



舰艇编队测距一致性欺骗干扰检测算法研究

徐贵鹏, 刘奇峰, 李倩, 奔粤阳

引用本文:

徐贵鹏, 刘奇峰, 李倩, 等. 舰艇编队测距一致性欺骗干扰检测算法研究[J]. *智能系统学报*, 2026, 21(2): 476-486.
XU Guipeng, LIU Qifeng, LI Qian, et al. Research on deception interference detection algorithm for ranging consistency of formation of ships[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2026, 21(2): 476-486.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202506015>

您可能感兴趣的其他文章

动态云台摄像机无人机检测与跟踪算法

Drone detection and tracking in dynamic pan-tilt-zoom cameras

智能系统学报. 2021, 16(5): 858-869 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202103032>

融合视觉显著性再检测的孪生网络无人机目标跟踪算法

Siamese network combined with visual saliency re-detection for UAV object tracking

智能系统学报. 2021, 16(3): 584-594 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202101035>

利用置信规则库构建WSN节点故障检测模型

Constructing a WSN node fault detection model using the belief rule base

智能系统学报. 2021, 16(3): 511-517 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202009006>

联邦推荐系统的协同过滤冷启动解决方法

Cold starts in collaborative filtering for federated recommender systems

智能系统学报. 2021, 16(1): 178-185 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202009032>

仿信鸽归巢行为的导航技术研究进展

Technology research review on homing pigeon-inspired navigation

智能系统学报. 2021, 16(1): 1-10 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202009049>

轨道交通车站乘客集散系统Anylogic仿真优化

Simulation and optimization of the passenger distribution system Anylogic in rail transit stations

智能系统学报. 2020, 15(6): 1049-1057 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811003>

DOI: 10.11992/tis.202506015

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.tp.20260204.1051.008>

舰艇编队测距一致性欺骗干扰检测算法研究

徐贵鹏, 刘奇峰, 李倩, 奔粤阳

(哈尔滨工程大学智能科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 欺骗式干扰因其会导致 GNSS 输出错误信息以及隐蔽性强的特点, 对舰艇编队航行安全构成重大威胁。传统的欺骗检测方法聚焦于单平台的信号特征分析及多传感器组合导航技术, 并未考虑到编队内部多个平台信息的相互利用。为了有效利用编队内部多平台的相对测距信息, 本文提出舰艇编队测距一致性欺骗干扰检测算法, 通过对数据链通信测距设备与 GNSS 的间接测距信息差异进行分析, 并构建形成检验统计量, 结合观测数据实时监测异常, 可有效检测变化非常缓慢的欺骗干扰; 同时引入信任度评估机制对检测结果进行二次验证, 有效降低误检概率。该方法有效利用了多个平台间的测距信息, 为舰艇编队导航安全提供新思路。

关键词: 全球卫星导航系统; 舰艇编队; 航行安全; 欺骗干扰; 欺骗检测; 测距; 假设检验; 信任度

中图分类号: TP274; TH89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2026)02-0476-11

中文引用格式: 徐贵鹏, 刘奇峰, 李倩, 等. 舰艇编队测距一致性欺骗干扰检测算法研究 [J]. 智能系统学报, 2026, 21(2): 476-486.

英文引用格式: XU Guipeng, LIU Qifeng, LI Qian, et al. Research on deception interference detection algorithm for ranging consistency of formation of ships[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(2): 476-486.

Research on deception interference detection algorithm for ranging consistency of formation of ships

XU Guipeng, LIU Qifeng, LI Qian, BEN Yueyang

(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Deceptive jamming of the Global Navigation Satellite System (GNSS) poses a significant threat to the navigation safety of naval formations due to its characteristics of causing incorrect information output by GNSS and strong concealment. Traditional spoofing detection methods focus on the analysis of signal characteristics of a single platform and multi-sensor integrated navigation technology, without considering the mutual utilization of information from multiple platforms within the fleet. To effectively utilize the relative ranging information among multiple platforms within the fleet, this paper proposes a ranging consistency spoofing interference detection algorithm for formation of ships. By analyzing the differences in indirect ranging information from data link communication ranging equipment and GNSS, and constructing a test statistic, combined with real-time monitoring of abnormal observations, it can effectively detect very slow-changing spoofing interference. At the same time, a trustworthiness evaluation mechanism is introduced to re-validate the detection results, effectively reducing the false alarm probability. This method effectively utilizes the ranging information among multiple platforms, providing a new approach for the safety of formation of ships.

Keywords: global navigation satellite system; formation of ships; the security of navigation; spoofing interference; spoofing detection; range finding; hypothesis testing; trust degree

随着水面舰艇工作海域与任务使命复杂化程度不断提高, 舰艇编队协同执行任务已成为常态^[1-6]。舰艇编队内部的多个舰艇可利用数据链

设备实现相对测距、测角以及通信, 从而为编队协同导航、控制以及决策提供实时共享信息^[7-9]。舰艇编队中各舰艇精准定位是协同执行任务的关键。舰艇导航系统主要包括惯性导航系统 (inertial navigation system, INS) 以及全球卫星导航系统。其中, INS 可在不依赖外部信息的情况下获

收稿日期: 2025-06-17. 网络出版日期: 2026-02-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52371368).

通信作者: 李倩, E-mail: liqianheu@163.com.

取舰艇位置、速度以及姿态等信息, 自主性好且不受外部干扰, 但 INS 定位误差随时间累积, 因此通常需要利用其他导航信息校准。全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)作为现代军事与民用领域关键导航基础设施, 定位精度稳定且不随时间累积, 可对 INS 输出进行校正, 是舰艇编队获取绝对定位信息的主要手段^[10]。

随着电子对抗技术发展, 舰艇 GNSS 导航信号也面临各种干扰威胁。GNSS 导航信号强度弱, 信号调制方式公开, 部分导航数据可预测, 导致 GNSS 易受到压制式干扰与欺骗式干扰。其中, 欺骗式干扰通过伪造或转发高功率虚假卫星信号, 诱导目标接收机跟踪干扰信号, 从而致使接收机输出错误位置、速度以及时间信息, 实现对目标位置的欺骗控制。欺骗式干扰可分为生成式欺骗干扰与转发式欺骗干扰。生成式欺骗干扰基于公开的民用信号伪码与导航电文直接生成模拟 GNSS 信号, 可实现对民码接收机的欺骗; 转发式欺骗干扰则通过先接收真实卫星导航信号, 再对信号适当增加延时并高功率转发来实现对民码与军码接收机的欺骗^[11-13]。欺骗式干扰隐蔽性好, 可在不引起目标察觉的情况下实现干扰, 且能使大部分抗干扰技术失效。因此, 欺骗式干扰对舰艇编队的破坏性与威胁性更大^[14-16]。舰艇编队在海上航行过程中, 部分舰艇可能会进入欺骗干扰区。在利用受欺骗干扰 GNSS 导航信号对舰艇搭载 INS 校正后, 舰艇导航定位轨迹将逐渐偏离预定航线, 从而导致舰艇无法正常执行编队任务。2019 年, 以色列公司 RegulusCyber 对特斯拉 Model3 轿车的 L2 级自动驾驶系统进行 GNSS 欺骗干扰试验, 成功诱导车辆产生错误定位信息, 导致急转弯与急刹等危险行为发生^[17]。2020 年, 加州大学团队提出“fusion ripper”GNSS 欺骗策略, 并通过仿真实验成功对 GNSS/IMU(inertial measurement unit)/LiDAR(Light detection and ranging) 组合导航系统实现欺骗^[18]。

针对 GNSS 欺骗式干扰, 近年来研究人员开展了基于信号特征分析及多传感器组合导航的干扰检测方法研究^[19-24]。2024 年, 中山大学李静团队提出一种基于特征整合与相关系数筛选的实时 GNSS 欺骗检测框架, 通过局部标准化策略和轻量化特征处理, 显著提升了复杂欺骗场景下的实时检测效率^[25]。同年, 河北师范大学杜云龙团队通过将四天线接收机检测信号到达方位角与星历进行对比实现对欺骗信号的检测与定位^[26]。2025 年, 哈尔滨工业大学刘健团队提出一种基于

