

可见光网络以用户为中心的协作传输技术探讨

徐文艳,于宏毅,杨森,段田东

(战略支援部队信息工程大学,郑州 450001)

摘要:无线通信业务需求不断增长,通信频谱逐步从传统射频频段扩展到光无线领域。为提高用户体验,针对可见光通信(VLC)系统,设计以用户为中心的协作传输方式。以用户为中心概念在以小单元场景为设计理念的5G时代具有重要意义。针对全新的以用户为中心设计理念进行阐述,描述VLC网络中以用户为中心的虚拟小区特点以及形成过程,结合可见光独有的特点,介绍了多用户处理技术、信道估计和网络资源管理等关键技术。这种新的传输方式能够为用户提供网随人动的服务,提升用户的峰值速率和边缘用户性能。

关键词:可见光通信;以用户为中心;协作传输

中图分类号:TN929.12 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)08-0016-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Discussion on user-centric cooperative transmission technology in visible light network

XU Wenyan, YU Hongyi, YANG Sen, DUAN Tiandong

(Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: With the increasing demand for wireless communication services, the communication spectrum has gradually expanded from the traditional radio frequency band to the optical wireless field. In order to improve user experience, it is of great significance to design user-centered cooperative transmission mode user-centric concept for visible light communication(VLC) system in the 5G era with small cell scenarios as the design concept. This paper expounds the new user-centric design concept, describes the characteristics and formation process of user-centered virtual cell in VLC network, and introduces the key technologies such as multi-user processing technology, channel estimation and network resource management combined with the unique characteristics of visible light. This new transmission mode can provide users with human-driven network services, and improve the peak rate and edge user performance.

Key words: VLC; user-centered; cooperative transmission

0 引言

近年来,可见光通信(VLC)迅速发展,其优点包括:泛在的照明基础设施、无授权的频谱、大带宽高功率和绿色能源等^[1]。除了多重优势外,VLC系统也存在一些潜在的缺点,例如:由于光主要是视线传播,VLC

网络在非视线场景中表现很差;VLC网络在目前的技术水平上无法提供方便的上行链路覆盖;在VLC网络中,与蜂窝射频网络相比,每个光接入点(AP)仅照亮一个小的受限单元。当用户随机分布时,室内VLC网络中的每个用户在特定位置可能会接收到来自多个APs的视距信号,这些信号相互叠加,小区边缘干扰严重,会对用户的正常通信造成干扰;此外,用户在室内移动时,频繁的切换会增加移动管理开销。这些都导致用户服务质量(QoS)显著降低。

针对上述问题,CUIHUA P等人提出了以用户为中心的设计虚拟小区的理念^[2],网络允许每个用户根据其QoS要求和信道条件,以协调的方式选择几个首选的APs进行传输。由于智能手机普及使用,移动云

收稿日期:2018-11-05。

基金项目:国家自然科学基金项目(61671477)资助。

作者简介:徐文艳(1983-),女,汉族,安徽界首人,博士研究生,战略支援部队信息工程大学讲师,主要研究方向为短波通信系统、现代无线通信系统和可见光通信系统(包括信号处理、MIMO、协作通信和信道编码)等。



计算也逐步兴起,以用户为中心的设计并利用用户终端地理位置的变化以及多样化的服务需求,用户终端参与光虚拟小区规划、资源管理、移动性控制、服务提供和信号处理等工作,终端不再是简单的终点,而是作为网络中的一个元素积极参与进来。因此,以用户为中心的设计理念可能成为 5G 时代颠覆性技术之一。

1 以用户为中心的设计理念

以用户为中心的设计理念是由小区边界问题引起的,比如小区间干扰和移动时带来的频繁切换。考虑到依靠视距光传播的 VLC 单元的具体特性,且光的传播具有一定的局限性,它取决于发射机的半功率角以及接收机视场角(FOV)。因此,VLC 网络可能需要一个全新的结构解决小区边界问题。以用户为中心的 VLC 网络,APs 将跟随用户,而不是用户跟随 APs。

