

引用格式:郭妍,曹聚亮,唐康华,等. GPS/INS组合导航终端的全向位置驱离算法研究[J]. 信息对抗技术, 2024, 3(3):79-86. GUO Yan, CAO Juliang, TANG Kanghua, et al. Research on omnidirectional position deportation algorithm of GPS/INS integrated navigation terminal[J]. Information Countermeasure Technology, 2024, 3(3):79-86. (in Chinese)]

GPS/INS 组合导航终端的全向位置驱离算法研究

郭妍*, 曹聚亮, 唐康华, 耿兴寿

(国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要 随着微惯性导航系统技术的发展,越来越多的无人平台装备了 GPS/INS 组合导航终端并具备了一定的抗欺骗能力,但现有的卫星导航欺骗方法难以满足对欺骗目标任意方向的位置驱离需求。为解决这一问题,提出了一种 GPS/INS 组合导航终端的全向位置驱离算法,可用于对非法无人平台管控的场景。该方法以卫星欺骗信号的设计为突破口,首先分析了卫星导航欺骗对组合导航位置和状态参数的影响,接着将卫星导航欺骗对组合导航状态参数的影响量作为求取欺骗信号的约束条件,进而确定位置驱离所需卫星欺骗信号的欺骗量,接着利用确定的欺骗量建立全向位置驱离模型,最终利用建立的模型生成对应的欺骗信号实现对组合导航终端的全向位置驱离任务。试验验证了本文设计的算法能够实现对组合导航终端 360°任意方向的位置驱离。

关键词 导航欺骗;全向位置驱离;卫星欺骗信号;GPS/INS 组合导航;导航对抗

中图分类号 U 228.3

文章编号 2097-163X(2024)03-0079-08

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2024.03.005

Research on omnidirectional position deportation algorithm of GPS/INS integrated navigation terminal

GUO Yan*, CAO Juliang, TANG Kanghua, GENG Xingshou

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract With the development of micro-inertial navigation system technology, more and more unmanned platforms are equipped with GPS/INS integrated navigation terminal and have certain anti-spoofing capabilities. But the existing satellite navigation spoofing methods are difficult to meet the demand for spoofing targets in any direction. To solve this problem, an omnidirectional position deportation algorithm for GPS/INS integrated navigation terminal was proposed, which could be used in the scene of illegal unmanned platform control. This method takes the design of satellite spoofing signal as the breakthrough point, firstly, the influence of satellite navigation spoofing on the position and state parameters of integrated navigation was analyzed; secondly, the influence of satellite navigation spoofing on the state parameters of integrated navigation was taken as the constraint condition to obtain the spoofing signal; thirdly, the spoofing amount of satellite spoofing signal required for position deportation was determined; fourthly, the omnidirectional position deportation model was estab-

lished by using the determined spoofing amount; finally, the corresponding spoofing signal was generated by using the established model to realize the omnidirectional position deportation task of integrated navigation terminal. The test verifies that the algorithm designed in this paper can realize the position deportation of the integrated navigation terminal in 360° arbitrary heading.

Keywords navigation spoofing; omnidirectional position deportation; satellite spoofing signals; GPS/INS integrated navigation; navigation countermeasure

0 引言

近年来,卫星导航欺骗技术在机场、石油码头和大型集会场地等需要管控无人平台的场景中得到了广泛应用,但现在越来越多的无人平台采用了 GPS/INS 组合导航系统并具有了一定的抗欺骗能力,而且目标无人平台的来向难以确定,常规的欺骗方法产生的定向驱离信号对欺骗目标的欺骗效果有限,因此需要通过对欺骗算法进行优化设计来减弱欺骗信号对组合导航各状态量的影响并实现任意方向的位置驱离任务,进而提高欺骗的成功率^[1]。

在对卫星导航终端的欺骗研究方面,现有研究主要通过引入约束条件^[2-3]、改进欺骗攻击方法^[4-5]、优化欺骗信号模型^[6]和欺骗策略^[7-8]等方法来优化和改进卫星欺骗信号,进而提高欺骗成功率。但针对卫星导航终端的欺骗方法已无法满足对组合导航终端的欺骗需求。在对组合导航终端欺骗的研究方面,文献[9]在对道路系统中的 GPS/INS 组合导航系统进行安全评估时,通过引入道路约束条件来优化欺骗算法,利用一个实时集成的 GPS/INS 欺骗器,将 GPS/INS 导航系统欺骗至预设的目标点。文献[10]分析了欺骗干扰对 GNSS/INS 组合导航系统卡尔曼滤波的误差协方差阵和新息等系统参数的影响,为组合导航系统欺骗的隐蔽性分析提供了理论参考。文献[11]通过对 GPS/INS 松组合导航模式下无人机欺骗过程的研究和探讨,验证了针对质点类型无人机卫星导航欺骗方法的有效性和正确性。文献[12]提出一种两步轨迹引导算法,可快速准确地引导配置有 GNSS/IMU 组合导航终端的目标载体沿欺骗轨迹运动且能避免欺骗检测告警。文献[13]通过仿真对比研究了阶跃式位置欺骗、斜坡式位置欺骗、阶跃式速度欺骗和斜坡式速度欺骗 4 类欺骗信号对 GNSS/INS 组合定位系统性能的影响,为通过欺骗信号设计

