

基于室外可见光通信系统检测算法

秦 岭, 宋科宁, 李宝山, 杜永兴 *

(内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 针对传统室外可见光通信系统中盲似然检测算法存在的问题, 提出了一种改进的盲似然检测算法, 即通过在发射端设置脉冲位置调制 (PPM) 帧头, 接收端按帧检测分组和约束搜索。分析比较了实际室外环境下固定阈值检测、均值检测、传统盲似然检测和改进盲似然检测算法的系统误码性能。仿真结果表明: 该算法有效地解决了平板问题, 降低了复杂度。当湍流强度、背景光强度、传输距离和发光强度改变时, 与其它检测算法相比, 改进的盲似然算法的准确度更高, 更适合应用于室外可见光通信。

关键词: 可见光通信; 盲似然检测; 脉冲位置调制; 大气湍流

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)02-0009-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.02.002

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Detection algorithm based on outdoor visible light communication system

QIN Ling, SONG Kening, LI Baoshan, DU Yongxing *

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: Aiming at the problems of blind likelihood detection algorithm in traditional outdoor visible light communication system, this paper proposes an improved blind likelihood detection algorithm. By setting the pulse position modulation (PPM) header at the transmitting end, the receiving end detects the packet and constrains the search by frame. The system error performance of fixed threshold detection, mean detection, traditional blind likelihood detection and improved blind likelihood detection algorithm in real outdoor environment is analyzed and compared. The simulation results show that the algorithm effectively solves the plate problem and reduces the complexity. When the turbulence intensity, background light intensity, transmission distance and luminous intensity change, the improved blind likelihood algorithm is more accurate than other detection algorithms, and is more suitable for outdoor visible light communication.

Key words: visible light communication; blind likelihood detection; pulse position modulation; atmospheric turbulence

0 引言

可见光通信具有保密性高、传输速率高和节能环保等优点, 被广泛应用到各个领域。目前室外可见光通信主要应用在智能交通中^[1-3]。但是, 室外可见光通

信容易受到大气湍流和背景光的影响, 导致接收端接收到的信号忽高忽低, 很难准确检测信号。室外可见光通信系统应用较广泛的检测算法包括最大似然检测、均值检测等, 其中最常用的算法是盲似然检测算法^[4,5]。盲似然检测准确度较高, 但容易出现平板问题、复杂度高且实用性较差。Sun Z.G 等人提出添加非零导频位来解决平板问题, 但是降低了带宽利用率^[6]。Zhu Y 等人首次提出分块编码方案来解决唯一标识问题和误码平板问题, 但是计算量明显增加^[7]。Dabiri M.T 等人提出了一种基于测试序列的广义的似然比检测算法, 减少了最大似然序列检测的似然比, 但是对于长序列, 计算量同样很大^[8]。Sadough S 等人提出了分块检测的盲似然检测算法, 该算法结构简单, 虽然降低

收稿日期: 2018-08-30。

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61501266) 资助。

作者简介: 秦岭 (1979-), 女, 内蒙古包头人, 博士, 副教授, 主要研内容包括: 智能交通领域的可见光通信、大气激光通信中的调制解调和室内定位技术。现任 EI 收录的中文核心期刊《光学学报》的审稿专家, 在重要期刊和国际学术会议上公开发表论文 20 余篇, 其中被 SCI、EI、ISTP 三大索引检索 4 篇, 主持和参加国家自然科学基金 3 项, 获得发明专利 1 项。

* 通信作者: 杜永兴 (Email: dyxql@imust.edu.cn)。



了复杂度,但是由于脉冲位置调制(PPM)的脉冲个数少,在分块长度较短时依旧会出现空窗现象,导致误码率升高^[9]。

针对当前已有检测算法用于 PPM 的室外可见光通信系统存在的问题,本文提出一种改进的盲似然检测算法。

1 系统模型的建立

本文采用基于 PPM 的室外可见光通信系统,如图 1 所示。信号首先经过 PPM,利用驱动电路将信号调制到 LED 灯上以光信号的形式发送出去,穿过不同强度的大气湍流和背景光后,在接收端透镜上汇聚的光能量由光电探测器接收;随后利用检测算法抑制大气湍流和背景光的影响,进行 PPM 解调,恢复出数据;最后进行误码率计算。接收端信号的表达式如下:

