



引文格式:祝浩祈,王甫红,张万威,等.一种城市环境下GNSS/MEMS IMU车载实时精密定位方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1232-1240.DOI:10.13203/j.whugis20220491
Citation: ZHU Haoqi, WANG Fuhong, ZHANG Wanwei, et al. Real-Time Precise Positioning Method for Vehicle-Borne GNSS/MEMS IMU Integration in Urban Environment[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 1232-1240.DOI:10.13203/j.whugis20220491

一种城市环境下GNSS/MEMS IMU车载实时精密定位方法

祝浩祈¹ 王甫红¹ 张万威¹ 栾梦杰¹ 程雨欣¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘要:针对城市环境下全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)信号严重遮挡和微机械惯性测量单元(micro-electro-mechanical system inertial measurement unit, MEMS IMU)误差快速累积导致GNSS/惯性导航系统(inertial navigation system, INS)组合定位精度下降的问题,提出了一种GNSS载波相位实时动态差分(real time kinematic, RTK) + 载波相位时间差分(time-differenced carrier phase, TDCP)/INS实时精密定位方法。在观测条件良好时,采用固定模糊度的RTK与INS紧组合;当信号严重遮挡RTK解算失败但TDCP解算成功时,使用TDCP观测值与INS紧组合;若TDCP解算失败,采用INS推算导航。在武汉大学校园及周边开展车载实验,结果表明,在除了隧道等密闭环境以外的城市道路上,多系统GNSS的TDCP解算成功率接近90%。在RTK解算失败的连续时间小于45 s的复杂环境下,TDCP/INS组合定位的平面和高程均方根误差分别为0.30、0.21 m,最大误差分别为0.69、0.72 m,可以实现分米级的实时定位精度。

关键词:GNSS;MEMS IMU;载波相位时间差分;车载实时精密定位;城市环境

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2022-10-11

DOI:10.13203/j.whugis20220491

文章编号:1671-8860(2023)07-1232-09

Real-Time Precise Positioning Method for Vehicle-Borne GNSS/MEMS IMU Integration in Urban Environment

ZHU Haoqi¹ WANG Fuhong¹ ZHANG Wanwei¹ LUAN Mengjie¹ CHENG Yuxin¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Recognizing that the seriously occluded global navigation satellite system (GNSS) signals in urban environments and the rapidly accumulated micro-electro-mechanical system inertial measurement unit (MEMS IMU) errors would lead to the decline of GNSS/inertial navigation system (INS) positioning accuracy, a real-time precise positioning method named GNSS real-time kinematic (RTK) + time-differenced carrier phase (TDCP) /INS is proposed. Methods: In this method, the RTK positioning with fixed ambiguity is coupled with INS tightly to generate the navigation results when GNSS signals are well tracked. If GNSS signals are seriously blocked and the RTK solution fails but the TDCP solution succeeds, the TDCP measurements are coupled with INS tightly for navigation. Moreover, if TDCP solution also fails, the INS is used for reckoning navigation. Results: Vehicle experiments have been carried out on the campus of Wuhan University and its surroundings. The results show that the success rate of TDCP solution with multi-GNSS is close to 90% on urban roads except for tunnels and other closed scenes. More impor-

基金项目:国家自然科学基金(62103307,62073044);卫星导航系统与装备技术国家重点实验室开放基金(CEPNT-2021KF-05, CEPNT-2021KF-10)。

第一作者:祝浩祈,硕士生,主要研究方向为GNSS/INS组合导航。2020202140062@whu.edu.cn

通讯作者:王甫红,博士,教授。fhwang@sgg.whu.edu.cn

tantly, even in an adverse scene where the continuous time of RTK solution failure is less than 45 s, the root mean square errors of the TDCP/INS solution are only 0.30 m and 0.21 m, and its maximum errors are 0.69 m and 0.72 m, respectively, in the horizontal and vertical directions. **Conclusions:** The experimental results have demonstrated that a decimeter-level real-time navigation accuracy is achievable with this method.