提高组合导航系统欺骗算法的性能提供了参考。文献[14]通过对 GPS 欺骗信号模型和欺骗攻击方式的设计,能够使自动驾驶汽车在使用多传感器融合定位系统时偏离车道或行驶至逆向车道。文献[15]提出一种能够实现无人机精确位置偏移的卫星导航欺骗控制策略。文献[16]考虑了无人机的组合导航系统、飞行控制原理和抗欺骗模块,建立了 GNSS 欺骗环境下无人机的动态模型并得出了无人机对欺骗的响应规律,进而提出了一种能够实现紧组合导航模式下的无人机定向欺骗算法。然而,在对组合导航系统的欺骗中,欺骗信号会直接影响系统的状态量,能否通过研究卫星欺骗信号对组合导航状态量的影响,进而实现对欺骗信号的优化并实现全向位置驱离的情况还未被考虑。

为了进一步了解卫星欺骗信号对组合导航系统终端状态量的影响,设计出能够实现任意方向位置驱离任务的卫星信号并实现对目标无人平台的全向位置驱离任务。本文首先建立 GPS/INS 组合导航系统模型,进而分析了卫星导航欺骗对组合导航位置和状态参数的影响,接着将卫星导航欺骗对组合导航状态参数的影响量作为求取欺骗信号的约束条件来确定卫星欺骗信号的欺骗量,最终建立全向位置驱离模型并利用确定的欺骗信号模型实现对欺骗目标的全向位置驱离任务。试验结果验证了本文提出的 GPS/INS 组合导航终端的全向位置驱离算法的有效性和正确性。

1 GPS/INS 组合导航系统模型

选取 GPS/INS 组合导航系统的状态向量和过程噪声向量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [(\delta \mathbf{P}^n)^T (\delta \mathbf{V}^n)^T (\boldsymbol{\varphi}^n)^T (\boldsymbol{\varepsilon}^b)^T (\mathbf{f}^b)^T]^T, \\ \mathbf{W} = [\mathbf{W}_a \ \mathbf{W}_g]^T \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\delta \mathbf{P}^n$ 为位置误差, $\delta \mathbf{V}^n$ 为速度误差, $\boldsymbol{\varphi}^n$ 为姿态误差, $\boldsymbol{\varepsilon}^b$ 为陀螺仪零偏, \mathbf{f}^b 为加速度计零偏,

其中, n 表示导航坐标系, b 表示载体坐标系; \mathbf{W}_a 为加速度计噪声, \mathbf{W}_g 为陀螺仪噪声。

则 GPS/INS 组合导航系统的状态方程为:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W} \quad (2)$$

式中, \mathbf{F} 为系统状态转移矩阵, \mathbf{G} 为系统噪声矩阵。

选取卫星导航系统和惯性导航系统的速度和位置之差作为观测量, 可得 GPS/INS 组合导航系统的观测方程为:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (3)$$

式中, \mathbf{H} 为量测矩阵, \mathbf{V} 为量测噪声向量。

2 卫星导航欺骗对 GPS/INS 组合导航系统的影响分析

2.1 卫星导航欺骗对组合导航系统位置的影响

假设从 k_0 时刻开始对欺骗目标实施卫星导航欺骗, 则 k 时刻目标接收机接收到的位置和速度信息为:

$$\begin{cases} \tilde{L}_k^{\text{GNSS}} = L_k^{\text{GNSS}} + \delta L_k^{\text{GNSS}} \\ \tilde{\lambda}_k^{\text{GNSS}} = \lambda_k^{\text{GNSS}} + \delta \lambda_k^{\text{GNSS}} \\ \tilde{h}_k^{\text{GNSS}} = h_k^{\text{GNSS}} + \delta h_k^{\text{GNSS}} \\ \tilde{v}_k^{\text{GNSS}_N} = v_k^{\text{GNSS}_N} + \delta v_k^{\text{GNSS}_N} \\ \tilde{v}_k^{\text{GNSS}_E} = v_k^{\text{GNSS}_E} + \delta v_k^{\text{GNSS}_E} \\ \tilde{v}_k^{\text{GNSS}_D} = v_k^{\text{GNSS}_D} + \delta v_k^{\text{GNSS}_D} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\tilde{L}_k^{\text{GNSS}}$ 、 $\tilde{\lambda}_k^{\text{GNSS}}$ 、 $\tilde{h}_k^{\text{GNSS}}$ 及 $\tilde{v}_k^{\text{GNSS}_N}$ 、 $\tilde{v}_k^{\text{GNSS}_E}$ 、 $\tilde{v}_k^{\text{GNSS}_D}$ 分别为卫星信号被欺骗情况下目标接收机接收到的纬度、经度、高度、北向速度、东向速度和地速; L_k^{GNSS} 、 λ_k^{GNSS} 、 h_k^{GNSS} 及 $v_k^{\text{GNSS}_N}$ 、 $v_k^{\text{GNSS}_E}$ 、 $v_k^{\text{GNSS}_D}$ 分别为卫星信号未被欺骗情况下目标接收机接收到的纬度、经度、高度、北向速度、东向速度和地速; δL_k^{GNSS} 、 $\delta \lambda_k^{\text{GNSS}}$ 、 δh_k^{GNSS} 及 $\delta v_k^{\text{GNSS}_N}$ 、 $\delta v_k^{\text{GNSS}_E}$ 、 $\delta v_k^{\text{GNSS}_D}$ 为在卫星信号中施加的纬度、经度、高度、北向速度、东向速度和地速欺骗偏移量。

