

先验信息约束的车载 GNSS RTK/IMU 紧组合导航算法

蒋磊, 孙蕊, 王媛媛

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

摘要:针对传统 RTK/IMU 组合导航系统在复杂环境中的模糊度固定率低导致其精度和可靠性较差的问题,文中提出一种先验信息约束的车载 GNSS RTK/IMU 紧组合导航算法。该算法首先构建一种基于 IMU 辅助伪距一致性检测的 GNSS 质量控制模型,以识别并剔除粗差较大的伪距观测值,接着提出一种附加先验长度信息约束的 GNSS 模糊度解算方法,提高 GNSS 模糊度解算的成功率,最后,将 RTK 与 IMU 输出的数据通过 EKF 进行紧组合滤波融合,从而提高组合导航系统在复杂环境中的精度与可靠性。实测车辆实验数据表明,提出算法相对于传统 RTK/IMU 紧组合导航算法,在三维位置和速度上的精度提升率达到 36.36% 和 14.29%;与基于 IMU 位置信息约束的 RTK/IMU 紧组合导航算法相比,提升率分别达到 26.31% 和 20.00%。

关键词:全球卫星导航系统;实时动态差分定位;组合导航;质量控制;模糊度解算

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1006-7949(2024)03-0044-09

GNSS RTK/IMU tightly coupled integration algorithm with prior information constraint for vehicle navigation

JIANG Lei, SUN Rui, WANG Yuanyuan

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To solve the problem of poor accuracy and reliability of traditional RTK/IMU integrated system in complex environments due to the low success rate of ambiguity resolution, this paper proposes a RTK/IMU tightly coupled vehicle navigation algorithm with prior information constraints. First, the accurate position information output by IMU mechanization is used to assist the GNSS quality control process to identify and eliminate the pseudoranges with large errors. Then, a new GNSS ambiguity solving method with prior length constraint is introduced to improve the success rate of ambiguity resolution. Finally, a tightly coupled integration scheme based on EKF is constructed to fuse the data output from both RTK and IMU to improve the accuracy and reliability of the integrated navigation system in complex environments. Results from an onboard vehicle experiment have showed that compared with the conventional RTK/IMU tightly coupled algorithm, the position and velocity accuracy improvements reach 36.36% and 14.29%. Compared with the RTK/IMU tightly coupled algorithm with the IMU position constraint, the improvements reach 26.31% and 20.00%, respectively.

Key words: GNSS; RTK; integrated navigation; quality control; ambiguity resolution

现代社会的快速发展给智能交通系统(intelligent transportation systems, ITS)的位置服务提出了更高的精度及可靠性的要求。在众多导航传感器中,全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)与惯性测量单元(inertial measure-

ment unit, IMU)具有天然的互补性质,通常会选择将其二者集成为 GNSS/IMU 组合导航系统,以提供精确、可靠的导航定位信息^[1]。实时动态差分定位(real-time kinematic, RTK)是一种利用基准站和流动站 GNSS 观测数据在时间和空间上的强相关性进行实时差分计算,从而可以获得厘米级精度的定位信息的技术^[2]。将 RTK 与 IMU 结合,可以优势互补,从而实现精度优于单一子系统的连续、高精度的导航定位效果。然而,随着应用环境日趋多元化、复杂化,GNSS 信号在复杂环境中容易出现反射、衍射以及观测中断等现象,从而无法满足车

收稿日期:2023-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42222401;41974033;42174025);工信部专项科研项目(TC220A04A-79);江苏省“六大人才高峰”项目(KTHY-014);江苏省自然科学基金资助项目(BK20211569)

第一作者简介:蒋磊(1997-),男,博士研究生

通信作者简介:孙蕊(1984-),女,教授,博士。

辆导航的高精度与高可靠性的需求^[3]。因此,提高复杂环境中 RTK/IMU 组合导航系统的精度与可靠性,是目前导航领域的研究重点之一,对未来 ITS 的深入发展及其相关的行业应用具有十分重要的意义。

实现上述高精度导航定位的关键在于 GNSS 整周模糊度的正确固定。为了解决法方程秩亏的问题,在 RTK/IMU 组合导航系统中通常会选择将 GNSS 伪距和载波相位观测值联立进行模糊度参数估计。但是,由于伪距观测值易受到复杂观测环境的影响,导致用户可观测到的卫星数量不足或者产生较大的测量误差,使得 GNSS 模糊度的固定率通常较低,进而会对 RTK/IMU 组合导航系统的精度造成负面的影响^[4]。近年来,随着 GNSS 逐渐向多星座、多频率方向不断发展,一些学者尝试将多 GNSS 系统引入组合导航中进行联合解算^[5]。由于多星座联合解算可以增加同一历元可观测卫星的数量,因此,该方法可以有效改善模糊度法方程的病态性,进而提高 RTK/IMU 组合导航系统在 GNSS 观测受限环境中的精度与可靠性。但是,多星座的引入也使得观测数据异常的可能性增大。针对上述问题,当前常用的方法是通过特定的随机模型评估 GNSS 观测量的精度并分配适当的权重,以削弱含较大粗差的数据对组合导航参数估计的影响^[6]。该方法可以显著提高 GNSS 在复杂观测环境中的精度,因此,被广泛地应用于缓解多路径效应对组合导航定位解算的影响。但是,此类模型通常为经验模型,在实际应用中难以准确评估观测量的具体精度。另一类常用的方法是故障检测与排除(fault detection and exclusion, FDE)技术^[7]。但是,传统的 FDE 算法大多是针对单一故障所设计,而未顾及多故障同时发生的情况,因此,无法直接应用于复杂观测环境中的车辆导航定位中^[8]。基于此,部分学者对传统的 FDE 算法进行了改进,提出了一些适合多故障并发场景的 GNSS 质量控制算法^[9-10]。但是,此类算法的适用性比较差,通常只能应用于特定的场景中。

