

基于烟花算法的可见光通信光源功率优化方法

游春霞¹, 胡青松^{2*}, 李世党¹

(1. 江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏徐州 221116; 2. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏徐州 221008)

摘要: 为了改善室内可见光通信系统接收平面光信号信噪比波动大的问题, 提高可见光通信系统的整体性能, 设计了基于群体优化算法——烟花算法的可见光通信系统的光源功率优化算法. 该算法以无线光接收平面的信噪比因子为优化目标, 优化每个LED(Light Emitting Diode)光源的发射功率, 获取接收平面最优信噪比因子, 有效降低光接收平面光信号波动度. 结果表明, 当光源数量为16个点光源时, 接收平面信噪比因子比等功率的光源分布降低了45%, 显著改善了接收光信号的波动幅度, 从而保证不同位置点的光通信用户获得同等通信质量. 该方法适用于任意数量和位置的LED光源, 不受光源数量和位置的限制. 对比分析发现, 增加光源数量, 接收平面信噪比因子更小, 信噪比分布均匀性更优.

关键词: 可见光通信; 烟花算法; 群体优化算法; 光源功率优化; 信噪比因子

基金项目: 国家自然科学基金(No.51874299, No.62371451); 江苏省产学研合作项目(No.BY2020580); 江苏师范大学校博士科研基金项目(No.18XLRS015)

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)06-2083-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220193

A Power Optimization Method of Light Sources Based on Fireworks Algorithm in Visible Light Communications

YOU Chun-xia¹, HU Qing-song^{2*}, LI Shi-dang¹

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: To solve the large fluctuation problem of signal-to-noise ratio of optical signals on the received plane in the indoor visible light communication system and improve the overall performance of the visible light communication system, a light source power optimization algorithm for the visible light communication system based on the swarm optimization algorithm — fireworks algorithm is proposed. The algorithm takes the signal-to-noise ratio factor of the wireless light-receiving plane as the optimization goal, optimizes the transmit power of each LED (Light Emitting Diode) light source, obtains the optimal signal-to-noise ratio factor on the receiving plane, and effectively reduces the optical signal fluctuation of the light-receiving plane. The results show that when the number of light sources is 16 point light sources, the signal-to-noise ratio factor on the receiving plane is reduced by 45% compared with the equal power light sources, which significantly improves the fluctuation amplitude of the received optical signal, thereby ensuring that the optical communication users at different positions can obtain the same communication quality. This method is suitable for any number and position of LED light sources, and is not limited by the number and positions of light sources. The comparative analysis shows that the signal-to-noise ratio factor of the receiving plane is smaller and the uniformity of the signal-to-noise ratio distribution is better with the increase of the number of light sources.

Key words: visible light communication; fireworks algorithm; swarm optimization algorithm; power optimization of light sources; signal-to-noise ratio factor

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.51874299, No.62371451); Jiangsu Provincial Industry-University-Research Institute Cooperation Project (No.BY2020580); Jiangsu Normal University Doctoral Research Fund Project (No.18XLRS015)

1 引言

可见光通信以其高速通信速度、太赫兹的免费频谱资源、无电磁辐射、集照明与通信于一体的高度节能等优势受到越来越多研究机构和学者的关注和研究,是未来短距离无线通信的极优通信方式,可以有效解决无线通信最后一米的问题^[1-3]。

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)光源以其高速调制特性,作为可见光通信的光源,目前,LED光源作为第三代电光源广泛应用于各个领域作为照明光源,现有的LED光源分布以等功率矩阵分布居多,也有一些场合使用圆形光源分布或者其他一些特殊形式的光源分布。如此分布的LED光源应用于可见光通信系统时导致接收平面信号信噪比分布不均匀,位于光源下方距离较近位置光信号功率很强,位于偏远位置点接收光信号极其微弱,不同位置光功率的波动幅度极大,影响了整个可见光系统的整体性能。

为提高光通信接收平面接收光信号的均匀性,使得不同的接收终端接收同等质量的信号,现有方法中主要是以下几种方法:一是调整LED光源位置,二是调整LED光源自身特性,三是优化LED光源功率因子。关于LED光源位置调节,起初可见光通信系统光源位于通信空间顶部中心区域,接收平面上接收光信号信噪比波动很大,随后日本Nakagawa团队设计了分组LED阵列式光源分布,并分析了这种LED分布的具体性能^[1]。2012年,新加坡南洋理工大学Wang Zixiong等人改进了光源分布,在不影响美观的基础上,设计了均匀圆周加角落补偿的光源分布模式,12个等功率LED光源分布于半径为 r 的圆周上,半径可调,另外4个等功率LED光源位于通信空间顶部的4个角落位置,大幅减小了接收光信号信噪比波动^[4]。之后又提出了通过倾斜光接收器的角度进一步降低接收平面的信号信噪比波动的方法^[5,6]。文献[7]研究了特殊车辆中可见光通信阵列光源的光源分布优化方案,形成了中心补偿的光源分布,文献[8]研究了均匀阵列分布中光源之间间隔距离和光源起始位置分布,陈勇等人分析了优化光源阵列间距、LED光源半功率角和功率因子降低接收面光信号波动的方法^[9]。文献[10]提出应用支持向量机优化方法选择几种固定LED位置的方案,获得最小的系统误码率。冷亭亭等人设计了根据接收用户的位置和速度,应用朴素的贝叶斯算法选择几种LED组合方案的最优方案^[11]。金建力等人提出应用一种自由曲面光学发生天线,改善通信范围内光信号均匀性的方法^[12]。Ding等人研究了应用进化算法(Evolutionary Algorithm, EA)优化LED功率因子以获得均匀接收平面光信号的方法,接收信号功率波动降低了26.5%^[13],本文作者近年来研究了煤矿工作面可见光通信系统中阵

