

◆ 计算科学 ◆

基于 Raptor 编码的多输入多输出光通信系统设计*

郝兵^{1**}, 吴迪², 萧威³

(1. 河套学院数学与计算机系, 内蒙古巴彦淖尔 015000; 2. 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150001;
3. 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 为了提高可见光通信(Visible Light Communication, VLC)系统的复用增益, 本文提出一种基于多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)的固定比例像素化 VLC 系统。系统首先执行空间-角度映射, 使数据的传送可在角域中进行; 同时利用 Raptor 编码方法来跟踪由于窗口截断而引起的数据信道特性变化; 然后对于使用高速相机捕捉到的一系列时变图像, 利用散景效应获得所有链路距离上的固定比例图像。实验利用液晶显示器和高速相机, 对所提出的 VLC 系统进行了验证。与传统的像素化 MIMO 系统相比, 本文所提出的系统在未对准朝向的情境下具有更高的鲁棒性, 从而在多路复用场景有着广泛的应用前景。

关键词: 多输入多输出; 可见光通信; Raptor 编码; 空间-角度映射; 固定比例

中图分类号: TN929 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2024)01-0119-07

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20240417.012

不同于长距离的电子无线通信^[1], 短距离的可见光通信(Visible Light Communication, VLC)主要利用发光二极管(Light Emitting Diode, LED)照明设施来提供宽带通信链路^[2], 并且 VLC 发射器可来自各种 LED 照明灯。由于 LED 通常很少针对通信应用进行优化且调制带宽通常被限制到很低^[3], 因此通信领域目前大多采用多个 LED 发射器和多个像素化接收器。

在无线光通信系统领域中, 有关多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统的研

究较多。张颖等^[4]提出了一个预编码和短距离像素化 MIMO VLC 系统, 该系统应用空间离散多频(Spatial Discrete Multiple Frequency, SDMF)^[5]来实现空间复用增益且不需要精确的空间对准, 但为了避免混淆现象需要获得信道知识以调整放大倍数。Narmanlioglu 等^[6]研究了渐晕对 SDMF 的影响, 比较了非对称削波 SDMF 和交流偏压 SDMF 的使用, 表征了在透视失真、视角变化和模糊的情况下的多路复用和分集增益。

此外, 研究人员提出了像素化链路之外的 MI-

收稿日期: 2021-12-12

修回日期: 2022-01-07

* 国家自然科学基金项目(61702008)和内蒙古自治区教育厅科技项目(NJZC17379)资助。

【第一作者简介】

郝兵(1976—), 男, 副教授, 主要从事传感器应用和可见光通信等研究, E-mail: bing2000119@163.com。

【**通信作者】

【引用本文】

郝兵, 吴迪, 萧威. 基于 Raptor 编码的多输入多输出光通信系统设计[J]. 广西科学, 2024, 31(1): 119-125.

HAO B, WU D, XIAO W. Design of Multiple Input Multiple Output Visible Light Communication System Based on Raptor Coding [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(1): 119-125.

MO 技术。刘洁^[7] 提出一个基于 LED 和光电二极管阵列的系统并分析其成像方法和非成像方法。敖珺等^[8] 采用数字喷泉(Fountain, LT)码 Raptor10 码来提高通信系统的可靠性及抗干扰能力, 并使用了巴克码作为帧头以及脉冲位置调制方式从而形成一个自由空间的光通信系统。Kumar 等^[9] 提出一个 4×4 阵列的 MIMO 设置, 并采用视距和第一反射信号分析了误码率性能, 比较了空间多路复用和信号调制。上述设计方案大多基于非成像系统, 在较远的工作距离下其位置鲁棒性较差。

虽然 LED 有着功耗低、使用寿命长、尺寸小和工作温度低等优点, 目前在实际生活中有着广泛的应用, 但很多方案没有针对调制带宽的优化。同时, 现有的 MIMO VLC 系统对各种障碍十分敏感, 通常需要通过精细校准来补偿失调、离焦像差、放大、渐晕和接收器朝向的影响, 但这比较麻烦且效果不佳。

