

引用本文:迟楠,王哲.可见光通信复用技术研究进展[J].光通信技术,2020,44(4):1-7.

可见光通信复用技术研究进展

迟楠,王哲

(复旦大学通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室,上海 200433)

摘要:随着对无线通信带宽需求的迅猛增长,人们对于高速数据接入的需求愈发迫切。借助可见光通信(VLC)复用技术可克服调制带宽约束,成倍提升VLC系统的传输容量,是目前VLC领域的研究热点。介绍了VLC复用技术的基本原理和关键技术,对近年来提出的多维复用技术和多输入多输出(MIMO)技术进行总结,并结合研究现状展望未来的发展方向。

关键词:可见光通信;复用技术;多输入多输出技术

中图分类号:TN929.12 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)04-0001-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress on multiplexing techniques of visible light communication

CHI Nan, WANG Zhe

(Department of Communication Science and Engineering, the Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves(MOE), Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: With the rapid growth of the demand for wireless communication bandwidth, people's demand for high-speed data access is increasingly urgent. With the aid of visible light communication (VLC) multiplexing techniques, the performance of VLC can overcome the modulation bandwidth constraint and double the transmission capacity of the VLC system, and it is a research hotspot in the field of VLC. This article introduces the basic principles and key technologies of VLC multiplexing techniques, including multi-dimensional multiplexing technique and multiple-in-multiple-out (MIMO) technique proposed in recent years, and looks into the future development based on the research status.

Key words: visible light communication; multiplexing technique; multiple-in-multiple-out technique

0 引言

随着发光二极管(LED)的快速普及,高速无线接入需求的快速迭代,以及未来6G布局的拉动,可见光通信(VLC)技术近年来获得了迅猛发展。VLC是一种利用LED光线强弱变化传递信息的技术^[1,2]。该技术在提供照明功能的同时,可用于信息的传输。相比于传统无线通信技术,VLC技术具有安全性高、低功耗、频谱

收稿日期:2020-04-08。

基金项目:国家重点研发计划(项目编号:2017YFB0403603)资助;国家自然科学基金(61925104)资助。

作者简介:迟楠(1974—)女,复旦大学教授,博士生导师。国家杰出青年科学基金获得者,美国光学学会OSA Fellow。长期从事高速光通信和高速VLC方面的研究,主要研究高谱效率多维多阶光调制技术和数字信号处理技术。



谱无需授权和抗电磁干扰等方面的优势^[3]。因此,VLC技术一直被认为是未来移动通信室内无线网络的可供选择的补充技术之一。

VLC的概念最早在2000年由日本研究者Yuichi Tanaka等人提出,他们对LED照明作为通信基站进行信息无线传输的室内通信系统^[4]进行了仿真,并基于此对VLC理论做了进一步完善及改进^[5,6]。2003年,日本成立了国际首个VLC组织“可见光通信联盟(VLCC)”,该组织对VLC的研究非常广泛,根据具体应用场景划分为室内移动通信、可见光定位、可见光无线局域网接入和交通信号灯通信等。2008年,德国海因里希赫兹通信工程研究所(HHI)的Klaus-Dieter Langer等人就100 MHz的VLC宽带接入网物理层的基础问题进行了初步研究^[7]。欧盟在2008年1月至2010年12月开展了OMEGA项目,目的在于发展

迟楠,王哲:可见光通信复用技术研究进展

1 Gb/s 以上的超高速家庭接入网。VLC 技术是 OMEGA 项目针对家庭无线接入技术的焦点之一,项目搭建的可见光测试网络最高传输速率为 300 Mb/s,平均速率为 73 Mb/s。2008 年 10 月,美国国家科学基金会资助智能照明通信项目,开始开展 VLC 的研究。

进入 2010 年,随着 VLC 技术的研究逐渐深入,该领域被更多的人认识和接受,技术背后广泛的市场应用前景吸引了越来越多的国家、企业、学校和科研机构参与到 VLC 的技术研究中来。研究重点主要集中在如何更高速、更长距离地实现可见光传输,包括多载波调制技术和先进的数字信号均衡技术等^[8,9],将 VLC 系统的容量提升了数十倍。相比之下,国内关于 VLC 技术的相关研究起步相对较晚。近几年来,复旦大学、清华大学、北京邮电大学、解放军信息工程学院和南昌大学等科研院校均启动相关研究工作,并取得了不少成果。其中,关于可见光复用和多输入多输出(MIMO)技术开展多通道并行 VLC 方面的研究较少,起步更晚。

