

基于 SVM 的水下 LED 可见光通信信号检测方法

李晓记^{1,2}, 杜卫海^{1,2}, 李燕龙², 阎威龙², 高天²

(1. 桂林电子科技大学 海洋工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 认知无线电与信息处理教育部重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对传统直流偏置正交频分复用(DCO-OFDM)水下发光二极管(LED)可见光通信系统的信号检测性能较差且通信距离较近的问题, 采用了基于支持向量机(SVM)的水下 LED 可见光通信信号检测方法, 即先对信号数据进行网格搜索和交叉验证, 得到最优的 SVM 模型, 再用所得模型对接收信号做出判决。仿真结果表明: 在相同通信距离下且低信噪比(SNR)时, 基于 SVM 检测的系统性能与基于直接判决最小均方(DD-LMS)检测的结果相当, 高 SNR 时, 前者优于后者; 在相同误码率且通信距离小于 3 m 时, 基于 SVM 检测的系统通信距离略远于 DD-LMS 检测。

关键词: 水下发光二极管可见光通信; 支持向量机; 直接判决最小均方检测; 网格搜索; 交叉验证

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)05-0050-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



SVM-based underwater LED visible light communication signal detection method

LI Xiaojie^{1,2}, DU Weihai^{1,2}, LI Yanlong², YAN Weilong², GAO Tian²

(1. College of Ocean Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Ministry of Education Key Lab of Cognitive Radio and Information Processing, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor signal detection performance and short communication distance of traditional direct-current biased orthogonal frequency division multiplexing (DCO-OFDM) underwater light-emitting diode (LED) visible light communication system, a signal detection method of underwater LED visible light communication based on support vector machine (SVM) is proposed. Firstly, grid search and cross validation are performed on the signal data to obtain the optimal SVM model, then the received signal is judged by the model. The simulation results show that the system performance based on SVM is equivalent to that based on direct decision least mean square (DD-LMS) at the same communication distance and low signal to noise ratio (SNR), when the SNR is high, the former is better than the latter. Under the same bit error rate, when the communication distance is less than 3 m, the communication distance of the system based on SVM detection is slightly longer than that of DD-LMS detection.

Key words: underwater light-emitting diode visible light communication; support vector machine; direct decision least mean square detection; grid search; cross validation

0 引言

在水下发光二极管(LED)可见光通信中, 海水对

收稿日期: 2020-09-17。

基金项目: 教育部第二批“新工科”研究与实践项目(E-XTYR20200653)资助; 教育部高等学校电子信息类教学指导委员会 2020 年度教学改革研究重点项目(2020-ZD-02)资助; 教育部产学研合作协同育人项目(201902180021、202002078046)资助。

作者简介: 李晓记(1976—), 女, 博士, 副教授, 现任桂林电子科技大学教务处副处长, 认知无线电与信息处理教育部重点实验室的研究生导师, 主要研究领域为信息与通信工程、水下可见光通信、创新创业教育和实验教学设计与研究。



光信号的吸收、散射、背景噪声以及系统中的非线性效应等因素的影响会造成接收端信号的畸变^[1-2]。传统的水下 LED 可见光通信中采用的检测方式是直接判决最小均方(DD-LMS)检测^[3], 由于其判决分类线是直线, 因此抗噪能力较弱, 判决性能较差。而基于支持向量机(SVM)的信号检测方法能根据实时接收的信号数据自动调整判决平面, 进而构建更加平滑、精确的超平面对其进行判决, 降低了误判率。目前, 机器学习领域的诸多方法均可用于解决通信系统中的非线性问题^[4-6], 例如: 神经网络通过训练接收信号数据, 得到发送信号数据与接收信号数据之间的映射关系, 进而恢复出接收信号^[7]; 将 SVM 用于大气中激光通信系统接

收端的信号检测等^[8]。针对大气湍流影响下的环境,文献[9]采用基于 SVM 的信号检测方法,在弱湍流条件下改善了系统的性能。因此,本文将 SVM 信号检测方法用于直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)水下 LED 可见光通信系统中,以提高检测性能。

1 水下 LED 可见光通信的系统模型

在不同的海水环境中,水分子、水中所包含的无机物质和有机物质等对 LED 可见光的散射都有很大的不同,使得水下信道十分复杂。因此,本文选用目前最广泛、最简单的比尔定律描述水下 LED 可见光的衰减,并且只考虑了吸收和散射 2 个因素对 LED 可见光在水下传输时的影响。假设 LED 可见光在水下传输时总的衰减系数为 $c(\lambda)$,其表示为吸收与散射系数之和^[10],即:

$$c(\lambda)=a(\lambda)+b(\lambda) \quad (1)$$

其中, λ 为可见光波长, a 为吸收衰减系数, b 为散射衰减系数。由于蓝绿波段的 LED 可见光在水下传输过程中受到的衰减较小,因此本文主要研究了波长为 520 nm 时的光在不同海水中传输时的系统性能。光波长为 520 nm 时,不同海水中传输的衰减系数如表 1 所示^[11]。

