

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.06.009

基于冗余 GNSS 观测的 RTK/INS 紧组合方法

蔡灿烽, 许智理, 申志恒, 李 昕

(武汉大学测绘学院, 武汉 430079)

摘要:为了解决传统全球卫星导航系统(GNSS)与惯性导航系统(INS)的紧组合方法在隧道、高架等复杂场景下定位精度退化、相位模糊度固定率低的问题,提出了一种基于冗余 GNSS 观测的 RTK/INS 紧组合方法,可以紧密集成任意个 GNSS 终端,通过大量的冗余观测与改进卫星几何构型,有效提高了系统的定位性能。实验验证与定量分析表明,该方法在城市环境中能够稳定实现厘米级的精度,在卫星数急剧减少的复杂场景下与单天线紧组合方法相比,显著改善了定位效果,将最大误差由接近 3 m 约束到了 1 m 以内,并将模糊度固定率提高了 20%。

关键词:冗余 GNSS 观测;组合导航;RTK/INS;紧组合;模糊度固定

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)06-0113-10

The tightly coupled RTK/INS integration method based on redundant GNSS measurement

CAI Canfeng, XU Zhili, SHEN Zhiheng, LI Xin

(School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: To address the degradation of positioning accuracy and low ambiguity fix rate in complex scenarios such as tunnels and overpasses using the traditional tight integration between global navigation satellite system (GNSS) and inertial navigation system (INS), a tightly coupled RTK/INS integration method based on redundant GNSS observations is presented. This method can seamlessly integrate any number of GNSS terminals and effectively improve the positioning performance of the system through improved satellite geometry configuration and abundant redundant observations. Experimental verification and quantitative analysis show that this method can achieve centimeter-level accuracy in urban environments and significantly improve positioning performance compared to single-antenna tight integration methods in complex scenarios with a drastic reduction in the number of satellites. The maximum error is limited to 1 m, compared to nearly 3 m, and the ambiguity resolution rate is increased by 20%.

Key words: Redundant GNSS measurement; Integrated navigation; RTK/INS; Tight integration; Ambiguity resolution

收稿日期: 2024-04-12; 修订日期: 2024-06-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (42204017)

作者简介: 蔡灿烽(2003—), 男, 主要从事多传感器组合导航方面的研究。

通信作者: 李昕(1994—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事北斗精密定位与多源导航方面的研究。

0 引言

随着社会的进步与科技的快速发展,导航定位技术在人类日常生活、社会经济发展和国家国防建设等众多领域发挥着越来越重要的支撑作用^[1]。在高新技术产业的蓬勃发展中,智能驾驶领域的推进也紧密依赖于稳定和准确的导航信息^[2]。当前,车载高精度导航系统主要依赖于多种传感器技术,其中包括全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)^[3]、惯性导航系统(inertial navigation system, INS)^[4]、视觉传感器^[5]和里程计^[6]等。其中GNSS能够为全球范围内的用户提供全天候、全天时的高精度位置、速度和授时(position, velocity and timing, PVT)服务,是户外高精度导航的首选技术手段^[7-10]。以实时动态差分定位(real-time kinematic, RTK)为代表的GNSS差分定位技术已较为成熟,能够在短基线条件下实现厘米级的动态实时定位,但是其高精度定位结果受卫星信号观测质量影响严重,需要正确地固定载波相位整周模糊度^[11],只有在GNSS观测较好的环境下才能实现厘米级定位。但是在城市等复杂环境中,隧道、高架等障碍物会干扰与遮挡卫星信号传播,导致模糊度固定率低,甚至可能出现位置服务中断的情况,仅使用RTK不能满足厘米级定位的实时性和连续性要求^[12]。而INS凭借其自主无源、不受外界干扰及短时高精度的特性,与GNSS形成了良好的优缺点互补关系,二者的组合运用充分发挥两种技术的优势,从而实现导航结果的连续性、高精度以及强鲁棒性^[4]。因此,GNSS/INS组合技术被视为一种重要的导航技术手段得到了广泛应用。

目前的研究已广泛证明,基于原始伪距和载波相位观测值的GNSS/INS紧组合方法在性能上远优于松组合方法和仅使用伪距进行单点定位的紧组合方法^[13-14]。随着硬件设计和制造技术的不断升级,传感器实现了轻量化且成本降低,这一趋势为集成惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)与GNSS天线阵列提供了更为广泛的应用。融合多个同质传感器不仅提供了大量冗余观测,而且大幅提升了系统对异常情况的抵抗能力^[15],这对于智能驾驶实现持续稳定的高精度定位至关重要^[16]。相比之下,在单传感器或无备用的集成系统中,某一个传感器的故障可能导致整个定位系统的崩溃,这对一些对系统可靠性和稳定性要求极高的