在波分复用(WDM)方面,复旦大学利用红绿蓝黄-发光二极管(RGBY-LED)实现了最高 8 Gb/s 的传输速率,这是基于商用 LED 的最高传输速率^[10]。在子载波复用(SCM)技术方面,复旦大学提出并实验证明了基于商用 RGB-LED 和荧光粉 LED 的新型全双工子载波复用-波分复用(SCM-WDM)系统,下行传输速率为 575 Mb/s,上行传输速率为 225 Mb/s^[2]。在偏振复用(PDM)方面,文献[11]成功实现了 2×2 的可见光 PDM 系统,采用基于 16 进制的正交振幅调制(16QAM)高阶调制的单载波频域均衡(SC-FDE)调制技术提升频谱利用率,在传输距离为 0.8 m 条件下实现总速率 1 Gb/s 的 PDM 传输。

在 MIMO 技术方面,可根据每个接收器接收到对应单个光源还是多个光源叠加的信息的不同,分为成像 MIMO 和非成像 MIMO 2 类。成像 MIMO 的每个发射和接收端是唯一对应的关系。因此,要求收发两端严格对准,硬件校准要求较高。该方法的优势在于无需额外的解复用算法。文献[12]提出 2×2 成像 MIMO VLC 系统,发射端采用 2 个 RGB LED 以及空间平衡编码(SBC),接收端采用集成 PIN 阵列进行接收,通过实验在 2.5 m 的距离上测得 1.4 Gb/s 的数据速率,验证了成像 MIMO 系统能够突破单个 LED 的带宽限制,并抵消二阶非线性失真。非成像 MIMO 则无需发射和接收端一一对准,但需采用 MIMO 解复用算法来实现叠加信号的分离。文献[13]通过实验研究了高速 2×2 非

成像 MIMO 奈奎斯特单载波 VLC 系统,使用商用 3 dB 带宽为 10 MHz 的蓝色 LED 和带宽 100 MHz 的雪崩二极管(APD)分别作为发射器和接收器,最终在 40 cm 距离下实现了 500 Mb/s 的数据速率。

据预测,未来十年 VLC 技术的提升将会逐渐弥补 VLC 和 5G 无线通信技术在性能上的差距。具体而言,到 2024 年,VLC 技术可将当前 5G 提供的 1 Gb/s 室内短距离速率提高到 20 Gb/s^[14]。随之而来的是并行 micro-LED 和互补金属氧化物半导体(CMOS)驱动器的硬件升级以及用户复用技术,即系统由分立器件到阵列集成的硬件架构提升以及基于光束的波束成形技术^[14]。到 2026 年左右,micro-LED 等阵列器件工艺和空分复用等技术均有望达到技术成熟且成本低廉的水平^[14]。结合未来室内大规模 LED 的全覆盖的照明需求,这与 MIMO 技术提高系统性能和传输速率的通信需求不谋而合,将极大推动 VLC MIMO 技术未来的发展。

本文首先对 VLC 复用技术进行分类探讨,随后从成像 MIMO 和非成像 MIMO 的分类切入,归纳总结近年来 VLC MIMO 技术的研究成果和未来发展趋势。

1 VLC 多维复用系统

在 VLC 系统中,采用多维复用技术可实现多路信号并行传输,同时克服调制带宽限制,是提升 VLC 系统容量的有效办法。通常可采用的多维复用方式包括 WDM、SCM 和 PDM。本节基于这 3 种复用技术,分别从原理上介绍采用多维复用技术的 VLC 系统。

1.1 WDM 技术

WDM 技术是将多路载有信息,但不同波长的光信号(对于 RGB-LED 发射端而言,即采用 RGB 三色调制后的光束合并发射)经过自由空间光信道传输,在接收端分别使用对应颜色的滤光片进行光载波分离,最后由光接收机进行信号处理以恢复原始信息的通信手段。

3 路不同波长的光信号经过电放大器和直流偏置器(Bias-Tee)后加载到 RGB 3 种颜色的 LED 上,通过这 3 束不同颜色的光束在空间耦合形成白光。在接收端经过透镜聚焦后,分别采用对应 RGB 3 种颜色的滤光片将不同波长的信号滤出,最后采用接收电路进行信号采集以及离线处理,VLC WDM 原理如图 1 所示。通过 RGB 三色的 WDM 技术,理论上 VLC 系统的传输容量可提升 3 倍。

