

基于液晶 RIS 辅助的 VLC 系统物理层安全方法

钱磊¹, 李东骏², 吴方乾¹, 孙洪亮³

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387;

2. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 3. 吉林化工学院 信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132022)

摘要: 为了提高可见光通信(VLC)系统的物理层安全性, 提出了一种基于液晶可重构智能表面(LC-RIS)辅助的 VLC 系统物理安全方法。在传统的 VLC 系统接收端引入折射率可控的 LC-RIS, 通过外加电场对入射光链路折射率的调控, 增加合法信道与窃听信道之间的差异性, 从而增加 VLC 系统的可达安全传输速率。仿真结果表明: 相比传统的 VLC 系统, 所提出方法的 VLC 系统的可达安全传输速率提升了 1 bit/(channel use), 有效地提高了通信的安全性; 基于粒子群(PSO)算法的 LC-RIS 折射率优化算法具有较好的鲁棒性。

关键词: 可见光通信; 物理层安全; 可重构智能表面; 安全容量; 粒子群算法

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)05-0041-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Physical layer security method for
VLC system based on liquid crystal RIS assistanceQIAN Lei¹, LI Dongjun², WU Fangqian¹, SUN Hongliang³

(1. School of Electronic and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. School of Electoronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

3. College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin Jilin 132022, China)

Abstract: In order to improve the physical layer security of visible light communication(VLC) system, a physical security method based on liquid crystal reconfigurable intelligent surface(LC-RIS) assistance is proposed. LC-RIS with controllable refractive index is introduced into the receiving end of the traditional VLC system, and the difference between the legitimate channel and the eavesdropping channel is increased by adjusting the refractive index of the incident optical link with applied electric field, so as to increase the reachable safe transmission rate of the VLC system. The simulation results show that compared with the traditional VLC system, the reachable safe transmission rate of the proposed VLC system is increased by 1 bit/ channel use, and the security performance of the communication is effectively improved. LC-RIS index optimization algorithm based on particle swarm optimization(PSO) algorithm has good robustness.

Key words: visible light communication, physical layer security, reconfigurable intelligent surface, secrecy capacity, particle swarm optimization algorithm

0 引言

由于可见光通信(VLC)信号难以穿透非透明障碍

物,它具有天然的安全性,非常适合应用于室内安全通信场景。然而,由于无线光传输的广播性质,部署在公共空间的 VLC 系统仍然面临着被截获和监听等安全风险。近年来,物理层安全技术被引入以提高 VLC 系统的安全性。

可重构智能表面(RIS)作为一种第六代(6G)无线通信中的革命性技术,受到了学术界和工业界的广泛关注。通过操控智能反射单元,RIS 能够调节无线传播环境,从而增强无线通信的安全性。由于射频与可见光的传输特性存在显著差异,当前射频通信中关于

收稿日期: 2024-05-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62301359)资助。

作者简介: 钱磊(1994—),女,博士,讲师,硕士生导师。2021 年获吉林大学通信与信息系统专业博士学位,现任职于天津工业大学电子与信息工程学院,主要研究方向包括可见光通信、物理层安全、统计时延 QoS 分析与保障。



