



装备科技译著出版基金



高新科技译丛
微机电系列



精工精译

基于MATLAB®的 无线光通信系统与信道建模

Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB®

【英】Z · Ghassemlooy

W · Popoola

S · Rajbhandari

梁猛 刘继红

著

译

- 全面介绍无线光通信技术的基础理论、器件与系统、调制技术、信道模型与系统性能分析
- 分析无线光通信技术面临的各种挑战、相应的解决途径以及当前的研究趋势
- 以MATLAB® 仿真贯穿全书，提供了大量MATLAB® 程序代码以及相应的仿真实例，帮助读者理解和开展进一步仿真研究
- 是Z. Ghassemlooy博士及其研究团队多年研究无线光通信技术的积累和总结，是该领域的重要参考资料



国防工业出版社
National Defense Industry Press



CRC Press
Taylor & Francis Group



装备科技译著出版基金

基于 MATLAB[®] 的无线光通信 系统与信道建模

Optical Wireless Communications
—System and Channel Modelling with MATLAB[®]

扎比·卡西姆卢 (Z. Ghassemlooy)

[英] 瓦休·波普拉 (W. Popoola)

著

苏建·拉吉汉德瑞 (S. Rajbhandri)

梁 猛 刘继红 译

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

基于 MATLAB®的无线光通信系统与信道建模/(英)扎比·卡西姆卢(Z. Ghassemloooy), (英)瓦休·波普拉(W. Popoola), (英)苏建·拉吉汉德瑞(S. Rajbhandri)著;梁猛,刘继红译. —北京:国防工业出版社, 2016. 11

(科工精译)

书名原文:Optical Wireless Communications—System and Channel Modelling with MATLAB® ISBN 978-7-118-10945-0

I. ①基… II. ①扎… ②瓦… ③苏… ④梁… III. ①光通信-无线电通信-通信信道 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 245993 号

Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB® by Z. Ghassemloooy, W. Popoola and S. Rajbhandari.

© 2013 by Taylor & Francis Group, LLC.

CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informabusiness. No part of this publication maybe reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photo copying, scanning or otherwise, without either the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

All rights reserved.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

本书简体中文版由 Taylor & Francis Group, LLC 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 21¼ 字数 539 千字

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 136.00 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

无线光通信利用光波在自由空间传输信息,兼具光通信宽带和移动通信灵活接入的优势,不需要频谱申请,易与高速光纤通信骨干网融合,正受到越来越多的关注,成为未来最有希望解决“最后1英里”电子瓶颈,支持室内、室外接入应用的技术方法之一。

本书全面介绍了无线光通信技术的基础理论、器件与系统、调制技术、信道模型与系统性能分析等内容,分析了无线光通信技术面临的各种挑战、相应的解决途径以及当前的研究趋势。本书以 MATLAB® 仿真贯穿全书,提供了大量 MATLAB® 程序代码以及相应的仿真实例,可以帮助读者理解和进一步开展仿真研究。

作者在光通信领域有多年的研究和教学经历,研究成果丰硕。本书不仅可以作为相关专业本科生、研究生的教材,也可作为无线光通信领域研究人员和技术工程人员的重要参考资料。

本书由梁猛和刘继红翻译并审校,其中梁猛负责第1章~第3章和第8章,刘继红负责第4章~第7章。参加本书翻译和整理工作的还有西安邮电大学陆蓉老师,研究生王春河、郑玉婷、王丽娟、魏乐、程菲等。在此向所有为本书出版提供帮助的人士表示诚挚的谢意。

本书得到装备科技译著出版基金的资助,在此表示感谢。

由于译者水平有限,疏漏甚至误译实难避免,恳请读者不吝赐教和批评指正。

译者

2016年9月

前 言

近年来,为了更好地支持诸如高清网络电视、移动视频电话、视频会议、高速 Internet 接入等层出不穷的宽带无线业务,移动通信终端用户的带宽需求不断增加。在未来 10 年内,随着高质量多媒体业务不断增长,更高带宽的接入需求将会愈加迫切。目前,为终端用户提供接入服务的网络技术多种多样,包括铜线技术、混合光纤同轴电缆、光纤到户、宽带微波/射频无线技术等。随着新型业务对带宽需求的持续加速,铜线/同轴电缆和射频蜂窝/微波技术面临带宽受限、频谱拥挤、授权昂贵、安装成本高以及安全等问题,其局限性已显露无疑,无法满足未来的接入要求。在一些国家,网络运营商正在敷设新的光纤接入网络,为用户提供的带宽大大增加。一般认为光纤网络可以提供无限带宽,但在实际应用中因为受网络结构、元器件兼容性、设备性能和部署完整系统的限制,可提供给终端用户的容量仍很有限。

无线光通信(Optical Wireless Communications, OWC)是一项具有革新意义的技术,提出距今已有 30 多年,随着终端用户接入带宽需求的不断增长,这项技术正受到越来越多的关注,成为未来最有希望支持室内、室外接入应用的技术方法之一。OWC 提供了一种灵活的网络解决方案,无需频谱授权,能实现成本低廉、安全性高的高速无线宽带连接,可支持语音与数据、视频娱乐、企业互联、灾后重建、照明与数据通信和安全监控等大量应用。在室内应用中,通过精确控制光斑大小,在很小的范围内可以容纳大量设备,构成一个完美的 OWC 系统。在室外应用中,OWC 或自由空间光(Free Space Optics, FSO)通信系统将与射频(Radio Frequency, RF)系统互补,在未来的信息高速公路中扮演重要的角色。