在实验中,文献[15]采用单载波频域均衡(SC-

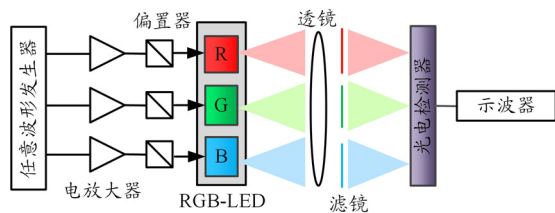


图1 VLC WDM原理

FDE)调制,结合预均衡和后均衡算法。每个波长的调制带宽为 156.25 MHz,调制阶数设定为 256QAM。经测试,每个波长传输速率为 1.25 Gb/s,RGB 三色 WDM 后系统总传输速率达到 3.75 Gb/s。

文献[10]采用 RGBY 四色实现 WDM,接收端经过线性均衡和非线性均衡后,在 1 m 自由空间中共计实现了 8 Gb/s 的总通信速率。

1.2 SCM 技术

SCM 技术是指多路信号经不同的载波分别调制,再由同一波长的发射器件在自由空间传输的一种复用方式。对于 VLC 系统,子载波信噪比(SNR)会随子载波中心频率增大而逐渐降低,子载波间隔的降低可有效克服频谱的不平坦问题。SCM 的灵活性正是在于其具备灵活的频谱分配方式,其原理示意图如图 2 所示。可以看出,对于不同的子载波,其调制阶数、带宽和中心频率等均可动态调整。

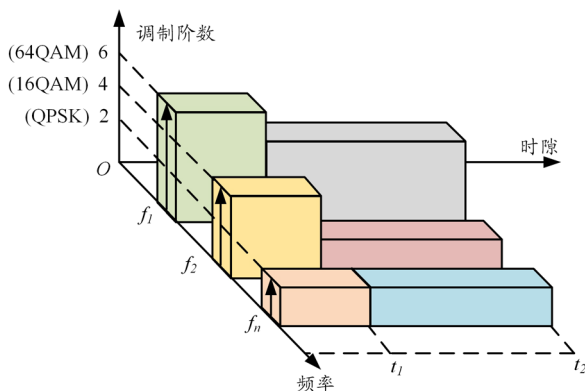


图2 SCM技术原理示意图

具体对于 VLC 系统而言,可在低频区域分配更高阶数的符号,以充分利用复用技术提高通信速率。此外,正交频分复用(OFDM)系统的峰均比(PAPR)通常会随子载波数目的增多而增大。而采用 SCM 可通过灵活调配每个子载波的调制阶数实现降低子载波数量的目的,最终降低 PAPR,提升通信性能。根据 SCM 特点,可以将其应用在多址接入或者双向传输中。特别对于双向传输,下行传输可保留低中频区域,使用 64QAM 或 16QAM-OFDM 调制方式提高下行通信速

率;而上行速率需求相对低,可利用高频区域,采用开关键控(OOK)或正交相移键控(QPSK)调制。

1.3 PDM 技术

激光光纤通信技术可借助偏振方向来实现 PDM。LED 发出的光是非相干光,但它可利用外部偏振片获得线偏振光,实现 PDM。VLC 系统发射端可采用多个不同偏振方向的起偏器和数量上相应的检偏器来接收。在同一波长信道的条件下,通过光的 2 个相互正交偏振态同时传输 2 路独立数据,以实现信息传输能力提高 1 倍而不增加额外带宽资源,达到提高频谱利用率的目的。

对于接收端的数字信号处理,一方面可借助相干检测技术降低系统的灵敏度,获得光载波幅度、频率、相位和偏振方向信息,并充分利用高阶、多维调制格式提高系统的频谱利用率;另一方面可利用数字信号处理技术灵活地完成数字偏振解复用,以获得理想的解复用结果。

基于 PDM,文献[16]通过实验成功实现了 2×2 可见光 PDM 系统,传输速率达到 1 Gb/s。实验中选取了 2 个独立的 LED 作为光源,并采用互为正交的 PDM 器实现 PDM。发射端采用基于 16QAM 的 SC-FDE 调制技术提高频谱利用率。在 125 MHz 带宽的条件下,实现了总速率为 1 Gb/s 的 PDM 传输,传输距离达到 80 cm。可见光 PDM 技术原理如图 3 所示。

