

团 体 标 准

T/FSTI 0017—2025

水上无人系统跨域通信技术

Domain Communication Technology for Unmanned Surface Systems

2025 - 11 - 27 发布

2025 - 12 - 01 实施

目 次

前言	1
1 范围	2
2 规范性引用文件	2
3 术语和定义	3
3.1 核心概念术语	3
3.2 通信与网络技术术语	3
3.3 无人平台与系统术语	3
3.4 数据传输与帧结构术语	3
4 技术要求	4
4.1 通信协议栈	4
4.1.1 物理层技术规范	4
4.1.2 数据链路层协议融合	4
4.1.3 网络层路由与异构切换	4
4.2 传输性能指标	4
4.2.1 一、分技术类型核心指标要求	5
4.2.2 环境适应性与测试条件	5
4.2.3 业务适配性补充指标	5
4.3 安全机制	5
4.3.1 加密层：国密算法与防篡改设计	6
4.3.2 认证层：北斗定位与双向身份核验	6
4.3.3 审计层：全链路日志与合规监管	6
4.3.4 增强安全措施	6
5 测试方法	6
5.1 通信性能测试	6
5.1.1 场景化测试用例设计	6
5.1.2 环境参数同步采集与信道分析	7
5.1.3 多维度性能指标测试	7
5.1.4 测试执行规范与数据有效性保障	7
5.2 协议兼容性测试	8
5.2.1 测试标准参考体系	8
5.2.2 测试流程与测试床搭建	8
5.2.3 关键测试内容与技术指标	8
5.3 安全性能测试	9
5.3.1 渗透测试与密钥更新机制验证	9
5.3.2 数据传输完整性检测	9
5.3.3 加密认证与失效保护测试	9
5.4 国际兼容性	9

5.4.1 核心协议架构与国际标准对接	9
附录 A 信道编码示例	11
A.1 AIS B 组设备电文时隙分配表示例	11
A.2 水声通信 CRC 校验位计算方法	11
A.3 空时编码在水声多用户通信中的应用	11
附录 B 测试数据记录表	12
B.1 标准化测试数据记录表结构	12
B.2 跨域通信专项测试扩展字段	12

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。

水上无人系统跨域通信技术团体标准

1 范围

本标准以现有标准体系为基础，明确与专项标准的边界划分，重点聚焦跨域通信的共性技术要求。在设备覆盖范围上，主要适用于水上无人系统，包括水面无人艇（USV）、无人潜航器（UUV）、水空跨域巡航器、海上无人机（UAV）等无人平台，以及无人船用融合通信网关设备的设计、生产及检验环节，不重复规定如GB/T 44414-2024界定的AIS设备分类等已有专项标准内容。

在通信场景方面，本标准覆盖水上无人系统跨域通信的多种应用场景，包括但不限于无人集群路由协议切换、感应耦合传输、跨网通信质量评估及动态可重构异构网络架构，涉及水下传感器、无人潜航器、水面舰艇、飞机与卫星之间的通信组网，支撑无人系统与岸基、无人系统之间、无人系统内部的互连互通。具体场景包括海上无人机对船、海上无人机对岸基、水空跨域无人平台间的通信，以及集群跨域通信组网中指挥信息、任务载荷、平台控制等数据信息的连同入网及应用。

通信内容涵盖位置、速度、深度、传感器数据、高清视频等关键信息，不包括雷达、视频 imagery 等高频宽应用。技术要求层面，规定通信协议栈、传输性能指标、安全机制、测试方法及国际兼容性等共性内容，适用于无人系统跨域通信的设计、生产、应用和管理环节，包括协同通信安全接入、自适应通信组网等核心技术场景。

核心覆盖范围总结

- 设备类型：USV/UUV/UAV、水空跨域巡航器、无人船及融合通信网关
- 网络架构：声/光/电异构网络，支持点对点、星状网、网状网等结构
- 排除项：雷达、视频 imagery 等高频宽应用，不重复现有专项标准内容

本标准通过明确上述范围，构建水上无人系统跨域通信的统一技术框架，为多域无人平台的协同作业提供标准化支撑。

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。

引用说明：本章节所列文件通过规范性引用构成本文件的必备条款，涵盖标准化工作基础、通信技术要求、信息安全规范等核心领域，确保技术要求的兼容性与权威性。所有引用文件均遵循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》的规范要求。

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
- GB/T 1.2-2020 标准化工作导则 第2部分：以ISO/IEC标准化文件为基础的标准化文件起草规则
- GB/T 22239-2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
- GB/T 38645-2020 信息安全技术 网络安全事件应急规范
- GB/T 44414-2024 海上自主无线电设备技术要求

行业标准与团体标准：

- YD/T 3594-2019 基于LTE的车联网通信安全技术要求
- YD/T 3371-2023 不同运营商IMS网间互通网关设备测试方法
- YD/T 4189-2023 携号转网非点对点短消息网间转发的质量要求和测试方法
- T/ZHUSA 003-2022 无人船融合通信网关技术要求及试验方法

国际标准与国际组织规范：

IEC 61162系列 海事导航和无线电通信设备及系统—数字接口（包括IEC 61162-1:2024单发送者和多接收者、IEC 61162-2:2024高速传输、IEC 61162-460以太网接口安全机制）

