

新型可见光成像通信信号解调方案研究

李攀攀¹, 冯莉芳^{1*}, 黄顺义²

¹北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083;

²北京扬华基业科技有限公司, 北京 100038

摘要 可见光成像通信(OCC)是利用手机摄像头的卷帘快门工作方式拍摄快速闪烁的发光二极管(LED),接收明暗相隔的条纹图像,并通过对该图像进行解码恢复,实现数据通信的一种新兴的无线光通信技术。然而数据传输过程中出现的灰度值波动会影响通信过程中的误码率(BER)、传输距离和数据速率。提出了一种新型的 OCC 信号解调方案。利用基于膨胀腐蚀的自适应图像增强算法消除灰度值整体波动,利用膨胀算法消除灰度值局部波动,从整体和局部两个方面综合处理,最大程度上消除灰度值波动,提高判决的准确性,从而提高系统的通信性能。为验证所提方案的性能,评估了该方案在不同传输距离和数据速率环境下的 BER。实验结果表明,所提方案的平均误码率较传统信号解调算法低两个数量级。

关键词 光通信; 可见光成像; 手机摄像头; 晕染效应; 解调算法

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2306006

New Type of Optical Camera Communication Signal Demodulation Scheme

Li Panpan¹, Feng Lifang^{1*}, Huang Shunyi²

¹School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

²Beijing Yanghua Foundation Technology Co., Ltd., Beijing 100038, China

Abstract Optical camera communication (OCC) is a new wireless optical communication technology, which uses the rolling shutter working mode of mobile phone camera to shoot fast flashing light emitting diode (LED), receives the stripe image separated by light and dark, and decodes and recovers the image to realize data communication. However, the fluctuation of gray value in the process of data transmission will affect the bit error rate (BER), transmission distance, and data rate in the process of communication. A new demodulation scheme of OCC signal is proposed. The adaptive image enhancement algorithm based on expansion corrosion is used to eliminate the overall fluctuation of gray value, and the expansion algorithm is used to eliminate the local fluctuation of gray value. It is comprehensively processed from the overall and local aspects to eliminate the fluctuation of gray value to the greatest extent and improve the accuracy of judgment, so as to improve the communication performance of the system. To verify the performance of the proposed scheme, BER under different transmission distance and data rate is evaluated. The experimental results show that the average BER of the proposed scheme is two orders of magnitude lower than that of the traditional signal demodulation algorithm.

Key words optical communications; visible-light imaging; cell phone camera; shading effect; demodulation algorithm

OCIS codes 060.4510; 070.4340; 100.2000

1 引言

可见光通信(VLC)是一种新兴的无线光通信

技术^[1-3],该技术采用室内照明白光发光二极管(LED)作为光源,通过使用高频率的调制信号驱动LED进行闪烁变化,实现数据通信,可应用于室内

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-04-25; 录用日期: 2021-06-15

基金项目: 北京市融合网络与泛在业务工程技术研究中心国家级基地培育计划(FRFBD-20-11A)

通信作者: *lffeng@ustb.edu.cn

定位导航^[4-6]、水下通信^[7]等各个领域。随着不断增强的高数据传输速率、超宽带宽等方面的需求,传统的基于射频的无线通信面临着频谱资源紧张等严峻问题。蔚然兴起的 VLC 因频谱资源丰富、绿色节能、成本低廉、数据传输速率高等优点恰可作为现有无线通信的有效补充,以解决频谱资源短缺等问题^[8]。

