

液晶智能超表面辅助的室内可见光通信系统优化设计

余礼苏^{1,2)}, 吕欣欣¹⁾, 钟 润¹⁾, 张鸣莉¹⁾, 王正海¹⁾, 王玉峰¹⁾

1) 南昌大学信息工程学院, 南昌 330031 2) 南昌大学先进信号处理与智能通信江西省重点实验室, 南昌 330031

通信作者, 王正海, E-mail: wangzhenghai@126.com; 王玉峰, E-mail: wangyuhao@ncu.edu.cn

摘 要 可见光通信 (VLC) 作为 6G 的候选技术, 具备广阔的免许可频谱、更高的安全级别、避免射频干扰等诸多优势, 这些特点使得 VLC 成为射频通信的有效补充方案. 本文设计并优化了一种基于功率域非正交多址 (PD-NOMA) 技术的室内 VLC 下行链路通信系统, 该系统中包括一块位于信道中间的同时透射和反射智能超表面 (STAR-RIS) 和一个基于液晶智能超表面 (LC-RIS) 的接收器. 为了评估所设计的系统性能, 本文提出了一个和速率最大化问题, 并考虑了实际情况下发射机和接收机之间的视距 (LoS) 路径存在非用户遮挡因素. 由于所提出优化问题的非凸性, 首先使用二次变换将目标函数转化为一个分式规划 (FP) 问题, 其次采用分步优化算法和凸优化 (CVX) 工具来获得可行解. 此外, 本文分析了发光二极管 (LED) 的数量、入射光波长以及液晶折射率对室内可见光通信系统和速率的影响. 数值仿真结果表明, 在能量分裂 (ES) 操作协议下, STAR-RIS 和 LC-RIS 联合辅助的室内 VLC 系统的和速率明显高于仅有反射智能超表面 (RIS) 和无 LC-RIS 的 VLC 系统. LED 灯数量、入射光波长以及液晶 (LC) 折射率均会在一定程度上对系统性能产生影响. 这些研究结果为室内可见光通信系统的设计和优化提供了重要参考.

关键词 可见光通信; 同时透射和反射智能超表面; 液晶智能超表面; 功率域非正交多址; 分式规划

分类号 TG142.71

Optimization design of liquid crystal-based reconfigurable intelligent surface-assisted indoor visible light communication systems

YU Lisu^{1,2)}, LÜ Xinxin¹⁾, ZHONG Run¹⁾, ZHANG Mingli¹⁾, WANG Zhenghai¹⁾, WANG Yuhao¹⁾

1) School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China

2) Jiangxi Provincial Key Laboratory of Advanced Signal Processing and Intelligent Communications, Nanchang University, Nanchang 330031, China

Corresponding author, WANG Zhenghai, E-mail: wangzhenghai@126.com; WANG Yuhao, E-mail: wangyuhao@ncu.edu.cn

ABSTRACT Visible light communication (VLC) is a promising technology for sixth-generation (6G) networks, offering a broad, license-free spectrum, enhanced security, and protection from radio frequency (RF) interference. This makes VLC an excellent complement to traditional RF communication. VLC is mainly used indoors, typically covering distances ranging between 2 and 5 meters. A major challenge in VLC is increasing data rates, especially when obstacles block the direct line of sight (LoS). To overcome such obstacles, reconfigurable intelligent surfaces (RISs) have been effectively used in wireless networks. Meta-surface-based simultaneous transmission and reflection reconfigurable intelligent surfaces (STAR RISs) have emerged to address LoS blockage and provide 360° coverage in radio-frequency wireless systems. The latest advancement is the proposal of optical simultaneous transmission and reflection reconfigurable intelligent surfaces for VLC systems. Liquid crystal (LC) RISs can electronically tune their physicochemical properties, such as the refractive index, by altering the orientation of the LC molecules using an external electric field. This fine-tuning capability

收稿日期: 2024-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62161023, 62061030, 62161024); 江西省主要学科科学技术带头人省级人才项目 (20232BCJ23085); 江西省自然科学基金资助项目 (20224BAB212002); 中国博士后科学基金资助项目 (2021TQ0136, 2022M711463); 江西省科技研发计划项目 (20242BCC32016)

enables LC RISs to precisely direct incident light beams, ensuring that the refracted beams perfectly align with the photodetector's field of view. This paper introduces a VLC downlink communication system based on indoor power domain non-orthogonal multiple access (PD-NOMA) technology. The system is designed and optimized to include a STAR RIS in the channel and LC RIS-based receivers with co-assisted composition. By utilizing the energy splitting (ES) protocol, STAR RIS is deployed in the transmission channel, while LC RIS-based VLC receivers are employed at the receiver side. Both components significantly enhance the optical signal, improving overall system performance. The system performance is evaluated by solving a sum-rate maximization problem that accounts for practical scenarios such as the presence of nonuser-obscured LoS paths between the transmitter and the receiver. A low-complexity algorithm using fractional programming and step-by-step optimization is recommended for managing perfect channel state information. Owing to the nonconvexity of the objective function, it is first transformed into a multinomial fractional planning problem using the Lagrangian dual transform, making it more tractable. Following this, a step-by-step optimization scheme combined with the CVX tool is used to obtain a feasible solution. This paper also evaluates how the number of light-emitting diodes (LEDs), the optical signal wavelength, and the LC refractive index affect the performance of indoor VLC systems. The final numerical simulation results show that the sum rate of the indoor VLC system incorporating both STAR RIS and LC RIS is significantly higher compared to systems using only reflective RISs and no LC RISs, especially under the ES operation protocol. Additionally, system performance is influenced by the number of LEDs, incident light wavelength, and LC refractive index. These findings provide an important reference for the design and optimization of indoor VLC systems.