应用,例如无人驾驶系统来说,这是难以接受的。

当前学界对多天线的研究大多集中在定姿方面的改善,即利用多个天线之间的姿态约束提高集成系统的估计性能,然而在算法层面利用多个天线的冗余观测值对定位效果进行改进的研究相对匮乏。Hirokawa等^[17]设计了多天线GPS/INS紧组合系统,集成了1个主天线的伪距和2个辅助天线的载波双差观测值,显示出比传统的GPS/INS紧组合更精确的姿态精度,但该方法仅使用载波双差观测值进行姿态测量,同时简化的模糊度搜索策略易导致错误模糊度的出现。Campo-Cossio等^[18]设计了低成本多天线GNSS/Gyroscope紧组合系统,将陀螺仪的角速率观测值用作卡尔曼滤波的系统输入,在高动态条件下有效改善了系统的可靠性和可用性,但在位置估计方面的改善非常有限。Ng等^[19]设计了一种深组合的多接收机矢量跟踪架构,能够同时跟踪多个天线所接收的卫星信号,以增强在信号干扰和跟踪中断期间的定位可靠性,然而,实现这一技术需要配备专门设计的矢量跟踪装置。Yoder等^[20]研究了一种紧组合伪距和载波并利用天线冗余观测的多天线算法,但是其串行式的主次天线关系使系统面临着主天线一旦崩溃整个定位系统即失效的风险。除此之外,也有部分学者利用多天线的特性提升定位系统的可靠性,Psiaki等^[21]设计了一种双天线架构,利用天线阵列抵抗信号欺骗。Vagle等^[22]研究了多天线GNSS/INS/里程计(odometer, ODO)集成技术,以抵抗卫星信号受到欺骗、干扰或中断等异常情况。

本文提出了一种适用于多GNSS终端的点对点式(peer-to-peer)GNSS RTK/INS紧组合方法,能够利用不同GNSS终端所采集信息进行观测值互补,以提高定位系统的可用卫星数、改善卫星几何构型及增强系统的鲁棒性和可靠性,旨在改善RTK/INS紧组合的定位效果。最后,通过车载实验进行验证,定性并定量地分析了多天线对定位精度带来的增益效果。

1 基于冗余GNSS观测的RTK/INS紧组合方法

1.1 RTK/INS紧组合

以RTK为代表的GNSS差分定位技术,通过双差观测模型削弱轨道误差、大气延迟等空间相关误差的影响,并消除卫星和接收机钟差等误差,从

而实现快速的厘米级定位^[9]。

为了解决 GNSS/INS 组合导航系统是非线性系统的问题,组合导航算法通常采用扩展卡尔曼滤波来实现。经过站间和星间两次求差,卫星钟差、接收机钟差等误差均被消除,在短基线的情形下大气残余误差可以忽略不计。 $\delta \mathbf{x}(t)$ 为 t 时刻的系统误差状态向量,地心地固系(Earth-centered, Earth-fixed, ECEF)下附加模糊度参数的 RTK/INS 紧组合误差状态可以表示为

$$\delta \mathbf{x}(t) = [(\delta \mathbf{r}^e)^T \quad (\delta \mathbf{v}^e)^T \quad (\boldsymbol{\phi}^e)^T \quad \delta \mathbf{b}_g^T \quad \delta \mathbf{b}_a^T \quad \delta \mathbf{N}^T]^T \quad (1)$$

式中, $(\delta \mathbf{r}^e)^T$, $(\delta \mathbf{v}^e)^T$ 与 $(\boldsymbol{\phi}^e)^T$ 分别表示位置误差向量、速度误差向量与姿态误差角,应注意地固系下姿态没有实际物理意义,需要转换为与当地水平坐标系之间的姿态矩阵后才可提取出一般意义的姿态角^[23]; $\delta \mathbf{b}_g^T$ 和 $\delta \mathbf{b}_a^T$ 分别表示陀螺和加速度计三轴零偏误差向量,由于比例因子误差和零偏误差具有强相关性而耦合在一起,导致其不具备可观性^[24],所以实际建模时可以不考虑比例因子误差; $\delta \mathbf{N}^T$ 为双差模糊度向量,作为参数置于滤波中进行估计。连续型状态方程可展开为^[11]

$$\begin{cases} \dot{\delta \mathbf{r}}^e = \delta \mathbf{v}^e \\ \dot{\delta \mathbf{v}}^e = \mathbf{R}_b^e \mathbf{f}^b \times \boldsymbol{\phi}^e + \mathbf{R}_b^e \delta \mathbf{f}^b - 2\boldsymbol{\omega}_{ie}^e \times \delta \mathbf{v}^e + \delta \mathbf{g}^e \\ \dot{\boldsymbol{\phi}}^e = -\mathbf{R}_b^e \delta \boldsymbol{\omega}_{ib}^b - (\boldsymbol{\omega}_{ie}^e \times) \boldsymbol{\phi}^e \\ \dot{\delta \mathbf{b}}_g = -\frac{1}{\tau_{bg}} \delta \mathbf{b}_g + \mathbf{w}_g \\ \dot{\delta \mathbf{b}}_a = -\frac{1}{\tau_{ba}} \delta \mathbf{b}_a + \mathbf{w}_a \\ \dot{\delta \mathbf{N}} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, \mathbf{R}_b^e 为 IMU 在 ECEF 下的姿态矩阵; \mathbf{f}^b 表示加速度计输出的比力测量值; $\delta \mathbf{f}^b$ 为加速度计仪表误差项; $\delta \mathbf{g}^e$ 为重力矢量误差; $\delta \boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ 为陀螺角速率测量值的误差向量; $\boldsymbol{\omega}_{ie}^e$ 为地球自转角速度矢量在 e 系下的投影; τ_{bg} 和 τ_{ba} 分别为对应的一阶高斯-马尔可夫过程的相关时间; \mathbf{w}_g 和 \mathbf{w}_a 分别为陀螺和加速度计的驱动白噪声; 由于模糊度参数不随时间变化(假设没有周跳发生), 所以其作为一个常数对应的误差状态 $\delta \dot{\mathbf{N}}$ 为 0。

