度要求越来越高，对大气环境的感知要求越来越精细。因此，对于对流层环境和电波传播的预测精度要求也越来越高。

本章首先从对流层对无线电信息系统影响因素出发，介绍对流层的无线电气象环境概念、主要的对流层传播效应，以及对流层电波传播对不同种类信息系统的影响，并简要介绍对流层传播的应用。

第一节 无线电气象

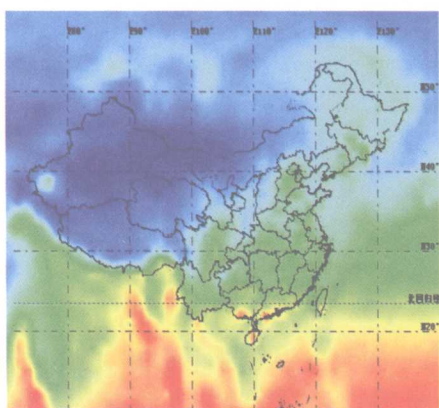
我们每天都在收听收看气象预报，关注天气的变化。而电波的传播也与气象变化密切相关，大气的温度、湿度、压力（压强）变化会引起大气折射指数的变化，影响无线电系统作用的覆盖范围和定位精度。降雨和云雾等气象过程引起电波的衰减，导致通信质量下降，严重时引起系统中断。无线电气象学是人们为了了解天气现象对无线电传播的影响规律而形成的一门交叉学科，它主要研究各种气象变化对无线电波的影响，并通过气象参数来表征其关系与特点。这些气象参数称为无线电气象参数，由此形成了专门的学科——无线电气象学，它通过研究无线电气象参数的统计规律，为电波传播预测提供基础数据。无线电气象参数主要有：温度、湿度、压力（压强）、折射指数、折射指数梯度、折射指数湿项、降雨率、雨顶高度、云含水量、地面水汽密度、水汽的积分含水量等，也包括无线电气象参数的年、月平均值和累计概率分布。无线电气象参数是研究对流层传播特性的重要基础。



以往无线电气象参数主要以图表和经验公式等形式表示,如温度、折射指数等值线图、雨区、雨顶高度的经验公式等。这些电波环境数据精度较低,并在不同分区的交界处产生预测结果的不连续性,而且不便于实际应用。为了更准确地反映电波环境的空间统计分布,更方便、可靠地用于无线电系统设计和性能评估,国际上已广泛采用电波环境栅格数据(数字地图)取代原有的电波环境图表,国际电信联盟(ITU)已经提供了多种电波环境特性的全球数字地图。为了得到更适合我国实际情况、精度更高的电波环境数据,中国电波传播研究所通过对国内 752 个地面气象站点、120 个探空站点以及我国邻近地区 600 多个地面气象站点 1981 ~ 2000 年 20 年的气象数据的统计,得到了与 ITU 对应的我国范围的电波环境数字地图,图 1-4 给出了几幅典型的我国无线电气象参数分布图。

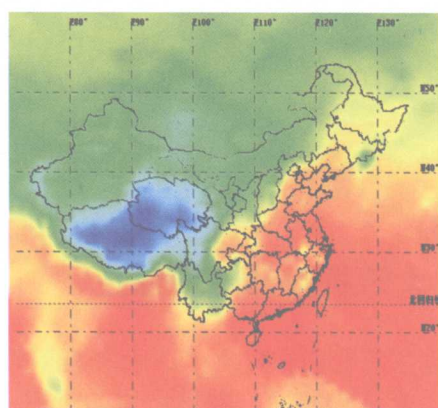
从图中可以看出,我国无线电气候变化巨大,具有明显的地域特征,其具有以下特点:

- (1) 无线电气象参数量值的大小,由东南沿海向西北地区逐渐变小;
- (2) 青藏高原地区,由于地势高,气压低,空气干燥,降雨少,是全国地面折射率最低的地区,大约只有 190N 单位;



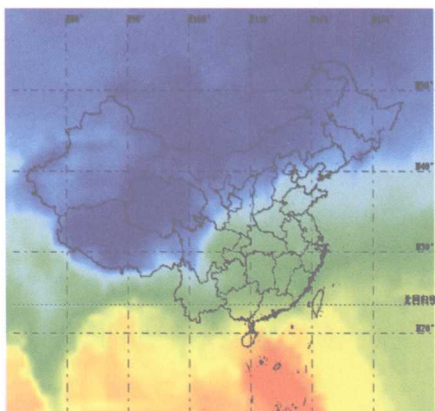
分钟降雨率 0.01% 分布图/(mm/h)

