

基于角度分集接收机的多小区多用户 MIMO-VLC 系统

刘建开, 岳殿武*, 赵正铎

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 小区间干扰严重影响了多小区系统的性能, 为了降低小区间干扰的影响, 研究了多小区多用户多输入多输出可见光通信(MIMO-VLC)系统的性能, 使用基于孔的角度分集接收机作为接收设备, 通过选择合适的 LED 配置, 对干扰区进行了优化, 并讨论了 2 种多小区实现方案: 第一种是动态小区划分; 第二种是光电探测器选择(PDS)消除小区间干扰。仿真结果表明: 当小区中有用户处于干扰区时, 对于这个小区中的用户, 动态小区划分方法的误码率(BER)性能更优, 但这个小区中用户的位置会对其它小区中用户的性能产生影响, 并且其计算复杂度较高; 对于 PDS 消除小区间干扰方法, 一个小区中用户的 BER 性能不受其它小区用户位置的影响, 其计算复杂度较低; 当用户都处于非干扰区时, 这 2 种方法的 BER 性能相同。

关键词: 可见光通信; 多小区; 多输入多输出; 角度分集

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)11-0037-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-cell multi-user MIMO-VLC systems based on angle diversity receiver

LIU Jiankai, YUE Dianwu*, ZHAO Zhengduo

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: The performance of multi-cell systems has been seriously affected by inter-cell interference. In order to reduce the influence of inter-cell interference, the performance of multi-cell and multi-user multiple input multiple output visible light communication (MIMO-VLC) system is studied. The angle diversity receiver based on the hole is used as the receiving device, and the interference area is optimized by selecting the appropriate LED configuration, and two multi-cell implementation schemes are discussed. The first is dynamic cell division, and the second is photodetector selection(PDS) to eliminate inter-cell interference. The simulation results show that: when there are users in the interference zone in the cell, the dynamic cell division method has better bit error rate (BER) performance for the users in the cell, but the location of users in this cell will affect the performance of users in other cells, and its computational complexity is high. For PDS method to eliminate inter-cell interference, the BER performance of users in a cell is not affected by the location of users in other cells, and its computational complexity is low. When users are all in the non-interference zone, the BER performance of the two methods is the same.

Key words: visible light communication; multi-cell; multiple input multiple output; angle diversity

0 引言

为了满足即将到来的基于 5G 的通信系统对频谱不断增长的需求, 人们正在探索其它频段上的高速数

收稿日期: 2019-06-04。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61371091)资助。

作者简介: 刘建开(1992-), 男, 河北承德人, 硕士生, 现就读于辽宁省大连海事大学信息科学技术学院电子与通信工程专业, 研究方向为移动通信网络理论与技术, 在校期间主要从事室内 MIMO 可见光通信接收机方面的研究。

* 通信作者: 岳殿武(E-mail: dwyue@dlmu.edu.cn)。



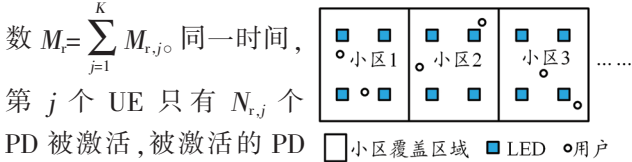
据传输, 其中一个频段是可见光频谱^[1]。可见光通信(VLC)根据发送的比特调制房间中 LED 的发光强度, 实现照明和数据传输的双重目标^[2]。VLC 系统具有价格低廉、能耗低、安全和无电磁干扰等优点, 但由于 LED 的调制带宽有限, 面临着低数据速率传输的问题。为了提高传输速率, 可以将多输入多输出(MIMO)技术应用于 VLC 系统^[3]。由于强度调制/直接检测(IM/DD)信道的特性, MIMO 技术的应用也面临着一定的挑战: 因为 IM/DD 信道不提供丰富的散射环境, 导致信道矩阵是病态或几乎奇异的。文献[4]使用成像接收机, 并通过光电探测器选择(PDS)降低了同一用户不