利用卡尔曼滤波融合卫星导航和惯性导航数据即可得组合导航输出的位置误差估计向量为:

$$\delta \hat{\mathbf{P}}_k^{\text{S}} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\infty}(l, 1) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 2) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 3) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 4) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 5) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 6) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} L_k^{\text{INS}} - \tilde{L}_k^{\text{GNSS}} \\ \lambda_k^{\text{INS}} - \tilde{\lambda}_k^{\text{GNSS}} \\ h_k^{\text{INS}} - \tilde{h}_k^{\text{GNSS}} \\ v_k^{\text{INS}_N} - \tilde{v}_k^{\text{GNSS}_N} \\ v_k^{\text{INS}_E} - \tilde{v}_k^{\text{GNSS}_E} \\ v_k^{\text{INS}_D} - \tilde{v}_k^{\text{GNSS}_D} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\infty}(l, 1) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 2) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 3) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 4) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 5) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 6) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} L_k^{\text{INS}} - L_k^{\text{GNSS}} \\ \lambda_k^{\text{INS}} - \lambda_k^{\text{GNSS}} \\ h_k^{\text{INS}} - h_k^{\text{GNSS}} \\ v_k^{\text{INS}_N} - v_k^{\text{GNSS}_N} \\ v_k^{\text{INS}_E} - v_k^{\text{GNSS}_E} \\ v_k^{\text{INS}_D} - v_k^{\text{GNSS}_D} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\infty}(l, 1) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 2) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 3) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 4) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 5) \\ \mathbf{K}_{\infty}(l, 6) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \delta L_k^{\text{GNSS}} \\ \delta \lambda_k^{\text{GNSS}} \\ \delta h_k^{\text{GNSS}} \\ \delta v_k^{\text{GNSS}_N} \\ \delta v_k^{\text{GNSS}_E} \\ \delta v_k^{\text{GNSS}_D} \end{bmatrix}$$

$$= \delta \hat{\mathbf{P}}_k - \Delta \mathbf{P}_k^{\text{GNSS}} \quad (5)$$

式中, L_k^{INS} 、 λ_k^{INS} 、 h_k^{INS} 、 $v_k^{\text{INS}_N}$ 、 $v_k^{\text{INS}_E}$ 、 $v_k^{\text{INS}_D}$ 分别为惯性导航系统输出的纬度、经度、高度、北向速度、东向速度和地速, \mathbf{K}_{∞} 为稳态增益矩阵, l 的取值分别为 1, 2, 3, 且 $\delta \hat{\mathbf{P}}_k^{\text{S}} = [\delta \tilde{L}_k^{\text{S}} \ \delta \tilde{\lambda}_k^{\text{S}} \ \delta \tilde{h}_k^{\text{S}}]^T$; $\delta \hat{\mathbf{P}}_k$ 为组合导航系统在卫星信号未被欺骗情况下正确的位置滤波估计向量, 且 $\delta \hat{\mathbf{P}}_k = [\delta \tilde{L}_k \ \delta \tilde{\lambda}_k \ \delta \tilde{h}_k]^T$; $\Delta \mathbf{P}_k^{\text{GNSS}}$ 为由于卫星导航欺骗所引起的位置向量偏移量, 且 $\Delta \mathbf{P}_k^{\text{GNSS}} = [\Delta L_k^{\text{GNSS}} \ \Delta \lambda_k^{\text{GNSS}} \ \Delta h_k^{\text{GNSS}}]^T$ 。

将卫星信号被欺骗情况下的组合导航滤波估计出的位置误差反馈到惯性导航结果中, 可得 k 时刻反馈校正后的位置向量为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k^{\text{S,C}} &= \mathbf{P}_k^{\text{INS}} - \delta \hat{\mathbf{P}}_k^{\text{S}} \\ &= \mathbf{P}_k^{\text{INS}} - (\delta \hat{\mathbf{P}}_k - \Delta \mathbf{P}_k^{\text{GNSS}}) \\ &= (\mathbf{P}_k^{\text{INS}} - \delta \hat{\mathbf{P}}_k) + \Delta \mathbf{P}_k^{\text{GNSS}} \\ &= (\mathbf{P}_k^{\text{INS}})^* + \Delta \mathbf{P}_k^{\text{GNSS}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{P}_k^{\text{S,C}}$ 为卫星信号被欺骗情况下组合导航反馈校正后输出的位置向量, 且 $\mathbf{P}_k^{\text{S,C}} = [L_k^{\text{S,C}} \ \lambda_k^{\text{S,C}} \ h_k^{\text{S,C}}]^T$; $\mathbf{P}_k^{\text{INS}}$ 为惯性导航系统输出的位置向量; $(\mathbf{P}_k^{\text{INS}})^*$ 为卫星信号未被欺骗情况下经过正确组合导航反馈校正后输出的位置向量, 且 $(\mathbf{P}_k^{\text{INS}})^* = [(L_k^{\text{INS}})^* \ (\lambda_k^{\text{INS}})^* \ (h_k^{\text{INS}})^*]^T$ 。

