

可见光通信应用前景与发展挑战

宋小庆 赵梓旭 陈克伟 廖自力

装甲兵工程学院, 北京 100072

摘要 白光发光二极管(LED)具有节能、可靠、寿命长、价格低以及高速调制等特性,可同时实现照明和可见光通信(VLC)双重功能。可见光通信具有安全节能、免电磁干扰、通信速率高以及精确定位等很多优势,应用前景广阔,是光通信领域的研究热点。故从定位导航、智能交通系统、高速传输、飞机和水下等场合对可见光通信应用前景及研究成果进行了综述,对可见光通信发展遇到的挑战及发展趋势进行了分析讨论。

关键词 光通信;可见光通信;白光LED

中图分类号 TN92 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.080004

Visible Light Communication: Potential Applications and Challenges

Song Xiaoqing Zhao Zixu Chen Kewei Liao Zili

Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

Abstract White illumination light emitting diode (LED) has the characteristics of energy efficiencies, reliability, long lifetimes, lower cost and high-speed modulation. LED can be used not only as illumination, but also simultaneously as the source of visible light communication (VLC). Due to the advantages such as energy saving, no electromagnet interference, high communication speed and accuracy position, visible light communication has wide application prospects. It is a hot research topic in optical communication field. The VLC potential applications and achievements in indoor positioning navigation, intelligent transport system, high speed communication, airport and underwater areas are reviewed, and some of the challenges and it's development direction in the future are also discussed.

Key words optical communications; visible light communication; white LED

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 230.3670

1 引言

和白炽及荧光灯相比,白光发光二极管(LED)具有寿命长、光效高、功耗低、无辐射、安全性好、可靠性高等特点,被称为“绿色照明”并得到迅猛发展。白光LED在未来市场极具竞争力。世界范围内约140多亿的白炽灯转换成更节能的LED^[1]。日本政府10年前就将LED作为21世纪照明技术^[2],中国政府也发布了在几年内逐步结束白炽灯的销售政策^[3]。

除了照明优势外,LED还具备响应时间短和高速调制等特性。白光LED高速调制所引起的光闪烁不容易被人眼察觉,可以在照明同时提供数据通信的功能。这种在380~780 nm可见光谱段进行数据通信的技术简称为可见光通信(VLC)技术。VLC在中、短距离安全保密通信、高精度准确定位、交通运输通信和室内导航等领域具有很大潜力,尤其是可以替代射频(RF)解决“最后1 m”的问题。和无线电波相比,可见光通信有很多优势:1)信息量在以摩尔法则发展,无线电频谱很多频段已被占用,VLC利用的是高于3 THz且尚属于空白频谱的可见光频谱,不受使用许可证限制;2)可见光不能穿透建筑墙,相互邻近封闭单元中VLC信号不会相互干扰,安全性高,保密性好;3)可见光收发器件设备简单,价格低廉;4)可见光波长属于亚微米级,在准确方向定位上具有明显优势;5)VLC能够替代无线电在某些电磁干扰敏感的特定场合(如飞机、医院、核电站或者石油钻探等)中的应用。

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-02-19; 网络出版日期: 2015-07-07

基金项目: 总装重点实验室建设基金

作者简介: 宋小庆(1971—),女,教授,主要从事车辆电子学及光通信等方面的研究。E-mail: swxq@vip.sina.com

VLC和RF相比最明显的不足是可见光传输速率受通信距离限制相对明显。VLC采用非相干通信模式,VLC通信路径损失是距离的4次方,而相对RF来讲,损耗是距离的平方^[4]。LED具有固有非线性电流-强度特性,性能随温度增加而急剧下降,输出光色以及设备寿命也快速减少。此外,灯光变暗会对传输功率和传输性能产生一定影响。这些不利因素限制了VLC的应用,VLC也不可能完全取代高速RF通信。如何充分利用VLC优势,克服不利因素以提升VLC通信性能是当今研究的热点。

VLC技术最早于1999年由香港大学Grantham Pang提出并针对VLC开展了音频传输的研究^[5]。日本随后对VLC展开了积极深入的研究。2003年,可见光通信协会(VLCC)在日本成立。目前,越来越多的机构和组织致力于VLC关键技术的研究。典型的研究机构包括:欧洲项目家庭千兆接入网(OMEGA, Home Gigabit Access Network)、美国光通信中心(UCL)、德国海因里希赫兹、夫琅禾费通信研究所、荷兰飞利浦公司、法国电信、牛津大学、澳大利亚莫纳什大学以及中国科学技术大学、复旦大学等。这些机构在VLC的理论、算法、仿真及实验方面做出了突出性成果。但VLC的发展尚处于起步阶段,和成熟工业、生活以及军事应用之间还有一段距离,很多的技术难点亟需解决。

