



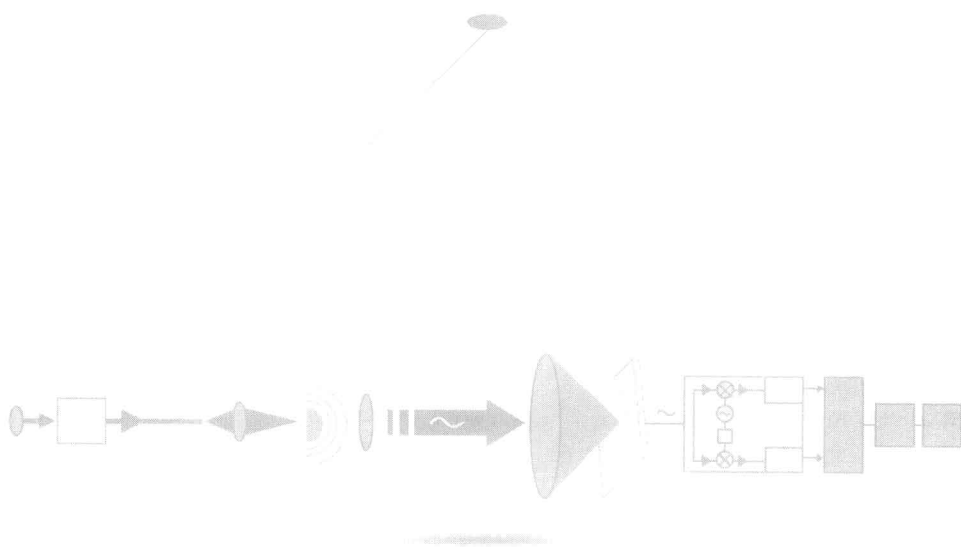
电子信息与电气工程技术丛书 (E&E)

LED VISIBLE LIGHT COMMUNICATION TECHNOLOGY

# LED可见光 通信技术

迟楠 著

Chi Nan



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书系统阐述了可见光通信的基本原理、系统构架、上层协议、发展趋势等。全书共分为9章,第1章给出了可见光通信的基本概念,并对其发展历史进行了追溯,研究趋势进行了展望;第2章~第6章详细介绍了实现可见光通信所采用的先进技术,包括可见光发射技术、信道建模、接收技术、调制技术和均衡技术;第7章为高速 VLC 通信系统实验,给出了本研究团队基于第2章~第6章介绍的技术理论基础之上的实验成果;第8章主要介绍了可见光通信实现的上层协议;第9章对可见光通信技术的未来发展进行了展望。

本书内容系统全面,结构体系创新,理论与实践结合,吸纳最新成果(包括作者本人及合作者的科研成果),各章附小结;可以作为高等学校光学、光学工程、激光技术、信息与通信技术等相关专业的研究生和本科生的教材,也可以作为从事可见光通信技术研究的科学和工程技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

LED 可见光通信技术/迟楠著.--北京:清华大学出版社,2013

电子信息与电气工程技术丛书

ISBN 978-7-302-33780-5

I. ①L… II. ①迟… III. ①发光二极管—光通信 IV. ①TN383 ②TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 211372 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:10.25 字 数:254千字

版 次:2013年11月第1版 印 次:2013年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:053369-01

随着计算机、智能设备的迅速普及,移动数字终端的范畴发生了革命性的变化,给传统接入网技术带来了巨大的考验。光纤到户“最后一公里路”的困境,无线接入网频谱资源的紧张,RoF 技术的不成熟和电磁辐射都制约着这个瓶颈的突破。当今世界正在演绎一场接入方式的深刻变革,社会也在呼唤一种拓宽频谱资源、绿色节能、可移动的接入方式,可见光通信(VLC)应运而生。

可见光通信采用白光 LED 作为光源,利用 LED 灯光承载的高速明暗闪烁信号来传输信息。可见光通信是照明与通信的深度耦合。由于白光 LED 具有效率高、价格低及寿命长等优点,逐渐取代白炽灯、日光灯成为主要照明光源已经成为必然的趋势。2011 年,我国已经公布了逐渐淘汰白炽灯路线图,计划在 2016 年全面禁止普通照明用白炽灯的销售。LED 成为下一代照明技术已是大势所趋,固态照明的普及将使可见光通信的光源无处不在。利用 LED 作为光源的可见光通信技术将站在巨人的肩膀上,随着 LED 的发展而高速发展。由于 LED 的节能和低成本特性,可见光通信将作为一种新型的绿色通信方式为国家的节能减排规划做出巨大的贡献。

可见光通信具有以下特点:

(1) 白光对人眼安全,室内白光 LED 灯的功率可以高达 10W 以上,这就使可见光通信具备了非常高的信噪比,具有更大的带宽潜力;

(2) 可见光通信无电磁污染,白光和射频信号不相互干扰,所以它可以应用在电磁敏感环境中,适用于飞机、医院、工业控制等射频敏感领域;

(3) 可见光通信兼具照明、通信和控制定位等功能,具有能耗低、购置设备少等优势,符合国家节能减排战略;

(4) 由于频谱无需授权即可使用,所以可见光通信应用灵活,可以单独使用,也可以作为射频无线设备的有效备份;

(5) 可见光通信适合信息安全领域应用,只要有可见光不能透过的障碍物阻挡,照明信息网内的信息就不会外泄,因此可见光通信具有高度的保密性。

可见光通信的概念在 2000 年提出之后,迅速获得了世界各国的关注和支持,在短短十几年间得到了迅猛的发展。从几十兆比特每秒到 500Mb/s 再到吉比特每秒传输速率不断提升;从离线到实时,从低阶调制到高阶调制,从点对点到 MIMO,技术发展一日千里。可见光通信被《时代周刊》评为 2011 年全球 50 大科技发明之一。当今,可见光通信技术的研究正在经历一个新概念、新技术层出不穷的极为活跃的发展期。无论从国家战略层面,还是节能减排的迫切需求,或者巨大的市场潜力来考虑,可见光通信作为一种照明和光通信结合的新型模式推动下一代照明和接入网的发展与技术进步,已成为国际竞争的焦点和制高点。

目前,国内还没有系统描述基于白光 LED 的可见光通信技术的书籍,本书填补了这一空白,对可见光通信系统进行了较为详尽的描述,可以作为高等院校学生的教材,也可以作为产业界工程技术人员入门参考书。本书第 1 章介绍可见光的基本概念,提供背景和预备知识。第 2 章到第 6 章为可见光技术基础,介绍可见光系统的发射部分、信道建模、接收部分,以及调制技术和均衡技术。为了使读者更为深刻的理解可见光技术,第 7 章给出一些可见光通信系统实验。第 8 章主要讲述可见光通信系统的上层协议。最后第 9 章对可见光通信技术的发展趋势进行了展望。

本书的撰写得到了上海市科委项目组相关教师和学生的大力帮助。刘木清、周小丽老师撰写了第 2 章的部分内容;郭心悦、张明伦老师撰写了第 3 章中信道模型的部分内容;张永刚、王少伟老师撰写了第 4 章中探测器部分内容;张睿老师撰写了第 8 章部分内容。感谢李荣玲、王源泉、王一光、黄星星、李洁慧、杨超同学在撰写本书过程中的支持与帮助。本书成稿时间较短,不足之处在所难免,诚恳希望广大读者多提宝贵意见,以利于我们今后改进和提高。

迟 楠

2013 年 7 月

于复旦大学

<b>第 1 章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 LED 市场趋势 .....	1
1.2 可见光通信发展历史 .....	3
1.3 可见光通信系统组成 .....	4
1.4 可见光通信技术的优势 .....	5
1.5 研究趋势 .....	6
1.6 小结 .....	7
参考文献 .....	7
<b>第 2 章 可见光发射部分</b> .....	<b>9</b>
2.1 LED 概述 .....	9
2.1.1 LED 光源的发展概况 .....	9
2.1.2 LED 的发光机理 .....	10
2.1.3 LED 的特性 .....	11
2.1.4 白光 LED 的种类 .....	14
2.2 PC-LED .....	16
2.2.1 PC-LED 的材料及光谱特性 .....	16
2.2.2 PC-LED 的结构 .....	17
2.2.3 PC-LED 的显色效应 .....	18
2.3 RGB LED .....	19
2.4 RGB 加 UV LED .....	20
2.5 LED 驱动 .....	21
2.5.1 LED 驱动的物理设备 .....	21
2.5.2 LED 驱动方式 .....	21
2.5.3 LED 的驱动电路设计 .....	22
2.6 LED 照明光场及视觉设计 .....	22
2.6.1 LED 照明光场的特点 .....	23
2.6.2 主要的 LED 的光学设计形式 .....	23
2.7 小结 .....	25
参考文献 .....	25
<b>第 3 章 可见光信道建模</b> .....	<b>27</b>
3.1 LED 频率响应模型 .....	27