Key words: global navigation satellite system (GNSS); MEMS IMU; time-differenced carrier phase; vehicle-borne real-time precise positioning; urban environment

随着自动驾驶、无人机和物联网技术的发展,实时高精度导航定位受到越来越多的关注^[1]。基于载波相位的实时动态差分(real time kinematic, RTK)技术,在全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)信号良好的环境下可以实现连续可靠的厘米级定位^[2-3]。但在城市复杂环境下,受城市高楼、树荫等地物遮挡,卫星信号频繁失锁及观测粗差增加,RTK无法获得固定解,定位精度严重下降。惯性导航系统(inertial navigation system, INS)具有短期推算精度高的特点,与GNSS有较强的互补性,两者组合可以提高GNSS定位在城市复杂环境下的连续性、可靠性和可用性^[4-5]。

虽然用INS的先验位置辅助载波相位模糊度固定,可以提高RTK的模糊度固定率^[6-8],但在遮挡严重的场景下,受限于GNSS可用卫星少、信号中断频繁和严重的多路径误差等原因,即使使用战术级惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)辅助,RTK模糊度固定率仍不足70%^[9],对于精度较低的微机械(micro-electro-mechanical system, MEMS)IMU,其辅助模糊度固定的能力会进一步下降^[10]。当RTK模糊度无法固定时,紧组合系统常用伪距观测值进行测量更新,导致定位精度下降至米级^[11-12]。在车载导航中,非完整性约束(non-holonomic constraints, NHC)也常被用作辅助信息来抑制INS定位误差发散^[13],由于缺少前向速度约束及MEMS IMU推算精度低,NHC/INS推算60 s平面误差便会超过10 m^[14]。因此,需要探索新的方法来抑制INS推算误差的快速累积。

在未发生周跳时,载波相位时间差分(time-differenced carrier phase, TDCP)方法通过对连续两个历元的载波相位观测值求差,消除了整周模糊度和共模误差,在前后历元有不少于4颗卫星的连续观测条件下,即可解算得到厘米级的历元间位置变化量^[15]。文献[16]混合使用L1/E1和L5/E5的单频载波相位观测值,验证了在复杂环境下使用多频多系统卫星信号可以大幅提高

TDCP解算成功率和可靠性。在复杂环境下RTK模糊度无法固定时,可以利用TDCP观测值与INS紧组合,以维持组合系统短期内较高的定位精度^[17]。但是,TDCP只能提供前后两个历元的相对位置关系,类似于推算导航,定位误差不断累积,影响系统的长期精度。文献[18]以低频的伪距观测值来抑制TDCP/INS长期的误差累积,但受伪距观测噪声的影响,该方法对定位精度提升有限。文献[19]提出了改进的基于TDCP的GNSS/INS组合方案,以当前历元和参考历元的TDCP测量来更新位置,避免位置误差累积,然而在复杂环境下由于载波相位周跳频繁发生以及共模误差无法消除等原因,该方法的定位精度迅速下降。综合上述研究结果,对于当前多频多系统接收机而言,TDCP方法具有避免模糊度解算、历元间位置变化量解算精度高、在遮挡较为严重的场景下仍能有较高的解算成功率等优点,但也存在着误差会缓慢累积的问题。因此,充分利用RTK固定解的绝对定位精度和短时间内TDCP相对定位精度,有望实现城市复杂环境下的高精度实时导航。

基于以上分析,本文提出了一种城市环境下GNSS RTK+TDCP/INS实时精密定位方法,并使用自研软件对车载动态GNSS/MEMS IMU数据开展实验研究,验证本文方法的可行性和定位精度。

