

# 基于速变视线导航法的无人船航行轨迹 自适应跟踪控制方法

陈 慧, 黄 熙

(广西工业职业技术学院, 南宁 530001)

**摘要:** 由于无人船在航行过程中会受到来自风浪的干扰, 对无人船的航行状态产生影响, 导致难以根据无人船的实时状态和环境变化, 自动调整控制指令, 实现自适应控制; 因此, 为了保证无人船能够按照既定规划路线航行, 提高无人船的航行安全, 利用速变视线导航法优化设计无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法; 根据无人船的航行目标, 规划无人船航行轨迹, 将其作为无人船的控制目标轨迹; 利用无人船中内置的传感器, 获取无人船初始位姿数据, 通过航行位置的预测与调整, 得出无人船实时航行轨迹位置的自适应跟踪结果; 基于无人船的控制目标轨迹, 考虑环境干扰, 在速变视线导航法支持下, 根据无人船的速度和环境条件动态调整视线角度, 生成并调整无人船航行轨迹控制指令, 通过控制指令的执行, 实现无人船航行轨迹的自适应控制; 通过性能测试实验得出结论: 与两种对比方法相比, 优化设计方法的跟踪误差明显降低, 无人船航行轨迹控制方法的误差减小 4.7 km, 且在抗干扰性能方面具有明显优势。

**关键词:** 速变视线导航法; 无人船; 航行轨迹; 轨迹跟踪; 自适应跟踪控制

## A Adaptive Tracking Control Method for Unmanned Ship Navigation Trajectory Based on SV-LOS Navigation Algorithm

CHEN Hui, HUANG Xi

(Guangxi Vocational & Technical Institute of Industry, Nanning 530001, China)

**Abstract:** Unmanned ships are interfered by wind and waves during navigation, which affects their navigation status, making it difficult to automatically adjust control instructions and achieve adaptive control based on the real-time status and environmental changes of unmanned ships. Therefore, in order to ensure that unmanned ships can navigate according to the determined planned route and improve the navigation safety of unmanned ships, an adaptive tracking control method for unmanned ship navigation trajectory is optimized and designed using the speed variable line of sight (SV-LOS) navigation algorithm. Based on the navigation objectives of the unmanned ship, the navigation trajectory of the unmanned ship, as the control target trajectory, is planned. The built-in sensors in the unmanned ship are used to obtain its initial pose data. The navigation position of the unmanned ship is predicted and adjusted to achieve the adaptive tracking result of the real-time navigation trajectory position. Based on the control target trajectory of the unmanned ship and environmental interference, with the support of the SV-LOS navigation algorithm, the line of sight angle is dynamically adjusted according to the speed and environmental changes of the unmanned ship. Subsequently, control instructions for the navigation trajectory of the unmanned ship are generated and adjusted. Through the execution of these instructions, the navigation trajectory adaptive control of the unmanned ship is achieved. The conclusion obtained by performance testing experiments is that compared with the two comparison methods, the optimized method significantly reduces the tracking error, the error of the unmanned ship navigation trajectory control method is reduced by 4.7 km, and it has obvious advantages in anti-interference performance.

**Keywords:** SV-LOS navigation algorithm; unmanned ship; navigation trajectory; trajectory tracking; adaptive tracking control

收稿日期:2024-09-14; 修回日期:2024-12-17。

作者简介:陈 慧(1991-),女,硕士,讲师。

引用格式:陈 慧,黄 熙. 基于速变视线导航法的无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(11): 174-182.

## 0 引言

无人船是一种无需人员直接操控, 借助精确卫星定位和自身传感系统, 能够按照预设任务在水面自主航行的智能设备<sup>[1]</sup>。为确保无人船能够按照预定的轨迹精确、稳定地航行, 从而顺利完成各种任务, 提出无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法。

无人船航行轨迹跟踪控制是指无人船在航行过程中, 通过集成多种传感器和先进的控制算法, 实时感知周围环境信息, 并根据这些信息自动调整航行轨迹, 以实现预设航行目标的精确跟踪。其核心在于控制算法的自适应性和鲁棒性, 能够应对复杂多变的海洋环境和任务需求。现阶段发展较为成熟的轨迹跟踪控制方法中, 文献 [1] 提出的基于扰动观测器输入和状态量化的轨迹跟踪控制方法应用扰动观测器, 获得外部扰动和量子化状态的估计, 利用李雅普诺夫稳定性理论, 证明了具有输入和状态量化的无人水面车辆轨迹跟踪控制系统的稳定性, 以及闭环控制系统中量化和非量化变量之间误差的有界性, 达到轨迹跟踪与控制的目的。上述方法中扰动观测器的准确性直接影响轨迹跟踪和控制效果, 由于环境的干扰, 观测器无法准确估计和补偿扰动, 会导致航行轨迹偏离预设目标。文献 [2] 提出的基于滑模预测控制的无人船轨迹跟踪控制方法构建一个模型预测控制器, 依据预定的轨迹生成符合各类约束条件的期望速度指令, 设计一个积分滑模控制器, 在外部环境存在干扰的情况下, 能确保系统紧密追踪并控制这些期望信号, 实现稳定的轨迹跟踪性能。上述方法尽管滑模控制对系统参数变化和外界扰动具有一定的鲁棒性, 但在实际应用中仍可能受到未知干扰和模型不确定性的影响, 从而影响跟踪控制效果。文献 [3] 提出的参考航速时变的无人船轨迹跟踪控制方法。构建 Serret-Frenet 坐标框架, 运用投影技术确定目标点, 引入了随时间变化的期望参考速度函数, 在控制的时间范围内生成了一组动态变化的参考序列, 考虑到无人水面航行器的动力系统限制, 针对时变参考量的轨迹跟踪模型设计预测控制器, 以确保控制任务的顺利执行。然而上述方法未能充分考虑环境干扰, 无法保证该方法在实际跟踪控制中的执行效果。文献 [4] 提出的基于模型预测的轨迹跟踪控制方法利用滑模跟踪控制律, 在该控制框架上构造收缩约束, 确保闭环系统的稳定性, 达到预期的跟踪控制效果。上述方法忽视了环境的干扰, 导致跟踪效果不佳, 无法保证控制效果。文献 [5] 提出的基于反馈线性化的轨迹跟踪控制方法通过反馈线性化技术, 将航行器原有的高度非线性和强耦合模型转化为更易于处理的线性模型, 构建一个比例积分观测器, 在复杂多变的海洋环境中准确捕捉并量化那些对反馈线性化