$$r = \eta sh + n_0 \quad (1)$$

式(1)中, $s = [s_1, s_2, \dots, s_L]^T$ 为发送信号, s_i 是发送的 PPM 信号, $i = 1, 2, \dots, L$, $s_i \in \{0, 1\}$ 。采用带帧头的 8-PPM 进行调制,这样调制后的一帧信息总共 288 个时隙,由帧头和帧头组成。 h 是大气湍流产生的信道衰落系数; n_0 是加性高斯白噪声,均值为 0,方差为 σ^2 ; η 是光电转换系数, $r = [r_1, r_2, \dots, r_L]^T$ 是 L 行第 1 列的接收信号。

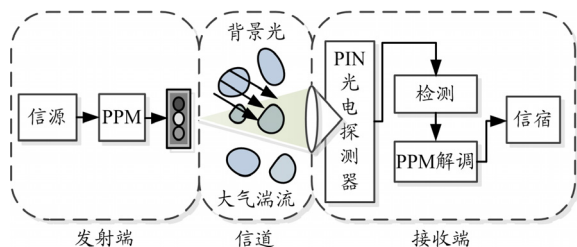


图 1 基于 PPM 的室外可见光通信系统

2 传统的检测算法

目前,在可见光通信系统传统的检测算法中,主要包括固定阈值检测、均值检测和盲似然检测。

2.1 固定阈值检测

固定阈值检测是根据接收到的信号中固定门限值进行判决,由于在多变的环境下光电探测器接收到的光强值相差很大,故容易形成误判^[10]。

2.2 均值检测

均值检测是将接收端中一定长度的数据块的均值作为该数据块的判决门限,但是数据块的长度对均值检测的系统性能影响很大。当数据块的长度较短

时,“0”与“1”的概率相差悬殊,此时就会产生很大的估计误差,导致接收端不能准确地从数据块中提取信息^[11]。

2.3 盲似然检测

盲似然检测是接收端在信道的数学模型和统计参数未知的条件下,通过对接收到的数据块进行处理,即可联合完成对信道的准确估计和对信号的检测^[12]。盲似然检测算法的复杂度与数据块长度有关,数据块越长,复杂度越高。但是由于 PPM 中脉冲个数极少且分布不均匀,当数据块长度较短时,容易出现平板效应;当数据块较长时,准确性增加的同时复杂度也上升,无法在实际的室外可见光通信中应用。

3 改进的盲似然检测算法

本文中 PPM 信号一帧的长度为 L_p ,设置约束条件 $n = L_p$ 。接收端将总长度为 L 的信号按帧检测分组后变为:

$$r^T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $L = m \times n$ 。按帧检测分组可以确保分组后每一个数据块中都有脉冲,无需再增加额外的脉冲,这样不仅能够避免传统盲似然检测中出现的平板效应,又能提高带宽利用率。

根据最大似然序列检测的原理可得^[13]:

$$\bar{s} = \arg \min ||r - \eta sh||^2 \quad (3)$$

其中, $\bar{s}$ 为信号发送序列。再对 r^T 的第 i 行进行展开:

$$||r_{ij} - \eta s_{ij} h||^2 = \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 - 2\eta h \sum_{j=1}^n r_{ij} s_{ij} + \eta^2 h^2 \sum_{j=1}^n s_{ij}^2 \quad (4)$$

其中, r_{ij} 表示接收端第 i 行 j 列的值, s_{ij} 表示发射端第 i 行 j 列的值。设发射端带帧头的 PPM 信号中一帧中脉冲的个数为 λ , $\lambda \ll n$,第 i 行重新排序得 $g_1 \geq g_2 \geq \dots \geq g_{\lambda}$,令 $G(k) = g_1 + g_2 + \dots + g_k$, $1 \leq k \leq \lambda$ 。由式(4)可得:

$$\begin{aligned} ||r_{ij} - \eta s_{ij} h||^2 &= \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 - 2\eta h \sum_{j=1}^{\lambda} r_{ij} s_{ij} + \eta^2 h^2 \sum_{j=1}^{\lambda} s_{ij}^2 \\ &= \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 - 2\eta h G(k) + \eta^2 h^2 k^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, k 表示接收端每个数据块接收到脉冲的个数。将式(5)看成关于 h 的函数并求导,令导数为 0,求得 h 为:

$$h = \frac{G(k)}{\eta k} \quad (6)$$

代入式(5)可得:

$$||r_{ij} - \eta s_{ij} h||^2 = \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 - \frac{G^2(k)}{k} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \hat{k} = \arg\max_k \frac{G^2(k)}{k} \\ 1 \leq k \leq \lambda \end{cases} \quad (8)$$

