引文格式：杨忠荣. 低成本车载RTK高精度定位方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3): 96-100. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.03.022

# 低成本车载RTK高精度定位方法

杨忠荣[1]
（1. 广州市中海达测绘仪器有限公司，广东 广州 511400）

**摘　要：**为解决低成本导航模块在复杂环境下定位可靠性低、连续性差的问题，提出了一种基于低成本导航模块实时动态（RTK）定位的车载高精度解决方案，引入惯性导航系统（INS）解算结果进行辅助定位，充分发挥了INS结果不受外界环境干扰且短时间内相对定位精度高的特点。通过INS位置信息辅助RTK进行周跳探测和浮点解滤波，可提升周跳探测的准确性、浮点解精度和平滑性。结果表明，在空旷环境下的结果差异不大；在城市遮挡环境下，固定率约提升5%，在树荫遮挡环境下，平面高程2 m精度能达到100%；在高架桥遮挡环境下，超过68%的历元的平面精度能达到2 m以内，98%的历元的高程精度能达到2 m，优于传统RTK解算结果。

**关键词：**RTK；车载导航；INS辅助导航；低成本RTK
**中图分类号：**P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）03-0096-05

## Low-cost Vehicle RTK High-accuracy Positioning Method

YANG Zhongrong[1]
(1. Hi-Target Surveying Instrument Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

**Abstract:** To address the issues of low reliability and poor continuity of low-cost navigation modules in complex environments, we proposed a vehicle high-accuracy positioning method based on real-time kinematic (RTK) positioning of low-cost navigation modules. We introduced the solution results of inertial navigation system (INS) to assist in positioning, and fully utilized the characteristics of INS results that were not affected by external environmental interference and had high relative positioning accuracy in a short period of time. By using INS position information to assist RTK in cycle slip detection and floating-point filtering, the accuracy of cycle slip detection, as well as floating-point solution accuracy and smoothness, have been improved. The actual measurement results show that there is not much difference in the results in open environments, but in urban obstructed environment, the fixed rate increases by about 5%. In shaded scenes, the accuracy of plane elevation of 2 m can reach 100%. In heavily obstructed environments of elevated bridges, over 68% of the epoch's plane accuracy can reach within 2 m, and 98% of the epoch's elevation accuracy can reach 2 m, which is better than traditional RTK solutions.

**Key words:** RTK, vehicle navigation, INS assisted navigation, low-cost RTK

高精度全球导航卫星系统（GNSS）实时动态（RTK）定位技术已应用于土地测量、精密农业、车辆导航、智能驾驶等领域。载波相位整周模糊度固定解是获得厘米级高精度定位的前提。研究表明，专业型接收机双频GNSS RTK可在空旷条件下实现短基线的快速固定，但其高成本极大地限制了潜在的应用；而低成本消费型导航模块，信号易受干扰，多路径误差和观测噪声大，尤其是在动态条件下，可靠性和稳定性不足[1-2]。在复杂多变的城市车载场景中，GNSS接收机易受高层建筑、树荫、高架桥等地物的遮挡，无法连续稳定地跟踪卫星信号，使得RTK结果产生较大的偏差或长时间无法连续稳定地输出定位结果。GNSS不可用时，惯性导航系统（INS）能高频率输出连续的位置、速度和姿态；但在INS导航中，低成本INS元器件精度差，随着时间的推移，误差累积速度过快，定位精度受到影响。如何提高复杂环境下低成本RTK定位的解算精度和可靠性，是智能车载导航的关键。INS辅助在模糊度解算[3-4]和周跳检测[5-6]中发挥着重要作用。研究表明[7]，与单个GNSS系统相比，INS辅助的GNSS定位性能显著提高。本文利用意法半导体（ST）的车载导航芯片采集GNSS原始观测数据；由于观测数据中多普勒精度较差，采用载波历元差分与原始多普勒相结合的方法提升测速精度和稳定性；同时为了提升定位精度，采用INS输出的位置信息辅助RTK周跳探测和模糊度解算，并充分利用运动约束模型，约束载体的垂向位移，提升载体垂向坐标

