

doi:10.13756/j.gtxyj.2020.01.012

无线通信技术

基于棱镜阵列接收机的多小区可见光系统研究

赵政铎, 岳殿武, 刘建开, 肖佳琳

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:可见光通信具有环保、安全和能耗低等优点,是第 5 代移动通信的一个强有力补充。针对多小区多用户多输入多输出可见光通信系统中小区间干扰的问题,文章提出使用基于棱镜阵列的非成像接收机作为接收设备,并讨论了两多小区划分方案来降低小区间干扰的影响,第 1 种是动态小区,第 2 种是非动态小区。仿真结果表明,经过光电探测器选择后,这两种方案都能有效地消除小区间干扰的影响。当用户处于干扰区时,动态小区方案的误比特率(BER)性能更优,但是其计算复杂度较高。当用户都处于非干扰区时,这两种方案的 BER 性能相同。

关键词:可见光通信;多输入多输出;多小区;多用户;棱镜阵列;光电探测器选择

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2020)01-0066-07

Research on Multi-cell Visible Light System based on Prism Array Receiver

ZHAO Zheng-duo, YUE Dian-wu, LIU Jian-kai, XIAO Jia-lin

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

Abstract: Visible Light Communication (VLC) with environmental protection, safety and low energy consumption is a powerful complement to the 5th generation mobile communication. Aiming at the problem of inter-cell interference in multi-cell multi-user Multiple Input Multiple Output VLC (MIMO-VLC) system, a non-imaging receiver based on prism array is used as the receiving device, and two multi-cell division schemes are proposed to reduce inter-cell interference. The first is a dynamic cell and the second is a non-dynamic cell. The simulation results show that after the Photodetector Selection (PDS), both schemes can effectively eliminate the influence of inter-cell interference. When the user is in the interference zone, the dynamic cell scheme has better Bit Error Rate (BER) performance at the cost of higher computational complexity. The BER performance of the two schemes is similar when the users are in the non-interference zone.

Key words: VLC; MIMO; multi-cell; multi-user; prism array; PDS

0 引 言

随着现代通信技术的迅速发展,便携式通信终端的数量和对无线通信网络接入的需求都在急剧增加^[1]。无线射频(Radio Frequency, RF)网络由于频谱资源有限,无法满足日益增长的通信速率需求^[2]。利用商用发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的可见光通信(Visible Light Communication, VLC)凭借其优势,被认为是下一代无线通信网络的一个强大替代或补充技术^[3]。VLC 具有更低的能量消耗和更高的安全性^[4]。与传统的 RF 通信不同的是, VLC 通过 LED 发出的高速明暗闪烁信号来传输信息,可以应用于禁止电磁信号的领域,如医院、工业和航天应用。

由于 LED 的调制带宽有限,面临着低数据速率传输的问题。为此,在 VLC 系统中通过多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)利用空间复用来提高数据速率^[5]。由于强度调制/直

接检测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)信道不能提供丰富的散射环境, MIMO 在 VLC 中的应用面临着一定的挑战。文献[6]通过使用光电探测器选择(Photodetector Selection, PDS)的成像接收机,降低了信道相关性。许多重要的 VLC 应用都需要体积小的接收设备,由于成像接收机体积大、成本高,很难集成,因而不是一个好的选择^[7]。在单用户 MIMO 系统下,文献[8]提出了基于棱镜阵列的非成像接收机。这种接收机一方面能够在紧凑的结构下提供良好的性能;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。类似于蜂窝移动网络,使用大量的 LED 阵列可以形成多小区 VLC 系统^[9]。在这样的多小区系统中,用户接收的信号可能受小区间干扰和小区内部干扰的影响。块对角化(Block Diagonalization, BD)预编码方法常用来抑制多用户干扰^[10]。文献[11]研究了多小区多用户多输入单输出(Multi-Input Single-Output, MISO)系统,通过多种小区协作策

收稿日期:2018-06-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61801074);大连海事大学研究生教育教学改革研究基金资助项目(YJG2019205)