列式光源分布中边缘功率优化的方法,以及光源分布一维二维三维位置优化方法,从而有效降低煤矿工作面可见光通信信噪比波动^[14]。

近几年,在可见光通信系统中,光束成形技术(VLC Beamforming)得到了广泛研究,即对特定位置的光接收终端发送光信号,以提高可见光通信系统的效率。此技术的应用需感知接收终端的位置,还会影响其他位置用户的照明效果。

以上光源分布的研究中存在以下几个方面的局限性。首先,由于可见光通信的光源安装需要考虑美观因素,不太可能按照SNR(Signal to Noise Ratio, SNR)波动最小的最优位置安装光源。其次,LED光源的数量一般不能任意设定,受到布局的影响,只能设定确定数量的LED光源数量。

本文应用群体优化算法优化所有LED光源的发射功率,光源数量可以根据实际需要设定,在不改变光源位置的前提下,以接收光平面的信噪比因子最小为优化目标,获得每个LED光源的最优功率,详细介绍了烟花算法的优化过程,光源数量为16时,比等功率LED光源功率,接收平面信噪比因子降低了45%。

2 系统模型

2.1 可见光通信系统LED光源分布

室内可见光通信系统如图1所示,LED光源安装于室内天花板平面上,光源向下发射无线光,LED光源与室内人员或者其他电子设备之间通过无线光通信进行数据交换。LED光源位于可见光通信空间上部空间,该通信空间为宽5 m、长5 m、高3 m,共有LED光源数量为 N 个,以均匀阵列分布形式位于可见光通信空间顶部,LED光源空间坐标的三维图如图2所示,设定整个通信空间左下角点位置为空间三维坐标原点,空间三维坐标为 $(0, 0, 0)$, N 个LED点光源三维横坐标分别为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$, N 个LED点光源纵坐标分别为 $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_N$, N 个LED点光源其功率分别为 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N$, i 为LED光源序号, P_i 为第 i 个LED光源的功率值。

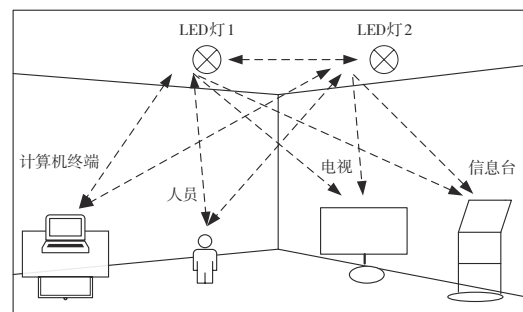


图1 室内可见光通信系统

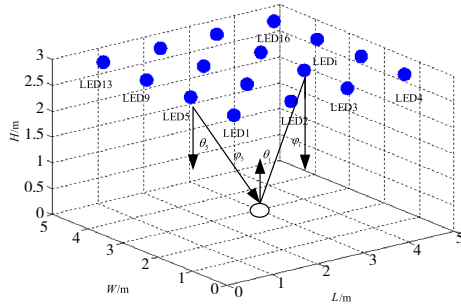


图2 多个LED点光源照射下接收光信号示意图

2.2 多个LED光源照射下信道模型

数量为 N 的多个LED点光源照射下,无线可见光通信系统如图1所示,由于可见光通信接收的光信号百分之九十以上来源于光直接照射,本文只考虑光直线传播接收功率,不考虑多次反射后接收的光信号,无线光接收点 j 在多个LED点光源作用下获得的信号为多个LED光源信号的叠加,其接收信号的信噪比为^[1]

$$\text{SNR}_j = \frac{P_s}{P_{\text{noise}}} = \frac{\sum_{i=1}^N (\gamma H_i(0))^2 \overline{X_i^2(t)}}{\sigma^2 B} \quad (1)$$

式(1)中, P_s 为接收有效信号的平均功率; P_{noise} 为接收信号中噪声的平均功率,干扰噪声信号均值为0,方差为 σ^2 的高斯白噪声, B 为可见光通信系统的带宽; γ 为光接收器光电二极管的光电转换系数; $H_i(0)$ 为第 i 个LED点光源与光接收点 j 之间的无线光传输信道的直流增益; $X_i(t)$ 为第 i 个LED光源发出的经过调制后的电信号; $\overline{X_i^2(t)}$ 是第 i 个LED点光源发出电信号的平均功率, P_i 为其功率值,即为 $P_i(t) = \overline{X_i^2(t)}$.

