

无线紫外光通信技术与应用

赵太飞 宋 鹏 著



科学出版社

无线紫外光通信技术与应用

赵太飞 宋 鹏 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

无线光通信是一种新型的通信技术,同时具有光纤通信和移动通信的优势。光的直线传播使无线光通信的应用范围受到了一定的限制,而“日盲”紫外光可以利用大气散射实现非直视通信,有效地克服其他无线光通信的不足,因此具有较强的应用价值。本书详细阐述“日盲”紫外光通信的散射链路特性,分析无线紫外光路径损耗模型,对紫外光通信中的分集接收技术进行讨论,采用蒙特卡罗方法仿真紫外光通信的基本原理,提出紫外光通信系统设计方案,研究直升机助降中无线紫外光引导方法和装甲编队中无线紫外光隐秘通信技术。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息类专业本科生、研究生的教材,也可作为研究人员和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

无线紫外光通信技术与应用 / 赵太飞, 宋鹏著. —北京: 科学出版社
2018.1

ISBN 978-7-03-055321-8

I. ①无… II. ①赵… ②宋… III. ①紫外线通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 280295 号

责任编辑: 宋无汗 杨 丹 王 苏 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 16

字数: 322 000

定价: 95.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着现代社会信息的日益膨胀，信息传输容量的剧增，现行的无线微波通信出现频带拥挤、资源缺乏等现象，开发大容量、高码率的无线光通信是未来通信发展的主要趋势。无线光通信是一种新型的通信技术，同时具备光纤通信和移动通信的优势，具有通信容量大、保密性能好、适应能力强等优点，受到人们的广泛重视。光的直线传播使无线光通信的应用范围受到了一定的限制，而“日盲”紫外光可以利用大气散射实现非直视通信，能够有效地克服其他无线光通信的不足。本书系统地研究了紫外光通信中的调制和分集接收技术，以及在直升机助降中无线紫外光的引导方法和装甲编队中无线紫外光的隐秘通信技术。作者对此领域遇到的相关理论问题进行了深入的探索，初步研究了紫外光通信中的理论，设计了紫外光通信的硬件系统，为组网通信奠定了理论基础并提供技术支撑，是在此领域的有益尝试。

本书共9章，涉及无线紫外光通信的理论基础，无线紫外光通信的覆盖范围，无线紫外光通信中的网络接入协议。在理论分析的基础上，提出了硬件系统的设计方案，以及无线紫外光在直升机助降中的引导方法和装甲编队中隐秘通信的应用方法。

本书第1章由西安理工大学的赵太飞教授和西安工程大学的宋鹏副教授合著；第2~4章、第9章由宋鹏副教授编写；第5~8章由赵太飞教授编写。全书由赵太飞教授定稿。本书是西安理工大学光电工程技术研究中心集体研究的成果，张爱利、官亚洲、王小瑞、冯艳玲、刘雪、刘一杰以及西安工程大学电子信息学院的熊扬宇、王建余等参与了本书的研究内容。西安理工大学的柯熙政教授一直关心和支持作者的研究工作，对本书提出了许多宝贵意见，在此表示深切的谢意！

本书的有关工作得到国家自然科学基金项目（U1433110、61001069）、光纤传感与通信教育部重点实验室开放基金项目（2014-03）、陕西省自然科学基金基础研究计划项目（2011JQ8028）、陕西省科技计划工业公关项目（2014K05-18）、陕西省教育厅产业化培育项目（2013JC09）、陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室项目（2016CP05）、西安市碑林区科技计划项目（GX1617、GX1302）、西安市科学计划项目（CXY1012(2)）等的资助，在此一并表示感谢。

本书是作者进行无线紫外光通信技术研究工作的初步总结，由于水平有限，书中难免存在不妥之处，欢迎读者不吝指正。

作 者

2017年5月

目 录

前言

第 1 章 无线紫外光通信理论基础	1
1.1 无线紫外光通信	1
1.2 无线紫外光通信的研究现状	3
1.2.1 国外研究现状	3
1.2.2 国内研究现状	4
1.3 无线紫外光通信原理	5
1.3.1 无线紫外光散射通信	5
1.3.2 无线紫外光通信方式	8
1.3.3 无线紫外光通信技术	10
1.4 无线紫外光组网通信的关键技术	13
1.4.1 无线 Mesh 网络结构	13
1.4.2 无线紫外光通信链路性能与信道带宽	14
1.4.3 无线紫外光通信节点模型	15
1.4.4 无线紫外光分集接收技术	16
参考文献	18
第 2 章 无线紫外光大气散射信道特性分析	21
2.1 无线“日盲”紫外光	21
2.2 大气的特点	22
2.3 大气信道中影响无线紫外光通信的主要因素	22
2.3.1 大气吸收	23
2.3.2 大气散射	24
2.4 基于 LOWTRAN 的大气无线紫外光传输特性仿真与分析	27
2.5 无线紫外光单次散射覆盖范围模型	33
2.5.1 NLOS 方式的覆盖范围	33
2.5.2 LOS 方式的覆盖范围	39
参考文献	39

