

无人农机组合导航系统自适应零速修正技术研究

刘剑雄¹ 梁永欣¹ 金浩² 晏飞² 张涛¹ 李玲美²

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500; 2. 云南省烟草公司曲靖市公司, 曲靖 655000)

摘要: 针对农机停车期间定位导航系统精度低的问题, 本文提出一种包含速度约束与航向角约束的自适应零速修正算法, 并在自主研发的小型农机上搭建单天线 BDS/INS 组合导航系统验证所提方法可行性与优势。为确保在进行零速修正时农机处于停车状态, 通过实测数据分析, 设计基于 x 轴(右方)加速度和 z 轴(上方)角速度方差的零速检测器, 并根据零速持续时间窗口长度剔除大量离散分布但持续时间较短的误检零速区间。由于单天线组合系统在静止时无法提供有效的航向角估计值, 则将进入停车时刻的航向角作为对应停车阶段零速修正航向角测量方程输入值; 且为降低异常 BDS 定位量测值对系统的影响, 引入 Sage-Husa 自适应滤波对其定位噪声实时估计。通过田间车载试验表明, 本文零速检测方法准确率较高, 符合农机实际行驶状态; 在 BDS 可用期间, 自适应零速修正可将航向角、速度与定位的精度分别提升 99.3%、93.3% 与 50%, 而在受干扰期间, 定位精度提升大于 90%; 在 BDS 中断 60 s 期间, 纯 INS 导航误差快速增大导致失效, 而零速修正可长时间维持 INS 高精度, 并满足丘陵山区无人农机作业精度要求。本文方法可提高单天线 BDS/INS 组合导航系统在复杂工况下作业的精度以及抗干扰性, 也可为其他无人农机研究提供参考。

关键词: 无人农机; 组合导航; 零速修正; 零速检测器; Sage-Husa 自适应滤波; 时间窗口

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)06-0024-12

OSID:



Adaptive Zero-velocity Update Technology for Integrated Navigation System of Unmanned Agricultural Machinery

LIU Jianxiong¹ LIANG Yongxin¹ JIN Hao² YAN Fei² ZHANG Tao¹ LI Lingmei²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Yunnan Qujing Tobacco Company, Qujing 655000, China)

Abstract: Aiming at the problem of low accuracy of positioning and navigation system during the parking of agricultural machinery, an adaptive zero velocity update algorithm containing velocity constraints and heading angle constraints was proposed, and a single-antenna BDS/INS integrated system on a self-developed small agricultural machinery was built to verify the feasibility and advantages of the proposed method. In order to ensure that the agricultural machinery remained in a stationary state during zero velocity update, a zero-velocity detector based on the acceleration of x axis (right side) and the angular velocity variance of z axis (top side) was designed through the analysis of the measured data, and a large number of misdetections zero-velocity intervals that were discretely distributed but with short durations were eliminated based on the length of the zero-velocity duration window. Due to the inability of a single antenna combination system to provide a valid estimated value of heading angle at rest, the heading angle at the moment of parking would be used as the input value for the zero-velocity update heading angle measurement equation during the corresponding parking phase. And in order to reduce the influence of the abnormal BDS positioning observations on the integrated system, Sage-Husa adaptive filtering was introduced to estimate its positioning noise in real time. The field experiments showed that the zero-velocity detection method had a high accuracy rate, which was in line with the actual driving state of agricultural machinery. During periods of BDS availability, adaptive zero velocity update improved the accuracy of heading angle, velocity, and positioning by approximately 99.3%, 93.3%, and 50%, respectively. When BDS signals were disturbed, the positioning accuracy improvement can exceed 90%.

收稿日期: 2025-04-09 修回日期: 2025-09-30

基金项目: 云南省重点研发计划项目(202103AN080001)和云南省烟草公司曲靖市公司科技计划项目(2024YNQJKJ07)

作者简介: 刘剑雄(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: jxlkmust@163.com

During a 60-second BDS outage, pure INS navigation errors grew rapidly and led to failure, whereas zero velocity update maintained high INS accuracy for an extended period, meeting the precision requirements for unmanned agricultural machinery operations in hilly and mountainous areas. The research result demonstrated that the method can improve the accuracy and anti-interference of single antenna BDS/INS integrated navigation system under complex working conditions, and it was also helpful to provide references for other unmanned agricultural machinery research.

Key words: unmanned agricultural machinery; integrated navigation; zero-velocity update; zero-velocity detector; Sage - Husa adaptive filtering; duration window

0 引言

随着 2020 年 7 月 31 日我国自主开发和建设的北斗卫星导航系统(BDS)全面组网建成,并正式提供全球无源定位导航授时服务,基于高精度 BDS 的农业产业与研究因此得以快速发展^[1-4]。成熟的卫星定位技术也推动了高精度 BDS/INS 组合导航系统在我国无人农机中的广泛应用,极大促进农业生产效率^[5-8];并且如何提升组合导航系统在复杂工况与干扰环境下的精度和稳定性,已然成为当下无人农机领域研究重点之一^[9-12]。小微型农机作为适用于丘陵山区的主流机型^[13],由于尺寸小,不易使用双天线 BDS/INS 组合系统,而单天线组合系统在载体停车时无法通过拟合行驶路线估计航向角^[14-15],在农机较大振动的情况下,其航向角误差会快速发散,同时速度和定位的精度也会下降;假如因遮挡、干扰等原因导致 BDS 失效,组合系统则退化为纯 INS 导航,且其误差在振动工况下迅速增大^[16]。然而,根据载体停车时已知的固有运动特征,可使用零速修正技术抑制 INS 误差增大,进而较大程度地减小系统误差^[17-19]。

在基于 Kalman 滤波的组合导航系统中,进行零速修正的前提是通过零速检测确定载体处于停车状态,常用的零速检测方法有 3 种,基于速度或定位的零速检测方法^[17,20]、基于加速度和角速度幅值以及广义似然比的零速检测方法^[21-22]与基于加速度和角速度方差的零速检测方法^[23]。第 1 种方法要求卫星导航信号持续可用,或需要额外测速传感器,因此应用场合与成本受限制,不易推广;第 2、3 种方法要求 INS 惯性测量单元(IMU)在载体行驶与停车时的振动状态和输出信号有较大差异,否则容易导致误判,引起系统更大的误差^[24]。为提高检测器在 BDS 信号中断或受干扰期间的精度,需采用后 2 种方法,但汽油机或柴油机驱动的农机自身具有较大振动^[25-26],尤其是小微型农机,易出现低速行驶作业时 IMU 输出幅值相比怠速时没有明显差异,从而导致常规零速检测方法失效。零速修正通常有 2 种方式,在零速检测估计载体为停车状态的时刻,将零

速度作为 Kalman 滤波中速度量测方程的输入,即零速度修正(ZUPT);由于停车时载体航向角也不会发生变化,也可以构建零角速度输入的航向角量测方程,即零角速度修正(ZARU),通过抑制单天线组合系统速度与航向角的误差发散降低定位误差^[17,27-29]。零速修正在抑制车载惯性导航系统误差发散方面具有重要作用,但其在干扰环境下用于提升农机组合系统精度的相关研究还较少,具体性能还有待考究。