智能手机的发展,为一种特殊的 VLC 技术——可见光成像通信(OCC)^[9-10]的实际应用铺设了硬件基础。如何高效解调是 OCC 研究中亟需解决的问题。在 OCC 中,列矩阵的选择和阈值方案是信号解调的关键。为了缓解晕染效应对解调性能的影响,文献[11]提出了一种选取晕染效应周围的列来解调信号的列选取算法,该方案选取了对比度较高的区域实现信号的恢复,但未考虑灰度值在该区域的波动情况。文献[12]则选取了整张条纹图像来解调信号,该方案明显降低了复杂度,但未消除晕染效应对系统性能的影响。传统的阈值方案多数基于多项式拟合(如三阶多项式拟合^[13])和自适应阈值算法^[14]。然而,基于多项式拟合的阈值分割方法不能抵抗灰度值的波动,且具有很高的计算复杂度。另外,在不使用曲线拟合阈值方案的情况下,Zhang 等^[15]提出了一种基于边界像素的分段线性函数阈值方法来提高数据的精度。最新的研究中,Meng 等^[12]提出了一种新的求导判决方案,求导方法作为一种新的阈值方法,不仅操作简单,且只需要考虑亮暗条纹边界处灰度值的变化情况,但该解调方案并不能从根本上消除灰度值波动。灰度值的波动有 2 种情况:灰度值的整体波动和灰度值的局部波动。灰度值的整体波动是 LED 的发光功率不均匀导致的,即当 LED 发射光经光学透镜被投射到摄像头图像传感器时,不同位置处的像素接收到的光功率不

相同,进而灰度值也不相同,并且呈现以 LED 发射光为中心向四周逐渐减小的趋势。灰度值的局部波动是由于电容效应的影响,亮暗条纹转换中间呈现出非亮非暗的条纹,导致亮暗条纹的分界不显著^[16]。灰度值波动严重会导致灰度值点不能分布在阈值两侧,影响灰度值转化为逻辑值的正确率,进而影响系统的性能。针对以上问题,本文设计了一种新型的 OCC 信号解调方案。首先采用基于感兴趣区域(ROI)提取的晕染消除方法缓解晕染效应的影响;其次采用基于膨胀腐蚀的自适应图像增强算法进行图像增强,从而消除灰度值的整体波动;然后采用膨胀操作消除局部灰度值波动;最终采用求导判决等一系列措施完成信息的解调,提升系统的通信性能。

2 系统模型

图 1 为 OCC 系统模型。发送端(Tx)首先对原始数据采用不归零开关键控(NRZ-OOK)的调制方式进行调制。为避免出现发送端发送的二进制数据包含一长串连续的“1”或者“0”导致 LED 光源出现肉眼可见的闪烁现象而影响照明使用的情况,在 NRZ-OOK 调制后再进行曼彻斯特编码,编码后的信息经 LED 驱动电路用于控制 LED 发光。接收端(Rx)根据 LED 发出的可见光信号频繁闪烁的特性和手机 CMOS 图像传感器的卷帘快门工作方式捕获到具有明暗条纹形式的图像。捕获到条纹图像后,对图像进行一系列的处理,包括 ROI 提取、图像增强、膨胀算法和求导判决等,最终恢复发送端传输的数据信息。经过一系列操作解调出信息后,将每帧图像得到的比特序列与原始发送序列作对比,即可得到本次实验的误码率(BER)数据。

