

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306286

无线光通信自适应阈值检测技术研究进展*

梁静远¹ 陈明惠¹ 王惠琴² 柯熙政^{1,3,4}

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 兰州理工大学计算机与通信学院 兰州 730050;
3. 西安文理学院信息工程学院 西安 710065; 4. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室 西安 710048)

摘要:光信号在大气湍流信道中传输时会引起信号衰落和光强闪烁等现象,接收端采用固定阈值检测无法正确恢复出基带信号,需要对接收信号判决阈值进行自适应调整。自适应阈值检测技术能够有效抑制大气湍流效应,是改善无线光通信系统的误码性能、提高系统可靠性的重要手段,其检测性能主要针对阈值检测算法和反馈机制等方面进行优化和改进。回顾自适应阈值检测技术的发展历程,从无线光通信系统结构出发,根据贝叶斯最大似然估计和最大后验概率准则,推导了接收信号的最优判决阈值模型,通过比较接收信号和最优判决阈值解调出基带信号。分析了基于最小均方误差滤波、卡尔曼滤波和渐消卡尔曼滤波3种算法的典型自适应阈值检测模型,分别适用于平稳输入信号和非平稳输入信号,同时介绍了西安理工大学在自适应阈值检测领域使用高阶累积量代替传统二阶统计量的相关研究工作,最后对未来该领域发展趋势进行总结和展望,可为未来无线光通信自适应阈值检测技术的研究和发展提供一定的参考借鉴。

关键词:无线光通信;大气湍流;自适应阈值检测

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Research progress of adaptive threshold detection technology for optical wireless communication

Liang Jingyuan¹ Chen Minghui¹ Wang Huiqin² Ke Xizheng^{1,3,4}

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
3. School of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China; 4. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Collaborative Network for Civil-Military Cooperation, Xi'an 710048, China)

Abstract: The transmission of optical signals in atmospheric turbulent channels causes signal fading and light intensity flicker, and the baseband signal cannot be recovered correctly by fixed threshold detection at the receiving end, so adaptive adjustment of the received signal decision threshold is required. Adaptive threshold detection technology can effectively suppress the atmospheric turbulence effect, which is an important means to improve the bit error rate performance of optical wireless communication systems and enhance system reliability. Its detection performance is mainly optimized and improved for the threshold detection algorithm and feedback mechanism. Reviewing the development process of adaptive threshold detection technology, starting from the structure of optical wireless communication system, deriving the optimal decision threshold model for the received signal based on Bayesian maximum likelihood estimation and maximum posterior probability criteria, and the realization of baseband signal demodulation by comparing the received signal with the optimal decision threshold. The typical adaptive threshold detection models based on the minimum mean square error filter, Kalman filter and fading Kalman filter are analyzed, which are suitable for stationary input signals and non-stationary input signals respectively. At the same time, the related research work of Xi'an University of Technology using high-order cumulants instead of traditional second-order statistics in the field of adaptive threshold detection is introduced. Finally, the future development trend of this

收稿日期: 2023-02-25 Received Date: 2023-02-25

*基金项目: 陕西省教育厅科研项目(18JK0341)、西安市科技创新指导项目(201805030YD8CG14(12))、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)资助

field is summarized and foreseen, which can provide some reference for the future research and development of adaptive threshold detection technology for optical wireless communication.

Keywords: optical wireless communication; atmospheric turbulence; adaptive threshold detection

0 引言

无线光通信(optical wireless communication, OWC)^[1]利用光作为载波,在空间信道中进行信息传递,集光纤通信、微波通信等无线通信方式优势于一体,具有频带宽、容量大、成本低、灵活机动等优点,应用前景广阔。但光信号在大气信道传输的过程中会受到大气信道的影响^[2-3],降低信号接收质量,严重时会导致通信中断。因此必须采取有效的大气湍流抑制方法,减小大气信道对光束传输的影响。自适应阈值检测技术^[4]的判决阈值随接收信号的变化而变化,对大气湍流造成的影响有较好抑制作用,可以降低接收端的误码率,提高通信质量,成为提高无线光通信系统性能的重要研究方向。

早期的自适应阈值检测技术通常根据信道状态信息(channel state information, CSI)调整接收端的判决阈值,检测光信号,由于在实际应用中难以获取完全 CSI,随后提出了无需 CSI 的自适应阈值检测技术。相对于需要 CSI 的自适应阈值检测技术,无需 CSI 的自适应阈值检测技术的复杂度和时延性较低,但检测性能低于需要 CSI 的检测技术。因此结合实际无线光通信系统,选择合适的自适应阈值检测技术对提高系统可靠性至关重要。

本文介绍了无线光通信自适应阈值检测技术国内外研究现状和基本工作原理,推导了最优阈值检测模型,对几种常用的自适应阈值检测方法进行分析,并总结了西安理工大学在该领域所做工作,最后预测了无线光通信自适应阈值检测的发展方向。

1 国内外研究进展

1.1 自适应阈值检测

无线光通信系统中,接收到光信号后要对接收信号与阈值进行比较判决。若信号大于设定阈值,输出为“1”;信号低于设定阈值,输出为“0”。受到大气闪烁等影响,接收信号的幅值出现随机起伏,如图 1 所示,采用固定阈值容易出现差错,因此有必要研究自适应阈值。自适应阈值检测可以根据接收信号强度变化,对判决阈值自动做出相应的调整,相较于固定阈值检测,具有较宽的动态范围和较高的检测概率。

以二元阈值检测^[5]为例,其自适应阈值检测如图 2 所示,接收机接收到信号后,将当前比特信号的采样值 $r(k)$ 与最优判决阈值 $U_T(k)$ 进行比较,根据判决准则得

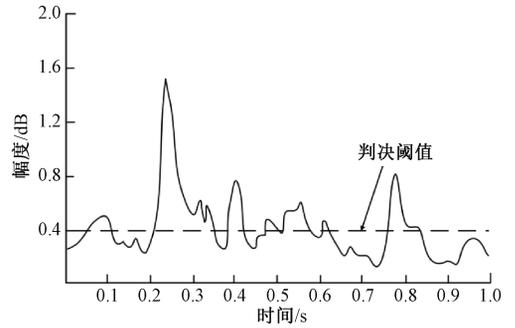


图 1 信号阈值检测波形图

Fig. 1 Signal threshold detection waveform diagram

到判决结果(即若 $r(k)$ 大于 $U_T(k)$,则判决结果输出“1”码,否则输出为“0”码),然后根据一定数量的采样数据估计出当前比特信号的均值和方差,并将估计出的均值和方差输入自适应预测器中,通过预测算法预测下一比特信号的均值和方差,进而得到下一时刻的最优判决阈值 $U_T(k+1)$,完成阈值更新,使得 $U_T(k+1)$ 对下一比特信号的采样值进行比较判决。

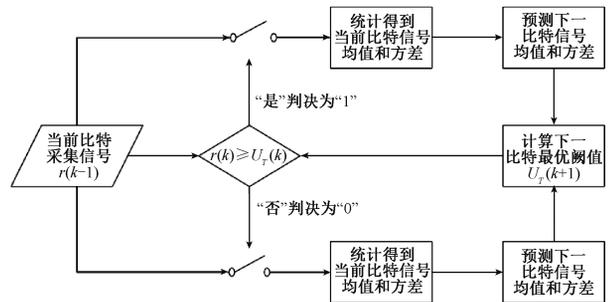


图 2 自适应阈值检测示意图^[5]

Fig. 2 Adaptive threshold detection schematic diagram

1.2 国外研究进展

阈值检测技术出现于 20 世纪 60 年代,最早是由 Urkowitz^[6]根据信号能量提出的一种未知信号检测方法。由于该方法受噪声影响较大,存在一定的局限性,此后被不断研究和改进。但早期信号检测中一直采用固定阈值,随着通信质量要求日益增高,迫切需要一种随接收信号强度变化自动调整判决阈值的自适应阈值^[7],因此在 20 世纪 90 年代末提出了自适应阈值检测。

2001 年, Mukai 等^[8]针对深空光通信中信道的动态衰落问题,提出了自适应设置脉冲信号检测阈值的方法,使得系统误差总概率最小,以应对不断变化的信道条件。但所采用的自适应阈值检测技术尚未成熟,需要进一步研究。

2002年, Burris等^[9]将Kalman滤波检测和估计引入具有乘性噪声无线光通信中, 自动跟踪比特电平的均值和方差变化, 更新检测阈值, 能以较低成本实现高速数据传输。

2003年, Zhu等^[10]研究了最大似然(maximum likelihood, ML)逐符号检测技术、最大似然序列检测技术(maximum likelihood sequence detection, MLSD)和导频符号辅助检测(pilot-symbol assisted detection, PSAD)技术这3种时域检测技术对大气湍流引起的光强起伏的减缓效果。实验结果表明, 与ML逐符号相比, MLSD和PSAD分别获得了2.4和1.9 dB的信噪比增益。由于MLSD利用了强度波动的时间相关性, 其检测性能优于其他两种时域检测技术, 因此后来被广泛研究, 但其成本和复杂度较高。

2004年, Cole等^[11]通过最小均方误差(minimum mean-square error, MMSE)估计大气闪烁条件下的光信号强度。仿真结果表明, 在小闪烁指数情况下, 该算法的检测性能优于最大似然算法; 随着闪烁指数的增高, MMSE估计值的准确性下降, 其性能近似于最大似然估计。

2005年, Namazi等^[12]在小波变换的基础上, 结合自适应维纳滤波的思想, 提出了自由空间光信号二进制数据同步和检测的新方法。分析了固定尺度Haar小波变换, 利用贝叶斯三元假设检验得到比特错误概率, 并推导出了最佳阈值检测模型。

