

基于位置和功率协同优化的煤矿工作面 可见光通信光源分布

游春霞^{1**}, 胡青松^{2*}, 李世党¹, 马勇¹, 陈浩¹

¹江苏师范大学物理与工程学院, 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 分析了煤矿工作面可见光通信系统模型, 设计了两种工作面通信空间发光二极管(LED)光源分布优化方法, 可分别实现每个 LED 光源在空间顶部的二维位置的优化, 以及每个 LED 光源二维位置及其功率分配权值的协同优化。应用烟花算法, 设置接收平面的信噪比(SNR)因子作为群体优化算法的目标函数, 并作为衡量接收平面信号均匀性的指标。研究表明, 两种优化方法得到的接收平面信号 SNR 因子比等功率均匀阵列光源分布的 SNR 因子分别降低了 16.6% 和 24.6%, 明显改善了接收信号 SNR 波动, 提高了信号均匀性, 保证了不同用户之间的同等通信质量。

关键词 光通信; 可见光通信; 烟花算法; 光源位置优化; 功率优化

中图分类号 TN929.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0406001

Light Source Distribution for Visible Light Communication in Coal Mine Working Face Based on Position and Power Co-Optimization

You Chunxia^{1**}, Hu Qingsong^{2*}, Li Shidang¹, Ma Yong¹, Chen Hao¹

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

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

Abstract The system model of visible light communication in coal mine working face is analyzed. Two optimization methods of LED light source distribution in coal mine working face are designed. One is be used to optimize the two-dimensional position of each LED light source on the top of working space, and the other is used to co-optimize the two-dimensional position and its power weight of each LED light source. The fireworks algorithm is adopted and the signal-to-noise ratio (SNR) factor of the receiving plane is set as the target function of the group optimization algorithm as well as the indicator for evaluating the uniformity of signals in the receiving plane. The research results show that after optimization with these two methods, the SNR factors of signals in the receiving plane are reduced by 16.6% and 24.6%, respectively, compared with that under the uniform array distribution of LED light sources with equal powers. The SNR fluctuation is significantly improved, the optical signal uniformity is also improved, and thus the same communication quality among different users is ensured.

Key words optical communications; visible light communication; fireworks algorithm; light source location optimization; power optimization

OCIS codes 060.2605; 060.4510

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-11-20; 录用日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(51874299)、江苏省重点研发计划(BE2018062)、江苏师范大学校博士科研基金(18XLR015)

* E-mail: hqsong722@163.com; ** E-mail: 149143512@qq.com

1 引言

可见光通信是近年来短距离无线通信技术的一个研究热点,能够解决通信最后 1 m 的问题。可见光通信以太赫兹可见光为信息载体,集照明与通信为一体,成为当前光通信领域的研究热点,被列为第 5 代移动通信的关键技术之一。在煤矿开采过程中,由发光二极管(LED)光源为煤矿工作面提供照明,也为可见光通信提供了条件。为了保证位于通信空间不同位置的移动用户获得相同的通信质量,要求接收平面获得质量相同的信号,尽可能减少信噪比(SNR)的起伏变化。

最初可见光通信系统光源布置于通信空间顶部中心位置,此布局下接收平面信号的 SNR 波动极大,分布极不均匀。日本 Nakagawa 研究团队于 2004 年提出了分组 LED 阵列光源布局,并分析了这种 LED 分布的具体性能^[1]。2012 年,Wang 等^[2]设计了均匀圆周加角落补偿的分布模式,12 个等功率 LED 光源均匀布置于半径为 r 的圆周上,4 个等功率 LED 光源位于通信空间的 4 个角落位置,从而有效减小接收平面的信号 SNR 波动;Hong 等^[3-4]提出了从倾斜光接收器角度降低接收平面的信号 SNR 波动的方法,这些方法能够一定程度上降低接收平面 SNR 波动。2017 年赵梓旭等^[5]设计了优化 LED 光源高度和 LED 光源边缘功率的方法,研究了特种车内部可见光通信阵列光源形成中心补偿型布局的光源分布优化方案;Ding 等^[6]研究了通过优化 LED 功率因子使接收平面的接收信号均匀的方法;赵黎等^[7]研究了均匀阵列分布中光源间距和光源起始位置;2018 年陈勇等^[8-9]研究了通过优化 LED 光源阵列距离、光源半功率角以及功率因子降低接收面信号波动的方法。

