

基于姿态检测与 Sugeno 模糊推理的速率自适应算法

夏巍, 荣凯*, 马驻

(安徽建筑大学 电子与信息工程学院, 合肥 230601)

摘要:为解决水下湍流导致光束偏移、通信链路不稳定的问题,提出一种基于姿态检测与 Sugeno 模糊推理的速率自适应方法。通过 MPU9250 姿态传感器实时采集设备三维姿态数据,经差值运算得到相对角度偏差,并将其作为模糊控制器的输入变量,依据预设模糊规则动态匹配最优通信速率等级,实现收发两端速率同步调整。实验结果表明,该方法可在 Y、Z 轴偏移角度变化时自动切换通信速率(从 460 800 b/s 降至 1 200 b/s),有效维持链路连通性,显著提升水下可见光通信的可靠性与鲁棒性。

关键词:水下可见光通信;通信速率自适应;姿态检测;三维姿态;Sugeno 模糊推理模型

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0042-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.007

Rate adaptive algorithm based on pose detection and Sugeno fuzzy inference

XIA Wei, RONG Kai*, MA Zhu

(School of Electronics and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: To address the issues of beam deviation and unstable communication links caused by underwater turbulence, a rate adaptive method based on attitude detection and Sugeno fuzzy inference is proposed. The MPU9250 pose sensor is used to collect real-time three-dimensional attitude data of the device, relative angular deviations are obtained through difference calculations and serve as input variables for the fuzzy controller. Based on predefined fuzzy rules, the controller dynamically matches the optimal communication rate level, enabling synchronized rate adjustment between transmitter and receiver. Experimental results show that this method automatically switches communication rates (from 460 800 b/s to 1 200 b/s) when angular deviations occur along the Y and Z axes, effectively maintaining link connectivity and significantly enhancing the reliability and robustness of underwater visible light communication.

Key words: underwater visible light communication, communication rate adaptation, posture detection, three-dimensional pose, Sugeno fuzzy inference model

0 引言

随着水下探索活动的不断深入,水下可见光通信(UVLC)因其高带宽、低延迟等优势,已成为当前水下

收稿日期:2024-12-27。

基金项目:安徽省高校省级自然科学基金项目-重大项目(2024AH040039)资助;合肥厘海科技有限公司项目(HYB20230129)资助。

作者简介:夏巍(1971—),男,安徽合肥人,博士,教授,安徽省计算机学会理事,安徽省数字安徽专家委员会评审专家委员会专家。主要研究方向为无线传感网、物联网、建筑监测与安全、智慧城市。主持安徽省高校科学基金重点项目1项,参与完成国家自然科学基金项目等10余项,获安徽省科技进步三等奖1项。

*通信作者:荣凯(1998—),男,硕士,主要研究方向为嵌入式系统。



无线通信领域的研究热点^[1-4]。然而,水下环境存在显著湍流效应,易引起光强闪烁、光束漂移等现象,导致接收信号强度剧烈波动,严重降低通信质量与可靠性。因此,有效抑制湍流对通信性能的影响,已成为该领域亟待解决的关键问题。

针对水下湍流对通信链路的不利影响,已有研究从多个角度提出了缓解策略。CHEN H 等人^[5]利用准艾里超几何高斯涡旋光束的自聚焦特性以抑制湍流干扰;UPPALAPATI A 等人^[6]采用 M 阶正交幅度调制结合重构网络系统以应对伽马-伽马湍流模型。LI X 等人^[7]基于单光子雪崩二极管信号累加方法,在广义伽马分布湍流中实现了较低误码率。LI X 等人^[8]将偏振

编码技术引入轨道角动量系统,有效提升了恶劣湍流环境中的通信性能;ROMDHANE I 等人^[9]提出了一种基于强化学习的自适应光束调控方法,提高了水下通信链路的成功率;LIU J 等人^[10]则设计了动态计数阈值机制,在设备移动中仍维持误码率低于前向纠错阈值,提高了水下通信过程的稳定性。

尽管上述研究在不同层面取得了进展,但现有方法大多未充分考虑水下设备在湍流作用下发生的随机空间漂移对通信链路稳定性的影响。针对这一研究缺口,本文提出一种基于姿态检测与 Sugeno 模糊推理的速率自适应算法。

