

移动场景下 无线信道测量与建模： 理论与应用

何睿斯 著

Wireless Channel Measurement and
Modeling in Mobile Communication Scenario:
Theory and Application



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

移动场景下 无线信道测量与建模： 理论与应用

何睿斯 著

Wireless Channel Measurement and
Modeling in Mobile Communication Scenario:
Theory and Application

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

移动场景下无线信道测量与建模：理论与应用 / 何睿斯著. — 北京：人民邮电出版社，2018.6

ISBN 978-7-115-48565-6

I. ①移… II. ①何… III. ①移动通信—无线电信道—测量技术②移动通信—无线电信道—信道模型—系统建模 IV. ①TN929.5②TN921

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第117587号

内 容 提 要

本书从移动场景下无线通信系统的设计与优化需求出发，深入揭示了移动场景下无线信道的基本特征、测量方法与建模理论。内容涵盖电波传播与非平稳信道基本理论、时变信道测试理论与方法、测试案例分析、无线信道建模理论与参数萃取方法、公路交通信道测量与建模、轨道交通信道测量与建模、时变信道动态建模与仿真方法等。

本书可以作为电波传播与无线信道研究人员、移动通信系统研发与设计人员、相关专业高等院校师生的参考读物，也可供具有一定移动通信技术基础的专业技术人员或管理人员阅读。

-
- ◆ 著 何睿斯
责任编辑 李彩珊
责任印制 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
固安县铭成印刷有限公司印刷

- ◆ 开本：800×1000 1/16
印张：14.75
字数：276千字
- 2018年6月第1版
2018年6月河北第1次印刷



定价：89.00 元

读者服务热线：(010) 81055488 印装质量热线：(010) 81055316

反盗版热线：(010) 81055315

前言

无线信道基本特性的研究与建模是任何无线通信系统设计首先要解决的问题。无线信道是连接无线通信系统中发射端与接收端的物理媒介，其特性直接决定了无线通信系统的性能，例如，通信系统的传输容量上限、接收端信号的误码率以及系统的吞吐量等。无线信道不仅时刻受到噪声和干扰的影响，同时还受到环境中障碍物及其自身随机运动的影响，这使得采用合理的方法准确地刻画无线信道变得十分重要。在无线通信系统的设计、仿真、优化中，需要用数学化的形式对信道加以描述，将复杂多变的无线信道加以抽象，这就形成了信道模型。

移动场景下无线信道的测量与建模理论一直是无线信道理论研究的难点。对于移动场景下的无线信道，其传播环境比固定无线通信的环境更为复杂，通信终端的移动性、环境中其他物体的随机移动均会对无线信道的基本特性产生较大的影响，信道内的多径信号存在大量复杂的动态变化和随机生灭，因而不能简单地用固定无线通信的电波传播理论与信道建模方法来开展分析，必须根据移动场景下时变信道的特点开展针对性的测量与建模。未来安全、可靠的智能交通系统建设离不开支持高速移动应用的无线通信系统的支撑，而无线网络的设计则需立足于对移动场景下无线信道的深入研究。

本书作者结合自身在高速铁路、车联网通信场景中信道测量与建模的长期研究积累与实践经验，围绕移动场景下时变非平稳信道的测量与建模理论、相关研究成果及应用撰写了本书。全书共分5章，基本涵盖了移动场景下信道测量与建模的主要内容。第1章简明扼要地介绍了电波传播的基本原理以及无线信道，特别是移动场景下无线信道的基本特征。第2章详细介绍了无线信道的测试理论与方法，包括时域信道测量与频域信道测量的区别，并分析了几个移动场景下无线信道的典型测试案例。第3章全面系统地介绍了无线信道的建模理论

与方法，包括统计性、确定性、基于几何的随机性信道建模 3 种，并介绍了无线信道参数萃取方法。第 4 章详细阐述了公路交通场景中移动性信道的测试与建模研究，包括支持非平稳信道仿真的动态方向性模型、车载通信中复杂非视距场景下的信道特性及模型。第 5 章详细阐述了高速铁路场景下无线信道的测量与建模研究，包括最新提出的高速铁路传播场景分类方法、大尺度传播模型库、高架桥及路堑等复杂场景下小尺度衰落信道建模等。

