

信息科学与工程系列专著

电波传播模型选择 及场强预测方法

——工程实施指南

王月清 王先义 主编 王健 谈铃 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

信息科学与工程系列专著

电波传播模型选择及场强预测方法

——工程实施指南

王月清 王先义 主 编

王 健 谈 铃 副主编

吴桂生 赵红梅 陈丹俊 王 瑞

刘亚南 姬生云 刘玉超 柴远波 编 写

刘 颖 田 斌 王 石

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据电磁场与电磁波基础理论、国际电联以及国内外多年的研究成果,给出9 kHz~300 GHz频段内各类无线电业务在不同环境中的电波传播模型选择、场强预测方法以及电波传输模型选择流程,适用于无线电装备研制论证、无线电台站规划设置、电磁干扰分析、电磁频谱管理、电磁兼容性分析等领域,能够为电磁环境的量化描述提供重要的工程应用价值。

本书适合电磁兼容性、电磁频谱管理与规划等相关专业人员使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电波传播模型选择及场强预测方法:工程实施指南/王月清,王先义主编. —北京:电子工业出版社,2015.1
(信息科学与工程系列专著)

ISBN 978-7-121-24293-9

I. ①电… II. ①王…②王… III. ①电波传播—物理模型—指南②电波传播—场强—预测—指南
IV. ①TN011-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第207663号



责任编辑: 窦 昊

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 345.6千字

版 次: 2015年1月第1版

印 次: 2015年1月第1次印刷

定 价: 49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

要深刻理解对电磁波传播造成影响的诸多因素，并能对电磁环境量化描述进行工程化应用，就必须定量描述在各个频段不同环境条件下的电波传播模型，以及在怎样的环境中 and 什么条件下如何选择这些传播模型，进而进行相应的场强预测。

有关电波传播模型的特定参考书较少，对满足电磁兼容性管理和电磁频谱管理业务发展需求尚存在一定的局限性，主要体现在：（1）在各种无线电业务中，由于应用环境的特殊性，要求各业务系统覆盖范围广，设备类型种类多并且电波传播环境复杂，为使各种类型的用频装备能够满足战术要求且避免相互干扰，需要在规划阶段就对其覆盖范围进行预测，而针对无线电波的传播特性，建立相关电波传播模型对用频装备以及电磁频谱资源的规划非常关键。（2）在确定各种用频装备覆盖范围和电磁干扰影响范围时，无线电传播损耗是一个关键参数，且传播损耗随不同地理环境、不同气候条件和不同工作频段而变化，因此需要量化的精确模型和场强预测方法，进行科学的频率指配、严格的系统设计和准确的场强预测，否则就会造成用频装备不能达到需求的战技性能。

本书立足前人研究基础，根据电磁场与电磁波基础理论、国际电联以及国内外多年的研究成果，给出了 9 kHz~300 GHz 频段内各类无线电业务在不同环境中的电波传播模型选择、场强预测方法以及电波传播模型选择流程。适用于无线电装备研制论证、无线电台站规划设置、电磁干扰分析、电磁频谱管理、电磁兼容性分析等领域，能够为电磁环境的定量化描述提供重要的工程应用价值。

本书由王月清、王先义、王健、谈铃策划。书中引用了中国电波研究所多年的研究成果和张明高院士、江长荫研究员、焦培南研究员、潘威炎研究员等专家编著的国家标准、著作以及相关报告和数据。第 1 章由王月清、王先义、王健、谈铃、吴桂生、田斌、柴远波编写，第 2 章由赵红梅、王月清、王健、吴桂生、刘颖编写，第 3 章由王健、王瑞、谈铃、王石编写，第 4 章由王健、王石、田斌、王月清编写，第 5 章由王健、陈丹俊、姬生云、吴桂生编写，第 6 章由赵红梅、吴桂生、刘亚南、王健编写，第 7 章由赵红梅、王健、王月清、刘颖编写，第 8 章由陈丹俊、王健、王石、田斌、王月清编写，第 9 章由王健、王月清、刘玉超编写。