实现无人农机定位导航系统实时高精度与强稳定性仍是当前的发展趋势与难点^[30],因此,将零速修正应用于无人农机的 BDS/INS 组合导航系统具有重要现实意义。本文提出一种包含速度约束与航向角约束的自适应零速修正算法,以自主研发的小型农机为平台搭建单天线 BDS/INS 系统,拟通过田间车载试验证明所提算法对组合导航系统的优化作用,同时满足实际应用需求。为设计合适的零速检测方法,根据农机停车与行驶过程中不同轴向 IMU 数据的特征,提出基于 x 轴加速度和 z 轴角速度方差的零速检测器,以及将零速持续时间窗口的最短长度作为判据,剔除大量离散分布但持续时间较短的误检零速区间;与实际行驶状态对比,检查本文方法是否存在误检区,并证明其相比其他不依靠 BDS 定位信息的常规零速检测方法的优点。在零速修正过程中,使用速度约束与航向角约束,航向角量测输入为进入停车时刻的航向角;而在 BDS 可用期间,加入位置量测,并结合 Sage - Husa 自适应滤波对其定位噪声实时估计,以避免异常定位信息对组合导航系统的影响。

1 试验平台与组合导航系统

1.1 试验平台

试验平台为自主研发的小型农机,如图 1 所示,农机质量约为 135 kg,重心设置接近其几何中心;前轮与后轮中心纵向距离为 1.0 m,左轮与右轮中心横向距离为 1.1 m;行驶速度为 0.4 ~ 0.6 m/s;无转向机构,使用差速转向;驱动为汽油机,动力传输采用机械与液压系统。



图1 半自动农机及其导航系统

Fig. 1 Semi-automatic agricultural machinery and its integrated system

1. 半自动农机 2. 移动站数传模块 3. IMU 模块与信号解算集成 4. RTK-BDS 移动站 5. 数据存储端 6. 转速传感器与感应齿轮 7. RTK-BDS 基站 8. 基站数传模块

农机体积小、质量轻, 差速转向可使农机急转弯, 此外还可实现底盘高度与平衡的自调节, 这些特征使该农机具有较强的机动性与多场景适配性, 因此可适应丘陵山区的多种不规则农田, 且转运方便。

1.2 单天线 BDS/INS 组合导航系统

单天线 BDS/INS 组合导航系统按图 1 的方式安装于小型农机作为导航测试的试验平台, BDS 天线与 INS 模块安装在靠近形心位置, RTK 基站则布置在空旷位置, 并确保在农机行驶时与移动站之间无较大遮挡物; 安装的转速传感器与齿轮可获得实时轮速信息用于验证所设计零速检测器准确率。关键部件与传感器参数如表 1、2 所示, WTRTK-980 型高精度 BDS 模块内置双核 CPU, 集成高速浮点处理器及 RTK 专用协处理器, 具有较好的卫星导航信号处理能力; 标准工况 RTK 模式, 基站与移动站距离不大于 5 km 则可保持厘米级定位精度; INS 模块的 IMU 为九轴运动传感器, 包括三轴陀螺仪、三轴加速度计与三轴磁力计, 通过 STM32 采用捷联惯导算法进行融合, 再基于 Kalman 滤波与 BDS 形成组合导航系统输出农机的实时位姿信息。大多数农机作业过程, 其车身过大的振动会使 IMU 噪声剧增且难以估计, 容易造成 INS 的误差会在短时间内快速增大, 因此当 BDS 受丘陵山区复杂环境或人为影响而失效时, 退化成纯 INS 导航且无特殊处理的组合系统也会迅速失效。

2 零速修正技术

在基于 Kalman 滤波的组合导航系统进行零速修正时, 建立包含状态方程和量测方程的组合系统

表 1 关键部件

Tab. 1 Key components

型号	数量	实物图
IMU (MEMS JY901S型)	1	
信号解算模块 (STM32F103C8T6型)	1	
BDS天线 (BT-300S型)	2	
BDS板卡 (WTRTK-980型)	2	
霍尔式转速传感器 (SC12-20K型)	2	
数传模块 (E90-DTU)	2	
数传天线 (E90-DTU)	2	
电池 (12 V 900 mA·h)	2	

表 2 关键传感器参数

Tab. 2 Parameters of key sensors

参数	数值
INS 输出频率/Hz	100
磁力计分辨率/Gs	2
陀螺仪零偏/((°)·h ⁻¹)	5
陀螺仪白噪声/((°)·(sqrt(h)) ⁻¹)	0.2
加速度计零偏/μg	500
加速度计白噪声/(μg·(sqrt(Hz)) ⁻¹)	100
RTK-BDS 输出频率/Hz	2
BDS 伪距白噪声均方根/m	(1, 1, 1)
RTK-BDS 伪距白噪声均方根/m	(0.02, 0.02, 0.05)
初始姿态误差/(°)	(0.5, 0.5, 1.0)
陀螺仪与加速度计安装误差/(°)	(0.05, 0.05, 0.1)

误差模型^[5], 计算式为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \mathbf{W}_{k-1} \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (1)$$

式中 \mathbf{X}_k ——15 维状态向量, 即 INS 失准角 ϕ 、速度误差 δv 、位置误差 δp 、陀螺仪零漂 ε^b 和加速度计零漂 ∇^b
 \mathbf{Z}_k ——量测向量

$\Phi_{k/k-1}$ ——状态转移矩阵

Γ_{k-1} ——系统噪声分配矩阵

H_k ——量测矩阵

W_{k-1}, V_k ——系统噪声、量测噪声,假设为高斯白噪声且为不相关序列^[13]

标准 Kalman 滤波更新过程可表示为

$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (2)$$

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (3)$$

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (4)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1}) \quad (5)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} \quad (6)$$

式中 $P_{k/k-1}$ ——一步预测方差矩阵

Q_{k-1} ——系统噪声方差矩阵

R_k ——量测噪声方差矩阵

P_k ——估计均方差

K_k ——卡尔曼滤波增益矩阵

I ——单位矩阵

载体为停止状态时,理论上载体的速度为零且姿态不发生变化,但由于发动机振动与 IMU 噪声使其测量值产生较大的跳动,进而导致系统误差持续发散,零速修正即利用载体速度与姿态角变化特征,在 Kalman 滤波中实现抑制误差发散的目的。

2.1 零速检测方法设计

当 BDS 可用时,使用基于定位的零速检测方法,检测模型为

$$\begin{cases} \delta_p = (L - L')(R_m + h)(\lambda - \lambda')(R_n + h) \\ |\delta_p| < \delta_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $|\delta_p|$ ——相近 2 个历元之间的 BDS 定位距离

L, λ, h ——当前时刻 BDS 定位纬度、经度、高度

L', λ' ——当前倒数第 3 个历元时刻 BDS 定位的纬度与经度

R_m, R_n ——地球子午圈和卯酉圈曲率半径

绘制农机在 100 s 怠速期间的 BDS 定位,为便于观测各点的距离,将经纬度差换算成米制单位差值,以点集经纬度均值为坐标原点,其圆跳动范围直径小于 0.04 m,如图 2 所示。理论上,可将 δ_0 设为 0.04 m,为使检测更具有可靠性,将 δ_0 定为 0.06 m。