钱磊,李东骏,吴方乾,等: 基于液晶 RIS 辅助的 VLC 系统物理层安全方法

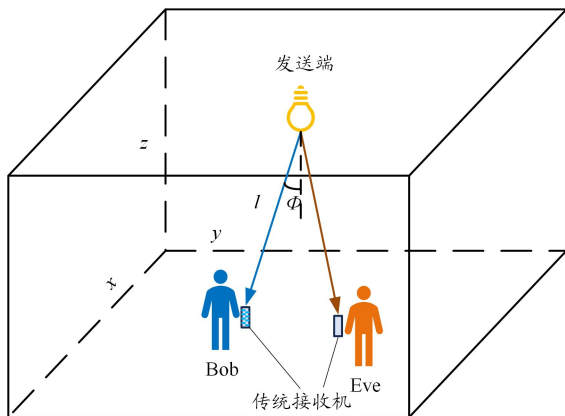
RIS 的研究难以直接应用于 VLC。目前,光 RIS 主要包括 3 种类型:基于镜面阵列的 RIS(mRIS)、基于液晶的 RIS(LC-RIS)以及基于可编程元表面反射器的 RIS。由于可编程元表面的成本相对较高,当前关于光 RIS 的研究主要集中在 mRIS 和 LC-RIS 上。文献[1-2]分别研究了 mRIS 辅助 VLC 系统的接收平面辐照度和时域信道特性。在此基础上,文献[3]首次探索了 mRIS 对 VLC 系统物理层安全性能的提升潜力,并提出了一种实现最大安全容量的镜面方向控制方法。随后,文献[4-5]进一步研究了 mRIS 辅助物理层安全在多用户 VLC 系统中的优化方法。对于 LC-RIS 辅助的 VLC 系统,文献[6-7]推导了该系统的最佳折射率和所需电压。此外,文献[8]在考虑信道遮挡和用户设备方向的基础上,提出了传输速率最大化的 mRIS 和 LC-RIS 联合优化方法。与 mRIS 相比,LC-RIS 更具成本优势,且其对于入射信号的调整更加简单可控。

基于此,本文提出一种基于 LS-RIS 辅助的 VLC 系统物理层安全方法,旨在探索 LC-RIS 对 VLC 系统物理层安全的提升效果。

1 LC-RIS 辅助的 VLC 系统物理层安全方法

1.1 系统物理层安全场景

本文针对一个特定的室内空间建立了一个利用 LC-RIS 辅助的 VLC 系统物理层安全场景,如图 1 所示。VLC 系统的发送端是一个位于房间天花板中心位置的 LED 阵列。该系统包含 2 个用户:合法用户 Bob 和非法窃听用户 Eve,两者均位于相同的接收平面上,通过光电二极管(PD)接收光信号并进行信号处理。其中,Bob 位于房间中心,并配备了 LC-RIS 辅助的接收机;而 Eve 则位于房间内任一随机位置,其位置服从



—合法用户 Bob 的传输链路; —非法窃听用户 Eve 的传输链路。

图 1 LC-RIS 辅助的 VLC 系统物理层安全场景图

均匀分布。在本研究中,VLC 系统采用了基于直流偏置的强度调制/直接检测(IM/DD)方式来实现信号传输。

由于光线在空气中的无线传播具有发散特性,处于同一空间内的 Bob 和 Eve 均能独立接收到发送端发出的信息。因此,Bob 的接收信号和 Eve 的窃听信号可分别表示为

$$y_B = h_B s + n_B \quad (1)$$

$$y_E = g_E s + n_E \quad (2)$$

其中, s 为 VLC 系统发送信号, y_B 、 y_E 分别为 Bob、Eve 的接收信号, h_B 为 Bob 光链路经过 LC-RIS 后的信道增益, g_E 为 Eve 光链路在空气中的信道增益。 n_B 、 n_E 分别为 Bob 和 Eve 接收到的噪声。

根据文献[8]可知,用户 k (Bob 或者 Eve) 光链路在空气中的信道增益为

$$g_k = \frac{A_{PD} (n+1)}{2\pi l_k^2} \cos^m \Phi_k T(\varphi_k) G(\varphi_k) \quad (3)$$

其中, A_{PD} 为 PD 的面积, l_k 为 LED 光源与接收者 k 之间的直线距离, n 为朗伯系数且 $n = -\ln(\cos \varphi_{1/2})^{-1}$, $\varphi_{1/2}$ 为 LED 光源的半功率角, Φ_k 为 LED 光源的出射角度, φ_k 为 PD 的入射角度, $T(\varphi_k)$ 是接收机的滤光片增益; $G(\varphi_k)$ 为具有内部折射率 a 的非成像聚光器增益,其表达式为

$$G(\varphi_k) = \begin{cases} a_2 / \sin^2 \varphi_{FoV}, & 0 \leq \varphi_k \leq \varphi_{FoV} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