本书针对时变非平稳信道测量与建模理论的介绍具有一定的先进性，与当前 5G 车联网、高速铁路无线通信等技术的发展密切相关，它将有助于我国无线通信领域的工程技术和研究人员以及高等院校师生，正确理解和掌握移动场景下无线信道的特征、测量与分析方法、建模及仿真技术等。

本书的撰写得到了北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室的支持和资助，也得到了国家自然科学基金（No.61501020, No.61771037）的资助，在此表示感谢。感谢北京交通大学的钟章队教授、艾渤教授，两位专家对本书提出了许多宝贵的指导和建议，也衷心感谢作者团队的研究生在资料整理、格式编排、文字校验方面的帮助和支持。最后，对长期支持我们研究工作的国内外专家和人士表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，也鉴于目前移动性场景下非平稳信道建模理论等方面尚有许多理论和技术问题有待研究和解决，本书中难免有疏漏甚至不当之处，欢迎广大读者批评指正。

何睿斯

2017 年 8 月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电波传播基本原理	1
1.1.1 自由空间传播损耗	3
1.1.2 反射和透射	4
1.1.3 绕射	5
1.1.4 散射	7
1.2 无线信道	8
1.2.1 损耗与衰落	9
1.2.2 频率选择性	13
1.2.3 多普勒效应	15
1.2.4 信道的广义平稳假设	18
1.2.5 多径成簇效应	21
参考文献	27
第 2 章 无线信道测量技术	31
2.1 信道测试的意义	31
2.2 时域信道测试	33
2.2.1 基于脉冲的信道探测技术	33
2.2.2 基于相关的信道探测技术	34

2.3	频域信道测试	35
2.4	静态和动态信道测试	36
2.5	动态信道测试活动	38
	参考文献	45
第3章	无线信道建模理论与方法	51
3.1	统计性信道建模	53
3.1.1	窄带模型	53
3.1.2	宽带模型	57
3.1.3	方向性信道模型	61
3.2	确定性信道建模	67
3.3	基于几何的随机信道建模	73
3.4	时变非平稳信道建模理论	79
3.5	多径参数萃取方法	80
	参考文献	85
第4章	公路交通信道测量与建模	95
4.1	概述	95
4.2	公路交通信道测量	99
4.2.1	V2V 信道测试系统	99
4.2.2	V2V 信道测量场景	102
4.2.3	测量数据校准和预处理	105
4.3	时变非平稳信道动态建模	107
4.3.1	时变信道非平稳特征度量方法	107
4.3.2	动态信道模型结构	116
4.3.3	多径萃取及动态跟踪	118
4.3.4	时变信道建模	123
4.3.5	模型动态仿真及验证	131
4.4	复杂场景信道建模	135
4.4.1	大型车体遮挡场景信道建模	135

4.4.2 交叉路场景信道建模	147
参考文献	157
第5章 轨道交通信道测量与建模	167
5.1 概述	167
5.2 场景分类及信道测量	171
5.2.1 高速铁路场景分类标准	171
5.2.2 高速铁路测试系统及信道测量	175
5.3 大尺度信道建模	180
5.3.1 路径损耗	180
5.3.2 阴影衰落	188
5.4 小尺度信道建模	197
5.4.1 高架桥场景小尺度信道建模	197
5.4.2 路堑场景小尺度信道建模	206
5.4.3 基于多重散射的衰落机理研究及信道建模	213
参考文献	218

第1章 绪论

无线信道的特性是研究、分析、评估任何无线通信系统首先要遇到的问题，也直接关系到无线通信工程设计中一系列系统设计问题。移动场景下的无线信道尤为复杂，不能简单地用固定无线通信的研究方法和结论来开展分析，必须密切结合移动环境和场景的具体特点，借助电波传播基础理论进行分析和研究。电波传播作为一门理论性很强的学科，经过了 100 多年的发展，已经获得了丰硕的成果。但客观世界是无穷的，电波传播的一些基本规律虽然已经掌握，但结合具体应用、具体环境有待研究的问题还很多，特别是在移动场景下的传播规律与无线信道特性还有待进一步研究；同时，电波传播又是一门实用性极强的技术，它的研究一直是围绕应用需求展开的。特别是发展到了今天，其发展动力更多地来自应用的需求。也就是说，电波传播发展的总趋势是应用牵引，交叉渗透。移动通信是当今通信领域最为活跃和发展最为迅速的领域之一，也是在 21 世纪对人类的生活和社会发展有重大影响的科学技术领域之一。移动场景下的电波传播理论与无线信道研究正逐渐成为该领域研究的热点和难点。

