

基于NOMA的室内可见光通信最优功率分配方案

周 围^{1,2}, 徐 锐^{1,2}, 李倩倩^{1,2}, 窦文静²

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 在基于非正交多址接入技术的多用户下行室内可见光通信(Visible light communication system based on non-orthogonal multiple access technology, VLC-NOMA)系统中, 针对和速率与用户公平性冲突的问题, 提出一种基于加权和速率最大化的迭代功率分配方案。该方案以最大化加权和速率为目标, 可通过改变权重因子来调节用户公平性。由于目标问题属于非凸优化问题, 通过辅助变量法和凸优化理论将该非凸问题转化为凹问题, 再通过拉格朗日对偶法进行求解, 并根据问题的解设计了一种迭代功率分配算法。对所提算法的收敛性、系统和速率以及用户公平性进行了仿真。结果表明, 所提迭代功率分配算法具有良好的收敛性, 相较于VLC-OMA系统, VLC-NOMA系统能够获得更好的和速率性能。通过调整权重因子, 在牺牲较小系统和速率的情况下能够获得比现有功率分配方案更好的系统和速率与用户公平性。

关键词: 可见光通信; 非正交多址接入; 加权和速率最大化; 功率分配; 用户公平性

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Optimal Power Allocation Scheme for Indoor Visible Light Communication Based on NOMA

ZHOU Wei^{1,2}, XU Rui^{1,2}, LI Qianqian^{1,2}, DOU Wenjing²

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In multi-user downlink indoor visible light communication system based on non-orthogonal multiple access technology (VLC-NOMA), an iterative power allocation scheme based on weighted sum-rate maximization is proposed to solve the problem of the conflict between sum-rate and user fairness. The objective of this scheme is to maximize the weighted sum-rate, and the user fairness can be adjusted by changing the weighted factor. Since the target problem is a non-convex optimization problem, this non-convex problem is transformed into a concave problem by auxiliary variable method and convex optimization theory, then solved by the Lagrange dual method, and an iterative power allocation algorithm is designed according to the solution of the problem. The convergence of the proposed algorithm, system sum-rate and user fairness are simulated. Results show that the proposed iterative power allocation

基金项目: 国家自然科学基金(61701062); 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2019jcyj-msxmX0079)。

收稿日期: 2023-09-15; **修订日期:** 2024-01-25

algorithm has good convergence, and VLC-NOMA system can obtain better sum-rate performance than VLC-OMA system. By adjusting the weighted factor, better system sum-rate and user fairness can be obtained than the existing power allocation scheme at the smaller expense of system sum-rate.

Key words: visible light communication; non-orthogonal multiple access; weighted sum-rate maximization; power allocation; user fairness

引 言

随着无线通信的高速发展,可见光通信(Visible light communication, VLC)技术因为其速率高、节能、安全、频谱免许可等优点而备受关注。该技术使用发光二极管(Light emitting diode, LED)来提供照明和通信,使用LED代替传统照明光源,预计将减少50%的二氧化碳排放,从而节省高达217太瓦时的能源。除此之外,VLC还为移动通信开辟了迄今尚未开发的电磁频谱可见范围,从而为无休止地追求更高的数据速率提供了巨大的频谱资源扩展。然而,作为现有无线通信技术的补偿技术,VLC使用的LED光源调制带宽窄,限制了VLC的速率性能。为此,在VLC上引入了非正交多址接入(Non-orthogonal multiple access, NOMA)技术^[1-2]。

NOMA作为5G的关键使能技术之一^[3],引入功率复用技术,即将发射信号在功率域进行叠加,这会导致用户间干扰,为了解决这一问题,在接收端通过串行干扰消除(Successive interference cancellation, SIC)技术进行解码来消除用户间干扰。NOMA进行SIC解码和功率分配需要信道状态信息(Channel state information, CSI)。与射频通信系统相比,在VLC系统中获得CSI要容易得多,因为室内VLC信道的时变可以忽略不计^[4-5]。合适的功率分配方案可以促进SIC解码并且显著提升系统性能,为此业界对于功率分配方案进行了大量的研究。文献[6]首次推导了VLC-NOMA系统中静态用户可达速率上界和下界的闭式表达,利用半正定松弛技术,通过求解凸半正定程序得到最优功率分配方案。在此基础上,文献[7]进一步优化了可达速率性能界,并提出一种适用于VLC信道的增益比功率分配(Gain ratio power allocation, GRPA)策略,根据用户不同的信道增益为用户分配功率,提高了VLC-NOMA系统的吞吐量。文献[8]研究了下行NOMA系统中保证用户服务质量(Quality of service, QoS)的功率分配方案,该方案提升系统和速率,但牺牲了用户公平性。文献[9]提出了3种新的功率分配方案,在满足各个用户目标数据速率的同时,最大化发射功率之差以便接收端利用SIC技术对各个用户进行恢复,并得到在此条件下的最大用户总容量。文献[10]研究了下行毫米波NOMA系统的功率分配算法,在满足个别QoS约束的同时,制定了两个优化问题,分别最大化可达和速率和能量效率。文献[11]设计了一种自适应功率分配方案,在用户严格中断概率约束下,使自动重复请求与追逐组合启用的NOMA混合系统的平均发射功率最小。文献[12]在一个典型的有两个用户的VLC-NOMA场景下,在和率最大化和最大最小公平准则下优化功率分配策略,其中包括实际的光功率和QoS约束。通过数学分析实现了半闭式的最优功率分配解决方案。文献[13]针对星间VLC-NOMA系统,提出了一种保证最低用户速率的功率分配方案,并求得其显式最优解。文献[14]提出了一种基于多因素控制的最优功率分配策略,该策略能够提供更高的系统和速率和更好的用户公平性,同时保证每个用户的QoS和眼睛安全,特别是在对SINR要求较高的情况下。该策略同时考虑了系统和速率以及用户公平性,但复杂度较高。文献[15]在VLC-NOMA系统中,除了考虑高斯噪声还考虑了与输入相关的散粒噪声,设计了一种最大化用户最小信干噪比(Signal to interference plus noise ratio, SINR)的功率分配方案,并利用几何规划求得了问题的最优解。

