

室内阵列可见光通信多用户信噪比优化算法

任嘉伟,汪涛,王超,李盾,张光伟

(解放军战略支援部队信息工程大学 信息工程学院,郑州 450000)

摘要:针对室内可见光多灯阵列多用户通信信噪比优化问题,提出基于遗传算法的阵列通信灯选择优化算法。通过量化分析每个发光二极管(LED)灯信号发射路径延迟特性作为基因对信噪比的贡献度量值,以该度量值作为基因交叉和变异时的依据,采用最大信噪比贡献保留和最小信噪比贡献消除方法来改进一般遗传算法的交叉和变异过程。仿真结果表明:相比一般遗传算法,该优化算法收敛速度更快,获得的信噪比更高。

关键词:可见光通信;遗传算法;室内通信;基因交叉;基因变异

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)09-0018-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.09.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Signal-to-noise ratio optimization algorithm for multi-user indoor array visiblelight communication

REN Jiawei, WANG Tao, WANG Chao, LI Dun, ZHANG Guangwei

(Information System Engineering College, PLA Strategic Support Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Aiming at the optimization of signal-to-noise ratio of indoor visible light multi-user communication, an optimization algorithm based on genetic algorithm is proposed. By quantificationally analyzing the delay characteristics of each light emitting diode (LED) lamp signal emission path as the measurement value of gene contribution to signal-to-noise ratio, the maximum signal-to-noise ratio contribution retention and minimum signal-to-noise ratio contribution elimination methods are used to improve the crossover and mutation process of genetic algorithm. The simulation results reveal that for the LED selection problem, the proposed method converges faster and obtains better signal-to-noise ratio than the general evolutionary algorithm.

Key words: visible light communication; evolutionary algorithm; indoor communication; gene crossover; gene mutation

0 引言

可见光通信作为一种新兴的无线通信技术,具有通信速率高、信号对人体无危害、绿色无辐射以及与现有设备不存在电磁兼容问题等突出优点。特别是其与室内照明系统的天然结合,使可见光通信成为室内高速高密度通信的最优解决方案之一^[1]。在典型的室内环境中,为了满足照明亮度标准,一般使用由数百个发光二极管(LED)灯珠组成的大规模LED阵列进行照明^[2]。在可见光通信中,可以使用这些LED灯珠进

行高速阵列通信。然而,不同LED灯珠与接收端的距离不同,其信号传播时间也不相同,这些传播时间不同的信号在接收端叠加后,将引起码间串扰,导致接收信噪比恶化。

目前,针对室内大规模LED阵列通信条件下的多用户信噪比的优化问题,人们提出了许多方案。文献[3-4]提出了改进调制算法并设计了新型的接收机,然而这些方法都是利用所有LED灯珠进行通信的,没有考虑发射灯与接收机之间的不同延时造成的码间串扰。文献[5]经过深入研究多径和阵列延迟,提出了在可见光室内通信中产生码间串扰的主要原因是不同LED灯珠直射支路之间的路径延迟差异。文献[6-8]提出了LED灯珠动态布局算法,研究集中于提升接收信号能量,接收到的码间串扰被认为是多径效应产生的。文献[5,9]提出了基于遗传算法的通信LED灯珠选择算法,通过选择某些特定的LED灯珠作为通信阵元

收稿日期:2020-03-24。

作者简介:任嘉伟(1985—),男,博士,现为解放军战略支援部队信息工程大学信息工程学院讲师,主要从事通信信号处理和可见光通信技术研究,并针对室内多用户可见光通信阵列优化问题开展研究。负责完成省部级项目1项,获省部级科技进步二等奖1项。



来实现码间串扰和信噪比的最优化,然而这些遗传算法都是使用一般的随机基因选择和变换,路径延迟差异等基因的实际意义并没有在基因变换中被利用,导致其遗传算法的收敛速度较慢,容易陷入局部最优解。因此,本文提出一种基于遗传算法的阵列通信灯选择优化算法。

1 室内多用户可见光通信建模

假设一个室内可见光通信场景存在多个大规模照明加通信 LED 阵列和若干用户终端机。LED 阵列中的灯珠记做 $L_i (i=1, 2, \dots, N_L)$, 用户接收机记为 $R_j (j=1, 2, \dots, N_R)$, 其中 N_L 为 LED 灯珠数目, N_R 为接收机数目。由于可见光通信与定位一体化技术的快速发展和广泛应用, 可见光通信系统中用户接收机的位置一般认为是已知的^[10], 系统总体结构示意图如图 1 所示。

