

引用本文: 刘春, 徐伟强. VLC/RF 异构网络融合小区缩放的功率控制与用户关联联合优化[J]. 光通信技术, 2025, 49(1): 12–16.

VLC/RF 异构网络融合小区缩放的功率控制与用户关联联合优化

刘 春, 徐伟强 *

(浙江理工大学 信息科学与工程学院, 杭州 310018)

摘要: 射频(RF)无线通信系统面临频谱短缺和接入拥塞问题, 而可见光通信(VLC)与 RF 融合可互补实现高数据速率和广覆盖优势。针对室内混合 VLC/RF 异构网络场景, 提出了融合小区缩放的功率控制与用户关联联合优化方案, 旨在功率和用户服务质量(QoS)约束条件下最大化系统总传输速率。通过将该问题建模为一个多变量耦合的混合整数非线性规划(MINLP)优化问题, 并采用了优化求解器 BARON 进行有效求解。仿真结果表明, 融合小区缩放的 VLC/RF 异构网络能够实现更优的功率分配和用户关联, 提高了系统总传输速率。

关键词: 可见光通信; 异构网络; 小区缩放; 功率控制; 用户关联

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)06-0012-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Joint optimization of power control and user association for cell scaling in VLC/RF heterogeneous network integration

LIU Chun, XU Weiqiang*

(School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Radio frequency(RF) wireless communication systems face issues of spectrum scarcity and access congestion. Integrating visible light communication (VLC) with RF can complementarily achieve advantages of high data rates and broad coverage. For indoor hybrid VLC/RF heterogeneous network scenarios, a joint optimization method that combines cell scaling power control and user association has been proposed to maximize the total system transmission rate under power and quality of service (QoS) constraints for users. By modeling this problem as a multi-variable coupled mixed-integer nonlinear programming (MINLP) optimization problem, it is effectively solved using the BARON optimization solver. The simulation results show that the integrated cell scaling in VLC/RF heterogeneous networks can achieve superior power allocation and user association, thereby enhancing the overall system transmission rate.

Key words: visible light communication, heterogeneous network, cell zooming, power control, user association

0 引言

随着第六代(6G)移动通信技术的发展, 光通信作为一种新兴技术, 为解决射频(RF)通信的拥堵问题提

收稿日期: 2024-01-23。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A2004)资助; 浙江省重点研发计划基金项目(2022C01079)资助; 绍兴市科技计划项目(2022B41011)资助。

作者简介: 刘春(1997—), 女, 硕士研究生, 现就读于浙江理工大学信息科学与工程学院信息与通信工程专业, 主要研究方向是无线网络、网络优化、可见光通信等, 参与了国家自然科学基金项目、浙江省重点研发计划基金项目。

* **通信作者:** 徐伟强(1975—), 男, 博士后, 主要研究方向是物联网、工业互联网、智能制造。



供了新途径, 并已被纳入最新的 802.11bb 协议^[1]。在光通信领域, 可见光通信(VLC)因其高达 400 THz 的可用带宽而备受瞩目, 相较于传统 RF 通信的 300 MHz 带宽, VLC 能实现高达 46.4 Gb/s 的峰值速率^[2]。VLC 利用发光二极管(LED)作为高效光源, 不仅提供高速数据传输, 还具有高的成本效益, 因此在支持超越 5G (B5G)时代的室内通信应用方面展现出巨大潜力。

然而, VLC 的传播具有高度指向性, 其性能严重依赖于视线(LoS)通道。在室内环境中, VLC 系统易受墙壁、天花板、地板、家具及人体等障碍物的影响, 导致覆盖范围受限, 进而可能降低用户服务质量(QoS)^[3]。相比之下, RF 系统尽管频谱资源有限, 但在非 LoS 传输

