光电技术及应用

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260114003

基于IRS辅助的VLC系统性能优化

闫治洲，李佳薪，王旭东*

（大连海事大学 信息科学技术学院，辽宁 大连 116026）

摘 要： 针对室内可见光通信（VLC）视距链路存在遮挡场景，提出一种基于智能反射面（IRS）辅助的VLC系统设计方案。首先，基于室内VLC系统模型，引入IRS改善的非视距链路，有效补偿被遮挡链路的信道衰减；随后，对单/多墙面分布式部署场景进行优化设计。在单墙面场景下，以信道增益最大化为目标，构建“反射单元尺寸＋数量”的联合优化目标函数，并利用序列二次规划算法求解单墙面场景下的IRS关键参数；在多墙面分布式部署场景下，以可达数据速率最大化为目标，利用混合粒子群算法对IRS阵列数量及部署墙面数等参数配置进行优化。仿真结果表明，针对单墙面场景，在保持1×10^{-3}误符号率的条件下，联合优化后的方案相较于未优化和单独优化的方案分别节省了2.3 dB和1.1 dB信噪比；针对多墙面场景，在相同发送功率下，联合优化方案的可达速率较未优化方案提升23%，并且当目标速率为1.5×10^{4} bps时联合优化方案可获得8 dB的信噪比增益。所设计系统能够显著提升遮挡场景下的通信性能，为IRS辅助VLC的工程部署提供理论依据。

关键词： 室内可见光通信；智能反射面；序列二次规划；混合粒子群优化算法

中图分类号： TN406 **文章编号：** 1001－5868(2026)03－0564－11

Performance Optimization of IRS-Assisted VLC Systems

YAN Zhizhou, LI Jiaxin, WANG Xudong

(**Information Science Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, CHN**)

Abstract: To address the occlusion scenario of the line-of-sight link in indoor visible light communication (VLC) systems, this study proposes a system design scheme for VLC assisted by an intelligent reflecting surface (IRS). First, based on an indoor VLC system model, an IRS is introduced to improve the non-line-of-sight link, which effectively compensates for the channel attenuation of the occluded link. Subsequently, both single-wall and multiwall distributed deployment scenarios are designed. For the single-wall scenario, a joint optimization objective function of “reflective unit size＋number of units” is constructed to maximize channel gain, and the sequential quadratic programming algorithm is used to solve the key parameters of the IRS. For the multiwall distributed deployment scenario, to maximize the achievable data rate, the hybrid particle swarm algorithm is adopted to optimize the parameter configuration, such as the numbers of IRS arrays and deployed walls. Simulation results show that in the single-wall scenario, to maintain a symbol error rate of 1×10^{-3}, the proposed joint optimization scheme reduces the required signal-to-noise ratio (SNR) by 2.3 dB and 1.1 dB compared with the unoptimized and separately optimized schemes, respectively. In the multiwall scenario, under the same transmission power, the achievable rate of the joint optimization scheme is 23% higher than that of the unoptimized scheme, and when the target

收稿日期：2026－01－14.

* **通信作者：**王旭东

rate is 1.5×10^4 bps, the joint optimization scheme can achieve an SNR gain of 8 dB. The proposed scheme significantly improves the communication performance of the VLC system in the occlusion scenario and provides a theoretical basis for the engineering deployment of IRS-assisted VLC.

Key words: intelligent reflective surface; indoor visible light communication; sequential quadratic planning; hybrid particle swarm optimization algorithm

0　引言

随着全球对高速无线通信需求的持续增长，传统射频（RF）通信系统因频谱资源稀缺与带宽受限而面临严峻挑战[1]。可见光通信（VLC）作为一种具有免许可频谱、高传输速率、无电磁干扰和固有物理层安全等优势的无线通信技术，被视为第六代移动通信（6G）的重要组成部分[2-3]。然而，VLC技术在室内和车载场景的部署受到诸多限制，包括对视距路径的强依赖、信号路径损耗大、易受遮挡和环境光干扰等，以及需要权衡照明与通信功能的双重需求[4]。这些局限性严重制约了VLC系统在复杂的室内环境中进行大规模应用。

为满足VLC系统性能提高的需求，近年来学术界提出多种创新性解决方案。文献[5]通过引入内部量子效率的ABC模型，提出一种精确的电光频率响应模型以优化VLC中LED的性能，同时通过级联多个低电流LED，实现了更高的增益和发射功率。文献[6]提出一种概率星座成形的非正交多址接入方案，通过联合优化信道编码率、星座间距和概率质量函数，显著提升多用户上行VLC系统的频谱效率。文献[7]提出一种全光空间调制多输入多输出（MIMO）方案，通过光域处理空间调制信号和采用集中式功率不平衡策略，降低了大规模MIMO系统的误比特率。文献[8]提出一种基于时分多址的室内下行VLC系统能量效率优化方案，该方案采用块坐标下降限制框架来联合优化多LED发射机的预编码和时隙分配，从而实现了高效、低复杂度的系统性能。然而，上述方法在复杂的室内环境中仍面临信号覆盖范围有限、信道相关性高以及照明与通信平衡等问题，这限制了其在VLC实际场景中的广泛应用。

面对上述挑战，有研究提出在VLC系统中引入智能反射面（IRS）技术。通过动态调整IRS无源反射单元的角度和幅度，重塑光信号传播路径，从而显著增强信号强度，扩展覆盖范围，满足对视距路径的依赖，并对照明与通信功能进行平衡优化[9-10]。此外，利用IRS还可以动态调整反射路径，有效应对遮挡问题，进一步提升系统的鲁棒性[11]。在IRS辅助VLC系统研究中，文献[12]提出一种针对VLC的光学IRS定制化信道估计协议，通过联合时空采样和基于几何光学的非均匀码本调谐，显著降低了高维信道状态信息矩阵的计算开销。文献[13]设计一种基于光学和IRS辅助的聚合VLC-RF系统资源分配算法，通过块坐标下降方法迭代优化IRS配置、子信道分配和功率分配，显著提升了系统能量效率。文献[14]构建一种联合优化VLC接入点功率分配、IRS关联和IRS元件角度的框架，结合速率分割多址和功率域非正交多址方案，通过遗传算法优化安全VLC系统的最大最小保密速率和保密能量效率。文献[15]提出一种结合毫米波和VLC的智能混合系统，利用IRS和基于深度确定性策略梯度的深度强化学习来适应用户移动和高维因素引起的信道变化，从而改善信道质量。文献[16]提出一种基于新型光学可调制智能超表面辅助的无蜂窝可见光通信网络接入方案，其中IRS为收发端提供额外的反射信道，并利用反射系数可调制的特性，直接为网络用户提供无线接入。然而，上述文献均未涉及IRS阵列设计及优化部署对VLC系统性能所产生影响的深入探究。

针对基于IRS辅助VLC系统性能改善问题，本文进行深入研究，主要工作如下：

（1）建立包含直视（LoS）和非直视（NLoS）两种链路的IRS辅助VLC系统模型，推导考虑反射单元参数、阻塞概率的符号误码率（SER）与可达速率表达式，为优化提供理论基础；

