

基于和速率最大化的以用户为中心可见光通信最优预编码设计

徐文艳, 杨森, 段田东

引用本文:

徐文艳, 杨森, 段田东. 基于和速率最大化的以用户为中心可见光通信最优预编码设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 686–694.

XU Wen-yan, YANG Sen, DUAN Tian-dong. Sum-rate maximization of user-centric visible light communication cells with zero forcing precoding[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 686–694.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0686>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

并行翻转-正交频分复用调光控制室内可见光通信系统

PF-OFDM dimming control for indoor visible light communication systems

光学精密工程. 2015, 23(10z): 85–91 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0084>

大气激光通信光斑图像的快速复原与实时检测

Rapid restoration and real-time detection on spot image of atmospheric laser communication

光学精密工程. 2015, 23(8): 2393–2399 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152308.2393>

联合能量约束下最大信道容量的线性多输入多输出预编码设计

Linear MIMO precoder optimization with maximizing channel capacity under joint power constraints

光学精密工程. 2015, 23(10z): 599–604 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0600>

用于星载激光通信终端的绝对式光电角度编码器

Absolute optical angle encoder used for laser communication terminal on satellite platform

光学精密工程. 2016, 34(10): 2424–2431 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162410.2424>

空间光混频器分光性能的分析与优化

Analysis and optimization of splitting performance for space optical hybrid

光学精密工程. 2017, 25(7): 1748–1756 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172507.1748>

文章编号 1004-924X(2020)03-0686-09

基于和速率最大化的以用户为中心 可见光通信最优预编码设计

徐文艳*, 杨 森, 段田东

(战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州 450002)

摘要: 本文针对可见光通信系统中以用户为中心协作联合传输的预编码技术进行了深入研究。首先, 利用信息论工具, 在以用户为中心的协作策略中推导出和速率表达式。然后, 考虑发光二极管的光功率限制以及光信号非负性等约束条件, 得到最大和速率优化问题, 在此基础上, 将最大和速率最优波束形成设计问题转化为凸优化问题, 并利用 CVX 标准优化包对其进行有效求解。最后, 将所提出的以用户为中心的传输方法与传统的以网络为中心的传输方法及非协作传输方式进行比较。仿真结果显示, 采用迫零预编码 (Zero Forcing, ZF) 技术在系统总和速率方面有较大提高, 约提高 2 nats/s/Hz。以用户为中心的协作方式相比较于非协作、以小区为中心传统协作方式, 系统性能更优。

关键词: 可见光通信; 以用户为中心; 预编码; 迫零; 凸优化

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202803.0686

Sum-rate maximization of user-centric visible light communication cells with zero forcing precoding

XU Wen-yan*, YANG Sen, DUAN Tian-dong

(PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

* Corresponding author, E-mail: 12551287@qq.com

Abstract: In this paper, the Zero-Forcing (ZF) precoding optimization of a visible light communication (VLC) system was studied in detail. We first derive sum-rate expression via information theory tool. Then, by considering that the optical power restriction of light-emitting diodes and VLC signals was inherently non-negative, the rate maximization problem was given in the form of mathematical optimization. Based on the derived bounds, optimal beamformer designs for max-min fairness sum-rate and maximum sum-rate problems were formulated as convex optimization problems, which then can be efficiently solved using standard optimization packages. Comparison with existing network-centric cooperative and noncooperative schemes in a VLC system show that the user-centric approach performs better, and ZF precoding can effectively improve the sum-rate of the system by approximately 2 nats/s/Hz, as is validated by simulations.

Key words: visible light communication; user-centric; precoding; Zero Forcing (ZF); convex optimization

1 引言

下一代无线通信技术对高数据速率通信的需求日益增长,也对现有技术提出了若干挑战。由于射频通信中频谱和功率不足,迫切需要为未来的无线通信系统寻找新的解决方案^[1]。近年来,可见光通信(Visible Light Communication, VLC)这种新技术得到普遍关注,有望成为现有无线技术的一个有益补充^[2]。通过大规模部署发光二极管(Light-Emitting Diode, LED),VLC在未来无处不在的网络中将发挥重要作用。不同于传统的射频系统(Radio Frequency, RF),VLC系统传输的信号是实值的、非负的,其通常使用强度调制和直接检测(Intensity Modulation and Direct Detection, IM/DD)。从网络角度来看,光发射机可以看作一个小的接入点(Access Point, AP),此外通常需安装几盏LED灯,以提供令人满意的照明,由于在VLC网络中通常有多个用户^[3],因此该系统可看作一个多输入多输出(Multiple-input Multiple-output, MIMO)系统。MIMO技术通过协作一组光APs同时传输数据,利用联合信号处理技术,能有效地降低协同小区内干扰信号,提高有用信号的接收效率。传统上以网络为中心的协作小区是按静态模式预先分配的,与用户分布无关,虽然Aps协作成功缓解了小区内干扰,但小区边缘的用户仍然存在较强的小区间干扰。而以用户为中心的协作传输方式是动态的^[4],每个用户可以选择为其服务的Aps集合来形成虚拟小区,通过这种方式打破了传统的以网络为中心的运行方式,自适应协作消除了小区边缘效应,并且通过在每个虚拟小区中布置更多的Aps,极大的提高了网络系统性能。