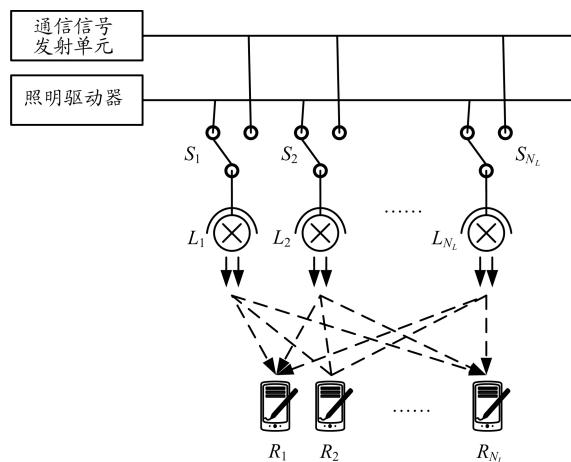


图 1 系统总体结构

LED 灯珠通过阵列切换控制结构, 可以连接发送信号总线用于发送通信信号, 也可以连接一个照明驱动器仅用于照明。LED 灯珠选择状态用向量 $\mathbf{S}=[s_1, s_2, \dots, s_{N_L}]$, $s_i \in \{0, 1\}$ 。当 $s_i=1$ 时, 第 i 个 LED 用于发射通信信号, 否则表示 L_i 仅用于照明。用户接收机包括光学镜头、感光二极管器件(PD)、可见光通信模块以及其它终端信息处理设备。通信 LED 选择优化方法的目标就是确定最优的状态向量 $\mathbf{S}$ 使所有用户总的通信效果最好。

接收机接收到的光强度由 LED 发射光强度、直射通路信道响应 $H(\mathbf{S}, i, j)$ 和反射通路信道响应 $H_{\text{ref}}(\mathbf{S}, i, j)$ 决定, 某种 LED 选择方案下, 第 j 个接收机的接收光强可表示为^[11]:

$$P_r(\mathbf{S}, j) = \sum_i P_i(i) \left[H(\mathbf{S}, i, j) + \int_{\text{wall}} dH_{\text{ref}}(\mathbf{S}, i, j) \right] \quad (1)$$

其中, $P_i(i)$ 为第 i 个 LED 的发射光强度, $\int_{\text{wall}} dH_{\text{ref}}(\mathbf{S}, i, j)$ 代表一次反射的信道响应在墙面或其它反射面的积分, 直射通路信道响应 $H(\mathbf{S}, i, j)$ 表示为:

$$H(\mathbf{S}, i, j) = \begin{cases} s_i \frac{(m+1)A}{2\pi d_{i,j}^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2)$$

其中, $d_{i,j}$ 为第 i 个 LED 到第 j 个接收机之间的空间直线距离, A 为接收机感光器件感光物理面积, φ 为 LED 发光辐射角, ψ 为接收机感光入射角, ψ_c 为接收机视场角, $T_s(\psi)$ 为光学滤光镜增益, $m=-\ln 2 / \ln(\cos \varphi_{1/2})$ 为朗伯指数, $\varphi_{1/2}$ 为半功率角。光学集中器增益 $g(\psi)$ 的计算公式为:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (3)$$

其中, n 为镜头折射率。在室内高速传输环境中, 接收机的视场角及光学设计可以有效屏蔽反射光^[12], 因此反射对通信质量的影响可以忽略不计。

从场景模型中可以看出, 不同 LED 到第 j 个接收机的直射路径距离是不同的, 所以信号传播时间也不同。第 i 个 LED 到第 j 个接收机的信号传播时间为 $t_{i,j} = d_{i,j}/c$, 其中 c 是光速。

从接收机的角度来看, 不同灯发射的某个码元信号到达情况的示意图如图 2 所示, 实际接收信号为各个灯到达信号的叠加。为简单起见, 码元波形在图 2

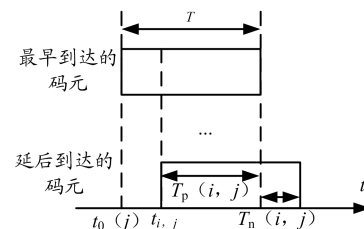


图 2 不同 LED 信号发射某个码元到达接收机的时间关系示意图

中设置为理想方波。

图 2 中, 横轴为时间, T 为码元周期, 定义第 j 个接收机最早接收到该码元的时间 $t_0(j)$ 为该码元的开始时间, 该时间作为后续其它延时信号的基准。其它灯发射的该码元会延时一段后到达。延时的码元可以分为拖尾和增强 2 个部分, 对应的时间长度分别为 $T_n(i, j)$ 和 $T_p(i, j)$, 注意到拖尾时间 $T_n(i, j)$ 与码元相对于基准的延时是相等的, 因此拖尾和增强部分的时间长度表达式分别为:

$$T_n(i, j) = t_{i,j} - t_0(j) \quad (4)$$

$$T_p(i, j) = T - T_n(i, j) \quad (5)$$

任嘉伟,汪涛,王超,等:室内阵列可见光通信多用户信噪比优化算法

其中,增强部分 $T_p(i,j)$ 叠加后会增强接收信号码元内能量的强度;拖尾部分 $T_n(i,j)$ 叠加后则会拓展接收码元的时长,造成码间串扰。码间串扰部分叠加后的总能量称为码间串扰噪声能量。叠加后的信号能量 P_s 和码间串扰噪声能量 P_{ISI} 可以表示为^[5]:

$$P_s(\mathbf{S},j)=\int_{t_0(j)}^{T+t_0(j)}\left[\sum_{i=1}^{N_i}H(\mathbf{S},i,j)\otimes x(t)\right]dt \quad (6)$$

$$P_{\text{ISI}}(\mathbf{S},j)=\int_{T+t_0(j)}^{\infty}\left[\sum_{i=1}^{N_i}H(\mathbf{S},i,j)\otimes x(t)\right]dt \quad (7)$$

其中, $x(t)$ 代表发射的光信号脉冲信号。码间串扰功率叠加在后续的码元上, 可以看作是在传输中增加了噪声, 称为码间串扰噪声。

本文假设可见光无线信道为高斯白噪声信道。因此接收噪声由散粒噪声、热噪声和码间串扰噪声组成。散粒噪声 σ_{shot} 、热噪声 σ_{thermal} 的表达式为:

$$\sigma_{\text{shot}}^2(j)=2q\gamma[P_s(j)+P_{\text{ISI}}(j)]B+2qI_{\text{bg}}I_2B \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{thermal}}^2=8\pi K T_k \eta A I_2 B^2 / G + 16\pi^2 K T_k \Gamma \eta^2 A^2 I_3 B^3 / g_m \quad (9)$$

其中, q 为电子电荷量, B 为等效噪声宽度, K 为玻尔兹曼常数, 其它参数条件如表 1 所示, I_3 取 0.0868。如果 LED 不发送通信信号, 只进行照明, 其发射信号可以视为一个直流分量, 在接收端可以通过交流耦合去除, 对叠加信号噪声没有影响。因此, 接收信号的信噪比表示为:

$$\text{SNR}_j(\mathbf{S})=\frac{[\gamma P_s(\mathbf{S},j)]^2}{\sigma_{\text{shot}}^2(j)+\sigma_{\text{thermal}}^2+[\gamma P_{\text{ISI}}(\mathbf{S},j)]^2} \quad (10)$$

表 1 仿真参数

项目	值
发射光强度	20 mW
半功率辐射角 $\varphi_{1/2}$	70°
接收机视角 ψ_c	60°
PD 接收面积 A	1.0 cm ²
镜头折射率 n	1.5
本底电流 I_{bg}	5100 μA
噪声带宽因子 I_2	0.526
开环电压增益 G	10
固定电容 η	112 pF/cm ²
场效应晶体管跨导 g_m	30 ms
场效应晶体管跨噪声因子 Γ	1.5
绝对温度 T_k	295 K
光/电转换效率 γ	0.53 A/W

2 基于最大信噪比贡献保留和最小信噪比贡献消除的优化算法

当室内有多个用户时, 根据信噪比表达式, 不同位置的接收机的信噪比是不同的。对于室内常见的广播类型应用, 多用户优化目标应为最小信噪比最大化, 从而保证所有用户的可通性和通信质量。此优化问题目标函数可表示为:

$$\max_s \{ \min [\text{SNR}_i(\mathbf{S})] \} \quad (11)$$

考虑到室内照明 LED 阵列的 LED 灯珠数较多, 对于优化式(11), 寻找全局最优解析解比较困难。一个可行的办法是利用随机搜索类算法迭代寻找近似最优解。遗传算法即为一种可行的求解方法。根据遗传算法理论, 每个个体代表一个状态向量的可行解, s_i 即为个体的基因。大量个体组成种群, 目标函数作为适应度函数。种群经过初始化、选择、基因交叉和变异产生新的后代, 通过不断迭代后找到更优化的解。