# 目录

3.1.1 白光 LED 频率响应模型 .....	27
3.1.2 蓝光滤波后 LED 频率响应模型 .....	28
3.2 各种 LED 的调制带宽 .....	28
3.2.1 LED 的调制带宽 .....	29
3.2.2 各种 LED 的调制带宽 .....	30
3.3 多径反射建模 .....	31
3.3.1 室内光通信的连接方式 .....	31
3.3.2 可见光通信信道建模 .....	33
3.3.3 可见光通信系统性能的基本分析 .....	35
3.4 光子模型 .....	35
3.4.1 模型设计 .....	35
3.4.2 仿真过程及数据分析 .....	37
3.5 小结 .....	40
参考文献 .....	40
<b>第 4 章 可见光接收技术 .....</b>	<b>41</b>
4.1 硅基 PIN 光电探测器 .....	41
4.1.1 PIN 结构及工作原理 .....	42
4.1.2 特性参数 .....	43
4.1.3 器件制备工艺 .....	47
4.2 窄带蓝光探测器 .....	48
4.3 蓝光滤膜 .....	53
4.3.1 概述 .....	53
4.3.2 基本原理与计算方法 .....	54
4.3.3 蓝光滤膜的设计 .....	56
4.3.4 设计实例 .....	59
4.3.5 制备方法 .....	60
4.4 探测器电路设计 .....	60
4.4.1 自适应接收技术 .....	60
4.4.2 时钟提取及恢复电路 .....	61
4.4.3 接收机后均衡技术 .....	62
4.5 小结 .....	62
参考文献 .....	62



<b>第 5 章 可见光调制技术</b> .....	<b>63</b>
5.1 OOK 调制技术 .....	63
5.1.1 OOK 通信原理 .....	63
5.1.2 OOK 误码特性 .....	64
5.1.3 系统实现及测试波形 .....	65
5.2 PPM 和 PMW 调制技术 .....	66
5.3 DMT 调制 .....	68
5.3.1 DMT 调制与解调的基本原理 .....	68
5.3.2 DMT 调制在可见光通信中的应用 .....	69
5.4 正交频分复用调制技术(OFDM) .....	70
5.5 CAP 调制 .....	72
5.6 小结 .....	75
参考文献 .....	75
<b>第 6 章 可见光通信均衡技术</b> .....	<b>77</b>
6.1 预均衡 .....	77
6.1.1 基于模拟电路的均衡技术 .....	78
6.1.2 基于 FIR 滤波器的预均衡技术 .....	78
6.2 后均衡 .....	85
6.3 频偏相偏的估计与补偿算法 .....	87
6.3.1 相偏的估计与补偿算法 .....	87
6.3.2 频偏的估计与补偿算法 .....	90
6.4 ACO-OFDM 调制 .....	91
6.4.1 ACO-OFDM 调制原理 .....	91
6.4.2 ACO-OFDM 调制系统原理 .....	92
6.4.3 ACO-OFDM 性能仿真 .....	93
6.4.4 ACO-OFDM 调制优缺点 .....	95
6.5 2 倍 FFT .....	95
6.6 小结 .....	97
参考文献 .....	97
<b>第 7 章 高速 VLC 通信系统实验</b> .....	<b>99</b>
7.1 副载波复用技术(SCM) .....	99
7.2 波分复用技术(WDM) .....	104



# 目录

7.3	多输入单输出(MISO)系统	105
7.3.1	2x1 MISO-OFDM VLC 系统实验	107
7.3.2	3x1 MISO-OFDM VLC 系统实验	107
7.4	双向传输技术	109
7.4.1	时分双工技术	110
7.4.2	频分双工技术	110
7.5	ACO-OFDM 技术	115
7.6	2倍 FFT 技术	116
7.7	小结	117
	参考文献	117
<b>第 8 章</b>	<b>可见光通信协议</b>	<b>119</b>
8.1	可见光通信协议 IEEE 802.15.7 概述	119
8.1.1	VLC 网络拓扑结构	119
8.1.2	系统框架	120
8.1.3	功能概述	121
8.2	MAC 层协议规范	122
8.2.1	MAC 层功能描述	122
8.2.2	MAC 帧格式	124
8.3	PHY 层协议规范	126
8.3.1	运行模式	126
8.3.2	常规需求	128
8.3.3	数据模式	130
8.3.4	调光和闪烁缓解	131
8.3.5	物理层数据单元(PPDU)格式	132
	参考文献	134
<b>第 9 章</b>	<b>可见光通信技术发展趋势</b>	<b>135</b>
9.1	MSD-MIMO 系统	135
9.2	像素化 MIMO 系统	136
9.3	非成像 MIMO	138
9.3.1	非成像光 MIMO 模型	139
9.3.2	发射器	139
9.3.3	计算 $H$ 矩阵	140