2 VLC基本链路及通信标准

2.1 VLC基本链路

图1显示的是室内简单VLC示意图。一个典型VLC链路由发送器、传播信道和接收器组成。

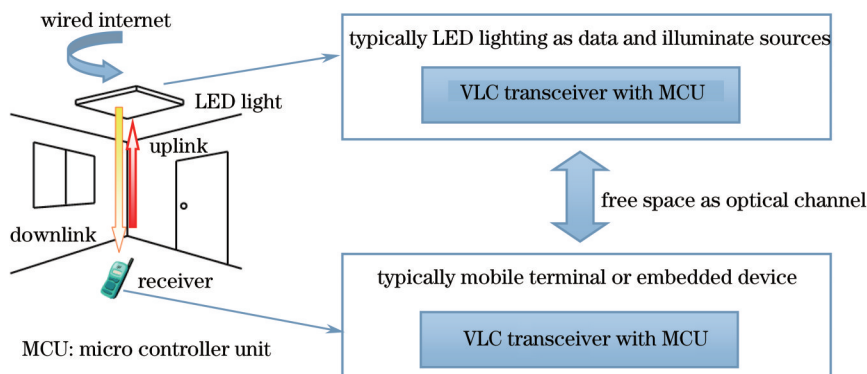


图1 室内VLC基本链路

Fig.1 Basic indoor VLC chain

2.1.1 光源

白光LED主要有三种类型:红绿蓝混合形成白光的RGB-LED、蓝光LED激发荧光粉后混合成白光的PC-LED以及在紫外LED表面通过红绿蓝荧光粉混合产生白光的UV-LED。UV-LED在白光形成中能量损耗大,光效低,实际应用中很少见^[6]。对于PC-LED,蓝光LED的调制带宽大约是35 MHz,受到黄光分量影响,其调制带宽只有几兆。为提高调制带宽,通常加入蓝光滤波器滤除黄光分量。PC-LED成本低,驱动简单,在照明中应用普遍。RGB-LED中三个LED可以独立调制。运用多路波分技术可以使得每个RGB-LED获得15 MHz调制带宽。该类型LED价格昂贵,驱动相对复杂,具有高效灵活的照明效果以及较高调制带宽,在未来市场潜力很大。

2.1.2 接收器

PIN二极管、雪崩二极管(APD)及图像传感器是VLC中用到的接收器。PIN光电二极管价格低、接收面积大、敏感度高以及对温度不太敏感,应用广泛。APD光电二极管接收敏感度高、接收面积小但价格昂贵。图像传感器能够在不相互干扰情况下同时获得图像和数据信息。由于图像传感器只检测LED传来像素的光强度,即使有多个光源同时传输数据,图像传感器仍能成功接收到它所需要的数据。图像传感器尤其适合准确定位系统。

2.2 通信标准

2007年,日本发布了JEITACP-1221“可见光通信系统”以及JEITACP-1222“可见光ID系统”。2009年,IrDA和VLCC联合制定了“IrDA可见光通信物理层技术要求”。欧洲OMEGA也在致力于家庭网络开发。但这些标准都没有充分考虑闪烁和调光问题。兼顾照明及节能,IEEE 2012年批准了802.15.7标准^[7]。

IEEE802.15.7对VLC定义了4类应用:局域网通信(VLAN)、定位增强信息广播、高分辨力定位(自动定位)以及中等分辨力定位(室内导航)。该标准提供了高速VLC通信无闪烁可适应调光机制^[8],支持点到点以及星型等多种网络拓扑结构,并对双向通信和广播模式物理层和媒体存取控制(MAC)层进行了规定。其中,PHY I为室外低速通信应用,其传输速率为12~267 kb/s,PHY II用于室内中速通信应用,传输速率为1.25~96 Mb/s。PHY III用RGB作为传输源和接收器,其速率范围为12~96 Mb/s。IEEE 802.15.7没有涉及到千兆速率。德国物理学家Harald Haas提出了Light Fidelity(Li-Fi)并进行标准化。该标准计划在未来达到10 Gb/s传输速率。除了VLC可以在GPS所不能发挥作用的室内和峡谷等场合进行定位,还可以用于水下通信、军用装备通信、电力线通信(PLC)及以太网供电(PoE)链路综合等。为了能够让VLC充分发挥其应用潜力,更为广泛应用的VLC国际标准还需要进一步开发。

3 VLC应用前景

3.1 室内定位

室内定位系统采用的RF、蓝牙以及超声等方式存在系统稳定性不高、响应时间长、电磁干扰大、精度和准确度较低等问题。VLC不受电磁干扰,可以通过室内固定光源实现快速准确定位和导航。未来的大商场、地下购物中心等地方可以通过基于VLC的智能行人自动支持系统的目标定位和引导,减少由于顾客找不到商品具体位置而带来的损失。类似的应用可拓展到机场、博物馆以及其他数字定位广播场合。VLC室内定位系统根据需求不同,其定位精度也不同。对于室内行人或者智障者导航类的定位,中等精度即可。但对于机器人等定位精度要求会更高。

