

# 可见光通信的研究

## Visible Light Communication

陈特/CHEN Te, 刘璐/LIU Lu, 胡薇薇/HU Weiwei

(北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)  
(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University, Beijing 100871, China)

中图分类号: TN92; TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 01-0049-04

**摘要:** 文章介绍了全球可见光通信的研究现状, 并针对可见光通信研究中存在的问题提出了未来可见光通信的研究趋势。文章认为可见光通信能够同时实现照明与通信的功能, 具有传输数据率高、保密性强、无电磁干扰、无需频谱认证等优点, 已经成为世界范围的研究热点。文章指出可见光通信在未来的通信领域中将会占据重要的地位, 并将大大地推动信息化社会的发展。

**关键词:** 发光二极管; 可见光通信; 正交频分复用

**Abstract:** In this paper, we review the status of visible light communication and discuss research trends in this field. We suggest that illumination and communication can be achieved simultaneously, and this has the advantages of high bitrates, enhanced security, abundant spectrum resource, and no electromagnetic interference. Visible light communication will be an important part of future communication, and will greatly promote the development of information society.

**Key words:** light-emitting diode (LED); visible light communication; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)

白光发光二极管(LED)面世后, 发光效率逐步提高, 其应用领域逐步从显示扩展到照明。与传统的照明设备相比, 白光LED具有驱动电压低、功耗低、使用寿命长等优点, 是一种绿色环保的照明器件, 被视为第四代节能环保型照明设备<sup>[1]</sup>。由图1可以看出, LED在全球照明市场中所占的比重正逐年递增。据专业人士预测, 随着白光LED照明技术的不断发展和完善, 到2021年, LED将占据52%以上的全球商用照明灯泡市场份额<sup>[2-3]</sup>。

由于白光LED具有很高的响应

灵敏度, 因此可以被用于进行高速的数据通信。可见光通信(VLC)就是在

白光LED技术上发展起来的新型的无线光通信技术。

室内可见光通信系统示意图如图2所示。在可见光通信系统中, 白光LED具有通信与照明的双重功能, 由于LED的调制速率非常高, 人眼完全感觉不到其闪烁。可见光通信系统可利用室内白光LED照明设备代替无线局域网基站, 其通信速度可达每秒数十兆至数百兆, 只要在室内灯光照到的地方, 就可以实现长时间的高速数据传输; 可见光通信系统具有安全性高的特点, 室内的信息不会外泄漏到室外; 由于不使用无线电波通信, 在对电磁信号敏感的环境中可以自由使用该系统。除此之外, 与传统的射频通信以及红外无线光通信技术相比, 可见光通信还具有对人体安全、频率资源丰富等优点。

## 1 可见光通信的研究现状

### 1.1 国际上的相关研究现状

由于可见光通信技术具有较好

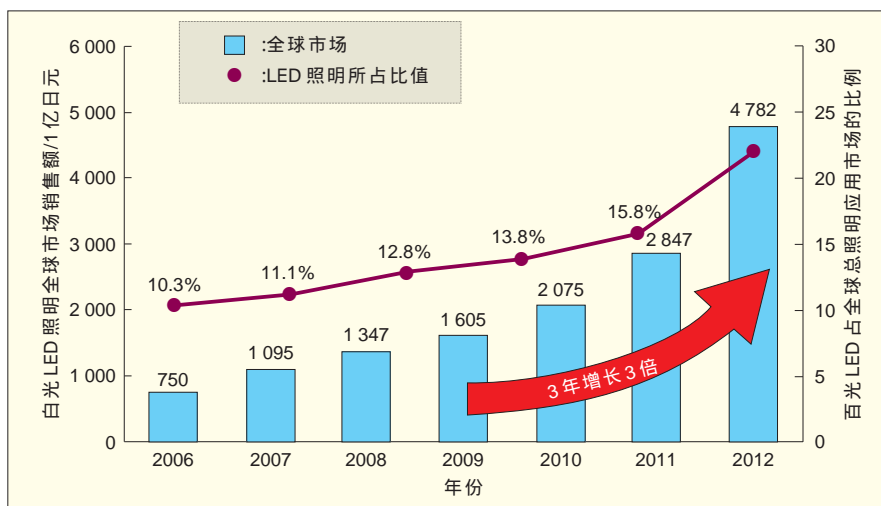
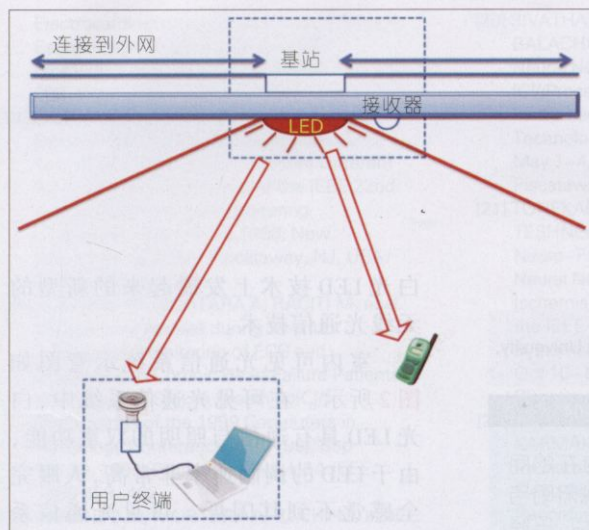