模型产生未知干扰的因素, 基于这一比例积分观测器的坚实基础, 设计滑模控制器, 以确保航行器能够高效、稳定地执行其轨迹跟踪与控制任务。将该方法用于船航行轨迹跟踪控制中, 尽管比例积分观测器可以捕捉和量化部分未知干扰, 但对于突发的、非线性的外部干扰(如突如其来的风浪), 处理能力有限, 导致滑模控制器的抖振现象加剧, 影响系统的稳定性和控制精度, 使船舶的轨迹会偏离预期, 且无法迅速调整, 无法保证轨迹的跟踪控制效果。综上所述, 为解决跟踪控制效果不佳的问题, 提出基于速变视线导航法的无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法。

速变视线导航法是一种基于视线原理的导航方法, 其核心在于通过实时调整无人系统的航行方向, 使其视线始终指向或趋近于预定的目标路径或目标点。与传统的固定视线角导航方法不同, 速变 LOS 导航法能够根据无人系统的速度、环境变化以及任务需求, 动态调整视线角, 从而实现更加精确和灵活的轨迹跟踪。利用速变视线导航法对无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法进行优化设计, 以期能够提升对无人船航行轨迹的跟踪与控制性能。

## 1 无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法设计

在实际应用中, 无人船通过内置传感器获取初始位姿数据, 并利用速变视线导航法 (SV-LOS) 动态调整视线角度, 从而生成航行轨迹控制指令。这些指令由无人船的推进系统和转向机构执行, 实现对期望轨迹的精确跟踪。无人船通过不断的指令调整和优化, 能够自适应地应对环境变化, 确保航行状态的稳定。

为了确保无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法的顺利运行, 需要满足一系列条件。首先, 无人船必须具备基本的航行能力, 包括可靠的推进系统、精确的导航系统和高度敏感的传感器。其次, 无人船的系统模型需满足特定假设, 即其惯性矩阵的非零非对角项能够通过坐标变换转化为斜对角形式。此外, 为了保持航行的精确性和稳定性, 无人船需要实时获取自身位置信息和期望航行路径信息, 并在相对平稳的水域中航行, 以减少外界干扰。最后, 速变 LOS 导航法中的各项参数需根据无人船的实际航行状况、系统特性和控制需求进行合理设置和调整, 以确保控制效果的准确性和可靠性。

优化设计的无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法基本运行原理为: 根据无人船的航行原理, 确定具体的控制对象。利用速变视线导航法检测环境中的无人船对象, 并通过视线角动态调整、制导、反馈等步骤, 求解无人船的实时航行参数, 以此作为初始控制值, 将其与规划的无人船航行轨迹控制目标进行比对, 生成跟踪控制指令, 最终通过跟踪控制指令的执行, 实现无人船航

行轨迹的自适应跟踪控制任务。具体流程图如图 1 所示。

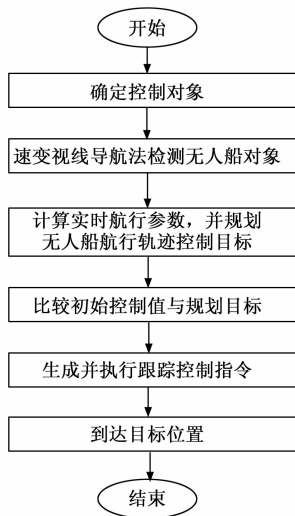


图 1 无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法流程图

### 1.1 规划无人船航行轨迹控制目标

无人船的航行与跟踪需要依托相应的坐标系, 因此在无人船航行轨迹规划之前, 首先需要在无人船的航行环境中构建环境坐标系和船体坐标系, 坐标系之间的关系如图 2 所示。

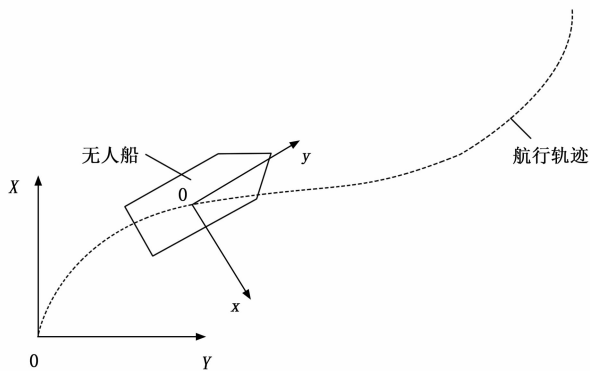


图 2 无人船航行环境与船体坐标系关系图

图 2 中  $XOY$  为水面环境坐标系,  $x_0y_0$  为船体坐标系。在构建的坐标系环境中, 根据水面环境以及无人船的航行目标, 规划无人船的目标航行轨迹, 以此作为无人船的控制目标。为了实现这一目标, 采用三次  $B$  样条基函数来生成无人船的航行轨迹。它使用三次多项式来描述曲线上的每一段。通过调整这些多项式的系数, 可以生成一条平滑且符合要求的航行轨迹。这种方法不仅保证了航行轨迹的连续性, 还使得无人船在航行过程中能够更加平稳地跟踪目标轨迹。初始生成的无人船航行轨迹的生成结果为:

$$l = \frac{(y_e - y_0)(x - x_0)}{x_e - x_0} + y_0 \quad (1)$$

式中,  $(x_e, y_e)$  为无人船航行轨迹的目标位置,  $P_0 = (x_0, y_0)$  为无人船的初始位置,  $P_0$  表示初始时刻无人船位置数据。根据无人船的航行需求, 若存在多个航行目标节点, 则需要度量无人船航行目标节点与无人船初始节点之间的距离, 度量过程如下:

$$d_i = \sqrt{[x_0 - x_e(i)]^2 + [y_0 - y_e(i)]^2} \quad (2)$$

式中,  $[x_e(i), y_e(i)]$  为无人船航行轨迹中的第  $i$  个目标节点。选择  $d_i$  取值最小的节点作为目标节点, 利用公式 (1) 生成第一段航行轨迹, 在此基础上, 以第一段航行轨迹的终止节点为初始节点, 选择距离当前位置最近的目标点为终止节点, 利用公式 (1) 重新生成第二段航行轨迹, 重复上述操作, 可以得出多个航行轨迹生成结果, 通过首尾相连得出无人船航行轨迹的初始规划结果<sup>[3]</sup>。为减少轨迹的波动, 提高无人船的航行安全, 对初始规划的航行轨迹进行平滑处理, 处理过程如下:

$$l_{\text{smooth}} = \sum_{i=0}^{n_l} B_i^3 p_i, p_i \in l \quad (3)$$

式中,  $p_i$  为规划航行轨迹  $l$  中的第  $i$  个节点,  $n_l$  和  $B_i^3$  为初始规划航行轨迹中包含的节点数量以及三次  $B$  样条基函数。按照上述方式, 即可得出水面环境坐标系中, 无人船航行轨迹的规划结果。