9.3.4 接收器 .....	140
9.4 成像 MIMO .....	141
9.4.1 成像分集光 MIMO 模型 .....	142
9.4.2 成像分集接收机 .....	143
9.5 光电前端芯片 .....	144
9.5.1 PIN 光电探测器 .....	145
9.5.2 前置放大器 .....	146
9.5.3 滤波器 .....	146
9.5.4 主放大器 .....	146
9.6 编码与信号处理芯片 .....	146
9.6.1 DSP 的应用与发展 .....	147
9.6.2 FPGA 的应用与发展 .....	147
9.7 小结 .....	148
参考文献 .....	148
缩写术语 .....	150

# 第 1 章 绪论

2000 年可见光通信的概念横空出世,其利用发光二极管(LED)作为光源,使 LED 照明的同时可以高速通信。白光 LED 现在已经被广泛应用于信号发射、显示、照明等领域。与其他光源相比,白光 LED 具有更高的调制带宽。并且白光 LED 还具有调制性能好、响应灵敏度高的优点,利用 LED 的这些特性,我们可以将信号调制到 LED 所发出的可见光上进行传输。白光 LED 可以将照明与数据传输结合起来的特性,促进了可见光通信(VLC)技术的发展。

当今无线频谱资源紧张,很多频段都已经被占用,如图 1-1 所示。VLC 利用的可见光波段尚属空白频谱,无需授权即可使用,因此 VLC 技术抢占空白频谱,有效地利用资源,拓展了下一代宽带通信的频谱,可以解决光通信与无线通信网络共存与兼容的问题。并且与其他无线技术相比,VLC 还拥有安全性高、保密性好等众多优点。本章的目的在于介绍可见光通信的基本概念,提供背景和预备知识。

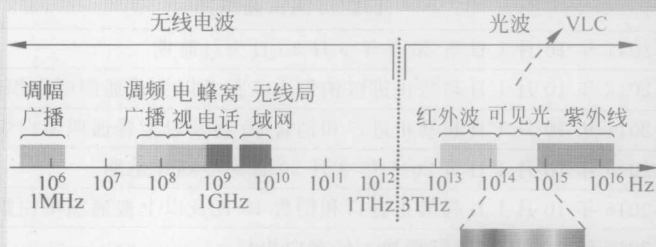


图 1-1 频谱资源示意图

## 1.1 LED 市场趋势

可见光通信利用白光 LED 作为光源,而 21 世纪注定是 LED 的时代。20 世纪 60 年代问世的 LED 在短短数十年飞速发展,光色从单到多、亮度从低到高、寿命从短到长、市场从无到有。LED 诞生至今以每 10 年亮度提高 20 倍,价格降低为原来 1/100 的速度发展。技术的日趋成熟、功能的不断完善和丰富给人类社会带来了翻天覆地的变化,其影响已经渗透到全球科技、经济、生活等各个领域,而在照明领域尤

具强大的优势和竞争力。较之白炽灯和节能灯,LED具有效率高、价格低及寿命长等优点。LED的能耗分别是其白炽灯 1/10 和节能灯的 1/4,发光效率更高(可达 249lm/W,约为日光灯 4 倍),寿命高达 10 万个小时,稀土添加量是节能灯的 1/1000。这些无与伦比的性能使其迅速占据了市场,备受世界各国的青睐,各国陆续推出了白炽灯淘汰计划,传统照明技术正在迅速向固体照明技术演进。LED 的市场份额和各国白炽灯取代路线图分别如图 1-2 和表 1-1 所示。毫无疑问,LED 成为下一代照明技术已是大势所趋。固态照明的普及使 VLC 的光源无处不在,利用 LED 作为光源的也可将光通信站在巨人的肩膀上,随着 LED 的发展而高速发展。

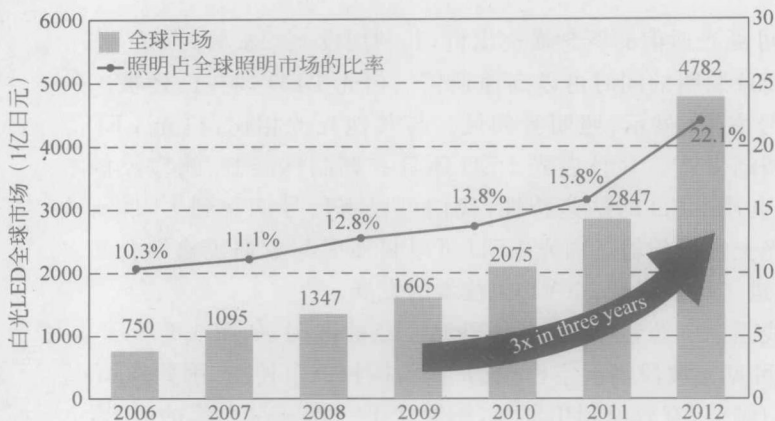


图 1-2 LED 市场份额(来源: Nikkei Electronics)