同理可得 $k+n$ 时刻反馈校正后的输出结果:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}} &= (\mathbf{P}_{k+n}^{\text{INS}})^* + \Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}} = (\mathbf{P}_{k+n}^{\text{INS}})^* \\ &+ \sum_{i=0}^n \mathbf{K}_{\infty}(l, i) [1 - \mathbf{K}_{\infty}(l, l)]^i \delta \mathbf{P}_{k+n-i-k_0}^{\text{GNSS}} \end{aligned} \quad (7)$$

则欺骗过程中组合导航系统的位置向量欺骗量为:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}} &= \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}} - (\mathbf{P}_{k+n}^{\text{INS}})^* \\ &= \sum_{i=0}^n \mathbf{K}_{\infty}(l, l) [1 - \mathbf{K}_{\infty}(l, l)]^i \\ &\quad \cdot \delta \mathbf{P}_{k+n-i-k_0}^{\text{GNSS}}\end{aligned}\quad (8)$$

2.2 卫星导航欺骗对组合导航状态参数的影响

设在 k 时刻, 卫星信号未被欺骗时, 组合导航系统的状态估计向量为:

$$\hat{\mathbf{X}}_k^+ = \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k^-) \quad (9)$$

式中, \mathbf{H}_k 为观测矩阵, \mathbf{Z}_k 为观测向量, $\hat{\mathbf{X}}_k^-$ 为状态预测向量, \mathbf{K}_k 为卡尔曼滤波增益矩阵。

当卫星信号被欺骗时, 观测向量为:

$$\tilde{\mathbf{Z}}_k = \mathbf{Z}_k + \Delta \mathbf{Z}_k \quad (10)$$

式中, $\Delta \mathbf{Z}_k$ 为观测向量中的欺骗偏移量。

于是, 卫星信号被欺骗后, k 时刻组合导航系统的状态估计向量为:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{X}}_k^+ &= \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\tilde{\mathbf{Z}}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k^-) \\ &= \hat{\mathbf{X}}_k^+ + \mathbf{K}_k \Delta \mathbf{Z}_k\end{aligned}\quad (11)$$

在 $k+1$ 时刻, 卫星信号未被欺骗时, 组合导航系统的状态估计向量为:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{X}}_{k+1}^+ &= \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^-) \\ &= \Phi_k \hat{\mathbf{X}}_k^+ + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \Phi_k \hat{\mathbf{X}}_k^+)\end{aligned}\quad (12)$$

式中, Φ_k 为状态转移矩阵。

则卫星信号被欺骗后, $k+1$ 时刻组合导航系统的状态估计向量为:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{X}}_{k+1}^+ &= \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\tilde{\mathbf{z}}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^-) \\ &= \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^+ + \mathbf{K}_{k+1} \Delta \mathbf{Z}_{k+1} \\ &\quad + (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}) \Phi_k \mathbf{K}_k \Delta \mathbf{Z}_k\end{aligned}\quad (13)$$

式中, \mathbf{I} 表示单位矩阵。

同理递推, 可得卫星信号被欺骗后, $k+n$ 时刻组合导航系统的状态估计向量为:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{X}}_{k+n}^+ &= \hat{\mathbf{X}}_{k+n}^- + \mathbf{K}_{k+n} (\tilde{\mathbf{Z}}_{k+n} - \mathbf{H}_{k+n} \hat{\mathbf{X}}_{k+n}^-) \\ &= \hat{\mathbf{X}}_{k+n}^+ + \sum_{i=0}^n \{ \mathbf{B}! \}^{\text{sgn}(i)} \mathbf{K}_{k+n-i} \Delta \mathbf{Z}_{k+n-i}\end{aligned}\quad (14)$$

式中, $\mathbf{B}! = [(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+n} \mathbf{H}_{k+n}) \Phi_{k+n-1}] \cdots [(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}) \Phi_k]$ 。

于是可得由于卫星导航欺骗所造成的状态估计向量误差为:

$$\begin{aligned}\delta \hat{\mathbf{X}}_{k+n}^+ &= \hat{\mathbf{X}}_{k+n}^+ - \hat{\mathbf{X}}_{k+n}^- \\ &= \sum_{i=0}^n \{ \mathbf{B}! \}^{\text{sgn}(i)} \mathbf{K}_{k+n-i} \Delta \mathbf{Z}_{k+n-i}\end{aligned}\quad (15)$$

3 全向位置驱离算法设计

由上节可知, 通过卫星欺骗信号对组合导航的位置进行欺骗时会对组合导航系统的状态量产生影响, 所以为了降低卫星导航欺骗对组合导航系统状态量的影响并实现对不同来向目标的驱离任务, 提高欺骗的成功率, 需要对欺骗信号进行优化, 于是采用斜坡式欺骗信号, 即:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{Z}_k &= [\delta L_k^{\text{GNSS}} \quad \delta \lambda_k^{\text{GNSS}} \quad \delta h_k^{\text{GNSS}}]^T \\ &= [K_L(k - k_0) \quad K_\lambda(k - k_0) \quad K_h(k - k_0)]^T\end{aligned}\quad (16)$$

式中, K_L 、 K_λ 、 K_h 分别为纬度、经度和高度方向上施加欺骗偏移量的斜率。

建立如下约束条件:

$$\delta \hat{\mathbf{X}}_{k+n}^+ \leq \mathbf{T} \quad (17)$$

式中, \mathbf{T} 为包含速度误差、姿态误差、陀螺和加速度计零偏误差的检测阈值矩阵, 且 $\mathbf{T} = [\mathbf{T}_v \quad \mathbf{T}_\varphi \quad \mathbf{T}_\epsilon \quad \mathbf{T}_v]^T$ 。