（2）提出单墙面场景下IRS参数联合优化策略：以SER最小化为目标，构建反射单元尺寸与数量的约束优化模型，采用序列二次规划（SQP）算法求解，显著增强系统接收信号能力；

（3）设计多墙面分布式部署优化算法，即混合粒子群算法（HPSA）：融合粒子群的全局搜索与遗传算法的交叉变异特性，优化IRS阵列数量与部署墙面数的配置，通过分散式部署进一步优化系统容

量的同时解决多目标优化易陷入局部最优的问题；

（4）通过大量仿真验证所提方案的有效性，对比未优化、单独优化与联合优化的性能差异，并量化优化增益。

1 IRS辅助VLC系统

1.1 系统模型

图1所示为本研究所使用的IRS辅助室内VLC系统架构。系统包含三个核心部分：LED光源、IRS辅助传输链路和信号接收端。其中，LED光源安装于室内顶部作为信号发射单元；光电探测器（PD）水平置于接收平面充当接收单元，该接收平面离地高度设定为0.85 m；房间尺寸可表示为$x_r \times y_r \times z_r$。

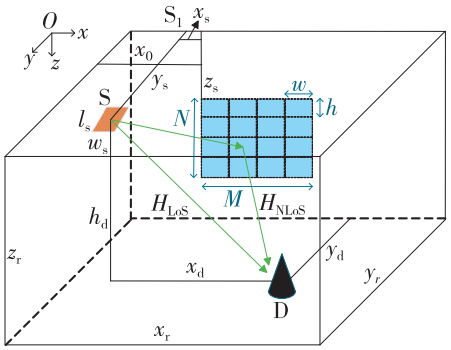


图1 室内IRS辅助VLC模型

系统中，LED发射源中心标记为S点，其在墙面的投影位置为S_1点，接收端中心标记为D点。IRS采用$M \times N$阵列结构，包含若干可独立调节角度的反射单元，这些单元均匀分布于x-z平面的墙体表面。参数x_d，y_d和h_d分别代表S点相对IRS阵列左上角在三个坐标轴方向的间距，参数x_d，y_d和h_d则表征D点相对S点在各坐标轴的位置偏移量。

单面墙分布式配置方案将反射单元随机划分成K个子阵列，其中$K \in N_+$，设$k \in \{1, 2, 3, \cdots, K\}$，这些子阵列均匀布置于同一墙面。针对第$k$个子阵列，其结构为$M_k \times N_k$的矩阵形式，各反射单元的宽、高尺寸分别设定为$w_k$和$h_k$。

在多墙面分布式配置方案中，如图2所示，K个IRS分布于N面墙，$N \in \{1, 2, 3, 4\}$，即反射单元阵列总数量为K，并假设在第n面墙上部署的阵列个数为K_n，且满足$\sum_{n=1}^{N} K_n = K$。第n面墙的第k个反射阵列用k_n标识，$k \in \{1, 2, 3, \cdots, K\}$，$n \in \{1, 2, 3, \cdots, N\}$，阵列按$M_{k_n}$行$N_{k_n}$列配置，反射单元宽度与高度分别定义为$w_{k_n}$和$h_{k_n}$。

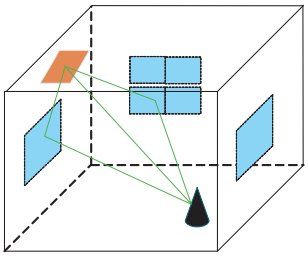


图2 多面墙分布式部署模型

1.2 信道增益

系统传输链路分为LoS链路和NLoS链路。当LoS链路被遮挡的概率为$p(0 \leqslant p \leqslant 1)$时，系统的总信道增益为：

$$H = (1-p)(H_{\mathrm{LoS}} + H_{\mathrm{NLoS}}) + pH_{\mathrm{NLoS}} = (1-p)H_{\mathrm{LoS}} + H_{\mathrm{NLoS}} \tag{1}$$

式中，H_{LoS}和H_{NLoS}分别表示LoS链路和NLoS链路的信道增益。

为简化LoS直射链路信道增益的计算过程，建立以光源中心O为坐标原点的笛卡尔坐标系统，如图3所示。

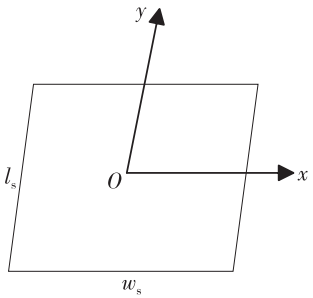


图3 平面光源

在此坐标系下，LoS链路的信道增益可表示为：

$$H_{\mathrm{LoS}} = \int_{-w_s/2}^{w_s/2} \int_{-w_s/2-l_s/2}^{l_s/2} P\left[L, \varphi(x,y)\right] \frac{\eta \varpi A_{\mathrm{D}} G \cos\left[\theta(x,y)\right] g\left[\theta(x,y)\right]}{d^2(x,y)} \mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{2}$$

式中，光源O的宽度与长度分别用w_s和l_s表示，η代表LED电光转换系数，ϖ为光电二极管的光响应度，A_{D}表示PD有效接收面积，G为跨阻放大器增益系数，θ为入射光与接收器法向的夹角，$g(\cdot)$表示光学集中器的聚光增益。在公式（2）中，$P\left[L, \varphi(x,y)\right]$采用朗伯辐射源模型：

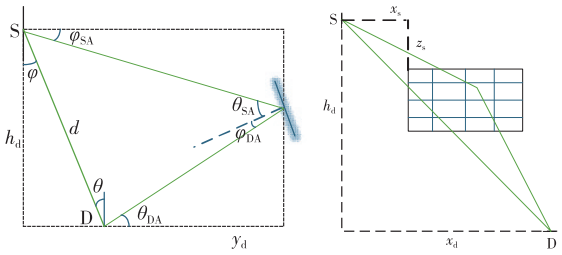
$$P\left[L,\varphi\left(x,y\right)\right]=\frac{L+1}{2\pi}\cos\left[\varphi\left(x,y\right)\right] \tag{3}$$

式中，L 为朗伯辐射阶数，用于表征发射机的方向性；φ 为光源初始方向与天花板的夹角，表示发射光线的角度。

发射机、接收机和IRS之间的空间位置关系如图4所示，表示为：

$$\cos\left[\varphi\left(x,y\right)\right]=\cos\left[\theta\left(x,y\right)\right]=\frac{h_{\mathrm{d}}}{d\left(x,y\right)}\cos\left[\varphi\left(x,y\right)\right] \tag{4}$$

式中，$d(x,y)$ 指光源上任意一点 (x,y) 到接收机的直线距离。



(a) 二维平面几何模型　　(b) 三维空间坐标模型

图4　收发机与镜面阵列之间的关系

根据图3中的坐标系，$d(x,y)$ 可表示为：

$$d\left(x,y\right)=\sqrt{\left(x_{\mathrm{d}}-x\right)^{2}+\left(y_{\mathrm{d}}-y_{\mathrm{s}}-y\right)^{2}+\left(h_{\mathrm{d}}\right)^{2}} \tag{5}$$