作者简介:赵政铎(1994—),男,辽宁大连人。硕士,主要研究方向为可见光通信。

通信作者:岳殿武,教授。E-mail: dwyue@dlmu.edu.cn

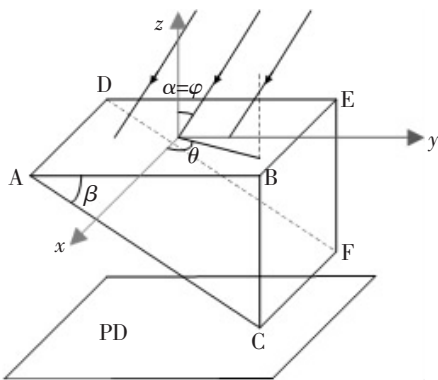
略最大化了用户的和速率。

鉴于此,本文研究了多小区多用户 MIMO-VLC 系统,并将基于棱镜阵列的非成像接收机与空间分离接收机进行了性能比较。结果表明,基于棱镜阵列的非成像接收机能够实现更优的可靠性能。通过改变 LED 的配置,减少了干扰区的面积。在此基础上,讨论了两种多小区实现方案:第 1 种是动态小区划分,第 2 种是非动态小区划分。经过 PDS 后,两种方案都能有效消除小区间干扰。最后仿真验证了所提方法的有效性。

1 多小区 VLC 系统模型

1.1 信道模型

在 VLC 室内系统中,有两种主要的链路模型:视距(Line of Sight, LOS)和非视距(Non-Line of Sight, N-LOS)。本文只考虑 LOS 链路,因为其在接收端的接收功率超过总功率的 95%^[8]。将 LED 看做是一个朗伯体光源,基于棱镜阵列的非成像接收机有较大的视场角,能够在小区的任意位置接收到信号,并且每个接收单元有很强的方向性,只能接收到来自特定方向的光。图 1 所示^[8]为一个接收单元,它包含一个棱镜和一个光电二极管(Photo-Diode, PD)。光的方向用 (φ, α) 表示, φ 和 α 分别为入



注: θ 为方位角; β 为上表面和倾斜面的夹角。

图 1 一个接收单元

射角和极角。由于 LED 与接收机之间的距离远大于接收机的尺寸,假设到达接收机的光线都是平行的。棱镜的上表面 ABED 垂直于不透明的侧面 ABC、BEFC 和 DEF,面 ABED 和面 ACFD 的夹角为 β 。假设侧面完全吸收入射到其表面的光,因此,没有光可以通过这些表面,也没有光从这些表面反射回棱镜。所以,只有从棱镜的顶面和斜面经过两次折射的光到达 PD,并假设 PD 能够收集所有从斜面折射出来的光。从棱镜顶面到 PD 的光功率损

失,是由上表面和倾斜表面的反射以及侧面的吸收引起的。基于棱镜阵列的接收机将每一个接收单元的上表面放置在同一平面上,图 2 所示为带有 N_R 个接收单元的接收机的俯视图。

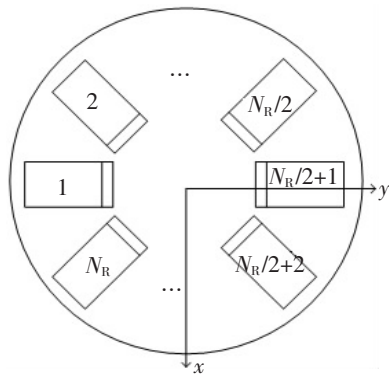


图 2 接收机俯视图

设表面 ABED 的入射角、表面 ABED 的折射角、表面 ACFD 的入射角和表面 ACFD 的折射角分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 。信道增益 H 可以表示为

$$H = \frac{1}{2\pi d^2}(m+1)S_u \cos^m(\psi) \cos(\varphi) \times$$

$$T_{\text{air-lens}}(\alpha_1, \alpha_2) T_{\text{lens-air}}(\alpha_3, \alpha_4), \quad (1)$$

式中: d 为 LED 到接收机的距离; m 为发光方向性的模式参数, $m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})}$, $\Phi_{1/2}$ 为 LED 的半功率角; S_0 为上表面 ABED 的有效接收面积; ψ 为 LED 的出射角; φ 为上表面 ABED 的入射角; $T_{\text{air-len s}}(\alpha_1, \alpha_2)$ 为表面 ABED 折射的光功率与入射的光功率之比; $T_{\text{len s-air}}(\alpha_3, \alpha_4)$ 为表面 ACFD 折射的光功率与入射的光功率之比。

1.2 多小区多用户 MIMO VLC 系统

在多小区多用户 VLC 系统中,每个小区包含 N_i 个 LED 发射机和 k 个用户设备 (User Equipment, UE)。第 j 个 UE 包含 $M_{r,j}$ 个 PD, PD

的总数为 $M_r = \sum_{j=1}^{j=K} M_{r,j}$, 同一时间, 第 j 个 UE 只有 $N_{r,j}$ 个 PD 被激活, 因此被激活的 PD 总数 $N_r = \sum_{j=1}^{j=K} N_{r,j}$ 。要求每个 LED 都能够完全覆盖本小区, 由于 LED 照明范围的重叠, 小区交界处会出现干扰区影响通信性能。可以通过设置适当的参数以及倾斜 LED 来减小干扰区面积。