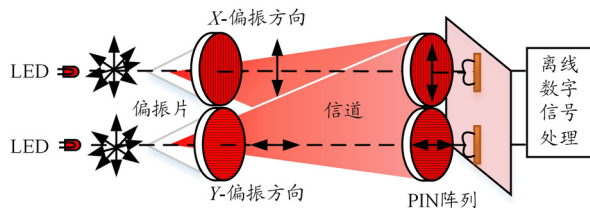


图3 可见光 PDM 技术原理示意图

2 VLC MIMO 系统

目前,室内照明大量采用 LED 阵列,这为 VLC 提供了天然的复用场景及硬件设施。VLC MIMO 技术采用多个 LED 发送数据,并采用多个接收机接收数据,可显著提升系统的通信容量。一般而言,VLC MIMO 可根据接收端与发射端之间的对应关系分为成像 MIMO 和非成像 MIMO 2 种,如图 4 所示。本节围绕上述 2 种 MIMO 技术,重点介绍 MIMO 技术原理以及相应的 VLC MIMO 实验。

2.1 成像 MIMO

VLC 成像 MIMO 技术是指多个发射机的光信号

经过空间成像棱镜,在接收端有对应的多个接收机与发射机光信号一一对应接收。成像 MIMO 要求每个接收机只能接收对应发射机发射的光信号。因此,接收端无需采用 MIMO 解复用算法来解决光信号串扰问题,这能够显著降低接收机集成的复杂度和成本。

基于 VLC MIMO 技术,文献 [17] 开展了基于 32QAM 和 64QAM 的高阶 SC-FDE 调制的成像 MIMO 系统研究,系统框图如图 5 所示。其中,每个发射机采用 RGB 三色 LED 作为光源,在 3 个波长上均独立调制并采用预均衡技术补偿信道频谱的不平坦衰落,信号带宽为 125 MHz。在接收端,频率衰落得到很好的补偿,最终实现 RGB 三色通信速率分别为 1.5 Gb/s、1.25 Gb/s 和 1.25 Gb/s 的高速可见光成像 MIMO 传输,传输距离为 0.75 m。

文献 [18] 实验论证了 VLC 成像 3×3 MIMO 系统(如图 6 所示),其使用 OFDM 调制以及比特加载技术,借助商用荧光白色 LED 作为发射机以及低成本的 PIN 作为接收机,开发预均衡硬件电路将白光的可用

带宽扩展到 100 MHz 以上,最终在 1 m 通信距离上实现了 800 Mb/s 的数据传输。

此外,文献[19]提出并实验论证了 4×4 成像 MIMO VLC 系统,该系统使用多带无载波调幅调相(CAP)技术在成像 MIMO 的基础上进行频率复用。该文献验证了 MIMO 技术和多带 CAP 技术相结合能有效提高 VLC 系统通信速率。实验表明:每个 LED 发射 20 个子带 CAP 信号,信号带宽为 20 MHz;LED 带宽约为 4 MHz。在通信距离为 1 m 的条件下,最终实现了约 249 Mb/s 的通信速率^[19]。

2.2 非成像 MIMO

相比于成像 MIMO,非成像 MIMO 无需精确对准,在实际应用场合下更为实用,仅需要在每个接收机前放置聚光器件即可完整构建。非成像 MIMO 系统框图如图 7 所示。文献[13]基于非成像 MIMO,实现了 2×2 MIMO VLC 系统。在实验系统中,采用 2 个商用 RGB LED 作为 VLC 发射源,4 阶 SC-FDE 调制技术来提升系统频率效率,最终在 2×2 MIMO 中实现了 500 Mb/s

