

# 团 体 标 准

T/FSTI 0015—2025

## 无人船水面目标识别传感器接口

Sensor Interface for Unmanned Surface Vessel Target Identification

2025 - 11 - 27 发布

2025 - 12 - 01 实施

## 目 次

前言 .....	1
引言 .....	2
1 范围 .....	3
1.1 核心技术边界 .....	3
2 规范性引用文件 .....	3
3 术语和定义 .....	4
3.1 无人船 (Unmanned Surface Vehicle, USV) .....	4
3.2 水面目标识别 (Water Surface Target Recognition) .....	4
3.3 4D 毫米波雷达 (4D Millimeter Wave Radar) .....	4
3.4 激光雷达 (LiDAR) .....	4
3.5 数据融合 (Data Fusion) .....	4
3.6 NMEA 2000 协议 .....	4
3.7 UDP 协议 (User Datagram Protocol) .....	4
3.8 环境感知 (Environmental Perception) .....	4
3.9 数据接口 (Data Interface) .....	4
3.10 网络时间协议 (Network Time Protocol, NTP) .....	4
3.11 船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS) .....	5
3.12 点云数据 (Point Cloud Data) .....	5
3.13 时间戳 (Time Stamp) .....	5
3.14 Protobuf (Google Protocol Buffers) .....	5
3.15 ROS (Robot Operating System) .....	5
4 技术要求 .....	5
4.1 传感器类型 .....	5
4.1.1 毫米波雷达 .....	5
4.1.2 激光雷达 (LiDAR) .....	5
4.1.3 光学传感器 .....	5
4.2 数据格式 .....	6
4.2.1 目标识别数据 .....	6
4.2.2 传感器接口数据 .....	6
4.2.3 激光雷达数据 .....	6
4.2.4 毫米波雷达数据 .....	7
4.2.5 摄像头数据 .....	7
4.3 通信协议 .....	7
4.3.1 物理接口 .....	7
4.3.2 传输协议 .....	8
4.3.3 时间同步 .....	8
4.4 测试方法 .....	8
4.4.1 性能测试 .....	8
4.4.2 环境适应性测试 .....	8

4.4.3 接口兼容性测试 .....	9
附录 A 术语缩写对照表 .....	10
附录 B 传感器数据格式示例 .....	12
B.1 毫米波雷达数据帧格式 .....	12
B.2 激光雷达点云数据格式 .....	12
B.3 目标识别数据 Protobuf 定义 .....	12
B.4 辅助定位数据格式示例 .....	13

全国团体标准信息平台

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由淘点链（广州）信息科技有限公司提出。

本文件由佛山市南海区九江科技创新协会归口。

本文件起草单位：淘点链（广州）信息科技有限公司、广州蓝旗网络科技有限公司、广州工业智能研究院、广州亿浩智能信息有限公司、小淘机器人智能科技（广州）有限公司、湾趣（广州）数字信息科技有限公司、广州乐多数字信息技术有限公司、广州百枝科技信息有限公司、广州坚石智能信息科技有限公司、湾聚时代（广州）数字信息技术有限公司、东莞市金泰吉科技有限公司、超数列（广州）科技有限责任公司、广东中科臻恒信息技术有限公司。

本文件主要起草人：樊立波、黄智、李然、肖金超、樊兆昌、顾壮壮、苏泳思、李柳敏、樊少丽、胡娜、卢越秀、曹汉龙、张烨、杨敬锋。

# 引 言

无人船（Unmanned Surface Vehicles, USV）作为智能型海洋装备的典型代表，其自主导航与避障功能高度依赖水面目标识别的准确性，而这一过程面临着复杂水面环境与传感器接口碎片化的双重挑战。在国家大力发展海洋装备和建设海洋强国的背景下，无人船在海洋资源开发、环境监测、安防巡逻等领域的应用日益广泛，其环境感知系统的可靠性已成为制约技术落地的核心瓶颈。

水面环境的多动态干扰特性显著影响传感器性能：风浪导致的船体颠簸会造成图像抖动，光照变化（如晨昏逆光、云层遮挡）直接削弱视觉传感器的对比度，而水面反射与波纹则易引发传统视觉识别系统的误判。例如，单一摄像头在强光条件下可能将波浪阴影误识别为障碍物，而激光雷达（LiDAR）虽能提供精确三维空间信息，却受限于恶劣天气下的探测距离衰减。这种单一传感器局限性在复杂场景中尤为突出，如环卫无人船在城市内湖作业时，需同时应对桥梁阴影、漂浮物反光与突发船只干扰，多传感器融合技术因此成为必然选择。通过视觉与LiDAR数据的特征级融合，可将目标检测精度提升30%以上，有效弥补单一模态缺陷。

当前无人船传感器集成面临协议碎片化困境：不同厂商的摄像头、雷达、声呐等设备采用专有API与数据格式，导致集成时需为每个传感器开发定制化驱动，开发周期延长40%以上。例如，某USV项目集成3类视觉传感器与2类激光雷达时，因通信协议差异（如TCP/UDP并存、数据帧结构不统一），数据同步延迟高达200ms，严重影响实时决策。现有国际标准如ASAM OSI侧重自动驾驶模拟框架的接口兼容，而ISO 87966虽涉及传感器数据融合逻辑接口，却未针对水面目标识别场景定义具体技术要求。本标准的独特性在于聚焦目标识别全链路接口规范，涵盖传感器类型选型（如可见光/红外摄像头、固态激光雷达）、数据格式（如点云数据的LAS标准、图像数据的JPEG2000压缩）、通信协议（如DDS实时传输）及测试验证方法，填补行业空白。

