

基于光 OFDM 及其 相关技术的室内可见光通信研究

Study on the Indoor Visible Light Communications
Based on Optical OFDM and Its Related Technologies

贾科军 著

 西南交通大学出版社

基于光 OFDM 及其相关技术的 室内可见光通信研究

贾科军 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

基于光 OFDM 及其相关技术的室内可见光通信研究 /
贾科军著. —成都: 西南交通大学出版社, 2019.5
ISBN 978-7-5643-6853-1

I. ①基… II. ①贾… III. ①光通信系统 - 研究
IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 080407 号

JIYU GUANG OFDM JI QI XIANGGUAN JISHU DE SHINEI KEJIANGUANG TONGXIN YANJIU

基于光 OFDM 及其相关技术的室内可见光通信研究

贾科军 著

责任编辑	梁志敏
封面设计	何东琳设计工作室 西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都勤德印务有限公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	12.5
字 数	197 千
版 次	2019 年 5 月第 1 版
印 次	2019 年 5 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-6853-1
定 价	68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562



作者简介

贾科军，男，1978年生，陕西兴平人，工学博士，2012年破格晋升兰州理工大学计算机与通信学院副教授，硕士生导师。2007年获西安理工大学通信与信息系统专业硕士学位，2018年获西南交通大学通信与信息系统专业博士学位。近年来主要从事可见光通信系统关键技术研究，成果发表在*SCIENCE CHINA Information Sciences*、*Chinese Journal of Electronics*、《光学学报》《中国激光》《光电子·激光》等学术期刊，并长期担任《光学学报》和《中国激光》期刊审稿专家。已获得授权发明专利2项、软件著作权3项。主持完成国家自然科学基金（项目编号：61461026）、甘肃省自然科学基金（项目编号：1212RJZA019）各1项。参编教材《通信系统概论》《Linux系统应用教程》《信息论与编码基础》3本，为本科生讲授“信息论与编码”课程。指导学生参加全国大学生数学建模、甘肃省大学生“创新杯”计算机应用能力竞赛等多项竞赛，分别获得甘肃省一等奖、二等奖各2项。

◎ 责任编辑 / 梁志敏

◎ 封面设计 /  JADE HE
DESIGN STUDIO

文軌車書
交通天下

<http://www.xnjdcbs.com>

前 言

随着各种行业和移动通信技术的融合，特别是移动互联网和物联网的发展，为无线通信的发展迎来了新的机遇和挑战。下一代无线通信系统需要更大的通信容量以支持各种宽带无线业务，比如高清电视（4~20 Mb/s）、移动视频电话、视频会议、高速网络接入和各种网络应用（达到100 Mb/s）等。传统的接入网技术主要包括铜线接入、同轴电缆接入、宽带射频接入（RF）和光纤接入等，其中铜线/同轴电缆接入和基于RF的接入技术都受到频谱拥挤、数据速率较低和频谱许可昂贵等问题的制约，而光纤接入到户又有“最后一千米”的困境。

可见光通信（VLC）利用可见光波段（波长380~780 nm）的光作为信息载体，通过给普通照明用的发光二极管（LED）加装调制电路，LED就能发出肉眼感觉不到的高速明暗闪烁的光信号，在提供照明的同时传输信息。可见光通信能够有效解决“最后一千米”问题，无需无线电频谱许可，可提供近乎无限（超过400 THz）的通信带宽，具有能满足未来高速数据传输需求的潜力，被认为是具有良好发展前景的与RF通信互补的技术。LED具有节能、环保、体积小和寿命长等特点，广泛应用于各种显示、装饰、普通照明和城市夜景等领域，逐渐取代白炽灯、日光灯成为下一代主要照明技术已是大势所趋。VLC必将随着LED的发展而高速发展，无论从国家战略层面，还是从节能减排或者抢占市场考虑，可见光通信作

为一种照明和光通信结合的新型通信方式，将推动下一代照明和接入网的发展，已成为国际竞争的焦点和制高点。

目前，VLC正在从实验室研究走向现实应用，未来在各领域的应用前景将不可估量。但是作为一种新兴的无线通信技术，VLC还面临多种技术挑战，包括缺少公认的信道模型、光多径传输引起的符号间干扰（ISI）、LED的调制带宽窄以及非线性特性、严重的背景光，以及上行链路的设计等问题。针对VLC发展面临的技术挑战，本书以室内可见光通信信道模型和光正交频分复用系统（O-OFDM）为基础，介绍OFDM自适应技术、MC-CDMA系统、MIMO-OFDM系统和非正交多址接入技术。