作者简介：杨忠荣（1993—），硕士研究生，研究方向为大地测量、GNSS数据处理，E-mail：yangzr305@163.com。

的平滑性；最后通过实测数据，对比了原始 RTK 和 INS 辅助 RTK 两种方案的解算性能。

## 1　GNSS 观测数据质量分析

动态观测数据采集在广州城市道路中开展，采用 ST 车载导航芯片，天线安装在车顶固定架上，路线包含空旷环境、树荫遮挡、城市高架桥等多种复杂场景，采用低成本 GNSS 模块，支持 GPS L1+L5、Galileo E1+E5a、BDS-2 B1I、BDS-3 B2a、QZSS L1+L5 四系统双频的 GNSS 原始观测数据。为了进一步分析 GNSS 原始观测数据质量，本文从观测卫星数和伪距多路径误差两方面对数据进行分析。由于计算多路径的真实量必须求出整周模糊度，但整周模糊度不容易准确确定，因此本文采用移动平均法计算伪距多路径[8]。在无周跳的情况下模糊度为常数，计算连续观测历元的均值，并将其扣除，即可得到伪距多路径值误差。GNSS 原始观测数据的可视卫星数序列见图 1，大部分历元卫星数为 20~25 颗，当受到环境干扰时，卫星数出现断崖式下降，同时低成本定位模块对卫星通道的限制，导致仅有少量卫星有双频数据，对 RTK 解算的稳定性和连续性造成较大影响。

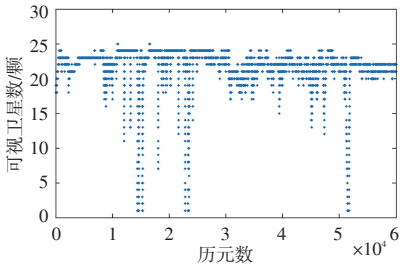



图 1　可视卫星时间序列

统计各系统各频点的伪距多路径值发现，频点 L5、E5a、B2a 的伪距多路径为 0.5~0.6 m，显著低于频点 L1、E1、B1I，说明其具有信号衰减小、抗多路径强的特点[9]。针对伪距多路径误差大的特点，解算过程中可通过相位平滑伪距的方法提高伪距精度，也可通过先验位置信息检核伪距值，剔除较大的伪距异常值。

## 2　高精度定位模型

### 2.1　差分定位模型

短基线解算时，电离层和对流层经过差分后的剩余误差可忽略不计；长基线解算时，电离层和对流层残余误差无法忽略，需作为参数进行估计。在遮挡环境中，GNSS 观测噪声与信噪比具有强相关性，随机模型在高度角模型的基础上增加了信噪比拟合模型，构建信噪比与高度角拟合函数：

$$\mathrm{snr}(\theta)=a_1\theta^2+a_2\theta+a_3 \tag{1}$$

式中，$a_1$、$a_2$、$a_3$ 为拟合参数，与系统和频点有关，由空旷环境长时间观测的数据计算得到；$\mathrm{snr}(\theta)$ 为高度角 $\theta$ 的拟合信噪比值，通过对比实测信噪比与拟合信噪比的差异，调整卫星的观测值权重。

### 2.2　测速模型

在城市复杂场景中，多普勒精度极易受环境影响，仅采用原始多普勒进行速度估计将出现异常跳点。因此，本文结合多普勒测速和载波相位历元间差分两种方法进行速度估计。多普勒测速观测方程为：

$$-\lambda\times D=\frac{(\boldsymbol{X}^{\mathrm{r}}-\boldsymbol{X}^{\mathrm{s}})(\boldsymbol{V}^{\mathrm{r}}-\boldsymbol{V}^{\mathrm{s}})}{\rho}+\mathrm{c}(\Delta dt_{\mathrm{r}}-\Delta dt_{\mathrm{s}})+\Delta I_\rho+\Delta T_\rho+\varepsilon_\rho \tag{2}$$

式中，$\lambda$ 为波长；$D$ 为多普勒频移；$\boldsymbol{X}^{\mathrm{s}}$ 和 $\boldsymbol{V}^{\mathrm{s}}$ 分别为卫星的位置向量和速度向量；$\boldsymbol{X}^{\mathrm{r}}$ 和 $\boldsymbol{V}^{\mathrm{r}}$ 分别为接收机的位置向量和速度向量；$\Delta dt_{\mathrm{r}}$、$\Delta dt_{\mathrm{s}}$ 分别为接收机和卫星钟漂；$\Delta I_\rho$、$\Delta T_\rho$ 分别为电离层延迟变化率和对流层变化率，由于大气随时间变化缓慢，可忽略不计[9]；$\varepsilon_\rho$ 为观测噪声和未模型化噪声。