对于第 c 个小区的第 j 个用户而言,其接收到的信号可以表示为

$$y_{c,j} = R(\underbrace{\mathbf{H}_{c,j} \mathbf{P}_{c,j} x_{c,j}}_{\text{小区内干扰}} + \underbrace{\mathbf{H}_{c,j} \sum_{i \in u_c, i \neq j} \mathbf{P}_{c,i} x_{c,i}}_{\text{小区间干扰}} + \mathbf{H}_{c,j} \sum_{i \in u_c, i \neq j} \mathbf{P}_{c,i} x_{c,i}) + n_{c,j}, \quad (2)$$

式中: u_c 为 c 小区用户的集合; u_c 为其他小区用户的集合; $\mathbf{H}_{c,j}$ 为 c 小区内 LED 到第 j 个用户的信道矩阵; $\mathbf{H}_{c,j}$ 为其他小区内 LED 到 c 小区第 j 个用户的信道矩阵; $\mathbf{P}_{c,j}$ 为 c 小区第 j 个用户的编码矩阵; $\mathbf{P}_{c,i} (i \neq j)$ 为 c 小区其他用户的编码矩阵; $\mathbf{P}_{c,i}$ 为其他小区用户的编码矩阵; $x_{c,j}$ 为发送给 c 小区第 j 个用户的信号; $x_{c,i} (i \neq j)$ 为发送给 c 小区其他用户的信号; $x_{c,i}$ 为发送给其他小区用户的信号; $n_{c,j}$ 为加性高斯白噪声。

为了便于分析,仅考虑两个小区,每个小区内两个用户的情况。用户分布可以分成两种情况:(1)所有用户都位于非干扰区,不需考虑式(2)中小区间干扰的影响;(2)有用户位于干扰区,要综合考虑小区内部和小区间干扰的影响。

1.2.1 动态小区

当用户都处于非干扰区时,对每个小区中的用户分别进行 BD 编码。当有用户处于干扰区时,将两个小区合并为一个小区,对所有用户进行联合 BD 编码。

块对角化预编码器(Block Diagonalization Pre-coder, BDP)的处理过程简介如下^[10]:对于 c 小区中的用户 j ,当用户都处于非干扰区时,我们定义其干扰矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_j = [\mathbf{H}_{c,1}^H, \dots, \mathbf{H}_{c,j-1}^H, \mathbf{H}_{c,j+1}^H, \dots, \mathbf{H}_{c,K}^H]^H$, 式中, K 为该小区的用户数量。当有用户位于干扰区时,其干扰矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_j = [\mathbf{H}_{c,1}^H, \dots, \mathbf{H}_{c,j-1}^H, \mathbf{H}_{c,j+1}^H, \dots, \mathbf{H}_{c,K}^H, \mathbf{H}_{c,1}^H, \dots, \mathbf{H}_{c,K}^H]^H$ 。对 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 进行奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)得到 $\tilde{\mathbf{H}}_j = \tilde{\mathbf{U}}_j \tilde{\mathbf{\Lambda}}_j [\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)} | \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}]^H$, 式中: $\tilde{\mathbf{U}}_j$ 为左奇异向量矩阵; $[\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)} | \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}]$ 为右奇异向量矩阵, $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)}$ 由非零奇异值对应的右奇异向量构成, $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ 为 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 的正交零空间矩阵,对其进行 SVD 分解,可得到 $\tilde{\mathbf{H}}_j = \mathbf{H}_{c,j} \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}_j \mathbf{\Lambda}_j \mathbf{V}_j^{(1)H}$; $\mathbf{\Lambda}_j$ 为大小为 $N_{r,j} \times N_{r,j}$ 的奇异值对角化矩阵; $\mathbf{U}_j$ 为大小为 $N_{r,j} \times N_{r,j}$ 的解码矩阵; $\mathbf{V}_j^{(1)}$ 为大小为 $N_{r,j} \times N_{r,j}$ 右奇异值矩阵。最终,可以得到第 j 个用户的预编码矩阵 $\mathbf{P}_j = [\mathbf{p}_{1,j}^T, \dots, \mathbf{p}_{N_t,j}^T]^T = \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} \mathbf{V}_j^{(1)}$ 。

当用户相距较近时,信道矩阵可能不满秩,从而导致通信质量很差,可以使用 PDS 技术解决这一问题。在 PDS 方法中,人们常使用最大最小奇异值(Maximum and Minimum Singular Value, MMSV)准则^[12];文献[13]指出,在空间多路复用系统中,单

用户接收信噪比的下界与等效信道的最小奇异值成正比,多用户系统的最大系统误码率(Bit Error Rate, BER)由性能最差的用户决定。基于以上讨论,我们也使用 MMSV 准则。