3.1.1 室内行人导航

文献[9]给出了帮助视觉障碍者识别位置的室内导航系统,如图2(a)所示,LED安装在天花板上,带有地磁传感器的智能手机挂在使用者脖子上,智能手机和耳机相连。手机通过可见光通信接收LED传来的ID信息,获取光源方向及定位信息;路径优化后将结果传送到耳机引导行人。测试结果表明在1~2 m范围内测试者能够准确定位和导航,并能在 -59° ~ 66° 的范围内实现方向矫正。

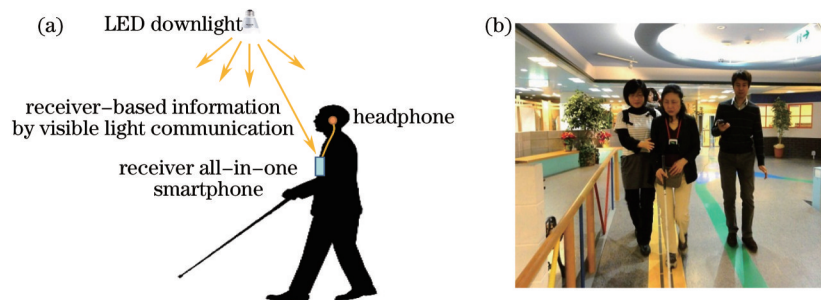


图2 基于VLC的帮助视觉障碍者提供室内导航系统。(a)可见光进行室内导航组成结构图;(b)室内导航系统测试
Fig.2 Indoor navigation for the visual impairment using visible light communication. (a) Structure of indoor navigation with VLC; (b) testing of indoor navigation prototype

文献[10]给出了结合墙上标牌面板LED光源开发的VLC定位导航系统。该系统设计了滤波器以减少背景光的干扰。通过VLC,使用者手机接收标牌面板LED传来的导航信息。导航信息包括标牌面板位置信息以及视觉障碍者达到可下载的数据信息的最佳光强点。在该系统中导航信号的数据传输速率为62.5 kb/s,而数据信息传输速率为1 Mb/s。测试中,视觉障碍者可通过耳机接收约5 m远处标牌面板上LED光传来的导航信号,当走到距离标牌面板约1 m远时,由于光强度足够,所以视觉障碍者接收器能自动进行文本信息下载和存储。

3.1.2 室内准确定位

在机器人及无人机(UVA)控制系统等很多应用中都需要精确定位。如何在保证系统复杂度不高的前提下获得高的定位精度是人们研究的热点。获取目标位置方法有很多,如测量信号到达角度(AOA)、到达时间(TOA)、到达时差(TDoA)以及接收到信号强度(RSS)等。文献[11]给出一种无需同步的基于RRS室内定位系统。测试结果表明在5.9 cm内以95%的准确率实现精确定位。文献[12]提出一种基于接收到信号强度/时

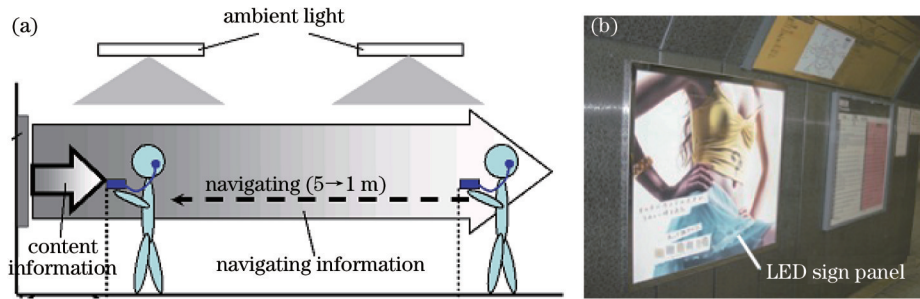


图3 运用LED标牌面板的VLC系统。(a) VLC模式结构;(b) LED标牌面板

Fig.3 VLC using LED sign panel. (a) Structure of VLC method; (b) LED sign panel

分复用模式(RSS/TDM)的比特填充法的室内定位系统。比特填充法可不受各种光信号干扰实现瞬时信号强度的测量。在该系统中16个相互间距为40 cm的LED灯组成正方形阵列固定在天花板上,VLC接收器安装在距离天花板170 cm的机器人上。测试结果表明机器人在低于3 cm的误差内,成功实现了5个目标点规划路径的自主导航。

图像传感器除了可同时实现图像捕获和数据接收之外,由于外界干扰光源聚焦像素和VLC理想信号聚焦像素有所区别,所以比光电二极管作为接收器具有更好的抗干扰能力。图像传感器在VLC中进行准确定位的应用越来越受到人们重视。无线个人区域网(WPAN)的IEEE标准化组织P802.15工作组已经在考虑如何将定位融入到相机通信标准中。

文献[13]给出了关于图像传感器几种应用研究。图4(a)显示屏上显示了接收端对图像及位置信息的同时获取。图4(b)是图像传感器在机器人上的应用。两个固定在机器人上的图像传感器通过LED发送的信息检测机器人位置。其中一个图像传感器捕获入射光方向,另外一个图像传感器连续捕获高速帧图像并解析可见光传来的数据。测试结果显示机器人能够在厘米范围内实现精确定位。图4(c)是利用图像捕获和可见光通信来实现50 m远水箱准确定位,定位精度达到毫米级。