为了提高 MIMO VLC 系统的位置鲁棒性和多路复用增益, 本文基于二维条形码^[10] 提出一个固定图像比例的像素化 MIMO VLC 系统。在该系统中, 发射器呈阵列排列, 准直透镜放置在发射器阵列正前方的焦距处, 接收器聚焦在无穷远处, 该系统利用散景效应获得在所有链路距离上的固定比例图像。由于该透镜可被视为一种空间至角度的映射, 因此本文所提出的系统是在角域发送数据, 而非在空间中直接传输数据, 从而其放大倍数与接收器位置无关, 且不需要在接收器移动时重新聚焦。综上, 本文所提出的系统可应用于发射器向很多简单接收器(例如智能手机)进行数据广播的情境。

1 VLC 系统

1.1 坐标系统

为了研究发射器、接收器等器件设备, 首先要明确坐标系统(图 1)。设发射坐标系统(Launch Coordinate System, TCS)的中心为点 O' , 其坐标为 (x', y') , O' 是发射图像平面与发射透镜的光轴之间的交点。接收坐标系统(Receiving Coordinate System, RCS)的中心 O 的坐标为 (x, y) ; θ 为某个很小的倾斜角度; O_{im} 为 O' 的映射点; f_1 和 f_2 分别为发射透镜和接收透镜的焦距; 两个透镜的光学中心之间的测量距离为 u ; I_t 和 I_r 分别为发射图像及其对应的接收图像的大小。

在图 1 所示的坐标系统中, 光学系统的放大倍数 M 为

$$M = \frac{I_r}{I_t} = \frac{f_2}{f_1}. \quad (1)$$

由式(1)可得, M 与距离 u 无关, 而在传统成像 MIMO 光无线系统中放大倍数 $M \propto 1/u$ 。在本文所提出的固定比例像素化 MIMO VLC 系统中, 相机捕捉到的每个发射像素的比例是固定不变的, 因此不需要重新聚焦。

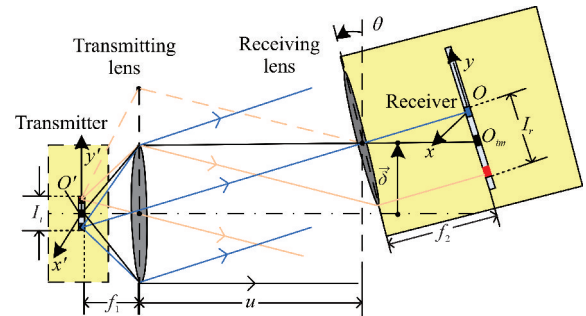


图 1 坐标系统

Fig. 1 Coordinate system

为简化且不失一般性, 本文假设 RCS 沿着 x 轴以一个较小角度 θ 旋转。当 $\theta = 0$ 时, TCS 中的 O' 将被映射到 RCS 中的坐标 O , 且不受 $\vec{\delta}$ 或 u 的影响。一般来说, 如果发射光轴和接收透镜之间存在较小的倾斜角度 θ , $\theta \in [0, \pi/2)$, 则 O' 会映射到 O_{im} , 且 TCS 和 RCS 之间存在一个固定平移。这是因为每条透射光线相对于接收透镜法线的角度均会被接收器的倾斜所修改。然而, TCS 和 RCS 之间的平移均与 u 或 $\vec{\delta}$ 无关, 且 M 固定不变。综上, TCS 和 RCS 之间的映射可表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -f_2 \tan\theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $-f_2 \tan\theta$ 为接收器倾斜所造成的固定平移。

1.2 点扩散函数和噪声

VLC 系统中的噪声是必须要考虑的。由于 VLC 系统中部件的孔径是有限的, 因此点扩散函数(Point Spread Function, PSF)本质上会受到衍射的限制^[11]。PSF 一般是随空间变化的, 但在光轴几乎对齐的系统(δ 和 θ 均足够小)中, 可以将 PSF 建模成一个空间不变的低通滤波器。VLC 系统中通常同时存在信号相关和信号无关的噪声分量。信号相关噪声由镜头噪声产生, 在发射器高照度下镜头噪声占主导地位; 而在高背景照明中噪声是与信号无关的。本文中由于环境光照条件较理想, 故将信号建模为噪声无关。