第 3 章 无线紫外光通信散射信道模型	41
3.1 共面单次散射传输模型	41
3.2 非共面单次散射传输模型	45
3.2.1 基于椭球坐标系的非共面单次散射信道模型	45
3.2.2 基于球面坐标系的非共面单次散射信道模型	50
3.3 基于蒙特卡罗方法非共面多次散射信道模型	53
3.3.1 蒙特卡罗光子轨迹直接模拟法	54
3.3.2 蒙特卡罗光子轨迹指向概率法	56
3.3.3 蒙特卡罗方法下脉冲响应的仿真	60
3.4 基于蒙特卡罗方法脉冲展宽效应研究	60
3.4.1 多次散射对脉冲展宽的影响	61
3.4.2 收发仰角对脉冲展宽的影响	64
3.5 采用蒙特卡罗方法研究非直视无线紫外光通信的覆盖范围	78
3.5.1 无线紫外光散射覆盖范围蒙特卡罗方法模拟	78
3.5.2 基于蒙特卡罗的无线紫外光非直视散射覆盖范围分析	79
参考文献	86
第 4 章 不同大气环境下无线紫外光信道特性分析	88
4.1 晴朗天气下无线紫外光通信系统性能分析	88
4.1.1 路径损耗分析	88
4.1.2 脉冲响应分析	90
4.1.3 系统 3dB 带宽	93
4.1.4 信道容量仿真预测	95
4.1.5 无线紫外光通信可行性实验分析	97
4.2 大气湍流对无线紫外光通信性能的影响	98
4.2.1 大气湍流理论介绍	99
4.2.2 高斯光束模型与性能分析	104
4.2.3 短距离无线紫外光通信在弱湍流下的性能分析	107
参考文献	110
第 5 章 无线紫外光网络通信链路性能分析	112
5.1 无线紫外光非直视通信链路间干扰	112
5.1.1 无线紫外光路径损耗模型	112
5.1.2 无线紫外光通信的误码率	115

5.1.3 无线紫外光通信的信噪比	118
5.1.4 无线紫外光非直视通信链路间干扰模型	118
5.2 角度感知的无线紫外光通信模型	121
5.2.1 研究背景	121
5.2.2 角度感知的无线紫外光通信节点模型	122
5.2.3 角度感知的无线紫外光通信性能分析	127
参考文献	132
第 6 章 无线紫外光网络接入协议	134
6.1 无线紫外光非直视通信定向 MAC 协议	134
6.1.1 网络假设与模型	134
6.1.2 UV-NLOS-DMAC 协议描述	136
6.1.3 UV-NLOS-DMAC 协议仿真结果与分析	138
6.2 无线紫外光多信道接入协议	142
6.2.1 研究背景	142
6.2.2 多信道的 MAC 协议及问题	143
6.2.3 无线紫外光非直视多信道多接口通信模型	144
6.2.4 无线紫外光非直视多信道多接口通信仿真与分析	147
参考文献	160
第 7 章 无线紫外光通信系统设计与实现	161
7.1 发送端的设计与实现	161
7.1.1 光源的选择	161
7.1.2 调制驱动电路设计	164
7.2 接收端的设计与实现	164
7.2.1 滤光片的选择	165
7.2.2 光电探测器的选取	166
7.2.3 接收端的电路设计	167
7.3 PPM 调制系统的 FPGA 设计	167
7.4 无线紫外光通信实验结果与性能分析	169
7.4.1 无线紫外光语音通信实验与结果分析	169
7.4.2 无线紫外光数据通信实验与结果分析	171
7.4.3 无线紫外光 PPM 调制系统实验与结果分析	177
7.5 无线紫外光大气传输性能实验	181
7.5.1 无线紫外光大气传输性能实验硬件平台	182