2007年, Riediger等^[13]研究了判决反馈链路(decision-feedback detection, DFD), 利用先前的判决和接收统计量的观测窗口来进行逐符号判决。仿真结果表明, 随着窗口长度的增加, 判决反馈链路性能接近相干检测下限。

2009年, Riediger等^[14]提出了适用空间光通信非相干检测的最优多符号检测(multiple-symbol detection, MSD)快速搜索算法和低复杂度判决度量的次优多符号检测, 可以明显改善序列较长的无线光通信的检测性能, 但该算法计算耗时较长。

2010年, Moradi等^[15]在Zhu等^[10]基础上进一步研究了导频符号辅助检测技术。当信道系数存在时间相关的情况下, 利用导频符号辅助检测来修正最大似然函数, 并且可扩展到多输入多输出的光通信系统中。但该检测技术需要时间联合和边缘概率分布密度函数, 增加了接收机的复杂度, 同时相对于最大似然序列检测技术, 由于该技术需要在数据中周期性的插入导频符号, 导致系统频谱利用率低。

2010年, Chatzidiamantis等^[16]考虑到实际应用中最优最大似然序列检测的计算复杂度高, 提出了一种低复杂度的基于广义最大似然序列检测的次优检测方案。该方案不需要任何信道信息, 仅使用接收序列的

观测值, 避免了复杂判决的过程, 但在小观测窗口下性能较差。

2013年, Song等^[17]在最大似然序列检测的基础上设计了一种广义最大似然比检验接收机(generalized likelihood ratio test, GLRT), 无需信道状态信息和信道模型信息, 利用过去检测到的数据符号来估计瞬时信道增益和发射功率, 并自适应地调整判决阈值, 相比需要信道模型信息的接收机具有更好的鲁棒性, 但在数据传输开始就需要导频符号。

2013年, Beaulieu等^[18]确定了Laplace白噪声下已知信号的最优检测器结构, 并利用高斯近似法对其检测性能进行渐近分析。仿真结果表明, 最优信号检测器的信噪比可达到高斯噪声下数字匹配滤波器的两倍。

2017年, Dabiri等^[19]综合最大似然序列检测和差分信号技术计算复杂度和成本方面的考虑, 对开关键控调制(on-off keying, OOK)信号采用低复杂度的盲估计检测算法, 无需传输任何训练符号, 通过逐块检测两步法实现了更低的误码性能, 适用于高速无线光通信, 但是需频繁调整观察窗口内的数据长度。

2019年, Choi等^[20]在发射信号中插入单音导频估计卫星光通信湍流信道信息, 所提取的信道状态信息接近完全信道状态信息, 可缓解湍流大气导致闪烁效应, 但需要进行复杂滤波处理抑制串扰。同年, Shin等^[21]还针对自适应阈值检测的实现复杂度随数据传输速率的提高而增加的问题, 提出了一种OOK差分检测技术, 利用最佳判决阈值通过序列符号差分的方法进行检测, 降低实现复杂度。

2021年, Choi等^[22]针对无线光通信多电平脉冲幅度调制格式, 提出了一种使用随机逼近算法预测下一帧判决阈值的自适应阈值判决技术。该技术可以自适应地跟踪强度波动的动态, 并平滑包括噪声信号在内的强度波动, 提高接收机性能。

1.3 国内研究进展

2006年, 王谨等^[23]利用自适应卡尔曼滤波器和同态滤波器预测信号和湍流的统计特征, 从而获得自适应判决阈值, 有效抑制大气湍流中的噪声。该方案具有结构简单、成本低的优点, 判决误差小于0.5%。仿真和实验结果表明, 在弱湍流条件下, 信噪比范围在10~20 dB内的通信系统采用自适应阈值检测技术误码率低于 10^{-5} , 并且还能从软件方面进一步提高其检测性能。

2008年, 吴成玉等^[24]研究了基于信号功率和噪声功率的自适应阈值检测技术, 并在此基础上提出了一种在滑窗中进行比较判决的自适应阈值检测技术。该技术不仅可以有效地消除小信号时的虚警现象, 并且可以更加准确地捕获信号。

2008年, 王妮^[25]提出了基于三阶累积量的判决引导

(decision-directed, DD) 算法, 利用高阶累积量作为代价函数更新自适应滤波器的抽头系数, 有效抑制了系统的加性噪声, 验证了高阶累积量对高斯噪声不敏感的特性。

2009 年, 赵致峰^[26]提出了自适应滑动相关检测技术, 依据滑动相关检测原理对接收信号进行积累相关运算, 从而得到自适应判决阈值。该方法可以减小虚警概率, 提高接收信号检测概率。

2012 年, Wang 等^[27]研究了接收机采用动态判决阈值(dynamic decision threshold, DDT) 方案对相干光通信系统误码性能的改善作用。该方案逐帧检测接收光信号, 并在每个检测帧中, 通过监视前导码为信号检测提供判决阈值, 只适用于低数据率通信。实验结果表明, 当闪烁指数为 1.0 时, 采用动态判决阈值方案可以达到 10^{-3} 误码率。

2013 年, 李凤飞等^[28]通过分析不同信噪比条件下同步阈值的变化规律, 提出了最优阈值选择方法, 能够有效减少各种噪声的干扰, 使得该系统性能在低信噪比加性高斯白噪声信道下接近最优阈值探测, 相较于固定阈值系统性能改善约 3 dB。

2014 年, 尚耀波等^[29]针对低信噪比条件下, 自适应阈值判决伪随机(pseudorandom noise, PN) 码捕获方法检测概率低的问题, 提出了一种改进算法, 根据参数设置调整基于信噪比的阈值。实验结果表明, 该算法能够提高系统检测概率, 同时具有较好的干扰抑制能力。

2015 年, 张波等^[30]提出了可变阈值因子的自适应阈值检测算法, 利用第 k 小元素代替排序类噪声能量估计。该算法仅使用排序算法中少次迭代的过程, 在保证检测性能的同时, 降低了算法的运算量, 实现快速自适应阈值判决检测。

2015 年, 柯熙政等^[31]和田晓超^[32]研究了大气强湍流信道中的信号检测问题。实验结果表明, 自适应阈值检测可以明显降低 K 分布湍流信道下光通信系统的误码率, 且码元采样数越多, 系统性能越好, 但算法复杂度也更高。

2017 年, Ding 等^[33]研究了无线光通信系统无需信道状态信息的自适应阈值判决方案。基于大气湍流的低通特性, 低通滤波器从光载波分量中提取瞬时强度起伏, 滤波后的输出可以直接用作判决阈值。蒙特卡罗仿真结果表明高速数据传输时, 该方案的性能非常接近理想信道状态信息判决下限。

2018 年, 张红玲等^[34]将渐消卡尔曼滤波算法引入到无线光通信的自适应阈值检测过程中, 有效解决了当观测模型不准确时, 卡尔曼滤波算法引起的发散问题。仿真结果表明, 采用渐消卡尔曼滤波算法的自适应阈值检测方法在信噪比为 10 dB 时, 其系统误码率较固定阈值提高 4 个量级。

2018 年, 李晓燕等^[35]研究了在弱湍流和强湍流条件下, 考虑探测器噪声等影响, 自适应判决阈值的双工逆向调制(modulating retro-reflector, MRR) 无线光通信系统的误码性能, 并推导出了最优自适应判决阈值计算公式。仿真结果表明, 采用 3 bit 训练数据计算自适应判决阈值可以显著提高系统误码性能。

2018 年, 朱宝芹等^[36]根据已判决信号的量化电压提出一种自适应阈值检测方法, 并利用信号中的直流量估计信道参数, 得到当前信号的判决阈值。该方法克服了传统判决阈值虚警概率高的缺点, 且具有更低的功率损耗。

2018 年, Li 等^[37]在接收端设计了两个自适应阈值来检测信号的同向支路和正交支路, 且不需要瞬时信道状态信息和概率密度函数。为提高阈值精度, 还提供了设置第二检测阈值的决策辅助方法。仿真结果表明, 采用双自适应阈值检测系统性能接近理想自适应检测系统。

2019 年, 由于差分信号的盲检测法在逆向调制端的波长分离存在一定困难, Li 等^[38]提出了一种新的基于自适应阈值的盲检测方法, 研究了大范围相关大气湍流衰落下逆向调制光通信系统的误码性能。仿真结果表明, 小的信道相关性可以获得更好的误码性能, 验证了理论推导误码率表达式的正确性, 为无线光通信系统设计提供了一些参考。

2019 年, Jiang 等^[39]设计一种新型信号检测算法, 首先利用随机共振技术提高系统信噪比, 再通过双阈值两步算法实现信号检测。该算法可以减少信号检测时间, 提高系统吞吐量。

2020 年, 刘洋^[40]提出了基于自适应阈值的 16QAM (quadrature amplitude modulation) 载波锁定检测算法, 根据输入信号的统计特性得到信号的分布情况, 调整检测阈值, 完成载波锁定模式判决。该算法可以提高检测可靠性, 并具有较强实用性。

2022 年, Liu 等^[41]提出了一种适用于微弱信号检测的局部自适应阈值算法。相对于全局阈值, 该算法仅在一个小的局部窗口内计算其阈值, 能够适应复杂背景噪声环境的变化, 有效降低虚警和漏警概率, 具有良好的背景抑制能力和较高检测精度。

2022 年, Zhang 等^[42]设计出了一种结构简单的自适应逐符号判决反馈阈值检测接收机, 在传输数据头部加入导频符号后, 根据先前检测出的信号估计瞬时信道状态信息, 从而自适应调整接收机的判决阈值。仿真结果表明, 该接收机对弱湍流信道到强湍流信道的闪烁效应均具有很好的抑制作用。