表 1 光波长为 520 nm 时,不同海水中的衰减系数

海水类型	a/m^{-1}	b/m^{-1}	c/m^{-1}
沿岸	0.179	0.219	0.398
港口	0.366	1.824	2.190

根据式(1)的总衰减模型,进而得到 LED 可见光在水下环境中传输时的信道直流增益 H ^[12]为:

$$H(d)=\frac{m+1}{2\pi}\cos^m(\varphi)A(d,\psi)\exp(-c(\lambda)d)\eta_t\eta_r\eta_p \quad (2)$$

$$A(d,\psi)=\frac{\pi D_z^2 \cos(\psi)/4}{\pi(d\cdot \tan(\varphi_{1/2})+D_t/2)^2} \quad (3)$$

其中, φ 和 ψ 分别为发射角与入射角, m 为朗伯辐射阶数, d 为通信链路长度, η_t 为发射机效率, η_r 为接收机效率, η_p 为海水信道中传输效率, A 为光电探测器(PD)的等效接收面积, D_t 为 LED 准直透镜直径, D_z 为 PD 聚光透镜直径。接收端的信号可以表示为:

$$r=s\cdot H+w \quad (4)$$

其中, s 为发送信号, w 为高斯白噪声。

2 基于 SVM 检测的实验仿真

2.1 SVM 检测方法原理

SVM 是一种二分类模型,其基本思想是找到那些距离分界线最近的样点,然后使这些样点到分界线的距离最大化,该分界线被称为超平面。在一个二元线性可分的样本空间中,通过如下线性方程来描述超平面:

$$\omega^T x+u=0 \quad (5)$$

其中, ω 为法向量,决定了超平面的方向; u 为截距,决定了超平面与远点的距离; x 为数据点。

对于线性可分的数据集来说,这样的超平面有无穷个,但是几何间隔最大的分类超平面却是唯一的,如图 1 所示。

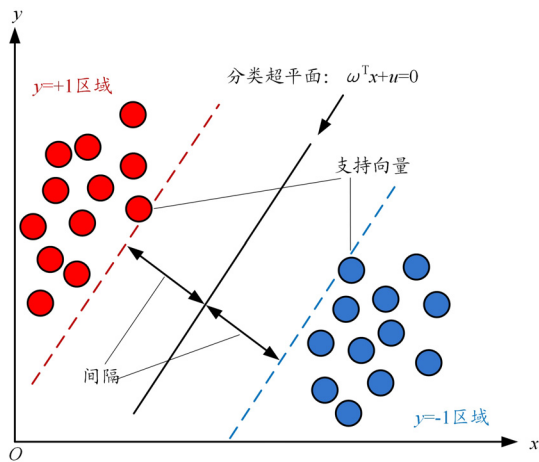


图 1 线性可分的 SVM 原理图

在图 1 中,假设所有的训练数据都被最优分类超平面 $f(x)$ 正确分类,且划分为“ $y=+1$ ”和“ $y=-1$ ”2 个区域。“ $y=+1$ ”区域内的数据 x 均满足 $f(x)>0$;相反,“ $y=-1$ ”区域内的数据 x 均满足 $f(x)<0$ 。

对于线性不可分的数据,可采用核函数将线性不可分的数据从低维特征空间映射到高维特征空间,使数据在更高维度中是线性可分的。本文采用 SVM 中常用的高斯核函数(RBF),其定义式为:

$$\kappa(x, x_i)=\exp[-\|x-x_i\|^2/(2\gamma^2)] \quad (6)$$

其中, γ 是高斯核参数, x_i 是第 i 个特征。

通过引入拉格朗日乘子,得到最优分类超平面的凸二次规划问题,即对目标函数求最大值 V :

$$V=\max\left\{\sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j \alpha_i \alpha_j \kappa(x_i, x_j)\right\} \quad (7)$$

其中, N 为子载波数, $\sum_{i=1}^N y_i \alpha_i = 0$, $0 \leq \alpha_i \leq C$, $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N)^T$ 为拉格朗日乘子向量, C 是惩罚因子,当 C