图1 LED照明占全球市场份额的估测

**基金项目:** 国家自然科学基金 (61071084); 国家重点基础研究发展 (973) 规划 (2012CB315606)



▲图2 室内可见光通信系统示意图

的应用前景,它在未来通信领域中占有重要的地位和价值,因此很多研究机构和电信运营公司加入到无线光通信的研究领域中来,特别是日本、欧洲、美国等国家在可见光通信的领域已经投入了大量的人力、物力以及财力。

可见光通信的研究最早在日本开展。早在2000年,中川研究室的Tannaka Yuichi等人就对基于白光LED的可见光通信信道进行了初步的数学分析和仿真计算,分析了白光LED作为室内照明和通信光源的可能性<sup>[4]</sup>。2002年,中川研究室的研究人员又对可见光通信系统展开了具体的分析,包括光源属性、信道模型、噪声模型、室内不同位置的信噪比分布等<sup>[5]</sup>。2003年,在中川正雄的倡导下,日本可见光通信联合体(VLCC)<sup>[6]</sup>成立,并吸引了一大批研究单位及企业参与,包括NEC、Sony、Toshiba、Samsung等。VLCC关于可见光通信的研究范围比较宽广,根据具体的应用场景可分为室内移动通信、可见光定位、可见光无线局域网接入、交通信号灯通信、水下可见光通信等。VLCC在可见光通信研究领域已经取得了很大的成就,例如Samsung公司展出过工作距离为1m的100 Mbit/s双向可见光通信系统;中川研究室还

开发了基于可见光通信的超市定位及导航系统,而且是面向商业化的产品。

欧洲的OMEGA计划<sup>[7]</sup>也对可见光通信展开了深入的研究。OMEGA计划由欧洲的20多家大学科研单位和企业组成,它的目标是发展出一种全新的能够提供宽带和高速服务的室内接入网路。OMEGA计划把可见光通信技术列为重要的高速接入技术之一,并且已经取得了丰硕的研究成果。2009年,牛津大学的

Dominic O'Brien等人利用均衡技术实现了100 Mbit/s的通信速率<sup>[8]</sup>;2010年,他们又利用多输入多输出(MIMO)和正交频分复用技术(OFDM)技术,实现了220 Mbit/s的传输速率<sup>[9]</sup>。2010年在OMEGA计划的年会上展出的室内可见光通信演示系统的通信速率达到了100 Mbit/s,该系统利用房间天花板上的16个白光LED通信,完成了4路高清视频的实时广播。在2010年1月,德国Heinrich Hertz实验室的科研人员创造了可见光通信速率的世界纪录,他们利用普通商用的荧光白光LED搭建的可见光通信系统达到了513 Mbit/s的通信速率,并且他们通过分析认为该系统的通信速率还有提升的空间,可达到700 Mbit/s甚至1 000 Mbit/s<sup>[10]</sup>。2011年,Heinrich Hertz实验室的科研人员又利用色光三原色(RGB)型白光LED以及密集波分复用(WDM)技术实现了803 Mbit/s的通信速率<sup>[11]</sup>。

除了日本和欧洲的科研单位,美国的UC-Light<sup>[12]</sup>也是进行可见光通信研究的重要机构。UC-Light依托于加州大学的4所分校和1个美国国家实验室,其研究人员的研究背景涉及建筑学、无线通信、网络、照明、光学、器件等领域。UC-Light成立的目的是开发一种基于LED照明的高速