同光电探测器(PD)以及不同用户间的信道相关性。但是,许多 VLC 应用都需要非常小的接收设备,接收机必须能够在紧凑的结构下提供条件良好的信道矩阵^[5]。由于成像接收机体积大,很难做到集成,且其成本较高,因而不是一个好的选择^[6]。文献[6]在单用户 MIMO 系统下,提出了基于孔的角度分集接收机,这种接收机能够在紧凑的结构下提供良好的性能,因而值得进一步发展。另一方面,LED 的光束角度有限,一个 LED 阵列只能覆盖一定的区域。因此,使用大量的 LED 阵列,可以形成类似移动蜂窝网络的多小区 VLC 配置^[7]。在这样的多小区 VLC 系统中,一个用户可能会受到小区间干扰和小区内部干扰。为了保证用户正常通信,需要减弱甚至消除这些干扰的影响。块对角化(BD)预编码能够有效地消除小区内部干扰^[8]。文献[9]研究了基于迫零(ZF)预编码的多小区多用户多输入单输出(MISO)系统的性能,通过多种小区协作策略,来提高系统的可达容量。

本文研究多小区多用户 MIMO-VLC 系统的性能。使用基于孔的角度分集接收机作为接收设备,讨论 2 种多小区实现方案。

1 多小区 VLC 系统模型

本文考虑的多小区 VLC 系统模型如图 1 所示。每个小区包含 N_i 个 LED 发射机和 $K(K \leq N_i)$ 个用户设备(UE),第 $j(j=1, \dots, K)$ 个 UE 包含 $M_{r,j}$ 个 PD,PD 总数 $M_r = \sum_{j=1}^K M_{r,j}$ 。同一时间,



第 j 个 UE 只有 $N_{r,j}$ 个 PD 被激活,被激活的 PD 总数为 $N_r = \sum_{j=1}^K N_{r,j}$ 。

图 1 多小区 VLC 系统示意图

1.1 信道模型

在室内 VLC 系统中,有 2 种主要的链路模型,视距(LOS)链路和非视距(N-LOS)链路。本文只考虑 LOS 链路,因为其接收功率超过总接收功率的 95%^[9]。接收机中的一个接收单元(RE)如图 2 所示^[6]。图 2(a)展示了一个典型 RE 的结构,RE 在不透明的屏幕上有一个孔,与放置 PD 的接收平面平行且距离为 L 。因此,对于给定的 RE,PD 只能接收到通过相关孔的光。其中,孔和 PD 都是圆形的,孔的半径用 R_A 表示,PD 的半径用 R_D 表示。光的方向用 (φ, α) 表示, φ 和 α 分别表示光的入射角和极角。假设孔的半径远小于 LED 与接收机之间的距离,通过孔的光线近似平行。因此,在

接收平面上形成一个半径为 R_A 的圆形光斑,如图 2(b)所示。孔和 PD 的相对位置用 (d_{AD}, α_{AD}) 表示, d_{AD} 为孔和 PD 的圆心距离, α_{AD} 为极角;孔和光斑的相对位置用 (d_{AS}, α_{AS}) 表示, d_{AS} 为孔和光斑的圆心距离, α_{AS} 为极角,光斑和 PD 的径向距离用 d_{SD} 表示。

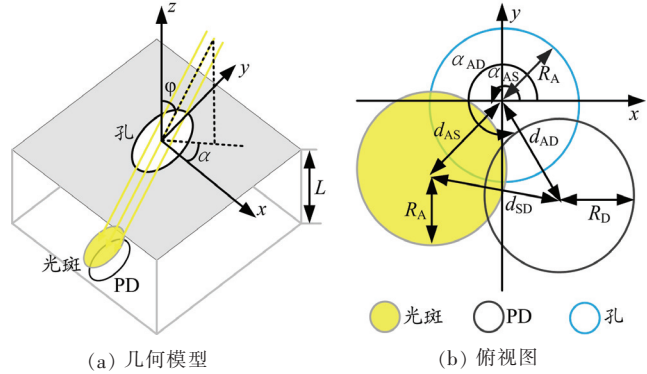


图 2 一个接收光信号的接收单元

本文将 LED 看做一个朗伯体光源,信道增益为^[6]:

$$h = \frac{(m+1)A_0}{2\pi l^2} \cos^m(\phi) \cos(\varphi) \quad (1)$$

其中, $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$, m 表示发光方向性的模式参数, $\Phi_{1/2}$ 是 LED 的半功率角; l 表示 LED 与接收机之间的距离; ϕ 表示出射角; φ 表示入射角; A_0 表示光斑和 PD 的重叠面积。参照图 2,应用几何学方法,重叠面积可以表示为:

$$A_0 = \begin{cases} 2R_D^2 \arccos\left(\frac{d_{SD}}{2R_D}\right) - \frac{d_{SD}}{2} (4R_D^2 - d_{SD}^2)^{1/2}, & 0 \leq d_{SD} \leq 2R_D \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中, d_{SD} 可以表示为:

$$d_{SD} = [d_{AS}^2 + d_{AD}^2 - 2d_{AS}d_{AD}\cos(\alpha_{AS} - \alpha_{AD})]^{1/2} \quad (3)$$

相对孔中心的光斑中心坐标可以表示为:

$$(d_{AS}, \alpha_{AS}) = (r \tan \varphi, \pi + \alpha) \quad (4)$$

本文研究的 MIMO 接收机包含多个 RE,每个 PD 放在相对孔的不同位置,带有 9 个 RE 的接收机俯视图如图 3 所示。

1.2 单小区多用户 MIMO-VLC 系统

每个小区内,考虑了一个应用块对角化预编码(BDP)的下行 VLC 系统^[8]。

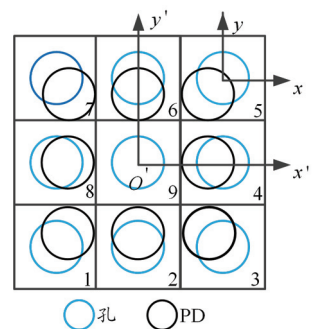


图 3 带有 9 个接收单元的接收机俯视图

第 j 个 UE 的数据流 q_j 应满足 $q_j \leq N_{r,j}$, $\sum_{j=1}^K q_j \leq N_t$ 。为了

最大化空间自由度, 假设 $\sum_{j=1}^K q_j = N_t$, $q_j = N_{r,j}$ 。因此, 每个 UE 可以看成是一个传输 $N_{r,j}$ 个数据流的 $(N_t \times N_{r,j})$ MIMO 配置, 并且 $N_t = \sum_{j=1}^K N_{r,j} = N_t$ 。第 j 个用户 $(N_t \times N_{r,j})$ 的预编码矩阵为:

$$\mathbf{P}_j = [\mathbf{p}_{1,j}^T, \dots, \mathbf{p}_{N_{r,j}}^T]^T = \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} \mathbf{V}_j^{(1)} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{p}_{i,j}$ ($i=1, \dots, N$) 是矩阵 $\mathbf{P}_j$ 的 $(1 \times N_{r,j})$ 的第 i 个行向量, $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 是对应零奇异值的右奇异矩阵, $\mathbf{V}_j^{(1)}$ 是对应非零奇异值的右奇异矩阵。

在上述方案中, 当多个用户相距较近时, 整体的 MIMO 信道矩阵可能会不满秩, 从而严重影响通信性能。但是, 使用 PDS 方法, 可以降低用户之间的信道相关性, 提高 VLC 系统的传输鲁棒性^[4]。文献[10]指出, 在空间多路复用系统中, 多用户系统的最大系统误码率由最差性能的用户决定, 本文考虑使用最大最小奇异值(MMSV)准则^[11]进行 PDS。本文使用的 MMSV-PDS 方法如下:

①在 BDP 的限制下, 创建一个对应满秩整体信道矩阵的候选 PD 集合 m_p , 每个用户包含 $N_{r,j}$ 个激活的 PD。 m_p 是总的 M_r 个 PD 集合 Ω_p 的一个子集, 即 $m_p \in \Omega_p$ 。

②对每一个候选子集 m_p , 对 $H_{j,m_p} \tilde{\mathbf{V}}_{j,m_p}^{(0)}$ 进行奇异值分解得到:

$$H_{j,m_p} \tilde{\mathbf{V}}_{j,m_p}^{(0)} = \mathbf{U}_{j,m_p} \mathbf{\Lambda}_{j,m_p} \mathbf{V}_{j,m_p}^{(1)H} \quad (6)$$