值增大时代表对误分类的惩罚增大,当 C 值减小时代表对误分类的惩罚减小。 y_i, y_j 分别表示数据的第 i, j 个标签, α_i, α_j 分别表示拉格朗日乘子向量中的第 i, j 个值。求解后得到分类超平面为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N y_i \alpha_i \kappa(x, x_i) + b \quad (8)$$

2.2 基于 SVM 的 16 阶脉冲幅度调制 (16QAM) 信号检测实验流程

本文基于 DCO-OFDM 的水下 LED 可见光通信系统进行实验仿真,如图 2 所示。将系统接收端经过 PD 后的电信号对其先进行模/数转换(A/D),随后去除循环前缀(CP)、快速傅里叶变换(FFT),将得到的信号采用基于 SVM 的检测方法加以解调^[13],再将解调后的标签组合经过映射后,得到恢复信号数据。

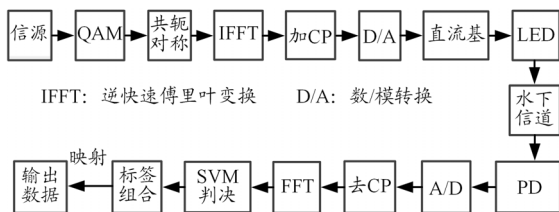


图2 基于 SVM 检测的 DCO-OFDM 水下 LED 可见光通信系统框图

本节采用 16QAM 信号来具体阐述 SVM 检测的原理。由于 SVM 方法是对 2 种类别进行分类,而 16QAM 信号星座图的每个星座点均需 4 位比特来表示,因此基于比特位的 SVM 信号分类判决器需 4 个。基于比特位的 16QAM 信号判决策略如图 3 所示。根据图 3 中的分类策略给出训练数据的标签,将接收信号经过训练好的模型判决后得到对应的标签组合,然后映射出对应的比特信息,最后对系统进行性能分析,实验流程图如图 4 所示。

具体实验流程如下:

首先,在系统的接收端,取接收信号的相位和幅度作为数据的 2 个特征。将接收信号数据分为训练集和测试集,然后对其进行数据预处理(即:标准化处理),去除接收信号幅度与相位 2 个特征之间量纲不同所带来的影响,便于比较数据之间的差异性。

其次,根据图 3 中的基于比特位的 16QAM 信号判决策略与训练数据集在发送端的原始信号序列,给出训练数据集的 4 组标签,将标签组合与训练数据集输入到 SVM 判决模型中,通过网格搜索与交叉验证方法得到模型的最优参数 C 与 γ , 利用 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件得到 α_i 并计算出 b , 从而得到最优的 SVM 判决模型 $f(x)$ 。