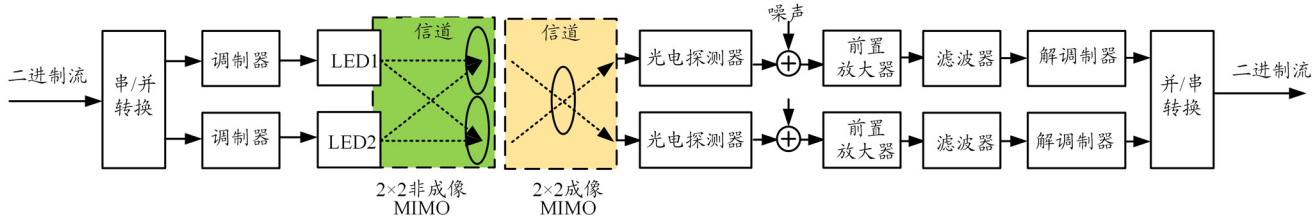
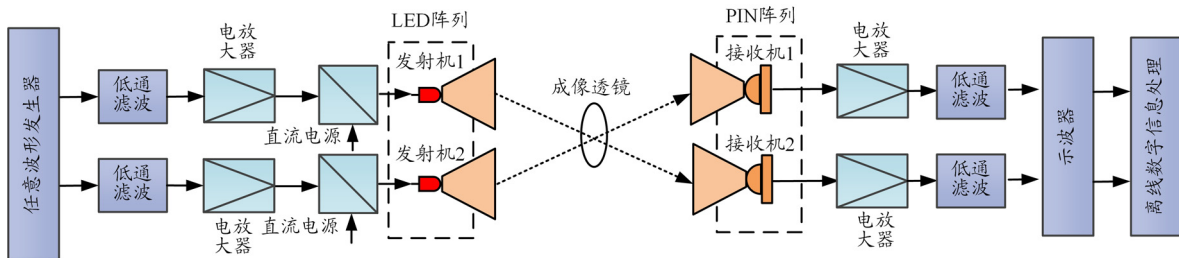
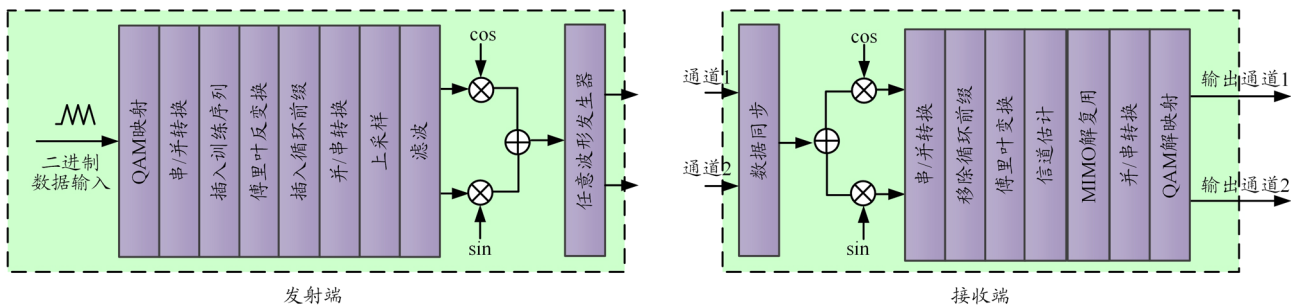


图 4 成像 MIMO 与非成像 MIMO 原理示意图



(a) 实验装置图



(b) 调制解调流程图

图 5 VLC 成像 MIMO 系统框图

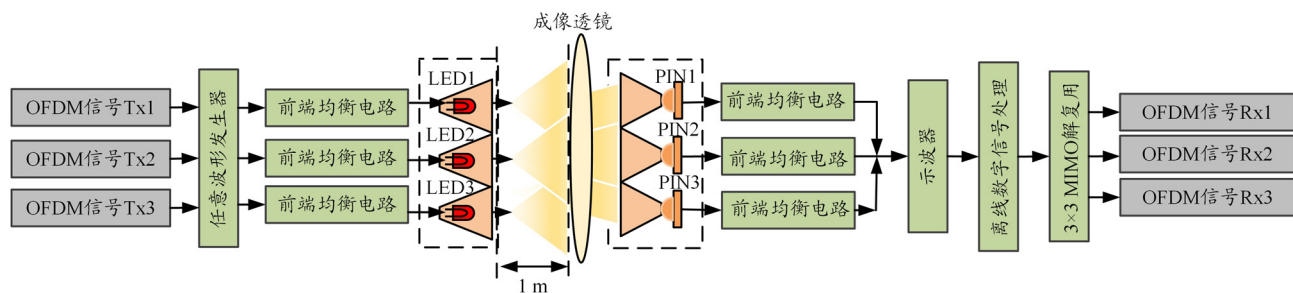
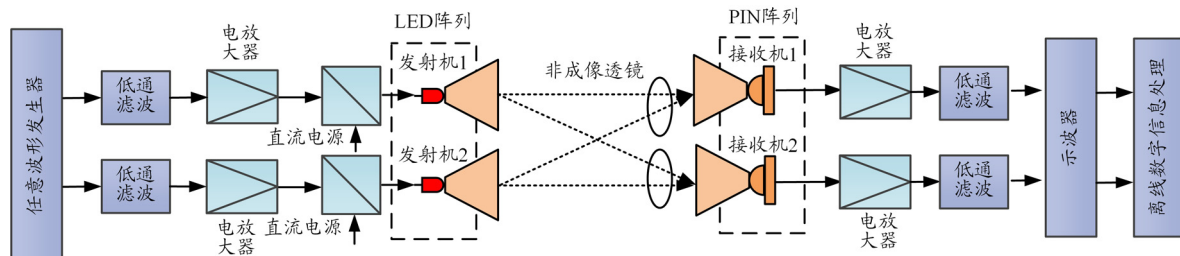
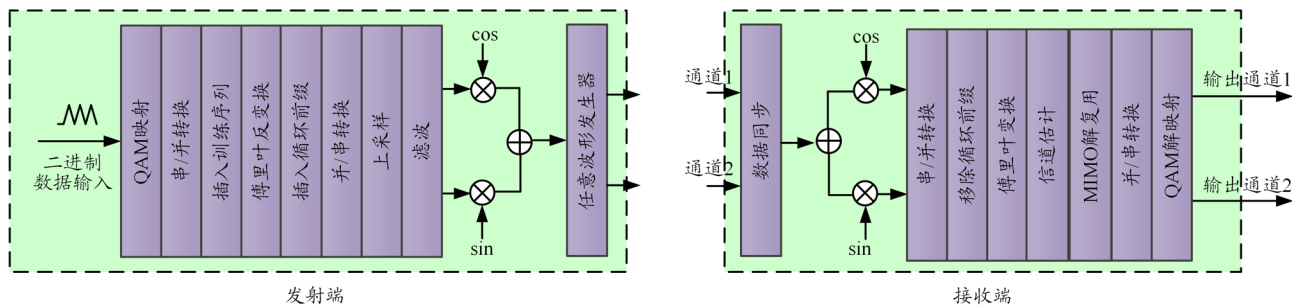