RTK/INS 紧组合的观测向量由基准站和流动站 GNSS 接收机输出的伪距、载波相位观测值形成站星双差后,再与 INS 推算的几何双差距离求差可得

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} \nabla \Delta \hat{\rho}_1 - \nabla \Delta \gamma_G \\ \nabla \Delta \hat{\rho}_1 - \boldsymbol{\Lambda} \cdot \nabla \Delta \varphi_G \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\nabla \Delta \hat{\rho}_1$ 表示利用 INS 递推的位置计算的站星几何双差距离; $\boldsymbol{\Lambda}$ 是由载波观测值对应频点的波长构成的对角矩阵; $\nabla \Delta \gamma_G$ 和 $\nabla \Delta \varphi_G$ 分别表示利用基准站和流动站接收机输出的伪距和载波相位计算的站星双差观测值,二者均包含了各系统的观测值。此时,紧组合滤波更新的量测方程可表示为

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \delta \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}_k \quad (4)$$

式中, \mathbf{H}_k 为描述滤波更新的观测值与系统误差状态之间投影关系的矩阵,即紧组合设计矩阵; $\boldsymbol{\eta}_k$ 为量测噪声向量。

在 RTK/INS 紧组合中使用的是在 GNSS 天线相位中心测量的原始 GNSS 观测值,但紧组合系统误差状态中的位置误差为 IMU 的位置误差。因此,需要利用杆臂进行空间同步,以将 GNSS 天线相位中心处的位置误差统一到 IMU 中心,再利用 GNSS 双差观测值与 GNSS 天线相位中心位置之间的投影关系构建紧组合设计矩阵。存在杆臂效应如式(5)所示。

$$\mathbf{r}_G^e = \mathbf{r}_I^e + \mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^b \quad (5)$$

式中, \mathbf{l}_G^b 为杆臂向量,即 IMU 测量中心到 GNSS 天线相位中心的向量在 IMU 系(b 系)下的投影,通过测量即可获得高精度的结果; \mathbf{r}_G^e 为 GNSS 接收机相位中心在 ECEF 下的位置向量测量值; \mathbf{r}_I^e 为 IMU 测量中心在 ECEF 下的位置向量。

由式(5)可以得到惯导推算的 GNSS 天线相位中心的位置误差状态

$$\delta \mathbf{r}_G^e \approx \delta \mathbf{r}_I^e + [\mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^b \times] \boldsymbol{\phi}_{be}^e \quad (6)$$

随后利用量测向量与设计矩阵 \mathbf{H} 计算增益和新息,更新权重,进行卡尔曼滤波更新。

1.2 基于冗余 GNSS 观测的 RTK/INS 紧组合方法

在多天增强线的情况下,假设 GNSS 接收天线的数量增加到 k 个,状态向量发生扩维,增补其余天线的模糊度参数,其定义为

$$\delta \mathbf{x}(t) = [(\delta \mathbf{r}^e)^T \quad (\delta \mathbf{v}^e)^T \quad (\boldsymbol{\phi}^e)^T \quad \delta \mathbf{b}_g^T \quad \delta \mathbf{b}_a^T \quad \delta \mathbf{N}_1^T \quad \delta \mathbf{N}_2^T \quad \cdots \quad \delta \mathbf{N}_k^T]^T \quad (7)$$

卡尔曼滤波连续时间系统误差状态方程的基本形式为

$$\delta \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t) \delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{F}(t)$ 为系统矩阵,可由系统已知特性推导得出; $\mathbf{w}(t)$ 为噪声向量。由式(2)可以推导出系统矩阵 $\mathbf{F}(t)$ 形式上为

$$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -2\boldsymbol{\omega}_{ie}^e \times & \mathbf{R}_b^e \mathbf{f}^b & \mathbf{0} & \mathbf{R}_b^e & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\boldsymbol{\omega}_{ie}^e \times & -\mathbf{R}_b^e & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -1/\tau_{bg} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -1/\tau_{ba} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(8)离散化后可以得到离散时间系统误差状态方程

$$\delta \mathbf{x}_{k+1} = \boldsymbol{\Phi}_{k+1,k} \delta \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (10)$$

其中, $\boldsymbol{\Phi}_{k+1,k}$ 为状态转移矩阵; \mathbf{w}_k 为驱动白噪声。当离散化的时间间隔 Δt 很小时, 系统矩阵 $\mathbf{F}(t)$ 在这段时间内可以近似为一个常值矩阵, 所以状态转移矩阵也可以近似为

$$\boldsymbol{\Phi}_{k+1,k} = \exp(\mathbf{F}(t_k) \Delta t) \approx \mathbf{I} + \mathbf{F}(t_k) \Delta t \quad (11)$$

卡尔曼滤波的协方差更新公式为^[4]

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k)^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T \quad (12)$$

其中, \mathbf{K}_k 为增益矩阵, 使用状态向量、量测矩阵 \mathbf{H}_k 、观测噪声矩阵 \mathbf{R}_k 和协方差的一步预测计算。观测向量表示为

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} \nabla \Delta \hat{\rho}_1 - \nabla \Delta \gamma_G^1 \\ \nabla \Delta \hat{\rho}_1 - \nabla \Delta \gamma_G^2 \\ \vdots \\ \nabla \Delta \hat{\rho}_1 - \nabla \Delta \gamma_G^k \\ \nabla \Delta \hat{\rho}_1 - \mathbf{A}^1 \nabla \Delta \boldsymbol{\varphi}_G^1 \\ \nabla \Delta \hat{\rho}_1 - \mathbf{A}^2 \nabla \Delta \boldsymbol{\varphi}_G^2 \\ \vdots \\ \nabla \Delta \hat{\rho}_1 - \mathbf{A}^k \nabla \Delta \boldsymbol{\varphi}_G^k \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $\nabla \Delta \gamma_G^i$ 表示第 i 个天线的伪距观测值向量; $\nabla \Delta \boldsymbol{\varphi}_G^i$ 表示第 i 个天线的载波相位双差观测向量; \mathbf{A}^i 为第 i 个天线的波长对角矩阵, 对角线上是各个载波观测值频点对应的波长。