当 BDS 中断时,使用基于 x 轴加速度和 z 轴角速度方差零速检测方法,检测模型为

$$\begin{cases} T(x_k) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=k}^{k+N-1} (x_i - \bar{x})^2} \\ T(x_k) < \lambda_k \end{cases} \quad (8)$$

式中 x_k —— k 时刻某一轴加速度计或陀螺仪输出数据

\bar{x} ——时间窗内采样数据均值

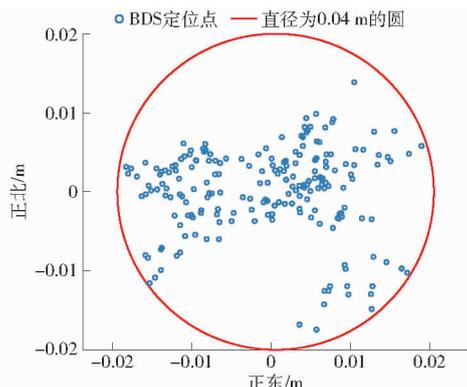


图2 怠速时 BDS 数据

Fig. 2 BDS data at idle speed

$T(x_k)$ —— k 时刻的方差检验统计量,取自滑动时间窗内采样数据方差,时间窗长度为 1 个 BDS 采样周期

N ——时间窗内采样个数

λ_k ——检验阈值,取车辆开始作业前怠速停车 2 min 内 IMU 数据方差统计量的 n 倍作为检验阈值

零速检测器的性能可通过探测率 $P(S)$ 和误判率 $P(F)$ 评估^[24],计算式为

$$P(S) = \frac{\text{len}(D_1)}{\text{len}(D)} \times 100\% \quad (9)$$

$$P(F) = \frac{\text{len}(D_2)}{\text{len}(D')} \times 100\% \quad (10)$$

式中 D ——原始数据集中零速数据集

D' ——零速检测器检测到的零速数据集

D_1 —— D' 中真实零速数据集

D_2 —— D' 中非零速数据集

D_2 即为误判零速点,在确保高探测率的同时保持低误判率,则说明探测器性能较好。

2.2 自适应零速修正

在农机停车单天线 BDS 无法输出有效航向角信息时,通常使用零角速度作为约束条件估计 IMU 零偏,以抑制组合系统航向角误差快速增大。然而,农机剧烈振动使 IMU 零偏增大且难以估计,从而导致零角速度约束往往不起作用^[17]。由于农机行驶阻力较大,从行驶状态转换到停车状态的时间较短,几乎不会长时间处于极低速,以至于产生单天线 BDS/INS 组合系统航向角估计值误差增大的现象;因此,将检测为零速区间初始时刻的航向角作为 Kalman 滤波航向角约束方程的输入值,并将其定义为初始航向角约束 (Initial heading angle constraint, IHC)。

当农机停车且 BDS 可用时,结合 ZUPT 与 IHC,可将 Kalman 滤波的 Z_k, H_k 和 R_k 初值设置为

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_l^n - \hat{\boldsymbol{\psi}}^n \\ \mathbf{v}^n - \mathbf{O} \\ \mathbf{p}_l - \mathbf{p}_B \end{bmatrix} = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{V}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{O}_{1 \times 9} & \mathbf{O}_{1 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 9} \\ \mathbf{O}_{3 \times 6} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 6} \end{bmatrix} \mathbf{x}_k + \mathbf{V}_k \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_k = \text{diag}([\eta_{yaw}, \eta_E, \eta_N, \eta_U, \eta_L, \eta_\lambda, \eta_h])$$

其中

$$\mathbf{E} = [0 \quad 0 \quad 1]$$

式中 $\boldsymbol{\psi}_l^n, \mathbf{v}^n, \mathbf{p}_l$ ——INS 在导航坐标系航向角、速度与定位

$\hat{\boldsymbol{\psi}}^n$ ——停车前一刻航向角估计值

\mathbf{p}_B ——BDS 定位信息

$\mathbf{I}_{3 \times 3}$ —— 3×3 单位矩阵

η_{yaw} ——载体航向角噪声

η_E, η_N, η_U ——载体在导航坐标系下东、北、天方向速度噪声

$\eta_L, \eta_\lambda, \eta_h$ ——BDS 纬度、经度与高度定位噪声

\mathbf{O} ——零矩阵

为避免 BDS 受干扰定位误差增大对组合系统的影响,引入自适应滤波。在农机停车期间其状态相对稳定,因此使用计算量不高的 Sage-Husa 自适应滤波实时对 BDS 定位量测噪声与系统噪声进行估计^[31],具体方法为

(1)更改式(4)中的 \mathbf{R}_k 为

$$\mathbf{R}_k = (1 - d_{1k})\mathbf{R}_{k-1} + d_{1k}\boldsymbol{\rho}_k \quad (12)$$

其中

$$\boldsymbol{\rho}_k = \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^T - \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T \quad (13)$$

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} \quad (14)$$

(2)考虑到 IMU 噪声可能呈弱非高斯性,完成式(6)更新后,更改 \mathbf{Q}_k 为

$$\mathbf{Q}_k = (1 - d_{2k})\mathbf{Q}_{k-1} + d_{2k}\boldsymbol{\theta}_k \quad (15)$$

其中

$$\boldsymbol{\theta}_k = \mathbf{K}_k \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^T \mathbf{K}_k^T + \mathbf{P}_k + \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{K}_k^T + \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} - \boldsymbol{\Phi}_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}^T - 2\mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T - 2\mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{K}_k^T \quad (16)$$

(3)随滤波的推进,可能出现 \mathbf{P}_k 中陀螺仪零偏与加速度计零偏最优估计值过度收敛或发散的情况,从而导致滤波结果精度下降。因此对这 2 种估计值的上下边界进行约束,使用伪代码形式表示为

For $i = 10, 11, \dots, 15$

If $\mathbf{P}_k^{(i)} \leq \mathbf{P}_{\min}^{(i)}$

$$\mathbf{P}_k^{(i)} = \mathbf{P}_{\min}^{(i)}$$

Else if $\mathbf{P}_k^{(i)} > \mathbf{P}_{\max}^{(i)}$

$$s = \text{sqrt}(\mathbf{P}_{\max}^{(i)} / \mathbf{P}_k^{(i)})$$

For $j = 1, 2, \dots, 15$

$$\mathbf{P}_k^{(ij)} = \mathbf{P}_k^{(ij)} * s$$

$$\mathbf{P}_k^{(ji)} = \mathbf{P}_k^{(ji)} * s$$

End

End

End

当 \mathbf{P}_k 中的对角线元素小于对应下限值时,则直接强制将其取为下限值;而当超过上限时,则将对应行与列的元素都同时缩小^[32]。

根据经验设定 \mathbf{P}_{\min} 与 \mathbf{P}_{\max} ,此处分别设为初始值的 0.01 倍与 1×10^3 倍,后者设置偏大是因为剧烈振动容易造成 IMU 零偏增大。

当速度精度越高,则以式(11)为观测值的 Sage-Husa 自适应滤波对噪声估计精度越高,可大幅减小异常 BDS 定位信息的影响,因此与零速修正的结合可以使滤波具有更高的精度与抗干扰性能。