7.5.2	实验条件及方法验证	182
7.5.3	收发端共面情形下的实验结果及分析	184
7.5.4	非共面路径损耗实验结果及分析	186
	参考文献	192
第 8 章	直升机助降中无线紫外光引导方法	193
8.1	无线“日盲”紫外光直升机引导方法	193
8.1.1	计算参数的获取	194
8.1.2	在直升机降落中风对无线紫外光通信性能的影响	195
8.1.3	无线“日盲”紫外光直升机降落调整方法	196
8.2	直升机起降中无线紫外光 ULC-LT 码引导方法研究	199
8.2.1	无线紫外光辅助起降	199
8.2.2	ULC-LT 码	202
8.2.3	直升机辅助起降无线紫外光通信传输策略	205
8.2.4	仿真结果分析	207
8.3	分步式 UEP-LT 码研究	212
8.3.1	非均等数据保护的 LT 码	212
8.3.2	SUEP-LT 码编码方法及步骤	216
8.3.3	仿真结果分析	219
	参考文献	225
第 9 章	装甲编队中无线紫外光隐秘组网通信技术	227
9.1	无线紫外光组网通信节点的设计	227
9.2	无线紫外光节点定位通信实施方案	228
9.3	组网节点间无线紫外光收发装置的捕获、对准和跟踪	231
9.3.1	捕获、对准和跟踪的定义	231
9.3.2	实现主从节点捕获、对准和跟踪的方法	231
9.3.3	捕获性能仿真分析	235
9.4	无线紫外光移动自组网链路间的干扰	236
9.4.1	多条链路间干扰模型	236
9.4.2	仿真分析	238
9.5	无线紫外光移动自组网节点间的定位方法	246
	参考文献	248

第 1 章 无线紫外光通信理论基础

通信技术在人们的日常生活中是非常重要的。通信的终极目标是实现任何人、任何时间、任何地方以任何通信方式的通信。在地形地貌比较复杂的场合，传统的无线通信和有线通信方式已经不能满足军事通信的需求。随着信息科技的发展，为了更好地满足战争需要，各国都在寻找更新颖、更隐蔽、更安全和抗干扰能力更强的通信方式。无线紫外光通信就是在这种需求下产生的。早在 20 世纪五六十年代，人们就开始研究紫外光探测技术^[1]。紫外光火灾侦测技术、紫外光消毒技术、紫外光防伪技术等被应用于民用和军事领域^[2]。紫外光学技术在军事上还有其独特的应用，主要有紫外光通信、紫外告警、紫外侦查和紫外制导等^[3]。利用无线紫外光进行通信是近些年才开始的。根据紫外光本身的一些物理效应和环境的特点，主要将其应用在军事通信上。

目前的通信方式主要有无线通信、有线通信、光纤通信和微波通信等^[4]。这些通信方式在军事通信中起到了非常重要的作用，但同时也存在些许不足。无线电波和微波通信易于被窃听、干扰和破坏，也不适合“无线电寂静”的情景。有线和光纤通信需要铺设相应的线路，在通信时不能灵活、机动和快速反应，在军事通信和战场中，极易受到破坏。光纤通信的优点是传输容量大且保密性能好，目前多用于民用通信，它的缺点是机动性差、建设难并且容易遭到破坏^[3]。虽然无线激光通信具有很多优点，但也存在一些问题，无线激光通信要求发送端和接收端在进行通信时严格对准，在非常复杂的环境中，通信系统的性能会受到严重的影响。无线紫外光通信具有非直视通信、抗干扰能力强和全天候工作等优点，能够在复杂的通信环境中传播信息，因此受到了人们的重视，已经成为军事通信的一个研究热点。

1.1 无线紫外光通信

紫外光是电磁波谱中波长为 10~400nm 辐射的总称，如图 1.1 所示。根据波长的变化，将紫外光分为以下四个波段：近紫外，NUV (315~400nm)；中紫外，MUV (200~315nm)；远紫外，FUV (100~200nm)；超紫外，EUV (10~100nm)。波长小于 200nm 的紫外辐射强烈地被大气中的臭氧吸收，因此只适用于真空条件下的研究与应用，故被称为真空紫外。波长高于 280nm 的波段，由于辐射太强，

多数光学系统性能受到限制；而波长低于 200nm 的波段，氧气分子的强吸收作用导致传输严重受限，无法进行通信。因此，无线紫外光通信常指利用中紫外波段（UVC，200~280nm）进行通信。