### 1.2 获取无人船初始位姿数据

无人船在航行过程中, 具备强大的环境感知能力, 利用雷达、声呐、摄像头等多种传感器实时扫描周围水域, 识别潜在障碍物与航道变化。通过北斗与惯性导航系统确定自身位置与航向, 确保每一步都精准无误。面对复杂多变的环境, 如轻柔的微风、细微的波浪以及偶尔掠过的小水流, 无人船会根据预设的任务目标更新航行位置与速度, 依此生成无人船航行轨迹控制指令, 来调整螺旋桨的推力与舵角, 以最小的能耗, 使无人船按预期目标行驶轨迹实现稳定航行<sup>[6-8]</sup>。

由此, 综上所述, 通过无人船内置的北斗传感器、陀螺仪、激光雷达传感器等元件, 从位置和姿态两个方面获取无人船的初始位姿数据, 为后续无人船实时航行轨迹位置跟踪提供可靠的数据支撑。初始时刻无人船位置数据  $P_0$  的采集结果为:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\text{regular}} + v_{\text{signal}} t_{\text{signal}} \cos \vartheta \\ y_{\text{regular}} + v_{\text{signal}} t_{\text{signal}} \sin \vartheta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $(x_{\text{regular}}, y_{\text{regular}})$  为无人船航行在水面环境中固定节点的位置坐标,  $v_{\text{signal}}$  和  $t_{\text{signal}}$  为传感信号的传输速度和传输时间,  $v_{\text{signal}} t_{\text{signal}}$  为无人船与固定节点之间的距离,  $\vartheta$  为无人船与固定节点之间的偏角<sup>[9]</sup>。根据无人船的工作原理, 构建对应的旋转矩阵, 记为  $R_0$ , 那么初始时刻无人船的姿态角数据收集结果为:

$$\begin{cases} \theta_0 = \arctan\left(\frac{r_{32}}{r_{33}}\right) \\ \varphi_0 = -\arcsin(r_{31}), r_{11}, r_{21}, r_{31}, r_{32}, r_{33} \in R_0 \\ \psi_0 = \arctan\left(\frac{r_{21}}{r_{11}}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $r_{11}$ 、 $r_{21}$ 、 $r_{31}$ 、 $r_{32}$  和  $r_{33}$  分别为无人船旋转矩阵中的组成元素, 即无人船旋转的旋转角度, 求解结果  $\theta_0$ 、 $\varphi_0$  和  $\psi_0$  分别为俯仰角、横滚角和偏航角的初始值<sup>[10]</sup>, 具体如图 3 所示。在初始时刻, 通过内置传感器的运行, 得出无人船初始位姿数据的获取结果。

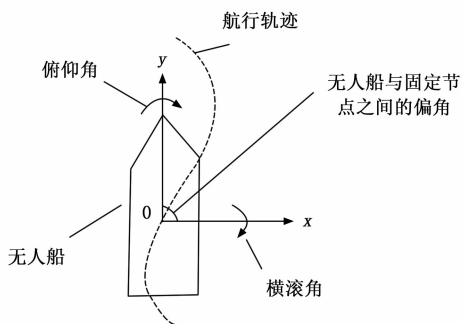


图 3 无人船与固定节点之间角度示意图

### 1.3 跟踪无人船实时航行轨迹位置

根据无人船初始位姿数据的获取结果, 对任意时刻无人船的航行位置进行预测, 预测结果为:

$$\begin{cases} x_{\text{prediction}}(t) = x_0 + v_0(t_m - t_0) \times \cos\theta_0 \\ y_{\text{prediction}}(t) = y_0 + v_0(t_m - t_0) \times \sin\varphi_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $v_0$  为无人船的初始航行速度,  $t_m - t_0$  为预测时间与初始时间的间隔值<sup>[11]</sup>。由于无人船在任意时刻均可能出现转向、加速以及减速行为, 会导致公式 (6) 中变量  $v_0$ 、 $\theta_0$  和  $\varphi_0$  的值发生变化, 此时需要对无人船的航行参数进行更新, 从而对公式 (6) 中变量  $v_0$ 、 $\theta_0$  和  $\varphi_0$  的取值进行调整, 在航行位置预测结果的基础上, 进行位置坐标修正, 进而得出对应时刻无人船航行位置的跟踪结果, 即:

$$\begin{cases} x_{\text{track}}(t) = x_{\text{prediction}}(t) + \Delta v \times \cos\Delta\theta \\ y_{\text{track}}(t) = y_{\text{prediction}}(t) + \Delta v \times \sin\Delta\varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\Delta v$ 、 $\Delta\theta$  和  $\Delta\varphi$  为无人船航行速度以及航行姿态角的变化量<sup>[12]</sup>。根据实时航行参数的更新调整, 得出航行状态下无人船实时航行轨迹位置的跟踪结果。

### 1.4 利用速变视线导航法生成无人船航行轨迹控制指令

在已知无人船初始位置的情况下, 综合考虑 1.1 节规划的无人船目标航行轨迹方向, 在速变视线导航法支持下, 确定无人船实时位置, 实现无人船航行轨迹的跟踪控制<sup>[13]</sup>。速变视线导航法的工作原理如图 4 所示。