上述文献以及现有的功率分配方案相关研究中,大多数只考虑了用户的和速率性能或能量效率性能,并未考虑用户公平性。针对该问题,本文基于室内多用户下行VLC-NOMA系统,提出加权和速率最大化的概念。在权值的选择中,将引入模糊逻辑,通过归一化信道增益将用户归类到不同的模糊集合中为用户进行权值分配。在问题的求解中,由于优化问题属于非凸问题,为了将问题转化为凸的,通过辅助变量和凸优化理论将该非凸问题转化为凹问题,并通过拉格朗日对偶法进行求解,根据问题的解设计一种迭代功率分配算法。最后,通过仿真验证该算法的收敛性、和速率性能以及用户公平性性能。

1 系统模型

考虑一个室内多用户下行VLC-NOMA系统,如图1所示。该系统由一个LED灯作为发射机,为均匀分布在半径为 r 的圆形区域内的 K 个用户 $U_k(k \in \{1, 2, \dots, K\})$ 服务。假设LED位于房间天花板的中心,通过VLC系统与NOMA技术的结合,将分布在房间内的用户根据信道增益分配不同的发射功率,并在功率域进行叠加。接收端用户通过光电二极管(Photo diode, PD)接收光信号后进行SIC解码,获得所需信息。因此,时间和频率资源可以完全由所有用户共享,从而提高频谱效率。

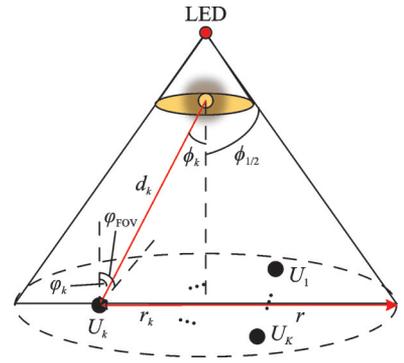


图1 系统模型
Fig.1 System model

根据NOMA原理,LED采用叠加编码的总发射信号表示为

$$x = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} x_k + I_{DC} \tag{1}$$

式中: P_k 表示分配给用户 k 的功率; $x_k(t)$ 表示用户 k 所需要的信息; I_{DC} 为添加到传输信号中的直流偏置,以避免LED调制期间的色差等问题。直流偏置对于提供用户所需的调光支持和控制照明也是必不可少的。

室内VLC系统一般采用朗伯辐射模型,LED的朗伯发射阶数表示为

$$m = \frac{-1}{\log_2(\cos \phi_{1/2})} \tag{2}$$

式中: $\phi_{1/2}$ 表示LED的半功率角,其辐射功率为最大值的一半。

由LED传输的信号通过VLC信道到达每个PD接收器,所有的PD都是相同的,并配备了光集中器,其增益表示为

$$g(\varphi_k) = \begin{cases} \frac{n_r^2}{\sin^2 \varphi_{FOV}} & 0 \leq \varphi_k \leq \varphi_{FOV} \\ 0 & \varphi_k > \varphi_{FOV} \end{cases} \tag{3}$$

式中: n_r 表示光集中器的折射率; φ_k 表示PD接收光信号的入射角; φ_{FOV} 表示PD的视场角。

在VLC系统中信道是多径的,包括一个主要的视距(Line-of-sight, LOS)链路和由于反射而扩散的多条非视距(Non-line-of-sight, NLOS)链路。根据文献[16]可知,通过LOS链路接收到的平均功率要比通过NLOS链路接收到的平均功率高大约20 dB,因此只用考虑LED与用户之间的LOS链路。LED与用户 k 之间的信道增益表示为

$$h_k = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{PD}}{2\pi d_k^2} \cos^m \phi_k T_f g(\varphi_k) \cos \varphi_k & 0 \leq \varphi_k \leq \varphi_{FOV} \\ 0 & \varphi_k > \varphi_{FOV} \end{cases} \tag{4}$$

式中: A_{PD} 表示 PD 的物理面积; d_k 表示 LED 与用户 k 之间的距离; ϕ_k 表示 LED 的辐照角; T_i 表示光滤波器增益。

不失一般性地, 假设用户信道增益按照升序排列, 即 $|h_1| \leq |h_2| \leq \dots \leq |h_K|$ 。在接收端使用直接检测, PD 直接从接收到的光载波中提取信号。用户 k 接收到的信号可表示为

$$y_k = \gamma_{\text{oe}} h_k x + n_k \quad (5)$$

式中: γ_{oe} 表示 PD 的响应度; n_k 表示加性高斯白噪声, $n_k \sim (0, \sigma_k^2)$ 。去除接收信号中的直流偏置, 接收到的信号可表示为

$$y_k = \gamma_{\text{oe}} h_k \left(\sum_{i=1}^{k-1} \sqrt{P_i} x_i + \sqrt{P_k} x_k + \sum_{i=k+1}^K \sqrt{P_i} x_i \right) + n_k \quad (6)$$