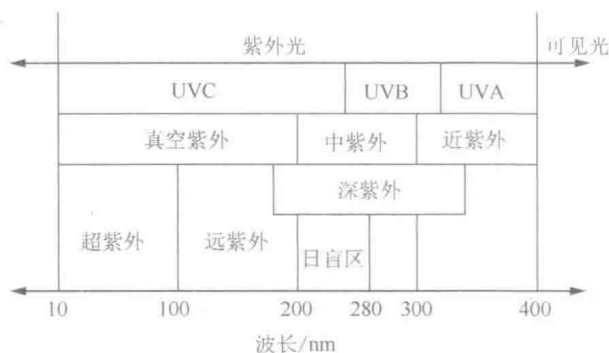


图 1.1 紫外光光谱图^[5]

无线紫外光通信是一种新型的通信模式，是利用紫外光在大气信道中的散射进行信息传输的。无线“日盲”紫外光通信的原理如图 1.2 所示。200~280nm 波段的太阳辐射被大气平流层的臭氧分子强烈吸收，因此在近地太阳光谱中几乎没有该波段的紫外光，该波段被称为“日盲”波段。利用“日盲”波段的紫外光进行通信时，背景噪声比较小，具有较强的抗干扰能力，并且能进行全天候工作。由于大气中存在大量的大气分子、悬浮颗粒等粒子，紫外光信号在传输过程中存在很强的散射现象，该散射特性能够使无线紫外光通信系统以非直视（non-line-of-sight, NLOS）方式传输紫外光信号，从而能适应复杂环境下的通信。

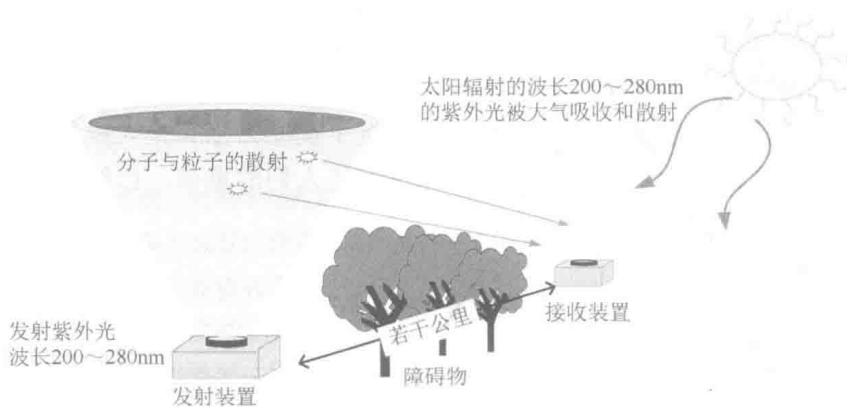


图 1.2 无线“日盲”紫外光通信原理图

无线紫外光通信是通过信号在大气中的散射进行通信的，和其他通信方式相比，无线紫外光通信有如下优点^[6]。

窃听率低：由于大气分子、悬浮颗粒等粒子的散射和吸收作用，紫外光信号

在传输过程中的能量衰减很快，信号强度按照指数的规律衰减。信号场强的指数衰减是与通信距离有关的函数。换句话说，若一个无线紫外通信系统的通信距离是2km，那么在2km之外就探测不到紫外光信号，从而可以根据距离的要求调整通信系统的发送功率，敌方就不易截获紫外光信号。

分辨率低：一方面，紫外光用肉眼很难看到，因此在通信时，难以用肉眼找到发射光源的位置；另一方面，无线紫外光通信是一种散射通信，因此难以从散射信号中判别信号源的位置。

抗干扰能力强：无线紫外光通信采用“日盲”波段的紫外光作为信息传输的载体，由于臭氧分子对太阳光中该波段紫外光的强烈吸收，近地低空大气中该波段的光谱很少，因此通信环境可以近似为无背景噪声环境。无线紫外光在大气中的衰减极大，因此敌方不能采用传统意义上的干扰方式对我方进行干扰。

非直视通信：由于大气分子对无线紫外光信号的散射作用，信号可以通过散射的形式到达接收端，从而可以绕过障碍物通过NLOS方式进行信息传播。无线紫外光通信的非直视特性克服了其他自由空间光通信必须工作在直视(line-of-sight, LOS)方式的弱点。

全方位全天候工作：无线紫外光不仅可以进行定向通信，也可以通过散射的形式进行非直视通信，从而能够应用在复杂的地形并能绕过山丘和楼宇等障碍物。由于气候和地形地貌的变化，可见光、红外等通信方式的性能受到很大的限制，但对于无线紫外光通信来说，在复杂多变的地貌或者气候恶劣的条件下都可以顺利进行通信。一般采用200~280nm的波长范围进行无线紫外光通信，地表在这个波段的辐射少，因此日光对通信系统的影响非常小，可以不分昼夜地进行工作。

