doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.006

基于伪距及多普勒频移的改进GNSS定位算法研究

王法安[1,2] 王博洋[1,2] 张兆国[1,2] 刘新琦[1,2] 倪 畅[1,2] 梁晋豪[3]

（1. 昆明理工大学现代农业工程学院，昆明 650500；2. 云南省高校中药材机械化工程研究中心，昆明 650500；
3. 东南大学机械工程学院，南京 211189）

摘要：针对三七种植区树木遮挡引起的卫星导航信号弱和相位失锁等导致智能化设备定位精度差问题，提出了基于伪距及多普勒双差定位算法的三七联合收获机遮蔽环境改进全球卫星导航系统（Global navigation satellite system, GNSS）定位算法。由于伪距测量和多普勒频移测量受影响因素的不同，以伪距双差及多普勒频移双差为输入，载噪比为权重，通过卡尔曼滤波实现测量值融合，降低估计误差校正伪距和多普勒频移测量。采用贝叶斯信息准则选择正则化参数，并通过Lasso回归求解重加权最小二乘问题，实现模型稀疏化，得到改进定位结果。使用u-blox ZED-F9P高精度全球导航卫星系统接收机采集RINEX格式报文，并通过Matlab实现了数据提取与位置解算。在开阔环境、荫棚遮蔽和树荫遮蔽工况下进行了实车定位精度试验。试验结果与传统伪距定位算法相比，静态定位时，开阔环境、荫棚遮蔽环境和树荫遮蔽环境位置误差分别降低13.43%、56.08%和46.35%，定位偏差均方根误差分别减少75.64%、62.31%、50.21%；动态工况下定位误差分别降低36.97%、52.14%、62.37%，定位偏差均方根误差分别减少45.34%、60.24%、65.81%。所提方法有效降低了GNSS卫星信号差、相位失锁带来的定位误差，有效提高了复杂工况下农机定位精度与定位可信度，可为丘陵山区因树木遮挡导致智能化设备定位精度差问题提供理论和技术支撑。

关键词：全球卫星导航系统；导航定位；伪距双差；卡尔曼滤波

中图分类号：S237 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S1-0051-10

Improved GNSS Positioning Algorithm Based on Pseudorange and Doppler Frequency Shift

WANG Faan[1,2] WANG Boyang[1,2] ZHANG Zhaoguo[1,2] LIU Xinqi[1,2] NI Chang[1,2] LIANG Jinhao[3]

(1. *Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *Research Center on Mechanization Engineering of Chinese Medicinal Materials of Yunnan Universities*, *Kunming* 650500, *China*
3. *School of Mechanical Engineering*, *Southeast University*, *Nanjing* 211189, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of poor positioning accuracy of intelligent equipment, such as weak satellite navigation signal and phase locking caused by tree occlusion in Panax notoginseng planting area, a global navigation satellite system (GNSS) positioning algorithm for the shading environment of Panax notoginseng combine harvester based on pseudorange and Doppler double-difference positioning algorithm was proposed. Firstly, based on the difference of the influencing factors of pseudorange measurement and Doppler frequency shift measurement, the pseudorange double difference and Doppler frequency shift double difference were taken as inputs, and the carrier irritability ratio was used as the weight, and the measured values were fused through Kalman filter, so as to reduce the estimation error and correct the pseudorange and Doppler frequency shift measurement. Secondly, the Bayesian information criterion was used to select the regularization parameters, and the reweighted least squares problem was solved by Lasso regression to achieve the sparsity of the model and obtain the improved positioning results. Finally, the u-blox ZED-F9P high-precision GNSS receiver was used to collect the messages in RINEX format. Under three working conditions: open environment, shade shelter and tree shade shielding, the positioning accuracy test

收稿日期：2024-07-18 修回日期：2024-09-28

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2002004)、国家自然科学基金青年基金项目(52402497)和云南省科技厅青年基金项目(202401AU070196)

作者简介：王法安(1990—)，男，讲师，博士，主要从事智能农机装备设计研究，E-mail: wfa@kust.edu.cn

通信作者：张兆国(1966—)，男，教授，博士生导师，主要从事农业机械装备设计研究，E-mail: zzg@kust.edu.cn

of the real vehicle was carried out. Compared with the traditional pseudo-distance positioning algorithm, open environment, shade shelter environment, and tree shade shade environment the position error was reduced by 13.43%, 56.08% and 46.35%, respectively, and the root mean square error of the positioning deviation was reduced by 75.64%, 62.31% and 50.21%, respectively. Under dynamic conditions, the positioning error was reduced by 36.97%, 52.14% and 62.37%, respectively, and the root mean square error of positioning deviation was reduced by 45.34%, 60.24% and 65.81%, respectively. The proposed method effectively reduced the positioning error caused by GNSS satellite signal difference and phase lock, and effectively improved the positioning accuracy and positioning credibility, The research result can provide theoretical and technical support for the problem of poor positioning accuracy of intelligent equipment due to tree shading in hilly and mountainous areas.

Key words: global navigation satellite system; navigation and positioning; pseudorange double difference; Kalman filter

0 引言

随着中药材产业的快速发展,三七产业已成为促进云南省农业与农村经济增长、提升农民收益关键特色产业[1-2]。而三七主要以人工收获为主,劳动强度大、收获机械智能化程度低,易对三七造成损伤,影响三七品质,使三七产业在中药材市场上处于劣势[3-4]。因此提升三七收获机械智能化程度,提高三七收获效率,保证三七品质,是推进三七产业化发展过程中亟待解决的问题[5-7]。智能农机可以利用卫星导航技术,通过相对定位算法获得厘米级定位精度,实现轨迹跟踪作业。

目前,在卫星定位技术领域,主要方法包括单点定位(Single-point positioning, SPP)、精密单点定位(Precise point positioning, PPP)、载波相位差分(Real time kinematic, RTK)和伪距差分定位(Differential, RTD)[8-13]。由于定位原理及过程简单,SPP技术被广泛应用于小型移动设备。但该技术易受信号干扰、卫星轨道偏差和时钟误差的影响,对其精度产生负面影响,导致其定位精度通常仅为米级[14]。PPP技术借助国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS)提供的卫星时钟数据及精密星历,仅需依靠一台多频接收机便可实现厘米级的定位精度,但精密单点定位技术存在误差校正模型复杂、初始收敛过程耗时长等不足,限制了其普遍适用性[15]。RTK技术通过基准站与流动站间的载波相位差分,实现了厘米级的定位精度,然而对流动站的接收设备要求较高,不适用于对定位精度要求不高的民用领域[16]。RTD技术具备高信赖度、定位迅速、高精度及低成本等优势,更易在智能农机领域得到推广和应用。IWAMOTO等[17]运用MLE方法进行伪距定位,该方法避免了繁复的迭代过程,但存在较大的定位偏差,影响定位效果。ZHANG等[18]运用PF算法优化室内定位过程,成功降低了非高斯噪声的干扰。LIANG等[19]利用GNSS伪距差分定位的基线分辨率约束仅相位差分定位的整数模糊度分辨率,实现快速、高精度的纯相位差分定位。董蔺等[20]使用空间相对定位技术与时间基线法相结合的新方法,实现了受距离限制的远海伪距差分定位技术。然而,三七种植在我国偏远的丘陵山区,信息通讯基站极少、信号差,在林下或非结构化、半封闭式的三七荫棚内,由于存在遮挡而导致GNSS接收信号出现短暂丢失的情况,进而影响农机定位精度,甚至对作物和工作人员造成伤害,严重制约了农机自动导航技术的发展。