表 1-1 全球各国淘汰白炽灯、推广 LED 路线图

洲	国 别	白炽灯淘汰路线图
亚洲	中国	2011 年 10 月 1 日至 2012 年 9 月 30 日为过渡期
		2012 年 10 月 1 日起禁止进口销售 100 瓦及以上普通照明白炽灯
		2014 年 10 月 1 日起禁止进口和销售 60 瓦及以上普通照明白炽灯
		2015 年 10 月 1 日至 2016 年 9 月 30 日为中期评估期
		2016 年 10 月 1 日起禁止进口和销售 15 瓦及以上普通照明白炽灯
	印度	2010 年之前用节能灯替换 4 亿盏白炽灯
	菲律宾	2010 年之后禁止白炽灯的使用
	马来西亚	2014 年之后停止生产、进口和销售白炽灯
欧洲	欧盟	2016 年之后停用白炽灯和卤素灯
	爱尔兰	2012 年之后停用白炽灯
	瑞士	禁止 F 和 G 级白炽灯的使用
	英国	2011 年之后停用白炽灯
美洲	加拿大	2012 年之后禁用白炽灯
	美国	2020 年之后禁用 45lm/W 以下白炽灯
	古巴	2005 年之后禁止进口白炽灯,用节能灯替代
大洋洲	澳大利亚	2010 年之后禁止白炽灯的销售

## 1.2 可见光通信发展历史

基于白光 LED 的可见光通信(VLC)技术,可以以低价格同时实现照明与通信,适用于各种接入场景,无电磁干扰,绿色环保。由于 VLC 技术的这些优点,其一问世便迅速获得世界各国的纷纷关注和支持,从诞生至今短短十几年间迅速发展,取得了一个又一个突破性的进展。

日本研究者首先提出了 VLC 的概念。在 2000 年,日本研究者提出并仿真了利用 LED 照明灯作为通信基站进行信息无线传输的室内通信系统。至此之后,日本的研究者看到了 VLC 的发展前景,投入了大量精力进行研究。2009 年,中川实验室提出了一种基于载波监听多路访问/冲突检测(CSMA/CD)的全双工多址接入的可见光通信系统,实现了 100Mbit/s 的高速通信。为了实现可见光通信的实用化,“可见光通信联盟(VLCC)”于 2003 年在日本成立,并迅速成为国际性组织。日本的 VLC 技术已经从系统传输研究走向了应用研究,已经提出了 VLC 技术在广告牌、灯塔、定位、智能交通系统等多方面的应用。2008 年,在日本九十九里海滩进行了利用灯塔上的 LED 作为发射机、图像传感器作为接收机的可见光通信实验,实现了可见光通信最远传输距离 2000m,传输速率为 1022bit/s。2009 年,VLCC 展出了应用 VLC 技术的数字广告牌样品,该广告牌利用其背光 LED 传输数据,使用者可以根据需要下载信息。2010 年,VLCC 与日本交通管理技术协会进行了以图像传感器作为接收机、利用 LED 交通信号灯作为发射机的可见光通信实验,并取得了成功,传输速率 4800kbit/s,距离 300m。2012 年,庆应义塾大学的研究者提出了针对视障者的语音辅助系统,使用智能手机检测用户的位置信息并引导用户。日本在基于 VLC 技术的产品开发方面,也已经迈出了步伐。2012 年,Casio 开发出了一款新的苹果应用程序“Picapicamera”,利用可见光技术用户之间可以即时分享拍摄的照片。

虽然可见光技术的发源地在日本,但是美国和欧盟的研究者们也不甘落后,由于政府的重视,研究资金充裕,现已取得了许多优异的成绩。2008 年,欧盟开展 OMEGA 项目,发展 1Gbit/s 以上的超高速家庭接入网研究,VLC 无线通信技术是研究焦点之一。搭建的测试网络理论速度为 1.25Gbit/s,最高传输速度为 300Mbit/s。2008 年,美国国家科学基金会资助开展“智能照明通信”(SLC)项目,主要为 VLC 无线通信技术研究。2011 年,德国、挪威、以色列与美国等共同成立 Li-Fi 联盟,进行航天系统中的连网研究,利用 VLC 技术实现飞行时的无线网络环境。2012 年,在英国工程与自然研究理事会(EP SRC)的资助下,英国、美国的科学家开展“超并行可见光通信”(UP-VLC)项目,探索自由空间和空间复用导波 VLC 的实施方案。柏林的研究机构海因里希赫兹研究所与西门子合作进行高速 VLC 技术研究,2012 年,利用 DMT 技术,采用 RGB-LED 的发射机、基于 PIN 的接收机,实现了单信道 806Mbit/s(红光信道)的传输速率。