以用户为中心的可见光通信网络架构中,用户根据其服务质量(Quality of Service, QoS)要求以及信号传输的信道条件,选择Aps进行传输,导致不同用户的不同光小区可能重叠。重叠光虚拟小区重叠Aps同时服务多个用户,随之也带来多用户信道干扰,导致在以用户为中心的协作传输技术下,VLC网络系统吞吐量并不能随着APs密度的增加而增长。因此消除小区间干扰成为以用户为中心的协作方案顺利实施的关键。对于光小区内部及小区间干扰,可以在发射端采

用预编码技术进行抑制,当已知信道状态信息(Channel State Information, CSI),系统对发射信号进行预编码处理,可以有效降低多用户间干扰(Multi-User Interference, MUI),提升系统性能。因此MIMO-VLC系统中在用户接收信号和发射信号之间应用最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)^[5-6]、迫零(Zero-Forcing, ZF)^[7]和块对角化(Block Diagonalization, BD)^[8-9]等预编码方案,尽可能消除或减少多用户干扰。涉及多小区结构及协作传输预编码设计的工作,允许小区间交换用户的CSI和数据,在VLC系统中大都围绕以网络为中心的架构展开。而对于可见光通信网络中以用户为中心的协作传输策略,现有的理论成果^[10-13]大都围绕虚拟小区生成及网络资源分配展开,而对于下行信道信号传输时使用的预编码技术并没有展开深入研究。

本文针对可见光通信网络中以用户为中心的协作方式,研究下行链路预编码方案。针对以用户为中心的协作方式,同一个灯AP可加入到多个虚拟小区,在协作过程中信息交换将大量增加,同时小区与小区之间并没有明显的边界,进一步增加了以用户为中心协作传输方式的复杂度,为了减少计算的复杂性,采用经典的迫零技术(ZF)的预编码方案,来减少小区内以及小区间的干扰。但是VLC系统光信号幅值是受限的,因此经典的复平均受限信号香农公式不适用于VLC系统。本文首先建立以用户为中心协作策略下的VLC系统具有幅值约束的信道容量最大化下行和速率的预编码矩阵优化问题,然后利用凸优化方法进行数学求解,尽可能提高用户的系统和速率。仿真结果表明,使用ZF预编码技术设计最佳波束形成方案具有明显增益,能有效提升系统和速率。

2 系统模型

本节针对室内VLC系统的一个光小区,假设有 L 个Aps同时向 K 个用户广播信息,使用脉冲振幅调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)方式。由于光信号的广播特性,小区用户的干扰主要来自于小区内干扰和小区间干扰。

2.1 传输模型

由于多用户占用相同的时间和频率,通信系

统中必然出现降低传输性能的 MUI。为了减少干扰,可以采用预编码技术。使用预编码的目的是减少接收信号中的干扰项,通过构造预编码矩阵来消除多用户干扰,使其与其他用户的信道矩阵正交,以此来抑制干扰。假设室内可见光小区多点协作传输通信模型如图 1 所示。

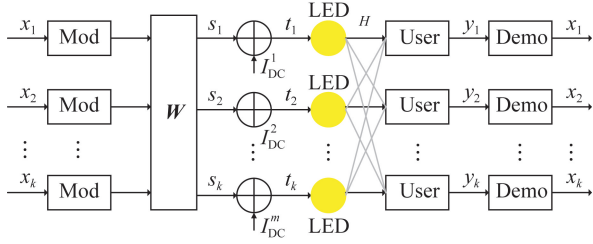


图 1 室内光小区协作传输系统模型

Fig. 1 VLC cooperative transmission system model

假设 AP 发送给用户终端的数据向量为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_k]^T$, 假设 x_k 为零均值电流信号, 其归一化范围为 $[-1, 1]$ ^[14], 根据用户传输过程中获得的 CSI 进行预编码, 经过矩阵 $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k]^T \in \mathbf{R}^{L \times K}$ 预编码处理后, 用户数据信号向量可以用式(1)表示:

$$\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_L]^T = \mathbf{W}\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \omega_k x_k. \quad (1)$$

预编码后信号幅度不一定为正, 因此在传输信号中需要加上直流偏置。所以发射信号 \mathbf{t} 可以表示为:

$$\mathbf{t} = \mathbf{s} + \mathbf{d}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{d} = [I_{DC}^1, I_{DC}^2, \dots, I_{DC}^k]^T$ 。

2.2 接收模型

考虑到单个 VLC-MIMO 系统, 路径配置通常有两种主要类型, 视距(Line-Of-Sight, LOS)路径和非视距路径(Indirect Line-Of-Sight, NLOS)两种。由于 LOS 路径占接收端光功率的 95% 以上^[15], 为方便起见, 本文只考虑 LOS 传播路径。