为提高智能农机在三七田等非结构农田的GNSS导航定位精度,本文基于伪距测量和多普勒频移测量,以伪距双差及多普勒频移双差为输入,载噪比为权重,通过卡尔曼滤波实现测量值融合,以降低估计误差来校正伪距和多普勒频移测量。采用贝叶斯信息准则选择正则化参数,并通过Lasso回归求解重加权最小二乘问题,以实现模型稀疏化,改进定位结果。

1 GNSS差分定位原理

全球卫星导航系统所提供的基础位置服务之一是基于伪距测量值的定位技术。在GNSS伪距定位中,采用三边测量法,通过至少接收来自3颗卫星的信号,可以在地球上的特定位置确定1个三维坐标[21],如图1所示。

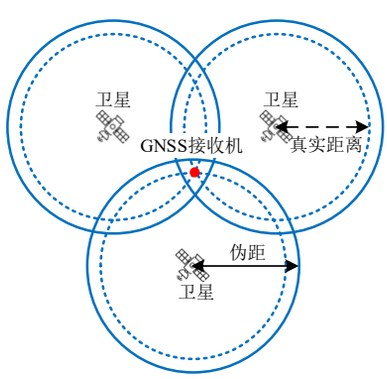


图1 GNSS伪距定位原理

Fig. 1 GNSS pseudorange positioning principle

在三维空间中确定一个待测点的确切位置，该位置可由多个已知点为球心，特定距离为半径的球面界定，球面交点即为待定未知点位置。在实施伪距定位时，需解算的参数包括接收机M空间坐标(x_M, y_M, z_M)以及接收机时钟偏差δt_M。为求解上述未知量，至少需4个独立方程，即至少能观察到4颗卫星，伪距定位非线方程组为[22]

$$\begin{cases}\sqrt{\left(x_{1,s}-x_M\right)^2+\left(y_{1,s}-y_M\right)^2+\left(z_{1,s}-z_M\right)^2}+\delta t_M=\rho_M^{(1)}\\ \vdots\\ \sqrt{\left(x_{i,s}-x_M\right)^2+\left(y_{i,s}-y_M\right)^2+\left(z_{i,s}-z_M\right)^2}+\delta t_M=\rho_M^{(i)}\\ \vdots\\ \sqrt{\left(x_{N_S,s}-x_M\right)^2+\left(y_{N_S,s}-y_M\right)^2+\left(z_{N_S,s}-z_M\right)^2}+\delta t_M=\rho_M^{(N_S)}\end{cases} \tag{1}$$

式中　i——接收机收到的各个独立卫星，$i=1,2,\cdots,N_S$

N_S——当前接收机位置观测卫星数量

$x_{i,s}$——卫星S_i x轴坐标

$y_{i,s}$——卫星S_i y轴坐标

$z_{i,s}$——卫星S_i z轴坐标

$\rho_M^{(i)}$——卫星i至接收机M的伪距

1.1　伪距与多普勒频移双差定位

伪距测量对大气条件、钟差和多路径效应等因素敏感[23]，但多普勒频移测量受上述因素影响较小。多普勒频移测量更易受接收机运动和卫星钟差影响，但其可通过伪距测量进行补偿[24]。

在导航定位中，定位公共误差在一定的时空范围内具有相似性。且由于接收机卫星时钟误差也相同，通过放置两个接收机M、R，计算其差分来消除公共误差[25]。此外，如果两接收机观测到同样的两个卫星i和j，利用双差分技术通过对地面站点进行差分计算，同时对不同卫星之间进行差分运算[26]，消除接收机钟差影响。接收机M和接收机R在t时刻与卫星i和j的双重差分GNSS伪距$\rho_{MR}^{ij}(t)$为

$$\begin{aligned}\rho_{MR}^{ij}(t)&=\rho_M^i(t)-\rho_R^i(t)-\rho_M^j(t)+\rho_R^j(t)=R_{MR}^{ij}(t)-\zeta_{MR}^{ij}(t)\\&=\left(\boldsymbol{e}_i-\boldsymbol{e}_j\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{MR}(t)+\zeta_{MR}^{ij}(t)\end{aligned} \tag{2}$$

式中　ζ_{MR}^{ij}——伪距测量值

R_{MR}^{ij}——接收机和卫星之间真实距离双差

$\boldsymbol{e}_i$——接收机M到卫星i单位矢量

$\boldsymbol{e}_j$——接收机M到卫星j单位矢量

$\boldsymbol{r}_{MR}$——接收机M和R之间相对位置向量

在定位过程中，融合GNSS多普勒频移，接收机M、R与卫星i和j的多普勒频移双重差分公式为

$$\vartheta_{MR}^{ij}(t)=-\frac{f}{c}(\boldsymbol{e}_i-\boldsymbol{e}_j)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_{\boldsymbol{MR}}(t)+\boldsymbol{\gamma}_{MR}^{ij}(t) \tag{3}$$

式中　f——$\mathrm{GNSS_{L1}}$信号载波频率

$\boldsymbol{v}_{MR}$——接收机R与接收机M之间相对速度

$\boldsymbol{\gamma}_{MR}^{ij}$——多普勒频移观测噪声

c——光速

1.2　基于卡尔曼滤波的数据融合

在定义伪距及多普勒频移双差后，通过卡尔曼滤波算法[27]将两测量值进行融合定位。该算法构建于状态空间模型之上，将GNSS接收机采集的数据作为滤波器的输入端，以系统状态参数作为输出端，通过结合系统状态与观测方程，建立输入至输出的关联模型[28-29]。

1.2.1　状态方程

定义接收机M和接收机R之间的状态向量为

$$\boldsymbol{X}(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{r}_{MR}\\ \boldsymbol{v}_{MR}\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中　$\boldsymbol{r}_{MR}$——接收机M和接收机R间相对位置

接收机运动状态采用常用模型，系统状态转移方程为

$$\boldsymbol{X}(t+\tau)=\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{G}\boldsymbol{W}(t) \tag{5}$$

其中

$$\boldsymbol{\Phi}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{3\times3} & \tau\boldsymbol{I}_{3\times3}\\ \boldsymbol{O}_{3\times3} & \boldsymbol{I}_{3\times3}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}0.5\tau^2\boldsymbol{I}_3 & \tau\boldsymbol{I}_3\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