以上关于光源分布的研究中存在的局限性包括:1)国内外研究中,考虑方形通信空间的 LED 光源分布(如长、宽、高分别为 5,5,3 m 的可见光通信空间),可见光通信中 LED 光源主要分布在均匀的 LED 光源阵列中,或局限于信号 SNR 极低的四角增加 LED 光源的布局,并没有优化每个 LED 光源位置的方法;2)LED 光源的总数不能任意设定,对于相同长度和宽度的通信空间,LED 光源的数量通常为 N ,例如 2^2 个(即 4 个 LED 光源)或 4^2 (即 16 个 LED 光源)。当 LED 光源数量不满足 N^2 时,如何分配光源位置尚未研究。然而,煤矿井下工作面通信空间是一个狭长形的通信空间,宽度为几米,长

度为几十、几百米,甚至几千米,现有的光源分布方法不适用于这种工作环境,如何布局煤矿工作面的可见光通信光源分布,使得位于不同位置的光移动终端获得相同的通信质量,是煤矿工作面可见光通信系统需要研究的问题。

本文设计的方法允许在通信空间中自由设定 LED 光源数量 N ,应用烟花算法优化 LED 光源在可见光通信空间顶部的二维位置,以及协同优化 LED 光源的二维位置和 LED 光源功率分配权值。定义 SNR 因子作为衡量信号 SNR 均匀性的指标,优化后接收平面信号 SNR 波动显著减小,当每个方形区域光源数量仅为 4 时,归一化后 SNR 因子能够从 0.199 降低为 0.166 和 0.150,分别降低了 16.6% 和 24.6%,增加光源数量可以进一步提高优化效果。

2 系统模型

2.1 工作面 LED 光源分布

煤矿工作面可见光通信系统如图 1 所示,LED 光源总数量为 N ,通信空间宽为 w ,长为 l ,高为 h ,单位均为 m。LED 点光源位于通信空间顶部,每个 LED 光源的二维位置可以在长宽范围内优化调节,空间坐标三维图如图 2 所示,设置长方体通信空间的左下角位置为空间坐标原点,其三维坐标为 $(0, 0, 0)$, N 个 LED 光源的横坐标位置为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$; N 个 LED 光源的纵坐标位置为 $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_N$; N 个 LED 光源的功率为 $k_1P, k_2P, \dots, k_iP, \dots, k_NP$, i 为 LED 光源序号, k_i 为第 i 个 LED 光源的功率分配权值, k_iP 为第 i 个 LED 光源的功率, P 为总功率。

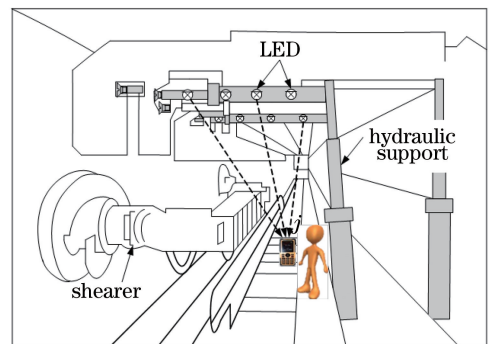


图 1 煤矿工作面可见光通信光源分布图

Fig. 1 Distribution of light sources for visible light communication in coal mine working face

2.2 LED 光源特性及信道模型

总量为 N 的多个 LED 光源照射下的可见光系统如图 2 所示,光电二极管接收到光信号后,接收点

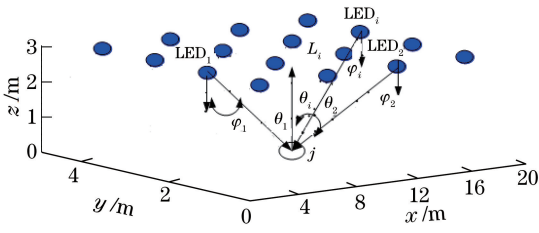


图 2 多个 LED 点光源作用下的接收信号示意图

Fig. 2 Schematic for receiving signals under multiple LED light sources

j 在多个 LED 光源作用下获得的信号 SNR 为^[1]

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

式中： P_s 为光电二极管接收信号的平均功率； P_{noise} 为光电二极管接收信号的噪声平均功率，噪声信号为均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声； B 为系统的带宽； γ 为光电二极管的光电转换系数； $H_i(0)$ 为第 i 个 LED 光源点与接收点 j 光传输无线信道的直流增益； $\overline{X_i(t)}$ 为第 i 个 LED 光源 (LED_i) 发出的经过强度调制的信号的平均功率，其中 t 为时间，即 $P_i = \overline{X_i(t)}$ 。