2 系统结构与模型

2.1 无线光通信系统结构

无线光通信系统的结构^[43-44]如图 3 所示,包括光发射机、大气信道和光接收机 3 部分。光发射机由信号源、调制器、激光器、驱动电路和发射天线等构成,其主要功能是将信号源输出的电信号经电-光转换后调制到光载波之上,由光发射天线发射出去。所发射的光信号经大气信道传输后到达接收机,光接收机由光接收天线、光滤波器、光电探测器和判决器等组成,其作用是将接收天线接收到的光信号进行滤波处理后,送入光电探测器完成光-电转换,再将转化后得到的电信号与判决阈值进行比较判决,解调出发送的信息。

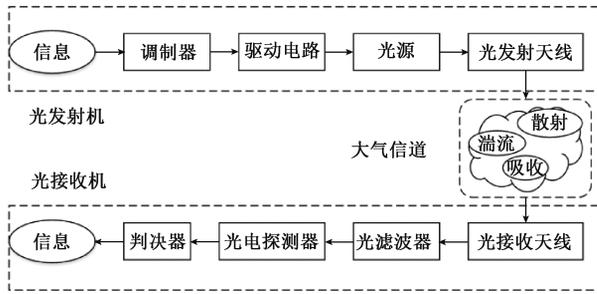


图 3 无线光通信系统结构^[44]

Fig. 3 Optical wireless communication system structure

2.2 光电探测噪声

在长距离无线光通信系统中,要求光电探测器具有很高的接收灵敏度,一般采用雪崩二极管(avalanche photon diode, APD)探测器。APD 是一种 P-N 结构的光检测二极管,通过半导体中载流子的雪崩效应实现光电信号放大,但探测器输出电流中含有多种噪声源,如热噪声、散粒噪声和暗电流噪声等^[45],会影响系统的最佳判决阈值。

热噪声和散粒噪声作为光电探测器的主要噪声源,二者相互独立,都可近似为零均值的高斯噪声。热噪声^[46]能用均方热噪声电流表示:

$$\sigma_T^2 = 4kTfG^2/R_L \quad (1)$$

式中: k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, f 为探测器带宽, G 为放大器增益, R_L 为负载电阻。

散粒噪声是由于探测器光子和电子离散分布所产生的噪声,其方差大小与信号强度有关,用均方散粒噪声电流^[47]表示为:

$$\sigma_s^2 = 2efMNG\langle U_s \rangle = 2efM^2NG^2\langle P_R \rangle R \quad (2)$$

式中:信号电压 $U_s = MGP_R R$, M 为 APD 倍增因子, G 为放大器增益, P_R 为光接收功率, R 为 $M = 1$ 时的探测器响

应度, $\langle \rangle$ 表示系综平均, e 为电子电荷, N 为 APD 噪声系数。

2.3 误码率

在无线光通信系统中,大气湍流和噪声等因素都会造成信号出现随机起伏,对信号检测产生不利影响,导致接收信号容易发生误判,产生误码率。误码率^[48]是指规定时间内码元传输时出错的概率,是评价通信系统的重要性能指标,由虚警概率 P_F 和漏警概率 P_M ^[46]两部分构成。虚警概率是指当信源噪声电压的幅值大于检测阈值,将发射的“0”码误判为“1”码的概率。漏警概率是指噪声电压幅值与信号电压幅值之和小于检测阈值,发射“1”码时被误判为“0”码的概率。

虚警概率^[49]可表示为:

$$P_F = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{U_T - U_0}{\sqrt{2\sigma_0^2}}\right) \quad (3)$$

漏警概率^[49]可表示为:

$$P_M = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{U_1 - U_T}{\sqrt{2\sigma_1^2}}\right) \quad (4)$$

式中: $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 表示互补误差函数, U_T 表示判决阈值, $\langle U_0 \rangle$ 和 σ_0^2 分别表示“0”码时信号电压的均值和方差, $\langle U_1 \rangle$ 和 σ_1^2 则分别表示“1”码时信号电压的均值和方差。

若“0”码和“1”码等概发送,则系统的误码率^[49]表示为:

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{U_T - \langle U_0 \rangle}{\sqrt{2\sigma_0^2}}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{\langle U_1 \rangle - U_T}{\sqrt{2\sigma_1^2}}\right) \quad (5)$$

最大限度减小噪声和湍流对通信的影响,获得最小误码率,是改善无线光通信自适应阈值检测性能的首要目的,对此,最优阈值检测提供了解决方案。

2.4 最优阈值检测

接收端为恢复发送信号的信息,需要设定一个临界值与接收信号进行比较判决,完成信号的解调,这个临界值就是阈值,高于或低于阈值都会使得信号判决结果发生不同改变。以二进制归零码为例,其判决阈值一般设置为 0.5,若接收信号采样值大于 0.5,则判决原始信号发送为“1”码,否则判决发送为“0”码。通常情况下,能够找到一个使得系统误码率最小的判决阈值,称为最优阈值,使用最优阈值对信号进行检测可以实现接收机的最佳接收。

最优阈值检测^[50]从 Bayes 似然比探测(likelihood ratio test, LRT)出发,根据最大后验概率准则(maximum a posteriori, MAP),对信号电平的均值、方差以及大气信道的相关参数进行估计和预测,得到最优判决阈值,实现信号的自适应接收。因此,最小误码率所对应的最优判决

阈值并不是一个恒定值,而是一个随大气湍流变化而改变的随机变化量。

1) 接收信号分析

接收端自适应阈值判决系统如图 4 所示,由光接收机、前端码元估计器、自适应阈值估计与预测器以及阈值判决电路 4 个单元组成^[51]。接收端先通过最大似然序列估计完成对前端码元的估计,再对码元均值和方差进行预测和跟踪,得到最优判决阈值,然后将接收信号与最优判决阈值比较,在判决电路中进行判决,解调出基带信号。

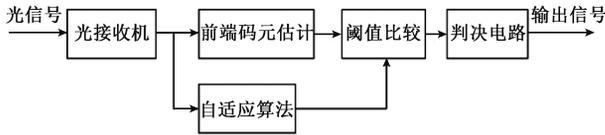


图 4 自适应阈值判决系统^[52]

Fig. 4 Adaptive threshold decision system

假设接收信号服从对数正态分布,采用 OOK 调制方式,则接收信号模型^[52]可表示为:

$$r(t) = \frac{\gamma e \lambda}{hc} I_0(t) \exp[2\chi - 2E(\chi)] + n_1(t) + n_2(t) \quad (6)$$

其中, γ 为探测器的量子效率, λ 为激光波长, h 为普朗克常量, c 为光在真空中的传播速度, $\frac{\gamma e \lambda}{hc}$ 定义为光电转换效率 η , $I_0(t)$ 为不考虑大气湍流情况下接收信号的光强, χ 为对数振幅起伏, $E(\chi)$ 为 χ 的均值, $n_1(t)$ 为与接收信号无关的热噪声等高斯噪声之和, $n_2(t)$ 为与接收信号有关的乘性噪声,且噪声 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 统计独立。

2) 最大似然估计

接收机为达到最佳接收效果,通常采用最大似然估计(maximum likelihood estimate, MLE),在没有任何先验知识的情况下,使用若干个观测值估计实际输入值^[53]。

假设接收数据是最优采样且码元已经同步,发射端发送“0”码(H_0)时的条件概率分布函数^[54]表示为:

$$p(r|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (7)$$

式中: σ_n^2 为探测器噪声方差,有 $\sigma_n^2 = \sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2$, $\sigma_{n_1}^2$ 和 $\sigma_{n_2}^2$ 分别为噪声 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 的方差, r 为接收信号。

发送“1”码(H_1)时的条件概率分布函数^[54]为:

$$p(r|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} f_\chi(\chi) \cdot \exp\left(-\frac{\left(r - \frac{\gamma e \lambda}{hc} I_0(t) \exp[2\chi - 2E(\chi)]\right)^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (8)$$

式中: $f_\chi(\chi)$ 为对数振幅起伏 χ 的概率密度函数

假设“0”码和“1”码等概发送,即 $p(H_0) = p(H_1) = 1/2$,根据最大后验概率准则和 Bayes 公式推导出逐符号最大似然探测输出比特^[55]表示为:

$$\hat{s}_{MLE}(r) = \operatorname{argmax}_s p(r|s) \quad (9)$$

式中: \hat{s}_{MLE} 表示发射字符 s (“0”码或“1”码)的最大似然估计, $\operatorname{argmax}(\)$ 表示使目标函数取最大值时的变量取值, $p(r|s)$ 表示发射字符 s 时接收信号的条件概率。

由上述推导得到似然比(likelihood ratio, LR)表达式^[56]为:

$$\Lambda(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f_\chi(\chi) \cdot \exp\left[-\frac{\left(r - \frac{\gamma e \lambda}{hc} I_0(t) \exp[2\chi - 2E(\chi)]\right)^2 - r^2}{2\sigma_n^2}\right] \begin{matrix} H_1 \\ > 1 \\ H_0 \\ < 1 \end{matrix} \quad (10)$$

式中: $\Lambda(r)$ 为接收信号的似然比, σ_n^2 为探测器噪声方差, $I_0(t)$ 为不考虑大气湍流情况下接收信号的光强。

3) 最优判决阈值

为提高系统检测性能,要求虚警概率 P_F 和漏警概率 P_M 尽可能小,满足该条件的检测阈值称为最优判决阈值,因此最优判决阈值 U_{OT} 可表示^[57]为:

$$U_{OT} = \operatorname{argmin}(P_F + P_M) \quad (11)$$

式中: U_{OT} 表示最优判决阈值, $\operatorname{argmin}(\)$ 表示使目标函数取最小值时的变量值, P_F 和 P_M 分别表示虚警概率和漏警概率。

对式(11)可以通过偏微分求零点的方式^[57]求解,即有:

$$\frac{\partial P_F}{\partial U_T} - \frac{\partial P_M}{\partial U_T} = 0 \quad (12)$$