经历了过去 20 多年 OWC 系统的发展过程,我们感觉编写一本反映该领域进展情况的新书非常必要。因目前已有室内或室外 OWC 系统的相关书籍,因此,本书中对技术理论的描述坚持简洁、全面的原则,使之既能满足本科生、研究生的课程学习,又适合研究人员和技术工程人员阅读。本书大体上包括了 OWC 系统四个重要的方面:①OWC 基础理论;②器件与系统;③调制技术;④信道模型与系统性能分析。另外,也涵盖了 OWC 面临的各种挑战、相应的解决途径以及当前的研究趋势。本书的一大特色是包括了大量 MATLAB®程序代码以及相应的 OWC 仿真实例,可以帮助读者理解讨论的主题和进一步开展仿真研究。

本书分为相对独立的 8 个章节。为了便于内容组织和读者阅读,每一章开篇都有适当的背景介绍和理论分析。另外,在章节的附录中还给出了相关的辅助材料。在概述 OWC 发展历史的基础上,第 1 章重点回顾了 OWC 系统在室内和室外的应用情况,介绍了 OWC 技术的现状和未来发展方向。OWC 系统的无线接入技术、链路构成、人眼安全问题、应用领域以及面临的挑战等内容也包括在本章内。可用于 OWC 系统的光源和光电探测器(PIN 和/或 APD)有多个种类,在短距离室内应用中一般使用发光二极管(LED)和低功率激光二极管(LD),而在长距离室外系统中则经常使用 LD。第 2 章介绍了这些光源的结构和光学特性,讨论了光探测过程的统计特性,以及探测过程中出现的各种噪声。

为了设计高效的光通信系统,需要深刻理解其信道特性。通信信道的特征可用其脉冲响

应描述,据此可分析信道失真并提出相应的补偿方法。第3章研究了分析视距和非视距室内应用的天花板反射模型、Hayasaka-Ito模型和球面模型等多种信道传播模型,概括介绍了人造光源干扰对室内OWC链路性能的影响。室外大气信道是一个非常复杂和动态变化的环境,对传播光束的特性有很大影响,除了引起损耗外,湍流还将造成光束的幅度和相位发生起伏。描述大气信道统计特性的多个模型也在第3章讨论。第3章还介绍了观察大气效应对FSO链路影响的实验测试平台以及相应的测量数据。

目前,实际使用的OWC系统绝大多数都采用强度调制/直接检测。对于室外大气传输,浓雾将造成光束强度显著下降,成为影响信道特性的主要因素。增大发射功率能改善这种情况,但人眼安全规定对最大发射光功率有明确限制。在室内应用中,人眼安全对发射光功率的限制更加严格。第4章讲述了室内和室外OWC系统中使用的多种具有较高功率和频谱效率的典型调制技术。本章的重点是脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)、开关键控(On-Off Keying, OOK)和数字脉冲间隔调制(Digital Pulse Interval Modulation, DPIM)等调制技术,讨论了它们的频谱特征、错误概率和功率与带宽要求。副载波强度调制和偏振移位键控等新型调制技术也在本章介绍。在室内环境中,人造光源会产生影响系统性能的周期性和确定性噪声,而散射链路的最大传输速率则受限于多径传播引起的码间干扰。第5章将研究存在人造光源干扰和码间干扰时,基于OOK、PPM和DPIM的室内OWC系统性能。为了改善链路性能,在第5章也概括介绍了高通滤波器、均衡器、小波变换和神经网络等能够降低干扰影响的技术方法。

大气湍流会引起信号衰落,描述这种现象的数学模型在第3章已经做了介绍。第6章将进一步分析大气湍流对室外OWC(即FSO)系统采用不同调制技术的影响,重点是OOK、PPM和相移键控预调制的副载波强度调制。室外FSO通信面临的基本挑战包括建筑物晃动、散射/吸收引起的衰减和闪烁引起的链路衰落。为应对建筑物晃动,要求有准确的瞄准和跟踪机制,同时使用光电探测器阵列和/或加宽光束直径。对于FSO系统,光束在横向上的相位和辐照度起伏使得光相干探测失去了吸引力,这也是陆地FSO链路采用直接检测的原因。克服信道衰落效应的技术包括增大发射功率、频率分集以及空间和时间分集(如多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO))等。第7章将深入讨论缓解FSO链路衰落的时间和空间分集方法以及副载波强度调制,并简单介绍在对数正态大气信道中,使用等增益合并、最佳合并和选择合并等分集机制时的链路性能。

近年来,可见光通信(Visible Light Communication, VLC)引起越来越多研究人员的关注,在第8章将专门对此进行介绍。VLC的基本原理是用LED同时实现照明和数据通信,固态光源的广泛使用和高亮度、长寿命LED的出现是推动这项技术发展的主要动力。通过可见光器件同时实现照明和数据通信催生了大量全新、有趣的应用,比如家庭网络、汽车之间的通信、机舱和车厢内的高速数据通信、交通信号管理与通信等。LED的功率效率和可靠性远优于传统用于照明的白炽光源。本章对VLC技术做了回顾,重点介绍基础理论背景、器件的可用性、调制与调光技术以及系统性能分析,对多输入多输出和蜂窝VLC系统也有所提及。

全书每一章都提供了相应的MATLAB代码以便于读者进行仿真,为了方便读者进一步阅读,每章末尾都列出了相关的和最新的参考文献。本书全部采用国际单位制。

非常感谢本书写作过程中参考过的所有论文、书籍的作者。特别感谢那些授权我们复制、

使用他们著作中图片的作者、出版社和公司。也非常感谢我们已经毕业和在读的博士研究生对 OWC 领域的巨大贡献,他们的工作无疑丰富了本书的内容。最后,我们把最重要的感谢送给一直支持和鼓励我们的家人和朋友,特别是我们各自的妻子 Azar、Odunayo 和 Kanchan,她们的耐心和无条件的支持帮助我们最终完成了这项极具挑战性的任务,她们的支持是无以伦比的!