1 水下光通信系统设计

本文为验证所提出算法的可行性,搭建了 UVLC 系统,如图 1 所示。系统发射端与接收端均采用 STM32F103RCT6 微控制单元,其中发射端集成 MPU9250 姿态传感器(下文简称 MPU9250)。

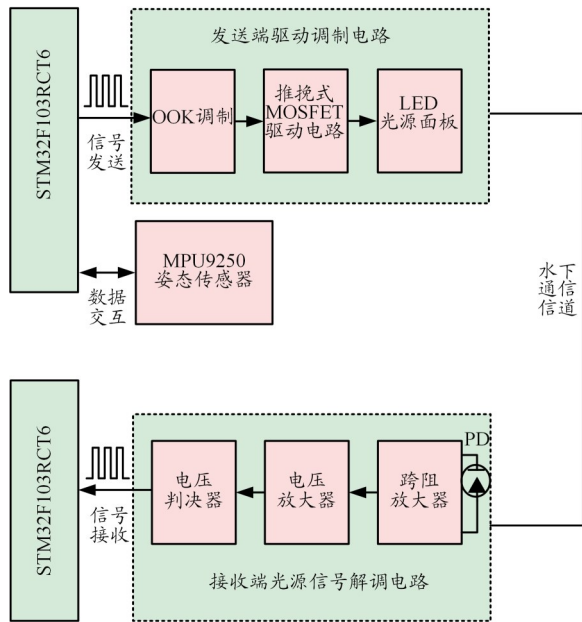


图 1 水下可见光通信系统

由于蓝绿光波长处于水的透射窗口范围内,可在水中实现较高传输速率并覆盖较远距离^[12],因此本文选用波长为 460~530 nm 的蓝绿光发光二极管(LED)作为系统光源。在发射端,系统采用结构简单、带宽需求低的开关键控(OOK)调制方式^[13-15]。信号经由推挽式金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)驱动电路放大后,驱动 LED 光源发光,完成数据发送。在接收端,光电探测器(PD)采集光信号,经跨阻放大器进行电流/电压转换后,再通过电压放大和阈值比较处理,解调出原始数据。

2 基于姿态检测的自适应算法设计

2.1 姿态获取

为实现通信速率跟随姿态变化进行动态调整,如何获取准确的姿态数据显得尤为关键。由于 MPU9250 具有高精度、低噪音以及温度补偿等优点,适用于在多种环境下进行姿态采集。因此,本文通过采用 MPU9250 作为姿态数据采集模块,数据采集频率为 200 Hz。微控制单元(MCU)通过采集 MPU9250 内部数值并经过运算即可得到相对应的翻滚角 X_{Angle} 、俯仰角 Y_{Angle} 、航向角 Z_{Angle} 。

然而,在系统运行过程中,其装置初始位置并不固定,在不同的初始位置条件下,相对位置的姿态数据也会发生变化。因此,无法将 MPU9250 所采集的姿态数据直接运用在算法中。为解决此问题,本文使用差值运算法,其原理为:在系统初始化过程中记录初始装置三维姿态数据,即将 X_{Angle} 、 Y_{Angle} 、 Z_{Angle} 作为初始状态值,以此在后续系统姿态采集过程中,通过当前实际姿态值与初始姿态值进行差值计算得到相对姿态值,计算过程如式(1)~式(3)所示。

$$X_1 = |X_0 - X_{Angle}| \quad (1)$$

$$Y_1 = |Y_0 - Y_{Angle}| \quad (2)$$

$$Z_1 = |Z_0 - Z_{Angle}| \quad (3)$$

式中, X_1 、 Y_1 、 Z_1 为系统运行过程中所采集到的实际值与初始值之间的差值, X_0 、 Y_0 、 Z_0 为系统运行中所采集到的实际角度值(测量值)。通过三目表达式计算出当前相对角度差值。此方法能够更准确地判断当前装置的空间姿态。

2.2 基于姿态检测的自适应算法

为提升系统在动态环境下的链路可靠性,本文提出一种基于 0 阶 Sugeno^[15]模糊推理的控制算法。该算法通过将姿态角度模糊化为离散等级,并依据预设规则快速匹配最佳通信速率,从而实现了对系统通信策略的实时、智能化调控。