速变视线导航利用载体的实时位置、速度、航向等

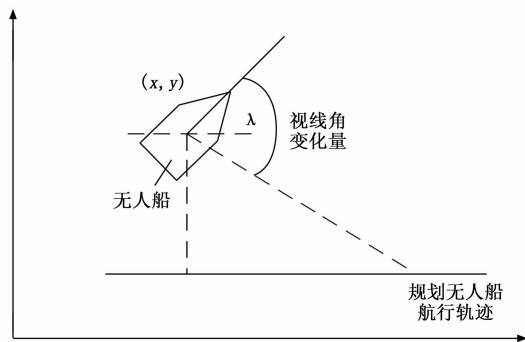


图 4 速变视线导航法工作原理图

状态信息, 结合期望路径的几何特性和动态变化, 通过计算并调整视线角, 使载体能够持续、稳定地沿着期望路径行驶。

#### 1.4.1 自适应动态调整视线角

视线角是从观测点出发, 指向无人船目标点的直线与当前方向之间的夹角, 无人船航行环境中, 在已知观测点位置的情况下, 根据无人船初始位姿数据的收集结果, 得出初始视线角的计算结果为:

$$\lambda_0 = \arctan\left(\frac{y_{\text{observe}} - y_0}{\sqrt{(x_{\text{observe}} - x_0)^2}}\right) \quad (8)$$

式中,  $(x_{\text{observe}}, y_{\text{observe}})$  为观测点位置坐标, 即目标轨迹  $l_{\text{smooth}}$  中的某一节点位置坐标。一般情况下, 无人船航行环境中观测点位置处于固定状态<sup>[14]</sup>。通过实时调整视线角, 确保无人船的航向能够始终指向目标路径上的最佳点, 从而减小偏离目标路径的误差。视线角的自适应动态调整过程可以量化表示为:

$$\begin{cases} \lambda_t = \lambda_0 + \Delta\lambda \\ \Delta\lambda = f(e, e', \kappa_{\text{gain}}) \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\Delta\lambda$  为视线角变化量,  $f()$  为视线角更新函数,  $e$  和  $e'$  分别为无人船航行偏差及其变化量,  $\kappa_{\text{gain}}$  为用于调节视线角调整的增益系数<sup>[15]</sup>。参考无人船目标轨迹位置与规划航行方向的偏差, 确定  $e$  和  $e'$  的具体取值, 从而实现视线角的自适应调整。

#### 1.4.2 生成速变视线制导律

速变视线导航法中从当前载体位置到期望路径上某个虚拟点的距离, 该虚拟点用于引导载体沿期望路径移动, 则基于上述视线角的自适应动态调整结果, 视线法的前视距离为:

$$L_{\text{foresight}} = \frac{e_x}{\tan(\lambda_{\text{desire}} - \lambda_t)} \quad (10)$$

式中,  $e_x$  为无人船与目标路径间的横向距离偏差,  $\lambda_{\text{desire}}$  为期望航向角<sup>[16]</sup>。在速变视线导航法生成速变视线制导律过程中, 设计无人船纵向速度制导律为:

$$Z_v = \kappa_{\text{control}} \sqrt{L_{\text{foresight}}^2 + e_y^2} \quad (11)$$

式中,  $e_y$  为无人船与目标路径间的纵向距离偏差,  $\kappa_{\text{control}}$

为正控制参数。公式 (10) 和公式 (11) 中, 横向和纵向距离偏差的计算公式如下:

$$\begin{cases} e_x = x_l - x_{\text{track}}(t) \\ e_y = y_l - y_{\text{track}}(t) \end{cases}, (x_l, y_l) \in l_{\text{smooth}} \quad (12)$$

在此基础上, 得出虚拟控制律为:

$$Z_{\text{virtually}} = \kappa_{\text{control}} e_x + Z_0 \cos(\psi - \gamma_p + \sin\beta) \quad (13)$$

式中,  $\gamma_p$  和  $\beta$  分别为期望路径切线角和漂角<sup>[17]</sup>。利用公式 (14) 对无人船纵向速度制导律与位置虚拟控制律的融合, 融合结果为:

$$K = Z_{\text{virtually}} + Z_0 \quad (14)$$

由此即可得出无人船航行轨迹控制指令的生成结果。

### 1.5 考虑环境干扰调整无人船航行轨迹控制指令

无人船在航行过程中, 会受到来自风浪的显著干扰, 干扰会对无人船的航行状态以及航行轨迹的控制效果产生影响, 因此需要根据当前环境干扰作用原理, 调整初始生成的无人船航行轨迹控制指令<sup>[18]</sup>。以海风干扰因素为例, 对无人船的干扰作用力可以表示为:

$$F_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A_f v_{\text{relative}}^2 \kappa_{\text{wind}} \quad (15)$$

式中,  $\rho_{\text{air}}$  为空气速度,  $A_f$ 、 $v_{\text{relative}}$  和  $\kappa_{\text{wind}}$  分别为船体上部分的正投影面积、相对风速以及风的纵荡力系数。由此可以得出海风作用下产生的无人船航行轨迹偏差为:

$$\begin{cases} e_{\text{wind}}(x) = F_{\text{wind}} \cdot x_{\text{track}} \cdot \cos\chi_{\text{wind}} \\ e_{\text{wind}}(y) = F_{\text{wind}} \cdot y_{\text{track}} \cdot \sin\chi_{\text{wind}} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\chi_{\text{wind}}$  为风向角。将公式 (16) 的计算结果添加到  $e_x$  和  $e_y$  的计算工作中, 实现  $e_x$  和  $e_y$  取值的更新, 进而实现无人船航行轨迹控制指令的更新<sup>[19-20]</sup>。同理, 按照上述方式, 也可分析海浪对无人船的干扰影响, 确定海浪作用下航行轨迹的偏差值, 进而实现对控制指令的调整。

### 1.6 实现无人船航行轨迹自适应控制

考虑无人船的组成结构以及工作原理, 为保证无人船能够执行控制指令, 且航行安全, 从速度、舵角等方面设置约束条件, 具体设置结果为:

$$\begin{cases} \min(v_0 + a_{\text{max}} \Delta t) \leq v_K \leq \max(v_0 + a_{\text{max}} \Delta t) \\ \theta_0 - \omega_{\text{max}} \Delta t \leq \theta \leq \theta_0 + \omega_{\text{max}} \Delta t \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $a_{\text{max}}$  为无人船的最大加速度值,  $\omega_{\text{max}}$  为无人船转速的最大值。在设定条件约束下, 执行生成并调整完成的无人船航行轨迹控制指令, 达到无人船控制的目的。

无人船的航行轨迹自适应控制以 PID 控制作为运行机理, 在实际的控制过程中, PID 控制器接收无人船当前航行状态与预设航行轨迹之间的偏差作为输入, 通过计算并输出相应的控制信号, 调整无人船的推进力和舵角, 以减小偏差并促使无人船沿着预设轨迹航行。无人船航行轨迹的自适应控制任务执行过程包含 3 个环