条件下仍能保持广泛覆盖,具有较强的适应能力和抗干扰性。因此,将 VLC 与 RF 技术相结合,成为提升传输可靠性和实现高速数据传输的有效途径。

为解决这一问题,小区缩放技术应运而生。该技术根据用户位置和数据速率需求,动态调整接入点(AP)的激活状态及功率分配,以控制覆盖范围^[4]。在 RF 网络中,小区缩放技术已通过 AP 智能切换和自适应覆盖调整实现高效传输策略^[5]。此外,引入小区休眠方案可动态调整 AP 休眠概率,降低负载较轻 AP 的能耗,减少干扰^[6]。该技术还能缓解移动设备间的资源竞争,特别适用于物联网(IoT)场景^[7]。文献[8]提出了一种基于遗传算法的小区缩放方法,用于提升 VLC/RF 混合蜂窝网络的能效,但未充分考虑用户关联及 QoS 对传输性能的影响。在恒定光照下,小区缩放技术能有效优化 VLC 系统的数据流量调度,减轻小区边缘用户的切换问题^[9]。

对于 VLC/RF 异构网络,由于存在 VLC 和 RF 这 2 种类型的 AP,功率控制和用户关联成为关键问题,直接影响系统传输速率。为此,本文提出一种 VLC/RF 异构网络融合小区缩放的功率控制与用户关联联合优化方案(下文简称融合小区缩放的 VLC/RF 方案)。

1 系统模型

室内 VLC/RF 异构网络系统模型如图 1 所示。该系统中,房间天花板上安装了 m 个 LED 作为 VLC AP,它们既满足室内的照明需求,也提供通信服务;同时,系统还集成了 n 个 RF AP 来支持混合系统的通信需求。定义 $\mathcal{M}=\{1,2,\dots,M\}$ 和 $\mathcal{N}=\{1,2,\dots,N\}$ 分别表示 VLC AP 的集合和 RF AP 的集合。该混合系统支持多个用户同步提供网络服务, K 个用户随机地分布在地板上,每个用户都配备一个光电探测器(PD)和一个 RF 天线,分别接收 VLC 和 RF 信号,用户的集合用 $\mathcal{K}=\{1,2,\dots,K\}$ 表示。所有 AP 都连接到一个中央控制器,负责收集用户反馈、调度、关联和资源分配。

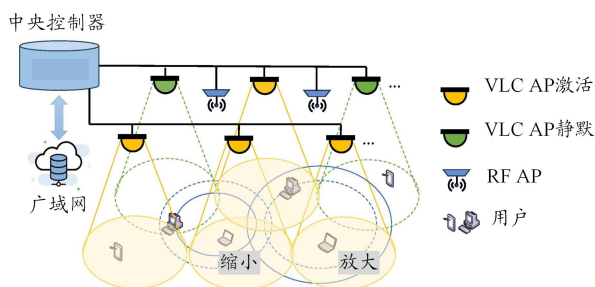


图 1 室内 VLC/RF 异构网络的系统模型

在 VLC 系统中,根据用户分布和数据速率的需求,决定哪些 VLC AP 处于活动状态(激活),哪些处于非活动状态(静默),即实现小区的缩放功能。设二进制 $x_m \in \{0,1\}$,VLC AP 的开关选择变量为 $m \in \mathcal{M}$, $x_m=1$ 意味着 VLC AP m 处于激活状态,需要确保至少有一个 VLC AP 处于激活状态,则有 $\sum_{m \in \mathcal{M}} x_m \geq 1$ 。此外,静默 AP 的 LED 不会熄灭,仍然用于照明。对于 RF AP _{n} ,将通过控制到用户 k 的发射功率 $P_{n,k}^{\text{RF}}$ 来改变小区缩放的覆盖范围。设二进制 VLC AP 的用户关联决策变量 $\alpha_{n,k} \in \{0,1\}$ 、RF AP 的用户关联决策变量 $\beta_{m,k} \in \{0,1\}$, $n \in \mathcal{N}$ 、 $m \in \mathcal{M}$ 、 $k \in \mathcal{K}$ 。其中, $\alpha_{n,k}=1$ 意味着用户 k 与 RF AP _{n} 连接,否则 $\alpha_{n,k}=0$ 。同样地, $\beta_{m,k}=1$ 意味着用户 k 与 VLC AP _{m} 连接,否则 $\beta_{m,k}=0$ 。在用户不具备多归属能力的基础上,需要确保任何用户 k 都关联到单个 AP,则有以下约束条件:

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} \alpha_{n,k} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \beta_{m,k} = 1 \quad (1)$$

1.1 RF 信道模型

针对 RF AP 的部署,本文采用了基于小区缩放原理的设计,使得各个 AP 能够根据实际需求调整自身的覆盖范围,从而避免了覆盖区域的大面积重叠。同时,通过应用频分复用(FDM)技术,确保了不同 AP 之间的信号传输互不干扰。此外,通过实施基于小区缩放的功率控制策略,进一步有效地减少了小区间的相互干扰,提升了整体网络性能。因此,第 k 个用户在 RF AP _{n} 处的下行接收信噪比(SNR)为

$$r_{n,k}^{\text{RF}} = \frac{P_{n,k}^{\text{RF}} g_{n,k}}{N_0 B^{\text{RF}}} \quad (2)$$

其中, $P_{n,k}^{\text{RF}}$ 为 RF AP _{n} 到用户 k 的传输功率, $g_{n,k}$ 是 RF AP _{n} 与用户 k 之间的信道增益, N_0^{RF} 为 RF 的噪声功率谱密度, B^{RF} 为 RF AP _{n} 的传输带宽。

根据 Shannon 公式,可以得到 RF AP _{n} 和用户设备 k 的下行信息传输速率为

$$R_{n,k}^{\text{RF}} = \alpha_{n,k} B^{\text{RF}} \log_2(1 + r_{n,k}^{\text{RF}}) \quad (3)$$

由于 VLC 系统的发射机端不可能提供无限大的传输功率,假设 $P_{\max}^{\text{RF}}$ 是 RF AP 的最大传输功率,则传输功率应满足如下约束条件:

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \alpha_{n,k} P_{n,k}^{\text{RF}} \leq P_{\max}^{\text{RF}} \quad (4)$$

刘春, 徐伟强: VLC/RF 异构网络融合小区缩放的功率控制与用户关联联合优化

1.2 VLC 信道模型

针对 VLC AP 的部署, 假设其覆盖范围固定不变, 并且在规划时可以忽略不同 AP 之间的微小重叠区域, 则用户 k 与 VLC AP _{m} 之间的接收 SNR^[10] 表示为

$$r_{m,k}^{\text{VLC}} = \frac{\mu^2 P_{m,k}^{\text{VLC}} |h_{m,k}|^2}{N_0^{\text{VLC}} B^{\text{VLC}}} \quad (5)$$

其中, μ 是 PD 的响应度, $P_{m,k}^{\text{VLC}}$ 为 VLC AP _{m} 到用户 k 的传输功率, $h_{m,k}$ 为 VLC AP _{m} 与用户 k 之间的信道增益, N_0^{VLC} 为 VLC 的噪声功率谱密度, B^{VLC} 为 VLC AP _{m} 的传输带宽。

因此, 每个 VLC AP 与用户 k 的信息传输速率为

$$R_{m,k}^{\text{VLC}} = x_m \beta_{m,k} B^{\text{VLC}} \log_2(1 + r_{m,k}^{\text{VLC}}) \quad (6)$$

同理, 假设 $P_{\max}^{\text{VLC}}$ 是 VLC AP 的最大发射功率, 则传输功率应满足以下约束条件:

$$\sum_{k \in K} x_m \beta_{m,k} P_{m,k}^{\text{VLC}} \leq P_{\max}^{\text{VLC}} \quad (7)$$