1 GNSS RTK+TDCP/INS 组合模型

1.1 状态方程

在导航坐标系(*n*系,北东地)下构建GNSS/INS组合导航系统。系统状态参数*x*为:

$$x = \begin{bmatrix} (\delta r^n)^T & (\delta v^n)^T & \phi^T & b_g^T & b_a^T & s_g^T & s_a^T \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中, δr^n 、 δv^n 、 ϕ 分别为 INS 机械编排的三维位置误差、三维速度误差、三维姿态误差; b_g 、 s_g 分别为三轴陀螺仪零偏和比例因子; b_a 、 s_a 分别为三轴加

速度计零偏和比例因子。采用 ϕ 角误差模型构建状态方程(具体推导过程可见文献[5]):

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta \dot{\mathbf{r}}^n = -\omega_{en}^n \times \delta \mathbf{r}^n + \delta \theta \times \mathbf{v}^n + \delta \mathbf{v}^n \\ \delta \dot{\mathbf{v}}^n = C_b^n \delta \mathbf{f}^b + (C_b^n \mathbf{f}^b \times) \phi - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \\ \quad \delta \mathbf{v}^n + \mathbf{v}^n \times (2\delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n) + \delta \mathbf{g}_l^n \\ \dot{\phi} = -\omega_m^n \times \phi + \delta \omega_{in}^n - C_b^n \delta \omega_{ib}^b \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, ω_{en}^n 为 n 系相对于地心地固坐标系(e 系)的旋转角速度矢量在 n 系下的投影; $\delta \theta$ 为 INS 计算坐标系(c 系)与 n 系的姿态差异; C_b^n 为从载体坐标系(b 系, 前右下)转换到 n 系的方向余弦矩阵; \mathbf{f}^b 和 ω_{ib}^b 分别为加速度计比力和陀螺仪角速度输出; ω_{ie}^n 为地球自转角速度矢量在 n 系下的投影; \mathbf{g}_l^n 为当地重力加速度矢量在 n 系下的投影; ω_{in}^n 为 n 系相对于惯性坐标系(i 系)的旋转角速度矢量在 n 系下的投影; $\delta(\cdot)$ 表示该变量的误差; $(\cdot \times)$ 表示向量的反对称矩阵。

陀螺仪、加速度计零偏和比例因子均建模为一阶高斯马尔可夫模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{b}}_g(t) = -\frac{1}{T_{gb}} \mathbf{b}_g(t) + \mathbf{w}_{gb}(t) \\ \dot{\mathbf{b}}_a(t) = -\frac{1}{T_{ab}} \mathbf{b}_a(t) + \mathbf{w}_{ab}(t) \\ \dot{\mathbf{s}}_g(t) = -\frac{1}{T_{gs}} \mathbf{s}_g(t) + \mathbf{w}_{gs}(t) \\ \dot{\mathbf{s}}_a(t) = -\frac{1}{T_{as}} \mathbf{s}_a(t) + \mathbf{w}_{as}(t) \end{array} \right. \quad (3)$$

式中, T_{gb} 、 T_{ab} 、 T_{gs} 、 T_{as} 为一阶高斯马尔可夫过程的相关时间; \mathbf{w}_{gb} 、 \mathbf{w}_{ab} 、 \mathbf{w}_{gs} 和 \mathbf{w}_{as} 为对应的驱动白噪声。

1.2 观测方程

在 GNSS 信号良好时使用 RTK/INS 紧组合定位, RTK/INS 紧组合观测方程为:

$$Z = [\lambda \nabla \Delta \varphi - \nabla \Delta \mathbf{r}] = Hx + V \quad (4)$$

式中, Z 为残差向量; $\nabla \Delta \varphi$ 为双差载波相位观测值, 含双差固定解模糊度; $\nabla \Delta \mathbf{r}$ 为 INS 推算的双差距离; λ 为载波波长; H 和 V 分别为观测矩阵和观测噪声阵。

