

# 低复杂度室内超密集可见光通信网络频谱资源分配算法

白向伟, 李青\*, 唐燕群

信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450000

**摘要** 针对室内超密集可见光通信网络多小区资源分配算法中存在的吞吐性能与算法复杂度之间的矛盾, 提出一种吞吐性能近似最优且复杂度低的资源分配算法。通过建立各小区资源分配问题的最优化模型, 得出该问题是凸优化问题的结论; 在合理近似处理后, 推导了终端资源分配归一化比例因子的解析式, 在此基础上提出一种资源分配算法; 算法复杂度分析表明本文算法具有多项式复杂度, 低于经典最优化内点法。仿真表明, 相比于请求速率占比分配法, 本文算法的吞吐量性能提升了 57%, 服务质量满意度性能提升了 67%。

**关键词** 光通信; 可见光通信; 超密集网络; 资源分配; 系统吞吐量; 服务质量保证

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0906007

## Low-Complexity Spectrum Resource Allocation Algorithm for Indoor Ultra-Dense Visible Light Communication Networks

Bai Xiangwei, Li Qing\*, Tang Yanqun

Information System Engineering Institute, Information Engineering University,

Zhengzhou, Henan 450000, China

**Abstract** A low-complexity spectrum resource allocation algorithm with near-optimal system throughput is proposed to resolve the conflict between high system throughput and low complexity of the multi-cell resource allocation algorithm for indoor ultra-dense visible light communication (UD-VLC) networks. Firstly, through establishing the optimal model of the resource allocation problem in each cell, we derive the conclusion that the problem is a convex optimization problem. Then, the analytic formula of the normalized scaling factor of each terminal for resource allocation is derived after reasonable approximate treatment, and the resource allocation algorithm is proposed. Finally, the complexity analysis shows that the proposed algorithm has polynomial complexity, which is lower than the classical optimal inter-point method. The simulation results show that the proposed method achieves 57% performance improvement on average system throughput and 67% performance improvement on quality of service (QoS) satisfaction against the required data rate proportion allocation (RDR-PA) method.

**Key words** optical communications; visible light communication; ultra-dense networks; resource allocation; system throughput; quality of service guarantee

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 060.4250

## 1 引 言

可见光通信(VLC)是一种利用发光二极管(LED)进行高速信息传输的新兴无线通信技术,具有同时支持通信和照明的优点,有效缓解了当前频谱资源紧张的问题,在超市导购、隐式成像<sup>[1]</sup>等领域

已有相关应用。

网络资源分配是以移动通信、无线局域网等为代表的无线网络研究领域的共性关键技术之一。在室内 VLC 网络中,这一问题更为重要。理论上,可见光的频谱范围为 385~790 THz(波长范围 380~780 nm),是射频(RF)网络(300 kHz~

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-04-23; 录用日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(61601516)、郑州市科技创新重大专项

\* E-mail: liqing0206@163.com

300 GHz)可用频谱的 1000 倍<sup>[2]</sup>;但是,现有商用 LED 的调制带宽仅有 20 MHz,实际可用的频谱资源仍很受限<sup>[3-4]</sup>。

可见光通信链路具有视线传输(LoS)特性,链路脆弱,易受遮挡而导致通信中断<sup>[5]</sup>;由于在网络布设时需兼顾照明与通信,VLC 网络比 RF 网络具有更高的接入点(AP)密度,小区交叠干扰问题更为突出;光源具有强指向性,小区覆盖范围有限,终端信道质量与空间位置紧密相关<sup>[6]</sup>,单位面积接入终端具有局部密集的特点:以上各点进一步加剧了 VLC 网络业务分布的局部密集性。据统计,超密集网络(UDN)中终端密度一般大于 0.25 个/m<sup>2</sup>,AP 间距小于 10 m,业务请求大于 10 Mbit/(s·m<sup>2</sup>)<sup>[7]</sup>。综上,室内 VLC 网络具有终端密集、接入点密集、业务密集的超密集特点,可称其为超密集可见光通信(UD-VLC)网络。在资源匮乏、终端间资源竞争激烈的条件下,设计高效的资源分配算法已成为室内 UD-VLC 网络的研究重点和难点之一。

针对室内 VLC 多小区网络场景下的资源分配问题,已有较多经典研究成果。文献[8-10]用马尔可夫模型为终端分配信道资源,文献[11]利用一种新的信道自适应技术分配信道资源。总的来看,文献[8-11]虽然提高了系统性能,但均脱离可见光通信的实际空间场景,未考虑相邻小区间的干扰问题。文献[12-13]基于终端优先级分配资源,利用模糊逻辑(FL)方法实现了终端优先级的度量,虽然提升了吞吐量和满意度,但利用质心法(CM)去模糊化的过程复杂度较高,且 FL 规则表的制定也具有主观

性。文献[14-16]利用终端请求速率占比分配法(RDR-PA)为终端分配资源,仅考虑了终端需求,未考虑信道通信质量,资源利用效率有待提升。文献[17]利用满意度占比分配法为终端分配资源,该算法仅适用于时隙资源的分配,缺少普适性。总的来看,文献[14-17]的算法均具有较低的复杂度,但未能实现最优吞吐性能。文献[18]利用梯度法解决资源最优分配问题,虽然实现了最优资源分配,但当目标函数为复杂的非线性函数时,存在收敛速度慢的缺点。综上,吞吐性能最优和算法复杂度低是一对矛盾指标,仍需设计一种吞吐性能最优且复杂度低的高效资源分配算法。

本文基于凸优化理论,提出了一种吞吐近似最优且复杂度为二次多项式复杂度的高效资源分配算法,克服了性能最优与复杂度低之间的矛盾。与最优化内点法相比,本文算法在降低算法复杂度的同时,具有与之相似的吞吐性能和服务质量(QoS)满意度保证。仿真分析表明,与请求速率占比分配法和均等分配法相比,本文算法吞吐量提升了 57%,QoS 满意度保证性能提升了 67%。