相关器复合度量的 GNSS 欺骗检测方案, 通过联合分析 I/Q(In-phase and Quadrature) 分量输出构建复合度量并融合了多个决策指标, 显著提升了欺骗检测的时效性与覆盖范围^[27]。2018 年, 南京航空航天大学徐睿团队对欺骗攻击下的 GNSS/INS 组合导航系统进行分析, 并通过 IMU 误差异常补偿检测实现欺骗干扰检测^[28]。2022 年, 韩国中央大学 Keum-Cheol Kwon 团队分析 GNSS 与加速度计输出之间的加速度差, 并利用一致性检验方法实现欺骗干扰检测^[29]。2024 年, 特里凡得琅工程学院 V.S. Vinoj 团队提出基于 INS 辅助的 GNSS/INS 组合导航欺骗检测方法, 通过扩展卡尔曼滤波的伪距-多普勒残差分析构建动态阈值机制, 实现对卫星欺骗信号的实时检测^[30]。

值得注意的是, 上述研究都聚焦于单平台 GNSS 欺骗干扰检测。受舰艇编队协同信息交互机制启发, 本文提出一种基于舰艇编队相对测距一致性的 GNSS 欺骗式干扰检测方法。在分析舰艇间直接测距信息(一般由数据链设备获得)与 GNSS 间接测距信息差值统计特性的基础上, 利用假设检验方法构建检验统计量, 从而实现对 GNSS 欺骗干扰的检测。进一步, 引入信任度评估方法对检测结果进行二次验证, 从而降低误检概率。由于本文方法以数据链测距信息为基准, 而 GNSS 欺骗干扰即使变化非常缓慢, 最终总会使目标 GNSS 位置信息大幅偏离真实位置, 进而导致 GNSS 间接测距信息大幅偏离数据链测距信息以及检验统计量超出阈值。所以本文方法可检测到变化非常缓慢的欺骗干扰。

1 测距误差分析与干扰检测量构建

为简化问题分析, 假设由两艘水面舰艇构成水面运动平台编队, 且两艘舰艇搭载同等精度的 GNSS 设备与数据链设备, 可实现舰艇间测距与数据通信功能。

两艘舰艇的二维平面真实位置分别表示为 $(P_{1E}, P_{1N}), (P_{2E}, P_{2N})$, 则两艘舰艇之间的真实距离可以表示为

$$D = \sqrt{\Delta P_E^2 + \Delta P_N^2}$$

式中: $\Delta P_E = P_{2E} - P_{1E}$, $\Delta P_N = P_{2N} - P_{1N}$ 。

同时, 数据链设备测距误差主要来源于时间同步偏差、非视距传播路径偏移及载体动态特性干扰的综合作用。在完成常值偏差补偿并忽略非视距传播等偶然因素的情况下, 可假设舰艇间数据链设备的测距误差服从零均值高斯分布, 即 $\Delta D_{\text{ranging}} \sim N(0, \sigma_{\text{ranging}}^2)$ 。

1.1 无干扰情况下 GNSS 测距误差分析

假设在无 GNSS 干扰的情况下, 两艘舰艇搭载的 GNSS 设备输出位置信息的误差服从零均值正态分布, 即

$$\epsilon_{1E}, \epsilon_{1N}, \epsilon_{2E}, \epsilon_{2N} \sim N(0, \sigma_{\text{GNSS}}^2)$$

式中 ϵ_{1E} 、 ϵ_{1N} 、 ϵ_{2E} 、 ϵ_{2N} 分别表示舰艇 1 与舰艇 2 的 GNSS 经纬度输出信息转换为二维平面位置信息后的定位误差, 且相互独立。

在上述假设下, 两艘舰艇 GNSS 测量位置可以分别表示为 $(P_{1E} + \epsilon_{1E}, P_{1N} + \epsilon_{1N})$, $(P_{2E} + \epsilon_{2E}, P_{2N} + \epsilon_{2N})$, 则两艘舰艇之间的 GNSS 间接测距可以表示为

$$D_{\text{GNSS}} = \sqrt{(\Delta P_E + \epsilon_E)^2 + (\Delta P_N + \epsilon_N)^2}$$

式中: $\epsilon_E = \epsilon_{2E} - \epsilon_{1E}$, $\epsilon_N = \epsilon_{2N} - \epsilon_{1N}$, 且满足 $\epsilon_E, \epsilon_N \sim N(0, 2\sigma_{\text{GNSS}}^2)$ 。

一般情况下, GNSS 定位误差远小于两艘舰艇之间的距离。为便于推导, 将 D_{GNSS} 进行一阶泰勒展开得到

$$D_{\text{GNSS}} = D + \frac{\Delta P_E \cdot \epsilon_E + \Delta P_N \cdot \epsilon_N}{D}$$

则两艘舰艇之间的 GNSS 间接测距误差可近似表示为

$$\Delta D_{\text{GNSS}} = D_{\text{GNSS}} - D \approx \frac{\Delta P_E \cdot \epsilon_E + \Delta P_N \cdot \epsilon_N}{D}$$

同时, ΔD_{GNSS} 的均值与方差可以表示为

$$E(\Delta D_{\text{GNSS}}) = \frac{\Delta P_E}{D} E(\epsilon_E) + \frac{\Delta P_N}{D} E(\epsilon_N) = 0$$

$$\text{Var}(\Delta D_{\text{GNSS}}) = \left(\frac{\Delta P_E}{D}\right)^2 \text{Var}(\epsilon_E) + \left(\frac{\Delta P_N}{D}\right)^2 \text{Var}(\epsilon_N) = 2\sigma_{\text{GNSS}}^2$$

定义 GNSS 间接测距误差与数据链测距误差的差值为干扰检测量, 即

$$\Delta D_{\text{diff}}^0 = \Delta D_{\text{GNSS}} - \Delta D_{\text{ranging}}$$

考虑到 GNSS 间接测距误差与数据链测距误差相互独立, 所以 ΔD_{diff}^0 的均值与方差可以表示为

$$E(\Delta D_{\text{diff}}^0) = E(\Delta D_{\text{GNSS}}) - E(\Delta D_{\text{ranging}}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Var}(\Delta D_{\text{diff}}^0) = \text{Var}(\Delta D_{\text{GNSS}}) + \text{Var}(\Delta D_{\text{ranging}}) = 2\sigma_{\text{GNSS}}^2 + \sigma_{\text{ranging}}^2 \quad (2)$$

1.2 欺骗干扰情况下 GNSS 测距误差分析

假设舰艇编队中的舰艇 2 处于 GNSS 欺骗干扰区域内, 则此时舰艇 2 的 GNSS 定位误差表示为

$$\begin{cases} \epsilon_{2E}^s = s_E + \epsilon_{2E} \\ \epsilon_{2N}^s = s_N + \epsilon_{2N} \end{cases}$$

式中 s_E 、 s_N 分别为东向与北向 GNSS 欺骗误差, 通常为确定性数值。

这种情况下, 舰艇 2 的 GNSS 定位误差分布为

$$\begin{cases} \epsilon_{2E}^s \sim N(s_E, \sigma_{\text{GNSS}}^2) \\ \epsilon_{2N}^s \sim N(s_N, \sigma_{\text{GNSS}}^2) \end{cases}$$

与 1.1 节分析类似, 此时两舰艇之间的 GNSS 间接测距误差可通过一阶泰勒展开近似表示为

$$\Delta D_{\text{GNSS}}^s \approx \frac{\Delta P_E(s_E + \epsilon_E) + \Delta P_N(s_N + \epsilon_N)}{D}$$

ΔD_{GNSS}^s 的均值与方差可以表示为

$$E(\Delta D_{\text{GNSS}}^s) = \frac{\Delta P_E \cdot s_E + \Delta P_N \cdot s_N}{D}$$

$$\text{Var}(\Delta D_{\text{GNSS}}^s) = \frac{\Delta P_E^2 \cdot 2\sigma_{\text{GNSS}}^2 + \Delta P_N^2 \cdot 2\sigma_{\text{GNSS}}^2}{D^2} = 2\sigma_{\text{GNSS}}^2$$