我们对近年来 VLC 的突破性传输实验做了全面统计,如表 1-2 所示。VLC 技术在短短十几年间迅猛发展,从几十兆比特每秒到 500Mbit/s 再到 800Mbit/s 传输速率不断提升,现在已经突破吉比特每秒,更高速率的通信也已经近在眼前;从离线到实时,从低阶调制到高阶调制,从点对点到 MIMO,技术发展一日千里;甚至已经走向市场,被《时代周刊》评为 2011 年全球 50 大科技发明之一。由此可见,当今 VLC 技术的研究正在经



历一个新概念、新技术层出不穷的极为活跃的发展期。

表 1-2 VLC 系统实验传输速率总结

	均衡	调制方案	实验速率	接收机	传输距离	研究机构
白光信道		OOK-NRZ	1022bit/s	成像传感器	2000m	可见光通信联盟
白光信道	预均衡	OOK-NRZ	40Mbit/s BER $<10^{-6}$	PIN	2m	牛津大学
蓝光信道	预均衡	OOK-NRZ	80Mbit/s BER $<10^{-6}$	PIN	0.1m	牛津大学
白光信道		OOK-NRZ	100Mbit/s	APD	3m	中川实验室
蓝光信道	后均衡	OOK-NRZ	100Mbit/s BER $<10^{-9}$	PIN	0.1m	三星电子
蓝光信道		DMT-QAM	200Mbit/s BER $<10^{-3}$	PIN	2m	弗朗霍夫研究所
MIMO 白光信道	后均衡	DMT-QPSK	220Mbit/s BER $<10^{-3}$	成像传感器	1m	牛津大学
蓝光信道		DMT-QAM	513Mbit/s BER $<2 \times 10^{-3}$	APD	0.27m	西门子
RGB		DMT-WDM	803Mbit/s BER $<2 \times 10^{-3}$	APD	0.12m	弗朗霍夫研究所
RGB		DMT	806Mbit/s BER $<2 \times 10^{-3}$	PIN	0.08m	弗朗霍夫研究所
蓝光信道		DMT-QAM	1Gbit/s BER $<1.5 \times 10^{-3}$	APD	0.1m	圣安娜高等研究学院
白光信道	后均衡	CAP	1.1Gbit/s BER $<10^{-3}$	PIN	0.23m	国立交通大学
RGB		DMT-WDM	3.4Gbit/s BER $<10^{-3}$	APD	0.1m	国立交通大学

### 1.3 可见光通信系统组成

一个基于白光 LED 的可见光通信系统框图如图 1-3 所示,该系统包括完整的发射、信道传输和接收部分。原始的二进制比特流经过预处理和编码调制之后,驱动 LED,对 LED 进行强度调制,将电信号转换为光信号。预处理,即预均衡,是为了补偿器件、信道对信号带来的失真,通过采用预均衡技术可以提高 LED 的响应带宽,提高传输速率。而在接收端进行的后均衡,可以补偿其他信道损耗,如相位噪声等。预均衡与后均衡技术的原理我们将在第 6 章中详细介绍。编码调制是为了在有限的带宽上实现更高的传输速率。由于受到可见光通信带宽的限制,为了提高白光 LED 通信系统的传输速率,在发射端可以通过设计和采用高阶的调制编码技术,来提高传输的频谱效率,从而实现高速传输。目前研究者们采用最多的高阶调制格式为 QAM-OFDM。