LED 光源选取服从朗伯分布的模型，其辐照强度为^[1]

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

式中： φ_i 为 LED_i 的辐射角； $m = \ln(1/2)/\ln(\cos \varphi_{1/2})$ ， $\varphi_{1/2}$ 为 LED_i 的半功率角。

LED_i 与接收平面接收点 j 之间的直视信道直流增益 $H_i(0)$ 为

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

式中： A 为光电二极管的光接收面； θ_i 为光电二极管的光入射角； L_i 为信号传输距离。LED 光源和光电探测器均水平放置。

为了衡量接收平面接收信号 SNR 的均匀性，引入 SNR 因子 Q_{SNR} 作为评价函数， Q_{SNR} 为 SNR 方差与 SNR 均值的比值，其计算公式为

$$Q_{\text{SNR}} = \frac{\sqrt{\text{var}(R_{\text{SNR}})}}{\bar{R}_{\text{SNR}}}, \quad (4)$$

式中： $\text{var}(R_{\text{SNR}})$ 为整个接收平面所有接收点信号的 SNR 方差； \bar{R}_{SNR} 为所有接收点信号的 SNR 均值。 Q_{SNR} 同时作为下节中群体优化算法的目标函数， Q_{SNR} 值越小，接收平面 SNR 波动越小，接收平面上

所有用户接收信号的质量越一致。

LED_i 在接收平面 j 处的照度为^[1]

$$E_i = \frac{(m+1)}{2\pi L_i^2} \cos^m \varphi_i \cos \theta_i. \quad (5)$$

K 个 LED 光源在接收点 j 处的照度为

$$E = \sum_{i=1}^K E_i. \quad (6)$$

接收平面的照明因子定义为接收平面照度方差与照度平均值的比值 Q_E ：

$$Q_E = \frac{\sqrt{\text{var}(E)}}{\bar{E}}, \quad (7)$$

式中： $\text{var}(E)$ 为接收平面照度方差； \bar{E} 为接收平面照度平均值。 Q_E 可衡量接收平面光照度的均匀性。

3 LED 光源位置和功率协同优化

3.1 烟花算法目标函数

烟花算法是近年来模拟烟花爆炸过程提出的一种智能群体优化算法^[10-12]，该算法通过空中每个烟花的爆炸产生新的火花，从而执行全局最优化搜索，该搜索具有求解复杂问题的全局最优解，避免陷入局部最优的优点，且不需要目标函数的梯度信息，对求解问题的目标要求很低。为了减小接收到信号 SNR 波动，保证所有用户通信的公平性，将 Q_{SNR} 设置为烟花算法的目标函数，计算公式如(4)式，LED 光源二维位置优化的主要目标是寻求一组最优 LED 光源二维位置 (N 个 LED 光源的横坐标 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$ 和 N 个 LED 光源的纵坐标位置 $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_N$)，使得目标函数 Q_{SNR} 值最小^[13-15]。

LED 光源二维位置和功率优化即寻求一组最优的 LED 光源二维位置和功率 (即 N 个 LED 光源的横坐标 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$ 、 N 个 LED 光源的纵坐标位置 $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_N$ 和 N 个 LED 光源功率分配权值 $k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_N$)，使得接收平面目标函数 Q_{SNR} 最小，从而获得最小的 SNR 波动。

3.2 基于烟花算法的 LED 光源位置优化

在基于烟花算法 LED 光源二维位置优化过程中，设 $p_s = (x_1, x_2, \dots, x_i, x_N, y_1, y_2, \dots, y_i, y_N)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 为一个 $2N$ 维空间位置点， $x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}$ (其中 x_{\min} 、 x_{\max} 表示允许的 LED 光源横坐标的最小值和最大值)， $y_{\min} \leq y_i \leq y_{\max}$ (其中 y_{\min} 、 y_{\max} 表示允许的 LED 光源纵坐标的最小值和最大值)，烟花算法的目标函数为 Q_{SNR} ，在横坐标和纵坐标允许的范围内寻找一个最优空间位置点。在

LED 光源横坐标和纵坐标范围内,随机产生 n 个烟花的位置 $p_{s1}, p_{s2}, \dots, p_{sn}$, 每个烟花位置均为一个 $2N$ 维空间位置。