KEY WORDS visible light communication; simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces; liquid crystal reconfigurable intelligent surfaces; receiver; fractional programming

随着 5G 技术的成熟, 全球开始逐步进行 6G 技术的研究和开发, 6G 具备极高的可靠性 (99.99999%)^[1]. 可见光通信 (VLC) 技术凭借高宽带、高速率、绿色节能、安全可靠以及高信噪比等诸多优势, 为通信领域带来了划时代的变革^[2-4]. VLC 在多个方面契合了 6G 通信的要求, 因此具有广泛的应用前景. 这些应用包括但不限于室内和地下通信、定位技术、水下通信、增强现实 (AR) 等. 鉴于 VLC 的出色表现, 它已被广泛视为 6G 通信的关键技术之一, 为未来的通信领域开辟了新的发展机遇^[3].

非正交多址 (NOMA) 技术相较于传统的正交多址接入 (如时分多址等), 在频谱利用率和连接密度方面展现出了显著的优势. 其核心理念在于, 在同一时间/频谱资源上, 通过调整功率或码本, 实现对多个用户的同时服务. 功率域非正交多址接入 (PD-NOMA) 首次由日本 NTT DOCOMO 公司提出^[5]. 在 PD-NOMA 中, 多个用户可在不同功率级别上共享相同资源块, 而接收端则利用串行干扰消除 (SIC) 技术来处理不同用户间的干扰^[6].

在无线网络领域, 智能超表面 (RIS) 是一项新兴技术, 专注于改善无线通信系统中的信号覆盖^[3, 7]. 由于其出色的高阵列增益、低成本、低功耗以及可以忽略的噪声水平^[8-10], RIS 有望在 6G 网络中提升非视距 (NLoS) 链路质量、扩大覆盖范围、减少干扰, 并确保用户通信的安全性^[11]. 鉴于 RIS 的

这些显著优势, 学者们已围绕其展开了广泛而深入的研究. 在文献 [12] 中, 研究者探讨了双 RIS 辅助系统, 该研究表明与单 RIS 系统相比, 双 RIS 系统进一步增强了未来无线网络覆盖范围、容量和效率. 文献 [13] 首次提出在光无线通信系统中使用数字 RIS, 并详细讨论了数字 RIS 的概念以及数字信号处理技术在物理材料中的应用. 文献 [14] 研究了有源 RIS 辅助通信系统的信号模型验证、渐近性能分析和多用户波束形成设计, 证明了有源 RIS 辅助的通信系统相较于无源 RIS 可以实现显著的速率增益. 此外, 文献 [15] 提出了同时透射和反射智能超表面 (STAR-RIS) 的概念, 其中入射无线信号可以在 RIS 同一侧的智能无线电环境半空间内反射, 同时也可以透射到 RIS 的另一侧. 文献 [16] 提出了一种基于 STAR-RIS 的系统设计, 介绍了 STAR-RIS 的三种实用协议, 即能量分裂 (ES)、模式切换 (MS) 和时间切换 (TS) 以及它们的优点和缺点. 文献 [17] 给出了光学同时透射和反射智能超表面 (OSTAR-RIS) 的概念和制备方法.

液晶技术各个领域都有着广泛的应用, 如 130 英寸液晶显示器^[18]、双稳态胆甾相液晶^[19]等. 液晶 (LC) 由于其折射特性 (包括透射系数、衰减系数和折射率) 的可调性, 成为了光学 RIS 技术的理想选择. 文献 [20] 通过采用基于硅基液晶的 RIS 模块, 成功解决了近地自由空间光学通信系统中的双重衰减问题. 采用基于 LC 的 RIS 来提高 VLC

信号的检测和传输范围已成为一种备受欢迎的方法. 文献 [21–22] 在 VLC 接收器的光电探测器 (PD) 前面部署光学 LC-RIS, 设计了一种能够实现弱光放大的 LC-RIS 型 VLC 接收机, 旨在提升信号检测能力和扩大传输范围; 结果表明, 在 VLC 接收器中应用基于 LC 的 RIS 可以有效防止由于凸透镜引起的损耗, 提供光放大以增强信号接收^[23]. 基于 LC 的 RIS 还可以被部署在传输通道 (如墙面、天花板等建筑物) 上, 用于调整入射光束的方向、增强其强度, 从而提升非视距链路的质量并扩大覆盖范围^[3, 24]. 在文献 [25] 中, 研究者将基于 LC 的 RIS 放置在发光二极管 (LED) 阵列前方, 形成了基于 LC-RIS 的 VLC 发射器, 以提高数据速率的均匀性并保持足够的照明. 这些应用方式突显了基于 LC 的 RIS 在 VLC 系统中的多样性和灵活性.

基于上述研究基础, 本文旨在进一步提升 VLC 系统的传输速率, 同时克服传统室内 VLC 系统中邻近房间无法通信的问题. 本文的主要贡献概括如下:

(1) 提出了一种基于 STAR-RIS 辅助的室内多 LED、多用户的 VLC 系统, 并在能量分裂 (ES) 协议下分析了其可达到的传输速率.

(2) 在接收端采用了基于 LC-RIS 的 VLC 接收器, 并考虑了入射光波长、发射光功率以及信噪比对系统传输速率的影响.

1 系统和信道模型

1.1 系统描述

系统场景如图 1 所示, 室内环境被划分为两个区域, 每个区域都部署了多个用户. 由于房间设计要求, 如功能设计, 一个隔间用作工作区, 另一个隔间用作休息或睡眠区, 由于建筑限制和个人喜好, 一个隔间安装了 LED 阵列, 而另一个隔间没有安装任何灯具. 室内环境中的多个非用户可能会阻挡来自 VLC 接入点的视距 (LoS) 信号 (即非用户阻挡). 为了在没有 LED 阵列的隔间内实现无线数据传输, 支持非 LoS 传输, 并克服设备方向对可实现数据传输速率的影响, 我们在隔开两个隔间的墙上部署了一个 STAR-RIS.