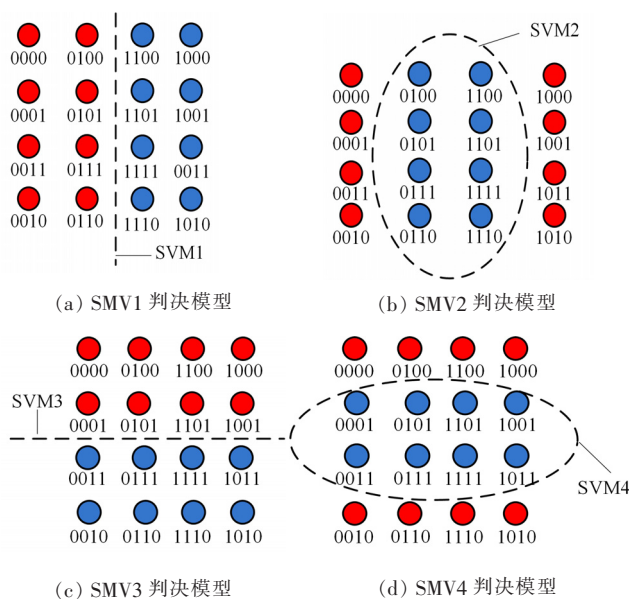


图3 基于比特位的 16QAM 信号判决策略

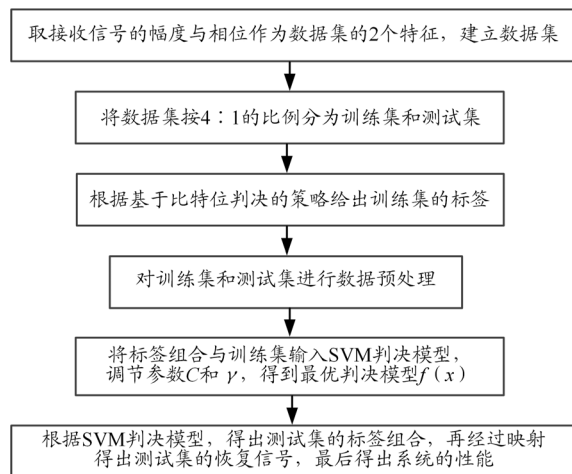


图4 实验流程图

根据得到的 4 组标签,训练出 16QAM 信号 4 个基于比特位的 SVM 判决模型(图 3 中的 SVM1、SVM2、SVM3 及 SVM4),最后利用各判决模型分别对接收信号数据进行判决。若 $f(x) > 0$,则该比特位判为“+1”,反之,判为“-1”,再将输出的对应标签组合按标签“+1”对应比特“1”、标签“-1”对应比特“0”进行映射后得到接收信号解调后的 16 进制表示,最后对其进行系统的性能分析。

3 实验仿真结果及分析

本文在 DCO-OFDM 水下 LED 可见光通信系统的接收端分别采用基于 SVM 与 DD-LMS 的检测方式进行仿真及性能对比,各项实验仿真参数如表 2 所示。

在沿岸海水和港口海水中,系统采用不同调制信

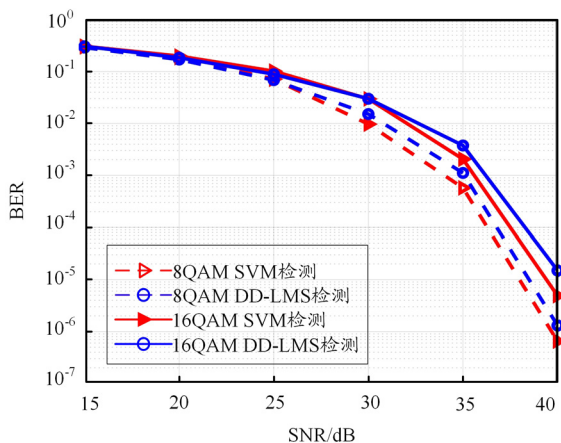
表 2 水下 LED 可见光通信实验参数

参数	数值
$\varphi_{1/2}$	20°
d	2.5 m
η_t	0.1289
η_r	0.9500
η_c	1
N	256
D_t	50 mm
D_r	60 mm

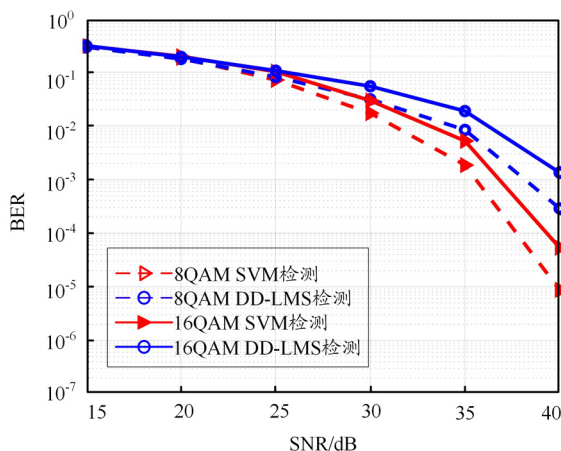
号下 2 种检测的误码率(BER)与信噪比(SNR)之间的关系如图 5 所示。可以看出,在沿岸海水与港口海水中,低 SNR 条件时,由于噪声影响较大,使得基于 SVM 检测的系统 BER 曲线与 DD-LMS 的几乎完全重合;高 SNR 条件时,在相同 BER 情况下,采用 SVM 检测的系统所需的 SNR 较 DD-LMS 低。例如:在 $C=0.151$ 的沿岸海水中,当 $BER=2.056 \times 10^{-3}$ 时,采用 SVM 检测的系统所需的 SNR 较 DD-LMS 改善了 1 dB 左右;在 $C=2.190$ 的港口海水中,当 $BER=1.345 \times 10^{-3}$ 时,采用 SVM 检测的系统所需的 SNR 较 DD-LMS 改善了 2.5 dB 左右。由于港口海水中信道衰减较大,散射作用较强,因此在港口海水中基于 SVM 检测的系统性能比沿岸海水中的提升明显。另外,对于采用 16QAM 信号与 SVM

检测的系统,为使 BER 保持在 10^{-3} , $C=2.190$ 时系统所需的 SNR 较 $C=0.151$ 时的增大了 1.5 dB 左右。因此,为使系统在不同海水中为获得相同的 BER,系统所需的 SNR 会随着 C 的增大而增大。