式中　τ——观测周期

$\boldsymbol{\Phi}$——状态转移模型

$\boldsymbol{G}$——过程噪声模型

$\boldsymbol{W}$——高斯相对加速度噪声

$\boldsymbol{O}$——零矩阵

$\boldsymbol{I}$——单位矩阵

该模型过程噪声协方差$\boldsymbol{Q}$为

$$\boldsymbol{Q}=\sigma^2\boldsymbol{G}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中　σ——沿各轴标准差，其均值为零

1.2.2　观测方程

$$\boldsymbol{Z}(t)=\boldsymbol{H}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{\xi}(t) \tag{7}$$

式中　$\boldsymbol{H}(t)$——观测模型

$\boldsymbol{\xi}(t)$——观测噪声

利用伪距和多普勒频移组成双差，将观测向量定义为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Z}(t)=\big[&\rho_{MR}^{12}(t)\ \ \rho_{MR}^{13}(t)\ \ \cdots\ \ \rho_{MR}^{1N}(t)\\&\vartheta_{MR}^{12}(t)\ \ \vartheta_{MR}^{13}(t)\ \ \cdots\ \ \vartheta_{MR}^{1N}(t)\big]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\xi}(t)=\big[&\zeta_{MR}^{12}(t)\ \ \zeta_{MR}^{13}(t)\ \ \cdots\ \ \zeta_{MR}^{1N}(t)\\&\gamma_{MR}^{12}(t)\ \ \gamma_{MR}^{13}(t)\ \ \cdots\ \ \gamma_{MR}^{1N}(t)\big]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{9}$$

利用参考卫星对所有测距测量值进行微分，消除相关定位误差。式(8)中，选择载噪比C/N_0大、仰角高的卫星作为参考卫星。由式(2)、(3)、(8)可得

$$\boldsymbol{H}(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}(t) & \boldsymbol{O}_{(N-1)\times3}\\ \boldsymbol{O}_{(N-1)\times3} & -\boldsymbol{U}(t)f/c\end{bmatrix} \tag{10}$$

其中

$$\boldsymbol{U}(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}(t)-\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}(t)\\ \boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}(t)-\boldsymbol{e}_3^{\mathrm{T}}(t)\\ \vdots\\ \boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}(t)-\boldsymbol{e}_N^{\mathrm{T}}(t)\end{bmatrix} \tag{11}$$

假设观测值独立，观测噪声协方差为

$$\boldsymbol{\Sigma}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Sigma}_{\rho} & \boldsymbol{O}_{N-1}\\ \boldsymbol{O}_{N-1} & \boldsymbol{\Sigma}_{\vartheta}\end{bmatrix} \tag{12}$$

定义σ_{ρ}^2和σ_{ϑ}^2分别为伪距和多普勒频移观测误差方差，$\boldsymbol{\Sigma}_{\rho}=\sigma_{\rho}^2\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$和$\boldsymbol{\Sigma}_{\vartheta}=\sigma_{\vartheta}^2\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$，其中

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{l}_{(N-1)\times 1} & -\boldsymbol{l}_{N-1} & -\boldsymbol{l}_{(N-1)\times 1} & \boldsymbol{l}_{N-1}\end{bmatrix} \tag{13}$$

其中$\boldsymbol{A}$中的$\boldsymbol{l}$表示一个下标维数和所有元素为1的矩阵。通过定义参数$\boldsymbol{\Phi}$、$\boldsymbol{G}$、$\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{\Sigma}$，卡尔曼滤波即可实现相对定位。

在卡尔曼滤波器中，后验估计协方差$\boldsymbol{P}^{+}$公式为

$$\boldsymbol{P}^{+}(t)=\left[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{H}(t)\right]\boldsymbol{P}^{-}(t) \tag{14}$$

式中 $\boldsymbol{P}^{-}$——先验估计协方差

$\boldsymbol{K}$——卡尔曼增益

$\boldsymbol{P}^{-}$的预测方程和$\boldsymbol{K}$更新方程为

$$\boldsymbol{P}^{-}(t)=\boldsymbol{F}\boldsymbol{P}^{+}(t-1)\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{K}(t)=\boldsymbol{P}^{-}(t)\boldsymbol{H}(t)^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{H}(t)\boldsymbol{P}^{-}(t)\boldsymbol{H}(t)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{\Sigma}\right)^{-1} \tag{16}$$

估计状态向量协方差式(14)其依赖于实际测量值。因此，其性能依赖于可见的GNSS卫星数量和位置。

2 基于Lasso回归的遮蔽环境定位算法改进

三七种植区树木遮挡或阴棚遮挡产生遮蔽环境会造成卫星导航信号弱和相位失锁等问题，使GNSS伪距和多普勒频移产生测量的额外偏差。通过Lasso回归求解重加权最小二乘问题，进行模型稀疏化，实现偏置向量估计。

2.1 基于伪距多普勒观测值的Lasso回归法

Lasso回归是一种采用L1正则化(L1-regularization)的线性回归技术，其可用来降低模型复杂性，避免图2所示过拟合问题，并选择重要的特征变量[30]。

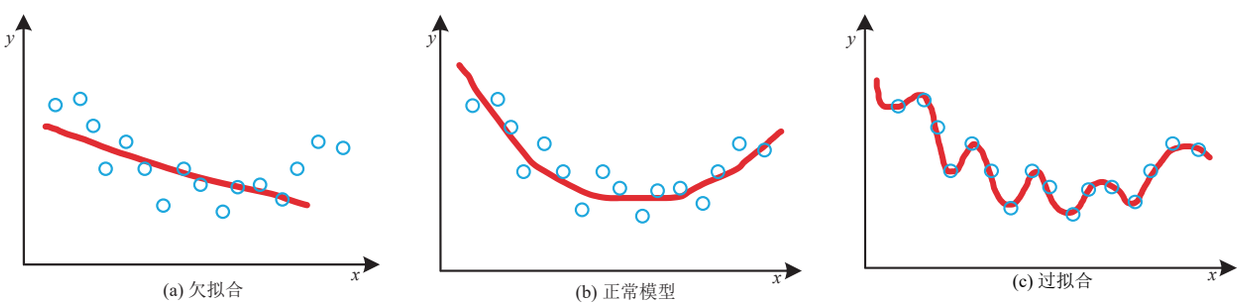


图2 过拟合问题示意图

Fig. 2 Schematics of overfitting

如图3所示，彩色椭圆为正则化参数变动下残差平方和分布情况，其中椭圆中心表示基于普通线性模型的最小二乘估计解，用$\hat{\beta}$表示。在该框架下，Lasso回归方法所采用的约束区域呈正菱形，等高线与约束区域的交点即最优目标函数解的位置。由于约束区域特性，其交点可能位于坐标轴上，导致某些特征权重降为零，进而产生一种易于生成稀疏解的算法特性。

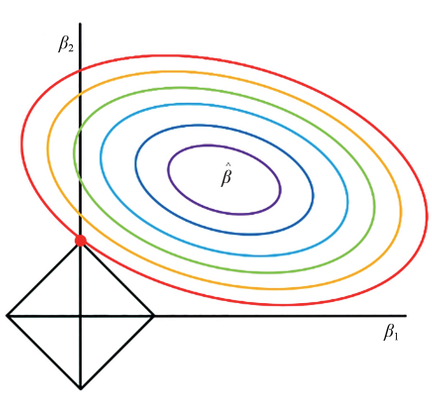


图3 Lasso回归示意图

Fig. 3 Lasso regression diagram

考虑经典回归模型中估计问题

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{X}\beta+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{17}$$