1.3 信道模型

本文提出的信道模型如图 2 所示。为简化且不失一般性,设 $\theta=0, \delta$ 足够小,接收器和发射器在时间上同步。一个接收器的帧包括间隔为 D_r 的 $n_r \times n_r$ 个像素,其对应的单个发射帧包括彼此间隔为 D_t 的 $n_t \times n_t$ 个像素。假设发射图像的中心 O' 为一个发射像素的中心(当 n_t 为奇数)或 4 个相邻像素的交点(当 n_t 为偶数);设 $i'(x', y')$ 为发射图像, $p_t(x', y')$ 为发射像素孔径函数,表示每个发射像素空间光强的分布。

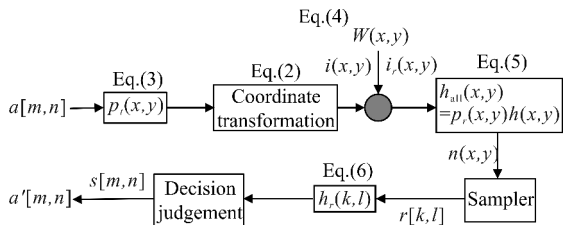


图 2 所提出的 MIMO VLC 系统的信道模型

Fig. 2 Channel model of proposed MIMO VLC system

该模型假设每个发射像素的发射孔径函数相同。分配到发射像素的数据 $a[m, n] \in \{0, 1\}$, 其中 $m, n \in [0, n_t - 1]$ 。发射图像为

$$i'(x', y') = \sum_{m=0, n=0}^{n_t-1, n_t-1} a[m, n] p_t(x' - mD_t + (n_t - 1) \frac{D_t}{2}, y' - nD_t + (n_t - 1) \frac{D_t}{2}). \quad (3)$$

应用式(3)中 TCS 和 RCS 之间的映射可得到对应的图像 $i(x, y)$ 。接收器有限的角距会造成接收图像的窗口化,窗口化的接收图像 $i_r(x, y)$ 为

$$i_r(x, y) = W(x, y) i(x, y), \quad (4)$$

式中, $W(x, y)$ 表示权重矩阵。

设 $h(x, y)$ 为光学系统的总体 PSF, 设 $p_r(x, y)$ 为接收像素孔径, 假定所有接收像素的孔径相同。混合信道响应 $h_{\text{all}} = h(x, y) * p_r(x, y)$, 其中 $*$ 表示二维卷积运算。为了确保对称性, 假设图像平面的原点位于接收像素的中点(当 n_r 为奇数时)或位于 4 个相邻像素的交点(当 n_r 为偶数时)。接收成像器对每个像素上的强度进行整合后输出一个强度估计值 $r[k, l]$:

$$r[k, l] = i_r(x, y) * h_{\text{all}}(x, y) \Big|_{\substack{x = -kD_r + (n_r - 1) \frac{D_r}{2} \\ y = -lD_r + (n_r - 1) \frac{D_r}{2}}} \quad (5)$$

式中, $k, l \in [0, n_r - 1]$ 。假定噪声采样为独立同分布和正态分布。

接收器阵列一般包含大量像素, 会过采样所接收的图像。因此, 接收器能够执行空间同步化以确定在 W 中每个发射像素的位置, 并进行空间滤波, 以提供每个发射子信道的检测统计值 $s[m, n]$:

$$s[m, n] = r[k, l] \otimes h_r[k, l] \Big|_{k, l \in Q}, \quad (6)$$

式中, $h_r[k, l]$ 为接收滤波器, \otimes 表示卷积。 Q 为空间同步确定的每个发射像素位置的集合。 $s[m, n]$ 被发送到决策制定模块, 从而为每个子信道确定发射数据的估计。

设 $|Q|$ 为在接收器处的窗口函数域权重矩阵 W 内成像的发射像素的数量。由于发射像素是边长为 D_t 的正方形, 因此接收器可见的发射器像素数量可由式(7)估计:

$$|Q| \approx \frac{|W|}{D_t^2 M^2} = \frac{\pi}{4} \times \frac{f_2^2 (l_r + l_t)^2}{u^2 D_t^2 M^2} = \frac{\pi f_1^2 (l_r + l_t)^2}{4u^2 D_t^2}, \quad (7)$$

式中, f_1 和 f_2 的定义见 1.1 节。

由式(7)可知, 当透镜大小(即 l_t 和 l_r)增加时, 接收器可见的发射像素数量会增加。在实际应用中, 透镜大小是有限的, 且接收器和发射器的形状也会影响 $|Q|$ 的大小。