全书共分为7章，第1章介绍了可见光通信系统原理、技术优势以及面临的挑战。第2章介绍室内可见光通信多径信道模型，包括可见光通信链路配置、常用的信道冲激响应计算方法、离散多径信道模型。第3章介绍光OFDM系统原理，首先介绍单载波和多载波系统，然后介绍OFDM系统，最后重点介绍了几种常用光OFDM系统原理，包括DCO-OFDM，ACO-OFDM、Flip-OFDM、U-OFDM。第4章介绍光OFDM自适应技术，首先介绍了自适应的基本原理，然后将Chow、Hughes-Hartogs和Fischer三种自适应比特功率加载算法应用于ACO-OFDM和DCO-OFDM系统。第5章介绍可见光通信MC-CDMA系统，首先介绍了CDMA和MC-CDMA系统原理和检测技术，然后详细介绍光ACO-MC-CDMA和光DCO-MC-CDMA系统，包括理论分析系统的信噪比（SNR）表达式和蒙特卡洛仿真模型。第6章介绍了MIMO-DCO-OFDM和MIMO-ACO-OFDM系统原理，包括理论分析系统的SNR表达式和仿真。第7章介绍NOMA-DCO-OFDM系统原理和功率分配方法，仿真分析LED的半功率角、光电检测器的FOV角、功率分配系数

对系统和速率的影响。

本书可作为高等院校高年级本科生和研究生的教材和参考书，也可以作为相关领域工程技术人员的参考书籍。本书的编写得到了西南交通大学信息科学与技术学院郝莉教授的大力支持和帮助，也得到了兰州理工大学计算机与通信学院相关教师的大力支持，在此表示诚挚的感谢。感谢我的学生靳斌、张守琴、陆皓、杨博然和魏少博的帮助，以及国家自然科学基金项目（NO:61461026）的资助。

由于撰稿时间较短，作者学识有限，本书的不足之处在所难免，敬请广大读者提出宝贵意见。

贾科军

2019年1月

于兰州理工大学

目 录

第 1 章 绪 论	001
1.1 移动通信面临的挑战	001
1.2 光无线通信技术	002
1.3 可见光通信技术的发展	003
1.4 可见光通信系统	005
1.5 发光二极管 (LED)	007
1.6 光电二极管	012
1.7 可见光通信技术的优势和挑战	015
1.8 本章小结	018
第 2 章 室内可见光通信信道模型	022
2.1 引 言	022
2.2 强度调制直接检测系统	022
2.3 可见光通信链路配置	026
2.4 室内光无线信道	028
2.5 离散多径信道模型	037
2.6 本章小结	045
第 3 章 光 OFDM 系统原理	048
3.1 引 言	048
3.2 单载波与多载波传输	049
3.3 OFDM 系统原理	056
3.4 DCO-OFDM	066
3.5 ACO-OFDM	076
3.6 DCO-OFDM 和 ACO-OFDM 性能比较	082
3.7 Flip-OFDM	085
3.8 U-OFDM	086

3.9	本章小结	089
第 4 章	室内可见光通信光 OFDM 自适应技术	091
4.1	引 言	091
4.2	自适应技术研究现状	092
4.3	自适应技术的理论基础	093
4.4	自适应光 OFDM 系统	096
4.5	自适应比特功率加载算法	099
4.6	数据仿真与分析	103
4.7	本章小结	109
第 5 章	室内可见光通信 MC-CDMA 系统研究	112
5.1	引 言	112
5.2	相关研究及进展	113
5.3	CDMA 技术	114
5.4	多载波码分多址系统	116
5.5	光 MC-CDMA 系统原理	125
5.6	光 ACO-MC-CDMA 系统	126
5.7	光 DCO-MC-CDMA 系统	141
5.8	本章小结	152
第 6 章	室内可见光通信 MIMO-OFDM 系统研究	156
6.1	引 言	156
6.2	相关研究及进展	157
6.3	室内可见光 MIMO-DCO-OFDM 系统	158
6.4	室内可见光 MIMO-ACO-OFDM 系统	170
6.5	本章小结	175
第 7 章	室内可见光通信非正交多址接入技术研究	179
7.1	引 言	179
7.2	相关研究及进展	180
7.3	室内可见光通信 NOMA-DCO-OFDM 系统	181
7.4	数值仿真和分析	186
7.5	本章小结	190