当 RTK 模糊度固定失败且 TDCP 解算成功时, 使用 TDCP/INS 紧组合定位。考虑相邻历元电离层和对流层延迟相等且未发生周跳, 由 t_{k-1} 和 t_k 观测历元构造 TDCP 观测值为:

$$\Delta L = L_{t_k}^i - L_{t_{k-1}}^i = \rho_{t_k} - \rho_{t_{k-1}} + c(\delta t_{u,t_k} - \delta t_{u,t_{k-1}}) + \epsilon_{\Delta L} \quad (5)$$

式中, Δ 表示差分算子; L^i 为载波相位观测值, 其中 i 表示不同频率的信号; ρ 为卫星和接收机之间

的几何距离; δt_u 为接收机钟差; c 为光速; $\epsilon_{\Delta L}$ 为 TDCP 测量的噪声和残余误差。

首先将前一时刻的组合结果作为已知值计算 $\rho_{t_{k-1}}$, 然后将 INS 推算的 TDCP 值 $\hat{\Delta L}$ 与式(5)作差, 则 TDCP/INS 紧组合观测方程为:

$$\begin{aligned} z &= \Delta L - \hat{\Delta L} = \\ & \left[\frac{C_e^n (\mathbf{r}_{SV}^e - \hat{\mathbf{r}}_G^e)}{\|\mathbf{r}_{SV}^e - \hat{\mathbf{r}}_G^e\|} \right]^T [\delta \mathbf{r}^n + (C_b^n \mathbf{l}^b \times) \phi] + \\ & c \Delta t_u + \epsilon_{\Delta L} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, z 为 TDCP 值残差; $\hat{\mathbf{r}}_G^e$ 为 t_k 时刻 e 系下接收机位置, 可由 INS 推算位置求得; \mathbf{r}_{SV}^e 为 t_k 时刻 e 系下卫星位置; C_e^n 为从 e 系转换到 n 系的方向余弦矩阵; \mathbf{l}^b 为 GNSS 天线的杆臂向量; 接收机钟差变化量 $\Delta \delta t_u = \delta t_{u,t_k} - \delta t_{u,t_{k-1}}$ 可通过最小二乘方法解算 TDCP 观测值求得。则式(6)可简化为:

$$z = \left[\frac{C_e^n (\mathbf{r}_{SV}^e - \hat{\mathbf{r}}_G^e)}{\|\mathbf{r}_{SV}^e - \hat{\mathbf{r}}_G^e\|} \right]^T [\delta \mathbf{r}^n + (C_b^n \mathbf{l}^b \times) \phi] + \epsilon_{\Delta L} \quad (7)$$

当 RTK 和 TDCP 均解算失败时, 使用 NHC/INS 定位。NHC 观测方程为:

$$Z = -C_b^n C_n^b \delta \mathbf{v}^n + C_b^n C_n^b (\mathbf{v}^n \times) \phi + \epsilon_v \quad (8)$$

式中, C_b^n 和 C_n^b 分别为从 b 系转换到车辆坐标系(v 系, 前右下)和从 n 系转换到 b 系的方向余弦矩阵; ϵ_v 为 NHC 速度测量噪声。NHC 只对侧向速度和垂向速度进行约束, 因此式(8)只取侧向和垂向分量。

1.3 INS 辅助 TDCP 粗差剔除

在严重遮挡环境中, 载波相位观测值受多路径效应、周跳等影响, 导致粗差数据的比例大幅上升。本文采用两步法探测载波相位观测值的粗差数据, 步骤如下:

1) 利用 INS 机械编排得到的先验位置进行 TDCP 粗差探测。首先利用式(5)构建 TDCP 观测值, 同时利用 INS 的先验位置和上一历元定位结果得到 INS 推算的 TDCP 值, 然后计算得到所有 TDCP 残差(观测值减计算值)的平均值 $\Delta \bar{v}$ 和标准差 σ 。当某颗卫星的 TDCP 值残差 Δv_i 满足 $|\Delta v_i - \Delta \bar{v}| > 3\sigma$ 时, 则不参与 TDCP 解算。