MATLAB®是 MathWorks 公司的注册商标。相关产品信息请联系:

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA 01760 - 2098 USA

电话:508 647 7000

传真:508 647 7001

E-mail:info@mathworks.com

网址:www.mathworks.com

目 录

第1章 无线光通信系统概述	1	2.6.5 强度噪声	42
1.1 无线接入方案	1	2.6.6 信噪比	42
1.2 OWC 发展简史	5	2.7 光检测的统计特性	43
1.3 OWC/无线电通信的比较	6	参考文献	44
1.4 链路结构	7	第3章 信道模型	46
1.5 OWC 应用领域	12	3.1 室内无线光通信信道	46
1.6 安全和规则	14	3.1.1 视距传输模型	48
1.6.1 最大容许照射量	16	3.1.2 非视距传输模型	50
1.7 OWC 技术面临的挑战	16	3.1.3 天花板反射模型	58
参考文献	18	3.1.4 Hayasaka-Ito 模型	59
第2章 光源与光检测器	22	3.1.5 球面模型	59
2.1 光源	22	3.2 人造光源干扰	60
2.2 发光二极管	24	3.2.1 白炽灯	61
2.2.1 LED 结构	25	3.2.2 传统镇流器驱动的荧光灯	62
2.2.2 面发光 LED 和半球 LED	26	3.2.3 荧光灯模型	62
2.2.3 边发光 LED	26	3.3 室外信道	66
2.2.4 LED 发光效率	27	3.3.1 大气信道损耗	66
2.3 激光器	29	3.3.2 雾和能见度	68
2.3.1 激光工作原理	29	3.3.3 光束发散	75
2.3.2 受激辐射	30	3.3.4 光器件损耗	77
2.3.3 光反馈和激光振荡	30	3.3.5 对准损耗	77
2.3.4 半导体激光器的基本结构	31	3.3.6 大气湍流模型	77
2.3.5 常用激光器的结构	32	3.3.7 OWC 大气影响实验台	86
2.3.6 LED 和 LD 的性能比较	34	参考文献	95
2.4 光检测器	34	第4章 调制技术	99
2.4.1 PIN 光电二极管	35	4.1 引言	99
2.4.2 APD 光电二极管	36	4.2 模拟强度调制	101
2.5 光检测技术	37	4.3 数字基带调制技术	102
2.5.1 直接检测	37	4.3.1 基带调制	102
2.5.2 相干检测	38	4.3.2 OOK	103
2.6 光检测噪声	39	4.3.3 高斯信道下的误码性能	106
2.6.1 光起伏噪声	40	4.4 脉冲位置调制	111
2.6.2 暗电流和过剩噪声	40	4.4.1 高斯信道下的误码性能	114
2.6.3 背景辐射	41	4.4.2 各种改进的 PPM	117
2.6.4 热噪声	41	4.5 脉冲间隔调制	119

4.5.1 高斯信道下的误码性能	123	5.6 多径传播链路性能	200
4.5.2 最佳门限电平	128	5.6.1 OOK	200
4.6 双头脉冲间隔调制	131	5.6.2 PPM	205
4.6.1 谱特性	133	5.6.3 DPIM	207
4.6.2 高斯信道下的误码性能	135	5.7 降低码间干扰影响的技术	208
4.7 多电平 DPIM	138	5.7.1 滤波	208
4.8 基带调制技术的比较	140	5.7.2 均衡	209
4.8.1 功率效率	140	5.8 均衡与分类问题	212
4.8.2 传输带宽要求	141	5.9 人工神经网络简介	212
4.8.3 传输容量	142	5.9.1 神经元	212
4.8.4 传输速率	143	5.9.2 ANN 的结构	213
4.8.5 PAPR	144	5.10 ANN 的训练	214
4.9 副载波强度调制	144	5.10.1 反向传播学习	214
4.10 正交频分复用	147	5.11 基于 ANN 的自适应均衡器	215
4.11 光偏振移位键控	150	5.11.1 基于 ANN 和 FIR 的均衡器性能 比较研究	220
4.11.1 二进制 PolSK	151	5.11.2 分集技术	222
4.11.2 误码率分析	154	参考文献	222
4.11.3 MPolSK	155	第 6 章 大气湍流对 FSO 链路性能的 影响	226
4.11.4 差分圆偏振移位键控	158	6.1 开关键控	226
4.11.5 错误概率分析	159	6.1.1 OOK 在泊松大气信道下的性能 ...	226
附录 4. A	160	6.1.2 OOK 在高斯大气光信道下的 性能	228
4. A.1 DPIM(1GS)时隙自相关函数的 推导过程	160	6.2 脉冲位置调制	229
附录 4. B	162	6.3 副载波强度调制	233
4. B.1 DH-PIM 的 PSD	162	6.3.1 SIM 信号的产生和探测	233
参考文献	168	6.3.2 SIM-FSO 在对数正态大气信道 下的性能	235
第 5 章 室内无线光通信系统性能 分析	172	6.3.3 SIM-FSO 的误码率分析	239
5.1 背景光对室内 OWC 链路 性能的影响	172	6.3.4 双伽玛和负指数大气信道下 SIM-FSO 的性能	247
5.2 无 HPF 时 FLI 的影响	173	6.3.5 负指数大气信道下的中断概率 ...	249
5.2.1 匹配滤波接收机	173	6.4 大气湍流代价	249
5.3 无 FLI 时基线漂移的影响	179	附录 6. A	252
5.4 使用 HPF 时 FLI 的影响	185	附录 6. B	253
5.5 小波分析	190	6. B.1 6.3.2 节、6.3.3.2 节和 6.3.3.3 节的 MATLAB 代码	253
5.5.1 连续小波变换	190	参考文献	257
5.5.2 离散小波变换	192	第 7 章 基于分集技术的室外 OWC	
5.5.3 基于 DWT 的降噪技术	193		
5.5.4 DWT 与 HPF 的比较	197		
5.5.5 实验研究	197		