室内可见光通信系统中 LED 符合朗伯模型, 发射机与用户之间的信道增益^[16]由式(3)表示:

$$\mathbf{H} = \begin{cases} \frac{A_k}{d_{k,l}^2} R_0(\varphi) T_s(\psi_{k,l}) g(\psi_{k,l}) \cos \psi_{k,l}, \\ (0 \leq \psi_{k,l} \leq \psi_{c,k}) \\ 0, (\psi_{k,l} > \psi_{c,k}) \end{cases}, \quad (3)$$

其中: A_k 代表光电二极管探测器 (Photodiode Detecto, PD) 的有效接收面积, $R_0(\varphi)$ 表示发光强

度, $d_{k,l}$ 代表发射机和接收机之间的距离, φ 表示 LED 灯光的发射角, $\psi_{k,l}$ 表示光信号在光接收机处的入射角, $\psi_{k,c}$ (Field of View, FOV) 表示接收机的视场角, $T_s(\psi_{k,l})$ 是光学滤波器增益, $g(\psi_{k,l})$ 是聚光器增益。

假设通过预编码后可以抑制信道干扰, 则第 k 个用户终端接收到的电信号可以表示为:

$$\mathbf{y}_k = \gamma \mathbf{H}_k \mathbf{s} + \mathbf{n}_k =$$

$$\gamma (\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{W}_i \mathbf{x}_i) + \mathbf{n}_k, \quad (4)$$

其中: γ 是 PD 的响应度, $\mathbf{H}_k = [h_{k1}, h_{k2}, \dots, h_{kL}]^T$ 表示第 k 个用户的信道向量, $\mathbf{W}_k = [\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kL}]^T$ 表示第 k 个用户的预编码, \mathbf{n}_k 代表高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN), 均值是 0, 方差可以表示为, $\sigma_k^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2$, 由热噪声和散弹噪声两部分组成。式中, 第 1 项是用户期望的信号, 第 2 项是多用户干扰 MUI, 包括同一光小区内其它用户的小区内干扰以及其它光小区的小区间干扰。

以用户为中心的协作传输方式是作用于用户位置和 ZF 预编码的不规则光小区, 本文假定, 只有与用户有 LOS 连接的 AP 才会被分组到一个小区内, 协作为用户提供服务。

2.3 可见光通信光信号实际约束条件

本节考虑 VLC 信号的实际约束。RF 系统有 3 种调制方式, 调幅、调频和相位调制, 而可见光通信系统的调制方式仅为调幅, 是 IM/DD 调制方式, 这种限制会影响预编码矩阵的设计。LED 线性范围是有限的, 输出光功率从 0 线性提高到 \mathbf{P}_{\max} ^[17]。而且, 为了保证 LED 的正常工作, 即消除 LED 过热和降低潜在的光强度, LED 阵列的驱动电流应该制约在 $[0, \mathbf{P}_{\max}]$, 即:

$$0 \leq \sum_{k=1}^K \omega_{l,k} s_k + d_l \leq \mathbf{P}_{\max}, \quad (5)$$

其中 d_l 表示为了满足 LED 非负性要求添加的直流偏置。

由式(5)以及 $x_k \in [-1, 1]$, 可得:

$$- \|\mathbf{W}_k\|_1 \leq s_k \leq \|\mathbf{W}_k\|_1. \quad (6)$$

结合式(5)和式(6), 得到以下约束条件:

$$\|[\mathbf{W}]_{k,:}\|_1 \leq \mathbf{P}_l, \mathbf{P}_l = \min(d_l, \mathbf{P}_{\max} - d_l). \quad (7)$$

本文在设计基于目标性能指标的最优预编码矩阵时需要考虑式(7)。

3 以用户为中心的光虚拟小区预编码方案

3.1 问题形成

对于以用户为中心的协作传输方式,虚拟小区是从用户的角度形成的,用户根据位置分组,根据其 QoS 要求和信道条件,选择若干个 Aps 组成一个动态光小区,用户处在光小区任意位置都可以根据不同的业务需求获取高效、低时延的服务,从而达到网随人动的目的。网络不依赖于 Aps,而是随着用户的移动而移动。用户是虚拟小区的中心,通过多个 Aps 提供服务。不同的用户的协作虚拟小区相互重叠,在重叠过程中,用户始终处于光小区的中心,小区边缘用户的服务质量得到明显提升。

为展示本文设计方案,使用虚拟小区的概念,所有服务 Aps 和用户组成一个虚拟小区。以用户为中心的网络中,每个用户都选择几个 Aps 形成一个虚拟小区。假设用户 k 和 k' 的虚拟小区重叠,重叠部分记为 $C_{k,k'}, C_{k,k'} = C_k \cap C_{k'}$ 为同时服务于 U_k 和 $U_{k'}$ 的 LED 阵列集合。一旦用户拥有与 Aps 的 LOS 连接,LED 阵列就被分组到一个虚拟单元中,以便协作地为用户服务。因此,重叠区域的干扰信号便转换成有用的协作传输信号,则 Aps 接收到的信号表示为:

$$y_k = \gamma \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k \mathbf{x}_k + \gamma \sum_{k' \neq k} \mathbf{H}_{k,k'} \mathbf{W}_{k,k'} \mathbf{x}_{k'} + n_k. \quad (8)$$