由于接收到的信号是所有用户信号的叠加, 因此为了提取每个用户自己的信号, 在接收端执行 SIC 解码, 优先解码信道条件差的用户。因此, 前 $K-1$ 个用户的 SINR 可表示为

$$\text{SINR}_k = \frac{h_k^2 P_k}{h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2} \quad k \neq K \quad (7)$$

用户 K 的信噪比 (Signal to noise ratio, SNR) 可表示为

$$\text{SNR}_k = \frac{h_k^2 P_k}{\sigma_k^2} \quad k = K \quad (8)$$

根据文献[17], 定义可达速率的下界作为用户的数据速率, 则用户 k 的数据速率表示为

$$R_k \triangleq \frac{B}{2} \log_2 \left(1 + \frac{2h_k^2 P_k}{\pi e \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right)} \right) \quad (9)$$

式中 B 表示信号带宽。

2 加权和速率最大化的功率分配方案

2.1 问题建模

对于通信系统而言, 最重要的两个性能指标就是可靠性和有效性。可靠性主要依靠误符号率或误比特率来衡量, 而有效性的主要衡量依据之一就是数据速率。本文主要研究下行多用户 VLC-NOMA 系统的和速率最大化问题, 给用户分配不同的功率是调节系统和速率最直接的方式。系统和速率的提升必定会导致用户公平性下降, 反之, 提升用户的公平性就会牺牲一定的和速率。为了实现系统和速率与用户公平性之间的折衷, 提出一种加权和速率最大化的功率分配方案, 其数学模型表示为

$$\begin{aligned} \max_{P_k} \quad & \sum_{k=1}^K \omega_k \frac{B}{2} \log_2 \left(1 + \frac{2h_k^2 P_k}{\pi e \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right)} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1: } \sum_{k=1}^K P_k \leq P_{\text{total}} \\ & \text{C2: } P_k \geq P_{k+1} \geq 0 \\ & \text{C3: } R_k \geq R_k^{\min} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: ω_k 为用户 k 数据速率的权重因子, 用于调节用户的公平性; P_{total} 表示总的发射光功率; 约束 C1 为总功率约束, 分配给用户的功率之和不能超过 LED 的功率限制; 约束 C2 为用户功率约束, 分配给每个

用户的功率是非负的;约束 C3 为 QoS 约束,为了保证用户 QoS,每个用户的数据速率应不低于设置的速率阈值。

2.2 权值选择

关于权值的选择,当权值取一些特殊值时可对问题进行转化。例如,当权值相等时,优化问题转化为最大化系统和速率;当速率最低用户的权值为 1,其余用户权值为 0 时,又将问题转化为最大化最小和速率问题。在本文中,为了保证用户的公平性给信道条件差的用户分配更高的权值。

权值的选择根据用户的信道增益采用模糊逻辑的方法进行确定。在此之前,将信道增益进行归一化,归一化信道增益表示为

$$\tilde{h}_k = \frac{|h_k| - |h_{\min}|}{|h_{\max}| - |h_{\min}|} \quad (11)$$

式中: $|h_{\max}|$ 为增益最强的信道; $|h_{\min}|$ 为增益最弱的信道。定义 3 种等级的模糊集合,分别为低、中、高。通过隶属函数将 \tilde{h}_k 映射到对应的模糊集中。隶属函数表示为

$$\begin{cases} \text{低} & 0 \leq \tilde{h}_k \leq a \\ \text{中} & a < \tilde{h}_k \leq b \\ \text{高} & b < \tilde{h}_k \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: a 、 b 分别为 3 个模糊集合的阈值,一般设置为 1/3 和 2/3。最后,根据不同的模糊集合设置不同的权值,低模糊集中用户的权值设置为 1,中模糊集中的用户权值设置为 0.5,高模糊集中的用户权值设置为 0.1。

2.3 模型求解

由于优化问题式(10)是非凸问题,在实际中很难求解。现在通过将其转换为凸形式来求解^[17],在此定义松弛变量

$$\gamma_k \leq \frac{h_k^2 P_k}{h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2} \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (13)$$

则问题式(10)可改写为

$$\begin{aligned} & \max_{P_k, \gamma_k} \sum_{k=1}^K \omega_k \frac{B}{2} \log_2 \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k \right) \\ & \text{s.t. C1: } \sum_{k=1}^K P_k \leq P_{\text{total}} \\ & \quad \text{C2: } P_k \geq P_{k+1} \geq 0 \\ & \quad \text{C3: } R_k \geq R_k^{\min} \\ & \quad \text{C4: } \gamma_k \leq \frac{h_k^2 P_k}{h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2} \end{aligned} \quad (14)$$