LED 光源位置和功率协同优化时, 设 $p_{ps} = (x_1, x_2 \dots, x_i \dots, x_N; y_1, y_2 \dots, y_i \dots, y_N; k_1, k_2 \dots, k_i \dots, k_N)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 为一个 $3N$ 维空间位置点 (其中 x_i, y_i 分别为 LED 光源的横坐标和纵坐标, $k_{\min} \leq k_i \leq k_{\max}$, k_{\min}, k_{\max} 为每个 LED 光源允许的功率分配权值最大值和最小值, 取值范围在 $0 \sim 1$ 之间), 烟花算法的目标函数为接收平面的 Q_{SNR} , 随机产生 n 个烟花的位置 $p_{s1}, p_{s2}, \dots, p_{sn}$, 每个烟花所处位置点均为一个 $3N$ 维空间位置点。 p_{ps_i} 为烟花算法中一个烟花或者一个火花的位置点, 烟花算法的目标函数为接收平面的 Q_{SNR} , 设计程序搜索目标函数值为最小值的位置点, 即为全局最优位置点。

以 LED 光源二维位置和功率优化为例, 烟花算法的优化流程图如图 3 所示。

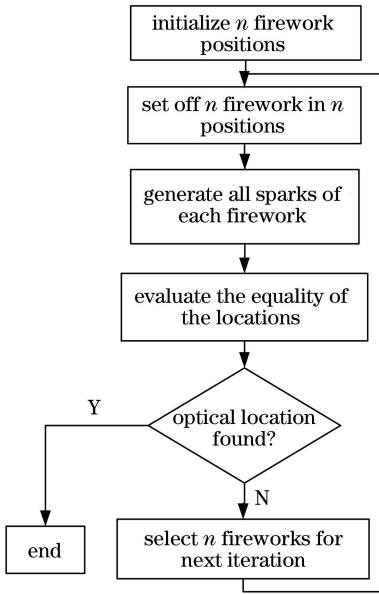


图 3 LED 光源二维位置和功率优化烟花算法流程图

Fig. 3 Flow chart of fireworks algorithm for optimization of two-dimensional position and power of LED light source

每个烟花在空中爆炸, 产生若干火花, 第 m 个烟花共产生的火花数目为^[10-12]

$$s_m = v \cdot \frac{p_{ps_{\max}} - Q(p_{ps_i}) + \zeta}{\sum_{m=1}^n [p_{ps_{\max}} - Q(p_{ps_m})] + \zeta}, \quad (8)$$

式中: v 为设置的总数量参数值; $p_{ps_{\max}}$ 为 n 个烟花中目标函数最差 (大) 的数, 即 $p_{ps_{\max}} = \max[Q(p_{ps_m})]$ ($m=1, 2, \dots, n$); $Q(x_i)$ 为第 i 个烟花的目标函数值; ζ 为一个很小的数。

第 m 个烟花产生的其中一个火花位置的计算步骤如下:

- 1) 火花位置初始化 $\tilde{p}_{ps_j} = p_{ps_m}$;
- 2) 产生随机数 $z, z = \text{round}[\omega \text{rand}(0, 1)]$, 其中函数 $\text{round}(\cdot)$ 和 $\text{rand}(\cdot)$ 分别为四舍五入近似函数和随机数生成函数, ω 为每个位置点 p_{ps_i} 的维数;
- 3) 在 \tilde{p}_{ps_j} 的 $3N$ 维中随机选择 z 维;
- 4) 计算爆炸幅度值 $A_m = \hat{A} \cdot \frac{Q(p_{ps_m}) - p_{ps_{\min}} + \zeta}{\sum_{m=1}^n [Q(p_{ps_m}) - p_{ps_{\min}}] + \zeta}$, \hat{A} 为设定的最大爆炸幅度, $p_{ps_{\min}} = \min[Q(p_{ps_m})]$ ($m=1, 2, \dots, n$) 为所有烟花 Q_{SNR} , 即目标函数的最小数值;
- 5) 计算幅值 $h = A_m \text{rand}(0, 1)$;
- 6) 将之前选择的 z 维数据每一维的值都增加 h (即 $\tilde{x}_k = \tilde{x}_k + h, \tilde{y}_k = \tilde{y}_k + h$ 或 $\tilde{p}_k^i = \tilde{p}_k^i + h$, 其中 $k=1, 2, \dots, z$);
- 7) 若 \tilde{x}_k, \tilde{y}_k 或 \tilde{p}_k^i 超出允许范围, 则对 \tilde{x}_k, \tilde{y}_k 或者 \tilde{p}_k^i 值进行调整: $\tilde{x}_k = x_k^{\min} + |\tilde{x}_k| \% (x_k^{\max} - x_k^{\min}), \tilde{y}_k = y_k^{\min} + \tilde{y}_k \% (y_k^{\max} - y_k^{\min})$ 或 $\tilde{p}_k^i = P_k^{\min} + \tilde{p}_k^i \% (P_k^{\max} - P_k^{\min})$, 其中 $\%$ 为取余函数。