当 BDS 不可用时,观测值无定位信息输入,则

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_l^n - \hat{\boldsymbol{\psi}}^n \\ \mathbf{v}^n - \mathbf{O} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{V}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{O}_{1 \times 9} & \mathbf{O}_{1 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 9} \end{bmatrix} \mathbf{x}_k + \mathbf{V}_k \quad (17)$$

$$\mathbf{R}_k = \text{diag}([\eta_{yaw}, \eta_E, \eta_N, \eta_U])$$

为降低量测矩阵维数,不对可观测性较强的横滚角与俯仰角的角速度进行约束;修正后高精度的速度信息可以大幅减缓 INS 定位误差发散,从而使系统短时间内继续工作。

3 田间试验与结果分析

3.1 数据采集

小型农机设计初衷主要是用于在种植农经作物过程中的打塘移栽作业,且由于具备机身宽度与高度的调节功能,同样可用于多种垄作栽培模式作业。垄作栽培模式能够极大促进作物生长发育与质量提升,是我国重要的耕作方式且被大力推行,同时也是我国西南丘陵山区较为主流的耕作方式^[33-34]。选择云南丘陵山区较为标准的农经作物种植垄田作为试验场地,如图 3 所示,垄台中心线为农机作业路径参考线,因此其最终行驶轨迹如图 4 所示,为便于观察路径,将经纬度转为米制单位的直角坐标系,起点(五角星符号)设为坐标系原点。

农机开始行驶作业之前,在发动机启动的状态下停车怠速接近 2 min,而后在行驶作业过程中,多次停车,持续时间约为 1 min 或 2 min,其 IMU 输出数据如图 5 所示。

3.2 零速检测器性能测试

由于基于定位的零速检测方法取决于 BDS 定位的精度与稳定性,因此本文不对其进行讨论,主要



图 3 西南丘陵种植垄田

Fig. 3 Cultivated ridges in southwest China's hilly regions

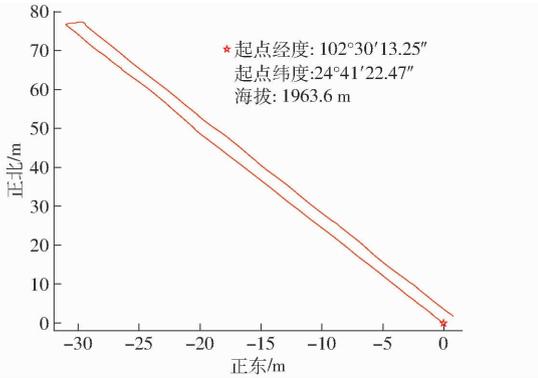


图 4 农机行驶轨迹

Fig. 4 Driving paths of agricultural machinery

分析基于 IMU 数据的检测方法,以避免在 BDS 受干扰期间检测失效的问题。根据零速检测的计算方法,停车与行驶过程中,IMU 数据特征差异越明显,零速检测精度则越高。由图 5 可知, x 轴加速度计与 z 轴陀螺仪相比其它 IMU 对停车与行驶状态的差异更加敏感,因此使用这 2 种数据进行零速检测。然而,农机怠速时的振动状况与行驶时的差异不明显,简单用统计量与阈值的方法容易出现误判。表 4 为设置不同 λ_k 方差检测器的 $P(S)$ 与 $P(F)$,其中 λ_1 与 λ_2 分别为 x 轴加速度与 z 轴角速度方差阈值, λ_{10} 与 λ_{20} 则是在农机怠速 2 min 期间对应的方差统计量。

由表 3 可知,前 3 者性能接近,且基于实测数据分析,发现误判的零速区间持续时间都较短,当 λ_1 为 $3\lambda_{10}$ 、 λ_2 为 $2\lambda_{20}$ 时,检测的真实零速区间没有出现中断情况,如图 6 所示,其中“0”表示不满足检测条件,识别为行驶状态,“1”则表示识别为停车状态。因此加入零速最短持续时间作为判据,即只有当连续大于 m 组 IMU 数据被判断为零速时,才认为农机处于停车状态。

为取得合适的 m 值,设置 4 个对照组,检测结果如表 4 所示。当 m 为 300 时,检测性能最优,漏检区间为停车时段的前 3 s(因为采集 300 组 IMU 数据的时间约为 3 s)。为增加检测可靠性,取 m 为 500,并设 λ_1 为 $3\lambda_{10}$ 、 λ_2 为 $2\lambda_{20}$ 与 m 为 500,检测结

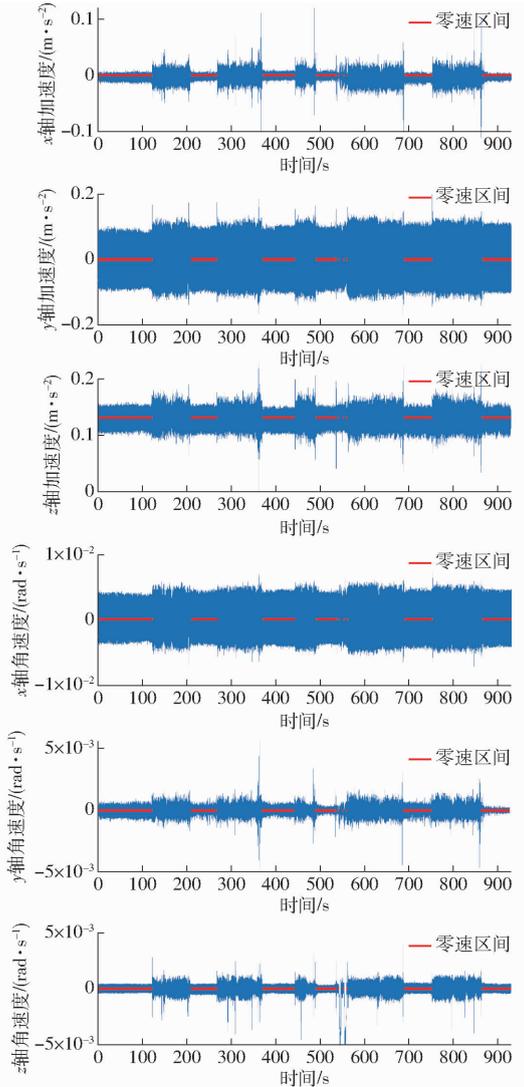


图 5 车载试验期间的 IMU 输出数据

Fig. 5 IMU output data during vehicle-mounted test

表 3 不同阈值检测器的 $P(S)$ 与 $P(F)$

Tab. 3 $P(S)$ and $P(F)$ of detectors for different

thresholds	$P(S)$	$P(F)$	%
阈值			
$\lambda_1 = 2\lambda_{10} \lambda_2 = 2\lambda_{20}$	98.93	4.91	
$\lambda_1 = 3\lambda_{10} \lambda_2 = 2\lambda_{20}$	99.11	6.22	
$\lambda_1 = 2\lambda_{10} \lambda_2 = 3\lambda_{20}$	99.23	10.74	
$\lambda_1 = 3\lambda_{10} \lambda_2 = 3\lambda_{20}$	99.44	19.25	