## 2 系统模型

如图 1 所示,本文所讨论的室内 UD-VLC 网络模型由以下过程生成:1)网络中包含  $N_A$  个规则布置的 AP;2)在距离 AP 高差为  $L$  的二维平面上随机均匀分布  $N_u$  个终端,终端运动模型采用静止模型;3)每个小区由 1 个 AP 和接受其服务的终端构成;4)可见光信道的传输特性近似认为是时不变信道。

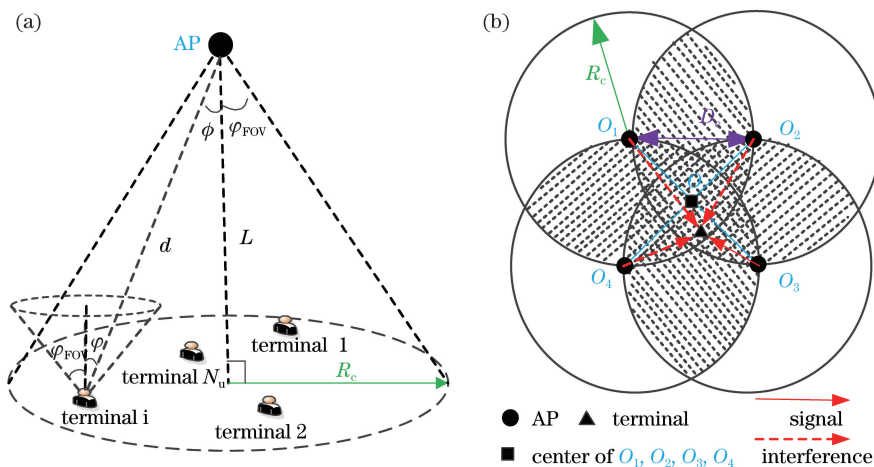


图 1 UD-VLC 网络模型。(a)单 AP 覆盖范围图;(b)局部网络交叠区示意图

Fig. 1 Model of UD-VLC networks. (a) Coverage of single AP;

(b) schematic of overlapping area of local networks

## 2.1 信道模型

如图 1(a) 所示, 在可见光 LoS 信道下, 终端  $i$  和 AP  $j$  间的信道增益为<sup>[19]</sup>

$$h_{i,j} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d_{i,j}^2} \cos^m \phi T_s(\varphi) g(\varphi) \cos \varphi, & 0 \leq \varphi \leq \varphi_{\text{FOV}} \\ 0, & \varphi > \varphi_{\text{FOV}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $m$  为朗伯阶数,  $m = -\ln 2 / [\ln(\cos \phi_{1/2})]$ ,  $\phi_{1/2}$  为半功率角;  $A$  为接收机有效接收面积;  $d_{i,j}$  为终端  $i$  和 AP  $j$  的空间距离;  $\phi$  为终端出射角;  $\varphi$  为终端入射角;  $T_s(\varphi)$  为滤波器增益;  $\varphi_{\text{FOV}}$  为终端接收视场角 (FOV);  $g(\varphi)$  为光学集中器增益, 可表示为

$$g(\varphi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \varphi_{\text{FOV}}}, & 0 \leq \varphi \leq \varphi_{\text{FOV}} \\ 0, & \varphi > \varphi_{\text{FOV}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $n$  为透镜折射系数。假设每个终端至多被一个 AP 服务, 若终端  $i$  与 AP  $j_a$  (特指与终端  $i$  相关联的 AP, 以便与那些与终端  $i$  没有必然关联的 AP  $j$  相区别) 相关联, 则终端接收的信号信干噪比 (SINR) 为<sup>[20]</sup>

$$\gamma_i = \frac{(rP_i h_{i,j_a})^2}{\sum_{j=1, j \neq j_a}^{N_A} (rP_j h_{i,j})^2 + n_0 B_{i,j_a}}, \quad (3)$$

式中:  $\gamma_i$  为终端  $i$  的 SINR 值;  $r$  为接收机灵敏度;  $P_i$  为 AP 发射光功率;  $n_0$  为噪声功率谱密度;  $B_{i,j_a}$  为 AP  $j_a$  分配给终端  $i$  的带宽。终端  $i$  因受阻挡等因素影响而产生通信中断, 其中断事件随机变量  $X_i$  在单位周期内服从伯努利分布<sup>[21]</sup>, 即

$$\begin{cases} P(X_i = 1) = 1 - p_i \\ P(X_i = 0) = p_i \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $X_i = 0$  表示信道发生中断,  $P(X_i = 0) = p_i$  表示中断发生的概率为  $p_i$ ;  $X_i = 1$  表示信道未发生中断,  $P(X_i = 1) = 1 - p_i$  表示信道未发生中断的概率为  $1 - p_i$ ;  $P(\cdot)$  表示对应事件发生的概率。各终端信道具有差异性, 假设  $p_i$  服从贝塔分布<sup>[22]</sup>。假设 AP 调制方式为开关键控 (OOK), 则终端  $i$  下行链路可达吞吐量为

$$C_i = (1 - p_i) B_{i,j_a} \log_2(1 + \gamma_i). \quad (5)$$

终端请求速率  $R_i$  服从伽马分布<sup>[23]</sup>, 各终端的中断期望记为  $\bar{p}$ , 请求速率期望记为  $\bar{R}$ 。

## 2.2 网络模型

图 1(b) 为 UD-VLC 网络模型的局部图。图 1(b)

包含 4 个规则布置的小区, 说明了多小区覆盖范围间的交叠关系, 体现了 AP 密集的特点。单 AP 覆盖半径  $R_c = L \tan \varphi_{\text{FOV}}$ , 4 个规则布置的 AP 构成正方形  $O_1 O_2 O_3 O_4$ , 中心为  $O$ ,  $D_c$  为 AP 间距离。当  $D_c \leq R_c$  时, 网络中任意位置可实现照明覆盖, 且终端存在干扰信号。终端基于信号强度策略 (SSS)<sup>[14]</sup> 与 AP 进行关联, 即终端由距离其最近的 AP 提供服务。