通信和定位系统。

## 1.2 中国的研究现状

中国的可见光通信研究起步相对较晚,与国际相比仍然落后很多,尚没有比较成熟的商业化的可见光通信系统。近年来,在国家大力支持的背景下,中国的可见光通信研究也逐步取得了一定的进步,在可见光通信理论、系统设计和计算机仿真、实验演示系统设计制作等方面取得了一些成果。

北京大学在2006年首次提出了基于广角镜头的超宽视角可见光信号接收方案,并进行了一系列的理论和实验工作。此外,在LED的调制驱动、LED阵列的布局优化以及高灵敏度接收等方面进行了一定的研究,并在可见光通信与无源光网络(PON)的融合接入中的物理层、链路层和传输层等方面开展了探索研究。在2010年的Intel杯大学生嵌入式系统大赛中,北京大学的参赛作品(基于白光LED的照明及综合信息发布系统)实现了5个频道的广播,在6m的工作距离下实现了3 Mbit/s的通信速率,该系统在大赛中荣获二等奖。

## 1.3 可见光通信的标准化工作

由于可见光通信有着广阔的前景,IEEE在2003年开始并最终于2011年发布了可见光通信的标准IEEE 802.15.7<sup>[13]</sup>。这是VLC的第一个标准,包含了3个物理层类型,分别对应于低中高速数据传输。但是,由于缺少LED照明部门的参与,IEEE 802.15.7并没有给出可见光通信最终的标准。

在日本,VLCC也为可见光通信的标准化进行了很多年的努力。近年来,国际红外数据协会(IrDA)和VLCC在可见光通信的标准化工作中开展了一系列的合作。2009年它们在IrDA标准的基础上发布了第一个可见光通信标准,在这个标准下,现有的IrDA光学模块可以在经过改造

后被用于可见光通信的数据传输。

## 2 可见光通信的应用领域

可见光通信由于具有众多的优点,因此在很多领域具有巨大的应用前景。

### (1) 照明与通信

白光LED可以同时被用于照明与通信,因此信息可以在室内环境下进行广播<sup>[14]</sup>,并同时满足照明的需求。此外,可见光通信还可以实现手持终端之间的点对点通信,由于发散角较小,因此可以有效地降低传输损耗,实现高速通信。

### (2) 视觉信号与数据传输

信号灯在航海和地面交通等领域有着非常广泛的应用,它通过颜色的变化来给人们提供信号,而将数据通信与信号灯相结合则可以为交通管理提供更好的安全性和可靠性。目前,基于可见光通信的信号灯已有若干演示系统,如将数据由交通灯传递给汽车<sup>[15]</sup>,或将数据在汽车与汽车之间传递等。

### (3) 显示与数据通信

LED阵列常常被用于信息显示,如广告牌、信息板等。若将相应的信息调制到这些LED阵列上,则可便捷地将数据传递给用户手持终端<sup>[16]</sup>。这种显示与通信相结合的系统在机场、博物馆等场所有着巨大的应用前景。

### (4) 室内定位

传统的卫星定位方法很难实现室内移动用户的精确定位,而可见光通信则可以将用户的位置信息通过LED照明设施来进行传递,从而实现精准的室内定位。目前,基于可见光通信的诸多室内定位方案已经被提出<sup>[17]</sup>,日本的VLCC则已经实现了基于超市环境下的室内定位实验。

## 3 可见光通信的研究趋势

虽然可见光通信具有巨大的应用前景,但在实用过程中还有很多关键问题需要解决。目前限制可见光

通信发展的主要因素有:受限的LED调制带宽、LED器件的非线性效应、可见光通信室内信道的多径效应等等。因此,为了实现可见光通信高速的数据传输,以下几个方面已经成为了可见光通信的研究趋势。

### (1) 高调制带宽的LED光源

目前商用白光LED的调制带宽有限,只有约3~50 MHz。这是因为白光LED设计的初衷是用于照明,而非用于通信,其结电容很大,限制了调制带宽。因此,在保证大功率输出的前提下,开发出具有更高调制带宽的LED光源,将极大地促进可见光通信的发展。