此时干扰检测量表示为

$$\Delta D_{\text{diff}}^s = \Delta D_{\text{GNSS}}^s - \Delta D_{\text{ranging}}$$

同理, 由于 GNSS 间接测距误差与数据链测距误差相互独立, 所以 ΔD_{diff}^s 的均值与方差可以表示为

$$E(\Delta D_{\text{diff}}^s) = E(\Delta D_{\text{GNSS}}^s) = \frac{\Delta P_E \cdot s_E + \Delta P_N \cdot s_N}{D} \quad (3)$$

$$\text{Var}(\Delta D_{\text{diff}}^s) = \text{Var}(\Delta D_{\text{GNSS}}^s) + \text{Var}(\Delta D_{\text{ranging}}) = 2\sigma_{\text{GNSS}}^2 + \sigma_{\text{ranging}}^2 \quad (4)$$

对比式 (1)、(2) 与式 (3)、(4) 可以发现, 当 GNSS 受到欺骗干扰时, 本文定义的干扰检测量 ΔD_{diff} 的统计特性将发生明显变化。

2 编队测距一致性检验与信任度评估

对于舰艇编队来说, 各舰艇搭载的数据链设备可以直接测量舰艇之间的相对距离。同时, 利用各舰艇搭载 GNSS 设备输出的定位信息同样可以间接获得舰艇之间的相对距离。当舰艇编队中部分舰艇进入干扰区导致其 GNSS 设备受到欺骗式干扰时, 则通过 GNSS 定位信息间接获得的舰艇之间距离信息将发生异常。第 1 章分析表明, 当不存在 GNSS 欺骗干扰时, ΔD_{diff} 表示为 ΔD_{diff}^0 ; 当存在 GNSS 欺骗干扰时, ΔD_{diff} 表示为 ΔD_{diff}^s 。本文提出的舰艇编队欺骗干扰检测方法正是基于 ΔD_{diff}^0 与 ΔD_{diff}^s 统计特性的变化实现对 GNSS 信号干扰实现检测。由于 GNSS 设备与数据链设备的误差特性 (均值与方差) 已知, 且欺骗引起的方差变化会导致 T 检验的检验统计量不稳定并拖慢检验速度, 所以即使为了提高检测速度采用较小的检测窗口, 本文依然采用 Z 检验方法来判断样本均值是否与总体均值具有显著性差异。

假设 H_0 表示不存在欺骗信号情况, H_1 表示存在欺骗信号情况。根据实时获取的最新 n 个观测值 $\Delta D_{\text{diff}}^{(1)}, \Delta D_{\text{diff}}^{(2)}, \dots, \Delta D_{\text{diff}}^{(n)}$, 可以构建检验统计量为

$$Z = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta D_{\text{diff}}^{(i)}}{\sqrt{(2\sigma_{\text{GNSS}}^2 + \sigma_{\text{ranging}}^2) / n}}$$

在 H_0 下, 有

$$Z \sim N(0, 1)$$

在 H_1 下, 有

$$Z \sim N\left(\frac{\Delta P_E \cdot s_E + \Delta P_N \cdot s_N}{D}, \frac{1}{\sqrt{(2\sigma_{\text{GNSS}}^2 + \sigma_{\text{ranging}}^2) / n}}\right)$$

在此基础上, 根据预设的显著性水平 α 查表获得临界值 $Z_{1-\alpha/2}$ 。若 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 则拒绝 H_0 , 判定存在欺骗干扰。

进一步, 为提高干扰检测准确性, 降低误检概率, 采用信任度评估方法对多次检测结果进行评估。设 k 时刻 GNSS 信任度为 C_{GNSS}^k , 且 $C_{\text{GNSS}}^k \in [0, 1]$, 则 C_{GNSS}^k 可利用如下公式计算:

$$C_{\text{GNSS}}^k = \begin{cases} C_{\text{GNSS}}^{k-1} - C_{\text{down}}, & |Z^k| > Z_{1-\alpha/2} \\ C_{\text{GNSS}}^{k-1} + C_{\text{rise}}, & \max(Z^{k-\kappa}, Z^{k-\kappa+1}, \dots, Z^k) \leq Z_{1-\alpha/2} \end{cases}$$

式中 C_{down} 与 C_{rise} 分别为检测到欺骗干扰时的 GNSS 信任度下降幅度以及连续 κ 次未检测到欺骗干扰时的 GNSS 信任度上升幅度。

为防止 C_{GNSS}^k 无序上升或下降, 对 C_{GNSS}^k 进行如下限制:

$$C_{\text{GNSS}}^k = \begin{cases} 0, & C_{\text{GNSS}}^k < 0 \\ C_{\text{GNSS}}^k, & 0 \leq C_{\text{GNSS}}^k \leq 1 \\ 1, & C_{\text{GNSS}}^k > 1 \end{cases}$$

当 C_{GNSS}^k 降至 0 时, 即可认定存在 GNSS 欺骗干扰。本文算法整体流程如图 1 所示。

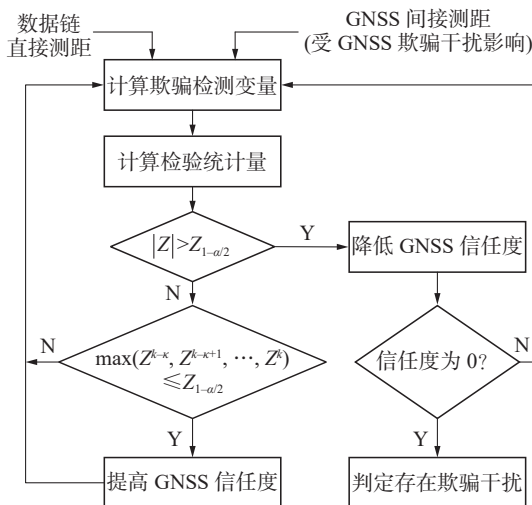


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flowchart

通过上述的理论分析可以看出, 本文构建的欺骗检测量可以基于数据链测距信息直接检测舰

艇间 GNSS 间接测距信息的异常变化, 当存在 GNSS 欺骗干扰时, 受欺骗的 GNSS 定位信息会发生偏移, 进而引起 GNSS 间接测距信息逐渐偏离数据链测距信息, 通过计算可得到欺骗检测量与检验统计量, 将检验统计量 Z 的范数与检测阈值进行对比, 若超出阈值, 则降低 GNSS 信任度, 若连续 κ 次都未超出阈值, 则提高 GNSS 信任度, 当信任度降低到 0 时, 可认为存在 GNSS 欺骗干扰。值得注意的是, 即使欺骗误差变化非常缓慢, 但只要 GNSS 的位置欺骗误差达到一定程度, 总会使欺骗检测量偏离正常范围, 进而导致检验统计量 Z 的范数达到阈值。所以本文的方法可以检测欺骗误差变化非常缓慢的 GNSS 欺骗干扰。

3 实验验证与分析

为验证本文所提算法有效性, 进行仿真实验验证与分析。设舰艇 1 与舰艇 2 初始位置分别为 $[0, 500 \text{ m}]$, $[0, -500 \text{ m}]$, 航向均为北偏西 45° , 两舰艇东向与北向速度为 $[-3 \text{ m/s}, 3 \text{ m/s}]$; GNSS 定位误差标准差 $\sigma_{\text{GNSS}} = 2 \text{ m}$, 数据链测距误差标准差 $\sigma_{\text{ranging}} = 5 \text{ m}$ 。仿真时长为 1000 s , 采样时间为 1 s 。实验开始 400 s 后, 沿北偏东 45° 方向以欺骗加速度 $[-0.1 \text{ m/s}^2, -0.1 \text{ m/s}^2]$ 向舰艇 2 的 GNSS 位置信息注入欺骗式干扰误差, 且最大欺骗速度为 1 m/s 。欺骗干扰样本检测数 $n=6$, 通过查找标准正态分布表, 显著性水平 α 为 0.01 时的临界值 $Z_{1-0.01/2} = 2.57$; 信任度下降幅度 $C_{\text{down}} = 0.2$, 信任度上升幅度 $C_{\text{rise}} = 0.3$, 信任度上升所需的连续未检测到干扰次数 $\kappa = 2$ 。将本文方法作为方法 1, 通过计算, 该参数下的置信区间为 $[-6.03 \text{ m}, 6.03 \text{ m}]$ 。