与式(6)同理, 建立 k 个 GNSS 天线相位中心位置误差与 IMU 位置误差的关系

$$\begin{cases} \delta \mathbf{r}_G^{e,1} \approx \delta \mathbf{r}_i^e + [\mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^{b,1} \times] \boldsymbol{\phi}_{be}^e \\ \vdots \\ \delta \mathbf{r}_G^{e,k} \approx \delta \mathbf{r}_i^e + [\mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^{b,k} \times] \boldsymbol{\phi}_{be}^e \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{l}_G^{b,k}$ 为第 k 个 GNSS 相位中心到 IMU 位置中心的杆臂。设第 i 个天线所观测到的可用卫星频点

数量为 n_i , 因此设计矩阵为

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^1 & \mathbf{0}_{n_1 \times 3} & \mathbf{H}^1 \cdot [\mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^{b,1}] & \mathbf{0}_{n_1 \times 6} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}^2 & \mathbf{0}_{n_2 \times 3} & \mathbf{H}^2 \cdot [\mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^{b,2}] & \mathbf{0}_{n_2 \times 6} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}^k & \mathbf{0}_{n_k \times 3} & \mathbf{H}^k \cdot [\mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^{b,k}] & \mathbf{0}_{n_k \times 6} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}^1 & \mathbf{0}_{n_1 \times 3} & \mathbf{H}^1 \cdot [\mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^{b,1}] & \mathbf{0}_{n_1 \times 6} & \mathbf{A}_{n_1 \times n_1}^1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}^2 & \mathbf{0}_{n_2 \times 3} & \mathbf{H}^2 \cdot [\mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^{b,2}] & \mathbf{0}_{n_2 \times 6} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{n_2 \times n_2}^2 & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}^k & \mathbf{0}_{n_k \times 3} & \mathbf{H}^k \cdot [\mathbf{R}_b^e \mathbf{l}_G^{b,k}] & \mathbf{0}_{n_k \times 6} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{n_k \times n_k}^k \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, \mathbf{H}^i 由第 i 个天线各颗卫星的双差方向余弦构成。

多天线 RTK/INS 紧组合算法流程如图 1 所示。首先由多个 GNSS 天线与 IMU 对准得到载体的位置与姿态, 对系统状态进行初始化; 将基准站观测值与多个 GNSS 天线观测值并行输入数据预处理模块, 利用 Turboedit 方法进行周跳探测^[25]后, 使用 INS 递推得到的位置辅助探测并排除伪距的粗差信息, 进而对数据的质量进行控制; 将伪距、载波双差和 INS 推算出的双差几何距离一并输入扩展卡尔曼滤波中, 滤波器将对系统的导航状态误差和 IMU 传感器误差进行最优估计, 并对 INS 机械编排的导航结果进行反馈修正, 输出位置、速度和姿态 (position, velocity, attitude, PVA) 等导航参数。

2 实验验证

为验证并量化多天线对于车辆定位的提升效果, 使用紧组合将不同天线的车载 GPS+BDS 双频双系统 RTK/INS 定位结果与各单天线结果进行对比, 分析其定位精度改善效果。

