

引用本文:徐正元,刘伟杰. 室外可见光通信抗干扰收发技术[J]. 光通信技术, 2020, 44(7): 1-6.

室外可见光通信抗干扰收发技术

徐正元^{1,2}, 刘伟杰^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 合肥 230026; 2. 中国科学院 无线光电通信重点实验室, 合肥 230026)

摘要: 室外可见光通信(VLC)系统中, 高强度的太阳光、高亮度的电子广告牌, 以及大量的人造光源等使得光电探测器容易出现饱和或者非线性输出等异常情况。为了解决此问题, 首先回顾了面向室外智能交通的 VLC 研究进展; 接着针对室外应用环境中出现的不同类型的干扰, 介绍了抗干扰收发技术, 包括光信道起伏与遮挡下的喷泉码方案、强背景光干扰与探测器饱和下的衰减分集接收技术, 以及多光源干扰下的自动对准与跟踪方法等; 最后, 指出这些抗干扰收发技术在未来的改进和研究方向。

关键词: 可见光通信; 智能交通; 干扰抑制; 喷泉码; 衰减分集; 自动跟踪

中图分类号: TN256 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2020)07-0001-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.07.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Transceiver techniques of interference mitigation for outdoor visible light communication

XU Zhengyuan^{1,2}, LIU Weijie^{1,2}

(1. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Key Laboratory of Wireless-Optical Communications, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China)

Abstract: In an outdoor visible light communication (VLC) system, a photodetector is vulnerable to strong sunlight, bright electronic billboards, and numerous artificial light sources, which leads to its saturation or nonlinear behavior. To solve this problem, this paper first overviews the research progress on VLC for outdoor intelligent transportation. Then, it introduces the transceiver techniques of interference mitigation, including Fountain codes for optical channel fluctuation and occlusion, reception techniques by attenuation diversity to mitigate strong ambient light interference and detector saturation, and the auto-alignment and tracking methods under multiple light source interference. Finally, the future improvement and research direction of these interference mitigation transceiver technologies are pointed out.

Key words: visible light communication; intelligent transportation; interference mitigation; Fountain code; attenuation diversity; auto-alignment and tracking

0 引言

相比于传统无线通信, 可见光通信(VLC)技术不需要频谱授权, 不存在电磁干扰问题, 可以提供更大

收稿日期: 2020-06-22。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(编号: 61631018)资助; 中科院前沿科学重点项目(编号: QYZDY-SSW-JSC003)资助。

作者简介: 徐正元(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 无线光通信与网络研究中心主任, 中科院无线光电通信重点实验室主任, 国家特聘专家, 国家 973 项目首席科学家, 国家基金委重点项目群负责人, 爱思唯尔(Elsevier)中国高被引学者, 科学中国人 2011 年度人物, 中国光学工程学会常务理事, 2010 年第一届 IEEE 无线光通信国际研讨会的创始主席。主要从事赫兹通信感知、定位导航和无线大数据等研究工作。



的带宽以及更灵活的光束整形方案, 在兼顾照明功能的同时还可以进行高速的无线数据通信^[1-3]。因此, VLC 技术和传统无线通信技术互补, 成为未来无线网络的补充候选解决方案^[4-5]。

作为一种绿色高速通信方式, VLC 在智能交通系统(ITS)中的应用受到了人们的广泛关注^[6-7]。在室外 ITS 中, 交通指示灯、路灯和汽车前后灯等都可以作为 VLC 发送端的光源, 实现车辆与路基设备、车辆到车辆和车辆与行人之间的交通信息共享, 提高交通设施的使用效率^[8]。接收端则普遍采用图像传感器、光电二极管(PD)、雪崩光电二极管(APD)、光电倍增管(PMT)或者单光子计数器(SPAD)等作为光电探测器。普通商