LED点光源选择服从朗伯分布的光源模型,其辐照强度为^[1]

$$I(\varphi_i) = \frac{(m+1)\cos^m(\varphi_i)}{2\pi} \quad (2)$$

其中, φ_i 为第 i 个LED光源的光辐射角, $m = \ln(1/2)/\ln(\cos(\varphi_{1/2}))$, $\varphi_{1/2}$ 为第 i 个LED点光源的半功率角,光源出厂时此数值已经确定,由LED的生产工艺决定此数值.

第 i 个LED光源点与接收平面接收点 j 之间的直视(Line of Sight, LOS)信道直流增益 $H_i(0)$ 为

$$H_i(0) = \frac{I(\varphi_i)\cos(\theta_i)A}{D_i^2} = \frac{(m+1)\cos^m(\varphi_i)A\cos(\theta_i)}{2\pi D_i^2} \quad (3)$$

其中, A 为无线光信号接收器光电二极管的光接收面积, θ_i 为无线光信号入射角, D_i 为无线信号传输距离,

LED光源和光接收器均为水平放置方式.

为了衡量接收平面接收信号信噪比均匀性,引入信噪比因子 Q_{SNR} 作为其评价函数,信噪比因子为SNR标准差与SNR均值的比值,计算公式如下:

$$Q_{\text{SNR}} = \frac{\sqrt{\text{var}(\text{SNR})}}{\overline{\text{SNR}}} \quad (4)$$

其中, $\text{var}(\text{SNR})$ 为整个光接收平面所有接收点接收信号的信噪比方差, $\overline{\text{SNR}}$ 为所有接收点接收信号的信噪比均值,SNR因子值越小,则接收平面光信号的方差与均值的比值越小,接收平面光信号SNR波动越小,接收平面上接收信号的均匀性越高.

3 LED光源功率优化

3.1 LED功率优化系统模型

在图2所示LED光源空间布局下,共 N 个LED光源,所有LED光源优化的数学模型如下.

N 个LED光源的总功率为 P , 即

$$P = \sum_{i=1}^N P_i \quad (5)$$

其中, N 为LED光源总数量, P_i 为序号 i 的LED光源的功率.接收点接收光信号的信噪比计算公式如式(1)所示.

在接收平面中每间隔一段距离选取一个测试点,整个接收平面所有接收点信噪比方差记为 $\text{var}(\text{SNR})$,所有接收点信噪比均值记为 $\overline{\text{SNR}}$,由信噪比因子 Q_{SNR} 评价接收平面上所有用户在接收平面上接收到光信号的均匀性,作为后续群体优化算法的目标函数,SNR因子值越小,在接收平面上所有用户的接收光信号的均匀性越高,位于不同位置的用户通信质量越接近.

3.2 基于烟花算法的功率优化

烟花算法^[15-20]是近年来由国内学者提出的一种新的群体智能优化算法,该算法模拟烟花在空中的爆炸形式,具有解决复杂问题全局最优解的能力,避免陷入局部最优解,对目标要求低,不需要目标函数的梯度信息.为此,我们选择烟花算法作为功率优化的优化算法.

将SNR因子 Q_{SNR} 设置为烟花算法的目标函数,LED光源功率化即为寻求一组最优的LED光源功率 $P_i, i=1, 2, \dots, N$ 使得光接收平面的信噪比SNR因子值最小.采用 $P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}$ 表示每个LED光源允许的功率值范围, P_{\min}, P_{\max} 为LED光源允许功率的最大值和最小值,在搜索空间范围内随机产生 n 个初始位置作为烟花位置 F_1, F_2, \dots, F_n , 每个烟花位置均为一个 N 维空间位置点,分别表示 N 个LED光源的功率值.

每个烟花在空中分别爆炸,产生若干数量的火花,序列号为 i 的烟花产生的火花数量为

$$s_i = v \cdot \frac{y_{\max} - Q(F_i) + \zeta}{\sum_{i=1}^n (y_{\max} - Q(F_i)) + \zeta} \quad (6)$$

其中, v 是为了控制所有烟花产生的总火花数量设定的参数值, 所有 n 个烟花中最差(大)的目标函数值为 y_{\max} , $Q(F_i)$ 是第 i 个烟花的目标函数值, ζ 是一个非常小的正数, 为了避免出现 0/0 无意义的情况而设置的一个小数数值.

每个火花位置计算步骤如下.