在本文提出的优化算法中, 初始化种群过程与一般遗传算法相同, 使用随机基因产生方法, s_i 取均匀分布的 0、1 随机数。在每次迭代过程中, 首先计算每个个体的适应度, 然后使用经典的轮盘选择法对个体进行选择。

根据遗传算法理论, 交叉和变异环节对种群基因的多样性和优势基因筛选保留具有重要影响, 其直接影响了算法的收敛速度获取全局最优解的能力。遗传算法中有很多成熟的交叉和变异方法, 比如单点交叉、多点交叉、均匀交叉和一致变异等^[13], 这些方法都是从数学角度针对一般性问题设计的, 可以应用于所有遗传算法问题。但是, 它们都只把基因认为是一种数学编码, 而并不利用基因数值在具体问题里的物理含义。因此, 对于本文的特殊优化问题, 可以提出针对性的交叉和变异方法, 这种方法根据每个基因对最小信噪比的影响来进行基因变换。由式(4)和式(5)可以看出, 码叠加增强部分可以增强信号信噪比, 而拖尾部分则会造成码间串扰, 导致信噪比恶化。对第 j 个接收机来说, 第 i 个 LED 发出的信号对接收信号信噪比的影响可以量化表示为:

$$g_{i,j}=\begin{cases} \frac{T_p(i,j)}{T_n(i,j)}, & T_n(i,j) \neq 0 \\ INF, & T_n(i,j)=0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, INF 为一个特殊标记。针对本文中的特殊优化问题, 可以根据式(12)定义最大信噪比贡献基因保留和最小信噪比贡献基因消除方法。

假设在某一次遗传算法迭代中, 第 k 个接收机的

信噪比最低。在交叉环节,可以使用最大信噪比贡献基因保留方法。首先,通过轮盘选择法等经典的个体选择方法选择父母个体,挑选出来的2个父母个体记做 G_1 和 G_2 。其后代个体 G_c 的每个基因根据如下规则生成:如果 $G_1(i)=G_2(i)=m$,则 $G_c(i)=m, m \in \{0, 1\}$;如果 $G_1(i) \neq G_2(i)$,则 $G_c(i)=\begin{cases} 1, g_{i,k} \geq r \text{ or } g_{i,k} = INF \\ 0, g_{i,k} < r \end{cases}$ 。其

中, r 为一个在 $[\min(g_{i,k}), \max(g_{i,k})]$ 范围内均匀分布的随机数。 INF 值在求最大、最小函数时忽略。在最大信噪比贡献基因保留交叉中,当父母的对应基因不同时,对信噪比贡献最大的后代基因将更容易得到保留。交叉完毕后,在变异环节,本文提出最小贡献基因消除方法。假设个体 G_m 被选择进行变异,则变异操作为:

$$G_m(l) = \begin{cases} 1, g_{l,k} \geq r \text{ or } g_{l,k} = INF \\ 0, g_{l,k} < r \end{cases} \quad (13)$$

其中, $l=a_1, a_2, \dots, a_{N_g}$; $N_g=N_{lg}F_g$, F_g 为编译基因个数占总基因个数的比例。 $a_1, a_2, \dots, a_{N_g}$ 为 $[1, N_L]$ 范围内的 N_g 个随机整数。通过最小贡献基因消除变异,对信噪比影响较差的LED发射信号将更容易被消除。为了保持种群的多样性,普通的随机交叉和变异方法也可以使用。定义一个新的参数 F_m 表示个体在交叉和变异过程中使用本文所提出的交叉变异方法处理的个体和被选择总个体的数量比,其它个体使用一般方法处理。

经过一定数量的迭代,适应度函数的变化将越来越小,当小于某个预设的门限时,认为算法已经收敛,此时最佳个体即为最优解。

3 算法性能分析

本文在典型室内环境条件下对提出的优化算法的性能进行仿真分析。为了方便进行性能比较,本文使用与文献[5]一样的室内可见光广播通信场景。房间尺寸为 $5.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ 。4个大规模LED阵列安装在高度为 2.5 m 的吊顶天花板上,每个阵列由 $3600 (60 \times 60)$ 个LED灯珠组成。LED灯珠之间距离为 1 cm 。LED阵列布局如图3所示。其它参数条件参照表1。这些LED向多个接收机发