2) 验后粗差探测。对通过步骤 1) 检测的 TDCP 观测值进行最小二乘解算, 并对结果进行卡方检验, 如果残差平方和 $V^T P V$ 不满足自由度为 $n - 4$ (其中 n 为参与计算的 TDCP 观测值数) 的中心化 χ^2 分布, 则采用 W 检验来剔除最大值对应的卫星数据^[20]。重复 TDCP 解算过程, 直到解

算结果能够通过 χ^2 检验。

为了验证 INS 辅助 TDCP 粗差剔除的效果,选取一段武汉大学校园环境的车载数据(行驶距离约 507 m),采用 INS 辅助和不使用 INS 辅助两种方案进行 TDCP 粗差探测。不同方案粗差探测后可用卫星数量如图 1 所示。对不同方案的 TDCP 解算成功率和 RTK 解算失败而 TDCP 解算成功时历元间位置变化量的均方根(root mean square, RMS)误差进行统计,结果见表 1。

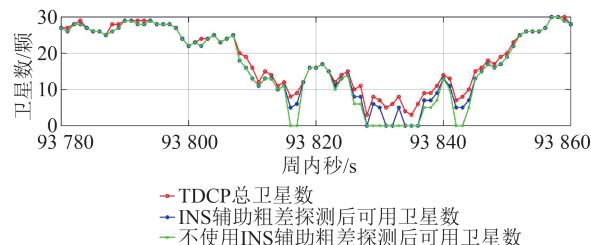


图 1 不同方案粗差探测后可用卫星数

Fig. 1 Number of Available GNSS Satellites After Different Outlier Detection Schemes