最终，LoS信道增益化简为：

$$H_{\mathrm{LoS}}=\int_{-w_{\mathrm{s}}/2}^{w_{\mathrm{s}}/2}\int_{-l_{\mathrm{s}}/2}^{l_{\mathrm{s}}/2}\frac{\left(L+1\right)\cos^{L}\left[\varphi\left(x,y\right)\right]}{2\pi}\frac{\eta\varpi A_{\mathrm{D}}G\cos\left[\theta\left(x,y\right)\right]}{d^{2}\left(x,y\right)}g\left[\theta\left(x,y\right)\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\int_{-w_{\mathrm{s}}/2}^{w_{\mathrm{s}}/2}\int_{-l_{\mathrm{s}}/2}^{l_{\mathrm{s}}/2}\frac{\left(L+1\right)\eta\varpi A_{\mathrm{D}}Gh_{\mathrm{d}}^{L+1}g\left[\theta(x,y)\right]}{2\pi d^{L+3}\left(x,y\right)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{6}$$

在IRS辅助VLC通信场景中，NLoS链路的增益为由发射光线通过IRS反射路径所实现的信道增益。针对IRS，单个反射单元的宽、高尺寸用 w 和 h 标识。为便于NLoS增益分析，建立各反射单元的独立直角坐标系，以单元几何中心为坐标原点。在第 (i,j) 个反射单元中，发射端和接收端的空间位置分别表示为：

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}-\left[x_{\mathrm{s}}+\left(j-1\right)w+\dfrac{w}{2}\right]\\ y_{\mathrm{s}}\\ -\left[z_{\mathrm{s}}+\left(i-1\right)h+\dfrac{h}{2}\right]\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}x_{\mathrm{d}}-\left[x_{\mathrm{s}}+\left(j-1\right)w+\dfrac{w}{2}\right]\\ y_{\mathrm{d}}\\ h_{\mathrm{d}}-\left[z_{\mathrm{s}}+\left(i-1\right)h+\dfrac{h}{2}\right]\end{bmatrix} \tag{7}$$

在IRS辅助的室内VLC系统中，NLoS链路的信道增益表示为：

$$H_{\mathrm{NLoS}}^{\mathrm{IRS}}=\eta\varpi A_{\mathrm{D}}G\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}E\left(\alpha_{i,j},\beta_{i,j}\right)g\left(\theta_{R_{i,j}}^{D}\right)\cos\left(\theta_{R_{i,j}}^{D}\right) \tag{8}$$

1.3　系统误码率

基于单个IRS辅助的室内VLC系统模型，接收信号 Y 可表示为：

式中，$\boldsymbol{R}_{i,j}$ 是第 (i,j) 块反射单元的中心点，$\theta_{R_{i,j}}^{D}$ 表示从 $\boldsymbol{R}_{i,j}$ 到 $\boldsymbol{D}$ 的反射光线与 z 轴之间的夹角，$E\left(\alpha_{i,j},\beta_{i,j}\right)$ 是接收机处由第 (i,j) 块反射单元造成的辐照度，与反射单元的反射系数 ρ 相关。

在未配置IRS的室内VLC系统中，NLoS链路增益主要源于墙面反射路径。为实现定量计算，将墙体分割为 $M\times N$ 个网格单元，各单元面积与第 (i,j) 块反射单元等同。此条件下，无IRS辅助时的NLoS增益可描述为：

$$H_{\mathrm{NLoS}}^{wall}=\eta\varpi G\rho\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}P\left(L,\varphi_{\mathrm{SA}_{i,j}}\right)\Delta A_{i,j}\cos\left(\theta_{\mathrm{SA}_{i,j}}\right)\cos\left(\theta_{\mathrm{DA}_{i,j}}\right)\times\frac{1}{d_{\mathrm{SA}_{i}}^{2}d_{\mathrm{DA}_{i}}^{2}}\begin{bmatrix}r_{d}P\left(L',\varphi_{\mathrm{DA}_{i,j}}\right)+\\ \left(1-r_{d}\right)P\left(L'',\varphi_{\mathrm{DA}_{i,j}}-\theta_{\mathrm{SA}_{i,j}}\right)\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中，单个反射单元面积记为 $\Delta A_{i,j}=w\times h$，$\varphi_{\mathrm{SA}_{i,j}}$ 表示光源初始光线方向与 y 轴的夹角，$\varphi_{\mathrm{DA}_{i,j}}$ 代表光线与墙面法向的夹角，$\theta_{\mathrm{SA}_{i,j}}$ 为发射端至墙面的入射角度，$\theta_{\mathrm{DA}_{i,j}}$ 为墙面至接收端的入射角度，如图4(a)所示。参数 r_{d} 表征扩散反射比例，L' 为扩散分量的方向性系数，L'' 表示镜面反射分量，$d_{SA_{i,j}}$ 和 $d_{DA_{i,j}}$ 分别为发射端到墙体及墙体到接收端的线性距离。

$$Y=\gamma H'X+Z=\gamma\left(\left(1-p\right)H_{\mathrm{LoS}}'+H_{\mathrm{NLoS}}'\right)X+Z \tag{10}$$

式中，γ定义为光电转换系数，计算式为$\gamma=\varpi\cdot A_{\mathrm{D}}\cdot G$；$H'$表示系统光信道增益；$Z$为均值为零、方差$\sigma^2$的加性高斯白噪声；$X$表示瞬时非负光强信号。

设LED的标称光强为P，其平均光强$E[X]$保持时间恒定，以符合VLC照明需求：

$$E[X]=\xi P \tag{11}$$

式中，ξ为调光目标，ξP为目标光强，调光目标应满足$0<\xi<1$。使用开关键控调制和硬判决解码，传输信号X服从等概率分布，取值为$X\in\{0,2\xi P\}$。基于上述模型，定义判决门限T为：

$$T=\gamma H'\xi P \tag{12}$$

因此，系统的SER可表示为：

$$P_{\mathrm{e}}=Pr(\mathrm{on})Pr(Y<T|\mathrm{on})+Pr(\mathrm{off})Pr(Y>T|\mathrm{off}) \tag{13}$$

式中，$Pr(\mathrm{on})$和$Pr(\mathrm{off})$分别表示发送“on”符号和发送“off”符号的概率，$Pr(Y<T|\mathrm{on})$和$Pr(Y>T|\mathrm{off})$分别为错误转移概率。由于发送符号等概率，SER可进一步简化为：

$$P_{\mathrm{e}}=\frac{1}{2}\left[Pr(Y<T|\mathrm{on})+Pr(Y>T|\mathrm{off})\right]=Q\left(\frac{T}{\sigma}\right) \tag{14}$$