结合式(3)和(4),可将式(12)转化为:

$$-\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{U_T - U_0}{\sqrt{2\sigma_0^2}}\right) = -\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{U_1 - U_T}{\sqrt{2\sigma_1^2}}\right) \quad (13)$$

其中, U_T 表示判决阈值, U_0 、 U_1 和 σ_0^2 、 σ_1^2 分别代表“0”码和“1”码时信号电压的均值和方差。对式(13)等式两边取自然对数,整理得:

$$\left(\sigma_1^2 - \sigma_0^2\right) U_T^2 + \left(2U_1 \sigma_0^2 - 2U_0 \sigma_1^2\right) U_T + \left(U_0^2 \sigma_1^2 - U_1^2 \sigma_0^2 + 2\sigma_0^2 \sigma_1^2 \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_1}\right) = 0 \quad (14)$$

求解式(14)中的 U_T ,则可得到最低误码率所对应的最优判决阈值^[57]为:

$$U_{OT} = \frac{\sigma_1 \sigma_0}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} \sqrt{\left(U_1 - U_0\right)^2 + 2\left(\sigma_1^2 - \sigma_0^2\right) \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right) + \dots}$$

$$\frac{U_0\sigma_1^2 - U_1\sigma_0^2}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} \quad (15)$$

在大气湍流影响下,最优判决阈值是一个随时间变化的量,根据式(15),可以从对信号均值和方差跟踪的角度出发改变最优判决阈值,保证系统误码率达到理论最小值。

2.5 典型自适应阈值检测模型

1) LMS 滤波自适应阈值检测模型

最小均方算法(least mean square, LMS)^[58]以最抖梯度下降法为基础进行迭代,包含两个基本过程:滤波过程和自适应过程。滤波过程计算线性滤波器输出对输入信号的响应,通过比较输出结果 y_k 与期望响应 d_k 产生估计误差 ε_k (即 $\varepsilon_k = d_k - y_k$),再将误差信号 ε_k 反馈回滤波器;自适应过程根据反馈回来的误差自动调整滤波器参数,使其均方误差最小化,再根据维纳-霍夫方程求解出最优维纳解,获得对信号均值和方差的最佳预测值。LMS滤波自适应阈值检测模型适用于平稳输入信号,LMS滤波算法如图5所示,将期望信号与输出信号之差作为误差信号,通过自适应权值控制算法控制误差信号,调整横向滤波器权向量,使得误差信号的均方值最小,获得最佳预测的信号均值和方差,再代入接收机最大似然比表达式中,得到最优判决阈值。

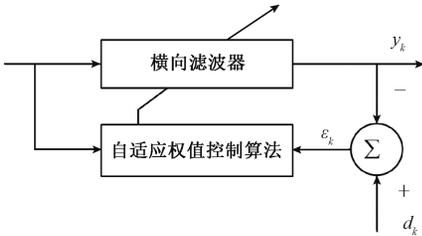


图5 LMS滤波算法模型图^[59]

Fig. 5 LMS filtering algorithm model diagram

根据LMS自适应阈值检测模型,得到系统的输出信号 y_k 和转移函数 H_k 分别^[59]表示为:

$$y_k = \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k \quad (16)$$

$$H_k = \sum_{i=1}^l w_{ik} \delta(t - iT) \quad (17)$$

式中: \mathbf{X}_k 为滤波器的输入向量, \mathbf{W}_k 为权向量, l 为横向滤波器长度, w_{ik} 为权系数, T 为码元持续周期。

将输出信号 y_k 代入误差信号 ε_k 表达式中有 $\varepsilon_k = d_k - \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k$,对其平方求均值得到均方误差性能曲面^[59]:

$$\xi = E(d_k^2) + \mathbf{W}_k^T \mathbf{R} \mathbf{W}_k - 2\mathbf{P} \mathbf{W}_k \quad (18)$$

其中, \mathbf{R} 为输入信号 \mathbf{X}_k 自相关矩阵, \mathbf{P} 为期望信号 d_k 与输入信号 \mathbf{X}_k 的互相关矩阵。计算均方误差性能曲面的梯度 $\nabla_k = \partial \xi_k / \partial \mathbf{W}_k = 2\mathbf{R} \mathbf{W}_k - 2\mathbf{P}$,由于在LMS滤波算法中 ε_k^2 被用作 ξ_k 的一个估计,故 $\hat{\nabla}_k = -2\varepsilon_k \mathbf{X}_k$ 。

LMS算法权向量更新方程^[59]表示为:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + 2\mu_c \varepsilon_k \mathbf{X}_k \quad (19)$$

式中: \mathbf{W}_k 为初始权向量, μ_c 为LMS的步长,用于控制算法的收敛速度使滤波器稳定工作, ε_k 为输出信号和期望信号的误差。

基于LMS滤波器的自适应阈值检测无需确定噪声和信号的统计关系,算法简单易于实现,但在调节滤波器权值时通常存在算法不收敛和计算量大等情况,造成系统误码率增大。由式(19)可知调整LMS滤波器的步长,可以控制LMS滤波算法的收敛速度,步长越大算法的收敛速度越快,但同时算法稳定性能变差。最简单而有效的方法就是优化步长参数选择,如采用变步长LMS滤波算法,能够在有效降低计算复杂度的同时,抑制大气湍流和噪声的影响,从而改善系统的误码性能。

2) Kalman 滤波自适应阈值检测模型

Kalman滤波^[60]是一种最优估计算法,通过线性系统的状态方程,将过去的测量估计误差合并到新的测量误差中来估计将来误差。一般用来处理非平稳输入信号,其工作原理如图6所示,系统扰动噪声向量 \mathbf{w}_k 加上 $k-1$ 时刻的系统状态 \mathbf{x}_{k-1} 与状态转移矩阵 \mathbf{A}_{k-1} 乘积便得到 k 时刻的系统状态 \mathbf{x}_k , \mathbf{x}_k 再与观测矩阵 \mathbf{H}'_k 相乘加上观测噪声向量 \mathbf{v}_k 就能得到 k 时刻状态的观测值 \mathbf{z}_k 。基于卡尔曼滤波自适应阈值常用来解决预测问题,通过前一时估计值和当前时刻观测值得到当前时刻估计值,再根据预测算法对信号的均值、方差以及湍流强度方差进行预测,自动更新判决阈值,实现信号的最佳接收。本质上是一个用于预测和线性修正的最佳状态估计器,最佳即估计误差的方差达到最小。

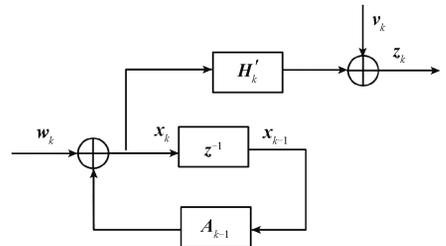


图6 Kalman滤波信号模型图^[61]

Fig. 6 Kalman filter signal model diagram

根据Kalman自适应阈值检测信号模型,分别建立系统状态方程和量测方程^[60]:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (20)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}'_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (21)$$

Kalman滤波器的增益 K_k 定义^[62]为:

$$K_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}'_k{}^T (\mathbf{H}'_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}'_k{}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (22)$$

其中,一步预测误差协方差矩阵 $\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{A}_{k|k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_{k|k-1}^T + \mathbf{Q}_k$, \mathbf{R}_k 为测量噪声向量 \mathbf{v}_k 协方差矩阵,

\mathbf{Q}_k 过程噪声向量 \mathbf{w}_k 的协方差矩阵。由此可以得到信号的预测值^[60]为:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{kl, k-1} + K_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k' \hat{\mathbf{x}}_{kl, k-1}) \quad (23)$$

湍流对数振幅起伏方差的预测^[62]可表示为:

$$\hat{\sigma}_{2v} = \frac{1}{4}(\hat{\sigma}_k^2 + 1) \quad (24)$$

其中, $\hat{\sigma}_k^2$ 为 k 时刻信号方差的估计值。由最大似然比表达式可知,接收机的判决阈值与数振幅起伏方差有关,知道振幅起伏方差的估计值,即可得到最大 LR 进行自适应阈值检测。

基于 Kalman 滤波器的自适应阈值检测能够离线计算系统的传递函数,显著减少了滤波器的存储量和计算量,使得滤波器易于从硬件上实现,对信号进行实时处理,但需要知道信号与噪声的关系,适用于非平稳随机过程。该方法通过对湍流方差、信号均值与方差的估计和预测,自适应地调整其检测阈值,降低噪声对信号的干扰,提高了接收机的检测性能,实现更低的误码率。但该方法只能对线性过程和测量模型进行精确估计和预测,在非线性场景中的无法达到最优估计效果,导致系统误码率增高,一种可行的解决方法是采用扩展 Kalman 滤波器。

3) 渐消 Kalman 滤波自适应阈值检测模型

由图 6 可知,传统 Kalman 滤波是根据前一个状态的估计值和当前观测值来估计当前状态,如果观测模型不准确,过于陈旧的观测值会对当前状态的估计产生较大影响,而忽略当前观测值的作用,导致滤波误差。渐消记忆 Kalman 滤波自适应阈值检测可以解决上述观测模型不准确所带来的问题,在传统 Kalman 滤波中加入一个渐消因子 λ_k ,使得预测方差矩阵^[62]为:

$$\mathbf{P}_{kl, k-1} = \lambda_k (\mathbf{A}_{kl, k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_{kl, k-1}^T + \mathbf{Q}_k) \quad (25)$$

式中: λ_k 为渐消因子, λ_k 取值不是越大越好, λ_k 过大会导致状态滤波的性能降低, $\mathbf{A}_{kl, k-1}$ 为一步状态转移矩阵, \mathbf{P}_{k-1} 为 $k-1$ 时刻误差协方差矩阵, \mathbf{Q}_k 为过程噪声向量的相关矩阵。