链路	259	7.8.2 球面波	280
7.1 大气湍流效应缓解技术	259	7.8.3 高斯光束波	280
7.2 对数正态大气信道下的接收		附录 7. A	281
分集	261	7. A. 1 对数正态分布变量均值和	
7.2.1 最大比合并	262	方差的计算	281
7.2.2 等增益合并	263	附录 7. B	282
7.2.3 选择合并	264	7. B. 1 对数正态分布变量 $I_{\max} =$	
7.2.4 接收信号相关性对误码性能的		$\max \{I_i\}_{i=1}^N$ 的 PDF	282
影响	265	附录 7. C	282
7.2.5 对数正态大气信道中使用接收		7. C. 1 负指数分布变量 $I_{\max} =$	
分集的中断概率	266	$\max \{I_i\}_{i=1}^N$ 的 PDF	282
7.3 对数正态大气信道下的发射		参考文献	283
分集	267	第 8 章 可见光通信	286
7.4 对数正态大气信道下的发射 -		8.1 概述	286
接收分集	267	8.2 系统描述	289
7.5 对数正态大气信道下空间分集		8.2.1 VLC 系统模型	291
SIM-FSO 的结果与讨论	268	8.2.2 信噪比分析	299
7.6 双伽玛和负指数大气信道中基于		8.2.3 信道时延扩展	299
接收分集的 SIM-FSO	270	8.3 系统实现	302
7.6.1 空间分集 BPSK-SIM 系统的		8.3.1 比特角度调制	303
BER 和中断概率	270	8.3.2 脉冲调制方案	303
7.6.2 负指数信道下 DPSK-SIM 的		8.3.3 离散多音频调制的 PWM	304
BER 和中断概率	272	8.3.4 多阶 PWM-PPM	306
7.7 基于副载波时间分集的陆地		8.3.5 NRZ-OOK 的 PWM	307
自由空间光链路	275	8.4 多输入多输出 VLC	308
7.7.1 STDD 的误码性能	275	8.5 家庭接入网络	315
7.8 孔径平均	279	参考文献	319
7.8.1 平面波	279	缩略语	323

第 1 章 无线光通信系统概述

随着移动通信用户数量的显著增长,对于带宽的需求也在不断增长。因此,下一代无线通信系统应该能够提供更高的容量来支持各种宽带无线服务,例如高清电视(High-Definition TV, HDTV)(带宽 4~20Mb/s)、计算机网络应用(带宽 100Mb/s)、移动视频电话、视频会议、高速互联网接入等。当前应用的接入网技术包括同轴电缆接入、无线互联网接入、宽带射频(RF)/微波接入和光纤接入。这些技术特别是同轴电缆和射频接入受到频谱窄、速率低、带宽申请费用贵、安全问题和安装接入成本高等因素的限制。无线光通信(Optical Wireless Communications, OWC)是个古老的技术,利用光在自由空间中传输信息,可提供一个灵活接入的、真正宽带的网络,成为解决宽带接入市场“最后 1 英里”电子瓶颈非常有潜力的替代方案。OWC 不需要申请频谱,带宽大、成本低、安装容易,易与高速通信的光纤骨干网相融合。本章将综合介绍对现有无线接入技术进行补充的室内、室外 OWC 系统的应用。本章内容安排如下:1.1 节概括介绍无线接入技术;1.2 节简单介绍 OWC 的发展历史;1.3 节介绍 OWC 和 RF 的区别及优缺点;1.4 节和 1.5 节分别介绍 OWC 系统的链路结构和应用;1.6 节介绍 OWC 中的人眼安全问题。

1.1 无线接入方案

在乡村地区,以直埋式光缆提供高速网络并不是一个经济的方案。此外,移动应用需求向宽带业务转移,大量的范围达 1km 的蜂窝对移动网络基础设施的需求尤其是移动基站和移动交换中心(Mobile Switching Centers, MSC)间的回程连接需求不断增长。当前系统和基站之间的距离为 10~20km,使用每用户 2Mb/s 的微波技术提供数据链路或者移动回程网络。这种技术不能处理更高的数据速率,这样就导致了数据传输的“回程电子瓶颈”。第 3 代和第 4 代(3G 和 4G)无线通信系统将提供从高移动性的蜂窝系统到固定、低移动性的室内环境的无所不在的通信网络连接。目前服务几十个用户约 100m 范围的射频蜂窝网络只能支持一两个高容量用户。同一区域的多个大容量用户需要差不多数量的蜂窝系统来提供服务。这种情况下多个蜂窝会相互重叠,出现干扰、载波重复使用的问题。所以,需要发展大容量、短距离链路技术,能够直接连接基站和光纤骨干网络。表 1.1 列出了解决“最后 1 英里”问题的主要可行的接入网技术。

表 1.1 “最后 1 英里”的接入技术

英 文	中 文	特 点
xDSL	数字用户线路	(1) 基于铜线传输,带宽有限; (2) 传输质量、速率与距离有关
RF	射频	(1) 频谱拥塞(通过使用许可减少干扰); (2) 安全性(可通过加密提高安全性); (3) 传输带宽小于光传输带宽; (4) 高频信号由于天气(雨)带来的衰减、大气中氧的吸收等影响,工作范围不超过 1km; (5) 使用的频带为 7GHz、18GHz、23GHz、35GHz、60GHz、66GHz