节, 分别为比例环节、积分环节和微分环节, 在比例环节, PID 控制器会根据偏差的大小成比例地调整控制量, 偏差越大, 控制量也越大, 这有助于快速响应偏差变化。积分环节控制会累积过去的偏差, 并根据累积的偏差量来调整控制量。这样, 即使偏差很小, 只要它持续存在, 积分控制也会逐渐增大控制量, 直到偏差完全消除。微分环节用来预测未来偏差的变化趋势, 根据偏差的变化率来调整控制量, 如果偏差正在快速变化, 微分控制会提前产生一个相反的控制量来抑制偏差的进一步变化。基于上述原理, 无人船航行轨迹控制输出如下:

$$u(t) = \gamma_p \cdot E(t) + \gamma_i \cdot \int_0^t E(K_{\text{adjust}}) + \gamma_d \cdot \frac{d}{dt} E(t) \quad (18)$$

式中,  $\gamma_p$ 、 $\gamma_i$  和  $\gamma_d$  分别为比例、积分和微分增益系数,  $E(t)$  为  $t$  时刻无人船航行轨迹的总偏差量,  $K_{\text{adjust}}$  为 1.5 节考虑环境干扰调整后的无人船航行轨迹控制指令。根据无人船航行轨迹的跟踪结果, 将生成的航行控制指令作用到无人船的平衡或推进系统中, 调整无人船的推进力和舵角, 以使得无人船按预期航行轨迹  $l_{\text{smooth}}$  行驶。反复执行跟踪与控制步骤, 若发现跟踪结果与规划航行轨迹一致, 无需执行控制任务, 否则启动并执行自适应控制指令。当跟踪到无人船航行到规划轨迹终点时, 退出航行轨迹自适应控制程序。

## 2 性能测试实验分析

为了测试优化设计基于速变视线导航法的无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法的运行性能, 展开实验测试。

### 2.1 准备无人船控制对象

此次实验选择 C-Cat5 型号的无人船作为跟踪控制对象, 该无人船由机械架构、驱动模块、通信模块、动力装置等部分组成, 无人船载体机械架构采用坚固耐用的材料制成, 船体设计充分考虑了水动力学原理, 确保在各种复杂水域环境中都能稳定运行。驱动模块使用的是 2 台 DC 电动马达, 为无人船提供强大的动力支持。通信模块支持 UHF、S-波段、L-波段和 XBee 等多种通信方式, 确保无人船与岸基之间的稳定通信。选择的无人船对象总长 5 m, 横梁 2.2 m, 吃水深度为 0.7 m。无人船的空载重量为 800 kg, 最大航速可达 7 节, 最大负载能力为 500 kg, 单次任务的最大航行距离为 10 公里,  $z$  轴转动惯量为  $4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

为保证性能测试实验结果的可信度, 生成多组航行轨迹, 在航行轨迹的直行段无人船的航行速度为 30 m/s, 弯道段航行速度为 15 m/s。

### 2.2 无人船航行环境及无人船航行轨迹控制执行设备配置

选择内陆水域作为无人船的航行环境, 该内陆水域

覆盖面积约为  $800 \text{ km}^2$ , 包含深水区域、浅水区域和变化水域 3 个部分, 深水区和浅水区域的平均水深分别为  $12 \text{ m}$  和  $4 \text{ m}$ , 满足无人船的航行要求。变化水域水深变化程度较大, 在该区域内, 无人船需要具备动态调整航行参数的能力, 以确保在不同水深条件下都能保持稳定的航行状态。在选择无人船航行环境下, 安装一个吹风机和一个造浪设备, 根据造浪设备的工作状态, 将航行环境划分成有干扰和无干扰两个场景, 有干扰环境中海风速为  $10 \text{ m/s}$ , 海浪长度和高度分别为  $25 \text{ m}$  和  $1.0 \text{ m}$ 。

为了给无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法的执行提供硬件支持, 使用 REMUS 600 控制器作为航行轨迹控制的执行元件。REMUS 600 控制器采用模块化设计方式, 允许根据任务需求灵活配置传感器和有效载荷。控制器具备强大的数据处理能力, 能够实时处理来自各种传感器的数据。将控制器设备安装到选择的无人船中, 具体安装情况如图 5 所示。



图 5 无人船中航行控制器安装实景

根据无人船的设计和结构, 确定 REMUS 600 控制器的具体安装位置, 使用合适的支架和紧固件将控制器固定在无人船上, 确保安装牢固, 避免在航行过程中发生晃动或脱落。连接控制器与无人船中的电源电缆和传感器电缆, 在连接过程中, 注意电缆的走向和固定, 避免相互干扰或损坏。在控制器安装完成后, 进行系统调试。包括检查电源供应是否正常、传感器数据是否准确传输、控制系统是否稳定运行等。通过调试, 确保 REMUS 600 控制器与无人船其他系统之间的协调与配合。

### 2.3 生成无人船航行轨迹控制任务

在选择无人船航行环境中, 构建环境坐标系, 生成环形、s 形、直线 3 种航行轨迹控制任务。部分无人船航行轨迹控制任务的生成结果如图 6 所示。

在构建的环境坐标系中, 对生成的航行轨迹控制任务中的各个轨迹节点的位置坐标进行提取、记录, 以此作为无人船航行轨迹的控制目标。按照上述方式生成多个不同类型的控制任务, 并对目标数据进行记录。