分析表明，IRS辅助VLC系统的SER随光信道增益H'增大而降低，随LoS链路阻塞概率p增大而升高。

2 基于IRS辅助VLC系统优化

2.1 序列二次规划算法

在单墙面部署模型中，以SER最小化为目标构建反射单元尺寸与数量的约束优化模型，优化变量为$w,h/M,N$。在此优化问题中，变量维度较低，属于中小规模问题；关于反射单元的尺寸与数量带有明确的约束条件，且根据公式(14)可知系统的SER与光信道增益H'单调递减关系。SQP方法[17]在解决此类优化问题方面获得了广泛应用，其具有以下显著特点：收敛性优异，兼具全局收敛性和局部超线性收敛性；边界搜索能力强，有助于加速收敛过程；求解精度高，通过每次迭代求解二次规划子问题，充分利用目标函数的局部信息，优化结果比穷举搜索、简单启发式算法更精准；约束处理能力强，能直接处理不等式约束和等式约束，无需额外的约束转换，恰好匹配本设计“中小规模、连续约束、可导目标”的问题场景。

2.1.1 优化目标

在固定反射单元数量的前提下，优化的核心变量之一为每个反射单元的尺寸(即宽度w和高度h)。为简化优化问题的复杂度，假定各反射单元具有相同的宽高尺寸，则SER最小化的优化问题可描述为：

$$\begin{aligned}&\max_{w,h} H_{\mathrm{NLoS}}\\ &\text{s.t.}\quad wh\leqslant\frac{(x_{\mathrm{t}}-x_0)(z_{\mathrm{t}}-z_{\mathrm{s}})}{MN}\\ &\qquad w_{\min}\leqslant w\leqslant w_{\max}\\ &\qquad h_{\min}\leqslant h\leqslant h_{\max}\end{aligned} \tag{15}$$

在反射单元尺寸确定的条件下，IRS的可调参数之一为单元总数(即M行N列)。参照式(15)，该优化问题可建模为：

$$\begin{aligned}&\max_{w,h} H_{\mathrm{NLoS}}\\ &\text{s.t.}\quad wh\leqslant\frac{(x_{\mathrm{t}}-x_0)(z_{\mathrm{t}}-z_{\mathrm{s}})}{MN}\\ &\qquad 1\leqslant M\leqslant M_{\max}\\ &\qquad 1\leqslant N\leqslant N_{\max}\\ &\qquad M,N\in\mathbb{N}_+\end{aligned} \tag{16}$$

IRS总面积受w,h(或M,N)影响而改变。在总面积恒定约束下，同时优化单元尺寸(w,h)与单元数量(M,N)，该问题的数学表达为：

$$\begin{aligned}&\max_{M,N,w,h} H_{\mathrm{NLoS}}\\ &\text{s.t.}\quad wN=x_{\mathrm{t}}-x_0\\ &\qquad hM=z_{\mathrm{t}}-z_{\mathrm{s}}\\ &\qquad w_{\min}\leqslant w\leqslant w_{\max}\\ &\qquad h_{\min}\leqslant h\leqslant h_{\max}\\ &\qquad M,N\in\mathbb{N}_+\end{aligned} \tag{17}$$

由于目标函数具有复杂但问题规模较小的特点，可以采用SQP算法来解决该二维优化问题。SQP算法核心是每次迭代求解一个二次规划(QP)子问题，设优化变量维度为n，约束条件个数为m。单次迭代中，QP子问题的计算复杂度为$O\left[(n+m)^3\right]$。对于单墙面场景的优化问题，优化变量为单元尺寸(w,h)与单元数量(M,N)，维度$n=4$(实际因$w=h,M=N$简化为$n=2$)，约束条件(IRS总面积约束、物理尺寸约束等)个数$m\leqslant5$。因此，单次迭代复杂度为$\mathrm{O}\left[(2+5)^3\right]=O(343)$，迭代次数在50次以内，总计算复杂度约为$O(1.7\times10^4)$，属于低复杂度算法，在本研究场景下计算效率极高，可快速获得精准的最优解。

2.1.2　算法描述

$$\begin{cases}\min f(x)\\ \text{s.t. } g_i(x)\geqslant 0 \quad i\in I=\{1,2,\cdots,m_1\}\\ \quad h_j(x)=0 \quad j\in E=\{m_1+1,\cdots,m\}\end{cases} \tag{18}$$

式中，$\boldsymbol{g}_I(x)=\left[g_1(x),\quad\cdots,\quad g_{m_1}(x)\right]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{h}_E(x)=\left[h_{m_1+1}(x),\cdots,h_m(x)\right]^{\mathrm{T}}$，可采用全局序列二次规划算法求解。该算法兼具全局收敛特性和局部超线性收敛速度，是高效寻优方法之一。

设$\boldsymbol{x}_k$为当前迭代位置，通过二次规划子问题求得搜索方向$\boldsymbol{d}_k$，再经一维搜索确定步长a_k，从而获取下一迭代点$\boldsymbol{x}_{k+1}=\boldsymbol{x}_k+a_k\boldsymbol{d}_k$。

$$\begin{cases}\min\left[q(d)\right]=\nabla\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d}+\dfrac{1}{2}\boldsymbol{d}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{d}\\ \text{s.t. } \nabla\boldsymbol{g}_I(\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d}+\boldsymbol{g}_I(\boldsymbol{x}_k)\geqslant 0\\ \quad \nabla\boldsymbol{h}_E(\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d}+\boldsymbol{h}_E(\boldsymbol{x}_k)=0\end{cases} \tag{19}$$

式中，$\boldsymbol{H}_k$是海森矩阵，可表示为：

$$\boldsymbol{H}_k=\boldsymbol{H}\left(\boldsymbol{x}^{(k)},\boldsymbol{\mu}^{(k)}\right)=\nabla_x^2\boldsymbol{L}\left(\boldsymbol{x}^{(k)},\boldsymbol{\mu}^{(k)}\right) \tag{20}$$

式中，μ为拉格朗日乘子，与$h_j(x)=0$相关联，用于在优化过程中考虑这些约束。

2.1.3　算法步骤

针对IRS辅助VLC系统的优化目标，将目标函数定义为SER最小化，并综合考虑了LoS链路阻塞概率的影响，采用的算法流程如下：

(1)初始化：选取初始点作为优化变量的起始点，并将最小化SER作为SQP算法的目标函数；

(2)定义约束：设定约束条件，例如IRS尺寸的物理限制；

(3)梯度计算：在当前迭代点处，计算目标函数的梯度(一阶导数)和海森矩阵(二阶导数)或其近似。

(4)搜索方向：利用当前点的目标函数梯度和海森矩阵，以及线性化的约束，求解搜索方向d；

(5)线搜索：沿搜索方向d进行步长搜索，确定合适的步长alpha，以确保目标函数值单调下降；

(6)更新迭代：更新迭代点，$\boldsymbol{x}_{k+1}=\boldsymbol{x}_k+a_k\boldsymbol{d}_k$，验证是否符合全部约束，若违反约束则回到步骤(5)重新调整步长；