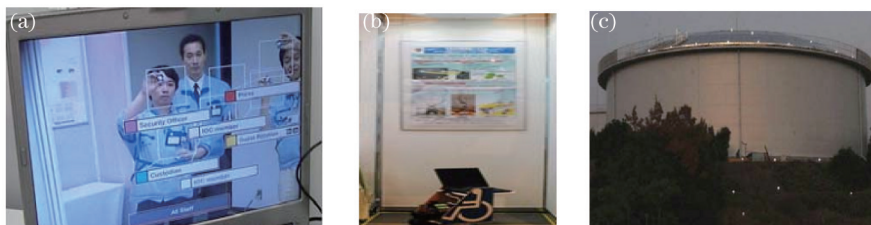


图4 带有图像传感器的VLC应用。(a) 图像和位置信息的屏幕显示;(b) 机器人定位;(c) 水箱位置测量

Fig.4 VLC application using image sensors. (a) Image and position information on display screen;

(b) VLC on robot control prototype; (c) VLC on measurement of tank location

3.2 智能交通系统(ITS)的信息传输

智能交通系统(ITS)通过及时获取并传输有关交通状况等方面的信息来减少交通事故、交通堵塞以及燃油消耗。图像处理可用来帮助驾驶员进行交通灯识别、障碍物检测、车辆和车辆以及车辆和道路设施之间信息的捕获,是ITS的一个关键技术。高速数据图像传感器结合VLC在ITS上具有广阔应用前景。文献[14]给出了运用LED光以及安装在汽车上的具有1000 frame/s帧速和1024 pixel×1024 pixel分辨力的摄像机进行路边装置与车辆之间的通信。实车测试验证了该系统能在车辆以30 km/h的速度下,在35 m范围内实现来自256个LEDs阵列组成光源传输来的数据的准确接收。

目前,在VLC中运用高速图像传感器存在一些技术问题需要解决:如安装设施价格昂贵,需要复杂的实时图像处理技术,摄像机帧速率低于发光二极管的反应速度从而限制了通信速度等。文献[15]报道了最新研发的光通信图像传感器(OCI)在无线光通信(OWC)系统中的应用。运用互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感技术最新开发的OCI具有两个特点:用于高速信号接收的通信像素(CPx)以及用于快速和精确LED检测的1 bit标志图像输出功能。该OWC系统被誉为当前世界上第一个仅有16.6 ms延迟、20 Mb/s传输速率的像素传输通信系统。

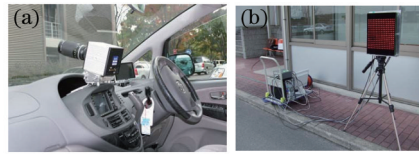


图5 VLC在ITS上的应用。(a)固定在车辆上的高速摄像机;(b)256 LEDs阵列的光发送器

Fig.5 Application of VLC for ITS. (a) Fixed a high-speed camera on a vehicle; (b) transmitter with 256 LEDs array

3.3 VLC 高速数据传输

大数据量如高清(HD)视频流传输、高速信息流下载及高速数据备份等信息获取成为当代生活中不可或缺的部分。可见光可以运用发散角度很小的光柱进行数据传输,而其路径传输损耗较低的特点使高速带宽的安全数据流下载和传输成为可能^[16]。如图6所示,欧洲 OMEGA 工程开发了一种具有 100 Mb/s 的 4 个高清数据流的 VLC 数据传输。运用正交频分多路复用(OFDM)技术,通过 16 个 LED 光源向 10 m² 面积范围内的光电二极管探测器上进行数据传输^[17]。更多内容可查阅文献[17]。

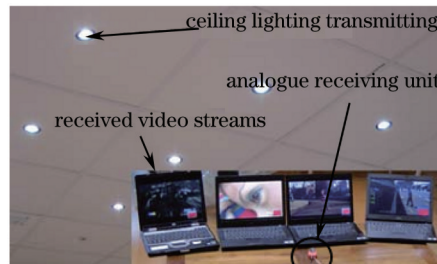


图6 基于 100 Mb/s 的 VLC 视频信号演示系统

Fig.6 VLC demonstration of video signals transmission at 100 Mb/s

文献[18]给出了通过在 VLC 接收器和发送器之间增添聚焦透镜来实现 5 m×5 m×3 m 室内视频和音频高质量广播传输的演示系统。和视距(LOS)链路相比,Nd-LOS 链路具有网络节点可移动性好、跟踪性强等特点,但其链路损耗导致传输速率不高。文献[19]针对这一问题开展了研究,实现了在 2 m 范围、400 Mb/s 传输速率以及误码率 $R_{BE} < 10^{-8}$ 的典型室内双向光无线通信系统研究(可见光 LED 作为下行链发送光源,IR 是上行链路数据发送光源)。RGB LEDs 采用波分复用技术(WDM)可以获得更高的数据传输速率。文献[20]给出了第一个基于波分复用/离散多音调(WDM/DMT)调制技术的 VLC 系统,实现了对单个白光 RGB-LED 进行调制并获得 803 Mb/s 速率的数据通信。