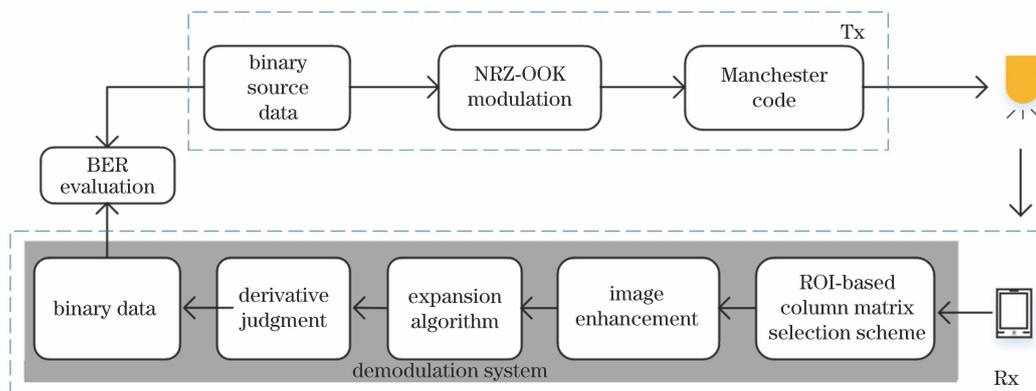


图 1 OCC 系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of OCC system

图像传感器的卷帘工作方式如图 2 所示。当 LED 不发送脉冲信号时,传感器对应列像素表现为暗条纹,相当于发射端发送比特信息“0”;当 LED 发送高电平脉冲信号时,对应列像素表现为亮条纹,相当于发射端发送比特信息“1”。上述过程持续到所有行像素曝光完成,最终形成亮暗相间的条纹图像。不同行像素包含了不同时刻的可见光信息,通过对该条纹图像进行解调,就可以提取出图像中包含的二进制信息,从而恢复出发送端的原始信息。

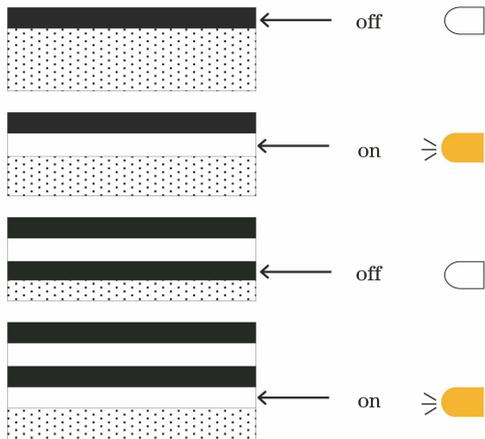


图 2 卷帘快门工作方式

Fig. 2 Working mode of roller shutter

3 新型解调方案设计

文献[12]提出了一种新型的采用导数来进行解调的方法,该方法利用临界灰度代替函数拟合来对图像进行解码。首先计算每行图像矩阵的特征灰度值;然后导出灰度值曲线,确定每一个临界灰度值的位置;最后对灰度值进行二值化和解码。此判决方法不仅操作简单,且只需要考虑亮暗条纹边界处灰度值的变化情况。但该解调方案并不能从根本上消除灰度值波动,利用求导的方法并不能准确解调出原始信息。

新型可见光成像通信信号解调方案主要分为 4 个阶段:1)采用文献[14]中的基于 ROI 提取的晕染消除方法缓解晕染效应的影响;2)采用基于膨胀腐蚀的自适应图像增强算法来进行图像增强并提升亮暗条纹的对比度,消除灰度值的整体波动;3)利用膨胀算法消除灰度值的局部波动;4)采用求导判决措施完成信息的解调。

3.1 基于膨胀腐蚀的自适应图像增强算法

基于膨胀腐蚀的自适应图像增强算法来源于形态学操作中的膨胀运算和腐蚀运算。膨胀运算求结构元素范围内的最大值,腐蚀运算使邻域中心值变为结构元素内的最小像素值。膨胀使得图像中的亮

部增多,反之,腐蚀使得图像的暗部增多。通过膨胀后的图像与原图像做差,保留条纹图像的局部亮细节;通过原图像与腐蚀后的图像做差,保留条纹图像的局部暗细节。 α_1, α_2 为控制系数,分别控制要增强的局部亮细节和暗细节的程度。在原图的基础上加上对局部亮细节的调整数,减去对局部暗细节的调整数,使得在原图的基础上,亮的地方更亮,暗的地方更暗,从而得到增强后的图像。记原图像为 I ,对图像的腐蚀运算为 $E(I)$,膨胀运算为 $D(I)$ 。