## 3 资源分配算法

### 3.1 资源分配问题凸性分析

当终端和 AP 的关联方式采用 SSS 策略, 且终端运动模型采用静止模型时, 多小区网络可等价分解为多个有扰单小区网络。若每个有扰小区的资源分配性能实现最优化, 则整个网络的资源分配性能可实现最优化。某有扰单小区在频谱资源约束下的吞吐最大化问题可表示为

$$\begin{aligned} \text{P1: } \max f(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^N (1 - p_i) (B x_i) \log_2 \left( 1 + \frac{S_i}{I_i + N_i} \right), \\ \text{s.t. } &\begin{cases} x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \\ x_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N x_i \leq 1 \end{cases}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)$ ;  $x_i$  为优化变量, 表示终端  $i$  分得的归一化资源比例因子;  $N$  为小区 AP 关联终端数;  $B$  为总频谱带宽;  $S_i$  为终端  $i$  的有用信号;  $I_i$  为终端  $i$  的干扰信号;  $N_i$  为终端  $i$  的噪声; 不等式约束表示每个终端分得的资源比例因子数值为  $0 \sim 1$ , 且所有终端分得的资源和不超过小区总资源。在某个分配周期内, 终端位置确定, 则  $p_i, S_i, I_i$  为常数,  $N_i = n_0 B x_i$  为优化变量的函数。记  $\alpha_i = (1 - p_i) B$ ,  $\beta_i = n_0 B$ , 问题 P1 的等价问题为

$$\begin{aligned} \text{P2: } \min f_0(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^N -\alpha_i x_i \log_2 \left( 1 + \frac{S_i}{I_i + \beta_i x_i} \right), \\ \text{s.t. } &\begin{cases} x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N x_i \leq 1 \end{cases}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $f_0(\mathbf{x}) = -f(\mathbf{x})$ ,  $f_0(\mathbf{x})$  关于  $x_i$  的一阶偏导数为

$$\frac{\partial f_0}{\partial x_i} = -\alpha_i \log_2 \left\{ \frac{1 + \frac{S_i}{I_i + \beta_i x_i}}{\exp \left[ \frac{\beta_i S_i x_i}{(I_i + S_i + \beta_i x_i)(I_i + \beta_i x_i)} \right]} \right\}. \quad (8)$$

记  $g(x_i) = \frac{1 + \frac{S_i}{I_i + \beta_i x_i}}{\exp\left[\frac{\beta_i S_i x_i}{(I_i + S_i + \beta_i x_i)(I_i + \beta_i x_i)}\right]}$ , 则

$f_0(x)$  关于  $x_i$  的二阶偏导数为

$$\frac{\partial^2 f_0}{\partial x_i^2} = -\frac{\alpha_i}{\ln 2} \cdot \frac{1}{g(x_i)} \cdot \frac{\partial g(x_i)}{\partial x_i}, \quad (9)$$

二阶混合偏导数为

$$\frac{\partial^2 f_0}{\partial x_i \partial x_j} = 0. \quad (10)$$

$g(x_i)$  关于  $x_i$  的偏导数为

$$\frac{\partial g(x_i)}{\partial x_i} = \frac{-S_i \beta_i (2I_i^2 + 2I_i \beta_i x_i + 2S_i I_i + S_i \beta_i x_i)}{(I_i + S_i + \beta_i x_i)(I_i + \beta_i x_i)^3 \exp\left[\frac{\beta_i S_i x_i}{(I_i + S_i + \beta_i x_i)(I_i + \beta_i x_i)}\right]} < 0, \quad (11)$$

因此,  $g(x_i)$  的最大值和最小值分别为

$$\begin{cases} g_{\max}(x_i) = g(x_i) |_{x_i=0} = 1 + \frac{S_i}{I_i} > 0 \\ g_{\min}(x_i) = g(x_i) |_{x_i=1} = \frac{1 + \frac{S_i}{I_i + \beta_i}}{\exp\left[\frac{\beta_i S_i}{(I_i + S_i + \beta_i)(I_i + \beta_i)}\right]} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

根据(11)式和(12)式,(9)式中  $f_0(x)$  关于  $x_i$  的二阶偏导数非负。根据(9)式和(10)式,可知  $f_0(x)$  的海森矩阵为半正定或正定阵,故问题 P2 的目标函数是凸函数。问题 P2 中不等式约束函数均为仿射函数,故可行域为凸集。综上所述,问题 P2

是凸优化问题,其局部最优解即为全局最优解,理论上一定可以得到全局最优解<sup>[24]</sup>。

### 3.2 低复杂度多小区资源分配算法

记  $p(S_i) = g_{\min}(x_i)$ , 则  $p(S_i)$  关于  $S_i$  的偏导数为

$$\frac{\partial p(S_i)}{\partial S_i} = \frac{I_i + S_i}{(I_i + \beta_i)(I_i + S_i + \beta_i) \exp\left[\frac{\beta_i S_i}{(I_i + S_i + \beta_i)(I_i + \beta_i)}\right]} > 0, \quad (13)$$

因此  $p_{\min}(S_i) = p(S_i) |_{S_i=0} = 1, g_{\min}(x_i) \geq p_{\min}(S_i) = 1$ 。结合(8)式可知  $\frac{\partial f_0}{\partial x_i} < 0$ , 则  $\frac{\partial f}{\partial x_i} > 0$ , 即对于任意终端,分得的资源比例越高,其可达吞吐量越高。因此,当小区分配给所有终端的资源比例因子和为1时,系统吞吐量实现最大化。问题 P2 的等价问题为

$$\begin{aligned} \text{P3: } \min f_0(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^N -\alpha_i x_i \log_2 \left( 1 + \frac{S_i}{I_i + \beta_i x_i} \right), \\ \text{s.t. } &\begin{cases} x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \\ \mathbf{1}^T \mathbf{x} = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

因问题 P3 是凸优化问题,且至少存在一个可行解  $x_i = \frac{1}{N}, i = 1, 2, \dots, N$  满足 Slater 条件,则问题 P3 满足强对偶性<sup>[24]</sup>。对其不等式约束  $x_i \geq 0$  引入拉格朗日乘子  $\lambda_i$ , 对等式约束  $\mathbf{1}^T \mathbf{x} = 1$  引入乘子