则全向位置驱离的方位角为:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(1)}{\Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(2)}\right) \quad (18)$$

由式(18)可知, 只需要通过对欺骗信号进行设计来改变纬度和经度方向欺骗量的值, 即可达到全向位置驱离效果。当经度方向的欺骗量为 0 时, 通过对纬度方向的欺骗信号的正负进行调节可得驱离的方位角为: $\phi_2 = \pm 90^\circ$; 当纬度方向的欺骗量为 0 时, 通过对经度方向的欺骗信号的正负进行调节可得驱离的方位角为: $\phi_3 = \pm 180^\circ$ 。

综上, 全向位置驱离的方位角为:

$$\phi = \begin{cases} \pm 90^\circ, & \Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(1) \neq 0 \text{ 和 } \Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(2) = 0 \\ \pm 180^\circ, & \Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(1) = 0 \text{ 和 } \Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(2) \neq 0 \\ \arctan(\Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(1)/\Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(2)), & \Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(1) \neq 0 \text{ 和 } \Delta \mathbf{P}_{k+n}^{\text{S,C}}(2) \neq 0 \end{cases} \quad (19)$$

4 试验验证

利用本文算法对车载组合导航系统进行欺骗试验来验证本文算法的有效性。试验中所用的设备如图 1 所示, 主要包括 GPS/INS 组合导航

终端、高精度纯惯性导航系统和欺骗信号发生器3部分。当GPS/INS组合导航终端被欺骗后,将高精度纯惯性导航系统当作参考系统。GPS/INS组合导航终端所用的INS的频率为200 Hz,GNSS的频率为10 Hz。陀螺零偏为 $0.5^{\circ}/\text{h}$,陀螺零偏噪声为 $0.15^{\circ}/\sqrt{\text{h}}$,加速度计零偏为 0.15 mg ,加速度计零偏噪声为 $21\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

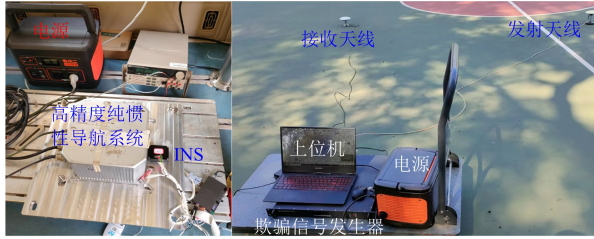


图1 试验设备照片

Fig. 1 Photos of test equipment

图2~11为一次全向位置驱离试验的试验结果,其中图2为卫星导航欺骗过程中施加的位置欺骗偏移量,图3为GPS/INS组合导航终端被欺骗后的导航定位效果。由图2~3可知,本文设计的算法能够实现对组合导航系统终端的位置驱离任务。

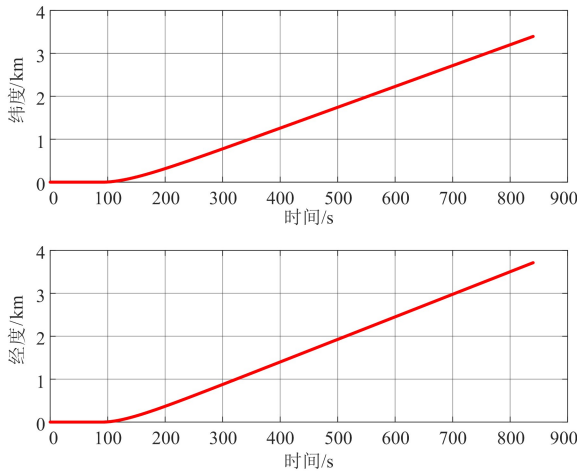


图2 卫星导航欺骗情况下的位置欺骗偏移量曲线

Fig. 2 Position offset curve in the case of satellite navigation spoofing

图4和图5分别为GPS/INS组合导航终端被欺骗前后的姿态测量值和卫星导航欺骗所引起的姿态角误差;图6和图7分别为GPS/INS组合导航终端被欺骗前后的速度测量值和卫星导航欺骗所引起的速度误差;图8和图9分别为GPS/INS组合导航终端被欺骗前后的陀螺零偏

测量值和卫星导航欺骗所引起的陀螺零偏误差;图10和图11分别为GPS/INS组合导航终端被欺骗前后的加速度计零偏测量值和卫星导航欺骗所引起的加速度计零偏误差。

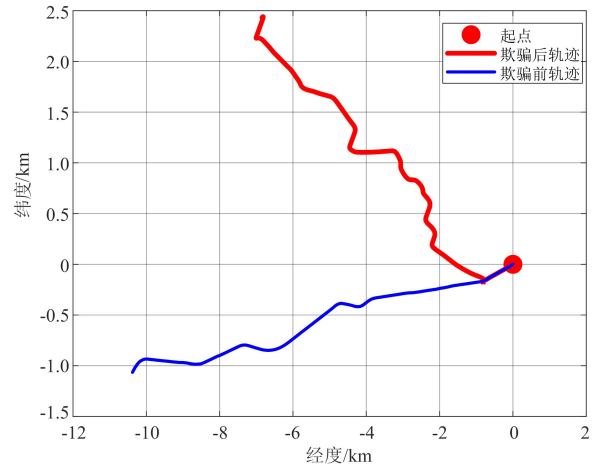


图3 卫星导航欺骗前后的导航轨迹对比

Fig. 3 Comparison of navigation trajectory before and after satellite navigation spoofing