为了避免陷入局部最优、维持火花的多样性, 修改算法, 并采取高斯爆炸产生某些特殊的火花, 将上述优化步骤 4) ~ 6) 替换为高斯系数 $g = \text{Gaussian}(1, 1)$ 的生成, 随机选定任意 z 维数的数值, 分别为 $\tilde{x}_k = \tilde{x}_k g, \tilde{y}_k = \tilde{y}_k g$ 和 $\tilde{p}_k^i = \tilde{p}_k^i g$, 其余维数数值保持原来数值, 计算步骤同上, 从而生成一个新的高斯火花位置。

选择所有火花和烟花中具有最小目标函数值的位置作为下一次迭代的第一个烟花位置, 并且在剩余的其他位置以一定概率获得其他烟花位置:

$$p(p_{ps_m}) = \frac{R(p_{ps_m})}{\sum_{j \in K} R(p_{ps_j})}, \quad (9)$$

式中: $R(p_{ps_m})$ 为 p_{ps_m} 到其他点 p_{ps_j} 的距离之和, 即 $R(p_{ps_m}) = \sum_{j \in K} d(p_{ps_m}, p_{ps_j})$ 。如 (9) 式所示, 某个烟花位置取决于它们与所有其他点位置的距离, 从而保持下一次迭代的烟花的多样性。

4 仿真结果与分析

4.1 系统参数

可见光通信系统参数如表 1 所示^[13-15], 仿真环境应用计算能力强、图形显示形象直观的 Matlab 软件。

表 1 可见光通信系统参数

Table 1 Parameters of visible light communication system

Parameter	Value
Length /m	20
Width /m	4
Height /m	3
Receiver height /m	0.85
$\varphi_{1/2} /(^{\circ})$	60
A /m^2	10^{-4}
γ	0.8

4.2 LED 光源二维位置优化

选取 LED 光源的数量为 20 个,爆炸的烟花数目为 5 个,数据维数为 40 维(分别为 20 个 LED 光源的横坐标和纵坐标),火花总数设置为 50 个,高斯火花数量为 5 个,归一化爆炸幅度为 0.8,最大迭代次数设置为 3×10^4 ,接收平面的高度为 0.85 m, LED 光源位于通信空间顶部,优化后 LED 光源二维位置优化空间位置如图 4 所示。

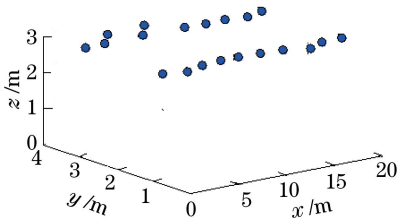


图 4 LED 光源二维优化空间位置

Fig. 4 Spatial locations of LED light sources by two-dimensional optimization

从图中可以看出,LED 光源分布在工作面顶部空间,呈 2 行分布,第一行 LED 光源纵坐标在 1 m 附近,第二行 LED 光源纵坐标在 3 m 附近。为了调节 SNR 均匀性,个别光源的纵坐标有所偏离。

4.3 LED 光源二维位置优化后仿真验证及分析

对比 LED 光源位置均匀阵列分布和优化后光源二维位置,对接收平面信号均匀性进行了分析,主要分析接收平面信号的 SNR 分布和照度分布。

由于 LED 光源总数量为 20,这样在均匀分割的 5 个 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 通信空间中,每个通信空间可以分布 4 个 LED 光源,即分布 2 行 2 列 LED 光源。为了增加收敛速度,首个烟花的位置设置为所有 LED 光源按照均匀阵列排列,高度均为 3 m,其三维分布图如图 5 所示。

由于在仿真分析中对接收平面 SNR 进行了归一化处理,即接收平面所有点的 SNR 除以接收平面 SNR 的最大值,经归一化处理,接收平面的 SNR 最大值为 1,所有点的 SNR 位于 0~1 范围内。因