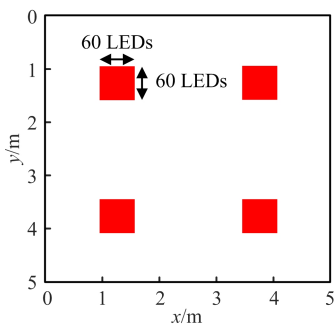


图3 LED阵列分布图

射相同的广播信号。系统通信速率假设为 200 Mb/s 。

接收机放在高为 0.85 m 的桌子上,该水平面称为接收平面。考虑2种应用场景:一种是可见光通信与定位系统结合,此时用户终端精确位置已知;另一种是某些可见光通信系统没有定位功能或终端处于移动状态,此时用户终端的位置不确定,这种情况下,可以考虑在接收机可能出现或移动的范围内均匀设置若干虚拟用户终端来进行优化。这里假设终端位置完全未知,也即接收机可能等概率地出现于接收平面的任何位置。综合考虑运算复杂度,设置16个均匀分布的虚拟用户终端。

根据通信理论,对于开关键控(OOK)调制而言,为使误码率达到 10^{-6} ,信噪比需要 13.6 dB 。遗传算法的初始化和选择操作使用与文献[5]相同的方法。选择出的个体一半使用本文提出的交叉变异方法进行基因处理,其它个体使用传统的单点交叉和一致变异,也即是 $F_m=0.5$ 。每次有 1% 的基因进行变异,也即 $F_g=0.01$ 。

本文提出的优化算法与一般遗传算法的收敛曲线对比情况如图4所示。可以看出,在使用了最大信噪比贡献基因保留和最小信噪比贡献基因消除方法后,在用户终端位置已知时,优化算法需要约1000代左右即可达到收敛,而一般遗传算法对同样的问题需要约2000代,可见本文的方法可以加快算法的收敛速度。而且,优化算法获得的最终信噪比结果优于一般遗传算法 3 dB 。用户终端位置未知时,优化算法的收敛速度和最终结果也优于一般遗传算法。优化后的信噪比在 0.85 m 平面上分布图以及接收机的位置如图5所示。可以看出,在接收机位置已知情况下,经过优化后,高信噪比集中于接收机所在位置,接收机位

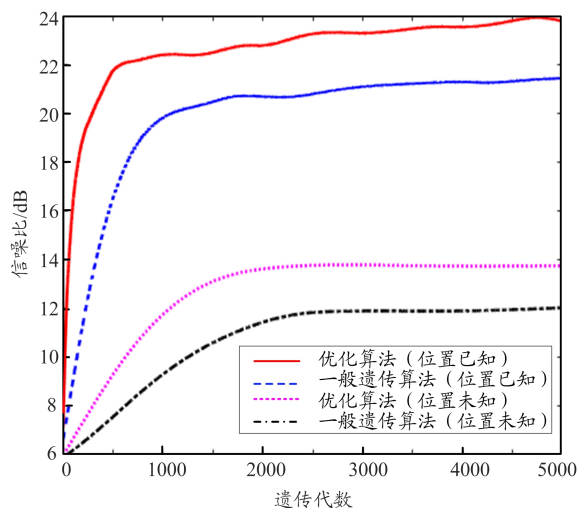
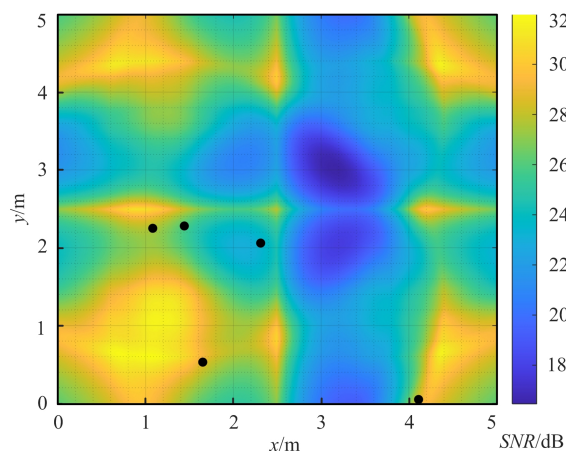
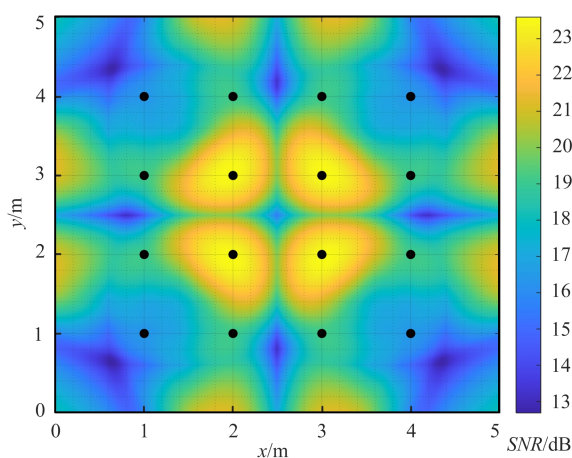