图6 VLC 成像 3x3 MIMO 系统框图



(a) 实验装置图



(b) 调制解调流程图

图7 VLC 非成像 MIMO 系统框图

的传输速率。

对于非成像 MIMO VLC 系统,每个接收机会接收到多个发送端发射的信号,相互之间会产生串扰,如何在互相串扰的信号中恢复出发射数据流是非成像 MIMO 技术的重中之重。在接收端采用后均衡算法,对每个发射数据帧的帧头插入训练序列,且训练序列在设计时插入到相邻的 2 个时隙中,这样保证每个时隙仅有一个发射端发射训练序列。

在此基础上,文献 [13] 研究了均衡技术与系统 BER、传输距离三者之间的关系。最终验证了在采用非成像 MIMO 辅以 SC-FDE 调制技术的条件下,2 个接收机性能接近,传输 0.4 m 时 2 个接收机的 BER 性能均能满足要求。

此外,文献[20]研究了基于 Alamouti 空时分组码 (STBC) 的 2x1 MISO VLC 系统。该系统借助 MISO-STBC 分集技术,相比于 SISO 系统可有效提升 VLC 系

统的可靠性。对于待发送序列 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_n]$,其相邻 2 个发射符号按照式(1)分配到 2 个发射端分别发射。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

参照式(1),将串行序列 $\mathbf{X}$ 的剩余符号间隔分配到 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 。基于 Alamouti STBC MISO-VLC 的模型可表示为:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_1(t) & -x_2^*(t) \\ x_2(t) & x_1^*(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

文献[20]测试了不使用后均衡算法、仅使用后均衡算法以及 Alamouti STBC 加后均衡算法 3 种情况,第三种算法可以在 1.3 m 距离下实现了 1.0 Gb/s 的通信速率。相比于前 2 种算法,STBC 加后均衡算法可额

迟楠,王哲:可见光通信复用技术研究进展

外获得 3.13 dB 的增益,显示出 Alamouti STBC 对 MISO 系统的显著提升。

3 VLC MIMO 的发展趋势

如今,基于人工智能的深度神经网络(DNN)和机器学习技术已成功应用于分类、预测、数据挖掘和模式识别等领域。但是,对于使用人工智能来解决 VLC MIMO 系统中的空间复用方面的研究较少。随着相关技术的不断发展,人工智能与 VLC MIMO 的结合有望成为未来该领域的研究热点。相比于传统的 MIMO 解复用算法以及后均衡算法,采用人工智能技术能够更加灵活、精准地对 VLC 信道、接收符号进行估计和补偿。现有研究表明,采用人工智能技术可有效提升 VLC MIMO 系统容量和鲁棒性。

