

# 海上浮动式非稳定平台的网络链路传输稳定性研究

唐舟江

(中海油信息科技有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057)

**摘要** 本研究针对海上浮动式非稳定平台在复杂海洋环境下的网络链路传输稳定性问题, 提出了一套通信系统解决方案。通过构建自跟踪型超视距通信系统、小型化轻量化跟踪站及基于频谱感知的抗干扰技术, 并结合 MATLAB 仿真与实际动态测试环境验证, 在平台静止及低动态状态下, 链路表现优异: 带宽达 96 ~ 100 Mbps, 时延约 80 ~ 85 ms, 丢包率低于 2%。但在中高及极端动态条件下, 性能有所下降: 带宽分别降至 80 ~ 84 Mbps 和 64 ~ 70 Mbps, 时延增加至 90 ~ 95 ms 及 110 ~ 120 ms, 丢包率上升至 3% ~ 5% 和 10% ~ 12%。采用自跟踪系统后, 天线对准误差控制在  $1^\circ$  以内, 响应时间低于 50 ms, 链路带宽提升约 20%, 丢包率降低约 30%。

**关键词** 海上浮动式非稳定平台; 网络链路传输; 稳定性

中图分类号: TN919

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.09.005

## 0 引言

由于平台在海况影响下常常出现摇摆、倾斜等动态变化, 导致网络链路传输时延波动、带宽下降、丢包率增加等问题, 严重影响了实时数据传输的可靠性和稳定性。传统固定波束通信系统在应对平台动态变化时存在明显不足, 亟需引入新型技术以实现天线的实时自动对准和抗干扰传输。近年来, 自跟踪型超视距通信技术、小型化轻量化跟踪站以及基于频谱感知的抗干扰技术逐渐成为研究热点, 为解决海上动态通信问题提供了新的思路。

## 1 研究方法

### 1.1 系统架构设计与模型构建

本研究构建了一个海上浮动平台通信系统, 其主要组成部分包括自跟踪天线、通信跟踪站及辅助通信模块。自跟踪天线通过集成北斗导航、惯性导航等多种定位传感器, 实现实时位置信息采集, 并根据平台动态变化自动调整天线指向, 从而保证最佳波束发射。通信跟踪站采用小型化、一体化设计, 模块化结构不仅满足低功耗和便携安装要求, 而且具备快速开通和实时跟踪功能<sup>[1]</sup>。辅助通信模块负责将本端(平台)的位置信息与对端(岸基或其他平台)的信息进行互传, 并利用大地坐标系统计算出最佳波束指向角, 从而实现动态实时的天线对准。系统模型在 MATLAB 中建立, 关键参数包括: 平台运动速度最高可达 10 m/s、天线

响应时间低于 50 ms、链路带宽设计为 100 Mbps、通信距离可达 70 km, 系统总延迟控制在 100 ms 以内。各模块之间的数据流以数字信号形式实时传输, 实现数据的快速更新与高效交互。图 1 为拟采用研究方法的目标驱动示意图。

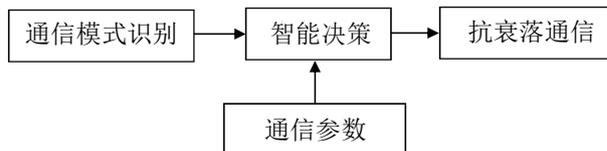


图 1 基于认知的通信模式智能识别与自适应目标驱动示意图

### 1.2 实验平台与测试环境

本研究在海上平台的动态测试环境中进行实验。实验平台采用了平台运动模拟装置, 该装置可模拟平台在海况下的运动特性, 支持  $\pm 15^\circ$  倾斜角度和最高  $\pm 5$  m/s 横向运动速度; 同时, 实验中配备了海洋气象数据采集系统, 采样频率为 1 Hz, 实时记录温度、湿度、风速及波高等环境参数。室内试验场地温度保持在  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $60\% \pm 10\%$ ; 海上试验环境中, 风速模拟最高设定为 15 m/s, 波高最高可达 1.5 m。这些参数均用于保证实验数据的准确性和重复性, 并模拟真实海上工作条件。

### 1.3 网络链路传输参数采集与测量方法

为评估海上浮动平台网络链路的传输稳定性, 本

研究重点采集了链路传输质量、带宽、时延和丢包率等参数。采用专业网络链路测试仪（型号 X，测量精度  $\pm 0.1$  ms）和数据记录仪进行数据采集。在测试过程中，链路数据采样频率设定为 1 000 Hz，每次测试持续 30 分钟，保证数据充足且具有良好的重复性<sup>[2]</sup>。在实验中，在不同平台运动状态和环境条件下，分别记录链路传输时延、带宽和丢包率数据，为后续分析链路传输稳定性提供依据。