其中, φ_{FoV} 为 PD 视场角(FoV)的一半。

1.2 系统合法用户信道增益

在合法用户的接收端,LC-RIS 通过施加外部电场来实现泵浦效应,将内部的液晶粒子激发到一个统一倾斜角度的高能量状态。这样处理后,入射光子的能量不会被液晶吸收,而是对内部粒子形成激励,从而增强了合法用户接收到的光信号强度。

在 LC-RIS 的辅助下,式(1)中合法用户 Bob 的信道增益为

$$h_B = g_B \alpha \vartheta \quad (5)$$

其中, g_B 表示合法用户链路在空气中的信道增益, α 表示 LC-RIS 过渡系数, ϑ 表示 LC-RIS 的放大系数。

根据角透射率和角反射率之间的关系^[8],LC-RIS 过渡系数为

$$\alpha = [1 - R_{ac}(\varphi_B)] [1 - R_{ca}(\theta)] \quad (6)$$

其中, φ_B 和 θ 分别表示 LC-RIS 的入射角和折射角, $R_{ac}(\varphi_B)$ 和 $R_{ca}(\theta)$ 分别表示光信号进入和离开 LC-RIS 时的反射量。

$$R_{ac}(\varphi_B) = \frac{1}{2} \left[\frac{\eta^2 \cos \varphi_B - \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \varphi_B}}{\eta^2 \cos \varphi_B + \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \varphi_B}} \right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{\cos \varphi_B - \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \varphi_B}}{\cos \varphi_B + \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \varphi_B}} \right]^2 \quad (7)$$

$$R_{ca}(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{\eta^{-2} \cos \theta - \sqrt{\eta^{-2} - \sin^2 \theta}}{\eta^{-2} \cos \theta + \sqrt{\eta^{-2} - \sin^2 \theta}} \right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{\cos \theta - \sqrt{\eta^{-2} - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\eta^{-2} - \sin^2 \theta}} \right]^2 \quad (8)$$

其中, η 表示空气和 LC-RIS 之间的折射率之比。

此外, LC-RIS 的放大系数 ϑ 表示为

$$\vartheta = e^{\Gamma d} \quad (9)$$

其中, d 为 LC-RIS 的厚度, Γ 可根据双波动态耦合理论^[9]表示为

$$\Gamma = \frac{2\pi\eta_c^3}{\lambda \cos \varphi_B} r E \quad (10)$$

其中, λ 为光波波长, r 为电光系数, E 为 LC-RIS 的外加电场强度 ($E = v_u/d$)。 v_u 是电势, η_c 是 LC-RIS 的折射率。 v_u 和 η_c 的关系^[9]为

$$\xi = \begin{cases} \frac{1}{2} - 2\arctan \left[\exp \left(-\frac{v_u - v_{th}}{v_o} \right) \right], & v_u > v_{th} \\ 0, & v_{uc} \leq v_{th} \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{1}{\eta_c(\xi)} = \frac{\cos^2 \xi}{\eta_c^2} + \frac{\sin^2 \xi}{\eta_o^2} \quad (12)$$

其中, v_{th} 是临界电压阈值, v_o 是由 LC-RIS 材料决定的常数, η_c 和 η_o 分别是折射率的上界和下界。

2 LC-RIS 辅助的 VLC 系统可达安全传输速率最大化问题

2.1 优化问题建立

在图 1 所示的场景模型中, Bob 与 Eve 均能接收到光发射机发出的信号。为了确保通信的安全性, 人们希望发射机发送的光信号只能被 Bob 有效接收, 而不能被 Eve 窃取。基于这一目标, 本文从网络信息论的角度出发, 引入了 VLC 系统的“可达安全传输速率”概念。

根据文献[9]可知, 对于含有峰值功率约束 $|s| \leq A$ 的 VLC 信道, 可达安全传输速率 R_s 的下界可推导为

$$R_s = \frac{1}{2} \ln \frac{6h_B^2 A^2 + 3\pi e \sigma^2}{\pi e h_E^2 A^2 + 3\pi e \sigma^2} \quad (13)$$

