

第一章 绪论

随着移动互联网的发展，其提供的各种方便快捷的功能已经深刻的改变了人们的生活方式。同时物联网、智能家居等相关产业也正处于快速发展阶段，如何为多种多样的智能设备提供安全可靠而又绿色经济的无线接入方式显得尤为重要，虽然目前使用的蜂窝网及 WIFI 接入能解决大部分的接入问题，但是由于频谱资源的限制迫使人们寻找新的接入方式。同时发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 作为新一代绿色高效的光源在照明市场上高歌猛进, 预计到 2021 年，其市场占有率将超过 52%^[1]。以 LED 为基础的室内可见光 (Visible Light Communication, VLC) 迎来了前所未有的发展机遇。

1.1 论文研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近 10 年来，因以智能手机为代表的智能终端的快速发展，人们对移动互联的需要越来越强劲，这也极大的推动了无线通信的研究与应用。4G 技术方兴未艾，而针对更高要求的 5G 移动通信技术研究已在紧锣密鼓进行，同时 wifi 作为移动蜂窝网的补充也发展迅猛。但是由于无线射频通信本身的特点，其面临着频谱资源更加紧张、利用现有的频谱去大幅提高通信性能的代价更加昂贵及电磁辐射可能影响健康等诸多问题。而可见光通信尝试从另一个角度解决这些问题，其具有频谱资源不受限制、对人类健康安全及通信速率快等特点，得到了国内外移动通信领域和光学领域学者的广泛关注。

同时具有能耗低、使用寿命长、生产过程环保等多方面优点的 LED 灯得到人们的亲睐，将取代白炽灯和节能灯成为室内照明的主要光源，而且半导体 LED 光源具有响应灵敏度高，易于调制等通信方面的先天优势，这给室内可见光通信提供了一个绝佳的载体。室内可见光通信与 LED 灯的结合，同时兼顾照明与通信双重功能，为室内短距离无线连接提供了一种高速、安全、绿色的选择，特别是在医院、飞机机舱等需要电磁屏蔽的环境下，可见光通信有着不可比拟的优势。

简单说来，可见光通信就是将我们要发送的信息经过编码、调制之后由 DA 以电信号输出去调制 LED 灯，电信号的起伏波动将转化为 LED 灯发光强度的变化；再接收端，由光电二极管 (Photo Diode, PD) 去检测这种光的强弱变化，并将之还原为电信号，然后解调、解码得到发射端发送的信息^[2-5]。但是这个通信过程中光的强弱的变化速度非常快，兼顾了通信的 LED 灯在照明功能上与普通 LED 灯毫无差异。

1.1.2 研究意义

目前室内可见光领域的研究主要还是针对点对点传输, 研究人员正努力使用各种各样的技术提高点对点的传输速率, 而很少关心将来可能商用中可能面临的困难。但是在实际使用中, 人们不仅要求传输速率快, 而且要求系统稳定可靠。现在市面上已经有很多的支持调制的 LED 灯, 不同厂商生产的 LED 灯的通信性能千差万别, 使用不同的接收器 PD 也将造成通信性能上的差异, 另一方面发射端 LED 与接收端 PD 之间的距离及入射角的不同也将造成信道的改变。所以为了适应真实的使用环境, 将自适应传输技术引入可见光通信是非常必要的。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

早在 1979 年, IBM 苏黎世研究实验室的 F. R. Gfeller 就提出一个用无线光通信解决计算机中心机器互联问题的方案^[6], 虽然他提出的模型中使用的是 950nm 波长的近红外光, 但是在发射端使用 LED, 在接收端使用 PD, 是现在室内可见光通信的雏形。那时 LED 技术还不够成熟, 而且价格高昂, 所以可见光通信的大发展推迟到了 LED 技术难题已经解决的 21 世纪。