ISO/IEC 4005-3:2023 电信和系统间信息交换—无人航空器区域网络（UAAN）—第3部分：控制通信物理层和数据链路协议

ISO/IEC 4005-1:2023 电信和信息交换系统—无人航空器区域网络（UAAN）—第1部分：通信模型和要求

ISO/IEC TR 30167:2021 物联网（IoT）—物联网水下通信技术

ISO 23807:2023 船舶与海洋技术—船岸异步非时间敏感数据传输通用要求

ISO/TS 23860:2022 船舶与海洋技术—自主船舶系统相关词汇

国际电信联盟（ITU）LNR技术互操作性测试标准（含AIS数据传输格式标准）

IMO《水面船舶自主航行规则（MASS code）》（计划2024年下半年推出非强制性版本，2028年1月1日强制生效）

其他规范性文件：

《跨域无人装备协同通信安全接入规范》（未注日期，适用最新版本）

STANAG 4586（北约无人机控制系统接口标准）

NMEA 0183（美国国家航海电子协会数据接口标准）

IHO S-100（国际 hydrographic 组织地理数据标准）

“两面神”（JANUS）协议标准（水下声学通信协议）

3 术语和定义

3.1 核心概念术语

跨域通信（Cross-domain communication）：指在水上环境（包括水面、水下、水空界面）中，不同无人平台（如无人船、水空跨域巡航器、无人机等）之间或与岸基、卫星等节点间的信息传递与交互过程，其核心特征在于涵盖水上-水下、水上-空中等介质转换场景。

异构网络（Heterogeneous network）：指融合水声、无线电、激光、卫星通信、光纤等多种技术的网络系统，支持多类型接入网络协同工作，以满足不同业务场景的传输需求（如传输速率、时延、覆盖范围）。

核心术语范围说明：跨域通信强调介质转换特性，覆盖水上-水下（如水声通信）、水上-空中（如无人机-水面艇通信）场景；异构网络突出技术融合属性，包含水声、无线电（如4G/5G）、激光等多技术协同。

3.2 通信与网络技术术语

信道切换（Channel switching）：在通信过程中，将无人平台的指令与控制从一个数据链路频道或频段转移到另一频道/频段的操作，核心目标是保障通信连续性。

异构网络选择（Heterogeneous network selection）：无人平台根据业务需求（如传输速率、时延）和网络状态（如切换成本）从多类型接入网络中选择最优网络的决策过程。

多址接入协议（Medium Access Control, MAC）：用于多用户节点接入网络的控制协议，在水上无人系统中特指联合空时编码的水声多用户节点协同并行传输协议。

空时编码（Space-time coding）：通过多输入多输出（MIMO）系统在空间和时间维度对数据包进行编码的技术，以实现并行传输和抗干扰。

JANUS协议：一种水声通信协议标准，定义了数据包帧结构、调制方法和信道编码算法，适用于水下与水面跨介质通信。

3.3 无人平台与系统术语

无人海上载具（Unmanned Maritime Vehicle, UMV）：包括无人水面艇（USV）、无人潜航器（UUV）等无人海上平台。

无人集群通信（Unmanned swarm communication）：支撑海上无人系统集群作战的关键要素，实现各类无人系统互连互通，确保指挥信息、任务载荷、平台控制等信息入网与应用的通信网络。

集群跨域通信组网：跨域集群各终端间在Ad-hoc网络、无线传感网络、无线Mesh网络基础上，利用无线自组网特性结合空中、水面、水下等作战域复杂环境特征，实现指挥信息、任务载荷、平台控制等数据信息连同入网及应用的网络架构。

3.4 数据传输与帧结构术语

指令帧（Command frame）：由主控系统发送至水下传感器，以控制水下传感器的工作活动、休眠、通信频率和供电方式的帧类型。

数据帧（Data frame）：由水下传感器发送给主控系统，包含水下传感器采集到的水下数据的帧类型。

CRC校验（Cyclic Redundancy Check）：用于数据帧传输的错误检测技术，通常占用2个字节。

4 技术要求

4.1 通信协议栈

水上无人系统跨域通信协议栈基于OSI模型框架构建，通过物理层、数据链路层及网络层的协同设计，实现空-地-水多域环境下的可靠数据传输。各层协议需满足海事场景的低延迟、高容错及异构网络融合需求，同时兼容国际通用标准以确保互操作性。

4.1.1 物理层技术规范

物理层作为协议栈的基础，需平衡传输距离、带宽效率与抗干扰能力。数传电台参数采用CK-WRC-200无人船方案的900MHz/2.4GHz频段配置，支持无人机区域网络(UA AN) Level II控制通信，符合ISO/IEC 4005-3:2023标准中关于无线分布式通信的物理层要求，可实现无人设备与控制器之间的一对一可靠连接。调制解调技术优先选用BPSK(二进制相移键控)或QPSK(四进制相移键控)，在带宽受限环境下提升数据传输效率，尤其适用于水声信道等复杂介质。对于水下通信场景，物理层还需整合声学通信、光学通信及甚低频(VLF)/极低频(ELF)通信技术，具体特性参考ISO/IEC TR 30167标准，其中水声通信可采用基于NATO ANEP-87的SWIG Acoustic协议，定义数据包帧结构与信道编码算法以适应水下衰减环境。