$\nu$ , 列写 KKT(Karush-Kuhn-Tucher)条件,即

$$\begin{cases} x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \\ \mathbf{1}^T \mathbf{x} = 1 \\ \lambda_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \\ \lambda_i x_i = 0, i = 1, 2, \dots, N \\ -\alpha_i \log_2[g(x_i)] - \lambda_i + \nu = 0, i = 1, 2, \dots, N \end{cases}, \quad (15)$$

式中:  $\lambda_i$  为松弛变量,  $\lambda_i = \nu - \alpha_i \log_2[g(x_i)]$ , 将其代入(15)式中第3个公式和第4个公式,可得

$$\begin{cases} x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \\ \mathbf{1}^T \mathbf{x} = 1 \\ \nu \geq \alpha_i \log_2[g(x_i)], i = 1, 2, \dots, N \\ x_i \{\nu - \alpha_i \log_2[g(x_i)]\} = 0, i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (16)$$

由(16)式第1个公式知,  $x_i = 0$  或  $x_i > 0$ 。观察(16)式第4个公式,有如下两种情况:

1) 若  $x_i=0$ , 则  $\nu - \alpha_i \log_2 [g(0)]$  可取任意实数, 即  $\nu - \alpha_i \log_2 \left(1 + \frac{S_i}{I_i}\right)$  可取任意实数。结合 (16) 式中第 3 个公式, 可得  $\nu \geq \alpha_i \log_2 \left(1 + \frac{S_i}{I_i}\right)$ 。

2) 若  $x_i > 0$ , 则  $\nu - \alpha_i \log_2 [g(x_i)] = 0$ , 即  $\nu = \alpha_i \log_2 [g(x_i)] \geq 0$ , 此结果已满足 (16) 式中第 3 个公式。根据  $g(x_i)$  的单调递减性质知  $\nu < \alpha_i \log_2 \left(1 + \frac{S_i}{I_i}\right)$ 。由  $\nu = \alpha_i \log_2 [g(x_i)]$ , 得  $x_i = g^{-1}(2^{\frac{\nu}{\alpha_i}})$ ,  $g^{-1}(\cdot)$  是  $g(\cdot)$  的反函数。记  $\sigma_i = \alpha_i \log_2 \left(1 + \frac{S_i}{I_i}\right)$ , 则有

$$x_i = \begin{cases} g^{-1}(2^{\frac{\nu}{\alpha_i}}), & 0 \leq \nu < \sigma_i \\ 0, & \nu \geq \sigma_i \end{cases} \quad (17)$$

将 (17) 式代入 (16) 式中的第 2 个公式, 得

$$q(\nu) = \sum_{i=1}^N x_i = 1. \quad (18)$$

(18) 式左端为  $\nu$  的分段递减函数, 分割点为  $\sigma_i$ , 因此 (18) 式关于  $\nu$  有唯一解。求得  $\nu$  值后, 根据 (17) 式确定  $x_i$  值, 问题 P3 求解完毕。由于  $g(x_i)$  的反函数不是初等函数, 根据可见光通信场景参数对其进行近似处理, 得到其近似函数为

$$\tilde{g}(x_i) = \frac{1 + \frac{S_i}{I_i}}{\exp\left[\frac{\beta_i S_i x_i}{I_i(S_i + I_i)}\right]}, \quad (19)$$

近似函数  $\tilde{g}(x_i)$  的反函数为

$$\tilde{g}^{-1}(y_i) = \frac{I_i(S_i + I_i)}{\beta_i S_i} \ln\left(\frac{S_i + I_i}{I_i y_i}\right). \quad (20)$$

各终端分割点  $\sigma_i$  及  $\nu$  的边界值 0 组成分割点向量  $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N, 0)$ , 对其进行降序排序, 得到降序分割点向量  $\boldsymbol{\sigma}' = (\sigma'_1, \sigma'_2, \dots, \sigma'_i, \dots, \sigma'_N, 0)$ 。假设  $\nu$  的值在第  $k$  个区间段  $[\sigma'_{k+1}, \sigma'_k]$  上, 记作  $\nu_k$ , 其中  $k = 1, 2, \dots, N$ 。根据 (17)、(18) 式和 (20) 式可得  $\nu_k$  的近似值为

$$\tilde{\nu}_k = \frac{\log_2 \left[ \frac{\prod_{i=1}^k \left( \frac{S'_i + I'_i}{I'_i} \right)^{\frac{I'_i(S'_i + I'_i)}{\beta'_i S'_i}}}{e} \right]}{\sum_{i=1}^k \frac{I'_i(S'_i + I'_i)}{\alpha'_i \beta'_i S'_i}}, \quad (21)$$

式中:  $I'_i$  为分割点是  $\sigma'_i$  的终端的干扰信号;  $S'_i$  为分割点是  $\sigma'_i$  的终端的有用信号;  $\alpha'_i = (1 - p'_i)B$ ,  $p'_i$  为分

割点是  $\sigma'_i$  的终端的信道中断概率;  $\beta'_i = n_0 B$ 。判断  $\tilde{\nu}_k$  是否在区间  $[\sigma'_{k+1}, \sigma'_k]$  上: 若在, 则将近似最优拉格朗日乘子  $\tilde{\nu}$  取值为  $\tilde{\nu}_k$ , 并计算各终端近似最优归一化资源分配比例因子  $\tilde{x}_i$ ; 否则, 在第  $k+1$  个区间段上进行判断操作, 直到找到满足条件的  $\tilde{\nu}$ 。

### 3.3 算法描述及复杂度分析

根据 3.2 节中的推导, 本文算法总结为图 2 中的资源分配算法, 整个网络执行算法的操作次数上界取决于分割点向量降序排序时使用的排序方法。记小区  $j$  关联的终端数为  $N_j$ , 当选择经典冒泡排序法进行排序时, 小区  $j$  的执行操作次数为  $N_j^2$ , 整个网络操作总次数  $C$  满足:

$$C = \sum_{j=1}^{N_A} N_j^2, \text{ s.t. } \sum_{j=1}^{N_A} N_j = N_u. \quad (22)$$