为了进一步分析 2 种检测方法分别与通信链路长度 d 之间的关系,本文在沿岸海水中分别采用 SVM 与 DD-LMS 检测,系统的 BER 随通信链路长度 d 变化的曲线如图 6 所示。其中,系统发送端的信号为 16QAM 信号, $SNR=40$ dB,通信链路长度为 2.5~3.5 m。可以看出,随着 d 的增大,系统的 BER 逐渐增大,当 d 大于 3.2 m 后, BER 的变化趋势趋于恒定,且基于 SVM 检测的 BER 与 DD-LMS 检测的基本相同;当 d 小于 3 m 时,与 DD-LMS 的相比,基于 SVM 的检测方法可以获得相对较低的 BER,检测效果较好。



(a) $C=0.151$



(b) $C=2.190$

图 5 2 种情况下的误码率曲线

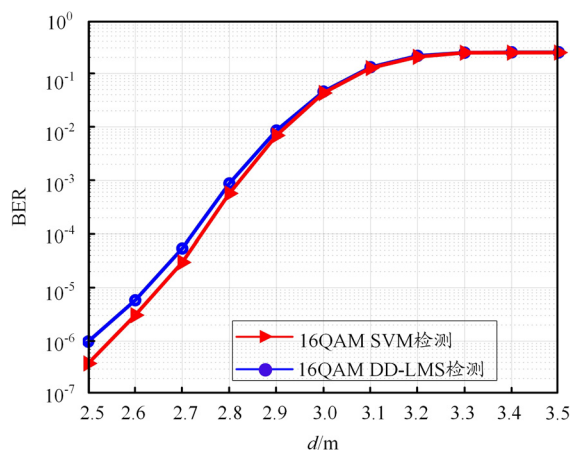


图 6 $C=0.151$ 时系统 BER 随通信链路长度变化曲线

4 结束语

本文通过对水下 LED 可见光通信进行实验仿真,提出了一种基于 SVM 的水下 LED 可见光通信信号检测方法,该方法独立于水下信道的统计特性,且只与信号数据有关。考虑到不同水下信道的衰减情况不同,系统分别采用 SVM 与 DD-LMS 检测方式进行判决,得到了 2 种检测方式下系统的 BER 与 SNR 之间的关系。通过比较两者的 BER 与 SNR 曲线图可以看出,在同一通信距离下,低 SNR 时,两者检测的效果相当;高 SNR 时, SVM 检测的性能优于 DD-LMS。此外,本文还仿真了不同检测方式下系统的 BER 与 d 之间的关系,相同 BER 下,在 d 小于 3 m 时,基于 SVM 检测方法的通信距离略远于 DD-LMS,这对提高水下 LED 可见光通信距离提供了一种思路。

李晓记,杜卫海,李燕龙,等:基于 SVM 的水下 LED 可见光通信信号检测方法

参考文献:

- [1] YING K, YU Z H, BAXLEY R J, et al. Nonlinear distortion mitigation in visible light communications [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 36–45.
- [2] INAN B A, LEE S C J A, RANDEL S B, et al. Impact of LED nonlinearity on discrete multitone modulation[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(5): 439–451.
- [3] WANG Y Q, HUANG X X, ZHANG J W, et al. Enhanced performance of visible light communication employing 512QAM N-SC-FDE and DD-LMS[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15328–15334.
- [4] 刘卓,陈晓琪,谢振平,等. 基于深度神经网络的迷彩目标发现仿真学习方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 162–168.
- [5] 曲磊,王康如,陈利利,等. 基于 RGBD 图像和卷积神经网络的快速道路检测[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 124–132.
- [6] 朱玥,覃尧,董岚,等. 人工智能在移动通信网络中的应用:基于机器学习理论的信道估计与信号检测算法 [J]. 信息通信技术, 2019, 13(1): 19–25.
- [7] KHAN F N, LU C, LAU A P T. Machine learning methods for optical communication systems[EB/OL]. [2020–09–17]. <https://www.osapublishing.org/viewmedia.cfm?uri=SPPCom-2017-SpW2F.3&seq=0>.
- [8] 何宏伟,吴志航,于召新,等. 4 进制自由空间激光通信信号的 SVM 检测算法[J]. 光学学报, 2018, 11(38): 14–21.
- [9] ZHENG C B, YU S, GU W Y. A SVM-based processor for free-space optical communication[C]// IEEE 5th international conference on electronics information and emergency communication (ICEIEC), May 14–16, 2015, Beijing, China. Piscataway: IEEE, 2015: 30–33.
- [10] SHIFRIN K S. Physical optics of ocean water [M]. New York: Amer. Inst. Phys, 1988.
- [11] JASMAN F, GREEN R J. Monte Carlo simulation for underwater optical wireless communications [C]// 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), October 21, 2013, Newcastle upon Tyne, UK. Piscataway: IEEE, 2013: 113–117.