感谢江长荫研究员对书稿的审核和建议。

全书的部分图表由金哪吒绘制修改，在此表示非常感谢！

由于作者水平的限制和经验不足，书中不可避免存在着错误，望读者批评指正。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁频谱管理的挑战	1
1.2 研究电波传播模型的意义	2
1.3 影响电波传播的环境	3
1.3.1 对流层	4
1.3.2 平流层	4
1.3.3 电离层	5
1.4 电波传播特性及其应用	6
1.5 电波传播模型的分类	7
1.6 本书构架	8
第 2 章 自由空间传播模型	10
2.1 基本定律	10
2.1.1 静止电荷与静电场	10
2.1.2 恒定电流与静磁场	12
2.1.3 时变磁场激发的电场	14
2.1.4 时变电场激发的磁场	14
2.1.5 麦克斯韦方程组	15
2.2 平面波的传播和辐射	18
2.2.1 平面电磁波	18
2.2.2 平面波的极化	19
2.3.3 平面波的辐射	20
2.3 通信链路的传播	23
2.3.1 点到面链路	23
2.3.2 点对点链路	24
2.3.3 层波特性	25
2.3.4 变换公式	26
2.3.5 功率预算	26
2.4 雷达系统的传播	27
第 3 章 地—电离层波导模传播模型	28
3.1 传播机理	28
3.1.1 传播特点	28
3.1.2 影响因素	29

3.2	模方程	33
3.2.1	各向异性低电离层极化率矩阵	33
3.2.2	电离层全波反射系数矩阵	34
3.2.3	电离层等效反射系数矩阵	36
3.2.4	地反射系数矩阵	38
3.3	模场参数	39
3.3.1	参数分析方法	39
3.3.2	典型计算结果	42
3.4	场强预测	46
3.4.1	均匀路径传播	46
3.4.2	缓变路径传播	47
3.4.3	突变路径传播	47
3.4.4	水(地)下场的计算	48
第4章	地波传播模型	49
4.1	均匀光滑地面的传播模型	49
4.1.1	均匀光滑平面地的传播	49
4.1.2	均匀光滑球面地的传播	50
4.1.3	平面地传播与球面地传播适用范围	54
4.1.4	ITU-R P.368 建议的传播曲线	55
4.2	分段均匀路径的传播模型	62
4.2.1	分段均匀的平面地面上的地波传播	62
4.2.2	分段均匀的球形地面上的地波传播	65
4.2.3	Millington 经验公式	67
4.3	地下或海水中的渗透传播模型	68
4.3.1	平静海(地)面情况下水(地)下传播损耗和相延	68
4.3.2	海浪起伏引起的水下 VLF 传播相位和衰减因子的脉动	69
第5章	天波传播模型	70
5.1	低频天波传播模型	70
5.1.1	收发角与入射角	71
5.1.2	地面的反射系数	74
5.1.3	电离层反射系数	74
5.1.4	电离层聚焦因子	76
5.1.5	天线的背景因子	78
5.1.6	传播路径的长度	82
5.2	中频天波传播模型	83
5.2.1	波动势	83
5.2.2	天波射线斜距	84

5.2.3	海洋增益因子	84
5.2.4	极化耦合损耗因子	86
5.2.5	电离层损耗因子	87
5.2.6	小时损耗因子	87
5.2.7	太阳活动性损耗因子	88
5.2.8	传播常数	88
5.3	高频天波传播模型	88
5.3.1	控制点	89
5.3.2	电离层传播参数	90
5.3.3	接收场强	92
第 6 章	超短波微波地面传播模型	99
6.1	确定性预测模型	99
6.1.1	视距传播模型	100
6.1.2	绕射传播模型	101
6.1.3	对流层散射传播模型	108
6.1.4	对流层波导传播模型	109
6.2	经验/半经验预测模型	111
6.2.1	Egli 模型	111
6.2.2	Okumura 模型	111
6.2.3	Okumura-Hata 模型	112
6.2.4	Lee 模型	113
6.2.5	GB/T 14617.1—93 模型	113
6.2.6	Rec.ITU-R P.1546 模型	128
第 7 章	航空移动和导航传播模型	162
7.1	传播机理	162
7.2	预测方法	162
7.3	传播曲线	162
7.4	预测流程	169
7.4.1	传输损耗作为天线高度插值	170
7.4.2	传输损耗作为距离函数的插值	171
7.4.3	传输损耗作为频率函数的插值	171
7.4.4	传输损耗作为时间百分比函数的插值	171
7.5	场强换算	171
第 8 章	地空传播模型	172
8.1	大气衰减	172
8.2	晴空效应	173