图4 2种遗传算法的收敛曲线



(a) 终端位置已知



(b) 终端位置未知

图5 接收机和信噪比分布图

置及优化结果如表2所示。可以看出,优化后的信噪比明显提升,所有接收机信噪比均高于13.6 dB门限,且具有较大余量。整个接收平面最低信噪比为16.46 dB。在接收机位置未知情况下,经过优化后,信噪比在整个平面内较均匀分布,整个接收平面最低信噪比为13.68 dB。2种情况均可以保证在用户终端在整个接收平面内进行200 Mb/s的高速高质量通信。实际使用时,可以根据预估的接收机位置分布来缩小虚拟用户终端的分布范围,从而获得局部信噪比分布更加优化的结果。

表2 优化结果

接收机位置	未优化信噪比	优化后信噪比
(1.44 m, 2.28 m, 0.85 m)	8.36 dB	25.09 dB
(1.65 m, 0.53 m, 0.85 m)	11.60 dB	27.13 dB
(1.08 m, 2.25 m, 0.85 m)	11.36 dB	27.32 dB
(4.11 m, 0.05 m, 0.85 m)	16.23 dB	28.78 dB
(2.31 m, 2.06 m, 0.85 m)	7.08 dB	23.95 dB

4 结束语

针对室内大规模可见光阵列通信多用户信噪比优化问题,本文提出一种室内阵列可见光通信多用户信噪比优化算法。该算法以所有用户最小信噪比最大化为优化目标,在基因交叉和变异环节引入路径迟差,并设计交叉和变异准则。仿真结果表明:本文提出的优化算法具有更快的收敛速度,且可以获得更好的信噪比优化结果。收敛速度的加快将有利于遗传算法类优化方法在室内可见光通信领域的应用。

参考文献:

- [1] 刘焕淋,朱平鑫,陈勇,等.改进遗传模拟退火算法优化室内VLC覆盖均匀性[J].中国激光,2019,46(1):240-246.
- [2] BITON C, ARNON S. Improved multiple access resource allocation in visible light communication systems [J]. Optics Communications, 2018 (424): 98-102.
- [3] GUPTA A K, CHOCKALINGAM A. Performance of MIMO Modulation Schemes with Imaging Receivers in Visible Light Communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(10): 1912-1927.
- [4] LI P, YANG Y, ZHU Y, et al. A multi-layer VLC imaging system based on space-time trace-rthogonal coding [J]. Optics Communications, 2017 (385): 104-112.
- [5] WANG L, WANG C, CHI X, et al. Optimizing SNR for indoor visible light communication via selecting communicating LEDs [J]. Optics Communications, 2017(387): 174-181.
- [6] 陈述,凌六一,黄家伟,等.室内可见光通信LED光源布局及优化[J].光通信技术,2018,42(10):56-59.
- [7] ZHENG H, CHEN J, YU C, et al. Inverse design of LED arrangement for visible light communication systems[J]. Optics Communications, 2017 (382): 615-623.
- [8] 王加安,车英,郭林煊,等.室内可见光通信系统光源LED布局优化与性能分析[J].中国激光,2018,45(5):166-177.
- [9] SHARMA R, KUMARI A C, AGGARWAL M, et al. Improved RMS Delay and optimal system design of LED based indoor mobile visible light communication system[J]. Physical Communication, 2018, 28(3): 89-96.
- [10] CHEN H, GUAN W, LI S, et al. Indoor high precision three-dimensional positioning system based on visible light communication using modified genetic algorithm[J]. Optics Communications, 2018(413): 103-120.
- [11] XU K, YU H, ZHU Y. Channel-Adapted Spatial Modulation for Massive MIMO Visible Light Communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(23): 2693-2696.
- [12] 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.
- [13] ROTHLAUF F. Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms[M]. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2006.