2.1 实验设备与环境

实验设实验组与参考组, 实验组含两同型号接

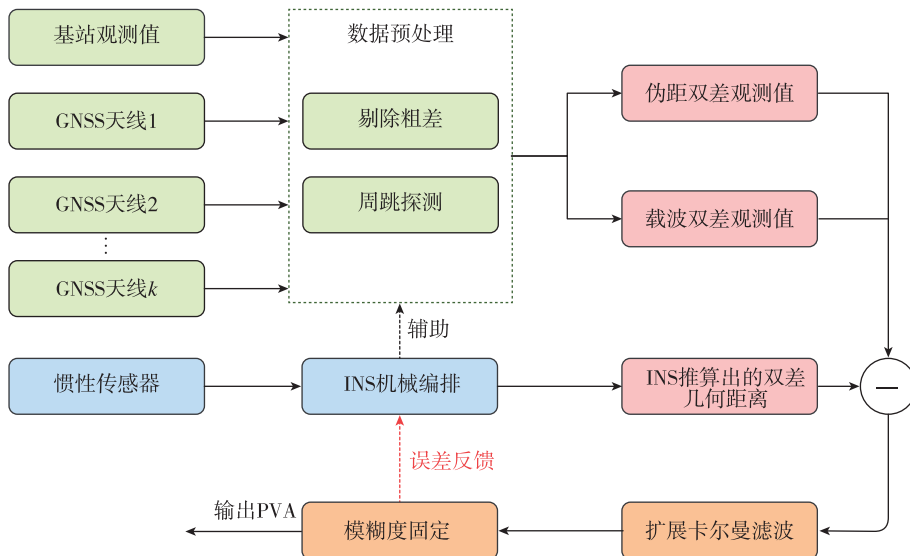


图 1 多天线组合算法流程图

Fig. 1 Multi-antenna combination algorithm flow chart

收机与天线,并使用同一个 MEMS 级 IMU,所使用的设备如表 1 所示。实验组使用武汉大学测绘学院开发的 GREAT(GNSS+ research, application and teaching) 软件进行解算;而参考组使用商用软件 Inertial Explorer (IE) 8.9 进行 RTK/INS 双向平滑解算,可提供高精度参考结果。参考组使用的测量级接收机和天线的精度远高于 2 个实验组的车规级设备。战术级惯导和 MEMS 惯导的输出频率分别为 200 Hz 和 100 Hz,GNSS 天线输出频率均为 1 Hz。每个 GNSS 接收机与 IMU 之间的杆臂在事先已进行了精确校准。车辆搭载组合设备在武汉市某路段进行数据采集,典型场景包含林荫道、建筑和高架桥。实验平台如图 2 所示,实验组的天线-1 与天线-2 分别架设在车体左右两侧,两天线之间的距离为 0.435 m,车辆后方天线为参考天线。本文方法的有效性依赖于天线间有足够的空间差异,所以选择尽可能长的基线更有利于本文提出方法生效。车辆轨迹如图 3 所示,图 4 为数据采集过程中的高架环境。

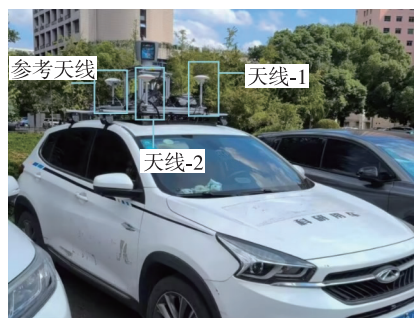


图 2 实验平台

Fig. 2 Experimental platform

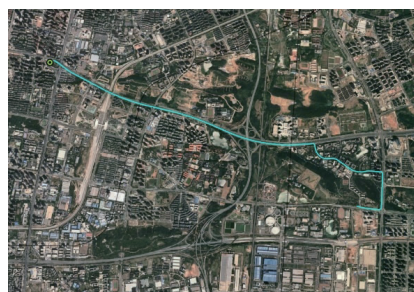


图 3 车辆轨迹

Fig. 3 Vehicle trajectory



图 4 典型高架环境

Fig. 4 Typical overpass environment

表 1 实验设备

Tab. 1 Experimental equipment

	实验组	参考组
接收机型号	UB4B0	Septentrio AsteRx4
天线型号	HX-CSX627A	Trimble Zephyr 2
IMU	MEMS 级 ADIS 16470	战术级 StarNeto XWGI7660

2.2 数据质量分析

当车辆行驶在城市区域时,由于树木与建筑的遮挡,处于不同空间位置的多个天线之间会出现较为显著的观测值差异,车载天线之间很可能存在不同的可用卫星数。当某一天线受极端环境影响造成某颗卫星观测值不可用时,另一天线的观测值由于空间分布的不同免于在同时刻受到同程度的影响,因此,综合多个天线可以实现观测值互补从而改善观测数据质量。图 5 给出了天线-1、天线-2 和多天线 3 种 RTK/INS 定位方法在采集数据的每个历元中的可用双频观测值卫星数,可以看出,多天线的可用卫星数总是大于等于任一单天线的可用卫星数。经统计,在约 20 min 的实验时段内,多天线的可用卫星数超过天线-1 和天线-2 的历元占比分别为 24.7%和 42.1%,同时大于两天线可用卫星数的历元占比为 17.0%。

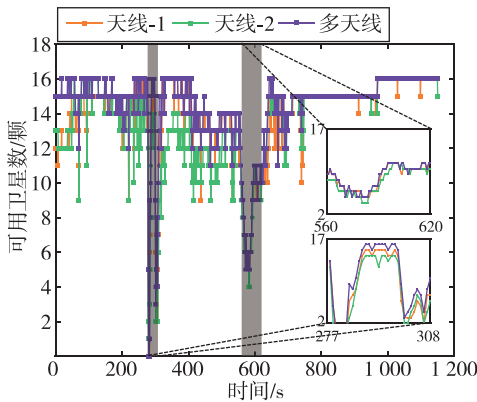


图 5 卫星数量

Fig. 5 Number of satellites

此外,图 6 绘制了位置精度因子(position dilution of precision,PDOP)序列。由于观测到了更多的卫星,多天线的卫星几何构型相对于任一单天线的几何构型都有所改善,平均 PDOP 从 2.6 降到了 2.2,这有助于定位系统在观测条件差时的解算准确性和精度。

2.3 实验结果

紧密组合多个天线,可以有效地提高定位的精度。图 7 所示为使用天线-1、天线-2、天线-1+基线约束和本文所提出的多天线 4 种 RTK/INS 方法的误差序列,由其各自定位结果与参考结果作差得到。天线-1 RTK/INS+基线约束使用天线-1 作为主天线,使用天线-1 与天线-2 的 GNSS 观测值估计