徐正元,刘伟杰:室外可见光通信抗干扰收发技术

用摄像头的帧率往往较低(小于 60 fps),无法满足高速 VLC 的需求^[9]。2010 年,日本的 Nagura T 等人提出了利用高速摄像头(16000 fps)来进行车辆之间的 VLC,成功实现了在静态模式下最大 128 kb/s 和动态环境下 16 kb/s 的传输速率^[10]。Yamazato 教授团队提出了一款基于图像传感器的 VLC 车载通信接收芯片,将目标检测、跟踪与即时通信巧妙地结合在一起,实现了最大 55 Mb/s 的实时通信传输^[11-13]。但是,无论是工业级高速摄像头还是集成图像传感器的通信专用芯片,由于特殊集成功能使得成本变得非常高,无法很快进入商用化进程。所以,PD 或者 APD 仍然是广大学者以及工业界较为认同的 VLC 接收器件。Luan H 等人使用商用单个奥迪车灯作为发送光源,使用商用 APD 模块作为接收端,实现了最大通信距离 60 m 的开关键控(OOK)调制传输^[14]。对于多车接入问题,Yang R 等人利用 4 个商用车灯,结合商用 APD 模块,成功实现了 30 m 距离下最大用户速率为 43.1 Mb/s 的正交频分复用多址接入系统^[15]。Mao Y 等人采用均衡技术,在调制带宽不足 5 MHz 的交通灯上,实现了传输速率超过 200 Mb/s 的实时通信系统^[16]。此外,Xu R 等人利用发光二极管(LED)、商用 APD 模块成功实现了精度高于 5 cm 的距离探测^[17]。但是,商用 APD 的使用会造成额外的成本开销和终端体积的增加,而 LED 在作为发送器件的同时也可以作为光/电转换器件^[18],并成功实现了基于路灯的车辆感知^[19],使智能交通 VLC 又迈出了新的一步。

上述 VLC 系统大多采用商用 APD 作为接收端光电探测器,或者是在实验室理想条件下基于单灯点到点通信的,而室外 VLC 的传输距离往往在几十米到几百米量级,因此收发端通常采用光学天线(例如透镜)来提高信噪比(SNR),而接收端透镜的引入会带来收发端对准问题。在室外存在多信号光源时,发送光源的选取和对准便成了一个实际系统中较为棘手的问题。此外,理想的光电探测器将输入的光强信号线性地转化为电流或者电压信号,输出到数字处理单元。但是,大量室外场景下的干扰源,如高强度的太阳光、高亮度的电子广告牌,以及大量的人造光源等,会给光电探测器带来非常大的影响,使得光电探测器容易出现饱和或者非线性输出等异常情况^[20],从而降低了系统性能,限制了传输速率。

由此可见,室外 VLC 系统极易受到外界干扰。本文主要介绍在 VLC 系统中抗干扰的收发关键技术(抗干扰编码调制技术、衰减分集阵列接收技术和

抗多光源干扰的跟瞄技术),归纳总结这些技术的相关研究成果以及未来发展趋势。

1 抗干扰编码调制技术

VLC 系统运行时容易受到外界光的干扰,导致传输数据出现差错。抗干扰编码调制技术具有前向纠错作用,使得在信道存在干扰时仍能以较大的概率从接收到的被干扰数据中恢复原始发送数据。

1.1 抗干扰信源编码技术

由于光信道极易受到外界干扰,因此纠错码成为实现室外 VLC 稳定传输的有力保证。目前,大多数编码技术为了实现高效纠错,不是采用级联方式构造随机长码,就是采用迭代译码方法,或两者均采用,以逼近 Shannon 极限。Yuan M 等人提出在存在信号相关噪声的 VLC 信道中采用低密度校验码(LDPC),以对抗干扰与噪声^[21]。Wang H 等人发现在调光约束条件下,Polar 码的性能比 LDPC 码更好^[22]。同时,电气和电子工程师协会(IEEE)的 VLC 标准中也提到了采用卷积码和里德所罗门(RS)码级联的方案来应对外界干扰^[23]。以上这几种编码技术均属于固定编码技术,不能随环境改变而变。而室外 VLC 中用户的移动、物体的遮挡以及探测器的饱和等问题都会影响系统的性能。因此,需要一种自适应的编/解码方案来应对室外复杂多干扰信道下的通信需求。

