

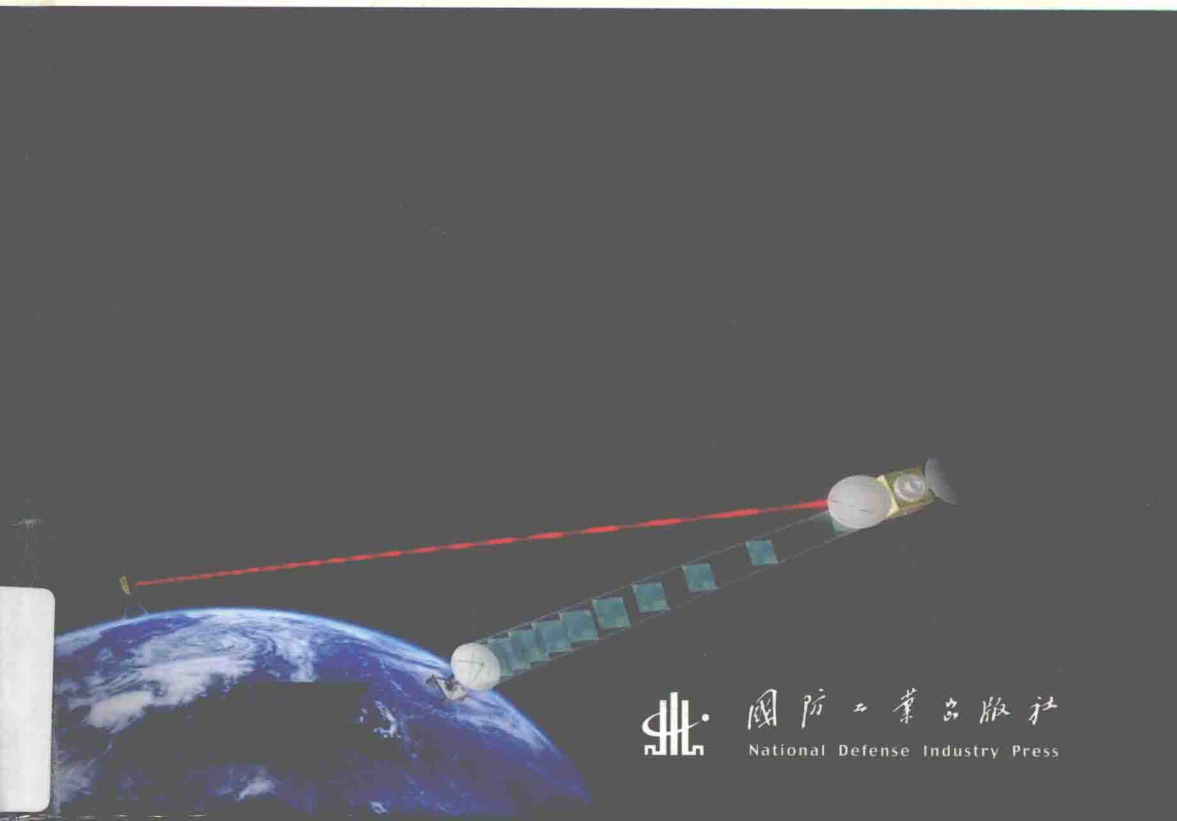


国防科技著作精品译丛

Satellite-to-Ground Radiowave Propagation
(2nd Edition)

星地电波传播 (第2版)

[美] J.E.Allnutt 著 吴 岭 译 朱宏权 弓树宏 审校



国防工业出版社
National Defense Industry Press

星地电波传播 (第2版)

Satellite-to-Ground Radiowave Propagation
(2nd Edition)

[美] J. E. Allnutt 著

吴岭 译

朱宏权 弓树宏 审校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2012 -236号

图书在版编目 (CIP) 数据

星地电波传播: 第2版 / (美) J. E. 奥尔纳特 (J. E. Allnutt) 著; 吴岭译.

-- 北京: 国防工业出版社, 2017. 2

(国防科技著作精品译丛)

书名原文: Satellite to Ground Radiowave Propagation (2nd Edition)

ISBN 978-7-118-10686-2

I. ①星… II. ①J… ②吴… III. ①电波传播—研究 IV. ①TN011

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第188618号

Translation from the English Language edition:

Satellite-to-Ground Radiowave Propagation, 2nd Edition by J.E.Allnutt J.E.Allnutt

Copyright © 2011 The Institution of Engineering and Technology This publication is copyright under the Berne Convention and the Universal Copyright Convention. All rights reserved.