表 1 不同粗差探测方案 TDCP 解算成功率和精度统计

Tab. 1 TDCP Solution Success Rate and Accuracy

Statistics of Different Outlier Detection Schemes

粗差探测方案	TDCP 解算		历元间位置变化量 误差 RMS/cm
	成功率/%		
INS 辅助	92		3.2
不使用 INS 辅助	84		4.9

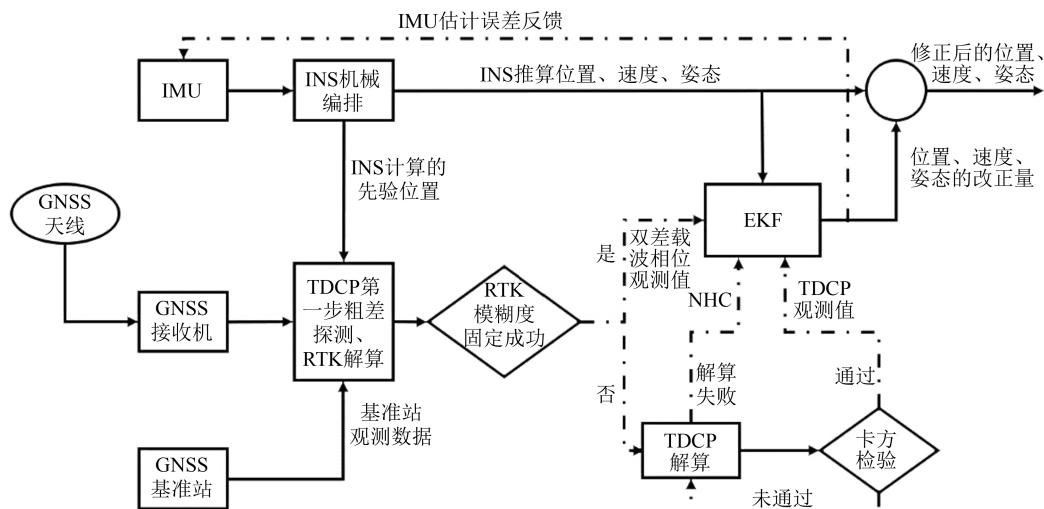


图 2 GNSS RTK+TDCP/INS 实时精密定位方法流程图

Fig. 2 Flowchart of GNSS RTK+TDCP/INS Real-Time Precise Positioning Method

2 定位性能实验分析

为了验证 RTK+TDCP/INS 方法的定位精度和性能,在中国湖北省武汉市开展 GNSS/MEMS IMU 车载实时精密定位实验。将 SBG 公

从图 1、表 1 中可以看出,因为 1 s 时间的 INS 机械编排的推算精度较高,INS 辅助粗差探测方案使用精确的先验位置来辅助 TDCP 粗差探测,大多数粗差都能够在步骤 1) 被识别并排除,可以实现单历元多个粗差的探测,步骤 2) 对验后残差进行统计检验,进一步提高解算结果的可靠性,TDCP 解算成功率和精度更高。而在遮挡较为严重的环境中,不使用 INS 辅助的粗差探测方案只有验后残差检验,并不能准确地识别粗差,且多个历元出现了将观测质量较好的数据误认为粗差并剔除的现象,导致可用卫星数不足,TDCP 解算成功率下降;同时由于粗差未能完全剔除和参与解算的观测值数量减少等原因,TDCP 解算精度降低。

1.4 算法框架

图 2 为本文提出的城市环境下 GNSS RTK+TDCP/INS 实时精密定位方法的流程图。首先,利用 INS 解算的先验位置辅助 TDCP 粗差探测,然后进行 RTK 解算。若 RTK 模糊度固定成功,则使用双差载波相位观测值进行扩展卡尔曼滤波(exended Kalman filter, EKF)的测量更新;否则进行 TDCP 解算和卡方检验,如果检验通过,使用 TDCP 观测值进行 EKF 测量更新,如果 TDCP 解算失败,使用 NHC 方法来辅助 INS,限制 INS 推算误差的快速累积。

司的 Ellipse E MEMS 外接 NovAtel 公司的多频多系统 OEM719 接收机,组成 GNSS/INS 组合导航系统。测试过程中,将基站的观测数据实时发送给 OEM719 接收机,组合导航系统可以输出实时精密定位结果。将一套战术级 GNSS/IMU(星

网宇达公司的XW-GI7660)安装在车载实验平台上,用于提供参考真值,XW-GI7660与OEM719通过信号功分器连接到同一个GNSS天线。不同设备的IMU参数见表2。由此可知,Ellipse E MEMS陀螺仪的性能指标远低于XW-GI7660,本文将重点讨论RTK+TDCP辅助MEMS IMU精密定位的精度和性能。

表2 Ellipse E和XW-GI7660 IMU参数

Tab. 2 IMU Parameters of Ellipse E and XW-GI7660

IMU传感器	零偏		随机游走	
	陀螺仪/(°·h ⁻¹)	加速度计/mGal	陀螺仪/(°·h ^{-1/2})	加速度计/(m·s ⁻¹ ·h ^{-1/2})
Ellipse E	8	40	0.18	0.12
XW-GI7660	<0.05	<30	0.01	

2.1 开阔环境

为了分析TDCP累积误差对组合导航的影响,在观测条件良好的武汉市郊区开展实时精密定位实验,实验过程中车辆在郊区道路限速条件下正常行驶,行驶速度曲线如图3所示。实验中,在RTK/INS滤波收敛后,仅使用TDCP观测值进行组合导航滤波的测量更新,统计TDCP/INS的定位精度及其与累积时长的关系。将一段15 min(行驶距离约为8 728 m)的TDCP/INS的定位结果与RTK/INS结果进行求差并统计分析,定位误差曲线如图4所示,不同时长的定位误差统计见表3。