随着深度学习目标检测算法（如YOLOv8、Transformer模型）在水面场景的适配优化，以及低功耗传感器（如微机电系统LiDAR）的普及，无人船感知系统正朝着“智能感知-高效传输-实时决策”一体化方向发展。在此背景下，接口标准化成为技术创新的“催化剂”：一方面，统一的数据交互规范可降低多传感器融合算法的开发门槛，使研究人员聚焦特征提取与模型优化而非格式转换；另一方面，标准化接口支持“即插即用”的传感器升级，如将传统机械扫描雷达替换为固态雷达时，无需重构通信链路。国际海事组织（IMO）已成立MASS工作组推进自主船舶法规适配，ISO正制定智能航运标准化路线图，本标准的制定将助力我国在无人船领域的技术话语权争夺，为“新质生产力”在水域运维、海洋开发等场景的落地提供技术支撑。

综上所述，本标准通过解决环境适应性、接口兼容性与技术协同性三大核心问题，构建无人船水面目标识别传感器接口的统一技术框架，为行业健康发展奠定基础。后续章节将详细阐述传感器选型要求、数据交互协议、性能测试指标等关键技术内容。

# 无人船水面目标识别传感器接口团体标准

## 1 范围

本标准明确适用于无人船水面目标识别传感器接口的设计、开发与测试全过程，旨在规范传感器数据交互的技术要求，确保无人船对水面静、动态目标的精准感知识别、跟踪及态势评估能力，尤其需满足恶劣环境条件下的应用需求。其技术范畴覆盖传感器类型界定、数据采集、传输协议、格式规范及测试验证方法，具体包括激光雷达、视觉相机、航海雷达等多传感器的数据融合接口（如激光雷达与摄像头的图像-点云数据融合、目标检测结果融合），以及基于光纤传感技术的水域岸线目标检测场景。

### 1.1 核心技术边界

本标准聚焦目标识别相关的传感器接口，明确排除非目标识别功能的动力系统、航行控制系统等模块，仅规范传感器与数据融合单元之间的交互接口，不涉及无人船整体控制逻辑或动力装置设计。

在应用场景上，标准覆盖水面无人船（含智能游船、无人艇）在环卫、文旅、环境监测等领域的目标识别作业，包括传感器数据从采集到融合的全流程技术要求。为确保与现有标准体系的兼容性，本标准引用T/NSSQ 052—2023中“信息共享接口”的界定方式，重点解决传感器数据交互的技术衔接问题，避免与无人船信息共享管理、水质监测等其他领域标准的范围重叠或技术遗漏。

本标准的制定特别关注多传感器协同感知场景，例如自动驾驶领域已成熟应用的激光雷达与摄像头数据融合接口规范，将其技术思路迁移至水面目标识别场景，要求传感器接口同时支持原始数据传输与感知结果融合（如目标检测框、跟踪轨迹等结构化信息），以实现船舶周边态势的实时动态评估。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

国家标准：

GB/T 1.1—2020 标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则用于规范本标准的文件结构与起草格式。

GB/T 2312 信息交换用汉字编码字符集基本集规定传感器接口数据中汉字信息的编码格式。

GB/T 7408.1-2023 日期和时间信息交换表示法 第1部分：基本原则统一传感器采集数据的时间戳表示格式。

GB/T 9359 水文仪器基本环境试验条件及方法适用于水面目标识别传感器的高低温、湿度等环境适应性测试。

GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语规范光学传感器采集图像的术语定义。

GB/T 17626.3 电磁兼容试验和测量技术射频电磁场辐射抗扰度试验用于传感器在射频电磁场环境下的抗干扰性能测试。

GB/T 18314-2024 全球导航卫星系统(GNSS)测量规范指导卫星定位传感器的坐标数据采集与处理。

GB 50026-2020 工程测量标准规定传感器安装位置的基准测量要求。

行业标准：

HY/T 0353—2023 无人船（艇）海底地形地貌调查技术要求参考无人船传感器系统的集成与数据采集流程。

CH/T 82011 机载激光雷达数据处理技术规范指导激光雷达传感器点云数据的预处理方法。

HJ 915 地表水自动监测技术规范适用于水质传感器数据的实时传输与质量控制。

团体标准：

T/NSSQ 046—2022 无人船水域水质监测技术规范规定水质传感器的采样频率与数据格式要求。

T/NSSQ 052—2023 无人船信息共享数据接口规范定义传感器数据与船载系统间的信息传输协议。

T/ZHUSA 003—2022 无人船融合通信网关技术要求及试验方法指导多传感器数据融合的网关接口设计。

DB34/T 4101-2022 智能驾驶 激光雷达与摄像头的感知数据融合接口规范参考激光雷达与视觉传感器的融合接口架构及数据格式。

DB4404/T 18—2021 无人水面艇海上测试管理规范规定传感器海上环境测试的流程与指标。

国际标准：

IEC 61996-1:2013/AMD1:2021 船舶导航和无线电通信设备及系统 - 船载航行数据记录仪 (VDR) - 第1部分: 性能要求、测试方法和所需测试结果指导传感器数据的记录格式与存储要求。