2 参数选择与 Raptor 码

2.1 参数选择

发射器透镜和接收器透镜的光学参数决定了本文所提出的 MIMO VLC 系统的通信性能。 l_r, l_t, f_1 和 f_2 必须在尽可能增加信道数量的同时满足一定的约束条件。

本文将空间过采样率 (Spatial Oversampling Rate, SOR) 定义为发射子信道发射的像素被接收的数量^[12], 即:

$$\text{SOR} = M^2 \frac{D_t^2}{D_r^2} = \frac{f_2^2}{f_1^2} \times \frac{D_t^2}{D_r^2}. \quad (8)$$

本文中的发射像素和接收像素均以正方形建模, SOR 是基于面积的估计。对于其他参数, 一般选择尽可能大的焦距 f_1 和孔径 l_t, l_r , 从而最大限度地增加接收器和发射器之间的可用子信道数量。但是, 商用接收透镜和发射透镜限制了光学参数的可选范围, 大部分商用透镜的焦比为 1.0-11.3。由式(8)可知, 固定 M 后, 加大焦距能够增加子信道数量。

以智能手机相机接收器为例, 其 $f_2 \approx 4$ mm, 透镜的焦比 $f\text{-num} \approx 2, D_r \approx 1$ μm ; 发射器可以为 $\mu\text{-}$

LED阵列,其 $D_i \approx 20 \mu\text{m}$;为简化空间配准,设 $\text{SOR} \approx 10$ 。由式(8)可得 $f_1 \approx 25.3 \text{ mm}$ 。为最大化数据速率,应尽可能扩大 l_i ,商用高质量单面透镜的 $f\text{-num}$ 一般为1, $l_i \approx 25.4 \text{ mm}$ 。由式(7)可得,在1 m的传输距离处可得到一个包含约945个可用子信道的阵列;在3 m的传输距离处可得到一个包含613个可用子信道的阵列;在5 m的传输距离处可得到一个包含147个可用子信道的阵列。因此系统在3 m处的可用性仍较强。

2.2 本文所提出的像素化 MIMO VLC 系统中的 Raptor 码

虽然本文所提出的像素化 MIMO VLC 系统中的图像比例是固定的,但窗口尺寸和位置均会根据相机活动范围和设备朝向在不同位置对图像进行截断。每个像素子信道的信道增益和噪声均可能不同,并且局部干扰有时会导致信号的时滞。因此,本文应用喷泉码的分组级编码方法来跟踪由于窗口截断而引起的信道特性变化并维护通信链路畅通。本文假定发射图像由发送关键控(On-Off Keying, OOK)的一个像素阵列所组成。对于一个消息,喷泉编码器将发射映射到单个像素上的分组流,发射像素所发送的每个分组均受足够长的循环冗余检验码的保护,从而支持高精度的误差检测。

本文的 Raptor 码为高效的 Raptor10 码^[13], Raptor10 码是二进制和系统化的,对于 k 分组消息,前 k 个编码分组与原始消息相同。在本文所提出的固定比例 MIMO VLC 系统(图3)中,系统化分组被放置于光轴附近,并假定系统通常能够满足朝向要求。在每个时间间隔中,为了使用 OOK 传输发射图像,系统为每个像素指定单独一个分组。不同于物联网无线通信^[14],Raptor10 码使得通信系统可以自动适应不同范围和朝向。但是随着距离增加,窗口尺寸减小,接收到的子信道数量变少,此时 Raptor10 码需要更长时间来收集足够的数据包,使其速率适应信道条件^[15]。为此,本文使用一个次优门限接收器,并假定噪声与信号无关。高信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)的像素子信道将接收较多的分组,信道增益较低的像素则将收到很少的正确分组。

在编码阶段,首先使用具有高速率的低密度奇偶校验(Low Density Parity Check, LDPC)码^[16](即外部码)对源符号 $s = [s_1, s_2, \dots, s_m]$, $s_i \in \{0, 1\}$ 进行编码以生成输入(中间)符号 $u = [u_1, u_2, \dots, u_k]$, $u_i \in \{0, 1\}$, $k > m$,其中前 m 个输入符号为原始源