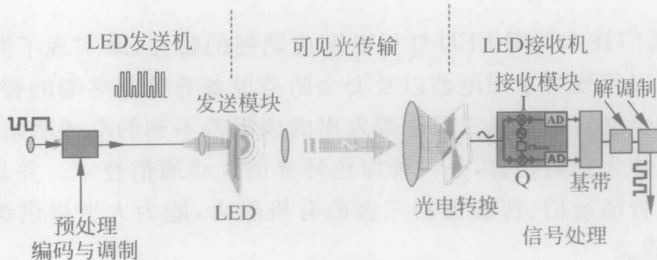


图 1-3 可见光通信系统框图

VLC 系统中使用的光源白光 LED, 目前市面上主要有两种类型的 LED: 荧光粉 LED 与红绿蓝(RGB)LED。荧光粉 LED 是最为广泛使用的 LED 类型, 其原理是利用蓝光激发黄色荧光粉, 以产生白光。这种类型的 LED 结构简单, 成本较低, 调制复杂度相对较低, 但是调制带宽很低, 对室内环境的频谱利用率不高。由于荧光粉 LED 的调制带宽只有几兆, 系统的传输速率被限制, 当信号格式采用 OOK-NRZ 时, 传输速率最高能达到 10Mbit/s。这是由于黄色荧光粉的响应速度慢而造成的。另一种类型为 RGB-LED, 其原理是将红、绿、蓝三色 LED 芯片封装在一起, 将它们发出的光混合在一起得到白光。RGB-LED 具有很高的调制带宽, 非常有希望用于未来的高速信号传输, 但是其调制复杂度相对较高, 并且如何控制三个芯片以保持颜色稳定, 避免闪烁还有待进一步研究。基于两种类型的 LED 的 VLC 系统, 各有其优势。基于荧光粉 LED 的系统优势在于实现简单、成本低廉; 而基于 RGB-LED 的系统优势在于可以实现更高的传输速率。

承载着传输数据的光信号在自由空间中进行传输, 通过接收机前端的透镜, 聚焦到光电探测器上。在此系统中, 接收到的绝大部分能量来自于直射路径 LOS (line-of-sight)。光电探测器将接收到的光信号转换为电信号, 对信号进行信号处理、解调制、解码等过程之后, 恢复出原始的发送信号。VLC 系统可以采用的接收机类型有三种: 基于 PIN 的接收机、基于 APD 的接收机、基于图像传感器(image sensor)的接收机。基于 PIN 的接收机响应快、灵敏度高、价格低廉, 基于 APD 的接收机同样响应更快、灵敏度更高、具有更高的信噪比、价格相对较高, 因此目前的高速 VLC 系统通常采用基于 PIN 或者 APD 的接收机。而基于图像传感器的接收机响应速度较慢、灵敏度相对较低, 但是它可以同时接收来自多个光源发送的数据, 并且传输距离更长, 因此在 MIMO-VLC 系统中经常使用, 同时在很多应用实例中, 如智能交通系统、定位等, 经常使用。

## 1.4 可见光通信技术的优势

可见光通信作为一种新兴的无线通信技术, 正受到越来越多的瞩目, 其优点主要体现在以下几个方面。

(1) 由于无线频谱资源日趋紧张, 可见光通信的引入是对通信频谱的一次巨大拓展。由于越来越多的移动数字终端的使用, 尤其是用户对“Anywhere, anytime”视频服务的需求, 使无线频谱资源即将耗尽。因此需要采用新技术对无线频谱进行扩展, 而可见光具有 380~780nm 的巨大带宽(相当于 405THz), 可以缓解无线频谱资源即将耗尽的燃



眉之急。

(2) 可见光通信技术利用 LED 灯可以高速调制的特性,既实现了照明,又实现了上网通信,同时还可以实现对家用电器以及安全防范设备等控制终端的智能控制。可见光通信技术,是利用荧光灯或发光二极管等发出的肉眼看不到的高速明暗闪烁信号来传输信息的,因此对人体无辐射伤害,是一种绿色环保的无线通信技术。并且 LED 是公认的节能光源。照明、智能通信、智能控制三者的有机融合,能为人类提供更加节能降耗、绿色环保的生活方式。

(3) 可见光通信技术的应用场景多种多样,可以作为现有的无线通信的有效补充。可见光通信技术,因为无电磁污染,可以应用于机关、医院、工业控制等射频敏感领域;由于照明与通信的结合,适合在智能家居、智能交通等领域应用;适合水下通信——基于蓝绿光 LED 灯的半导体照明技术可用于水下高带宽通信;适合信息安全领域应用——只要有可见光不能透过的障碍物阻挡,半导体照明信息网内的信息就不会外泄。

(4) 可见光通信技术具有高速通信的潜力,可能为未来的高速接入提供技术支持。由于白光对人眼的安全性,室内白光 LED 灯的功率之和可以高达 10W 以上,这就使可见光通信具备了非常高的信噪比,为其高速通信打下了良好的基础,非其他技术可比。目前可见光通信的实验速率已经达到 3.4Gbit/s。

由于可见光通信技术具有以上几大优势,世界各国的研究者们对其倾注了极大的热情,使得可见光通信技术的发展一日千里,几乎每天都有新的突破。可见光通信技术的应用领域多样,用户数量巨大,具有很好的发展前景,可见光通信技术的实用化值得期待。