预测误差协方差和新息协方差的估计值^[34]分别为:

$$\hat{\mathbf{P}}_{kl, k-1} = \lambda_k \mathbf{P}_{kl, k-1} \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_k = \alpha_k \mathbf{C}_k \quad (27)$$

其中, α_k 为一个标量因子,通过开窗估计法确定 $\hat{\mathbf{C}}_k$, 求解出渐消因子 λ_k , 则信号的状态滤波^[34]:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{A}_{kl, k-1} \hat{\mathbf{x}}_{kl, k-1} + K_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k' \mathbf{A}_{kl, k-1} \hat{\mathbf{x}}_{kl, k-1}) \quad (28)$$

其对数起伏方差预测的计算公式同传统 Kalman 滤波自适应阈值检测,通过 k 时刻信号方差的预测值求解对数振幅起伏方差的预测值,得到接收机的似然比进行阈值判决。基于渐消 Kalman 滤波的自适应阈值检测通过引入渐消因子,降低滤波器的记忆长度,来减小过去数

据的影响,使当前数据在滤波过程中发挥主要的作用,从而抑制 Kalman 滤波发散的产生。相对于传统 Kalman 滤波算法,系统的误码性能有所改善。

上述 3 种自适应阈值检测模型适用于弱湍流条件下的自适应信号处理,对于强湍流大气条件下,通常采用基于高阶累积量自适应阈值检测技术。

2.6 高阶累积量自适应阈值检测

近年来,西安理工大学柯熙政教授团队对无线光通信中的自适应光学系统进行了广泛研究,并取得了卓越的成绩,其中包括对高阶累积量中自适应算法、盲均衡和阈值检测技术等方面的研究^[25-26, 32, 63-64]。无线光通信系统噪声模型大多服从高斯分布,一般使用二阶统计量对其进行分析处理,对于非高斯信号处理可以使用高阶(3 阶及 3 阶以上)累积量,同时高阶累积量中包含比二阶统计量更多信息,能够更加准确的反映信号特征,适合复杂信道环境下的信号检测。基于高阶累积量自适应阈值检测使用高阶累积量对信道参数和噪声进行估计,可以较好地抑制湍流对无线光通信系统接收信号的影响,改善系统性能。

1) 判决引导自适应滤波算法

判决引导算法(decision directed, DD)的收敛能力弱,但其稳态跟踪性能较好,因此将判决引导算法与基于高阶累积量的 LMS 自适应滤波算法相结合^[25],能够在兼顾算法稳定性的同时提高其收敛性。基于高阶累积量的判决引导自适应滤波算法利用高阶累积量作为代价函数,更新滤波器的抽头系数,不仅可以获得较小的均方误差,而且对加性噪声和非高斯有色噪声有较好的抑制作用。

图 7 为选取最优步长时高阶累积量判决引导算法和判决引导算法的均方误差(mean square error, MSE)曲线。从图 7 可以看出,判决引导算法在迭代次数 $n = 50$ 时达到收敛,高阶累积量判决引导算法在 $n = 200$ 时达到收敛,相对于判决引导算法,虽然高阶累积量判决引导算法收敛速度较慢、复杂度较高,但其稳态误差有所改善。

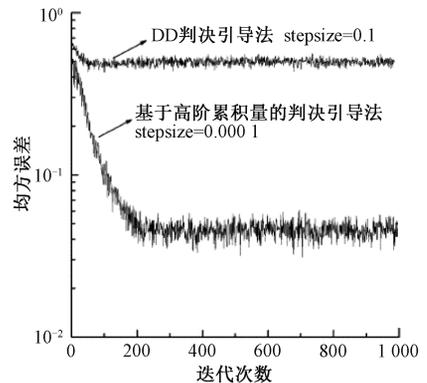


图 7 两种算法性能比较^[25]

Fig. 7 Performance comparison of two algorithms

同时针对大气信道中不同噪声类型,采用高阶累积量判决引导自适应滤波算法对其误差性能进行了研究,得到不同步长的均方误差曲线和同一步长下3种噪声模型的均方误差曲线,分别如图8和9所示。

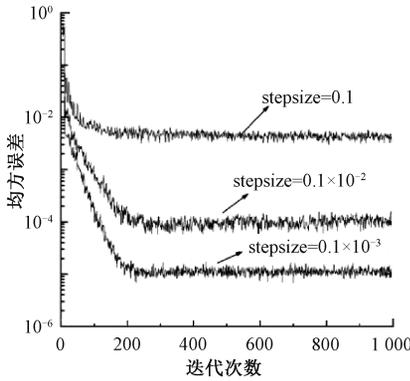


图8 不同步长的均方误差(MSE)曲线^[25]
Fig. 8 MSE curves with different step sizes

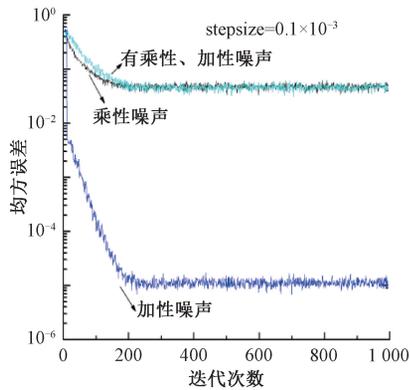


图9 3种噪声模型的均方误差(MSE)曲线^[25]
Fig. 9 MSE curves of three noise models

从图8中可以看出,当 stepsize = 0.1 时,算法的收敛速度和稳态误差都达到最大值。随着 stepsize 的减小,算法的收敛速度逐渐降低,但其稳定性不断提高,表明算法收敛性的提高通常以算法的稳定性为代价。

从图9中可以看出,相比仅受加性噪声时,算法的稳态误差在仅受乘性噪声影响时明显增大,而在只有乘性噪声影响下算法的收敛速度比既有乘性又有加性噪声略快,且二者稳态误差相差较小,表明基于高阶累积量的判决引导自适应滤波算法可以有效抑制加性噪声,因此在既有乘性噪声又有加性噪声影响时算法的收敛性和稳定性接近于仅受乘性噪声的情况。

2) 滑动相关自适应阈值算法

滑动相关检测^[65-66]是指在滑动窗口内通过自相关和互相关运算对信号进行检测或去噪处理,滑动窗口长度近似等于被检测信号的长度,滑动步长为窗口长度的一

半,能够显著减小滑窗带来的计算量和信号损失。由于相关函数一般只能处理加性白噪声的观测数据,提出将高阶累积量与相关检测相结合,其检测原理^[26]如图10所示,输入一个随机脉冲信号,对其进行采样滤波后,与信号的4倍频分量相乘($[\cdot]^4$ 表示4次方非线性变换),再通过滑动相关算法进行信号检测,该方法能够实现多重相关,提高系统检测概率。

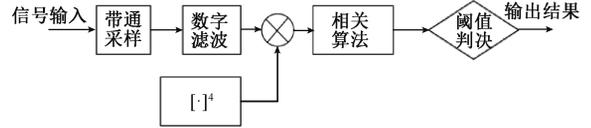


图10 高阶累积量滑动相关检测^[26]
Fig. 10 High-order cumulant sliding correlation detection

基于高阶累积量的滑动相关自适应阈值检测^[26],利用滑动相关算法对接收信号进行积累相关运算,所得到的输出信号每个帧周期内含有L个相关峰,但其中仅有一个是携带了发送信息的最大自相关峰,将给定帧长内输出信号的相关峰送入信号检测器中,通过自适应阈值控制算法对其进行判决、累加、比较,得到自适应判决阈值,其控制算法原理如图11所示。

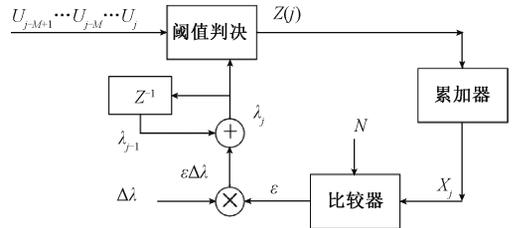


图11 滑动相关检测自适应阈值控制算法^[26]
Fig. 11 Sliding correlation detection adaptive threshold control algorithm

输入阈值判决器的相关峰样值信号 U_j , 取其相邻 N 个信号码元内的 $N \times L$ 个样值 $U_{j-M+1}, U_{j-M}, \dots, U_j$ 作为观测对象, 阈值判决器判决出每个帧周期内输出信号的最大自相关峰, 若 $U_{j-M} \geq \lambda_j$ (M 为 $0 \sim NL$ 的整数), 判决器输出 $Z(j) = 1$, 否则输出 $Z(j) = 0$ 。累加器对判决输出的 $N \times L$ 个 $Z(j)$ 信号样值累加求和, 输出信号 $X_j = \sum_{M=0}^{M-1} Z(j-M)$ 。将累加和 X_j 送入比较器, 与预定的参考码元数 N 进行比较, 得到一个可控制阈值调整方向的变量值 ϵ , 其比较过程可以等效为一个符号函数, 即 $\epsilon = \text{SGN}(X_j - N)$, 然后 ϵ 与阈值控制增量 $\Delta\lambda$ 相乘获得阈值的变化量 $\epsilon\Delta\lambda$, 最后通过 $\epsilon\Delta\lambda$ 实现对判决阈值 $\lambda_j = \lambda_{j-1} + \epsilon\Delta\lambda$ 的自适应控制。

3) 强湍流信道自适应阈值检测

无线光通信根据大气湍流程度和运动状态的不同,

可将大气信道分为弱湍流 ($C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17} m^{-2/3}$, C_n^2 为大气折射率结构常数) 信道、中湍流 ($6.4 \times 10^{-17} m^{-2/3} < C_n^2 < 2.5 \times 10^{-13} m^{-2/3}$) 信道和强湍流 ($C_n^2 > 2.5 \times 10^{-13} m^{-2/3}$) 信道^[67]。针对强湍流信道的自适应阈值检测, 西安理工大学利用修正的球不变随机过程法建立了一种 K 分布强湍流信道模型^[31], 避免了随机变量的各态历经问题, 在此信道模型之上利用低阶累计量和高阶累计量之间的保护特性分析从光强信号中得到的新息过程的高阶累计量^[32,63], 从而估计出信号的衰落以及高斯噪声, 再分别对信号衰落和噪声单独处理, 得到湍流信号的实时参数以控制信号判决阈值。