符号;再使用 LT 码(即内部码)对输入符号做进一步编码以生成输出(编码)符号 $c = [c_1, c_2, \dots, c_n]$, $c_i \in \{0, 1\}$, $n > k$ 。在 Gaussian 白噪声信道上使用二进制相移键控^[17](Binary Phase Shift Keying, BPSK)发送输出符号,即使用 $\{0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow -1\}$ 映射。接收向量为 $y = x + w$,其中 x 为调制码字, w 为零均值高斯噪声向量,其方差为 $\sigma^2 = N_o/2$, N_o 为噪声功率谱密度。每个接收输出符号(初始)的对数似然比(Log Likelihood Ratio, LLR)为 $L(c_j) = 2y_j/\sigma^2$ 。

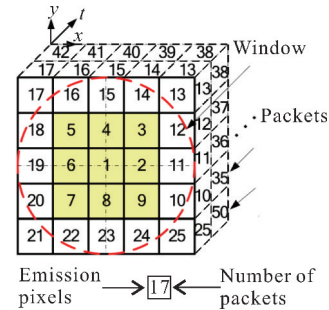


图3 将 Raptor10 分组映射到发射图像

Fig. 3 Mapping Raptor10 packets to transmitted images

Raptor10 码的解码首先在与内 LT 码关联的解码映射上执行,以得到输入符号对应的 LLR 值。将输入符号作为可变节点(Variable Node, VN),输出符号作为检查节点(Check Node, CN),在图4所示的二分图上执行 LT 解码,具体流程如下。首先, VN 向所有相邻的 CN 发送初始值为 0 的 LLR 值;然后, CN 使用发送的 LLR 值在与 LDPC 预编码关联的 Tanner 映射上对原始源符号进行解码;最后,系统执行预定义迭代次数的解码,直至满足停止标准。从第 j 个 CN 到第 i 个 VN 的更新规则表示为 $L_{c_j \rightarrow u_i}$,从第 i 个 VN 到第 j 个 CN 表示为 $L_{u_i \rightarrow c_j}$:

$$L_{c_j \rightarrow u_i} = 2 \tanh^{-1} \left(\left(\tanh \frac{L(c_j)}{2} \prod_{i' \in N_c(j) - \{i\}} \tanh \left(\frac{1}{2} L_{u_{i'} \rightarrow c_j} \right) \right) \right), \quad (9)$$

$$L_{u_i \rightarrow c_j} = \sum_{j' \in N_v(i) - \{j\}} L_{c_{j'} \rightarrow u_i}, \quad (10)$$

式中, $N_c(j)$ 表示连接到第 j 个 CN 的 VN 集合, $N_v(i)$ 表示连接到第 i 个 VN 的 CN 集合。

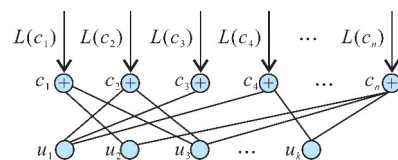


图4 编码示例

Fig. 4 Coding example

3 实验结果与分析

3.1 实验装置和参数

实验装置如图 5 所示,实验参数如表 1 所示。发射器为一块分辨率为 1280×1024 像素的 LCD 显示器,接收器为一个安装在单轨上的 CMOS 相机。实验目的是研究本文所提出的 VLC 的复用增益情况,包括其数据速率、一些信道特征以及在未对准和朝向情形下的鲁棒性。

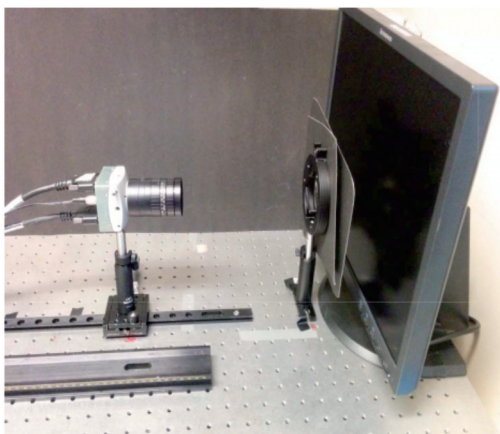


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

参数 Parameter	值 Value
LCD pixel spacing D_t	0.293 mm
Focal length f_1	50.000 mm
Focal length f_2	25.000 mm
Camera pixel size D_r	12.000 μm
LCD light intensity	250.000 cd/m^2
Lens aperture l_t	50.000 mm
Camera aperture l_r	17.900 mm
Exposure time	10.000 ms