同时, 采用文献 [28] 与文献 [29] 所提方法分别作为方法 2 与方法 3 进行对比实验。

方法 2 即利用 GNSS/INS 松组合系统中的 IMU 偏差补偿量范数构建欺骗干扰检测量, 其量测信息为 GNSS 的位置与速度, 通过检测 IMU 偏差的异常补偿量来检测欺骗干扰, 欺骗干扰检测量具体公式为

$$\begin{cases} \|\boldsymbol{\varepsilon}_b\| = \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_{bx}^2 + \boldsymbol{\varepsilon}_{by}^2 + \boldsymbol{\varepsilon}_{bz}^2} \\ \|\nabla\| = \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2 + \nabla_z^2} \end{cases}$$

式中: $[\boldsymbol{\varepsilon}_{bx}, \boldsymbol{\varepsilon}_{by}, \boldsymbol{\varepsilon}_{bz}]$ 、 $[\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]$ 分别为陀螺仪与加速度的常值偏差补偿值, $\|\boldsymbol{\varepsilon}_b\|$ 与 $\|\nabla\|$ 分别为陀螺仪与加速度计补偿值范数。

通过计算 $\|\boldsymbol{\varepsilon}_b\|$ 与 $\|\nabla\|$ 的历史统计量作为欺骗预警阈值, 阈值计算公式为

$$\begin{cases} \varepsilon_{th} = \bar{\varepsilon}_b + 3\sigma_{\varepsilon_b} \\ \nabla_{th} = \bar{\nabla}_b + 3\sigma_{\nabla_b} \end{cases}$$

式中： $\bar{\varepsilon}_b$ 与 σ_{ε_b} 分别为陀螺仪历史偏差补偿值范数的均值与方差， $\bar{\nabla}_b$ 与 σ_{∇_b} 分别为加速度计历史偏差补偿值范数的均值与方差。当 $\|\varepsilon_b\|$ 与 $\|\nabla\|$ 分别同时大于预警阈值 ε_{th} 与 ∇_{th} 时，判断存在欺骗干扰。

而方法 3 即基于假设检验的方法，利用 GNSS 加速度信息与舰船搭载惯性测量组件测量加速度信息之间的平方差构建检验统计量，公式表示为

$$z_{dcs} = \left| \hat{f}_{gnss,h}^n \right|^2 - \left| \hat{f}_{acc,h}^n \right|^2$$

式中 $\hat{f}_{gnss,h}^n$ 与 $\hat{f}_{acc,h}^n$ 分别为 GNSS 与加速度计在导航坐标系的水平方向测得的比力。

随后假设 H_0 表示不存在欺骗信号情况， H_1 表示存在欺骗信号情况。根据虚警率 P_{fa} 来计算检测阈值 γ ，具体公式为

$$\text{prob}\{z_{dcs} > \gamma | H_0\} = P_{fa}$$

最后可根据 z_{dcs} 是否超过阈值 γ 来判断是否存在 GNSS 欺骗干扰。

方法 2 实验中，惯性测量组件中的陀螺仪零偏为 $0.01^\circ/h$ ，加速度计零偏为 $100 \mu g$ ，角度随机游走为 $0.01^\circ/\sqrt{h}$ ，速度随机游走为 $10 \mu g/\sqrt{Hz}$ ，GNSS 测速误差标准差为 0.2 m/s ，通过计算无欺骗干扰情况下的陀螺与加速度计偏差补偿范数的历史统计值，得到其阈值分别为 $\varepsilon_{th}=2.86 \times 10^{-9} \text{ }^\circ/h$ ， $\nabla_{th}=6.09 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$ ，其余实验条件与前述一致。实验过程中，为降低野值对检测结果的影响，利用滑动平均方法对 IMU 补偿值范数进行平滑，平滑窗口大小设为 5 s 。

方法 3 的实验中，GNSS 水平加速度可通过对 GNSS 水平速度进行差分获得，并利用移动平均方法对其进行平滑，平滑窗口大小设为 10 s ，通过计算无欺骗干扰，虚警率 $P_{fa}=0.001$ 情况下的历史统计值来计算阈值 γ ，通过计算， $\gamma=0.0112 \text{ m}^2/\text{s}^4$ 。其余实验参数与上述实验一致。

需要注意的是，对于方法 2 与方法 3，由于其使用历史统计值来进行阈值设定，设定比较理想化。在实际应用中，传感器输出与历史值可能存在偏差，进而导致实际检测阈值偏离依据历史统计值设定的阈值，若实际阈值偏大，则会导致检测效率降低，若实际阈值偏小，则会导致误检概率上升。本实验基于理想条件下阈值不会出现偏差的假设进行对比实验，来验证本文算法在理论上与其他方法的优劣。实验结果如图 2~5 所示。

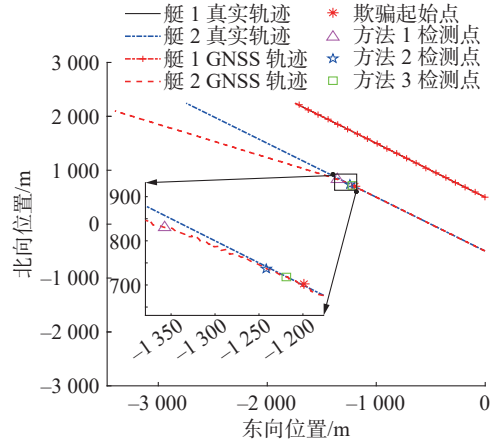
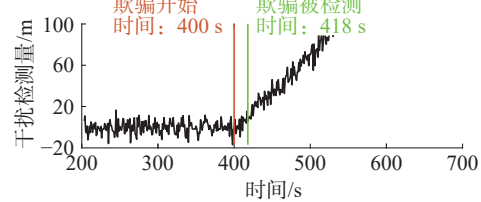
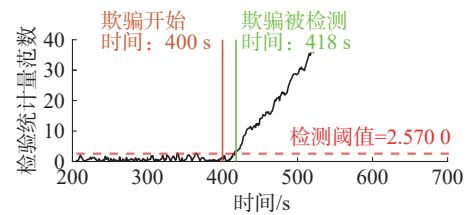


图 2 编队航行轨迹 (欺骗加速度 0.1 m/s^2)
Fig. 2 Formation flight trajectory (spoofing acceleration: 0.1 m/s^2)

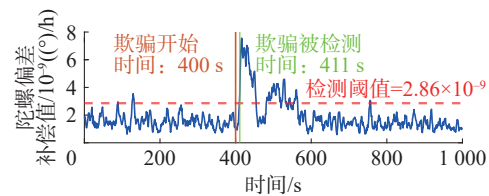


(a) 干扰检测量

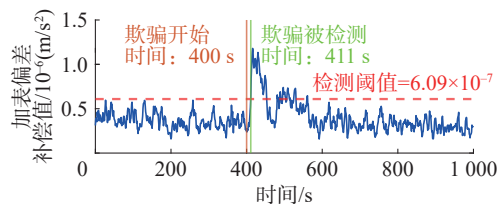


(b) 检验统计量范数

图 3 编队测距欺骗干扰检测 (欺骗加速度 0.1 m/s^2)
Fig. 3 Formation ranging spoofing interference detection (spoofing acceleration: 0.1 m/s^2)



(a) 陀螺偏差补偿值



(b) 加表偏差补偿值

图 4 GNSS/INS 松组合系统欺骗干扰检测 (欺骗加速度 0.1 m/s^2)
Fig. 4 Spoofing interference detection in GNSS/INS loosely combined systems (spoofing acceleration: 0.1 m/s^2)