(7)收敛判断：若满足停止条件，则认为已找到问题的解，输出最终的迭代点，若不满足则返回步骤(3)。

2.2　混合粒子群算法

在多墙面部署模型中，优化变量呈现出离散性。而优化问题由于具有非凸性，极易陷入局部最优。为此，本文融合遗传算法与粒子群算法，所提出的HPSA流程如图5所示。该算法融合了粒子群算法收敛速度快且全局搜索能力强的特点，在处理多目标参数问题时，利用算法快速逼近全局最优的能力，并结合遗传算法的选择、交叉、变异机制防止早熟收敛，设计了基于可达速率的适应度函数，对IRS的部署方式进行优化。

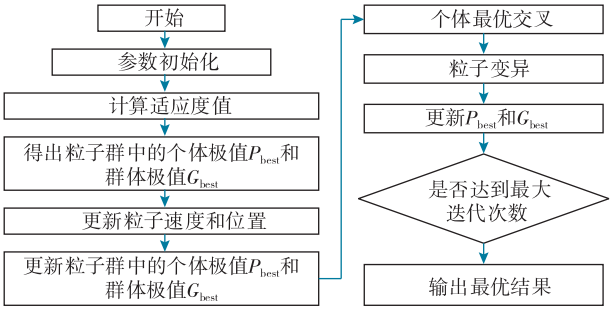


图5　混合粒子群算法流程图

在IRS总面积固定的前提下，优化的核心变量为阵列的部署方式。为降低问题的维度，设定各反射单元宽高一致，且各阵列行列数相同。因此，优化问题可建模为：

$$\begin{aligned}&\max_{K_n,N}\ H_{\mathrm{NLoS}}^{\mathrm{IRS}}\\ &\text{s.t.}\quad K_n\in N_+\\ &\qquad N\in\{1,2,3,4\}\end{aligned} \tag{21}$$

针对IRS辅助室内VLC系统，提出一种HPSA优化IRS的部署策略，其流程如下：

(1)参数初始化：针对待优化的IRS部署参数，设置每面墙部署的反射单元阵列个数为K_n，部署墙面数为N，优化维度$D=20$，学习因子$c_1=0.29$，$c_2=1.49$，惯性权重$\omega=0.9$，交叉概率为0.9，变异概率为0.1。各参数的设置参考经典配置策略的同时通过预实验验证，有效平衡种群多样性与收敛速度且保持较强的全局搜索能力；

(2)计算适应度值：以可达数据速率作为适应度函数，依据适应度值排序，确定当前个体最优值P_{best}与全局最优值G_{best}；

(3)更新粒子速度和位置：依据公式(22)和公式(23)，更新第k代第i个粒子的速度及位置，求解新个体适应度值，并刷新P_{best}与G_{best}；

$$v_{id}^{k+1}=\omega v_{id}^{k}+c_1r_1\left(P_{id}^{k}-x_{id}^{k}\right)+c_2r_2\left(P_{gd}^{k}-x_{id}^{k}\right) \tag{22}$$

$$x_{id}^{k+1}=x_{id}^{k}+v_{id}^{k+1} \tag{23}$$

式中，r_1，r_2为[0，1]区间内的随机变量，c_1，c_2为学习系数，D表示优化维度，d取值1～D，k为迭代代数，P_{id}^{k}表示个体最优位置，P_{gd}^{k}表示全局最优位置。

(4)个体最优交叉操作：随机抽取两个粒子，先将其与个体最优在第一维度交叉，再将交叉结果与全局最优在第二维度交叉。计算新个体适应度值，若优于原值则保留并更新P_{best}和G_{best}，否则舍弃该更新；

(5)粒子变异操作：按设定变异概率对个体执行变异，计算变异个体的适应度。若新适应度优于原值则接受变异并更新P_{best}与G_{best}，否则舍弃本次操作；

(6)输出最优结果：检查是否达到最大迭代次数，若是则终止并输出最优解，若否则迭代次数递增，返回步骤(3)至(5)循环执行，直至满足停止条件后输出最优解。

HPSA算法适用于离散、非凸优化问题，其复杂度主要取决于种群规模、迭代次数及优化维度。设种群规模为S，迭代次数为k，优化维度为D。粒子速度与位置更新的复杂度为$O(S\times D)$，交叉操作复杂度为$O(S\times D)$，变异操作复杂度为$O(S\times D)$，适应度函数计算复杂度为$O(S\times L)$(L为可达速率计算的基本操作数，$L\approx100$)。对于多墙面场景的优化问题，$S=50$，$k=200$，$D=20$，因此总计算复杂度为$O(k\times S\times(D+L))=O\left[200\times50\times(20+100)\right]=O(1.2\times10^{6})$，属于中等复杂度算法。相较于传统粒子群算法或遗传算法，HPSA通过交叉变异机制避免了局部最优，在相同复杂度下获得了更优的优化性能。

3 仿真与性能分析

3.1 IRS辅助VLC系统性能分析

3.1.1 单墙面分布式部署性能分析

设置反射单元数量为$M=N=10$，反射单元尺寸为$w=h=0.2$ m，基于IRS辅助的VLC系统模型仿真参数如表1所示。根据1.3节所述可知，系统的符号误码率SER受发送功率P、调光目标ξ和LoS链路阻塞概率p影响。在此基础上引入公式(5)，得出系统的符号误码率SER受收发机距离x_{d}影响的理论结果。

图6到图9的实验条件如表2所示。

表1 仿真参数及具体取值

参数	符号	参数值
房间尺寸	$x_{\text{r}}\times y_{\text{r}}\times z_{\text{r}}$	5 m×5 m×3 m
发射机尺寸	$w_{\text{s}}\times l_{\text{s}}$	0.01 m×0.01 m
光源S到IRS的距离	x_{s}，y_{s}，z_{s}	0.26 m，2.5 m，0.5 m
IRS左上角到墙的距离	x_0	2 m
接收机D到S的距离	y_{d}，h_{d}	2 m，3 m
接收机的有效面积	A_{D}	1×10^{-4} m^2
接收机响应度	ϖ	0.54 A/W
转换效率	η	0.44 W/A
视场半角	φ_{c}	90°
放大器增益	G	1 V/A
散射百分比	r_{d}	75%
反射系数	ρ	0.8
反射单元折射率	α	1.5
噪声标准差	σ	1
IRS总面积	$S_{\text{总}}$	12 m^2

表2 仿真参数及具体取值

图片序号	实验目的	实验条件
图6	SER与收发机x轴间距x_{d}的关系	$P=33$ dBm，$\xi=0.75$
图7	SER与调光目标ξ的关系	$P=33$ dBm，$x_{\text{d}}=0.2$ m
图8	SER与LoS链路阻塞概率p的关系	$P=33$ dBm，$x_{\text{d}}=0.2$m，$\xi=0.25$，0.75
图9	SER与发送功率P的关系	$x_{\text{d}}=0.2$m，$\xi=0.75$

图6对比了LoS链路完全受阻($p=1$)与无阻塞($p=0$)两种场景。相较于无IRS辅助的VLC系统，引入IRS后系统的SER表现更佳。当LoS路径存在时，收发距离缩短导致LoS增益提升，因此有LoS增益的VLC系统SER下降幅度明显大于无LoS增益情况。