(续)

英 文	中 文	特 点
Cable	电缆	(1) 由于是共享线路,会带来信号质量和安全问题; (2) 使用高峰期间速率会降低
FTTH	光纤到户	(1) 带宽可达 100Mb/s,但成本高; (2) 实用化还需要时间
Satellite	卫星	(1) 使用成本贵; (2) 带宽有限
OWC	无线光通信	

目前,公共电话网络仍在使用的同轴电缆接入技术和时分复用技术,提供给每终端用户有限的带宽(如传输速率 1.5Mb/s 的 T1 或 2.024Mb/s 的 E1)。数字用户线路(Digital Subscriber Line, DSL)技术可以给家庭和小型商户提供高速的互联网接入,但是其最高速率难以突破限制。基于电缆调制技术进行电视节目传输在非商业市场取得了成功,但是存在传输速率低和链路安全的问题。尽管变化已经非常迅速,但是无线互联网接入发展仍然比较缓慢。宽带射频/微波(或毫米波)技术具有很好的移动性,却因为信道衰减较大(60GHz 时损耗系数 16dB/km)限制了传输距离。与光纤系统比较射频频谱拥挤、成本高、传输速率低。卫星技术带宽受限并且很昂贵。光纤技术各方面都很有优势,但却难以铺设到达乡村地区和终端用户。光纤到户(Fiber to the Home, FTTH)的实现可以有不同的体系结构。时分复用无源光网络(Time Division Multiplexed Passive Optical Networks, TDM-PON)中多个用户共享带宽;而许多网络业务供应商和运营商已经升级到波分复用无源光网络(Wavelength Division Multiplexing PON, WDM-PON)。WDM-PON 通过共享 PON 结构给每个用户提供专享的高带宽。然而对于未来的发展,还存在一些问题需要加以解决,包括:①网络升级改造时在原有基础设施条件下如何容纳附加设备;②客户的工作环境例如室内/办公室内的温度变化对系统性能的影响;③光纤实际铺设的问题。

固定无线接入可以采用:

(1) 基于 IEEE 802.16d 标准的全球微波互联接入(WiMax)理论速率可达 120Mb/s,视距链路距离 50km。

(2) 电力线宽带(Broadband over Power Line, BPL)接入利用已经铺设好的电力线提供网络接入服务。

(3) 超宽带(Ultra Wide Band, UWB)技术在几十米范围内有良好的传播特性。随着发射设备和用户间距离减少至 1km 的微蜂窝的引入,能够提供更多的终端用户更高的数据速率和移动宽带业务。这需要发展连接基站和 MSC 间大容量、短距离并且可以连接到光纤骨干网的传输技术。

考虑到室内、室外环境中应用的移动性,毫无疑问射频通信技术成为首选。在这种应用环境中,个人用户的数据速率会受到限制,可以根据需要进行频谱、带宽的分配。对于室内固定终端,目前主要使用 10Mb/s 的有线以太网局域网(Local Area Networks, LAN),速率为 100Mb/s 和 1Gb/s 的技术正处在发展阶段。而室内移动终端通过现有的蜂窝网络接入。笔记本电脑、掌上电脑、个人数字助手(Personal Digital Assistant, PDA)等便携设备的涌现刺激了移动接入的需求,因此导致了射频无线局域网和无线个人局域网(Wireless Personal Area Networks, WPAN)的发展。无线 LAN 和 WPAN 允许用户在网络覆盖的所有区域内保持网络连接,相比

于传统的有线网络更加灵活自由、移动性更好,可分为基础无线网络和自组织无线网络^[1]。这种网络结构需要使用能够与有线局域网连接或充当无线设备接口的接入点或基站。相比之下,自组织无线网络类似于对等网络,网络中每个用户连接到其他用户,而不是中心服务器。自组织无线局域网仅在网络需要时建立连接,无须设置中心控制节点。目前,市面上有许多无线局域网产品。射频无线局域网使用免授权的频谱部分,在 2.4GHz 频段提供 1 ~ 2Mb/s 带宽。然而可利用带宽只有 83.5MHz,因此必须与无绳电话和婴儿监视器等其他应用共享带宽。下一代无线局域网分配的频率为 5GHz,提供 20Mb/s 的带宽,为无线局域网专用,不会受到其他应用的影响,可以进一步优化系统速率和效率。目前在这一频段存在 IEEE 802.11a 和 HiperLAN2 两种标准,设定的最大传输速率均为 54Mb/s^[2,3]。由于无线局域网 LAN 和 WPAN 的应用广泛,有限的频谱上承载了大量的多媒体和其他业务数据,造成频谱拥挤,导致服务质量、网络的生存能力下降。一种可能的解决方法是提升系统频率,开发不需要申请的 60GHz 频段。这种方案由无线千兆联盟提出^[4],系统带宽为 7GHz,速率接近 7Gb/s。IEEE 802.11ad 中已经考虑了使用 60GHz 频段^[5]。由于在 60GHz 频段处,路径损耗非常高,因此还没有替代传统的无线局域网技术,但对于短距离、高速率的室内应用更有吸引力。

图 1.1 给出了核心网、城域网、有线接入、无线接入情况下的每个用户的功率。在下个 10 年里,有线接入的功率将维持平稳,而无线射频接入的功率可能会增长 100 倍。预计到 2020 年,无线射频接入的功率将占据全球网络功率的主要部分。