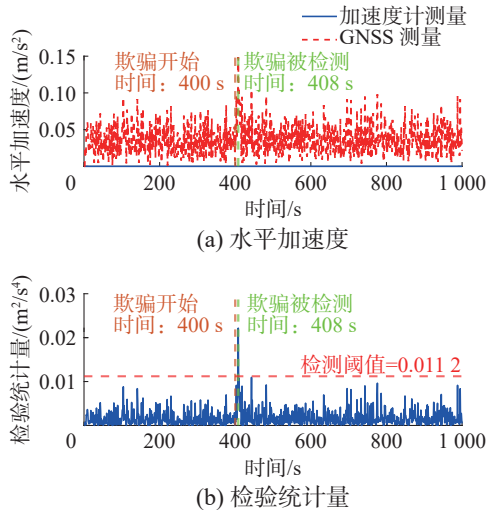


图 5 加速度一致性欺骗干扰检测 (欺骗加速度 0.1 m/s^2)

Fig. 5 Spoofing interference detection in GNSS/INS loosely combined systems (spoofing acceleration: 0.1 m/s^2)

从图 2 可以看出在欺骗开始后, 艇 2 的 GNSS 轨迹逐渐偏离其真实轨迹, 并在一段时间后先后被方法 3、方法 2 与方法 1 检测到。通过图 3 可以看出在 400 s 出现欺骗干扰后, 利用 GNSS 间接获得的舰艇间相对距离信息与数据链测距信息之间逐渐出现偏差。在此基础上, 利用本文所构建的欺骗干扰检测量 ΔD_{diff} 可以在受到 GNSS 欺骗后 18 s 检测到干扰。通过图 4~5 可以看出, 舰艇 2 的 GNSS/INS 松组合系统中的 IMU 偏差补偿量范数出现异常增量, 利用方法 2 构建的欺骗干扰检测量在受到 GNSS 欺骗后 11 s 检测到干扰; 同时艇 2 的 GNSS 间接计算的水平加速度也发生明显变化, 与加速度计测量的加速度出现较大偏差, 利用方法 3 构建的检验统计量在收到 GNSS 欺骗后 8 s 检测到干扰。这说明 3 种算法都具备对 GNSS 欺骗干扰进行检测的能力。同时, 可以看出方法 2 与方法 3 的欺骗检测速度比本文方法略快, 由于方法 2 主要基于 GNSS 的速度与位置信息对 IMU 偏差的补偿进行检测, 检测速度主要依赖于 GNSS 误差特性, GNSS 速度与位置变化较快, 导致 GNSS 与 INS 速度与位置之差快速变大, 进而在利用其作为量测量时估计的 IMU 偏差补偿量快速增长, 所以可以基于 IMU 偏差补偿量变化快速检测到 GNSS 干扰; 另一方面由于方法 3 基于加速度参数来进行欺骗干扰检测, 一旦 GNSS 受到欺骗干扰导致 GNSS 位置信息偏离真实位置, 其间接计算得到的加速度也会快速偏离加速度计测量值, 进而导致检验统计量超出阈值, 所以也可以较为快速地检测到 GNSS 干扰。而本文提出的干扰检测方法由于使用 GNSS 间接测距信息与

数据链测距信息的差值作为欺骗检测量, 其方差同时受到 GNSS 位置误差方差与数据链测距误差方差的影响, 所以欺骗检测量 ΔD_{diff} 的方差较大; 且需要欺骗误差增大到足以使检验统计量达到检测阈值时才能实现欺骗检测, 所以检测速度相对较慢。

进一步, 将欺骗加速度减小为 $[-0.005 \text{ m/s}^2, -0.005 \text{ m/s}^2]$, 其他仿真实验条件保持不变, 3 种算法的实验结果如图 6~9 所示。

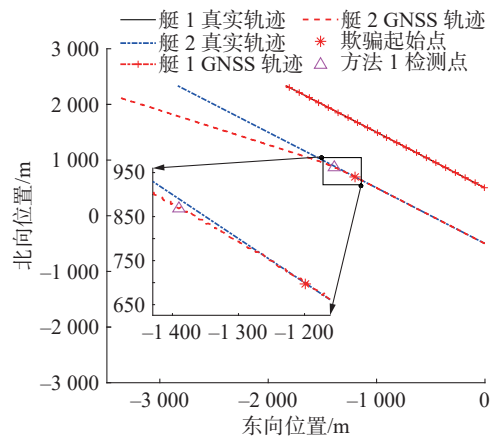


图 6 编队航行轨迹 (欺骗加速度 0.005 m/s^2)

Fig. 6 Formation flight trajectory (spoofing acceleration: 0.005 m/s^2)

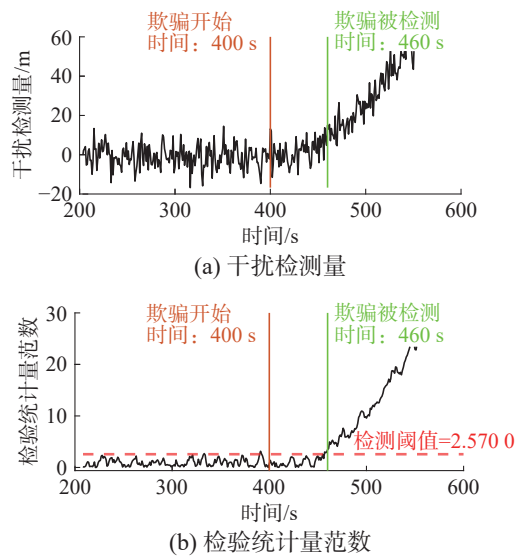
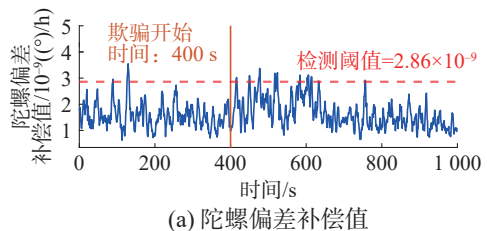


图 7 编队测距欺骗干扰检测 (欺骗加速度 0.005 m/s^2)

Fig. 7 Formation ranging spoofing interference detection (spoofing acceleration: 0.005 m/s^2)



(a) 陀螺偏差补偿值

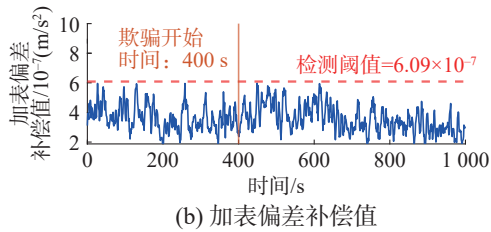
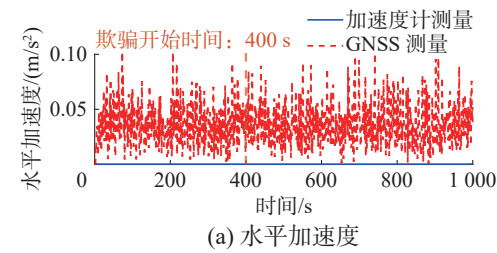
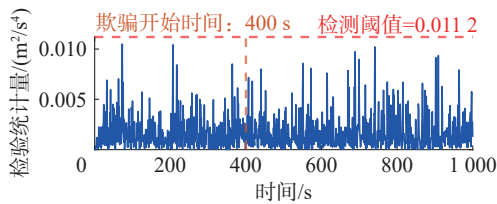


图 8 GNSS/INS 松组合系统欺骗干扰检测 (欺骗加速度 0.005 m/s²)

Fig. 8 Spoofing interference detection in GNSS/INS loosely combined systems (spoofing acceleration: 0.005 m/s²)



(a) 水平加速度



(b) 检验统计量

图 9 加速度一致性欺骗干扰检测 (欺骗加速度 0.005 m/s²)