根据编码理论,为实现可靠传输,系统的码率需要满足一定的纠错能力。而当信道条件急剧变化(如 VLC 信道受遮挡或者强光干扰)时,固定码率便不能满足稳定传输的需求,而喷泉码是一种变码率的编码方式^[24]。喷泉码的编/解码原理示意图如图 1(a)所示。在发送端,这种编码能够从一组给定的源符号序列中产生一串不限长度的编码符号序列,即图中蓝色的小水珠;在理想情况下,接收端即篮子从接收到的编码符号序列中获得大小与源符号数量 K 相同或稍大的任意子集,便可恢复源符号。图 1(b)显示了喷泉码收发端编解码的过程。在 VLC 链路存在遮挡或者发生突发性干扰时,喷泉码可以通过继续接收更多数据包达到正确解调原始发送数据的目的。

尽管喷泉码的研究已取得了一些可喜成果,但是目前所进行的研究大部分停留在理论研究和仿真层面,喷泉码的实际实现有待人们进一步深入研究。其次,喷泉码依赖于接收端的反馈消息,这对于 VLC 来说也是一个挑战,反馈链路的建立以及其响应速度和稳定性都会影响到喷泉码的性能。

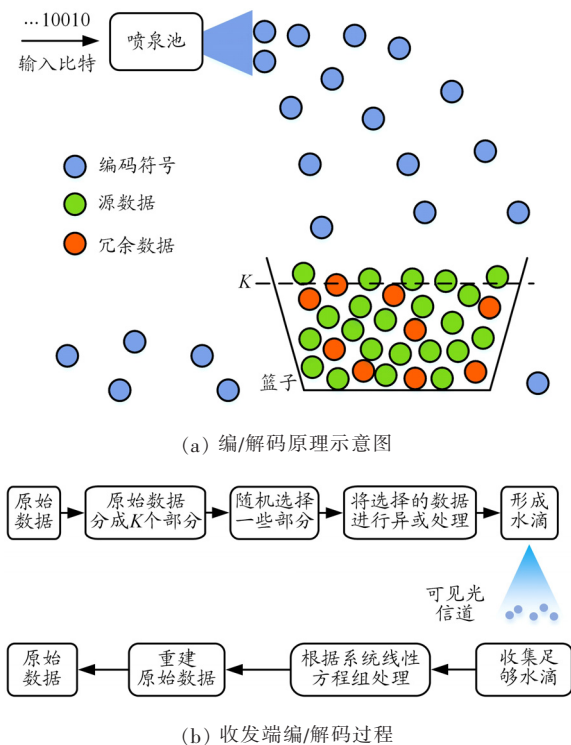


图1 喷泉码原理与收发端编/解码过程

1.2 抗干扰调制技术

目前,大多数 VLC 系统采用强度调制以及直接检测(IM/DD)的方案实现信号传输。信号在室外自由空间传输时,由于大气湍流的存在或者接收端的移动,使得接收到的信号存在严重的功率波动,降低了接收 SNR,造成误码率提高。随着激光照明的逐渐普及,尤其是以奥迪为主导的车企在探索激光大灯的同时,也给 VLC 指明了一个新的发展方向。利用激光作为光源,便可以获得除了强度以外新的调制维度——偏振态(SOP)。SOP 是激光光源中较为稳定的属性^[25],对应的偏振键控(PolSK)调制方式开始受到广大学者的关注。

OOK 调制信号与圆偏振键控(CPolSK)调制信号在发送 0/1 比特时的对比状态如图 2 所示。CPolSK 利用圆偏振光的 2 种旋态(左旋和右旋)进行编码调制,从而实现数据的传输。从图 2 可以看出,传统 OOK 调

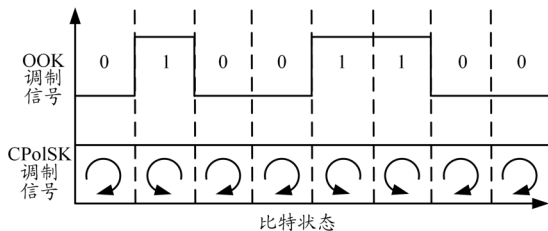


图2 OOK 调制信号与 CPolSK 调制信号比较示意图

制信号的脉冲高度在传输过程中存在起伏变化,而 CPolSK 调制的信号序列在整个传输过程中信号强度恒定,只有圆偏振旋态发生改变。而相关研究表明,圆偏振光在大气中传输时,其偏振度受大气干扰会发生轻微变化(小于等于 10%),但偏振态(左旋或右旋)不发生改变^[26]。因此,与 OOK 调制技术相比,CPolSK 调制技术抗干扰能力更强。