1.1 电波传播基本原理

首先介绍影响电磁波传播的基本原理和机制。人们对无线电波传播的最初了解要追溯到

詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 的开创性研究。Maxwell 于 1864 年建立的电波传播理论预言了无线电波的存在。1887 年海因里希·鲁道夫·赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz) 证实了电磁波的物理存在。然而 Hertz 没有看到电磁波的实用特性, 他认为由于声波的频率非常低并且电磁波传播特性很差, 因此无线电波不能用来携带语音。Maxwell 和 Hertz 的研究对无线通信领域的发展起到了重要作用。1892 年, 英国科学家威廉·克鲁克斯爵士 (Sir William Crookes) 预言了使用调制的发送接收设备实现长距离电报通信的可能。1894 年, 奥利弗·洛奇 (Oliver Lodge) 运用这些理论建造了第一个无线通信系统, 尽管其传输距离只有 150 m。1897 年, 古列尔莫·马可尼 (Guglielmo Marconi) 成功地把无线信号从英国的怀特岛发送到 18 英里 (29 km) 外的一艘拖船上。到 1901 年, Marconi 的通信系统已经能够横跨大西洋。1906 年, 雷金纳德·费森登 (Reginald Fessenden) 使用幅度调制第一次进行了语音和音乐的传送, 他把低频信号调制到高频电磁波上进行传输, 从而突破了 Hertz 所说的低频传播限制, 这也是今天在各种无线通信系统中普遍使用的方法。如今, “移动电波传播” 这个词语已经囊括了无线通信实际运用中的所有情况, 无论发送端和接收端能否移动, 或是否正在移动, 它也理所应当地涵盖了卫星移动通信、航海移动通信以及无绳电话、传统的私人移动通信系统及蜂窝系统。其中, “陆地移动电波传播” 的发展尤为引人注目, 因为它直接服务于现实社会的大众群体^[1]。

电波传播大、小尺度范畴的划分是对电波传播特性认知的巨大进步, 划分的依据是人们观测无线电波窗口的大小。电波传播的大尺度特性是依据其距离尺度定义的, 反映了接收机和发射机之间长距离 (一般几百米到几千米) 的信号场强变化。对于大尺度特性的研究侧重于路径损耗的预测和阴影衰落的估计。广义的大尺度特性包含路径损耗和阴影衰落两部分。前者是由发射功率的辐射扩散及信道的传播特性造成的; 后者则是由随机地存在于发射机与接收机之间的障碍物通过吸收、反射、绕射和散射等方式造成的。小尺度特性描述短距离 (几个波长) 或短时间 (秒级) 内接受场强的快速波动的特性, 其往往是由多径效应引起的。自 20 世纪 50 年代起, 大量学者在各类场景下针对信道的大、小尺度特性开展了研究, 建立了一系列经典的信道模型, 为今天蓬勃发展的通信行业做出了巨大贡献。无线电波传播的研究在 20 世纪 70—90 年代达到顶峰, 大量基础理论以及传播模型都已建立, 现如今, 无线电波传播的研究处于一个平稳发展的阶段。近些年, 电波传播的研究呈现 3 种趋势: 新的电波传播预测方法、更高的传输频段和带宽、新的无线通信应用场景。

直射、反射、绕射和散射 4 种传播机制是人类认知无线电波传播的开端, 也是无线信道建模的基础。电波传播机制是指电波接触到传播环境时发生变化的规律。对于陆地移动通信

系统所用的特高频 (UHF, 300~3 000 MHz) 频段的电波而言, 主要的传播机制有: 自由空间传播、反射、绕射、散射。其他传播机制有: 透射及吸收、波导、大气效应。电波传播理论中最简单的情况是自由空间传播, 即一个发送天线和一个接收天线存在于自由空间中。在更为实际的情况下, 环境中往往还存在绝缘和导电的障碍物, 又称相互作用体 (Interacting Object, IO)。如果这些相互作用体有光滑的表面, 电磁波就会被反射, 而另一部分能量则穿透相互作用体传播。如果相互作用体表面粗糙, 电磁波将发生散射。最终, 电磁波将在相互作用体边缘发生绕射。接下来, 将对上述效应做更为详细的阐述。

