

团 体 标 准

T/FSTI 0016—2025

无人船环境感知数据接口

Environmental Perception Data Interface for Unmanned Surface Vessels

2025 - 11 - 27 发布

2025 - 12 - 01 实施

目 次

前言	1
引言	2
1 范围	3
1.1 核心适用对象与技术范畴	3
1.2 应用场景与边界限定	3
1.3 与现有标准的衔接	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	4
4 技术要求	5
4.1 传感器类型	5
4.1.1 声学传感器	5
4.1.2 光学与雷达传感器	5
4.1.3 环境传感器	6
4.2 数据格式	6
4.2.1 导航定位数据	6
4.2.2 水质监测数据	7
4.3 通信协议	7
4.3.1 数据传输协议	7
4.3.2 接口连接方式	8
4.3.3 时间同步	8
附录 A 术语缩写对照表	9
附录 B 传感器数据格式示例	11
B.1 平台航行位置信息单元格式	11
B.2 ROS 传感器消息格式示例	11
B.2.1 激光雷达数据 (sensor_msgs/LaserScan)	11
B.2.2 点云数据 (sensor_msgs/PointCloud)	12
B.2.3 IMU 数据 (sensor_msgs/Imu)	12
B.2.4 GPS 数据 (sensor_msgs/NavSatFix)	12
B.3 Protobuf 数据格式示例	13
B.3.1 基础消息定义	13
B.3.2 传感器数据专用消息	13

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、广州工业智能研究院、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

随着海洋经济与水域管理需求的快速增长，无人船技术已从实验室研究迈向规模化应用阶段，在海上巡检、幸存者救援、环境监测、水文测绘、垃圾清理等危险或高耗时任务中展现出不可替代的价值。作为无人船自主导航与决策的核心支撑，环境感知系统通过多传感器协同实现对复杂水域环境的实时认知，其性能直接决定无人船的作业安全性与任务可靠性。然而，与路面自动驾驶相比，水面环境的非结构化特征（如风浪引起的船体姿态变化、振动干扰传感器输出、水花/水汽对光学设备的遮挡）和动态干扰因素（水面镜面反射、光照突变、恶劣天气），使得环境感知面临更为严峻的技术挑战。

当前，单一传感器技术的局限性已成为制约感知精度提升的主要瓶颈：摄像头易受光照与气象条件干扰，激光雷达在复杂水汽环境中探测距离受限，声呐数据处理延迟较高。为突破这一限制，行业普遍采用多传感器融合技术，例如通过视觉与激光雷达信息融合实现补给锥套的自主检测跟踪，或利用毫米波雷达与摄像头融合提升恶劣天气下的目标识别鲁棒性。然而，传感器类型的多样性（光学、声学、微波等）、数据格式的异构性（点云、图像、时序信号）以及通信协议的碎片化，导致不同厂商设备间难以实现数据互通与协同工作，不仅增加了系统集成成本，更制约了技术创新的迭代速度。

标准化的核心价值体现在三方面：一是通过统一传感器数据接口规范（包括数据格式、通信协议、元数据定义），提升不同厂商设备的兼容性，降低跨平台集成难度；二是建立统一的技术依据，减少重复开发，推动行业资源优化配置；三是引导技术发展方向，促进感知算法与硬件设备的协同创新，为无人船从“单一任务工具”向“多场景智能平台”演进奠定基础。

随着我国无人船艇装备技术进入产品推广应用为主的新发展阶段，环境感知数据接口的标准化已成为行业发展的迫切需求。本标准的制定旨在规范数据接口的技术要求，涵盖传感器类型适配、数据交互流程、协议兼容性等关键内容，为无人船环境感知系统的设计、开发与应用提供统一技术框架，最终支撑海洋资源开发、水域生态保护、应急救援等国家战略领域的高效发展。

无人船环境感知数据接口团体标准

1 范围

本标准明确界定无人船环境感知数据接口的技术边界与适用范畴，核心适用于无人船环境感知系统的数据接口设计、开发及测试环节，同时涵盖信息共享数据接口的管理要求。其技术要求聚焦于环境感知数据的全生命周期管理，包括多传感器数据的采集、传输、解析与融合，以及数据格式定义、通信协议规范和接口技术参数等关键内容。

1.1 核心适用对象与技术范畴

本标准针对无人船环境感知系统中的多源异构传感器接口进行规范，具体涵盖4D毫米波雷达、单目摄像头、GPS、IMU、激光雷达、导航雷达等主流传感器类型。通过明确传感器接口要求，支持无人船在水面环境下的多样化感知任务，包括但不限于物体检测、实例分割、语义分割、可行驶区域分割、水岸线分割及全景感知等核心功能。