3.4 VLC 在航空中应用

VLC 在航空中优势明显。可见光 LED 已经在新一代商用飞机上得到推广应用,通过可见光替代光缆或电缆进行通信能够减少体积和重量、减少电磁干扰(EMI)及降低成本等,波音商用飞机平台也在开展未来无线光网络方案研究。文献[21]给出了基于 VLC 通信的乘客阅读灯服务单元(PSUs)、娱乐系统以及机舱对讲机的应用。图 7(a)中阅读灯照亮乘客座位区,同时阅读灯作为光通信源向乘客笔记本电脑或其他终端接收机传输数据。乘客娱乐系统是通过座位整列之间的可见光相互通信而构成了高速网状网络,实现机内娱乐(iFE)信息的传输。来自 LED 灯的光信号也可以用来作为低带宽的语音通信,实现机内对讲,如图 7(b)所示。

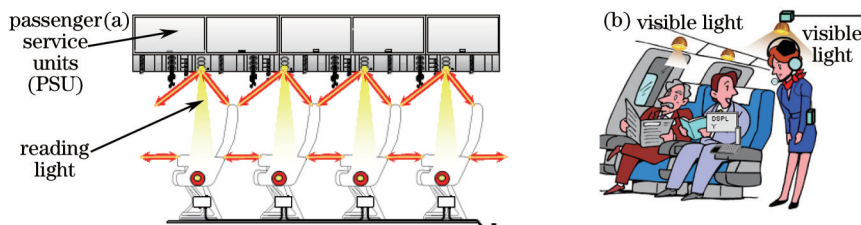


图7 VLC在商业飞机上的应用。(a)基于乘客阅读灯的VLC;(b)基于机内对讲机的VLC

Fig.7 VLC applications in commercial airplane.(a) Reading light passenger service;(b) cabin interphones

3.5 水下 VLC

水下通信在军事、工业以及科学领域都具有重要地位。水下通信速率需求在几兆到几十兆甚至更高范围内。无线电波中海水会受到高度衰减。声波在海洋中传输速度为 1500 m/s,延迟时间长,带宽受限,误码

率高,声波也会对海豚和鲸鱼等海洋动物产生干扰等。VLC在水下可以很好地克服衰减和电磁干扰等问题。文献[22]给出了关于操控者与水下远程运输车之间的VLC通信系统开发。该系统中发送器由70个LED光源组成,支持 120° 视角范围的数据传输,传输速率高达20 Mb/s。文献[23]给出了水下可见光通信系统在核电站机器检测中的具体应用。水下的远程运输车装备摄像机与20 m远处站点之间进行视频和控制信号的传输。目前水下光无线通信系统面临主要挑战是由于受到水下性质尤其是浑浊度的影响而难以实现长距离通信。针对这一问题,新加坡国立大学和麻省理工学院开展了在30 m的距离内实现1.2 Mb/s的水下光通信系统研究和论证。

4 面临的主要挑战

4.1 VLC通信速率的提高

可见光LEDs最大挑战是VLC的数据通信速率。为了提高通信速率,除了需要在LED器件上进行突破外,还可通过其他技术手段进行提升。如运用调制、波分复用、均衡、光多输入多输出(MIMO)以及这些方法的混合使用。

4.1.1 编码调制技术

为了克服白光LED的调制带宽的局限,必须深入探究频带利用率高、抗干扰性能好的调制复用技术。目前常见调制编码有开关键控(OOK)、脉冲位置调制(PPM)、多脉冲位置调制(MPPM)、差分脉冲位置调制(DPPM)等。相对于OOK调制方式,后三种利用率更好些。PPM具有自提取同步信号,适合低信噪比的场合。MPPM带宽效率和功率效率均较高。OFDM是一种高效调制技术,具有频谱效率高、带宽扩展性强、抗多径衰落、频谱资源灵活分配等优点,是当今世界研究热点之一。早在2001年,日本提出在VLC中引入OFDM调制方式的必要性。2005年,西班牙的Gonzalez等提出了一种利用自适应OFDM调制,可根据当前信道状况调整各子信道分配的比特和功率,提高整个系统传输效率。长春理工大学研究学者近年来也对OFDM调制技术进行了研究,可以根据信道优劣选择恰当的OFDM调制解调方式。OMEGA论证了基于正交频分复用/正交振幅调制(OFDM/QAM)技术的3 m以上距离进行84 Mb/s光无线通信数据传输。OFDM在光无线通信系统中的缺点是直流(DC)成分导致的功效低。OFDM在高效调制的同时,也会导致带宽通信系统复杂以及影响照明均匀等问题。为了进一步提升传输速率,DMT技术逐步受到关注。文献[24]建立了一种基于DMT的VLC系统模型,仿真结果证明DMT在有限带宽限制下显著提高了数据传输速率。文献[25]给出了运用DMT技术实现磷光粉LED和APD之间的513 Mb/s数据通信实验。文献[26]给出对RGB LEDs发光进行DMT调制的1.25 Gb/s可见光WDM链路。目前DMT技术方面研究工作做得不是很多,尚需要进一步深入研究。但如何选择适合可见光的调制技术是当前亟待解决的关键问题^[27]。