容易看出,当约束 C4 取等号时,问题式(14)和问题式(10)等价。

定理 1^[18] 总有 $\inf_{x,y} f(x,y) = \inf_x \inf_y f(x,y)$,即总可以通过优化一部分变量再优化另一部分变量来达到优化一个函数的目的。其中, $x, y \in \mathbf{R}$ 。

当 P_k 固定时,问题式(14)是关于 $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_1, \dots, \gamma_k, \dots, \gamma_K]$ 的凸问题。根据定理 1,可先对 $\boldsymbol{\gamma}$ 进行优化,于是,关于约束 C4,构造拉格朗日函数可表示为

$$L(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{2} \omega_k B \log_2 \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k \right) - \mu_k \left(\gamma_k - \frac{h_k^2 P_k}{h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2} \right) \right] \quad (15)$$

式中: μ_k 为拉格朗日乘子, 且 $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k, \dots, \mu_K]$ 。等式两边分别对 γ_k 和 μ_k 求导可得

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\mu})}{\partial \gamma_k} = \frac{\omega_k B}{\pi e \ln 2 \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k \right)} - \mu_k = 0 \\ \frac{\partial L(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\mu})}{\partial \mu_k} = -\gamma_k + \frac{h_k^2 P_k}{h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)有最优辅助变量及拉格朗日乘子为

$$\begin{cases} \mu_k^* = \frac{\omega_k B}{2 \ln 2 \left(\frac{\pi e}{2} + \gamma_k^* \right)} \\ \gamma_k^* = \frac{h_k^2 P_k}{h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2} \end{cases} \quad (17)$$

通过原始问题 $\max_{\boldsymbol{\gamma}} L(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\mu}^*)$, 可将原优化问题转化为

$$\max_{P_k, \boldsymbol{\gamma}} \sum_{k=1}^K \frac{1}{2} \omega_k B \left[\log_2 \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k \right) - \frac{\pi e}{2 \ln 2} \gamma_k \right] + \sum_{k=1}^K \frac{\omega_k B h_k^2 P_k \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k \right)}{2 \ln 2 \left[\frac{\pi e}{2} \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right) + h_k^2 P_k \right]} \quad (18)$$

s.t. C1, C2, C3

问题式(18)中的目标函数是关于变量 P_k 的比例和形式, 仍然是一个非凸问题。

定理 2 定义优化问题

$$\max_x \sum_{j=1}^J \frac{A_j(x)}{B_j(x)} \quad \text{s.t. } x \in \mathbf{X} \quad (19)$$

问题式(19)可以等价于

$$\begin{cases} \max_{x, \boldsymbol{\theta}} \sum_{j=1}^J (2\theta_j \sqrt{A_j(x)} - \theta_j^2 B_j(x)) \\ \text{s.t. } x \in \mathbf{X}, \theta_j \in \mathbf{R} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_j, \dots, \theta_J]$ 为辅助变量, 且最优解为 $\theta_j^* = \sqrt{A_j(x)}/B_j(x)$ ^[19]。

根据定理 2, 引入辅助变量 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k, \dots, \theta_K]$, 经过二次变换, 可将优化问题改写为

$$\max_{P_k, \boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\theta}} \sum_{k=1}^K 2\theta_k \sqrt{\frac{1}{2} \omega_k B h_k^2 P_k \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k \right)} - \sum_{k=1}^K \left\{ 2(\ln 2) \theta_k^2 \left[\frac{\pi e}{2} \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right) + h_k^2 P_k \right] + g(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\theta}) \right\} \quad (21)$$

s.t. C1, C2, C3

式中: $g(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \omega_k B \left[\log_2 \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k \right) - \frac{\pi e}{2 \ln 2} \gamma_k \right]$, 且辅助变量的最优解为

$$\theta_k^* = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \omega_k B h_k^2 P_k \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k\right)}}{2 \ln 2 \theta_k^2 \left[\frac{\pi e}{2} \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right) + h_k^2 P_k \right]} \quad (22)$$

在问题式(21)中,固定 γ 和 θ ,该问题是关于变量 P_k 的凹优化问题。因此,对于问题式(21)可以采用拉格朗日对偶方法求解该问题,通过该方法可以得到最优功率分配表达式。根据式(10)约束 C3 可以等价

$$\pi e \left(2^{\frac{2R_k^{\min}}{B}} - 1 \right) \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right) \leq 2P_k h_k^2 \quad (23)$$

则问题式(21)的拉格朗日函数如下

$$L(f, \lambda_k, \xi, \eta_k) = f(\mathbf{P}) + \sum_{k=1}^K \lambda_k \left[2P_k h_k^2 - \pi e \left(2^{\frac{2R_k^{\min}}{B}} - 1 \right) \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right) \right] + \xi \left(\sum_{k=1}^K P_k - P_{\text{total}} \right) + \sum_{k=1}^K \eta_k P_k \quad (24)$$

式中: $\lambda_k \geq 0, \xi \geq 0, \eta_k \geq 0$ 为拉格朗日乘子; $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_K]$; $f(\mathbf{p})$ 可表示为

$$f(\mathbf{P}) = \sum_{k=1}^K 2\theta_k \sqrt{\frac{1}{2} \omega_k B h_k^2 P_k \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k\right)} - \sum_{k=1}^K \left\{ 2(\ln 2) \theta_k^2 \left[\frac{\pi e}{2} \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right) + h_k^2 P_k \right] + g(\gamma, \theta) \right\} \quad (25)$$