Fig. 9 Spoofing interference detection in GNSS/INS loosely combined systems (spoofing acceleration: 0.005 m/s²)

从图 6 中可以看出,只有方法 1 在欺骗开始后成功检测到了 GNSS 欺骗干扰。从图 7 可以看出,当欺骗加速度为 0.005 m/s² 时,GNSS 间接测距信息与数据链测距信息之间虽然也出现偏差,但偏离速度相对图 3 有所减慢,从而导致在受到 GNSS 欺骗后 60 s 检测到欺骗干扰,检测时间有所变长,这是因为本文方法是基于 GNSS 与数据链测距之差进行欺骗检测,随着时间增加,欺骗轨迹逐渐偏离真实轨迹,进而引起 GNSS 间接测距逐渐偏离数据链测距。但是,即使欺骗误差变化缓慢,只要两个测距值之差达到阈值,即可成功检测到欺骗干扰。另一方面,图 8、9 中的方法 2 与方法 3 未能检测到欺骗,对于方法 2 来说,这是由于欺骗加速度过小,以至于 GNSS 欺骗速度与欺骗位置变化也过小,欺骗误差引起的 IMU 偏差补偿值要小于 GNSS 噪声引起的 IMU 偏差补偿值,所以受干扰的 IMU 误差补偿值未能突破检测阈值;且若在欺骗初期 GNSS 输出与 INS 输出差值相对较大的情况下未能检测到欺骗干扰,则随着惯导逐渐跟踪欺骗轨迹,该方法将丧失检测欺骗干扰的能力。对于方法 3 来说,由

于欺骗加速度远小于 GNSS 间接计算的加速度噪声,导致欺骗加速度直接被噪声淹没,且检验统计量几乎未发生变化,进而未能检测到该 GNSS 欺骗干扰。这验证了本文算法具备对变化非常缓慢的欺骗干扰进行检测的能力。

随后分别在欺骗加速度为 $[-0.1 \text{ m/s}^2, -0.1 \text{ m/s}^2]$, $[-0.005 \text{ m/s}^2, -0.005 \text{ m/s}^2]$, $[-0.004 \text{ m/s}^2, -0.004 \text{ m/s}^2]$ 的条件下分别对 3 种方法进行 500 次实验,并计算其平均检测延迟、检测成功率、误检率以及漏检率,成功检测到欺骗干扰的判断标准为首次检测时间在欺骗开始时间之后;误检判断标准为首次检测时间在欺骗开始时间之前;漏检判断标准为未检测到欺骗干扰;平均检测延迟为所有成功检测到欺骗干扰实验的检测延迟均值,实验结果如表 1 所示。

表 1 检测概率统计 (500 次)

Table 1 Detection probability statistics (500 times)

欺骗加速度 m/s ²	方法	平均检测延迟/s	检测成功率	误检率	漏检率
0.1	方法1	19.06	0.978	0.022	0
0.1	方法2	11.44	0.890	0.110	0
0.1	方法3	7.43	0.924	0.076	0
0.01	方法1	41.42	0.964	0.036	0
0.01	方法2	39.25	0.886	0.114	0
0.01	方法3	290.71	0.214	0.090	0.696
0.005	方法1	54.68	0.970	0.030	0
0.005	方法2	116.09	0.676	0.114	0.210
0.005	方法3	289.25	0.132	0.080	0.788
0.004	方法1	59.45	0.970	0.030	0
0.004	方法2	133.32	0.340	0.098	0.562
0.004	方法3	305.22	0.124	0.076	0.800

通过表 1 可以看出,随着欺骗加速度逐渐减小,各方法的平均检测延迟均出现不同程度的增加,误检率几乎不变,方法 2 与方法 3 的检测成功率逐渐降低,漏检率逐渐增大,而本文提出的方法 1 成功率几乎未出现明显变化,漏检率更是始终保持在 0。再对比相同加速度下不同方法的表现可以看出,在欺骗加速度较大时,相对于方法 2 与方法 3,方法 1 的检测速度较慢,但检测成功率更高,且误检率较低,而在欺骗加速度较小时,本文方法全面超越方法 2 与方法 3。这进一步印证了上面的分析,本文方法可有效检测变化非常缓慢的欺骗干扰。

在仿真实验基础上, 进一步基于车载编队真实实验数据进行算法性能分析。实验编队由 3 辆汽车组成, 各车均搭载 GNSS 设备、SINS(strap-down inertial navigation system) 设备以及数据链测距通信设备, 如图 10、11 所示。

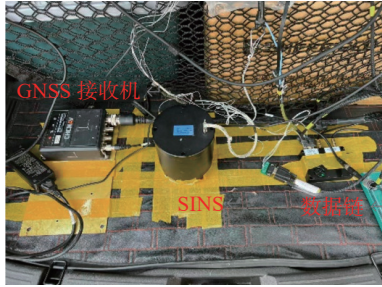


图 10 实验设备
Fig. 10 Experimental equipment



图 11 实验车辆编队
Fig. 11 Experimental vehicle formation

实验车搭载 SINS 陀螺仪零偏为 $0.05^\circ/\text{h}$, 加速度计零偏为 5 mg , 角度随机游走为 $0.1^\circ/\sqrt{\text{h}}$, 速度随机游走为 $2 \text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$, GNSS 定位误差标准差 $\sigma_{\text{GNSS}}=0.5 \text{ m}$, GNSS 测速误差标准差为 0.2 m/s 。由于数据链设备在距离 100 m 以内时的测距误差较大, 所以当数据链测距大于 100 m 时, 数据链测距误差标准差 $\sigma_{\text{ranging}}=50 \text{ m}$, 否则 $\sigma_{\text{ranging}}=100 \text{ m}$, 该参数下的置信区间分别为 $[-40.64 \text{ m}, 40.64 \text{ m}]$ 、 $[-81.27 \text{ m}, 81.27 \text{ m}]$ 。

为模拟 GNSS 欺骗式干扰, 人为对车 2 的 GNSS 数据注入欺骗误差, 模拟定速牵引式欺骗干扰。东北向欺骗加速度设为 $[-0.1 \text{ m/s}^2, 0.1 \text{ m/s}^2]$, 最大欺骗速度为 1 m/s , 欺骗开始时间为 300 s , 欺骗干扰样本检测数 $n=10$, 通过查找标准正态分布表, 显著性水平 α 为 0.01 时的临界值 $Z_{1-0.01/2}=2.57$; 信任度下降幅度 $C_{\text{down}}=0.25$, 信任度上升幅度 $C_{\text{rise}}=0.25$, 信任度上升所需的连续未检测到干扰次数 $\kappa=2$ 。通过计算无欺骗干扰情况下的陀螺与加速度计偏差补偿范数的历史统计值, 得到方法 2 的阈值分别为 $\varepsilon_{\text{th}}=1.22 \times 10^{-8} \text{ }^\circ/\text{h}$, $\nabla_{\text{th}}=5.9 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$, 实验过程中, 为降低野值对检测结果的影响, 利用滑动平均方法对 IMU 补偿值范数进行平滑, 平

滑窗口大小设为 5 s 。对于方法 3, 通过无欺骗干扰、载体稳定且虚警率 $P_{\text{fa}}=0.001$ 情况下的历史统计值来计算阈值 γ , 通过计算, $\gamma=0.0059 \text{ m}^2/\text{s}^4$ 。利用移动平均方法对其进行平滑, 平滑窗口大小设为 10 s , 其余实验参数与上述实验一致。实验结果如图 12~16 所示。