4.1.2 数据链路层协议融合

数据链路层需实现多技术帧格式的统一与高效介质访问控制。AIS群组工作模式作为水上通信的核心机制，规定了主从设备组网配置：从设备通过2006信道向主设备发送识别码、节点编号及实时位置信息，主设备按标准电文格式(可打印ASCII码)和播发周期广播数据，支持单发送者到多接收者的单向串行传输。水声通信帧格式则采用结构化设计，包含起始帧序列(0xc3, 0xa5)、地址字段(目标/发送方标识)、控制字段(帧类型与长度)、数据字段(传感器数据与电量信息)及CRC校验字段，确保水下数据传输的完整性。此外，海事电子设备接口需兼容IEC 61162系列标准，其中IEC 61162-2:2024定义高速传输的单发话器-多受话器模式，IEC 61162-460则规定以太网互联方案，支持与自动化网络的安全冗余连接。水声多用户场景下，可采用接收端预约的MAC协议，基于距离认知划分协同传输小区，通过空时码编码实现无干扰并行传输。

4.1.3 网络层路由与异构切换

网络层需解决动态拓扑下的低延迟路由与多链路自适应切换问题。基于Q-learning的路由切换算法是核心技术，通过强化学习生成切换阈值(上限与下限)，实现OLSR协议(高通信质量场景)与DTN协议(弱连接场景)的动态切换，确保切换时间<50ms以满足实时性需求。异构网络支持4G/卫星/水声链路的无缝融合，卫星通信优先采用IMO认可的VSAT和Inmarsat链路，Iridium作为备份；近距离通信可选用甚高频(VHF)无线电，中远距离则依赖高通量卫星(HTS)或低轨卫星星座(LEO)降低延迟。网络拓扑采用固定与动态切换结合的方式：星型拓扑简化维护与覆盖，网状结构增强冗余性，动态拓扑通过事件触发机制(如状态误差超阈值)降低资源消耗。此外，协议栈需支持与STANAG 4586(北约无人机控制系统接口)的互操作性，并采用对象管理组(OMG)数据分发服务(DDS)作为核心组件，实现松散耦合的模块化服务架构，提升系统扩展性与容错能力。

协议栈关键特性总结：

多标准兼容：物理层遵循ISO/IEC 4005-3，数据链路层融合AIS与JANUS协议，网络层支持STANAG 4586互操作。

异构网络融合：集成4G/卫星/水声链路，通过Q-learning算法实现<50ms切换，优先保障关键业务实时性。

海事专用优化：AIS群组工作模式支持主从设备协同，IEC 61162系列确保导航设备接口统一，SWIG Acoustic协议适应水下信道特性。

协议栈的实现需采用FPGA+DSP核心处理器架构，集成信号预处理、乒乓实时处理及Socket通信模块，软件层面支持Modbus、TCP/IP等工业协议的透明传输，硬件接口配置2RJ45网口、3RS232串口及1*RS485串口，满足多样化设备接入需求。通过上述分层设计，协议栈可实现水上无人系统跨域通信的可靠性、实时性与可扩展性，为集群协同作业提供底层通信支撑。

4.2 传输性能指标

水上无人系统跨域通信的传输性能指标体系需基于无线电、水声、激光等不同通信技术的特性差异构建，同时结合海洋环境动态变化对通信链路的影响，形成覆盖基础参数、环境适应性及业务适配性的

多维度评价标准。

4.2.1 一、分技术类型核心指标要求

针对不同通信介质的物理特性，需明确差异化的关键性能参数，具体指标如下表所示：

表 1 核心指标要求

技术类型	核心指标	要求值	依据标准/场景
无线电通信	数传电台频段	900MHz/2.4GHz	CK-WRC-200 无人船方案
	传输距离	视距 $\geq 10\text{km}$ (1W 发射功率)；自主航行时无线宽带专网 $\geq 2\text{km}$ ；小型无人艇 $\geq 2\text{km}$ ，大型 $\geq 5\text{km}$	GB/T 44414-2024；水质监测无人艇标准
	定位精度	$\leq 2.5\text{m}$ (RTK 模式)；水平定位精度优于 10m (95%置信度, A 组设备)	水质监测无人艇标准；海上自主无线电设备规范
	抗干扰能力	支持跳频通信	T/ZHUSA 003-2022
	通信时延	$\leq 14\text{ms}$ (控制指令)	无人艇智能操作系统测试
	带宽要求	视频传输 $\geq 1\text{Mbps}$ ；电台通信波特率 $\geq 9600\text{bps}$	无人艇业务传输需求
水声通信	传输带宽	1-5kbps	水声信道特性参数规范
	传输距离	$\leq 10\text{km}$	水下声学通信系统设计标准
激光通信	通信速率	$\geq 1.25\text{Gbps}$ (动态场景)	六博光电船载系统；高速数据传输场景
	动态跟瞄误差	$< 5 \mu\text{rad}$	激光链路稳定性要求
	传输时延	微秒级 (FPGA 编解码模块)	实时控制链路需求