此外,由于 IMU 具有短时间内高精度的物理特性,因此,可以利用 IMU 机械编排输出的高精度导航定位信息来辅助 GNSS 模糊度的解算过程^[11]。在 RTK/IMU 组合导航模型中,主要有两种模糊度的计算方法,一种是将模糊度参数增广到扩展卡尔曼滤波(extend kalman filter, EKF)的状态向量中,通过滤波来估计模糊度的浮点解,同时实现 IMU 辅助模糊度的解算过程,再利用最小二乘模糊度降

相关平差法(least-squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)搜索并固定模糊度^[12]。但是,这种方法会使得滤波状态向量的维数增大,特别是对于多星座联合解算的情况,可能会降低滤波解算的效率和稳定性,因此,该方法不适合在复杂环境中使用^[13]。另一种方法是利用 IMU 提供的高精度先验位置信息辅助 GNSS 独立解算模糊度,然后再将其回带到 EKF 中进行滤波融合^[14]。在该方法中,IMU 先验位置约束信息的加入可以有效辅助压缩整周模糊度的搜索空间,从而提高 GNSS 模糊度解算的成功率,但是,该方法在实践应用过程中仍有诸多限制,有待于进一步研究^[15]。

综上所述,针对传统 RTK/IMU 组合导航系统在复杂环境中模糊度固定困难导致其精度与可靠性较差的问题,本文提出了一种先验信息约束的车载 RTK/IMU 紧组合导航算法。该算法首先利用 IMU 提供的高精度先验位置信息构建了一种基于 IMU 辅助伪距一致性检测的 GNSS 质量控制模型,以识别并剔除粗差较大的伪距观测量,避免其对模糊度参数估计以及后续的组合导航解算造成影响;接着,基于 IMU 几何中心与 GNSS 天线相位中心之间的相对距离保持不变这一先验信息,提出了一种附加先验长度信息约束的 GNSS 模糊度解算方法,从而提高复杂观测环境中 GNSS 模糊度解算的成功率。最后,通过一组实地车辆实验验证了该算法的有效性。

1 算法框架

本文提出了一种先验信息约束的车载 RTK/IMU 紧组合导航算法,算法流程如图 1 所示,主要包括:基于 IMU 辅助伪距一致性检测的 GNSS 质量控制、附加先验长度信息约束的 GNSS 模糊度解算以及 RTK/IMU 紧组合滤波融合 3 个部分的内容。

算法开始时,首先执行基于 IMU 辅助伪距一致性检测的 GNSS 质量控制。由 IMU 机械编排根据上一历元组合导航系统输出的结果推算本历元车辆的位置,然后结合本历元基准站和流动站共视卫星的位置计算各卫星的虚拟伪距。接着将计算得到的虚拟伪距与实际接收到的伪距通过检测因子 D 来识别和标记“正常”和“异常”的卫星数据。如果某颗卫星对应的检测因子的绝对值 $|D|$ 大于所设定的阈值 K ,则系统判定该卫星的观测数据为“异常”,并将其保存到“异常卫星数据集”中;反之,则判定为“正常”,并将其保存到“正常卫星数据