在本系统中, 假设有 L 个不同基色的 LED 灯, 用户的数量为 U , M 表示反射用户 ($M_1, \dots, M_r$, 其中 M_r 表示第 r 个反射用户)、 T 表示透射用户 ($T_1, \dots, T_t$, 其中 T_t 表示第 t 个透射用户), θ 和 ϕ 分别表示 LED 光源辐射角和可见光信号到达接收器的入射角. 为了增强通信并增加辅助通信通道, 系统



图1 系统场景图

Fig.1 System scenario

在室内墙壁上安装了由 N 个相同大小的单元组成的 STAR-RIS 阵列, 入射到 STAR-RIS 单元上的信号分为透射信号和反射信号. 假设 STAR-RIS 的所有元件都工作在反射和透射 (R&T) 模式下, 这意味着入射到每个元件上的信号能量会按照特定的能量分裂比例分配给反射信号和透射信号. 此外, 在接收端的 PD 前还放置了基于 LC 的 RIS, 用于放大和引导入射光以增强信号. LC-RIS 的物理特性将在下一节讨论. 系统模型如图 2 所示.

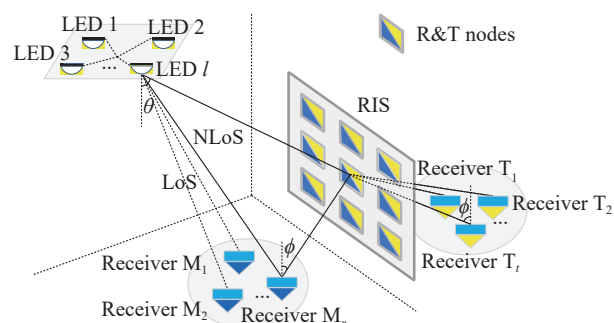


图2 系统模型图

Fig.2 System model

为了便于表达, 用户组、RIS 单元和 LED 灯组的集合分别表示为 $\mathcal{U}$ 、 $\mathcal{N}$ 和 $\mathcal{L}$.

为了实现该场景, 假设预期用户基于其信道增益 $H_1 \leq H_2 \leq \dots \leq H_U$ ^[26]. 本系统基于 PD-NOMA 为用户提供服务. 根据 NOMA 方案, LED 发送叠加信号 x 以服务于预期用户可以表示为

$$x = \sum_{u=1}^U \sqrt{c_u P_S} s_u + I_{DC} \quad (1)$$

其中, c_u 和 s_u 分别表示分配的功率比和预期用于第 u 个用户的调制消息信号. P_S 是信号的电发射功率. I_{DC} 是为确保正瞬时强度而添加的固定偏置电流. 根据文献 [27], c_u 可以表示为

$$c_u = \begin{cases} \zeta(1-\zeta)^{u-1}, & 1 \leq u \leq U \\ (1-\zeta)^{u-1}, & u = U \end{cases} \quad (2)$$

其中, ζ 是在范围 $(0.5, 1]$ 中的固定值, 并且 $\sum_{u=1}^U c_u = 1$.

为了实现高速信号传输并降低信号间的干扰, 本文采用了非对称限幅光正交频分复用 (ACO-OFDM) 调制技术对发射信号进行处理. 经过 ACO-OFDM 调制后, 原始的复码字信号被转换为适合 LED 传输的正实值信号: $x_{T-\text{sup}}$, 其表示如下

$$x_{T-\text{sup}} = \sum_{l=1}^L x_{l, \text{ACO-OFDM}}^T \quad (3)$$

其中, $x_{l, \text{ACO-OFDM}}^T$ 表示第 l 个 LED 上承载的经过 ACO-OFDM 调制后的原始复码字的正实值信号.

在去除 DC 偏置之后, 第 u 个用户处的接收信号 y_u 表示为

$$y_u = H_u \times \left(\sum_{u=1}^U \sqrt{c_u P_S s_u} \right) + w_u \quad (4)$$

其中, w_u 表示具有方差 σ^2 的加性实值高斯噪声, $w_u \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$.

在本文中, 第 l 个 LED 灯和第 u 个接收机之间的 LoS 信道增益表示为 $h_{u,l}^{\text{LoS}}$. 该系统通过在发射器和接收器之间配置 RIS 来增强通信, 考虑到墙壁和天花板等物体反射的可见光信号相对于 LoS 增益可以忽略不计^[28], 本文未作考虑. 因此, NLoS 信道是由两部分组成: 一是 LED 灯到 RIS 单元的信道, 二是 RIS 单元到接收器的信道. 在第 n 个 RIS 单元的辅助下, 第 u 个接收机和第 l 个 LED 灯之间的 NLoS 信道增益为 $h_{u,n,l}^{\text{NLoS}}$, 如式 (6) 所示.

$$h_{u,l}^{\text{LoS}} = \frac{A(m+1)}{2\pi d_{u,l}^2} \cos^m(\theta) g(\phi) \cos(\phi) f(\phi) \quad (5)$$

$$h_{u,n,l}^{\text{NLoS}} = \delta \frac{A(m+1)}{2\pi (d_{n,l} + d_{u,n})^2} \cos^m(\theta) g(\phi) \cos(\phi) f(\phi) \quad (6)$$

在式 (5) 和式 (6) 中, m 为朗伯指数, δ 是 STAR-RIS 反射因子, A 为可以检测光信号的 PD 检测器的面积. $d_{u,l}$, $d_{n,l}$ 和 $d_{u,n}$ 表示不同位置之间的距离, 其中, 下标 u 、 n 和 l 分别代表接收机、RIS 单元和 LED 的位置索引. $g(\phi)$ 和 $f(\phi)$ 分别表示为滤光器增益和聚光器增益. 在 $f(\phi) = n_c^2 / \sin^2(\phi_c)$ 中, n_c 表示透镜的折射率, ϕ_c 表示接收器的视场角. 考虑到 RIS 阵列的大小和室内通信距离, 本文将 NLoS 链路的信道增益模型简化为 RIS 近场模型, 并进一步将其简化为加性信道增益模型.