MMSV-PDS 方法的步骤如下:

第 1 步:在 BDP 的限制下,创建一个候选的集合 m_p 对应满秩的整体信道矩阵,每个用户包含 $N_{r,j} (j=1, \dots, K)$ 个被激活的 PD。这个候选的集合 m_p 是总的 M_r 个 PD 集合 Ω_p 的一个子集,即 $m_p \in \Omega_p$ 。

第 2 步:对每一个候选子集 m_p ,将 $\mathbf{H}_{j,m_p} \tilde{\mathbf{V}}_{j,m_p}^{(0)}$ ($j=1, \dots, K$) 进行 SVD 得到

$$\mathbf{H}_{j,m_p} \tilde{\mathbf{V}}_{j,m_p}^{(0)} = \mathbf{U}_{j,m_p} \mathbf{\Lambda}_{j,m_p} \mathbf{V}_{j,m_p}^{(1)H}, \quad (3)$$

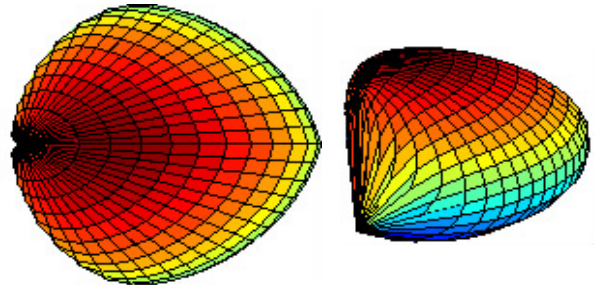
式中, $\mathbf{\Lambda}_{j,m_p}$ 为与 m_p 相关的第 j 个用户的信道矩阵。这样,对于给定的 m_p ,可以得到第 j 个用户的最小奇异值 $\lambda_{j,m_p}^{\min} = \min\{\text{diag}(\mathbf{\Lambda}_{j,m_p})\}$ 。接下来可以得到所有用户的最小奇异值 $\tilde{k}_{m_p}^{\min} = \min_{j=1, \dots, K} \lambda_{j,m_p}^{\min}$ 。

第 3 步:选择 PD 集合 m_p ,使其满足 $m_{p,\text{solution}} = \arg\max_{m_p \in \Omega_p} \{\tilde{k}_{m_p}^{\min}\}$, 这就是最终要激活的 PD 集合。

1.2.2 非动态小区

在这种小区划分方案中,不论用户是否处于干扰区,都将每个小区中的用户分别进行 BD 编码,将来自其他小区的光视为干扰。

基于棱镜阵列的非成像接收机,由于每一个接收单元都有较小的视场角,且有很强的方向性,因此,只能接收到来自特定方向的光。当 β 为 45° 时,与入射光方向相关的归一化信道增益仿真结果如图 3 所示。由于每个小区内用户受到的小区间干扰都是来自特定方向,因此,利用这一特性来消除小区间干扰。



(a) 俯视图 (b) 侧视图

图 3 归一化信道增益

非动态小区消除干扰的步骤如下:

第 1 步:对于每个用户,首先选出没有小区间干

扰的 PD 集合 Z_p , 其中包含 $Z_{r,j} (j=1, \dots, K)$ 个 PD, 满足 $M_r \geq Z_{r,j} \geq N_{r,j}$ 。

第 2 步: 根据 1.2.1 节讨论的 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。

第 3 步: 对每个小区中的用户进行 BD 编码, 消除小区内部干扰。

1.2.3 复杂度分析

在讨论的 MMSV-PDS 方法中, 对于一个候选集合 m_p , 其中包含了 K 个用户。相关的计算复杂度主要取决于 $2K$ 次 SVD 运算和 K 次矩阵乘法运算,

$$\chi_1 = \left(\prod_{j=1}^{j=K} C_{M_{r,j}}^{N_{r,j}} \right) \left[\sum_{j=1}^{j=K} (a_j + b_j + c_j) \right] = \left(\prod_{j=1}^{j=K} C_{M_{r,j}}^{N_{r,j}} \right) \left[\sum_{j=1}^{j=K} (9\tilde{N}_{r,j}^3 + 16\tilde{N}_{r,j}^2 N_t + 16\tilde{N}_{r,j} N_t^2 + 4N_{r,j}^2 N_t + 21N_{r,j}^3) \right], \quad (4)$$