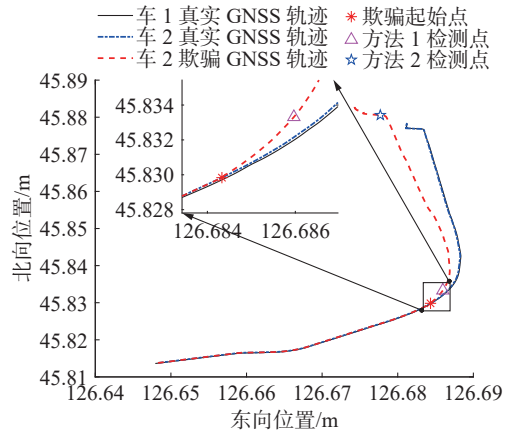


图 12 编队飞行轨迹
Fig. 12 Formation flight trajectory

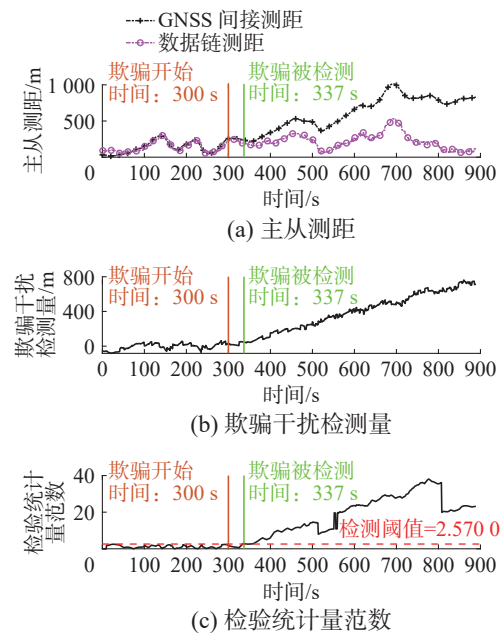
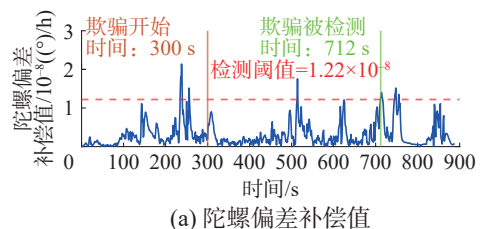


图 13 编队测距欺骗干扰检测
Fig. 13 Formation ranging spoofing interference detection



(a) 陀螺偏差补偿值

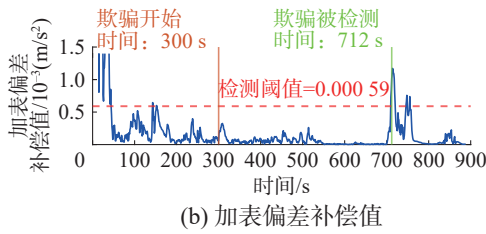


图 14 GNSS/INS 松组合系统欺骗干扰检测

Fig. 14 Spoofing interference detection in GNSS/INS loosely combined systems

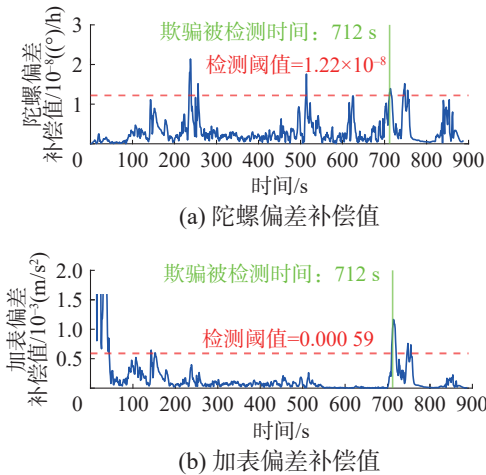


图 15 GNSS/INS 松组合系统欺骗干扰检测 (无欺骗干扰)
Fig. 15 Spoofing interference detection in GNSS/INS loosely combined systems (without spoofing interference)

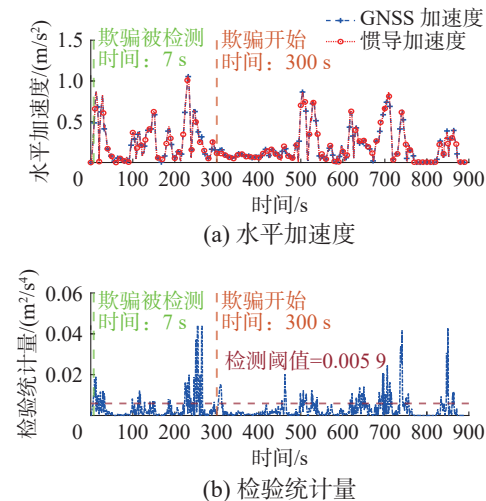


图 16 加速度一致性欺骗干扰检测 (欺骗加速度 0.1 m/s²)
Fig. 16 Spoofing interference detection in GNSS/INS loosely combined systems (spoofing acceleration: 0.1 m/s²)

从图 13 可以看出,在受到欺骗干扰后,车 2 的 GNSS 间接测距受欺骗干扰影响逐渐偏离数据链测距,进而导致欺骗干扰检测量的检验统计量 Z 逐渐增大,逼近检测阈值,欺骗检测算法在欺骗发生后第 37 s 检测到欺骗干扰。同时,可以

看出本次实验相对于仿真实验欺骗检测延时较高,这是因为本次实验采用的数据链设备测距误差较大,导致欺骗检测量方差变大,所以需要更长的时间来检测检验统计量 Z 是否符合原始分布。从图 14 可以看出,方法 2 提出的算法在欺骗开始后 412 s 检测出欺骗干扰,而从图 15 可以看出即使在没有欺骗干扰的情况下该方法依旧在对应时间检测到了欺骗干扰,这说明发生了误检,由图 12 可以看出在方法 2 检测点,车辆正在进行急转弯,经过分析可能由于在车辆进行急转弯时,角速度与线加速度变化较大,系统对 IMU 偏差的可观测性提高,能更清晰地分离 IMU 偏差与其他误差,导致 IMU 偏差补偿值激增,进而引起误检。从图 16 可以看出,方法 3 在还未出现欺骗干扰时检测到了欺骗干扰,这说明发生了误检,通过观察图中曲线,可以看出,当时车辆的水平加速度较大,且在持续增大,可能是因为车辆机动过快,且 GNSS 加速度计算存在延迟,所以无法与惯导加速度测量相一致,进而导致二者差异增大,出现误检,可以认为该算法无法适应快速机动环境。

4 结束语

本文针对现有的 GNSS 欺骗干扰检测算法未考虑编队测距信息的问题,基于假设检验的方法开展了编队 GNSS 欺骗干扰检测算法研究。在对测距设备与 GNSS 之间的测距信息差异进行分析的基础上,构建欺骗检测量及其检验统计量,并引入信任度评估方法对检测结果进行二次验证,降低误检概率。分别通过仿真实验与实际试验数据验证了本文提出的算法能够有效检测变化非常缓慢的 GNSS 欺骗式干扰,检测速度主要受测距设备测距精度以及欺骗误差变化速度影响。本文研究成果可为协同编队提供一种新的 GNSS 欺骗干扰检测方法,提高协同编队的导航安全性。

参考文献:

[1] 吕遐东, 郑爽, 陈杰. 基于改进遗传算法的舰艇编队联合防空资源预规划方法[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(3): 266–276.

LYU Xiadong, ZHENG Shuang, CHEN Jie. Pre-planning method of joint air defense resources for ship formations based on improved genetic algorithm[J]. Chinese journal of ship research, 2023, 18(3): 266–276.

[2] 王琦, 冯伟强, 孔维玮, 等. 水面有人/无人舰艇协同控制问题初探[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(17): 127–131.