其中

$$\boldsymbol{y}=(y_1,y_2,\cdots,y_n)^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2,\cdots,\boldsymbol{X}_p)^{\mathrm{T}}$$

式中 $\boldsymbol{y}$——响应变量

$\boldsymbol{X}$——预测变量

β——回归系数

$\boldsymbol{X}_j=(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{nj})^{\mathrm{T}}\left(j=1,2,\cdots,p\right)$为线性独立的预测因子，误差以零均值和有限方差$\sigma^2$独立分布。在不损失一般性的情况下，假设响应和预测因素集中，因此$\sum_{i}^{n}x_{ij}=0$，$\sum_{i}^{n}y_i=0$，且截距可从模型中省略。当真实模型具有稀疏表示，即β某些分量恰好为零时，可给出稀疏建模问题。利用Lasso回归求解重加权L_1最小二乘问题得到稀疏向量，即

$$\hat{\beta}=\arg\min_{\beta\in R^p}\frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{X}\beta\right\|_2^2+\lambda\left\|\beta\right\|_1 \tag{18}$$

其中

$$\left\|\beta\right\|=\sum_{i=1}^{p}\left|\beta_i\right|$$

式中 λ——正则化参数

然而，因其迫使系数受到相等的惩罚，Lasso回归可能有不可忽略的估计偏差。通过建立自适应Lasso估计器，对不同系数赋予不同权重，获取最优预测性能，自适应Lasso为

$$\left\|\beta\right\|_1=\sum_{i=1}^{p}w_i\left|\beta_i\right| \tag{19}$$

式中　w——正权重

为求解一个从当前解值计算下一次迭代使用的权重，基于自适应Lasso回归的加权最小化定义为

$$\hat{\beta}^{*}=\arg\min_{\beta\in R^{p}}\frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{X}\beta\right\|_{2}^{2}+\lambda\left\|\boldsymbol{W}\beta\right\|_{1} \tag{20}$$

式中　$\boldsymbol{W}$——对角加权矩阵

通过使用自适应加权的L_1惩罚，重新加权的L_1最小化优于普通的L_1最小化。根据稀疏估计理论，提出的定位算法可以在GNSS信号相位失锁的情况下，估计GNSS伪距和多普勒频移测量的额外偏差。偏置向量$\boldsymbol{\xi}$相对于常见观测卫星数量稀疏，即未知偏置向量的某些分量等于零。为了估计偏置向量$\boldsymbol{\xi}$，需解决重加权L_1问题，即

$$\hat{\xi}=\arg\min_{\xi\in R^{2N-2}}\frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}-\boldsymbol{\xi}\right\|_{2}^{2}+\lambda\left\|\boldsymbol{W}\xi\right\|_{1} \tag{21}$$

为了得到一个类似于式(21)重加权L_1，使用最小二乘法建立$\boldsymbol{X}$和$\boldsymbol{\xi}$之间的联系，即

$$\boldsymbol{X}=\left(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\right)^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{\xi}\right) \tag{22}$$

通过引入式(22)$\boldsymbol{X}$的最小二乘标准形式，将式(22)重新表示为

$$\hat{\xi}=\arg\min_{\xi\in R^{2N-2}}\frac{1}{2}\left\|(\boldsymbol{I}_{2N-2}-\boldsymbol{P})(\boldsymbol{Z}-\xi)\right\|_{2}^{2}+\lambda\left\|\boldsymbol{W}\xi\right\|_{1} \tag{23}$$

其中　$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{H}\left(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\right)^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}$$

式中　$\boldsymbol{P}$——投影矩阵

$\boldsymbol{I}_{2N-2}$——单位矩阵

由于　$$\tilde{\boldsymbol{Z}}=(\boldsymbol{I}_{2N-2}-\boldsymbol{P})\boldsymbol{Z} \tag{24}$$

$$\tilde{\boldsymbol{H}}=\boldsymbol{I}_{2N-2}-\boldsymbol{P} \tag{25}$$

式(23)中$\boldsymbol{\xi}$的稀疏估计推导为

$$\hat{\xi}=\arg\min_{\xi\in R^{2N-2}}\frac{1}{2}\left\|\tilde{\boldsymbol{Z}}-\tilde{\boldsymbol{H}}\xi\right\|^{2}+\lambda\left\|\boldsymbol{W}\xi\right\|_{1} \tag{26}$$

2.2　加权GNSS测量模型求解

为求解式(26)，需定义与观测值相关的加权矩阵$\boldsymbol{W}$。假设所有观测值权重相等的单位矩阵不适用于高精度GNSS定位，其可能导致精度估计出错或结果可靠性差。故提出使用载噪比C/N_0作为方差模型输入，对GNSS测量值进行加权。C/N_0为接收信号强度的有效指标，对于存在相位失锁或多路径误差的信号，通常显示出较低的C/N_0[31]，C/N_0加权通常在较差的信号环境中表现更好。

基于C/N_0的观测值加权矩阵可构造为

$$\boldsymbol{W}=\operatorname{diag}\left(\sigma_1^2,\cdots,\sigma_j^2,\cdots,\sigma_N^2\right)^{-1} \tag{27}$$

其中　$$\sigma_j^2=a+10b\frac{-(C/N_0)_j}{10}$$

式中　σ_j——模型标准差

$\left(C/N_0\right)_j$为与第j颗卫星相关的C/N_0。使用常数：$a=10\ \mathrm{m^2\cdot Hz}$，$b=22\,500\ \mathrm{m^2\cdot Hz}$。方差模型中假设伪距和多普勒频移不相关，误差分别随$N\left(0,\Sigma_\rho\right)$，$N\left(0,\Sigma_{\dot{\rho}}\right)$变化。

双差中涉及两颗卫星的两个$\boldsymbol{W}$函数的组合计算公式为

$$\boldsymbol{W}\left[(C/N_0)_1,(C/N_0)_2\right]=\frac{\boldsymbol{W}\left[(C/N_0)_1\right]+\boldsymbol{W}\left[(C/N_0)_2\right]}{2} \tag{28}$$

此外，参数λ将会影响重加权后模型稀疏度。调节参数选取方法包括贝叶斯信息准则(BIC)，赤池信息量准则(AIC)和广义交叉验证(GCV)等。由于本文主要关注模型稀疏性，BIC惩罚项较AIC更大，且在考虑样本数量充足的情况下，采用贝叶斯信息准则调优参数选择器，即

$$BIC(\lambda)=\lg(\hat{\sigma}_\lambda^2)+\frac{1}{2N-2}\lg(2N-2)\mathrm{d}\hat{f}(\lambda) \tag{29}$$

