引文格式：刘畅. 基于时间差分观测值的单天线北斗车辆航向角与俯仰角估计[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 27-31. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.05.006

基于时间差分观测值的单天线北斗车辆航向角与俯仰角估计

刘　畅
（辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院，辽宁 阜新 123000）

摘　要：地面车辆的姿态信息（航向角与俯仰角）在智能交通、移动测绘等领域具有重要应用价值。传统多天线北斗姿态测量方案存在成本高、安装复杂等缺点，提出了一种基于单天线北斗接收机的低成本姿态解算方法。基于单频北斗接收机输出的载波相位或伪距观测值，通过时间差分处理消除公共误差，再结合车辆运动学约束精确估计车辆的动态航向角和俯仰角。实验结果表明，基于时间差分载波相位（TDCP）的算法在良好观测条件下可提供优于3.93°的航向角精度和2.60°的俯仰角精度；基于时间差分伪距（TDPR）的算法也能达到优于8.96°的实用精度，为低成本车辆姿态测量提供了有效解决方案。

关键词：GNSS；TDCP；TDPR；车辆姿态；单天线
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0027-05

Single Antenna BDS Vehicle Heading Angle and Pitch Angle Estimation Based on Time Differenced Observation

LIU Chang
(School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Attitude information (heading angle and pitch angle) of ground vehicles is essential in intelligent transportation and mobile surveying and mapping. Traditional multi-antenna BDS attitude measurement solutions suffer from high cost and complex installation. We proposed a low-cost attitude solution method based on single antenna BDS receiver. Based on carrier phase or pseudo range observations from single frequency BDS receiver, we eliminated common errors through time differenced processing, and accurately estimated dynamic heading angle and pitch angles by incorporating vehicle kinematic constraints. Experimental results show that the algorithm based on time differenced carrier phase (TDCP) provides heading angle accuracy better than 3.93°and pitch angle accuracy better than 2.60° under favorable observation conditions, while the algorithm based on time differenced pseudo range (TDPR) achieves practical accuracy better than 8.96°, offering an effective solution for low-cost vehicle attitude measurement.

Key words: GNSS, TDCP, TDPR, vehicle attitude, single antenna

车辆姿态信息，尤其是航向角与俯仰角，是智能交通系统、高精度地图采集、车辆动力学控制、移动测绘等应用的核心参数之一[1]。传统的姿态获取方案通常依赖于集成惯性测量单元（IMU）、磁力计、多天线全球导航卫星系统（GNSS）接收机[2-3]等多传感器融合系统。基于多天线GNSS的载波相位相对定位技术，可通过解算短基线向量直接提供高精度的航向与俯仰信息[4-5]；但存在安装复杂、成本高昂、易受载体形变影响等不足[6]。为降低系统成本与复杂度，单天线GNSS姿态测量技术受到广泛关注[7]。早期方法多依赖于与IMU、轮速计等传感器的融合[8-9]或利用多普勒频移、信号到达角等特征[10-11]，但仍存在依赖外部传感器或易受环境干扰的局限性。近年来基于时间差分载波相位（TDCP）的方法为单天线高精度动态定位与测速提供了有效途径[12-13]，通过对相邻历元的载波相位观测值作差，有效消除钟差、整周模糊度以及大部分大气延迟等公共误差，实现厘米级甚至毫米级的历元间位移估计[14-15]；再结合车辆在道路平面的运动学约束，可从位移矢量中解算得到航向角与俯仰角[16]。Sun 等[17]系统验证了基于TDCP的单天线GNSS姿态估计方法的可行性。类似地，时间差分伪距（TDPR）技术虽然精度较低，但抗干扰能力更强，为复杂环境下的姿态维持提供了备用手段[18-19]。现有研究对TDCP在复杂城市环境下的误差特性及其与TDPR的系统性性能对比尚不充分，因此本文提出了一种完全基于单天线北斗接收机观测数据的车辆航向角与俯仰角估计方法，重点对比分析了TDCP与TDPR方法的姿态估计性能，并探讨了基于残差检测的自适应融合