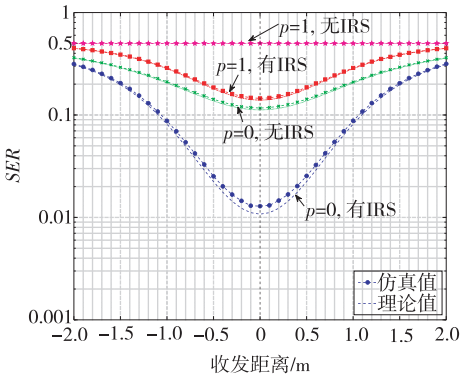


图6 不同收发距离下的SER

图7同样对比了$p=1$与$p=0$两种情况。结果表明，当LoS链路完全不阻塞时，随着调光目标ξ的增加，有IRS辅助的VLC系统性能改善程度优于无IRS辅助VLC系统。对于完全阻塞情况，有IRS辅助的VLC系统性能随着调光目标的增加略有

改善。

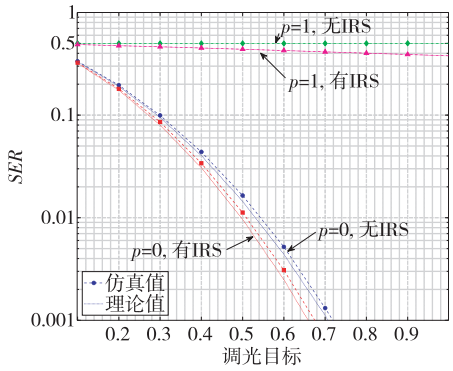


图 7　不同调光目标下的 SER

图 8 对比了调光目标 ξ 分别为 0.25 和 0.75 的情况。结果显示，LoS 链路在系统信道增益中占主导地位。无论是否采用 IRS，VLC 系统 SER 均随阻塞概率降低而改善。此外，随阻塞概率上升，IRS 辅助系统的 SER 表现优于传统系统。

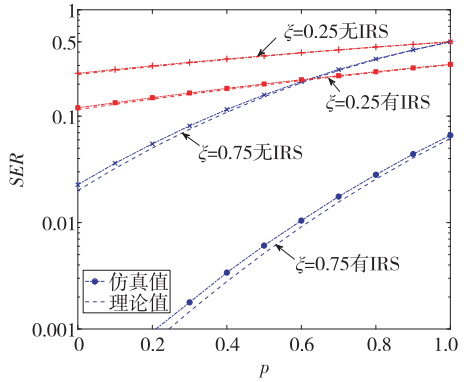


图 8　不同阻塞概率下的 SER

图 9 比较了 $p=1$ 与 $p=0$ 两种场景，数据显示 IRS 辅助系统的 SER 性能明显优于无 IRS 方案，验证了 IRS 的有效性。

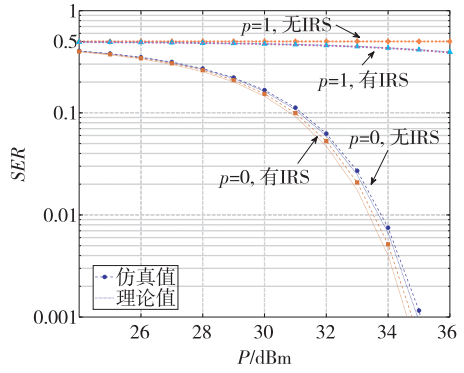


图 9　不同发送功率下的 SER

从图 6 到图 9 可以看出，系统的符号误码率 SER 受发送功率 P、调光目标 ξ、LoS 链路阻塞概率 p 和收发机距离 x_d 影响的理论与仿真结果高度一致，证实了所推导 SER 表达式的正确性。

同时，为了验证实验方案的普适性，对于非规则形状的反射单元和不同的空间尺度分别进行验证。

图 10 所示为规则与非规则两种情况。结果表明，在 IRS 面积相同的情况下，形状规则与否对系统性能的影响很小，所以方形单元的假设具有普适性。

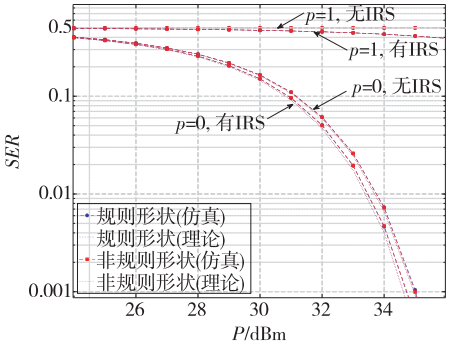


图 10　不同形状下的 SER

图 11 所示为不同空间尺度下的 SER 变化，以 5 m×5 m×3 m 为基准房间，大房间和小房间的尺寸分别为 10 m×10 m×4 m 和 3 m×3 m×2.5 m。结果显示，不同的空间尺度下系统性能不同。这是由于空间尺度会改变系统链路的传播距离，影响信道增益。但性能的提升趋势一致，验证了方案的普适性。

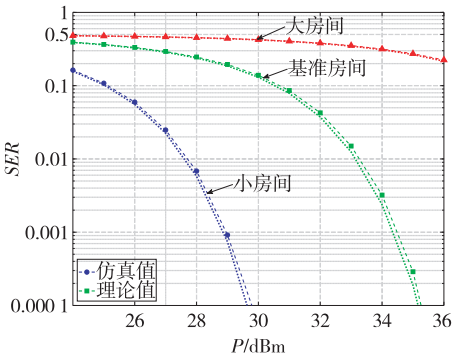


图 11　不同空间尺度下的 SER

3.1.2　多墙面分布式部署性能分析

为确保实验的可控性，每个反射单元的尺寸统一设定为 $w=h=0.1$ m，各反射阵列采用 $M=N=10$ 配置，对应每个阵列的面积为 $A=M\cdot N\cdot w\cdot h=1\ \mathrm{m}^2$。为控制变量，假定 IRS 的总面积 $S_{总}$ 为 12 m^2 保持不变，即阵列总数 $K=12$。

图 12 到图 15 的实验条件如表 3 所示。

表 3 仿真参数及具体取值

图片序号	实验目的	实验条件
图 12	R 与收发机 x 轴间距 x_d 的关系	P=30 dBm, p=0, r_q=3
图 13	R 与发送功率 P 的关系	x_d=0.2 m, p=0, r_q=3
图 14	R 与 LoS 链路阻塞概率 p 的关系	P=30 dBm, x_d=0.2 m, r_q=3
图 15	R 与光电功率比 r_q 的关系	P=30 dBm, x_d=0.2 m, p=0

从图 12 可见，当无 IRS 辅助时系统可达速率较低；引入 IRS 后，分散部署提升性能更明显。随着 x_d 增大，IRS 辅助 VLC 系统可达速率下降，并在 x_d=0 处达到最大值。