步骤 1 初始化火花位置 $\tilde{F}_j = F_j$;

步骤 2 生成随机数 $z, z = \text{round}(w \cdot \text{rand}(0, 1))$;

步骤 3 在 \tilde{F}_j 的 N 维中随机选择 z 维;

步骤 4 计算烟花的爆炸幅度值 A_i

$$A_i = \hat{A} \cdot \frac{Q(F_i) - F_{\min}}{\sum_{i=1}^n (Q(F_i) - F_{\min})} \quad (7)$$

步骤 5 随机选取幅值 $h = A_i \cdot \text{rand}(0, 1)$;

步骤 6 步骤 3 中选择的 z 维数据, 每一维数据的值增加 h , 即 $\tilde{F}_k^j = \tilde{F}_k^j + h, k = 1, 2, \dots, z$;

步骤 7 若 \tilde{F}_k^j 超出数值允许范围, 则对 \tilde{F}_k^j 的数值按以下计算方法进行调整.

$$\tilde{F}_k^j = P_{\min} + \left| \tilde{F}_k^j \right| \% (P_{\max} - P_{\min}) \quad (8)$$

在上述计算中, w 为位置点 L_i 的维数, 将维数设置为 N 维, \hat{A} 表示烟花的最大爆炸幅度, $F_{\min} = \min(Q(F_i)), i = 1, 2, \dots, n$ 是所有烟花的目标函数中数值最小的函数值, 函数 round 为功能四舍五入的函数, 随机函数 $\text{rand}(0, 1)$ 产生 1 个数值在 0~1 之间服从均匀分布的随机数, $\%$ 为功能为取余的运算.

为了避免陷入局部最优, 保持火花的多样性, 在产生上述火花的同时, 使用高斯爆炸产生一些特殊位置的火花, 因此需要改变上述过程. 步骤 4 改为: 确定高斯系数 $g = \text{Gaussian}(1, 1)$; 步骤 5 改为: 随机选取 z 维数据, 将各维数值修正为 $\tilde{F}_k^j = \tilde{F}_k^j \cdot g$, 其余维数数值保持不变, 从而形成一个特殊位置的高斯火花; 步骤 6 改为: 若 \tilde{F}_k^j 超出位置值允许范围, 则用式(8)对 \tilde{F}_k^j 数值进行调整, 调整在功率数值允许范围内.

$g = \text{Gaussian}(1, 1)$ 函数产生 1 个服从高斯分布的随机数, 在所有的普通火花、高斯火花和烟花中, 选择目标函数值最小的位置, 确定为下一次迭代的烟花位置, 另外 $n-1$ 个烟花位置在剩余位置所有烟花中以一定概率选取. 每个位置被选中为烟花的概率如式(9)所示, 从而保持下一次迭代烟花位置的多样性, 避免陷入局部最优解.

$$p(F_i) = \frac{R(F_i)}{\sum_{j \in K} R(F_j)} \quad (9)$$

上式中 $R(F_i)$ 为 F_i 到所有其他点 F_j 的距离和值, $d()$ 为两个位置点之间距离.

$$R(F_i) = \sum_{j \in K} d(F_i, F_j) \quad (10)$$

当迭代次数超过设定数量, 或者 SNR 因子值为最小值 0 时, 优化算法结束. 此时, SNR 因子值最小的那个烟花即为 N 个 LED 光源功率的最优值.

烟花算法优化光源功率的流程图如图 3.

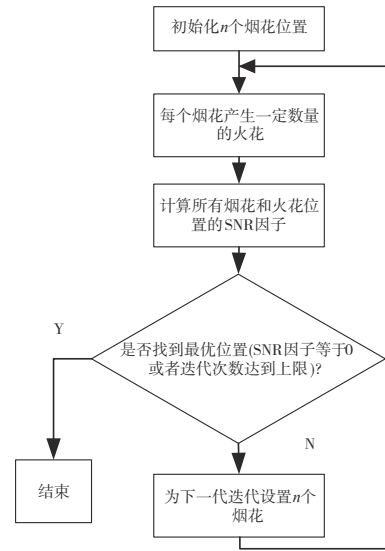


图 3 烟花算法功率优化流程图

4 仿真结果及分析

按照图 2 空间三维位置布置 LED 光源, 可见光通信系统参数如表 1 所示.

表 1 室内可见光通信系统参数

参数	数值
长	5 m
宽	5 m
高	3 m
光接收面高度	0.85 m
LED 光源半功率角	60°
光电探测器有效面积	10 ⁻⁴ m ²
光电探测器视场角	45°
调制系数	0.2

4.1 功率初值与迭代次数

应用烟花算法优化时, 需要产生 n 个烟花的初始位置, 每个烟花爆炸生成若干火花, 常用方法由随机函数 $\text{rand}()$ 随机产生烟花初始位置, 本文使用所有 1 W 的 LED 光源功率值为烟花的初始位置, 仿真结果表明可

以减少迭代次数,达到更快优化的效果.

模拟实验中,设置烟花数量为 5 枚,每个烟花的数据维数为 N 维,火花总数量为 50 枚,为了保持火花位置的多样性,设置高斯火花数量为 5 枚,爆炸幅度为 10, LED 光源的功率优化范围在 0~10 W 之间.