式中: $M_{r,j}$ 为每个 UE 包含的 PD 数量; N_t 为 LED 发射机数目; $N_{r,j}$ 为被激活 PD 的数量。 $\tilde{N}_{r,j} = N_r -$

$$\chi_2 = 2 \left(\prod_{j=1}^{j=K/2} C_{Z_{r,j}}^{N_{r,j}} \right) \left[\sum_{j=1}^{j=K/2} (a_j + b_j + c_j) \right] = 2 \left(\prod_{j=1}^{j=K/2} C_{Z_{r,j}}^{N_{r,j}} \right) \left[\sum_{j=1}^{j=K/2} (9\bar{N}_{r,j}^3 + 8\bar{N}_{r,j}^2 N_t + 4\bar{N}_{r,j} N_t^2 + 2N_{r,j}^2 N_t + 21N_{r,j}^3) \right], \quad (5)$$

式中, $Z_{r,j}$ 为每个 UE 中无小区干扰的 PD 数量。 $\bar{N}_{r,j} = N_r/2 - N_{r,j}$ 。

$$\chi = 2 \left(\prod_{j=1}^{j=K/2} C_{M_{r,j}}^{N_{r,j}} \right) \left[\sum_{j=1}^{j=K/2} (a_j + b_j + c_j) \right] = 2 \left(\prod_{j=1}^{j=K/2} C_{M_{r,j}}^{N_{r,j}} \right) \left[\sum_{j=1}^{j=K/2} (9\hat{N}_{r,j}^3 + 8\hat{N}_{r,j}^2 N_t + 4\hat{N}_{r,j} N_t^2 + 2N_{r,j}^2 N_t + 21N_{r,j}^3) \right], \quad (6)$$

式中, $\hat{N}_{r,j} = N_r/2 - N_{r,j}$ 。

通过上述分析可知, 一个较大的 $C_{M_{r,j}}^{N_{r,j}} (j=1, \dots, K)$ 或用户数 K 会导致计算复杂度迅速增加, 因此, 应该限制这些参数的值来避免过大的实现代价。

2 仿真结果及分析

在这部分, 通过选择合适的 LED 配置对干扰区进行优化。通过仿真分析动态小区划分和非动态小区划分的 BER 性能。所考虑的多小区多用户 VLC 系统如图 4 所示。除其他说明外, 房间、LED 和接收机的参数如表 1 所示。在仿真中, 考虑了以下用户位置的场景:

用户 1: $UT_1 = (-4, 0, 0)$ 、用户 2: $UT_2 = (-3, 1, 0)$ 和用户 3: $UT_3 = (3, 0, 0)$, 用户 1 和用

可以通过每秒浮点运算次数 (Floating Point Operations Per Second, FLOPS) 衡量。根据式 (3), 通过 SVD 运算得到 $\tilde{\mathbf{V}}_{j,m_p}^{(0)}$, 通过矩阵运算得到 $\mathbf{H}_{j,m_p} \tilde{\mathbf{V}}_{j,m_p}^{(0)}$, 通过 SVD 运算得到 $\mathbf{A}_{j,m_p}$, 所需要的 FLOPS 分别表示为 a_j, b_j 和 c_j 。在 VLC 系统中, 上述提到的操作都是在实矩阵上进行的, 一个 $A \times B$ 的实矩阵乘以一个 $B \times C$ 的实矩阵, 需要 $2ABC$ 次 FLOPS。对一个 $A \times B$ 的矩阵进行 SVD 操作, 如果只考虑乘法运算, 忽略加法运算, 大约需要 $(9A^3 + 8A^2B + 4AB^2)$ 次 FLOPS^[14]。

当有用户处于干扰区时, 对于动态小区划分方案, 其计算复杂度可以为

$N_{r,j}$ 。对于非动态小区划分方案, 其计算复杂度可以表示为

当用户都处于非干扰区时, 两种小区划分方法的计算复杂度相同, 可以表示为

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。

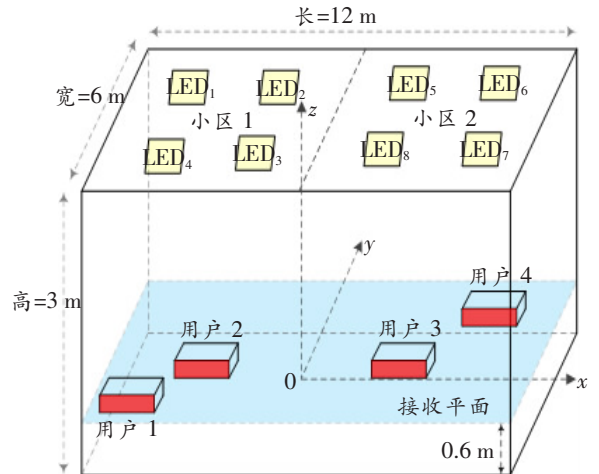


图 4 VLC 系统的几何示意图

表 1 多小区多用户 VLC 系统参数

参 数	值
房间尺寸(长×宽×高)	12 m×6 m×3 m
LED 个数	8
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/ MHzz	20
LED 转换系数/W/A	0.44
PD 响应度/A/W	0.54
PD 视场角/°	90
PD 面积/cm²	1
棱镜的长/cm	1
棱镜的宽/cm	1
夹角 β/°	40
调制方式	非对称性限幅光正交频分复用
调制阶数	4
子载波数	256