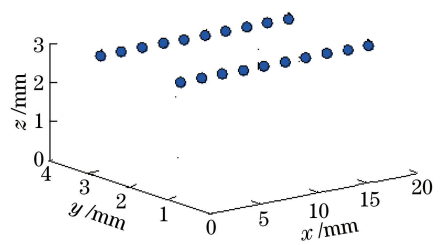


图 5 20 个 LED 光源初始三维位置

Fig. 5 Three-dimensional initial positions of 20 LED light sources

此,LED 光源所选取的功率大小对 SNR 均匀性分布分析没有影响。20 个 LED 光源功率选取同一功率值,接收平面的高度为 0.85 m,图 5 为所有 LED 光源位于同一高度,即位于工作面顶部空间位置,并按照均匀阵列排列。 $z = 0.85 \text{ m}$ 的水平接收平面的接收信号 SNR 分布和照度分布分别如图 6、7 所示,可以得出:光源点下方位置接收到信号的 SNR 和照度远大于其他位置,信号分布波动大;接收平面的归一化 SNR 均值为 0.738;SNR 的最小值为 0.224,最大值为 1.000,方差为 0.152; $Q_{\text{SNR}} = 0.199$ 。图 7 为在此光源分布下得到的接收平面照度及其等高线分布,由图 7 可得:接收平面归一化照度均值大小为 0.827,最小数值为 0.330,最大值为 1.000,方差为 0.141,照度因子为 0.171,接收平面的 SNR 和照度波动较大。

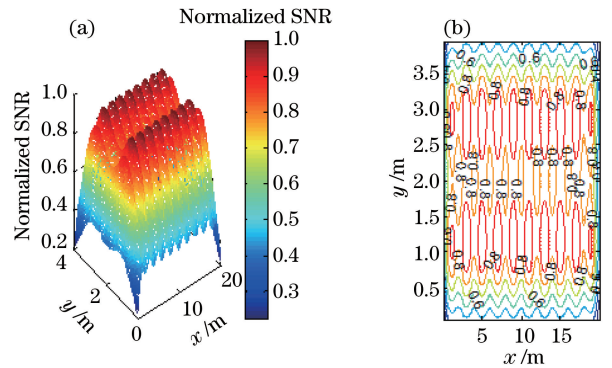


图 6 20 个 LED 光源阵列分布信息。

(a) SNR; (b) 等高线分布

Fig. 6 Array distribution information of 20 LED light sources.

(a) SNR; (b) contour distribution

当 LED 光源的横坐标在 0~20 m、纵坐标在 0~4 m 范围内可调节时,应用烟花算法对每个 LED 光源顶部二维位置点进行优化后,LED 光源空间二维位置分布如图 4 所示,此时,高度 $z = 0.85 \text{ m}$ 的水平接收平面接收信号 SNR 分布和照度分布如图 8、9 所示,可以得出:接收平面的归一化 SNR 最大值为 1.000,最小值为 0.306,SNR 均值为 0.738,方差为 0.123; $Q_{\text{SNR}} = 0.166$,相比于 LED 光源

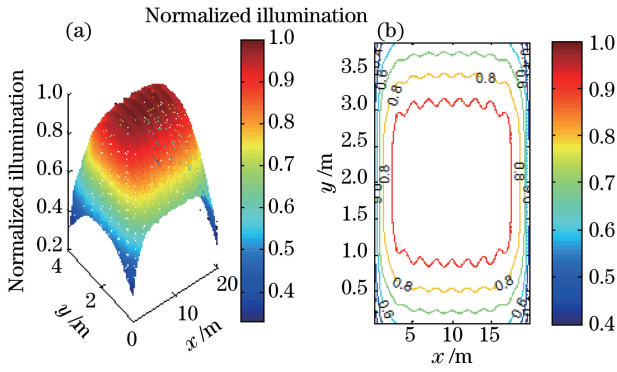


图 7 20 个 LED 光源均匀阵列分布信息。

(a) 照度; (b) 等高线分布

Fig. 7 Uniform array distribution information of 20 LED light sources. (a) Illumination; (b) contour distribution

阵列分布时, Q_{SNR} 为原来的 83.4%, 降低了 16.6%。图 9 为在此光源分布下水平接收平面的归一化照度及其等高线分布示意图, 归一化照度最大值为 1.000, 最小值为 0.403, 整个平面照度均值为 0.854, 方差为 0.108; 照度因子为 0.126, 是 LED 光源同一高度 3 m 均匀阵列分布时照度因子的 73.7%。