1.1.1 自由空间传播损耗

自由空间是指一种理想的、均匀的、各向同性的介质空间, 电磁波在该介质中传播时, 不发生反射、折射、散射和吸收现象, 只存在电磁波能量扩散而引起的传播损耗。值得注意的是, 自由空间传播损耗并非真正意义上的损耗, 因为电磁波携带的能量并未减少。接收台收到的能量之所以降低, 是因为单位面积上的电磁波密度在经过一段距离的传播后在接收点处有所降低。如何判断发射台和接收台之间“无阻挡”是理解自由空间传播机制的关键。尽管射线理论将电磁波的传播简化为了无限窄的射线, 但实际上这条“无限窄”的射线也是有宽度(厚度)的(波长不为0), 而这个“宽度(厚度)”可以由第一菲涅尔区来描述, 即直线传播的电波主要能量集中在以发射台和接收台为焦点的椭球体内。只有当这个椭球体(第一菲涅尔区)内无阻挡时, 才能认为电波传播符合自由空间传播机制。否则, 即使发射台和接收台之间有视距存在, 而第一菲涅尔区内有阻挡, 电波传播仍然不符合自由空间传播机制^[2]。

在自由空间中, 点源向四周均匀地辐射能量, 距离发射台任意距离处的接收功率可由 Friis (费叶斯) 公式求出。能量守恒定律表明, 对围绕发送天线的任何一个闭合表面上的能量密度积分, 都应该等于发送功率。假设某一闭合表面是以发射机天线为圆心、半径为 d 的球面, 并且假设发送天线的辐射各向同性, 那么该表面的能量密度为 $P_{TX}/(4\pi d^2)$ 。接收机天线存在一个“有效面积” A_{RX} 。可以认为撞击到该区域的所有能量都被接收天线收集到, 于是接收能量可以表示为:

$$P_{RX}(d) = P_{TX} \frac{1}{4\pi d^2} A_{RX} \quad (1-1)$$

如果发送天线不是各向同性的, 那么能量密度必须要乘以接收天线方向上的天线增益

G_{TX} 。发送天线功率与所考虑方向增益的乘积也称作等效各向同性辐射功率 (Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP)。对于给定的功率密度, 有效天线面积正比于从天线连接处收到的功率。可以证明天线有效面积与天线增益存在如下关系:

$$G_{RX} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{RX} \quad (1-2)$$

在式 (1-2) 中最值得注意的是, 对于一个固定的天线面积, 天线增益随频率增加而增长。这个特性很直观, 因为天线的方向性取决于由波长确定的尺寸。将式 (1-2) 代入式 (1-1), 得到接收功率 P_{RX} 为以自由空间距离 d 为变量的函数, 这一关系也被称为 Friis 定律:

$$P_{RX}(d) = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中的 $[\lambda / (4\pi d)]^2$ 为自由空间损耗因子。自由空间的传播损耗公式在很长一段时间内作为电波传播损耗特性测量与研究的参考。由于电磁波在大气中的传播机理与在自由空间理想状态下的传播机理近似相同, 因此可以将电磁波在大气中的直射传播简化为自由空间中的直射电波传播。自由空间的传播模型往往用于预测接收机和发射机之间的路径, 是完全无阻挡的视距路径时接收信号的强度。

1.1.2 反射和透射

反射和透射机制的研究得益于物理学家在声学、几何光学和电波传播领域的贡献^[3]。电波在不同性质的介质交界处, 会有一部分发生反射, 一部分通过。如果平面波入射到理想电介质的表面, 则一部分能量进入第二介质, 一部分能量反射回到第一介质, 没有能量损耗。如果第二介质为理想反射体, 则所有的入射能量被反射回第一介质, 无能量损耗。反射波和传输波的电场强度取决于菲涅尔 (Fresnel) 反射系数 (Γ)。反射系数为材料的函数, 并与极性、入射角和频率有关。一般来说, 电磁波为极化波, 即在空间相互垂直的方向上同时存在电场成分。极化波在数学上可表示成两个空间互相垂直成分的和, 例如水平和垂直、左手环和右手环极化成分等。对一定的极性, 可通过叠加计算反射场。反射波的电场强度可以通过反射系数 R 与原媒介中的入射波联系在一起, R 的大小由波的极化方式、入射角和传播电波的频率决定, 反射系数定义为反射波场强 E_r 与入射波场强 E_i 的比值:

$$R = \frac{E_r}{E_i} = |R| e^{-j\phi} \quad (1-4)$$

其中, $|R|$ 为反射点上反射波场强与入射波场强的振幅比, ϕ 为反射波相对于入射波的相移。

从叠加的角度考虑, 在解决一般反射问题时, 仅需考虑两个正交极化分量。在介质边缘处, 水平极化和垂直极化情况下的反射系数可以表示为^[3]:

$$R_{\parallel} = \frac{\eta_2 \sin \theta_t - \eta_1 \sin \theta_i}{\eta_2 \sin \theta_t + \eta_1 \sin \theta_i} \quad (1-5)$$

$$R_{\perp} = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_t}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_t} \quad (1-6)$$

其中, $\eta_i = \sqrt{\zeta_i / \varepsilon_i}$ 为第 i ($i=1,2$) 种介质的固有阻抗, ζ_i 和 ε_i 分别表示第 i 种介质的磁导率和介电常数; θ_i 、 θ_t 分别表示电磁波入射角和折射角。对地面反射波而言, 若令接收到的直射波场强为 E_d , 则反射波场强为 $E_r = E_d |R| e^{-j(\phi + \Delta\phi)}$, $\Delta\phi$ 表示入射波变化的相位, 则总接收场强 E_t 是两条路径电波的叠加, 可表示为:

$$E_t = E_d (1 + |R| e^{-j(\phi + \Delta\phi)}) \quad (1-7)$$

式 (1-7) 表明, 直射波和地面反射波的合成场强随反射系数和路径差的变化而变化。当 ϕ 和 $\Delta\phi$ 同相时, E_t 比 E_d 大, 信号得到加强; 而当两者相反时, E_t 比 E_d 小, 信号被削弱或被抵消, 信号电平的这种扰动就是衰落。理想地面反射时, 反射系数 $R = -1$, 可以证明^[3]发射端与接收端 (T-R) 间距离为 d 处的接收信号功率为:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 中, d 是 T-R 间距离, h_t 、 h_r 分别为发射和接收天线的高度。

波的透射指入射波射入和穿过某个相互作用体。透射对于光传播进入建筑物是非常重要的。如果基站在建筑物以外, 或在另一个房间里, 那么波就要穿透一座墙 (绝缘层), 才能够到达接收机。

1.1.3 绕射

无线电波的反射现象基于一个假设: 反射面远大于波长。这一假设也限制了反射机制在电波传播预测中的应用。电波在传播途径中遇到大障碍物时, 会绕过障碍物向前传播, 这种现象叫作电波的绕射。超短波、微波的频率较高、波长短、绕射能力弱, 在高大建筑物后面信号强度小, 容易形成所谓的“阴影区”。阴影区内信号质量受到影响的程度, 不仅和建筑

物的高度有关，还和接收天线与建筑物之间的距离以及频率有关。绕射使得无线电信号绕地球曲线表面传播，能够传播到阻挡物后面。尽管接收机移动到阻挡物的阴影区时，接收场强衰减非常迅速，但绕射场依然存在并常常具有足够的强度。1678年惠更斯（Huygens）原理的提出，使得绕射现象开始被人们所关注，这也极大地促进了电波传播的研究。Huygens原理表明电波传播中波前上的所有点可作为产生次级波的点源，这些次级波组合起来形成传播方向上新的波前。绕射由次级波的传播进入阴影区而形成，阴影区绕射波场强为围绕阻挡物所有次级波的矢量和。在移动通信系统中，对次级波的阻挡产生了绕射损耗，仅有一部分能量能绕过阻挡体。也就是说，阻挡体使一些菲涅尔区（Fresnel Zone）发出的次级波被阻挡，根据阻挡体的几何特征，接收能量为非阻挡菲涅尔区所贡献能量的矢量和。一般来说，如果阻挡物不阻挡第一菲涅尔区，则绕射损失最小，绕射影响可忽略不计。