第 1 章 绪 论

1.1 移动通信面临的挑战

移动通信诞生于 20 世纪 80 年代初,之后大约每过 10 年,移动通信就会经历标志性的一代技术革新。诞生于 20 世纪 80 年代初的第一代(1G)模拟蜂窝式移动电话通信系统,采用频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)技术,是基本面向模拟电话的通信系统。1992 年诞生了第二代蜂窝通信系统(2G),主要采用时分多址接入技术(Time Division Multiple Access, TDMA),全球移动通信系统(Global System for Mobile Communication, GSM)是被广泛使用的 TDMA 网络,能提供数字语音和低速数据业务,2G 网络标志着移动通信技术从模拟走向了数字时代。2001 年诞生了第三代数字移动通信技术(3G),它在支持更高带宽和数据速率的同时,能提供多媒体服务,以码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)作为多址接入技术,3G 主流标准包括 WCDMA、CDMA2000、TD-SCDMA。2011 年第三代移动通信合作伙伴计划(3GPP)发布了第四代宽带数据移动互联网通信技术(Long Term Evolution-Advanced, LTE-Advanced),其以正交频分多址(OFDMA)为技术核心,用户速率可达 100 Mb/s ~ 1 Gb/s,能够支持各种移动宽带数据业务。

随着各种行业和移动通信的融合,特别是移动互联网和物联网的发展,无线通信技术又迎来了新的挑战。移动通信用户数量有了显著增长,用户对于带宽的需求也在不断增长。下一代无线通信系统需要更大的通信容量以支持各种宽带无线业务,比如高清电视(4 ~ 20 Mb/s)、移动视频电话、视频会议、高速网络接入和各种网络应用(达到 100 Mb/s)等。下一代无线通信的通信速率(峰值速率)将增大 10 倍,全球移动数据流量将增大 500 ~ 1 000 倍^{[1]·[2]}。通常,提高通信系统容量的方法主要包括

增加可用带宽、提高无线传输链路的频谱效率和增加小区密度等，其中增加可用带宽往往是最直接、最有效的方法。为提升系统容量，需要更多的可用频谱，而现有的频谱资源远远不能满足需求。根据国际电联 2015 年世界无线电通信大会（WRC-15）的研究，频率在 6 GHz 以下的可用频谱资源已非常稀缺，而更高频率的频谱资源较为丰富，能有效缓解频谱资源紧张的现状，因此对于 6 GHz 以上频段频谱的开发和利用成为未来无线通信研究的热点内容。

另外，随着无线电频谱的日益拥挤，无线电波传输技术遭受电磁干扰（EMI）的问题日益严重。同时，开关电源和其他高频设备引起的干扰也在增加，特别是在医院和工业环境中，无线电系统的适用性已经受到这些问题的严重限制。一般的频率分配规则只能解决部分问题。现在每个系统设计时都必须要考虑 EMI 问题，所以未来的应用还需要探索新的波长范围。

传统的接入网技术主要包括铜线接入、同轴电缆接入、宽带射频（Radio Frequency, RF）接入和光纤接入等，其中铜线/同轴电缆接入和基于 RF 的接入技术都受到频谱拥挤、数据速率较低和频谱许可昂贵等问题的制约，而光纤接入到户又有“最后一千米”的困境。容量的需求和频谱的短缺已经成为无线通信发展最为棘手的问题。

1.2 光无线通信技术

光通信是用光波作为传输媒质来传输信息的通信方式。“烽火狼烟”是古代中国边境的士兵为了及时传递敌人来犯的信息，在烽火台上点燃“燃料”，燃烧时的烟雾可以从很远处看到，战情信息从这些烽火台一个接一个的传递下去，以达到了传递信息的目的。“烽火狼烟”是光通信的较早应用，可以看作光无线通信（Optical Wireless Communication, OWC）。OWC 是指以光信号作为传输介质在自由空间传输信息的通信方式。图 1.1 所示为通信技术的发展历史，可以看出：OWC 是最先被人类应用的通信技术，远早于现代主流的光纤（Fiber Optics, FO）和射频（RF）通信方式。

