

文章编号:1671-5896(2026)04-0749-07

面向 OCC 系统的 QC-LDPC 编译码算法设计与实现

闫晓明¹, 石 迪², 籍风磊¹, 王铭阳¹, 王 勇¹

(1. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130012; 2. 海洋石油工程股份有限公司设计院 深水设计分院, 天津 300451)

摘要: 针对可见光信道中的干扰较强, 且现阶段 OCC(Optical Camera Communication)系统的编码技术纠错性能不足, 造成 OCC 系统可靠性降低的问题, 提出了一种面向 OCC 系统的 QC-LDPC(Quasi-Cyclic Low Density Parity Check Code)编译码算法。根据 OCC 系统的结构特点以及信道链路特性, 确定具有结构化设计和低复杂度译码特性的 QC-LDPC 码作为纠错码型, 采用快速编码算法减小编码过程的运算复杂度; 结合归一化最小和算法和分层译码算法的各自特点提出了一种改进的 L-MS(Layer-Min Sum)译码算法。OCC 系统实验平台测试结果表明, 在室内环境通信场景下, OCC 系统的误码率为 3.16×10^{-6} , 通信速率为 2 850.4 bit/s; 在室外环境通信场景下, OCC 系统的误码率为 9.07×10^{-6} , 通信速率为 2 797.9 bit/s, 在保证低误码率的同时, 兼顾了数据的传输速率。

关键词: 可见光相机通信; 编译码; LDPC 码; 现场可编程门阵列; 帧结构

中图分类号: TN929.12

文献标志码: A

Design and Implementation of QC-LDPC Encoding and Decoding Algorithm for OCC Systems

YAN Xiaoming¹, SHI Di², JI Fenglei¹, WANG Mingyang¹, WANG Yong¹

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. Deep Water Design Branch, Design Institute of Offshore Oil Engineering Company Limited, Tianjin 300451, China)

Abstract: The strong interference in the visible channel and the insufficient error correction performance of the coding techniques for OCC(Optical Camera Communication) systems cause the reliability of OCC systems to be reduced. A QC-LDPC(Quasi-Cyclic Low Density Parity Check Code) compilation code algorithm for OCC system is proposed. According to the structural characteristics of OCC system and channel link characteristics, QC-LDPC code with structured design and low-complexity decoding characteristics is identified as the error correction code type, and fast coding algorithm is used to reduce the computational complexity of the coding process. Combined with the normalized least-sum algorithm and the layered decoding algorithm, an improved L-MS(Layer-Min Sum) decoding algorithm is proposed. The experimental results show that the BER(Bit Error Rate) of the OCC is 3.16×10^{-6} . The communication rate is 2 850.4 bit/s under the communication scenario of indoor environment. The BER of the OCC system is 9.07×10^{-6} and the communication rate is 2 797.9 bit/s under the communication scenario of outdoor environment. The proposed method effectively maintains a low bit error rate while ensuring a satisfactory data transmission rate.

Key words: optical camera communication; encoding and decoding; quasi-cyclic low density parity check code (LDPC) code; field-programmable gate array(FPGA); frame structure

收稿日期: 2025-07-29

基金项目: 吉林省科技发展规划重点研发基金资助项目(20200401122GX); 吉林大学实验技术重点基金资助项目(SYXM2024a009)

作者简介: 闫晓明(1967—), 男, 吉林四平人, 吉林大学高级工程师, 主要从事通信终端设备研发研究, (Tel) 86-13604401953 (E-mail) txjs@sohu.com; 通讯作者: 王勇(1982—), 女, 太原人, 吉林大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事图像处理研究, (Tel) 86-13614409575 (E-mail) wang_yong8205@163.com。

0 引 言

可见光相机通信(OCC: Optical Camera Communication)是一种发射端以 LED(Light Emitting Diode)光信号为信息载体,接收端利用高速相机图像传感器接收信息,自由空间为通信信道的新型无线通信技术。相较于 VLC(Visible Light Communication)技术,相机的使用使探测范围更广,通信距离更长,赋予了 OCC 技术更高的灵活性,能适配于更为复杂的应用场景^[1-4]。