2000 年, 来自日本庆应义塾大学的 Tanaka 团队首次提出使用白光 LED 作为光源的室内可见光通信模型^[7], 并且进行了简单的数学分析及仿真实验指出了多径产生的符号间干扰 (Inter Symbol Interference, ISI) 和接收机视场角 (Field of View, FOV) 是影响通信性能的两个主要因素。2001 年, 他们研究了正交频分复用调制 (Orthogonal frequency division modulation, OFDM) 和归零键控 (On-Off Keying Return-to-Zero, OOK-RZ) 在白光 LED 多灯情况下的通信性能^[2], 通过仿真表明在多灯的场景下, 不同发射端到达接收端的路程差造成的多径对系统性能影响显著, 同时指出 OOK-RZ 能够胜任较为低速的情况 (100 Mbps), 而带有保护间隔的 OFDM 能够很好的抵抗多径引起的时延扩展, 适应高速环境 (400 Mbps)。2004 年, Toshihiko Komine 进一步指出 ISI 取决于传输速率和 FOV 两个因素, 并且预言可见光通信的速率可以达到 10 Gb/s^[5]。21 世纪初, 日本一直走在可见光通信研究的前列, 并且于 2003 年成立了可见光通信协议 (Visible Light communication consortium, VLCC), 积极推进可见光的研究和技术标准化, 夏普、松下、东芝、三星、NEC 和卡西欧等公司都是其成员。

在欧洲, 由二十多家国际知名大学和公司联合确立了 OMEGA 计划, 以最终形成亿兆家庭网络标准为目的, 其中室内光通信是其主要的研究对象, 该计划在可见光点对点传输系统设计领域取得了不错的研究成果^[8-11]。来自爱丁堡大学的 Harald Haas 教授团队也对可见光通信进行了广泛的研究, 包括调制方式^[12-15]、信道建模研究^[16, 17]、硬件实现^[18-20]及室内可见光混合组网^[21-23]等。在 2011 年, Haas 教授以可见光通信为主题在 TED(Technology, Entertainment, Design) 上做过一次演讲, 该演讲视频在网络上播放超过 150 万次, 使得无线光通信被人们熟知。

美国同样重视可见光通信的发展,在2008年10月美国国家科学基金会(National science foundation, NSF)出资1.85亿美元,提出了志在推动基于LED的可见光通信技术的“智慧照明(Smart lighting)”项目,希望能在LED照明系统中嵌入可见光通信技术以提供更多的无线接入点。2009年,美国电子电气工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)标准化组织将无线光通信技术列入无线私域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)的实现范畴内,同时制定了无线光通信技术标准——IEEE 802.15.7,大力推动无线光通信技术的标准化。

从2008年开始,各国的研究人员设计出了很多基于白光LED的无线可见光通信演示系统,在传输速率上也是你追我赶。2008年,来自英国诺森比亚大学的Hoa Le Minh等人采用多共振均衡方法将白光LED的3 dB带宽由2.5 MHz提升到了25 MHz,并且基于OOK调制实现了通信速率达40 Mbps的系统^[24],2009年,他们又通过在接收端加入一个一阶均衡器将3 dB带宽扩展到了50 MHz,也在OOK调制下设计了速率为100 Mbps的通信系统^[25],Hoa Le Minh等人的工作为可见光高速通信系统的设计奠定了基础。2010年,Jelena Vučić等人使用波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)和离散多音调制(Discrete Multi-Tone, DMT)技术将通信速率提高到513 Mbps^[10]。2012年,A.M.Khalid采用DMT自适应调制实现了通信速率达1 Gbps的系统,再次刷新了可见光系统速率记录。

自2012年以来,研究人员开始使用基于RGB LED来进一步提升可见光通信系统的速率。2012年,Giulio Cossu等人采用DMT调制在RGB LED灯下实现了将可见光通信系统的速率提高到3.4 Gbps^[26]。2015年,已经有研究人员讨论了使用角度分集(Angle Diversity)、图形接收器(Imaging Receivers)和中继点(Relay Node)在RGB LED通信速率达到10 Gbps系统^[27]。

1.2.2 国内研究现状

中国对可见光通信的研究起步稍晚,但是得益于国内学者在通信领域的基础积累,在VLC研究中也有迎头赶上之势。在2010年之前,已经有部分学者开始关注可见光通信的发展,在国内的一些期刊上介绍了可见光通信,并且研究了一些具体的问题^[28-30]。随着国家“十二五”计划的实现,2013年,“十二五”国家863计划“可见光通信系统关键技术研究”主题项目和国家973计划项目“宽光谱信号无线传输理论与方法研究”同步启动,将国内可见光通信研究推向高潮,国内很多高校及研究单位均参与其中,主要包括清华大学、北京理工大学、复旦大学、东南大学、北京大学、北京邮电大学、中科院半导体研究所、解放军理工大学等。取得了一批杰出的研究成果。中国科技大学徐正元教授支持的973项目在可见光通信的基础研究中取得了不错的成绩,包括系统分析建模、LED灯布局优化、调制技术研究等^[31-33]。复旦大学迟楠教授团队则致力于可见光通信系统的实现,力推VLC向产业化方向发展,他们先后完成了575 Mbps至3.7 Gbps可见光通信系统搭建^[34-36]。目前正在向10 Gbps量级通信速率的系统努力^[37]。