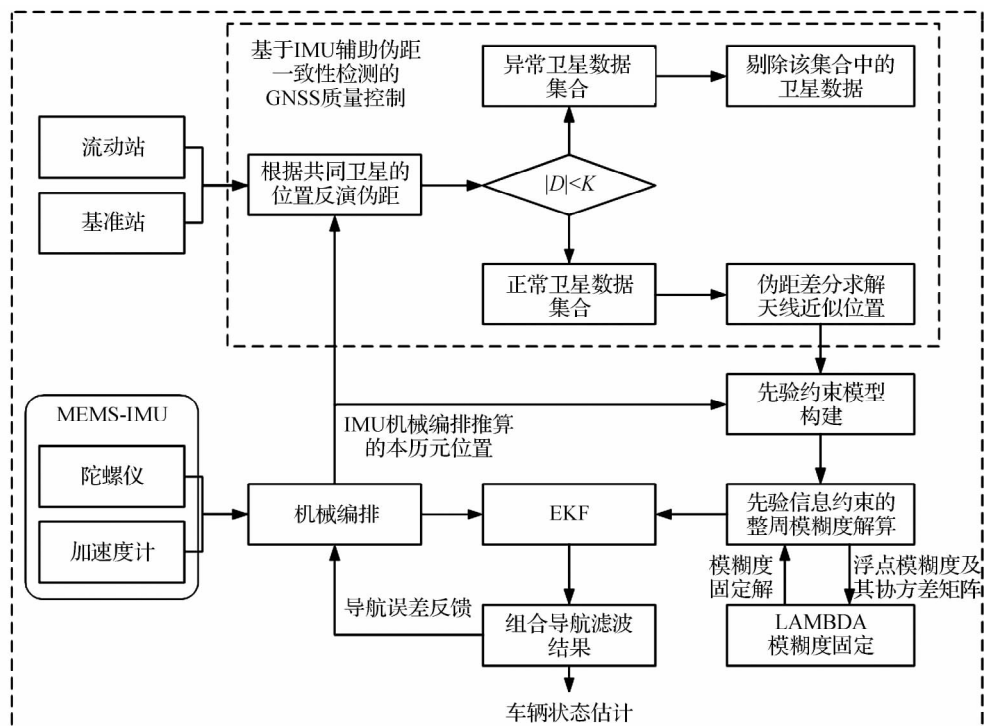


图 1 算法框架

集合”中。最后,将“异常卫星数据集合”中的观测数据进行剔除处理,不再参与后续的计算过程。

在完成上述质量控制过程后,将保存在“正常卫星数据集合”中的基准站和流动站的 GNSS 观测数据通过伪距差分定位的方式计算得到流动站天线的近似坐标,结合 IMU 机械编排推算的本历元的位置得到 IMU 与 GNSS 天线之间相对坐标的近似值。根据 IMU 几何中心与 GNSS 天线相位中心之间相对距离保持不变这一性质构建先验约束模型,并将其线性化后加入到 GNSS 双差模糊度解算方程中,对模糊度浮点解的计算过程进行约束,从而提高模糊度参数浮点解及其协方差矩阵的精度。接着,利用 LAMBDA 算法搜索模糊度的固定解,并通过 Ratio 值检验法^[16]对搜索出来的结果进行检验。一旦系统检测到模糊度被正确固定,则将整周模糊度补偿到对应的载波相位观测方程中,然后,将双差伪距和载波相位观测方程与 IMU 进行紧组合滤波融合;反之,如果模糊度固定失败,系统则利用模糊度浮点解进行组合导航滤波融合,从而得到本历元车辆的最优状态估计并输出。

2 先验信息约束的 RTK/IMU 紧组合导航滤波模型构建

2.1 状态方程

RTK/IMU 紧组合导航滤波的状态向量 \mathbf{X} 表示如下:

$$\mathbf{X} = [\delta r^e \quad \delta v^e \quad \phi \quad b_a \quad b_g \quad s_a \quad s_g]^T. \quad (1)$$

式中:上标 e 表示地心地固坐标系 (earth-centered, earth-fixed, ECEF); δr^e 和 δv^e 分别为 e 系中 IMU 的位置和速度误差矢量; ϕ 为载体的姿态失准角; b_a 和 s_a 分别为加速度计的零偏和比例因子误差; s_g 分别为陀螺仪的零偏和比例因子误差。

本文采用的 IMU 误差模型以及传感器误差建模方法可以参考文献[14]。组合导航滤波的状态方程可以表示如下:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k. \quad (2)$$

式中: $\Phi_{k,k-1}$ 为系统从 t_{k-1} 到 t_k 时刻的状态转移矩阵; \mathbf{W}_k 为系统噪声矩阵。

2.2 量测方程

RTK/IMU 紧组合导航滤波的量测向量通常由 GNSS 双差观测值与基于 IMU 机械编排推算的双差观测值进行差分构成。采用 IMU 辅助 GNSS 独立解算模糊度的策略,在计算得到模糊度的固定解后,再将其回代到 EKF 的量测方程中进行紧组合滤波融合。

2.2.1 基于 IMU 辅助伪距一致性检测的 GNSS 质量控制

由于在 GNSS 模糊度解算的过程中引入了伪距观测值,而伪距观测值的精度通常较低且比较容易受到外界的干扰导致较大的测量误差,因此,在进行模糊度解算之前,通常需要对所接收到的 GNSS 观测数据进行质量控制。因此,本文构建了

一种基于 IMU 辅助伪距一致性检测的 GNSS 质量控制模型,以识别并剔除粗差较大的伪距观测值,具体原理如下:

假设 t_{k-1} 时刻 RTK/IMU 组合导航系统输出的 e 系中车辆位置为 $r_{k-1} = (x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})$,由 IMU 机械编排推算的 t_k 时刻车辆的位置 $r_k = (x_k, y_k, z_k)$,即:

$$r_k = r_{k-1} + \frac{1}{2}(v_{k-1} + v_k)\Delta t. \quad (3)$$

式中: v_{k-1} 和 v_k 分别为 t_{k-1} 和 t_k 时刻车辆的速度; Δt 表示 t_{k-1} 和 t_k 时刻之间的时间间隔。假设 t_k 时刻共观测到了 m 颗卫星,则 e 系中卫星到地面接收机之间的几何距离 $\tilde{\rho}_i$ 为:

$$\tilde{\rho}_i = \text{norm}(r_{k,i}^s - r_k), i = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

式中: $\text{norm}(\cdot)$ 为向量的范数; $r_{k,i}^s$ 为观测卫星的位置。则 t_k 时刻基于 IMU 辅助计算的虚拟伪距 \tilde{P}_k 为:

$$\tilde{P}_k = \tilde{\rho}_k + c(dt_{r,k} - dt^{s,k}) + I_k + T_k. \quad (5)$$

式中: c 为光速; $dt_{r,k}$ 为接收机钟差,可以通过伪距单点定位解算得到; $dt^{s,k}$ 为卫星钟差,可以通过广播星历获取; I_k 和 T_k 分别为对流层和电离层误差,可以分别通过 Klobuchar 模型和 Saastamoinen 模型获取。

假设 t_k 时刻的实际观测到的伪距 P_k 为:

$$P_k = \rho_k + c(dt_{r,k} - dt^{s,k}) + I_k + T_k + \varepsilon_{P,k}. \quad (6)$$

式中: $\varepsilon_{P,k}$ 为伪距的量测噪声。

将此时各卫星的实际观测伪距与虚拟伪距的方程进行一次差分,即可得到对应的伪距误差 ΔP_k 为:

$$\Delta P_k = P_k - \tilde{P}_k = \rho_k - \tilde{\rho}_k + \varepsilon_{P,k} = \Delta \rho_k + \varepsilon_{P,k}. \quad (7)$$

式中: $\Delta \rho_k$ 为卫星到接收机之间的几何距离与计算的几何距离之间的差分残余项。从式(7)可以看出,经过差分处理后,消除了接收机钟差、卫星钟差、对流层误差和电离层误差,残余项主要为几何距离的差分残余和观测噪声。