4.2.2 环境适应性测试条件

通信性能指标需在特定海洋环境条件下进行验证，环境参数对指标的衰减阈值影响显著，主要包括：关键环境影响因素

海况等级：3级海况下需明确指标衰减阈值，如无线电传输距离衰减率、激光链路中断概率等

水质参数：水下传输受水温、盐度、浊度影响，水声通信带宽在高浊度水体中可降低至1kbps以下

气象条件：雾、雨、浪等导致激光通信突发中断时间 $< 50\text{ms}$ (船只紧急转向时)，需通过快速重连机制补偿

电磁环境：复杂电磁干扰下，跳频通信模式需保持抗干扰增益 $\geq 15\text{dB}$

此外，异构网络切换性能需满足：跨技术切换时间 $< 50\text{ms}$ ，切换触发条件包括接收信号强度 (RSSI) 低于 -90dBm 或误码率 (BER) 超过 10^{-6} ，确保多链路协同时的业务连续性。

4.2.3 业务适配性补充指标

针对无人系统多样化业务需求，需补充与应用场景强相关的性能参数：

数据速率分级：支持低速场景 (如传感器数据， ≤ 1 条消息/秒，符合IEC 61162-1标准) 与高速场景 (如高清视频回传，1.25Gbps激光通信) 的动态适配

消息传输特性：串行传输时典型消息长度11~79字符，重复率需达20ms/次，满足导航设备实时数据更新需求

网络层性能：端到端吞吐量通过空时复用技术可提升30%以上，平均时延通过多节点协同传输缩短至传统方案的1/3

可靠性参数：路径中断次数 (it) 与平均中断时间 (ai_time) 需满足任务周期内 $it \leq 3$ 次/小时， $ai_time \leq 200\text{ms}$

通过上述指标体系的构建，可实现对水上无人系统跨域通信链路从物理层到应用层的全维度评估，为技术选型、系统优化及标准化验证提供量化依据。

4.3 安全机制

水上无人系统跨域通信的安全机制需构建“加密-认证-审计”三层防护体系，通过多维度技术措施保障通信链路的机密性、完整性和可用性，同时满足跨域协同场景下的动态安全需求。

4.3.1 加密层：国密算法与防篡改设计

加密机制采用国密SM4分组密码算法作为核心加密手段，遵循《跨域无人装备协同通信安全接入规范》的技术要求，实现通信数据的端到端加密。该算法具备128位密钥长度，可有效抵御暴力破解等攻击手段，同时支持与AES-256等国际算法的兼容部署，满足不同安全等级场景需求。为强化数据完整性保护，系统需集成CRC循环冗余校验机制，通过校验字段实时检测传输过程中的数据篡改或误码，确保接收端可准确识别异常数据包。此外，平台软件需采用防篡改设计，通过代码签名、运行时校验等措施防止恶意植入后门程序，保障核心控制逻辑的安全性。

4.3.2 认证层：北斗定位与双向身份核验

接入认证环节整合北斗定位模块与设备唯一标识（UUID）双重因子，实现物理位置与数字身份的绑定核验。要求定位模块具备厘米级定位精度，且GNSS性能稳定，避免因定位漂移导致认证失效。在身份验证流程中，采用双向挑战-应答机制，通信双方需交换加密证书并通过密钥协商生成会话密钥，防止中间人攻击和身份假冒。对于跨域节点，密钥管理系统支持基于分布式协商协议的动态密钥更新，确保在节点加入/退出集群时密钥链的实时刷新，避免长期密钥泄露风险。

三层安全架构核心要素

加密层：国密SM4算法（数据加密）+ CRC检错（完整性校验）

认证层：北斗定位（物理锚定）+ 设备UUID（数字身份）+ 动态密钥协商（跨域适配）

审计层：操作日志全记录 + 异常行为实时告警 + 第三方合规审计接口

4.3.3 审计层：全链路日志与合规监管

审计机制需实现通信行为的全生命周期记录，包括接入请求、数据传输、指令交互等操作日志的实时存储与加密备份。系统应支持与第三方审计平台的对接，提供符合GB/T 22239-2019《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》的日志格式与查询接口。针对异常行为，需建立基于机器学习的检测模型，对高频接入失败、数据异常篡改、越权指令等风险行为触发实时告警，并自动启动应急响应流程。

4.3.4 增强安全措施

为提升系统鲁棒性，安全机制还需整合多重保障技术：在网络层面，采用IEC 61162-460标准定义的冗余网络架构，通过双链路备份与快速切换机制降低单点故障风险；在失效保护方面，无人平台需具备通信中断自动返航功能，当链路丢失或电量低于预设阈值时，可基于预存航点自主返航至安全区域，如华微3号无人测量船已实现低电量/失联状态下的择近返航。抗干扰设计上，引入认知电磁环境技术，通过实时频谱感知与动态信道切换，规避复杂电磁环境下的信号干扰。此外，通过分离“安全关键软件”与“非安全关键软件”模块，确保控制指令、定位数据等核心功能的独立运行，降低非关键模块漏洞对系统安全的影响。

上述安全机制的设计与实施需全面符合YD/T 3594-2019《基于LTE的车联网通信安全技术要求》等行业标准，同时参考中国船级社《智能船舶规范2024》中关于网络安全型式认可的具体要求，构建覆盖“设备-链路-平台”的纵深防御体系。

5 测试方法

5.1 通信性能测试

为全面评估水上无人系统在复杂海洋环境下的通信可靠性与稳定性，需构建场景化测试体系，同步整合动态工况模拟、环境参数采集与多维度性能指标验证。测试设计需覆盖物理层接口特性、无线与水声信道传输性能、动态场景适应性及环境干扰评估，通过标准化方法实现测试结果的可复现与可对比。