1.3 论文主要研究工作和章节安排

本人在硕士研究生阶段主要室内可见光领域的研究。研一时，重点放在专业课程及可见光理论方面的学习，特别关注了 OFDM 技术在可见光系统中的应用，并且改进了非对称削波光正交频分复用 (Asymmetrically Clipped Optical OFDM, ACO-OFDM) 调制技术，针对 ACO-OFDM 系统时域信号的特征，提出了一种能够明显改善 ACO-OFDM 系统峰均比 (Peak to Average Power Ratio, PAPR) 性能的结构，即在发射端削波而在接收端能恢复的非对称削波光正交频分复用 (Recoverable Upper Clipping ACO-OFDM, RoC-ACO-OFDM)^[38]。研二研三主要进行了可见光通信点对点系统设计实现及自适应传输相关技术的研究。与另外两位同学基于现场可编程门阵列 (Field — Programmable Gate Array, FPAG) 设计了一套传输参数可配置的可见光通信演示系统，该系统已有自适应传输的雏形。与对与自适应传输相关的信道估计、能量分配及比特分配等相关内容进行了学习研究。限于毕业论文课题范围，本文仅关注可见光通信自适应传输技术，主要内容安排如下：

第一章主要介绍可见光通信的研究背景，包括其基本原理及与传统通信方式相比的优势，同时也对可见光通信在国内外的发展历程进行了概述。

第二章 可见光多波段通信系统概述

2.1 引言

参考文献

- 1 陈特, 刘璐, 胡薇薇. 可见光通信的研究 [J]. 中兴通讯技术, 2013, 1(1):49–52.
- 2 Tanaka Y, Komine T, Haruyama S, et al. Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting[C]. In: Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2001 12th IEEE International Symposium on. 2001. 2:F–81.
- 3 Fan K, Komine T, Tanaka Y, et al. The effect of reflection on indoor visible-light communication system utilizing white LEDs[C]. In: Wireless Personal Multimedia Communications, 2002. The 5th International Symposium on. 2002. 2:611–615.
- 4 Komine T, Nakagawa M. Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication[J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 2003, 49(1):71–79.
- 5 Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 2004, 50(1):100–107.
- 6 Gfeller F R, Bapst U. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation[J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(11):1474–1486.
- 7 Tanaka Y, Haruyama S, Nakagawa M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links[C]. In: Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000. PIMRC 2000. The 11th IEEE International Symposium on. 2000. 2:1325–1329.
- 8 Vučić J, Kottke C, Nerreter S, et al. 125 Mbit/s over 5 m wireless distance by use of OOK-Modulated phosphorescent white LEDs[C]. In: Optical Communication, 2009. ECOC'09. 35th European Conference on. 2009. 1–2.
- 9 Vučić J, Kottke C, Nerreter S, et al. White light wireless transmission at 200 Mb/s net data rate by use of discrete-multitone modulation[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2009, 21(20):1511–1513.
- 10 Vučić J, Kottke C, Nerreter S, 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.
- 11 Vucic J, Kottke C, Habel K, et al. 803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary[C]. In: Optical Fiber Communication Conference. 2011. OWB6.
- 12 Afgani M Z, Haas H, Elgala H, et al. Visible light communication using OFDM[C]. In: Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2006. TRIDENTCOM 2006. 2nd International Conference on. 6–pp.