2.2.1 算法框架与设计

本算法的工作流程如图 2 所示。系统以接收端 Y 轴与 Z 轴的欧拉角为输入,经过模糊推理器处理,输出一个最优的通信速率等级,进而驱动通信模块完成速率重配置。

鉴于光源面板的圆形对称特性,翻滚角(对应于 X 轴的欧拉角)对系统性能的潜在影响可忽略。因此,本文将 Y_1 和 Z_1 参数作为输入变量。同时, Y 轴与 Z 轴的动态响应表现出近乎等同的影响力度,故两轴在模

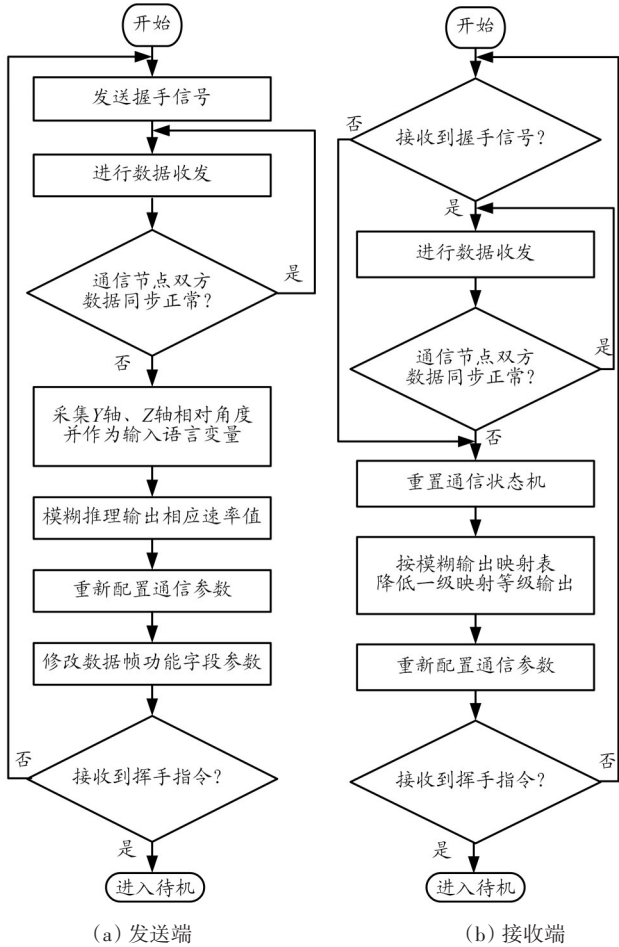


图2 通信速率自适应算法流程

型中的权重被设定为等值。

2.2.2 输入与输出的模糊化

由于当Y轴或Z轴偏移角度超过 30° 时,通信链路难以维持。因此,将输入变量的区域定义为 $[0^\circ, 30^\circ]$,并将其均匀划分为6个模糊等级(00~05)。具体的角度、等级及输出变量之间映射关系如表1所示。其中,输出变量为系统应采用的通信速率,同样被量化为6个离散等级(00~05),每个等级对应一个具体的波特率值。

表1 等级、角度及输出之间的映射关系

等级	Y轴欧拉角 取值范围	Z轴欧拉角 取值范围	通信速率/ (b/s)
00	$(0^\circ, 5^\circ)$	$(0^\circ, 5^\circ)$	460 800
01	$(5^\circ, 10^\circ)$	$(5^\circ, 10^\circ)$	115 200
02	$(10^\circ, 15^\circ)$	$(10^\circ, 15^\circ)$	14 400
03	$(15^\circ, 20^\circ)$	$(15^\circ, 20^\circ)$	9 600
04	$(20^\circ, 25^\circ)$	$(20^\circ, 25^\circ)$	4 800
05	$(25^\circ, 30^\circ)$	$(25^\circ, 30^\circ)$	1 200

2.2.3 模糊规则表的设计与验证

输入变量与输出变量之间的对应关系需通过二维模糊控制规则表实现。在二维模糊控制规则表构建过程中,2个输入变量的等级被作为关键参数传递至速率调整函数中,该函数通过所设计的模糊控制规则实现了对系统预设通信速率的迅速匹配与定位,并将相应的通信速率等级以返回值的方式调用至速率初始化函数中以实现速率的重新配置。其中,具体的模糊控制规则如表2所示。