关键技术覆盖：本标准涉及的数据接口规范包含三大核心维度：

数据格式：定义传感器原始数据与处理后数据的结构化表示方法

通信协议：规范传感器与处理单元、系统间的数据传输规则

接口要求：明确硬件接口特性与软件接口交互逻辑，确保多传感器协同工作的兼容性

1.2 应用场景与边界限定

在应用场景层面，本标准适用于无人船自主航行、自主补给、海洋环境监测（如海洋污染、赤潮、海冰监测）、海洋资源调查（如油气与矿产资源探测）、海洋灾害预警（如海啸、台风预警）及智能养殖（如鱼塘巡逻、水质监测）等多领域的环境感知数据接口管理。需特别说明的是，本标准不涉及无人船的动力系统、控制系统、推进系统等非环境感知相关模块，仅聚焦于感知数据链的接口技术要求。

1.3 与现有标准的衔接

作为无人船数据接口体系的重要组成部分，本标准与T/NSSQ 052—2023《无人船信息共享数据接口规范》团体标准形成互补，后者侧重于信息共享场景下的数据接口连接方式、传输约定及信息单元格式定义，而本标准则深化环境感知领域的多传感器接口技术细节，共同构建无人船数据交互的标准化体系。

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 3838《地表水环境质量标准》

GB 50026-2020《工程测量标准》

GB/T 18314-2024《全球导航卫星系统(GNSS)测量规范》

GB/T 2312《信息交换用汉字编码字符集基本集》

GB/T 9359《水文仪器基本环境试验条件及方法》

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》

行业标准：

CH/T 2009-2010《全球定位系统实时动态测量(RTK)技术规范》

CH/T 7002-2018《无人船水下地形测量技术规程》

CH/T 7003-2021《内陆水域水下地形测量技术规程》

HY/T 0353-2023《无人船(艇)海底地形地貌调查技术要求》

团体标准：

T/NSSQ 046-2022《无人船水域水质监测技术规范》

T/NSSQ 052-2023《无人船信息共享数据接口规范》

其他规范性文件：

ISO Draft Standard “road vehicles — logical interface between sensors and data fusion unit for automated driving functions”（传感器与数据融合单元逻辑接口规范）

ASAM OSI (Open Simulation Interface)（符合ISO 23150逻辑接口的通用数据交换接口）

ROS Humble Documentation “sensor_msgs package” (传感器数据消息定义)
 ROS Melodic Documentation “sensor_msgs package” (传感器数据消息定义)
 Google Protocol Buffers (Protobuf) Documentation “Language Guide (proto3)” (数据序列化格式规范)

MAVLink 通信协议规范

引用说明：本章节所列文件涵盖无人船环境感知数据接口涉及的测量标准、环境试验、数据格式及通信协议等关键技术领域。其中国家标准明确了基础测量与环境要求，行业标准聚焦水下地形测量与无人船作业规范，团体标准针对无人船特定应用场景的数据接口与监测流程，其他规范性文件则提供了传感器接口、数据序列化等国际通用技术框架。

3 术语和定义

•AIS (船舶自动识别系统, Automatic Identification System): 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, 用于船舶身份识别、位置报告及航行状态交换。

•Asterix: 用于航空和海事 surveillance 信息交换的结构化数据格式标准, 支持多源监测数据的统一编码与传输。

•ASAM OSI (Open Simulation Interface): 自动化驾驶功能与仿真框架间的兼容性接口标准, 支持传感器数据与自动驾驶功能的连接, 采用 Protocol Buffer 消息格式, 定义 ground truth interface 和 sensordata interface 等顶级接口。

•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, 是无人船环境感知系统中数据流转的核心通道。

•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, 涵盖地形、地貌、水质、气象等多维度数据采集。

•GPS (全球定位系统, Global Positioning System): 基于卫星的全球导航系统, 为无人船提供实时位置坐标与时间同步服务。

•ground truth interface: ASAM OSI 定义的顶级消息接口, 提供全局坐标系下模拟对象的精确视图, 用于仿真环境中真实状态的基准数据传输。

•IMU (惯性测量单元, Inertial Measurement Unit): 测量物体三轴姿态角及加速度的传感器, 为无人船提供运动状态的实时惯性数据。

•LiDAR (激光雷达, Light Detection and Ranging): 通过发射激光束测量目标距离和轮廓的传感器, 可生成三维点云数据, 用于环境建模与障碍物检测。

•MAVLink (微型飞行器连接协议, Micro Air Vehicle Link): 无人设备与地面站间的轻量级消息协议, 支持自定义消息定义, 需保证通信双方协议版本一致性。

•MQTT (消息队列遥测传输协议, Message Queuing Telemetry Transport): 基于发布/订阅模式的轻量级消息传输协议, 适用于低带宽、高延迟的无人船环境感知数据传输场景。

•NMEA-0183: 国家海洋电子协会制定的海事电子设备通信标准, 定义了车载传感器 (如 GPS、声呐) 的数据输出格式。

•NMEA2000: 美国航海电子联合会 (NMEA) 基于 SAE J1939 制定的车载设备通信协议, 支持超过 100 种海事数据消息类型, 适用于多设备协同工作。