ZF 预编码通过构建预编码矩阵来消除多用户干扰,减少了干扰信号,并使其与其他用户的信道矩阵正交。

在上述介绍 VLC 用户系统模型的基础上,利用预编码向量 \mathbf{W}_k 表示相应的和速率问题。对于加性噪声信道,可以利用熵权不等式^[18]得到下界容量,用户 k 的信道容量为:

$$\begin{aligned} C_k &\geq I(X_k; Y_k) = h(Y_k) - h(Y_k | X_k) = \\ &h(X_k + N) - h(N) \stackrel{\text{(EPI)}}{\geq} \\ &\frac{1}{2} \log(e^{2h(X_k)} + e^{2h(N)}) - h(N) = \\ &\frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{e^{2h(X_k)}}{2\pi e N_0}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)可以得到,用户 k 的可实现的数据率可以表示为:

$$C_k \geq \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{2\gamma \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k}{\pi e \sigma_k^2}\right) \triangleq R_k. \quad (10)$$

因此,系统中所有用户的和速率可以表示为:

$$R = \sum_{k=1}^K R_k = \sum_{k=1}^K \frac{1}{2} \left(1 + \log \frac{2\gamma \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k}{\pi e \sigma_k^2}\right). \quad (11)$$

然后,利用 LED 输入信号为非负且幅度有限的特点,结合预编码矩阵 \mathbf{W}_k 所受的限制,研究 VLC 系统下行链路的和速率最大化问题,表示为:

$$\begin{aligned} P1: \max_{\mathbf{W}_k} &\sum_k \frac{1}{2} \left(1 + \log \frac{2\gamma \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k}{\pi e \sigma_k^2}\right), \\ \text{s. t.} &\quad \mathbf{H}_{k,k'} \mathbf{W}_{k,k'} = 0, \forall k \neq k', \\ &\quad \|\mathbf{W}_k\|_1 \leq \mathbf{P}_l, \mathbf{P}_l = \min(\mathbf{d}_l, P_{\max} - \mathbf{d}_l). \end{aligned} \quad (12)$$

需要注意的是,目标函数明显是非凸的。因此,通常很难立即解决这个问题。因此接下来试图通过寻找局部最优性来研究次优解。

3.2 和速率最大化分析

对于式(12)中所示的和速率最大化问题,本节目标是找到它的局部最优解。首先引入松弛变量 λ_k 和表达式 $\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k = \sqrt{q_k}$,那么式(12)可以进一步表示为:

$$\begin{aligned} P2: \max_{\mathbf{W}_k, q_k, \lambda_k} &\sum_k \frac{1}{2} \left(1 + \log \frac{2\gamma \lambda_k}{\pi e \sigma_k^2}\right), \\ \text{s. t.} &\quad \mathbf{H} \mathbf{W} = \text{diag}\{\sqrt{q_1}, \dots, \sqrt{q_k}\}^T, \\ &\quad \|\mathbf{W}_k\|_1 \leq \mathbf{P}_l, \forall k, \\ &\quad q_k \geq \lambda_k, \forall k, \\ &\quad q_k \geq 0, \forall k. \end{aligned} \quad (13)$$

可以看出上述问题的目标函数是凹函数。然而,由于 $\mathbf{H} \mathbf{W}$ 是仿射变换得到的,第一个约束条件是非凸的, $\text{diag}\{\sqrt{q_1}, \sqrt{q_2}, \dots, \sqrt{q_k}\}^T$ 是凹的。为了解决这个问题,利用凹凸过程(Convex-Concave Procedure, CCCP)^[19-20]对该问题进行求解,通过迭代寻找局部最优解。其中,在第 i 次迭代过程中,凹项 $\sqrt{q_k}$ 进行一次泰勒展开,近似表达为 $\sqrt{q_k} \approx \sqrt{q_k^{(i-1)}} + \frac{1}{2\sqrt{q_k^{(i-1)}}} (q_k - q_k^{(i-1)})$,因此,式(13)转换为凸优化问题如下:

$$P3: \max_{\mathbf{W}_k, q_k, \lambda_k} \sum_k \frac{1}{2} \left(1 + \log \frac{2\gamma \lambda_k}{\pi e \sigma_k^2}\right),$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad \mathbf{H}\mathbf{W} &= \text{diag} \left\{ \left[\sqrt{q_1^{(i-1)}} + \frac{1}{2\sqrt{q_1^{(i-1)}}} (q_1 - q_1^{(i-1)}) \cdots \sqrt{q_k^{(i-1)}} + \frac{1}{2\sqrt{q_1^{(i-1)}}} (q_k - q_k^{(i-1)}) \right]^T \right\}, \\ \sum_{i=1}^K \|\mathbf{W}_i\|_{k,:} &\leq \mathbf{P}_l, \forall k, \\ q_k^{(i)} &\geq \lambda_k, \forall k, \\ q_k^{(i)} &\geq 0, \forall k. \end{aligned} \quad (14)$$