- WANG Qi, FENG Weiqiang, KONG Weiwei, et al. Research on collaborative control of manned/unmanned boats on the surface[J]. *Ship science and technology*, 2024, 46(17): 127–131.
- [3] 王得朝, 金霄, 陈浙梁, 等. 中大型无人水面舰艇及编队协同发展分析[J]. *现代防御技术*, 2021, 49(4): 7–14,42.
WANG Dechao, JIN Xiao, CHEN Zheliang, et al. Analysis on the development of medium and large sized unmanned surface vehicle and formation coordinated[J]. *Modern defense technology*, 2021, 49(4): 7–14,42.
- [4] GUO Zilong, HONG Mei, SHI Jian, et al. Research on optimal allocation of surface ship formation based on index method and multi-objective programming[J]. *Ocean engineering*, 2024, 305: 117952.
- [5] LI Mingyang, MENG Kai, CHEN Jieliu, et al. Ship formation algorithm based on the leader–follower method[J]. *IEEE access*, 2023, 11: 21655–21668.
- [6] 柳晨光, 贺治卜, 初秀民, 等. 船舶编队控制综述[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(4): 10–27.
LIU Chenguang, HE Zhibo, CHU Xiumin, et al. Overview on ship formation control[J]. *Journal of traffic and transportation engineering*, 2022, 22(4): 10–27.
- [7] 褚金奎, 林木音, 王寅龙, 等. 偏振光传感器的无人船导航与编队应用[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1661–1669.
CHU Jinkui, LIN Muyin, WANG Yinlong, et al. Application of polarization sensor to unmanned surface vehicle navigation and formation[J]. *Optics and precision engineering*, 2020, 28(8): 1661–1669.
- [8] 谢启龙, 宋龙, 鲁浩, 等. 协同导航技术研究综述[J]. *航空兵器*, 2019, 26(4): 23–30.
XIE Qilong, SONG Long, LU Hao, et al. Review of collaborative navigation technology[J]. *Aero weaponry*, 2019, 26(4): 23–30.
- [9] 胡常青, 文龙贻彬, 张亚婷, 等. 基于超短基线水声定位的 USV/UUV 协同导航方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2019, 27(3): 327–333.
HU Changqing, WEN L, ZHANG Yating, et al. Cooperative navigation for USV/UUV based on ultra-short baseline positioning system[J]. *Journal of Chinese inertial technology*, 2019, 27(3): 327–333.
- [10] 黄文涛, 钟昭, 翟文华, 等. 基于分布式网络的水面舰艇编队一体化导航方法[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(2): 233–244.
HUANG Wentao, ZHONG Zhao, ZHAI Wenhua, et al. Distributed network-based integrated navigation method for surface ship formation[J]. *Chinese journal of ship research*, 2024, 19(2): 233–244.
- [11] 高扬骏, 李广云, 吕志伟. 卫星导航干扰技术的现状及展望[J]. *测绘与空间地理信息*, 2022, 45(6): 13–18.
GAO Yangjun, LI Guangyun, LYU Zhiwei. Current situation and prospect of satellite navigation interference technology[J]. *Geomatics & spatial information technology*, 2022, 45(6): 13–18.
- [12] 高扬骏. 卫星导航欺骗式干扰的关键技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2020.
GAO Yangjun. Research on key technologies of satellite navigation spoofing interference[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2020.
- [13] 李豹, 许江宁, 朱银兵, 等. 卫星导航欺骗干扰技术研究进展[J]. *海洋测绘*, 2018, 38(3): 69–72.
LI Bao, XU Jiangning, ZHU Yinbing, et al. Review of technologies for satellite navigation spoofing[J]. *Hydrographic surveying and charting*, 2018, 38(3): 69–72.
- [14] 易明疆, 李晋徽, 温志津. 无人机卫星导航欺骗式干扰技术的发展现状[J]. *舰船电子对抗*, 2023, 46(6): 44–51.
YI Mingjiang, LI Jinhui, WEN Zhijin. Development status of deception jamming technology to UAV satellite navigation[J]. *Shipboard electronic countermeasure*, 2023, 46(6): 44–51.
- [15] GENG Xingshou, GUO Yan, TANG Kanghua, et al. A covert spoofing algorithm for SINS/GNSS tightly integrated navigation system[J]. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 2025, 22: 6134–6142.
- [16] GENG Xingshou, GUO Yan, TANG Kanghua, et al. Research on covert directional spoofing method for INS/GNSS loosely integrated navigation[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2023, 72(5): 5654–5663.
- [17] MIT R, ZANGVIL Y, KATALAN D. Analyzing tesla's level 2 autonomous driving system under different GNSS spoofing scenarios and implementing connected services for authentication and reliability of GNSS data[J]. *Proceedings of the 33rd international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS+ 2020)*, 2020: 621–646.
- [18] SHEN Junjie, WON J Y, CHEN Zeyuan, et al. Drift with devil: security of multi-sensor fusion based localization in high-level autonomous driving under GPS spoofing (extended version)[C]//29th USENIX security symposium. Virtual Event: USENIX, 2020: 931–948.
- [19] 杨琼. 卫星导航接收机抗干扰技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
YANG Qiong. Research on the interference mitigation algorithm of satellite navigation receiver[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [20] 张鑫. 卫星导航欺骗干扰信号检测技术综述[J]. *全球定*

- 位系统, 2018, 43(6): 1–7.
ZHANG Xin. Overview of satellite navigation spoofing signal detection technology[J]. GNSS world of China, 2018, 43(6): 1–7.
- [21] 马祎旻, 李洪, 陆明泉. GNSS/多传感器融合定位中的欺骗检测技术[J]. 导航定位学报, 2024, 12(4): 114–122.
MA Yimin, LI Hong, LU Mingquan. Spoofing detection technologies for GNSS/multi-sensor fusion positioning[J]. Journal of navigation and positioning, 2024, 12(4): 114–122.
- [22] WANG Lei, CHEN Lei, LI Baiyu, et al. Development status and challenges of anti-spoofing technology of GNSS/INS integrated navigation[J]. Frontiers in physics, 2024, 12: 1425084.
- [23] 倪淑燕, 陈世森, 付琦玮, 等. 卫星导航欺骗干扰检测与抑制技术综述[J]. 电讯技术, 2024, 64(5): 812–820.
NI Shuyan, CHEN Shimiao, FU Qiwei, et al. Review on spoofing detection and mitigation of satellite navigation [J]. Telecommunication engineering, 2024, 64(5): 812–820.
- [24] 柯晔, 吕志伟, 邓旭, 等. GNSS/INS 组合导航系统抗欺骗式干扰技术现状与展望[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(12): 180–183.
KE Ye, LYU Zhiwei, DENG Xu, et al. Current status and prospects of anti-spoofing technology of GNSS/INS integrated navigation system[J]. Geomatics & spatial information technology, 2022, 45(12): 180–183.
- [25] LI Jing, CHEN Zhengkun, YUAN Xuelin, et al. A real-time GNSS time spoofing detection framework based on feature processing[J]. GPS solutions, 2024, 29(1): 45.
- [26] 杜云龙, 赵骁骢, 冯冀宁. 4 天线 GNSS 欺骗干扰测向算法[J]. 无线电工程, 2025, 55(2): 373–384.
DU Yunlong, ZHAO Xiaocong, FENG Jining. Four-antenna GNSS spoofing jamming direction finding algorithm[J]. Radio engineering, 2025, 55(2): 373–384.
- [27] LIU Jian, KONG Qinglei, YIN Feng, et al. An efficient GNSS spoofing detection scheme with correlator-based complex metric[J]. Digital signal processing, 2025, 158: 104942.
- [28] XU Rui, DING Mengyu, QI Ya, et al. Performance analysis of GNSS/INS loosely coupled integration systems under spoofing attacks[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4108.
- [29] KWON K C, SHIM D S. Performance analysis of direct GNSS spoofing detection with accelerometers for constant velocity[J]. International journal of control, automation and systems, 2022, 20(8): 2749–2758.
- [30] VINOJ V S, LALU V. INS aided spoofing detection of high dynamic GNSS receiver for launch vehicle applications: a loosely coupled approach[J]. Advances in space research, 2024, 74(6): 2814–2829.

作者简介:



徐贵鹏, 博士研究生, 主要研究方向为协同导航与 GNSS 欺骗检测。
E-mail: 18846013661@163.com。



刘奇峰, 硕士研究生, 主要研究方向为惯性卫星组合导航欺骗检测。
E-mail: 1289484477@qq.com。



李倩, 教授, 主要研究方向为惯性导航、组合导航以及协同导航技术。主持国家自然科学基金项目 3 项、黑龙江省优秀青年自然科学基金项目 1 项。获省部级科技奖励一等奖 2 项、二等奖 2 项。E-mail: liqianheu@163.com。