2 优化问题

本文提出的方案旨在通过考虑所有用户的地理位置和数据速率需求, 在满足功率消耗和 QoS 约束的前提下, 最大化系统总传输速率。为此, 本文首先将此问题建模为一个多变量耦合的混合整数非线性规划 (MINLP) 优化问题, 以找到最优的功率分配方案和用户关联策略。整个系统的传输速率可表示为

$$R = \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} R_{n,k}^{\text{RF}} + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} R_{m,k}^{\text{VLC}} \quad (8)$$

本文联合优化功率控制与用户关联, 在功率和 QoS 约束下最大化系统总传输速率。该问题可以公式化地表示为

$$\max_z R \quad (9a)$$

$$\text{s.t. } C_1: \sum_{n \in N} \alpha_{n,k} + \sum_{m \in M} \beta_{m,k} = 1 \quad (9b)$$

$$C_2: \sum_{m \in M} x_m \geq 1 \quad (9c)$$

$$C_3: \sum_{k \in K} \alpha_{n,k} P_{n,k}^{\text{RF}} \leq P_{\max}^{\text{RF}} \quad (9d)$$

$$C_4: \sum_{k \in K} x_m \beta_{m,k} P_{m,k}^{\text{VLC}} \leq P_{\max}^{\text{VLC}} \quad (9e)$$

$$C_5: P_{n,k}^{\text{RF}} \geq 0 \quad (9f)$$

$$C_6: 0 \leq P_{m,k}^{\text{VLC}} \leq P_c \quad (9g)$$

$$C_7: R \geq Q_{\text{all}} \quad (9h)$$

$$C_8: \alpha_{n,k} \in \{0, 1\}, \beta_{m,k} \in \{0, 1\}, x_m \in \{0, 1\} \quad (9i)$$

其中, $z \in \{\alpha_{n,k}, \beta_{m,k}, x_m, P_{n,k}^{\text{RF}}, P_{m,k}^{\text{VLC}}\}$ 。

C_1 确保每个用户都只能由一个 AP 提供服务; C_2 确保至少有一个 VLC AP 处于激活状态; C_3 、 C_4 分别表示每个 AP 的总功率约束; C_5 、 C_6 中的约束条件分别保证 VLC 和 RF 的功率非负要求, 且 VLC 功率不能超过最大光功率限制 P_c , 以免伤害人眼; C_7 中的约束表示用户 QoS 要求, 即来自 VLC 和 RF 链路的所有用户设备的总可实现速率不应低于数据速率要求 Q_{all} ; C_8 表示离散二进制变量。

鉴于本文所提出的优化问题融合了离散二进制变量、连续变量, 并且包含了变量间的耦合约束条件, 故采用 BARON 求解器显得尤为合适^[11]。这一选择不仅紧密契合问题的特点, 还充分利用了 BARON 求解器在全局优化方面的显著优势, 从而大幅提高了获得高质量解决方案的可能性。

3 仿真结果与分析

本文的研究环境是一个尺寸为 10 m×10 m×3 m 的房间, 其中天花板中央安装了用于照明和数据传输的 LED VLC AP。此外, 天花板上还配置了 6 个 VLC APs 和 2 个 RF APs, 所有设备的具体坐标如表 1 所示。房间坐标系设定为 (X, Y, Z), 其原点 (0, 0, 0) 被定位在房间的一个角落。在这个坐标系中, 任意 2 个相邻 AP 之间的最小距离为 2 m。用户设备的位置是随机分布。为了模拟真实的使用场景, 用户的接收器被设置在距地面 0.25 m 的接收平面上。在仿真实验中, 本文参考了文献[12–13]中的相关参数, 并选取了部分关键参数, 其取值如表 2 所示。