P3 问题可由 CVX^[21] 等常用凸优化软件包进行优化求解,算法 1 中给出了求解该问题的详细迭代算法。

算法 1: 求解(14)式迭代算法

初始化: 输入信道矩阵 \mathbf{H}_k 和噪声方差 σ_k^2 ; 初始值 q_k 足够小, 假设为 $q_k = 0.1$ 。

迭代: 第 i 次迭代。

(1) 通过 $q_k^{(i-1)}$ 更新 $q_k^{(i)}, \lambda_k, \mathbf{W}_k$ 的值, 其中可以利用 CVX 工具箱。

(2) $i = i + 1$ 。

终止迭代, 当满足下面两条件时终止迭代。

(1) $|q_k^{(i)} - q_k^{(i-1)}| \leq \delta, \delta = 10^{-3}$ 为门限值。

(2) $i = M, M = 20$ 为预先设置的最大迭代次数。

由于迭代性质, 上述算法需要多次迭代才能保证局部最优解的收敛性。因此, 本文进一步研究关于 P1 问题如何低复杂度解决的问题。

$$\text{由于} \left(\sum_{i=1}^K \|\mathbf{W}_i\|_{k,:} \right)^2 = \left(\sum_{i=1}^K |w_{k,i}| \right)^2$$

以及 $\sum_{i=1}^K \mathbf{W}_i \mathbf{W}_i^T = \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_{k,i}^2$, 因此, 根据柯西-施瓦茨不等式, 可以直接得到:

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^K \|\mathbf{W}_i\|_{k,:} \right)^2}{K} \leq \sum_{i=1}^K \mathbf{W}_i \mathbf{W}_i^T = \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_{k,i}^2, \forall k. \quad (15)$$

因此, 可以用式(15)代替 P1 问题中的第 2 个约束条件。P1 问题可以表达为一下优化问题:

$$\begin{aligned} \text{P4:} \max_{\mathbf{W}_k} \sum_k \frac{1}{2} \left(1 + \log \frac{2\gamma \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k}{\pi \epsilon \sigma_k^2} \right), \\ \text{s. t.} \quad \mathbf{H}_{k,k'} \mathbf{W}_{k,k'} = 0, \forall k \neq k', \\ \sum_{i=1}^K \mathbf{W}_i \mathbf{W}_i^T = \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_{k,i}^2, \mathbf{P}_l = \min(\mathbf{d}_l, \mathbf{P}_{\max} - \mathbf{d}_l). \end{aligned} \quad (16)$$

显然, P4 问题的界的紧致性取决于式(15)中不等式的紧致性, 不等式与用户数是成反比的。为了解决 P4 最优解, 给出变量 $\mathbf{G}_i = \mathbf{W}_i \mathbf{W}_i^T > 0$, P4 可以进一步表示为:

$$\begin{aligned} \text{P5:} \max_{\mathbf{W}_k} \sum_k \frac{1}{2} \left(1 + \log \frac{2\gamma \mathbf{H}_k \mathbf{G}_k \mathbf{H}_k^T}{\pi \epsilon \sigma_k^2} \right), \\ \text{s. t.} \quad \mathbf{H}_{k,k'} \mathbf{G}_{k,k'} \mathbf{H}_{k,k'}^T = 0, \forall k \neq k', \\ \sum_{i=1}^K [\mathbf{G}_i]_{k,k} \leq \frac{\mathbf{P}_l}{K}, \mathbf{P}_l = \min(\mathbf{d}_l, \mathbf{P}_{\max} - \mathbf{d}_l), \\ \text{rank}(\mathbf{G}_k) = 1, \forall k. \end{aligned} \quad (17)$$

P5 问题的目标函数和前两个约束条件都是凸的, 但是第 3 个约束不是凸的, 为了解决 P5, 首先忽略该第 3 个约束条件, 得到式(18):

$$\begin{aligned} \text{P6:} \max_{\mathbf{W}_k} \sum_k \frac{1}{2} \left(1 + \log \frac{2\gamma \mathbf{H}_k \mathbf{G}_k \mathbf{H}_k^T}{\pi \epsilon \sigma_k^2} \right), \\ \text{s. t.} \quad \mathbf{H}_{k,k'} \mathbf{G}_{k,k'} \mathbf{H}_{k,k'}^T = 0, \forall k \neq k', \\ \sum_{i=1}^K [\mathbf{G}_i]_{k,k} \leq \frac{\mathbf{P}_l}{K}, \mathbf{P}_l = \min(\mathbf{d}_l, \mathbf{P}_{\max} - \mathbf{d}_l). \end{aligned} \quad (18)$$

由此看出, P6 问题一个受线性矩阵约束的标准行列式(MAXDET), 利用 CVX 标准优化包就可以有效的进行求解。根据参考文献[22], P4 中对秩一约束总是成立的。换句话说, P6 题和 P4 题是等价的, 因此它们有相同的解。