作者简介：刘畅（2005—），本科，研究方向为空地结合导航定位，E-mail：lchang202307@163.com。

策略，为后续融合算法的设计与实现提供了参考。

1 单天线GNSS姿态测量原理

车辆姿态定义需建立3个参考坐标系（图1）：地心地固坐标系（ECEF），原点位于地球质心，随地球旋转，定义为 (X, Y, Z) [15]；东北天坐标系（ENU），是以车辆当前位置为原点的局部导航坐标系，X 轴指向大地东、Y 轴指向大地北、Z 轴垂直于参考椭球体（指向上方）；车身坐标系，以车身中心线向前的运动方向为 y 轴，位于汽车运动的平面上，x 轴垂直于车身中心线，在汽车运动的平面上指向原点的右边，z 轴向上垂直于汽车运动平面[17]。

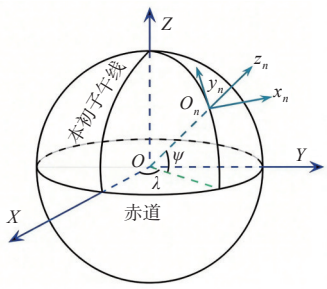


图1 车辆姿态定义的3个参考坐标系

2 时间差分测量模型

2.1 TDCP模型

载波相位观测方程可表示为：

$$\Phi=\frac{1}{\lambda}\left[r+\mathrm{c}\left(dt_{\mathrm{R}}-dt^{\mathrm{S}}\right)-I_{\phi}+T_{\phi}\right]+N+\epsilon_{\phi} \tag{1}$$

式中，Φ 为以周为单位的测量载波相位；r 为用户与卫星之间的几何距离；λ 为波长；c 为真空中光速；I_{ϕ} 为电离层误差；T_{ϕ} 为对流层误差；dt_{R} 为用户钟差；dt^{S} 为卫星钟差；N 为整周模糊度；ϵ_{ϕ} 为未建模效应、模型误差和测量误差。

在历元 t_k，载波相位测量方程可表示为：

$$\Phi_{t_k}=\frac{1}{\lambda}\left(r_{t_k}-I_{\phi t_k}+T_{\phi t_k}\right)+\frac{\mathrm{c}}{\lambda}\left(dt_{\mathrm{R}t_k}|dt^{St_k}\right)+N_{t_k}+\epsilon_{\phi} \tag{2}$$

在较小的采样率下，多数共模误差的变化速度较平缓；且只要载波跟踪环路能保持锁定状态，N 即可维持恒定不变[12-14]。基于这一特性，恒定的 N、dt^{S}、T_{ϕ}、I_{ϕ}、ϵ_{ϕ} 均可被有效消除，则有：

$$\Delta\Phi=\Phi_{t_{k+1}}-\Phi_{t_k}=\frac{1}{\lambda}\Delta r+\frac{\mathrm{c}}{\lambda}\Delta dt_{\mathrm{R}}+\Delta\epsilon_{\phi} \tag{3}$$

式中，$\Delta\Phi$、Δr 分别为两个测量历元间的载波相位和几何距离变化；Δdt_{R} 为用户钟漂；$\Delta\epsilon_{\phi}$ 为时间差分后未消除的测量误差，是由卫星钟差、卫星位置、电离层误差、对流层延迟、多路径和接收机噪声等变化引起的历元间残差，通常可忽略不计。

$$\Delta r=r_{t_{k+1}}-r_(t_k)=|X^{\mathrm{S}}_{t_{k+1}}-X_(t_{k+1})\hat{}R|-|X^{\mathrm{S}}_{t_k}-X^{\mathrm{R}}_{t_k}| \tag{4}$$