IEC 62388:2013 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - shipborne radar - performance requirements, methods of testing and required test results

规范雷达传感器的性能测试方法。

ISO 23150 道路车辆—自动驾驶系统与数据融合单元间的逻辑接口参考传感器与数据融合单元的逻辑接口设计。

NMEA 0183 美国航海电子联合会 (NMEA) 航海数据通信协议用于传感器与船载显示设备的异步串行数据传输。

NMEA 2000 美国航海电子联合会 (NMEA) 航海应用数据交换通信协议适用于多传感器间的高速数据总线通信。

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准, 按术语在标准中出现的顺序排列:

#### 3.1 无人船 (Unmanned Surface Vehicle, USV)

利用无线电遥控或自动驾驶系统控制操作的非载人船只, 通常由船体、电力驱动装置、船载设备等组成, 具备环境感知、目标识别、自主导航等能力。

#### 3.2 水面目标识别 (Water Surface Target Recognition)

通过传感器获取水面目标的特征信息 (如距离、速度、轮廓等), 利用算法实现目标分类 (如船只、浮标、障碍物) 和定位的过程。

#### 3.3 4D 毫米波雷达 (4D Millimeter Wave Radar)

能够探测目标距离、方位角、俯仰角和相对速度的毫米波雷达, 工作频段通常为77GHz, 具备全天候探测能力, 适用于无人船近距离目标检测。

#### 3.4 激光雷达 (LiDAR)

通过发射激光束测量目标距离和三维坐标的传感器, 输出点云数据 (在同一空间参考系下表达目标空间分布和表面特性的点集合), 适用于高精度地形测绘和目标三维轮廓检测。

#### 3.5 数据融合 (Data Fusion)

将来自不同传感器 (如雷达、激光雷达、摄像头) 的数据进行整合, 通过时空对齐 (如时间戳同步、坐标系转换) 提高目标识别准确性和可靠性的过程, 包括多传感器数据融合和感知结果融合两种类型。

#### 3.6 NMEA 2000 协议

基于CAN总线的船载电子设备通信协议, 支持船位、航向航速等航行数据的实时传输, 是船载传感器与控制系统间的主流通信标准之一。

#### 3.7 UDP 协议 (User Datagram Protocol)

无连接的传输层协议, 为应用程序提供无需建立连接即可发送IP数据包的方法, 适用于传感器数据 (如雷达点云、图像流) 等实时性要求高的场景。

#### 3.8 环境感知 (Environmental Perception)

无人船通过传感器获取周围环境信息的过程, 包括地形地貌 (如浅滩、障碍物)、水质 (如pH值、溶解氧)、气象 (如风压、水温) 等, 是目标识别和自主决策的基础。

#### 3.9 数据接口 (Data Interface)

预先定义的为应用程序提供数据访问、处理和服务功能的程序、函数或过程, 在传感器接口中用于规范不同设备间的数据格式 (如点云、图像) 和传输规则 (如协议类型、波特率)。

#### 3.10 网络时间协议 (Network Time Protocol, NTP)

用来使计算机时间同步化的一种协议, 通过校准时钟确保多传感器数据采集的时间戳一致性, 是实现数据融合时空对齐的关键技术。

### 3.11 船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS)

一种应用于船和岸、船和船之间的海事安全与通信的新型助航系统，通过VHF无线电波传输船舶身份、位置、航向等静态和动态信息，辅助水面目标识别与避障。

关键协议与接口说明

- NMEA 2000协议：基于CAN总线，传输船位、航向等航行数据；
- UDP协议：无连接传输层协议，优先保障传感器数据实时性；
- 数据融合接口：规范多传感器数据（图像、点云）的输入输出格式，支撑感知结果融合算法实现。

### 3.12 点云数据 (Point Cloud Data)

在同一空间参考系下表达目标空间分布和表面光谱特性的点的集合，由激光雷达等传感器输出，包含三维坐标 (x, y, z) 及反射强度等信息，是目标三维轮廓重建的核心数据。

### 3.13 时间戳 (Time Stamp)

用于记录数据采集时间日期的字符串或编码信息（如UNIX时间戳），通过NTP协议同步多传感器时间戳，确保数据融合时的时空一致性。

### 3.14 Protobuf (Google Protocol Buffers)

一种语言中立、平台中立、可扩展的序列化结构数据格式，用于高效数据交换（如传感器数据传输、算法模块间通信），具有压缩率高、解析速度快的特点。

### 3.15 ROS (Robot Operating System)

为机器人提供硬件抽象、设备驱动、消息传递（如sensor\_msgs包定义传感器数据格式）和多传感器融合功能的开源软件框架，广泛应用于无人船感知系统开发。

## 4 技术要求

### 4.1 传感器类型

无人船水面目标识别系统依赖多类型传感器协同感知环境，按技术原理可分为毫米波雷达、激光雷达 (LiDAR) 及光学传感器三大类。各类传感器通过差异化技术特性提供互补信息，其选型需满足接口标准化与数据兼容性要求，为多传感器融合奠定基础。