### 2.4 性能测试实验设计

设计性能测试实验, 根据实验目的将实验分成 3 个部分, 分别为跟踪性能测试、控制性能测试以及抗干扰性能测试。跟踪性能测试实验的基本运行原理为: 考虑

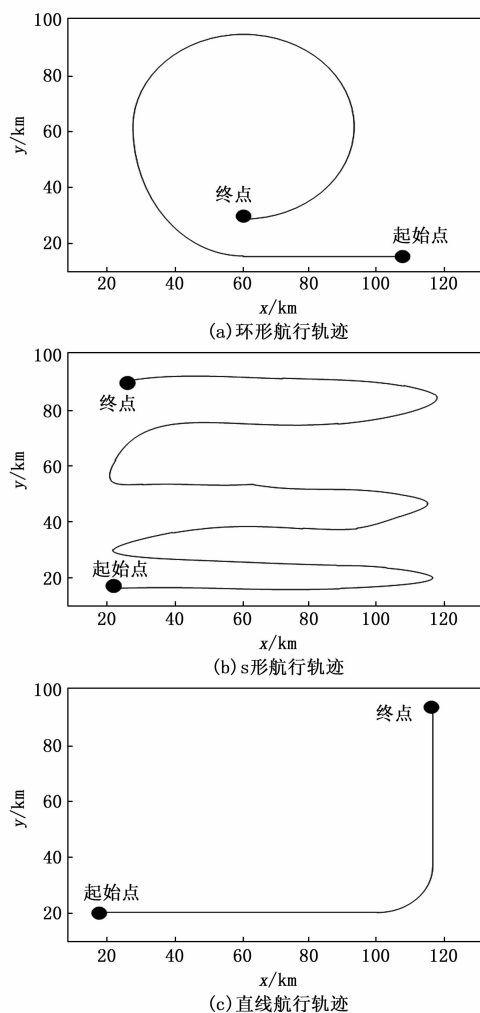


图 6 无人船航行轨迹控制任务生成结果

航行环境干扰因素, 确定无人船的实际航行轨迹, 利用优化设计的航行轨迹跟踪方法得出无人船航行轨迹的自适应跟踪结果, 将其与航行轨迹的实际值进行比对, 得出证明轨迹跟踪性能的测试结果。生成无人船航行轨迹控制任务, 结合当前航行轨迹的跟踪结果, 执行轨迹控制指令, 在控制方法作用下对无人船的实际航行轨迹进行监测, 判断实际航行轨迹与控制目标之间的差异, 从而反映优化设计方法的控制性能。而跟踪控制方法的抗干扰性能测试, 就是对比有、无干扰环境下跟踪控制效果的变化情况, 根据两者之间的差异大小, 证明优化设计方法的抗干扰性能是否满足预期要求。

### 2.5 描述性能测试实验过程

使用 ROS 作为基于速变视线导航法的无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法的开发工具, ROS 包含三维可视化工具、数据记录与回放工具等开发工具, 能够实现无人船航行轨迹跟踪与控制结果的可视化输出。为保证速变视线导航法的正常运行, 设置视线角和前视距离的初始值分别为  $25^\circ$  和  $20 \text{ km}$ 。在跟踪性能测试实验中,

将开发的跟踪控制方法应用到处于航行状态的无人船中,得出无人船航行轨迹的跟踪结果,如图 7 所示。



图 7 无人船航行轨迹自适应跟踪结果

按照时序关系,将任意时刻无人船航行轨迹的跟踪结果以可视化形式输出,并标记各个轨迹点的位置坐标。重复上述操作得出不同航行轨迹任务下无人船的自适应跟踪结果。在此基础上,根据生成的无人船航行轨迹控制任务,执行控制任务,得出控制方法作用下无人船实际航行轨迹数据,如图 8 所示。

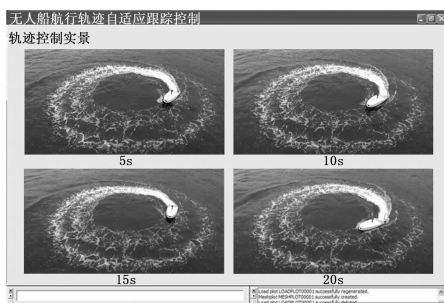


图 8 无人船航行轨迹自适应跟踪控制结果

在抗干扰性能测试实验中,分别在有、无干扰场景下,重复上述操作,得出两场景下无人船航行轨迹的跟踪与控制结果数据。为体现出优化设计方法的性能优势,将文献 [1] 中基于扰动观测器输入和状态量化的轨迹跟踪控制方法和文献 [2] 中基于滑模预测控制的无人船轨迹跟踪控制方法作为实验对比,在相同的实验环境下完成对比方法的开发,将其应用到同一无人船中,得出对应的跟踪与控制结果。

## 2.6 设置性能测试实验指标

优化设计无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法的跟踪与控制性能测试指标分别为跟踪偏差和控制偏差,其中跟踪偏差指标的测试结果如下:

$$\epsilon_{\text{track}} = |x_{\text{reality}} - x_{\text{track}}| + |y_{\text{reality}} - y_{\text{track}}| \quad (19)$$

式中,  $(x_{\text{reality}}, y_{\text{reality}})$  和  $(x_{\text{track}}, y_{\text{track}})$  分别为无人船的实际航行位置和跟踪位置,控制偏差测试结果为:

$$\epsilon_{\text{control}} = |x_{\text{c-reality}} - x_m| + |y_{\text{c-reality}} - y_m| \quad (20)$$

式中,  $(x_{\text{c-reality}}, y_{\text{c-reality}})$  和  $(x_m, y_m)$  分别为控制作用下无人船的实际航行位置以及控制目标位置。另外,跟踪控制方法抗干扰性能的测试指标为偏差波动系数,该指标

的测试结果为:

$$\sigma = |\epsilon_{\text{track}}^y - \epsilon_{\text{track}}^w| + |\epsilon_{\text{control}}^y - \epsilon_{\text{control}}^w| \quad (21)$$

式中,  $\epsilon_{\text{track}}^y$ 、 $\epsilon_{\text{track}}^w$ 、 $\epsilon_{\text{control}}^y$  和  $\epsilon_{\text{control}}^w$  分别为有、无干扰场景下的跟踪偏差和控制偏差。最终计算得出跟踪偏差取值越小,证明对应方法的跟踪性能越优;控制偏差越小,说明对应方法控制性能越优;偏差波动系数取值越小,证明对应方法抗干扰性能越优。

## 2.7 性能测试实验结果与分析

### 2.7.1 视线角度调整有效性分析

由于无人船在航行过程会受到来自风浪的干扰,视线角度的动态调整结果将会影响后续生成无人船航行轨迹控制指令的精度。因此,为验证所提方法的有效性,在存在干扰因素的条件下,利用所提方法调整视线角度,并与预期结果进行比较。设置在航行的第 5 s 和 10 s 以及 18 s 引入干扰,则所提方法的视线角度结果如图 9 所示。

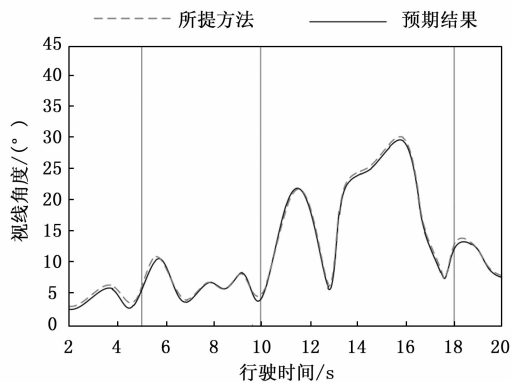


图 9 视线角度调整结果

根据图 9 结果可知,在存在干扰条件下,利用所提方法进行视线角度调整,其视线角度结果与预期结果基本一致。由此可说明,所提方法具有有效性,可获得精准的视线角度结果,为生成无人船航行轨迹控制指令提供可靠的基础。