4 以网络为中心的虚拟小区预编码方案

采用以网络为中心的协作策略, 不仅需要抑制小区内干扰, 还需抑制小区间干扰, 尤其对于小区边缘用户。抑制干扰可采用预编码, 为小区内用户设计预编码矩阵, 同时考虑其他小区中用户的信道来执行预编码算法。为了做到这一点, 需要在小区之间共享 CSI, 给系统增加了少量复杂性。则最大和速率问题可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k^{(c)} &= \mathbf{H}_k^{(c)} \mathbf{W}_k^{(c)} \mathbf{x}_k^{(c)} + \sum_{j \neq k} \mathbf{H}_j^{(c)} \mathbf{W}_j^{(c)} \mathbf{x}_j^{(c)} + \\ &\quad \sum_{c' \neq c} \sum_{i \in c'} \mathbf{H}_i^{(c')} \mathbf{W}_i^{(c')} \mathbf{x}_i^{(c')} + \mathbf{n}_k^{(c)}. \end{aligned} \quad (19)$$

进一步推导最大系统和速率可以表示为:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{W}_k} \sum_{k \in U_c} (\log(2\mathbf{H}_k^{(c)} \mathbf{W}_k^{(c)}) - \log \sqrt{2\pi \epsilon \sigma_{c,k}^2}), \\ \text{s. t.} \quad \mathbf{H}_k^{(c)} \mathbf{W}_i^{(c)} = 0, \forall k \neq i, \\ \mathbf{H}_k^{(c')} \mathbf{W}_i^{(c')} = 0, \forall c \neq c', \\ \sum_{i \in U_c^{(c)}} \|\mathbf{W}_i^{(c)}\|_{k,:} \leq \mathbf{P}_i. \end{aligned} \quad (20)$$

同公式(18)类似, 利用现有的 CVX,

YALMIP 等标准优化包可以有效地求解。

5 仿真分析

本节模拟一个可见光通信预编码广播系统,评估上节中提出的方案。假设室内长 8 m,宽 4 m,高 3 m,8 组 LED 阵列,4 个用户。如图 2 所示,笛卡尔坐标系原点为天花板中心,用于指定用户终端和 LED 阵列的位置,假设所有的用户在同一个接收平面上,高为 0.65 m,虚线部分表示小区之间的干扰。由于以用户为中心的虚拟小区形成是与用户位置有很大关系,故而用户的位置坐标假设是用户 1: (-3, 2, -1.5); 用户 2: (-2, -0.8); 用户 3: (2, 2, -0.7), 用户 1 和用户 2 位于虚拟小区 1 中,用户 4 在虚拟小区 2 中,用户 3 在小区 1 和 2 之间移动。其他的仿真参数如表 1 所示。仿真结果通过 10 000 个不同的通道实现,即 10 000 个不同位置的用户分布在该房间中,如果有用户离开房间,则重新初始化该用户,LED 灯阵列平均功率从 20~40 dBm 不等,相当于 0.1~10 W。

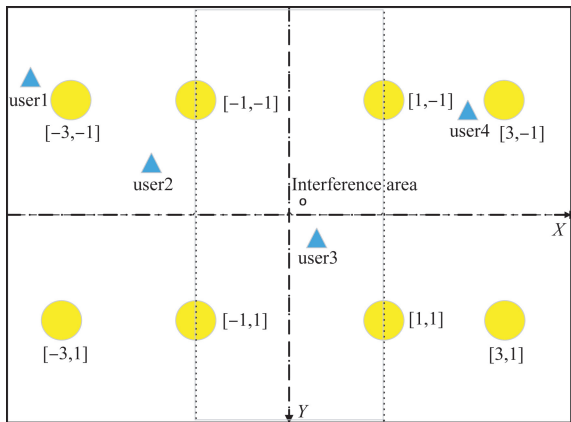


图 2 室内灯 Aps 和用户分布

Fig. 2 Layout of the VLC Aps and users projected.

仿真中研究了 VLC 系统的和速率性能,和速率 sum-rate 是所有用户可达到的速率之和。图 3 给出了用户不同协作方式下系统最大和速率和 LED 平均光功率之间的关系,从图 3 可以看到,经过 ZF 预编码技术显著提高了 VLC 系统和速率,且以用户为中心的方案性能优于传统的以网络为中心的方案,约提高 2 nats/s/Hz。分析其原因,主要是因为以用户为中心和以网络为中心

的两种协作方式在处理重叠区域时存在差异,以网络为中心的方案是利用预编码技术降低了边缘用户的干扰,而以用户为中心的重叠信道区域作为协同传输信道对用户的共同提供服务,将干扰信号转换为传输信号,因此以用户为中心的协同方案提高了系统性能。此外,随着传输功率的增加,以用户为中心的和以网络为中心的协作传输方式系统和速率均比非协作传输时高,这是因为两种协作传输都经过预编码技术的处理把小干扰项消除了,所以和速率更高。