在所提出的 VLC 系统中, 过渡系数表示通过 LC 单元的信号传播. LED 和用户之间信道的增益表示为^[7]

$$H_u = \sum_{l=1}^L \left(\kappa h_{u,l}^{\text{LoS}} \times \alpha_{u,l}^{\text{LC-LoS}} + \sum_{n=1}^N h_{u,n,l}^{\text{NLoS}} g_{n,l} \times \alpha_{u,n}^{\text{LC-NLoS}} \right) \quad (7)$$

在式 (7) 中, $\kappa \in \{0, 1\}$ 表示 LoS 路径是否被阻塞, 若 $\kappa = 0$, 则表示 LoS 路径被阻塞, 若 $\kappa = 1$ 则没有被阻塞. 对于配置 LED 灯房间用户的非视距路径, 定义矩阵 $\mathbf{G} = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_L]_{N \times L}$ ($\mathbf{g}_l = [g_{1,l}, \dots, g_{n,l}, \dots, g_{N,l}]$, g_l 中的元素由 0、1 组成) 来表示 LED 灯组与 RIS 单元之间的相关矩阵. 如果 $g_{n,l} = 1$, 则表示第 n 个 RIS 单元用于辅助 L 第个 LED 灯组的通信. 在本文中, 假设每个 RIS 单元最多只能服务一个 LED 灯组, 即 $\sum_{l=1}^L g_{n,l} \in \{0, 1\}, \forall n \in \mathcal{N}$. $\alpha_{u,l}^{\text{LC-LoS}}$ 和 $\alpha_{u,n}^{\text{LC-NLoS}}$ 分别表示 LoS 和 NLoS 路径的过渡系数.

1.2 LC-RIS 接收机模型

下面将讨论基于 LC-RIS 的接收器模块如何通过放大和引导入射光来增强信号接收. 图 3 是 LC-RIS 的模型图. 其中, L_1 为入射光强, χ 为折射角, L_3 为出射光强, v_{th} 表示发生倾斜时所需的临界电压. ϕ 表示光信号在 LC-RIS 表面的入射角, 其在 LoS 链路和 NLoS 链路中有不同的表现形式, 分别为 $\phi_{u,l}$ 和 $\phi_{u,n,l}$.

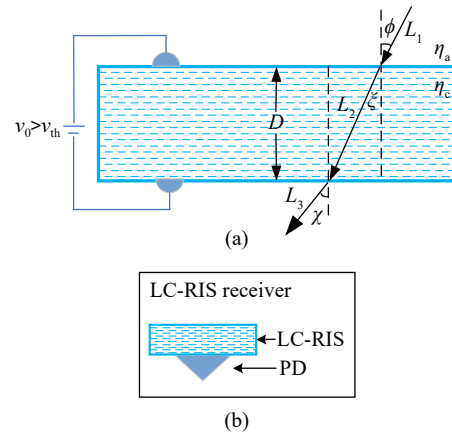


图 3 LC-RIS 接收器模型. (a) LC 单元的光信号传播模型; (b) 基于 LC-RIS 的接收器

Fig.3 LC-RIS receiver model: (a) optical signal propagation model of LC cell; (b) receiver based on LC-RIS

L_3 可以使用比尔吸收定律^[29] 计算, 并由下式给出

$$L_3 = L_1 \times \exp(\Gamma D) \times \alpha_{\text{LC}} \quad (8)$$

其中 $\exp(\Gamma D)$ 表示入射光强度的指数增加, α_{LC} 表示过渡系数, D 为 LC RIS 的深度, Γ 表示放大增益系数. Γ 可以表示为

$$\Gamma = \frac{2\pi\eta_c^3 v_e}{\lambda D \cos(\phi_{u,l})} r_{\text{eff}} \quad (9)$$

在式 (9) 中, v_e 表示外部施加的电压, r_{eff} 表示电光系数, η_a 和 η_c 分别是空气介质和 LC 的折射率, λ 是透射光的波长, ξ 为光信号的折射角. 从式 (9) 可以明显看出, 基于 LC 的 RIS 的放大增益受光信号的波长、施加的电压和 LC 模块的折射率的影响.

过渡系数 α_{LC} , 用来观测基于 LC 的 RIS 模块对总信道增益的影响. NLoS 链路的过渡系数可以表示如下^[22]

$$\alpha_{u,n,l}^{\text{LC-NLoS}} = A_{\text{ac}}(\phi_{u,n,l}) \times A_{\text{ca}}(\xi) \\ = (1 - F_{\text{ac}}(\phi_{u,n,l})) \times (1 - F_{\text{ca}}(\xi)) \quad (10)$$

其中, 表示入射光在空气和 LC 单元之间的界面上的透射率, $A_{\text{ca}}(\xi)$ 表示光信号离开 LC 单元时的角透射率. $F_{\text{ac}}(\phi_{u,n,l})$ 和 $F_{\text{ca}}(\xi)$ 分别表示当光信号进入和离开 LC 单元时被反射的光量. 具体表示如下^[22]

$$F_{\text{ac}}(\phi_{u,n,l}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\eta^2 \cos(\phi_{u,n,l}) - \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\phi_{u,n,l})}}{\eta^2 \cos(\phi_{u,n,l}) + \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\phi_{u,n,l})}} \right)^2 + \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\cos(\phi_{u,n,l}) - \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\phi_{u,n,l})}}{\cos(\phi_{u,n,l}) + \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\phi_{u,n,l})}} \right)^2 \quad (11)$$

$$F_{\text{ca}}(\xi) = \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_1^2 \cos(\xi) - \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\xi)}}{\eta_1^2 \cos(\xi) + \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\xi)}} \right)^2 + \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\cos(\xi) - \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\xi)}}{\cos(\xi) + \sqrt{\eta^2 - \sin^2(\xi)}} \right)^2 \quad (12)$$