条纹图像中局部暗细节 $P_1(I)$ 和局部亮细节 $P_2(I)$ 的表达式为

$$\begin{cases} P_1(I) = I - E(I) \\ P_2(I) = D(I) - I \end{cases} \quad (1)$$

为实现图像的自适应增强,控制系数 α_1 和 α_2 通过求取以图像中各个像素点为中心的局部区域的最小值和最大值的偏差来获得。若所选局部区域的窗口大小为 $n \times n$ (n 为整数), x_i 为灰度值, e 为灰度值中的局部最大值或最小值,则偏差公式可表示为

$$V(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - e)^2. \quad (2)$$

当 e 取最大值时,得到局部最大值的偏差 V_d ;取最小值时,得到局部最小值的偏差 V_e 。得到偏差后,两个控制系数可表示为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{A_e}{\sqrt{V_e}} \\ \alpha_2 = \frac{A_d}{\sqrt{V_d}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: A_d 和 A_e 是输入参数,分别控制膨胀和腐蚀对比度增强的数量。

为了找到局部窗口宽度 n, A_d 和 A_e 的理想取值,采用图像增强后的标准差作为评价指标^[17]进行了实验。标准差越大说明图像的对比度越大,增强效果越明显。图 3 反映了在 A_d 和 A_e 固定为 300 和 200 的情况下,参数 n 对增强后图像标准差的影响。从图中可以看出:当 $n = 10$ 时,增强后的图像标准差为 117.97;当 n 增大到 50 时,标准差增加到 120.91; n 持续增大到 100 的过程中,标准差基本稳定在了 120 和 121 之间,图像增强效果不随着 n 的增大而发生太大的改变。故把使得标准差最大的值,即 $n = 50$ 作为理想取值。

为了进一步确定 A_d 和 A_e 的理想取值,在 $n = 50$ 的情况下,得出了这两个参数在不同取值时增强后的图像标准差的变化情况,如表 1 所示。从表 1 中可以看出:随着这两个参数的增大,图像标准差变

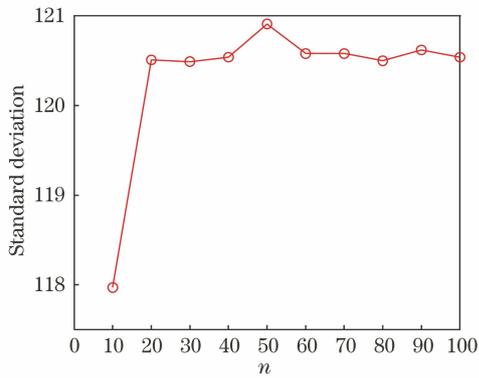


图 3 图像标准差随参数 n 的变化

Fig. 3 Standard deviation of image varying with parameter n

表 1 图像标准差随参数 A_d 和参数 A_e 的变化情况

Table 1 Standard deviation of image varying with parameter A_d and parameter A_e

Parameter	$A_d=50$	$A_d=100$	$A_d=150$	$A_d=200$	$A_d=250$	$A_d=300$
$A_e=50$	49.91	86.94	107.36	113.72	113.83	112.67
$A_e=100$	44.35	72.64	104.88	116.38	118.07	118.20
$A_e=150$	38.37	69.96	100.06	116.26	119.37	120.19
$A_e=200$	32.67	63.89	94.53	114.84	119.58	120.91
$A_e=250$	27.58	58.00	88.69	112.08	119.20	120.23
$A_e=300$	23.09	52.34	82.94	108.17	118.28	120.11

大,图像对比度也增大;当两个参数增加到一定程度时,标准差同样稳定在了 120 附近,此时图像两端的对比度已得到明显增强,标准差的微小波动不会对最后的结果产生较大影响。故在实验中同样选取使得标准差最大的值,即 $A_d=300$ 和 $A_e=200$ 作为理想取值。

故增强后的图像 R 的表达式为

$$R = I + \frac{A_e}{\sqrt{V_e}} \times P_1(I) - \frac{A_d}{\sqrt{V_d}} \times P_2(I) \quad (4)$$

把(1)式中求取的局部暗细节 $P_1(I)$ 和局部亮细节 $P_2(I)$ 代入(4)式,(4)式重写为

$$R = I + \frac{A_e}{\sqrt{V_e}} [I - E(I)] - \frac{A_d}{\sqrt{V_d}} [D(I) - I] \quad (5)$$