式中，$X^{\mathrm{S}}_{t_{k+1}}$、$X^{\mathrm{S}}_{t_k}$ 分别为历元 t_{k+1} 和 t_k 时BDS卫星在ECEF坐标系中的位置矢量；$X^{\mathrm{R}}_{t_{k+1}}$、$X^{\mathrm{R}}_{t_k}$ 分别为历元 t_{k+1} 和 t_k 时用户在ECEF坐标系中的位置矢量；‖为求范数运算。

将式（4）写成矢量乘法形式，即

$$\Delta r=\vec{r}_{t_{k+1}}\cdot\left(X^{\mathrm{S}}_{t_{k+1}}|X^{\mathrm{R}}_{t_{k+1}}\right)-\vec{r}_{t_k}\cdot\left(X^{\mathrm{S}}_{t_k}|X^{\mathrm{R}}_{t_k}\right) \tag{5}$$

$$\vec{r}_{t_k}=\frac{X^{\mathrm{S}}_{t_k}-X^{\mathrm{R}}_{t_k}}{|X^{\mathrm{S}}_{t_k}-X^{\mathrm{R}}_{t_k}|} \tag{6}$$

式中，$\vec{r}_{t_{k+1}}$、$\vec{r}_{t_k}$ 为从用户位置指向卫星的单位矢量；·为矢量的内积。

尽管卫星和用户在两个连续历元中都在运动，但由于卫星速度（卫星比用户运动快得多，因此仅以卫星为例）约为3 km/s，每颗卫星在两个连续历元间移动的距离远小于用户与卫星之间的距离（约为20 000 km），因此 $\vec{r}_{t_{k+1}}$ 可近似等于 $\vec{r}_{t_k}$，则有：

$$\Delta r=\vec{r}_{t_{k+1}}\cdot\left(\Delta r^{\mathrm{S}}-\Delta r^{\mathrm{R}}\right) \tag{7}$$

式中，Δr^{S}、Δr^{R} 分别为卫星和接收机在ECEF坐标系中两个连续历元间的位置变化量。

$$\Delta\Phi=\frac{1}{\lambda}r_{t_{k+1}}\cdot\left(\Delta r^{\mathrm{S}}-\Delta r^{R}\right)+\frac{\mathrm{c}}{\lambda}\Delta dt_{\mathrm{R}}+\Delta\epsilon_{\phi} \tag{8}$$

$$\left[r_{t_{k+1}}\ \ -1\right]\cdot\begin{bmatrix}\Delta r^{\mathrm{R}}\\ \mathrm{c}\Delta dt_{\mathrm{R}}\end{bmatrix}=r_{t_{k+1}}\cdot\Delta r^{\mathrm{S}}-\lambda\Delta\Phi+\lambda\Delta\epsilon_{\phi} \tag{9}$$

若至少观测到4颗卫星且其载波跟踪环路保持锁定，则可按式（10）计算ECEF坐标系中的车辆位置变化量 Δr^{R}：

$$\begin{bmatrix}r^1_{t_{k+1}} & -1\\ r^2_{t_{k+1}} & -1\\ \vdots & \vdots\\ r^l_{t_{k+1}} & -1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}}\\ \mathrm{c}\Delta dt_{\mathrm{R}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r^1_{t_{k+1}}\cdot\Delta r^{S1}-\lambda\Delta\Phi^1\\ r^2_{t_{k+1}}\cdot\Delta r^{S2}-\lambda\Delta\Phi^2\\ \vdots\\ r^l_{t_{k+1}}\cdot\Delta r^{Sl}-\lambda\Delta\Phi^l\end{bmatrix}+\lambda\begin{bmatrix}\Delta\epsilon^1_{\phi}\\ \Delta\epsilon^2_{\phi}\\ \vdots\\ \Delta\epsilon^l_{\phi}\end{bmatrix} \tag{10}$$