选取烟花数量为 5,即 n 为 5,随机选取烟花位置作为每个 LED 光源的功率,当 LED 光源数量为 16 时,仿真数据显示,SNR 因子值高达 0.386 1,甚至高至 0.466 2.当所有 LED 光源功率均选取 1 W 时,SNR 因子值为 0.218 1,与随机选取烟花位置信噪比因子值 0.386 1 比较,SNR 因子值降低了 43.5%,更接近优化目标值,从而有效减少优化算法迭代次数,节省了优化时间.因此,在优化算法中,修改了随机生成烟花初始值,在 5 个烟花的初始值中选择所有功率为 1 W 的 LED 光源功率作为第一个烟花,剩余 4 个烟花仍由软件随机函数 $\text{rand}()$ 随机生成,以保持烟花的多样性.

图 4 是光源数量为 16 的两种不同初始位置烟花算法 SNR 因子值与迭代次数关系图,红色曲线为 LED 光源初始功率随机选取时的 SNR 因子值,蓝色曲线为 LED 初始功率均为 1 W 的 SNR 因子值.当 LED 光源功率初始值选取为 1 W 时,信噪比因子值从 0.218 1 开始优化,收敛速度更快;当 LED 光源初始功率为随机选取时,信噪比因子值从 0.386 1 开始优化,达到最优解所需的迭代次数明显多于功率初始值选取为 1 W 时的迭代次数.

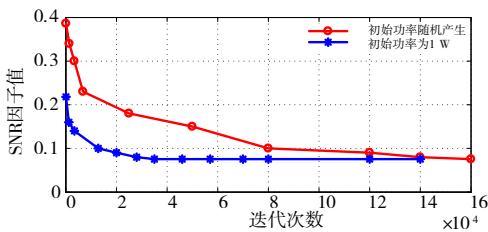


图 4 烟花算法迭代次数与 SNR 因子值关系

4.2 基于烟花算法的功率优化仿真结果与分析

为了提高寻优的效率,所有 LED 光源的初始功率值全部设置为 1 W 作为一个烟花的位置,取代原始算法中光源功率随机产生的方案,设置 SNR 因子为烟花算法的目标函数,使用 Matlab 软件实现其仿真分析.在模拟实验中,烟花数量设置为 5 个,数据维数设置为 N 维,分别为 N 个 LED 光源的功率,火花总数设置为 50 个.为了保持火花位置的多样性,避免陷入局部最优,高斯火花的数量设置为 5 个,爆炸幅度为 10 W,最大迭代次数设置为 30 000 次,光接收平面高度设置为 0.85 m,每个 LED 光源的功率在 0~10 W 范围内寻优.分别选取了不同的 LED 光源数量的优化效果进行了分析比较.

(1) LED 光源数量为 2 时优化效果分析

LED 光源数量为 2,光源位置安装与空间顶部,均匀分布于空间顶部,2 个 LED 光源的三维坐标分别为 (1.25, 2.5, 3)、(3.75, 2.5, 3). 图 5 为 2 个 LED 光源功率均为 1 W 时,高度为 0.85 m 处接收平面光信号信噪比,此时中心位置接收 SNR 值最大,此处距离多个 LED 光源点距离较近,归一化 SNR 最大值为 1,归一化 SNR 最小值为 0.022 1,SNR 平均值为 0.331 8,SNR 因子为 0.799 6. SNR 波动较大,SNR 波动幅度达到了 97.8%. 优化后 LED 光源最优功率仍然为两个 LED 光源功率相等的最优功率,接收平面 SNR 分布与图 5 相同.

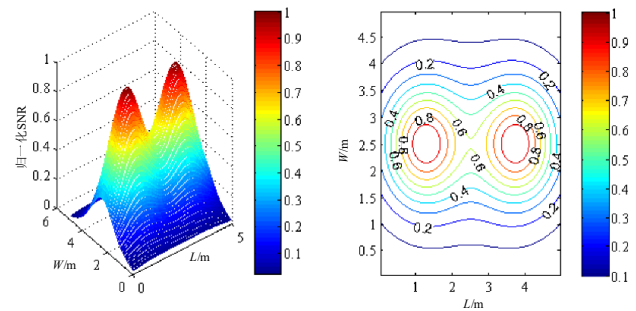


图 5 $N=2$ 时,LED 光源等功率接收平面归一化 SNR 及其等高线分布图

(2) LED 光源数量为 4 时优化效果分析

LED 光源数量为 4,光源位置安装与空间顶部,均匀分布于空间顶部,4 个 LED 光源的三维坐标分别为 (1.25, 1.25, 3)、(1.25, 3.75, 3)、(3.75, 1.25, 3) 和 (3.75, 3.75, 3). 图 6 为 4 个 LED 光源功率均为 1 W 时,高度为 0.85 m 处接收平面光信号信噪比,此时四个光源下方位置接收 SNR 值最大,此处距离 LED 光源点距离较近,归一化 SNR 最大值为 1,归一化 SNR 最小值为 0.140 3,SNR 平均值为 0.588 7,SNR 因子为 0.331 5. SNR 波动较大,SNR 波动幅度达到了 86%. 优化后 LED 光源最优功率仍然为 4 个 LED 光源功率相等的最优功率,功率为 2.28 W,接收平面归一化 SNR 分布与图 6 相同.