式(24)应当满足以下 KKT 条件

$$(1) \frac{\partial L}{\partial P_k} = f'(\mathbf{P}) - 2\lambda_k h_k^2 + \xi + \eta_k = 0$$

$$\text{其中 } f'(\mathbf{P}) = \frac{\theta_k \omega_k B h_k^2 \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k\right)}{\sqrt{2\omega_k B h_k^2 P_k \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k\right)}} - 2(\ln 2) \theta_k^2 h_k^2$$

$$(2) \pi e \left(2^{\frac{2R_k^{\min}}{B}} - 1 \right) \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right) \leq 2P_k h_k^2$$

$$(3) \lambda_k \left[2P_k h_k^2 - \pi e \left(2^{\frac{2R_k^{\min}}{B}} - 1 \right) \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i + \sigma_k^2 \right) \right] = 0$$

$$(4) \xi \left(\sum_{k=1}^K P_k - P_{\text{total}} \right) = 0$$

$$(5) \eta_k P_k = 0$$

$$(6) \lambda_k \geq 0, \eta_k \geq 0, \xi \geq 0, p_k \geq 0$$

根据条件 2,不等式左边严格大于零,因此 $P_k > 0, \eta_k = 0$ 。结合条件 1,可得 $\lambda_k > 0, \xi \geq 0$ 。

通过拉格朗日函数,问题式(24)的对偶问题可以表示为

$$\begin{cases} \min_{\lambda_k, \xi, \eta_k} D(\lambda_k, \xi, \eta_k) = \max_{\mathbf{P}} L(f, \lambda_k, \xi, \eta_k) \\ \text{s.t. } \lambda_k \geq 0, \xi \geq 0, \eta_k \geq 0 \end{cases} \quad (26)$$

根据 KKT 条件,可以得到最优功率分配表达式为

$$P_k^* = \frac{\theta_k^2 \omega_k B h_k^2 \left(1 + \frac{2}{\pi e} \gamma_k\right)}{2 \left(2(\ln 2) \theta_k^2 h_k^2 + 2\lambda_k^* h_k^2 + \xi^*\right)^2} \quad (27)$$

式中： λ_k^* 和 ξ^* 为对偶最优解，将通过次梯度法迭代更新， λ_k 和 ξ 在第 $t+1$ 次迭代的值可表示为

$$\lambda_k^{(t+1)} = \lambda_k^{(t)} - \nu \left[2P_k^{*(t)} h_k^2 - \pi e \left(2 \frac{2R_k^{\min}}{B} - \right. \right. \quad (28)$$

$$\left. \left. 1 \right) \left(h_k^2 \sum_{i=k+1}^K P_i^{*(t)} + \sigma_k^2 \right) \right]$$

$$\xi^{(t+1)} = \xi^{(t)} - \nu \left(\sum_{i=1}^K P_i^{*(t)} - P_{\text{total}} \right) \quad (29)$$

式中： $\nu > 0$ ，表示搜索步长。

通过求解上述问题，获得了功率分配值的最优解，但上述引入的辅助变量 γ_k 和 θ_k 的最优解中存在 P_k ，为此，设计一种迭代功率分配算法，如表1所示。首先，初始化功率分配值 $P_k = P_{\text{total}}/K$ ；然后，通过式(17)和式(22)迭代计算 γ_k 和 θ_k ；然后，通过式(27)更新功率分配值；最后，通过式(28)和式(29)更新 λ_k 和 ξ 。

2.4 复杂度分析

本节将对算法1的复杂度进行分析。在算法1中，每一次迭代计算 γ 、 θ 和 P 的复杂度为 $O(K^2)$ ，使用次梯度法更新拉格朗日对偶变量 λ_k 和 ξ 更新在多项式时间内收敛到最优解，计算复杂度为 $O(1)$ 。因此整体的计算复杂度为 $O(K^2N)$ ，其中， N 为对偶变量 λ_k 和 ξ 使用次梯度法的迭代次数。

3 仿真分析

为了验证加权和速率最大化功率分配方案的可行性以及优越性，以三用户场景为例，使用MATLAB软件进行仿真验证。分别对所提迭代算法收敛性、不同功率分配方案下的和速率、OMA系统和NOMA系统下的和速率以及用户公平性指数进行数值仿真。对于下行三用户VLC-NOMA系统模型参数，设置QoS阈值为 $R_1^{\min} = R_2^{\min} = R_3^{\min} = 1$ Mbit/s，其余系统参数如表2所示。

表1 迭代功率分配算法

Table 1 Iterative power allocation algorithm

算法：基于加权和速率最大化的迭代功率分配算法

1. 输入： a, b, B, h_k
2. 初始化： $n = 0, n_{\max}, m_{\max}, P_k^{(0,0)} = P_{\text{total}}/K, \lambda_k, \xi$
3. 对信道增益进行排序
4. 根据式(11)计算 \tilde{h}_k
5. 根据式(12)将每个用户映射到不同的模糊集合
6. 通过不同的模糊集合确定 ω_k
7. While
8. 根据式(17)计算 $\gamma^{(n)}$
9. $m = 0$
10. While
11. 根据式(22)计算 $\theta^{(n,m)}$
12. 根据式(27)更新 $P^{(s,t)}$
13. 根据式(28)和式(29)更新 λ_k 和 ξ
14. $m = m + 1$
15. Until 收敛 or $m = m_{\max}$
16. $n = n + 1$
17. Until 收敛 or $n = n_{\max}$
18. 输出： P_k