然后,定义伪距误差检验因子 D 为:

$$D_i = \frac{(\Delta P_{k,i} - \alpha)}{\beta}. \quad (8)$$

式中:下标 i 表示卫星索引号; α 和 β 分别为 ΔP_k 的均值与标准差。 α 和 β 是动态变化的,与卫星仰角和接收机周边环境有关,但是由于实验时间较短,因此,本文中假设上述两个参数在实验过程中保持不变。假设检验因子 D 服从正态分布,参考 3σ 假设来设置阈值 K ,基于先验初始化数据设置阈值 $K = 5 \text{ m}^{[17]}$ 。将某一时刻所有观测到的卫星的检验

因子的绝对值 $|D|$ 与阈值 K 进行比较。若某一卫星的 $|D|$ 大于 K ,则系统判定该卫星的观测数据为“异常数据”,并将其保存到“异常卫星数据集”中;反之,系统则判定为“正常数据”并将其保存到“正常卫星数据集”中。

经过上述处理后保存在“异常卫星数据集”中的数据被认为是具有较大误差的 GNSS 观测信息。因此,将“异常卫星数据集”中的观测数据进行剔除处理,不再参与后续的模糊度解算以及滤波融合过程。

接着利用“正常卫星数据集”中的数据构建 GNSS 双差伪距和载波相位观测方程如下:

$$\nabla \Delta P = \nabla \Delta \rho + \nabla \Delta \varepsilon_P, \quad (9)$$

$$\lambda \nabla \Delta \varphi = \nabla \Delta \rho + \lambda \nabla \Delta N + \nabla \Delta \varepsilon_\varphi.$$

式中: $\nabla \Delta$ 为双差算子; φ 为载波相位观测值; λ 为载波的波长; N 为整周模糊度; ε_φ 为载波相位的量测噪声。

将式(9)进行线性化处理并整理成矩阵的形式,可得 GNSS 模糊度解算模型如下:

$$\begin{bmatrix} \nabla \Delta P \\ \lambda \nabla \Delta \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & 0_{n \times n} \\ G & \lambda I_{n \times n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \nabla \Delta N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nabla \Delta \varepsilon_P \\ \nabla \Delta \varepsilon_\varphi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

式中: G 为单位视线向量所构成的矩阵; n 为双差模糊度的数量; I 为单位矩阵。

2.2.2 附加先验长度信息约束的 GNSS 模糊度解算方法

在传统的 RTK/IMU 组合导航系统中,若无额外的约束条件,GNSS 模糊度固定的成功率较低。在车辆运动的过程中,其上安装的 GNSS 天线相位中心和 IMU 几何中心之间的相对距离是保持不变的,并且通过事先测量得到其精确的数值,因此,利用这一先验信息构建约束方程,从而增强 GNSS 模糊度解算模型的强度,具体原理如下。

首先,如图 2 所示,设从 IMU 几何中心到 GNSS 天线相位中心的矢量为 b ,事先测量得到的距离值为 l ,则该约束方程为:

$$|b| = \sqrt{x_b^2 + y_b^2 + z_b^2} = l. \quad (11)$$

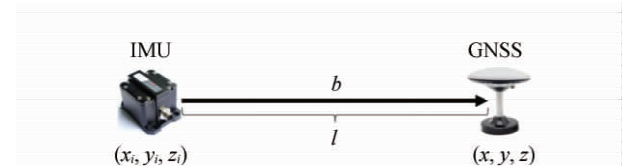


图 2 先验长度信息约束示意图

该约束方程为非线性方程,无法直接使用,需要在近似解处对其进行线性化处理。设 b 的近似解为 $b_0 = (x_{b_0}, y_{b_0}, z_{b_0})$,则将式(11)在 b_0 处进行泰

勒展开并取一次项,忽略高阶项的影响:

$$\frac{x_{b_0}x_b + y_{b_0}y_b + z_{b_0}z_b}{\sqrt{x_{b_0}^2 + y_{b_0}^2 + z_{b_0}^2}} + \sqrt{x_{b_0}^2 + y_{b_0}^2 + z_{b_0}^2} - \frac{x_{b_0}^2 + y_{b_0}^2 + z_{b_0}^2}{\sqrt{x_{b_0}^2 + y_{b_0}^2 + z_{b_0}^2}} \approx l. \quad (12)$$

将式(12)展开并整理如下:

$$\left. \begin{aligned} a_x^b x_b + a_y^b y_b + a_z^b z_b &\approx l \\ a_x^b &= \frac{x_{b_0}}{\sqrt{x_{b_0}^2 + y_{b_0}^2 + z_{b_0}^2}}, a_y^b = \frac{y_{b_0}}{\sqrt{x_{b_0}^2 + y_{b_0}^2 + z_{b_0}^2}} \\ a_z^b &= \frac{z_{b_0}}{\sqrt{x_{b_0}^2 + y_{b_0}^2 + z_{b_0}^2}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

令 $a^b = [a_x^b, a_y^b, a_z^b]^T$, 同时顾及先验距离信息 l 的测量误差和线性化过程中忽略的高阶项的误差 ε_l , 则式(13)可变换为:

$$l = a^b b + \varepsilon_l. \quad (14)$$

设 IMU 几何中心的坐标为 X_I , 并代入式(14)中可得:

$$l + a^b X_I = a^b X + \varepsilon_l. \quad (15)$$

令 $L = l + a^b X_I$, 式(15)可表示为:

$$L = a^b X + \varepsilon_l. \quad (16)$$

将式(10)和式(16)联立, 即可得到附加先验长度信息约束的 GNSS 模糊度解算模型如下:

$$\begin{bmatrix} \nabla \Delta P \\ \lambda \nabla \Delta \varphi \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & 0 \\ G & \lambda I \\ a^b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \nabla \Delta N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nabla \Delta \varepsilon_P \\ \nabla \Delta \varepsilon_\varphi \\ \varepsilon_l \end{bmatrix}. \quad (17)$$