表 1 系统仿真参数

Tab. 1 System parameters used for simulation

| Parameters | Value |
|--|-------|
| Room size/m | 8×4×3 |
| LED bandwidth, B/MHz | 20 |
| LED beam angle, $\varphi/(\text{°})$ | 120 |
| LED pitch/cm | 2 |
| LED Lambertian emission order m | 1 |
| Optical concentrator refractive index a_k | 1.5 |
| PD area, A/cm^2 | 1 |
| PD responsivity, $\gamma/(A \cdot W^{-2})$ | 0.4 |
| Per-amplifier noise current density, $i_{\text{amp}}/(\rho A \cdot \text{Hz}^{1/2})$ | 5 |
| Ambient light photocurrent, $\chi_{\text{amb}}/(A \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1})$ | 10.93 |
| Receiver FOV, $\Psi_c/(\text{°})$ | 60 |
| LED conversion factor, $\zeta/(W \cdot A^{-1})$ | 0.44 |

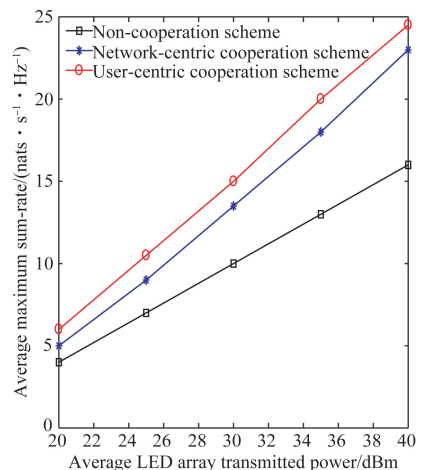


图 3 系统和速率性能

Fig. 3 Sum-rate performance

图 4 给出了 3 种协作方式下的用户平均吞吐量累计分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF)。仿真结果显示使用 ZF 预编码技术的以用户为中心传输策略用户平均吞吐量更高。

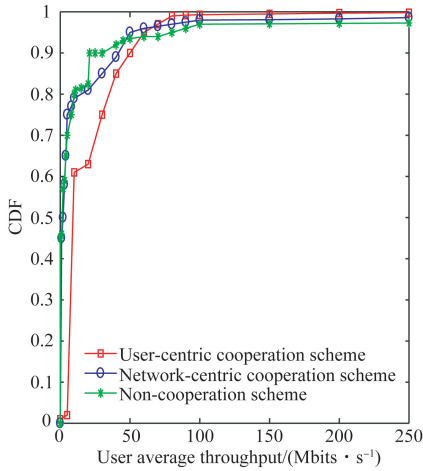


图 4 不同协作模式用户平均吞吐量 CDF 性能

Fig. 4 Average throughput CDF performance for users in different collaboration schemes

图 5 给出了室内相同光布局的情形下,用户在房间随机移动,不同用户终端数量 K 的系统平均和速率。注意的是,以用户为中心的 VLC 系统平均和速率并未随着用户数量的增加而持续上升,这是因为用户光功率值是固定的,其次在室内有限的区域内,增加用户终端也给 ZF 预编码带来了难度和复杂度,因此需要进一步对虚拟小区大小进行适当优化。

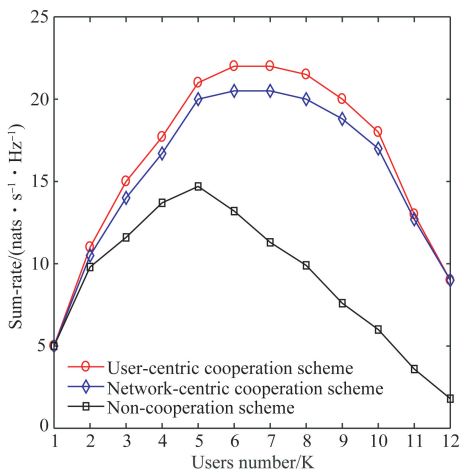


图 5 系统和速率和用户数量的关系

Fig. 5 Relations between sum-rate and user number

图 6 以用户 3 为例给出了 3 种协作方案的信噪比性能。图中表示了检测到的用户输出信号的平均信噪比与 AP 功率之间的关系。从图中可以看到,以用户为中心的用户平均信噪比相较于以网络为中心的方案高约 5 dB,相较于非协作方式高约 11 dB。用户受到相邻虚拟小区的干扰,采用以用户为中心协作时,大部分的干扰转化为了有用功率,从而提高了该用户的平均信噪比。