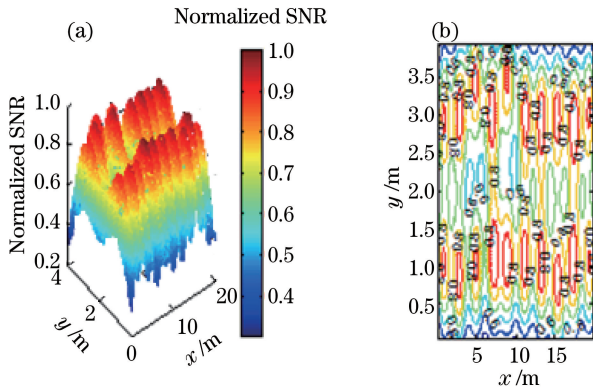


图 8 20 个点光源二维位置优化后接收平面 SNR 均匀性。

(a) SNR; (b) 等高线分布

Fig. 8 SNR uniformity of receiving plane after optimization of two-dimensional positions of 20 LED point light sources. (a) SNR; (b) contour distribution

4.4 LED 光源二维位置和功率协同优化

选取 LED 光源数量为 20, 爆炸的烟花数目为 5, 数据维数为 60 (分别为 20 个 LED 光源的横坐标、纵坐标和功率分配权值), 火花总数为 50, 高斯火花数为 5, 爆炸幅度为 0.8, 最大迭代次数为 3×10^4 , 水平接收平面高度为 0.85 m, LED 光源位于顶部通信空间, 优化后 LED 光源二维位置优化位置和功率分配权值分布如图 10 所示。

从图 10 中可以看出, LED 光源分布在工作面

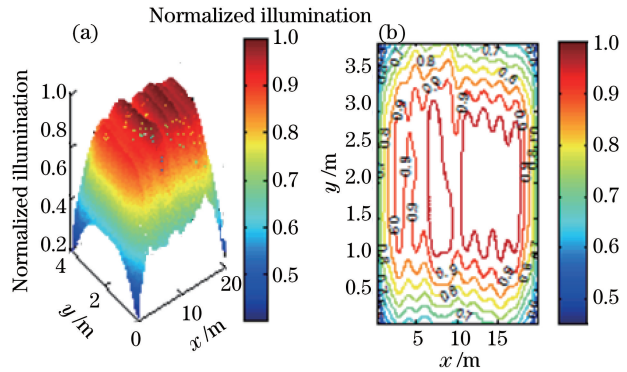


图 9 20 个点光源二维位置优化后接收平面的照度均匀性。

(a) 照度; (b) 等高线分布

Fig. 9 Illumination uniformity of receiving plane after optimization of two-dimensional positions of 20 LED point light sources. (a) Illumination; (b) contour distribution

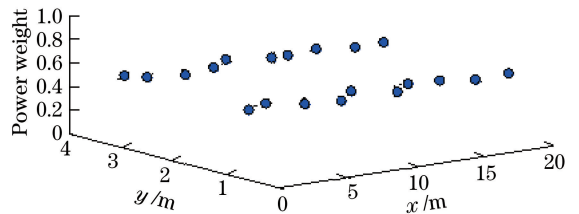


图 10 20 个 LED 光源二维优化位置和功率优化分布图
Fig. 10 Two-dimensional optimal positions and powers of 20 LED light sources

顶部空间, 呈 2 行分布, 第一行 LED 光源纵坐标在 1 m 附近, 第二行 LED 光源纵坐标在 3 m 附近。为了调节 SNR 均匀性, 个别光源坐标有所偏离, 功率权值在 0.54 附近, 边缘位置的光源功率权值偏大, 中间位置某些光源功率权值也有调节。

4.5 LED 光源二维位置和功率协同优化仿真验证及其分析

为了验证 LED 光源二维位置和功率分配权值协同优化对接收平面信号均匀性的影响, 分别对优化前后接收平面信号的 SNR 和照度进行了对比分析。

当 LED 光源横坐标在 0~20 m、纵坐标在 0~4 m 范围内可调节时, 功率分配权值在 0~1 之间, 应用烟花算法对 LED 光源二维位置和功率分配权值进行优化。z=0.85 m 接收平面的接收信号 SNR 和照度分布如图 11、12 所示, 可以看出: 水平接收平面归一化 SNR 最大值为 1.000, 最小值为 0.366, 均值为 0.732, 方差为 0.110; $Q_{SNR}=0.150$, 相比于 LED 光源阵列分布时, Q_{SNR} 为原来的 75.4%; 接收平面信号 SNR 波动显著减小。图 12 为在此光源分布下接收平面归一化照度及其等高线分布, 可以看出: 照度