从上述推导过程可以看出, b_0 的精度对方程的约束效应具有较大的影响。若 b_0 的精度较低, 则 ε_l 较大, 方程的约束效果也会随之降低。为了提高 b_0 的精度, 本文利用保存在“正常卫星数据集合”中的 GNSS 观测数据, 构建伪距差分定位方程:

$$\nabla \Delta P = G_P X_0 + \nabla \Delta \varepsilon_P. \quad (18)$$

式中: X_0 为 GNSS 天线相位中心坐标的近似解。对式(18)进行最小二乘解算, 即可得到 X_0 的坐标。由于 IMU 具有短时间内高精度的特性, 因此, X_I 可由 IMU 机械编排根据组合导航系统上一时刻输出的导航信息推算得到。因此, b_0 可计算如下:

$$b_0 = X_0 - X_I = \begin{bmatrix} x_{b_0} - x_i \\ y_{b_0} - y_i \\ z_{b_0} - z_i \end{bmatrix}^T. \quad (19)$$

式中: $(x_{b_0}, y_{b_0}, z_{b_0})$ 和 (x_i, y_i, z_i) 分别为 X_0 和 X_I 对应的坐标值。

将计算得到的 b_0 代入式(17)中进行最小二乘解算, 即可得到 GNSS 模糊度参数的浮点解及其协

方差矩阵, 再利用 LAMBDA 算法搜索模糊度的固定解, 并通过 Ratio 值检验法对搜索得到的结果进行验证。一旦模糊度固定成功, 则相应的整周模糊度将会被补偿到对应的载波相位观测方程中, 然后将经过模糊度补偿后的双差载波相位和伪距观测值与 IMU 对应的预测结果进行紧组合滤波融合; 反之, 如果模糊度固定失败, 则利用模糊度的浮点解和伪距观测值进行滤波融合。此处需要注意的是, 为了提高滤波融合过程中载波相位观测量的比重, 将伪距和载波相位观测值以 1 : 100 的权重与 IMU 输出的结果进行滤波融合。最后, 将 EKF 融合的结果作为当前时刻车辆状态的最优估计并输出。

3 实验与分析

为了对提出算法的性能进行评估, 在江苏省南京市进行了实地车辆实验, 实验设备布局如图 3 所示。实验中所使用的 GNSS 设备为北斗星通的 C520-AT 型接收机, 采样频率 10 Hz, 使用 GPS 和 BDS 双星座单频观测数据进行导航解算, 使用的天线型号为浙江中裕通信的 ZYACF-S065。惯性导航设备是一种型号为 STIM-300 的机电系统 (micro-electro mechanical systems, MEMS) IMU, 采样频率为 125 Hz。IMU 几何中心到 GNSS 天线相位中心的距离为 1.5 m。参考轨迹由高精度组合导航系统 HGuide n580 通过一个型号为 ZYACF-L004 的双极化天线采集的数据, 利用 NovAtel 商业软件 Interial Exporer 后处理得到。HGuide n580 中集成的 IMU 型号为 Honeywell HG4930, 惯性传感器参数如表 1 所示。实验车辆的行驶轨迹和部分实验环境分别如图 4、图 5 所示。

表 1 惯性传感器参数

IMU	参数	加速度计	陀螺仪
STIM-300	零偏不稳定性	0.05 mg	$0.5^\circ \cdot \text{h}^{-1}$
	随机游走	$0.06 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{h}^{-\frac{1}{2}})$	$0.15^\circ \cdot \text{h}^{-\frac{1}{2}}$
HG4930	零偏不稳定性	0.025 mg	$0.25^\circ \cdot \text{h}^{-1}$
	随机游走	$0.03 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{h}^{-\frac{1}{2}})$	$0.04^\circ \cdot \text{h}^{-\frac{1}{2}}$

为了能够更准确地评估算法的性能, 将其与两种候选算法 (传统 TC 算法和基于 IMU 位置信息约束的 TC 算法) 的解算结果进行比较。每种算法实验过程中均执行文中涉及的 GNSS 质量控制标准。