其中, $\eta = \eta_c/\eta_a$ 和 $\eta_1 = \eta_a/\eta_c$ 分别表示光进入和离开 LC-RIS 时的相对折射率, 对于 LoS 路径, 则有 $\alpha_{u,l}^{\text{LC-LoS}} = A_{\text{ac}}(\phi_{u,l}) \times A_{\text{ca}}(\xi)$. 通过式 (11) 和 (12) 得出, 可以通过调节 LC-RIS 的折射率 η_c 来优化过渡系数. 这涉及倾斜角 ρ , 其确定 LC 单元的分子取向. 倾斜角和折射率之间的关系由式 (13) 给出

$$\frac{1}{\eta_c^2(\rho)} = \frac{\cos^2(\rho)}{\eta_c^2} + \frac{\sin^2(\rho)}{\eta_0^2} \quad (13)$$

其中, $\eta_c(\rho)$ 表示在特定倾斜角 ρ 时 LC 单元的折射率, η_c 和 η_0 分别对应于 LC 单元的非寻常和寻常折射率. 又倾斜角 ρ 可由外部施加的电压控制, 两者之间的关系可以描述为^[22]

$$\rho = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left[\exp \left(-\frac{v_e - v_{\text{th}}}{v_0} \right) \right], & v_e > v_{\text{th}} \\ 0, & v_e \leq v_{\text{th}} \end{cases} \quad (14)$$

其中, v_0 是控制电压变化对倾斜角影响的标度电压, 用于确定当 $v_e > v_{\text{th}}$ 时倾斜角的变化速率. 根据式 (13)、(14), LC 单元的倾斜角 ρ 可通过施加电压来控制, 从而使得 LC 单元能够作为电压控制的 RIS. 图 4(a) 展示了 LC 的折射率 η_c 随外部电压 v_e 的变化关系, 图 4(b) 则绘制了在 LC-RIS 辅助的室内可见光通信系统中, 不同 LED 数量下 LC 的折射率及入射光波长对系统速率的影响曲线. 从图中可以看出, LED 数量的增加显著提高了系统的和速率, 例如, 使用 4 个 LED 时的和速率明显高于仅使用 1 个 LED 的情况. 此外, LC 的折射率和入射光的波长也对系统的和速率产生了一定影响. 在实验中, 当将光信号的波长从 510 nm 调整为 670 nm 时, 4 个 LED 的 VLC 系统数据速率性能提升了 115%.

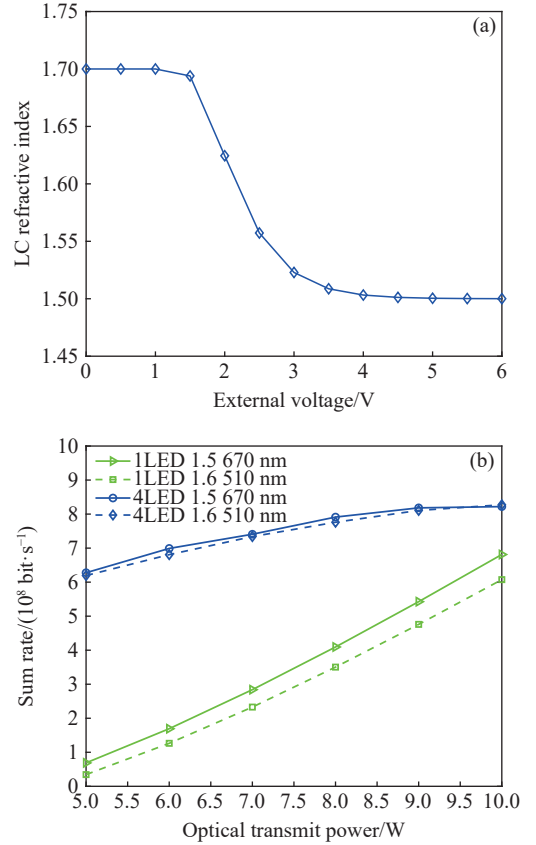


图 4 LC-RIS 特性曲线. (a) LC 的折射率随外部电压的变化曲线; (b) LC-RIS 辅助下折射率和波长对和速率的影响

Fig.4 LC-RIS characteristic curves: (a) LC refractive index variation curve versus external voltage; (b) Effect of refractive index and optical signal wavelength on sum rate assisted by LC-RIS

2 系统容量分析

2.1 和速率分析

根据 NOMA 方案, 每个用户需要执行连续干

扰消除 (SIC) 来解码其信息. 假设在执行 SIC 过程之后没有残留干扰 (即, 完美 SIC)^[30]. 所提出的系统的和速率表示为:

$$R_{\text{sum}} = \sum_{u=1}^U R_u \quad (15)$$

$$R_u = \begin{cases} \frac{1}{2} \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{\exp(1)}{2\pi} \frac{(\rho_{\text{PD}} \exp(\Gamma D) H_u)^2 c_u P_S}{I + N_0 B} \right), & 1 \leq u \leq U \\ \frac{1}{2} \text{Blog}_2 \left(1 + \frac{\exp(1)}{2\pi} \frac{(\rho_{\text{PD}} \exp(\Gamma D) H_u)^2 c_u P_S}{N_0 B} \right), & u = U \end{cases} \quad (16)$$

其中, $I = \sum_{i=u+1}^U (\rho_{\text{PD}} \exp(\Gamma D) H_i)^2 c_i P_S$ 表示由 NOMA 方案的应用产生的用户间干扰项, B 表示系统的带宽, ρ_{PD} 表示 PD 的响应度, N_0 表示噪声的功率谱密度.