5.1.1 场景化测试用例设计

动态跟瞄与运动场景测试需模拟实际作业中的典型运动状态，重点验证通信链路在机动条件下的稳定性。采用六博光电系统方法开展3级海况下的动态跟瞄误差测试，同步模拟双船相向行驶、并行行驶及机动绕行场景，通过实时轨迹记录分析相对运动对信号锁定的影响。针对突发状况，设计船只紧急转向测试用例，要求跟瞄系统重新锁定时间 ≤ 0.3 秒，通信中断时间 < 50 毫秒，确保应急工况下的链路连续性。

关键动态指标

跟瞄系统响应：紧急转向后重新锁定时间 ≤ 0.3 秒

通信中断阈值：突发场景下链路中断时间 < 50 毫秒

运动场景覆盖：相向行驶、并行行驶、机动绕行（双船测试）

极端环境适应性测试需验证系统在特殊气象与光照条件下的性能。通过环境模拟舱构建正午强日照（照度 $\geq 100,000$ lux）、夜间弱光（照度 ≤ 5 lux）等极端光照场景，采用自适应滤波算法优化目标识别与锁定逻辑，记录信号强度（RSSI）波动幅度及误码率（BER）变化趋势。同步开展温度循环测试（ $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ ）与盐雾腐蚀试验（浓度5% NaCl, pH 6.5~7.2），评估硬件接口在恶劣环境下的物理稳定性。

5.1.2 环境参数同步采集与信道分析

水声信道测试需严格参照《基于海洋环境信息感知的信道测量方法》，构建“环境-信道”联动测试框架。接收端部署多参数感知装置，包括FPGA开发板（时序控制核心）、DHT22温湿度模块（测量精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/\pm 2\%$ RH）、一体化风速风向传感器（量程 $0\sim 60$ m/s, 分辨率 0.1 m/s）、波高检测模块（量程 $0.1\sim 10$ m）及北斗三号数传终端（提供时间戳与位置信息），同步采集水温、盐度、风速、波高等环境参数。通过时间戳对齐算法（误差 ≤ 1 ms）将环境数据与通信信息（经第二VST解调）关联，建立信道特性（如功率时延谱、多普勒频移）与环境参数的映射模型。

无线通信测试则按《无人艇功能测试试验方法》执行，在视距条件下测量不同距离（1 km、5 km、10 km）的通信性能，要求10 km处丢包率 $\leq 1\%$ ，端到端时延（通过ping命令测试） ≤ 50 ms。针对水声信道，使用USRP设备生成PN序列作为探测信号，通过频谱分析仪解析功率时延谱特征，计算多径效应导致的码间干扰系数，同时记录多普勒频移量（与船只航速正相关）用于动态补偿算法优化。

5.1.3 多维度性能指标测试

物理接口性能测试涵盖串口与网口两类关键接口。串口测试包括：设备热插拔可靠性（连续插拔50次无通信中断）、硬件切换与波特率兼容性（支持9600~115200 bps自适应）、数据传输稳定性（连续发送10,000帧数据无校验错误）。网口测试则聚焦数据吞吐量，通过iperf工具测量TCP/UDP传输速率（要求 ≥ 100 Mbps@100 m），并验证数据读取/下载的完整性（文件传输错误率 $\leq 0.01\%$ ）。

网络层与应用层性能测试需满足跨域通信需求。跨网通信质量测试由互联单位A发起，在源节点（A网络）、互连节点、目的节点（B网络）间执行双向转发时延（要求 ≤ 100 ms）与丢失率（要求 $\leq 0.5\%$ ）测试，测试频次及数据包数量需符合相关标准第一章第五条规定。路径状态监测通过拓扑元组（t_record, t_now, addr_dest, addr_last, t_time）记录链路健康状态，当元组从拓扑集中删除时判定路径中断，累计中断次数并计算平均中断时长（要求单次中断 ≤ 1 秒）。

表2 核心性能指标汇总

测试维度	关键指标	标准要求
无线通信	10 km处丢包率	$\leq 1\%$
端到端时延	ping测试结果	≤ 50 ms
路径可靠性	单次中断时长	≤ 1 秒
水声信道	多普勒频移补偿误差	≤ 5 Hz
串口稳定性	连续插拔无中断次数	≥ 50 次

通信距离与遥控响应测试需实地验证系统作用范围。无人艇通信距离测试通过逐步远离地面控制站（步长500 m），记录通信中断时的经纬度坐标，计算最大有效距离（无人监测采样船数传有效距离 ≥ 5 公里）。遥控响应测试在“手动模式”下执行前进、转向、加减速等操作，要求指令响应延迟 ≤ 200 ms，动作执行准确率100%。

5.1.4 测试执行规范与数据有效性保障

为确保测试结果的科学性与可比性，需严格遵循标准化执行流程。样本量与测试时段设置：单次通信性能测试需发送 ≥ 200 条30-50字中文测试消息，覆盖文本、指令等典型数据类型；忙时测试选择20:00-21:00（网络负载高峰期），评估系统在高并发场景下的表现。

时钟同步与抗干扰措施是数据准确性的关键。所有网元需通过北斗三号模块完成时间校准，时延测试误差控制在毫秒级；为避免触发运营商频控策略，采用多号码轮询机制发送测试消息，确保数据传输的连续性。