4.1.2 收发器均衡及滤波技术

对发送端模拟均衡可补偿白光LED在高频下的快速衰减,使得荧光粉LED调制带宽扩展到25 MHz。发送器均衡的不足之处在于驱动电路需要被调制以及部分信号没有被转化为光而导致能量没有被充分利用。相对接收器来说,均衡处理是复杂的。文献[28]通过非归零码-开关键控(NRZ-OOK)技术,让蓝光滤波移走慢黄光的部分,从而使得带宽增加到100 Mb/s并具有很高的照明亮度。由于强烈的背景噪声及电路固有噪声的干扰,随着传输距离的加大,可见光通信系统中接收信号可能会十分微弱。为了精确接收信号,需要采用高效光滤波器抑制背景杂散光干扰。因为通信系统中的信号能量与噪声同时分布在整个可见光谱中,滤波后信噪比不高,研究高效滤波技术及新型滤波器是提高光通信性能的有效方法。

4.1.3 并行通信(OMIMO)技术

和无线电系统类似,并行通信(OMIMO)通过在并行多路接收器和发送器进行数据传输,通过空间复用实现高速传输,增大光无线通信系统的吞吐量。OMIMO技术是提升VLC通信速率和通信质量的重要途径。Brien首次在VLC中提出了OMIMO模型。2011年Dambul提出了成像OMIMO结构。目前MIMO技术潜力的发挥主要还受到芯片水平的限制。文献[29]报道了一个关于 4×4 50 Mb/s MIMO VLC通信实验。庆应义塾大学(Keio University)报道了1 Gb/s并行传输的概念性论证实验:运用MIMO技术,通过576 LEDs阵列向256接收器阵列发送数据,每个LED发送的数据速率为5 Mb/s。文献[30]建立了室内可见光MIMO信道模型。仿真结果表明:MIMO系统的信道容量高于单输入单输出(SISO)系统,且随着LED与光电探测器

(PD)数量的增加, MIMO系统的信道容量逐步提高,但随着信道空间相关性的增强, MIMO系统信道容量的提升逐步减小,限制了系统传输速率的提高。如何更好地利用室内VLC系统的空间资源,获取更高的复用增益有待进一步去研究。

4.2 可见光信道模型的完善建立及LED光源布局的优化

可见光无线信道模型的建立是分析和设计可见光通信系统的基础。LED灯光空间布局、空气环境等也会对信道模型和通信性能产生影响。为提升VLC通信效率,必须对LED灯的个数、空间布局及光亮度进行合理的选择,尽可能避免盲区和多径延迟产生码间干扰(ISI)。中国科学院半导体研究所利用大功率白光LED照明灯,采用OOK-NRZ调制方式,实现了多灯同时调制、大范围覆盖下的90 kb/s、局部小范围285 kb/s的单向下行通信速率。为优化LED光源的布局,文献[31]对光链路视距信道损耗进行了理论分析,对LED光源建模并进行光线追迹仿真,为多灯联合调制和基于网格的照明调制的不同应用提供了分析依据。文献[32]提出通过优化LED半功率角的布局来提高室内可见光通信系统性能的方法。该方法不需要调节LED的功率,比较适合工程运用,对于提高可见光通信系统的信噪比、降低信噪比的波动有明显效果。目前很多学者开展的室内LED可见光无线信道分析,基本上均采用Gfeller和Bapst关于红外通信信道的分析模型,对背景光、散射等所产生的影响尚未作深入分析。如何进行合理的LED布局优化、建立完善的可见光通信模型并计算及测量信道的单位脉冲响应,是当今VLC的研究的难点之一。

4.3 上行链路技术

牛津大学的Brien和爱丁堡大学的Harald Haas课题组很早就考虑到上行链路是可见光通信的重要挑战之一,并指出射频、红外光等可以作为上行链路。由于射频上行会产生电磁辐射,无法用在电磁敏感环境,且也会减弱VLC通信的保密性。红外上行也面临一些列技术难度:红外LED光束较为集中,需要进行简单瞄准并将发射功率限制在人眼安全范围内;由于红外LED调制带宽受限导致上行传输速率较低;可见光与红外无线通信的信道冲激响应不同,这两种系统中引起的码间串扰(ISI)原因各异等。故需要对多光源、时变信道环境下的可见光无线通信(VLC)系统的信道冲激响应和不同光路径引起的ISI开展深入研究。美国的智能照明计划正在研究具有收发一体的白光LED技术,LED灯将作为收发器实现全双工通信^[33]。文献[34]展示了以RGB-LED中红绿2个通道作为下行、蓝色通道作为上行的波分双工(WDD)可见光通信系统。但可见光LED作为上行链路的一个突出问题是对人产生视觉干扰,因此利用可见光作为上行链路只能用于某些特殊场景。文献[35]提出了采用1550 nm激光作为可见光通信上行链路的方案,该上行链路具有速率高、无电磁干扰、保密性好等与可见光通信相一致的特点,激光器成本较高且需要考虑人眼安全等问题。