无需捕获、瞄准和跟踪：无线紫外光通过散射进行信息传输，发送端以某一角度发射信号，接收端以某一角度接收信号，发送端和接收端在空间会形成一个共同的区域称为有效散射体，信号经过有效散射体的散射后到达接收端。因此，只要接收端在发送端的覆盖范围之内，接收端就可以接收到无线紫外光信号。

无线紫外光非直视通信适合应用在有障碍物、隐蔽性强和作战环境复杂的场合。因此，世界各大军事强国都非常重视无线紫外光通信系统的研究。

1.2 无线紫外光通信的研究现状

1.2.1 国外研究现状

国外对无线紫外光通信的研究起步比较早，1939年美国就研究了紫外光源、探测器和滤光片的性能。在此后的五六十年间，美国在无线紫外光通信领域的研

究取得了很大的进步。1960年,美国海军开始在无线紫外光通信方面进行相关研究。1965年,Koller^[7]对紫外光的辐射特性进行了研究。

1968年,麻省理工学院的学术论文中研究了26km范围内的无线紫外光通信大气散射链路模型,实验的紫外光源采用大功率氙灯,光电探测器采用光电倍增管^[8]。

1985~1986年,美国的Geller等^[6]研制了一套无线“日盲”紫外光短距离通信系统,该通信系统可工作在直视和非直视两种方式下。1985年时通信速率为1200bit/s,1986年将通信速率提高到了2400bit/s,误码率小于 10^{-5} ,直视和非直视的通信距离分别达到了3km和1km。

2004年,英国BAE系统公司建立了基于无线“日盲”紫外光非直视通信的无人值守地面传感器网络,在通信距离为几百米范围内,通信速率为几百kbit/s,误码率小于 10^{-7} ^[9]。

2009年,以色列大学研究了无线紫外光波段分别为520nm和270nm的海下通信^[10],在比较清洁的海水和通信速率为100Mbit/s的条件下,两个紫外波段分别实现了通信距离为170m和10m的通信。

2010年,美国加利福尼亚大学的徐正元团队研究了室外无线紫外光通信网络的接入协议^[11]。

2011年,希腊雅典大学的Vavoulas等仿真分析了无线紫外光多跳网络中孤立节点的概率^[12],同时分析了无线紫外光网络的连通性问题^[13]。

2012年,加拿大麦克马斯特大学的Kashani等研究了基于LEDs的无线通信中串行链路和并行链路中继的优化位置,分析了中继链路数和信道参数的差异对系统性能的影响^[14]。

2013年,美国弗吉尼亚大学的Noshad等^[15]采用M阵列的光谱幅度编码方法研究了无线紫外光非直视通信,接收端采用双光电倍增管,研究了数据率和距离的关系。

1.2.2 国内研究现状

国内对无线紫外光通信的研究起步比较晚,目前的研究大部分还处在理论探讨阶段。国内对无线紫外光通信的研究主要如下。

1999年,北京理工大学以低压充气汞灯为发射光源,实现了无线紫外光非直视通信。实验表明,通信距离在500m之内的通信效果良好。

2005年,国防科学技术大学以低压碘灯为发射光源,研制了一套无线紫外光非直视通信系统实验样机。该样机可以在通信距离为8m内实现语音和高速率通信,通信速率最大达到了48kbit/s^[16]。

2007年,重庆大学研制出了无线紫外光通信系统,其通信距离达到了50m,通信速率达到了1200bit/s^[17]。

2011年,西安理工大学以紫外光LED为光源,实现了点到点的语音和图像通信。同年,国防科学技术大学研究了障碍物对无线紫外光非直视通信链路的影响^[18]。

2012年,北京邮电大学团队将分集接收技术应用在无线紫外光通信系统中,为提高系统的信道容量、传输速率和传输距离提供了有效的方法^[19]。2013年,该团队建立了蒙特卡罗仿真模型,通过实验达到了良好的效果^[20]。

2013年,重庆通信学院研究了基于多输入多输出和空时编码技术的无线紫外光通信系统模型,使无线紫外光通信系统的传输性能得到了提高^[21]。

除此之外,电子科技大学、西安光学精密机械研究所和西安电子科技大学等也对无线紫外光通信进行了相关研究。

1.3 无线紫外光通信原理

无线紫外光通信具有可以实现非直视通信方式、全天候全方位工作、抗干扰能力强等优点。体积小、费用低、重量轻、可靠性高的无线紫外光电器件的出现,使无线紫外光通信逐渐成为当前无线光网络的一个研究热点。