相位历元间差分测速观测方程为：

$$\lambda\Delta\phi=\Delta\rho-\mathrm{c}\Delta dt_{\mathrm{s}}+\mathrm{c}\times dt_{\mathrm{r}}+\Delta\varepsilon_\phi \tag{3}$$

式中，$\Delta\phi$ 为载波相位历元间变化量；$\Delta\rho$ 历元间卫地距变化。

### 2.3　卡尔曼滤波模型

构建约束条件方程为[10-11]：

$$\boldsymbol{B}_k\hat{X}_k-D_k=0 \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{B}_k$ 为附加约束的观测矩阵；$D_k$ 为约束方程理论值。

在城市环境中，车载系统在平坦路面运动，短时间内高程方向不会出现较大的变化，因此对高程方向施加一个松约束有利于高程方向的平滑性。构造约束方程时，以前一个历元的固定解高程坐标为常值约束当前历元，约束方程为：

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{X}-\boldsymbol{D}_X=0 \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{X}$ 为三维位置向量，$\boldsymbol{X}=[x\quad y\quad z]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{D}_X$ 为前后历元的位置偏差向量，$\boldsymbol{D}_X=\boldsymbol{X}_k-\boldsymbol{X}_{k-1}$；$\boldsymbol{B}$ 为纬度，$\boldsymbol{B}=[\cos\boldsymbol{B}\cos L\quad \cos\boldsymbol{B}\sin L\quad \sin\boldsymbol{B}]$，$L$ 为经度。

## 3 INS辅助的RTK定位策略

当车载系统处于复杂环境，接收到的卫星数较少或信号受到严重干扰时，仅靠RTK解算会出现解算结果不连续或结果异常现象[12]，但INS结果不受外界环境干扰且短时间内相对定位精度较高，可高频率输出连续的位置、速度和姿态。利用INS输出的信息，可有效提升观测环境较差时解算结果的可靠性。本文引入INS位置作为先验信息，提升了模糊度浮点解的精度和历元差分周跳探测的可靠性。

### 3.1 模糊度解算策略

基于载波相位的高精度定位高度依赖于整数模糊度的固定解，但在动态复杂环境下，很难得到模糊度固定解。INS的先验信息可提高浮点模糊度的精度，缩小整数模糊度的搜索空间，从而提高模糊度的固定率和可靠性。本文将INS导出的位置矢量作为虚拟观测量，状态向量可表示为：

$$\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}=[X_b^{\mathrm{T}}\quad X_a^{\mathrm{T}}] \tag{6}$$

式中，$X_b^{\mathrm{T}}$ 为位置增量；$X_a^{\mathrm{T}}$ 为模糊度参数。

此外，INS输出的位置向量可作为附加的观测向量，参与卡尔曼滤波；同时卫地距参数 $\Delta\nabla P_{\mathrm{b,r}}^{i,j}$ 采用INS输出的位置计算，量测方程可表示为：

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix}\lambda\Delta\nabla\phi_{\mathrm{b,r}}^{i,j}-\Delta\nabla\rho_{\mathrm{b,r}}^{i,j}\\ \Delta\nabla P_{\mathrm{b,r}}^{i,j}-\Delta\nabla\rho_{\mathrm{b,r}}^{i,j}\\ 0\end{bmatrix},\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{h} & \lambda\boldsymbol{I}_{n\times n}\\ \boldsymbol{h} & 0_{n\times n}\\ \boldsymbol{I}_{3\times 3} & 0_{3\times 3}\end{bmatrix},\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}X_b\\ X_a\end{bmatrix},\boldsymbol{\varepsilon}=\begin{bmatrix}\varepsilon_\phi\\ \varepsilon_\rho\\ \varepsilon_{\mathrm{ins}}\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中，$\Delta\nabla$ 为双差因子；$\boldsymbol{h}$ 为线性化后的 $n\times 3$ 维方向余旋系数矩阵；$\boldsymbol{I}_{n\times n}$ 为 $n\times n$ 维单位阵。

由于初始位置采用的是INS输出的坐标，因此以零向量作为虚拟观测方程约束坐标增量，通过增加测量值提升测量模型的几何强度，提高模糊度浮点解精度，缩小模糊度搜索范围。由于INS的位置精度与GNSS观测噪声无关，虚拟观测方程的协方差矩阵由INS输出的坐标精度信息得到，即