在波长 1.55 μ m 处光纤的传输容量约为 4Tb/s,与掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fibre Amplifier, EDFA)一起使用将进一步改善系统的性能。但是对于终端用户来说线路铺设成本依旧很高(如“最后 1 英里”和乡村区域)。一种毫米波和光纤混合网络可以满足宽带无线系统的需求,因此两种技术混合使用对于传送各种宽带应用来说是非常划算的方法。光载毫米波(光载无线)系统能为固定和移动用户提供大于 500Mb/s 的速率^[6-8]。但是,能提供的全部传输容量仍受到毫米波的载波频率的限制。

类似于无线电,其他的电磁波频带也可以进行无线传输,如在红外(Infrared, IR)频段就可以实现 OWC。和室外应用一样,室内信息终端和便携设备数量的大量增长加速了 OWC 技术的研究和发展。作为射频接入技术的补充,OWC 首先被提出用以短距离无线传输已超过 20 年^[9]。多数实际的 OWC 系统发射机采用发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)或激光二极管(Laser Diode, LD),接收机中采用 PIN 光电二极管或雪崩光电二极管。速率低于 2.5Gb/s 的系统广泛采用强度调制(Intensity Modulation, IM)和直接检测(Direct Detection, DD),而速率更高的系统则采用外调制技术。

OWC 的应用非常广泛、多样,包括集成电路内超短距离(毫米范围)的光互连,大量的消费电子产品,户外楼宇间通信链路(几千米范围),卫星间通信链路(4500km)等。相比于射频系统,OWC 系统具有以下优势^[10-12]:

- (1) 带宽资源丰富(700 ~ 1500nm 波段,200THz 带宽);

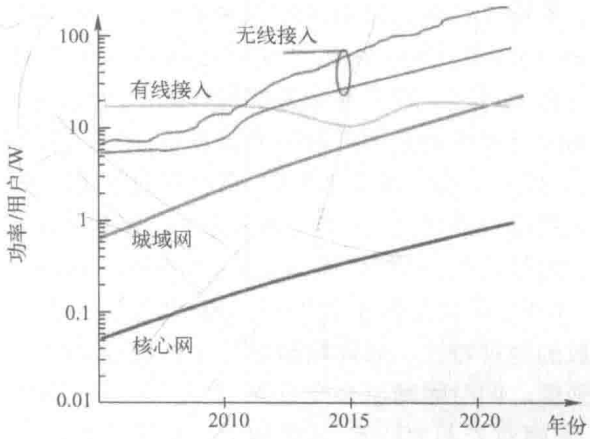


图 1.1 不同接入方式下每个用户的功率

- (2) 使用不需申请,无需频谱使用费用;
- (3) 使用 IM 和 DD 时无多径衰落;
- (4) 发射与接收之间要求光路对准,安全性高;
- (5) 光束窄、不可见,难于发现和截取(监听);
- (6) 空间容量高,可以共享频率;
- (7) 器件尺寸小、重量轻,成本低;
- (8) 蜂窝边界清晰,信道间干扰小;
- (9) 一个波长可覆盖大量蜂窝,没有射频系统中的频率再用问题;
- (10) 无须开挖道路,易于安装;
- (11) 800 ~ 900nm 和 1550nm 波段吸收损耗最小;
- (12) 没有电磁辐射存在,对身体无害;
- (13) 功耗低;
- (14) 对电磁干扰不敏感。

另一方面,OWC 链路具有难于截取和抗干扰的特性,在所有广域接入解决方案中最为安全。不同于许多射频系统中信号向各个方向发射,OWC 系统(特别是室外自由空间光(Free Space Optical,FSO)系统)发射机使用高方向性、锥形激光束向某一个方向发射信号,并且通常安装在街道之上较高的地方实现视距(Line of Sight,LOS)通信,使得激光束的截取非常困难。任何接近系统的企图都很容易被发现,因为窃听设备必须安放在发射机所发射的非常窄的光束里,使光束的一部分被截取,造成接收端的功率损耗,引发管理软件告警。同时,接收端后面可设置窗户或墙,防止接收部分多余的能量被截取而造成泄密。基于上述特点,开发语音、视频和宽带数据的 OWC 通信系统,可用于政府、军队等的保密通信^[12]。

OWC 可以工作在 750 ~ 950nm 的近红外区。除了肉眼不可见外,红外光具有可见光的大多数的物理特性。然而眼睛对这个波长范围内的光非常敏感,因此必须限制发射机的发射信号强度。同时眼睛也会受日光、荧光等背景光源影响(如图 1.2 所示)。在波长更长的 1550nm 处,眼睛对光不太敏感,对眼睛的安全需求可以放宽,背景光的干扰也显著减少。1550nm 也是光纤通信骨干网络的第三窗口。类似于可见光,红外光不能通过不透明的障碍,会被墙壁、天花板和室内的大多数物体反射。