虽然 OCC 应用在智能交通系统中具有诸多优势,但其技术仍不够成熟,并且其关键技术之一的编码技术存在以下问题^[5-7]: 1) 编码的纠错性能不足,导致 OCC 系统的纠误码性能较差; 2) 现阶段 OCC 系统主要采用单片机作为编码调制单元,但单片机算力有限,难以满足高性能纠错编码算法的需求。针对上述问题,笔者对 OCC 系统的编译码算法进行设计与实现,采用现场可编程门阵列(FPGA: Field-Programmable Gate Array)提升 OCC 系统收发端算力,引入准循环低密度奇偶校验码(QC-LDPC: Quasi-Cyclic Low Density Parity Check Code)作为 OCC 系统的纠错码型,并在室内外环境中验证 QC-LDPC 编译码算法的可靠性。

为提高室外环境下 OCC 系统纠错性能,笔者提出了一种结合归一化最小和算法和分层译码算法各自特点的改进的 L-MS(Layer-Min Sum)译码算法。在发射端,为防止数据传输时出现丢帧现象,结合 LED 阵列结构以及编码信息长度,设计 QC-LDPC 码的数据帧结构。在接收端,根据发射端的数据帧结构设计 LED 阵列灰度值提取算法;基于改进的 L-MS 译码算法设计译码器。在室外环境下利用所搭建的 OCC 系统实验平台进行算法性能验证。

1 OCC 系统结构

图 1 为 OCC 系统结构,其主要由发射端、自由空间光信道、接收端 3 部分组成^[8-11]。OCC 系统的发射端主要由编码调制单元、驱动放大单元和 LED 阵列构成。