其中, $1 \leq k \leq \lambda$ 为约束条件, 这样设置不仅大大减少了对每一行中 $\hat{k}$ 的搜索复杂度 ($\hat{k}$ 表示估计出来的接收端脉冲个数), 而且还能保证在接收端低信噪时能够剔除一些边缘噪声, 提高算法准确度。因此判决条件为:

$$\begin{cases} g_{ik} = 1, \hat{k} = \lambda, k \leq \hat{k} \\ g_{ik} = 0, \hat{k} = \lambda, \hat{k} < k \leq n \\ g_{ik} = 0, \hat{k} \neq \lambda, k \leq n \end{cases} \quad (9)$$

4 仿真结果与分析

本文按照图 1 建立基于 PPM 的室外可见光通信仿真模型。采用随机相位屏模拟大气湍流, 湍流内尺度 $l_0=0.01\text{m}$, 外尺度 $L_0=10\text{m}$, 空间频率 $f=1/L_0$, 发光面大小 $D=0.2\text{m}$, 采样点个数为 100×100 。折射率结构常数设置为 $10^{-17} \text{m}^{-2/3} \sim 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ 。其它参数如表 1 所示。

表 1 其它仿真参数

参数	数值
LED 的波长	625nm
单个 LED 灯发光强度	2.5cd
LED 的半功率角	15°
接收机接收视角	7.6°
接收机垂直倾角	85°
光电探测器转换效率	0.4
光电探测器感应面积	0.8mm ²
发射机发射的平均光功率	74mW
内部折射率	1.7
接收机滤波器增益	1.0

传统盲似然检测算法的复杂度来自对接收信号进行排序的复杂度, 当数据块长度为 L 时, 对接收的信号进行快速排序, 其复杂度为 $O(L \log_2 L)$; 而改进的盲似然检测算法中通过设置帧头长度和添加约束条件将搜索范围缩小至前 λ 项, 无需对后面的数值进行迭代计算, 此时快速排序的复杂度变为 $O(\lambda \log_2 \lambda)$ 。由于 $\lambda \ll L$, 因此改进的盲似然检测算法的复杂度远远低

于传统的盲似然检测算法, 并且分块长度越长, 效果越明显。

在 $m=1$ 且分块长度分别为 70、140 时, 设置约束条件 $\lambda=4$, 传统盲似然检测算法与改进的盲似然检测算法迭代次数如表 2 所示, 系统误码率如图 2 所示。

表 2 两种算法迭代次数比较

分块长度	传统盲似然算法 迭代次数	改进盲似然算法 迭代次数
$L=70$	2625	90
$L=140$	10150	160

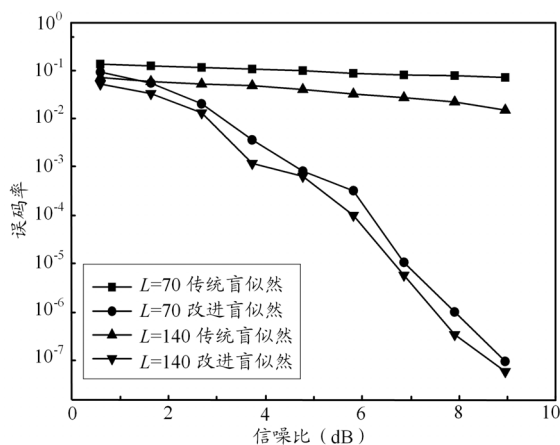


图 2 不同分块长度下系统误码率图

由表 2 可知, 改进盲似然算法的复杂度大大降低。在图 2 中, 随着信噪比的增加, 传统盲似然检测算法的系统误码率几乎不变且出现平板效应, 难以准确恢复信号; 而改进的盲似然算法的系统误码率明显下降, 能够满足通信的要求。