表 1 VLC APs 和 RF APs 位置

APs	坐标(单位:m)
VLC AP ₁	(3, 2, 3)
VLC AP ₂	(3, 6, 3)
VLC AP ₃	(3, 10, 3)
VLC AP ₄	(5, 1, 3)
VLC AP ₅	(5, 3, 3)
VLC AP ₆	(5, 5, 3)
RF AP ₁	(3, 4, 3)
RF AP ₂	(3, 8, 3)

当用户数量为 10 时, 本文比较了所提出的融合小区缩放的 VLC/RF 方案、VLC/RF 方案和 VLC 链路方案的传输速率与用户接收视场角 (FOV) 之间的关系, 如图 2 所示。可以看出, 随着 FOV 的增大, 3 种方案都呈现传输速率先增加后减小的趋势。这是由于用户

表 2 主要仿真参数设定

参数	取值
VLC 带宽/MHz	20
RF 带宽/MHz	10
FOV/(°)	50
PD 探测器面积/cm ²	1.0
光滤波片增益	1
光折射指数	1.5
PD 探测器响应度/(A·W ⁻¹)	0.52
VLC 噪声功率密度/(W·Hz ⁻¹)	1.0×10 ⁻²¹
RF 噪声功率密度/(W·Hz ⁻¹)	7.6×10 ⁻²¹
RF 载频/GHz	2.4
最大光功率限制 P _W /W	3.25
数据速率要求 Q _{all} /(Gb/s)	2.5

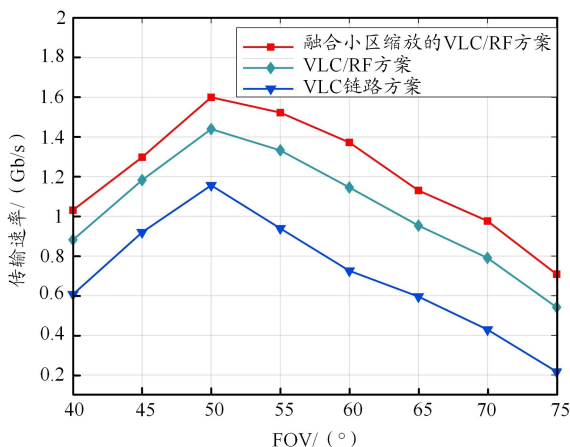


图 2 3 种方案的传输速率与 FOV 的关系

FOV 越小,特定方向上的接收信号难度便会越大,LoS 信道质量也可能下降至无法有效通信。于是,随着 FOV 的增大,覆盖概率和传输速率就随之提升。但当 FOV 超过一定阈值后,信道质量恶化,导致传输速率下降。尽管如此,无论 FOV 如何变化,本文提出的方案均优于其它方案。

当单独优化每个参数而忽略其它参数时,融合小区缩放的 VLC/RF 方案的性能情况如图 3 所示。可以看出,优化用户关联对传输速率有着显著的影响。这是因为通过正确选择 AP 为每个用户服务,不仅能有效覆盖信号受阻或处于边缘的用户,还能最大化网络的整体传输速率。

在用户数量为 10 的情况下,3 种方案的传输速率与总功率阈值之间的关系如图 4 所示。可以看出,随着总功率阈值的增加,融合小区缩放的 VLC/RF 方案和 RF 链路方案的传输速率均呈现出单调递增的趋