### (2) LED的大电流驱动和非线性效应补偿技术

在可见光通信系统中,LED的工作电流较大,需要进行大电流驱动,而LED的非线性效应则会使可见光信号发生畸变。因此在实际使用中需要合理地控制偏置电压、信号动态范围、信号带宽等参数,并且根据LED的非线性传输曲线的特征有意识地对调制信号进行预畸变处理等等,以提高调制效率,提升传输容量。

### (3) LED光源的布局优化

在可见光通信系统中,白光LED光源需要同时实现室内照明和通信的双重功能,而单个LED的发光强度比较小,因此在实际系统中光源应采用多个LED组成的阵列。LED阵列的布局是影响可见光通信系统性能的重要因素之一。一方面,为了满足室内照明的要求,首先要考虑室内照明度的分布;另一方面,为了保证通信的性能,还需要考虑室内信噪比的分布,避免盲区和阴影的出现。一般来说,LED的数目越大,室内的照明度越高,系统接受到的光信号的功率也越大,但由不同路径造成的符号间干扰也越严重。因此,在对可见光通信系统的研究中,应对LED阵列进行合理的布局。

此外,对于不同的室内环境,如何迅速地建立光功率与信噪比分布

模型,实现快速的智能布局也是可见光通信研究中需解决的关键问题。

### (4) 光学MIMO技术

与射频系统相似,通过采用多个发射和接收单元的并行传输可以提高可见光通信的性能。此外需要指出的是,一个典型的室内照明方案需要采用白光LED阵列来满足一定的照明度,这恰好使MIMO技术更具有吸引力。

### (5) 光学OFDM技术

为了在有限带宽的条件下实现高速传输速率,OFDM成为了一个极具吸引力的高频谱效率的调制技术。OFDM技术为信道色散提供了一个简单的解决方法,而且可以完全在数字域实施,它将信道的可用带宽划分为许多个子信道,利用子信道间的正交性实现频分复用,并可以在子载波上通过对比特和功率的分配来实现信号传输对信道条件的调节适应。由于降低了子载波的传输速率,延长了码元周期,因此具有优良的抗多径效应性能;此外OFDM还可以使不同用户占用互不重叠的子载波集,从而实现下行链路的多用户传输。

### (6) 高灵敏度的广角接收技术

室内光通信系统大多数工作在直射光条件下,当室内有人走动或者在直射通道上有障碍物时,将会在接收机处形成阴影效应,影响通信性能,甚至出现通信盲区,使通信无法继续。而采用大视场的广角光学接收系统可以解决这一问题,其大视场角的特性可以保证同时接收直射和散射光信号,这样就避免了阴影和盲区现象的发生。同时,室内光通信系统采用MIMO技术要求接收机能够接收到发端LED光源阵列发出的光信号,以解析出多个独立的通信信道。这也需要接收光学系统具有大视场特性。

### (7) 消除码间干扰的技术

在室内可见光通信系统中,LED光源通常由多个发光LED阵列组成,另外为了达到较好的照明和通信效



果,防止阴影影响,一个房间通常要安装多个LED光源。由于LED单元分布位置的不同以及墙面的反射、折射及散射,不可避免的产生码间干扰,极大降低了系统的性能。自适应均衡技术以及前面提到的OFDM技术已经在高速无线通信中得到了广泛的应用。在可见光通信系统中,也可以采用这些方式降低符号间干扰。目前,应用于可见光通信的均衡和OFDM技术的研究已经成为可见光通信研究中的热点。

(8) 可见光通信与现有网络的融合接入技术

目前,全球已经开展了光纤到户的工作,并取得很大的进展。光纤到户后,可为单用户提供300 Mbit/s的下行带宽,在此网络带宽下,目前的微波无线低频段广播覆盖的频谱资源不够,无法满足如此高的带宽需求,因此,在最后10 m距离内的高速接入将成为宽带通信的瓶颈。可见光波段位于380~780 nm,属于新频谱资源。室内可见光通信由于具有诸多优点,已经成为了理想的短距离高速无线接入方案之一。将可见光通信系统与光纤到户系统融合,例如,可以通过光电、电光的转换将信息调制到LED光源发射到用户终端,实现高速率、高保密性的无线光接入。此外,可见光通信可与电力线通信(PLC)技术相融合,利用现有的电力线设备传输信号并驱动LED光源,将会大幅度降低成本,因此,这种技术融合在未来也将会成为可见光通信的研究趋势。