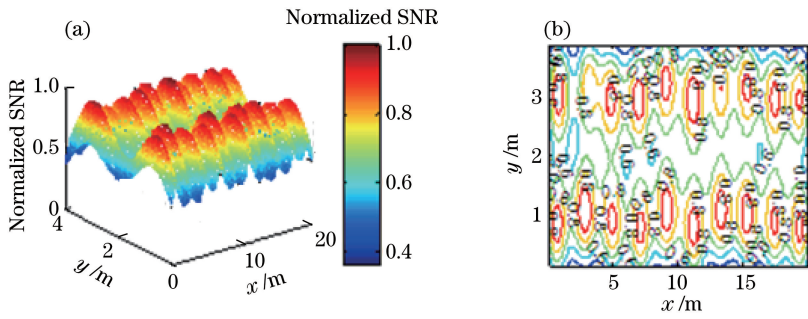


图 11 20 个点光源二维位置和功率协同优化后接收平面的 SNR 均匀性。(a) SNR;(b)等高线分布
Fig. 11 SNR uniformity of receiving plane after co-optimization of two-dimensional positions and powers of 20 LED point light sources. (a) SNR; (b) contour distribution

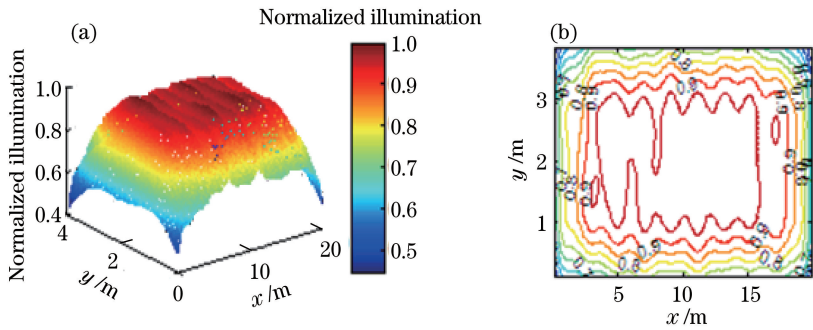


图 12 20 个点光源二维位置和功率协同优化后接收平面的照度均匀性。(a)照度;(b)等高线分布
Fig. 12 Illumination uniformity of receiving plane after co-optimization of two-dimensional positions and powers of 20 LED point light sources. (a) Illumination; (b) contour distribution

归一化最大值为 1.000,最小值为 0.445,整个平面照度均值为 0.872,方差为 0.102;照度因子为 0.116,相比于 LED 光源同一高度 3 m 均匀阵列分布时,照度因子为原来的 82.3%;信号和照度分布均匀性都得到了改进。

5 结 论

针对煤矿工作面可见光通信中信号分布不均匀的问题,提出了优化 LED 光源二维位置和协同优化 LED 光源二维位置以及功率分配权值的改进可见光通信 SNR 分布均匀性的方法,应用烟花算法实现任意数量的 LED 光源二维位置和功率权值的最优分布,克服了无法任意设定光源数量以及无法实现多个参数优化的缺陷,从而使得可见光接收平面能够获得均匀的 SNR 分布,接收平面中不同移动用户接收到的信号质量相同,保证了通信的公平性。

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] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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): 0122001.

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): 0122001.

[6] 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.

[7] Zhao L, Peng K, Jiao X L. Design of the layout of

- lighting for indoor VLC system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1122001.
- 赵黎, 彭恺, 焦晓露. 室内 VLC 系统光源布局设计 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 1122001.
- [8] 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): 0506003.
- 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): 0506003.
- [9] 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): 0806003.
- 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): 0806003.
- [10] 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.
- [11] Tan Y. Editorial: special issue on advances in swarm intelligence for neural networks [J]. *Neurocomputing*, 2015, 148: 1-2.
- [12] 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.
- [13] You C X, Zhang S, Zhai Y R, *et al.* A new optimization method of light source for visual light communication in mine working face [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(2): 333-338.
- 游春霞, 张申, 翟彦蓉, 等. 煤矿工作面可见光通信光源优化设计新方法 [J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(2): 333-338.
- [14] You C X, Zhang S, Zhang R, *et al.* Light source altitude optimization in coalface visible light communications based on the fireworks algorithm [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(5): 1174-1180.
- 游春霞, 张申, 张然, 等. 基于烟花算法的煤矿工作面 VLC 光源高度优化 [J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(5): 1174-1180.
- [15] 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.