2.1 干扰区优化

由 1.2 节的分析可知,干扰区面积的大小会对系统的性能产生很大的影响。图 5 所示为干扰区范围示意图,当 LED 垂直向下放置时,计算出 LED 所需的最小半功率角为 69°,如图 5(a)中阴影所示,干扰区的面积超过了整个小区面积的 2/3。通过选择

合适的 LED 半功率角,并倾斜 LED,来减小干扰区的面积,LED 的参数如表 2 所示。如图 5(b)所示,干扰区的面积约为整个小区面积的 1/6,用户在大多数情况下都处于非干扰区。

表 2 LED 配置参数

LED 序号	视场角 $\psi_{1/2}/^\circ$	倾斜角 $\delta/^\circ$	方位角 $\alpha_{n_i}/^\circ$
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

2.2 BER 性能分析

首先,仿真了不同接收机下两种小区划分的 BER 曲线,如图 6 所示。用户 4 位于(1.0,0.5,0),LED 半功率角为 69°,垂直向下放置。图 6(a)中使

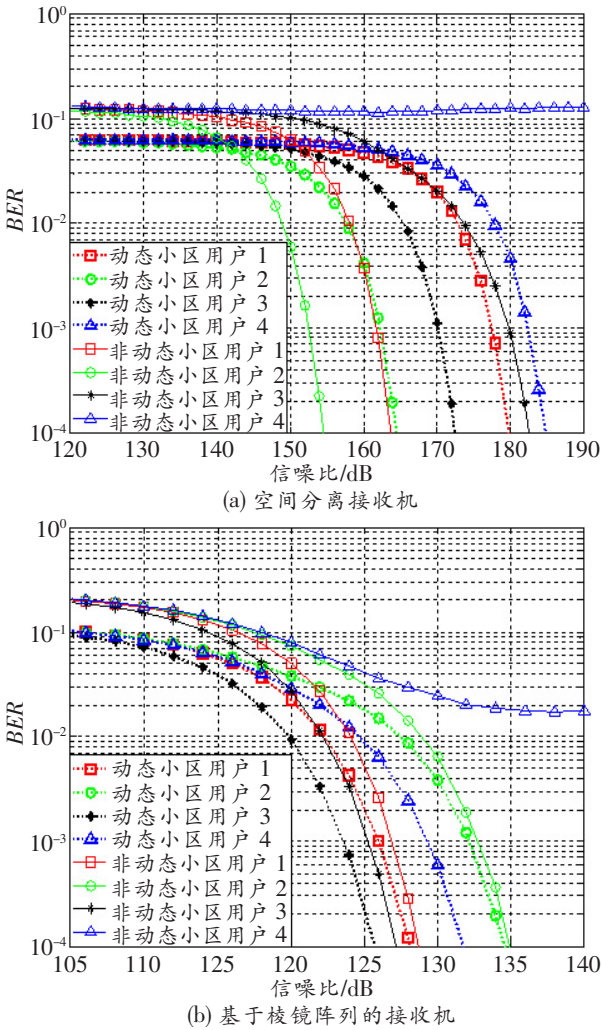


图 6 不同接收机下两种小区划分的 BER 曲线

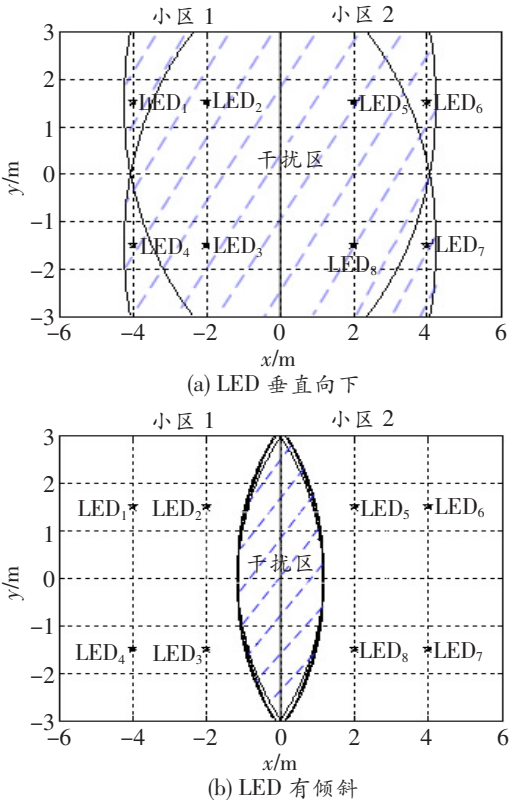


图 5 干扰区范围示意图

用空间分离接收机,PD 数量为 2,间距为 3 cm。图 6(b)中使用基于棱镜阵列的非成像接收机,接收单元数量为 2。由图 6(a)可知,相比于动态小区划分方法,非动态小区中用户 1 和用户 2 的 BER 性能更优,但是用户 4 无法满足通信需求。