---

**Input:** the information of terminals and APs  
**Output:** the approximate optimal normalized resource ratio factor  $\tilde{x}_i$  of each terminal

```

for i = 1:1:N_u
    calculate the break point  $\sigma_i$  for terminal i
end
for j = 1:1:N_A do the following steps for Cell_j
    constitute the break point vector  $\boldsymbol{\sigma}_j$ 
    sort  $\boldsymbol{\sigma}_j$  in descending order and obtain  $\boldsymbol{\sigma}'_j$ 
    for k = 1:1:N_j
        calculate  $\tilde{\nu}_k$ 
        if  $\tilde{\nu}_k \in [\sigma'_{k+1}, \sigma'_k]$ 
             $\tilde{\nu} = \tilde{\nu}_k$ 
            break
        end
    end
end
for i = 1:1:N_u
    calculate the approximate optimal normalized resource ratio factor  $\tilde{x}_i$ 
end

```

---

图 2 低复杂度多小区资源分配算法  
 Fig. 2 Low-complexity multi-cell resource allocation algorithm

根据均值不等式理论, 算数平均数小于等于平方平均数, 则有

$$C = \sum_{j=1}^{N_A} N_j^2 \geq \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_A} N_j\right)^2}{N_A} = \frac{N_u^2}{N_A}. \quad (23)$$

当且仅当  $N_1 = N_2 = \dots = N_{N_A} = \frac{N_u}{N_A}$  时, (23) 式等号成立。又根据不等式理论:

$$C = \sum_{j=1}^{N_A} N_j^2 \leq \left(\sum_{j=1}^{N_A} N_j\right)^2 = N_u^2, \quad (24)$$

当且仅当  $N_1 = N_u, N_2 = \dots = N_{N_A} = 0$  时, (24) 式等号成立。本文用符号  $\Omega(\cdot)$  表示算法的渐进时间复杂度下界, 用符号  $O_i(\cdot)$  表示算法的渐进时间复杂度上界。根据 (23) 式, 本文算法的渐进时间复杂度下界为  $\Omega\left(\frac{N_u^2}{N_A}\right)$ ; 根据 (24) 式, 本文算法的渐进时间

复杂度上界为  $O_f(N_u^2)$ 。经典最优化算法内点法的复杂度为  $O_f(N_u^{3.5})$  [25-26], 因此本文算法的复杂度明显低于内点法。

## 4 算法仿真分析

### 4.1 仿真条件

如无特殊说明, 本文仿真分析的参数如表 1 所示。仿真分析的性能指标为系统吞吐量与终端满意度。系统吞吐量即网络中所有终端的吞吐量之和可表示为

$$C_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{N_u} C_i \quad (25)$$

终端  $i$  的 QoS 满意度即终端的可达吞吐量与请求数据速率的比值 [12], 可表示为

$$\chi_i = \begin{cases} C_i/R_i, & C_i < R_i \\ 1, & C_i \geq R_i \end{cases} \quad (26)$$

QoS 满意度越高, 表明网络对终端的业务请求保证越高 [17]。QoS 满意度为 1 的终端称为满意终端。选取文献 [25-26] 中的内点 (inter-point) 法、文献 [14-16] 中的 RDR-PA 算法、文献 [27-28] 中经典的均等分配 (uniform) 法作为对比算法。

### 4.2 系统吞吐量性能分析

#### 1) 终端密集对性能的影响

图 3 所示为终端密度  $\rho_u$  对平均系统吞吐量的影响。当  $\rho_u$  一定时, 本文算法和 inter-point 方法具有相似的性能, uniform 法和 RDR-PA 算法具有相似性能, 且本文算法性能优于 uniform 法和 RDR-PA 算法。4 种分配方法的曲线图具有相同的趋势: 当  $\rho_u$  逐渐增大时, 平均系统吞吐量逐渐增加, 且增长速率逐渐减小, 直至最后趋于稳定。这是因为, 当

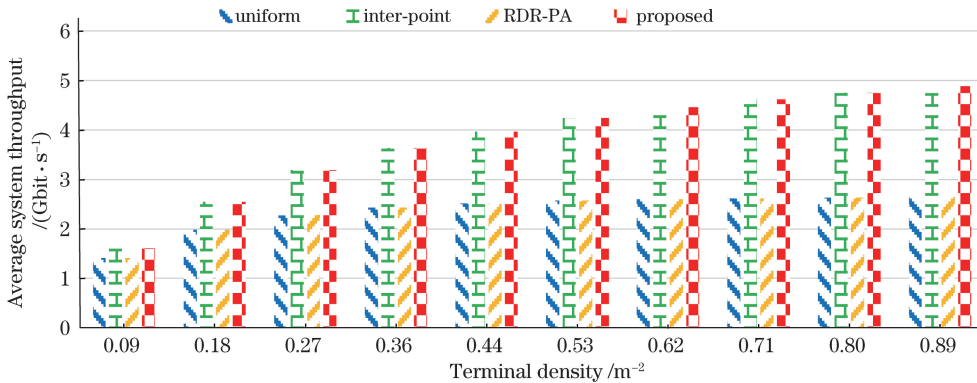


图 3 终端密度对平均系统吞吐量的影响对比图

Fig. 3 Algorithm comparison in the effect of terminal density on average system throughput

#### 2) AP 密集对性能的影响

图 4 所示为 AP 密集程度  $\rho_A$  对平均系统吞吐

Parameter	Value
Room size / (m × m × m)	15 × 15 × 3
Transmit optical power of AP $P_t$ / W	9
Height between AP and terminal $L$ / m	2.15
Half-intensity radiation angle $\phi_{1/2}$ / (°)	60
FOV of terminal $\varphi_{\text{FOV}}$ / (°)	60
Refractive index $n$	1.5
Detector responsivity $r$ / (A · W <sup>-1</sup> )	0.53
Physical area of terminal $A$ / m <sup>2</sup>	1.0 × 10 <sup>-4</sup>
Power spectral density of noise $n_0$ / (A <sup>2</sup> · Hz <sup>-1</sup> )	1.0 × 10 <sup>-21</sup>
Bandwidth of each AP $B$ / MHz	40
Gain of optical filter $T_S(\varphi)$	1
Average required data rate $\bar{R}$ / (Mbit · s <sup>-1</sup> )	40
Average blocking probability $\bar{p}$	0.1
Density of APs $\rho_A$ / (counts · m <sup>-2</sup> )	0.11
Density of terminals $\rho_u$ / (counts · m <sup>-2</sup> )	0.44