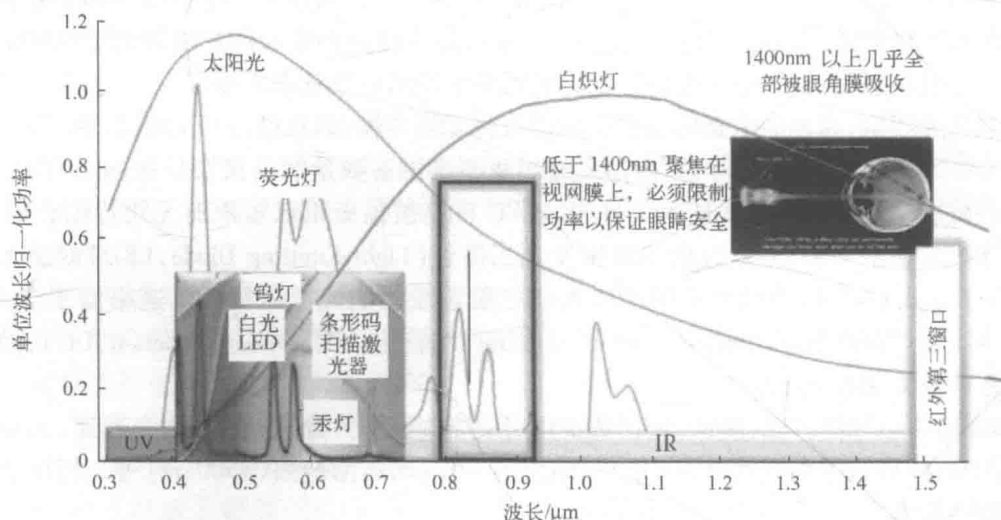


图 1.2 OWC 系统及背景光单位波长上的归一化功率

1.2 OWC 发展简史

OWC 或 FSO 通信是一种古老的技术,通过光携带信息在空气中从一点向另一点传输。例如:大约在公元前 800 年,古希腊人和罗马人使用烽火传递信号;公元前 150 年美洲印第安人使用烟传递信号;18 世纪 90 年代,旗语开始应用于法国航海。但是可称为第一个实现自由空间中光通信的是 1880 年亚历山大·格拉汉姆·贝尔的光电话实验。实验中,贝尔用声音调制阳光并发送约 200m 的距离。接收端采用抛物面反射镜,焦点处放置硒电池来接收信号。然而,实现的设备较为简陋,同时太阳光照射断断续续,所以实验不是很顺利。

随着 1960 年激光器的发明,OWC 技术的发展也有了重大改变。20 世纪 60 年代早期到 70 年代,研究人员开展了一系列的 FSO 验证实验。这些实验包括:1962 年,麻省理工学院林肯实验室使用 GaAs LED 进行了 30 英里(48km)的电视信号传输;1963 年 5 月,用 He-Ne 激光器在美国帕纳明特岭和圣加布里埃尔山之间实现了 118 英里(190km)的声音信号传送;1963 年 3 月,北美航空的研究者进行了第一个用激光器传送电视信号的实验。日本电气股份有限公司(NEC)在 1970 年搭建第一个商用激光自由空间传输系统,该系统使用 632.8nm 的 He-Ne 激光器,实现从横滨到多摩川之间 14km 的全双工通信^[10]。

OWC 技术首先用于军事保密通信。美国国家航空航天局(NASA)和欧洲航天局(ESA)对深空应用进行了大量研究,包括火星激光通信实验(MLCD)项目和卫星间半导体激光链路实验(SILEX)项目等。尽管深空 OWC 在这本书范围之外,值得一提的是,在过去的 10 年里,已成功验证了速率达到 10Gb/s 的近地卫星间的 FSO^[11]。虽然之前已有一些无线光传输的技术,但实现能实用的、真正有效的 OWC 系统,还存在一些问题^[10]:第一,当时已有的通信系统能够满足当时的需求;第二,还需要进行研发以提高器件的可靠性,确保系统可靠运行;第三,大气环境中系统会受天气的影响,如大雾会导致通信中断;第四,太空中大气可以忽略,但系统需要精确的跟踪和对准技术,而这些技术在当时还处于研究阶段。鉴于这些问题,直到现在 FSO 才开始慢慢融入通信网络。

随着光电子器件技术的迅速发展和不断成熟,OWC 开始了新的发展。新出现的应用对带宽不断增长的更大需求也暗示了不得不舍弃仅依靠一种接入技术连接终端的老方法。结合在军事领域的成功应用,科研人员对 OWC 在民用接入网的应用重新恢复了兴趣。在过去的几年里,世界各地成功的实验促使这个领域得到了进一步的投资。在现今的通信基础设施建设中,日益增加的 OWC 商业化和部署已达到新的高度。两个静态节点间速率为 1.25Gb/s 的能在各种天气条件下稳定实现 3.5km 距离运行的全双工室外 OWC 系统在现在市场上已经非常常见。2008 年,第一套 10Gb/s 室外 OWC 系统投入市场^[12],它成为当时可实用的最高速率商用无线技术。集成波分复用技术与 FSO 的波分复用 FSO 系统正处于实验研究阶段^[13]。表 1.2 介绍了 OWC 发展简史。

表 1.2 OWC 的发展简史

时 间	系统/设备/标准
公元前 800 年	烽火——古希腊人和罗马人
公元前 150 年	烟——美洲印第安人
18 世纪 90 年代	光电报——Claude Chappe, 法国

(续)

时 间	系统/设备/标准
1880	光电话——贝尔,美国
1960	激光的发明
20 世纪 70 年代	FSO 主要用于军事安全通信
1979	室内 OWM 系统——Alexander Graham Bell
1993	红外数据通信标准的制定——红外数据协会(IrDA)
2003	可见光通信协会(VLCC)成立——日本
2008	家庭网络(红外和 VLC 技术)的全球标准——OMEGA 计划,欧盟
2009	IEEE 802. 15. 7——VLC 标准的制定

1.3 OWC/无线电通信的比较

表 1.3 对室内射频无线通信和红外无线通信进行了对比。毫无疑问,射频技术为室内、室外网络提供了很好的移动性,但是终端用户的可分配带宽受到限制。有线 LAN 以 10Mb/s 以太网技术为主,用于连接固定终端,100Mb/s 和 1Gb/s 的标准正在研发之中。利用传统蜂窝网络可以实现移动接入。射频无线局域网使用不需申请的频段,包括频率 2.4Gb/s(速率 1 ~ 2Mb/s)、5.7GHz(速率约 20Mb/s),同时建议采用 17GHz 和 60GHz,在这两个频段速率会更高。射频接入技术在低速率覆盖时有明显优势(载波频率低),这与射频电磁波的衍射散射以及接收端的灵敏度有关。射频信道对拥塞和遮挡阴影有较好的鲁棒性,能提供房间内的全覆盖。在更高的载波频率(更高速率)时,射频信号传播与光类似,也变成视距传输。同时,这些频率上的射频器件非常贵,射频技术的主要优势(移动性、覆盖范围、接收灵敏度)相比 OWC 系统不再明显。