设置参数 $m=128, n=289, \lambda=4$, 在湍流强度分别为强湍流 ($10^{-13} \text{m}^{-2/3}$)、中等湍流 ($10^{-15} \text{m}^{-2/3}$) 和弱湍流 ($10^{-17} \text{m}^{-2/3}$) 条件下不同检测算法的系统误码性能的仿真结果如图 3、图 4 和图 5 所示。

在图 3 中, 由于强湍流的影响, 接收端接收的信号波动幅度大, 判决条件难以确定, 因此 4 种检测算法的误码率相差不大, 但是仍可间断使用; 而改进的盲似然检测算法系统误码率始终是最底的。在图 4 中, 固定阈值检测的系统性能最差, 传统盲似然检测略优于均值检测, 在误码率为 10^{-4} 时, 改进盲似然检测算法所需的信噪比比传统盲似然检测算法的信噪比降低 1dB。在图 5 中, 相较于强湍流和中等湍流, 弱湍流对系统的影响最小, 改进算法的优势最明显, 在误码率低于 10^{-5} 时, 改进盲似然检测算法所需的信噪

比比传统盲似然检测算法的信噪比降低 3dB。这是由于改进盲似然检测算法搜索范围受到约束条件的限制,降低对信道统计特性的依赖,滤掉边缘噪声,最终达到抑制湍流的效果。