表2 系统仿真参数

Table 2 System simulation parameters

参数	数值
朗伯系数 m	1
LED半功率角 $\phi_{1/2}/(^{\circ})$	60
PD物理面积 $A_{\text{PD}}/\text{cm}^2$	1
PD视场角 $\varphi_{\text{FOV}}(^{\circ})$	72
PD响应度 $\gamma_{\text{oc}}/(\text{A}\cdot\text{W}^{-1})$	0.53
光集中器的折射率 n_r	1.5
光学滤波器增益 T_f	0.9
房间尺寸/m	$5 \times 5 \times 3$
a, b	1/3, 2/3
LED物理位置	(2.5, 2.5, 3)
用户物理位置	(1, 2, 1), (3, 1, 1.5), (2, 2, 0.8)
信道带宽 B/MHz	10
噪声单边功率谱密度 $\sigma_k^2/(\text{W}\cdot\text{Hz}^{-1})$	10^{-21}

图2研究了所提迭代算法在不同发射光功率下的和速率收敛性,分别设置发射光功率为10、20和30 dBm,分别设置权重因子为 $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 1$ (该情况为加权和速率最大化的特殊情况,即最大化系统和速率)。可以看出,所提的迭代功率分配算法具有良好的收敛性,对于不同的发射光功率,可以在5次以内收敛。

图3研究了所提迭代算法在不同发射光功率下的用户功率的收敛性,分别设置发射光功率为10、20和30 dBm,权重因子依然设置为 $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 1$ 。可以看出,所提的迭代功率分配算法具有良好的收敛性,对于不同的发射光功率,可以在5次以内收敛。

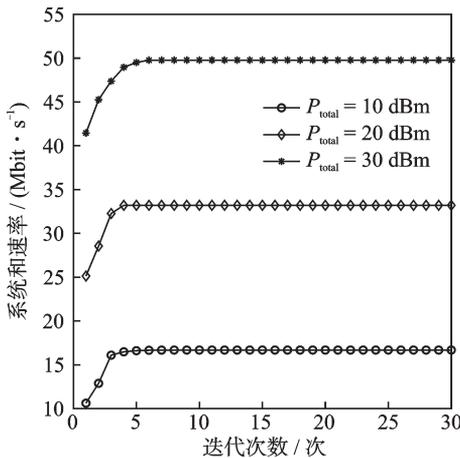


图2 不同发射光功率下和速率随迭代次数的变化

Fig.2 Variation of sum rate with the number of iterations in different transmission light powers

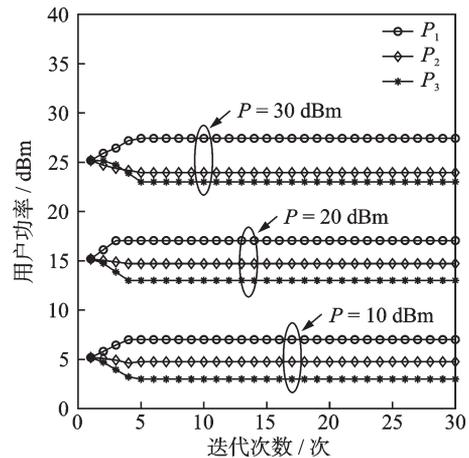


图3 不同发射光功率下用户功率随迭代次数的变化

Fig.3 Variation of user power with the number of iterations in different transmission light powers

图4展示了权重因子设置为 $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 1$ 时,不同发射光功率下,所提算法在基于OMA的VLC系统与基于NOMA的VLC系统中的和速率性能对比。可以看出,与OMA结合和与NOMA结合的VLC系统和速率都随着发射光功率的增大而增大,但是与NOMA结合的VLC系统和速率性能始终优于与OMA结合的VLC系统和速率性能。因此,相较于与OMA技术相结合,能够在接入更多用户的同时获得更好的系统性能。

图5展示了权重因子设置为 $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 1$ 时,不同发射光功率下,所提算法与GRPA方案、分数功率分配(Fractional transmit power allocation, FTPA)方案以及固定功率分配(Fixed power allocation, FPA)方案下的和速率性能对比。其中,GRPA方案的功率分配因子为 $\alpha_1 = h_2^2 h_3^3 / (h_1^2 h_3^3 + h_2^2 h_3^3 + h_1^5), \alpha_2 = h_1^2 h_3^3 / (h_1^2 h_3^3 + h_2^2 h_3^3 + h_1^5), \alpha_3 = h_1^5 / (h_1^2 h_3^3 + h_2^2 h_3^3 + h_1^5)$;FTPA方案的功率分配因子选取为0.7;FPA方案的功率分配因子为 $\beta_1 = 0.5, \beta_2 = 0.3, \beta_3 = 0.2$ 。可以看出,4种功率分配方案的和速率性能都随着发射光功率的增加而增大。在发射光功率较低时所提方案与GRPA方案性能相近,随着发射光功率越来越大,GRPA方案与所提方案的差距也越来越大。与FTPA方案和FPA方案相比,所提方案的性能始终优于这两种方案。