3.2 信道测量

当发射图像为棋盘十字的形状时,不同的 u 和不同的离轴平移量 $\vec{\delta}$ 下的接收图像如图 6 所示。从 400 mm 和 500 mm 两个距离拍摄图像,离轴平移量分别为 $|\vec{\delta}| = 0$ mm 和 5 mm。对于一个给定的距离,改变 $\vec{\delta}$ 会造成窗口中心的平移,造成发射图像在不同位置被截断。虽然改变 u 不会造成放大倍数的较大变化,但会导致窗口直径和可见像素子信道数量的变化。

窗口尺寸和每个发射子信道的接收像素数量的测量结果见图 7。所有测量均在 $|\vec{\delta}| = 0, \theta = 0$ 下执

行,蓝色的三角形和线分别表示对于不同距离 u 和窗口尺寸的实验结果。红色正方形表示每个发射子信道的边长,单位为接收的像素数。通过发射一个全白图像,并利用 Canny 边缘检测器来确定接收帧的边缘,以测量出窗口大小。计算出包围图的面积和图中对应圆的直径。其中, u 较小时存在很好的一致性,距离较大时拟合度更为松散^[18,19]。这可能是因为在较远距离上满足近轴近似的难度更大,且当距离较远时像素的亮度会变低,加大了测量的难度。假设像素均是正方形像素,该度量被用于表示接收器处每个发射子信道的大小,表示为式(8)中的 $\sqrt{\text{SOR}}$ 。随着距离的变化因子超过 3 倍(0.1–1.0 m),发射子信道的尺寸变化约为 4 个像素。由此,对于一个较大范围的 u 值,接收器处的每个发射子信道的比例几乎固定不变。

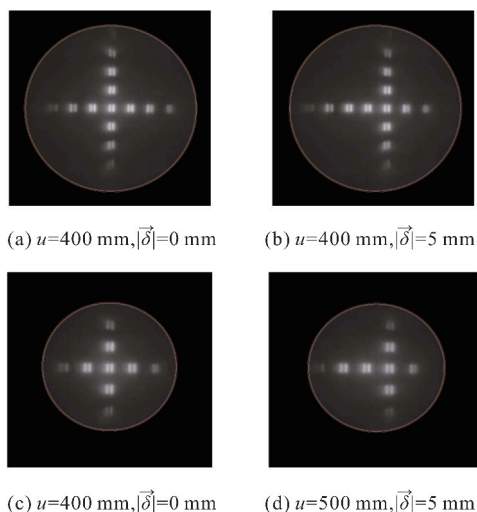


图 6 棋盘十字形发射图像的接收图像

Fig. 6 Received images of the transmitted images with

checkerboard cross shape

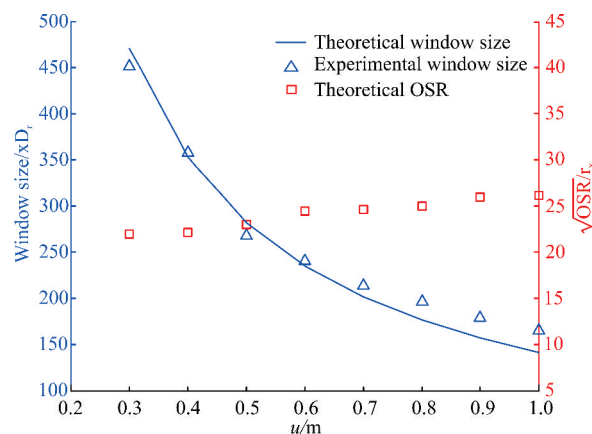


图 7 信道特征

Fig. 7 Channel characteristic

本文实施了一个小规模通信系统以测试所提出的固定比例 MIMO 信道在不同距离的可用数据速率。为了评估系统的性能极限,假定在每个发射像素上发送 OOK 的概率相等。先测量接收器的每个发射子信道的信噪比,再计算接收器窗口 $W(x, y)$ 中可见的每个发射子信道的互信息 C_i 。假定发射子信道之间不存在干扰,则该信道的信息速率 $C = \sum C_i$, 单位为 bit/frame。