$\rho_u$  较低时, 随着终端密度的增长, 处于服务状态的 AP 比例增大, 没有终端与之关联的 AP 比例降低, 因此吞吐量增长速率较快; 当  $\rho_u$  较高时, 处于服务状态的 AP 比例已接近于 1, 囿于资源的有限性, 平均系统吞吐量逐渐趋于稳定。本文算法的吞吐收敛点处  $\rho_u$  值高于 RDR-PA 算法, 说明本文算法对终端的容纳能力更强, 对终端密集场景的适应性更好。当  $\rho_u$  为 0.89 时, RDR-PA 算法的平均系统吞吐量稳定在 2.64 Gbit/s, 而本文算法的平均系统吞吐量为 4.88 Gbit/s, 性能提升比例为 84.8%, 说明本文算法对吞吐性能的优化效果更好。

量的影响。本文算法和 inter-point 方法性能相近, 优于 RDR-PA 算法和 uniform 方法。一方面,  $\rho_A$  的

增大使得网络资源总量增加;另一方面, $\rho_A$  的增大使得交叠区面积增大,小区之间干扰增大。总体而言,小间距干扰造成的吞吐量的损失大于资源增加带来的吞吐增量,所以  $\rho_A$  越高,平均系统吞吐量越低。从节省能量的角度考量,应该适当降低 AP 的

布设密集程度。相比于 RDR-PA 算法,本文算法的吞吐量增长值及吞吐性能提升比例随  $\rho_A$  的增大而降低。当  $\rho_A$  为  $0.11 \text{ m}^{-2}$  时,本文算法有最大吞吐增量  $1.46 \text{ Gbit/s}$ ,性能提升比例最大值为  $57.8\%$ ,更适用于 AP 密集场景。

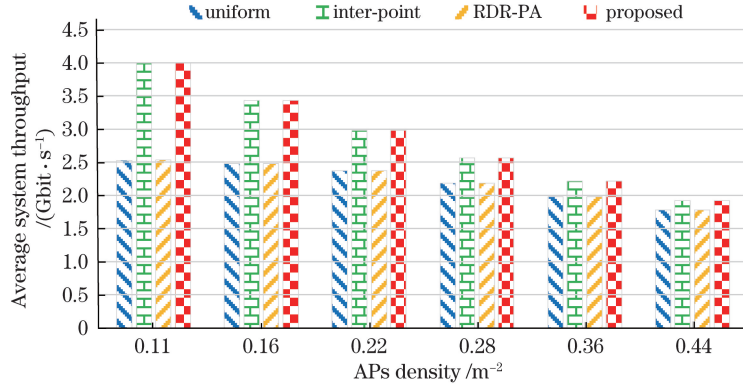


图 4 AP 密度对平均系统吞吐量的影响对比图

Fig. 4 Algorithm comparison in effect of AP density on average system throughput

### 3) FOV 对性能的影响

图 5 所示为 FOV 对平均系统吞吐量的影响。为满足本文算法超密集覆盖的要求,AP 布设密度设定为  $0.284 \text{ m}^{-2}$ 。4 种算法的性能均随着 FOV 的增大而降低。这是因为,根据(2)式,当 AP 在终端 FOV 以内时,集中器增益关于 FOV 的一阶导数  $g'(\varphi_{\text{FOV}}) = -2n^2 \cos \varphi_{\text{FOV}} / \sin^2 \varphi_{\text{FOV}}$  小于 0,FOV 增大将导致  $g(\varphi_{\text{FOV}})$  减小,并将导致信道增益降低。因

此,可以通过适当调小 FOV 来提高系统性能。但过度调小 FOV 会造成 AP 覆盖范围缩小,形成通信盲区;因此,需要在通信覆盖效率和吞吐量性能之间进行权衡。4 种算法的性能随 FOV 增大而降低的速率逐渐变缓。这是因为集中器增益关于 FOV 的二阶导数  $g''(\varphi_{\text{FOV}}) = 2n^2(1 + 2 \cos^2 \varphi_{\text{FOV}}) / \sin^4 \varphi_{\text{FOV}}$  大于 0。相比于 RDR-PA 算法,本文算法的性能提升比例稳定在  $17.2\%$ 。

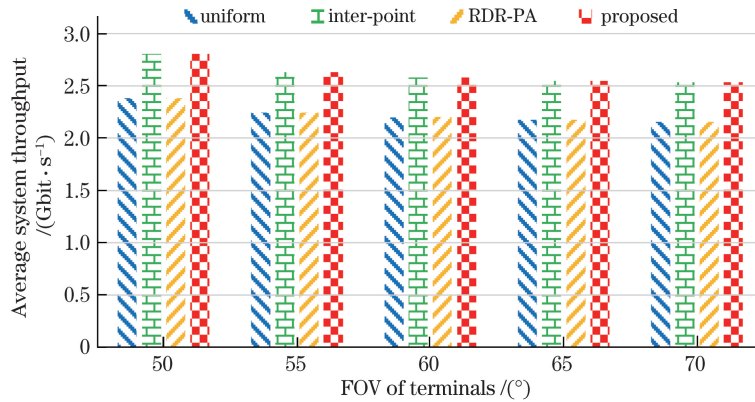


图 5 FOV 对平均系统吞吐量的影响对比图

Fig. 5 Algorithm comparison in effect of FOV on average system throughput

## 4.3 QoS 满意度保证性能分析

### 1) 终端密集对性能的影响

图 6 所示为终端密度  $\rho_u$  对平均满意终端比例的影响。当  $\rho_u$  约为  $0.22 \text{ m}^{-2}$  时,4 种方法的性能相似;当  $\rho_u$  小于  $0.22 \text{ m}^{-2}$  时,本文算法的性能略低于 RDR-PA 算法,但性能差距较小(差距相对比例在  $5\%$  以内);当  $\rho_u$  大于  $0.22 \text{ m}^{-2}$  时,本文算法的性能