## 1.5 研究趋势

目前,国外的主流设备商和各大学、研究所等都在开展 VLC 技术的研究,VLC 技术已经成为当前国际研究的热点。然而,VLC 技术的发展也存在着一些限制因素,其中最主要的挑战在于白光 LED 有限的带宽,从而限制了传输速率。目前最广泛使用的荧光粉 LED 的调制带宽只有几兆,因此如何提高 LED 的调制带宽,提高系统传输速率,成为研究者们研究的关键点。

首先,研究者在信号探测之前,加入了一块蓝光滤波器,以滤除响应慢的黄光分量,从而将荧光粉 LED 的调制带宽从 3MHz 提高到了 10MHz;然后,采用均衡技术,调整 LED 的频率响应,将带宽提高到了几十兆。如果使用 RGB-LED 替换荧光粉 LED 作为光源,可以获得更高的调制带宽,通过采用 WDM 技术,可以提高系统传输速率。采用 MIMO 技术,通过空分复用以提高系统传输速率。通过采用高阶调制格式、DMT 技术,可以进一步提高系统传输速率。

蓝光过滤与均衡技术,实现简单,可以增加荧光粉 LED 的调制带宽,在一定程度上可以提高系统传输速率。WDM 技术只适用于采用 RGB-LED 作为光源的 VLC 系统,利用 RGB-LED 调制带宽高、发出三种单色光的特性,可以很大程度地提高系统传输速率。要进一步提高速率,需要采用高阶调制格式,如 QAM-DMT,但是同时也增加了系统的复杂程度。MIMO 技术,由于受成像探测器限制,目前实现的速率并不高,但却是最有前景

的技术。通过采用高阶调制格式提高系统传输速率,调制阶数越高,系统越复杂,接收机的灵敏度要求也越高,因此必然遇到瓶颈。然而 MIMO 技术可以在有限的带宽上,通过空间复用实现高速通信,因此随着技术的发展,MIMO 技术必将成为未来高速 VLC 系统的有力选择。

## 1.6 小结

本章主要介绍了关于可见光通信的一些基本概念和背景知识,为读者接下来进一步了解可见光通信技术打好基础。本章首先简要讲述了 LED 的市场趋势,为读者展现了 LED 强大的市场潜力。然后介绍了可见光通信的发展历程,使读者对可见光通信技术从概念出现到突破吉比特每秒的传输速率的发展过程有所了解。之后讲述了可见光通信系统的基本组成架构,并对各个部分进行了简要说明,最后对可见光通信技术的研究趋势进行了总结与展望。

## 参考文献

- [1] Klaus-Dieter Langer, Jelena Vučić, Christoph Kottke et al. Advances and Prospects in High-Speed Information Broadcast using Phosphorescent White-Light LEDs [C]. ICTON, 2009; Mo. B5. 3.
- [2] Kaiyun Cui, Gang Chen, Zhengyuan Xu, and Richard D. Roberts. Line-of-sight Visible Light Communication System Design and Demonstration [C]. CSNDSP 2010, 2010; OWC-21.
- [3] Y. Tanaka, S. Haruyama, M. Nakagawa. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links[C]. Indoor and Mobile Radio Communications, 2000, Vol 2: 1325~1329.
- [4] Hoa Le Minh, Dominic O'Brien, Grahame Faulkner et al. High-Speed Visible Light Communications Using Multiple-Resonant Equalization [J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2008, 20 (14): 1243~1245.
- [5] Hoa Le Minh, Dominic O'Brien, Grahame Faulkner et al. 80 Mbit/s Visible Light Communications Using Pre-Equalized White LED [C]. ECOC 2008, 2008; P. 6. 09.
- [6] Jelena Vučić, Christoph Kottke, Stefan Nerreter et al. 513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED [J]. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2010, 28 (24): 3512~3518.
- [7] Christoph Kottke, Kai Habel, Liane Grobe et al. Single-Channel Wireless Transmission at 806 Mbit/s Using a White-Light LED and a PIN-Based Receiver [C]. ICTON, 2012; We. B4. 1.
- [8] A. M. Khalid, G. Cossu, R. Corsini, P. Choudhury, and E. Ciarabella. 1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1465~1473.
- [9] Fang-Ming Wu, Chun-Ting Lin, Chia-Chien Wei, Cheng-Wei Chen, Hou-Tzu Huang, and Chun-Hung Ho. 1. 1-Gb/s White-LED-Based Visible Light Communication Employing Carrier-Less Amplitude and Phase Modulation[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2012, 24 (19): 1730~1732.
- [10] J. Grubor, S. C. J. Lee, K.-D. Langer, T. Koonen, and J. W. Walewski. Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white light LEDs [C]. ECOC 2007, 2007: 1~2.