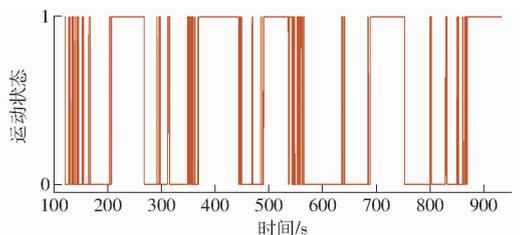


图 6 常规方差检测器的检测结果

Fig. 6 Detection results of conventional variance detector

果如图 7 所示。通过加入零速持续时间判据的方法,虽然牺牲了零速检测器部分灵敏度,但结果剔除

了误判的短时零速区间。在农机导航应用中通常不需要过高的检测精度,该结果已经可以满足大部分农机应用需求。

表4 不同 m 值方差检测器 $P(S)$ 与 $P(F)$

Tab.4 $P(S)$ and $P(F)$ of variance detector for different

m values		%
m	$P(S)$	$P(F)$
100	96.54	1.58
300	91.82	0
500	88.08	0
700	84.96	0

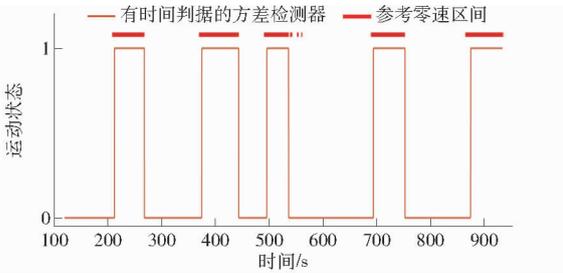


图7 $m = 500$ 方差检测器检测结果

Fig.7 Detection results of variance detector with $m = 500$

除上述加速度方差检测器外,还有3种常规零速检测器。

加速度运动方差检测器(AMVD),计算式为

$$\begin{cases} T(a_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} \|a_i - \bar{a}\| \\ T(a_k) < \lambda_a \end{cases} \quad (18)$$

式中 $T(a_k)$ —— k 时刻加速度方差统计量

$\|\cdot\|$ ——二范数

a_i ——检测窗口中第 i 组三轴角速度

\bar{a} ——检测窗口中数据均值

λ_a ——加速度运动方差检验阈值

角速度能量检测器(ARED),计算式为

$$\begin{cases} T(w_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} \|w_i\| \\ T(w_k) < \lambda_w \end{cases} \quad (19)$$

式中 $T(w_k)$ —— k 时刻角速度能量统计量

λ_w ——角速度能量检验阈值

广义似然比检验检测器(SHOE),计算式为

$$\begin{cases} T(w_k, a_k) = \\ \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} \left(\frac{1}{\sigma_a^2} \left\| a_i - g \frac{\bar{a}}{\|\bar{a}\|} \right\|^2 + \frac{1}{\sigma_w^2} \|w_i\|^2 \right) \\ T(w_k, a_k) < \lambda_T \end{cases} \quad (20)$$

式中 $T(w_k, a_k)$ —— k 时刻广义似然比统计量

σ_a 、 σ_w ——检测窗口中加速度计和陀螺仪的噪声方差

w_i ——检测窗口中第 i 组的三轴角速度

λ_T ——广义似然比检验阈值

由图5可知,农机行驶过程期间的IMU检验统计量相对停车期间的增幅较小,容易造成检测失效,通过测试证明SHOE完全失效。因此,将AWVD的统计量由三轴加速度组成改为仅 x 轴加速度,ARED的统计量由三轴角速度组成改为仅 z 轴角速度,以提高检测精度。分别取 λ_a 为 $2\lambda_{10}$ 与 λ_w 为 $3\lambda_{20}$ 。同样在AWVD与ARED中加入 m 为500的时间判据,其零速检测结果如表5与图8所示,其中“0”仍表示行驶状态,“1”与“2”分别表示AWVD与ARED识别的停车状态。AWVD存在少量误检,ARED性能虽然略高于加速度方差检测器,但仅采用 z 轴角速度作为检测统计量,可靠性在一定程度上会有所降低,因此本文未采用这2种方法。

表5 不同检测器 $P(S)$ 与 $P(F)$

Tab.5 $P(S)$ and $P(F)$ of different detectors %

零速检测器	$P(S)$	$P(F)$
AWVD(m 为500)	88.34	0.63
ARED(m 为500)	89.75	0

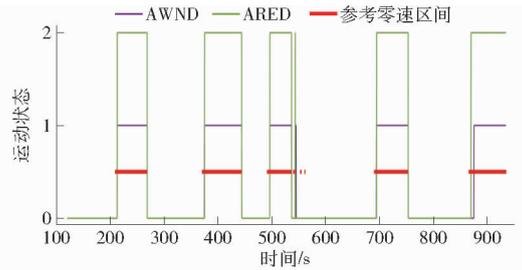


图8 不同检测器检测结果对比

Fig.8 Comparison of detection results among different detectors

3.3 零速修正测试结果与分析

3.3.1 测试A

测试A是证明零速修正的必要性,在农机运行的2300s期间进行多次停车,并采用以下系统进行导航:①有BDS信号辅助,对比BDS/INS、BDS/INS/ZUPT、BDS/INS/ZUPT/ZARU与BDS/INS/ZUPT/IHC4种系统精度。②无BDS信号辅助,对比INS、INS/ZUPT、INS/ZUPT/ZARU与INS/ZUPT/IHC4种系统精度。记录系统各项误差在停车期间最大值,以及绘制其在停车较长期间(1079.3~1227.4s)导航误差,如表6~8与图9、10所示,计算航向角误差与位置误差是以进入停车时刻的状态作为参考。为避免部分系统误差曲线被覆盖导致难以观察(例如BDS/INS与BDS/INS/ZUPT的航向角误差重合度较高,后者会覆盖前者大部分曲线),从而可能产生歧义,则使用同一曲线表示,且由于纯INS导航在

表 6 各停车时间段航向角误差最大值

Tab. 6 Maximum heading angle error in each parking duration interval

(°)

时间/s	INS	BDS/INS	INS/ZUPT	BDS/INS/ ZUPT	INS/ZUPT/ ZARU	BDS/INS/ ZUPT/ZARU	INS/ZUPT/ IHC	BDS/INS/ ZUPT/IHC
131.2 ~ 266.5	3.70	3.69	3.70	3.70	2.52	2.51	0.05	0.05
353.0 ~ 415.9	1.61	1.59	1.60	1.59	1.26	1.26	0.05	0.05
575.3 ~ 704.0	1.95	1.95	1.95	2.00	1.50	1.51	0.03	0.04
827.9 ~ 922.5	1.34	1.35	1.34	1.34	1.00	1.00	0.05	0.05
1 079.3 ~ 1 227.4	4.71	4.71	4.70	4.70	3.69	3.69	0.05	0.05
1 484.3 ~ 1 604.1	4.32	4.32	4.31	4.31	3.26	3.28	0.06	0.10
1 714.4 ~ 1 807.0	2.05	2.05	2.05	2.05	1.71	1.71	0.09	0.16
1 965.9 ~ 2 089.9	8.64	8.64	8.64	8.66	7.01	7.00	0.07	0.06
2 197.6 ~ 2 273.7	16.71	16.71	16.70	16.69	14.76	14.77	0.05	0.08