现有的文献中,多点协作传输(COMP)技术,也被称为网络多输入多输出(MIMO)技术,广泛应用于虚拟小区的构建^[3],多基站之间联合对用户提供服务,将小区边缘强干扰信号转换为有用信号。考虑到现实网络中回程限制和训练开销,只包含少量 APs 的虚拟小区是比较理想的^[4]。在传统的协同网络中,网络为固定位置提供网络覆盖,为了提高频谱效率,从网络的角度形成虚拟小区,是非重叠的^[5],小区配置通常是固定的,网络资源按照预先设置的算法分配给用户。而以用户为中心的网络,从每个用户的角度出发,形成虚拟小区,以确保 QoS。这不可避免地导致重叠簇。在理想情况下,不论用户的物理位置如何,小区中心和小区边缘的性能差距将消失,打破了传统意义的小区边界,更好地为用户服务,提升了通信网络性能。为了支持网络的无缝连接和用户移动性,网络自适应地为用户接入虚拟小区所关联的 APs,目的是使该虚拟小区能够跟踪用户的移动,并能提供持续的 QoS。以用户为中心的虚拟小区设计考虑用户分布,一个虚拟小区包括提供服务的 APs、用户和相关的光学链路,小区的形状通常是不规则的、无定型的。以用户为中心的小区的形成与资源配置相结合,在虚拟小区形成过程中,用户被调度,资源也同时被分配。此外,以网络为中心的网络切换机制是由用户触发的,通常是用户在移动时发送切换请求;而在以用户为中心的网络中,切换是由 AP 触发的,AP 通过跟踪用户动态更新虚拟小区组成。

针对以用户为中心的设计理念,Ping-Heng 等人^[6]

已经提出并给出了 VLC 网络虚拟小区的设计机制。以用户为中心的小区中,用户可以由多个 AP 来提供服务,网络也是通过多个 AP 联合提供服务来构造出以用户为中心的虚拟小区。以用户为中心的网络中不规则虚拟小区进行数据传输时,主要有 3 个特征:①多层小区重叠覆盖。对于重叠区域,利用协作传输将干扰信号转化为有用信号,或者利用预编码算法将干扰消除。②数据与控制分离。通过覆盖更多光 AP,实现控制平面连接,可以确保用户移动时始终能够获得重要系统信息,比如网络的关键控制信息等。因此,当用户移动的级别比较高时,该用户的虚拟小区可以由单独的控制平面和数据平面连接组成。③QoS 提升。通过光虚拟小区的构造,从用户的角度提高了服务质量 QoS,使得不同位置的用户都能获得高速率,低时延的通信服务,同时保证用户在小区内移动时具有高质量的服务体验。

以用户为中心的网络,每个用户可以选择几个 APs 组成一个虚拟小区,APs 可以通过 MIMO 技术联合传输到用户终端,也可以利用波束合成单独传输到用户终端。由于多个用户终端具有不同的 QoS 要求和信道条件,它们对 APs 选择也会不同,这不可避免导致虚拟小区之间的重叠。换句话说,每个 AP 可能属于不同的虚拟小区。小区重叠与虚拟情况如图 1 所示,AP₃ 既属于虚拟小区 1(分簇 1),又属于虚拟小区 3(分簇 3)。当虚拟小区发生变化时,更新小区调整后的结果发送给中心单元(CU),由 CU 进行下一步协调。理想情况下,为了避免造成大量的信令开销,虚拟小区具有平均信道增益,具体来说,每个用户首先进行测量,然后向 CU 进行报告,将获取的几个相邻的 APs 平均信道增益传送给 CU,CU 根据系统资源和每个用户终端的 QoS 需求来决定每个用户终端所连接的 APs。