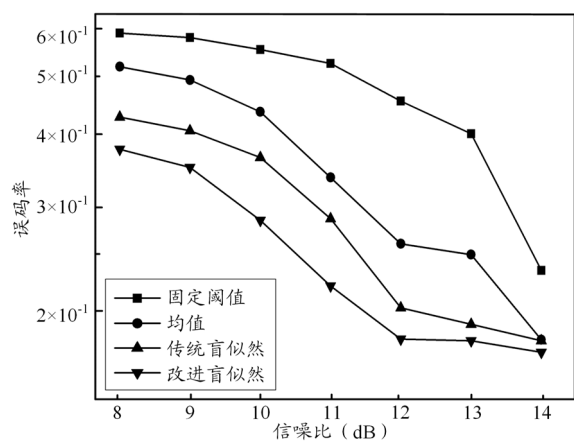


图3 强湍流下4种检测算法的误码率图

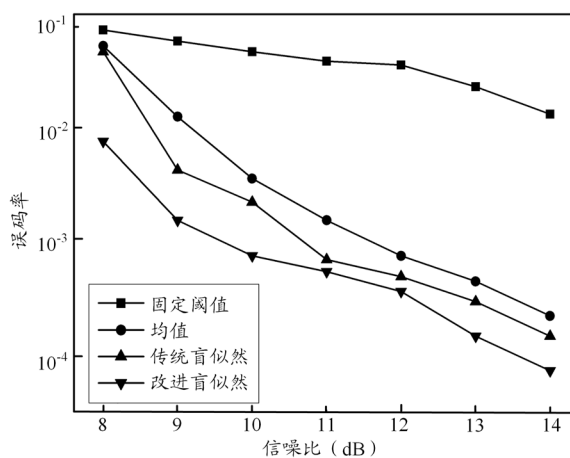


图4 中等湍流下4种检测算法的误码率图

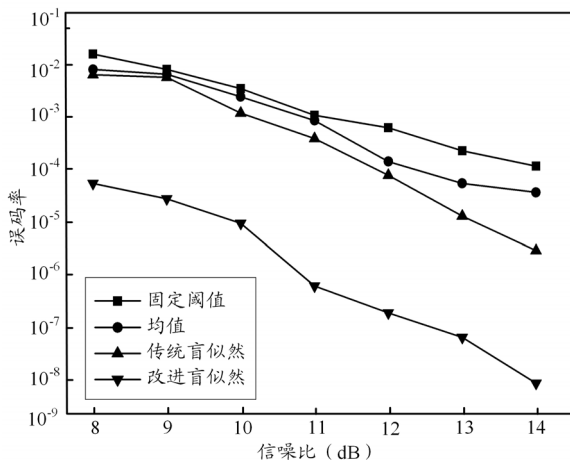


图5 弱湍流下4种检测算法的误码率图

背景光功率采用黑体辐射模型来计算^[14,15],在不同强度的背景光下,4种检测算法的性能仿真结果分别如图6、图7所示。

由图6可以看出,当接收面功率小于1.5W时,直射背景光的影响较大,LED交通灯的信号几乎淹没在直射背景噪声中,难以准确区分信号与噪声。4种检测算法的系统误码率相差甚微,但是由于改进盲似然算法可以设置约束条件来准确区分噪声与信号,其检测准确度最高,并且随着接收面功率的增加,系统性能提升得越明显。当接收面功率大于1.5W时,改进盲似然检测算法所需的信噪比比传统盲似然检测算法的信噪比降低0.5dB。在图7中,相较于直射背景光情形,扩展背景光的影响较小。在接收面功率大于2.5W时,改进盲似然检测算法的系统误码率甚至达到了 10^{-9} ,远低于其它检测算法的系统误码率。由此可见,改进的盲似然算法能够抑制背景光的影响,提高系统

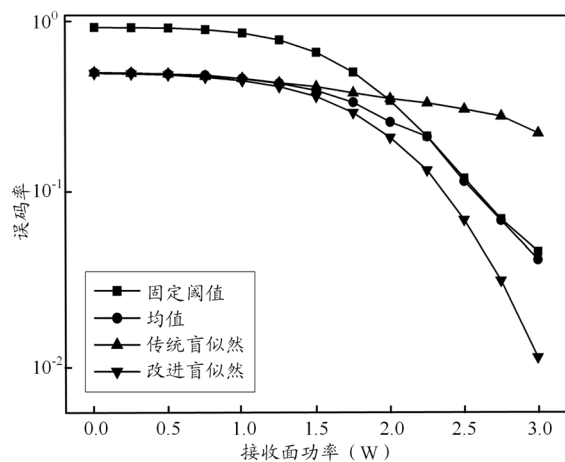


图6 直射背景光下4种检测算法的误码率图

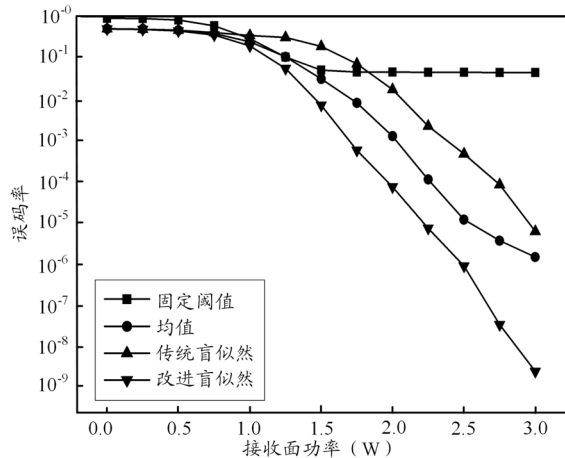


图7 扩展背景光下4种检测算法的误码率图

性能。在湍流强度为 $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 在不同发光强度和传输距离下, 室外可见光通信系统性能的仿真结果如图 8、图 9 所示。

从图 8 可以看出, 随着传输距离的增加, 并且由于传输信号更容易受到大气湍流的影响, 接收端检测信号的阈值变化剧烈, 因此固定阈值检测算法无法满足通信需求。虽然其它 3 种检测算法的误码率也在缓慢升高, 但是相较于均值检测和传统盲似然检测, 改进的盲似然检测的系统误码

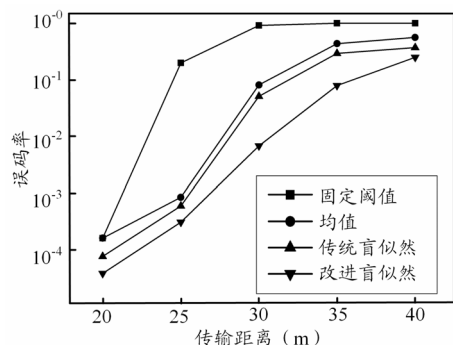


图 8 不同距离下检测算法的误码率图

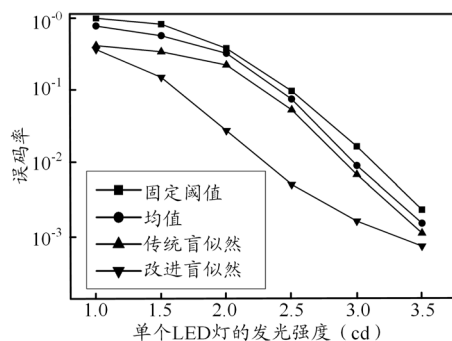


图 9 不同发光强度下检测算法的误码率图

率始终最低, 在误码率低于 10^{-2} 的前提下, 能够实现 30m 的通信距离。从图 9 可以看出, 随着单个 LED 灯发光强度的增大, 改进的盲似然检测算法的误码率下降趋势最明显。