Apart from any fair dealing for the purposes of research or private study, or criticism or review, as permitted under the Copyright, Designs and Patents Act 1988, this publication may be reproduced, stored or transmitted, in any form or by any means, only with the prior permission in writing of the publishers, or in the case of reprographic reproduction in accordance with the terms of licences issued by the Copyright Licensing Agency. Enquiries concerning reproduction outside those terms should be sent to the publisher at the undermentioned address:

The Institution of Engineering and Technology

Michael Faraday House Six Hills Way, Stevenage Herts, SG1 2AY, United Kingdom

本书简体中文版由 IET 英国工程技术学会授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

星地电波传播 (第2版)

[美] J. E. Allnutt 著

吴 岭 译

朱宏权 弓树宏 审校

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 41¼

字 数 760 千字

版 印 次 2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 198.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

译者序

卫星通信系统作为一种通信方式已经存在了半个多世纪,广泛应用于通信、导航、遥感、广播电视等领域,它具有许多其他通信方式无法替代的突出优点。近年来,卫星通信技术取得长足的进步,而且还在不断地发展,如开发毫米波卫星通信技术、将 MIMO 通信技术在卫星通信中使用等。

但是,所有的卫星通信技术必须依赖于在卫星和地面接收终端之间形成可靠、可用的无线通信链路。无线通信链路的设置需要结合具体的通信体制、应用目的等系统问题,针对特定频率的无线电波和特定的传播环境,对电波传播特性进行系统评估和预报。针对卫星通信技术,系统阐述星地链路传播特性的学术专著,对于卫星通信、电波传播等专业相关的本科生、研究生、学者、工程师等人员具有重要的理论意义和实用价值。J.E. Allnutt 的《星地电波传播》第 2 版 (“Satellite-to-Ground Radiowave Propagation” 2nd Edition) 正是专门针对卫星通信系统星-地链路中的电波传播问题的一本专著。

本书在保留 1989 年第 1 版学术内容的基础上,结合 1989 年至 2010 年之间卫星通信技术的新发展,增加了星地链路中 30GHz 以上电波传播的理论及实验结果、专门针对移动卫星通信业务的传播理论及实验结果、星地光传播特性问题、针对部分传播损伤特性的对抗技术。本书的最大特点是搜集了学术文献资料中大量的工程模型和实验结果,既适合以学术研究为目的的学生、学者阅读,也可供以工程应用为主的工

程技术人员参考。

本书共 8 章。第 1 章主要针对本书的内容进行一般性的概括和介绍;第 2~5 章分别针对电离层传播效应、晴空大气传播效应、对流层衰减效应、对流层去极化效应方面的理论、实验结果等内容进行研究;第 6 章主要讨论卫星移动业务中的传播效应;第 7 章为星地光通信系统中的传播效应;第 8 章对部分传播效应的对抗技术进行了讨论。附录 A 给出了与空间无线通信有关的术语和定义;附录 B 包含了文章涉及到的一般数学方程;附录 C 为属于缩略索引;附录 D 为文中涉及传播效应的国际无线电联盟建议。

本书由吴岭翻译,朱宏权和弓树宏审校。本书在翻译出版过程中,得到了侯孝民、邱磊、游莎莎的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

本书的译者都是多年工作在卫星通信、电波传播技术领域的一线研究人员,但是通信技术及电波传播涉及的知识面很广,因此我们对于原著内容的理解难免会有偏差,翻译不当之处,恳请得到各位同行和专家的批评指正。

电离层环境和对流层环境中的传播特性均为随机过程,工程模型和理论结果的适用性对时间和空间的依赖性较强,因此在使用本书中的计算模型及参数、理论及实验结果时需要核准它们的适用条件。另外,卫星通信技术在不断发展之中,本书的内容只涵盖了 2010 年以前的部分理论及实验结果。

译者

2016 年 8 月

前言

自 1989 年本书的第 1 版出版后, 卫星通信领域发生了巨大变化。国际通信卫星机构 (INTELSAT) 作为一个曾经由 140 个国家共同参加的国际组织, 已经与它最好的竞争者 PanAmSat[®] 合并组成了世界上最大的卫星通信公司。基于卫星的商业通信已经普遍实现数字化, 仅留下极少量的模拟链路还在使用。目前, 超宽带陆地光纤已经连接了地球上的主要社区, 因此, 商业通信卫星已经成功地进入了各种不同的市场。它们提供了覆盖全球的广播电视业务、因特网线路备份业务、VSAT 业务, 以及所有支持国际电信联盟 (ITU) 区域的卫星移动通信业务。更重要的是, 最近的两项创新技术将会完全改变现有的商用和军用的卫星通信行业, 它们将会是 21 世纪的转折点。