令 $\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}r^1_{t_{k+1}} & -1\\ r^2_{t_{k+1}} & -1\\ \vdots & \vdots\\ r^l_{t_{k+1}} & -1\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}r^1_{t_{k+1}}\cdot\Delta r^{S1}-\lambda\Delta\Phi^1\\ r^2_{t_{k+1}}\cdot\Delta r^{S2}-\lambda\Delta\Phi^2\\ \vdots\\ r^l_{t_{k+1}}\cdot\Delta r^{Sl}-\lambda\Delta\Phi^l\end{bmatrix}$，基于最小二乘法，可以得到：

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}}\\ \mathrm{c}\Delta dt_{\mathrm{R}}\end{bmatrix}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C} \tag{11}$$

式中，$\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}}=[\Delta x^{\mathrm{R}}\ \ \Delta y^{\mathrm{R}}\ \ \Delta z^{\mathrm{R}}]^{\mathrm{T}}$；$x^{\mathrm{R}}$、$\Delta y^{\mathrm{R}}$ 和 Δz^{R} 为ECEF坐标系3个轴的车辆位置变化量。

2.2　TDPR模型

伪距测量模型可表示为：

$$\rho = r + \mathrm{c}\left(dt_{\mathrm{R}} | dt^{\mathrm{S}}\right) + I_{\rho} + T_{\rho} + \epsilon_{\rho} \tag{12}$$

式中，I_{ρ} 和 T_{ρ} 分别为信号穿过电离层和对流层产生的延迟。

由于大多数共模误差在较小的采样率内变化缓慢，因此可消除 dt^{S}、T_{ρ}、I_{ρ}、ϵ_{ρ}。TDPR测量可表述为：

$$\Delta\rho = \rho_{t_{k+1}} - \rho_{t_k} = \Delta r + \mathrm{c}\Delta dt_{\mathrm{R}} + \Delta\epsilon_{\rho} \tag{13}$$

式中，$\Delta\rho$、Δr 分别为两个历元间的伪距和几何距离变化；Δdt_{R} 为用户接收机钟差；$\Delta\epsilon_{\rho}$ 通常可以忽略不计[19-20]。

$$\Delta\rho = r_{t_{k+1}} \cdot \left(\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{S}} - \Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}}\right) + \mathrm{c}\Delta dt_{\mathrm{R}} + \Delta\epsilon_{\rho} \tag{14}$$

$$\left[r_{t_{k+1}} \quad -1\right] \cdot \begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}} \\ \mathrm{c}\Delta dt_{\mathrm{R}}\end{bmatrix} = r_{t_{k+1}} \cdot \Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{S}} - \Delta\rho + \Delta\epsilon_{\rho} \tag{15}$$

若至少观测到4颗卫星，则可按照式（16）计算ECEF坐标系中的车辆位置变化量：

$$\begin{bmatrix} r^1_{t_{k+1}} & -1 \\ r^2_{t_{k+1}} & -1 \\ \vdots & \vdots \\ r^l_{t_{k+1}} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}} \\ \mathrm{c}\Delta dt_{\mathrm{R}}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r^1_{t_{k+1}} \cdot \Delta r^{S1} - \Delta\rho^1 \\ r^2_{t_{k+1}} \cdot \Delta r^{S2} - \Delta\rho^2 \\ \vdots \\ r^l_{t_{k+1}} \cdot \Delta r^{Sl} - \Delta\rho^l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\epsilon^1_{\rho} \\ \Delta\epsilon^2_{\rho} \\ \vdots \\ \Delta\epsilon^l_{\rho} \end{bmatrix} \tag{16}$$

令 $\boldsymbol{C}_1 = \begin{bmatrix} r^1_{t_{k+1}} \cdot \Delta r^{S1} - \Delta\rho^1 \\ r^2_{t_{k+1}} \cdot \Delta r^{S2} - \Delta\rho^2 \\ \vdots \\ r^l_{t_{k+1}} \cdot \Delta r^{Sl} - \Delta\rho^l \end{bmatrix}$，基于最小二乘法可以得到：