2 衰减分集的阵列抗干扰接收技术

现有的光接收机在较强的光强下可能会出现饱和以及非线性的情况。针对太阳光或者人造光源,文献[27]提出了一种格栅滤光片的接收机结构,但该结构不能很好地适应太阳光一天内多变的朝向。文献[28]提出了利用窄带滤光片的方案滤除多余太阳光,但是同样会将有效信号的功率滤除。鉴于此,文献[29-30]提出了一种利用衰减片的光接收机结构,来抵抗强光干扰,并提高系统鲁棒性。不同情况下引起的探测器饱和示意图如图 3 所示。图 3(a)中,强背景光使得接收信号整体幅度提升漂移,导致真实有效信号的峰峰值 V_{pp} 被截断成 $V_{pp \text{ clip}}$,从而造成有效信号功率下降,同时也引入了非线性。另外,考虑到室外场景的高移动性特点,收发端之间的距离会随着用户的移动而变化,造成接收到的光信号幅度有一定的波动,引起信号的非线性饱和,如图 3(b)所示。可以看出,无论是外部强背景光引起的饱和,还是收发端之间的距离变化引起的饱和,都会使得接收机收到的信号产生失真,给系统性能带来损失。

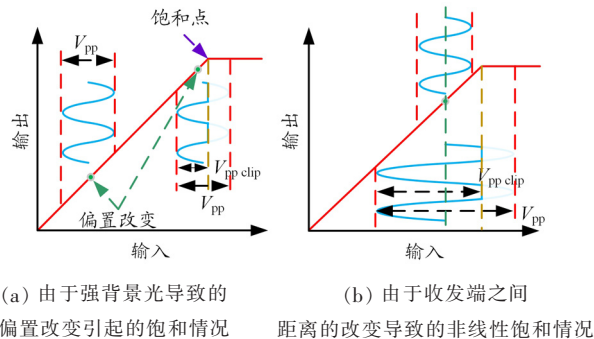


图3 不同情况下的探测器饱和示意图

2.1 自适应电控光衰减的抗干扰 VLC 接收机

为了抵抗强背景光带来的探测器饱和以及非线性问题,文献[29]提出了一种利用电控衰减片的自适应光接收机结构。带电控光衰减片的 VLC 接收机原理示意图如图 4 所示。经过透镜的入射光穿过电控光衰

徐正元,刘伟杰:室外可见光通信抗干扰收发技术

减片进入 APD, 数据解调模块结合发送的训练数据判断信号失真程度,通过电控的方式调整衰减片的

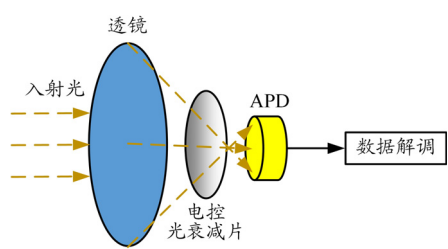


图 4 带电控光衰减片的 VLC 接收机原理示意图

衰减系数,以适应 APD 的线性工作范围,从而获得最佳的解调信号。该接收机结构在背景光较弱时起到一定抗衰减作用,可以将信号的峰值限制到 APD 模块的最大输出门限,以此来提高接收端 SNR。但是,在有效信号过强时,数据帧头已经无法正确辨识,导致无法利用发送的训练数据进行失真判决。