5 结束语

针对传统室外可见光通信中盲似然检测算法存在的问题, 本文提出了一种改进的盲似然检测算法。该算法通过设置帧头和按帧检测分组, 解决了平板问题。约束搜索滤掉了边缘噪声, 减少了计算量, 提高了检测准确度。该算法对信道统计特性的依赖性大大降低, 能够在复杂的环境中准确恢复信号, 提高系统性能。仿真结果表明: 改进的盲似然检测算法的系统误码率明显下降, 复杂度明显降低, 稳定性大大提高, 并且在不同的室外环境中, 相较于其它 3 种检测算法, 改进的盲似然检测算法对大气湍流和背景光的抑制效果最好, 更适合应用到室外可见光通信系统, 进而使得系统在保持高速率传输的同时提高了通信质量, 为加速室外可见光通信实用化的进程奠定了坚实的

基础。但是, 当湍流足够强时, 信道衰减变化的幅度范围更大, 在较低的信噪比下, 该算法不能准确得到发送的脉冲数, 对强湍流的抑制作用不明显。

参考文献:

- [1] MARSHOUD H, MUHAIDAT S, SOFOTASIOS P C, et al. Optical Non-Orthogonal Multiple Access for Visible Light Communication [J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 82-88.
- [2] WANG Y, HUANG X, SHI J, et al. Long-range high-speed visible light communication system over 100-m outdoor transmission utilizing receiver diversity technology[J]. Optical Engineering, 2016, 55(5): 1-7.
- [3] GOTO Y, TAKAI I, YAMAZATO T, et al. A new automotive VLC system using optical communication image sensor [J]. IEEE Photonics journal, 2016, 8(3): 1-17.
- [4] 李芬红, 马朝华, 朱剑涛. 自由空间光通信的闭式次最优最大似然序列检测方法[J]. 激光杂志, 2015(11): 126-130.
- [5] 齐豫, 刘智, 倪小龙. 基于期望最大化的随机光信号最大似然检测算法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017(2): 90-93.
- [6] ZHU Y J, SUN Z G, ZHANG J K, et al. Training Receivers for Repetition-Coded MISO Outdoor Visible Light Communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1): 529-540.
- [7] ZHU Y, SUN Z, ZHANG J, et al. A Fast Blind Detection Algorithm for Outdoor Visible Light Communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1-8.
- [8] DABIRI M T, SADOUGH S, SAFI H. GLRT-Based Sequence Detection of OOK Modulation Over FSO Turbulence Channels [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(17): 1494-1497.
- [9] DABIRI M T, SADOUGH S. Generalized Blind Detection of OOK Modulation for Free-Space Optical Communication[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(10): 2170-2173.
- [10] TAN Z W, LIU H L. Adaptive decision directed impulse noise mitigate in power line communication[J]. IET Signal Processing, 2018, 12(3): 368-374.
- [11] KIM Y H, CHUNG Y H. Experimental outdoor visible light data communication system using differential decision threshold with optical and color filters[J]. Optical Engineering, 2015, 54(4): 1-3.
- [12] SONG T Y, KAM P Y. A Robust GLRT Receiver With Implicit Channel Estimation and Automatic Threshold Adjustment for the Free Space Optical Channel with IM/DD [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(3): 369-383.
- [13] ZHU Y J, SUN Z G, ZHANG J K, et al. A Fast Blind Detection Algorithm for Outdoor Visible Light Communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1-8.
- [14] 赵嘉琦, 许银帆, 李洁慧, 等. 强背景光下可见光大气湍流信道建模及分集接收技术[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 9-15.
- [15] CHI N, ZHANG M J, ZHOU Y J, et al. 3.375Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing PAM-8 modulation with phase shifted Manchester coding [J]. Optics Express, 2016, 24(19): 21663-21673.