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}} \\ \mathrm{c}\Delta dt_{\mathrm{R}}\end{bmatrix} = (\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_1 \tag{17}$$

2.3　从车辆位置变化估计航向角和俯仰角

考虑到道路几何形状和车辆运动限制（通常可简化为非完整约束），车辆在道路上行驶时，其航向近似等于其轨迹曲线的切线方向，且航向不能突然改变，因此可以采用历史轨迹曲线的割线来替代切线，割线方向即为车辆航向值；俯仰角同理。

姿态与ENU坐标系中位置变化的关系见图2，车辆在ENU坐标系中的位置变化 $\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}}_{\mathrm{ENU}} = [\Delta x^{\mathrm{R}}_{\mathrm{E}} \quad \Delta y^{\mathrm{R}}_{\mathrm{N}} \quad \Delta z^{\mathrm{R}}_{\mathrm{U}}]^{\mathrm{T}}$，其中 $\Delta x^{\mathrm{R}}_{\mathrm{E}}$、$\Delta y^{\mathrm{R}}_{\mathrm{N}}$ 和 $\Delta z^{\mathrm{R}}_{\mathrm{U}}$ 分别为ENU坐标系东、北、天方向的位置变化量。从 $\Delta\boldsymbol{r}$ 到 $\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}}_{\mathrm{ENU}}$ 的ECEF到ENU的转换为 $\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}}_{\mathrm{ENU}} = \boldsymbol{R}^{\mathrm{ENU}}_{\mathrm{ECEF}}\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}}$，其中 $\boldsymbol{R}^{\mathrm{ENU}}_{\mathrm{ECEF}} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\cos\lambda\sin\phi & -\sin\lambda\sin\phi & \cos\phi \\ \cos\lambda\cos\phi & \sin\lambda\cos\phi & \sin\phi \end{bmatrix}$。一旦获得 $\Delta\boldsymbol{r}^{\mathrm{R}}_{\mathrm{ENU}}$，车辆在ENU坐标系中的俯仰角（弧度）为 $\tan^{-1}\left(\dfrac{\Delta z^{\mathrm{R}}_{\mathrm{U}}}{\sqrt{(\Delta x^{\mathrm{R}}_{\mathrm{E}})^2 + (\Delta y^{\mathrm{R}}_{\mathrm{N}})^2}}\right)$，范围为 $(\frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$；航向角（弧度）为 $\begin{cases} \cos^{-1}\left(\dfrac{\Delta y^{\mathrm{R}}_{\mathrm{N}}}{\sqrt{(\Delta x^{\mathrm{R}}_{\mathrm{E}})^2 + (\Delta y^{\mathrm{R}}_{\mathrm{N}})^2}}\right) & \Delta x^{\mathrm{R}}_{\mathrm{E}} \geqslant 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}\left(\dfrac{\Delta y^{\mathrm{R}}_{\mathrm{N}}}{\sqrt{(\Delta x^{\mathrm{R}}_{\mathrm{E}})^2 + (\Delta y^{\mathrm{R}}_{\mathrm{N}})^2}}\right) & \Delta x^{\mathrm{R}}_{\mathrm{E}} < 0 \end{cases}$，范围为[0,2π)。

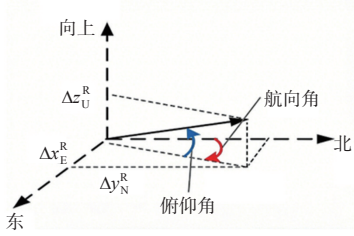


图2　ENU坐标系中姿态与车辆位置变化的关系

本文算法的具体步骤为：①估计 t_k 和 t_{k+1} 时刻的车辆与卫星位置，计算从用户位置指向卫星的单位向量，需说明的是，本文采用的代码均为自行创作编辑，通过读取Rinex文件计算卫星与车辆位置；②计算载波相位或伪距在两个历元间的变化量 $\Delta\Phi$、$\Delta\rho$，同时计算几何距离在两个历元间的变化量 Δr；③估计ECEF坐标系下的车辆位置增量；④计算ENU坐标系下的车辆位置增量；⑤估计ENU坐标系下的车辆航向角和俯仰角。