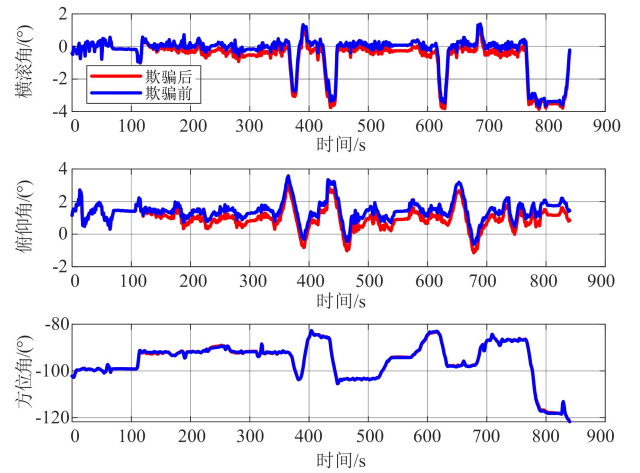


图4 卫星导航欺骗前后的姿态对比曲线

Fig. 4 Comparison of attitude curve before and after satellite navigation spoofing

由图4~11可知,利用本文设计的算法对欺骗目标进行位置驱离时,由于卫星导航欺骗所造成的姿态误差、速度误差、陀螺零偏误差和加速度计零偏误差都维持在较小的范围以内,且在组合导航终端被欺骗后,在误差允许的范围内,组合导航的姿态和速度仍与未被欺骗前的姿态和速度相似,即本文算法能够有效减弱卫星导航欺骗对组合导航系统状态参数的影响,避免惯性导航系统辅助的基于状态参数欺骗检测算法的欺骗检测,进而实现对GPS/INS组合导航终端

的位置驱离任务,初步证明了算法的有效性和正确性。

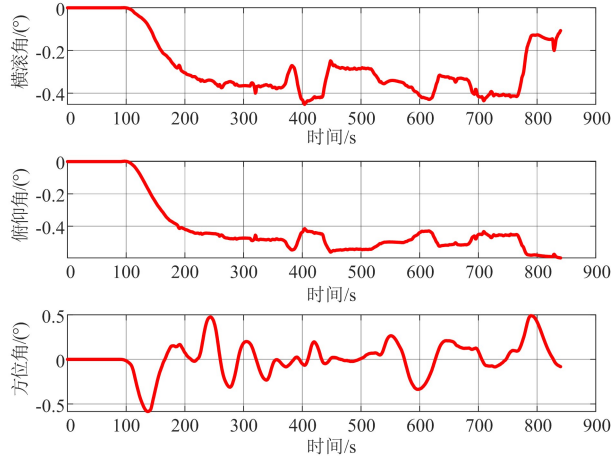


图 5 卫星导航欺骗引起的姿态角误差曲线

Fig. 5 Attitude error curve caused by satellite navigation spoofing

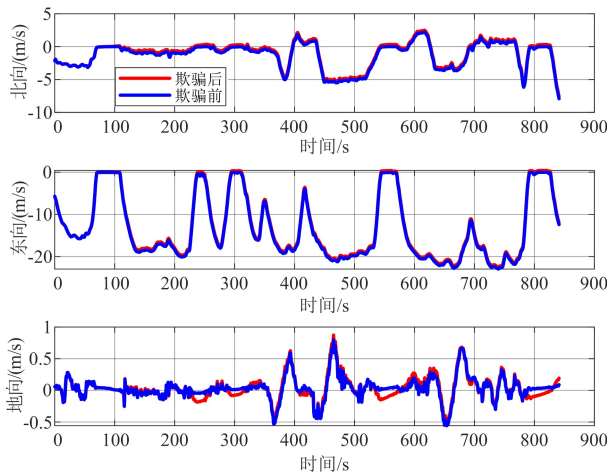


图 6 卫星导航欺骗前后的速度对比曲线

Fig. 6 Comparison of velocity curve before and after satellite navigation spoofing