此外,图 8 给出了当 $|\vec{\delta}|=0$ 和 3 mm 时,将 Raptor10 码应用到发射像素时的吞吐量。Raptor10 码的消息长度 $k=1024$ bits,符号大小为 32 bits。对于给定窗口比例, Raptor 码会自动调整不同距离下的信道吞吐量。当 $|\vec{\delta}| \neq 0$ 时会存在一个较小的速率惩罚。这是因为当 $|\vec{\delta}|=0$ 时,解码器会捕捉到编码器发送的许多系统化符号,这样会降低解码的开销。定性方面,系统性能很大程度上取决于所用的透镜和相机的质量。当 $|\vec{\delta}|$ 较大时,速率可能会受到接收透镜中镜头像差的影响。但 Raptor 码能够自适应速率以在各种距离和未对准的情况下提供可用速率。

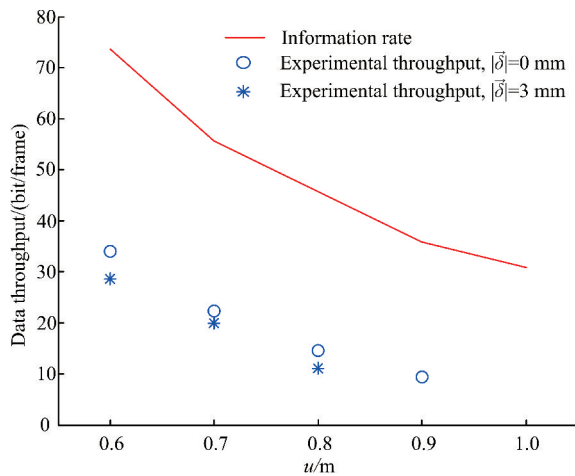


图 8 数据速率结果

Fig. 8 Data rate results

3.3 与其他像素化系统的比较

与传统的像素化 MIMO VLC 系统^[6]不同,本文系统在未对准和朝向的情形下具有鲁棒性,不需要重新对焦,且不要求距离信息。在本文提出的固定比例系统中,接收器透镜聚焦于无穷远处,在角域对数据进行多路复用。

与其他像素化 MIMO VLC 系统的比较如表 2 所示,设定智能手机相机和 μ LEDs 阵列的样例距离为 1 m。本文固定比例 MIMO 系统有大约 945 个独立子信道,数量最多,因此成像的发射像素也最多。

此外,数据吞吐量最大达到 30.1 bit/frame,因此性能更强。综上,本文 MIMO VLC 系统提供了大量的从发射器至接收器的独立子信道。其他像素化系统在接收器处为单个透镜有更大的视场(FOV),虽然更大的 FOV 可能会捕捉到更多的发射像素,但其需要信道知识和很高的计算复杂度,且易受聚焦和尺度误差的影响。本文方案提供了一个低复杂度系统,具有对准鲁棒性,提供了多路复用增益。

表 2 与其他像素化 MIMO VLC 系统的比较

Table 2 Comparison with other pixel MIMO VLC Systems

方案 Scheme	独立子信道数 Number of independent sub-channels	数据吞吐量/ (bit/frame) Data throughput/ (bit/frame)
Ref. [6]	309	19.1
Ref. [8]	756	26.5
Ref. [16]	798	27.3
Proposed	945	30.1

4 结论

本文提出了一个基于成像接收器的固定比例 MIMO VLC 系统。在本系统中,数据在角域而非空间域中传输,可用信道取决于从发射器至接收器的角距。本系统的主要优点是在对单个子信道进行解码时,不需要进行重新聚焦和距离估计,并且利用 μ LED 阵列和成像传感器实现了 VLC 系统较高的复用增益。未来将利用更高阶的调制对本文所提出的系统进行仿真和实验,使用多色发射器和接收器元件,并考虑将定位技术集成到固定比例 MIMO 通信系统。