2.2 衰减分集阵列抗干扰接收机

为了抵抗强光或者强信号带来的探测器饱和或失真,文献[30]提出了一种利用衰减分集的光接收机阵列结构来抵抗强光干扰,提高系统鲁棒性。其基本思想就是让同一接收信号并行经过衰减量级差异化的多个衰减片后落在探测器工作范围内的不同工作点,并经过后续数据融合算法处理,恢复发射信号。含 6 个不同衰减系数光衰减片的阵列接收机原理示意图如图 5 所示。首先,接收单元由传统单个 APD 探头替换成多个 APD 的阵列结构。由无线通信接收机理论可知,阵列结构可以带来 $\log M$ 的接收 SNR 分集增益,其中 M 是接收单元的数目。在每个 APD 前面放置一块不同光密度(OD)的衰减片,衰减片可以将 APD 的输入光信号强度降低某个量级,将原本工作在饱和区或者非线性区的 APD(模块)的工作点拉回到正常工作的线性区。但是,由于背景光的强度可能不断变化,会存在随机性的太阳光强度。如果仅使用单一的衰减片,在强光下可能会造成衰减的幅度不足以使 APD 返回到线性工作区,或者在弱背景光时衰减片把有效传输光信号过多衰减,导致 SNR 降低。因此,多个不同 OD 的衰减片共同作用会使得总体接收信号的 SNR 最大化,获得分集增益。目前,接收机采用多个探测器装配不同 OD 系数

的衰减片,后端每一路信号采集之后根据融合算法进行信号合并,最终送入解调单元进行数据恢复。

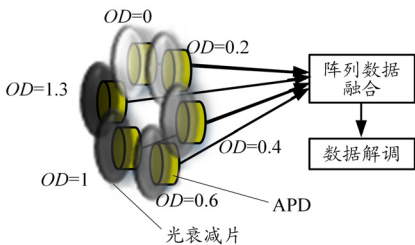


图 5 带光衰减片的阵列 VLC 接收机示意图

后续的研究可以考虑多路接收时采用各支路的自适应衰减,优化多路合并输出后的 SNR,类似于无线通信接收机中的多路合并优化方案,比如最大比合并(MRC)。

另一种相对简单可行的方案就是使用一块连续衰减片替代原先的衰减片组。配置连续衰减片的阵列接收原型机效果图如图 6 所示。接收机可以根据外界环境的光强动态调整衰减片的旋转角度,选取衰减片和 APD 的匹配方案,最大化 SNR。目前的原型机上的 APD 和衰减片暂时是分立元件的组合,后期可以考虑将可控衰减片集成到 APD 的生产工艺里,这样可以进一步缩小探测器的体积,使探测器的应用范围更加广泛。

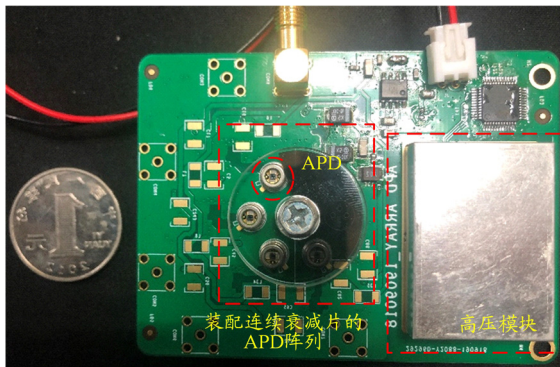


图 6 配置连续衰减片的阵列接收原型机

3 抗多光源干扰的跟瞄技术

室外 VLC 在实际应用中往往会增加光学系统,以提高接收端信号的 SNR。根据几何光学的知识可知,多个光源经过透镜后汇聚在焦平面上的不同位置,而对于 VLC 来说,这个焦平面通常调整至光接收机的探测面。光接收机的有效面积与响应速度成反比关系,即响应速度越快要求最大有效面积越小。接收机“希望”光源经过透镜之后的光斑可以全部进入探测器内,以最大化接收 SNR。同时,当存在多个分布式信号发射光源时,如何挑选载有效信息的光源,也是室外 VLC 的一大挑战。

文献[31]提出了一种简单而有效的跟瞄方式,可使室外 VLC 接收端快速跟踪感兴趣的光源,并且可以将光源经过透镜后的光斑快速汇聚到 APD 光感面上。跟瞄系统的工作流程如图 7 所示。发送端由两部分组成:一部分是发送传输通信数据的信号灯;另一部分是发送信标的信标灯。本文利用现场可编程门阵列(FPGA)将伪随机数据进行上采样,之后为了减少符号间干扰,经过根升余弦滤波器滤波后的数据进行数/模