在 OOK 调制下, 定义此 K 分布下系统的信噪比 $SNR = \mu / 2\sigma_n^2$, 初始条件设置信号衰落噪声比 CNR_K 和两种噪声比 CNR_c 为 10 dB, 信道相关系数和噪声相关系数为 0.9, 采样数 $m = 32$, 研究噪声参数与理论值的偏差和方差^[32]。图 12 和 13 即为不同阶参数 v 条件下, 使用高阶累计量估计高斯噪声参数 $\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2$ 时, $\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2$ 与理论值的估计偏差和方差变化曲线, 虚线表示 $\sigma_{n_1}^2$, 实线表示 $\sigma_{n_2}^2$ 。从图 12 和 13 中可以看出, $v = 0.1$ 时, $\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2$ 估计值的偏差和方差最大, 随着阶参数 v 的增大, $\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2$ 估计值的偏差和方差越来越小, 表明阶参数逐渐增大时系统也开始趋于稳定, 但 $\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2$ 估计值的偏差和方差不会随着 v 的增大一直减小, 当 $v = 4.5$ 时, 继续增大 v 值, 估计值的偏差和方差会达到一个临界点而趋于饱和, 这是因为增大阶参数导致高斯噪声的估计值变大所造成的。

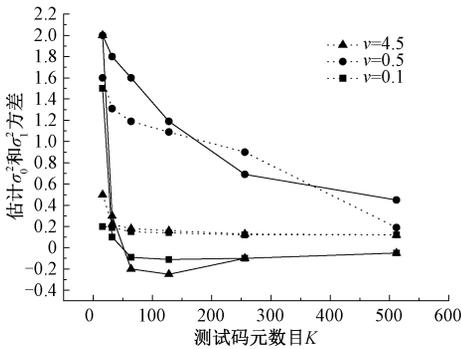


图 12 $\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2$ 的估计偏差与 K 值关系图^[32]

Fig. 12 The relationship between the estimated deviation of $\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2$, and K value

对接收到数字信号的脉冲的 50% 处采样, 令均值 $\mu = 1$, 阶参数 $v = 2$, 固定阈值为 0.5, 研究了采用两种不同阈值检测方法时光通信系统的误码性能, 如图 14 所示, 虚线代表固定阈值, 实线代表采样数 m 分别为 8, 16, 32, 64 时的自适应阈值。从图 14 中可知, 相比固定阈值检测, 自适应阈值检测可显著降低系统误码率, 同时在采

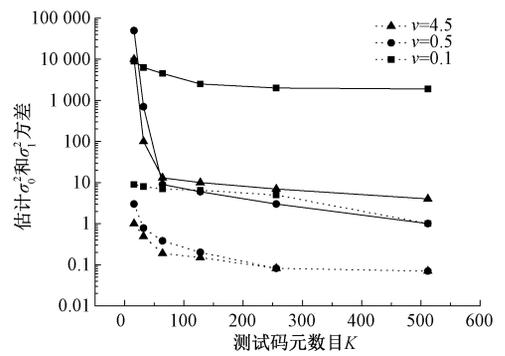


图 13 $\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2$ 的估计方差与 K 值关系图^[32]

Fig. 13 The relationship between the estimated variance of $\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2$, and K value

用自适应阈值检测方法时, 采样数越大获取的信号信息越准确, 对系统的性能改善也越明显。

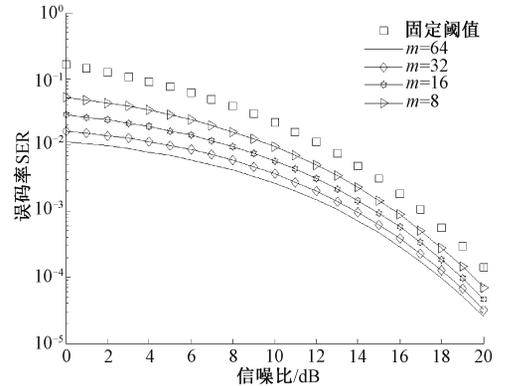


图 14 误码率随信噪比的变化曲线^[63]

Fig. 14 The variation curve of bit error rate with SNR

图 15~17 分别为大雨、中雨和小雨天气下采用自适应阈值检测的误码率随信噪比的变化曲线。由图 15~17 可知, 在信噪比相同的条件下, 系统误码率随采样数增大而减小, 且采样数越大, 采用自适应阈值检测技术对系统性能改善作用越明显, 当采样数超过 32 时, 其性能提升趋于平缓。

图 18 为采样数 64 时, 大雨、中雨和小雨天气接收信号误码率随信噪比的变化曲线。在相同信噪比条件下, 大雨天气下接收信号的误码率低于中、小雨天气, 显著提高了信号的接收质量。

在上述雨天所进行的自适应阈值检测实验基础上进一步对晴天和雾天自适应阈值检测的误码性能进行了研究^[64]。晴天、雾天和雨天误码率随信噪比的变化曲线分别为图 19、20 和 21 所示, 从图 19~21 中得到与图 15~17 相同的结论, 再次验证了采样数与误码率之间关系的正确性。

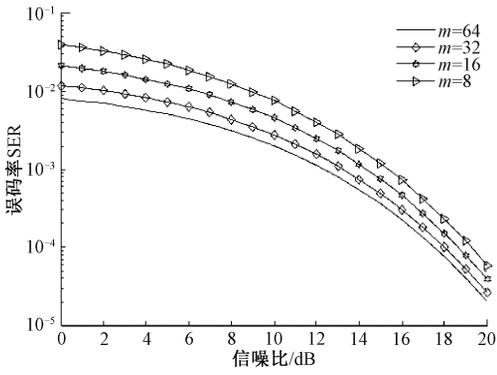


图 15 大雨天气误码率随信噪比变化曲线^[32]

Fig. 15 The curve of bit error rate with SNR in heavy rain weather

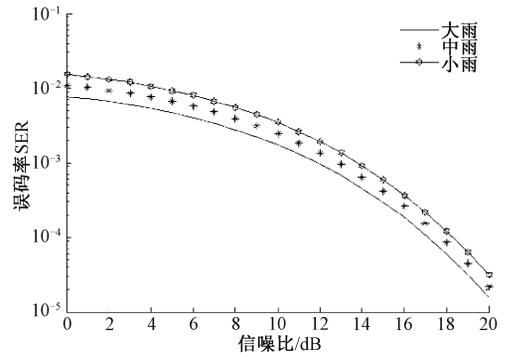


图 18 不同天气下误码率随信噪比变化曲线^[32]

Fig. 18 The curve of bit error rate with SNR under different weather conditions

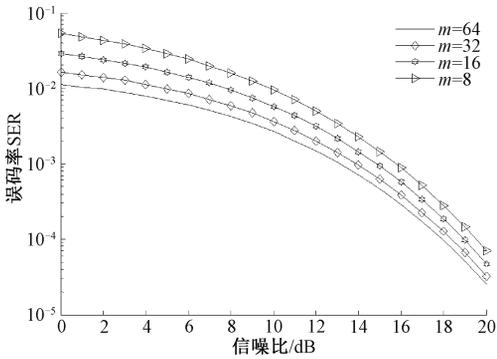


图 16 中雨天气误码率随信噪比变化曲线^[32]

Fig. 16 The curve of bit error rate with SNR in moderate rain weather

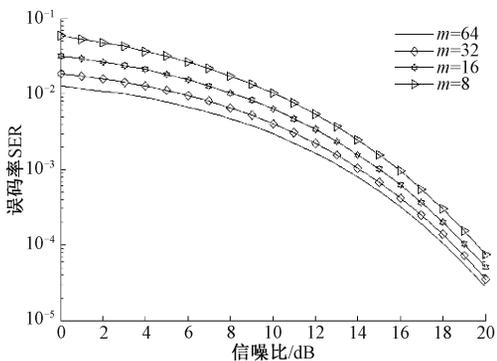


图 17 小雨天气误码率随信噪比变化曲线^[32]

Fig. 17 The curve of bit error rate with SNR in light rain weather

时参数实现自适应阈值检测并分析其性能。与固定阈值检测方法相比,采用自适应阈值可以明显降低通信系统误码率;码元采样数越大,系统性能越好,但算法复杂度也越高。在不同天气下对自适应阈值检测方法进行检验,结果表明,采用该检测方法可以有效克服强湍流对无线通信系统接收信号的影响,改善系统误码性能。

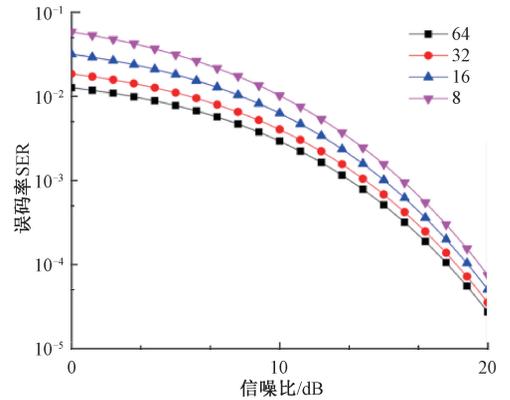


图 19 晴天时误码率随信噪比变化曲线^[64]