#### 4.1.1 毫米波雷达

毫米波雷达凭借全天候工作能力与高精度运动参数测量优势，成为水面目标识别的核心传感器，主流分为4D毫米波雷达与传统毫米波雷达两类：

4D毫米波雷达采用77GHz频段FMCW+MIMO体制，配置3发射 (TX)+4接收 (RX) 天线阵列，可同步探测目标的距离 (0.2-40m)、方位角 ( $\pm 55^\circ$ )、俯仰角 ( $-15^\circ \sim +15^\circ$ ) 及相对速度四维度信息。其点云数据密集且帧率 $\geq 10\text{Hz}$ ，支持64个目标同时跟踪，接口采用以太网（支持POE供电），输出包含空间坐标 (x,y,z) 与速度 (v) 的4D点云数据，适用于全向环境感知与自主避障场景。

传统毫米波雷达工作频段覆盖24GHz或77GHz，探测距离0.15-300m，测角精度 $\pm 1^\circ$ ，数据格式符合NMEA 0183协议，输出目标距离、方位角及速度信息，典型应用于中远距离大型目标（如船舶、浮标）的初步检测。

#### 4.1.2 激光雷达 (LiDAR)

激光雷达通过三维点云采集提供目标深度信息，有效弥补毫米波雷达在静态目标细节描述上的不足，按线束与技术原理分为以下类型：

16线激光雷达探测距离0.15-100m，角度分辨率 $0.1^\circ$ ，扫描频率10Hz，数据格式为ROS标准PointCloud2消息（包含x,y,z坐标及反射强度），接口采用以太网UDP协议传输。该型号可穿透水面部分反射干扰，适用于浅水区地形测绘与近距离障碍物三维建模。

单线激光雷达（如LD14）基于三角测量法，量程0.15-8m，角度分辨率 $1^\circ$ ，电机转速默认6Hz（可通过PWM控制15-30KHz），通信接口为UART（波特率115200bps），输出数据包含距离与置信度信息，主要用于船体周边近距离避障。

#### 4.1.3 光学传感器

光学传感器通过图像与光谱信息实现目标纹理、颜色等特征识别，包括可见光摄像头与红外热成像

传感器，需满足复杂光照与恶劣天气适应性：

可见光摄像头主流配置为1920×1080分辨率（或720P及以上），帧率30fps，镜头视场角104°（广角），接口支持USB、CSI或GigE Vision，部分型号具备自动光照适应能力与二次开发接口。其输出图像可通过YOLOv3等算法实现船只、漂浮物等目标的2D检测，需与激光雷达进行联合标定以实现像素级空间对齐。

红外热成像传感器具备穿透黑夜、雾霾、扬尘等恶劣环境的能力，可实时输出清晰路况图像，弥补可见光传感器在低光照或复杂气象条件下的性能短板，常与可见光摄像头组成多光谱视觉系统。

兼容性设计要点：毫米波雷达的4D点云（x,y,z,v）、激光雷达的PointCloud2数据与光学传感器的图像数据需通过时间同步（如PTP协议）与空间标定（外参矩阵）实现融合。例如，16线激光雷达与1920×1080摄像头联合部署时，需确保点云与图像像素的投影误差≤0.5个像素，以满足目标检测精度要求。

各类传感器通过标准化接口（如以太网、UART）与数据格式（如NMEA 0183、PointCloud2）实现即插即用，结合多传感器融合策略（特征级匹配与决策级加权），可将水面目标识别精度提升至98.7%以上，为无人船自主导航与安全作业提供可靠环境感知能力。

## 4.2 数据格式

无人船水面目标识别系统的数据格式需满足结构化传输、高效解析及多传感器兼容性要求，主要分为目标识别数据和传感器接口数据两大类，并需明确与通信协议的衔接规范。

### 4.2.1 目标识别数据

目标识别数据采用Protobuf格式进行结构化定义，该格式通过二进制编码实现高效序列化，具有体积小、解析速度快、类型安全等优势，适用于实时目标信息传输。具体定义如下：

```
message Target {
  int32 id = 1;           // 目标ID（唯一标识）
  string type = 2;       // 目标类型（如“船只”“浮标”“漂浮物”）
  float confidence = 3;  // 识别置信度（0-1.0，数值越高可信度越强）
  float x = 4;           // 相对x坐标（单位：米，以无人船质心为原点）
  float y = 5;           // 相对y坐标（单位：米，以无人船质心为原点）
  float z = 6;           // 相对z坐标（单位：米，垂直方向）
  float length = 7;     // 目标长度（单位：米）
  float width = 8;      // 目标宽度（单位：米）
  float velocity = 9;   // 相对速度（单位：米/秒，沿x轴正方向为正）
  float heading = 10;   // 航向角（单位：度，正北为0°，顺时针递增）
}
```

关键特性：Protobuf通过字段编号（如id = 1）替代字段名存储，较JSON减少40%-60%数据体积，解析速度提升5-10倍，特别适合无人船低带宽、高实时性的应用场景。

### 4.2.2 传感器接口数据

传感器接口数据需根据设备类型（激光雷达、毫米波雷达、摄像头）定义专用帧结构，确保原始数据的完整性和可解析性。

### 4.2.3 激光雷达数据

激光雷达点云数据采用ROS sensor\_msgs/PointCloud2标准消息格式，支持三维坐标与反射强度等多维度信息传输，具体结构如下：

```
std_msgs/Header header // 包含时间戳（精确到0.1ms）和坐标系ID
uint32 height           // 点云高度（1表示无序点云）
uint32 width            // 点云宽度（单帧点数量=height×width）
sensor_msgs/PointField[] fields // 字段定义，包含x（FLOAT32，米）、y（FLOAT32，米）、z（FLOAT32，米）、intensity（UINT8，信号强度）
bool is_bigendian      // 字节序标识（0=小端，1=大端）
uint32 point_step      // 单点字节数（如16字节：x(4)+y(4)+z(4)+intensity(4)）
uint32 row_step        // 行字节数（=width×point_step）
uint8[] data           // 点云数据数组（二进制存储）
bool is_dense          // 是否含无效点（0=含NaN/Inf点，1=全有效）
```