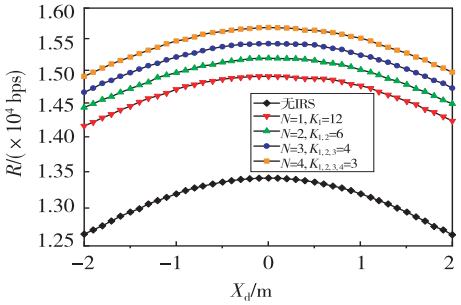


图 12 不同收发距离下的可达数据速率变化

图 13 中考虑了每面墙部署阵列数 K_n 和部署墙面数 N 不同的几种情况。结果表明，提高发送功率 P 能够提升系统的可达速率。相比无 IRS 辅助的场景，引入 IRS 后系统性能得到明显改善；当 IRS 总面积保持一致时，增加 IRS 部署的墙面数量可进一步提升系统的可达数据速率，说明 IRS 部署越分散则系统性能越好。

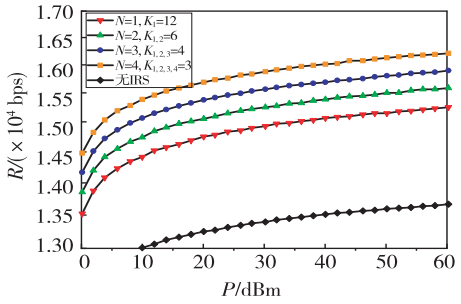


图 13 不同发送功率下的可达数据速率变化

如图 14 显示，随着阻塞概率 p 增大，采用 IRS 辅助的 VLC 系统速率呈下降趋势。可见，无 IRS 方案的性能波动明显且整体较低；在配置 IRS 的场景中，当总面积保持不变时，提高墙面部署数量能够提升可达速率，表明分散式 IRS 布局优于集中式配置。

如图 15 表明，参数 r_q 增大会导致 IRS 辅助 VLC 系统的可达速率降低。当未引入 IRS 时，系统表现欠佳；而采用 IRS 技术后，IRS 配置越分散系统性能越好。

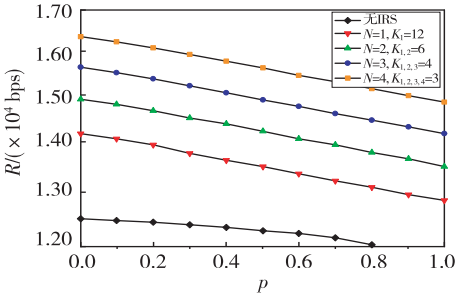


图 14 不同阻塞概率下的可达数据速率变化

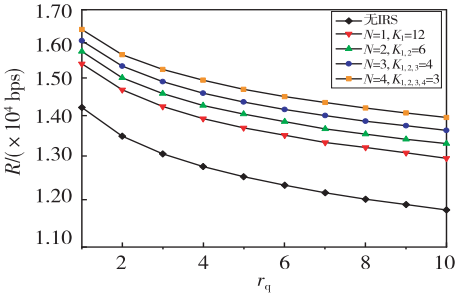


图 15 不同光电功率比下的可达数据速率变化

根据图 12～15 所示的结果可知，基准方案的性能指标相对较低；当配置 IRS 且总面积相近时，增加墙面布设数量可明显改善系统速率表现。这表明 IRS 部署越分散，系统性能越优。

图 16 进一步展示了在不同部署墙面数量下，可达数据速率随阵列数量变化的规律。结果表明，增加阵列数目能够提升系统速率；当阵列规模保持恒定时，扩大墙面部署范围同样能产生正向效果。这表明 IRS 阵列规模与墙面分布数量均对性能具有促进作用，验证了理论分析的正确性。

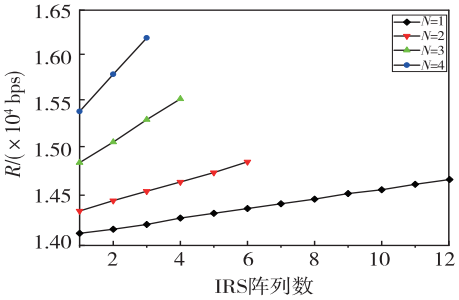


图 16 不同部署墙面数量下的可达数据速率变化

3.2 反射单元参数优化性能分析

针对所推导的公式(14)的 SER 表达式，本文分析表明反射单元的物理维度、配置数量及整体面积等因素会制约系统性能。鉴于此，下文将进一步探讨 IRS 核心参数的优化策略以提升系统能力。

3.2.1 单墙面分布式部署参数优化性能分析

实验条件设定为：调光参数 ξ=0.75，LoS 路径

全阻断($p=1$)，收发机横向距离 $x_d=0.2$ m。数值计算中采用方形反射单元假设($w=h$)；性能对比包括优化前IRS方案及传统无IRS方案；未优化方案中反射单元宽度 w 和高度 h 均设为 0.15 m。

图 17 验证了优化反射单元尺寸的有效性。可以看出，引入IRS技术后，VLC系统的平均误码率性能获得显著改善；相较于采用默认配置的IRS方案，经参数优化后的SER指标进一步降低。

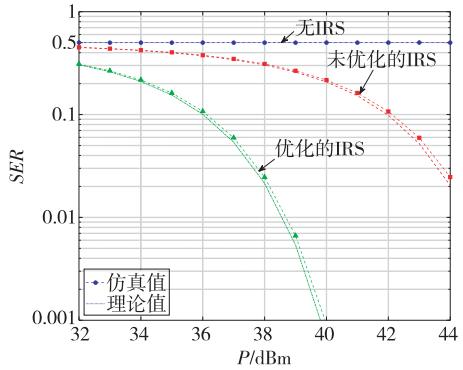


图 17　优化反射单元尺寸，SER与发送功率的关系

图 18 展示了联合优化反射单元尺寸和数量所带来的性能提升。仿真中反射单元采用方形结构($w=h$)，且IRS阵列配置为对称布局($M=N$)。基准方案参数设定为：单元边长 $w=h=0.25$ m，反射镜数量 $M=N=10$。结果表明，配置IRS的系统误码性能明显优于传统方案，而参数优化后的性能提升幅度更大，验证了理论推导的有效性。

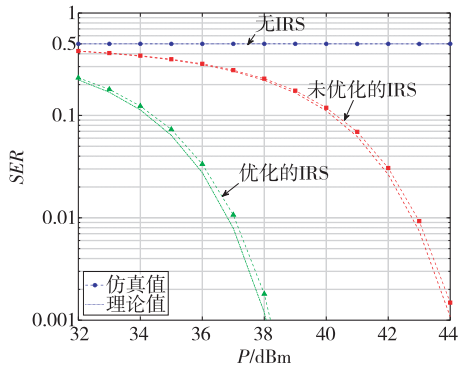


图 18　联合优化反射单元的尺寸数量，SER与发送功率的关系

图 19 则进一步对比联合优化与单独优化的性能差异。由于联合优化策略可对 M,N,w,h 四参数同步寻优，其性能始终显著优于单参数优化方法。以 $P=39$ dBm 为例，当单独优化单元尺寸(w,h)与联合优化全部参数时，系统SER分别达到 3.3×10^{-2} 和 8.7×10^{-3}。对比可知，未经优化的IRS配置性能最弱。