1.3.1 无线紫外光散射通信

无线紫外光信号在信道中经过大气中多种微粒的散射最终到达接收端。接收端接收到的能量大小与多个因素有关,包括大气对光波的散射特性、发送仰角、接收仰角、发送光源的发散角和接收视场角等。此外,无线紫外光信号的传输伴随着多径传输现象,若在发送端和接收端之间光子仅被散射一次,则称为单次散射通信;若发生两次或两次以上散射,则称为多次散射通信。

1. 无线紫外光单次散射通信

在无线紫外光通信中,紫外光子经过大气的吸收和散射作用最终被接收端接收。紫外光子经过一次散射到达接收端的通信称为单次散射,如图1.3所示。Tx为发送端,Rx为接收端, θ_1 为发送仰角, θ_2 为接收仰角, ϕ_1 为发送端的发散角, ϕ_2 为接收视场角, V 为有效散射体, δV 为有效散射体的微分元, ζ 为有效散射体微分元 δV 和接收端的连线与接收光轴的夹角。

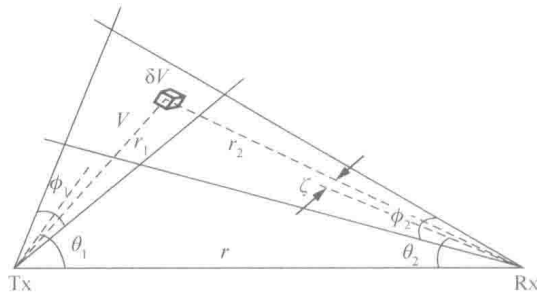


图 1.3 无线紫外光单次散射通信链路

在 $t=0$ 时刻，发送端以发射功率 E_t 发送无线紫外光信号，信号经过微分元 δV 散射后，接收端接收到的能量为^[22]

$$\delta E_r = \frac{E_t K_s P(u) A_r \delta V \cos \zeta \exp[-K_c (r_1 + r_2)]}{\Omega_1 r_1^2 r_2^2} \quad (1.1)$$

式中， A_r 是接收孔径的面积； K_c 是大气信道衰减系数且 $K_c = K_a + K_s$ ， K_a 是吸收系数， K_s 是大气的散射系数； Ω 是发送立体角； $P(u)$ 是散射相函数^[23]。

为了简化计算模型，假定有效散射体的体积足够小，则 $\zeta = 0$ ， $\Omega_1 = 2\pi[1 - \cos(\phi_1/2)]$ ， $\theta_s = \theta_1 + \theta_2$ ， $r_1 = r \sin \theta_2 / \sin \theta_s$ ， $r_2 = r \sin \theta_1 / \sin \theta_s$ ，则接收端的总能量为

$$E_r \approx \frac{E_t K_s P(u) A_r V \sin^4 \theta_s \exp\left[-\frac{K_c r}{\sin \theta_s} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)\right]}{2\pi r^4 \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2}\right)} \quad (1.2)$$

式中， V 为有效散射体的体积。实验光源采用 LED^[24]，光源的发散角通常比较小，有效散射体的体积近似为两个圆锥体的体积之差，则有效散射体的体积为

$$V = \frac{1}{3} \pi (D_1^2 h_1 - D_2^2 h_2) \quad (1.3)$$

式中， h_1 和 D_1 分别为大圆锥体的高和底面半径，且 $h_1 = r_1 + r_2 (\phi_2/2)$ ， $D_1 = h_1 (\phi_1/2)$ ； h_2 和 D_2 分别为小圆锥体的高和底面半径，且 $h_2 = r_1 - r_2 (\phi_2/2)$ ， $D_2 = h_2 (\phi_1/2)$ 。

将式 (1.3) 代入式 (1.2) 得到接收端的能量公式为

$$E_r \approx \frac{E_t K_s P(u) A_r \phi_1^2 \phi_2 \sin \theta_s (12 \sin^2 \theta_2 + \phi_2^2 \sin^2 \theta_1)}{96 r \sin \theta_1 \sin^2 \theta_2 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2}\right) \exp\left[\frac{K_c r (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin \theta_s}\right]} \quad (1.4)$$