#### 4 结束语

可见光通信能够同时实现照明与通信的功能,具有传输数据率高,保密性强,无电磁干扰,无需频谱认证等优点,是理想的室内高速无线接入方案之一。可见光通信在全球已经成为了研究的热点,特别是日本、欧洲和美国对可见光通信的研究投入了大量的人力和物力,并取得了一

定的进展。在可见光通信的研究中,高调制带宽的LED光源、LED的大电流驱动和非线性效应补偿技术、LED光源的布局优化、光学MIMO与OFDM技术、高灵敏度的广角接收技术、消除码间干扰的技术以及可见光通信与现有网络的融合接入技术等已经成为了研究趋势。可见光通信在未来的通信领域中将会占据重要的地位,并将大大地推动信息化社会的发展。

#### 参考文献

- [1] NAKAMURA S. Present performance of InGaN based blue/green/yellow LEDs[C]// Proceedings of the SPIE Conference on Light - Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications, Apr 13 - 14, 2007, San Jose, CA, USA. Vol 3002. Bellingham, WA, USA: SPIE, 1997:26 - 35.
- [2] 中国安防展览网.10年内LED将占商用照明一半以上份额[EB/OL].(2012-06-13). <http://www.afzhan.com/new s/Detail/20080.html>
- [3] HARUYAMA S. Visible light communications: Recent activities in Japan[R]. Boston, MA, USA: Academia Day at BU Photonics Center, Boston University, 2011.
- [4] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links[C]// Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC 00): Vol 2, Sep 18 - 21, 2000, London, UK. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 1325 - 1329.
- [5] FAN K, KOMINE T, TANAKA Y, et al. The effect of reflection on indoor visible light communication system utilizing white LEDs [C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications(WPMC '02): Vol 2, Oct 27 - 30, 2002, Honolulu, HI, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 611 - 615.
- [6] VLCC[EB/OL].<http://www.vlcc.net>
- [7] OMEGA[EB/OL].<http://www.ict-omega.eu/>
- [8] MINH H L, O BRIEN O, FAULKNER G, et al. 100 - Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(15): 1063 - 1065.
- [9] AZHAR A H, TRAN T A, O BRIEN D. Demonstration of high - speed data transmission using MIMO - OFDM visible light communications[C]// Proceedings of the 2010 IEEE Globecom Workshop on Optical Wireless Communications(OWC 10), Dec 6 - 10, 2010, Miami, FL, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1052 - 1056.
- [10] VUCIC 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]// Proceedings of the Optical Fiber

Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 11), Mar 6 - 11, 2011, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011:3p.

- [12] UC - Light[EB/OL].<http://www.uclight.ucr.edu/>
- [13] VUCIC J, LANGER K. High - speed visible light communications: State - of - the - art[C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 12), Mar 4 - 8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012:3p.
- [14] GRUBOR J, GAETE JAMETT O C, WALEWSKI J, et al. High - speed wireless indoor communication via visible light[M]. ITG Fachbericht, 198. Berlin, Germany: VDE Verlag, 2007: 203 - 208.
- [15] WADA M, YENDA T, FUJII T, et al. Road - to - vehicle communication using LED traffic light[C]// Proceedings of the 2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IVS 05), Jun 6 - 8, 2005, Las Vegas, NV, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005:601 - 606.
- [16] PARK S B, LUNG O K, SHIN H S, et al. Information Broadcasting System based on Visible Light Signboard[C]// Proceedings of the 7th IASTED International Conferences on Wireless and Optical Communications, May 30 - Jun 1, 2007, Montreal, Canada. 2007.
- [17] YOSHINO M, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. High - accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor[C]// Proceedings of the Radio and Wireless Symposium(RWS 08), Jan 22 - 24, 2008, Orlando, FL, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 439 - 442.

收稿日期 2012-10-08

#### 作者简介



陈特,北京大学信息科学技术学院博士生;主要研究方向为光通信。



刘璐,北京大学博士毕业;北京大学信息科学技术学院副教授;主要研究领域为卫星激光通信以及光电精密测控技术;已发表学术论文20余篇,申请发明专利5项,已获授权3项。



胡薇薇,中国科学技术大学博士毕业;北京大学信息科学技术学院教授、博士生导师;主要研究领域为无线光通信、ROF通信、光学相控阵等;已发表学术论文100余篇,出版著作3部,已获授权9项。