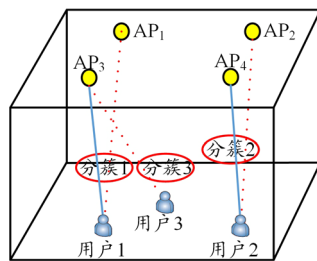


图1 以用户为中心的概念网络示例

2 以用户为中心的协作传输关键技术

2.1 多用户处理技术

受发光二极管(LED)调制带宽的限制,在实际部署 VLC 系统时,通常利用空间复用方式提供高数据速率传输。因此,MIMO 方案在室内 VLC 系统中使用非

常广泛。但是,这也带来了多用户干扰(MUI)等多种挑战。为了支持多个用户终端同时在网络中活动,需要用到多用户信号处理技术(即预编码技术)来形成虚拟小区。针对以用户为中心的协作方式,同一个灯 AP 可以加入到多个虚拟小区,在协作过程中信息交换会大量增加,同时小区与小区之间没有明显的边界,增加了协作方式的复杂度。此外,预编码技术在传统的无线电(RF)中得到大量研究,然而,VLC 信号与 RF 信号有本质区别,RF 信号是有复值的,而在 VLC 中,调制方式是强度调制/直接检测(IM/DD)。LED 是通过强度来调制的,瞬时辐射光功率由信号幅值决定,所以调制信号是正的和实值的,从而导致输入信号的幅值有限,与平均功率约束不同,获取 VLC 信道容量相对繁杂,同时从用眼安全考虑,信号也受到平均光功率的限制。因此,IM/DD 信道通常被建模为加性高斯白噪声信道,经典的香农公式在 VLC 系统中已经不适应。但是,针对输入信号幅度的约束,目前还没有关于信道容量的精确封闭表达式,只能用几个容量边界接近信道容量,在使用预编码等相关信号处理技术时需要研究受幅值约束的高斯信道容量边界。

与单输入单输出(SISO)系统相比,MIMO 系统能够提供更高的数据速率。先进的 MIMO 传输技术在光学领域的研究已受到重视^[7,8],目前主要研究了配备多激光器和光电检测器(PD)的自由空间光学 MIMO 系统,而基于 VLC 系统的 MIMO 系统也得到了研究。在文献[7]中,T.Q.Wang 等人设计和分析了一种利用半球面透镜成像接收器的 MIMO 系统,用来提高空间多样性顺序,利用半球形透镜实现了宽 FOV,从而使得接收到的光信号有效分离。因此,信道矩阵各元素之间的相关性相对较低,这为 MIMO 系统中信号的有效解码提供了有利的分集增益。此外,文献[8]展示了一种基于多输入多输出-正交频分复用(MIMO-OFDM)的成像接收器,传输速率达到了 220 Mb/s,通过优化每个子载波的预均衡权,提高可实现的系统性能。对于 MU-VLC 系统预编码设计主要集中在均方误差(MSE)或者迫零(ZF)准则下的线性预编码,对于以用户为中心的协作方式如何预编码并没有展开研究。比如,文献[9-11]研究了 MU-MIMO 模型,特别是对于接收机中包含多个 PD 的模型。T.V.Pham 等人^[9]研究了 MUI-MIMO VLC 系统中的分组对角化(BD)预编码技术,考虑到了非负限号约束条件。B.N.Bharath 等人^[10]研究了对于单 PD 接收机或者多用户多输入单输出(MU-MISO)配置的模型,设计了基于 MSE 准则的预编码矩

阵。然而以上研究有局限性,没有考虑信道容量的总和速率,简单地定义为能达到最小误码率的输入与输出之间的互信息量的最大值。T.Cogalan 等人^[11]给出了基于和速率的优化问题,特别指出了给定最小误码率阈值的多级脉冲幅度调制(PAM)的 IM/DD 信道可达到的数据速率,由于可实现的数据速率表达式依赖于振幅信号与噪声标准差之比,因此问题形成凸优化得以解决。

2.2 信道估计

APs 协作传输性能很大程度受信道质量影响,对多个 APs 进行联合预编码时,需要获取虚拟小区中所有用户的瞬时信道状态信息(CSI),获取 CSI 的过程就是信道估计。而 VLC 中的信道模型,信道脉冲响应(CIR)与 RF 不同,显著区别是 VLC 中的 CIR 不受多普勒效应的影响,而且 VLC 通道模型中存在大量的反射波,反射波还具有相当的功率。这给 VLC 信道估计带来困难,传统的利用导频信号估计方法会导致效率下降。