其中, s 在 $[-A, A]$ 内取均匀分布, A 是光信号峰值功率。

本文以 LC-RIS 辅助的 VLC 系统的可达安全传输速率 R_s 的下界作为目标函数, 将 LC-RIS 的折射率作为优化变量, 建立相应的优化问题 P_1 。

$$P_1: \max_{\eta_c} R_s \quad (14a)$$

$$\text{s.t. } \eta_o \leq \eta_c \leq \eta_e \quad (14b)$$

2.2 基于粒子群(PSO)算法的求解方法

式(14)为非凸优化问题, 采用传统的凸优化方法难以求解。因此, 本文采用 PSO 算法对式(14)进行求解。PSO 优化的过程为粒子在每次迭代过程更新自身位置与速度的同时, 搜寻个体最佳适应度与全局最佳适应度, 并加以更新, 以获取最优解。

在第 t 次迭代过程中, 第 i 个粒子的位置和速度分别表示为 x_i^t 和 v_i^t , 其更新过程为

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (x_{i,pbest}^t - x_i^t) + c_2 r_2 (x_{gbest}^t - x_i^t) \quad (15)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (16)$$

其中, $i=1, 2, \dots, m$, ω 为惯性权重因子, c_1 与 c_2 为加速常数, r_1 与 r_2 是服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数; $t=1, 2, \dots$, t_{max} , t_{max} 为最大迭代次数。

基于 PSO 算法的求解过程如算法 1 所示。

算法 1 基于 PSO 算法的 VLC 系统可达安全传输速率优化算法

输入 粒子种群数量 m , 最大迭代次数 t_{max}

输出 $P_{gbest}^{t_{max}} = \eta^*$ 为最大迭代次数的全局最佳位置, 即 LC-RIS 折射率的最优值

1) PSO 初始化: 目标函数 R_s , 惯性权重因子 ω , 加速常数 c_1 和 c_2 , 每个粒子的初始位置与初始速度 x_i , v_i , 各个粒子的最佳位置 $P_{i,pbest}$ 与全局粒子最佳位置 P_{gbest} , 粒子的位置与速度范围分别控制在 $[\eta_o, \eta_e]$ 、 $[-v_{max}, v_{max}]$

2) while $t \leq t_{max}$

3) while $1 \leq i \leq m$

根据式(15)和式(16)更新每个粒子的位置与速度; 根据式(13)计算每个粒子的适应度

4) If x_i^t 的适应度 $> P_{i,pbest}^{t-1}$ 的适应度, 更新 $P_{i,pbest}^t = x_i^t$

5) End if

6) If x_i^t 的适应度 $> P_{gbest}^{t-1}$ 的适应度, 更新 $P_{gbest}^t = x_i^t$

7) End if

8) End while

9) End while

3 仿真结果分析

本文根据仿真结果对 LC-RIS 辅助的 VLC 系统的物理层安全传输性能进行评估,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

参数	取值
房间大小 $x \times y \times z/\text{m}$	$5 \times 5 \times 3$
接收机高度 Z_r/m	0.85
PD 的物理面积 A_{PD}/m^2	10^{-4}
半功率角 $\varphi_{1/2}/(^{\circ})$	70
接收机的滤光片增益 $T(\varphi)$	1.0
滤光片内部折射率 a	1.5
PD 的视场角 $\varphi_{\text{FOV}}/(^{\circ})$	80
空气折射率 n_a	1.0
阈值电压 V_{th}/V	1.34
常数电压 V_0/V	1.0
液晶 RIS 的上限折射率 n_e	1.7
液晶 RIS 的下限折射率 n_o	1.5
液晶 RIS 的厚度 d/mm	0.75
电光系数 $r/(\text{nm}/\text{V})$	12
信道带宽 B/MHz	200
噪声功率谱密度 $N_0/(\text{A}^2/\text{Hz})$	10^{-21}

3.1 可达安全速率随 Eve 位置变化情况

将 Bob 放置在房间的中心位置,而 Eve 放置在房间其它不同位置,得到可达安全传输速率随窃听者 Eve 位置变化情况如图 2 所示。可以看出,当 Eve 位于房间中心 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的区域内,VLC 系统可达安全传