实验室与外场验证结合可实现全链路测试覆盖。实验室测试通过信号同步检测（基于Notch滤波器外同步法与格兹尔算法自同步法）验证基带信号处理性能，并在不同信道条件下（AWGN、多径衰落）仿真比较调制编码方案（如LDPC、Turbo码）的BER曲线。外场试验包括水池测试（硬件模块功能验证）与湖试（浮标系统信号检测与数据包解析能力评估），最终通过实海测试验证系统在真实海洋环境下的综

合性能。

5.2 协议兼容性测试

协议兼容性测试是保障水上无人系统跨域通信可靠性的关键环节，需通过标准化测试流程与异构网络环境验证，确保不同设备、系统及网络间的无缝信息交互。测试需以国际互操作性标准为基准，结合水上通信场景特性，构建覆盖协议转换性能、标准一致性、多协议支持及设备级兼容的全方位验证体系。

5.2.1 测试标准参考体系

协议兼容性测试应优先参考国际权威互操作性标准，包括：北约STANAG 4586《北约无人机控制系统（UCS）接口标准》，其规定了无人机系统的体系架构、接口定义、通信协议及消息格式；联合无人系统体系结构（JAUS）系列标准，从系统层、子系统层、节点层和构件层构建无人系统开放体系；以及ISO 4891:2024《船舶与海洋技术—船舶智能应用互操作性》，为船舶智能系统跨平台通信提供通用规范。这些标准共同构成兼容性验证的技术基准，确保测试结果的国际通用性与权威性。

5.2.2 测试流程与测试床搭建

测试需遵循标准化流程，通过搭建异构网络测试床模拟水上复杂通信环境，该测试床应支持多网络制式（如AIS、5G、卫星通信）与多协议栈（如NMEA 0183、TCP/IP、MAVLink）的共存与转换，可复现设备在动态网络切换、信号衰减等场景下的通信行为。测试床需具备高精度时延测量模块（误差 $\leq 1\text{ms}$ ）和协议解析工具，实时监测数据转换过程中的协议字段完整性与时序特性。

核心测试流程要点：

1. 协议转换性能验证：重点测试AIS电文与IP数据的转换时延（ $\leq 20\text{ms}$ ）及NMEA 0183与TCP/IP协议的转换效率，确保数据在异构协议栈间高效流转。
2. 国际标准一致性验证：依据STANAG 4586验证指令格式与无人系统控制接口的兼容性，通过消息字段比对、交互时序分析确保与北约无人系统通信协议兼容。
3. 网间差异控制：跨网转发与网内转发的成功率差值需 $\leq 3\%$ 、时延差值 $\leq 3\text{s}$ ，保障场景下的通信体验一致性。

5.2.3 关键测试内容与技术指标

1. 协议转换与性能测试

针对水上无人系统常用协议组合，开展专项转换性能测试：

- AIS-IP转换：通过测试床模拟AIS基站与IP网络的通信场景，测量电文封装/解封装时延，要求单次转换时延 $\leq 20\text{ms}$ ，确保船舶动态信息（如位置、航向）的实时性。
- NMEA 0183-TCP/IP转换：验证船舶导航数据（如GPS定位、舵角）在串口协议与网络协议间的转换效率，要求丢包率 $\leq 0.1\%$ ，数据字段准确率100%。

2. 多协议支持与网间互通测试

系统需支持多协议栈并行工作，测试内容包括：

- 多协议兼容性：验证对MAVLink（无人机控制）、TCP/IP（数据传输）、DDS（分布式实时系统）等协议的兼容能力，通过协议字段映射表确认跨协议数据语义一致性。
- 5G异网漫游测试：针对支持5G的无人设备，测试网间切换时的移动性管理（切换时延 $\leq 50\text{ms}$ ）、会话连续性（断连时间 $\leq 3\text{s}$ ）及切片映射准确性（业务QoS保障率 $\geq 99\%$ ）。
- IMS网间互通测试：对跨运营商IMS网关设备，验证SIP消息路由、媒体流转发、时间同步（偏差 $\leq 10\text{ms}$ ）及操作维护功能，确保语音与视频通信的跨网可靠性。

3. 设备级与系统级兼容性验证

- AIS设备兼容性：测试A组海上自主无线电设备播发信息在雷达、ECDIS等设备的实时显示能力；验证B组设备信息的可选择性显示功能（用户可通过简单操作隐藏非关键信息）。
- 外部系统接入测试：利用rcg测试工具模拟主控端，通过背负式通信系统网口下发路径任务指令，验证无人艇沿规划航线航行的准确度（位置偏差 $\leq 5\text{m}$ ）及状态数据（速度、姿态）回传的实时性（周期 $\leq 1\text{s}$ ）。

- 硬件协议稳健性：在FPGA+DSP异构硬件架构下，测试uPP总线传输速率（ $\geq 100\text{Mbps}$ ）、乒乓缓存数据吞吐效率及Socket通信的并发连接支持能力（ ≥ 100 路），确保硬件层协议处理的稳定性。