由图 6(b)可知,两种方法下用户的 BER 性能有一个明显的提升,但是对于非动态小区划分中的用户 4,仍然会受到很强的小区间干扰,同样无法满足通信需求。综合以上两种情况,动态小区划分方法可以有效地消除小区间干扰的影响,同时,基于棱镜阵列的非成像接收机能显著降低信道相关性,提供更优的 BER 性能。

接下来,在使用基于棱镜阵列的非成像接收机的情况下,仿真了不同小区划分方法下的 BER 曲线,如图 7 所示。用户 4 位于(1.0,0.5,0),LED 半功率角为 69° ,垂直向下放置。实线使用的接收机

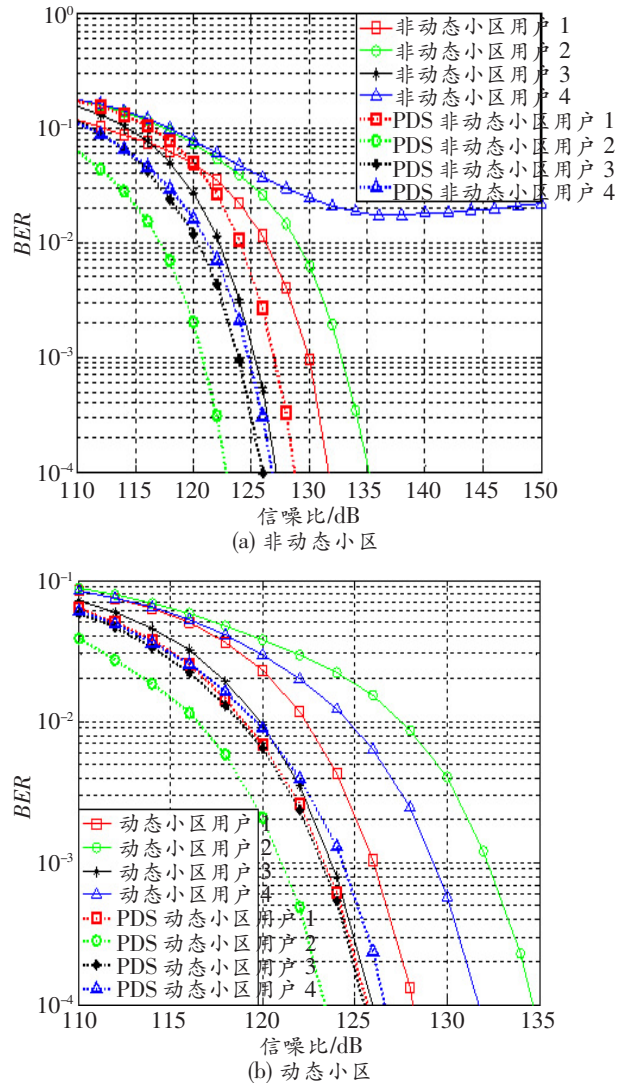


图 7 不同小区划分方法下的 BER 曲线

有两个接收单元,虚线使用的接收机有 8 个接收单元。由图 7(a)可知,使用 PDS 方法后,每个用户的 BER 性能都有不同程度的提高,尤其对于用户 4,成功地消除了小区间干扰的影响,使其能够满足正常的通信需求。由图 7(b)可知,通过使用 PDS 方法,明显地提高了系统的 BER 性能。

在对干扰区进行优化后,图 8 所示为信噪比为 125 dB 时,两种方案下用户 4 的 BER 随接收位置变化的等高线图。位于干扰区时,非动态小区中用户 4 的 BER 性能差,由于其可激活的 PD 受到了限制。动态小区中用户 4 的 BER 性能更优,但它的计算复杂度更高。因为,动态小区联合 BD 编码要综合考虑 4 个用户,而非动态小区单独考虑每个小区中的用户,当每个用户可选择的 PD 个数一定时,MMSV 方法选择激活 PD 组合的计算复杂度与用户数呈指数增长。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。在非干扰区时,两种方案的 BER 性能相同。