3　测试案例与结果

采用动态实时回放模式验证本文算法在BDS系统下的性能。测试数据采集于武汉大学校园及其周边区域，包含开阔路段、林荫遮挡区、连续弯道和小坡度路段，能较好地代表城市校园及其周边典型交通场景。参考姿态角通过高精度IMU单元（i-Mar RT-200）的观测数据进行前后向事后处理，得到参与本次分析的有效历元数据（图3）。

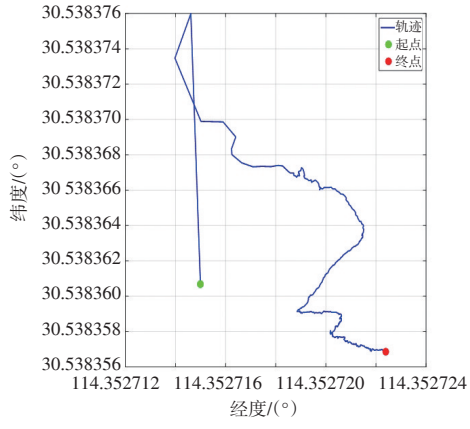


图3　行进轨迹

3.1　航向角估计结果

在有效历元内两种方法的航向角估计结果与参考

解的对比情况见图4，可以看出，TDCP方法的航向角估计结果整体与参考解贴合度更高，TDPR方法的估计结果波动较大；TDCP方法的航向角估计精度较优，均方根误差（RMSE）为3.93°，标准差（STD）为4.46°；TDPR方法的RMSE为8.06°，STD为11.72°。

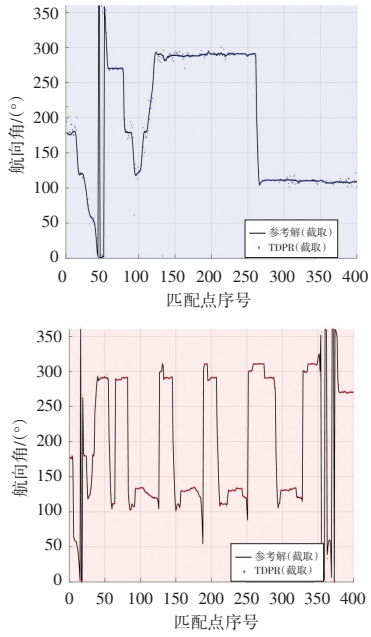


图4 航向角估计结果与参考解对比图

3.2 俯仰角估计结果

两种方法的俯仰角估计结果与参考解的对比情况见图5，从整体趋势来看，TDCP方法的俯仰角估计结果始终紧贴参考解，波动幅度较小；TDPR方法的估计结果偏离参考解较远，且存在多次明显的尖峰误差；TDCP方法的俯仰角RMSE仅为2.60°，STD为2.70°，TDPR方法的RMSE为13.71°，STD为17.37°。