图6展示了权重因子设置为 $\omega_1 = 1, \omega_2 = 0.5, \omega_3 = 0.1$ 时,不同发射光功率下,所提算法与GRPA方案、FTPA方案以及FPA方案下的和速率性能对比。其中,GRPA方案、FTPA方案以及FPA方案的功率分配因子的选择与图4相同。可以看出,相较于图4,在调整权重因子之后牺牲了一定的和速率性

能, 但和速率性能依然优于其他3种方案。同时还对比了连续凸逼近 (Successive convex approximation, SCA) 算法^[20], 可以发现本文的迭代功率分配算法和SCA算法有相近的性能。

图7展示了不同发射光功率下4种功率分配方案的公平性对比, 用户公平性指数计算方式如式(30)所示。结合图4和图5可以看出, 在调整权重因子之后牺牲了较少的和速率性能, 从而获取了更好的用户公平性。当权重因子设置为 $\omega_1=1, \omega_2=1, \omega_3=1$ 时用户公平性指数在0.7~0.8; 调整为 $\omega_1=1, \omega_2=0.5, \omega_3=0.1$ 后用户公平性在0.9~1.0之间。并且当权重因子设置为 $\omega_1=1, \omega_2=0.5, \omega_3=0.1$ 时, 和速率性能下降获得更好用户公平性的同时, 所提方案依然有比其余3种方案更好的性能。使用SCA算法求解的加权和速率最大化功率分配方案用户公平性也能够保持在0.9~1.0。

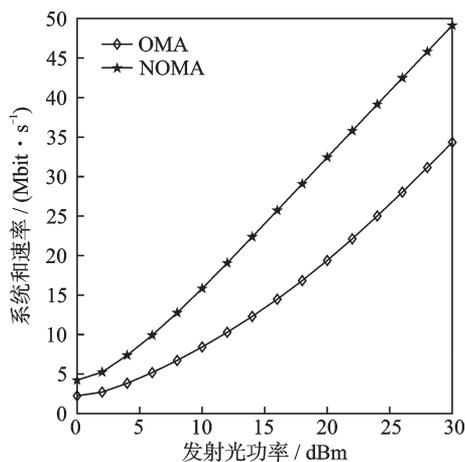


图4 与OMA 和与NOMA结合的和速率对比
Fig.4 Comparison of sum rate with OMA or NOMA

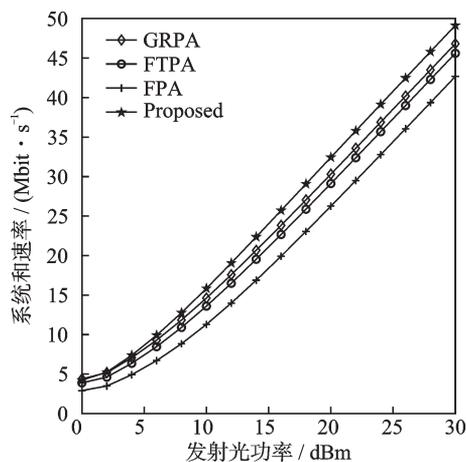


图5 不同发射光功率下和速率对比($\omega_1=1, \omega_2=1, \omega_3=1$)
Fig.5 Comparison of sum rate in different transmission light powers ($\omega_1=1, \omega_2=1, \omega_3=1$)

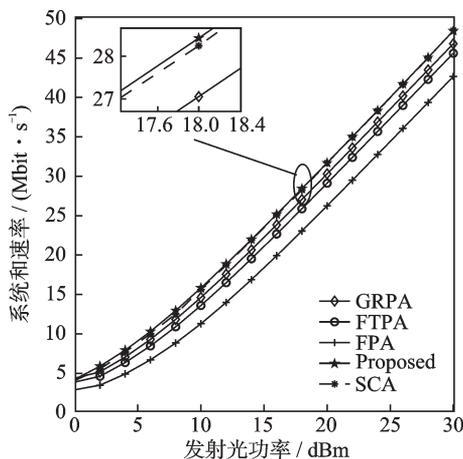


图6 不同发射光功率下和速率对比($\omega_1=1, \omega_2=0.5, \omega_3=0.1$)
Fig.6 Comparison of sum rate in different transmission light powers ($\omega_1=1, \omega_2=0.5, \omega_3=0.1$)

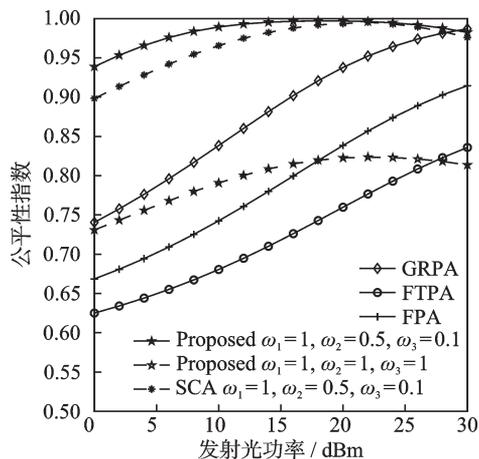


图7 不同发射光功率下用户公平性对比
Fig.7 Comparison of user fairness in different transmission light powers

$$FI = \frac{\left(\sum_{k=1}^K R_k\right)^2}{K \left(\sum_{k=1}^K R_k^2\right)} \quad (30)$$