(a) 0.01% 时间概率的降雨率



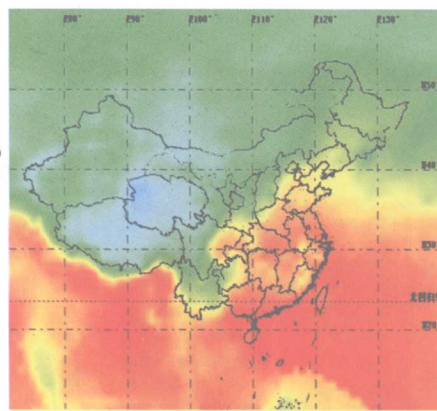
地面折射率 7 月份分布图 / N 单位

(b) 7 月份地面折射率



折射湿项 50% 分布图 / N 单位

(c) 50% 时间概率的折射率湿项



水汽密度含量 7 月份分布图/(g/m³)

(d) 7 月份地面水汽密度

图 1-4 我国部分无线电气象参数分布图

(3) 广东、福建等东南沿海地区, 由于空气中水汽含量高, 降雨频繁、降雨强度大, 是我国地面折射率最高的区域, 年平均高达 370N 单位。

由此可以看出, 在无线电系统设计和电波修正中, 必须利用当地的无线电气象参数, 优化系统设计, 以提高系统的可靠性和测量精度。

一、大气吸收

无线电波通过晴空大气时引起的衰减主要是水汽和氧气的吸收所致。大气中的氧气和水汽造成几个大气吸收的峰值, 以及几个称为窗口的大气吸收极小的区域 (见图 1-5)。例如在微波频段水汽三个最强的吸收峰分别在以下频率: 22.2GHz、183.3GHz、325.2GHz。在实际应用中, 为避免大气吸收衰减的影响, 通常选择大气传播窗口频率, 以减少大气衰减的影响。大气吸收频段通常可用于外空间的卫星之间通信, 也可用于短距离保密通信, 避免敌方对通信信息的截获。

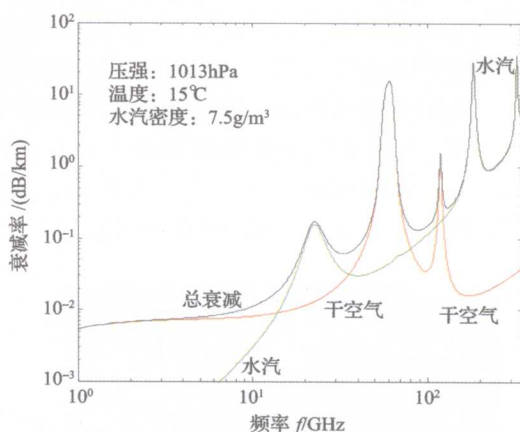


图 1-5 大气衰减率

二、大气折射和电波修正

折射现象是我们在日常生活中所熟悉的自然现象, 如大气中的微小水滴对光的折射产生彩虹, 光透过水面、玻璃产生的折射 (见图 1-6) 等。在真空中, 折射指数 n 等于 1, 电磁波以直线传播, 其传播速度等于真空中的光速, 约为 $3 \times 10^5 \text{ km/s}$, 多普勒频移正比于运动物体的径向几何距离变化率。虽然实际大气的折射指数与真空中的折射指数偏离不到千分之一, 但却使电波不再沿直线而是沿曲线传播, 传播的速度也小于真空中的

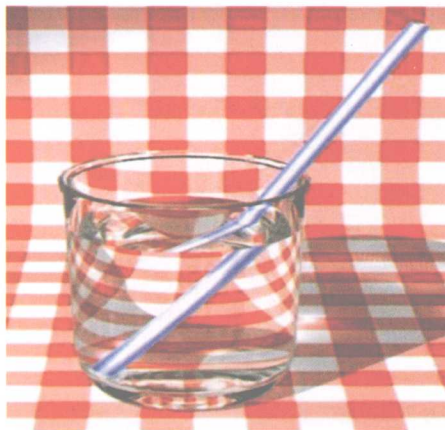


图 1-6 光的折射

的速度, 多普勒频移也不再正比于物体的径向速度。这些传播效应都是由于大气的折射指数不等于 1, 且随空间变化引起的。折射效应的显著程度主要依赖传播路径上折射指数变化的梯度和初始仰角。图 1-7 给出了几种典型的大气折射情况。