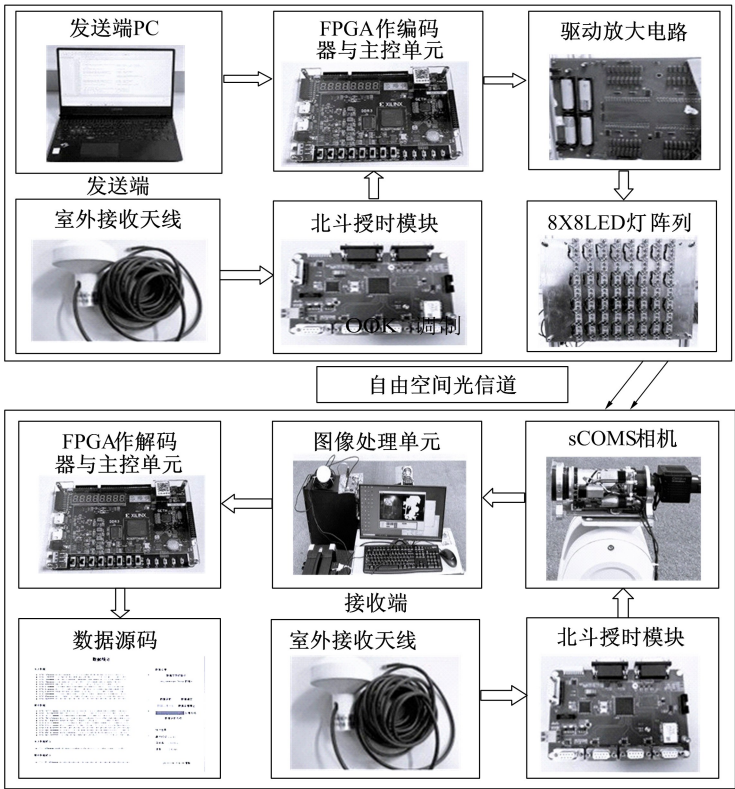


图 1 OCC 系统结构

Fig. 1 Structure of the OCC system

在信息传输过程中,将数据源码通过编码调制单元进行调制,生成的电信号传输至驱动放大单元,并利用其对电信号进行放大处理后驱动 LED 阵列,通过 LED 阵列的明暗变化实现信息的传输。LED 光信号以光波形式辐射至自由空间光信道,接收端相机实时捕获 LED 阵列的灰度图像并进行解码处理。在传输过程中,多种环境因素会对信号造成干扰,例如发射端面板的太阳光反射以及雾霾、雨雪等复杂天气条件。OCC 系统的接收端主要由相机、图像处理和解码模块构成。相机负责捕捉通过信道传输的光信号,并由图像传感器将光信号转换为电信号解调。图像处理模块对受环境光及气候因素干扰的图像进行滤波、增强等处理,以便解码模块还原数据信息。接收端的设计应确保其在复杂条件下也能稳定工作,需具备较高的灵敏度和较强的抗干扰能力,以保证信息的准确解码和可靠传输^[12-13]。

图2为实验场景图,其中图2a为接收端组件,含 sCOMS (scientific Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)、像机,承载相机的云台,北斗授时系统, FPGA 主控单元,数据接收电脑;图2b为实验远景,发送端距离接收端 80 m 以内;图2c为发送端,含发送端电脑,北斗授时系统, FPGA 编码器, LED 阵列组件。

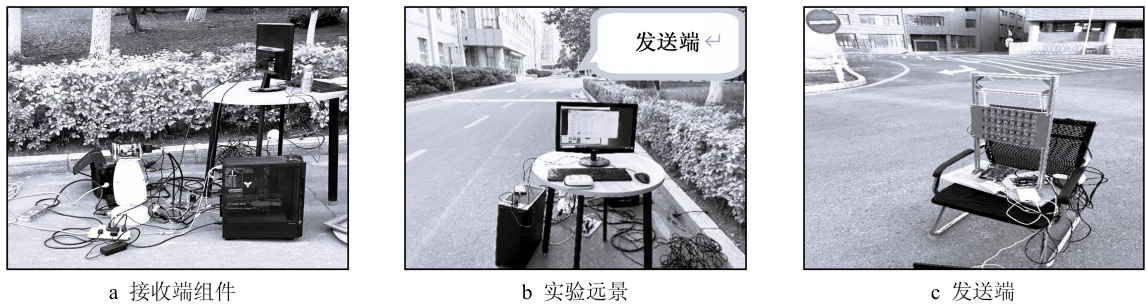


图2 实验场景图

Fig.2 Experimental scene diagram

2 OCC 系统 QC-LDPC 编译码算法设计与仿真分析

2.1 可快速编码的 QC-LDPC 码

2.1.1 快速编码算法原理

循环移位操作:由于 QC-LDPC 码的校验矩阵 $\mathbf{H}$ 由多个子矩阵构成,这些子矩阵通过循环移位形成周期性的关系,使 QC-LDPC 码在编码过程中能复用已计算的子矩阵,避免了每次都重新计算完整矩阵的过程,减少了存储和计算过程中的复杂性^[14-15]。

稀疏矩阵的高效计算:QC-LDPC 的校验矩阵 $\mathbf{H}$ 具有稀疏性,矩阵中大多数元素为“0”,只有少数元素为“1”。稀疏矩阵的特性使编码过程可通过高效的稀疏矩阵乘法跳过元素“0”的计算,进一步提升编码效率。

2.1.2 算法设计

QC-LDPC 快速编码算法充分利用了其准周期性矩阵结构,通过循环移位、稀疏矩阵优化等策略,显著提高了编码效率。算法在伽罗华域 GF(2)中运算,GF(2)域仅包含元素“0”和“1”,运算基于模2规则,有利于算法硬件实现^[16],设计步骤如下。