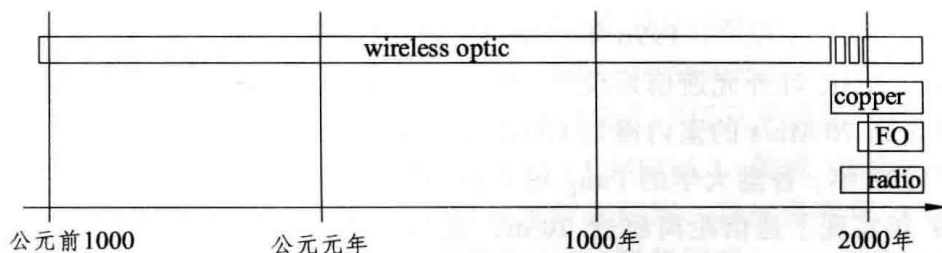


图 1.1 通信历史

由于技术的先进性、无电磁辐射，以及不对现有射频通信系统产生电磁干扰，OWC 已经发展成为射频通信的高容量的互补通信技术。OWC 通常分为利用红外光谱的红外光（IR）通信以及利用可见光谱的可见光通信（Visible Light Communication, VLC）。因为可以提供大约 670 THz 的可以自由使用的频带资源，OWC 可以满足未来高速率数据通信的要求。

与 IR 通信相比，可见光通信的优势有：

- （1）在照明的同时提供信息传输，绿色环保。
- （2）VLC 基于现有的照明设备，建设成本较低。
- （3）通常 VLC 要满足照明需求，具有很高的信噪比。
- （4）LED 发射功率大，但不会对人体产生危害。
- （5）IR 和 VLC 通常都需要直流偏置，特别是在光正交频分复用（OFDM）系统中，但是 VLC 系统的直流偏置可以用于照明。

1.3 可见光通信技术的发展

约公元前 800 年，希腊人和罗马人用烽火台传递战事。古北美洲印第安人在公元前 150 年用烟雾信号传递信息^[3]。18 世纪 90 年代，法国海军使用的旗语可以看作光无线通信的应用。1792 年法国工程师 Claude Chappe 通过给一个横木的两端加上能够旋转的机械臂，实现了信息的编码和传输，利用中继站可以实现超过 100 km 的光电报网络。1844 年，美国人萨缪尔·摩尔斯发明了莫尔斯码，通过灯塔上的信号灯可以为海军的船只导航。1880 年，亚历山大·格拉汉姆·贝尔（Alexander Graham Bell）发明了可将语音信号调制在太阳光上的光线电话机（photophone）^[4]。1979 年，Gfeller 和 Bapst 采用开关键控（On-Off Keying, OOK）方式调制波长为 950 nm 的红外光，漫射覆盖室内办公环境，实现了速率为 1 Mb/s

的室内 OWC 系统^[5]。1996 年, Marsh 和 Kahn 实现了速率 50 Mb/s 的室内漫射 OOK 红外光通信系统^[6]。2000 年, Carruthers 和 Kahn 实现了速率可达到 70 Mb/s 的室内漫射 OOK 红外光通信系统^[7]。

1998 年, 香港大学的 Pang 等人首先提出室外可见光通信概念, 并在 1999 年实现了通信距离超过 20 m, 速率可达 128 kb/s 的可见光通信系统^{[8], [9]}。日本 Keio 大学的科学家 M. Nakagawa 和 Y. Tanaka 等首先提出了在室内使用白光 LED 提供照明的同时传输信息的可见光通信的概念, 并在 2000 年仿真实现了利用 LED 照明灯作为通信基站在室内进行信息的无线传输^[10]。2003 年, Tanaka 等实现了速率达 400 Mb/s 的室内 OOK 可见光通信系统, 仿真分析了光路径差对通信系统的影响, 并提出采用正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM) 技术抵消路径差的影响^[11]。Douseki 采用白光 LED, 设计了能自己提供电能、在照明距离 40 cm 处可以达到 100 kb/s 高速传输的光无线通信系统^[12]。Afgani 和 Hass 等人提出并验证了在强度调制直接检测 (Intensity Modulation and Direct Detection, IM/DD) 系统采用具有高峰均比的 OFDM 技术的可行性, 并实现了直流偏置光 OFDM 技术 (DC-biased Optical OFDM, DCO-OFDM) ^[13]。牛津大学的 Minh 等采用非归零 OOK 调制和后均衡技术, 实现了 100 Mb/s 的白光 LED 通信系统^[14]。2010 年, Vucic 和 Kottke 等人采用 DMT (Discrete Multi-Tones) 调制、自适应比特和功率加载等方法, 实现了 513 Mb/s 的点到点可见光通信系统^[15], 2011 年, 他们采用波分复用 (WDM) 和 DMT 分别调制 RGB 白光 LED 的红、绿、蓝芯片, 在接收端采用滤光器滤光后分别解调, 实现了 803 Mb/s 的通信速率^[16]。2010 年, Azhar 等人建立了 2×9 的多输入多输出正交频分复用 (MIMO-OFDM) 系统, 通信距离 1 m 时总传输速率为 220 Mb/s^[17]。Khalid 等采用商用的白光 LED, 通过自适应比特和功率加载算法, 实现了速率达 1 Gb/s 的 VLC 系统^[18]。此后, Cossu 和 Khalid 等人采用 RGB-LED 实现了 3.4 Gb/s 的系统^[19]。Tsonev 等人采用磷化镓 μ LED、均衡和自适应比特加载算法实现了 3 Gb/s 的 VLC 系统^[20]。2017 年, 台湾学者 Lu 等使用 RGB-LED, 建立了 2×2 的 WDM MIMO 系统, 实现了通信距离达 3 m、速率为 6.36 Gb/s 的可见光通信系统^[21]。