大气折射会产生以下传播效应。

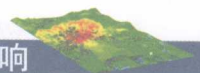
(1) 负折射传播

此时射线曲率为负值, 射线是下凹的, 这种情况较为少见。

(2) 标准折射传播

即标准大气中的正常传播。此时射线曲率半径大于地球半径, 射线偏离地球向高空传播。

(3) 临界折射传播



此时射线曲率半径等于地球半径,射线沿地球表面平行传播。

(4) 波导反常传播

此时射线曲率半径小于地球半径,射线弯向地面,出现反常传播,在满足一定的条件下,射线会被波导陷获,电磁波在波导范围内发生超视距传播。

在未考虑电波传播折射效应时,认为电波是以光速沿直线传播,系统所测目标的仰角、距离、高度和运动速度等参量,均为视在值。

为了准确对观测目标定位,必须进行折射误差修正才能获得目标的真实位置和速度,如图 1-8 所示。特别是在低仰角和远距离的情况下,折射效应更为严重。例如,当初始仰角小于 3° , 对 300km 以上的目标,仰角和高度的折射误差分别为 10% 和 30% 以上。对于深空探测,则可产生大的定位误差,真可谓是“失之毫厘,谬以千里”。因此,定位精度的导航、定位、雷达探测等系统均需要大气电波折射修正,如我们日常使用的卫星导航系统 GPS 就嵌入了电波折射修正模型。当前,雷达与干涉仪系统测量精度日益提高,尤其是在高精度靶场跟踪测量的情况下,提高电波折射误差修正精度,已成为主要的问题。

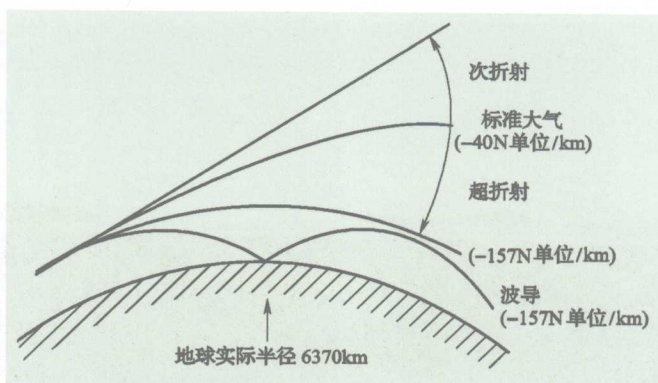


图 1-7 典型的大气折射情况

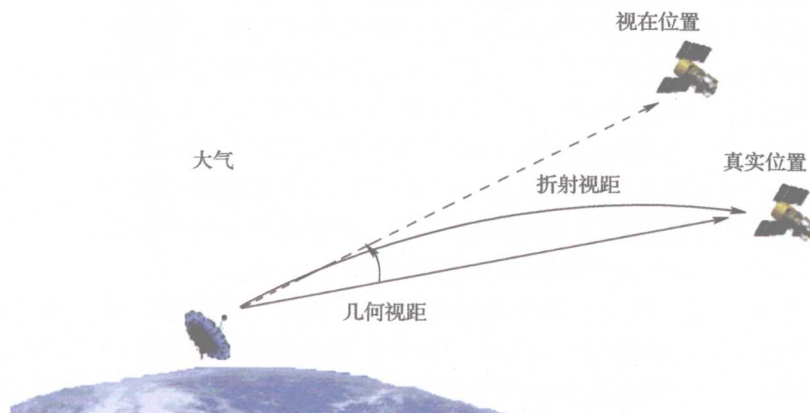


图 1-8 目标定位中的大气折射修正示例

三、大气波导传播及其应用

“海市蜃楼”是我们所熟悉的一种自然现象,通常发生在海上和沙漠地区,图 1-9 为发生在山东蓬莱的“海市蜃楼”。“海市蜃楼”是在一定气象条件下,由于光波在大气波导传播使人们看到远方的场景的一种自然现象。同样,在一定的气象条件下,在大气边界层尤其是在近地层中传播的电磁波,受大气折射的影响,其传播轨迹弯向地面,当射线曲率半径小于地球半径时,电波会部分地被陷获在一定厚度的大气薄层内,就像电磁波在金属波导管中