图 4 为原始条纹图像和增强后的条纹图像。图 5 为原图的灰度值和增强后图像的灰度值变化情况。从图 4 和图 5 中可以看出,经图像增强后,图像两端的灰度值得到明显增强,明暗条纹对应的灰度值差异明显变大,消除了灰度值的整体波动,更易于条纹的判决。

3.2 基于膨胀算法的局部灰度值波动消除算法

膨胀算法的基本思想是用具有一定形态的结构元素去度量 and 提取图像中的对应形状,以达到对图

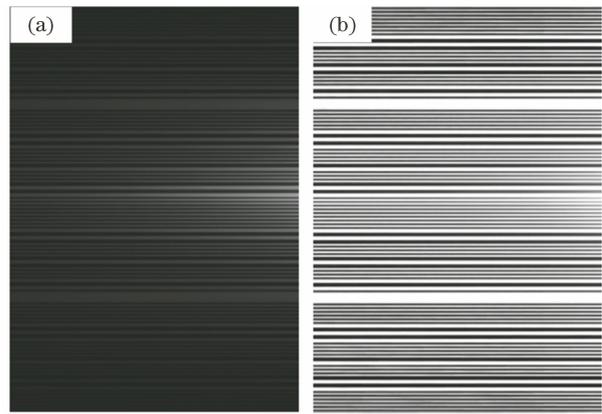


图 4 条纹图像。(a)原始图像;(b)增强后的图像

Fig. 4 Stripe images. (a) Original image;

(b) image after enhancement

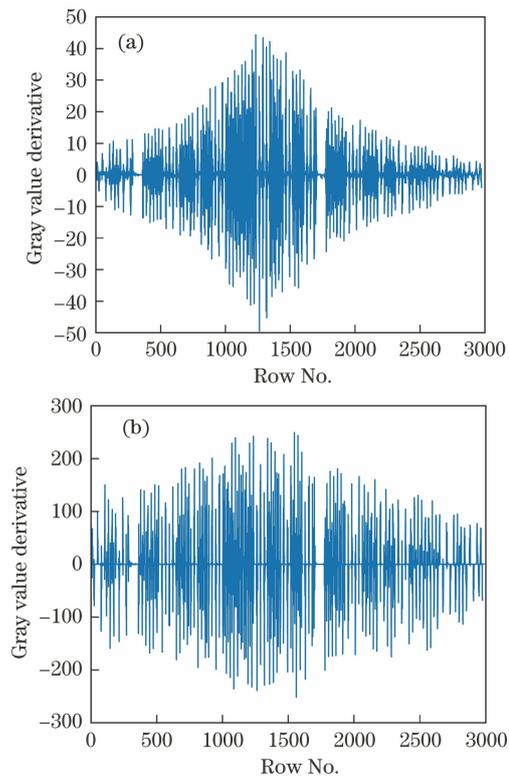


图 5 灰度值导数。(a)原始图像;(b)增强后的图像

Fig. 5 Derivative of gray value . (a) Original image;

(b) image after enhancement

像进行分析和识别的目的。原理是选取一个核算子,对图像的每个像素进行遍历处理,修改像素值为所有像素中的最大值。该操作可以将图像外围的突出点连接并向外延伸,简化图像数据,保持它们基本的形状特性,并除去不相干的结构。经过图像增强后,条纹图像的整体灰度波动得到缓解,但解调过程中存在的灰度值局部波动严重影响图像的解调性能。膨胀算法可消除灰度值局部波动的影响,该算法的具体步骤如下。

1) 选取核算子。

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2) 将核算子 B 与条纹图像的灰度值矩阵 A 做卷积计算,如图 6 所示,得到覆盖区域的像素最大值,并用此最大值替代该点的像素值。