第一项创新来自于 2009 年 11 月发射的下一代 INTELSAT 14 卫星。与前几代卫星不同的是, 这颗卫星的有效载荷中包含了一个由思科公司提供的因特网路由器, 这个空间因特网路由器 (Internet Router in Space, IRIS) 构成了一个独特的多用途星上处理载荷。到目前为止, IRIS 的测试结果良好, 这意味着 IRIS 技术很可能在未来的商用和军用卫星系统中发挥重要作用。

卫星通信的第二项创新以军事应用为初始目标, 但主要应用到了商业市场。它包括利用星间链路 (Inter-satellite Links, ISL) 和星上路由器 (类似于 IRIS) 对在轨卫星进行组网使其形成一个卫星群。群中的各卫星可以相距很近 (若干千米), 也可以相隔很远 (出于军事用途, 如

50 km) 从而规避意外事件或者敌方恶意攻击 (如导弹发射) 的威胁。这些卫星群在低轨、中轨、高轨都可以运行。组成群的单颗卫星尺寸通常会小于它所替代的常规卫星, 因此卫星集群主要具有两个优势: 一是, 可以使用较小的火箭完成卫星发射, 这将会带动小推力火箭 (小于传统的阿丽亚娜五号等级的火箭) 在商业市场的发展; 二是, 可以在不同时间发射构成群有效载荷的不同部件以更好地适应市场需求。2010 年初, 轨道科学受美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 委托展开了卫星群概念的研究。

与此同时, 复合载荷 (由多个用户操控的负载集合) 技术也在商用通信卫星行业引起了一场技术革新。INTELSAT 22 卫星就是其中之一, 它本身携带了澳大利亚军方使用的超高频 (UHF) 载荷, 同时也可以很方便地通过 ISL 与其他处于合适位置的商用载荷卫星形成卫星集群。

从表面上看, 上述卫星通信的技术概念似乎与本书的星地电波传播内容相去甚远, 但实际上, 以上提及的每一项新技术的实现都要依赖于一个高性能、高可用性的星地传输链路, 这个链路必然要穿过大气层, 而这正是本书的核心研究内容。

另外, 本书第 2 版与第 1 版之间相隔了 20 多年, 这就为本版的成稿带来了新的难题: 第 2 版中究竟应该保留第 1 版的哪些内容, 又应该增加哪些新内容。通常, 一本书的前后版本之间仅相隔 5 年左右, 而本书的版本之间足足跨越了卫星通信工程的一个时代。因此, 决定保留第 1 版中诸多历史性介绍的内容, 例如, 4GHz 链路的电离层闪烁是如何被发现的, 漂移卫星怎样旁证了低仰角衰落现象, 冰晶去极化现象为什么是一个重要发现 (更具体地说, 如何被证明该现象应独立于雨去极化而单独存在), 为什么天线极化纯度低会降低上行链路和下行链路去极化的相关性; 各种传播模型是如何从提出概念到通过验证测试的; 以及其他许多能帮助理解特殊现象的历史内容。

在本书第 1 版的行文过程中, 我曾坚持了一些个人观点, 随着时间的推移, 这些观点依然存在并被广泛地证实。我认为, 本书的核心应该是研究针对地球同步卫星的传播, 因为地球同步轨道仍然是卫星系统中效益最大的轨道。虽然与地球同步卫星的固定通信业务相比, 低中轨地球卫星、卫星集群以及深空探测器还有着不同的技术难题, 但它们都有一个共同之处, 那就是它们的信号必须穿过地球大气。因此将以商用

地球同步通信卫星为重点来讲述地球大气对无线电信号传输的影响。

考虑到大部分的理论和实验结果都针对的是 30GHz 以下的无线电频段, 所以本书重点讨论的也是这个频段。不过目前已经有了 30GHz 以上频率的实验结果, 主要是来自于意大利政府的意大利卫星通信系统 (ITALSAT) 计划。另外, 商用和军用领域已经开始重视自由空间的光通信技术, 因此, 本书中也安排了相关的章节内容。此外, 卫星移动通信也有单独章节介绍, 内容囊括了配置有大天线的地球同步轨道卫星 (GEO)、中轨地球卫星 (MEO)、低轨地球卫星 (LEO), 或通过 ISL 集群或与通过陆地光缆形成链路的地面站组成的综合系统等种种卫星系统, 然而, 究竟哪种卫星系统更占优势的问题尚无定论。