2. 无线紫外光多次散射通信

在实际的无线紫外光通信中，由于通信方式和大气条件等的影响，发送端的

紫外光子经过多次散射到达接收端。无线紫外光多次散射链路如图 1.4 所示^[25]。

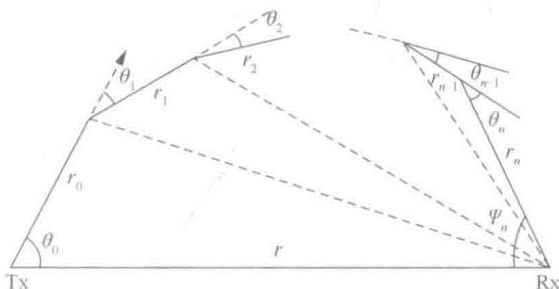


图 1.4 无线紫外光多次散射通信链路

散射距离 r 的概率分布函数为

$$f_r(r) = K_s e^{-K_s r} \quad (1.5)$$

结合瑞利散射 (Rayleigh scattering) 和米氏散射 (Mie scattering), 散射角的概率分布函数为

$$f_\theta(\theta) = \frac{K_s^R}{K_s} f_\theta^{\text{Ray}}(\theta) + \frac{K_s^M}{K_s} f_\theta^M(\theta) \quad (1.6)$$

式中, θ 的变化范围为 $[0, \pi]$ 。由于散射方位角和散射相函数没有依赖关系, 散射方位角 ϕ 在 $[0, 2\pi]$ 内服从均匀分布。散射方位角的概率分布函数为

$$f_\phi(\phi) = \frac{1}{2\pi}, \quad \phi \in [0, 2\pi] \quad (1.7)$$

紫外光源在发散光束内以 θ_0 和 ϕ_0 均匀地发射光子, 光子经过距离 r_0 后到达第一个散射点。发射光束内的立体角认为是一个概率分布函数为 $1/\Omega_s$ 的均匀分布, 且 $\Omega_s = 2\pi[1 - \cos(\alpha_1/2)]$ 。在无穷小立体角内, 被散射的概率由 $d\Omega_0 = \sin\theta_0 d\theta_0 d\phi_0$ 变为 $d\Omega_s = 1/\Omega_s \sin\theta_0 d\theta_0 d\phi_0$ 。此概率经过距离 dr_0 后衰减 $e^{-K_s r_0} f_\theta(r_0) dr_0$, 因此最后的概率为

$$dQ_0 = \frac{e^{-K_s r_0}}{\Omega_s} f_\theta(r_0) \sin\theta_0 d\theta_0 d\phi_0 dr_0 \quad (1.8)$$

光子到达第一个散射点后, 可以将散射点近似为二次光源, 二次光源遵循式 (1.6) 和式 (1.7) 发射光子。从第 i 个散射点到第 $i+1$ 个散射点 ($i=1, 2, \dots$), 概率 dQ_i 为

$$dQ_i = e^{-K_s r_i} f_r(r_i) f_\theta(\theta_i) f_\phi(\phi_i) \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i dr_i \quad (1.9)$$

经过 n 次散射后, 为了研究接收端接收到的这个光子, 重点研究接收视场角内的一个无穷小的立体角。 ψ_n 为接收端到第 n 个散射中心与基线距离的夹角, 接收视场角的范围为 $[\beta_2 - \alpha_2/2, \beta_2 + \alpha_2/2]$, 其中, β_2 为接收仰角, α_2 为视场角, 因此可以将光子的方向定义为

$$I_n = \begin{cases} 1, & \beta_2 - \alpha_2 / 2 < \psi_n < \beta_2 + \alpha_2 / 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.10)$$

因此，光子离开第 n 个散射中心，到达探测器的概率为

$$dQ_n = I_n e^{-K_n r_n} f_{\theta_n}(\theta_n) f_{\phi_n}(\phi_n) \sin \theta_n d\theta_n d\phi_n \quad (1.11)$$

经过 n 次散射后，光子到达的概率为

$$P_n = \int \int \dots \int dQ_0 \times dQ_1 \times \dots \times dQ_n \quad (1.12)$$