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{\Delta\nabla_\phi} & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{R}_{\Delta\nabla_P} & 0\\ 0 & 0 & \boldsymbol{R}_{\mathrm{ins}}\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中，$\boldsymbol{R}_{\Delta\nabla_\phi}$、$\boldsymbol{R}_{\Delta\nabla_P}$、$\boldsymbol{R}_{\mathrm{ins}}$ 分别为双差载波、双差伪距和INS坐标的协方差阵。

通过迭代卡尔曼滤波估计模糊度浮点解参数。

### 3.2 INS辅助周跳探测

历元差分周跳探测，以前一历元为基准站，当前历元为流动站，组建历元单差观测方程。高频解算中相邻历元间单差对流层、电离层延迟和卫星钟变化可忽略，残余误差吸收到观测噪声中，但历元间单差无法消除接收机钟差的影响[13]，因此作为参数进行估计。采用相对定位处理模式获取当前历元观测值的验后单位权中误差，并基于抗差最小二乘获取每颗卫星的观测值残差，对单站单频数据进行周跳探测与修复[13]。历元间单差观测方程为：

$$\lambda\Delta\varphi=\Delta\rho-c\Delta dt_r-\lambda\Delta N+\Delta\varepsilon \tag{10}$$

式中，$\Delta\rho$ 为历元间的卫地距；$\Delta dt_r$ 为接收机钟差历元间变化量；$\Delta N$ 为周跳值；$\Delta\varepsilon$ 为观测噪声。

对式（10）进行线性化，则有：

$$\lambda\Delta\varphi_i-\Delta\rho_i=[l_i\ \ m_i\ \ n_i][dx\ \ dy\ \ dz]^{\mathrm{T}}+\Delta dt_r+\varepsilon_{\varphi_i} \tag{11}$$

式中，$l$、$m$、$n$为方向余弦；$dx$、$dy$、$dz$为位置变化量。

误差方程和待估参数可表示为：

$$v=\boldsymbol{B}\boldsymbol{X}-L \tag{12}$$

$$\boldsymbol{X}=[dx\ \ dy\ \ dz\ \ \delta t_r]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

历元差分采用抗差最小二乘解算待估参数，逐步进行迭代计算，直至前后两次解算的坐标差值满足限差要求。此时可获得每颗卫星的观测值残差 $v_i$，若标准化残差大于某一阈值，则确定其有周跳发生；但当异常卫星较多时，待估参数精度较差，导致该方法失效。在复杂环境下周跳卫星较多时，加入外部INS高精度位置作为约束，可防止待估参数错误。以INS输出的位置为先验坐标计算 $\Delta\rho$ 卫地距和线性化，再加入位置变化量的零值约束。约束方程的协方差采用INS位置的精度信息，误差方程可表示为：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{L}_{n\times 1}\\ 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_{n\times 3} & 1\\ \boldsymbol{I}_{3\times 3} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{r}\\ \Delta dt\end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{\Delta\phi} & 0\\ 0 & \boldsymbol{R}_{\mathrm{ins}}\end{bmatrix} \tag{15}$$

式中，$\boldsymbol{L}_i=[\lambda\Delta\varphi_i-\Delta\rho_i]$；$\boldsymbol{H}_i=[l_i\ m_i\ n_i]$；$\boldsymbol{r}=[dx\quad dy\quad dz]$；$\boldsymbol{R}_{\Delta\phi}$、$\boldsymbol{R}_{\mathrm{ins}}$ 分别为单差载波、INS位置协方差矩阵；$n$、$i$ 为卫星数量和编号。

## 4 RTK定位性能分析

### 4.1 实验数据

为验证本文方法的可行性，采用ST车载导航芯片采集GNSS原始数据，将原始数据导入RTK解算程序进行实时解算，并同步运行INS模块，实现INS解算结果辅助RTK解算。原始载波伪距观测数据更新频率为10 Hz，INS数据频率为100 Hz，测试持续时间约为90 min。选取广州市区一段城市道路进行动态测试，

包含空旷环境、城市高架桥遮挡、树荫遮挡等场景。以光纤捷联惯导数据和GNSS测量接收机后处理解算结果为真值，评估自研RTK算法基于低成本车载导航芯片的定位效果。测试轨迹如图2蓝色实线所示，A、B、C区域分别表示空旷环境、树荫遮挡和高架桥遮挡环境。本文设计了两种解算方案：方案1为纯RTK解算模式，表示无INS参与的解算结果，频点选择GPS L1+L5，GA E1+E5a，BDS B1I+B2A，QZSS L1+L5，有高程约束；方案2为INS辅助的RTK解算模式，频点选择与方案1一致，有高程约束。