传播被誉为特殊的神秘科学, 任何参与过传播实验, 尤其是与卫星相关的传播实验的人员都不会否认这一点。除掌握传播理论的基础知识外, 还要求广博的地面站技术、卫星转发器特性、天线原理、气象学和协调策划等各方面的知识。如前所述, 为了突出传播损耗的多样性, 我认为尽可能地进行历史性回顾是很有帮助的, 因此写入了许多早期实验的细节, 包括在传播实验中易犯的错误。

在第 2 版内容编排上, 试图将各种主要的传播损耗现象分开表述, 并尽量做到自成一体。开篇章节是概括性介绍, 后续 4 章将电离层效应、晴空效应、衰落效应和去极化效应各自单独介绍, 并尽量减少交叉引用。这虽然会导致内容上的些许重复, 但我希望这样的编排能有助于对各主题的理解。第 6 章重点讲述了移动卫星业务中的传播效应, 包括用于航海、航空和陆地的移动业务; 第 7 章单独介绍了光通信效应; 第 8 章讨论了多种损耗效应的补偿和恢复技术。另外, 将沙尘引起的传播损耗放在光通信一章中, 因为这似乎是与之最相关的章节, 很多沙尘暴效应都是以光学能见距离来衡量。

为了使本书既能吸引应用科学或工程学的大学生, 又能吸引经验丰富的传播学专家, 插入了很多注释性文字, 引用了大量文献来诠释每一个主题及次级主题。引用的参考文献可以帮助资深读者找到最初的原始材料, 从而进一步加深他们的理解。鉴于此, 我认为有必要尽量指出本书引用的多位传播学专家的相关支撑材料, 特别是那些关于 ITU-R 第三研究小组及其主要工作团队 3J、3K 和 3M 的内容。我也对 NASA 传播实验工作组 (NASA Propagation Experimenters Group, NAPEX), Olympus

传播实验工作组 (Olympus Propagation Experimenters Group, OPEX) 和 Italsat CEPIT 的公开成果进行了深入分析, 尤其是后两者。很高兴, 也很感谢能够得到 ITU 的关于在许多图片和文字内容引用方面的许可。本书引用了大量美国航空航天局 (NASA) 和 ESA (OPEX) 的公开研究成果, 在这些引用中, 有时很难准确追踪到每一幅图片或每一段文字的具体作者, 因此, 对文中出现的引用错误深表歉意。

本书中大量图片的引用得到了出版者和作者的亲自许可, 除 ITU 和 NASA 外, 还要感谢 AIAA (美国)、AGARD、AT&T 知识财产公司、美国的地球物理学的联盟、美国摄影测量及遥感社团、Bordas Dunod Gauthiers-Villars、Bradford 大学研究公司, 英国电讯国际, 英国的电讯研究实验室 (现在英国电信, 上市公司), Butterworths (英国), CRC (供给服务部, 加拿大), CDRL (英国), CTR (美国)、COMSAT (美国)、ESA, IECE 现在的 IEICE (日本)、IET (正式的称 IEE)、IEEE, 国际卫星通信学报、INTELSAT、KDD (日本)、John Wiley & Sons 公司, Merrill 出版业公司 (美国)、自然 (Macmillan 杂志, 公司), 新科学家, 俄亥俄州州立大学、Peter Peregrinus, 空间科学和工程学中心, 威斯康辛州—麦迪逊大学和 URSI。在众多允许我引用其文献图片的作者中, 重点感谢 Bertram Arbesser — Rastburg、Asoka Dissanayake, Erkii Salonen, Gert Brussaard, Dickson Fang, C.H. Liu, Jonathan Maas, Neil McEwan, David Rogers, John Thirlwell, Laurent Castanet, Max van der Kamp, Peter Watson, Timothy Pratt and QingWei Pan。另外, 与他们的私下交流成果虽然没能在本书中以文字方式体现, 但对本书的成稿也有莫大的帮助, 在此一并感谢。