### 2.7.2 无人船航行轨迹跟踪性能测试结果

收集任意时刻无人船航行轨迹的跟踪结果数据,将其与无人船的实际航行轨迹进行比对,通过公式 (19) 的计算,得出无人船航行轨迹跟踪性能的测试对比结果,如图 10 所示。

从图 10 中可以直观看出,与两种传统无人船航行轨迹跟踪方法相比,针对 3 个无人船航行轨迹控制任务,优化设计方法的跟踪误差明显降低,可维持在 0.3 km 以下。而两种对比方法,其跟踪误差较大,分别为 0.4 km 和 0.6 km。由此,对比 3 种方法结果可说明,优化设计方法具有更高的跟踪性能。

### 2.7.3 无人船航行轨迹控制性能测试结果

在不同控制方法作用下,以 s 形航行轨迹任务为

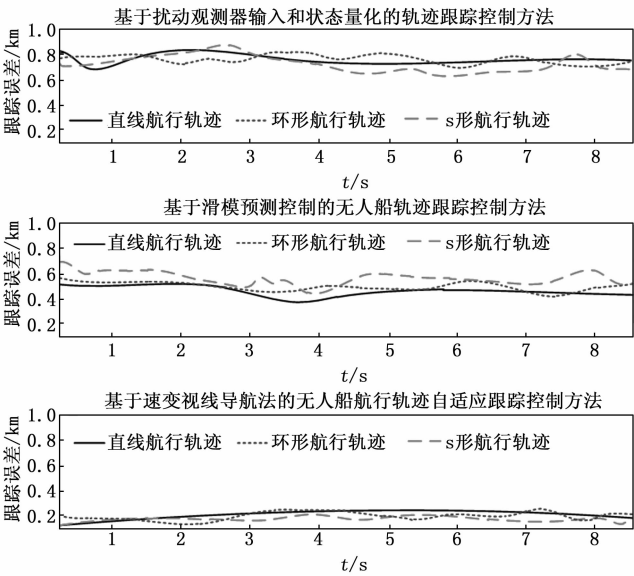


图 10 无人船航行轨迹跟踪误差测试对比结果

例，对无人船航行轨迹数据进行实时调取与记录，得出反映航行轨迹控制性能的测试结果，如表 1 所示。

表 1 无人船航行轨迹控制性能测试数据表

| 实验组别 | 航行轨迹控制目标 |      | 基于扰动观测器输入和状态量化的轨迹跟踪控制方法下的轨迹坐标 |      | 基于滑模预测控制的无人船轨迹跟踪控制方法下的轨迹坐标 |      | 基于速变视线导航法的无人船航行轨迹自适应跟踪控制法下的轨迹坐标 |      |
|------|----------|------|-------------------------------|------|----------------------------|------|---------------------------------|------|
|      |          |      |                               |      |                            |      |                                 |      |
|      | x/km     | y/km | x/km                          | y/km | x/km                       | y/km | x/km                            | y/km |
| 1    | 25       | 15   | 20                            | 13   | 28                         | 14   | 25                              | 14   |
| 2    | 44       | 15   | 48                            | 12   | 46                         | 14   | 45                              | 15   |
| 3    | 69       | 15   | 62                            | 13   | 64                         | 13   | 68                              | 15   |
| 4    | 73       | 15   | 77                            | 13   | 72                         | 15   | 73                              | 15   |
| 5    | 92       | 15   | 96                            | 12   | 94                         | 15   | 92                              | 15   |
| 6    | 111      | 15   | 118                           | 12   | 115                        | 14   | 110                             | 15   |
| 7    | 85       | 26   | 80                            | 28   | 82                         | 25   | 85                              | 26   |
| 8    | 62       | 26   | 66                            | 28   | 60                         | 25   | 61                              | 25   |

表 1 表示的是 s 形航行轨迹的控制结果数据，将表 1 中的数据代入到公式 (20) 中，得出两种对比方法的平均无人船航行轨迹控制误差分别为 4.7 km 和 3.6 km，优化设计方法无人船航行轨迹控制误差的平均值为 0.8 km。由此，根据上述结果可得出，优化设计方法的控制误差较低，具有较好的控制性能。

2.7.4 跟踪控制方法抗干扰性能测试结果

以 s 形航行轨迹任务为例，在有、无环境干扰场景下，对无人船航行轨迹跟踪与控制数据进行统计，计算跟踪偏差和控制偏差，将其代入到公式 (21) 中，即可得出跟踪控制方法抗干扰性能的测试对比结果，如图 11 所示。

从图 11 中可以直观看出，优化设计方法在有、无

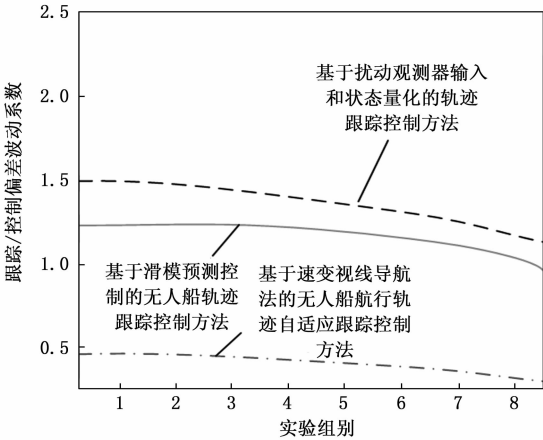


图 11 无人船航行轨迹跟踪控制方法抗干扰测试结果

环境干扰场景的偏差波动系数均低于 0.5，且均低于两种对比跟踪控制方法。两种对比跟踪控制方法的偏差波动系数最低分别为 0.75 和 1.2。由此，对比 3 种方法的偏差波动系数结果可得出，优化设计方法具有更高的抗干扰性能。

3 结束语

无人船航行轨迹自适应跟踪控制技术在海洋科学研究、海洋资源勘探、环境监测、海上搜救等多个领域具有广泛的应用前景。它能够提高无人船的自主作业能力，减少人工干预，降低作业成本，提高作业效率和安全性。同时，该技术还有助于推动无人船技术的整体进步和发展，为海洋领域的智能化和自主化提供有力支持。在此次研究中，引入速变视线导航法对无人船航行轨迹自适应跟踪控制方法进行优化。实验测试结果表明，速变视线导航法能够更灵活地应对外部环境变化，提高无人船在复杂海况下的航行稳定性和准确性，具有较高的应用价值。

参考文献：

[1] WANG Y. Disturbance observer based adaptive trajectory tracking control for unmanned surface vehicle with input and state quantization [J]. Ocean Engineering, 2024 (308): 118206.