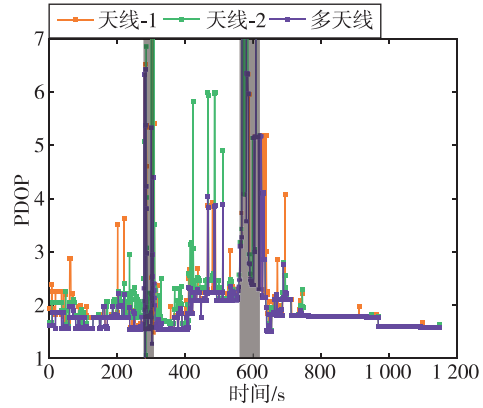


图 6 PDOP 序列

Fig. 6 Sequence of PDOP

基线向量,由基线向量估计姿态从而进行约束^[26]。可以观察到,本文所提方法的定位误差曲线更加平滑稳定,而且离群值的幅值明显减小。当使用单一天线的定位结果出现跳变点或是发散导致分米级误差时,多天线组依然能够维持在厘米级的精度水平。多天线系统能够同时处理多个信号源的信息,并通过对这些信息进行融合处理,以减少定位过程中的随机误差和环境干扰。因此,在面对阴影地区所代表的城市地区卫星数急剧下降的典型情况时,多天线定位结果相较于使用单一天线的实验组保持了一个较高的定位精度,整体鲁棒性与抗干扰能力显著增强。相比之下,单一天线定位容易受到周围环境、信号衰减或多径效应等因素的影响,导致定位误差出现不稳定性 and 剧烈波动。此外,将本文提出方法与当前普遍使用的基线约束下的 GNSS RTK/INS 方法定位误差进行对比,结果显示,本文所提方法误差序列更为平稳,这表明紧组合不同

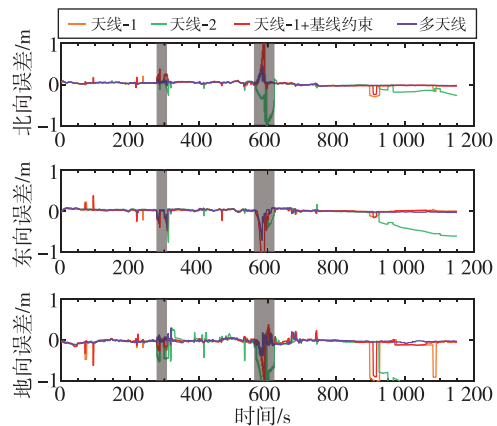


图 7 北东地三向位置误差曲线

Fig. 7 Curve of position error in three directions of north, east and ground

天线的方法相比基线约束方法更能有效改善定位结果。

表 2 给出了 4 个实验组位置误差的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和模糊度固定率, 以量化分析定位精度提升结果。多天线定位结果在 3 个方向上可以达到 (0.049, 0.063, 0.061) m 的定位精度, 由于加入更多观测信息, 与较优的单天线定位结果相比分别提高了 (51.4%, 65.4%, 69.9%), 较之使用基线约束方法的定位结果分别提高了 (48.9%, 69.3%, 46.2%)。从三维 RMSE 来看, 定位结果相比基线约束方法改善了 62.2%, 模糊度固定率也从 95.0% 提升到了 97.6%。

模糊度精度因子 (ambiguity dilution of precision, ADOP) 是一种用于描述模糊度参数的精度特性的指标, 能够高度反映浮点模糊度的平均精度的指标, 能够高度反映浮点模糊度的平均精度 [27]。图 8 所示为天线-1、天线-2 与多天线共 3 个实验组实验时段内的 ADOP 时间序列, 可以看出, 多天线组的模糊度固定率优于任一单天线组的结果。此外, 多天线组的曲线更为平稳, 收敛速度更快, 跳变值更少, 这表明多天线组具有比单天线更优秀的模糊度固定能力。图 9 所示为模糊度固定情况, 多天线组表现明显优于使用单一天线和基线约束方法的实验组。在 900 s 后, 由于天线-2 模糊度固定率明显降低, 定位结果多为浮点解。此时

RTK 定位结果精度偏低, 对 MEMS 惯导的误差累积约束较弱。因此, 尽管天线-2 的 ADOP 在 900 s 后较为稳定, 但是位置误差与另外 2 个实验组相比明显偏大。同时也可以看出, 紧组合多个天线能够有效提升定位系统应对复杂环境下固定模糊度的能力。

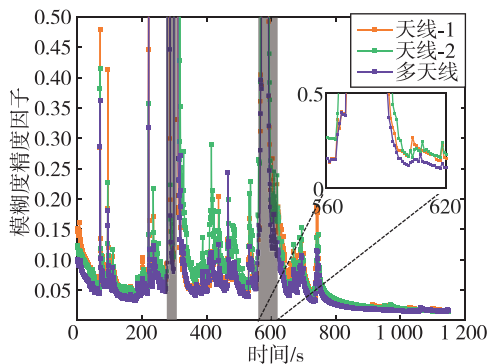


图 8 ADOP 序列

Fig. 8 Sequence of ADOP

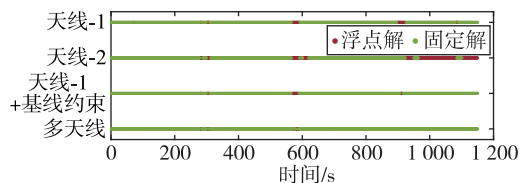


图 9 实验组模糊度固定情况

Fig. 9 Fixed ambiguity of experimental group

表 2 观测时段位置误差信息与模糊度固定率

Tab. 2 Position error and fixed ambiguity rate during the observation period

使用方式	RMSE/m			三维 RMSE/m	模糊度固定率/%
	北向	东向	垂向		
天线-1	0.101	0.182	0.203	0.290	92.3
天线-2	0.154	0.289	0.518	0.613	76.3
天线-1+基线约束	0.096	0.205	0.132	0.262	95.0
多天线	0.049	0.063	0.061	0.099	97.6

观测时段中的 277~308 s 和 560~620 s 是城市环境中信号遮挡、卫星数急剧下降的典型代表时段, 误差序列如图 10 所示, 最大误差与模糊度固定率如表 3 所示。选择 560~620 s 对比分析多天线 RTK/INS 相对于传统方法在应对环境干扰时的抵抗能力, 可以看出本文方法在面对环境干扰、卫星数急剧减少时依然能够相对于单一天线的 RTK/