•NTP (网络时间协议, Network Time Protocol): 用于计算机网络时间同步的协议, 确保无人船多传感器数据采集的时间一致性。

•OPC UA (开放平台通信统一架构, OLE for Process Control Unified Architecture): 工业自动化领域的设备间通信协议, 支持跨厂商设备的协议转换与数据交互。

•Protocol Buffer (PB, 协议缓冲区): Google 开发的跨语言、跨平台二进制数据交换格式, 通过 .proto 文件定义结构化数据, 具有高效的序列化性能, 简称 Protobuf。

•Protobuf (Protocol Buffers): Protocol Buffer 的简称, 一种紧凑、可扩展的结构化数据序列化协议, 广泛用于无人船传感器数据的编码与传输。

•ROS (机器人操作系统, Robot Operating System): 提供统一编程框架和开发工具的机器人软件平台, 支持多传感器数据融合与处理, 用于无人船自主导航、避障等功能开发。

•Sapient 标准: 用于多传感器数据融合的技术标准, 支持异构感知数据的时空配准与目标信息整合。

•sensordata interface: ASAM OSI 定义的顶级消息接口, 用于传感器原始数据与处理结果的交换。

•sensor_msgs: ROS 中的传感器消息软件包, 定义摄像头、激光雷达等设备的数据格式 (如

PointCloud2)。

- UDP (用户数据报协议, User Datagram Protocol) : 无连接的传输层协议, 允许应用程序直接发送封装的 IP 数据包, 适用于对实时性要求高的环境感知数据传输。

- USBL (超短基线定位系统, Ultra-Short Baseline) : 水下声学定位技术, 通过声波信号实现水下目标的追踪与定位。

- USV (无人船, Unmanned Surface Vehicle) : 利用无线电遥控或自动驾驶系统控制的非载人船只, 可搭载传感器执行环境监测、勘测等任务。

- (g)PTP (通用精确时间协议, generalized Precision Time Protocol) : 实现网络中设备亚微秒级时间同步的协议, 保障无人船多传感器数据采集的时间戳一致性。

4 技术要求

4.1 传感器类型

无人船环境感知系统依赖多类型传感器协同工作, 按技术原理可分为声学传感器、光学与雷达传感器、环境传感器三大类。各类传感器需满足数据接口兼容性要求, 以支撑多源信息融合, 提升复杂水域环境下的感知鲁棒性。

4.1.1 声学传感器

声学传感器通过声波传播特性实现水下目标探测与环境建模, 是无人船水下感知的核心手段, 主要包括以下类型:

表 1 声学传感器

传感器类型	核心功能	技术参数	典型应用场景
单波束测深仪	高精度水深测量	频率 200kHz, 波束角 3°, 测深范围 0.15-300m, 精度 $\pm 1\text{cm} + 0.1\%h$ (h 为水深), 分辨率 1cm, 采样率 30Hz, 集成水温传感器 (-55°C~+100°C)	航道测绘、水深监测
多波束成像声呐	二维前视高分辨率成像	型号 SV1203D, 最大工作深度 4 公里, 体积小、功耗低[18]	水下障碍物检测、地形三维建模
侧扫声呐	海底地貌高分辨率成像	生成连续海底图像, 适用于地质结构识别	沉船探测、海底管线巡检
被动声呐	水下噪声源监测	监听环境声波, 识别船舶、海洋生物等声源	水下生态监测、船舶追踪
声速剖面仪	声速校正	实时测量水体声速分布, 用于修正声波传播误差	提升测深、成像精度
水声网络通讯机	水下声学通信	工作频段 21~27kHz, 支持 OFDM/MFSK 调制, 最大通信深度 300 米	无人船集群协同、数据中继

4.1.2 光学与雷达传感器

光学与雷达传感器通过电磁波或光波实现水面及近岸环境感知, 是无人船避障、定位与目标识别的关键设备:

表 2 光学与雷达传感器

传感器类型	核心功能	技术参数	典型应用场景
激光雷达(LiDAR)	三维环境建模与地形扫描	采样频率 10Hz, 提供距离、强度数据, 适用于浅海测绘	河床地形扫描、水下障碍物检测
毫米波雷达	全天候近距离目标跟踪	探测距离 0.2-40m, 俯仰角 14° × 方位角 112°, 支持 64 目标同时跟踪	避障、船舶近距离碰撞预警
4D 毫米波雷达	目标多维运动参数测量	提供距离、速度、方位角、俯仰角四维信息, 穿透雨雪雾	复杂天气条件下的环境感知