1) 假设信息源码为: $\mathbf{s} = [s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_K]$, 校验向量为 $\mathbf{p} = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_m]$, 编码信息为 $\hat{\mathbf{C}} = [\mathbf{s} \ \mathbf{p}]$, 编码信息的长度为 $K=N+M$, 由校验等式 $\mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{C}}^T = 0$ 可知:

$$\begin{bmatrix} H_1 & H_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{s}^T \\ \mathbf{p}^T \end{bmatrix} = 0. \quad (1)$$

由于在 GF(2)中运算,可得:

$$\begin{bmatrix} H_1(1,1) & \cdots & H_1(1,K) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_1(M,1) & \cdots & H_1(M,K) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1^T \\ s_2^T \\ s_3^T \\ \vdots \\ s_K^T \end{bmatrix} = H_2 \cdot \begin{bmatrix} p_1^T \\ p_2^T \\ p_3^T \\ \vdots \\ p_M^T \end{bmatrix}. \quad (2)$$

简化式(2), 可得:

$$[I_a + I_b + \cdots I_x] \cdot p_1^T = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K H(i, j) \cdot s_j^T. \quad (3)$$

移位得到 p_1^T 为

$$p_1^T = [I_1 + I_2 + \cdots I_x]^{-1} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K H(i, j) \cdot s_j^T. \quad (4)$$

2) 得到 p_1^T 后, 根据式(2)可得 p_2^T 为

$$p_2^T = \sum_{j=1}^K H(1, j) \cdot s_j^T + I_a \cdot p_1^T. \quad (5)$$

依此类推可得:

$$p_M^T = \sum_{j=1}^K H(M-1, j) \cdot s_j^T + p_4^T. \quad (6)$$

由此得到构成校验向量的每个 p_i 。将信息源码与校验向量组成编码信息 $\hat{C} = [s \ p]$, 实现快速编码算法。

2.2 改进的 L-MS 译码算法

改进的 L-MS 算法将复杂的 $\tanh$ 函数和 $\tanh^{-1}$ 函数转换为最小值函数 $\min |f(x)|$, 减小了译码过程中的运算复杂度, 引入乘性因子 α 降低了校验节点的幅度值, 提升了算法的译码性能。同时引入了分层结构, 上一层已更新的校验节点信息可直接应用到下一层校验节点的更新^[17], 加快了译码算法的收敛速度, 兼顾了 NMS(Normalized Min Sum)译码算法与 L-MS 译码算法各自的优点。在高信干噪比信道条件下, 该算法性能表现尤为出色。

具体步骤如下。

1) 设置信息初始化:

$$\begin{cases} t_n = y_j, \\ LQ_n = 0, \end{cases} \quad (7)$$

其中设置后验概率初始为 0, 先验概率为 y_i 。

2) 分层更新, 恢复变量节点信息:

$$T_{nm}^{(l, k)} = T_n^{(l, k-1)} - C_{mn}^{(l-1)}, \quad (8)$$

其中 T_{nm} 为变量节点 n 传递给校验节点 m 的信息, C_{mn} 为校验节点 m 传递给变量节点 n 的信息, l 为矩阵行数, k 为矩阵列数。

3) 更新校验节点信息与后验概率:

$$C_{mn}^l = \alpha \prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sign}(T_{n'm}^{(l, k)}) \min_{n' \in N(m) \setminus n} |T_{n'm}^{(l, k)}|, \quad (9)$$

$$LQ_n = T_{nm}^{(l, k)} + C_{mn}^l. \quad (10)$$

4) 译码判决, 所有层的信息更新完成后, 进行比特判决, 若 $LQ_n > 0$, 则信息比特 x_n 判断为“1”, 否则, 判断为“0”。直到译码算法达到设定的最大迭代次数, 或满足校验等式 $H \cdot \hat{C}^T = 0$ 时, 译码结束, 输出译码判决后的二进制信息。