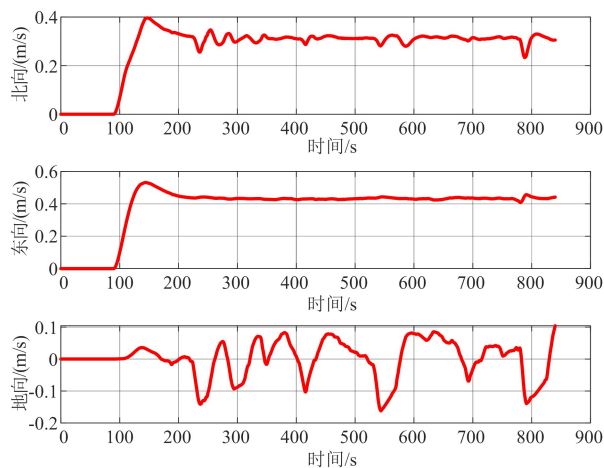


图 7 卫星导航欺骗引起的速度误差曲线

Fig. 7 Velocity error curve due to satellite navigation spoofing

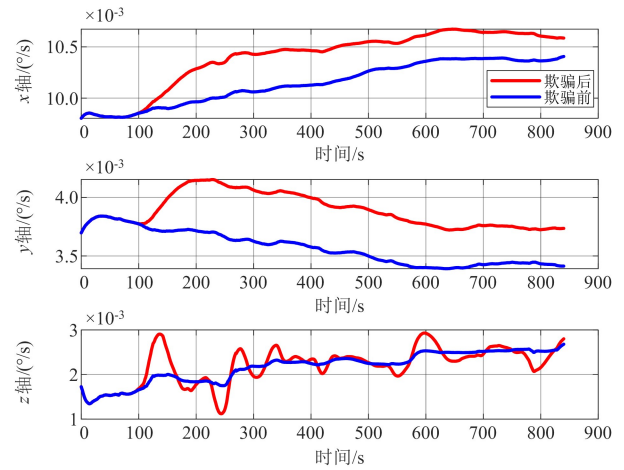


图 8 卫星导航欺骗前后的陀螺零偏对比曲线

Fig. 8 Comparison of gyroscope zero bias curve before and after satellite navigation spoofing

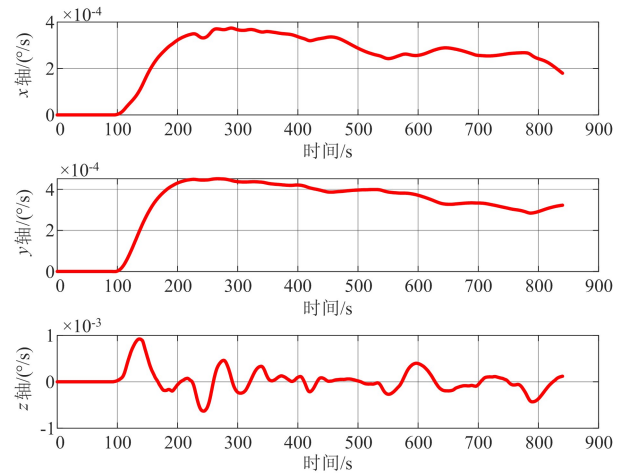


图 9 卫星导航欺骗引起的陀螺零偏误差

Fig. 9 Gyroscope zero bias error caused by satellite navigation spoofing

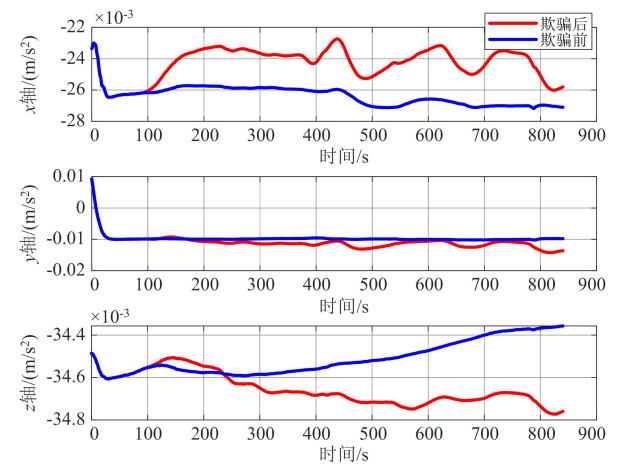


图 10 卫星导航欺骗前后的加速度计零偏对比曲线

Fig. 10 Comparison of accelerometer zero bias curve before and after satellite navigation spoofing

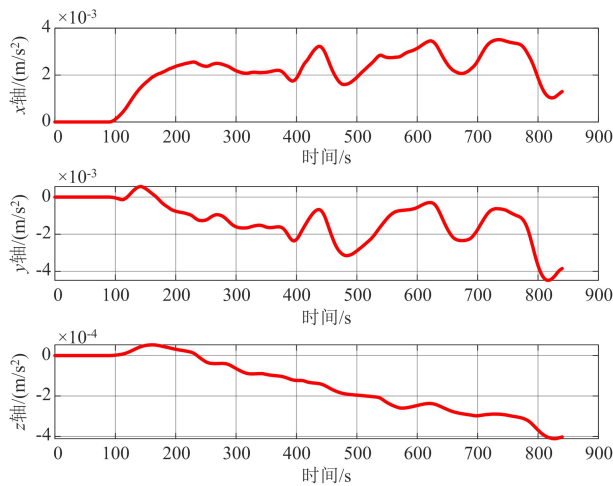


图 11 卫星导航欺骗引起的加速度计零偏误差

Fig. 11 Accelerometer zero bias error caused by satellite navigation spoofing

为了进一步验证算法的有效性,共进行了10次位置驱离试验,位置驱离的角度统计值见表1所列。由表1可知,位置驱离误差绝对值的均值为 1.91° ,标准差为 0.56° 。

表 1 全向位置驱离试验结果

Tab. 1 Results of omnidirectional position deportation test

组号	设定驱离 角度/ $^\circ$	实际驱离 角度/ $^\circ$	误差绝对 值/ $^\circ$
1	15	13.77	1.23
2	30	27.83	2.17
3	45	42.44	2.56
4	60	57.73	2.27
5	75	73.67	1.33
6	105	106.33	1.33
7	120	122.27	2.27
8	135	137.56	2.56
9	150	152.17	2.17
10	165	166.23	1.23