INS 紧组合保持一个较小的位置误差, 而基线约束方法对定位结果的改进非常有限。多天线组的北东地三向最大误差为 (0.419, 0.707, 0.368) m, 相对于次优定位结果提升了 (58.4%, 70.9%, 57.1%), 定位精度显著高于单天线 RTK/INS。相较于模糊度固定率次高的天线-1, 多天线组的模糊度固定率提高了 19.6%, 三维位置 RMSE 提升了 67%。

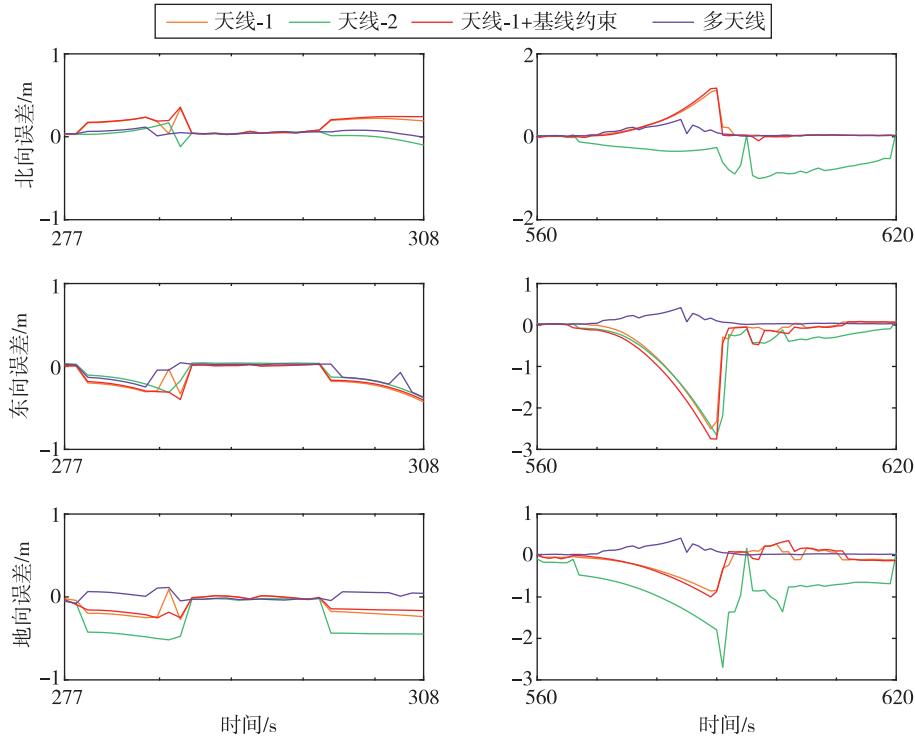


图 10 环境干扰时段三维误差序列

Fig. 10 3D error sequence of environmental interference period

表 3 复杂环境下最大误差与模糊度固定率

Tab. 3 Maximum error and ambiguity fixed rate in complex environment

使用方式	观测时段/s	最大误差/m			模糊度固定率/%
		北向	东向	垂向	
天线-1	277~308	0.341	0.500	0.272	46.9
天线-2		0.169	0.456	0.517	40.6
天线-1+基线约束		0.357	0.478	0.252	46.9
多天线		0.117	0.444	0.115	56.3
天线-1	560~620	1.129	2.431	0.857	57.4
天线-2		1.006	2.667	2.695	21.3
天线-1+基线约束		1.173	2.751	0.998	55.7
多天线		0.419	0.707	0.368	77.0

3 结论

为了解决 RTK/INS 紧组合方法在隧道、高架等复杂场景下相位模糊度固定率低、组合系统退化的问题,本文提出了一种基于冗余 GNSS 观测的 RTK/INS 紧组合导航方法,可以紧密集成任意数量的 GNSS 终端。通过车载实验数据,比较了单天线 RTK/INS 紧组合与本文提出方法的定位结果,定性定量分析了所提出方法的增益,得出的结论如下:

1)基于冗余 GNSS 观测的 RTK/INS 紧组合方法通过综合不同天线之间的观测值实现互补,有效增加可用卫星数、改善几何构型,从而提高观测数据质量,使定位结果精度更高的同时也更加可靠。

2)在面对隧道、高架等卫星信号受到干扰的复杂环境时,紧组合冗余 GNSS 观测的 RTK/INS 方法表现出了更强的鲁棒性,显著提高了系统的定位精度与模糊度固定率。

通过实测数据验证,在常规情况下,具备至少一个冗余天线的 RTK/INS 紧组合方法在定位方面

表现出稳定的厘米级精度;而在卫星数量急剧减少的极端环境中,定位精度能够维持在亚米级,最大方向误差大幅降低。相较于单天线 RTK/INS 系统,本文提出的方法定位精度最大提升幅度近 70%,模糊度固定率提高近 20%。