最后, 把我的爱和感谢献给我的妻子 Norma, 她给我的温暖和支持贯穿于我整本书的写作。

J.E. Allnutt

2010 年 8 月

目录

第 1 章 地空无线通信	1
1.1 引言	1
1.2 人造地球卫星	3
1.2.1 轨道选择	4
1.2.2 天线选择	10
1.2.3 频率选择	16
1.2.4 极化选择	17
1.2.5 跟踪选择	20
1.2.6 业务选择	23
1.3 大气	23
1.3.1 大气分层	23
1.3.2 天气模式	26
1.3.3 降雨特性	31
1.3.4 降水 (水凝物沉降粒子) 类型	38
1.3.5 雨滴特性与分布	39
1.3.6 大气潮汐	50
1.4 系统规划	54
1.4.1 地面站协调	54
1.4.2 站点屏蔽	59

1.4.3 链路预算.....	63
参考文献.....	69
第 2 章 电离层效应.....	78
2.1 引言.....	78
2.2 基本公式.....	83
2.2.1 临界频率.....	83
2.2.2 电子总含量.....	86
2.2.3 法拉第旋转.....	86
2.2.4 群时延.....	88
2.2.5 相位超前.....	90
2.2.6 多普勒频率.....	90
2.2.7 色散.....	91
2.3 电离层闪烁.....	91
2.3.1 菲涅尔区.....	92
2.3.2 吉赫兹电离层闪烁观测.....	93
2.3.3 闪烁指数.....	93
2.3.4 功率谱.....	105
2.4 电离层闪烁特性.....	107
2.5 吉赫兹电离层理论与预测模型.....	109
2.5.1 背景及早期预测模型.....	109
2.5.2 通用的模拟程序.....	112
2.6 系统影响.....	113
2.6.1 幅度效应.....	114
2.6.2 相位效应.....	118
2.6.3 系统效应.....	121
参考文献.....	123
第 3 章 晴空大气的影响.....	130
3.1 引言.....	130
3.2 折射效应.....	131
3.2.1 大气折射指数.....	131

3.2.2	折射率随高度的变化	133
3.2.3	射线弯曲	136
3.2.4	散焦	141
3.2.5	到达角和多径效应	142
3.2.6	天线增益降低	144
3.2.7	相位超前	146
3.3	反射效应	148
3.3.1	光滑表面的反射	148
3.3.2	粗糙表面的反射	151
3.4	吸收效应	153
3.4.1	氧气和水蒸气的谐振线	155
3.4.2	气体吸收	156
3.4.3	雾衰减	164
3.4.4	云衰减	167
3.4.5	路径积分含水量	172
3.5	对流层闪烁效应	177
3.5.1	漂移测量	178
3.5.2	高纬度测量	179
3.5.3	谱分析	181
3.5.4	对流层“湿”闪烁和“干”闪烁	182
3.5.5	海上移动通信	184
3.5.6	对流层闪烁的特征	187
3.6	晴空大气效应的理论和预测模型	189
3.6.1	对流层闪烁的早期理论概述	191
3.6.2	决定对流层闪烁引起的有效幅度损耗的预测模型	193
3.6.3	低仰角衰落	195
3.6.4	低仰角衰落预测模型	196
3.7	系统影响	198
3.7.1	相位效应	198
3.7.2	幅度效应	199
3.7.3	系统效应	203
	参考文献	204

第 4 章 衰减效应	215
4.1 引言	215
4.1.1 散射和吸收	219
4.1.2 指数 (幂) 定律关系	221
4.1.3 多重散射的影响	228
4.1.4 天空噪声温度	229
4.2 测量技术	230
4.2.1 降雨量测量	230
4.2.2 微波辐射计测量	235
4.2.3 卫星信标测量	245
4.2.4 雷达测量	251
4.3 实验结果	260
4.3.1 辐射计实验	260
4.3.2 雷达实验	261
4.3.3 卫星信标实验	262
4.4 路径衰减的时空变化	264
4.4.1 累积统计	264
4.4.2 最坏月份	273
4.4.3 短期变化特征	277
4.4.4 站点之间的变化	283
4.5 衰减数据的相关	294
4.5.1 长期缩放比例	295
4.5.2 短期频率换算	298
4.5.3 试验技术之间的相关性	301
4.5.4 差分效应	304
4.6 雨衰预测模型	306
4.6.1 单站预测模型	306
4.6.2 有效雨顶高度	310
4.6.3 非 GSO 路径的长期统计计算	315
4.6.4 联合效应模型	316
4.6.5 一个以上路径损伤的 ITU-R 联合效应模型	317
4.6.6 站址分集预测模型	319