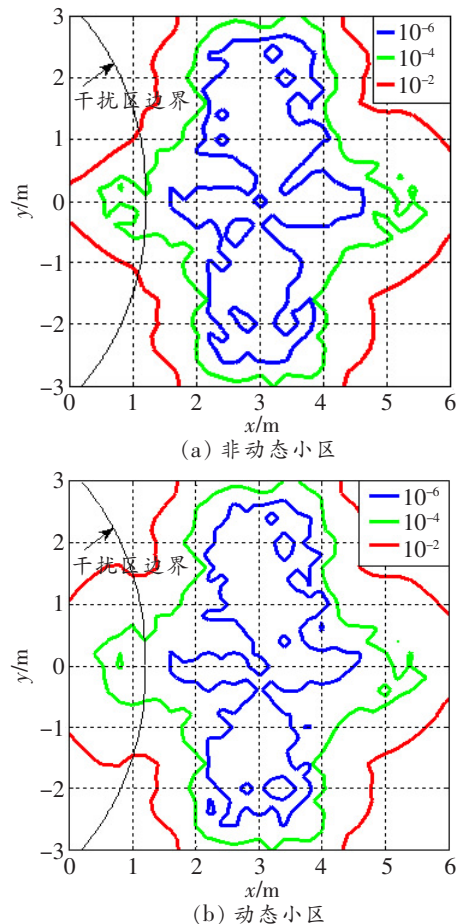


图 8 两种方案下用户 4 的 BER 随接收位置变化的等高线图

3 结束语

本文将基于棱镜阵列的非成像接收机应用于多小区多用户 MIMO VLC 系统。首先,将基于棱镜阵列的非成像接收机与空间分离接收机进行了比较,仿真结果表明,基于棱镜阵列的非成像接收机能够提供一个相关性很低的信道,实现更优的系统性能;接下来,使用 PDS 方法,成功地消除了非动态小区中小区间干扰的影响,对于动态小区,使用 PDS 方法能够显著地提高系统的性能;最后,通过改变 LED 的配置,优化了干扰区的面积。在此基础上,研究两种多小区方案的 BER 性能。仿真结果表明,在使用 PDS 方法后,两种方案都能够有效地消除小区间干扰的影响。当用户处于干扰区时,动态小区体现出了更优的 BER 性能,但其计算复杂度高。当用户都处于非干扰区时,两种方案的 BER 性能相同。

参考文献:

- [1] Na Z, Wang Y, Xiong M, et al. Modeling and Throughput Analysis of an ADO-OFDM based Relay-Assisted VLC System for 5G Networks[J]. IEEE Access, 2019, 6(10): 17586—17594.
- [2] Kazemi H, Safari M, Haas H. A Wireless Backhaul Solution Using Visible Light Communication for Indoor Li-Fi Attocell Networks[C]//ICC 2017. Paris, France;IEEE, 2017:1—7.
- [3] Eroglu Y S, Yapici Y, Guvenc I. Effect of Random Vertical or Rotation for Mobile Users in Visible Light Communication[C]//Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers 2017. Pacific Grove, CA, USA;IEEE, 2017:238—242.
- [4] Yin L, Haas H. Coverage Analysis of Multiuser Visible Light Communication Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(3): 1630—1643.
- [5] Ying K, Qian H, Baxley R J, et al. MIMO Transceiver Design in Dynamic-Range-Limited VLC Systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22):2593—2596.
- [6] Cai K, Jiang M. Multi-User MIMO-OFDM Imaging VLC System with PD Selection [C]//VTC Spring 2016. Nanjing, China;IEEE, 2016:1—5.
- [7] Wang T Q, He C, 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.
- [8] 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.
- [9] Pham T V, Minh H L, Pham A T. Multi-cell VLC: Multi-user Downlink Capacity with Coordinated Precoding [C]//ICC 2017, Paris, France;IEEE, 2017: 469—474.
- [10] Yao R, Nan H, Xu J, et al. Optimal BD-ZF Precoder for Multi-User MIMO Downlink Transmission[J]. Electronics Letters, 2015, 51(14):1121—1123.
- [11] Pham T V, Phama A T. Coordination /Cooperation Strategies and Optimal Zero-Forcing Precoding Design for Multi-User Multi-Cell VLC Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019:67(6):4240—4251.
- [12] Chen R, 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.
- [13] 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.
- [14] Li W, Latva M. An Efficient Channel Block Diagonalization Method for Generalized Zero Forcing Assisted MIMO Broadcasting Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(3):739—744.