训练资源分配直接影响信道估计的结果,主要由于正交导频序列的长度受限于信道相干时间的长度,在 VLC 通信系统中信道估计中的关键是合理分配导频序列,避免导频污染,导频污染主要是由期望信道和干扰信道的相互叠加而导致信道估计的准确率不高。为了优化协同网络中便于下行预编码的信道估计,从同一簇的 APs 发送的训练信号或从选择相同 AP 的用户发送的训练信号应该是相互正交的。对于非重叠的虚拟小区,只需为每个虚拟分配一组正交的训练资源,并在虚拟小区之间重用资源即可实现。然而,在以用户为中心的网络中,虚拟小区是重叠的。为了满足所有虚拟小区的需求,可以为每个 AP 或每个用户终端分配一个正交的训练资源,但是总体训练开销随 APs 或用户终端总数的增加而线性增加,这会抵消合作收益,导致净吞吐量降低;也可以通过合理设计 APs 或用户之间的训练资源重用方案,减少开销。

训练资源重用问题在传统的射频系统相关文献中得到了广泛的研究。针对 SISO 用户系统,文献[12]主要研究了训练序列的设计、训练持续时间和功率分配等,并给出了相应的解决办法。但是对于近年来出现的 VLC 系统并没有展开研究。如果通过分配正交训练资源,可以避免信道估计中多种干扰,那么这些技术都可以借鉴应用于 VLC 通信系统以用户为中心的网络。然而,面对具有重叠合作簇的多单元网络,针对 VLC 信道独有的特点,如何在不造成大量训练的情况

下分配正交训练资源,其开销仍然是未知的,这对于提高 VLC 系统以用户为中心的网络频谱效率非常重要。

2.3 网络资源管理

当 VLC 系统中存在多个用户终端时,公平高效的多用户调度和资源管理是一个突出问题。在射频系统中,这个问题已经经过大量研究,但是在以 VLC 为基础的网络中,多用户 VLC 系统中有关协作通信传输的调度和资源分配研究不多。

目前已发表的参考资料大都围绕着如何提高 VLC 网络的系统吞吐量,而且相关研究是以网络为中心的背景下进行的。在 IEEE 802.15.7^[12] 无线个人局域网(WPAN)中,有色可见光信道被分配以协调干扰和减小衰落概率。Shen 等人^[13]提出了一个根据信道选择来调度和分配资源的方案,以增加 IEEE 802.15.7 WPAN 系统吞吐量。Burchardt 等人^[14]研究了 RGB-LED 蜂窝结构被用于避免干扰、提高系统灵活性的问题。Kim 等人^[15]研究了 VLC 设置中更高的层协议设计和配置问题,并提出一个调度 LED 至客户端传输可调波束宽度和波束角度的框架。Yamazato 等人^[16]利用发射机对副载波进行分配,减少子载波之间的干扰,改善使用离散多音调制(DMT)的多用户 VLC 系统的吞吐量。Wang 等人^[17]精心设计了一个逻辑框架,旨在 VLC 系统中实现本地化、访问、调度和传输,它能够以一种适度的复杂性实现大量的吞吐量。然而,与大多数研究基于 VLC 系统的资源分配的文献相似,大都在努力提高可实现的吞吐量,而不考虑问题所带来的公平性。考虑到公平性,Bykhovshy 等人^[18]提出了一种增量调度方案,在全局调度阶段负责将资源分配给用户,而本地调度阶段则通过反向跟踪用户终端设备的移动来定期调整资源分配。此外,Babatundi 等人^[19]提出了一种基于比例公平性的调度算法。对于有中心控制的 VLC 系统,在平衡可实现的吞吐量和解决问题所带来的公平性方面,它优于最高的调度策略。