表2 模糊通信速率等级控制规则

通信速率 等级	欧拉角等级	
	Y轴	Z轴
00	00	00
	00	01
	01	00
	01	01
	02	00
	02	01
01	00	02
	01	01
	01	02
	02	00
	02	01
	02	02
02	00	03
	01	02
	01	03
	02	00
	02	01
	02	02
03	00	04
	01	03
	01	04
	02	00
	02	01
	02	02
04	00	05
	01	04
	01	05
	02	00
	02	01
	02	02
05	00	00
	01	01
	01	02
	02	03
	02	04
	02	05

在本实验中,模糊规则表中的预设通信速率是通过严格的实验分析确定的。具体而言,在通信距离固定为 1 m 的条件下,发送方以不同的通信速率向接收方传输固定的 100 组数据,监测接收方在不同通信速率下的数据接收状态,并采用误码率(BER)作为评价指标,以确定当前实验条件下的最优通信速率。如在 Z 轴偏移达到 27° (映射等级被定义为 05)、Y 轴偏移为 7° (映射等级则为 01) 的实验条件下,进行最优通信速率值测试,其实验数据如表 3 所示。

表 3 不同通信速率下的 BER

通信速率/(b/s)	BER
600	0
1 200	0
2 400	56×10^{-2}
4 800	无法通信

通过实验验证可知,在当前实验条件下,当通信速率设定为 1 200 b/s 时,通信系统具备最佳的通信效果,同时 BER 为 0。由此得出,在该偏移状态下,通信速率对应的映射值应设定为 05。类似地,其它状态下,不同的偏移量对应的合适通信速率值也由此方式进行确定。通过此方式构建精确的模糊控制规则表,为通信系统的速率调整提供了科学依据。

2.2.4 算法可靠性保障机制

算法的可靠性保障机制如下:

1) 链路建立与数据传输:通信双方首先以初始速率建立链路并传输数据。

2) 异常检测与速率调整:当因姿态变化导致通信异常(如发送端未收到应答)时,发送端立即采集当前 Y_1 、 Z_1 角度数据。

3) 查询与重配置:发送端将角度值量化后输入模糊控制器,查询表 2 得到最优速率等级,并据此重新配置通信速率。

4) 握手与恢复:发送端以新速率重发握手信号。接收端则采用速率扫描机制,按表 3 速率逐级尝试接收,直至成功响应握手信号,恢复数据传输。

5) 重发机制:为提高可靠性,系统引入重发机制。若发送端在限定时间内未收到应答,将自动重发数据帧,直至达到最大重发次数 n 为止。若重发 n 次后仍失败,则向上位机报告通信错误。

3 实验验证与分析

为验证所提出方法的有效性,本文搭建了可见光

视频传输系统,实物图如图 3 所示。系统左侧为发送端,右侧为接收端,在无背景光干扰、通信距离为 1 m 的条件下进行通信测试。

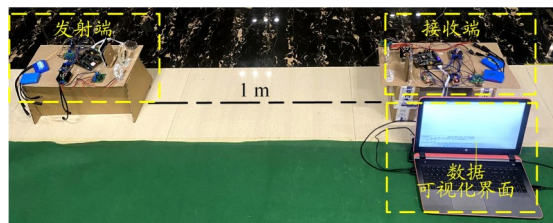


图 3 可见光通信系统实物图

实验过程中,通信双方在握手成功后,发送端以 1 s 为周期发送字符串“communication successful”,其对应的数据帧为“43 6F 6D 6D 75 6E 69 63 61 74 69 6F 6E 20 73 75 63 63 65 73 73 66 75 6C”。每发送 10 次后进行数据同步,同步成功后继续传输。

在 Y 轴与 Z 轴偏移角度均小于 5° 的条件下,通信链路仅存在轻微偏移,系统能够以最大配置速率 460 800 b/s 稳定通信。

当 Y 轴偏移角度为 0° 、Z 轴为 17° 时,根据模糊推理规则, Y 轴输入量为 00, Z 轴为 03,查模糊控制规则表得通信速率等级应为 02,即 14 400 b/s。通信双方依据自适应算法同步调整至该速率,以维持链路连通。