- 13 Elgala H, Mesleh R, Haas H. Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM[J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 2009, 55(3):1127–1134.
- 14 Mesleh R, Mehmood R, Elgala H, et al. Indoor MIMO optical wireless communication using spatial modulation[C]. In: Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on. 2010. 1–5.
- 15 Mesleh R, Elgala H, Haas H. Optical spatial modulation[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(3):234–244.
- 16 Elgala H, Mesleh R, Haas H. A study of LED nonlinearity effects on optical wireless transmission using OFDM[C]. In: Wireless and Optical Communications Networks, 2009. WOCN'09. IFIP International Conference on. 2009. 1–5.
- 17 Elgala H, Mesleh R, Haas H. Non-linearity effects and predistortion in optical OFDM wireless transmission using LEDs[J]. International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems, 2009, 1(2):143–150.
- 18 Stefan I, Elgala H, Mesleh R, et al. Optical wireless OFDM system on FPGA: Study of LED nonlinearity effects[C]. In: Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd. 2011. 1–5.
- 19 Chun H, Rajbhandari S, Faulkner G, et al. Demonstration of a Bi-directional visible light communication with an overall sum-rate of 110 Mb/s using LEDs as emitter and detector[C]. In: Photonics Conference (IPC), 2014 IEEE. 2014. 132–133.
- 20 Manousiadis P, Chun H, Rajbhandari S, et al. Demonstration of 2.3 Gb/s RGB white-light VLC using polymer based colour-converters and GaN micro-LEDs[C]. In: Summer Topicals Meeting Series (SUM), 2015. 2015. 222–223.
- 21 Wang Y, Haas H. Dynamic load balancing with handover in hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(22):4671–4682.
- 22 Stefan I, Haas H. Hybrid Visible Light and Radio Frequency Communication Systems[C]. In: Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2014 IEEE 80th. 2014. 1–5.
- 23 Basnayaka D A, Haas H. Hybrid RF and VLC Systems: Improving User Data Rate Performance of VLC Systems[C]. In: Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2015 IEEE 81st. 2015. 1–5.
- 24 Minh H L, O'Brien D, Faulkner G, et al. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2008, 20(14):1243–1245.
- 25 Le Minh H, O'Brien D, Faulkner G, et al. 100-Mb/s NRZ visible light communications using a post-equalized white LED[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2009, 21(15):1063–1065.
- 26 Cossu G, Khalid A, Choudhury P, et al. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED[J]. Optics express, 2012, 20(26):B501–B506.
- 27 Hussein A T, Elmirghani J M. 10 Gbps Mobile Visible Light Communication System Employing Angle Diversity, Imaging Receivers, and Relay Nodes[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(8):718–735.

- 28 丁德强, 柯熙政. 可见光通信及其关键技术研究 [J]. 半导体光电, 2006, 27(2):114–117.
- 29 于志刚, 陈长缨, 赵俊, et al. 白光 LED 照明通信系统中的分集接收技术 [J]. 光通信技术, 2008, 32(9):52–54.
- 30 张立, 朱娜, 张宁. 室内 LED 光无线通信多径效应抑制 [J][J]. 通信技术, 2010, 43(07):198–200.
- 31 Ma C, Zhang H, Cui K, et al. Effects of LED lighting degradation and junction temperature variation on the performance of visible light communication[C]. In: Systems and Informatics (ICSAI), 2012 International Conference on. 2012. 1596–1600.
- 32 Zhang X, Cui K, Zhang H, et al. Capacity of MIMO visible light communication channels[C]. In: 2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. 2012.
- 33 Ma C, Zhang H, Yao M, et al. Distributions of PAPR and crest factor of OFDM signals for VLC[C]. In: 2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. 2012.
- 34 Wang Y, Wang Y, Chi N, et al. Demonstration of 575-Mb/s downlink and 225-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED[J]. Optics express, 2013, 21(1):1203–1208.
- 35 Wang Y, Shao Y, Shang H, et al. 875-Mb/s asynchronous bi-directional 64QAM-OFDM SCM-WDM transmission over RGB-LED-based visible light communication system[C]. In: Optical Fiber Communication Conference. 2013. OTh1G–3.
- 36 Chi N, Wang Y, Wang Y, et al. Ultra-high-speed single red-green-blue light-emitting diode-based visible light communication system utilizing advanced modulation formats[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1):010605.
- 37 Wang Y, Shi J, Yang C, et al. Integrated 10 Gb/s multilevel multiband passive optical network and 500 Mb/s indoor visible light communication system based on Nyquist single carrier frequency domain equalization modulation[J]. Optics letters, 2014, 39(9):2576–2579.
- 38 Xu W, Wu M, Zhang H, et al. ACO-OFDM-Specified Recoverable Upper Clipping With Efficient Detection for Optical Wireless Communications[J]. Photonics Journal, IEEE, 2014, 6(5):1–17.

心於至善