2.2 问题构建和优化

在解决系统的优化问题时, 由于涉及多个优化变量, 直接求解会导致高复杂度. 为此, 本文提出了一种有效的优化方案: 采用分步优化算法, 依次对两个变量进行优化. 首先, 在给定 RIS 单元的分配系数下, 确定功率分配系数的最优值. 随后, 保持功率分配系数不变, 寻找 RIS 单元分配系数的最优解. 鉴于目标函数的非凸性, 首先利用文献 [31] 中所提出的二次变换方法, 将目标函数转化为一个分式规划 (FP) 问题, 从而简化了目标函数的处理难度. 由此, 可实现的数据速率最大化问题可以被公式化为

$$(P0): \max_{\{G, c_u\}} \sum_{u=1}^U R_u \quad (17a)$$

$$\text{s.t. C1: } R_u \geq R_{\min}, \forall u \in \mathcal{U} \quad (17b)$$

$$\text{C2: } g_{n,l} \in \{0, 1\}, \forall u \in \mathcal{U}, \forall n \in \mathcal{N}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (17c)$$

$$\text{C3: } \sum_{l=1}^L g_{n,l} \in \{0, 1\}, \forall u \in \mathcal{U}, \forall n \in \mathcal{N}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (17d)$$

$$\text{C4: } \sum_{u=1}^U c_u = 1, \forall u \in \mathcal{U} \quad (17e)$$

$$\text{C5: } c_u \in (0.5, 1], \forall u \in \mathcal{U} \quad (17f)$$

其中, $R_{\min}$ 表示每个用户满足 QoS 所需的最小通信容量.

凸优化 (CVX) 工具作为一款强大的优化求解工具, 能够直接解决多种凸优化问题. 然而, 上述优化问题是一个非凸问题, 因此无法直接借助 CVX 工具来解决. 为了应对这一挑战, 首先, 采用分式

约束中的直接式求解方法将 R_u 表示为如下形式:

$$R_u^* = \begin{cases} \text{Blog}_2 \left(1 + 2y_u \times \sqrt{\exp(1)(\rho_{\text{PD}} \exp(\Gamma D) H_u)^2 c_u P_S - y_u^2 \times 2\pi(I + N_0 B)} \right), & 1 \leq u \leq U \\ \text{Blog}_2 \left(1 + 2y_u \times \sqrt{\exp(1)(\rho_{\text{PD}} \exp(\Gamma D) H_u)^2 c_u P_S - y_u^2 \times 2\pi N_0 B} \right), & u = U \end{cases} \quad (18)$$

问题 P0 为整数规划问题, 属于非确定性多项式 (NP) 难问题, 故本文采用松弛约束, 以最大化可实现通信容量, 即将约束 (19) 松弛为 $0 \leq g_{n,l} \leq 1$ ^[32]. 由于 R_u 是两个单调递增函数的复合函数, 从而导致关于 $g_{n,l}$ 的单调性. 因此, 公式 (20) 中的约束可以替换为 $\sum_{l=1}^L g_{n,l} = 1$. 优化问题可以变换为:

$$(P1): \max_{\{G, c_u\}} \sum_{u=1}^U R_u^* \quad (19a)$$

$$\text{s.t. C1: } (17b) \quad (19b)$$

$$\text{C2: } 0 \leq g_{n,l} \leq 1, \forall u \in \mathcal{U}, \forall n \in \mathcal{N}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (19c)$$

$$\text{C3: } \sum_{l=1}^L g_{n,l} = 1, \forall u \in \mathcal{U}, \forall n \in \mathcal{N}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (19d)$$

$$\text{C4: } (17e) \quad (19e)$$

$$\text{C5: } (17f) \quad (19f)$$

$$\text{C6: } y_u \in \mathbf{R}, \forall u \in \mathcal{U} \quad (19g)$$

固定 G 和 c_u 时, 最优 y_u 的闭式解为

$$y_u^* = \frac{\sqrt{\exp(1)(\rho_{\text{PD}} \exp(\Gamma D) H_u)^2 c_u P_S}}{2\pi(I + N_0 B)} \quad (20)$$

固定 y_u 时, 变换后的问题是一个凸优化问题.

3 仿真结果

3.1 参数设置

在本研究中, 假设所有 LED 发射端的照度参数相同, 且满足共同的室内照度约束. 为了兼顾通信和照明, 系统通信空间采用 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 大小的室内空间, LED 灯在房间顶部对称布置, 分别在 $(2 \text{ m}, 2 \text{ m}, 3 \text{ m})$ 、 $(2 \text{ m}, 6 \text{ m}, 3 \text{ m})$ 、 $(6 \text{ m}, 2 \text{ m}, 3 \text{ m})$ 、 $(6 \text{ m}, 6 \text{ m}, 3 \text{ m})$ 处设置四个 LED 灯. 系统中有两个用户, 分别位于两个房间内, 坐标为 $(4 \text{ m}, 4 \text{ m}, 1 \text{ m})$ 、 $(4 \text{ m}, -4 \text{ m}, 1 \text{ m})$ 处. RIS 阵列被布置在发射终端和接收终端之间的室内墙壁上, 由两个对称角构成的矩形区域内均匀分布着规格相同、间距适当的 RIS 单元, 矩形的对角点坐标为 $(0.5 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1.5 \text{ m})$ 和 $(7.5 \text{ m}, 0 \text{ m}, 2.5 \text{ m})$. 朗伯指数设置为 1, 最低 QoS

速率为 $R_{\min} = 10^6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$, 调制带宽为 20 MHz, RIS 反射因子 $\delta = 0.95$, LED 视场角 $\text{FOV} = 85^\circ$. 具体参数设置如表 1 所示.