其中, H_{j,m_p} 是和 m_p 相关的第 j 个用户的信道矩阵, $\tilde{\mathbf{V}}_{j,m_p}^{(0)}$ 是右奇异向量, $\mathbf{U}_{j,m_p}$ 包含左奇异向量, $\mathbf{\Lambda}_{j,m_p}$ 是由奇异值组成的对角矩阵, $\mathbf{V}_{j,m_p}^{(1)H}$ 是右奇异向量。这样, 对于给定的 m_p , 可以得到第 j 个用户的最小奇异值 $\lambda_{j,m_p}^{\min}$ 为:

$$\lambda_{j,m_p}^{\min} = \min\{\text{diag}(\mathbf{\Lambda}_{j,m_p})\} \quad (7)$$

其中, $\text{diag}(\mathbf{\Lambda}_{j,m_p})$ 是 $\mathbf{\Lambda}_{j,m_p}$ 对角线上元素组成的集合。然后计算:

$$\tilde{k}_{m_p}^{\min} = \min_{j=1, \dots, K} \lambda_{j,m_p}^{\min} \quad (8)$$

其中, $\tilde{k}_{m_p}^{\min}$ 代表对于给定的 m_p 中所有用户的最小奇异值。

③选择 PD 集合 m_p , 使其满足:

$$m_{p,\text{solution}} = \underset{m_p \in \Omega_p}{\text{argmax}} \left\{ \tilde{k}_{m_p}^{\min} \right\} \quad (9)$$

其中, $m_{p,\text{solution}}$ 是用户要激活的 PD 集合。

1.3 多小区多用户 MIMO-VLC 系统

在多小区多用户 MIMO-VLC 系统中, 每个 VLC 小区本质上可以看作一个多用户的 MIMO 系统。第 c 个小区第 j 个用户的接收信号可以表示为:

$$y_{c,j} = R \times \left(H_{c,j} \mathbf{P}_{c,j} x_{c,j} + \underbrace{H_{c,j} \sum_{i \in u_c, i \neq j} \mathbf{P}_{c,i} x_{c,i}}_{\text{小区内干扰}} + \underbrace{H_{c',j} \sum_{i \in u_{c'}, i \neq j} \mathbf{P}_{c',i} x_{c',i}}_{\text{小区内干扰}} \right) + n_{c,j} \quad (10)$$

其中, u_c 是 c 小区用户的集合, $u_{c'}$ 是其它小区用户的集合。 $H_{c,j}$ 是 c 小区内 LED 到第 j 个用户的信道矩阵, $H_{c',j}$ 是其它小区内 LED 到 c 小区第 j 个用户的信道矩阵。 $\mathbf{P}_{c,j}$ 是 c 小区第 j 个用户的编码矩阵, $\mathbf{P}_{c,i}$ ($i \neq j$) 是 c 小区其它用户的编码矩阵, $\mathbf{P}_{c',j}$ 是其它小区用户的编码矩阵。 $x_{c,j}$ 是 c 小区第 j 个用户的发送信号, $x_{c,i}$ ($i \neq j$) 是 c 小区其它用户的发送信号, $x_{c',i}$ 是其它小区用户的发送信号。 $n_{c,j}$ 是加性高斯白噪声。小区内干扰可以通过 BD 编码消除, 下面, 研究如何降低小区内干扰的影响。为了便于分析和理解, 仅考虑 2 个小区、每个小区 2 个用户的情况。

1.3.1 动态小区划分

每个小区都包括干扰区和非干扰区。用户的分布可以分为 2 种情况: 第一种情况是所有用户都处于非干扰区; 第二种情况是至少有一个用户处于干扰区。当所有用户都处于非干扰区时, 没有小区内干扰, 为了提供更好的通信质量, 这时对每个小区分别进行 BD 编码。当有用户处于干扰区时, 为了不受小区内干扰的影响, 将 2 个小区合并为一个小区, 对所有用户进行联合 BD 编码。

1.3.2 PDS 消除小区内干扰

在单用户 MIMO 系统中, 基于孔的角度分集接收机, 由于其很强的方向性, 可以提供相关性很低的信道矩阵。一个 RE 的归一化信道增益与信号方向的关系如图 4 所示。这类似于射频系统中描述天线方向性的天线模式图, 原点到图上每一点的距离表示这个方向到达 PD 的归一化光功率强度。可以看出, 每个 RE 都有较小的视场角, 只能接收到特定方向的光。每个小区内用户受到的小区间干扰都是来自特定方向