Fig. 19 The curve of bit error rate with SNR in sunny days

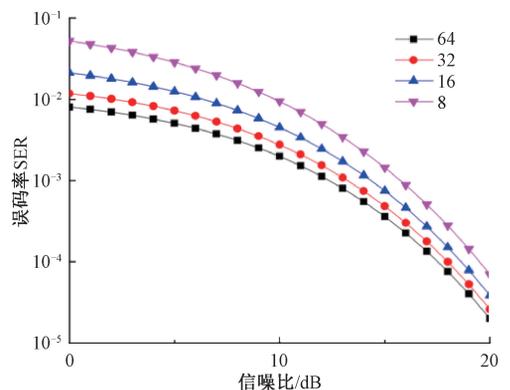


图 20 雾天时误码率随信噪比变化曲线^[64]

Fig. 20 The curve of bit error rate with SNR in foggy days

图 22 为不同天气下接收信号误码率与信噪比的关系曲线,在采样值相同的条件下,信噪比与误码率成反比,表明增大信噪比可以提高通信质量。

在大气强湍流信道条件下,利用高阶累积量得到实

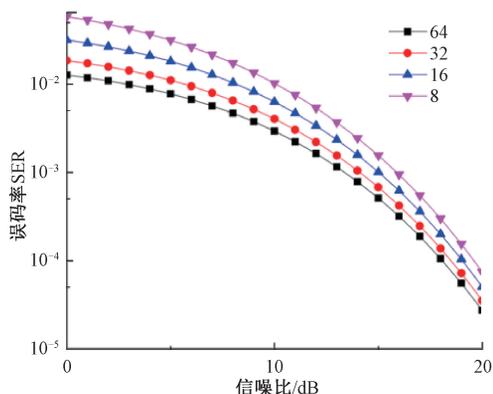


图 21 雨天时误码率随信噪比变化曲线^[64]

Fig. 21 The curve of bit error rate with SNR in rainy days

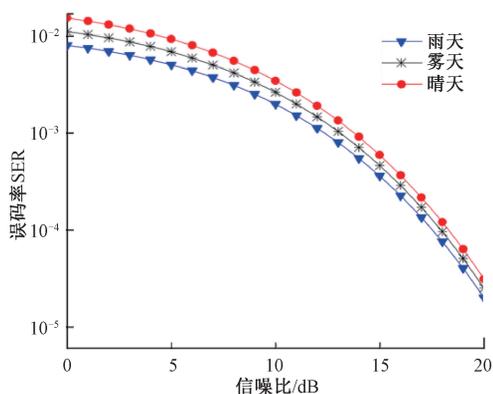


图 22 不同天气下误码率随信噪比变化曲线^[64]

Fig. 22 The curve of bit error rate with SNR under different weather conditions

3 结 论

大气光通信系统性能受判决阈值影响较大,相比传统的固定阈值检测,自适应阈值检测可以实时更新最优判决阈值,提高检测概率,缩短捕获时间,以较低成本有效降低无线光通信系统的误码率。

本文回顾了自适应阈值检测研究进展,介绍了最优阈值策略和几种常用的自适应阈值检测算法,对无线光通信自适应阈值检测技术的发展趋势进行展望,主要包括如下 4 个方面:

1) 由于无线光通信的数据传输速率越来越高,高速光通信中难以获得信道状态信息,需要研究如盲估计等无需信道状态信息的阈值检测技术。

2) 优化自适应阈值控制算法(如最大似然、广义最大似然和最小均方误差等算法),减少迭代次数,降低算法复杂度,实现接收信号实时阈值判决。

3) 研究不同调制格式^[68]和湍流强度下^[69]最优判决阈值,以应对复杂大气信道条件下的信号检测。

4) 根据接收信号平均强度和信道湍流强度等统计量随时间缓慢变化的特性,研究最优常量阈值检测技术,降低自适应阈值检测实现难度。

参考文献

[1] KHALIGHI M A, UYSAL M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4) : 2231-2258.

[2] 陈牧,柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8) : 115-121. CHEN M, KE X ZH. Effects of atmospheric turbulence on the performance of laser communication systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8) : 115-121.

[3] 梁静远,李梦茹,王佳帆,等. 无线光通信系统纠错编码研究进展[J]. 物联网学报, 2022, 6(3) : 23-36. LIANG J Y, LI M R, WANG J F, et al. Research progress of error correction coding in wireless optical communication systems[J]. Journal of Internet of Things, 2022, 6(3) : 23-36.

[4] CHOI K, CHEUN K, JUNG T. Adaptive PN code acquisition using instantaneous power-scaled detection threshold under Rayleigh fading and pulsed Gaussian noise jamming [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(8) : 1232-1235.

[5] BURRIS H R. Adaptive signal processing methods for bit error rate reduction in optical communication systems[D]. Washington: The Catholic University of America, 2003.

[6] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals [J]. IEEE, 1967, 55 (4) : 523-531.

[7] 刘乃安,曾兴雯,郭峰,等. 高速突发通信中的自适应门限技术及其性能[J]. 电子学报, 1998, 26 (1) : 111-114. LIU N AN, ZENG X W, GUO F, et al. Adaptive threshold technology and its performance in high-speed burst communication[J]. Journal of Electronics, 1998, 26(1) : 111-114.

[8] MUKAI R, ARABSHAHI P, YAN T Y. An adaptive threshold detector and channel parameter estimator for deep space optical communications [J]. IEEE, 2001, 1(3) : 50-54.

[9] BURRIS H R, REED A E, NAMAZI N M, et al. Adaptive thresholding for free-space optical communication receivers with multiplicative noise [J]. IEEE, 2002, 3(3) : 1473-1480.

- [10] ZHU X M, KAHN J M, WANG J. Mitigation of turbulence-induced scintillation noise in free-space optical links using temporal-domain detection techniques[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(4): 623-625.
- [11] COLE M, KIASALEH K. Signal intensity estimators for free-space optical communications through turbulent atmosphere [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(10): 2395-2397.
- [12] NAMAZI N M, BURRIS R, GILBREATH G C. Analytical approach to the calculation of probability of bit error and optimum thresholds in free-space optical communication[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(2): 25-32.
- [13] RIEDIGER M L B, SCHOBBER R, LAMPE L. Decision-feedback detection for free-space optical communications[J]. *IEEE*, 2007, 3(7): 1193-1197.
- [14] RIEDIGER M L B, SCHOBBER R, LAMPE L. Fast multiple-symbol detection for free-space optical communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(4): 1119-1128.
- [15] MORADI H, REFAI H H, LOPRESTI P G. Thresholding-based optimal detection of wireless optical signals [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, 2(9): 689-700.
- [16] CHATZIDIAMANTIS N D, KARAGIANNIDIS G K, UYSAL M. Generalized maximum-likelihood sequence detection for photon-counting free space optical systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(12): 3381-3385.
- [17] SONG T, 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*, 2013, 32(3): 369-383.
- [18] BEAULIEU N C, BARTOLI G, MARABISSI D, et al. The structure and performance of an optimal continuous-time detector for Laplace noise [J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(6): 1065-1068.
- [19] DABIRI M T, SADOUGH S M S. Generalized blind detection of OOK modulation for free-space optical communication [J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(10): 2170-2173.
- [20] CHOI I Y, SHIN W H, HAN S K. CSI estimation with pilot tone for scintillation effects mitigation on satellite optical communication [J]. *Optics Communications*, 2019, 435(11): 88-92.
- [21] SHIN W H, CHOI J Y, HAN S K. Fixed threshold on-off keying differential detection for satellite optical communications [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1590-1596.
- [22] CHOI J Y, LEE J W, HAN S K. Stochastic approximation aided adaptive thresholding for optical detection in PAM4 based FSO transmission [J]. *IEEE Access*, 2021, 9(7): 106451-106458.
- [23] 王瑾, 黄德修, 元秀华. 基于 LSM-Kalman 滤波器的湍流噪声抑制[J]. *光电工程*, 2006, 33(7): 39-43.
- WANG J, HUANG X D, YUAN X H. Turbulence noise suppression based on LSM- Kalman filter [J]. *Optical Engineering*, 2006, 33(7): 39-43.
- [24] 吴玉成, 陈婷婷. 在滑动窗口中判决的自适应门限检测方法[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(10): 2770-2773.
- WU Y CH, CHEN T T. Adaptive threshold detection method for decision in sliding window [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(10): 2770-2773.
- [25] 王妮. 基于高阶累积量的大气激光通信信道盲均衡的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- WANG N. Research on blind equalization of atmospheric laser communication channel based on high-order cumulant [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [26] 赵致峰. 电力线载波集中抄表系统设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- ZHAO ZH F. Design and implementation of power line carrier centralized meter reading system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [27] WANG Z X, ZHONG W D, YU C. Performance improvement of OOK free-space optical communication systems by coherent detection and dynamic decision threshold in atmospheric turbulence conditions[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(22): 2035-2037.
- [28] 李风飞, 胡国荣. 电力线 OFDM 通信系统的自适应定时同步阈值选择方法[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(23): 93-96.
- LI F F, HU R G. Adaptive timing synchronization threshold selection method for power line OFDM communication system [J]. *Power System Automation*, 2013, 37(23): 93-96.
- [29] 尚耀波, 郭英, 王锦江, 等. 基于信噪比的自适应门限判决 PN 码捕获算法[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(4): 88-93.
- SHANG Y B, GUO Y, WANG J J, et al. Adaptive threshold decision PN code acquisition algorithm based on SNR [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2014,