表 1 系统参数
Table 1 System parameters

Parameters	Value	Parameters	Value
U	2	$r_{\text{eff}}/(\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	12
L	4	v_{th}/V	1.34
N	256	v_0/V	1.0
δ	0.95	η_e	1.7
$\rho_{\text{PD}}/(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	0.53	η_a	1.0
$g(\phi)$	1	η_0	1.5
$f(\phi)$	1	λ/nm	{510, 670}
$\text{FOV}/(^\circ)$	85	D/mm	0.75
$R_{\min}/(\text{bit} \cdot \text{s}^{-1})$	10^7	N_0	10
A/cm^2	1.0	B/MHz	200

3.2 仿真结果分析

考虑到 VLC 实际环境, 假设用户在每个 LED 上的 NLoS 链路有 50% 的概率被阻塞, 且阻塞是由均匀介质引起的, 导致衰减的 NLoS 信道增益乘以系数 0.2^[32]. 结合先前的仿真结果, 选择波长为 670 nm 的光信号波长和折射率为 1.5 的 LC-RIS 进行仿真.

将功率分配比大的用户定义为用户 2, 功率分配比小的用户定义为用户 1, 满足 $H_1 \leq H_2 \leq \dots \leq H_U$. 图 5 是本文提出的基于 LC-RIS 辅助的室内 VLC 系统的和速率随功率变化的仿真结果. 仿真结果表明在 LC-RIS 的辅助下, 系统的和速率明显高于无 LC-RIS 接收机辅助的和速率, 实现了约 50% 的性能提高.

图 6 中的所有方案都在接收端配置了基于 LC-

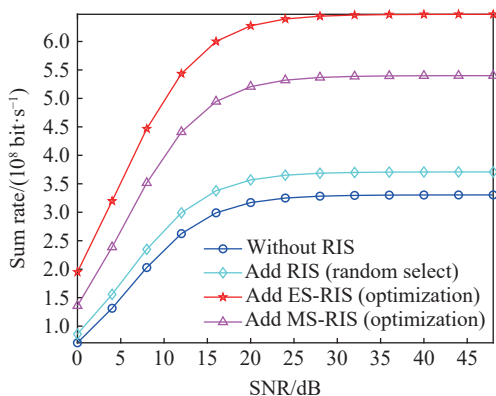


图 5 和速率随发射功率的变化曲线

Fig.5 Sum rate versus transmit power curve

RIS 的接收机, 仿真结果表明, 随着信噪比的增加, 系统的和速率先逐渐上升, 而后趋于平稳. 此外, 在 STAR-RIS 的辅助下, 系统的和速率显著高于仅采用反射 RIS 辅助或无 RIS 辅助的系统. 在 STAR-RIS 的能量分裂 (ES) 协议下的和速率优于模式切换 (MS) 协议, 这是因为 ES 协议允许每个 RIS 单元既反射又透射信号, 从而增加了两个用户接收到发射信号的概率. 结合图 5 的仿真结果, 可以看出, STAR-RIS 和 LC-RIS 接收机的辅助可以在很大程度上提升系统的性能, 通过运用本文提出的优化算法, 系统的和速率明显提升.

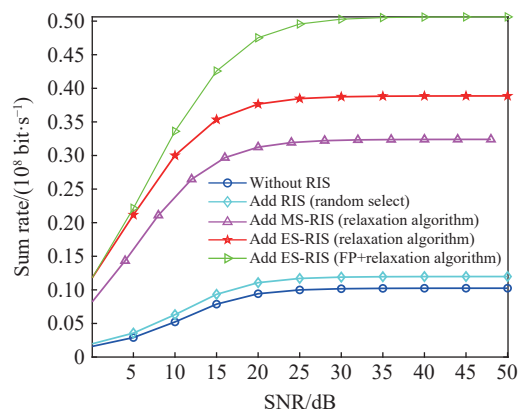


图 6 和速率随信噪比的变化曲线

Fig.6 Rate versus SNR curve

4 结论

本文提出了一种 STAR-RIS 和 LC-RIS 联合辅助的室内可见光通信系统, 考虑了 LoS 和 NLoS 信道, 并分析了系统容量. 在系统的优化设计过程中, 由于目标函数的非凸性和多变量复杂性, 采用了分步优化方法对各个变量进行逐步优化. 为了处理目标函数的非凸性及其结构特点, 采用了 FP 方法. 通过比较不同 RIS 方案辅助下系统的和速率, 并在满足特定功率分配比的约束条件下评估了各方案的效果. 仿真结果显示, 与现有的多址接入方案相比, 通过系统用户组的功率分配和 RIS 优化配置, 所提出的系统能够显著提升通信容量和速率.