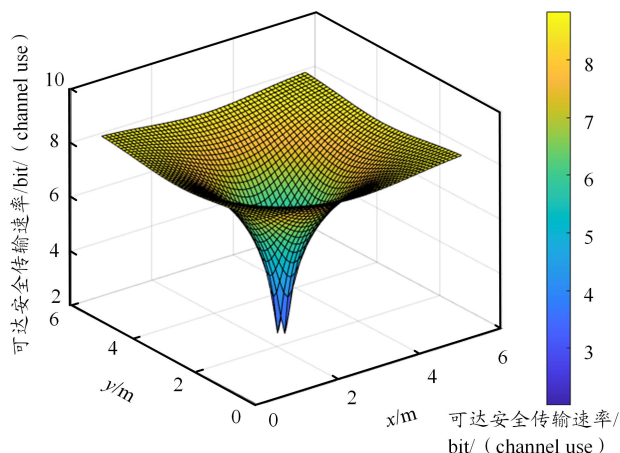


图 2 可达安全传输速率随窃听者 Eve 位置变化情况

输速率为 $2 \sim 5 \text{ bit}/(\text{channel use})$;当 Eve 位于房间中心 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 之外的区域时,VLC 系统可达安全传输速率为 $6 \sim 10 \text{ bit}/(\text{channel use})$ 。由此可见,Eve 离中心位置越远,Bob 所处信道的安全传输特性越好。

3.2 2 种系统下的可达安全传输速率对比

在折射率一定的条件下,假设 Eve 位于距离房间中心 $0.5 \sim 1.5 \text{ m}$ 的圆形区域内,而 Bob 位于房间中心位置。为了简化 Eve 的位置对 Bob 安全传输速率影响的分析,本文将 Eve 的位置区域等效为 Eve 接收端信号入射角度,得到基于 LC-RIS 辅助的 VLC 系统与采用无 LC-RIS 的传统 VLC 系统的可达安全传输速率对比情况如图 3 所示。可以看出,在不同的窃听者位置对应的入射角度下,基于 LC-RIS 辅助的 VLC 系统的可达安全传输速率相较于传统 VLC 系统整体提高了大约 $1 \text{ bit}/(\text{channel use})$,这表明物理层安全性的提升效果具有较好的鲁棒性。

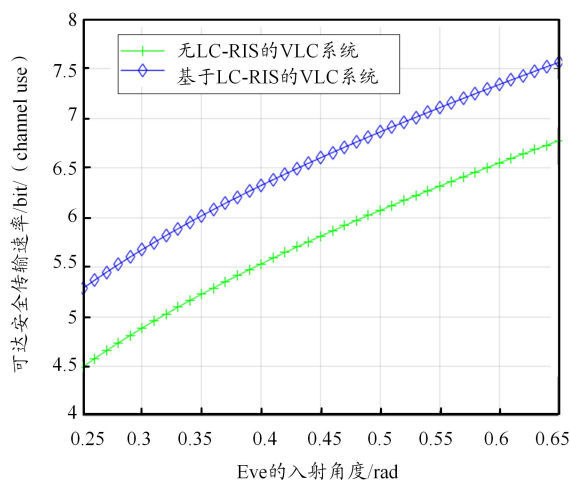


图 3 2 种系统下的可达安全传输速率对比情况

3.3 2 种算法情况下的可达安全传输速率对比

Bob 处于房间内的不同位置时,基于 PSO 算法与 Bsch 算法的可达安全传输速率对比图如图 4 所示。可以看出,在 3 种位置下,基于 PSO 算法的可达安全传输速率始终优于 Bsch 算法,这表明本文所提出的基于 PSO 算法的 LC-RIS 折射率优化算法具有较好的鲁棒性。

3.4 不同波长对可达安全传输速率的影响

在不同波长下(波长分别为 $723, 502, 410 \text{ nm}$),Bob 的可达安全传输速率情况如图 5 所示。可以看出,在较短波长(如 410 nm)下 LC-RIS 辅助的可达安全传输速率增益效果更为显著,这是因为 LC-RIS 在短波长光线下能够更有效地提升信道增益。