8.2.1	波阵面不相干性导致的天线增益降低	173
8.2.2	波束扩展损耗	173
8.3	降水衰减	174
8.3.1	年均衰减统计的预测	174
8.3.2	降水事件的特性	176
8.4	云雾衰减	177
8.5	闪烁效应	177
8.5.1	对流层闪烁	177
8.5.2	电离层闪烁	181
8.6	综合预测模型	185
8.6.1	固定业务预测模型	185
8.6.2	陆地移动业务预测模型	185
8.6.3	海事移动业务预测模型	187
8.6.4	航空移动业务预测模型	189
第 9 章	电波传播模型选择流程	190
9.1	HF 及以下频段传播模型选择	190
9.2	VHF/UHF 及以上频段电波传播模型选择	191
9.3	VHF/UHF 及以上频段地面业务传播模型选择	191
9.4	地空传播损耗计算流程	194
附录 A	电磁频谱的基本术语	196
附录 B	单位和符号	201
附录 C	一些典型介质的基本常量	203
参考文献		205

第1章 绪 论

电磁频谱管理涉及如何更好地满足国家需求,如何更好地满足无线电用户利益并同时保护公共利益。无线电技术的飞速发展及其在社会中应用的不断增长,为无线电技术及管理技术提供的巨大的发展机遇,显示出无线电频谱资源和频谱管理程序化日益重要。不断增长的需求对频谱的使用效率提出了更高要求,因此必须实施有效的频谱管理。电波传播模型是电磁干扰分析、频率分配、频率指配等电磁频谱管理过程的技术基础。

1.1 电磁频谱管理的挑战

无线电波在越来越多的业务中得到广泛应用,如国防、公共安全、广播、商业和工业通信、航空和水上通信、导航、无线电定位以及个人通信等领域。在紧急情况或自然灾害情况下,当有线通信不能使用时,无线电通信链路在动态或移动环境中就显得尤为重要。如果想高效使用频谱资源,则必须依据国家规则和无线电规则对其使用进行协调和管理。各国利用频谱资源的能力很大程度上取决于频谱管理活动,这些活动的目的是合理调配电磁频谱资源,提高其使用效率。

在如图 1.1 所示的战场电磁空间中,频谱管理尤为重要。电磁空间是继陆战场、海战场、空战场和天战场之后,人类开辟的第五维空间,其形成经历了计算机网络空间、电磁与网络融合空间、泛在网络电磁空间等三个阶段。夺取电磁空间优势成为赢得未来战争主动权的先决条件。未来信息化战争,战场透明度将进一步增强,制空权、制海权,已经从依靠对空兵器、作战飞机等“硬武器”系统优势,逐步转为依靠电子设备、技术、战术等“软杀伤”系统的优势。没有制电磁权,制空权和制海权就会成为一句空话。反之,谁在制电磁权上占有优势,谁就在战场上占有优势,谁就将赢得战争。

因此,必须正视我们国家制电磁权劣势的现实,在国家安全战略框架下统筹谋划应对策略。应该站在“五维一体”的高度筹划电磁空间安全战略。随着国家间的利益博弈由传统的领域向海洋、太空和电磁等多维空间转移,按空间范围划分的“五维一体”安全新理念已经渐露端倪。这种新理念认为,国家安全是一种涵盖了陆海空天和电磁空间的“全维”安全,任何一维安全的缺失,都将波及其他维度,并最终危及国家整体安全。因此,要求我们从过去主要关注有形空间安全转变为同时关注无形空间安全,在五维空间对国家安全进行统筹谋划、协调推进。在战略思维模式上,实现从生存安全观向发展安全观、从主权安全观向战略空间安全观的重大转变,把电磁空间安全提升到国家安全的高度,提升到与海洋、太空安全利益同等重要的位置来认识。

我们必须依赖关键技术手段实现对电磁空间安全的维护。相对于自然地理空间,电磁空间可以说是技术的集合体,集中了当今科学技术发展的顶尖成果。因此,电磁空间的制高点不在地理上,而在技术上,抢占技术制高点是获取电磁空间安全的必由之路。