图2　动态测试轨迹图

### 4.2　车载动态定位性能分析

本文选取空旷环境、树荫遮挡和高架桥遮挡3种城市道路典型场景的观测数据进行分析，结果见表1，在空旷环境下，两种解算模式的固定率和均方根误差（RMSE）差异很小；在树荫遮挡和高架桥遮挡环境下，方案2的解算结果明显优于方案1，固定率约提高5%；在树荫遮挡环境下，方案2北（N）、东（E）、天（U）方向的RMSE比RTK结果小一个量级。不同环境平面精度和高程精度的分段统计见表2、3，在树荫遮挡和高架遮挡环境下，方案2在1 m和2 m精度区段的占比比方案1高20%以上，在5 m精度区段的占比比方案1高10%以上，这由于高程方向增加了运动学约束方程，高程精度总体优于平面精度。

表1　动态车载测试结果统计

| 场景 | 解算模式 | 固定率/% | RMSE/m | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | N | E | U |
| 空旷环境 | 方案1 | 98.65 | 0.034 | 0.009 | 0.030 |
| | 方案2 | 98.65 | 0.035 | 0.009 | 0.031 |
| 树荫遮挡 | 方案1 | 50.47 | 4.846 | 4.846 | 4.960 |
| | 方案2 | 55.12 | 0.345 | 0.477 | 0.258 |
| 高架桥遮挡 | 方案1 | 33.13 | 4.713 | 9.616 | 8.546 |
| | 方案2 | 39.23 | 1.551 | 3.257 | 1.708 |

3种观测场景下，N、E、U方向与真值的坐标差异时间序列见图3~5，可以看出，空旷环境下精度较平稳，存在少量厘米级的跳点，总体精度约为0.05 m；树荫遮挡环境下，方案2的结果总体较平滑，N、E、U方向的RMSE值分别为0.345 m、0.477 m和0.258 m，方案1结果3个方向的RMSE值都超过了4 m，且出现了一些明显的跳点，最大的达到50 m；高架桥遮挡环境下，仅能观测到少部分卫星，且数据质量差，存在较多的周跳，方案1的历元间差分周跳探测方法已失效，存在较多异常点，但方案2的跳点数量明显少于方案1。综上所述，方案2加入了INS位置信息辅助解算，有利于历元差分模块探测周跳，剔除异常卫星；且方案2的固定率总体优于方案1，说明加入INS位置信息能有效提升模糊度固定率。

表2　平面精度分段统计表/%

| 场景 | 解算模式 | 平面精度 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | <1.0 m | <2.0 m | <5.0 m |
| 空旷环境 | 方案1 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| | 方案2 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 树荫遮挡 | 方案1 | 51.85 | 70.78 | 90.00 |
| | 方案2 | 84.30 | 100.00 | 100.00 |
| 高架桥遮挡 | 方案1 | 32.06 | 40.58 | 55.30 |
| | 方案2 | 63.98 | 68.10 | 86.54 |

表3　高程精度分段统计表/%

| 场景 | 解算模式 | 高程精度 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | <1.0 m | <2.0 m | <5.0 m |
| 空旷环境 | 方案1 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| | 方案2 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 树荫遮挡 | 方案1 | 58.97 | 65.47 | 83.05 |
| | 方案2 | 99.50 | 100.00 | 100.00 |
| 高架桥遮挡 | 方案1 | 54.22 | 63.60 | 77.15 |
| | 方案2 | 96.90 | 98.94 | 99.17 |