文献[21]基于人工神经网络(ANN)提出了一种时域和空间联合的后均衡算法。相比于传统判决反馈的均衡器(如迫零均衡、决策反馈均衡),ANN 能够同时补偿系统的非线性传递函数以及串扰,具有显著优势。作者实验验证了使用 ANN 作为后均衡器在二进制脉冲幅度调制(PAM2)和 PAM4 中可以获得最优性能。在此基础上双验证了 ANN 均衡器在信道矩阵接近奇异时,MIMO 均衡性能会显著高于传统后均衡算法。文献[22]基于直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)提出了 DNN 模型的信道估计方法。DNN 模型利用发射信号作为标签,把接收端的采样信号作为信道特征进行学习。相比于传统的最小二乘(LS)、最小均方误差(MMSE)算法,DNN 模型在获得更好的 BER 性能的同时,省去了 MMSE 算法带来的复杂运算。

文献 [23] 研究了一种基于机器学习的 2×2 VLC MIMO 系统解复用方案。方案基于复数独立成分分析(ICA)算法,提出了一种联合 IQ 分量的叠加星座点分离方案以最大化空间复用增益并提高通信容量。在实验系统中,发射端 Tx1 和 Tx2 为 2 个独立信号源,分别发射 QPSK 和 16QAM 信号,在发射功率比 $a=4,3,2$ 和 1 条件下,接收端可获得 64QAM、49QAM、36QAM 和 25QAM 叠加星座点,如图 8 所示。接收阵列不同接收器件同一时刻获得的信号的功率配比不同,借助包括 ICA 在内的机器学习算法,可有效分离每个探测器的叠加星座点,得到恢复后的并行多路信息。实验表明:采用基于联合 IQ 分量 ICA 算法的 MIMO VLC 系统,在 1.3 m 的通信距离下,低于 7% pre-FEC 门限下的最大通信速率约 900 Mb/s。相比之下,采用传统 2×2

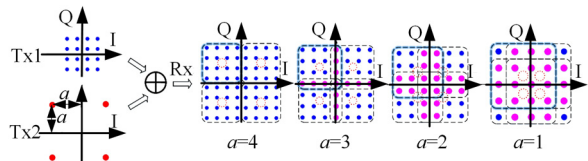


图 8 发射 QPSK 和 16QAM,接收端在不同发射功率比条件下的叠加星座点^[24]

Alamouti STBC 算法的通信速率约 600 Mb/s,通信速率提升约 50%。

随着深度神经网络、机器学习等理论方法的不断发展、深化,势必会深刻影响未来 MIMO 技术的发展,从传统 MIMO 算法到基于人工智能的 MIMO 算法将是大势所趋。

4 结束语

本文首先分析了 VLC 系统多维复用技术手段,包括 WDM、SCM 以及 PDM 技术,着重介绍了各种复用技术的原理。同时,针对 VLC 系统中的 MIMO 技术,分别介绍了 2 种 MIMO 技术,即成像 MIMO 和非成像 MIMO 技术。最后,分析了 VLC MIMO 与人工智能技术结合的相关成果,展望了该领域未来的发展前景。总体而言,VLC MIMO 技术通过 LED 阵列发射和接收阵列接收,对于室内照明场景而言,不仅能够提高室内照明质量,而且能够提升 VLC 系统传输的通信速率和可靠性。瞄准未来覆盖室内网络应用等方面的应用深化 VLC MIMO 领域的研究,具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] CHI N, HAAS H, KAVEHRAD M, et al. Visible light communications: demand factors, benefits and opportunities [Guest Editorial] [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 5-7.
- [2] 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]. Opt Express, 2013, 21(1): 1203-1208.
- [3] 迟楠,乔梁,赵嘉琦,等. 基于 VLC 的 MIMO 技术研究现状 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(2): 113-122.
- [4] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [C]//11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Sept. 18-21, 2000, London, England. London: Proceedings (Cat. No. 00TH8525). IEEE, 2000: 1325-1329.
- [5] TANAKA Y, KOMINE T, HARUYAMA S, et al. Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting [C]//12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications,

Sept. 30–Oct. 3, 2001, San Diego, CA. San Diego: Proceedings (Cat. No. 01TH8598). IEEE, 2001: F–F.

[6] FAN K, KOMINE T, TANAKA Y, et al. The effect of reflection on indoor visible-light communication system utilizing white LEDs [C]//The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Oct. 27–30, 2002, Honolulu, USA. Honolulu: IEEE, 2002: 611–615.