(3) LED 光源数量为 9 时优化效果分析

LED 光源数量为 9,光源位置安装与空间顶部,均

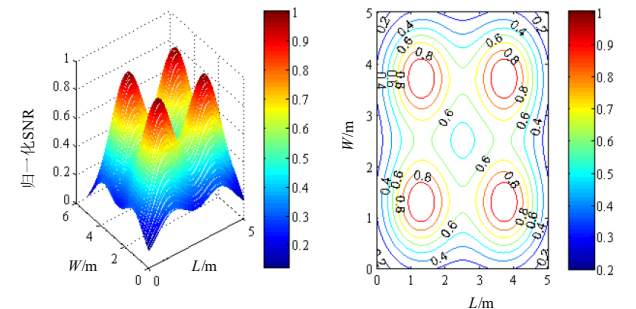


图 6 $N=4$ 时 LED 光源等功率接收平面归一化 SNR 及其等高线分布图

匀分布于空间顶部,9个LED光源的三维坐标分别为(0.83,0.83,3)、(2.5,0.83,3)、(4.17,0.83,3)、(0.83,2.5,3)、(2.5,2.5,3)、(4.17,2.5,3)和(0.83,4.17,3)、(2.5,4.17,3)、(4.17,4.17,3)。图7和图8分别为9个LED光源优化后的功率一维图和空间三维图,如图所示,位于四个角落位置光源功率值较大,位于中间位置的光源功率值较小,功率在1W附近变化。

图9为9个LED光源功率均为1W时,高度为0.85m处接收平面光信号信噪比,此时中心位置接收SNR值最大,此处距离LED光源点距离较近,归一化SNR最大值为1,归一化SNR最小值为0.258,SNR平均值为0.739,SNR因子为0.213。SNR波动较大,SNR波动幅度达到了74.2%。

图10为9个LED光源功率优化后,高度为0.85m处接收平面光信号信噪比分布,此时,归一化SNR最大值为1,归一化SNR最小值为0.332,SNR平均值为0.77,SNR因子值为0.157。接收平面SNR波动降低,SNR均值提高,衡量SNR波动的SNR因子值下降为0.157,为原来的73.7%,有效降低了26.3%。

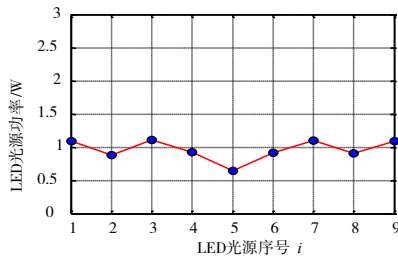


图7 N=9时LED光源优化功率一维图

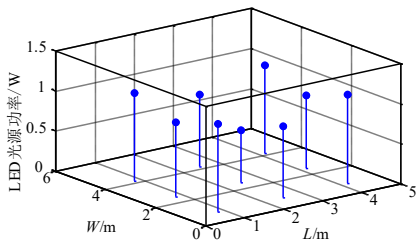


图8 N=9时LED光源优化功率三维图

(4) LED光源数量为16时优化效果分析

通信空间内LED光源数量为16,经过烟花算法优化,各LED光源功率如图11所示,具体各LED光源功率值见表2所示。从表中可以看出,位于边缘位置的LED光源功率较大。位于中心位置的LED光源功率值较小,例如位于中心位置的7号、10号、11号光源功率值较小,特别是位于四个角落位置的1号、4号、13号、16号LED光源功率值较大。此时到不同位置点通信距离差别较大,通过适当增大光源功率增

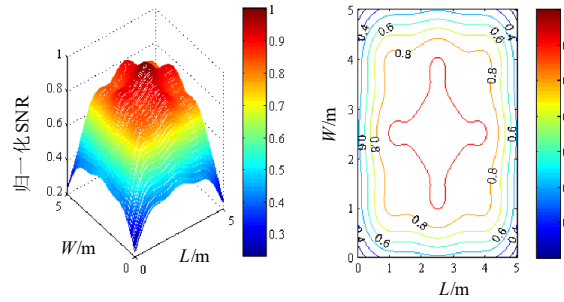


图9 N=9时LED光源等功率接收平面归一化SNR及其等高线分布图

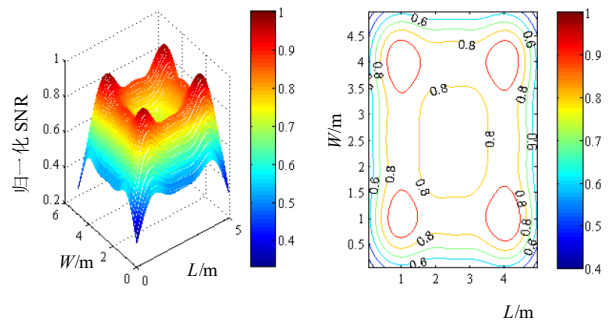


图10 N=9时LED光源功率优化后接收平面归一化SNR及其等高线分布图

强四个角落位置光信号信噪比,降低接收平面的信噪比波动。

图11为LED光源优化后的功率一维图,横坐标为光源序号,图12为LED光源优化后的功率三维图,LED光源编号见图2所示,图中可见,位于四个角落位置光源功率值较大。