导航雷达	远距离目标探测	型号 Halo24, 最大探测距离 89 公里 (48 海里), 18 个量程设置	开阔水域导航、远距离船舶监测
可见光/红外摄像头	水面目标视觉识别	360° 全向视频, 分辨率 1920×1080, 视场角 104°, 采样频率 30FPS	浮标识别、油污/垃圾检测、夜间辅助观测
GNSS-RTK	高精度定位	平面精度±1cm+1ppm, 高程精度±2cm	无人船航线规划、位置校准
惯性测量单元 (IMU)	运动状态与姿态感知	提供角速度、加速度数据, 补偿横摇/纵摇误差	船体姿态稳定、运动轨迹推算

4.1.3 环境传感器

环境传感器用于监测水体、气象及空气质量参数, 支撑无人船的环境适应性与任务针对性:

表 3 环境传感器

传感器类型	监测参数	技术特性	典型应用场景
多参数水质传感器	pH 值、溶解氧、浊度、温度、COD/BOD、叶绿素 a、氨氮等	集成光学/离子选择传感器, 支持参数扩展	水质污染监测、水生生态评估
气象传感器	风速、风向、气压、水温、水面温度	实时采集环境气象数据, 支撑航线安全评估	航行气象预警、任务可行性分析
空气质量传感器	PM2.5、SO ₂ 、NO _x	集成气体检测模块, 适用于近岸大气环境监测	沿岸污染溯源、大气-水体交互研究
生物传感器	叶绿素、浮游生物	光学检测原理, 快速响应水体生物指标变化	藻类爆发预警、渔业资源调查

传感器兼容性要求: 无人船环境感知需实现多传感器数据融合, 例如激光雷达与毫米波雷达融合可将探测精度提升至98.7%。选型时需确保接口协议统一 (如以太网、USB)、时间同步精度≤1ms, 并预留扩展接口以支持新增传感器 (如生物传感器、4D雷达)。

4.2 数据格式

4.2.1 导航定位数据

导航定位数据格式需满足平台航行状态监测与环境感知的高精度要求, 主要包括数据帧结构、传感器消息格式及坐标转换规范, 确保与通信协议中的传输机制无缝衔接。

• 数据帧格式

无人船导航定位系统的上下位机数据帧采用结构化设计, 以固定包头标识起始, 包含核心航行参数与校验机制:

- 下位机数据帧: 以“A5 5A”为包头, 依次包含数据长度 (1位)、地址、纬度 (4位, 32位带符号整数, 单位度, 范围-90° +90°, 北纬为正)、经度 (4位, 32位带符号整数, 单位度, 范围-180° +180°, 东经为正)、时间 (3位)、速度 (2位)、IMU数据 (4位)、舵角 (1位)、速度等级、校验码及包尾, 实现航行状态原始数据的完整封装。

- 上位机数据帧: 同样以“A5 5A”为包头, 包含数据帧长度 (len)、无人船标识 (ID_ship)、命令内容 (order) 及校验码 (AA), 用于指令传输与状态反馈。

• 传感器数据格式

基于ROS (Robot Operating System) 的传感器消息格式为环境感知数据提供标准化接口, 核心类型包括:

- 导航卫星数据: 采用sensor_msgs::NavSatFix类型, 包含纬度 (latitude, float64)、经度 (longitude, float64)、海拔 (altitude, float64) 及位置协方差矩阵 (position_covariance), 配合NavSatStatus消息描述卫星接收器状态 (如STATUS_FIX (0) 表示有效定位, STATUS_NO_FIX (-1) 表示未定位) 和服务类型 (如SERVICE_GPS (1)、SERVICE_GALILEO (8))。

- 惯性测量单元 (IMU) 数据: 使用sensor_msgs::Imu类型, 包含旋转四元数 (orientation)、三轴角速度 (angular_velocity)、线性加速度 (linear_acceleration) 及对应的协方差矩阵, 支持滤波后数据 (mavros/imu/data) 与原始数据 (mavros/imu/data_raw) 的差异化传输。

- 视觉与点云数据: sensor_msgs::CameraInfo存储摄像头内参 (焦距、主点坐标) 与畸变系数; sensor_msgs::PointCloud2用于三维点云数据, 包含X、Y、Z坐标及颜色信息, 支持激光雷达与深度相机的环境建模数据。

- 坐标转换规范
 - 多传感器数据融合需通过坐标转换实现空间一致性，关键转换流程包括：
 - 激光雷达至摄像头坐标系：通过平移与旋转变换，将激光雷达坐标系中点 $Q(X, Y, Z)$ 转换为摄像头坐标系下 $Q'(X', Y', Z')$ 。
 - 摄像头至像素坐标系：通过透视投影公式将 $Q'(X', Y', Z')$ 投影至图像坐标系 $q(x, y)$ ，再经像素尺度因子 (s_x, s_y) 与图像中心 (u_0, v_0) 转换为像素坐标 $q'(x', y')$ 。

4.2.2 水质监测数据

水质监测数据格式需参考《地表水环境质量标准》(GB 3838)与《污水综合排放标准》(GB 8978)，明确参数类型、单位及精度要求，确保监测数据的规范性与可比性。