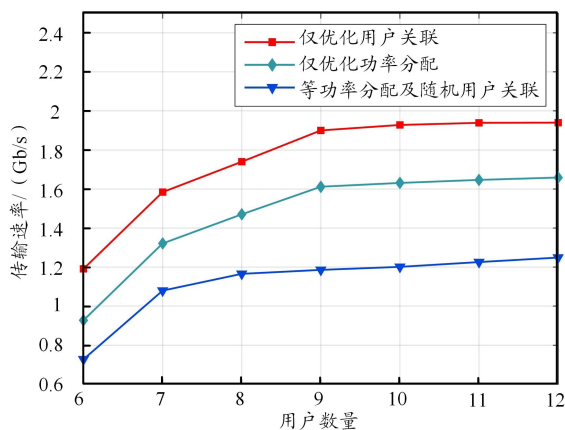


图 3 不同优化对本文方案的传输速率的影响

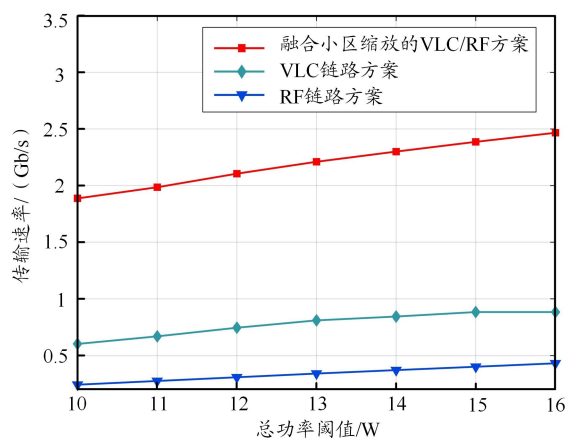


图 4 3 种方案的传输速率与总功率阈值的关系

势;而 VLC 链路方案的传输速率最初随着总功率阈值的增加而上升,在达到一特定功率后趋于平稳,不再增长。这一现象的原因在于 VLC 链路的传输能力最终受限于光功率约束。一旦达到最大允许的光功率水平,即使继续提升总功率阈值,VLC 链路的传输速率也不会有显著增加。此外,融合小区缩放技术的异构网络能够有效地提高通信系统的传输速率。这是因为小区缩放技术通过优化资源分配和降低用户间干扰,改善了网络性能,从而在既定的功率预算内实现了更高的数据传输速率。

当用户数量设定为 10 时,RF 链路方案和 VLC 链路方案的发射功率随总功率阈值变化的趋势如图 5 所示。可以看出,当总功率阈值增加时,RF 链路方案的发射功率也随之增大;然而,VLC 链路方案的发射功率最初随着总功率阈值的增加而上升,在达到一特定功率后便保持恒定。这是由于 VLC 链路的发射功率受限于最大光传输功率,而 RF 链路的发射功率则受到总功率阈值的约束。一旦最大光发射功率达到了较高的水平,无论是 VLC 链路方案还是 RF 链路方案的发

刘春, 徐伟强: VLC/RF 异构网络融合小区缩放的功率控制与用户关联联合优化

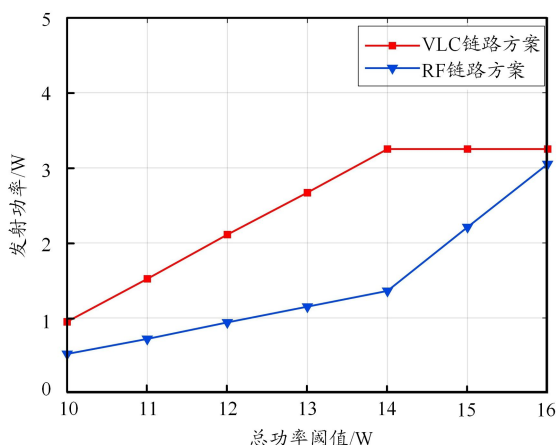


图5 不同链路的发射功率与总功率阈值的关系

射功率,都将受到总功率阈值的限制。

本文将提出的方案与现有的 VLC/RF 方案、VLC 链路方案和 RF 链路方案进行了比较。为了确保公平性,所有方案中的 VLC 和 RF AP 均部署在同一位置,即与本文提出方案中的 AP 位置保持一致。在不同用户数量条件下,各方案传输速率的对比情况如图 6 所示。可以看出,本文提出的融合小区缩放的 VLC/RF 方案表现最好。这突显了 VLC/RF 异构网络与小区缩放组合的显著优势,它能提供更优的功率分配和用户关联,并且能够在存在多用户的情况下降低干扰,从而提高传输速率。