3 OCC 系统 QC-LDPC 编译码算法实验

3.1 LED 灰度值提取算法

对接收端 sCMOS 相机拍摄的包含有 LED 阵列图像进行均值滤波处理^[18], 以减小接收图像中因环境干扰而产生的小噪声点。设置 5×5 的卷积核对图像进行开、闭运算处理, 即对图像进行“腐蚀”和“膨胀”操作, 能更好地消除图像中 LED 轮廓边缘的“凸起”以及轮廓内部的“空洞”, 方便提取 LED 轮廓内的平均灰度值^[19]。完成开闭运算处理后, 对图像进行二值化处理, 绘制点亮 LED 的轮廓, 计算一阶矩得到每个点亮 LED 中心点坐标, 并对比数值大小得到左上角与右下角定位灯的中心坐标, 由此确定 LED 阵列

的 ROI(Region Of Interest)。计算两个定位灯 x,y 轴间的距离差,判断得到的定位灯坐标是否准确。然后由几何原理确定出其他 62 个 LED 的中心坐标,提取 LED 轮廓内的平均灰度值,并在归一化后转化为 12 位二进制数据,传输至译码器译码。

具体操作如下。

1) 对接收端 sCMOS 相机拍摄到的包含 LED 阵列图像进行均值滤波处理,滤除图像中的小噪点,部分原图像如图 3a 所示、滤波后图像如图 3b 所示。

2) 设置 5×5 卷积核,从左到右,从上至下依次对图像进行开、闭运算处理,消除 LED 阵列中的“凸起”和“空洞”,以便于后续提取 LED 轮廓内的平均灰度值,二值化图像如图 3c 所示。

3) 对图像进行二值化处理,绘制图像中点亮 LED 的轮廓,并计算每个 LED 轮廓的一阶矩,即 LED 轮廓的中心,如下:

$$E(x)=\int_{-\infty}^{+\infty}xf(x)\mathrm{d}x。(11)$$

得到两个定位灯的中心坐标后,计算两定位灯中心坐标 x 轴间的距离 $x_{\max}-x_{\min}$ 和 y 轴间的距离 $y_{\max}-y_{\min}$,由于每个 LED 间的距离相等,因此理论上两轴间的距离相等。判断两距离之差是否大于 LED 轮廓半径的平均值,若小于,则成功确定图像中 LED 阵列的 ROI;否则,重新对图像进行处理。

4) 根据几何原理计算出每个 LED 的中心点坐标,当 LED 点亮时,直接提取轮廓内的平均灰度值。当 LED 熄灭时,以 LED 中心坐标为圆心,提取圆圈内的平均灰度值,LED 阵列灰度值提取如图 3d 所示。其中,小圆点所在位置代表熄灭 LED 的中心坐标。

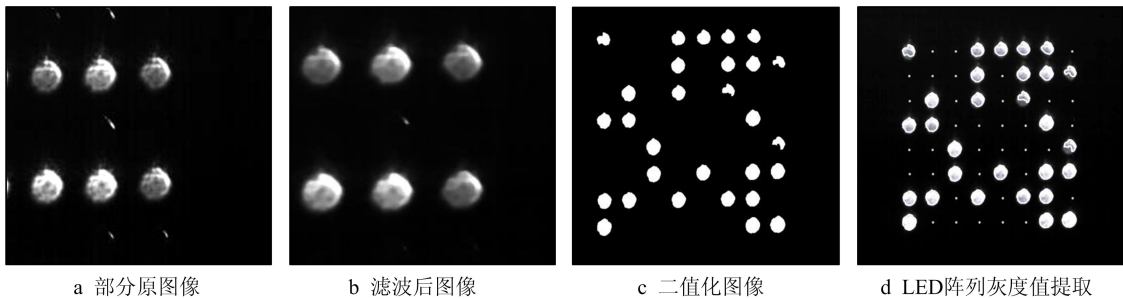


图3 LED 阵列灰度值提取算法效果

Fig.3 Effect of the algorithm for extracting gray values of the LED array

5) 提取到每个 LED 的平均灰度值后,对其进行归一化处理,通过归一化公式将平均灰度值映射到 $[-255,255]$ 区间,取整数位,并转化为 12 位二进制补码信息,然后传输至译码器译码。