表 7 各停车时间段速度误差最大值

Tab. 7 Maximum velocity error in each parking duration interval

m/s

时间/s	INS	BDS/INS	INS/ZUPT	BDS/INS/ ZUPT	INS/ZUPT/ ZARU	BDS/INS/ ZUPT/ZARU	INS/ZUPT/ IHC	BDS/INS/ ZUPT/IHC
131.2 ~ 266.5	3.95	0.15	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
353.0 ~ 415.9	1.09	0.13	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
575.3 ~ 704.0	3.07	0.19	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.01
827.9 ~ 922.5	2.06	0.14	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
1 079.3 ~ 1 227.4	6.34	0.18	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
1 484.3 ~ 1 604.1	3.63	0.17	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
1 714.4 ~ 1 807.0	2.21	0.15	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
1 965.9 ~ 2 089.9	3.64	0.16	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
2 197.6 ~ 2 273.7	2.75	0.20	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

表 8 各停车时间段定位误差最大值

Tab. 8 Maximum positioning error in each parking duration interval

m

时间/s	INS	BDS/INS	INS/ZUPT	BDS/INS/ ZUPT	INS/ZUPT/ ZARU	BDS/INS/ ZUPT/ZARU	INS/ZUPT/ IHC	BDS/INS/ ZUPT/IHC
131.2 ~ 266.5	81.97	0.09	0.03	0.05	0.08	0.03	0.04	0.04
353.0 ~ 415.9	21.59	0.08	0.05	0.06	0.06	0.03	0.06	0.03
575.3 ~ 704.0	154.56	0.07	0.02	0.05	0.02	0.04	0.03	0.03
827.9 ~ 922.5	68.81	0.08	0.09	0.07	0.9	0.04	0.08	0.05
1 079.3 ~ 1 227.4	177.86	0.11	0.07	0.04	0.07	0.05	0.07	0.04
1 484.3 ~ 1 604.1	157.22	0.15	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05
1 714.4 ~ 1 807.0	77.68	0.10	0.07	0.03	0.07	0.04	0.07	0.06
1 965.9 ~ 2 089.9	172.13	0.14	0.07	0.03	0.06	0.03	0.04	0.03
2 197.6 ~ 2 273.7	80.29	0.13	0.04	0.02	0.04	0.02	0.04	0.03

无 BDS 信号期间的误差快速增大,影响其它系统对比,因此不对其进行绘图。

停车期间航向角估计值受速度与定位误差的影响较小,因此系统在有与无 BDS 辅助情况下航向角误差对比结果相似,ZARU 在剧烈振动情况下,其减小航向角误差作用并不明显,而 IHC 明显可以抑制系统航向角增大趋势。通过对比可知,ZUPT 不能抑制航向角误差增大,但其速度约束可以有效提高

组合系统的定位精度,从而降低 BDS 定位白噪声的影响,且在无 BDS 信号期间极大减缓定位误差增大速率,由图 10 可知,3 种应用 ZUPT 的组合系统在 140 s 内仍可保持定位误差小于 0.1 m。统计各系统在 9 个停车区间前 60 s 误差均值与均方根,如表 9 所示。相比于无零速修正的 BDS/INS 系统,BDS/INS/ZUPT/IHC 系统在 BDS 可用期间航向角、速度与定位误差均值分别减小 99.3%、93.3% 与 50%,

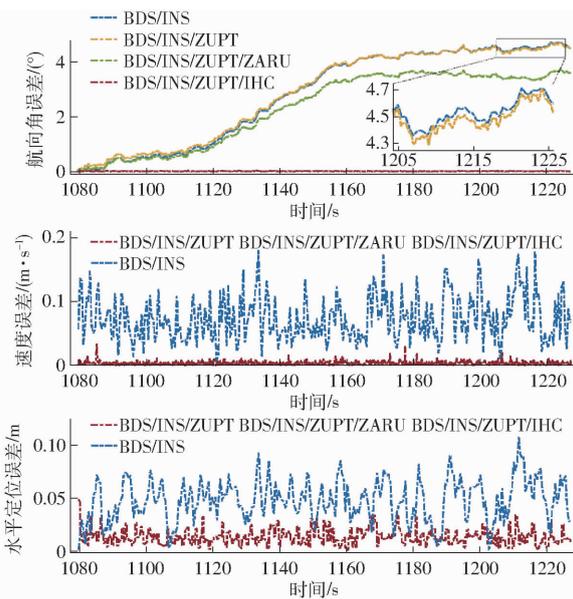


图9 停车期间有 BDS 信号结果对比

Fig. 9 Comparison results with BDS signals

在 BDS 失效期间切换为 INS/ZUPT/IHC 系统也可

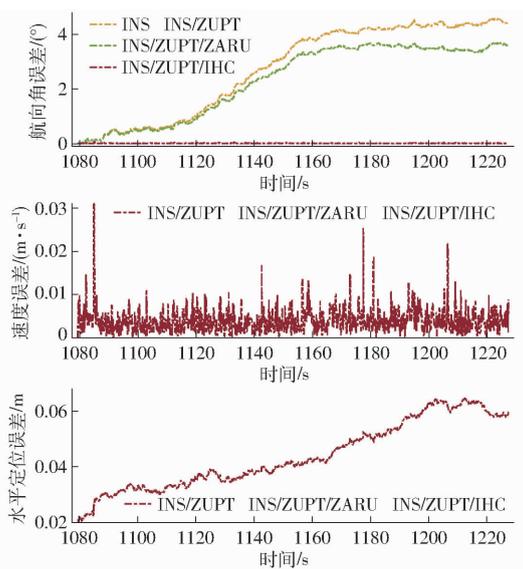


图10 停车期间无 BDS 信号结果对比

Fig. 10 Comparison results without BDS signals

以有效长时间抑制误差发散,满足无人农机对组合导航系统精度与稳定性需求。

表9 各停车区间前 60 s 误差均值与均方根

Tab. 9 Statistics of various errors in the first 60 s of each parking interval

参数	INS	BDS/ INS	INS/ ZUPT	BDS/INS/ ZUPT	INS/ZUPT/ ZARU	BDS/INS/ ZUPT/ZARU	INS/ZUPT/ IHC	BDS/INS/ ZUPT/IHC
航向角误差均值/(°)	1.44	1.42	1.43	1.42	1.39	1.39	0.01	0.01
航向角误差均方根/(°)	0.85	0.83	0.84	0.82	0.77	0.77	0.01	0.01
速度误差均值/(m·s ⁻¹)	0.87	0.06	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
速度误差均方根/(m·s ⁻¹)	0.50	0.03	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
水平定位误差均值/m	8.93	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
水平定位误差均方根/m	9.12	0.01	0.004	0.008	0.004	0.007	0.004	0.006

3.3.2 测试 B

基于标准 Kalman 滤波的零速修正不能实时对量测噪声进行调整,当 BDS 受干扰误差增大时,BDS/INS/ZUPT/IHC 系统速度误差与定位误差也会随之增大。因此测试 B 是证明在零速修正中加入 Sage-Husa 自适应滤波的必要性,测试其在 BDS 受干扰期间的稳定性。分别从农机 2 段长时间停车区间(1079.3~1227.4 s 与 1965.9~2089.9 s)的第 20 秒开始,人为地给 RTK-BDS 在东北方向上分别加入均方根为 1 m 的白噪声定位误差,对比有无自适应零速修正的组合系统精度。2 种系统误差曲线及其在 BDS 受干扰期间的误差统计量如图 11、表 10 所示,黑色箭头表示 RTK-BDS 受干扰开始时间,红色为结束时间,持续时间均为 60 s,航向角误差与测试 A 结果相似,此处不再绘图。