紫外光源发射一个脉冲信号的能量为 E_i ，则经过 n 次散射接收到的总能量为

$$E_{r,n} = \sum_{i=1}^n E_r(i) = E_i \sum_{i=1}^n P_i \quad (1.13)$$

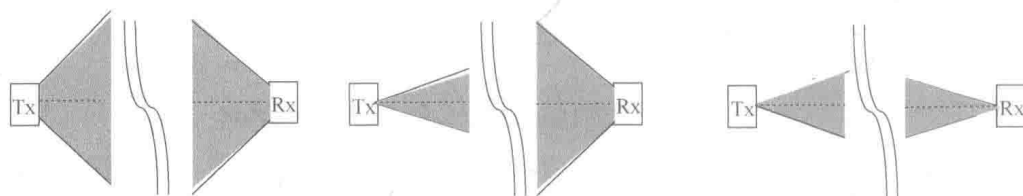
和单次散射理论相比，多次散射能够得到更精确的路径损耗，尤其是在仰角比较大的情况下。文献[26]仿真分析了不同仰角下，无线紫外光信号经过 1~5 次散射时接收端接收到的能量。当通信距离小于 20m 时，光子的第一次散射对接收到的总能量起主导作用。随着通信距离的增加，多次散射对接收端接收到的总能量的贡献逐渐增大。当通信距离为 1000m 且发送仰角和接收仰角都为 90° 时，第二次、第三次和第四次散射比其他次数散射对接收总能量的贡献大。和其他次数散射相比，第五次散射对接收到的能量基本没有贡献。

1.3.2 无线紫外光通信方式

无线紫外光通信有直视通信和非直视通信两种工作方式。直视通信指光波沿着直线传播到接收端；非直视通信指由于散射作用，信号可以绕过发送端和接收端之间的障碍物进行信息传输。与激光通信不同，无线紫外光非直视通信不需要进行对准、捕获和跟踪。

1. 无线紫外光直视通信链路模型

根据光束发散角和接收视场角的对应关系，无线紫外光直视通信分为三种类型：宽发散角发送-宽视场角接收、窄发散角发送-宽视场角接收和窄发散角发送-窄视场角接收，如图 1.5 所示^[27]。



(a) 宽发散角发送-宽视场角接收 (b) 窄发散角发送-宽视场角接收 (c) 窄发散角发送-窄视场角接收

图 1.5 无线紫外光直视通信类型

无线紫外光直视链路在大气自由空间中的功率衰减呈指数衰减。自由空间的路径损耗与 r^2 成正比, r 越大, 路径损耗越大, 接收到的能量与 r^2 成反比即 $\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2$ 。大气衰减可表示为 $e^{-K_e r}$, 探测器的接收增益为 $\frac{4\pi A_r}{\lambda^2}$ 。结合这些因素, 无线紫外光直视链路接收端的接收功率表示为^[28]

$$P_{r,LOS} = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 e^{-K_e r} \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \quad (1.14)$$

式 (1.14) 可以简化为

$$P_{r,LOS} = \frac{P_t A_r}{4\pi r^2} e^{-K_e r} \quad (1.15)$$

式中, P_t 是发送功率; r 是发送端与接收端的基线距离; λ 是无线紫外光波长; K_e 是大气信道衰减系数; A_r 为接收端孔径。从式 (1.15) 可以得出, 接收功率通过 K_e 依赖于无线紫外光波长。 K_e 根据大气条件而定, 接收功率与 r^2 成反比。

2. 无线紫外光非直视通信链路模型

根据发射光束发散角、接收视场角、发送仰角、接收仰角的不同, 无线紫外光非直视通信分为 (a)、(b)、(c) 三类, 如图 1.6 所示。其中, 图 1.6 (a) 为 NLOS (a), 这种通信方式的发送仰角和接收仰角都为 90° , 对收发端的位置和方向要求最低, 但是信道的时延扩展较大^[27], 因此能够获取的信道带宽最小; 图 1.6 (b) 为 NLOS (b), 这种通信方式的接收仰角为 90° , 只对发送端的方向和散射角有要求, 信道的时延扩展一般, 能够获取的信道带宽处于中等; 图 1.6 (c) 为 NLOS (c), 这种通信方式的发送仰角和接收仰角都小于 90° , 对收发端的角度和方位都有比较高的要求, 但信道的时延扩展最小, 能够获取的信道带宽较高。无线紫外光不同通信方式下的性能如表 1.1 所示。

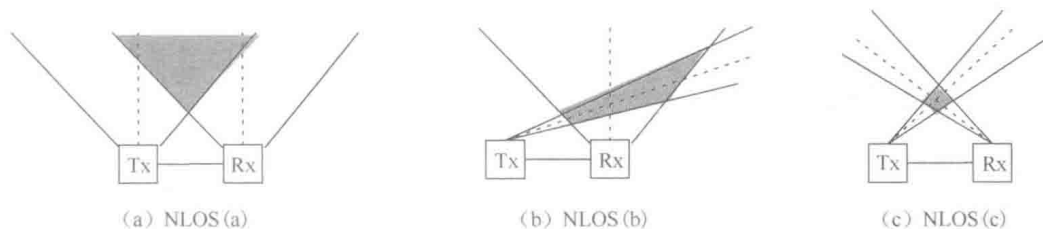


图 1.6 无线紫外光非直视通信类型^[29]