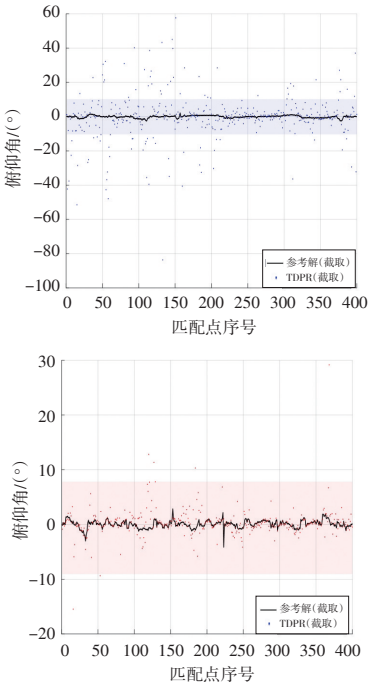


图5 俯仰角估计结果与参考解对比图

4 结 论

本文基于武汉大学主校园内采集的GNSS数据，对比验证了基于TDPR、TDCP的车载姿态角估计方法的性能。结果表明，TDCP方法的姿态角估计精度明显优于TDPR方法，其航向角整体RMSE为3.93°、STD为4.46°，俯仰角RMSE为2.60°、STD为2.70°；相较于TDPR方法，TDCP方法的航向角RMSE降低51.2%，俯仰角RMSE降低80.9%，且STD指标同样表现出更优的稳定性。在车辆转向、坡度变化和局部遮挡的全域复杂区间内，TDCP方法的精度稳定性进一步凸显，航向角RMSE仅为3.95°、STD为4.52°，俯仰角RMSE为2.69°、STD为2.81°，而TDPR方法的局部误差显著增大、鲁棒性较弱。此外，TDCP方法仅需单天线GNSS观测数据即可实现高精度姿态估计，在低成本车载导航、智能交通等领域具有良好应用前景，未来可结合多频GNSS信号与抗遮挡算法进一步提升其对复杂城区环境的适配能力[21]。

参考文献

[1] Groves P D. Principles of GNSS, Inertial, and Multi-sensor Integrated Navigation Systems[M]. ArtechHouse, 2013:17-19

[2] Farrell J A. Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors[M]. McGraw-Hill, 2008:353-377

[3] Wendel J, Trommer G F. Tightly Coupled GPS/INS Integration for Missile Applications[J]. Aerospace Science and Technology, 2004, 8(7):627-634

[4] Teunissen P J, Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems[M]. Springer, 2017: 661-668

[5] 杨元喜,李金龙,王爱兵,等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(1): 72-81

[6] 吴刚祥. GPS动态对动态相对定位算法研究及软件开发[D]. 北京:清华大学,2015

[7] Ding W, Sun W, Yan H, et al. Low-cost Dual-Antenna GNSS-based Heading and Pitch Angles Estimation Considering Baseline Length Constraint[J], Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2025, 239 (1):115492

[8] 方文轩,丛佃伟. 卫星/惯性/视觉组合导航多源融合技术现状及发展[J]. 无线电工程,2022,52(10):1813-1820

[9] 甘雨，隋立芬，张清华，等. 利用时间差分载波相位的GNSS/INS紧组合导航[J]. 测绘通报，2015(6):5-8

[10] Serrano L，Kim D，Langley R B. A Single GPS Receiver as A Real-time，Accurate Velocity and Acceleration Sensor[C]// Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004). Long Beach，CA，USA: The Institute of Navigation，2004:2021-2034

[11] 闫勇伟. 北斗测速与测姿技术及互检方法研究[D]. 武汉:武汉大学，2017

[12] Wu M，Wen R，Zhang Y，et al. Rapid Deformation Identification and Adaptive Filtering with GNSS TDCP Under Different Scenarios and Its Application in Landslide Monitoring[J]. Remote Sensing，2025，17(10):1751

[13] Zhang X，Zhu F，Tao X，et al. High-precision Velocity Estimation Based on Doppler-aided Time-differenced Carrier Phase Model Using Low-cost GNSS Receiver[J]. Measurement Science and Technology，2021，32(4):45-104

[14] Niimi D，Meguro J. Tightly Coupled Rao-blackwellized Particle Filter for GNSS-only Positioning in Urban Environments[J]. IEEE Robotics and Automation Letters，2026，11(2):1122-1129

[15] 王甫红，程雨欣，赵广越，等. 智能手机GNSS/MEMS IMU车载组合导航的安装角估计算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2025，50(10):1948-1956