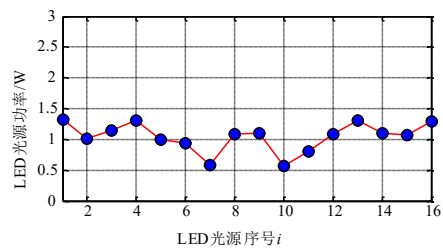


图11 N=16 LED光源优化后功率

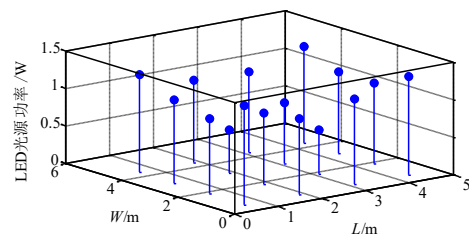


图12 N=16 LED光源优化功率三维图

表 2 $N=16$ 烟花算法优化后每个 LED 光源功率值

光源序号 i	功率/W	光源序号 i	功率/W
1	1.32	9	1.10
2	1.01	10	0.58
3	1.14	11	0.81
4	1.31	12	1.09
5	0.99	13	1.31
6	0.94	14	1.10
7	0.58	15	1.07
8	1.08	16	1.29

为了对比烟花算法优化 LED 光源功率后光信号分布均匀效果,分析了优化前后接收平面光信号信噪比分布. 图 13 为 16 个 LED 光源功率均为 1 W 时,高度为 0.85 m 处接收平面光信号信噪比分布及其等高线图,此时中心位置接收 SNR 值最大,此处距离多个 LED 光源点距离较近,接收平面归一化 SNR 最大值为 1,归一化 SNR 最小值为 0.288 2,SNR 平均值为 0.775 4,SNR 因子值为 0.218 1. 整个接收平面 SNR 波动较大,SNR 波动达到了 71.18%.

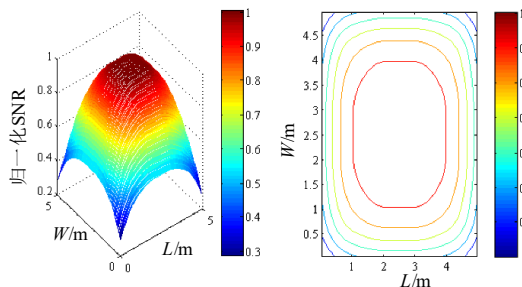
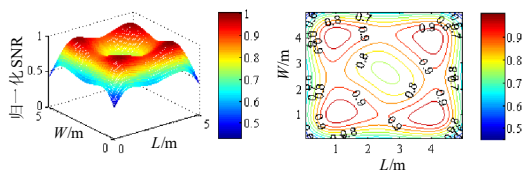
图 13 $N=16$ LED 光源等功率分布接收平面归一化 SNR 分布及其等高线图

图 14 为 16 个 LED 光源功率优化后,高度为 0.85 m 处接收平面光信号信噪比分布,此时,归一化 SNR 最大值为 1,归一化 SNR 最小值为 0.43,SNR 平均值为 0.83,SNR 因子值为 0.12. 接收平面 SNR 波动降低,SNR 均值提高,衡量 SNR 波动的 SNR 因子值显著下降为 0.12,仅为原来的 55%,降低了 45%. 对比文献 13 中提高 26.5% 的性能效果,本文采用的方法性能效果改善了 45%,比 EA 算法效果有一定程度改善.

图 14 $N=16$ LED 光源功率优化后归一化 SNR 及其等高线分布图

综上所述,应用群体优化算法——烟花算法优化每个 LED 光源功率后,当光源数量较多时,接收平面接收的光信号信噪比波动获得了显著的降低,信噪比均值有所提高,使得接收平面信噪比均匀性更好. 信号信噪比直接影响可见光通信系统的通信性能,故目标函数选择接收平面信噪比因子,以获得最小的信噪比因子为优化目标,降低接收平面信噪比波动,从而获得稳定的系统性能.

5 结论

针对室内可见光通信中信号分布极度不均匀的问题,设计了一种优化 LED 光源功率数值的方法,提高可见光通信无线光信号在接收面上的信噪比分布均匀性,使不同位置的光移动用户可以接收到相同质量的无线光信号,保证通信的公平性,从而提高整体系统性能并简化设备. 采用群体优化算法——烟花算法,引入 SNR 因子作为目标函数,通过逐次迭代搜索所有 LED 光源最优功率,并对比分析了等功率接收平面 SNR 分布均匀性的改进效果,光源数量为 16 时,接收平面 SNR 因子降低了 45%. 该方法的应用,通过调节光源功率降低了接收平面信噪比波动,并且可以根据现场施工需求适用于任意 LED 光源数量的系统,通过增加 LED 光源数量,能够进一步降低光信号信噪比波动.