[2] 冯 鑫，于双和. 基于滑模预测控制的水面无人船轨迹跟踪研究 [J]. 电光与控制, 2023, 30 (9): 92-98.

[3] 雷超凡，初秀民，柳晨光，等. 参考航速时变的无人船轨迹跟踪控制方法 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45 (11): 83-87.

[4] 黄浩乾，郑康健，马惊天. 基于模型预测的 AUV 轨迹跟踪滑模控制方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2024, 32 (2): 205-212.

[5] 李 娟，王佳奇，丁福光. 基于反馈线性化的 AUV 三维轨迹跟踪滑模控制 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43

- (3): 348-355.
- [6] 张锦淇, 董早鹏, 杨倩倩, 等. 基于级联思想的欠驱动 AUV 三维轨迹跟踪控制 [J]. 大连海事大学学报, 2022, 48 (4): 19-28.
- [7] 高 双, 柳春平, 张 瞳, 等. 可行状态包络下欠驱动水面船全时可跟踪轨迹规划方法 [J]. 船舶工程, 2022, 44 (s1): 459-466.
- [8] 徐海祥, 卜瑞波, 冯 辉. 面向船舶智能航行的多目标实时跟踪方法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (1): 138-143.
- [9] 张 强, 李昊洋, 孟祥飞, 等. 基于 Lyapunov 理论考虑不确定扰动的船舶自适应跟踪控制 [J]. 上海海事大学学报, 2023, 44 (1): 8-16.
- [10] 闫兆进, 杨 慧, 慈 慧, 等. 船舶轨迹提取模型构建与交通流分析 [J]. 地球信息科学学报, 2023, 25 (11): 2134-2149.
- [11] 魏新江, 魏永丽, 张慧凤. 船舶动力定位系统的精细抗干扰控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (10): 2593-2599.
- [12] 黄浩乾, 刘睿童, 王 迪, 等. 基于扰动观测器的 AUV 固定时间积分滑模控制方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31 (3): 292-300.
- [13] 徐 鹏, 徐 东, 李腾涛, 等. 基于 COMGRU 的 AUV 航路轨迹预测方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45 (7): 1384-1390.
- [14] 赵 琦, 许志远, 葛佳薇, 等. 基于 SW-BiConvLSTM 的船舶轨迹预测 [J]. 船海工程, 2024, 53 (4): 36-42.
- [15] 王 伟, 王 勇, 周晨光, 等. 基于模糊神经网络 PID 的无人艇航向控制器研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2023, 46 (4): 458-462.
- [16] 边有钢, 张俊杰, 李崇康, 等. 多 AUV 分布式模型预测深度和纵向速度控制 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (6): 45-54.
- [17] 李文魁, 周 铸, 宦爱奇, 等. 自主水下航行器自适应 S 面三维轨迹跟踪的仿真验证 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17 (4): 38-46.
- [18] 黄宴委, 林 涛, 黄文超, 等. 一种快速有限时间收敛的轨迹跟踪引导律 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40 (6): 965-976.
- [19] 初庆栋, 尹羿博, 龚小旋, 等. 基于双偶极向量场的欠驱动无人船目标跟踪制导方法 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17 (4): 32-37.
- [20] 宁 君, 马一帆, 李 伟, 等. 带有状态/输入量化的无人船自适应模糊跟踪控制 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (5): 52-61.
- (上接第 173 页)
- [13] PATIÑO-GÓMEZ M, ORTEGA-GÓÑZALEZ F J. Polar mode amplification techniques for aeronautical radio navigation transmitters: power efficiency and linearity enhancements [J]. IEEE Microwave Magazine, 2023, 24 (11): 16-34.
- [14] CHEN X, WU H, FU G. Wideband VHF/UHF wing conformal vertical polarized omnidirectional antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21 (5): 953-957.
- [15] MICHALOWSKA J. Prediction and assessment of exposure to electromagnetic field during a helicopter flight [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2022, 98 (1): 96-99.
- [16] 安 建, 刘旭东, 吕飞飞, 等. 基于改进时频脊线的多用户宽带跳频信号参数估计方法 [J]. 计算机测量与控制, 2025, 33 (4): 225-231.
- [17] 姚瑞煦, 李 俊, 张新炜, 等. 基于 STFT 图像特征的天然气管道预警技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (4): 83-89.
- [18] MENGRAN L, CHAO Z, HANGHAI F, et al. A sound source localization method based on multiscale cross-STFT complexvalued convolutional neural network [J]. Sensor Review, 2025, 45 (3): 374-386.
- [19] SOONTORNAPAR T, PLOYSUWAN T. A novel approach to enhanced fall detection using STFT and magnitude features with CNN autoencoder [J]. Neural Computing and Applications, 2024, 37 (6): 1-17.
- [20] 周 星, 行鸿彦, 叶 如. 结合贝叶斯优化和时域卷积网络的海面微弱信号检测方法 [J]. 探测与控制学报, 2025, 47 (2): 55-63.
- [21] HAMA Y, OCHIAI H. Can spatial modulation outperform spatial multiplexing in practical band-limited coded systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 62 (5): 128-133.
- [22] WU C, YANG S, XIAO Y, et al. Quasi-orthogonal space-time block coded spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70 (12): 7872-7885.
- [23] DINGYUN S, YUYANG P, MING Y, et al. Deep learning based signal detection for quadrature spatial modulation system [J]. China Communications, 2024, 21 (10): 78-85.
- [24] 王 军, 张维通, 闫正兵, 等. 基于迁移 QCNN 的孪生网络轴承故障诊断方法 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (4): 1-7.
- [25] XIAOMAO F, HAILIANG W, YANG Z, et al. Automatic fall risk assessment with Siamese network for stroke survivors using inertial sensor-based signals [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2022, 37 (9): 6168-6184.