通过上述系统化测试，可有效验证水上无人系统通信协议在复杂环境下的兼容性，为多平台协同作业、跨域数据共享及国际标准对接提供技术保障。

5.3 安全性能测试

水上无人系统的安全性能测试需严格遵循 IEC 61162-460 标准规定的测试方法，从数据传输安全、加密认证机制、抗攻击能力及失效应急响应等多维度验证系统安全性。测试流程需覆盖主动攻击模拟、数据完整性校验、加密强度验证及极端场景下的失效保护能力，确保系统在复杂水上环境中维持稳定的安全通信。

5.3.1 渗透测试与密钥更新机制验证

采用专业渗透测试框架构建攻击模拟环境，重点复现中间人攻击场景，通过伪造通信节点、截获传输数据包等手段，验证密钥动态更新机制的实时性与有效性。测试过程需监控密钥更新触发条件（如通信超时、异常数据注入）及更新耗时，确保在攻击发起后 100% 触发密钥轮换，且新密钥的分发与同步无数据丢失。

5.3.2 数据传输完整性检测

通过高精度流量分析工具对通信链路进行全量数据包捕获，利用 CRC 校验字段验证数据传输的准确性与完整性。测试需覆盖不同传输速率（200 kbps - 2 Mbps）及信道干扰场景（信噪比 0 - 20 dB），要求 CRC 校验通过率 $\geq 99.9\%$ ，且错误数据包可被系统自动识别并触发重传机制。此外，需通过二进制比对确认重传数据与原始数据的一致性，排除校验通过但内容篡改的潜在风险。

核心测试指标

中间人攻击下密钥更新成功率：100%

数据传输 CRC 校验通过率： $\geq 99.9\%$

AES-256 加密算法破解尝试抵抗时长： ≥ 72 小时

通信中断后应急响应触发时间： ≤ 5 秒

5.3.3 加密认证与失效保护测试

在加密层测试中，采用AES-256对称加密算法对传输数据进行加密强度验证，通过暴力破解模拟（每秒 10^6 密钥尝试）测试其抗破解能力，要求持续攻击 72 小时内无法获取有效明文。双向身份验证测试需模拟伪造设备接入请求，验证系统对非法节点的识别率及拒绝响应时间（ ≤ 1 秒）。

失效保护测试重点模拟链路丢失场景，包括突发通信中断（如电磁干扰）、地面站失联等情况。测试无人系统启动预编程返航路径或应急锚定功能的响应时间（ ≤ 5 秒）及执行准确性（定位偏差 ≤ 10 米，95% 置信度）。对于无人艇等水上平台，还需验证通信恢复后人工遥控与自主控制模式的无缝切换能力，确保控制权交接过程无操作延迟。

通过上述多维度测试，可全面验证水上无人系统在恶意攻击、数据损坏及极端环境下的安全韧性，为跨域通信的可靠性提供技术保障。

5.4 国际兼容性

水上无人系统跨域通信的国际兼容性是实现全球化部署与协同作业的核心前提，需在物理层、网络层及协议体系层面构建与国际标准的深度衔接机制，并通过多维度技术适配确保跨域异构网络的互操作性。

5.4.1 核心协议架构与国际标准对接

物理层与数据链路层采用分层兼容策略：物理层严格遵循IEC 61162-1:2024海事电子设备数字接口标准，统一电文格式以确保与船舶电子系统的直接对接；数据链路层则参考ISO/IEC 4005-3:2023无人区域网络（UAN）Level II控制通信协议，规定无线通信的信道接入与帧结构规范，同时兼容ISO 80629:2022对无人航空器区域网络（UAAN）物理层与数据链路协议的补充定义。对于水下通信场景，引入国际水声通信标准“两面神”（JANUS）协议，支持水下与水面跨介质信息交互，其技术指标符合国际电信联盟（ITU）《ITU-R M. 2135》标准中156-162.05 MHz频段的自主海事无线电设备特性要求，确保空天地海一体化通信的频段合规性。

网络层与应用层采用分布式寻址与模块化架构：网络层基于ISO/IEC 4005-3的分布式寻址机制实现节点动态发现，同时参考美军UMAA架构的DDS数据总线与松耦合服务模块化设计，提升系统扩展性；应用层则衔接IEC 61162-460数字接口扩展协议与STANAG 4586北约无人机控制系统接口标准，支持任务指令与状态数据的标准化传输。通过部署协议转换器，可实现上述多层协议与国际标准的无缝转换，解决异构网络间的协议差异问题。

关键国际标准体系

海事通信：IEC 61162-1:2024（物理层）、IEC 61162-460（接口扩展）、IEC 61097-16:2019（GMDSS 船载地球站）

无人机网络：ISO/IEC 4005-3:2023（UA AN控制通信）、ISO 80629:2022（UAAN协议）

跨域协同：STANAG 4586（北约无人机控制）、JANUS协议（水声通信）、ITU-R M. 2135（156-162.05 MHz频段）

全国团体标准信息平台

附录 A 信道编码示例

在水上无人系统跨域通信中，信道编码技术是保障数据传输可靠性的核心手段。以下结合具体应用场景，提供典型信道编码实例，辅助设备开发人员实现协议解析与工程化落地。

A.1 AIS B 组设备电文时隙分配表示例

作为水上船舶自动识别系统（AIS）的关键组成部分，B 组设备采用时分多址（TDMA）技术实现信道接入。其电文时隙分配表通过预设时间窗口划分，确保多设备在共享信道中无冲突传输。具体而言，AIS 系统将 1 分钟划分为 2250 个时隙（每个时隙约 26.67 ms），B 组设备需根据自身导航状态（如静态、动态）选择时隙发送电文，例如静态船舶每 3 分钟发送一次位置报告，动态船舶每 30 秒发送一次，通过时隙分配避免数据碰撞。该分配机制可通过表格形式直观呈现，为开发人员提供时隙选择的量化依据，是 AIS 协议解析的基础环节。