由图 11、表 10 可知,在 2 段 BDS 受干扰期间,无自适应零速修正的 BDS/INS/ZUPT/IHC 系统为

米级定位精度,而加入自适应系统则可有效降低异常信息的影响,其定位误差最大值小于 0.2 m,相比前者分别减小 91.8% 与 92.5%,且满足应用需求。另外,BDS 更新频率为 2 Hz,假如在 2 个信号之间再以 10 Hz 进行零速修正(INS/ZUPT/IHC),最终可实现系统定位误差小于 0.1 m,如图 12 所示,但是高频计算需要性能较好的硬件,使用场所与成本受限制,因此本文不再讨论。

4 结论

(1)以小型农机为试验平台,设计了一种单天线 BDS/INS 组合系统,并采用零速修正技术提高系统在农机停车期间的精度。为避免以 IMU 数据为统计量的常规零速检测方法在农机复杂振动条件下产生较多误检零速点甚至失效,从而错误地使用零速修正,本文基于实测数据选择 IMU 敏感轴设计方差零速检测器,以及加入最短零速持续时间作为零

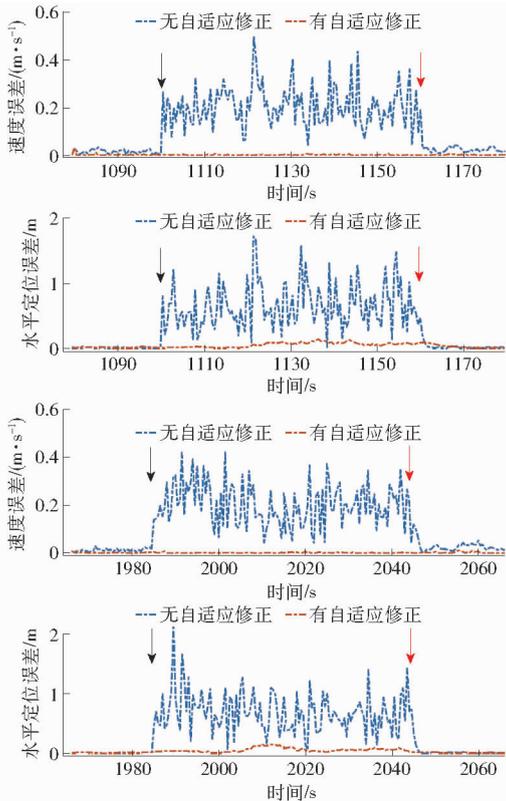


图 11 2 段 BDS 干扰期间的对比结果

Fig. 11 Comparison results during two periods of BDS interference

表 10 2 次 BDS 干扰期间水平定位误差

Tab.10 Statistical metrics of horizontal positioning error during two BDS jamming periods

方法	时间/s	最大值/m	均值/m	均方根/m
无自适应零速修正	1 100 ~ 1 160	1.71	0.31	0.43
	1 985 ~ 2 045	2.12	0.34	0.41
有自适应零速修正	1 100 ~ 1 160	0.14	0.04	0.04
	1 985 ~ 2 045	0.16	0.03	0.03

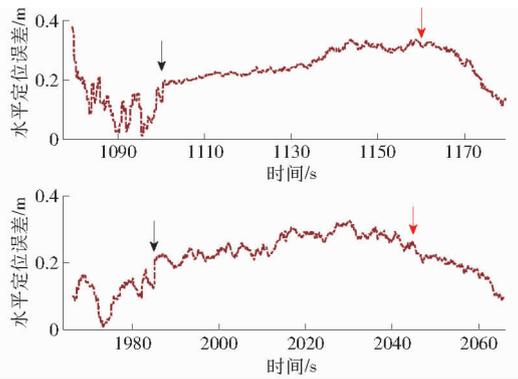


图 12 2 段 BDS 干扰期间高频率零速修正误差

Fig. 12 Error of high-frequency zero-velocity update during two periods of BDS interference

速判据,通过牺牲部分检测敏感度的方式消除误检零速点,提高检测精度。

(2)当 BDS 定位信号失效时,则基于速度约束与航向角约束进行零速修正,将进入停车时刻的航向角作为对应停车阶段航向角量测方程的输入值,以抑制航向角误差持续发散;当 BDS 定位信号存在时,则增加位置量测,且为降低异常定位信息对组合系统的影响,使用 Sage - Husa 自适应滤波对 BDS 定位噪声实时估计。

(3)在车载试验中,通过本文零速修正技术将 BDS/INS 系统的航向角、速度与定位误差分别减小 99.3%、93.3% 与 50%,也可使纯 INS 导航长时间维持高精度,证明本文方法能极大提高所述 2 种导航模式的稳定性;而在 BDS 受干扰期间,自适应零速修正则可使组合系统的定位误差减小 90% 以上,误差最大值小于 0.2 m,可满足实际应用需求,也表明了零速修正与自适应滤波的有机结合可以较好提升导航系统性能。

参 考 文 献

[1] 蔡洪亮,孟轶男,耿长江,等.北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估:定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J].测绘学报,2021,50(4):427-435.
CAI Hongliang, MENG Yinan, GENG Changjiang, et al. BDS-3 performance assessment; PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(4): 427-435. (in Chinese)

[2] 胡炼,关锦杰,何杰,等.花生收获机自动驾驶作业系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(9):21-27.
HU Lian, GUAN Jinjie, HE Jie, et al. Design and experiment of automatic driving operation system of peanut harvester based on BDS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9):21-27. (in Chinese)

[3] 窦汉杰,陈震宇,翟长远,等.果园智能化作业装备自主导航技术研究进展[J].农业机械学报,2024,55(4):1-22.
DOU Hanjie, CHEN Zhenyu, ZHAI Changyuan, et al. Research progress on autonomous navigation technology for orchard intelligent equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 1-22. (in Chinese)

[4] 马若飞,伟利国,赵博,等.基于多传感器数据融合的旋耕耕深检测系统研究[J].农业机械学报,2024,55(9):52-64.
MA Ruofei, WEI Ligu, ZHAO Bo, et al. Rotary tillage depth detection based on multi-sensor data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 52-64. (in Chinese)

[5] 钟银,薛梦琦,袁洪良.智能农机GNSS/INS组合导航系统设计[J].农业工程学报,2021,37(9):40-46.
ZHONG Yin, XUE Mengqi, YUAN Hongliang. Design of the GNSS/INS integrated navigation system for intelligent agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 40-46. (in Chinese)

[6] 王吉中,赵博,赵士猛,等.无沟铺管机北斗导航控制系统设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(9):47-54.