其中　$$\hat{\sigma}_\lambda^2=\sum_{i=1}^{2N-2}\left(\tilde{\boldsymbol{Z}}-\tilde{\boldsymbol{H}}\xi\right)^2\Big/(2N-2)$$

式中　$\mathrm{d}\hat{f}$——ξ的非零系数量

3　试验

3.1　试验设备与方案

本研究主要使用设备为u-bloxZED-F9P高精度GNSS接收机，通过无线连接接收校正和记录数据，如图4所示。

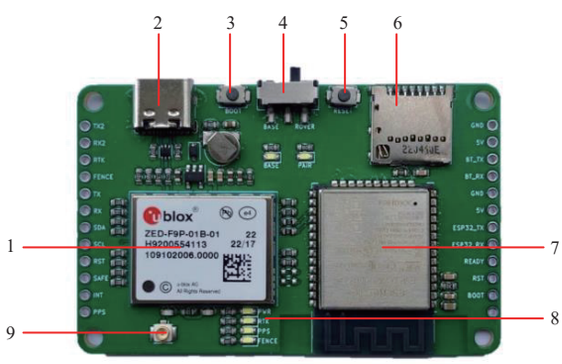


图4　u-bloxZED-F9P高精度GNSS接收机

Fig. 4　The u-bloxZED-F9P high-precision GNSS receiver

1. ZED-F9P模块　2. USB连接口　3. BOOT程序加载按键　4. 模式开关　5. RESET复位按键　6. 储存卡卡槽　7. 蓝牙Wi-Fi模块　8. 状态LED　9. GNSS天线连接口

该模块支持多星座信号接收，可单机实现定位定向功能，无线通讯方式丰富。当模式开关设置为Rover时，设备将进入位置模式，将接收来自多个星座(北斗、GPS、GLONASS、伽利略等)的L1和L2 GNSS信号，并通过配对蓝牙设备以波特率115 200 b/s广播。当开关设置为Base时，设备将进入Base Station模式。并且当设备安装到固定位置(如三脚架或屋顶)时，可作为基站使用。USB接口可用于为设备供电或连接计算机，使用u-center直接配置和检查ZED-F9P。信号采集时，所有设备设置及采集数据将以UBX格式存储在SD卡中。

使用安装ZED-F9P定位模块三七联合收获机进行

试验，试验方案如表1所示。试验数据采集时间为2023年1月24–26日。原始GNSS数据由u-blox ZED-F9P接收机采集，使用SD卡进行数据存储。设置参考站接收机R和流动站接收机M。每组数据采集时间为15 min，卫星截止高度角为15°，采样间隔为1 s，采用GNSS时间进行数据同步。

表1 定位算法试验方案

Tab. 1 Positioning algorithm test plan

试验环境	运动方式	采样时间/min	试验次数
开阔环境	静止	15	3
	自由行驶	30	1
树荫遮蔽	静止	15	3
	自由行驶	30	1
荫棚遮蔽	静止	15	3
	自由行驶	30	1

为模拟如图5所示不同情况下三七种植环境，试验于云南省高校中药材机械化工程研究中心试验基地、昆明理工大学机电院旁树林及草坪进行，试验场地分别对应开阔环境、荫棚遮蔽及树荫遮蔽，如图6所示。



(a) 开阔环境 (b) 树荫遮蔽 (c) 荫棚遮蔽

图5 三七种植环境

Fig. 5 *Panax notoginseng* planting environments



(a) 开阔环境 (b) 树荫遮蔽 (c) 荫棚遮蔽

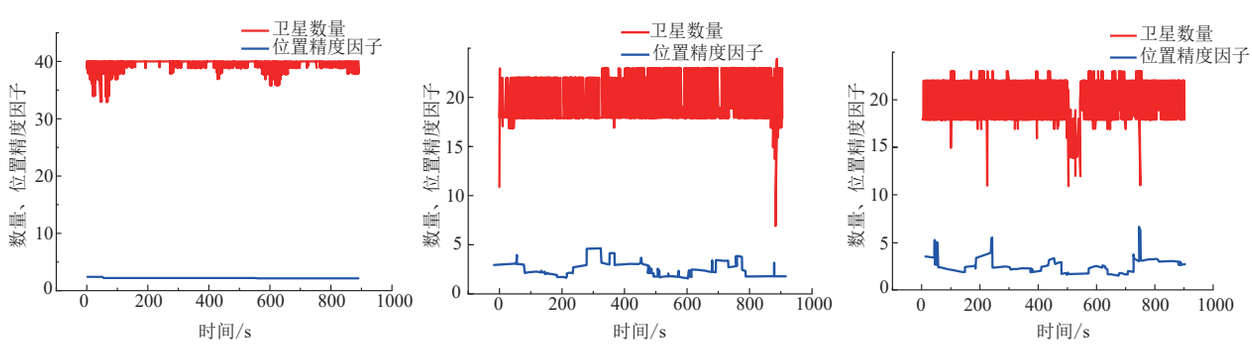
图6 试验环境

Fig. 6 Test environments

3.2 试验结果

采用Matlab软件对采集的RINEX文件进行解算。并针对不同环境下获取的观测数据，本研究与香港卫星定位基准站(HKSL)同步进行联测，以此解算定位结果作为真实值。

读取3种环境下GNSS可见卫星数及空间位置精度因子(PDOP)，结果如图7所示。



(a) 开阔环境 (b) 树荫遮蔽 (c) 荫棚遮蔽

图7 各环境下GNSS可见卫星数及PDOP

Fig. 7 Number of GNSS visible satellites and PDOP in various complex environments

由图7可知，在开阔环境下，卫星可见数约40颗，能够使用传统方法较好的完成定位解算，且PDOP值均在3.0以下；在树荫遮蔽环境下，卫星可见数大部分在18颗及以上，且PDOP值在2.0以上，卫星空间构型差；在荫棚遮蔽环境下，卫星观测情况类似于树荫遮蔽环境，卫星可见数在20颗上下浮动，但中间存在部分时间卫星可见数在15颗以下，PDOP值同2.0以上，空间构型欠佳。可见，在树荫遮蔽及荫棚遮蔽环境下，GNSS卫星信号差，亟需通过改进定位算法提高定位精度。

为充分验证算法有效性，分析改进单点定位算法定位偏差及其均方根误差。定位偏差ΔP计算式为

$$\Delta P = \left|(x_i, y_i) - (\bar{x}_i, \bar{y}_i)\right| \tag{30}$$

式中 (x_i, y_i)——时刻i定位参考坐标

$(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$——时刻i定位解算坐标

定位偏差均方根误差计算式为

$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta P^{\mathrm{T}} \Delta P}{n}} \tag{31}$$

式中 n——定位解算历元

3.2.1 静态工况

首先对各环境下数据进行分析，将3种环境下的观测数据分别通过传统伪距差分算法及改进GNSS伪距差分算法进行解算，得到静态条件下X、Y方向定位偏差如图8所示。由图8可知，在开阔环境下两种算法定位误差较为接近，但在2种遮蔽环境下改进定位算法相较传统伪距差分算法表现更佳，能够显著减小在遮蔽环境因导航信号弱和相位失锁等问题造成的定位误差，并改善定位效果。