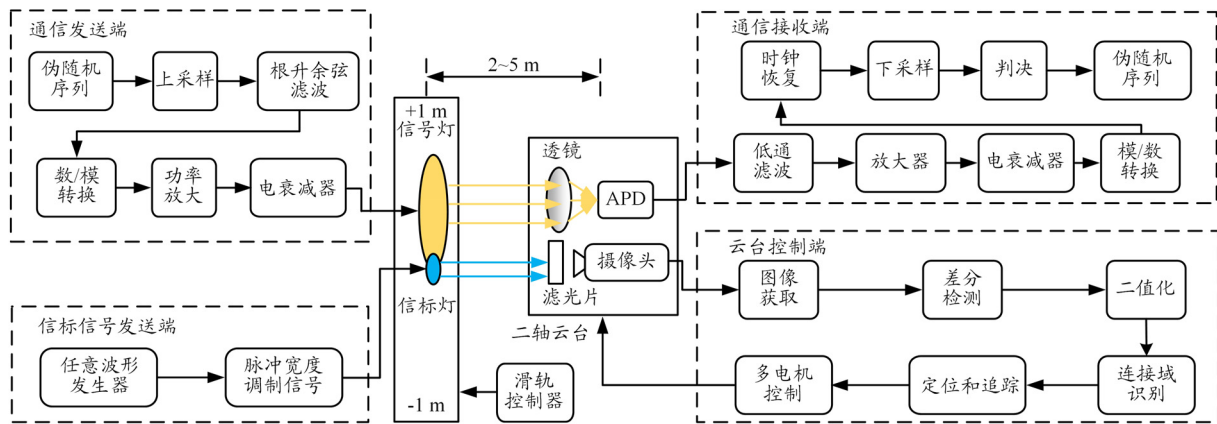


图7 基于摄像头的跟瞄系统工作原理图

转换变成模拟信号,再经放大器、衰减器至驱动电路,驱动 LED 灯发送信号。另外一路信标信号由任意波形发生器产生的脉冲宽度调制信号组成,直接驱动信标灯。接收端由一个二轴云台和后端数字处理单元(通信接收端和云台控制端)组成。安装在二轴云台上的摄像头利用宽视场角的优势可以快速捕捉信标灯。由于摄像头的帧率在几百帧每秒,所以在慢变环境下,连续两帧中的背景可以认为是静止不变的,利用差分检测对差分后的每一帧图像进行解析,便可在像平面上找到感兴趣的光源。通过二值化、连接域识别,识别出信标灯的位置并进行定位和追踪。之后根据信标灯和信号灯的几何位置关系可以确定电机需要旋转的角度,使得透镜汇聚后的光斑全部落入 APD 探测器的有效面积内,最大化接收 SNR。APD 捕获到信号后开始进行数字解调,最终恢复出原始发送数据。自动跟瞄系统的发送端和接收端实物图分别如图 8、图 9 所示。该跟瞄系统目前可以在距离 3 m 时实现 200 Mb/s 实时通信传输,跟瞄角度误差小于 0.35 mrad,跟瞄速度最大为 27 °/s,延时低于 21 ms^[32]。因此,该跟瞄系统可以基本满足实际跟瞄需求。从图 8 可以看出,发送端需要配置一个辅助信标光源,这在实际应用中可能需要额外的成本以及改变现有光源的外观。此外,图 9 中的相机以及二轴云台目前尺寸还较为庞大,未来可