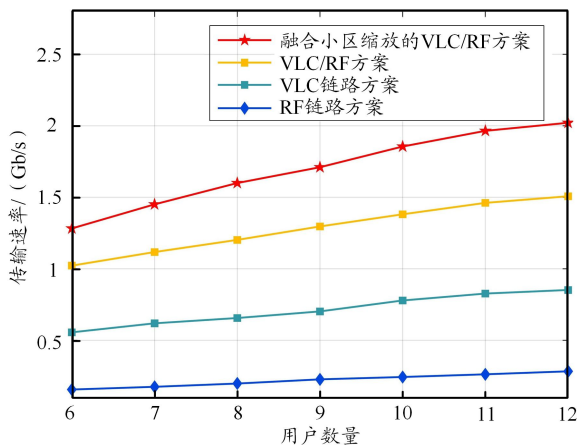


图6 不同方案下传输速率与用户数量之间的关系

4 结束语

本文提出了一种融合小区缩放技术的功率控制与用户关联联合优化方法,旨在满足功率限制和用户 QoS 约束的同时,最大化系统总传输速率,并将这一复杂问题建模为一个多变量耦合的 MINLP 问题。小区缩放策略在低数据速率场景中通过关闭多余的 VLC AP

来节约能量;而在高数据速率需求时,则调整 RF AP 的覆盖范围以降低能耗。此方法巧妙地结合了 2 种不同类型的通信技术,实现了能效与性能之间的平衡。仿真结果表明:相较于现有方案,本文提出的 VLC/RF 异构网络环境下的融合小区缩放功率控制与用户关联联合优化方案,在功率分配和用户连接方面展现出更佳性能,能够显著提升系统的总体传输速率,为改善系统性能提供了新的思路。

参考文献:

- [1] AMJAD M S, TEBRUEGGE C, MEMEDI A, et al. Towards an IEEE 802.11 compliant system for outdoor vehicular visible light communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 5749–5761.
- [2] HU J H, HU F C, JIA J L, et al. 46.4 Gbit/s visible light communication system utilizing a compact tricolor laser transmitter [J]. Optics Express, 2022, 30(3): 4365–4373.
- [3] FENG L, YANG H, HU R Q, et al. MmWave and VLC-based indoor channel models in 5G wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(5): 70–77.
- [4] NIU Z, WU Y, GONG J, et al. Cell zooming for cost-efficient green cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(11): 74–79.
- [5] LUO S, ZHANG R, LIM T J. Optimal power and range adaptation for green broadcasting [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4592–4603.
- [6] XU X, YUAN C, CHEN W, et al. Adaptive cell zooming and sleeping for green heterogeneous ultradense networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 67(2): 1612–1621.
- [7] JIANG H, XIAO Z, LI Z, et al. An energy-efficient framework for internet of things underlaying heterogeneous small cell networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 21(1): 31–43.
- [8] WANG F, YANG F, SONG J, et al. Cell zooming for hybrid VLC-RF cellular networks with high energy efficiency[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(5): 789–793.
- [9] RAHAIM M, LITTLE T D C. SINR analysis and cell zooming with constant illumination for indoor VLC networks[C]. 2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications(IWOW). IEEE, 2013: 20–24.
- [10] YANG H, XIE X, KADOCH M. Intelligent resource management based on reinforcement learning for ultra-reliable and low-latency IoV communication networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4157–4169.
- [11] SAHINIDIS N V. BARON: a general purpose global optimization software package[J]. Journal of Global Optimization, 1996, 8: 201–205.
- [12] 丁举鹏, 易芝玲, 赵楷, 等. 异构可见光及 RF 混合链路软切换表现分析[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 94–98.
- [13] GUO Y, XIONG K, LU Y, et al. Achievable information rate in hybrid VLC-RF networks with lighting energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(10): 6852–6864.