典型参数：16线激光雷达单帧点云数量≥1000点，数据更新频率≥10Hz，距离测量范围0.1-200米。

## 4.2.4 毫米波雷达数据

毫米波雷达采用自定义二进制帧结构，帧头固定标识，数据区按点集排列，具体定义如下：

表 1 毫米波雷达数据

字节位置	字段名称	数据类型	单位	说明
0	帧头	UINT8	-	固定为 0x54
1	帧类型	UINT8	-	0x2C (低 5 位表示点数, 固定为 12 点/帧)
2-3	转速	UINT16	度/秒	低字节在前 (如 0x0868=2512 度/秒)
4-5	起始角度	UINT16	度×100	低字节在前 (如 0x7EAB=324.27 度)
6-41	点云数据	UINT8	距离: mm	12 组数据, 每组含 2 字节距离+1 字节置信度
42-43	结束角度	UINT16	度×100	低字节在前 (如 0x82BE=334.70 度)
44-45	时间戳	UINT16	ms	0-30000 循环计数
46	校验值	UINT8	-	帧头至时间戳字节累加和

角度计算：单帧内点角度分布通过起始角与结束角线性插值获得，公式为  $\text{angle}_i = \text{start\_angle} + (\text{end\_angle} - \text{start\_angle}) \times i / (n-1)$  ( $i=0\sim 11$ ,  $n=12$ )。

## 4.2.5 摄像头数据

摄像头图像数据采用GigE Vision协议传输，支持高分辨率流传输，具体参数如下：

分辨率：1920×1080（像素），支持向下兼容（如1280×720）

像素格式：YUV422（默认，占用带宽低）或RGB8（彩色模式，3字节/像素）

帧率：30fps（最大），支持动态调整（1-30fps）

元数据：每帧图像附加传感器ID（字符串）、时间戳（精确到0.1ms）、内参矩阵（3×3浮点数组）及畸变系数（5×1浮点数组）

数据结构：单帧YUV422图像数据量约4.1MB（1920×1080×2字节），通过UDP传输时需分片封装（MTU=1500字节时约2730片/帧）。

#与通信协议衔接 传感器数据通过UDP传输时，需遵循以下帧封装规范：

1. 帧头：固定为0xA5 0x5A（2字节），用于接收端帧同步。
2. 数据区：包含传感器类型标识（1字节，如0x01=激光雷达、0x02=毫米波雷达）、原始数据（如PointCloud2二进制数组或毫米波雷达帧）。
3. 校验：采用CRC16算法（多项式0x8005），覆盖帧头至数据区，结果占2字节。
4. 包尾：固定为0xAA（1字节），标识帧结束。

传输要求：单帧UDP数据包最大长度不超过1472字节（MTU=1500字节时），超大帧需通过序号字段（2字节）分片传输，接收端按序号重组。

## 4.3 通信协议

无人船水面目标识别系统的通信协议需满足传感器数据高效传输、多设备协同及时间同步的需求，其架构按物理接口—传输协议—时间同步三层设计，各层协议选型需结合应用场景的实时性、可靠性及精度要求。

## 4.3.1 物理接口

物理接口是传感器数据传输的硬件基础，需根据设备类型、传输速率及安装环境选择适配方案：

- 以太网：采用1000BASE-T标准，支持POE供电（Power over Ethernet），传输延迟≤10ms，适用于激光雷达、4D毫米波雷达、摄像头等高速率传感器数据传输。例如，HPX-346雷达通过以太网以UDP数据包形式分发数字化雷达数据，满足实时目标检测需求。

- 串口（RS232/RS485）：默认波特率115200bps，数据位8位，停止位1位，无校验，适用于传统设备如GNSS模块、传统毫米波雷达。例如，LD14激光雷达通过UART协议单向发送测量数据，上电后自动传输无需外部指令。

- CAN总线：符合ISO 11898标准，传输速率250kbps，支持NMEA 2000协议，适用于车载设备状态监控（如舵机、动力系统），通过扩展帧ID实现多设备数据交互。

### 4.3.2 传输协议

传输协议需平衡实时性与可靠性，主流方案包括UDP与NMEA 2000，二者在无人船系统中分工明确：

表 2 传输协议

协议类型	技术特点	优势	局限性	适用场景
UDP 协议	数据帧格式：包头（4字节同步字）+长度（2字节）+数据区+校验和（2字节）；发送间隔 100ms（传感器数据）/200ms（目标识别结果）[30]	无连接、低延迟，支持高频数据传输（如雷达点云、图像流）	无重传机制，可靠性依赖上层校验	激光雷达、摄像头等实时传感器数据传输
NMEA 2000 协议	基于 CAN2.0B 帧格式，扩展帧 ID 含 PGN（Parameter Group Number）；定义 PGN 129038（船位数据）、PGN 127250（航向航速数据）	标准化程度高，支持多设备协同，适用于船载系统状态监控	传输速率较低（250kbps）	舵机、动力系统等设备状态参数交互