当前用频系统的激增和电磁频谱资源的泛用已造成电磁空间环境空前复杂，有效的电磁频谱管理成为确保用频系统、设备正常运行的必要保障。

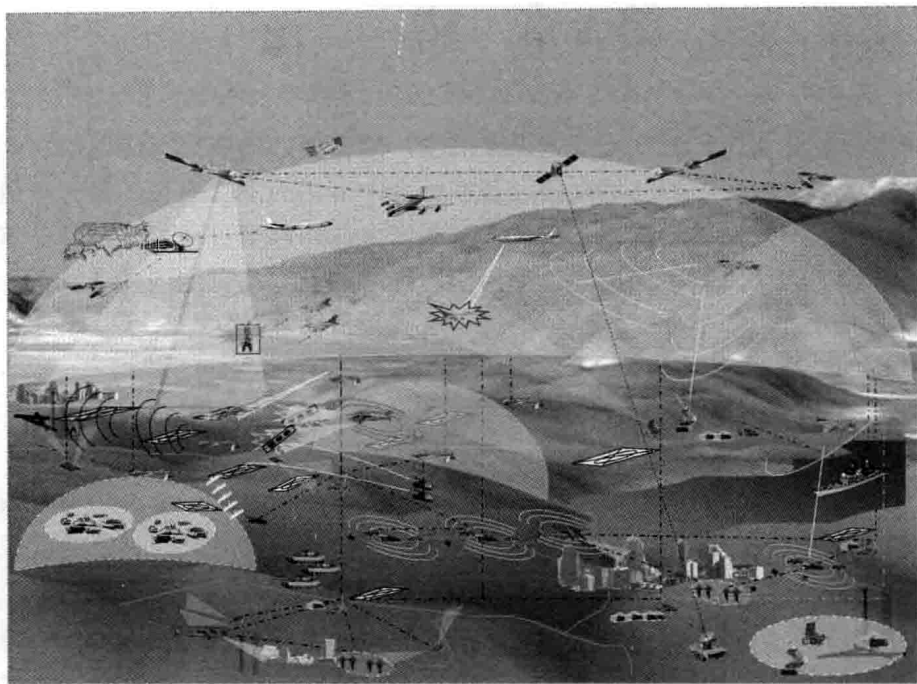


图 1.1 战场电磁空间

1.2 研究电波传播模型的意义

电波传播是所有无线电收发系统（包括自然发射源的被动检测系统）之间的信息传输基础，是电子系统的重要组成部分。电波在各种物理特性和时空结构的环境介质中传播，它对信息传输可能有两方面的效应，一方面是达成信号传播，如高频（HF）电离层反射、低频（LF）地面绕射以及甚低频（VLF）与极低频（ELF）地球—电离层波导模引导，提供信号远距离传播的机制；另一方面则是对信号传播的限制作用，包括衰减与扰动等传播效应，导致信号可通率下降以及各种信号失真，甚至致使传输中断，如无线电导航与雷达定位误差、卫星信号闪烁以及电离层扰动期间的短波通信中断等现象。电波传播模型以及特性变化的复杂性，本质来源于环境介质特性的时空变化。除了少数人为控制外，传播介质属于客观存在的自然环境。由于大量因素的影响，日地空间环境具有非常复杂的时空随机变化特性，为确定系统工程应用的环境参数，需要有较长期的大量的观测数据的积累、处理、分析等诸多方面的研究。此外，自然噪声与人为干扰对信号的接收也存在着严重影响。

电波传播研究的目的是充分研究空间介质信道的“达成和限制”两种效应，用其所长而避其所短，并对系统中的传播影响进行预测修正，使系统工作性能与空间信道特性达到良好匹配。其主要问题是：

① 在各种电子系统任务目标与技术体制要求下, 探讨不同频段电波的传播机制以及论证最佳的传播方式, 为发展新系统体制提供传播机制的定量分析依据;

② 在已定系统体制方案和指标要求下, 有关传播信道的时域、空域、频域、极化域、调制域以及码域特性的测试、计算和分析, 为系统技术参数的设计提供传播信道数据;

③ 基于传播介质环境参数的统计预测及有关实测诊断, 对信号在时域、空域及频域的传播效应进行预测, 并对异常传播和扰动效应做出预报或警报, 为系统在运行中调整(或自适应地改变)其可变参数或在数据处理中进行相应的传播误差修正, 提供传播环境服务, 从而保证实现或提高系统的潜在性能。

电波传播模型研究是电子系统工程的重要基础之一, 需要使用者、研制者及环境科学研究者等三方的密切合作, 在合理提出使用要求、适当确定系统设计指标和充分利用环境特性等三个方面达到良好的协调。必须着重指出的是, 随着电子系统技术水平的不断提高, 在许多情况下空间传播特性已经成为提高系统功能与精度的主要限定因素; 同时, 许多系统的运行需要有本地区甚至是实时传播环境参数的支持, 尤其是新体制的确定, 往往需要有传播机制和特性参数作为依据。这样的传播数据, 如果不在系统预研开始前就着手研究积累, 到系统开始论证设计需要时一般是来不及提供的。因此, 电波传播研究人员必须以系统应用问题为工作的中心, 同时系统总体应该将传播信道作为整个系统的主要组成部分, 而系统的用户一般不应只看到硬件设备的运转, 而应该熟悉系统性能与电波传播环境的关系, 掌握修正电波传播效应和利用环境条件的方法。