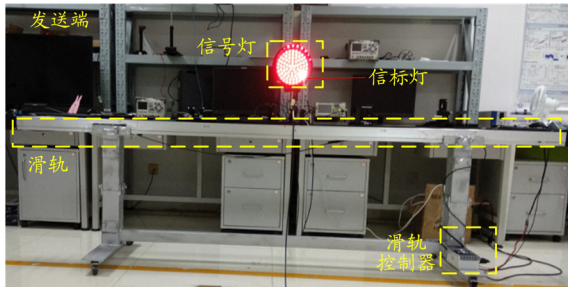


图8 跟瞄系统发送端实物图

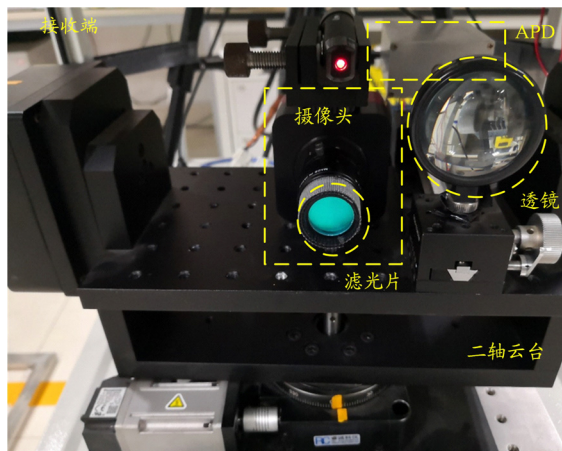


图9 跟瞄系统接收端实物图

以考虑使用小型化的微机电系统(MEMS)进行系统改进,以便向系统集成化迈进。

4 结束语

本文对室外 VLC 中存在的干扰进行了大致的分类,介绍了部分抗干扰的发端与收端技术。无论是抗干扰编码调制技术,还是利用衰减片或者衰减分集的抗强光干扰 VLC 接收机,以及抗多光源干扰的跟瞄技术,目前还处于独立研究状态。未来必将是多种抗干扰技术的联合使用,使得 VLC 系统可以适应复杂多变的室外场景,并更好地服务于智能交通、车联网和无人驾驶等室外应用的通信需求,甚至渗透至成像与智能感知等领域。

参考文献:

- [1] HANZO L, HAAS H, IMRE S, et al. Wireless myths, realities, and futures: from 3G/4G to optical and quantum wireless [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100: 1853-1888.
- [2] DAVID K, BERNDT H. 6G vision and requirements: is there any need