5 结束语

本文研究了一种GPS/INS组合导航终端的全向位置驱离算法。该算法首先建立GPS/INS组合导航系统模型,进而分析了卫星导航欺骗对组合导航位置和状态参数的影响,接着将卫星导航欺骗对组合导航状态参数的影响作为求取欺骗信号的约束条件来确定卫星欺骗信号的欺骗

量,最终建立全向位置驱离模型并利用确定的欺骗信号实现对组合导航系统的全向位置驱离任务。组合导航终端欺骗试验表明,在全向位置驱离过程中,卫星导航欺骗所造成的姿态误差、速度误差、陀螺零偏误差和加速度计零偏误差都能够通过约束条件的设置使其小于欺骗检测阈值,有效减弱了卫星导航欺骗对组合导航系统状态参数的影响,且全向位置驱离误差绝对值的均值为 1.91° ,标准差为 0.56° 。因此,本文设计的GPS/INS组合导航终端的全向位置驱离算法能够实现对目标GPS/INS组合导航终端的全向位置驱离任务。试验结果为推广对各类型无人平台GPS/INS组合导航终端的位置驱离提供了理论依据和现实参考。

参考文献

- [1] WU Z J, ZHANG Y, YANG Y M, et al. Spoofing and anti-spoofing technologies of global navigation satellite system: a survey[J]. IEEE Access, 2020, 8: 165444-165496.
- [2] ZENG K X, SHU Y C, LIU S N, et al. A practical GPS location spoofing attack in road navigation scenario[C]//Proceedings of the 18th International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. [S.l.]:ACM, 2017: 85-90.
- [3] ZENG K X, LIU S N, SHU Y C, et al. All your GPS are belong to us: towards stealthy manipulation of road navigation systems[C]//Proceedings of the 27th USENIX Conference on Security Symposium. [S.l.]: ACM, 2018: 1527-1544.
- [4] SANDERS C, WANG Y Q. Localizing spoofing attacks on vehicular GPS using vehicle-to-vehicle communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12):15656-15667.
- [5] PARDHASARADHI B, SRIHARI P, APARNA P. Spoofer-to-target association in multi-spoofing multi-target scenario for stealthy GPS spoofing[J]. IEEE Access, 2021, 9: 108675-108688.
- [6] WANG F L, HONG Y, BAN X G. Infrastructure-enabled GPS spoofing detection and correction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(12):13878-13892.
- [7] MA C, YANG J, CHEN J Y, et al. Effects of a navigation spoofing signal on a receiver loop and a UAV spoofing approach[J]. GPS Solutions, 2020, 24:76.
- [8] HE J Y, GONG X. Resilient path planning of unmanned aerial vehicles against covert attacks on ultra-

- wideband sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(11):10892-10900.
- [9] NARAIN S, RANGANATHAN A, NOUBIR G. Security of GPS/INS based on-road location tracking systems[C]//Proceedings of 2019 IEEE Symposium on Security and Privacy. [S.l.]:IEEE, 2019: 587-601.
- [10] LIU Y, LI S H, FU Q W, et al. Impact assessment of GNSS spoofing attacks on INS/GNSS integrated navigation system[J]. Sensors, 2018, 18(5):1433.
- [11] GUO Y, WU M P, TANG K H, et al. Covert spoofing algorithm of UAV based on GPS/INS-integrated navigation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6557-6564.
- [12] GAO Y J, LYU Z W, ZHANG L D. Two-step trajectory spoofing algorithm for loosely coupled GNSS/IMU and NIS sequence detection[J]. IEEE Access, 2019, 7: 96359-96371.
- [13] 张超, 吕志伟, 张伦东, 等. 欺骗干扰对 GNSS/INS 系统定位性能的影响[J]. 导航定位学报, 2022, 10(4): 20-28.
- ZHANG Chao, LYU Zhiwei, ZHANG Lundong, et al. Influence analysis of spoofing interference on positioning performance of GNSS/INS system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2022, 10(4): 20-28. (in Chinese)
- [14] SHEN J J, WON J Y, CHEN Z Y, et al. Drift with devil: security of multi-sensor fusion based localization in high-level autonomous driving under GPS spoofing [C]//Proceedings of the 29th USENIX Conference on Security Symposium. [S.l.]:ACM, 2020: 931-948.
- [15] LU S H, GUO Y, SHANG H, et al. Spoofing control strategy for precise position offset based on INS/GNSS tightly coupled navigation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 103585-103600.
- [16] GAO Y J, LI G Y. A GNSS instrumentation covert directional spoofing algorithm for UAV equipped with tightly-coupled GNSS/IMU [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 8501413.

作者简介

郭妍

女, 1990 年生, 博士, 副教授, 研究方向为卫星导航应用和无人机控制

E-mail: guoyan010417@126.com



曹聚亮

男, 1976 年生, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 研究方向为惯性导航、卫星导航和重力测量

E-mail: cjvl@163.com



唐康华

男, 1976 年生, 博士, 副研究员, 研究方向为卫星导航应用和组合导航

E-mail: tt_kanghua@hotmail.com



耿兴寿

男, 1994 年生, 博士研究生, 研究方向为卫星导航应用和组合导航

E-mail: 2099349490@qq.com



责任编辑 殷文卓