优于 RDR-PA 算法,且性能提升比例随着  $\rho_u$  的增大而逐步提高,当  $\rho_u$  为  $0.89 \text{ m}^{-2}$  时,性能提升比例已达  $67\%$ 。这是因为:当  $\rho_u$  小于  $0.22 \text{ m}^{-2}$  时,终端密度相对较低,终端间资源竞争的激烈程度较低,资源相对充足,本文算法无明显优势;当  $\rho_u$  大于  $0.22 \text{ m}^{-2}$  时,随着终端密度的增加,终端间资源竞争的激烈程度逐渐增加,资源短缺程度逐渐加剧,此时

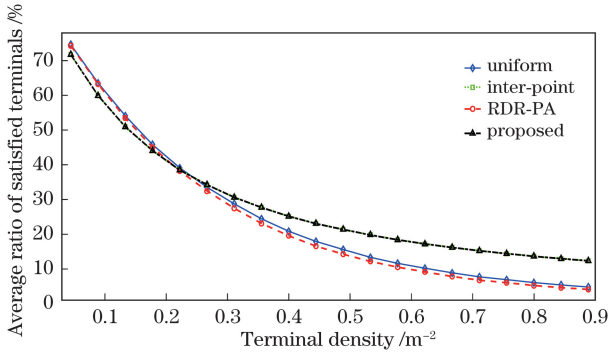


图 6 终端密度对平均满意终端比例的影响对比图

Fig. 6 Algorithm comparison in effect of terminal density on average ratio of satisfied terminals

本文算法在资源利用效率方面的优势逐渐凸显。本文算法性能超越点的单位面积终端数 0.22 接近于终端密集临界值 0.25, 说明本文算法在终端超密集场景下具有更好的 QoS 保障, 更适用于终端密集

场景。

### 2) AP 密集对性能的影响

如图 7 所示, 研究 AP 密度  $\rho_A$  对平均满意终端比例的影响。本文算法的平均满意终端比例随  $\rho_A$  的增加呈现出先增后降的单峰性质, 约在  $0.25 \text{ m}^{-2}$  时出现峰值; RDR-PA 算法的性能随  $\rho_A$  的升高而降低。这是因为, 本文算法对资源的利用率高于 RDR-PA 法。当 AP 密度较低时, 随着  $\rho_A$  的增加, 本文算法在系统吞吐量方面的优势超过小区交叠干扰产生的不利影响; 当  $\rho_A$  进一步增大时, 由于小区间交叠干扰过于严重, 满意终端比例降低。当 AP 密度为  $0.22 \text{ m}^{-2}$  时, 本文算法的满意终端比例达到 35.2%; 当 AP 密度为  $0.28 \text{ m}^{-2}$  时, 本文算法具有最大满意终端比例绝对增量为 22.2%, 性能提升 172.8%。综上, 在满意终端比率性能方面, 本文算法具有一定的克服小区间干扰的能力。

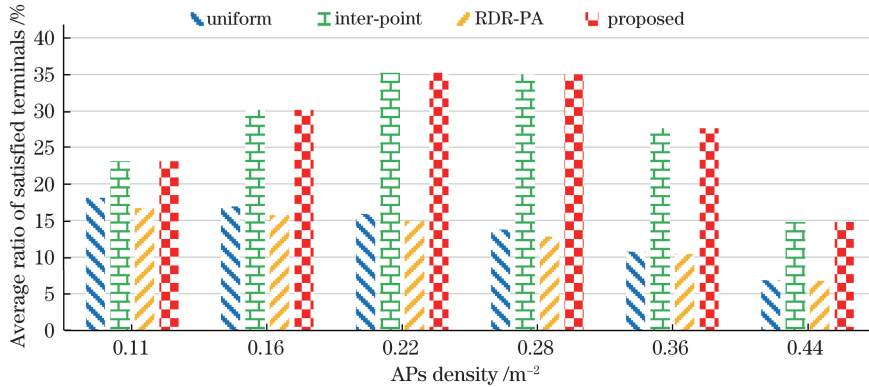


图 7 接入点密度对平均满意终端比例的影响对比图

Fig. 7 Algorithm comparison in effect of access point density on average ratio of satisfied terminals

### 3) 业务密集对性能的影响

图 8 所示为终端平均请求速率  $\bar{R}$  对平均满意终端比例的影响。随着  $\bar{R}$  的增加, 本文算法满意终

端比例缓慢降低, 而 RDR-PA 算法的满意终端比例却快速下降。例如, 当  $\bar{R}$  由 20 Mbit/s 提升至 100 Mbit/s 时, 本文算法的满意终端比例由 23.5%

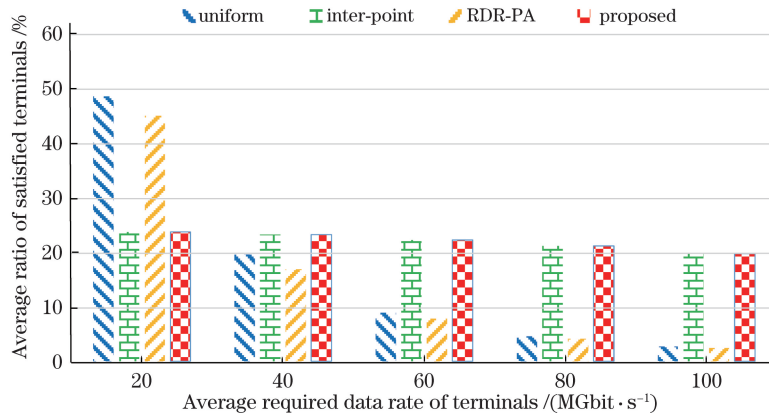


图 8 终端平均请求速率对平均满意终端比例的影响对比图

Fig. 8 Algorithm comparison in effect of average required data rate of terminals on average ratio of satisfied terminals