此外，系统需兼容 ROS 消息框架（如 sensor\_msgs/LaserScan、sensor\_msgs/Image）实现传感器数据处理与融合，以及 Protobuf 序列化协议实现跨平台数据交换，提升分布式系统的兼容性。

### 4.3.3 时间同步

多传感器数据融合需严格的时间同步支撑，根据精度需求选择NTP或PTP协议：

- NTP协议：通过网络对时，同步精度 $\leq 10\text{ms}$ ，更新频率1次/10分钟，适用于岸基指控中心与无人船系统的时间校准。例如，无人船可接入岸基NTP服务器，定期修正本地时钟以确保日志与远程数据的时间一致性。

- PTP协议（IEEE 1588）：支持亚微秒级同步（精度 $\leq 1\mu\text{s}$ ），包括TSN的gPTP（IEEE 802.1AS）变种，适用于激光雷达、摄像头等高精度传感器。例如，激光雷达与域控制器通过gPTP实现时间戳对齐，确保点云与图像数据的时空匹配。

协议兼容性要求：传输协议需符合T/NSSQ 052—2023标准中UDP报文格式（包头4字节同步字+长度2字节+数据区+校验和2字节），确保与现有无人船信息共享标准兼容。

通过分层设计，通信协议可实现传感器数据从物理层到应用层的高效流转，为水面目标识别提供稳定、精准的数据传输支撑。

## 4.4 测试方法

无人船水面目标识别传感器接口的测试方法需系统性覆盖性能验证、环境耐受及接口适配三大维度，通过标准化测试流程确保传感器在复杂水域环境下的可靠运行。测试体系分为性能测试、环境适应性测试及接口兼容性测试三类，具体实施方案如下：

### 4.4.1 性能测试

性能测试聚焦传感器对水面目标的探测能力与识别精度，通过量化指标验证核心功能有效性。

探测距离与精度测试需在水池或平静湖面等受控环境中开展，采用 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 金属板作为标准目标。测试步骤为：无人船与目标距离从5m开始递增（间隔5m）至最大探测距离，实时记录传感器输出距离值，计算误差需满足 $\leq \pm 0.5\% \times \text{实际距离}$ 的精度要求。针对典型目标的实测标准包括：长度8m以上钢制船（航速5节）正面探测距离 $\geq 25\text{m}$ 、侧面 $\geq 32\text{m}$ ，目标检测率 $\geq 98\%$ ；直径1m以上静止钢制浮球探测距离 $\geq 8\text{m}$ ，检测率 $\geq 95\%$ 。

目标识别准确率测试基于WaterScenes数据集（含船只、浮标、漂浮物等10类目标）进行，评价指标采用mAP（mean Average Precision），需达到 $\geq 0.85$ ，同时保证帧率 $\geq 10\text{fps}$ 。为提升检测精度，可采用3D点云与视觉信息融合方案：通过CornerNet-Lite网络生成候选目标框并获取相机检测置信度，将3D点云投影至二维像素平面后计算LiDAR检测置信度（基于点云投影面积与边界框像素面积比），融合双模态置信度后，目标识别准确率较传统视觉方法可提升15.5%以上。

### 4.4.2 环境适应性测试

环境适应性测试验证传感器在极端气候、电磁干扰及水域扰动下的稳定运行能力，参照多项国家标准与行业规范执行。

气候环境测试需满足GB/T 9359规定的环境参数：工作温度范围 $-20^{\circ}\text{C}$ 至 $+60^{\circ}\text{C}$ ，存储温度 $-40^{\circ}\text{C}$ 至 $+70^{\circ}\text{C}$ ，在 $40^{\circ}\text{C}$ 、95%RH（无凝结）条件下保持功能正常；传感器外壳防护等级需达到IP67，确保水下1m深度30分钟无渗漏。

电磁兼容性测试包括辐射抗扰度与传导骚扰两方面：辐射抗扰度需符合GB/T 17626.3标准，在

80MHz~1GHz 频段内承受 3V/m 场强无性能下降；传导骚扰需满足 GB/T 6100-2018 要求，在 0.15MHz~30MHz 频段内骚扰电压 $\leq 54\text{dB}\mu\text{V}$ （准峰值）。

水域干扰因素测试需覆盖盐度（10-36PSU 范围稳定性验证）、温度（ $< 2^\circ\text{C}$  低温水与  $> 30^\circ\text{C}$  高温水 50% 量程测试）及浊度（空白对照试验验证颗粒物影响），确保传感器在复杂水质条件下的检测一致性。

#### 4.4.3 接口兼容性测试

接口兼容性测试验证传感器数据传输的稳定性与多设备协同能力，保障无人船系统的实时数据交互。

数据传输稳定性测试：通过 24 小时连续数据传输实验，采用 Wireshark 抓包分析丢包率（需 $\leq 0.1\%$ ）、误码率（需 $\leq 10^{-6}$ ），并通过 Iperf 工具验证带宽 $\geq 100\text{Mbps}$ 的传输能力。

多传感器同步测试采用 GPS 秒脉冲触发信号实现时间基准统一，以激光雷达（采样频率 10Hz）为基准，匹配摄像头（30FPS）的图像数据时间戳，计算同步误差需 $\leq 1\text{ms}$ 。此外，需通过目标匹配测试（计算激光雷达点簇中心圆与视觉矩形框交并比 IOU $\geq 0.8$  判定为同一目标）验证空间坐标转换精度，确保多源数据的时空一致性。