4.4 新LED器件

市场上固态LED灯主要是从满足照明角度进行设计,对通信性能并没有给予充分考虑。理想特性的LED对VLC通信性能至关重要。实际通信应用中效果较好的是商业化产品与技术(COTS)LED器件。基于连续增长的LED光源以及Gb/s数据传输速率的需求,少量大型高功率氮化镓(GaN)的发光二极管也可以同来满足VLC通信的高速传输需求。2014年,Tsonev等^[36]基于OFDM技术通过氮化镓微米发光二极管(μ LED)搭建了3 Gb/s传输速率的VLC通信链路。此外,有机可见光作为光无线通信领域中一个独立技术正在迅猛发展。和LED相比,有机发光二极管(OLED)具有灵活性、可弯曲性、成本低等很多优点。它正被应用到在高清晰度电视(HDTV)的高端显示产品和智能手机上,引起了科学家们的高度关注。文献[37-38]分别给出了运用有机低分子有机发光二极管(SMOLED)和硅PIN PD作为发送和接收器实现了550 kb/s的VLC数据通信以及运用高分子发光二极管(PLED)和硅PIN PD作为发送和接收器实现了10 Mb/s数据通信的报道。由于有机半导体电荷迁移性比无机半导体的电荷迁移性要低几个数量级,使得带宽受限从而限制了传输速度。这也是有机可见光无线通信面临的一个重要挑战。

5 结 论

随着照明技术、节能技术和无线通信技术的发展,VLC将是下一代光通信主要发展方向,很多学者和研究团体在VLC的关键技术和应用方面做出了积极的探索并取得了很大进展。作为一个积极发展潜力的新兴技术,目前VLC的很多研究结果还局限于原理样机系统验证以及模拟仿真等初始探究阶段。要让VLC步

入工业和军事中的应用,还面临很多挑战。如VLC应用标准如何进一步完善和建立,如何研制出能够提供能量转换效率更高、调制带宽更宽的新发射器件,如何采用新算法、新方法和新技术减少背景噪声影响、码间串扰和多径效应的影响,如何提高长距离传输的通信速率,如何建立准确和理想的信道模型,以及如何构建智能的上行链路等。这些技术难题都亟待解决。同时,VLC也将与RF以及其他无线通信技术相互补充和兼容并成为未来无线网络发展的趋势。

参考文献

- 1 Steve Hranilovic, Lutz Lampe, Srinath Hosur. Visible light communications: The road to standardization and commercialization (part 1)[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2): 24-25.
- 2 Toshihiko Komine, Masao Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- 3 Chao Ma, Hongming Zhang, Kaijun Cui, *et al.*. Effects of LED lighting degradation and junction temperature variation on the performance of visible light communication[C]. International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), 2012: 1596-1599.
- 4 J M Kahn, J R Barry. Wireless infrared communications[J]. IEEE, 1997, 85(1): 265-298.
- 5 Pang G, KaLim H, Kwan T, *et al.*. Visible light communication for audio systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(4): 1112-1118.
- 6 Chi Nan. LED Visible Light Communication Technologies[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 16-20.
迟楠. LED可见光通信技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 16-20.
- 7 Armstrong, Y Ahmet Sekercioglu, Adrian Neild. Visible light positioning: A roadmap for international standardization[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2): 68-73.
- 8 Sridhar Rajagopal, Richard D Roberts, Sang-Kyu Lim. IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 72-82.
- 9 M Nakajima, S Haruyama. Indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication and compensated geomagnetic sensing[C]. IEEE International Conference on Communications in China: Wireless Communication Systems, 2012: 524-529.
- 10 Akinobu Funahashi, Kentaro Kobayashi, Hiraku Okada, *et al.*. I-LightHouse: A visible light communication system for the visually impaired[C]. IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2011: 1026-1030.
- 11 Weizhi Zhang, M I Sakib Chowdhury, Mohsen Kavehrad. Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications[J]. Opt Eng, 2014, 53(4): 045105.
- 12 Keon Young Yi. Development of a localization system based on VLC technique for an indoor environment[J]. Electron Eng Technol, 2015, 10(1): 436-442.
- 13 Shinichiro Haruyama. Advances in visible light communication technologies[C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2012: We.3.B.5.
- 14 Shinya Iwasaki, Chinthaka Premachandra, Tomohiro Endo. Visible light road-to-vehicle communication using high-speed camera[C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2008: 13-18.
- 15 Isamu Takai, Shinya Ito, Keita Yasutomi, *et al.*. LED and CMOS image sensor based optical wireless communication system for automotive applications[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(5): 6801418.
- 16 O Brien D, Zeng L, Hoa Le-Min, *et al.*. Visible light communications challenges and possibilities[C]. IEEE 19th International Symposium on IMRC, 2008: 1-5.
- 17 Jelena Vučić, Klaus-Dieter Langer. High-speed visible light communications: State-of-the-art[C]. Optical Fiber Communication, 2012: OTH3G.3.
- 18 Yingjie He, Liwei Ding, Yuxian Gong, *et al.*. Real-time audio & video transmission system based on visible light communication[J]. Optics and Photonics Journal, 2013, 3: 153-157.
- 19 Giulio Cossu, Raffaele Corsini, Amir M Khalid, *et al.*. Bi-directional 400 Mb/s LED-based optical wireless communication for non-directed line-of-sight transmission[C]. Optical Fiber Communication, 2014: Th1F.2.
- 20 Jelena Vučić, Christoph Kottke, Kai Habel, *et al.*. 803 Mb/s visible light WDM link based on DMT modulation of a