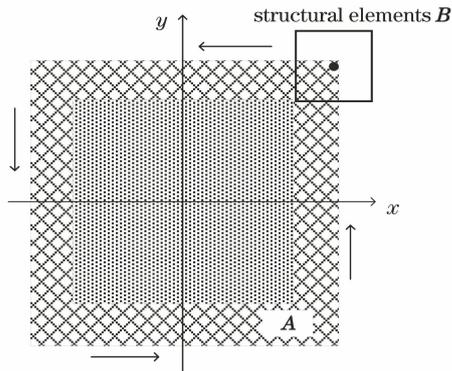


图 6 操作过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of operation process

3) 得到膨胀处理后的图像。图 7(a)、(b)分别为未经过膨胀处理和处理之后的灰度值导数,从图中可直观看出,膨胀操作可去除亮暗条纹边界处干扰,消除灰度值的局部波动,提高判决结果的准确性。

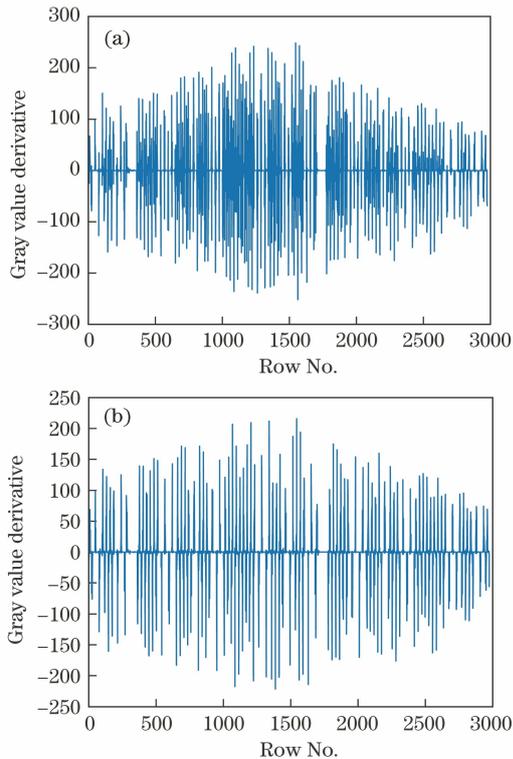


图 7 灰度值导数。(a)膨胀处理前;(b)膨胀处理后

Fig. 7 Derivative of gray value. (a) Before expansion; (b) after expansion

4 实验结果分析

实验采用华为 mate 20 手机摄像头作为接收器,内置相机的帧率为 60 frame/s,像素分辨率为 3968×2976 ,采用连拍方式得到条纹图像。VLC 数据包包含 8 位报头 $[0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0]$ 和不同数据速率的不同有效负载位长,32 位为 1.92 kbit/s (32 bit/frame \times 60 frame/s),64 位为 3.84 kbit/s,96 位为 5.76 kbit/s,128 位为 7.68 kbit/s。4 种不同的速率对应的位分辨率分别为 27.56,20.67,13.65,9.60。实验相关配置参数如表 2 所示。为了弥补帧与帧之间存在一个读出时间间隙的缺陷,本实验采用每帧重复发送两次数据包的方式传输信息。误码率是衡量任何通信算法和系统精度的重要指标,受多种因素的影响。实验从两个方面切入:1)手机摄像头与光源的间距;2)数据速率。受 LED 功率限制,收发器之间的间距设置为 7,10,15 cm。

表 2 实验配置参数

Table 2 Experimental configuration parameters

Experimental parameter	Value			
Frame rate / (frame \cdot s $^{-1}$)	60			
Pixel resolution	3968 \times 2976			
Data rate / (kbit \cdot s $^{-1}$)	1.92	3.84	5.76	7.68
Payload bit length / bit	32	64	96	128
Bit resolution / pixel	27.56	20.67	13.65	9.60