[16] Wu Q，Chai H，Xiang M，et al. Rapid In-motion Heading Alignment Using Time-differenced Carrier Phases from a Single GNSS Antenna and a Low-grade IMU[J]. Measurement Science and Technology，2024，35(10):1-7

[17] Sun R，Cheng Q，Wang J. Precise Vehicle Dynamic Heading and Pitch Angle Estimation Using Time-differenced Measurements from a Single GNSS Antenna[J]. GPS Solutions，2020，24(2):1-9

[18] Bae J W，Kim H S. Towards Ferrous Medium-entropy Alloys with Low-cost and High-performance[J]. Scripta Materialia，2020，186(1):169-173

[19] Qian N，Chang G，Gao J. GNSS Pseudorange and Time-differenced Carrier Phase Measurements Least-squares Fusion Algorithm and Steady Performance Theoretical Analysis[J]. Electronics Letters，2019，55(23):1238-1241

[20] 龚旭峥，汪香梅，王凯时. 利用LMD-SVD方法进行GNSS坐标时间序列降噪[J]. 地理空间信息，2024，22(3):43-46

[21] 张辉，胡宗强. 基于神经网络及卡尔曼滤波的机器人组合导航定位分析[J]. 地理空间信息，2025，23(12):29-32

(上接第26页)

[20] 厉芳婷，胡菡，刘韬，等. 基于深度学习的遥感影像地表水时空监测与分析[J]. 地理空间信息，2023，21(9):52-56

[21] 王德传. 利用U-Net神经网络的多光谱图像草地特征提取[J]. 地理空间信息，2024，22(8):41-44

[22] Zhang Z，Liu，Q，Wang Y. Road Extraction by Deep Residual U-Net[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters，2018，15(5):749-753

[23] Ganerød AJ，Lindsay E，Fredin O，et al. Globally vs. Locally Trained Machine Learning Models for Landslide Detection: A Case Study of a Glacial Landscape[J]. Remote Sensing，2023，15(4):895

[24] Dang K B，Nguyen C Q，Tran Q C，et al. Comparison Between U-shaped Structural Deep Learning Models to Detect Landslide Traces[J]. Science of the Total Environment，2024，912:169113

[25] 白石，唐攀攀，苗朝，等. 基于高分辨率遥感影像和改进U-Net模型的滑坡提取:以汶川地区为例[J]. 自然资源遥感，2024，36(3):96-107

[26] 苏沉. 黄河中上游宁夏南部山区环境地质灾害风险评价研究[D]. 西安:长安大学，2023

[27] Tian X，Chen C. Modulation Pattern Recognition Based on ResNet50 Neural Network[C]. 2019 IEEE 2nd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP)，2019:34-38

[28] Zhou E，Xu X，Xu B，et al. An Enhancement Model Based on Dense Atrous and Inception Convolution for Image Semantic Segmentation[J]. Applied Intelligence，2023，53(5):5519-5531

[29] Cruden D M，Varnes D J. Landslide Types and Processes，Transportation Research Board，U. S. National Academy of Sciences，Special Report [J]. Transportation Research Record，1996，247:36-57

[30] 常允良. 黄土滑坡的形态特征及其稳定性研究:以彭阳县和原州区滑坡为例[D]. 西安:长安大学，2013

[31] He K，Zhang X，Ren S，et al. Deep Residual Learning for Image Recognition[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition，2016:770-778

[32] McColl S T，Cook S J. A Universal Size Classification System for Landslides[J]. Landslides，2024，21(1):111-120

[33] 刘文红. 黄土高原滑坡发育背景与成灾模式研究[D]. 西安:长安大学，2016

[34] 郭果，陈筠，李明惠，等. 土质滑坡发育概率与坡度间关系研究[J]. 工程地质学报，2013，21(4):607-612

[35] 冯娟龙，吴川东，于洋，等. 极端降雨对晋西黄土区农地流域泥沙连通性的影响[J]. 水土保持研究，2023，30(4):228-235