1.3 影响电波传播的环境

地球表面及其大气层是影响无线电传播的两个主要因素。地球大气分层结构包括: 对流层、平流层、电离层等, 如图 1.2 所示。对流层是地球上各种天气变化的发源地。平流层顶的臭氧层, 可吸收大部分有害的太阳辐射。无线电短波之所以能传输到很远的地方, 就是由于电离层能将它反射回地面。

下面我们将介绍对无线电波产生影响的对流层、平流层、电离层等特性。

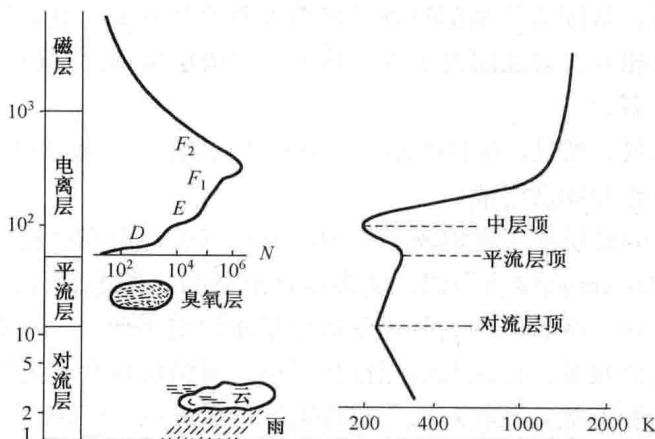


图 1.2 地球大气分层结构

1.3.1 对流层

对流层处于大气层的最底层,平均从地面到 13 km 左右。对流层从地球表面开始向高空伸展,直至对流层顶,即平流层的起点为止。它的高度因纬度而不同,在低纬度地区大约 17~18 km,在中纬度的地区高 10~12 km,在高纬度地区只有 8~9 km。在高纬度的地区,因为地表的摩擦力会影响气流,形成了一个平均厚 2 km 的行星边界层。这一层的形成主要依靠地形而有所不同,而且亦会被逆流层的分隔而与对流层的其他部分分开。

对流层是地球大气层最靠近地面的一层,它同时是地球大气层中密度最高的一层,蕴含了整个大气层约 75% 的质量。对流层中含有丰富的水分,它们以旋转气团、各种云层、雨、雾、雪、雹等形式出现在离地面数千米的高度范围内,形成湍流区。

在对流层中高度每升高 1 km,温度约下降 6.5°C 。到对流层顶温度大约已降到 -56°C 。由于水气和二氧化碳对太阳的强烈吸收以及地球的红外辐射,会使对流层中局部范围内的温度随高度增加而上升,出现温度递增现象。例如在沙漠地区,白天被太阳加热的地面,在夜里很快向外辐射大量热量以使贴近地面的空气层温度迅速降低,而较高高度的空气层温度却相对稳定,产生温度的递增现象。这种温度递增称为地面辐射温度递增。温度递增现象是形成大气波导的重要原因。

对流层对电波传播的影响主要取决于对流层本身的电气特性,它可用折射指数来描述。折射指数和气象三要素(温度、湿度和压强)有着密切关系。由于对流层中的大气温度、湿度和压强会随着时间和空间发生十分复杂的变化,因此就导致了对流层中各种各样的传播方式或效应,如传播路径弯曲的大气折射、多径时延、大气波导、多径效应、去极化现象、大气吸收、信号衰落以及水气凝结体和其他大气微粒的吸收与散射等现象。

1.3.2 平流层

平流层又称同温层,是从对流层到 60 km 高度的大气层,是地球大气层里上热下冷的一层。在平流层中各分层排列有序并不混合,其高温层置于顶部,而低温层置于低部,随高度上升而气温上升,是因为其顶部吸收了来自太阳的紫外线而被加热;这与位于其下贴近地表的对流层刚好相反,对流层是上冷下热的。平流层的顶部气温大概徘徊在 270 K 左右,与地面气温差不多。