4 结束语

研究了室内多用户下行VLC-NOMA系统中加权和速率最大化的功率分配方案。利用辅助变量法和凸优化理论将原非凸问题转化为凹问题,并通过拉格朗日对偶法进行求解,根据问题的解提出了一种迭代的功率分配算法。仿真结果表明:(1)所提的迭代算法具有良好的收敛性;(2)相较于与OMA技术结合,与NOMA技术结合在接入更多用户的同时能够获得更好的和速率性能;(3)通过调整权重因子,可以在牺牲较少系统和速率的同时获得更高的用户公平性。

参考文献:

- [1] MARSHOUD H, KAPINAS V M, KARAGIANNIDIS G K, et al. Non-orthogonal multiple access for visible light communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 51-54.
- [2] 谈苗苗,孔槐聪,黄庶沛,等.基于上/下行NOMA的卫星通信系统遍历容量分析[J].南京航空航天大学学报,2023,55(5): 780-788.
TAN Miaomiao, KONG Huaicong, HUANG Shupe, et al. Ergodic capacity analysis of uplink/downlink NOMA-based satellite communication system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 780-788.
- [3] DAI L L, WANG B C, DING Z G, et al. A survey of non-orthogonal multiple access for 5G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2294-2323.
- [4] RYU J W, KIM J W, KIM S D, et al. On the reliability evaluation in downlink VLC NOMA systems[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). [S.l.]: ICTC, 2021: 989-993.
- [5] TRAN G N, KIM S. Performance analysis of short packets in NOMA VLC systems[J]. IEEE Access, 2022 (10): 6505-6517.
- [6] MA S, HE Y, LI H, et al. Optimal power allocation for mobile users in non-orthogonal multiple access visible light communication networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(3): 2233-2244.
- [7] TAO Siyu, YU Hongyi, LI Qing, et al. Strategy-based gain ratio power allocation in non-orthogonal multiple access for indoor visible light communication networks[J]. IEEE Access, 2019, 7:15250-15261.
- [8] 陈发堂,邓青,石贝贝.下行NOMA系统中一种考虑用户QoS的功率分配方案[J].计算机应用研究,2021,38(1):269-272.
CHEN Fatang, DENG Qing, SHI Beibei. Power allocation scheme considering user QoS in downlink NOMA system[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(1): 269-272.
- [9] 吴霞,马文峰,王聪,等.新的NOMA多用户功率分配方法[J].通信技术,2021,54(9):2093-2102.
WU Xia, MA Wenfeng, WANG Cong, et al. New NOMA multi-user power allocation method[J]. Communications Technology, 2021, 54(9): 2093-2102.
- [10] ZHANG Y, ZHAO X W, ZHOU Z Y, et al. Power allocation algorithms for stable successive interference cancellation in millimeter wave NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 5833-5847.
- [11] XU Y Q, DING Z G, SHEN C, et al. Outage constrained power efficient design for downlink NOMA systems with partial HARQ[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 5188-5201.
- [12] SHEN H, WU Y F, XU W, et al. Optimal power allocation for downlink two-user non-orthogonal multiple access in visible light communication[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2017, 2(4): 57-64.
- [13] 郝少伟,李勇军,赵尚弘,等.基于非正交多址接入的星间可见光通信最优功率分配研究[J].中国激光,2021,48(7):125-134.

- HAO Shaowei, LI Yongjun, ZHAO Shanghong, et al. Optimal power allocation for intersatellite visible light communication based on nonorthogonal multiple access[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 125-134.
- [14] LI Q, SHANG T, TANG T, et al. Optimal power allocation scheme based on multi-factor control in indoor NOMA-VLC systems[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 82878-82887.
- [15] CANG Y H, CHEN M, XU Z, et al. Optimal power allocation for non-orthogonal multiple access VLC systems with shot noise[C]//*Proceedings of 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. [S.l.]: IEEE, 2022: 7-12.
- [16] YANG F F, JI X D, LIU X Q, et al. Power allocation optimization for NOMA based visible light communications[C]//*Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. [S.l.]: IEEE, 2021: 1-6.
- [17] ZHOU J, ZHANG W Y. Bounds on the capacity region of the optical intensity multiple access channel[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(11): 7629-7641.
- [18] STEPHEN B, LIEVEN V. *Convex optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 121-127.
- [19] KAIMING S, WEI Y. Fractional programming for communication systems—Part I: Power control and beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(10): 2616-2630.
- [20] 冯嫚, 胡忠颖, 巴特尔. 基于连续凸逼近的协作式非正交多址接入联合无线携能通信的能效优化方案[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(4): 1147-1153.
- FENG Man, HU Zhongying, BA Teer. Energy efficiency optimization algorithm of cooperative non-orthogonal multiple access joint simultaneous wireless information and power transfer based on successive convex approximation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(4), 1147-1153.

作者简介:



周围(1971-),男,博士,教授,研究方向:通信系统及信号处理和智能天线设计, E-mail: zhouw@cqupt.edu.cn。



徐锐(1999-),通信作者,男,硕士研究生,研究方向:非正交多址接入技术, E-mail: 1101862533@qq.com。



李倩倩(1998-),女,硕士研究生,研究方向:智能反射面。



窦文静(2000-),女,硕士研究生,研究方向:OTFS技术。

(编辑:夏道家)