- 参数分类与要求
 - 必测参数：包括水温(°C，精度±0.5°C)、pH值(无量纲，精度±0.1)、溶解氧(mg/L，精度±0.2 mg/L)、化学需氧量(COD, mg/L，精度±5%)、氨氮(mg/L，精度±0.05 mg/L)等，需满足GB 3838中基本项目的监测要求。
 - 选测参数：根据应用场景可选总磷(mg/L)、总氮(mg/L)、重金属(如铜、锌，μg/L)等，其精度应符合GB 8978中对应污染物的测定方法标准。

- 数据结构化格式

水质数据宜采用Protocol Buffers (Protobuf)进行封装，通过.proto文件定义结构化消息，例如：

```
message WaterQualityData {
  uint64 timestamp = 1; // 时间戳（毫秒级）
  float temperature = 2; // 水温（°C）
  float ph = 3; // pH值
  float do = 4; // 溶解氧（mg/L）
  repeated float optional_params = 5; // 选测参数数组
}
```

Protobuf的二进制编码特性可减少数据体积20%-100%，解析速度较JSON提升5-100倍，适用于无人船有限带宽下的实时数据传输。

#与通信协议的衔接 为确保数据传输的完整性与效率，数据格式设计需与通信协议紧密配合：

- 帧结构一致性：下位机与上位机数据帧的包头(“A5 5A”)、校验码(如AA)设计需与通信链路中的差错控制机制对应，避免传输过程中的数据丢失或误码。
- 序列化格式选择：导航定位与水质监测的结构化数据优先采用Protobuf，非结构化数据(如雷达原始回波)可采用CSV或专用格式(如SEG-Y、XTF)，并通过UDP/RS232接口传输，实现与通信协议中传输层的适配。

关键格式要求

- 导航定位数据的经纬度采用32位带符号整数编码，确保±0.0001°的定位精度；
- 传感器消息格式需兼容ROS 2 sensor_msgs标准，支持多厂商设备的即插即用；
- 水质参数单位与精度需严格遵循GB 3838/GB 8978，数值保留位数不低于标准方法的检出限要求。

4.3 通信协议

无人船环境感知数据的通信协议需满足实时性、可靠性与兼容性要求，涵盖数据传输、接口连接及时间同步三大核心环节，其技术规范与应用场景如下：

4.3.1 数据传输协议

UDP协议作为无人船与外部系统数据交换的核心协议，具有无连接、不可靠传输、面向数据报的特点，适用于实时性要求高的场景。其报文结构由8字节报头(含源端口、目的端口等4个2字节字段)与最大64KB-8字节载荷组成，端口号范围为[0, 65535]。实际应用中，无人船通过UDP定期发送轨迹报告、GPS导航数据及雷达模拟数据，发送频率需满足每100ms定期发送的实时性要求，例如HPX-346接口单元将雷达数据数字化后通过UDP packets分发，USVX系统通过UDP接收GPS及罗盘导航数据。

NMEA 2000协议基于SAE J1939标准，通过CAN2.0B总线实现船载设备间数据交互，定义超过100种消息类型，可传输发动机转速、舵角状态等关键航行数据。相比NMEA 0183，其支持多设备同时接入，通信速率更高，SmartBoat®等设备已实现对该协议的集成支持。

ROS通信机制通过消息传递实现无人船感知层(传感器)、决策层(控制算法)与执行层(推进系统)的模块化通信，支持相机、激光雷达、惯性测量单元(IMU)等多传感器数据融合，其发布-订阅模

型可灵活适配动态感知需求。此外，数据分发服务（DDS）作为UMAA架构的核心协议，采用数据中心架构与发布-订阅模型，支持传感器标准化数据共享；Protobuf协议则以序列化效率高（数据量小、速度快）的优势，广泛用于跨平台数据存储与RPC调用。

4.3.2 接口连接方式

有线连接以稳定性为核心，主要包括：- 以太网：基于UDP/TCP/IP协议，需配置设备IP地址与连接超时时间，支持远程操作（如Innomar Compact-USV的线启动/停止功能）；- 串口：涵盖RS232/RS485/RS422接口，参数需明确端口号、停止位（1/2位）、数据位（7/8位）、奇偶校验位（无/奇/偶）及超时时长，例如RS232用于传输GNSS位置、深度数据，Modbus协议用于串口设备通信。

无线连接需根据作业范围与数据类型选择，关键技术参数如下表：

表 4 关键技术参数

	频率/协议	通信距离	核心应用场景	技术特点
数传电台	2.4GHz	通视环境 2km	短距离船岸指令传输	抗干扰能力强，适合视距内操作
4G 网络	LTE	无限制	近岸高带宽数据传输	标配 eSIM+Nano SIM 卡槽，含 10G×36 月流量
5G 网络	5G NR	近岸覆盖范围	实时视频、高清图像传输	5G+卫星组合实现延迟<300ms
卫星通信	VSAT/Starlink	远洋全球覆盖	远洋环境监测数据回传	带宽有限（通常<10Mbps），延迟较高
5.8G 高速通信	5.8GHz	视距 3-5km	水体环境参数实时上传	支持 Mbps 级速率，适合高密度数据
LoRa 自组网	LoRaWAN	视距 1-2km	近距离传感器组网	低功耗，适合电池供电设备