[7] O'BRIEN D, ZENG L, LE-MINH H, et al. Visible Light Communications[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2009.

[8] 迟楠. LEDVLC 技术 [M]. 北京:清华大学出版社, 2013.

[9] 迟楠. LEDVLC 关键器件与应用[J]. 互联网天地, 2015(8): 95–95.

[10] WANG Y, TAO L, HUANG X, et al. 8-Gb/s RGBY LED-based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1–7.

[11] WANG Y, YANG C, WANG Y, et al. Gigabit polarization division multiplexing in visible light communication [J]. Optics letters, 2014, 39(7): 1823–1826.

[12] LI J, XU Y, SHI J, et al. A 2×2 imaging MIMO system based on LED Visible Light Communications employing space balanced coding and integrated PIN array reception [J]. Opt. Commun., 2016, 367: 214–218.

[13] WANG Y, CHI N. Demonstration of high-speed 2×2 non-imaging MIMO Nyquist single carrier visible light communication with frequency domain equalization [J]. Journal Lightwave Technol, 2014, 32(11): 2087–2093.

[14] STRINATI E C, BARBAROSSA S, GONZALEZ-JIMENEZ J L, et al. 6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 42–50.

[15] WANG Y, HUANG X, WANG Y, et al. Demonstration of 3.75-Gb/s Visible Light Communication Adopting Single Carrier Frequency Domain

Equalization Using a Single RGB LED[C]//Asia Communications and Photonics Conference. November 12–15, 2013, Beijing, China. Beijing: Optical Society of America, 2013. DOI: 10.1364/ACPC.2013.AF2E.4.

[16] WANG Y, YANG C, WANG Y, et al. Gigabit polarization division multiplexing in visible light communication [J]. Optics letters, 2014, 39(7): 1823–1826.

[17] 王源泉. Indoor gigabit 2×2 imaging multiple-input-multiple-output visible light communication [J]. Chin. Opt. Lett., 2014, (10): 16–19.

[18] HSU C W, LU I C, LIU Y L, et al. Demonstration of high speed imaging 3×3 MIMO-OFDM visible light communication system[C]//2016 IEEE Photonics Conference (IPC), Oct. 2–6, 2016. Waikoloa, USA. Waikoloa: IEEE, 2016: 729–730.

[19] WERFLI K, CHVOJKA P, GHASSEMLOOY Z, et al. Experimental demonstration of high-speed 4×4 imaging multi-CAP MIMO visible light communications [J]. Journal Lightwave Technology, 2018, 36(10): 1944–1951.

[20] 乔梁, 卢星宇, 梁尚雨, 等. MISO visible light communication system utilizing hybrid post-equalizer aided pre-convergence of STBC decoding[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(6): 38–42.

[21] RAJBHANDARI S, CHUN H, FAULKNER G, et al. Neural network-based joint spatial and temporal equalization for MIMO-VLC system [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2019, 31(11): 821–824.

[22] WU X, HUANG Z, JI Y. Deep neural network method for channel estimation in visible light communication [J]. Optics Communications, 2020. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.125272.

[23] WANG Z, HAN S, CHI N. Performance enhancement based on machine learning scheme for space multiplexing 2×2 MIMO VLC system employing joint IQ independent component analysis [J]. Optics Communications, 2020. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.124733.

2020 年征订启事

光通信技术 月刊

邮发代号: 48-126

定 价: 16 元/册; 192 元/年

订 阅: 全国各地邮局

1977 年,《光通信技术》期刊伴随着世界光通信的诞生而诞生。从创刊至今共 44 年,《光通信技术》期刊见证了世界光通信技术从无到有、从起步到兴盛的整个历程,光通信领域出现的所有新技术(包括光纤光缆、PDH、SDH、WDM、MSTP、EDFA、ATM、APON、EPON、GPON、xPON、PTN、OADM/ROADM、OTN、SDN、SDON、空间光通信、可见光通信、光传感技术、光交换技术和量子通信技术等)均在本刊报道过。

《光通信技术》期刊紧跟时代步伐,刊登的文章非常具有前瞻性,可读性强,影响力广,覆盖了光通信领域各个层次的读者,读者遍布几十多个国家和地区,期刊已连续 7 届入选《中文核心期刊要目总览》。

《光通信技术》期刊不仅文章内容可读性强,而且印刷质量精美,从 2004 年开始采用双色印刷,2019 年改用全彩色印刷。