平流层主要由氮气、氧气、少量的水气、臭氧(在 22~27 km 形成臭氧层)、尘埃、放射性微粒、硫酸盐质点等物质组成。

在中纬度地区,同温层位于离地表 10~50 km 的高度;而在极地,此层则始于离地表 8 km 左右。在 20~50 km 高度范围内,其温度逐渐升高,到达 50 km 时达到 0°C 左右的最大值。除臭氧外,这一区域中的大气化学成分基本恒定不变。臭氧能吸收太阳的紫外辐射,然后向平流层释放热量,使大气层保持热平衡;同温层保存了大气中 90% 的臭氧,位于这一高度的臭氧能够有效地吸收对人类健康有害的紫外线(UV-B 段),从而保护了地球上的生命。

1.3.3 电离层

电离层的形成是太阳辐射与地球上层大气原子和分子相互作用而使大气电离的结果，在中低纬度电离能量主要是太阳短波长的电磁辐射，即紫外线和 X 射线；在极区起重要作用的还有太阳能力粒子（质子和电子）。

电离层的特性，除了受电离源变化的影响外，还有地球磁场的影响，因此电离层是一个具有复杂结构特性与变化过程的空间层区域。电离层是电中性、少量成分、各向异性、有耗、色散、有源、非均匀的时变介质。电离层可分为 D 层、E 层、F₁ 层和 F₂ 层，其结构如图 1.3 所示。

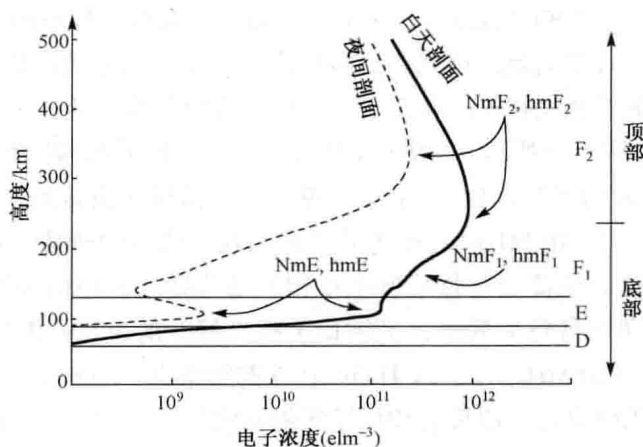


图 1.3 电离层分层结构

电离层分层特性如表 1.1 所列。

表 1.1 电离层分层特性

名称	C	D	E	F	
				F ₁	F ₂
高度 (km)	50~70	70~90	90~130	130~210	>130
电离浓度 (elm ⁻³)	<10 ⁸	<10 ⁹	3×10 ⁸ ~3×10 ¹¹		5×10 ¹⁰ ~5×10 ¹²
主要电离源	宇宙射线	X 射线		EUV (14~80 nm)	
昼夜变化	仅存在于白天		电子浓度中午最大，有明显太阳天顶角变化特性；夜间很弱	仅存在于白天	电子浓度中午最大
季节变化	冬季较经常出现	夏季最强		夏季较明显	冬季中午电子浓度高出夏季 20%
太阳活动周期变化	出现率与太阳活动反相	与太阳活动同相		太阳活动低年较明显	太阳活动周期期间，电子浓度变化可达 10 倍
纬度变化	中纬经常出现	磁暴恢复期，亚极光带和中纬电子浓度增加	极光带夜间电离源为磁层粒子		磁赤道两侧 20°~30° 内电子浓度呈驼峰状
非规则变化		冬季异常	突发 E 层，在赤道、中纬和高纬特性明显不同		扩展 F 层

1.4 电波传播特性及其应用

从电磁频谱自身特性来看,频率越低,穿透性也就越好,传输距离就越远;但本身的发射接收成本也越高,并且数据速率很低。因此低端优质频谱资源就显得极为宝贵,但是实际上新研电子装备的选频也要综合考虑各种因素,并且各频段的传播特性是选频的基础。下面介绍各个频段的传播特性及其应用业务。

(1) VLF ($f < 30 \text{ kHz}$): 频率低于 30 kHz , 传播损耗近似自由空间传播损耗。在 VLF 频带内, 电波可以在全球范围内的电离层与地球表面之间的波导中传播。

(2) LF ($30 \text{ kHz} < f < 300 \text{ kHz}$): 在这个频带内, 主要有两种不同类型的传播模式: 即经常用来计算有用信号限值的地波模式和经常用来传播无用信号的电离层(天波)模式。天波信号幅度具有明显的昼夜变化, 这是由于电离层吸收变化的缘故。这一传播模式有以下区域特点: 在该区域, 天波不会抵达(即跳过)地面, 每一与地面的截断距离正好是跳过距离。