4.7 系统的影响	321
4.7.1 上行链路衰落余量	324
4.7.2 下行链路恶化	324
4.7.3 服务质量	326
参考文献	327
第 5 章 去极化效应	348
5.1 引言	348
5.2 水汽凝结体去极化的基本原理	350
5.2.1 媒质的各向异性: 差分效应	350
5.2.2 极化倾角和雨滴倾角	355
5.2.3 交叉极化鉴别度和交叉极化隔离度	359
5.3 测量方法	360
5.3.1 基础理论	360
5.3.2 直接测量	361
5.3.3 间接测量法	369
5.4 实验结果	370
5.4.1 认识问题	370
5.4.2 早期的倾斜路径结果	372
5.4.3 传播路径去极化效应的时空变化	376
5.4.4 最坏月	384
5.4.5 短期特征	385
5.4.6 站点之间的变化	389
5.5 XPD 数据相关性	392
5.5.1 长期频率缩放比例	392
5.5.2 短期频率缩放比例	394
5.5.3 衰减与去极化之间的相关性	398
5.6 去极化预测模型	401
5.6.1 降雨去极化模型	402
5.6.2 冰晶去极化模型	403
5.6.3 通用的 ITU-R 去极化模型	403

5.6.4	水汽凝结体引起的 XPD 统计特性的长期频率和极化缩放比例	405
5.6.5	衰减和 XPD 的联合预测模型	406
5.7	系统影响	408
5.7.1	共信道干扰	408
5.7.2	闪烁/去极化影响	410
	参考文献	413
第 6 章 移动卫星业务传播效应		421
6.1	引言	421
6.2	传播参数范围	423
6.3	卫星移动通信业务	424
6.3.1	海事移动卫星业务	424
6.3.2	航空移动卫星业务	424
6.3.3	陆地移动卫星业务	425
6.4	损伤来源	425
6.5	移动卫星业务的传播效应与预测模型	428
6.5.1	海事移动通信	428
6.5.2	航空移动通信	448
6.5.3	陆地移动通信	454
6.6	植被引起的衰落	471
	参考文献	472
第 7 章 光通信传播效应		478
7.1	引言	478
7.2	光链路特性及其与微波波段的区别	480
7.2.1	相干性方面	480
7.2.2	菲涅尔区	485
7.2.3	孔径平均效应	487
7.2.4	散射方面	489
7.2.5	空-地及地-空不对称性方面	493
7.2.6	天线跟踪	494

7.2.7 衍射极限光学	498
7.3 光波段的大气吸收	500
7.4 天气模型	501
7.4.1 折射效应与波束弯曲	502
7.4.2 等晕角	503
7.4.3 大气湍流的暂态效应	505
7.5 光传播路径预测方法	506
7.5.1 吸收损耗	506
7.5.2 散射损耗	506
7.5.3 振幅闪烁	507
7.5.4 到达角与波束漂移	508
7.6 其他粒子的效应	508
7.6.1 大气粒子的范围	508
7.6.2 沙尘效应	510
参考文献	518

第 8 章 信号传播损伤的恢复技术

8.1 概述	522
8.2 电离层传播效应	523
8.2.1 克服电离层幅度闪烁的影响	524
8.2.2 法拉第旋转效应的改善	528
8.3 对流层闪烁效应	530
8.3.1 对流层的闪烁: 改善湍流折射效应	530
8.3.2 低仰角衰落: 改善大气多径效应	531
8.3.3 大气潮汐的影响: 改善大气损耗的变化	531
8.3.4 气象地图	532
8.4 海事多径效应	536
8.4.1 频率分集	537
8.4.2 高度/空间分集	537
8.4.3 极化赋形天线	537
8.4.4 波束赋形天线	538

8.5	雨衰效应	539
8.5.1	克服信号衰落的固定资源分配方法	543
8.5.2	动态资源分配消除信号衰落	546
8.5.3	检测信号损伤	570
8.5.4	联合信号恢复 (抗衰落) 技术	571
8.6	去极化效应	571
8.6.1	低于 10 GHz 的技术	571
8.6.2	高于 10 GHz 的技术	575
8.7	干扰	576
8.7.1	一般表现形式	576
8.7.2	旁瓣干扰	577
8.7.3	主瓣 (主波束) 干扰	579
8.8	自动分析方法	583
	参考文献	584
附录 A 空间电波传输术语定义		596
附录 B 常用公式		607
B2.1	本书中出现或引用的公式	607
B2.2	GEO 卫星相对地面站的方位角和俯仰角计算	619
B2.3	一些有用的常数	620
	参考文献	620
附录 C 术语和缩略词		621
附录 D ITU-R 传输相关的建议书		638