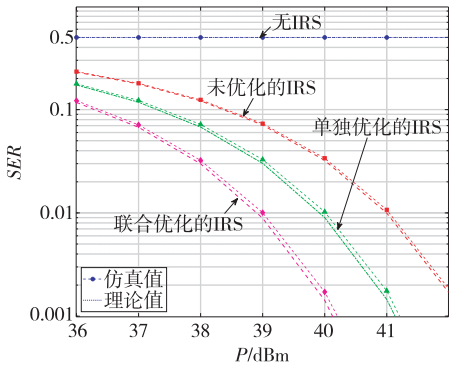


图 19　联合优化与单独优化的性能对比

3.2.2　多墙面分布式部署参数优化性能分析

针对IRS阵列数量和部署墙面数量进行优化分析，对比结果如图 20 所示。在无IRS辅助场景下，VLC系统的可达速率受限；而引入IRS技术后，系统吞吐量实现大幅跃升。此外，由 $K_n=6,N=1$ 与 $K_n=12,N=1$ 的性能曲线对比可知，优化反射阵列数量能够显著提升系统性能；对比 $K_n=12,N=1$ 与联合优化得到的 $K_n=3,N=4$ 的性能曲线可知，通过优化部署墙面数量及其上阵列分布可进一步提升系统性能。定量分析表明，当发射功率设定为 40 dBm时，通过对反射阵列规模及墙面部署策略进行联合寻优，系统可达速率由 1.3×10^4 bps 提高到 1.6×10^4 bps，验证了优化IRS阵列数量和部署墙面数量的有效性。

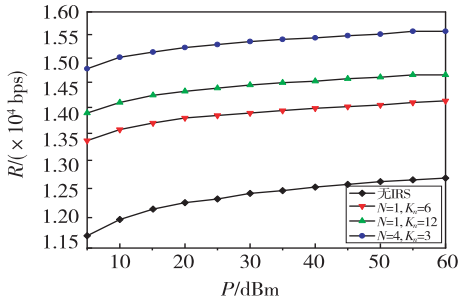


图 20　IRS阵列数量和部署墙面数量不同优化方案的性能对比

4　结束语

本文围绕IRS辅助VLC系统的性能优化问题，针对单墙面阵列设计与多墙面部署策略两类核心场景，开展系统的理论与仿真研究。主要工作包括：将IRS引入室内VLC系统中以解决直视链路遮挡的问题；建立考虑LoS阻塞概率的IRS辅助VLC系统模型；推导了SER与可达速率表达式，并验证

推导公式的准确性，为系统优化奠定理论基础；提出单墙面场景下反射单元尺寸与数量的联合优化策略（SQP算法），以及多墙面场景下的分布式部署优化算法（HPSA）。仿真结果表明：单墙面场景下，所提联合优化策略可将系统SER降至8.7×10^{-3}；多墙面场景下，联合优化后速率达1.6×10^{4} bps，两类方案均显著提升了系统性能。本研究的核心创新为在复杂室内环境下的VLC系统中引入IRS，为系统提供了“参数优化-部署优化”的完整解决方案。未来工作可进一步拓展至多约束联合优化，针对VLC通信与照明双重功能需求，联合优化通信性能、光照强度、照明均匀度等多维度指标，满足实际应用场景的综合性能最优需求。

参考文献：

[1] Tang P, Yin Y, Tong Y, et al. Channel characterization and modeling for VLC-IoE applications in 6G: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(21): 34872-34895.

[2] Li X, Zhang Y. Visible light communication for 6G: Prospects and challenges [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(8): 8901-8915.

[3] Yang H, Wang Q. High-speed visible light communication systems: Design and optimization [J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(2): 567-580.

[4] 黄名川，王旭东，吴 楠. 基于深度学习的室内可见光通信光源配置策略[J]. 光通信技术，2024，48(2)：18-23.
Huang Mingchuan, Wang Xudong, Wu Nan. Light source configuration strategy for indoor visible light communication based on deep learning [J]. Optical Communication Technology, 2024, 48(2): 18-23.

[5] Xiong J, Li M, Zhang R, et al. Precise frequency response of COTS LED for VLC using internal quantum efficiency metric [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 1376-1386.

[6] Kafizov A, Elzanaty A, Alouini M S. Probabilistic constellation shaping for enhancing spectral efficiency in NOMA VLC systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(8): 9958-9971.

[7] Li Y, Cao X, Tang J, et al. Energy-efficient optical-aided VLC-MIMO system with centralised optimal PI strategy [J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(7): 3059-3069.

[8] Ihsan A, Asif M, Ullah Khan W, et al. Energy-efficient TDMA-NOMA for RIS-assisted ultra-dense VLC networks [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2025, 9(3): 1239-1253.

[9] Xu S, Wu Y, Zhang L, et al. Simultaneous position and orientation estimation for reconfigurable intelligent surfaces-assisted visible light communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(1): 861-876.

[10] Ahmed M, Raza S, Amin Soofi A, et al. Active reconfigurable intelligent surfaces: expanding the frontiers of wireless communication-a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2025, 27(2): 839-869.

[11] Sarkar D, Yogita, Yadav S S, et al. A comprehensive survey on IRS-assisted NOMA-based 6G wireless network: design perspectives, challenges and future directions [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2024, 21(2): 2539-2562.

[12] Sun S, Yang F, Mei W, et al. Channel estimation for optical intelligent reflecting surface-assisted VLC system: a joint space-time sampling approach [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2025, 43(3): 867-882.

[13] An N, Yang F, Cheng L, et al. IRS-assisted aggregated VLC-RF system: resource allocation for energy efficiency maximization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(10): 12578-12593.

[14] Tang R, Liu Z. Hybrid modulation with IRS for enhanced VLC performance [J]. Optics Letters, 2024, 49(11): 3012-3015.

[15] Saifaldeen D A, Al-Baseer A M, Ciftler B S, et al. DRL-based IRS-assisted secure hybrid visible light and mmWave communications [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 3007-3020.

[16] 贾林琼，冯事成，乐淑娟，等. 可调制光学IRS辅助无蜂窝VLC网络的接入资源管理算法[J]. 电子与信息学报，2025，47(2)：397-408.
Jia Linqiong, Feng Shicheng, Le Shujuan, et al. Joint resource management for tunable optical IRS-aided cell-free VLC networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(2): 397-408.

[17] 王旭东，董文杰，吴 楠. 基于TDOA/AOA混合的高精度室内可见光定位算法[J]. 系统工程与电子技术，2019，41(10)：2371-2377.
Wang Xudong, Dong Wenjie, Wu Nan. Hybrid TDOA/AOA algorithm based high accuracy indoor visible light positioning [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(10): 2371-2377.

作者简介：

闫治洲（2001—），男，黑龙江省哈尔滨市人，硕士研究生，主要研究方向为室内可见光通信；

王旭东（1967—），男，黑龙江省哈尔滨市人，博士，教授，硕士生导师，主要研究方向为MIMO无线通信、空间调制、可见光无线通信及定位技术。