参考文献

- [1] 杨元喜. 导航与定位若干注记[J]. 导航定位学报, 2015, 3(3): 1-4.
YANG Yuanxi. Notes of navigation and positioning [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2015, 3(3): 1-4(in Chinese).
- [2] 沈凯, 刘庭欣, 左思琪, 等. 复杂城市环境下 GNSS/INS 组合导航可观测度分析及鲁棒滤波方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 252-261.
SHEN Kai, LIU Tingxin, ZUO Siqi, et al. Analysis of observability and robust filtering method for GNSS/INS integrated navigation in complex urban environments[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 252-261(in Chinese).
- [3] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 第 3 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2016.
LI Zhenghang, HUANG Jinsong. GPS surveying and data processing[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2016(in Chinese).
- [4] GROVES P D. Principles of GNSS, inertial, and multi-sensor integrated navigation systems (GNSS technology and applications)[M]. 2nd ed. Boston: Artech House Publishers, 2013.
- [5] 毛军, 付浩, 褚超群, 等. 惯性/视觉/激光雷达 SLAM 技术综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(4): 17-30.
MAO Jun, FU Hao, CHU Chaoqun, et al. A review of simultaneous localization and mapping based on inertial-visual-lidar fusion[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(4): 17-30(in Chinese).
- [6] LI X, QIN Z, SHEN Z, et al. A high-precision vehicle navigation system based on tightly coupled PPP-RTK/INS/odometer integration[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 24(2): 1855-1866.
- [7] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510.
YANG Yuanxi. Integrated PNT system and its key technologies[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(5): 505-510(in Chinese).
- [8] 李德仁. 从测绘学到地球空间信息智能服务科学[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1207-1212.
LI Deren. From geomatics to science of intelligent Earth spatial information services[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1207-1212 (in Chinese).
- [9] 李征航, 何良华, 吴北平. 全球定位系统(GPS)技术的最新进展 第二讲 网络 RTK[J]. 测绘信息与工程, 2002, 27(2): 22-25+32.
LI Zhenghang, HE Lianghua, WU Beiping. Latest advances in global positioning system (GPS) technology: Lecture 2-Network RTK [J]. Journal of Geomatics, 2002, 27(2): 22-25+32(in Chinese).
- [10] 刘经南, 高柯夫. 智能时代测绘与位置服务领域的挑战与机遇[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1506-1517.
LIU Jingnan, GAO Kefu. Challenges and opportunities in the field of geomatics and location services in the intelligent era[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1506-1517(in Chinese).
- [11] 李团. 单频多模 GNSS/INS/视觉紧组合高精度位姿估计方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
LI Tuan. Research on high-precision pose estimation method of single-frequency multi-mode GNSS/INS/visual tight integration[D]. Wuhan: Wuhan University, 2021(in Chinese).
- [12] 李团, 章红平, 牛小骥, 等. 城市环境下 BDS+GPS RTK+INS 紧组合算法性能分析[J]. 测绘通报, 2016(9): 9-12.
LI Tuan, ZHANG Hongping, NIU Xiaoji, et al. Performance analysis of tight integration algorithm for BDS+GPS RTK+INS in urban environments[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(9): 9-12(in Chinese).
- [13] SILVA I, PENDÃO C, TORRES-SOSPEDRA J, et al. TrackInFactory: a tight coupling particle filter for industrial vehicle tracking in indoor environments[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 52(7): 4151-4162.
- [14] GAO Z, GE M, LI Y, et al. Modeling of multi-sensor tightly aided BDS triple-frequency precise point positioning and initial assessments[J]. Information Fusion, 2020, 55: 184-198.
- [15] BANCROFT J B. Multiple IMU integration for vehicular navigation[C]// Proceedings of 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009). Savannah: ION, 2009: 1828-1840.
- [16] 许智理, 闫倬豪, 李星星, 等. 面向智能驾驶的高精度多源融合定位综述[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(3): 1-20.

- XU Zhili, YAN Zhuohao, LI Xingxing, et al. Review of high-precision multi-sensor integrated positioning towards intelligent driving[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2023, 10(3): 1-20(in Chinese).
- [17] HIROKAWA R, EBINUMA T. A low-cost tightly coupled GPS/INS for small UAVs augmented with multiple GPS antennas[J]. *Navigation*, 2009, 56(1): 35-44.
- [18] CAMPO-COSSIO M, PURAS A, ARNAU R, et al. Real-time attitude determination system based on GPS carrier phase measurements and aided by low-cost inertial sensors for high dynamic applications [C]// *Proceedings of 13th IAIN World Congress and Exhibition*. Stockholm, 2009: 2730.
- [19] NG Y, GAO G X. GNSS multireceiver vector tracking [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(5): 2583-2593.
- [20] YODER J E, HUMPHREYS T E. Low-cost inertial aiding for deep-urban tightly coupled multi-antenna precise GNSS[J]. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 2023, 70(1): 561.
- [21] PSIAKI M L, OHANLON B W, POWELL S P, et al. GNSS spoofing detection using two-antenna differential carrier phase[C]// *Proceedings of 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS + 2014)*. Tampa: ION, 2014: 2776-2800.
- [22] VAGLE N, BROUMANDAN A, LACHAPELLE G. Multiantenna GNSS and inertial sensors/odometer coupling for robust vehicular navigation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(6): 4816-4828.
- [23] 申志恒. 车载场景高精度定位定姿理论与即时建图应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
- SHEN Zhiheng. Research on theory of high-precision positioning and orientation in vehicle scene and real-time mapping application[D]. Wuhan: Wuhan University, 2022(in Chinese).
- [24] HONG S, LEE M H, CHUN H H, et al. Observability of error states in GPS/INS integration[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(2): 731-743.
- [25] BLEWITT G. An automatic editing algorithm for GPS data[J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199-202.
- [26] SHEN Z, LI X, LI X, et al. Precise and robust IMU-centric vehicle navigation via tightly integrating multiple homogeneous GNSS terminals[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 73: 1-14.
- [27] 李盼. GNSS精密单点定位模糊度快速固定技术和方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- LI Pan. Research on rapid ambiguity resolution technique and method for GNSS precise point positioning [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(in Chinese).

(编辑:孟彬)