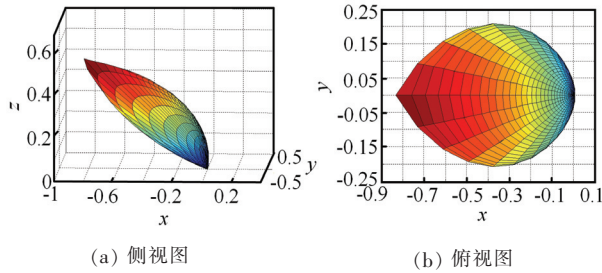


图4 归一化信道增益与信号方向的关系

的,因此,可以利用接收机中每个 RE 很强的方向性来消除小区间干扰。用 PDS 消除小区间干扰的步骤如下:

①对每个用户选出没有小区间干扰的 PD 集合 Z_p ,其中包含 $Z_{r,j}$ 个 PD,应满足 $M_r \geq Z_{r,j} \geq N_{r,j}$,并且 $Z_p \in \Omega_p$ 。

②根据 1.2 节中的 MMSV-PDS 方法,在集合 Z_p 中选出满足 MMSV 条件的 PD 集合 n_p ,这就是相应的用户要激活的 PD 集合,最终得到一个没有小区间干扰的满秩信道矩阵。

2 仿真结果及分析

本文考虑的多小区 VLC 系统几何示意图如图 5 所示。除其它说明外,房间、LED 和接收机的参数如表 1 所示。本文考虑以下用户位置的场景:用户 1(-4,-1,0)、用户 2(-3,1,0)和用户 3(2,0,0);用户 1 和用户 2 位于第 1 个小区,用户 3 和用户 4 位于第 2 个小区,用户 4 在第 2 个小区中移动。

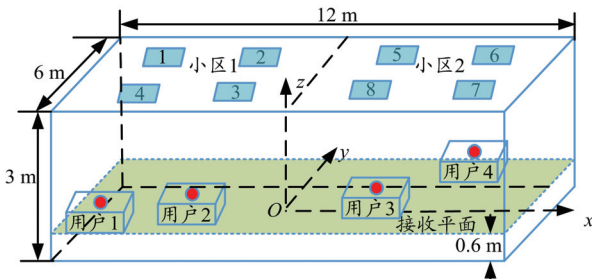


图5 多小区多用户 MIMO-VLC 系统几何示意图

2.1 干扰区的优化

干扰区的范围会对小区的划分以及系统性能产生直接的影响。为了服务尽可能多的用户,要求每个 LED 将本小区完全覆盖,计算出 LED 所需的最小半功率角为 69° ,此时的干扰区如图 6(a)中阴影所示。可以看出,干扰区的面积很大,超过整个小区面积的 $2/3$,这种情况是不希望看到的。文献[12]利用倾斜 LED 降低空间相关性,本文可以通过倾斜 LED 来减小干扰区

表 1 系统模型参数表

参数名称	参数值
房间尺寸	12 m×6 m×3 m
LED 坐标	(-4,1.5,2.4), (-2,1.5,2.4), (-2,-1.5,2.4), (-4,-1.5,2.4), (2,1.5,2.4), (4,1.5,2.4), (4,-1.5,2.4), (2,-1.5,2.4)
LED 带宽	20 MHz
PD 响应度	0.54 A/W
PD 视场角	90°
接收单元个数	9 个
PD 面积	1 cm^2
孔的半径 R_A	$1/\sqrt{\pi} \text{ cm}$
PD 半径	$1/\sqrt{\pi} \text{ cm}$
孔距接收平面高度	$1/\sqrt{\pi} \text{ cm}$
孔和 PD 的径向距离	$1.6R_A$ (第 9 个 PD 为 0)
调制方式	ACO-OFDM
调制阶数	4 阶
子载波数	256 个

的面积。首先,给定每个 LED 的视场角为 60° ;然后,方位角和倾斜角的选择准则为:使每个 LED 的光照范围与小区交界处上顶点(0,3)和下顶点(0,-3)的距离之和最小。选择的 LED 参数如表 2 所示,此时的干扰区如图 6(b)所示。可以看出,干扰区的面积约为整个小