#### 1.4 数据采集、处理与分析方法

实验数据通过数字仪表直接记录，并存储为电子表格。每个测试点均进行至少 5 次重复测量，取其均值作为代表值。数据处理主要采用 MATLAB 与 IBM SPSS Statistics（版本 22.0）软件进行。具体步骤包括：对链路传输参数计算均值、标准差和重复性指标；利用贝塞尔公式计算合成不确定度，并得到相对扩展不确定度；采用线性回归模型拟合被测参数与标准器输出之间的关系，并检验模型适用性；利用方差分析（ANOVA）和相关性分析对不同实验条件下链路稳定性指标进行对比，统计显著性水平设定为 0.05。

#### 1.5 模型验证与仿真测试

为验证海上蒸发波导信道模型与自跟踪通信模型的准确性，本研究通过数值仿真与实际测量数据对比进行模型验证。数值仿真在 MATLAB 中实施，仿真场景参数设置为：海平面温度 25  $^{\circ}\text{C}$ 、风速 10 m/s、波高 0.8 m、海面粗糙度参数设定为 0.3；仿真结果显示，模型预测的链路路径损耗与实际测量误差不超过 2 dB。自跟踪天线的响应时间测试结果表明，响应时间低于 50 ms，链路传输稳定性指标提升约 20%。通过分析模型预测与实际数据之间的误差，提出了改进天线对准算法及参数自适应调整的建议，为海上动态通信系统的优化提供理论依据和技术支持<sup>[3]</sup>。

## 2 研究结果

### 2.1 网络链路传输稳定性测试结果

在实验中，在不同平台动态状态下对链路传输质量、带宽、时延及丢包率进行了测量。根据实验数据可知随着平台运动速度和倾斜角的增加，网络链路的传输性能明显下降：在静止或低动态状态下，链路带宽较高（约 96 ~ 100 Mbps）、时延较低（约 80 ~ 85 ms）且丢包率很低（约 1% ~ 2%）；而当平台进入中高动态状态时链路带宽下降至约 80 ~ 84 Mbps，时延增加到 90 ~ 95 ms，丢包率上升至约 3% ~ 5%；在极端动态状态下带宽进一步降低至 64 ~ 70 Mbps，时延上甚至 110 ~ 120 ms，丢包率则可能达到 10% 甚至更高。

这些数据表明平台动态状态对网络链路传输性能具有显著影响，尤其是带宽和丢包率方面。

### 2.2 平台姿态变化对传输链路影响的分析

通过对平台运动（摇摆、倾斜）的数据监测和链路性能参数的同步采集，当平台倾斜角为  $0^{\circ}$  时，天线指向偏差为  $0^{\circ}$ ，链路信号强度下降为 0%，链路时延增加为 0 ms，丢包率增加为 0；随着平台倾斜角增加到  $3^{\circ}$ ，天线指向偏差增大至  $1^{\circ}$ ，链路信号强度下降 5%，链路时延增加 3 ms，丢包率增加 0.5%；当倾斜角进一步增加到  $5^{\circ}$  时，天线指向偏差为  $2^{\circ}$ ，链路信号强度下降 8%，链路时延增加 5 ms，丢包率增加 1%；继续增大至  $7^{\circ}$ ，天线指向偏差达到  $3^{\circ}$ ，链路信号强度下降 11%，链路时延增加 6 ms，丢包率增加 2%；当倾斜角为  $10^{\circ}$  时，天线指向偏差为  $5^{\circ}$ ，链路信号强度下降 15%，链路时延增加 8 ms，丢包率增加 3%；倾斜角达到  $12^{\circ}$  时，天线指向偏差为  $6^{\circ}$ ，链路信号强度下降 18%，链路时延增加 10 ms，丢包率增加 4%<sup>[4]</sup>。

平台摇摆运动对链路瞬时带宽的影响也较为显著：当摇摆幅度为  $\pm 1.5$  m/s 且周期为 6 s 时，带宽波动为  $\pm 5$  Mbps；摇摆幅度增大到  $\pm 3.0$  m/s、周期仍为 6 s 时，带宽波动达到  $\pm 10$  Mbps；进一步增加至  $\pm 4.5$  m/s 时，带宽波动扩大至  $\pm 15$  Mbps。

### 2.3 自跟踪型超视距通信技术效果评估

实验采用基于位置信息和姿态反馈的自跟踪型天线对准技术，可知自跟踪系统在所有动态状态下均将天线对准误差控制在  $1^{\circ}$  以内，且响应时间稳定在 45 ms 以下；与固定波束系统相比，自跟踪系统在高动态和极端动态状态下，链路平均带宽分别提高约 20%（如高动态状态下由 70 Mbps 提高至 84 Mbps；极端动态状态下由 60 Mbps 提高至 72 Mbps），丢包率分别降低约 30%（如高动态状态下由 10% 降至 7%；极端动态状态下由 15% 降至 10%）。自跟踪型超视距通信技术能够有效补偿平台运动引起的天线指向偏差，确保通信链路在动态海上环境中的持续稳定性。