1962年，Keller J B提出了几何绕射理论^[4]，使得绕射损耗的精确计算成为可能，但该理论的复杂性妨碍了它在无线通信中的应用。楔形绕射简化了几何绕射理论^[5]，但仍没法避免数值计算。而菲涅尔刃形绕射模型^[6]则因其简单性成为最常用的绕射模型。其刃形绕射波场强可表示为：

$$\frac{E_d}{E_0} = F(\nu) = \frac{(1+j)}{2} \int_{\nu}^{\infty} e^{-\frac{j\pi t^2}{2}} dt \quad (1-9)$$

其中， E_0 为自由空间场强。 ν 是菲涅尔绕射参数，可使用图表进行计算。刃形绕射损耗的近似解可以表示为^[3]：

$$PL_D = \begin{cases} 0, \zeta > 1 \\ 20\lg(0.5 + 0.62\zeta), 0 \leq \zeta \leq 1 \\ 20\lg(0.5e^{0.95\zeta}), -1 \leq \zeta < 0 \\ 20\lg[0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.1\zeta + 0.38)^2}], -2.4 \leq \zeta < -1 \\ 20\lg\left(-\frac{0.225}{\zeta}\right), \zeta < -2.4 \end{cases} \quad (1-10)$$

随后，Bullington提出的用等效阻挡体代替一系列阻挡体的方法^[7]，极大地简化了计算，并扩展了菲涅尔刃形绕射模型的适用范围。但对于多刃形障碍物，数学处理则变得非常棘手。Lee在参考文献^[8]中给出了刃形绕射模型的近似解，方便了该模型的使用，但同时也引入了一定的预测误差。绕射理论的研究极大地完善了电波传播预测体系，使得更为精确的确定性建模成为可能。

值得一提的是,菲涅尔区理论在计算绕射损耗的过程中起到了极大的推动作用。在计算刃形损耗时,Fresnel-Kirchoff绕射参数 v 在式(1-4)中扮演着自变量的角色,其表达式可以写为:

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = \alpha \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}} \quad (1-11)$$

同时,菲涅尔半径决定了哪些区域内的障碍物会对电波传播产生较大影响,其表达式为:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1-12)$$

一般来讲,当阻挡物不遮挡第一菲涅尔区时,绕射的影响可以忽略不计。事实上,菲涅尔区的作用不仅体现在绕射损耗上,它实际上决定了无线电波传播的过程中电波能量的耗散情况,当菲涅尔区域内的障碍物情况不发生改变时,无线电波的能量随距离的耗散速度也保持不变。用数值方法计算菲涅尔区域内的障碍物对电波能量的耗散情况,能实现任意场景下无线电波传播的预测,但这种数值的计算往往十分复杂,使得这种方法的应用受到了限制。尽管如此,仍有不少学者致力于该问题的研究,例如 Sweeney D G 在参考文献[9]中研究了菲涅尔区域内的雨滴对电波传播的影响; Tatarskii V I 在参考文献[10]中研究了任意障碍物存在于菲涅尔区域内时,电波传播所受的影响。然而,上述工作都基于过多的简化性假设,使得结果的实用性受到影响。

1.1.4 散射

在实际通信系统中,由于大量物体的尺度与通信波长相当及环境中物体表面的粗糙,散射现象十分普遍,这也导致了实际测量的接收信号比单独绕射和反射模型预测的要强。当电波穿行的介质中存在小于波长的物体并且单位体积内阻挡体的个数非常大时,会发生散射。粗糙表面、小物体或其他不规则物体,如树叶、街道标志和灯柱等,都会引发生散射。对于散射的最初研究集中在电离层和对流层。随后,人们开始在陆地移动通信系统中考虑散射的影响,瑞利(Rayleigh)准则成为判断散射是否发生的标准^[11]。若给定入射角 θ_i ,则定义表面平整度的参考高度(或称临界高度) h_c 为:

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i} \quad (1-13)$$

若表面上最大凸起高度小于 h_c ，则认为表面是光滑的，这时的散射属于散射点的镜面反射；若高度大于 h_c ，则认为表面是粗糙的，对于粗糙表面，其表面反射系数需要乘上一个散射损耗因子 ρ_s ，以代表减弱的反射场。参考文献[12]提出了表面高度 h 是具有局部平均值的服从高斯（Gaussian）分布的随机变量， ρ_s 可表示为：

$$\rho_s = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (1-14)$$

其中， σ_h 为表面高度与平均表面高度的标准偏差。参考文献[13]对由参考文献[12]推导的散射损耗因子进行了修正，使其与测量结果更加一致：

$$\rho_s = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] I_0 \left[8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (1-15)$$