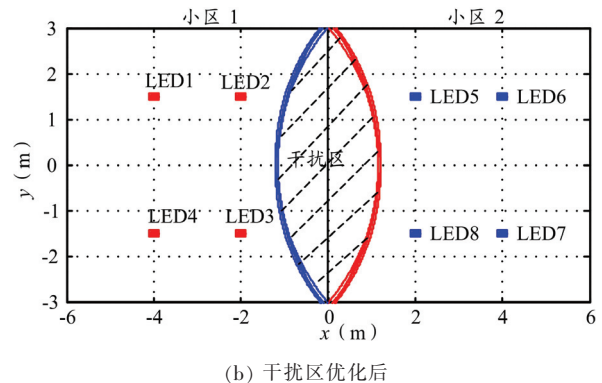
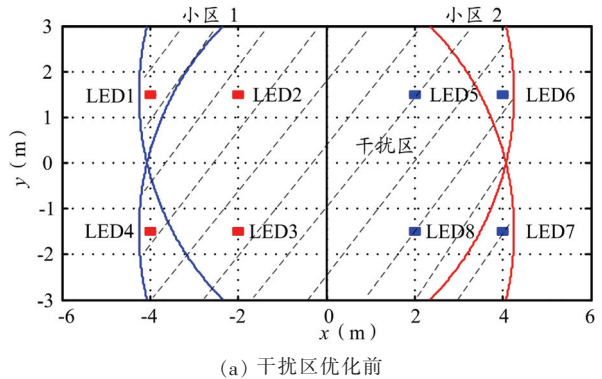


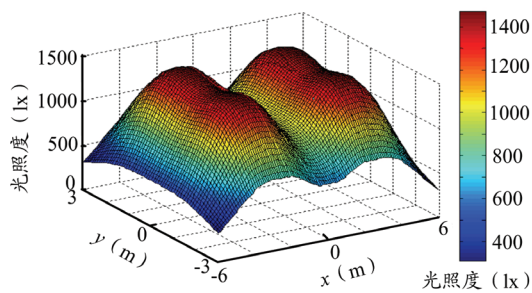
图6 干扰区范围示意图

表 2 LED 配置参数

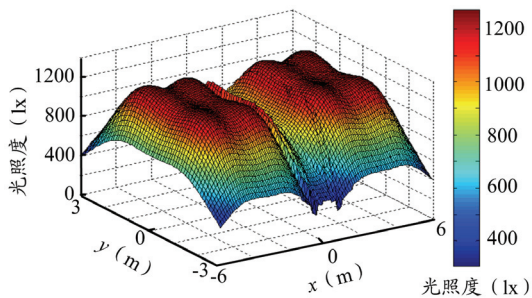
LED 序号	视场角	倾斜角	方位角
1	60°	9°	298°
2	60°	13°	228°
3	60°	13°	131°
4	60°	9°	62°
5	60°	13°	311°
6	60°	9°	242°
7	60°	9°	118°
8	60°	13°	336°

区面积的 $1/6$, 使得用户在大多数情况下都可以处于非干扰区。

LED 倾斜前后接收平面的光照度分布如图 7 所示。国际标准化组织规定, 办公的光照度应该在 $300 \sim 1500$ lx 之间^[2]。LED 倾斜前的光照度分布如图 7 (a) 所示, 其中最小光照度为 310 lx, 最大的光照度为 1472 lx; LED 倾斜后的光照度分布如图 7 (b) 所示, 其中最小光照度为 306 lx, 最大的光照度为 1272 lx。可以看出, LED 倾斜前后都可以满足办公光照度要求, 虽然 LED 倾斜后的最大光照度有所减小, 但是在整个小区范围内, 其光照度分布更加均匀。