3.2 实验结果

在室内环境通信场景下,由于干扰较少,系统能实现低误码率和较高通信速率的稳定传输,实验测试引入编码后的系统误码率为 3.16×10^{-6} ,低于实验仿真结果;未引入编码的对照组实验误码率为 1.53×10^{-3} 。图 4 为室外环境中不同距离的误码率。由于室外环境的干扰噪声较多且通信距离更远,因此系统的通信速率与误码率受到干扰。在引入编码的实验测试中,10~80 m 的平均误码率为 9.07×10^{-6} ,前 40 m 的通信距离误码率相对较低,系统能维持较高的通信质量;40~80 m 误码率逐渐增大,在 80 m 处误码率最大,此时的误码率为 2.61×10^{-5} ;未引入编码的对照组实验平均误码率为 8.54×10^{-3} 。

图 5 为室外环境下不同距离的通信速率。在引入编码的实验测试中,10~80 m 的平均通信速率为 2 797.9 bit/s,在 10~30 m 范围间通信速率相对较快,系统能维持较高的数据传输速率,40~80 m 范围内通信速率逐渐降低;未引入编码的对照组实验平均通信速率为 4 017.5 bit/s。在室内环境中,干扰较少,实验测试引入编码后的通信速率为 2 850.4 bit/s;未引入编码的对照组实验平均通信速率为 4 126.3 bit/s。

系统实验平台在引入码率为 $2/3$ 的 QC-LDPC 码后,有效信息占编码信息的 $2/3$,通信速率比未引入编码有所降低,但系统实验平台的误码性能得到显著提升。

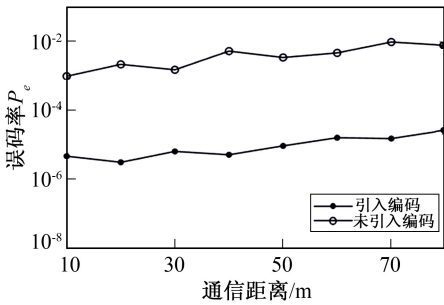


图 4 室外环境下不同距离误码率
Fig.4 Bit error rate at different distances in outdoor environment

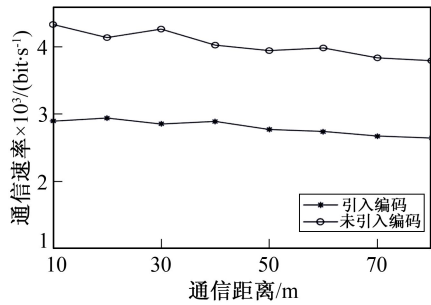


图 5 室外环境下不同距离通信速率
Fig.5 Communication rates at different distances in outdoor environment

综上所述,笔者算法在室外复杂环境中能充分发挥其软硬件协同优势,在保证低误码率的同时,兼顾了数据的传输速率,进一步验证了其在复杂环境下的实用性和可靠性。笔者所提的 QC-LDPC 编译码算法结合 LED 阵列灰度值提取算法具有较强的抗干扰能力,能满足 OCC 系统在复杂环境下的通信需求。

4 结 语

笔者对面向 OCC 系统 QC-LDPC 编译码算法进行了探讨,研究了改进的 L-MS 算法以及 LED 灰度值提取算法,所提出的算法提升了 OCC 系统的抗干扰能力,满足了复杂环境下的通信需求,其结果有望推广到智能交通系统。

参考文献:

[1]LIU W, XU Z. Some Practical Constraints and Solutions for Optical Camera Communication [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2020, 378(2169): 1-25.

[2]UTAMA I B K Y, SITANGGANG O S, NASUTION M R A, et al. Enhancing Optical Camera Communication Performance for Collaborative Communication Using Positioning Information [J]. IEEE Access, 2024, 12: 11795-11809.