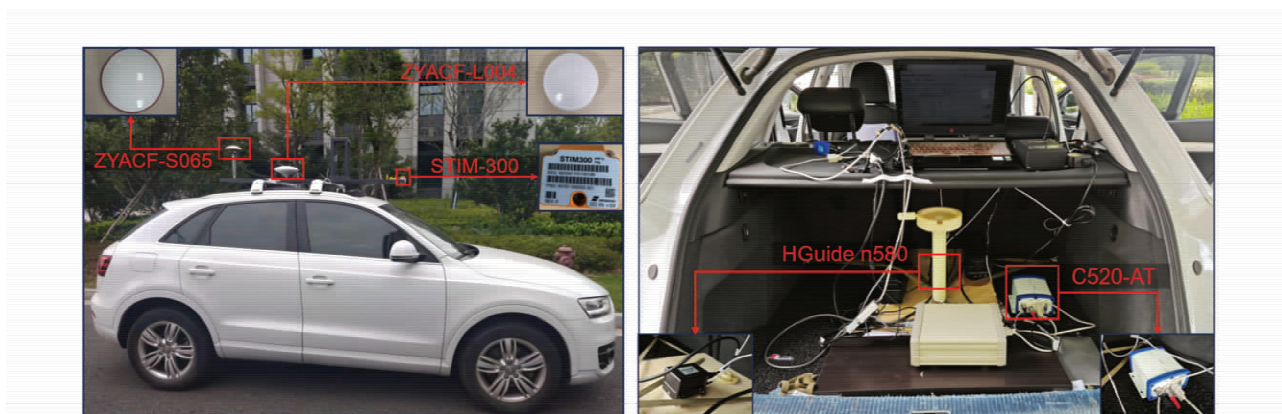


图3 实验设备布局



图4 部分实验环境

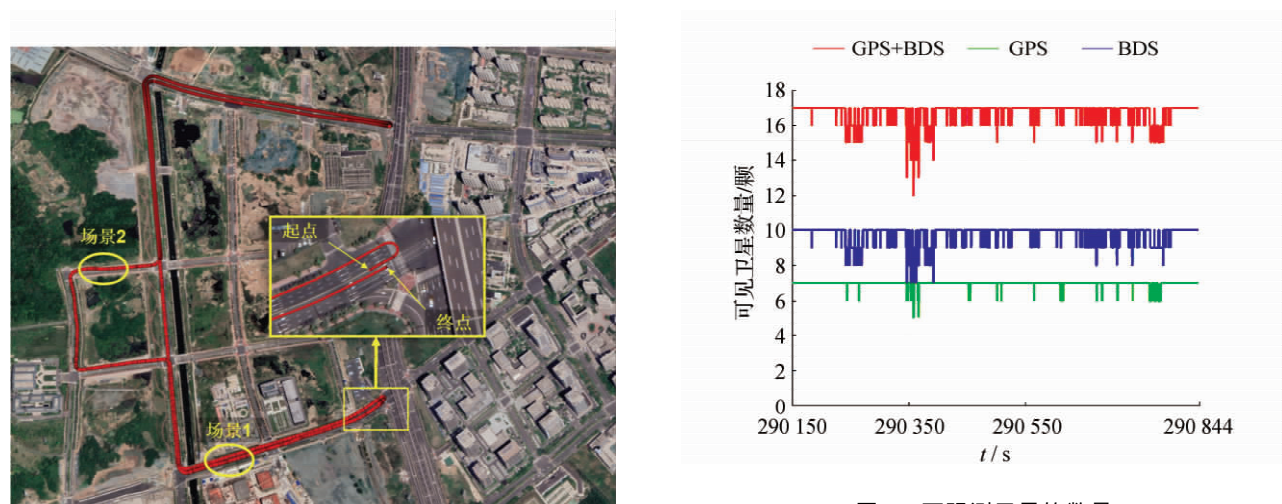


图5 车辆行驶路径

图6 可观测卫星的数量

车辆行驶过程中的可见卫星数量分布如图6所示, GPS和BDS双星座的启用, 有效地增加了同一历元可观测到的卫星数量, 并且大多数历元的可观测卫星数量均保持在13颗及以上, 总体的卫星可见性较好。但是, 结合图4可以看出, 实验车辆在行驶的过程中会受到周边复杂环境的影响, 导致部分历

元中GNSS观测数据的质量不佳, 可能会对RTK/IMU组合导航系统的精度造成一定的负面影响。

图7和图8展示了3种实验算法的Ratio值计算情况和模糊度解算结果对比。若某历元计算得到的Ratio值大于所设定的阈值(本文设定为2)且定位误差小于19 cm(约1个载波周期), 则认为该历元模糊度已正确固定, 反之则认为该历元模糊度

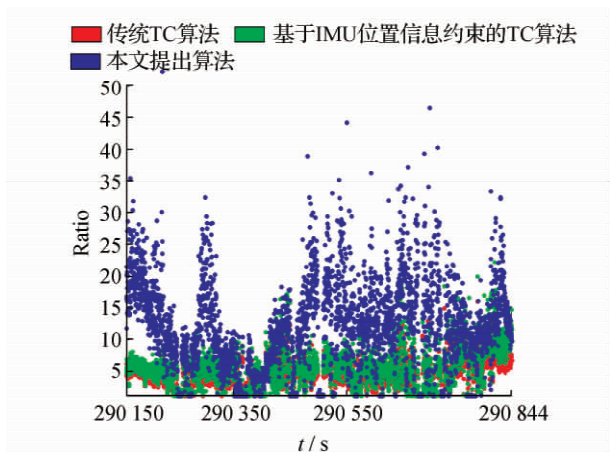


图 7 Ratio 值解算情况

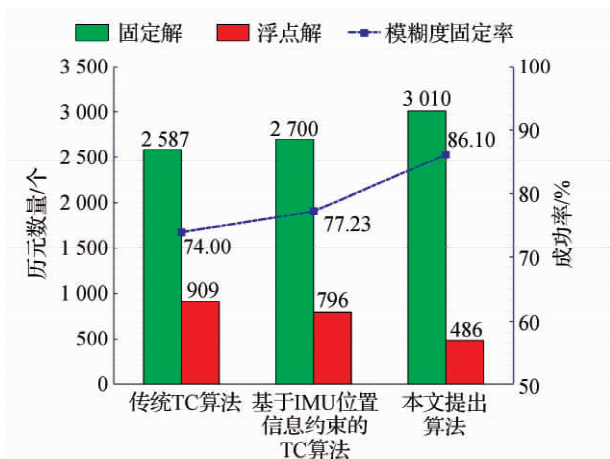


图 8 各算法模糊度解算性能对比

固定失败。从图 8 中可以看出,本文提出算法正确固定模糊度的历元数量为 3 种测试算法中最高,整体的固定率达到了 86.10%,优于传统 TC 算法的 74.00%和基于 IMU 位置信息约束的 TC 算法的 77.23%。与传统 TC 算法相比,基于 IMU 位置信息约束的 TC 算法的提升率为 4.36%,这表明 IMU 位置信息约束能够在一定程度上提升模糊度的固定率,但是整体的提升效果有限。而本文提出算法相对于传统 TC 算法的模糊度固定率有较大的提升,达到 16.35%,与基于 IMU 位置信息约束的 TC 算法相比,提升率也达到了 11.49%。结果表明,本文提出算法相对于两种候选算法具有更好的模糊度解算性能。此外,结合图 7 可以看出,本文提出算法计算得到的 Ratio 值普遍大于另外两种算法的计算结果,这也证明了本文提出算法在模糊度解算的准确率和质量方面也要优于其他两种候选算法。