降至 19.6%，性能下降相对比例仅为 16.9%；而 RDR-PA 算法的满意终端比例由 44.7% 降至 2.4%，性能下降相对比例高达 94.7%。当  $\bar{R}$  高于 40 Mbit/s 时，相比于 RDR-PA 算法，本文算法的性能实现超越。这是因为，随着  $\bar{R}$  的增加，资源紧张状况加剧，本文算法在吞吐量方面的性能优势逐渐凸显。当  $\bar{R}$  为 100 Mbit/s 时，本文算法性能是 RDR-PA 算法的 8.2 倍。以上分析表明，本文算法在高终端需求下具有较好的 QoS 保障，更适用于业务密集型场景。

## 5 结 论

针对室内超密集可见光通信网络多小区资源分配中存在的吞吐最优与算法低复杂度相矛盾的问题，通过凸优化理论，提出了一种吞吐近似最优且复杂度低的资源分配算法。仿真分析表明，相比于 RDR-PA 算法，本文算法的吞吐性能和 QoS 保证均有明显提升，适用于超密集场景。下一步将针对小区间干扰消除的问题进行研究。

### 参 考 文 献

- [1] Li M C, Hu Y P, Yao X W, *et al.* Frame synchronization compensation algorithm for visible light implicit imaging communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0106002.  
李明超, 胡赟鹏, 姚祥文, 等. 一种可见光隐式成像通信帧同步补偿算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0106002.
- [2] Feng L F, Hu R Q, Wang J P, *et al.* Applying VLC in 5G networks: architectures and key technologies[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(6): 77-83.
- [3] Chen C, Serafimovski N, Haas H. Fractional frequency reuse in optical wireless cellular networks[C]//2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 8-11, 2013, London, UK. New York: IEEE, 2013: 3594-3598.
- [4] Li X, Huo Y K, Zhang R, *et al.* User-centric visible light communications for energy-efficient scalable video streaming [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2017, 1(1): 59-73.
- [5] Li X, Zhang R, Wang J H, *et al.* Cell-centric and user-centric multi-user scheduling in visible light communication aided networks[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 8-12, 2015, London, UK. New York: IEEE, 2015: 5120-5125.
- [6] Tao S Y, Yu H Y, Li Q, *et al.* Performance analysis of gain ratio power allocation strategies for non-orthogonal multiple access in indoor visible light communication networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018, 2018: 154-167.
- [7] Chen S Z, Qin F, Hu B, *et al.* User-centric ultra-dense networks for 5G[M]//SpringerBriefs in electrical and computer engineering. Cham: Springer, 2017: 1-3.
- [8] Uddin M S, Chowdhury M Z, Jang Y M. Priority-based resource allocation scheme for visible light communication[C]//2010 Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), June 16-18, 2010, Jeju Island, Korea. New York: IEEE, 2010: 247-250.
- [9] Chowdhury M Z, Uddin M S, Jang Y M. Dynamic channel allocation for QoS provisioning in visible light communication[C]//2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), January 9-12, 2011, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE, 2011: 13-14.
- [10] Chowdhury M Z, Uddin M S, Jang Y M. Dynamic channel allocation for class-based QoS provisioning and call admission in visible light communication[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(2): 1007-1016.
- [11] Chowdhury M Z, Jang Y M, Haas Z J. Priority based bandwidth adaptation for multi-class traffic in wireless networks[J]. *International Journal of Multimedia & Ubiquitous Engineering*, 2012, 7(2): 445-450.
- [12] Wu X P, Safari M, Haas H. Bidirectional allocation game in visible light communications[C]//2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 15-18, 2016, Nanjing, China. New York: IEEE, 2016: 1-5.
- [13] Wu X, Safari M, Haas H. Three-state fuzzy logic method on resource allocation for small cell networks [C]//2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), August 30-September 2, 2015, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2015: 1168-1172.
- [14] Wu X P, Safari M, Haas H. Access point selection for hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(12): 5375-5385.
- [15] Ibrahim A, Ismail T, Elsayed K. Optimized radio resource allocation scheme for indoor optical wireless communication[C]//2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 2-6, 2017, Girona, Spain. New

- York: IEEE, 2017: 1-4.
- [16] Wu X P, Basnayaka D, Safari M, *et al.* Two-stage access point selection for hybrid VLC and RF networks[C]//2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 4-8, 2016, Valencia, Spain. New York: IEEE, 2016: 1-6.
- [17] Wang Y, Wu X, Haas H. Fuzzy logic based dynamic handover scheme for indoor Li-Fi and RF hybrid network[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE, 2016: 1-6.
- [18] Kafafy M, Fahmy Y, Abdallah M, *et al.* Power efficient downlink resource allocation for hybrid RF/VLC wireless networks[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), March 19-22, 2017, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2017: 1-6.
- [19] 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.
- [20] Liu J H, Li Q, Zhang X Y. Cellular coverage optimization for indoor visible light communication and illumination networks[J]. Journal of Communications, 2014, 9(11): 891-898.
- [21] Jin F, Zhang R, Hanzo L. Resource allocation under delay-guarantee constraints for heterogeneous visible-light and RF femtocell [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2): 1020-1034.
- [22] Bai X W, Li Q, Tao S Y. Resource allocation based on dynamic user priority for indoor visible light communication ultra-dense networks[C]//2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT), October 8-11, 2018, Chongqing, China. New York: IEEE, 2018: 331-337.
- [23] Burchardt H, Sinanovic S, Bharucha Z, *et al.* Distributed and autonomous resource and power allocation for wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(7): 2758-2771.
- [24] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [25] Li Y R, Huang N, Wang J Y, *et al.* Sum rate maximization for VLC systems with simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(6): 531-534.
- [26] Xiao Y, Zhu Y J, Zhang Y Y, *et al.* Linear optimal signal designs for multi-color MISO-VLC systems adapted to CCT requirement[J]. IEEE Access, 2018, 6: 75519-75530.
- [27] Ye C, Gursoy M C, Velipasalar S. Optimal resource allocation for full-duplex wireless video transmissions under delay constraints[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), March 19-22, 2017, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2017: 1-6.
- [28] Tian W, Liu L K, Zhang X, *et al.* A resource allocation algorithm combined with optical power dynamic allocation for indoor hybrid VLC and Wi-Fi network[C]//2016 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), December 23-25, 2016, Tehri, India. New York: IEEE, 2016: 21-27.