(3) MF ($300 \text{ kHz} < f < 3 \text{ MHz}$): 在此频带内, 传播模式也是地波和天波。

(4) HF ($3 \text{ MHz} < f < 30 \text{ MHz}$): 在此频率范围内, 信号的传播一般通过电离层反射, 因而表现出很大的变化。电离层传播特性主要指的是传播过程中的多径失真、信号干扰情况。由于长距离传播和频谱资源拥挤, 必须使用相当复杂的传播预测模式。

(5) VHF 和 UHF ($30 \text{ MHz} < f < 3 \text{ GHz}$): 在这些频带内, 除低端不会出现通过规则的电离层进行的传播外, 还会出现受超折射和传导所限制的气候效应, 这可能是大气折射指数中正常梯度的转换所引起的。自由空间传播的另一重要因素是, 由包括地球的曲率、地形和建筑物引起的对流层散射和绕射。取决于特定的传播环境, 下述内容可以用来估算传播损耗:

- 自由空间传播。在某些环境中, 只假定有用信号在自由空间的传播就足够了。
- 平坦地面绕射。对有用信号预测, 在大于视距的范围时, 需要考虑地球的曲率。
- 粗糙地面传播。可由地形数据库得到的地形剖面进行传播的详细计算。

此外, 还有必要考虑有可能造成干扰的其他传播机理。这些机理包括:

- 电离层传播。在某些季节和一天的某些时刻, 电离层传播模型, 如通过偶尔发生的 E 层, 可以允许在最高约 70 MHz 频率上进行长距离传播。
- 超折射和传导。

(6) SHF 和更高频率 ($f > 3 \text{ GHz}$): 前面所述的传播因素(天波除外)均适用于更高的频率。然而, 必须考虑衰减、散射和由降雨及其他大气微粒产生的交叉极化。对于 1 GHz 以上频段, 必须考虑大气层的气体引起的衰减。发生在传播路径上的降雨会产生多种问题。频率大于 10 GHz 时, 雨滴引起的衰减, 可能对信号质量造成严重的衰落。估计衰减概率分布的方法, 通常以时间概率超过 0.01% 的雨强密度值 $R_{0.01} (\text{mm/h})$ 为基础。这个值应以雨量计所做的长期降雨观测为基础, 采用大约 1 分钟的降雨时间来进行辨别。在清洁的空气条件下, 地面传播可能遇到由于绕射、大气和表面多径、波束扩散、天线散焦造成的衰落, 也可能遇到由于大气层气体造成的衰减, 以及在某些区域内沙尘暴造成的衰减。

(7) 地空传播: 在地一空路径上, 最主要关心的传播现象是信号衰减、闪烁衰落和信号的去极化, 每一种现象的重要性均取决于路径几何尺寸、气候和电子系统的参数。当考

虑无用信号时，必须要考虑水气引起的交叉极化、电离层的极化旋转和电离层闪烁效应。当信道仰角变小时，路径损耗将超过自由空间值，当然，当障碍增加时，也可能出现中断现象。各频段的传播模式和应用如表 1.2 所示。

表 1.2 各频段的传播模式和应用

频段	频率范围	传播模式	主要应用
VLF	3~30 kHz	波导传播	远程无线电导航和战略通信
LF	30~300 kHz	地波、天波传播	远程无线电导航和战略通信
MF	300 kHz ~3 MHz	地波、天波传播	中程点对点、广播和海事移动通信
HF	3~30 MHz	地波、天波传播	点对点、全球广播和移动通信
VHF	30~300 MHz	空间波、绕射、对流层散射传播	短程和中程点对点、移动、LAN、音频和视频广播、个人通信
UHF	300 MHz ~3 GHz	空间波、绕射、对流层散射、视距传播	短程、中程和远程点对点、移动、LAN、音频和视频广播、个人通信、卫星通信
SHF	3~30 GHz	视距传播	中程和远程点对点、移动、LAN、音频和视频广播、个人通信、卫星通信
EHF	30~300 GHz	视距传播	短程点对点、微波蜂窝、LAN、个人通信、卫星通信

1.5 电波传播模型的分类

电波传播模型是指无线电波在空间传播过程中物理特征所形成模式，这里是特指远场区域中的电波传播模型。利用这些模型，我们能够更好地理解电波在空间的传播特征，并定量计算其传播参数和预测场强值。