2003 年, 日本 Keio 大学发起并成立了可见光通信协会 (Visible Light Communications Consortium, VLCC) 以推进 VLC 的研究, 其成员包括

卡西欧、NEC、松下电气工程、三星以及 NTT Docomo 等电信运营商。2008 年, VLCC 与红外线数据协会 (Infrared Data Association, IrDA) 及光无线通信推进协会 (ICSA) 合作, 共同制定了“可见光通信”标准。2008 年, 欧盟启动了家庭 Gigabit 接入计划 (OMEGA), 集成 VLC、无线通信和电力线通信技术, 构建家庭区域宽带通信网, 目标是实现 1 Gb/s 的通信速率。2008 年, 由美国政府资助的一项“智慧照明 (smart lighting)”计划, 试图将无线通信能力嵌入到未来的 LED 照明设备中, 减轻目前 RF 频段的拥挤状况。同年, IEEE 专门成立了可见光通信小组 IEEE802.15.7 开展 VLC 的研究。2011 年, IEEE 发布了 VLC 标准“IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light”。2011 年, 英国的可见光通信研究被《时代周刊》评为当年全球 50 大科技发明之一。

2012 年, 我国科技部公布的《“十二五”国家科技计划材料领域 2013 年度备选项目征集指南》中, 也将 LED 技术列入其中, 内容包括大电流驱动薄膜半导体照明技术开发和“十城万盏”半导体照明应用研究及示范。2013 年, 由解放军信息工程大学牵头的首个国家 863 计划“可见光通信系统关键技术研究”正式启动, 并在 2014 年发起成立了“中国可见光通信产业技术创新战略联盟”, 致力于突破可见光通信技术创新和产业应用发展的瓶颈。2013 年复旦大学的迟楠教授团队实现了离线最高速率可达 3.25 Gb/s, 实时系统平均上网速率 150 Mb/s, 堪称世界最快的“灯光上网”。2015 年 12 月, 经中国工信部测试认证, 中国“可见光通信系统关键技术研究”又获得重大突破, 实时通信速率提高至 50 Gb/s, 再次展现了中国在可见光领域的研发实力。2015 年, 中国科学院半导体研究所陈弘达、陈雄斌研究员主持北京市科技计划课题“室内高速可见光通信系统收发器件与越区切换技术研发”, 在传输距离 6.2 m 时, 实现了单路实时传输平均速率 610 Mb/s^[22]。2017 年, Zhi Li 和 Chao Zhang 等人采用 RGB LED、WDM 调制实现了 544.32 Mb/s 的传输速率^[23]。

1.4 可见光通信系统

可见光通信是一种光无线通信技术, 利用可见光波段 (波长 380 ~

780 nm) 的光作为信息载体, 在自由空间传输信息^[24]。通过给普通照明用的发光二极管加装调制电路, LED 就可发出肉眼感觉不到的高速明暗闪烁的光信号, 在提供照明的同时传输信息。基于白光 LED 的可见光通信系统原理如图 1.2 所示。