在收发器间距为 10 cm 的场景下,测试不同发送速率对系统误码性能的影响。为便于分析和比较,分析了所提解调方案、多项式拟合中的三次多项式拟合、自适应阈值算法、边界像素阈值方案以及传统的导数方案的误码率性能,结果如图 8 所示。实验结果表明:随着数据速率的增加,条纹图像中位分辨率减小,灰度值波动加剧,5 种解调方案的误码率都逐渐增大;所提方案在 1.92,3.84,5.76,7.68 kbit \cdot s $^{-1}$ 的数据速率下,误码率分别为 1.3×10^{-6} , 5.2×10^{-6} , 1.8×10^{-5} , 3.2×10^{-5} ,均优于其他解调方案的误码率。传统的导数方案在 4 种速率下的误码率分别为 4.2×10^{-6} , 5.0×10^{-5} , 1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-3} ,所提算法相比于传统的导数方案,误码率降低了约一个数量级,传统的导数方案并不能从根本上消除灰度值波动。多项式拟合算法中的三阶多项式拟合和自适应阈值拟合精度较低,灰度值并不能准确分布在拟合曲线的两侧;边界像素阈值方案使用场景有限,比传统的多项式方法解

码性能有所提高。

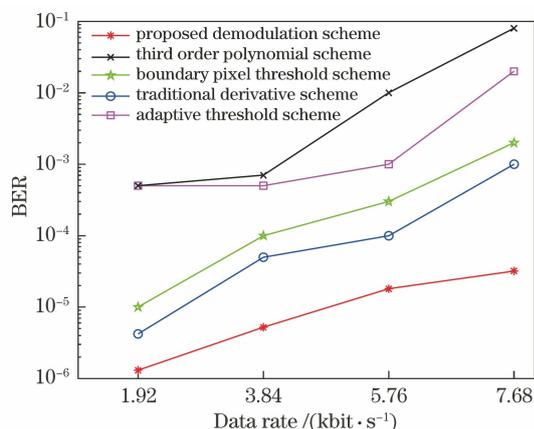


图 8 间距为 10 cm 时,不同数据速率下的误码率性能

Fig. 8 BER performances against different data rates under 10-cm spacing

利用基于膨胀与腐蚀的自适应图像增强算法提高了图像的对比度,消除了灰度值的整体波动;利用膨胀算法去除了亮暗条纹边界的噪声,有效消除了灰度值的局部波动,提高了判决信息的准确率。即使在高速率下,所提解调算法也展现出了优越的性能,在 7.68 kbit·s⁻¹ 的数据速率下误码率较传统算法降低了约两个数量级。

在数据速率为 7.68 kbit·s⁻¹ 时,测试了不同收发器间距对系统误码性能的影响,结果如图 9 所示。从图中可以看出:随着传输距离的增加,手机摄像头捕获到的亮暗条纹图像的清晰程度变差,黑白条纹的对比度降低,灰度值波动加剧,系统的误码率呈现逐渐增大的趋势,但在 15 cm 间距处也能满足 7% 的前向纠错(FEC)要求。

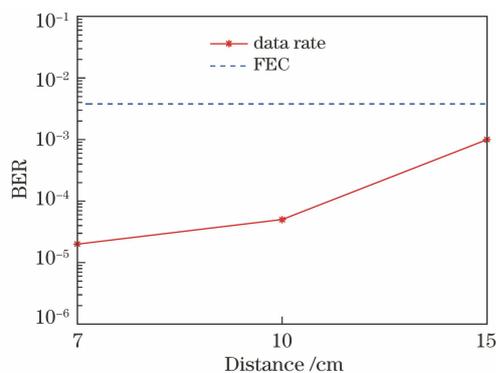


图 9 数据速率为 7.68 kbit·s⁻¹ 时,不同间距下的误码率性能

Fig. 9 BER performance under different distances with 7.68-kbit·s⁻¹ data rate

5 结 论

为提高可见光成像通信系统的解调性能,提出

了一种新型的解调方案。首先通过基于晕染消除的 ROI 提取方案消除晕染的影响,其次利用基于膨胀腐蚀的自适应图像增强算法进行图像增强,消除条纹图像灰度值的整体波动,再利用膨胀算法消除灰度值的局部波动,最终进行求导判决恢复出原始信息。所提方案从灰度值的整体波动和局部波动 2 个方面分别提供了解决方法,最大程度抵抗了灰度值的波动。与 4 种传统的解调算法相比,收发间距固定时,不同的数据速率下所提方案的解调性能均是最优的,且在 7.68 kbit·s⁻¹ 的数据速率下误码率较传统算法降低了约两个数量级。当数据速率固定为 7.68 kbit·s⁻¹ 时,收发距离为 15 cm 处的系统误码率也能满足 7% 的 FEC 要求。