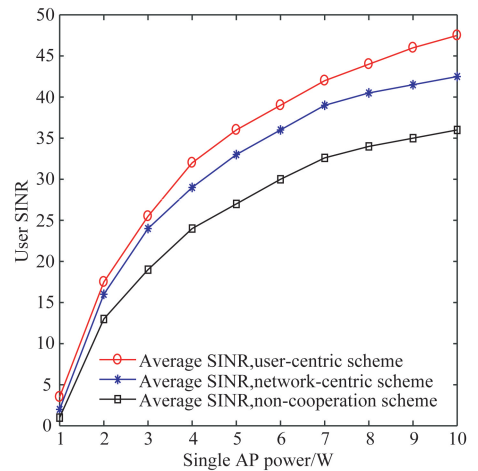


图 6 用户 3 信号的单 AP 功率与信噪比的关系

Fig. 6 Relations between single AP power and SINR of user 3

6 结 论

本文针对在 VLC 系统中以用户为中心的网络传输协作策略,提出了一种基于 ZF 预编码的可见光通信系统协作传输方案。结合光学信号的实际限制,研究了 VLC 系统的可达和速率最大化问题,利用最优预编码设计得到系统最大和速率。为了解决相应的复杂问题,提出了一种利用凹凸过程的局部最优迭代算法,最后针对 VLC 多用户多小区网络中多种协作形式设计了最优预编码方案,使用户的系统速率达到最优。仿真结果显示,ZF 预编码可以有效地提高系统和速率,以用户为中心的协作方案可以明显提升系统性能。本课题将进一步研究以用户为中心的协作方案中虚拟小区大小优化问题,以期最大化整体网络性能。

参考文献:

- [1] 郭树旭,藏玲玲,韩明珠,等.可见光通信的间隔多脉冲位置调制[J].光学精密工程,2014,22(7):1760-1765
GUO SH X, ZHANG L L, HAN M ZH, *et al.*. Interval pulse position modulation in visible light communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1760-1765. (in Chinese)
- [2] 赵黎,朱彤,霍杰,等.可见光 MIMO 通信系统中级联编码的应用[J].红外与激光工程,2019,48(3):0322002.
ZHAO L, ZHU T, HUO J, *et al.*. Application of concatenated codes in visible MIMO communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3):0322002. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] LI X, JIN F, ZHANG R, *et al.*. Users first: user-centric cluster formation for interference-mitigation in visible-light networks [J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2016, 15(1): 39-53.
- [5] PHAM T V, LE-MINH H, PHAM A T. Multi-user visible light communication broadcast channels with zero-forcing precoding [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2017, 64(6): 2509-2521.
- [6] SUN Z G, YU H Y, TIAN Z J, *et al.*. Linear precoding for MU-MISO VLC systems with noisy channel state information [J]. *IEEE Commun. Lett.*, 2018, 22(4): 732-735.
- [7] MA H, MOSTAFA A, LAMPE L, *et al.*. Coordinated beamforming for downlink visible light communication networks [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2018, 66(8): 3571-3582.
- [8] MA S, YANG R, LI H, *et al.*. Achievable rate with closed-form for SISO channel and broadcast channel in visible light communication networks [J]. *J. Light. Technol.*, 2017, 35(14): 2778-2787.
- [9] MARSHOUD H, DAWOUD D, KAPINAS V M, *et al.*. MU-MIMO Precoding for VLC with Imperfect CSI [C]. *Proceedings of the International Workshop on Optical Wireless Communications*, 2015.
- [10] FENG S M, ZHANG R, X L, *et al.*. Dynamic throughput maximization for the user-centric visible light downlink in the face of practical considerations [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 25(2): 1536-1551.
- [11] JIANG R, WANG Q, HAAS H, *et al.*. Joint user association and power allocation for cell-free visible light communication networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(1): 136-148.
- [12] ZANG R, CUI Y, CLAUSSEN H, *et al.*. Anticipatory association for indoor visible light communications: light, follow me [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 8(5): 212-224.
- [13] LI X, HUO Y, ZANG 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.
- [14] YING K, QIAN H, BAXLEY R J, *et al.*. MIMO transceiver design in dynamic-range-limited VLC systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2016, 28(22): 2593-2596.
- [15] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Trans. Consum. Electron.*, 2004, 50(1): 100-107.
- [16] 朱彤,赵黎,刘智港,等.兼顾照明的可见光 MIMO 通信系统模型[J].红外与激光工程,2018,47(8):0822001.
ZHU T, ZHAO L, LIU ZH G, *et al.*. Visible light MIMO communication system model considering lighting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0822001. (in Chinese)
- [17] PHAM T V, MINH H L, PHAM A T. Multi-user visible light communication broadcast channels with zero-forcing precoding [J]. *IEEE Transaction on Communications*, 2017, 65(6): 2509-2521.
- [18] LAPODOTH A, MOSER S M, WIGGER M A. On the capacity of free-space optical intensity channels [J]. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2009, 55(10): 4449-4461.
- [19] YUILLE A L, RANGARAJAN A. The concave-convex procedure (CCCP) [J]. *Neural Comput.*, 2003, 15(4): 915-936.
- [20] SRIPERUMBUDUR B K, LANCKRIET G R G. On the convergence of the concave-convex procedure [J]. *Proc. Neural Inf. Process. Syst.*, 2009, 6(3): 1759-1767.

[21] GRANGT M, BOYD S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, 2013. [Online]. Available: <http://cvxr.com/cvx/>.

[22] WIESEL A, ELDAR Y C, SHAMAI S. Zero-forcing precoding and generalized inverses [J]. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2008, 56(9): 4409-4418.

作者简介:



徐文艳(1983—),女,安徽界首人,讲师,中国民航大学获得硕士学位,目前在战略支援部队信息工程大学主要从事信号处理、可见光通信网络协作传输等方面的研究。E-mail: 12551287@qq.com