- 34(4):88-93.
- [30] 张波,郭英,侯文林,等. 可变阈值因子的快速自适应门限检测算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(8):62-65.
ZHANG B, GUO Y, HOU W L, et al. Fast adaptive threshold detection algorithm with variable threshold factor[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(8): 62-65.
- [31] 柯熙政,田晓超. 二维相关 K 分布湍流信道的建模与仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(4):41-49.
KE X ZH, TIAN X CH. Modeling and simulation of two-dimensional correlated K-distributed turbulent channel[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4):41-49.
- [32] 田晓超. 强湍流下大气激光通信接收信号的自适应处理[D]. 西安:西安理工大学, 2015.
TIAN X CH. Adaptive processing of received signal in atmospheric laser communication under strong turbulence[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015.
- [33] DING S L, ZHANG J K, DANG A H. Adaptive threshold decision for on-off keying transmission systems in atmospheric turbulence [J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24425-24436.
- [34] 张红玲,刘智,倪小龙,等. 大气光通信中自适应阈值的优化技术研究 [J]. 信息通信, 2018, 185(5): 229-230.
ZHANG H L, LIU ZH, NI X L, et al. Research on the optimization technology of adaptive threshold in atmospheric optical communication [J]. Information Communication, 2018, 185(5):229-230.
- [35] 李晓燕,张鹏,佟首峰. 大气湍流影响下基于自适应判决门限的逆向调制自由空间光通信系统误码率性能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(6):161-170.
LI X Y, ZHANG P, TONG SH F. BER performance analysis of reverse modulation free space optical communication system based on adaptive decision threshold under the influence of atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6):161-170.
- [36] 朱宝芹,张明清,陈健. 自适应判决门限和直流提取技术对 OOK/FSO 系统性能的优 [J]. 量子电子学报, 2018, 35(1):108-114.
ZHU B Q, ZHNAG M Q, CHEN J. Performance optimization of OOK/FSO system by adaptive decision threshold and DC extraction technique [J]. Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(1):108-114.
- [37] LI L, GENG T W, WANG Y, et al. Free-space optical communication using coherent detection and double adaptive detection thresholds [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 11(1): 1-17.
- [38] LI X Y, ZHAO X H, ZHANG P. Bit error rate analysis for modulating retro-reflector free space optical communications with adaptive threshold over correlated gamma gamma fading channels [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(12): 2275-2278.
- [39] JIANG X L, DIAO M. A new type double-threshold signal detection algorithm for satellite communication systems based on stochastic resonance technology [J]. Wireless Networks, 2019, 12(13):259-272.
- [40] 刘洋. 一种适用于 16QAM 的自适应阈值载波锁定检测算法[J]. 电讯技术, 2020, 60(2): 164-168.
LIU Y. An adaptive threshold carrier lock detection algorithm for 16QAM [J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(2): 164-168.
- [41] LIU C, XIE F, DONG X, et al. Small target detection from infrared remote sensing images using local adaptive thresholding [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15(1): 1941-1952.
- [42] ZHANG J, LIANG Y, ZHU Y, et al. Adaptive symbol-by-symbol decision feedback threshold detection receiver to suppress oceanic turbulence scintillation effect [J]. Optics Communications, 2023, 530(1): 1-8.
- [43] 王惠琴,王雪,孙剑锋,等. 相关信道下无线光多输入多输出系统的平均容量 [J]. 光学学报, 2016, 36(7): 41-49.
WANG H Q, WANG X, SUN J F, et al. Average capacity of wireless optical multiple-input multiple-output systems over correlated channels [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 41-49.
- [44] 柯熙政,邓莉君. 无线光通信 [M]. 北京:科学出版社, 2016.
KE X ZH, DENG L J. Optical Wireless Communication [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [45] 柯熙政,秦欢欢,杨尚君,等. 车联网可见光通信系统夜间背景光噪声模型 [J]. 电波科学学报, 2021, 36(6):986-990.
KE X ZH, QIN H H, YANG SH J, et al. Night background light noise model of visible light communication system for vehicular networks [J]. Journal of Radio Science, 2021, 36(6): 986-990.
- [46] 吕辉,高瞻. 自由空间光通信系统中的激光器和探测器 [J]. 电信快报, 2003, 15(3):35-37.
LYU H, GAO ZH. Lasers and detectors in free space optical communication systems [J]. Telecommunication

- Express, 2003, 15(3): 35-37.
- [47] 李菲,路后兵. 弱湍流条件下大气光通信的阈值优化方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 190-195.
LI F, LU H B. Threshold optimization method for atmospheric optical communication under weak turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 190-195.
- [48] 汤海. 大气衰减信道光通信系统传输误码率研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(2): 1-4.
TANG H. Research on transmission error rate of atmospheric attenuation channel optical communication system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(2): 1-4.
- [49] 伍长鑫,向健勇,马景义,等. 光电积累检测原理和发现概率及虚警概率的测试方法[J]. 光电工程, 1990, 17(5): 26-34.
WU CH L, XIANG J Y, MA J Y, et al. Photoelectric accumulation detection principle and detection probability and false alarm probability test method [J]. Opto-Electronic Engineering, 1990, 17(5): 26-34.
- [50] MIDDLETON D. Canonically optimum threshold detection[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1966, 12(2): 230-243.
- [51] ARNON S. The effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless communication systems[J]. Optics Letters, 2003, 28(2): 129-131.
- [52] 王瑾. 光无线通信自适应接收技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
WANG J. Research on adaptive receiving technology of optical wireless communication[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [53] 林京. 基于最大似然估计的小波阈值消噪技术及信号特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(9): 923-927.
LIN J. Wavelet threshold denoising technique based on maximum likelihood estimation and signal feature extraction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(9): 923-927.
- [54] BURRIS H R, NAMAZI N M, REED A E, et al. Comparison of adaptive methods for optimal thresholding for free-space optical communication receivers with multiplicative noise [J]. SPIE, 2002, 4821(9): 139-154.
- [55] LEE P. Computation of the bit error rate of coherent M-ary PSK with Gray code bit mapping[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34(5): 488-491.
- [56] WANG J, YUAN X, HUANG D. Suppression of turbulence noise in optical wireless communication system[J]. SPIE, 2005, 5625(11): 1077-1084.
- [57] GAGLIARDI R M, KARP S. Optical Communications[M]. New York: Wiley-Interscience, 1995.
- [58] 张倩. 变抽头长度 LMS 自适应算法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(21): 114-118.
ZHANG Q. Research on variable tap length LMS adaptive algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(21): 114-118.
- [59] 王瑾,黄德修,元秀华. 基于最小均方自适应滤波器的无线光通信接收性能分析[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1379-1383.
WANG J, HUANG D X, YUAN X H. Receiver performance analysis of wireless optical communication based on least mean square adaptive filter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(10): 1379-1383.
- [60] 卢艳军,陈雨荻,张晓东,等. 基于扩展 Kalman 滤波的姿态信息融合方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 281-288.
LU Y J, CHEN Y D, ZHANG X D, et al. Research on attitude information fusion method based on extended Kalman filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 281-288.
- [61] 张红玲. 基于自适应阈值的大气光通信优化技术研究[D]. 长春:长春理工大学, 2018.
ZHANG H L. Research on atmospheric optical communication optimization technology based on adaptive threshold [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [62] 王瑾,黄德修,元秀华,等. 基于自适应滤波器的大气湍流噪声抑制[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 750-753.
WANG J, HUANG D X, YUAN X H, et al. Atmospheric turbulence noise suppression based on adaptive filter [J]. Optical Technology, 2006, 32(5): 750-753.
- [63] KE X Z, JI X K. Research on adaptive threshold of received signal in communication system[J]. Optics and Photonics Journal, 2021, 11(1): 1-11.
- [64] 季旭宽. 无线光通信系统信号阈值检测处理研究[D]. 西安:西安理工大学, 2021.
JI X K. Research on signal threshold detection and processing of wireless optical communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [65] 李锐,何辅云,夏玉宝. 相关检测原理及其应用[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(4): 573-576.
LI R, HE F Y, XIA Y B. Principle and application of correlation detection [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2008, 31(4): 573-576.
- [66] 汪志宁,刘春,戴雷,等. 小波变换组合双线性插值法

在北斗周跳中的应[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 50-57.

WANG ZH N, LIU CH, DAI L, et al. Application of wavelet transform combined bilinear interpolation method in Beidou cycle slip [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(11): 50-57.

- [67] 吴晓军, 王红星, 李笔锋, 等. 近海面大气折射率结构常数统计特性分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 17-26.

WU X J, WANG H X, LI B F, et al. Statistical characteristics analysis of atmospheric refractive index structure constant near sea surface [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 17-26.

- [68] 高晓梅, 舒玉婷, 梁静远, 等. 通信激光器及其调制技术研究进展[J]. 光通信研究, 2022, 48(11): 1-19.

GAO X M, SHU Y T, LIANG J Y, et al. Research progress of communication laser and its modulation technology[J]. Optical Communication Research, 2022, 48(11): 1-19.

- [69] 李征, 廖志文, 梁静远, 等. 大气湍流模型的研究与展望[J]. 光通信技术, 2022, 46(12): 1-13.

LI ZH, LIAO ZH W, LIANG J Y, et al. Research and prospect of atmospheric turbulence model [J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(12): 1-13.

作者简介



梁静远, 2012 年于陕西理工大学获得学士学位, 2015 年于西安理工大学获得硕士学位, 现为西安理工大学助理工程师, 主要研究方向为无线光通信系统调制解调技术。

E-mail: ljy@xaut.edu.cn

Liang Jingyuan received her B. Sc. degree from Shaanxi University of Technology in 2012, and M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2015, respectively. Now she is an assistant engineer at Xi'an University of Technology. Her main research interests include modulation and demodulation technology of optical wireless communication system.



柯熙政 (通信作者), 1979 年于陕西工学院获得学士学位, 1992~1996 年就读于中国科学院大学获得硕士学位和博士学位, 现为西安理工大学教授, 主要研究方向为无线光通信理论与技术。

E-mail: xzke@263.net

Ke Xizheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shaanxi Institute of Technology in 1979, M. Sc. degrees and Ph. D. degrees from the University of Chinese Academy of Sciences from 1992 to 1996. Now he is a professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include theory and technology of optical wireless communication.