(a) LED 倾斜前



(b) LED 倾斜后

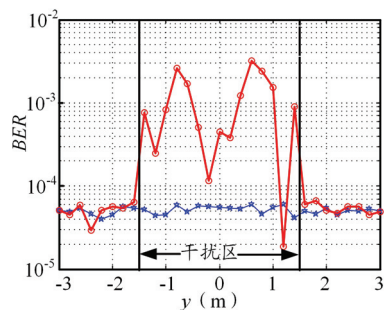
图 7 光照度分布图

2.2 BER 性能分析

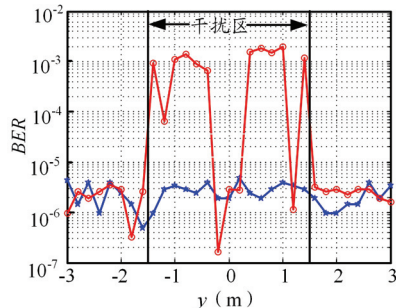
图 8 展示了干扰区优化后 4 个用户在信噪比为 130 dB 时的 BER 性能 (图中蓝线表示 PDS 消除小区间干扰, 红线表示动态小区划分)。用户 4 在 $x=1$ 的直线上移动, 当 $-1.5 < y < 1.5$ 时, 用户 4 处于干扰区。可以看出, 当用户 4 位于干扰区时, 对于第 1 个小区中的用户 1 和用户 2, 除个别点外, PDS 消除小区间干扰方法优于动态小区划分方法, 而对于第 2 个小区中的用

户 3 和用户 4, 动态小区划分方法优于 PDS 消除小区间干扰方法。其原因是: ①对于 PDS 消除小区间干扰的方法, 用户 4 可以激活的 PD 受到了限制, 在 MMSV 准则的约束下, 用户 3 要激活的 PD 也会受到影响, 从而导致第 2 个小区中用户的性能较差。而第 1 个小区中的用户由于都处于非干扰区, 可以激活最佳的 PD 组合, 从而拥有良好的性能。②对于动态小区划分方法, 对 4 个用户进行联合 BD 编码, 用户 3 和用户 4 可以更灵活地激活 PD, 但是会对用户 1 和用户 2 要激活的 PD 产生影响。所以, 用户 3 和用户 4 的性能得到改善, 而用户 1 和用户 2 的性能会随着用户 4 位置的变化产生较大波动。当用户 4 处于非干扰区时, 动态小区划分方法对 2 个小区分别进行 BD 编码, 这种情况下, 2 种方法激活的 PD 组合相同, 有相同的 BER 性能。

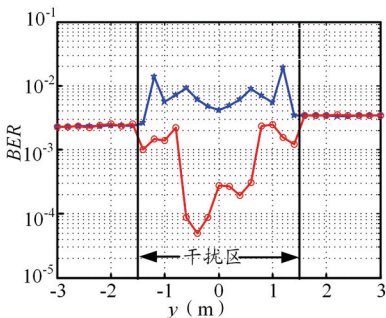
当信噪比为 131 dB 时, 用户 4 在整个小区中的 BER 等高线图如图 9 所示。可以看出, 低的 BER 分布在靠近中心的区域, 高的 BER 分布在边缘及角落。当