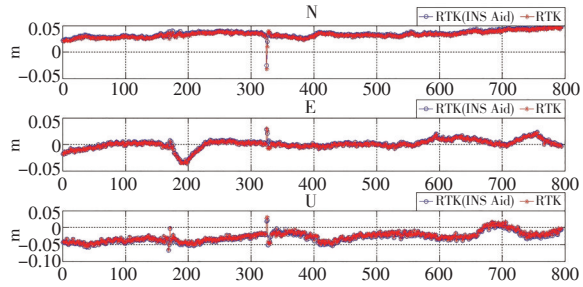



图3　空旷环境误差序列

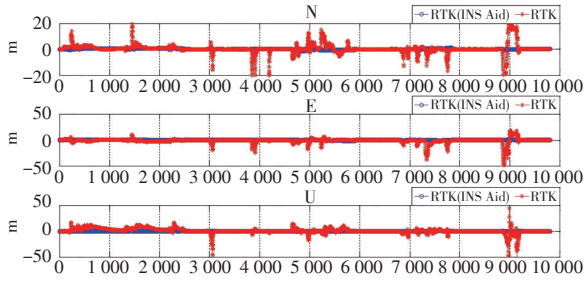



图4　树荫遮挡环境误差序列

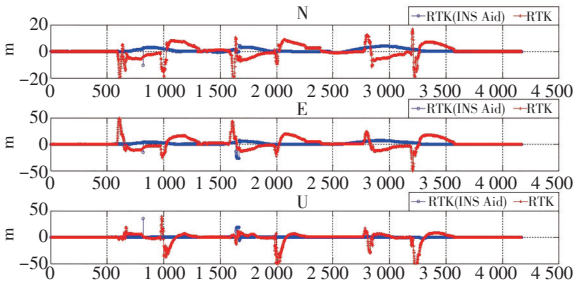



图5 高架桥遮挡环境误差序列

## 5 结 语

本文采用INS辅助RTK解算的策略，充分发挥了INS系统不受环境因素影响、结果在短时间内相对可靠的优势。通过INS位置信息辅助RTK解算，有利于在遮挡环境对异常卫星进行探测与剔除。同时，以先验位置约束的形式辅助RTK浮点解滤波，可提高浮点解的精度，从而提升模糊度搜索的效率。本文基于低成本导航模块进行车载动态测试，对比分析了空旷环境、树荫遮挡和高架桥遮挡3种城市道路典型场景的解算性能。结果表明，在空旷环境下，两种方案的解算结果差异不大，但在遮挡环境下，引入INS辅助定位的方式明显优于纯RTK解算结果。通过分析各场景定位性能，验证了INS信息对城市复杂环境下RTK高精度定位的适用性和有效性；在空旷环境下固定率和定位精度差异不大；在遮挡环境下固定率约提升了5%，且解算精度和平滑性也有明显提升。

## 参考文献

[1] Li T, Zhang H, Niu X, et al. Tightly-coupled Integration of Multi-GNSS Single-frequency RTK and MEMS-IMU for Enhanced Positioning Performance[J]. Sensors, 2017, 17(11):2 462

[2] El-Mowafy A K. Integrity Monitoring of Vehicle Positioning in Urban Environment Using RTK-GNSS, IMU and Speedometer[J]. Measurement Science and Technology, 2017,28(5):1-12

[3] Skaloud J. Reducing the GPS Ambiguity Search Space by Including Inertial Data[C]//Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1998

[4] Monikes R, Teltschik A, Wendel J, et al. Post-processing GNSS/INS Measurements Using a Tightly Coupled Fixed-interval Smoother Performing Carrier Phase Ambiguity Resolution[C]// IEEE Position, Location, and Navigation Symposium, 2006

[5] Altmayer C. Enhancing the Integrity of Integrated GPS/INS Systems by Cycle Slip Detection and Correction[C]// Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000

[6] Younsil K, Song J, Changdon K, et al. GPS Cycle Slip Detection Considering Satellite Geometry Based on TDCP/INS Integrated Navigation[J]. Sensors, 2015, 15(10): 25 336-25 365

[7] Han H, Wang J, Wang J, et al. Performance Analysis on Carrier Phase-based Tightly-coupled GPS/BDS/INS Integration in GNSS Degraded and Denied Environments[J]. Sensors, 2015, 15(4):8 685-8 711

[8] Estey L H, Meertens C M. TEQC: The Multi-purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data[J]. GPS Solutions, 1999, 3(1):42-49

[9] 王颖喆,陶贤露,朱锋,等. 利用智能手机实现GNSS原始观测值的高精度差分定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021,46(12):1 941-1 950

[10] Yang Y, Gao W, Zhang X. Robust Kalman Filtering with Constraints: A Case Study for Integrated Navigation[J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(6):373-381

[11] 李彦杰,杨元喜,何海波. 附加约束条件对GNSS/INS组合导航结果的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017,42(9):1 249-1 255

[12] 徐天扬,章浙涛,何秀凤,等. 一种适用于单频GNSS数据的多周跳探测与修复方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024,49(3):465-472

[13] 黄会宝,高强. 基于低成本GNSS接收机的多天线RTK定位研究[J]. 地理空间信息, 2022,20(1):94-97