参 考 文 献

- [1] Liu Y. Decoding mobile-phone image sensor rolling shutter effect for visible light communications[J]. Optical Engineering, 2016, 55(1): 016103.
- [2] Siddique I, Awan M Z, Khan M Y, et al. Li-Fi the next generation of wireless communication through visible light communication (VLC) technology[J]. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology, 2019: 30-37.
- [3] Gu W X, Feng L F. Modulation algorithm for implicit imaging communications based on visible light[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0306002. 谷五勋, 冯莉芳. 一种基于可见光的隐式成像通信调制算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0306002.
- [4] Ji Y Q, Xiao C X, Gao J, et al. A single LED lamp positioning system based on CMOS camera and visible light communication[J]. Optics Communications, 2019, 443: 48-54.
- [5] Zhu H Y, Zhu Y J. Invisible information casting system based on visible light communication[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0906008. 朱环宇, 朱义君. 基于可见光通信的隐式信息服务系统[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0906008.
- [6] Zhang X F, Wang M, Wang J. Research status and development of indoor positioning based on visible light communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100001. 张晓锋, 王敏, 王瑾. 基于可见光通信室内定位的研究现状与发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100001.
- [7] Uema H, Matsumura T, Saito S, et al. Research and development on underwater visible light communication systems[J]. Electronics and Communications in Japan, 2015, 98(3): 9-13.

- [8] Zhang T T, Zhou J, Zhang Z S, et al. A performance improvement and cost-efficient ACO-OFDM scheme for visible light communications[J]. Optics Communications, 2017, 402: 199-205.
- [9] Chow C W, Shiu R J, Liu Y C, et al. Using advertisement light-panel and CMOS image sensor with frequency-shift-keying for visible light communication[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 12530-12535.
- [10] Danakis C, Afgani M, Povey G, et al. Using a CMOS camera sensor for visible light communication[C]//2012 IEEE Globecom Workshops, December 3-7, 2012, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1244-1248.
- [11] He J, Jiang Z W, Shi J, et al. A novel column matrix selection scheme for VLC system with mobile phone camera[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(2): 149-152.
- [12] Meng Y M, Chen X B, Pan T H, et al. HyperSight: a precise decoding algorithm for VLC with mobile-phone camera[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(4): 1-11.
- [13] Zhang Z S, Zhang T T, Zhou J, et al. Performance enhancement scheme for mobile-phone based VLC using moving exponent average algorithm[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1-7.
- [14] Liu X J, Feng L F, Chen D Y. An efficient demodulation scheme for VLC signal image processing[J]. Optoelectronics Letters, 2020, 16(3): 211-215.
- [15] Zhang Z S, Zhang T T, Zhou J, et al. Thresholding scheme based on boundary pixels of stripes for visible light communication with mobile-phone camera[J]. IEEE Access, 2018, 6: 53053-53061.
- [16] Zhang J, Zheng X Y, Liu J H. Design of demodulation algorithm for CMOS camera based visible light communication[J]. Study on Optical Communications, 2019(5): 19-21, 36.
张佳, 郑晓玉, 刘继红. 基于 CMOS 相机的可见光通信解调算法设计[J]. 光通信研究, 2019(5): 19-21, 36.
- [17] Tang Z L, Liu X, Zhang X. Adaptive enhancement algorithm for uneven illumination image[J/OL]. Computer engineering and application: 1-9 [2021-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20210311.1145.010.html>.
汤子麟, 刘翔, 张星. 光照不均匀图像的自适应增强算法[J/OL]. 计算机工程与应用: 1-9 [2021-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20210311.1145.010.html>.