此外，双链路通信（4G+无线电）可实现断联自动切换，保障船岸通信连续性；超短波数据链与岸基远程测控链路则分别用于船岸组网及光电图像、数字地图传输。

4.3.3 时间同步

为确保多传感器数据时空一致性，需采用分层对时策略：NTP协议用于网络设备对时，各软件启用NTP客户进程，以1次/10分钟的速率同步时间，精度达毫秒级；PTP（(g)PTP）协议由GPS模块支持，通过硬件时间戳实现微秒级精度同步，满足激光雷达、相机等高精度传感器的时间对齐需求。

关键协议选型原则：实时控制指令优先采用UDP/MQTT，传感器数据传输推荐Protobuf/DDS，船载设备互联选用NMEA 2000/CAN总线，远程监控则结合4G/5G与卫星通信，形成多层次、高可靠的通信架构。

附录 A 术语缩写对照表

为便于读者快速查阅无人船环境感知数据接口相关术语，本章按字母顺序整理了标准中涉及的核心缩写及其定义，涵盖传感器、通信协议、数据格式等关键领域。

表 5 术语缩写对照表

缩写	全称	说明
AES	Advanced Encryption Standard	高级加密标准
AIS	Automatic Identification System	船舶自动识别系统，雷达数据辅助数据源
AMS	Autonomous Motion Subsystem	无人船自主运动子系统
ARQ	Automatic Repeat reQuest	自动重传请求（文中提及 stop-and-wait ARQ）
ASAM	Association for Standardization of Automation and Measuring Systems	自动化与测量系统标准化协会
Asterix	All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange	航空和海事 surveillance 信息交换标准
BED	Basic Environment Descriptors	数字化表示 CAV 遍历环境的数据
CAN	Controller Area Network	控制器局域网，用于实时数据通信、一种数据总线
CTD	Conductivity, Temperature, Depth	电导率、温度、深度传感器
DDS	Data Distribution Service	数据分发服务
DVL	Doppler Velocity Log	多普勒测速仪
DO	Dissolved Oxygen	溶解氧
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum	跳频扩频
FPS	Frames Per Second	摄像头每秒帧率
GPS	Global Positioning System	全球定位系统，用于定位和时间同步，提供绝对位置信息
(g)PTP	generalized Precision Time Protocol	用于网络设备时间同步的协议
Hz	Hertz	激光雷达采样频率单位
IMU	Inertial Measurement Unit	惯性测量单元，无人船环境感知传感器，用于测量姿态、加速度、速度和角速度等信息
INS	Inertial Navigation System	惯性导航系统，自主式导航系统
ISO	International Organization for Standardization	国际标准化组织
K-line	K-line Communication	一种通信线路
LiDAR	Light Detection and Ranging	激光雷达，用于三维环境扫描，生成三维点云数据
MAC	Medium Access Control	介质访问控制
MAVLink	Micro Air Vehicle Link	微型飞行器连接通信协议，无人机通信消息协议
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport	轻量级消息传输协议，用于发布/订阅通信
NMEA	National Marine Electronics Association	美国国家海洋电子协会协议（NMEA 0183、NMEA 2000 为其制定的标准接口协议）
NMEA-0183	National Marine Electronics Association 0183	海事电子设备通信标准
NMEA2000	National Marine Electronics Association 2000	美国航海电子联合会制定的航海通信协议
NTP	Network Time Protocol	网络时间协议
OPC UA	OLE for Process Control Unified Architecture	用于工业自动化设备间通信的协议
PCIe	Peripheral Component Interconnect Express	HPX-450 雷达接口卡采用的高速接口
Protobuf	Protocol Buffers	Google 开发的高效数据序列化协议，二进制编码格式
QKD	Quantum Key Distribution	量子密钥分发
RS232	Recommended Standard 232	串行通信接口标准

ROS	Robot Operating System	开放源代码机器人操作系统，提供传感器驱动、导航等工具，包含 sensor_msgs 包
SEG-Y	Society of Exploration Geophysicists - Y format	地球物理勘探数据格式
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	同时定位与地图构建，ROS 导航堆栈核心算法
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址
TLV	Tag-Length-Value	Protobuf 序列化结构
UDP	User Datagram Protocol	用户数据报协议，用于雷达数据分发的网络协议
URCS	Underwater Real-time Communication System	水下实时通信系统
USBL	Ultra-Short Baseline	超短基线定位系统
USV	Unmanned Surface Vehicle	无人水面艇
VSAT	Very Small Aperture Terminal	甚小孔径终端
WPAN	Wireless Personal Area Network	无线个人局域网