静态工况下X、Y方向定位结果平均偏差如表2所

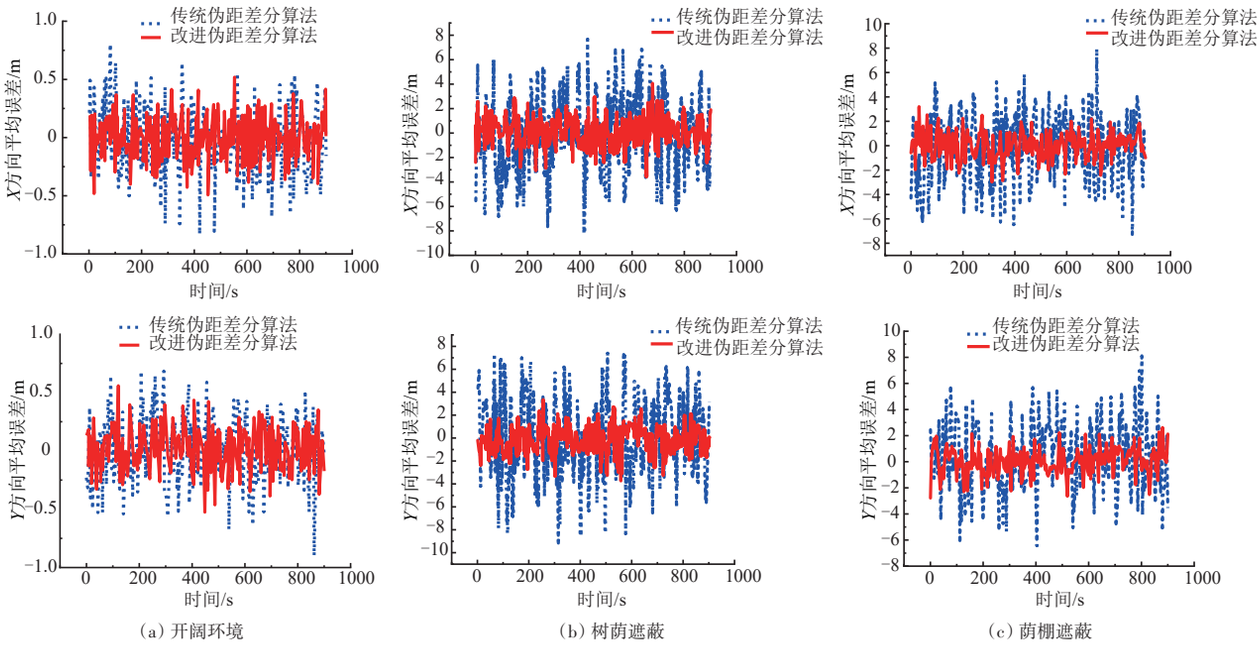


图8　不同环境下算法静态定位偏差

Fig. 8　Static positioning bias of algorithm in different environments

示。在开阔环境下，传统伪距双差算法具有较好的定位精度，X方向平均偏差为0.048 m，Y方向平均偏差为0.057 m。但在树荫遮蔽环境及荫棚遮蔽环境下，传统伪距双差算法静态平均定位偏差明显增大。树荫遮蔽环境下，X方向平均偏差为3.429 m，Y方向平均偏差为2.868 m。荫棚遮蔽环境下X方向平均偏差为3.269 m，Y方向平均偏差为2.611 m。传统伪距双差算法在遮蔽环境下平均偏差为3 m左右，单组数据最大平均偏差为4.061 m。而在3种试验场景中，基于伪距及多普勒频移双差的改进定位算法在X、Y两个方向上的位置误差较传统伪距双差定位算法均有明显减少，且在卫星信号差的遮蔽情景下表现更佳。树荫遮蔽环境下，X方向平均偏差为1.222 m，Y方向平均偏差为1.497 m。荫棚遮蔽环境X方向平均偏差为1.597 m，Y方向平均偏差为1.526 m。位置误差较伪距双差定位算法分别减少13.43%、56.08%、46.35%，显著提高了定位有效性。

定位偏差均方根误差表征定位算法可信度，如表3所示。在开阔环境、树荫遮蔽环境以及荫棚遮蔽环境下，本文所提出的基于伪距及多普勒频移改进GNSS定位算法相比于传统伪距双差算法具有较低均方根误差。传统伪距双差算法在3种环境下X和Y方向定位偏差均方根误差分别为0.832、1.121、4.080、3.921、4.143、4.279 m。而本文所提出改进算法定位偏差的均方根误差分别为0.219、0.251、1.427、1.584、2.199、1.990 m。定位偏差的均方根误差较伪距双差定位算法分别减少75.64%、62.31%、50.21%，显著提高了定位可信度。

荫棚遮蔽环境下，两种算法分别解算得静态定位二维偏差分布如图9所示，可知在静态工况遮蔽环境下，本文所提出的算法优于传统伪距双差算法。

表2　各环境下两算法静态平均定位偏差统计

Tab. 2　Statistics of static average deviations of two algorithms in each environment　　m

观测环境	组别	X方向		Y方向	
		传统	改进	传统	改进
开阔环境	1	0.042	0.035	0.068	0.054
	2	0.058	0.049	0.066	0.063
	3	0.043	0.038	0.037	0.033
	平均值	0.048	0.041	0.057	0.050
树荫遮蔽	1	3.302	1.156	2.821	1.489
	2	4.061	1.538	2.576	1.441
	3	2.924	0.973	3.208	1.562
	平均值	3.429	1.222	2.868	1.497
荫棚遮蔽	1	3.208	1.577	3.260	1.590
	2	2.965	1.554	2.911	1.508
	3	3.634	1.659	1.661	1.479
	平均值	3.269	1.597	2.611	1.526

3.2.2　动态工况

动态工况下各环境下两算法动态平均定位偏差和定位偏差均方根误差如表4、5所示。相比于静态工况，动态工况下平均定位偏差在3种环境下均有增加，而定位偏差均方根误差在2种遮蔽环境下有所增加，但传统伪距差分算法平均定位偏差和定位偏差均方根误差增大更加明显。

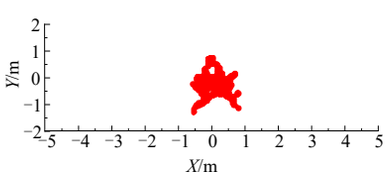
动态工况下，传统伪距双差算法在3种环境下X和Y方向平均定位偏差为0.216、0.185、5.307、6.100、5.895、6.566 m，且在荫棚遮蔽环境下平均误差最大，为5.895、6.566 m。定位偏差均方根误差分别为0.762、0.543、8.632、10.618、13.251、11.157 m。而本文所提出的算法在3种环境下X和Y方向平均定位偏差为0.138、0.115、2.570、2.885、2.216、2.473 m。定位偏差均方根误差分别为0.325、0.362、3.811、3.755、4.070、4.202 m。在开阔环境