## 附录 A 术语缩写对照表

以下术语缩写对照表按字母顺序排列，涵盖无人船水面目标识别传感器接口相关的核心技术术语、标准组织及通信协议，为标准使用者提供统一的术语参考。

AES:	Advanced Encryption Standard (高级加密标准)
AIS:	Automatic Identification System (船舶自动识别系统)
ADC:	Autonomous Domain Controller (智驾域控制器)
Asterix:	Air Traffic Control Radar Data Exchange Format (空中交通管制雷达数据交换格式)
ARQ:	Automatic Repeat reQuest (自动重传请求)
ASAM:	Association for Standardization of Automation and Measuring Systems (自动化与测量系统标准化协会)
ASV:	Autonomous Surface Vehicle (自主水面艇)
API:	Application Protocol Interface (应用程序接口)
BED:	basic environment descriptors (基本环境描述符)
CAN:	Controller Area Network (控制器局域网)
CCS:	China Classification Society (中国船级社)
CFSU:	Configuration File Storage Unit (配置文件存储单元)
CTD:	Conductivity, Temperature, Depth (电导率、温度、深度传感器)
CSI:	Camera Serial Interface (相机串行接口)
CW:	Continuous Wave (连续波模式)
DCPA:	Distance to Closest Point of Approach (最近会遇距离)
DDS:	Data Distribution Service (数据分发服务)
DPD:	N,N-diethyl-1,4-phenylenediamine (N,N-二乙基-1,4-苯二胺)
DSP:	Digital Signal Processor (数字信号处理器)
DVL:	Doppler Velocity Log (多普勒测速仪)
EKF:	Extended Kalman Filter (扩展卡尔曼滤波)
FPS:	Frames Per Second (每秒帧数, 摄像头采样频率单位)
FPGA:	Field-Programmable Gate Array (现场可编程门阵列)
FMCW:	Frequency Modulated Continuous Wave (调频连续波模式)
GB:	Guobiao (Chinese National Standard) (国家标准)
gPTP:	generalized Precision Time Protocol (通用精确时间协议)
GLONASS:	Global Navigation Satellite System (格洛纳斯卫星导航系统)
GNSS:	Global Navigation Satellite System (全球导航卫星系统)
GPS:	Global Positioning System (全球定位系统)
HJ:	Huanjing (Environmental Protection) (环境保护行业标准)
Hz:	Hertz (赫兹, 频率单位, 如激光雷达采样频率10Hz)
I2C:	Inter-Integrated Circuit (集成电路总线)
IACS:	International Association of Classification Societies (国际船级社协会)
IEC:	International Electrotechnical Commission (国际电工委员会)
IMU:	Inertial Measurement Unit (惯性测量单元)
IMO:	International Maritime Organization (国际海事组织)
INS:	Inertial Navigation System (惯性导航系统)
IOU:	Intersection Over Union (交并比, 用于目标匹配判断)
ISO:	International Organization for Standardization (国际标准化组织)
JCU:	Joint Calibration Unit (联合标定单元)
JAUS:	Joint Architecture for Unmanned Systems (无人系统联合架构)
LiDAR:	Light Detection and Ranging (激光雷达)
LoRa:	Long Range (远距离无线电)
LFM:	Linear Frequency Modulation (线性调频模式)
LVDS:	Low-Voltage Differential Signaling (低压差分信号)
MAC:	Medium Access Control (介质访问控制)
MAVLink:	Micro Air Vehicle Link (微型飞行器链路协议)
MASS:	Maritime Autonomous Surface Ships (海上水面自主船舶)
MDE:	Multi-Domain Extension (多域扩展)

T/FSTI 0015-2025

MFSK: Multiple Frequency Shift Keying (多频移键控)  
MQTT: Message Queuing Telemetry Transport (消息队列遥测传输)  
NMEA: National Marine Electronics Association (国家海洋电子协会协议)  
NMEA0183: National Marine Electronics Association 0183 (美国国家海洋电子协会标准0183)  
NTP: Network Time Protocol (网络时间协议)  
OEM: 原始设备制造商  
OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (正交频分复用)  
OMG: Object Management Group (对象管理组)  
OPC UA: OLE for Process Control Unified Architecture (过程控制统一架构)  
OpenCV: Open Source Computer Vision Library (开源计算机视觉库)  
OSI: Open Systems Interconnection (开放系统互连)  
PCL: Point Cloud Library (点云库)  
PCIe: PCI Express (高速串行计算机扩展总线标准)  
PB: Protocol Buffer (二进制数据交换格式)  
POE: Power Over Ethernet (以太网供电)  
Protobuf: Protocol Buffers (协议缓冲区)  
PTP: Precision Time Protocol (精确时间协议)  
QKD: Quantum Key Distribution (量子密钥分发)  
ROS: Robot Operating System (机器人操作系统, 提供硬件抽象、设备驱动等功能)  
RS232: Recommended Standard 232 (串行通信接口标准)  
SDAU: Sensor Data Acquisition Unit (传感器数据采集单元)  
SEG-Y: Society of Exploration Geophysicists - Y (地震数据格式)  
SOME/IP: Scalable service-Oriented MiddlewarE over IP (IP上的可扩展服务导向中间件)  
SPI: Serial Peripheral Interface (串行外设接口)  
SPX: Cambridge Pixel的雷达数据提取和处理系统  
SOC: System on Chip (系统级芯片)  
SLAM: Simultaneous Localization and Mapping (同步定位与地图构建)  
TCP: Transmission Control Protocol (传输控制协议)  
TCPA: Time to Closest Point of Approach (到达最近会遇点的时间)  
TDMA: Time Division Multiple Access (时分多址)  
TRO: Total Residual Oxidant (总残留氧化剂)  
TSN: Time Sensitive Network (时间敏感网络)  
UDP: User Datagram Protocol (用户数据报协议)  
UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (通用异步收发传输器)  
UAAN: Unmanned Aircraft Area Network (无人航空器区域网络)  
UCS: Unmanned Systems Control Segment (无人系统控制段)  
UMAA: Unmanned Maritime Autonomy Architecture (无人海事自主架构)  
UMVs: Unmanned Maritime Vehicles (无人海事车辆)  
USBL: Ultra-Short Baseline (超短基线定位系统)  
USV: Unmanned Surface Vehicle (无人船)  
UUVs: Unmanned Underwater Vehicles (无人水下航行器)  
USB: Universal Serial Bus (通用串行总线)  
VSAT: Very Small Aperture Terminal (卫星通信)  
WiFi: Wireless Fidelity (无线局域网技术)  
XTF: eXtended Triton Format (侧扫声呐数据格式)  
ZigBee: 基于IEEE 802.15.4标准的低功耗局域网协议