A.2 水声通信 CRC 校验位计算方法

水声信道因多径效应、多普勒频移等特性，数据传输错误率较高，CRC（循环冗余校验）编码是常用的错误检测手段。实际应用中，水声通信系统通常采用 16 位 CRC 校验码（占用 2 个字节），其计算过程基于多项式除法原理：将待传输数据帧视为二进制多项式，除以预设生成多项式（如 CRC-16-CCITT 的生成多项式为 $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ ），所得余数作为校验位附加于数据帧尾部。接收端通过相同计算验证校验位，若不一致则判定数据帧损坏并触发重传机制。

CRC 校验位计算要点

1. 数据帧长度：需包含帧头、有效载荷及校验位字段
2. 生成多项式：水声通信常用 CRC-16 标准（如 $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$ ）
3. 校验位长度：固定 2 字节（16 位），可通过 FPGA 并行模块实现微秒级计算

A.3 空时编码在水声多用户通信中的应用

针对水声信道多用户干扰问题，空时编码技术通过空间维度与时间维度的联合编码，实现同一小区内多节点信号的无干扰并行传输。例如，在水声多用户节点协同并行传输协议中，系统对每个用户的数据包进行空时码编码，利用多天线的空间分集特性，将不同用户信号映射至独立空间子信道，接收端通过最大似然译码算法分离各用户数据，显著提升信道利用率。该编码方式已通过仿真验证，在浅海水声信道（多普勒频移 $\leq 50\text{Hz}$ 、多径时延 $\leq 10\text{ms}$ ）条件下，可实现 3 个用户节点的并行传输，误码率低于 10^{-5} 。

上述实例覆盖了水上无人系统中射频通信（AIS）、水声通信等典型场景，通过时隙分配、错误检测、多用户协同等编码策略，为设备开发提供了从协议解析到性能优化的工程化参考。

附录 B 测试数据记录表

为实现水上无人系统跨域通信测试数据的标准化采集与自动化分析，本章节设计包含环境参数、设备状态、性能指标三大核心维度的测试数据记录表，整合关键测试变量与判据阈值，支持测试过程的全要素记录与结果追溯。

B.1 标准化测试数据记录表结构

表 2 标准化测试数据记录表

环境参数	设备状态	性能指标	辅助记录项
风速(m/s)	发射功率 (dBm)	关键指标：端到端发送成功率实测值：-判据值： $\geq 98\%$ 测量点：接入网关→用户终端	操作时刻：YYYY-MM-DD HH:MM:SS
波高 (m)	电池电压 (V)	关键指标：网关转发成功率实测值：-判据值： $\geq 99\%$ 测量点：接入网关→互联网关	无人艇响应情况：正常/ 异常
-	-	关键指标：网间前转成功率实测值：-判据值： $\geq 99\%$ 测量点：Forward (SMS) 响应	通讯带宽 (Mbps)：-
-	-	关键指标：端到端发送时延实测值：-判据值： $\leq 12s$ 测量点：接入→接收全程	中断位置 (经纬度)：-
-	-	关键指标：网间转发时延实测值：-判据值： $\leq 50ms$ 测量点：互联网关间	中断距离 (m)：-
-	-	关键指标：La 往返 (往返转发时延) 实测值：-单位：s 测试场景：源测试点→目的测试点	路径中断次数：-

设计说明：表格通过环境参数（风速、波高）反映测试场景的水文气象条件，设备状态（发射功率、电池电压）监测硬件运行状态，性能指标整合成功率、时延等核心通信质量参数，并关联实测值与判据阈值，辅助记录项则覆盖操作时序、异常位置等过程数据，实现“环境-设备-性能”的全链路数据关联，为自动化分析提供结构化输入。

B.2 跨域通信专项测试扩展字段

针对跨网通信场景，需补充以下专项测试参数，具体记录格式如下：

表 3 专项测试参数

跨网测试参数	描述	单位	实测值	判据值	测试链路
LaPA	源测试点至互联单位 A 互联节点 1 的双向转发时延	时间	-	-	源测试点 互联单位 A 互联节点 1
LoPA	源测试点至互联单位 A 互联节点 1 的双向转发丢失率	%	-	-	源测试点 互联单位 A 互联节点 1
LaPB	互联单位 A 互联节点 1 至互联单位 B 互联节点 1 的双向转发时延	时间	-	-	互联单位 A 互联节点 1 互联单位 B 互联节点 1
LoPB	互联单位 A 互联节点 1 至互联单位 B 互联节点 1 的双向转发丢失率	%	-	-	互联单位 A 互联节点 1 互联单位 B 互联节点 1

以上表格设计参考了拓扑记录、路径中断监测及跨网通信测试的核心参数要求，同时兼容无人艇现场测试的数据记录习惯，可通过数字化工具实现自动填充与阈值校验，提升测试数据的完整性与分析效率。