本节提供了适用于不同频段的传播模型，分类如表 1.3 所示。

表 1.3 电波传播传播模型

传播模型					主要适用频段		
自由空间传播模型					-		
波导模传播模型					3 ~ 30 kHz		
地波传播模型					3 kHz ~ 30 MHz		
低于 150 kHz 天波传播模型					< 150 kHz		
150 ~ 1700 kHz 天波传播模型					150 ~ 1700 kHz		
1600 kHz ~ 30 MHz 天波传播模型					1600 kHz ~ 30 MHz		
地面 固定 / 移动 传播模型	确定模型	视距传播		视距传播模型	>30 MHz		
		空间波传播		空间波传播模型	30 MHz ~ 30 GHz		
		绕射传播	子路径绕射		子路径绕射传播模型	30 MHz ~ 30 GHz	
			光滑地面绕射		光滑地面绕射传播模型	30 MHz ~ 30 GHz	
			障碍绕射	刃形障碍绕射		刃形障碍绕射传播模型	30 MHz ~ 30 GHz
				柱形障碍绕射		柱形障碍绕射传播模型	30 MHz ~ 30 GHz
		对流层波导传播		对流层波导传播模型	500 MHz ~ 50 GHz		
		对流层散射传播		对流层散射传播模型	100 MHz ~ 10 GHz		
	经验半经验模型	Egli 模型			40 ~ 400 MHz		
		GB/T 14617.1-1993 模型			30 MHz ~ 3 GHz		
		Okumura-Hata 模型			100 MHz ~ 3 GHz		
		Rec. ITU-R P.1546 模型			30 MHz ~ 3 GHz		

续表

传播模型	主要适用频段
航空移动和导航传播模型	125 MHz ~ 15.5 GHz
地空固定传播模型	1 ~ 55 GHz
地空陆地移动传播模型	0.85 ~ 20 GHz
地空海事移动传播模型	0.8 ~ 20 GHz
地空航空移动传播模型	1 ~ 2 GHz

1.6 本书构架

本书由 9 章组成, 主要阐述了各频段电波传播模型选择及场强预测的工程应用方法。

第 2 章将介绍自由空间传播模型, 它是无线电工程的一个基本参数。自由空间中的电波传播可以提供一个有用的比较标准, 来评估传输路径的性能。这一章包括自由空间中电磁场的基本定律、平面电磁波的传播和辐射模型、自由空间通信链路的传播模型、自由空间雷达系统的传播模型等内容。

第 3 章将介绍地—电离层波导模传播模型, 在甚低频及其以下频段的电波远距离传播, 电波被限制在大地和电离层之间的空间中传播, 该空间就像一个波导, 故该频段的传播通常采用“波导模概念”来描述传播场的特性, 在波导中的电磁场可以表示成一系列传播模式的叠加。这一章包括波导模传播机理、波导模方程、波导模场参数以及波导模场强预测等内容。

第 4 章将介绍地波传播模型, 它是指沿着大地或海水与空气交界面传播的无线电波。地波在传播过程中场强和相位不仅随距离变化, 而且还与地面几何因素(距离、地形和地球半径等)以及物理因素(大气折射率、地面电导率和相对介电常数等)有关。这一章包括均匀光滑地面的传播模型、分段均匀路径的传播模型、不规则地面上地波传播模型以及地下或海水中的渗透传播模型等内容。

第 5 章将介绍天波传播模型。天波是电磁波经电离层反射或折射后返回地面接收点的传播。电离层能反射电波, 也能吸收电波。但是天波传播受频率、昼夜、日地物理事件等因素的影响很大。这一章分别介绍低频天波传播模型、中频天波传播模型和高频天波传播模型。

第 6 章将介绍超短波微波波段地面传播模型。这一章将介绍该频段所涉及的确定性预测模型和经验/半经验预测模型等内容, 其中确定性预测模型包括视距传播模型、绕射传播模型、对流层散射传播模型以及对流层波导传播模型等内容, 经验/半经验预测模型包括 Egli 模型、Okumura 模型、Okumura-Hata 模型、Lee 模型、GB/T 14617.1-93 模型、Rec.ITU-R P.1546 模型等内容。

第 7 章将介绍航空移动和导航传播模型, 给出了工作频率在 125 MHz 到 30 GHz 频段内航空移动业务电波传播预测方法, 包括传播机理、预测方法、传输曲线、预测流程和场强换算等内容。