参考文献

- [1] 肖楠,李陶深,王哲. 带有下行 SWIPT 的强干扰 WPCN 中用户最小速率最大化研究[J]. 广西科学, 2019, 26(3):267-275.
- [2] FERREIRA R X R, XIE E Y, MCKENDRY J J D, et al. High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(19):2023-2026.
- [3] 曾福来,刘洛琨,朱义君,等. APSK 调制在基于 OFDM 可见光通信系统中的性能分析[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(3):646-655.
- [4] 张颖,高悦,柯熙政. 预编码室内 MIMO 可见光通信系统空间相关性分析[J]. 光电工程, 2020, 47(3):190666.
- [5] 唐菁敏,王朝阳,周旋,等. 基于多载波同步的最大能量 TOA 估计算法[J]. 通信技术, 2017, 50(11):2448-2453.
- [6] NARMANLIOGLU O, KIZILIRMAK R C, MIRAMIRKHANI F, et al. Effect of wiring and cabling topologies on the performance of distributed MIMO OFDM

- VLC systems [J]. IEEE Access, 2019, 7: 52743-52754.
- [7] 刘洁. 双紫外掩膜大尺度成型及监测系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [8] 敖珺, 谈新园, 马春波, 等. 基于 Raptor10 码的自由空间光通信系统设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(9): 173-178.
- [9] KUMAR A, GHORAI S K. Performance of MIMO-VLC system for different radiation patterns of LED in indoor optical wireless communication system [C]// 2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). Goa, India: IEEE, 2019: 75-86.
- [10] 乌旭, 张瑾瑾, 张燕恒. 基于二维条码的光学相位防伪掩模设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 122-128.
- [11] TAVOUSHI P, AHMADI B, MAY N, et al. A new fast helium ion imaging technique through rapid acquiring and restoring using the point spread function deconvolution method [J]. Microscopy and Microanalysis, 2020, 26(S2): 1728-1731.
- [12] AKBARI M, HONARPARVAR M, SAVARIA Y, et al. OTA-free MASH two-step incremental ADC based on noise shaping SAR ADCs [C]// IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS). Montreal, Canada: IEEE, 2020: 98-107.
- [13] 陈果, 彭小峰, 曹阳, 等. 电力线通信中 Raptor 级联编码方案研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2019, 33(3): 169-173, 179.
- [14] 徐永盛, 纪跃波. 基于 Android 平台的教学楼智能门锁系统设计[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2020, 34(1): 90-95, 98.
- [15] 敖珺, 梁积卫, 马春波, 等. 自由空间光通信中基于 Q 学习算法的 Raptor10 码译码策略[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 227-235.
- [16] ZHOU C, WANG X Y, ZHANG Z G, et al. Rate compatible reconciliation for continuous-variable quantum key distribution using Raptor-like LDPC codes [J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2021, 64(6): 260311.
- [17] 陈丹, 鲁萌萌, 刘艳蓉. 湍流信道下指向误差对自适应副载波调制性能的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 50-58.
- [18] WANG J Q, ZHANG X. Cooperative MIMO-OFDM-based exposure-path prevention over 3D clustered wireless camera sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(1): 4-18.
- [19] PANTA J, SAENGUDOMLERT P, STERCKX K L, et al. Performance optimisation of indoor SVD-based MIMO-OFDM optical wireless communication systems [J]. IET Optoelectronics, 2020, 14(4): 159-168.

Design of Multiple Input Multiple Output Visible Light Communication System Based on Raptor Coding

HAO Bing^{1* * *}, WU Di², XIAO Wei³

(1. Department of Mathematics and Computer Science, Hetao College, Bayannur, Inner Mongolia, 015000, China; 2. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang, 150001, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui, 232001, China)

Abstract: In order to improve the multiplexing gain of the Visible Light Communication (VLC) system, a fixed-ratio-pixelated VLC system based on Multiple Input Multiple Output (MIMO) is proposed in this article. The system first performs space-angle mapping, so that data transmission can be carried out in the angular domain; at the same time, the Raptor coding method is used to track the change of data channel characteristics caused by the truncation of the window. Then, for a series of time-varying images captured by a high-speed camera, the system uses the scatter effect to obtain a fixed-scale image over all link distances. In the experiment, the proposed VLC system is verified by using liquid crystal displays and high-speed cameras. Compared with the traditional pixelated MIMO system, the proposed system has higher robustness in the case of misalignment, so it has a wide application prospect in multiplexing scenarios.

Key words: multiple input multiple output; Visible Light Communication (VLC); Raptor coding; spatial-angle mapping; fixed ratio

责任编辑: 陆雁, 陈少凡