[3]ZADOBRISCHI E. The Concept Regarding Vehicular Communications Based on Visible Light Communication and the IoT [J/OL]. Electronics, 2023, 12: 1359 [2025-06-01]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/allldb/full-record/WOS:001151713300001>.

[4]LIU A, SHI W, OUYANG M, et al. Characterization of Optical Camera Communication Based on a Comprehensive System Model [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(18): 6087-6100.

[5]HASAN M K, ALI M O, RAHMAN M H, et al. Optical Camera Communication in Vehicular Applications: A Review [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(7): 6260-6281.

[6]NGUYEN H, UTAMA I B K Y, JANG Y M. Enabling Technologies and New Challenges in IEEE 802.15.7 Optical Camera Communications Standard [J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 62(3): 90-95.

[7]SAXENA V N, GUPTA J, DWIVEDI V K. Secured End-to-End FSO-VLC-Based IoT Network with Randomly Positioned VLC: Known and Unknown CSI [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 10(2): 1347-1357.

[8]TAMANG L D, KIM B W. Optical Camera Communication for Vehicular Applications: A Survey [J]. IEIE Transactions on Smart Processing & Computing, 2021, 10(2): 136-145.

[9]CHENG L, WU Y, XU C, et al. Automotive Visible-Light Communication: Alternative Devices and Systems [J]. Tsinghua Science and Technology, 2023, 28(4): 719-728.

[10]于浩海. 可见光相机通信系统发射机优化与解码算法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.

YU H H. Research on Transmitter Optimization and Decoding Algorithm for Optical Camera Communication System [D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[11]闫晓明, 韩倩倩, 籍风磊. 基于遮挡重检测的 OCC 系统目标 LED 阵列跟踪算法 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41(11): 8-15.

- YAN X M, HAN Q Q, JI F L. Investigation of Target LED Array Tracking Algorithm in the Optical Camera Communication System Based on Occlusion Redetection [J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(11): 8-15.
- [12]ZHANG P, LIU Z, HU X, et al. Constraints and Recent Solutions of Optical Camera Communication for Practical Applications [J/OL]. Photonics, 2023, 10(6): 608 [2025-06-01]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/alldb/full-record/WOS:001015530000001>.
- [13]HASAN M K, CHOWDHURY M Z, SHAHJALAL M, et al. Performance Analysis and Improvement of Optical Camera Communication [J/OL]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2527 [2025-06-01]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/alldb/full-record/WOS:000455145000195>.
- [14]LIN D, YI F, YONGLIANG G, et al. Design of Protograph LDPC-Coded MIMO-VLC Systems with Generalized Spatial Modulation [J]. China Communications, 2024, 21(3): 118-136.
- [15]BOCHAROVA I E, KUDRYASHOV B D, OVSYANNIKOV E P, et al. Optimization of Irregular NB QC-LDPC Block Codes over Small Alphabets [C]//IEEE Information Theory Workshop (ITW), Virtual Event. [S.l.]: IEEE, 2021: 1-5.
- [16]CUMMINS A D, MITCHELL D G M, PERRINS E. Rate-Compatible, Bandwidth- Efficient LDPC Codes for Aeronautical Telemetry [J/OL]. Entropy, 2024, 26: 1045 [2025-06-01]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/alldb/full-record/WOS:001387688500001>.
- [17]HOCEVAR D E. A Reduced Complexity Decoder Architecture via Layered Decoding of LDPC Codes [C]//IEEE Workshop on Signal Processing Systems. Austin, Texas, USA: IEEE, 2004: 107-112.
- [18]CHOUDHARY J, CHOUDHARY A. Enhancement in Morphological Mean Filter for Image Denoising Using Glcm Algorithm [J]. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2021, 13(4): 134-137.
- [19]CHLIVEROS G, TZANETATOS I, KONTOMARIS V S. A Deep Learning Image Corrosion Classification Method for Marine Vessels Using an Eigen Tree Hierarchy Module [J]. Coatings, 2024, 14(6): 768-768.

(责任编辑:张洁)