参考文献

- [1] Ma Z G, Li Z, Liang Y P. Overview and prospect of communication-sensing-computing integration for autonomous driving in the Internet of vehicles. *Chin J Eng*, 2023, 45(1): 137 (马忠贵, 李卓, 梁彦鹏. 自动驾驶车联网中通感算融合研究综述与展望. *工程科学学报*, 2023, 45(1): 137)
- [2] Dwivedy P, Dixit V, Kumar A. A survey on visible light

- communication for 6G: Architecture, application and challenges // 2023 International Conference on Computer, Electronics & Electrical Engineering & Their Applications (IC2E3). Srinagar Garhwal, 2023: 1
- [3] Abumarshoud H, Mohjazi L, Dobre O A, et al. LiFi through reconfigurable intelligent surfaces: A new frontier for 6G? *IEEE Veh Technol Mag*, 2022, 17(1): 37
- [4] Aboagye S, Ndjiongue A R, Ngatched T M N, et al. RIS-assisted visible light communication systems: A tutorial. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2023, 25(1): 251
- [5] Benjebbour A, Saito Y, Kishiyama Y, et al. Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access // *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*. Naha, 2013: 770
- [6] Riazul Islam S M, Avazov N, Dobre O A, et al. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges // *IEEE Commun Surve Tutor*. 2017, 19(2): 721
- [7] Aboagye S, Ngatched T M N, Dobre O A, et al. Intelligent reflecting surface-aided indoor visible light communication systems. *IEEE Commun Lett*, 2021, 25(12): 3913
- [8] Di Renzo M, Zappone A, Debbah M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2020, 38(11): 2450
- [9] Basar E, Di Renzo M, De Rosny J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Access*, 2019, 7: 116753
- [10] Dai L L, Wang B C, Wang M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results. *IEEE Access*, 2020, 8: 45913
- [11] Liu Y W, Liu X, Mu X D, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities. *IEEE Commu Surv Tutor*. 2021, 23(3): 1546
- [12] Ardah K, Gherekhloo S, de Almeida A L F, et al. Double-RIS versus single-RIS aided systems: Tensor-based mimo channel estimation and design perspectives // *ICASSP 2022-2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Singapore, 2022: 5183
- [13] Ndjiongue A R, Ngatched T M N, Dobre O A, et al. Digital RIS (DRIS): The future of digital beam management in RIS-assisted OWC systems. *J Light Technol*, 2022, 40(16): 5597
- [14] Zhang Z J, Dai L L, Chen X B, et al. Active RIS vs. passive RIS: Which will prevail in 6G? *IEEE Trans Commun*, 2023, 71(3): 1707
- [15] Xu J Q, Liu Y W, Mu X D, et al. STAR-RISs: Simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Commun Lett*, 2021, 25(9): 3134
- [16] Liu Y W, Mu X D, Xu J Q, et al. STAR: Simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces. *IEEE Wirel Commun*, 2021, 28(6): 102
- [17] Ndjiongue A R, Ngatched T M N, Dobre O A, et al. Double-sided beamforming in VLC systems using omni-digital reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Commun Mag*, 2024, 62(2): 150
- [18] Li D, Yang W H, Chen H. Simulation of liquid crystal-wave plate in large size LCD display. *J Nanchang Univ (Eng Technol)*, 2023, 45(1): 96
(李玓, 杨伟恒, 陈辉. 液晶波片在超大尺寸显示器上的仿真. 南昌大学学报(工科版), 2023, 45(1): 96)
- [19] Yu M N, Zou C, Gao Y Z, et al. Effects of controllable defects on the bistable properties of cholesteric liquid crystal materials and the potential application. *Chin J Eng*, 2022, 44(4): 712
(于美娜, 邹呈, 高延子, 等. 缺陷控制对胆甾相液晶材料双稳态性能的影响及其应用. 工程科学学报, 2022, 44(4): 712)
- [20] Ndjiongue A R, Ngatched T M N, Dobre O A, et al. Design of a power amplifying-RIS for free-space optical communication systems. *IEEE Wirel Commun*, 2021, 28(6): 152
- [21] Ndjiongue A R, Ngatched T M N, Dobre O A, et al. Reconfigurable intelligent surface-based VLC receivers using tunable liquid-crystals: The concept. *J Light Technol*, 2021, 39(10): 3193
- [22] Aboagye S, Ndjiongue A R, Ngatched T M, et al. Design and optimization of liquid crystal RIS-based visible light communication receivers. *IEEE Photonics J*, 2022, 14(6): 7355607
- [23] Ndjiongue A R, Ngatched T M N, Dobre O A, et al. Toward the use of re-configurable intelligent surfaces in VLC systems: Beam steering. *IEEE Wirel Commun*, 2021, 28(3): 156
- [24] Ibne Mushfique S, Alsharoa A, Yuksel M. MirrorVLC: Optimal mirror placement for multielement VLC networks. *IEEE Trans Wirel Commu*. 2022, 21(11): 10050
- [25] Aboagye S, Ngatched T M N, Ndjiongue A R, et al. Liquid crystal-based RIS for VLC transmitters: Performance analysis, challenges, and opportunities. *IEEE Wirel Commun*, 2024, 31(4): 98
- [26] Zhang X K, Gao Q, Gong C, et al. User grouping and power allocation for NOMA visible light communication multi-cell networks. *IEEE Commun Lett*, 2017, 21(4): 777
- [27] Shen T J, Yachongka V, Hama Y, et al. Secrecy design of indoor visible light communication network under downlink NOMA transmission. *arXiv preprint* (2023-04-18) [2024-05-21]. <https://arxiv.org/abs/2304.08458v1>
- [28] Obeed M, Salhab A M, Alouini M S, et al. On optimizing VLC networks for downlink multi-user transmission: A survey. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2019, 21(3): 2947
- [29] Soltani M D, Purwita A A, Zeng Z H, et al. Modeling the random orientation of mobile devices: Measurement, analysis and LiFi use case. *IEEE Trans Commun*, 2019, 67(3): 2157
- [30] Maraqa O, Siddiqi U F, Al-Ahmadi S, et al. On the achievable max-min user rates in multi-carrier centralized NOMA-VLC networks. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(11): 3705
- [31] Shen K M, Yu W. Fractional programming for communication systems: Part I: Power control and beamforming. *IEEE Trans Signal Process*, 2018, 66(10): 2616
- [32] Sun S Y, Yang F, Song J. Sum rate maximization for intelligent reflecting surface-aided visible light communications. *IEEE Commun Lett*, 2021, 25(11): 3619