图 9~11 分别展示了实验中 3 种测试算法的位置、速度和姿态误差解算结果。各算法的位置、速度和姿态精度对比分别如表 2~4 所示。通过对上述图表的数据分析可以看出,先验约束信息的加

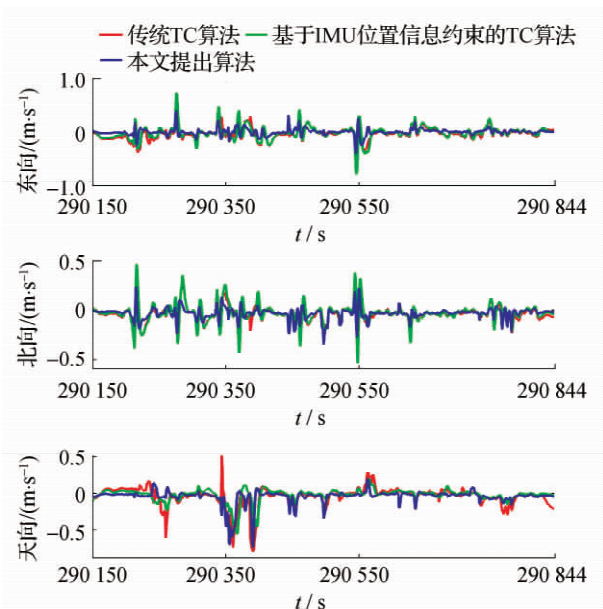


图 9 各算法的定位误差对比

表 2 各算法的定位精度对比

RMSE	传统 TC 算法 /m	基于 IMU 位置信息 约束的 TC 算法/m	本文 提出 算法 /m	相对于算 法 1 的提 升率/%	相对于算 法 2 的提 升率/%
东向	0.13	0.12	0.06	53.85	50.00
北向	0.10	0.10	0.06	40.00	40.00
天向	0.15	0.11	0.10	33.33	9.10
3D	0.22	0.19	0.14	36.36	26.31

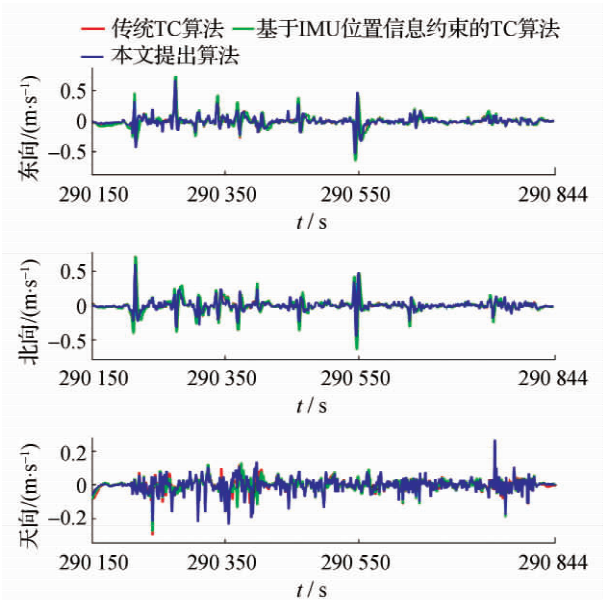


图 10 各算法的速度误差对比

表 3 各算法的速度精度对比

RMSE	传统	基于 IMU	本文	相对于	相对于
	TC	位置信息约	提出	算法 1	算法 2
	算法	束的 TC 算法	算法	的提升	的提升
	$/(m \cdot s^{-1})$	$/(m \cdot s^{-1})$	$/(m \cdot s^{-1})$	率 %	率 %
东向	0.10	0.10	0.08	20.00	20.00
北向	0.14	0.10	0.08	42.86	20.00
天向	0.05	0.04	0.04	20.00	0.00
3D	0.14	0.15	0.12	14.29	20.00

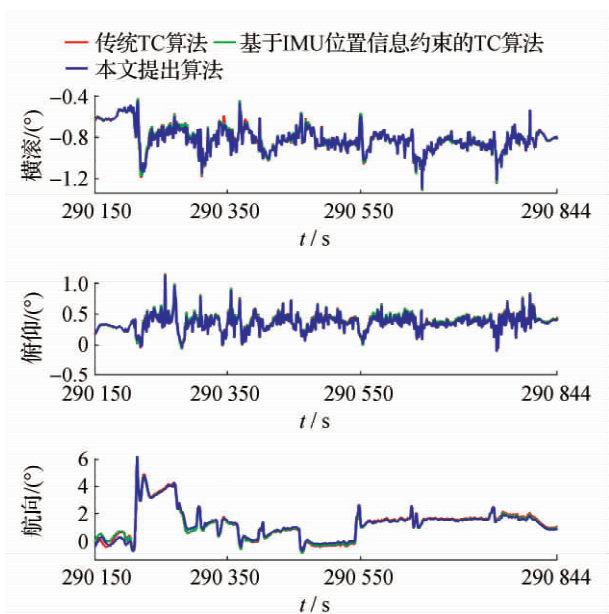


图 11 各算法的姿态误差对比

表 4 各算法的姿态精度对比

RMSE	传统	基于 IMU	本文	相对于算	相对于算
	TC	位置信息	提出	法 1 的提	法 2 的提
	算法	约束的 TC	算法	升率/%	升率/%
	$/(^{\circ})$	算法 $/(^{\circ})$	$/(^{\circ})$		
横滚	0.83	0.83	0.82	1.20	1.20
俯仰	0.40	0.40	0.38	5.00	5.00
航向	1.66	1.63	1.62	2.41	0.61