参考文献

- [1] 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.
- [2] KOONEN T. Indoor optical wireless systems: Technology, trends, and applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(8): 1459-1467.
- [3] CHI N, ZHOU Y J, WEI Y R, et al. Visible light communication in 6G: Advances, challenges, and prospects[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 93-102.
- [4] WANG Z X, YU C Y, ZHONG W D, et al. Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4564-4573.
- [5] HONG Y, CHEN J, WANG Z X, et al. Performance of a precoding MIMO system for decentralized multiuser indoor visible light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(4): 7800211.
- [6] WANG Z X, YU C Y, ZHONG W D, et al. Performance improvement by tilting receiver plane in M-QAM OFDM

- visible light communications[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13418-13427.
- [7] 赵梓旭, 宋小庆, 贾胜杰, 等. 特种车内可见光通信系统光源布局优化[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 230-237. ZHAO Z X, SONG X Q, JIA S J, et al. Optimization layout of lighting for VLC system in special vehicle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 230-237. (in Chinese)
- [8] 陈勇, 沈奇翔, 刘焕淋. 室内可见光通信中接收光功率均匀性优化方法[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 178-185. CHEN Y, SHEN Q X, LIU H L. Optimization algorithm of receiver optical power uniformity in indoor visible light communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 178-185. (in Chinese)
- [9] 王加安, 车英, 吕超, 等. 基于能量最优的室内可见光通信LED布局[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 57-69. WANG J A, CHE Y, LÜ C, et al. LED layout for indoor visible light communication based on energy optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 57-69. (in Chinese)
- [10] 张芳鑫, 王法松, 李睿, 等. GSSK-VLC系统中基于SVM的LED选择算法[J]. 电子学报, 2021, 49(7): 1400-1405. ZHANG F X, WANG F S, LI R, et al. SVM-based LED selection algorithm in GSSK-VLC system[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(7): 1400-1405. (in Chinese)
- [11] 冷亭亭, 张延彬, 王法松. 基于朴素贝叶斯的室内VLC网络天线选择方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(1): 67-74. LENG T T, ZHANG Y B, WANG F S. Naive Bayesian-based antenna selection approach for indoor VLC network[J]. Control and Decision, 2023, 38(1): 67-74. (in Chinese)
- [12] 金建力, 路慧敏, 陈丹阳, 等. 一种抗可见光蜂窝网小区间干扰的光学发射天线设计[J]. 电子学报, 2021, 49(10): 1975-1981. JIN J L, LU H M, CHEN D Y, et al. Design of anti-cell interference optical transmitting antenna for visible light cellular network[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(10): 1975-1981. (in Chinese)
- [13] DING J P, HUANG Z T, JI Y F. Evolutionary algorithm based power coverage optimization for visible light communications[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(4): 439-441.
- [14] YOU C X, ZHANG S, ZHANG R. An optimal LED light source arrangement to reduce SNR fluctuation for MISO VLC system using fireworks algorithm[J]. International Journal of Grid and Distributed Computing, 2016, 9(12): 295-306.
- [15] PEI Y, ZHENG S Q, TAN Y, et al. Effectiveness of approximation strategy in surrogate-assisted fireworks algorithm[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2015, 6(5): 795-810.
- [16] TAN Y. Editorial: Special issue on advances in swarm intelligence for neural networks[J]. Neurocomputing, 2015, 148: 1-2.
- [17] LI J Z, ZHENG S Q, TAN Y. The effect of information utilization: Introducing a novel guiding spark in the fireworks algorithm[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2017, 21(1): 153-166.
- [18] LI J Z, TAN Y. The bare bones fireworks algorithm: A minimalist global optimizer[J]. Applied Soft Computing, 2018, 62: 454-462.
- [19] ZHENG S Q, LI J Z, JANECEK A, et al. A cooperative framework for fireworks algorithm[J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 14(1): 27-41.
- [20] LI J Z, TAN Y. Loser-out tournament-based fireworks algorithm for multimodal function optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2018, 22(5): 679-691.

作者简介



游春霞 女, 1979年2月出生于江苏省姜堰市. 博士, 西澳大学访问学者, 现为江苏师范大学物理与电子工程学院副教授, 从事可见光通信和智能信号处理方面的研究.
E-mail: 149143512@qq.com



胡青松 男, 1978年7月出生于四川省广安市. 现为中国矿业大学教授、博士生导师, 从事矿山物联网、精确定位与导航、工业AI等方向的研究工作, 获省部级奖励8项, 在国内外发表论文90余篇.
E-mail: hqsong722@163.com



李世党 男, 1984年9月出生于河南省商丘市. 现为江苏师范大学物理与电子工程学院讲师. 主要研究方向为智能反射面辅助通信、通感一体化、智能通信等.
E-mail: shidangli@jsnu.edu.cn