中，改进算法定位偏差为0.13 m左右，定位偏差RMS小于0.4 m，在遮蔽环境下定位偏差小于3 m，定位偏差RMS为4 m左右。在遮蔽环境下定位偏差小于3 m，定位偏差RMS在4 m左右。改进定位算法由于参与多普勒频移数据，弥补了遮蔽环境下卫星信号弱以及相位失锁影响，使定位误差分别减少36.97%、52.14%、62.37%，定位偏差均方根误差分别减少45.34%、60.24%、65.81%。

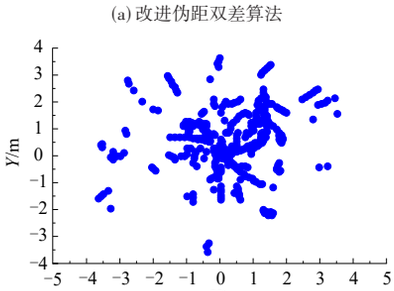
表3 各环境下两算法静态定位偏差RMS统计

Tab. 3 RMS of static positioning deviations of two algorithms in various environments m

观测环境	组别	X方向		Y方向	
		传统	改进	传统	改进
开阔环境	1	0.288	0.168	1.357	0.358
	2	0.522	0.208	1.181	0.245
	3	1.687	0.282	0.826	0.151
	平均值	0.832	0.219	1.121	0.251
树荫遮蔽	1	3.963	1.465	3.674	1.272
	2	3.648	0.970	4.335	2.132
	3	4.630	1.845	3.754	1.349
	平均值	4.080	1.427	3.921	1.584
荫棚遮蔽	1	3.986	2.058	3.404	1.475
	2	4.606	2.667	4.777	2.281
	3	3.837	1.872	4.655	2.213
	平均值	4.143	2.199	4.279	1.990



(a) 改进伪距双差算法



(b) 传统伪距双差算法

图9 两算法静态定位二维偏差

Fig. 9 Two-dimensional deviation of static positioning by using two algorithms

表4 各环境下两算法动态平均定位偏差统计

Tab. 4 Statistics of dynamic average deviations of two algorithms in each environment m

观测环境	X方向		Y方向	
	传统	改进	传统	改进
开阔环境	0.216	0.138	0.185	0.115
树荫遮蔽	5.307	2.570	6.100	2.885
荫棚遮蔽	5.895	2.216	6.566	2.473

荫棚遮蔽环境下，2种算法分别解算得到动态定位轨迹分布如图10所示。

表5 各环境下两算法动态定位偏差RMS统计

Tab. 5 RMS of dynamic positioning deviations of two algorithms in various environments m

观测环境	X方向		Y方向	
	传统	改进	传统	改进
开阔环境	0.762	0.325	0.543	0.362
树荫遮蔽	8.632	3.811	10.618	3.755
荫棚遮蔽	13.251	4.070	11.157	4.202

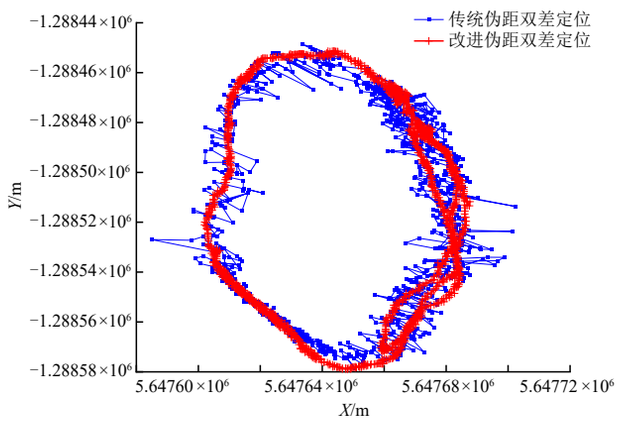


图10 两算法动态定位轨迹

Fig. 10 Two algorithms positioning trajectory

3.2.3 定位精度

两种算法定位效果如表6所示。定位误差结果被划分为0~3 m、3~6 m以及大于6 m 3个等级，观测数据共计3 600个。

表6 定位精度统计

Tab. 6 Positioning accuracy statistics

区间/m	传统伪距定位数量	改进算法数量	传统伪距定位占比/%	改进算法占比/%
0~3	837	2 111	23.25	58.64
3~6	868	1 489	24.11	41.36
>6	1 895	0	52.64	0

其中，传统伪距定位算法定位误差在0~3 m精度区间内数据量为837，占总数的23.25%；在区间3~6 m数据量为868，占比24.11%，而误差精度在6 m以上数据则有1 895，占比达52.64%。改进定位算法定位误差在区间0~3 m的内有数据2 111，占比高达58.64%，在区间3~6 m数据量为1 489，占比41.36%，而在6 m以上区间内没有数据。

综上所述，本文所提出的基于伪距及多普勒双差改进定位算法，在所有工况下均优于传统伪距双差的定位效果，并且在卫星被遮挡造成卫星信号差时具有较大优势，具有较高鲁棒性。

4 结论

(1)提出了基于伪距及多普勒频移的改进GNSS定位算法。基于伪距测量和多普勒频移测量受影响因素的不同，以伪距双差及多普勒频移双差为输入，载噪比为权重，通过卡尔曼滤波实现测量值融合，降低估计误

差来校正伪距和多普勒频移测量。其次，采用贝叶斯信息准则选择正则化参数，并通过Lasso回归求解重加权最小二乘问题，实现模型稀疏化。

（2）使用u-blox ZED-F9P高精度GNSS接收机采集RINEX格式报文，并使用Matlab实现了数据提取与位置解算。在开阔环境，荫棚遮蔽及树荫遮蔽3种工况下，进行了实车定位精度试验。

（3）试验结果与传统伪距定位算法相比，静态定位时，开阔环境、荫棚遮蔽环境和树荫遮蔽环境位置误差分别降低13.43%、56.08%、46.35%，定位偏差均方根误差分别减少75.64%、62.31%、50.21%。动态工况遮蔽环境下定位误差分别降低36.97%、52.14%、62.37%，定位偏差均方根误差分别减少45.34%、60.24%、65.81%。所提方法有效缓解了遮蔽环境下GNSS卫星信号差、相位失锁带来的定位误差，有效提高了复杂工况下农机定位精度与定位可信度。

参　考　文　献

[1] 王法安，温博，谢晓红，等.三七收获机输送分离装置作业机理分析与参数优化[J].农业机械学报，2023，54(增刊1)：201－211，259.
WANG Faan, WEN Bo, XIE Xiaohong, et al. Operation mechanism analysis and parameter optimization of conveying and separating device of *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 201－211，259. (in Chinese)

[2] 刘立红，刘英，王芬，等.云南三七产业发展现状及发展建议[J].中国现代中药，2017，19(9)：1331－1335.
LIU Lihong, LIU Ying, WANG Fen, et al. The current development situation and suggestion of *Panax notoginseng* in Yunnan Province[J]. Modern Chinese Medicine, 2017, 19(9): 1331－1335. (in Chinese)