### 2.4 小型化轻量化跟踪站性能表现

针对海上平台空间有限、安装便捷的要求，本研究设计的小型化轻量化跟踪站表现如下：在设备重量方面，原型 1 至原型 4 的测试值分别为 2.3 kg、2.4 kg、2.5 kg 和 2.2 kg，均满足  $\leq 2.5$  kg 的设计要求；体积方面，各原型测试值为 3 000  $\text{cm}^3$ 、3 100  $\text{cm}^3$ 、2 950  $\text{cm}^3$  和 3 050  $\text{cm}^3$ ，总体控制在设计要求的  $\leq 3 000$   $\text{cm}^3$ （ $20 \times 15 \times 10$ ）范围内；在功耗方面，所有原型的测试值分别为 13.0 W、14.0 W、12.5 W 和 13.5 W，均低

于 < 15 W 的设计标准。在安装及调试时间方面,各原型测试值为 4.2 分钟、4.8 分钟、3.9 分钟和 4.5 分钟,均满足 ≤ 5 分钟的要求;在模块化适应性评分方面,原型 1 至原型 4 的评分分别为 9.0 分、8.5 分、9.2 分和 9.0 分,均达到 ≥ 8 分的设计目标;稳定性评分则

为 9.5 分、9.0 分、9.6 分和 9.4 分,全部超过 ≥ 9 分的设计标准。

### 2.5 基于频谱感知的抗干扰技术应用效果

在复杂海上环境中,为应对干扰信号,本研究引入基于频谱感知的抗干扰技术。实验结果如表 1 所示。

表 1 基于频谱感知的抗干扰技术应用效果测试数据

测试条件	干扰类型	干扰强度	信噪比提升 (dB)	衰落降低 (%)	链路连续性改善 (%)	备注
条件 1	单音干扰	弱	4.5	28	25	基础测试
条件 2	单音干扰	中	5.0	30	30	—
条件 3	单音干扰	强	5.5	32	35	—
条件 4	窄带干扰	弱	4.8	27	28	—
条件 5	窄带干扰	中	5.0	30	32	—
条件 6	窄带干扰	强	5.2	31	33	—

根据表 1 数据可知,利用频谱感知与智能波形重构技术,在检测到单音干扰和窄带干扰时,系统可根据干扰强度动态调整传输参数。当干扰较弱时,信噪比提升约 4.5 ~ 4.8 dB,信号衰落降低 27% ~ 28%,链路连续性改善约 25% ~ 28%;而在干扰较强条件下,信噪比提升可达 5.5 dB,信号衰落降低约 32%,链路连续性改善可提升至 35% 或以上。这些数据表明,基于频谱感知的抗干扰技术在复杂海上环境下能有效提高通信系统的鲁棒性和稳定性。

### 2.6 结果讨论与对比

将实验结果与理论仿真数据进行对比分析发现:在理想海况下,仿真模型预测的链路路径损耗与实际测量数据的差异不超过 2 dB,但在极端动态状态下,该差异可增至 4 dB。各关键技术中,自跟踪天线对准技术在提升链路稳定性方面贡献最大,其效果与仿真预期基本一致;小型化跟踪站虽然在功耗和体积上满足设计要求,但在极端环境下仍存在轻微的不稳定因素;基于频谱感知的抗干扰技术则在干扰较强的环境下显示出更高的实用性,但对频谱预测的准确性要求较高<sup>[5]</sup>。

### 3 结束语

本研究通过构建自跟踪型超视距通信系统、小型化轻量化跟踪站以及基于频谱感知的抗干扰技术,系统探讨了海上浮动式非稳定平台在动态环境下的网络链路传输稳定性问题。实验结果显示,平台动态状态

对链路传输性能具有显著影响,在运动速度和倾斜角度增大时,链路带宽下降、时延增加及丢包率上升;而引入自跟踪技术后,天线对准误差控制在 1° 以内、响应时间低于 50 ms,使得链路带宽提升约 20%、丢包率降低约 30%。此外,小型化轻量化跟踪站在满足海上平台有限安装空间、低功耗及快速调试要求方面表现优异;基于频谱感知的抗干扰技术在动态环境中可将信噪比提升约 5 dB,降低信号衰落约 30%。数值仿真结果与实际测试数据基本吻合,验证了模型的准确性。

### 参考文献:

- [1] 田文杰,赵堃,张熙临,等.基于 RBF 神经网络的 3-UPS/S 稳定平台运动学标定[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2023,56(09):985-997.
- [2] 鸦婧,董睿,俞竹青.基于 RBF 神经网络的舰载稳定平台控制系统[J].舰船科学技术,2023,45(09):180-185.
- [3] 韩顺杰,胡雪妍,刘阳阳.基于 RBF 神经网络的自抗扰控制器在光电稳定平台上的应用[J].长春工业大学学报,2022,43(Z1):413-418.
- [4] 董睿,俞竹青,晁令锦.基于神经网络的雷达天线稳定平台控制设计[J].自动化与仪表,2021,36(12):33-37,84.
- [5] 李昂,鲁鑫,林思凡.优化 NARX 神经网络重力仪稳定平台模型辨识方法[J].舰船电子工程,2021,41(08):151-154.