附录 B 传感器数据格式示例

传感器数据格式是无人船环境感知系统中数据交互与解析的基础，其规范性直接影响数据传输效率与多传感器融合精度。以下从通用位置信息单元、主流传感器消息类型及高效数据序列化格式三个维度，通过表格与代码示例展示典型格式模板。

B.1 平台航行位置信息单元格式

参考行业通用的位置信息编码规范，平台航行位置信息单元采用结构化二进制格式，包含基础航行参数与扩展字段，具体定义如下表所示：

表 6 位置信息编码

序号	字段名称	字段长度（字节）	说明
1	信息单元序号	1	该字段数值由打包时设置
2	信息单元标识	1	用于区分不同类型的信息单元
3	信息单元长度	2	标识后续数据字段的总字节数
4	时戳	4	信息产生时刻（24h 制），精度 0.1ms
5	发送无人系统节点编码	2	发送此信息的无人平台编码标识
6	二级信息单元标识	2	细分信息单元类型
7	接收无人系统节点编码	2	指定限制接收的平台编码，FFFFH 表示无限制
8	信息单元数据来源标识	1	0-无人系统平台，1-远程监控台，2-其它平台
9	信息单元参数扩展标识	1	0 表示仅包含航行基本参数
10	经度	4	32 位带符号整数，先低字节后高字节，单位：度，范围-180° ~+180°（东经为正）
11	纬度	4	32 位带符号整数，先低字节后高字节，单位：度，范围-90° ~+90°（北纬为正）
12	深度	2	16 位无符号整数，精度 0.1m，全 1 表示数据无效
13	绝对航速	2	有符号 16 位短整型，单位：节，精度 0.1，负数表示反向航行
14	绝对航向	2	无符号 16 位短整型，单位：度，范围 0° ~360°（正北为 0° 顺时针递增）
15	艏向角	2	无符号 16 位短整型，单位：度，范围 0° ~360°（正北为 0° 顺时针递增）
16	艏向角加速度	2	有符号 16 位短整型，单位：度/s，分辨率 0.01
17	平台巡航模式	1	0-停止，1-自主巡航，2-远程遥控，255-状态不明
18	模拟标志	1	0-真实数据，1-模拟数据

该格式通过固定长度字段与明确的字节序定义，确保航行状态数据在异构平台间的高效解析，适用于无人船与岸基监控系统的实时通信。

B.2 ROS 传感器消息格式示例

在机器人操作系统（ROS）中，传感器数据通常采用 sensor_msgs 消息类型封装，以下为典型传感器的消息结构与使用示例：

B.2.1 激光雷达数据（sensor_msgs/LaserScan）

激光雷达数据采用极坐标格式存储，包含扫描角度范围、距离数组等核心字段，具体定义如下表：

表 7 激光雷达数据

字段名称	数据类型	说明
header	std_msgs/Header	包含消息时间戳与坐标系 ID（如“laser_link”）
angle_min	float32	扫描起始角度（弧度），通常为 $-\pi/2$

angle_max	float32	扫描结束角度（弧度），通常为 $\pi/2$
angle_increment	float32	相邻扫描点角度增量（弧度）
time_increment	float32	相邻扫描点时间间隔（秒）
scan_time	float32	完整扫描周期（秒）
range_min	float32	最小可测距离（米）
range_max	float32	最大可测距离（米）
ranges	float32[]	距离数组，长度为 $(\text{angle_max} - \text{angle_min}) / \text{angle_increment} + 1$
intensities	float32[]	反射强度数组，与 ranges 长度一致

B.2.2 点云数据（sensor_msgs/PointCloud）

点云数据用于表示三维空间中的特征点集合，包含坐标与附加属性通道，示例代码如下：

```
//创建点云消息指针并初始化头信息
```

```
sensor_msgs::PointCloudPtr feature_points(new sensor_msgs::PointCloud);
```

```
feature_points->header = img_msg->header; // 继承图像消息的时间戳
```

```
feature_points->header.frame_id = "world"; // 坐标系设为世界坐标系
```

```
//添加三维坐标点
```

```
geometry_msgs::Point32 p;
```

```
p.x = un_pts[j].x; // 世界坐标系 X 坐标
```

```
p.y = un_pts[j].y; // 世界坐标系 Y 坐标
```

```
p.z = 1.0; // Z 坐标（示例固定为 1）
```

```
feature_points->points.push_back(p);
```

```
//添加属性通道（点 ID、图像坐标 u/v）
```

```
sensor_msgs::ChannelFloat32 id_of_point, u_of_point, v_of_point;
```

```
id_of_point.values.push_back(pts_id[j]); // 点唯一标识
```

```
u_of_point.values.push_back(pts_uv[j].u); // 图像 u 坐标
```

```
v_of_point.values.push_back(pts_uv[j].v); // 图像 v 坐标
```

```
feature_points->channels.push_back(id_of_point);
```

```
feature_points->channels.push_back(u_of_point);
```

```
feature_points->channels.push_back(v_of_point);
```