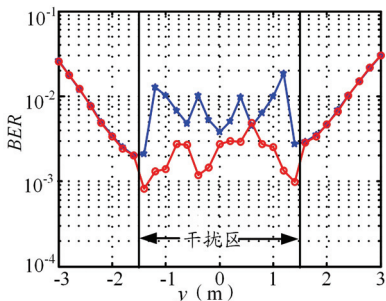
(a) 用户 1



(b) 用户 2

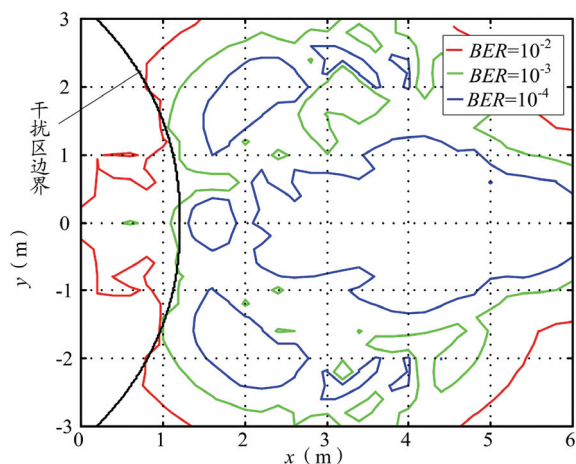


(c) 用户 3

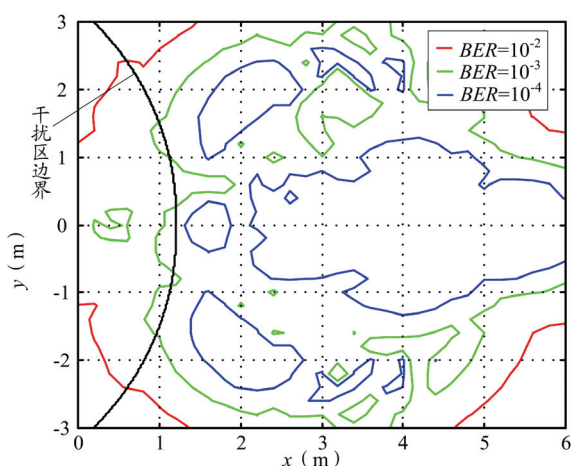


(d) 用户 4

图 8 4 个用户的 BER 曲线



(a) 动态小区划分



(b) PDS 消除小区间干扰

图9 2种方法下用户4的BER分布曲线

用户4在干扰区时,动态小区划分方法低BER(比如 $BER < 10^{-2}$)所占的面积更大,表现出了较好的性能,但它的计算复杂度更高。因为动态小区划分方法要综合考虑4个用户,而PDS消除小区间干扰方法单独考虑每个小区中的2个用户,因此,动态小区划分方法的高性能是以计算复杂度为代价的。当用户4处于非干扰区时,2种方法有相同的BER性能。

3 结束语

本文将基于孔的角度分集接收机应用于多小区多用户MIMO-VLC系统,为了降低小区间干扰的影响,通过改变LED的配置,优化了干扰区面积。在此基础上,研究了2种多用户小区实现方案。仿真结果表明:这2种方案都能够有效地降低小区间干扰的影响。当小区中有用户处于干扰区时,相比于PDS消除

小区间干扰的方法,动态小区划分方法的BER性能更优,但是这个小区中用户的位置会对其它小区用户性能产生影响。对于PDS消除小区间干扰的方法,一个小区中用户的BER性能不受其它小区用户位置的影响,并且其计算复杂度较低。当用户都处于非干扰区时,2种方法的BER性能相同。

参考文献:

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, WAN C W, et al. What Will 5G Be [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065–1082.
- [2] MITRA R, BHATIA V. Precoding technique for ill-conditioned massive mimo-vlc system [C]// 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), June 3–6, 2018, Portugal, Porto. Piscataway: IEEE, 2018: 1–5.
- [3] BURTON A, MINH H L, GHASSEMLOOY Z, et al. Experimental Demonstration of 50 Mb/s Visible Light Communications Using 4×4 MIMO [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(9): 945–948.
- [4] CAI K, JIANG M. Multi-user MIMO-OFDM Imaging VLC system with pd selection[C]// 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 15–18, 2016, Nanjing, China. Piscataway: IEEE, 2016: 1–5.
- [5] WANG T Q, GREEN R J, ARMSTRONG J. MIMO Optical Wireless Communications Using ACO-OFDM and a Prism-Array Receiver[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(9): 1959–1971.
- [6] WANG T Q, HE C W, ARMSTRONG J. Performance Analysis of Aperture-Based Receivers for MIMO IM/DD Visible Light Communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(9): 1513–1523.
- [7] PHAM T V, MINH H L, PHAM A T. Multi-cell vlc: multi-user downlink capacity with coordinated precoding[C]// 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops, May 21–25, 2017, Paris, France. Piscataway: IEEE, 2017: 469–474.
- [8] 王敏, 王杰令, 周斌, 等. 多用户 MIMO 系统中连续块对角化预编码算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2017, 54(6): 1190–1194.
- [9] PHAM T V, PHAM A T. Cooperation strategies and optimal precoding design for multi-User Multi-cell VLC networks [C]// GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, December 4–8, 2017, Singapore, Singapore. Piscataway: IEEE, 2017: 1–6.
- [10] CHEN R H, HEATH R W, ANDREWS J G. Transmit Selection Diversity for Unitary Precoded Multiuser Spatial Multiplexing Systems With Linear Receivers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(3): 1159–1171.
- [11] HEATH R W, SANDHU S, PAULRAJ A. Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers [J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(4): 142–144.
- [12] RUOWEN B, RUI J, TAN J D, et al. Performance comparison of vlc mimo techniques considering indoor illuminance with inclined leds [C]// 2016 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE), September 26–28, 2016, Germany, Aachen. Piscataway: IEEE, 2016: 105–110.