[3] 张兆国，邓寓轩，王法安，等.自走式三七联合收获机底盘通过性能分析与模型试验[J].农业机械学报，2023，54(9)：164－177.
ZHANG Zhaoguo, DENG Yuxuan, WANG Faan, et al. Trafficability analysis and scaling model experiment of self-propelled *Panax notoginseng* combine harvester chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 164－177. (in Chinese)

[4] 张兆国，王一驰，李汉青，等.液压控制履带自走式温室三七收获机设计与试验[J].农业机械学报，2021，52(6)：127－135，158.
ZHANG Zhaoguo, WANG Yichi, LI Hanqing, et al. Design and test of hydraulic control tracked self-propelled greenhouse *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 127－135，158. (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] 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)

[7] 王法安，王博洋，张兆国，等.履带车辆自适应预瞄跟踪模糊控制算法[J].农业工程学报，2024，40(10)：32－43.
WANG Faan, WANG Boyang, ZHANG Zhaoguo, et al. Adaptive preview tracking fuzzy control algorithm for tracked vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(10): 32－43. (in Chinese)

[8] 邓陈喜，姜维，王剑，等.基于北斗3号PPP-B2b信号的实时精密单点定位方法研究[J].铁道学报，2024，46(2)：63－73.
DENG Chenxi, JIANG Wei, WANG Jian, et al. Research on real-time precise point positioning method based on BDS-3 PPP-B2b signals[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(2): 63－73. (in Chinese)

[9] 邹俊平，王解先.单双频GPS混合观测高精度单频精密单点定位[J].同济大学学报(自然科学版)，2021，49(5)：731－736.
ZOU Junping, WANG Jiexian. Mixed application of single and dual frequency receivers in single-frequency precise point positioning[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2021, 49(5): 731－736. (in Chinese)

[10] HAO Yushi, SHI Chuang, XU Aigong, et al. Revealing methods of GNSS spoofing mitigation through analyzing the spoofing impacts on adaptively robust estimation-based RTK/INS tightly coupled integration[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(20): 25165－25178.

[11] 李文娇. 北斗伪距差分定位PPP反演大气延迟性能评估[D]. 济南：山东大学，2022.
LI Wenjiao. Atmosphere deley performance evaluation BDS pseudorange differential positioning PPP inversion[D]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese)

[12] 陈俊平，张益泽，于超，等.北斗卫星导航系统精密定位报告算法与性能评估[J].测绘学报，2022，51(4)：511－521.
CHEN Junping, ZHANG Yize, YU Chao, et al. Processing algorithms and performance evaluation of BDS RDSS location reporting service[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(4): 511－521. (in Chinese)

[13] AN Xiangdong, ZIEBOLD R, LASS C. From RTK to PPP-RTK: towards real-time kinematic precise point positioning to support autonomous driving of inland waterway vessels[J]. GPS Solutions, 2023, 27: 15211886.

[14] PANDA S K, GEDAM S S. Evaluation of GPS standard point positioning with various ionospheric error mitigation techniques[J]. Journal of Applied Geodesy, 2016, 10(4): 211－221.

[15] 吕大千.基于精密单点定位的GNSS时间同步方法研究[J].测绘学报，2022，51(2)：315.
LÜ Daqian. Research on GNSS time synchronization method based on precise point positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica

Sinica, 2022, 51(2): 315. (in Chinese)

[16] ZHUANG Xu, YANG Jie. MPARELAM: robust approach for ambiguity resolution in complex RTK positioning scenarios[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(17): 19582 - 19589.

[17] IWAMOTO T, NAGANO T, KENICHI T. Statisitical estimation of pseudo ranges to GPS satellites[J]. Technical Report of IEICE, 2015, 105(4):25 - 28.

[18] ZHANG Yuan, TAN Xinglong, ZHANG Chengsheng, et al. Adaptive particle filter UWB location algorithms considering colored noise [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019, 20(8):30 - 33.

[19] LIANG Xiao, HUANG Zhigao, QIN Honglei. A new rapid integer ambiguity resolution of GNSS phase-only dynamic differential positioning[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 3117093.

[20] 董蔺,姬生月,王振杰.基于北斗短报文的低成本远海伪距差分定位方法[J].测绘通报,2023(2):128 - 133,149.
DONG Lin, JI Shengyue, WANG Zhenjie. Investigation on low-cost remote ocean pseudorange differential positioning with BeiDou short message service[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(2): 128 - 133,149. (in Chinese)

[21] 王威欢. 北斗导航的高精度伪距测量定位方法研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2023.
WANG Weihuan. Research on high precision pseudo range measurement and positioning method of Beidou navigation[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University,2023. (in Chinese)

[22] 颜翰文,张益泽.顾及电离层延迟改正精度信息的伪距单点定位随机模型[J/OL].导航定位与授时,1 - 22[2024-10-13].
YAN Hanwen, ZHANG Yize. Stochastic model of pseudorange single point positioning considering ionospheric delay correction accuracy information[J/OL]. Navigation positioning and timing, 1 - 22[2024-10-13]. (in Chinese)

[23] SWAMY KCT, VENKATA R D, SUMAN T, et al. Time-differenced double difference method for measurement of navigation with Indian Constellation (NavIC) receiver differential phase bias[J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2023, 207: 112385.

[24] BAI Shiyu, LAI Jizhou, Lü Pin, et al. Performance enhancement of tightly coupled GNSS/IMU integration based on factor graph with robust tdcp loop closure[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(3): 2437 - 2449.

[25] 王虎,党亚民,侯阳飞,等.PPP网解UPD模糊度固定的无基站差分大型CORS站整网快速精密解算[J].测绘学报,2020,49(3):278 - 291.
WANG Hu, DANG Yamin, HOU Yangfei, et al. Rapid and precise solution of the whole network of thousands of stations in China based on PPP network solution by UPD fixed technology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(3): 278 - 291. (in Chinese)

[26] WU Ning, QIN Honglei, ZHANG Chao. Long-baseline differential doppler positioning using space-based SOP based on BPVGMM[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 3276510.

[27] HUANG Xunhua, ZHANG Fengbin, WANG Ruidong, et al. KalmanAE: Deep embedding optimized kalman filter for time series anomaly detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 3329098.

[28] 徐厚宝,杨承莲,张永康.卡尔曼滤波优化的高斯过程回归模型[J].北京理工大学学报,2024,44(5):538 - 545.
XU Houbao, YANG Chenglian, ZHANG Yongkang. Optimization model of Gaussian process regression based on Kalman filtering[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(5): 538 - 545. (in Chinese)

[29] KO K, BYUN I, AHN W, et al. Response to comments on high-speed train positioning using deep kalman filter with 5G NR signals[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(2): 2170 - 2171.

[30] YUAN Min, JIANG Chen, ZHANG Yixiong, et al. Interference suppression for automotive millimeter-wave radars with fused lasso[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(7): 7987 - 8002

[31] XU Penghui, ZHANG Guohao, ZHONG Yihan, et al. A framework for graphical GNSS multipath and NLOS mitigation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(9): 12176 - 12186.