该示例中，点云消息通过 points 数组存储三维坐标，channels 数组存储附加属性，适用于视觉特征点的空间定位与追踪。

B.2.3 IMU 数据（sensor_msgs/Imu）

IMU 数据包含姿态、角速度与线性加速度信息，典型结构示例如下：

```
sensor_msgs::Imu {
```

```
orientation: {x: 0.0, y: 0.0, z: 0.0, w: 1.0}, // 四元数姿态（w 为实部）
```

```
orientation_covariance: [0.01, 0, 0, 0, 0.01, 0, 0, 0, 0.01], // 姿态协方差矩阵
```

```
angular_velocity: {x: 0.1, y: 0.05, z: 0.03}, // 角速度（rad/s）
```

```
angular_velocity_covariance: [0.001, 0, 0, 0, 0.001, 0, 0, 0, 0.001], // 角速度协方差
```

```
linear_acceleration: {x: 0.5, y: 0.2, z: 9.8}, // 线性加速度（m/s2）
```

```
linear_acceleration_covariance: [0.01, 0, 0, 0, 0.01, 0, 0, 0, 0.01] // 加速度协方差
```

```
}
```

B.2.4 GPS 数据（sensor_msgs/NavSatFix）

GPS 数据包含经纬度、海拔及定位状态，示例如下：

```
sensor_msgs::NavSatFix {
```

```
status: sensor_msgs::msg::NavSatStatus::STATUS_FIX, // 定位状态：有效固定解
```

```
service: sensor_msgs::msg::NavSatStatus::SERVICE_GPS, // 服务类型：GPS
```

```
latitude: 39.9042, // 纬度（度）
```

```
longitude: 116.4074, // 经度（度）
```

```
altitude: 50.0, // 海拔（米）
```

```
position_covariance: [0.1, 0, 0, 0, 0.1, 0, 0, 0, 0.2], // 位置协方差矩阵
```

```
position_covariance_type: 2 // 协方差类型：对角线矩阵
```

}

B.3 Protobuf 数据格式示例

Protobuf是一种高效的二进制序列化格式，适用于传感器数据的低带宽传输，以下为 .proto 文件定义示例：

B.3.1 基础消息定义

```
syntax = "proto3"; // 使用 proto3 语法
package lm; // 包名
// 示例 1: 简单消息结构
message HelloWorld {
  required int32 id = 1; // 必选字段: ID (字段编号 1)
  required string str = 2; // 必选字段: 字符串内容 (字段编号 2)
  optional int32 opt = 3; // 可选字段: 扩展信息 (字段编号 3)
}
// 示例 2: 嵌套消息与枚举
enum PhoneType { // 电话类型枚举
  MOBILE = 0; // 移动电话 (默认值)
  HOME = 1; // 家庭电话
  WORK = 2; // 工作电话
}
message PhoneNumber {
  string number = 1; // 电话号码
  PhoneType type = 2; // 电话类型 (引用枚举)
}
message Person {
  string name = 1; // 姓名
  int32 id = 2; // 唯一 ID
  string email = 3; // 邮箱
  repeated PhoneNumber phones = 4; // 重复字段: 电话号码列表
}
```

B.3.2 传感器数据专用消息

针对无人船多传感器融合场景，可定义包含 GPS 与 IMU 的复合消息：

```
message SensorData {
  // GPS 数据数组 (支持多时刻采样)
  repeated double latitude = 1; // 纬度数组 (度)
  repeated double longitude = 2; // 经度数组 (度)
  repeated double altitude = 3; // 海拔数组 (米)
  // 嵌套 IMU 数据结构
  message ImuData {
    geometry_msgs::Quaternion orientation = 1; // 姿态四元数
    geometry_msgs::Vector3 angular_velocity = 2; // 角速度 (rad/s)
    geometry_msgs::Vector3 linear_acceleration = 3; // 线性加速度 (m/s2)
  }
  repeated ImuData imu_data = 4; // IMU 数据数组
}
```

Protobuf通过二进制编码显著降低数据体积，在100个Person对象的编码测试中，其耗时(50.602ms)较JSON(73.688ms)减少约31%，适用于无人船低带宽环境下的实时数据传输。

格式选择建议：

- 实时通信：优先采用ROS sensor_msgs消息，兼容主流机器人框架；
- 低带宽传输：选择Protobuf二进制格式，减少30%~50%数据量；
- 标准化存储：航行位置信息推荐使用表格定义的结构化格式，确保多平台兼容性。

通过上述格式示例，可直观理解无人船环境感知数据的组织方式，为传感器接口开发、数据解析与

融合算法实现提供规范模板。不同格式各有侧重，需根据实际场景（实时性、带宽、兼容性）选择适配方案。

全国团体标准信息平台