入,有效地改善了提出算法的定位精度,特别是水平方向上的提升幅度较为明显。相对于传统 TC 算法,本文提出算法在东向和北向定位的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别从 0.13 m 和 0.10 m 提高到 0.06 m 和 0.06 m,提升率分别达到 53.85% 和 40.00%,天向定位的 RMSE 从 0.15 m 提高到 0.10 m,提升率为 33.33%,三维定位总体提升率达到 36.36%。与基于 IMU 位置信息约束的

TC 算法相比,提出算法在东向和北向也能达到 50.00% 和 40.00% 的定位精度提升,三维定位总体提升率达到了 26.31%。

在速度方面,本文提出算法在东向、北向和天向速度的 RMSE 分别为 0.08 m/s、0.08 m/s 和 0.04 m/s,优于传统 TC 算法的 0.10 m/s、0.14 m/s 和 0.05 m/s,提升率分别为 20.00%、42.86% 和 20.00%,3D 综合提升率达到 14.29%。与基于 IMU 位置信息约束的 TC 算法相比,本文提出算法主要是提升了水平方向的速度精度,东向和北向各有约 20% 的速度精度提升。

在姿态方面,与传统 TC 算法相比,本文提出算法在横滚、俯仰与航向的精度提升分别为 1.20%、5.00% 和 2.41%。与基于 IMU 位置信息约束的 TC 算法相比,本文提出算法在横滚和俯仰上各有 1.20% 和 5.00% 的姿态精度提升,在航向上的精度提升率为 0.61%。

以上实验结果均表明,本文提出算法在位置、速度和姿态确定方面相对于传统 TC 算法均有明显的精度提升,与基于 IMU 位置信息约束的 TC 算法相比,具有更好的定位和定速效果。

4 结 论

本文针对复杂环境中车辆高精度导航定位的需求,提出了一种先验信息约束的车载 RTK/IMU 紧组合导航算法。该算法首先利用 IMU 机械编排推算的高精度先验位置信息辅助构建检验因子,对所接收到的 GNSS 观测数据进行质量控制。接着,利用 IMU 几何中心与 GNSS 天线相位中心相对距离保持不变这一先验信息构建约束方程,对 GNSS 模糊度的解算过程进行约束,从而提高了模糊度解算的成功率。最后,通过一组实地跑车实验验证了该算法在真实环境中的性能。实验结果表明,相对于传统 RTK/IMU 紧组合导航算法,提出算法在三维位置、速度确定精度上的提升率达到 36.36% 和 14.29%;与基于 IMU 位置信息约束的 RTK/IMU 紧组合导航算法相比,提升率分别达到 26.31% 和 20.00%。在姿态确定方面,提出算法相对于两种候选算法在横滚和俯仰上分别达到了 1.20% 和 5.00% 的精度提升,在航向上的精度提升率分别为 2.41% 和 0.61%。

参考文献:

[1] YANG L, LI Y, WU Y, et al. An enhanced MEMS-INS/GNSS integrated system with fault detection and

- exclusion capability for land vehicle navigation in urban areas[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(4): 593-603.
- [2] TAKASU T, YASUDA A. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package[C], *Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS*, Korea, 2009.
- [3] SUN R, WANG G, CHENG Q, et al. Improving GPS code phase positioning accuracy in urban environments using machine learning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 8(8): 7065-7078.
- [4] 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): 8685-8711.
- [5] NIU Z, LI G, GUO F, et al. An algorithm to assist the robust filter for tightly coupled RTK/INS navigation system[J]. *Remote Sensing*, 2020, 14(10): 2449.
- [6] LI B, LOU L, SHEN Y. GNSS elevation-dependent stochastic modeling and its impacts on the statistic testing[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2016, 142(2): 04015012.
- [7] HEWITSON S, LEE H K, WANG J. Localizability analysis for GPS/Galileo receiver autonomous integrity monitoring[J]. *The Journal of Navigation*, 2004, 57(2): 245-259.
- [8] ZHU N, MARAISJ, BÉTAILLE D, et al. GNSS position integrity in urban environments: a review of literature[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(9): 2762-2778.
- [9] HSU L, TOKURA H, KUBO N, et al. Multiple faulty GNSS measurement exclusion based on consistency check in Urban Canyons[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(6): 1909-1917.
- [10] CASTALDO G, ANGRISANO A, GAGLIONE S, et al. P-RANSAC: an integrity monitoring approach for GNSS signal degraded scenario[J]. *International Journal of Navigation and Observation*, 2014, (4): 1-11.
- [11] ZHANG X, ZHU F, ZHANG Y, et al. The improvement in integer ambiguity resolution with INS aiding for kinematic precise point positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93: 993-1010.
- [12] 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*, 2023, 24(2): 1855-1866.
- [13] 孙红星. 差分 GPS/INS 组合定位定姿及其在 MMS 中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [14] 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): 2462-2484.
- [15] 李团, 章红平, 牛小骥, 等. RTK/INS 紧组合算法在卫星数不足情况下的性能分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(3): 478-484.
- [16] LI L, LI Z, YUAN H, et al. Integrity monitoring-based ratio test for GNSS integer ambiguity validation [J]. *GPS Solutions*, 2015, 20(3): 573-585.
- [17] SUN R, WANG J, CHENG Q, et al. A new IMU-aided multiple GNSS fault detection and exclusion algorithm for integrated navigation in urban environments [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4): 1-17.

[责任编辑:李铭娜]