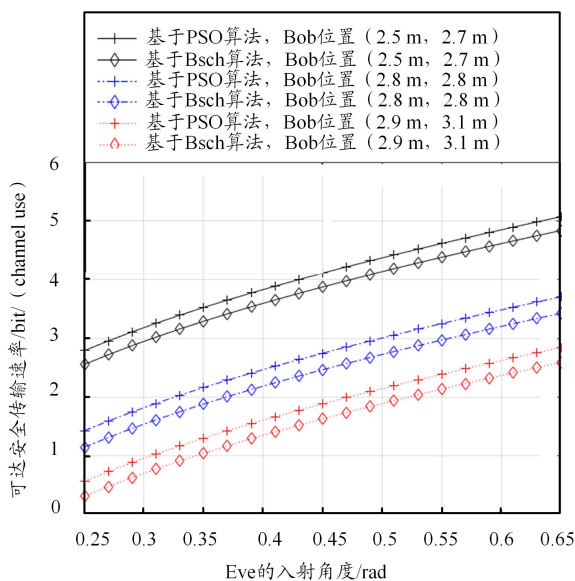


图4 2种算法情况下的可达安全传输速率对比图

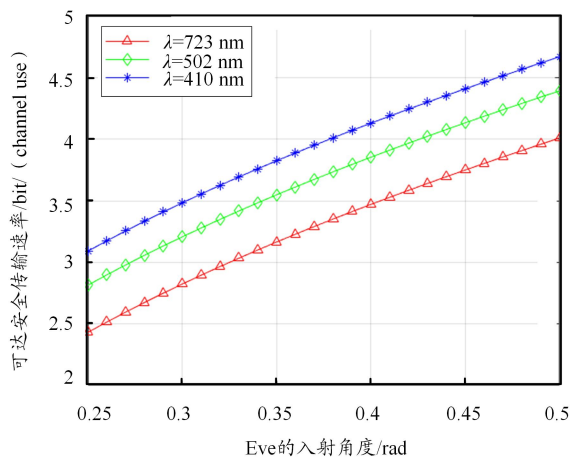


图5 不同波长下 Bob 的可达安全传输速率结果图

4 结束语

本文提出了一种基于 LS-RIS 辅助的 VLC 系统物

理层安全方法。仿真结果表明:相比传统的 VLC 系统, LC-RIS 辅助的 VLC 系统中合法用户的可达安全传输速率提高了 1 bit/(channel use);基于 PSO 算法的 LC-RIS 折射率优化算法具有较好的鲁棒性;LC-RIS 辅助的 VLC 系统中,短波长的可见光具有更好的信道增益与通信保密性。

参考文献:

- [1] ABDELHADY A, SALEM A, AMIN O, et al. Visible light communications via intelligent reflecting surfaces: Metasurfaces vs mirror arrays[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 2: 1–20.
- [2] ABDELHADY A, AMIN O, SALEM A, et al. Channel characterization of IRS-based visible light communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(3): 1913–1926.
- [3] QIAN L, CHI X, ZHAO L, et al. Secure visible light communications via a intelligent reflecting surfaces[C]//IEEE. Proceedings of ICC 2021-IEEE International Conference on Communications. Montreal: IEEE, 2021: 1–6.
- [4] SUN S, YANG F, SONG J, et al. Optimization on multiuser physical layer security of intelligent reflecting surface-aided VLC[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(7): 1344–1348.
- [5] SAIFALDEEN D, CIFTLER B, ABDALLAH M, et al. DRL-based IRS-assisted secure visible light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(6): 1–9.
- [6] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100–107.
- [7] ABOAGYE S, NDJIONGUE A, NGATCHED T, et al. Design and optimization of liquid crystal RIS-based visible light communication receivers[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(6): 1–7.
- [8] MARAQA O, NGATCHED T. Optimized design of joint mirror array and liquid crystal-based RIS-aided VLC systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(4): 1–11.
- [9] EL G A, KIM Y H. Network information theory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.