- for beyond 5G? [J]. IEEE Veh. Technol. Mag., 2018, 13(3): 72–80.
- [3] ZHANG Z, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies [J]. IEEE Veh. Technol. Mag., 2019, 14(3): 28–41.
- [4] 徐正元,王昭诚. 6G 扬帆起航: 拍赫兹通信与健康泛在网络助推 6G 新应用 [J/OL]. IEEE 科技纵览, 2019-12-27 [2020-06-22]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404454066502631625>.
- [5] 徐正元. 宽光谱无线光通信理论与方法 [M]. 中国基础研究发展报告, 北京: 科学出版社, 2019: 275–277.
- [6] UYSAL M, GHASSEMLOOY Z, BEKKALI A, et al. Visible light communication for vehicular networking: performance study of a v2v system using a measured headlamp beam pattern model [J]. IEEE Veh. Technol. Mag., 2015, 10(4): 45–53.
- [7] 徐正元,金显庆,毛天奇,等. 室外可见光通信与智能交通 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
- [8] DIMITRAKOPOULOS G, DEMESTICHAS P. Intelligent transportation systems [J]. IEEE Veh. Technol. Mag., 2010, 5(1): 77–84.
- [9] LIU W, XU Z. Some practical constraints and solutions for optical camera communication [J]. The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences., 2020, 378(2169): 1–25.
- [10] NAGURA T, YAM T, KATAYAMA M. Tracking an LED array transmitter for visible light communications in the driving situation[C]//The 7th International Symposium on Wireless Communication Systems, Sept. 19–22, 2010, York, UK. Piscataway: IEEE, 2010: 765–769.
- [11] TAKAI I, ITO S, YASUTOMI K, et al. LED and CMOS image sensor based optical wireless communication system for automotive applications [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(5): 6801418–6801418.
- [12] TAKAI I, HARADA T, ANDOH M, et al. Optical vehicle-to-vehicle communication system using LED transmitter and camera receiver[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 1–14.
- [13] GOTO Y, TAKAI, YAMAZATO T, et al. A new automotive VLC system using optical communication image sensor [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1–17.
- [14] LUAN H, JIN X, LIU W, et al. Demonstration of a real-time vehicular visible light communication system with timing recovery [C]//The 13th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference, June 26–30, 2017, Valencia, Spain. Piscataway: IEEE, 2017: 472–477.
- [15] YANG R, JIN X, JIN M, et al. Experimental investigation of optical OFDMA for vehicular visible light communication [C]//The 43th European Conference on Optical Communication, Sept. 17–21, 2017, Gothenburg, Sweden. Washington: OSA, 2017. DOI: 10.1109/ECOC.2017.8346017.
- [16] MAO Y, JIN X, PAN W, et al. Real-time investigation of CAP transceivers with hybrid digital equalization for visible light communication [J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9382–9393.
- [17] XU R, XU Z. LED-based vehicular visible light ranging [C]//IEEE International Conference on Communications, May 20–24, 2019, Shanghai, China. Piscataway: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761797.
- [18] LI S, HUANG B, XU Z. Experimental MIMO VLC systems using tricolor LED transmitters and receivers [C]//IEEE GLOBECOM Workshop on Optical Wireless Communications, Dec. 4–8, 2017, Singapore. Piscataway: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2017.8269140.
- [19] XUE W, LI S, XU Z. Sunlight enabled vehicle detection by LED street lights [C]//Asia Communications and Photonics Conference, Oct. 26–29, 2018, Hangzhou, China. Washington: OSA, 2018. DOI: 10.1109/ACP.2018.8596156.
- [20] LIU W, XU Z. APD nonlinearity and its impact on PAM-based visible light communication[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(5): 1057–1061.
- [21] YUAN M, SHA X, LIANG X, et al. Coding performance for signal dependent channels in visible light communication system [C]//IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, Dec. 14–16, 2015, Orlando, FL, USA. Piscataway: IEEE, 2015: 1037–1041.
- [22] WANG H, KIM S. Dimming control systems with polar codes in visible light communication [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2017, 29(19): 1651–1654.
- [23] IEEE. Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. 35.110-Networking [S]. New York: IEEE, 2018: 1–405.
- [24] WANG Y, WU N, Xu Z. Study of raptor codes for indoor mobile VLC channels [C]//IEEE GLOBECOM Workshop on Optical Wireless Communications, Dec. 9–13, 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirate. Piscataway: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644291.
- [25] 赵新辉,姚勇,孙云旭,等. 一种新的自由空间光通信调制方式—圆偏振位移键控[J]. 光学学报, 2008, 28(s2): 223–226.
- [26] BENEDETTO S, POGGIOLINI P. Theory of polarization shift keying modulation [J] IEEE Trans. Commun., 1992, 40(4): 708–721.
- [27] CHUNG Y H, OH S. Efficient optical filtering for outdoor visible light communications in the presence of sunlight or artificial light [C]//2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, November 11–15, 2013, Naha, Japan. Piscataway: IEEE, 2013: 749–752.
- [28] ISLIM M S, VIDEV S, SAFARI M, et al. The impact of solar irradiance on visible light communications [J]. Journal. Light. Technol., 2018, 36(12): 2376–2386.
- [29] TU C, LIU W, XU Z. Mitigation of strong background radiation with attenuation diversity for vehicular visible light communication [C]//The 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Oct. 23–25, 2019, Xi'an, Shanxi, China. Piscataway: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/WCSP.2019.8928070.
- [30] LIU W, JIN X, XU Z. Mitigation of strong solar radiation by attenuation diversity in vehicular visible light communication [C]//Asia Communications and Photonics Conference, Nov. 2–5, 2019, Chengdu, Sichuan, China. Washington: OSA, 2019: T2B.2-1–T2B.2-3.
- [31] LIU F, JIANG W, JIN X, XU Z. A simple and effective tracking scheme for visible light communication systems [C]//In International Conference on optical communications and Networks, Nov. 16–19, 2018, Zhuhai, China. San Francisco: SPIE, 2019: 110481H-1–110481H-5.
- [32] LIU F, JIN X, JIANG W, XU Z. Effective auto-alignment and tracking of transceivers for visible-light communication in data centres [C]//Proc. SPIE, Broadband Access Communication Technologies XIII, Feb. 2–7, 2019, San Francisco, CA, USA. San Francisco: SPIE, 2019: 109450N-1–109450N-8.