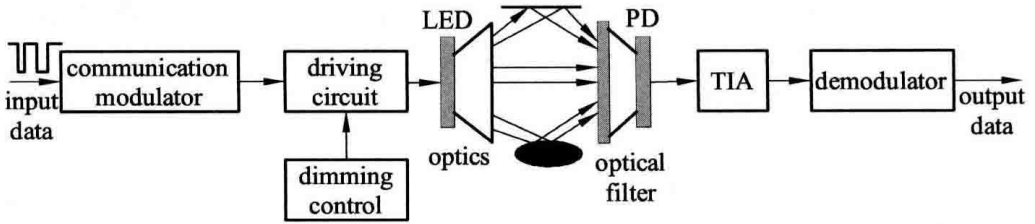


图 1.2 可见光通信系统原理图

原始的二进制比特信息流经过调制后和调光控制信号一起输入驱动电路, 然后调制 LED 发光, 将电信号转换为光强信号。光信号再经过光束成形系统 (如光放大器、准直器) 来放大和集中光束。光信号经过光无线信道传输, 其中一部分信号被室内物体吸收, 其他的光信号经室内散射或者镜面反射传输。通常入射到接收端光电检测器 (Photo Detector, PD) 的光信号有两种传输模式, 一种是不经过反射而直接入射的视线传输 (Line-of-Sight, LOS), 另一种是经过反射体反射而入射的漫射传输 (Non-Line-of-Sight, NLOS)。接收端采用滤光器仅使载荷信息的光波信号透过, 同时还可滤掉部分背景光干扰。光信号经过放大和聚焦后输入光电检测器, 将光信号转换为电信号。电信号经过跨导放大器 (Transimpedance Amplifier, TIA) 后输入解调器, 解调出原始信号。

通常在 VLC 系统中使用白光 LED 作为光源, 同时提供照明和通信的双重功能。LED 属于固体光源, 在 20 世纪 90 年代时才有了用于照明的大功率 LED。随后, LED 照明技术发展很快, 其使用寿命已经超过了 100 000 h, 照明效率超过了 260 lm/W^[25], 而传统的白炽灯照明效率最大为 52 lm/W, 荧光灯为 90 lm/W^[26]。相比于传统光源, LED 具有很多优点, 比如使用寿命长、耐潮湿环境、体积小、发光效率高、功率消耗低和响应速度快。因为这些优点, 白光 LED 被认为是实现照明 (室内和室外) 和数据通信双重功用的理想光源。

据《2015—2020 年中国 LED 照明产业市场前景与投资战略规划分析报告》分析, 照明市场是 LED 最重要、最具发展前景的应用。为推动中

国 LED 产业的发展,降低能源消耗,2009年,中国科技部推出了“十城万盏”工程,我国 LED 路灯市场保持持续增长,至 2013 年,占到全球市场规模的五成左右,已成为全球最重要的 LED 路灯市场之一。2016 年,在法兰克福国际灯光照明及建筑物技术与设备展 (Light+Building 2016) 期间,欧洲照明协会 (Lighting Europe) 正式对外发布了以 2025 年为战略目标的行业发展路线图。欧洲照明协会预测,从 2016 年开始,传统电光源产品的年销售数量将持续下滑,预计到 2020 年,LED 光源的年销售数量将增长至 8 亿支。

LED 逐渐取代白炽灯、日光灯成为下一代主要照明技术已是大势所趋,利用 LED 作为发射光源的可见光通信技术,必将随着 LED 的发展而高速发展。无论是从国家战略层面,还是从对节能减排的迫切需求,或者是从抢占市场考虑,可见光通信作为一种照明和光通信结合的新型通信方式,将推动下一代照明和接入网的发展,已成为国际竞争的焦点和制高点。

1.5 发光二极管 (LED)

1962 年, GaAsP 红光发光二极管诞生。与传统的照明光源荧光灯和白炽灯相比,LED 在能效、光照度、寿命和可靠性方面都表现出了技术优势。随着 III-V 族合金的提纯和外延技术的发展,LED 的性能在过去的 50 年中获得了显著的提升。商用 LED 的效率已从 0.1 lm/W 迅速提升到 100 lm/W 以上。目前,LED 可以发射从短波长 (紫色) 到长波长 (红色) 的所有可见光谱的光。因此,LED 已广泛应用于我们的日常生活中,如普通照明、交通信号灯和平板显示器。在全球商业照明中,LED 的市场份额不断增长,未来几年,商用 LED 销售税收将超过 200 亿美元。尽管目前 LED 的价格高于传统光源,但可以预见的是,随着制造技术的发展,LED 的成本将进一步降低。

1.5.1 LED 类型

图 1.3 所示为目前主要的几种 LED 类型,包括荧光 LED (pc-LED),多芯片 LED,有机 LED (OLED) 和微 LED (μ -LED)。其中 pc-LED 和