表 1.3 射频无线通信和红外无线通信的特性对比

性能	射频无线通信	红外无线通信	对红外的意义
带宽管理	需要	不需要	不需要许可,全球兼容
穿墙效果	可以	不可以	固有的安全特性;相邻房间载波可再利用
雨的影响	有	没有	
雪的影响	没有	有	会减少传输距离
多径衰落	有	没有	链路设计简单
多径色散	有	有	传输速率高时需要解决的问题
路径损耗	高	高	只能实现短距离传输
主要噪声	其他用户	背景光	只能实现短距离传输
平均功率	$\int f(t) ^2 dt$	$\int f(t) dt$	$f(t)$ 是高峰均比输入信号

相比之下,室内和室外 OWC 系统利用不需申请的 700 ~ 10000nm 波段,可实现在单一波长上的速率超过 2.5Gb/s、传输距离达到 5km 的可适用于各类协议的低成本的信息传输(如图 1.3 所示)。对于室内 OWC 系统,蜂窝界线明显,相互干扰可以忽略,为增加系统容量的载

波重用也不受影响。由此可见,因为用户随时间推移对容量的需求远超过无线电所能提供的带宽,OWC 将是未来的有效解决方案。或许未来最大的短距离无线通信系统将利用的是光而不再是射频。目前,已有学者建议在 4G 中应用 OWC。在未来开放的大环境下,个人用户需要大于 100Mb/s 的速率,OWC 将是非常明智的解决方法。无线光局域网已经应用于例如远程医疗、应急情况、高速铁路、笔记本电脑、掌上电脑、博物馆等。根据 IEEE 802.11 标准,红外物理层支持速率达 2Mb/s,有潜力提到更高速率。红外数据联盟(IrDA)已经对低成本和短距离(1~8m)红外数据链路进行了标准化,链路速率从 2.5kb/s 到 16Mb/s,波长选用 850nm 和 900nm。图 1.4 给出了无线光系统的移动性和比特速率的关系。

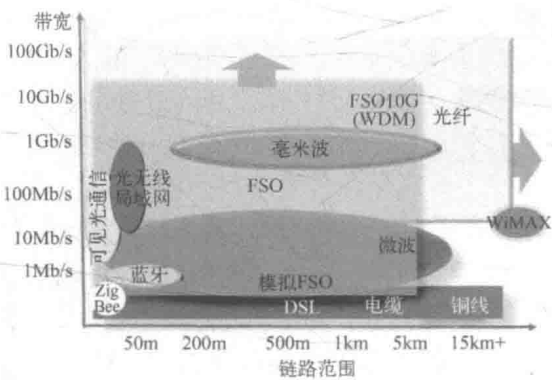


图 1.3 OWC 与无线电通信的带宽及范围对比

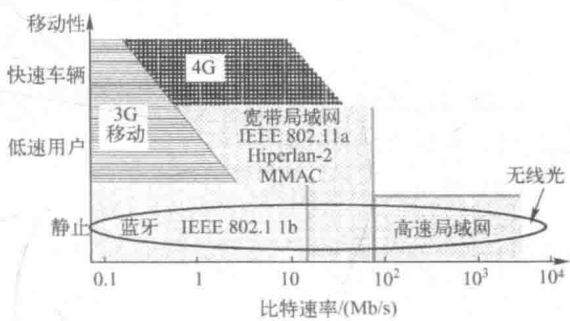


图 1.4 无线光通信系统的移动性和比特速率的关系

一定程度上,射频无线接入和红外无线接入是相互补充的,而不是相互竞争的关系。例如,如果一个无线局域网需要大面积覆盖,用户在漫游中一直保持与网络连接,那么射频接入是最合适的选择。然而,如果一个覆盖适度面积的无线局域网需要提供大带宽多媒体网络服务,如视频会议和视频点播,那么红外接入技术是唯一满足带宽需求的选择。OWC 技术能克服电子瓶颈解决“最后 1 英里”接入的问题(如图 1.5 所示)。利用 OWC 的高速率、抗风雨的特点,OWC 和毫米波混合技术将满足在户外任何天气条件下均能工作的应用需要^[17],这将有可能成为未来 4G 通信系统最佳解决方案。

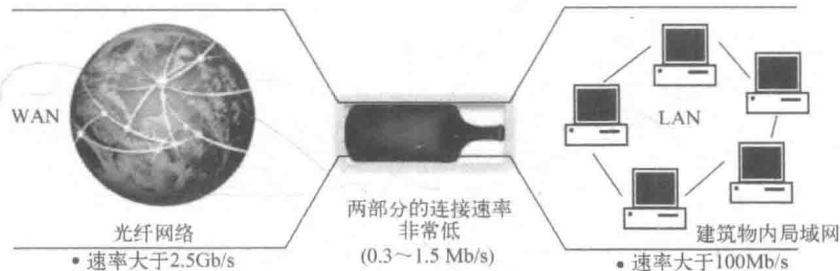


图 1.5 接入网络瓶颈

1.4 链路结构

图 1.6 给出了 OWC 系统的简单框图。光源可用 LED 和 LD。目前,商用 OWC 系统可在 5km 距离上传送高速信号,成本仅比射频技术的高一点,却比当前最新的射频局域网产品速率快得多^[18,19]。同时,OWC 是一种全新的技术,高速 OWC 链路设计有不同于其他通信系统的