- WANG Jizhong, ZHAO Bo, ZHAO Shimeng, et al. Design and test of the BDS navigation system for trenchless pipe laying machines[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 47–54. (in Chinese)
- [7] HUANG Yourui, FU Jiahao, XU Shanyong, et al. Research on integrated navigation system of agricultural machinery based on RTK-BDS/INS[J]. Agriculture, 2022, 12: 1169.
- [8] 胡炼, 彭靖怡, 赖桑愉, 等. 基于 BDS 和 IMU 的挖掘机铲斗位姿测量方法与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 12–19.
- HU Lian, PENG Jingyi, LAI Sangyu, et al. Method and experiments of excavator bucket position and attitude measurement using BDS and IMU[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 12–19. (in Chinese)
- [9] 傅军, 韩洪祥, 戴海发. 基于改进新息序列的组合导航系统缓变故障检测方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 28–33, 50.
- FU Jun, HAN Hongxiang, DAI Haifa. Detection method of mitigating fault of combined navigation system based on improvement of new interest sequence[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 28–33, 50. (in Chinese)
- [10] 李忠利, 刘小锋, 陈修魁, 等. 基于信息融合的拖拉机组合导航定位系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 382–390, 399.
- LI Zhongli, LIU Xiaofeng, CHEN Xiukui, et al. Tractor integrated navigation and positioning system based on data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 382–390, 399. (in Chinese)
- [11] 张闻宇, 王进, 张智刚, 等. 基于自校准变结构 Kalman 的农机导航 BDS 失锁续航方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 18–27.
- ZHANG Wenyu, WANG Jin, ZHANG Zhigang, et al. Self-calibrating variable structure Kalman filter for tractor navigation during BDS outages[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 18–27. (in Chinese)
- [12] 邱权, 胡青含, 樊正强, 等. 基于自适应系数卡尔曼滤波的农业移动机器人组合定位[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 36–43.
- QIU Quan, HU Qinghan, FAN Zhengqiang, et al. Adaptive-coefficient Kalman filter based combined positioning algorithm for agricultural mobile robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 36–43. (in Chinese)
- [13] FENG Yihang, HUANG Guanwen, LI Xin, et al. Adaptive BDS/MEMS INS navigation algorithm for low-dynamic carrier based on motion characteristics detection and dual-antenna position/velocity constraints[J]. Measurement, 2024, 225: 114037.
- [14] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1–18.
- SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1–18. (in Chinese)
- [15] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1–18.
- ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1–18. (in Chinese)
- [16] XIA Xin, HASHEMI E, XIONG Lu, et al. Autonomous vehicles sideslip angle estimation: single antenna GNSS/IMU fusion with observability analysis[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(19): 14845–14859.
- [17] 袁洪良, 杨浚宇, 唐睿, 等. 基于低成本惯导和运动约束的农机高精度定位系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 17–25.
- YUAN Hongliang, YANG Junyu, TANG Rui, et al. High-precision localization of autonomous agricultural machinery using low-cost IMU and motion constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 17–25. (in Chinese)
- [18] FEI Ke, MAI Chaodong, JIANG Runpeng, et al. Research on a low-cost high-precision positioning system for orchard mowers[J]. Agriculture, 2024, 14(6): 813.
- [19] 张文安, 汪伟, 付明磊, 等. 基于自适应零速修正机制的低速无人车定位方法[J]. 传感技术学报, 2022, 35(1): 63–71.
- ZHANG Wenan, WANG Wei, FU Minglei, et al. A low-speed unmanned vehicle positioning method based on adaptive zero velocity update mechanism[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(1): 63–71. (in Chinese)
- [20] 赵方, 吴凡. GNSS/INS 自适应智能组合导航算法[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(2): 1–8.
- ZHAO Fang, WU Fan. Adaptive integrated navigation based artificial intelligence[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(2): 1–8. (in Chinese)
- [21] LI Leilei, PAN Yingjun, LEE Jongki, et al. Cart-mounted geolocation system for unexploded ordnance with adaptive ZUPT assistance[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(4): 974–979.

- [22] SKOG I, HANDEL P, NILSSON J O, et al. Zero-velocity detection—an algorithm evaluation[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, 57(11): 2657–2666.
- [23] AMIN M S, REAZ M B I, NASIR S S, et al. A novel vehicle stationary detection utilizing map matching and IMU sensors[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 597180.
- [24] 宋宇, 朱锋, 卢立果, 等. 车载 GNSS/SINS 组合导航中零速区间探测方法的改进[J]. *测绘地理信息*, 2016, 41(6): 12–16.
SONG Yu, ZHU Feng, LU Ligu, et al. Improvement of zero velocity detection method in vehicle GNSS/SINS integrated navigation[J]. *Journal of Geomatics*, 2016, 41(6): 12–16. (in Chinese)
- [25] 徐刚, 朱思洪, 聂信天, 等. 国产拖拉机振动系统固有频率研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(15): 157–161.
XU Gang, ZHU Sihong, NIE Xintian, et al. Research on natural frequency of domestic tractors' vibrating system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(15): 157–161. (in Chinese)
- [26] 薛金林, 汪珍珍, 伊力达尔·伊力亚斯, 等. 轮式拖拉机振动系统横向固有频率理论建模及验证[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 51–56.
XUE Jinlin, WANG Zhenzhen, YILIDAER·Yiliyasi, et al. Lateral natural frequency modeling and verification for vibration systems of wheeled tractors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(19): 51–56. (in Chinese)
- [27] KILIC C, GUTIERREZ E, GROSS J N. Evaluation of the benefits of zero velocity update in decentralized extended Kalman filter-based cooperative localization algorithms for GNSS – Denied multi-robot systems[J]. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 2023, 70(4): 608.
- [28] LI Qihang, LI Kui, LIANG Wenwei. A zero-velocity update method based on neural network and Kalman filter for vehicle-mounted inertial navigation system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(4): 045110.
- [29] 张且且, 郭静茹, 赖际舟. 一种改进的车载组合导航零速检测及运动约束方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2024, 32(10): 1001–1009, 1017.
ZHANG Qieqie, GUO Jingru, LAI Jizhou. An improved zero-velocity detection and motion constraint method for vehicle-mounted integrated navigation[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2024, 32(10): 1001–1009, 1017. (in Chinese)
- [30] 刘成良, 贡亮, 苑进, 等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(7): 1–22, 55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7): 1–22, 55. (in Chinese)
- [31] 魏伟, 秦永元, 张晓冬, 等. 对 Sage – Husa 算法的改进[J]. *中国惯性技术学报*, 2012, 20(6): 678–686.
WEI Wei, QIN Yongyuan, ZHANG Xiaodong, et al. Amelioration of the Sage – Husa algorithm[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012, 20(6): 678–686. (in Chinese)
- [32] 严恭敏, 邓瑀. 传统组合导航中的实用 Kalman 滤波技术评述[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(2): 50–64.
YAN Gongmin, DENG Yu. Review on practical Kalman filtering techniques in traditional integrated navigation system[J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2020, 7(2): 50–64. (in Chinese)
- [33] 梁玉刚, 胡文彬, 刘焯, 等. 中国垄作栽培模式的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(7): 1414–1422.
LIANG Yugang, HU Wenbin, LIU Ye, et al. The research progress of ridge cultivation mode in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(7): 1414–1422. (in Chinese)
- [34] 苏文. 黏性土壤条件下起垄机关键技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
SU Wen. Research on key technologies of ridge raising machine under cohesive soil conditions[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023. (in Chinese)