以用户为中心的 VLC 研究处在初始阶段,特别是对于多发多收场景。以用户为中心的设计应用在 VLC 中能提升系统吞吐量方面已经得到证明。Xuan 等人^[20]提出了以用户为中心的小区协作技术,但是其并未考虑用户业务类型,系统带宽使用并不充分,而且使用联合传输和向量传输这 2 种技术,虽然向量传输具有高带宽使用率的特点,但是由于依赖先进的信号处理技术,并且需要在 APs 间共享 CSI 信息,系统负载太

重。Xuan 等人^[21]进一步研究了以用户为中心的动态簇的形成,设计了可扩展视频流,在室内 VLC 系统中实现了节能的目的。Rong 等人^[22]研究了一种基于位置和延迟感知的用户关联设计,在室内 VLC 中,通过采取预期估计的方法降低了系统范围内的平均延迟。考虑到现实中用户定位跟踪方法和多样化的移动模型,混合式用户分布将会得到更进一步的研究。Rui 等人^[23]提出了无定型 VLC 网络中的联合用户和功率分配解决方案,解决了负载均衡和功率控制问题。Simeng 等人^[24]利用启发式动态规划算法研究调制模式分配、功率分配策略,所提出的以用户为中心的系统吞吐量和中断概率均优于传统的以网络为中心的系统。

此外,与射频通信相比,VLC 具有一些独特的特点需要考虑,比如阻塞是 VLC 最显著的物理特性之一。Kim 等人^[25]为 VLC 下行信道提出了 3 种基于资源分配的服务模式,以保持高系统吞吐量和满足照明需求。VLC 强度调制信号的非负性是另一重要特性,Park 等人^[26]为了最大化系统的光谱效率,设计了一种光学 MIMO 系统,并提出了一种光功率分配方案。为了提高可实现的吞吐量,文献[27]在 VLC 下行信道中引入了非正交多址概念,提出了一种基于用户信道条件的新型功率分配策略。Jiang 等人^[28]考虑 LED 灯の色度、亮度、信号振幅以及目标误码率的约束,对和速率最大化问题进行求解,为了最大限度地提高基于多芯片 LED 的 MU-MISO VLC 系统的和速率,提出了一种基于上述 4 种约束的光功率分配和评估方案。

3 结束语

本文介绍了 VLC 系统中以用户为中心的设计理念,它允许网络通过多点协作传输的方式为用户定制一个“网随人动”的虚拟小区,可以大幅提高用户体验。对于这种以用户为中心的网络,由于来自不同虚拟小区的多个用户需求冲突,且 VLC 比 RF 有独有的特性,在多用户信号处理、信道估计和资源分配等方面会遇到很多挑战。作为新一代绿色通信最具潜力的研究方向之一,以用户为中心的网络协作传输技术已经引起国内外广泛关注,并有相关初步研究成果。但是考虑到 VLC 系统中的实际情况,仍然存在着具有挑战性的关键技术,有待深入、系统研究。在 VLC 现实条件的约束下,探索多种因素与系统容量之间的关系,拓展非理想信道状态下高效传输理论方法的研究。在这种以用户为中心的新型设计理念下,有效设计 VLC

系统中复杂度低的预编码优化矩阵、合理分配训练资源、降低下行信道训练开销,进而设计协作传输时的动态资源分配方案,极具理论研究意义和实际应用价值。

参考文献:

- [1] HANZO L, HASS 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(5): 1853–1888.
- [2] CUIHUA P, MAGED E, JIANGZHOU W, et al. User-Centric C-RAN Architecture for Ultra-Dense 5G Networks: Challenges and Methodologies [J]. IEEE Communication Magazine, 2018, 12(6): 14–20.
- [3] CHEN S. User-Centric Ultra-Dense Networks for 5G: Challenges, Methodologies, and Directions [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 50(17): 78–85.
- [4] HUANG H, TRIVELLATO M. Increasing downlink cellular throughput with limited network MIMO coordination [J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2009, 8(6): 2983–2989.
- [5] KATRANARAS E, ALI M, DIANATI M, et al. Green Inter-Cluster Interference Management in Uplink of Multi-Cell Processing Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13 (12): 6580–6592.
- [6] PING HENG K, ALAIN M. User-Centric Multi-RATs Coordination for 5G Heterogeneous Ultra-Dense Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 11(6): 672–670.
- [7] WANG T Q, SEKERCIOGLU Y A and ARMSTONG J. Analysis of an optical wireless receiver using a hemispherical lens with application in MIMO visible light communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(11): 1744–1754.
- [8] AZHAR A H, TRAN T A and BRIEN A. Demonstration of high-speed data transmission using MIMO-OFDM visible light communications [C] //IEEE Globecom Workshops, December 6–10, 2010, Miami, USA. Miami: IEEE, 2010.
- [9] PHAM T V, MINH H L, GRASSEMLOOY Z, et al. Sum-rate maximization of multi-user MIMO visible light communications[C]//IEEE International Conference Communication Workshop (ICCW), May 23–27, Kuala Lumpur, Malaysia. Kuala Lumpur: IEEE, 2016.
- [10] BHARATH B N and MURTHY C R. Channel training signal design for reciprocal multiple antenna systems with beamforming [J]. IEEE Transactions Veh. Technology, 2013, 62(1): 140–151.
- [11] COGALAN T, HAAS H, PANAYIR C I. Precoded single-cell multi-user MISO visible light communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 36(23): 1–6.
- [12] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.7 Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light: 802.15.7–2011[S]. New York: IEEE, 2011.
- [13] SHEN H, DENG Y, XU W, et al. Rate-maximized zero-forcing beamforming for VLC multiuser MISO downlinks [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–13.
- [14] BURCHARDT H, SERAFIMOVSKI N, TSONEV D, et al. VLC: Beyond point-to-point communication [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 98–105.
- [15] KIM Y H, CAHYADI, CHUNG Y H. Experimental demonstration of VLC-based vehicle-to-vehicle communications under fog conditions [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1–9.
- [16] YAMAZATO T, TAKAI I, OKADA H, et al. Image-sensorbased visible light communication for automotive applications[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 88–97.
- [17] WANG T Q, SEKERCIOGLU Y A, ARMSTRONG G. Analysis of an optical wireless receiver using a hemispherical lens with application in MIMO visible light communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(11): 1744–1754.
- [18] BYKHOVSK Y, ARNON S. Multiple access resource allocation in visible light communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 32(8): 1594–1600.
- [19] BABATUNDI O, QIAN L, CHENG J. Downlink scheduling in visible light communications[C]//International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Oct 23–25, Hefei, China. Hefei: IEEE, 2014.
- [20] LI X, JIN F, RONG Z. Users First: User-Centric Cluster Formation for Interference-Mitigation in Visible-Light Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 670–682.
- [21] LI Xuan, HUO Y, RONG Z, et al. User-centric visible light communications for energy-efficient scalable video streaming[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2017, 1(1): 59–73.
- [22] RONG Z, YING C, HOLGER C, et al. Anticipatory Association for Indoor Visible Light Communications: Light, Follow Me [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 8(5): 212–224.
- [23] RUI J, QI W, HARALD H, et al. Joint User Association and Power Allocation for Cell-Free Visible Light Communication Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(1): 136–148.
- [24] SIMIENG F, RONG Z, XUAN L, et al. Dynamic Throughput Maximization for the User-Centric Visible Light Downlink in the Face of Practical Considerations [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 25(2): 1536–1551.
- [25] KIM W C, BAE C S, JEON S Y, et al. Efficient resource allocation for rapid link recovery and visibility in visible-light local area networks [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(2): 524–531.
- [26] PARK K H, KP Y C, ALOUINI M S. On the power and offset allocation for rate adaptation of spatial multiplexing in optical wireless MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1535–1543.
- [27] MARSHOUD H, KAPINAS V M, KARAGIANNIDIS G K, et al. Non-orthogonal multiple access for visible light communications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 51–54.
- [28] JIANG R, WANG Z, DAI L. Multi-user sum-rate optimization for visible light communications with lighting constraints[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(16): 3943–3952.