- single RGB LED luminary[C]. Optical Fiber Communication, 2011: OWB6.
- 21 Eric Chan, Dennis Koshinz, William Krug, *et al.*. Wireless optical links for avionics applications[C]. SPIE, 2011, 8026: 80261M.
- 22 M Doniec, Vasilescu I, Chitre M, *et al.*. Aquaoptical: A lightweight device for high-rate long-range underwater point-to-point communication[C]. IEEE OCEANS, 2009: 1-6.
- 23 Ian C Rust, H Harry Asada. A dual-use visible light approach to integrated communication and localization of underwater robots with application to nondestructive nuclear reactor inspection[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012: 2445-2450.
- 24 Wang Wei, Liang Xiuyan, Wang Ning. Discrete multi-tone technique application on visible light communication[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2014, 29(4): 160-165.
王 巍, 梁绣滢, 王 宁. 离散多音频技术在可见光通信中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 160-165.
- 25 J Vučić, C Kottke, S Nerreter, *et al.*. 513 Mb/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(24): 3512-3518.
- 26 C Kottke, J Hilt, K Habel, *et al.*. 1.25 Gb/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary[C]. ECOC, 2012: We.3.B.4.
- 27 Tan Jiajie, Zou Changqing. Challenges and prospects of indoor visible light communication by high power white LED[J]. Journal of Hengyang Normal University, 2011, 32(3): 39-44.
谭家杰, 邹常青. 室内白光LED照明通信的现状与展望[J]. 衡阳师范学院学报, 2011, 32(3): 39-44.
- 28 Hoa Le Minh, O Brien D, Faulkner G, *et al.*. 100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(15): 1063-1065.
- 29 Andrew Burton, Hao Le Minh, Zabih Ghasseloo, *et al.*. Experimental demonstration of 50-Mb/s visible light communications using 4×4 MIMO[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26(9): 945-948.
- 30 Xiao Shuaifang, Huang Kaizhi, Zhong Zhou, *et al.*. Spatial correlation analysis of MIMO channel in indoor visible light communication[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(9): 2117-2123.
肖帅芳, 黄开枝, 钟 州, 等. 室内可见光MIMO信道的空间相关性分析[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2117-2123.
- 31 Yang Yu, Liu Bo, Zhang Jiankun, *et al.*. A visible light communication system based on high power illumination LED lamp[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(6): 803-807.
杨 宇, 刘 博, 张建昆, 等. 一种基于大功率LED照明灯的可见光通信系统[J]. 光电子·激光, 2011, 22(6): 803-807.
- 32 Li Fang, Chen Jianping. Optimization of LED SAHP for indoor visible light communication systems[J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(6): 33-35.
李 昉, 陈建平. 用于VLC的LED半功率角优化布局方法研究[J]. 中兴通信技术, 2014, 20(6): 33-35.
- 33 Liu Hongzhan, Lü Xiaoxu, Wang Faqiang, *et al.*. The current situation and development trend of indoor visible light communication by white LED illumination[J]. Optical Communication Technology, 2009, 7: 53-65.
刘宏展, 吕晓旭, 王发强, 等. 白光LED照明的可见光通信的现状与发展[J]. 光通信技术, 2009, 7: 53-65.
- 34 Chi N, Wang Y Q, Wang Y G, *et al.*. Ultrahigh-speed single red-green-blue lightemitting diode-based visible light communication system utilizing advanced modulation formats[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(1): 010605.
- 35 Zheng Zhong, Liu Lu, Hu Weiwei. Analysis of uplink schemes for visible-light communication[J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(6): 8-11.
郑 重, 刘 璐, 胡薇薇. 应用于可见光通信的上行链路方案探讨[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(6): 8-11.
- 36 Tsonev D, Hyunchae Chun, Raibhandari S, *et al.*. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26(7): 637-640.
- 37 P A Haigh, Z Ghassemlooy, H LeMinh, *et al.*. Exploiting equalization techniques for improving data rates in organic optoelectronic devices for visible light communications[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(19): 3081-3088.
- 38 P A Haigh, I Ghassemlooy, I Papakonstantinou. 1.4 Mb/s white organic LED transmission system using discrete multi-tone modulation[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(6): 615-618.

栏目编辑: 王晓球