其中， I_0 为第一类零阶贝塞尔函数。粗糙表面的散射场强可利用修正的反射系数 $\rho_s R$ 来求解， R 为反射系数。然而，由于散射波所经历的衰减较大，在某些场景的确定性建模中往往忽略散射的影响。

直射、反射、绕射和散射 4 种传播机制是人类认识无线电波传播的开端，也是无线信道研究的基础。接下来将基于电波传播的基本原理进一步介绍无线信道的基本特性。

1.2 无线信道

无线传播信道是连接无线通信系统中发射端与接收端的物理媒介。传播信道的特性直接决定了无线通信系统的性能，例如，通信系统的传输容量上限、接收端信号的误码率以及系统的吞吐量等。对于电波传播现象以及信道特性的深入研究是实现系统最优设计的先决条件。无线信道不像有线信道那样固定并可预见，而是具有极度的随机性，不仅时刻受到噪声和干扰的影响，同时还受环境中障碍物及其自身随机运动的影响。信号从发射天线到接收天线的传输过程中，会经历各种复杂的传播路径，包括直射路径、反射路径、衍射路径、散射路径以及这些路径的随机结合，这使得采用合理的方法准确地刻画无线传播信道变得十分重要。

移动通信的用户由于要进行自由移动，其位置不受束缚，这也导致了移动场景下的无线

信道特性更加难以预测^[14]。首先,移动通信的工作环境十分复杂,在移动场景下尤为突出,无线信号不仅会随着传播距离的增加而发生弥散损耗,并且会受到地形、建筑物的遮蔽而发生“阴影效应”,而且信号经过多点反射,会从多条路径到达接收地点,这种多径信号的幅度、相位和到达时间都不一样,它们相互叠加会产生电平快衰落和时延扩展;其次,移动场景下通信常常在快速移动中进行,这不仅引起多普勒频移,产生随机调频,而且会使得电波传播特性发生快速的随机起伏。因此,可以认为移动场景下的无线信道同时受到时间、环境和其他外部因素变化的影响。

关于无线信道的特征,可以分为大尺度特性和小尺度特性。大尺度特性着眼于信号在大范围(时间、距离)内的变化规律,重点是描述不同场景下信号路径损耗的变化以及阴影衰落的特性。小尺度特性则研究信号在短时间、短距离内的快衰落情况。无线信道也可以通过窄带通信和宽带通信进行描述。窄带通信重点研究信号幅度的波动情况,而宽带特性则针对信号的时延展开研究。无论何种划分,其研究目的都是建立适用于不同场景的精确的信道模型。信道的建模理论也是和电波传播理论紧密结合在一起的。接下来,将结合电波传播机制,重点阐述无线信道的若干基本特性。

1.2.1 损耗与衰落

信号在自由空间中传播会产生损耗和衰落。自由空间的路径损耗在第1.1节中已经有所介绍。本节主要讨论由路径损耗、阴影衰落以及多径效应所引起的小尺度衰落。

(1) 路径损耗

路径损耗是由发射功率的辐射扩散及信道的传播特性共同造成的。在路径损耗模型中一般认为:对于相同的收发距离,其路径损耗也相同。阴影衰落是由发射机和接收机之间的障碍物造成的,这些障碍物通过吸收、反射、散射和绕射等方式衰减信号功率,严重时甚至会阻断信号。一般情况下,路径损耗引起长距离(10~1 000 m)上接收功率的变化,而阴影引起障碍物尺度距离(室外环境是10~100 m,室内更小)上功率的变化,两者在相对较大的距离上引起功率变化,故称其为大尺度传播效应。

运用路径损耗模型可以进行实际链路预算设计,常用的路径损耗模型可以分为两大类,即射线追踪模型和经验型模型^[15]。射线追踪模型有两径模型、十径模型。两径模型用于单一的地面反射波在多径效应中起主导作用的情形。十径模型包括各种一次、两次和三次反射信号,具体有直射路径、地面反射路径、一次墙面反射路径、两次墙面反射路径、墙地反射路