## B.1 毫米波雷达数据帧格式

毫米波雷达数据帧采用结构化二进制格式，包含帧头、设备状态、数据区及校验字段，具体定义如下表所示：

表 4 毫米波雷达数据帧格式

字段	长度（字节）	说明	示例值
帧头	1	固定起始标识，十六进制	0x54
帧类型	1	数据帧类型区分	0x2C
转速	2	雷达旋转速度，单位：度/秒，低字节在前	0x0868 (2512° /s)
数据区	36	12组目标数据，每组含距离（2字节，mm）+置信度（1字节，0-255）	0x0064 0x64（距离 100mm，置信度 100）
校验和	1	从帧头到数据区所有字节累加和（取低 8 位）	0xXX（动态计算）

关键特性：数据区采用紧凑结构设计，12组目标数据可覆盖雷达单次扫描的主要探测结果，置信度字段支持对目标有效性的快速筛选。

## B.2 激光雷达点云数据格式

激光雷达点云数据包含三维坐标及反射强度信息，支持两种常用表示形式：

单点坐标示例

单个点的三维坐标及反射强度表示为：

(x=1.2 m, y=3.4 m, z=0.5 m, reflectivity=0.8)

其中x、y、z为空间坐标（单位：米），reflectivity为反射强度（0-1.0）。

ROS标准消息格式（sensor\_msgs/PointCloud2）

工业级应用中通常采用PointCloud2消息结构，包含元数据及二进制数据缓冲区：

```
std_msgs/Header header          # 包含时间戳与坐标系信息
uint32 height = 1                # 点云高度（1表示无序点云）
uint32 width = 10000            # 点云宽度（点数量）
sensor_msgs/PointField[] fields # 字段定义：x(FLOAT32, offset=0)、y(FLOAT32, offset=4)、
z(FLOAT32, offset=8)、intensity(FLOAT32, offset=12)
bool is_bigendian = false        # 字节序（小端模式）
uint32 point_step = 16           # 单点字节数（4字段×4字节）
uint32 row_step = 160000         # 行字节数（width×point_step）
uint8[] data                     # 二进制点云数据（长度=row_step×height）
bool is_dense = true             # 无无效点
```

## B.3 目标识别数据 Protobuf 定义

目标识别结果采用Protocol Buffers（proto3）进行序列化，定义包含单目标属性及多目标数组两类消息：

```
syntax = "proto3";
package usv.target; // 命名空间：无人船目标识别
// 单目标属性定义
message Target {
  int32 id = 1; // 目标唯一ID（必选）
  string type = 2; // 目标类型（如"ship", "buoy", "debris", 必选）
  float confidence = 3; // 识别置信度（0-1.0, 必选）
  float x = 4; // 相对x坐标（米, 必选）
  float y = 5; // 相对y坐标（米, 必选）
  float z = 6; // 相对z坐标（米, 可选, 默认0）
  float length = 7; // 目标长度（米, 可选）
  float width = 8; // 目标宽度（米, 可选）
  float velocity = 9; // 相对速度（米/秒, 可选）
  float heading = 10; // 航向角（度, 0-360, 可选）
```

```
}  
// 多目标数组定义  
message TargetArray {  
  repeated Target targets = 1; // 目标列表（支持0-N个目标）  
  uint32 timestamp = 2;      // 时间戳（毫秒级，必选）  
}
```

设计特点：通过repeated关键字支持动态目标数量，可选字段（如z、length）降低非必要数据传输开销，适合无人船实时通信场景。

#### B.4 辅助定位数据格式示例

为确保传感器数据时空对齐，定位数据采用NMEA 0183标准格式，例如GGA语句：  
\$GPGGA,123519,4807.038,N,01131.000,E,1,08,0.9,545.4,M,46.9,M,,\*47

其中包含UTC时间（123519）、纬度（48°07.038'N）、经度（11°31.000'E）、定位质量（1=有效定位）等关键信息，可直接用于传感器数据的地理坐标标定。