在 Y 轴偏移 0° 、Z 轴偏移 27° 的条件下进行测试,此时 Y 轴输入为 00, Z 轴为 05,查表得推荐通信速率等级为 05,即 1 200 b/s,通信双方成功调整至该速率并保持通信。

实验结果表明,在光路发生偏移时,发送端能够通过实时采集设备姿态数据,并依据模糊推理算法动态选择适宜的通信速率,从而有效维持通信链路可靠性。

4 结束语

本文提出了一种基于姿态检测与 Sugeno 模糊推理的速率自适应算法。当检测到因通信链路偏移而导致通信中断时,系统自动触发设备姿态采集。采集到的姿态数据经过等级量化后,作为输入变量送入 Sugeno 型模糊推理模型,并依据预设的模糊控制规则表输出对应的速率等级,从而实现通信速率的动态调节。在此过程中,收发双方协同同步切换至新的通信速率,以维持链路连通性。实验结果表明,在链路发生偏移时,借助所提出的姿态驱动速率自适应机制,可有效抑制水下湍流对光通信质量的影响,显著提升

夏巍, 荣凯, 马驻: 基于姿态检测与 Sugeno 模糊推理的速率自适应算法

系统可靠性与鲁棒性。本研究为解决水下可见光通信中因链路失准导致的性能下降问题提供了一种可行方法。

参考文献:

- [1] WANG F, LIU Y, SHI M, et al. 3.075 Gb/s underwater visible light communication utilizing hardware pre-equalizer with multiple feature points[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(5): 056117-1-056117-9.
- [2] CHI N, ZHAO Y, SHI M, et al. Gaussian kernel-aided deep neural network equalizer utilized in underwater PAM8 visible light communication system[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26700-26712.
- [3] WANG F, LIU Y, JIANG F, et al. High speed underwater visible light communication system based on LED employing maximum ratio combination with multi-PIN reception[J]. *Optics Communications*, 2018, 425: 106-112.
- [4] SHI J, XU Z, NIU W, et al. Si-substrate vertical-structure InGaN/GaN micro-LED-based photodetector for beyond 10 Gbps visible light communication[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(10): 2394-2404.
- [5] CHEN H, ZHANG P, HE S, et al. Average capacity of an underwater wireless communication link with the quasi-Airy hypergeometric-Gaussian vortex beam based on a modified channel model[J]. *Optics Express*, 2023, 31(15): 24067-24084.
- [6] UPPALAPATI A, NAIK R P, KRISHNAN P. Analysis of M-QAM modulated underwater wireless optical communication system for reconfigurable UOWSNs employed in river meets ocean scenario[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15244-15252.
- [7] LI X, TONG S, ZHOU Y, et al. BER performance of nonzero dead time SPAD-based UWOC with signal accumulation over generalized gamma turbulence channels[EB/OL]. (2022-10-01)[2024-10-25]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401822003510>.
- [8] LI X, SUN L, HUANG J, et al. Channel polarization scheme for ocean turbulence channels in underwater visible light communication (2023-02-03)[2024-10-25]. <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/2/341>.
- [9] ROMDHANE I, KADDOUM G. A reinforcement-learning-based beam adaptation for underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(20): 20270-20281.
- [10] LIU J, MA L, WANG C, et al. Real-time underwater visible light mobile communication with an extended distance using dynamic counting threshold[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 43(3): 1017-1023.
- [11] ANGELOV P P, FILEV D P. An approach to online identification of Takagi-Sugeno fuzzy models[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2004, 34(1): 484-498.
- [12] 迟楠, 王超凡, 李韦萍, 等. 基于蓝绿光 LED 的水下可见光通信技术研究进展[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2019, 58(5): 537-548.
- [13] AMALIA A I, HAMBALI A, PAMUKTI B. Performance analysis of on-off keying modulation on underwater visible light communication[C]// *IEEE. Proceedings of 2020 6th International Conference on Science and Technology (ICST)*. Yogyakarta. IEEE, 2020: 1-5.
- [14] PANDEY P, AGRAWAL M. Implementation of MIMO concept for underwater visible light communications system[EB/OL]. (2023-03-13)[2024-10-25]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11082-023-046743>.
- [15] 龚从安, 胡芳仁, 赵晓燕, 等. 基于 OOK 调制的水下高速激光通信系统设计与实现[J]. *光通信技术*, 2023, 47(1): 13-16.