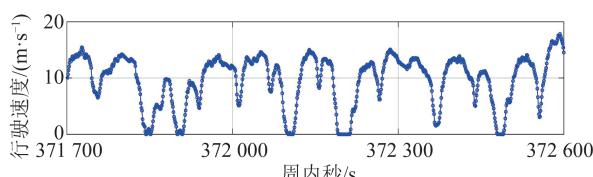


图3 开阔环境下车载实验行驶速度

Fig. 3 Velocity of Vehicle Experiment in Open Environment

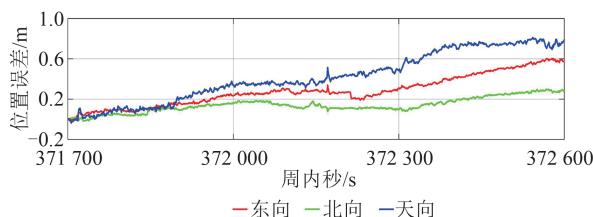


图4 开阔环境下TDCP/INS定位误差曲线图

Fig. 4 Positioning Error Curves of the TDCP/INS Solution in Open Environment

从图4、表3中可以看出,由于TDCP属于相对定位,只能提供历元间的位置变化量,TDCP

辅助INS的定位误差会随时间缓慢累积。5 min时平面位置误差达到0.30 m、高程0.37 m。随着误差的累积,在15 min时达到平面0.67 m、高程0.81 m。即使在开阔环境下,TDCP辅助INS也存在误差缓慢累积的问题,但是在较短的时间内,使用TDCP/INS定位的方法可以有效限制MEMS IMU推算误差的快速增长,维持分米级的定位精度。

表3 不同时长TDCP/INS定位误差统计

Tab. 3 Positioning Error Statistics of the TDCP/INS Solution for Different Data Durations

累积时长/min	最大定位误差/m			
	东向	北向	天向	平面
5	0.25	0.16	0.37	0.30
10	0.34	0.18	0.52	0.35
15	0.60	0.30	0.81	0.67

2.2 复杂环境

2.2.1 车载实验1

2021-11-08,利用相同的实验平台在武汉城区开展车载实时精密定位实验,截取观测环境较为复杂的武汉大学校园及周边的一段数据开展定位精度分析,行驶轨迹长度约为5 078 m,轨迹图如图5所示。图5中a、b、c区域代表不同程度的遮挡场景,部分实验场景见图6,不同颜色的点表示采用不同方式进行组合定位。实验过程中车辆行驶速度曲线如图7所示,其中,武汉大学校园内限速30 km/h,出校园后在城市道路上以正常速度行驶。

实验1中GNSS(本文使用GPS+北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)+伽利略卫星导航系统(Galileo satellite navigation system, Galileo))卫星的可用数量如图8所示,在部分遮挡场景,GNSS可用卫星数大部分在10~20颗之间,在严重遮挡场景,可用卫星数少于10颗。在城市环境下,GNSS信号中断频繁,载波相位观测值存在观测噪声变大和周跳增多等问题,尤其是半周跳问题,将导致RTK模糊度无法固定或固定错误。利用INS辅助TDCP解算,通过剔除载波相位观测值中的粗差数据,10颗卫星能够保证TDCP的成功解算。对实验1中RTK、TDCP成功解算的历元占比进行统计,结果见表4。在实验1中TDCP解算成功率高达96%。因此,在城市环境下,除了隧道等密闭场景外,利用多频多系统接收机,大多数场景均能实现RTK+TDCP/INS定位。合理利用RTK的绝对定位精度、短时间TDCP相对定位精度和

GNSS 观测中断下的 INS 推算, 实现城市复杂场

景下的连续实时精密定位。



图 5 车载实验 1 轨迹图

Fig. 5 Trajectory of Vehicle Experiment 1



图 6 车载实验 1 部分场景
Fig. 6 Several Scenes of Vehicle Experiment 1

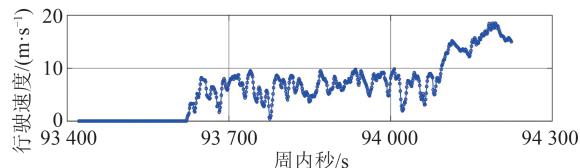


图 7 车载实验 1 行驶速度

Fig. 7 Velocity of Vehicle Experiment 1

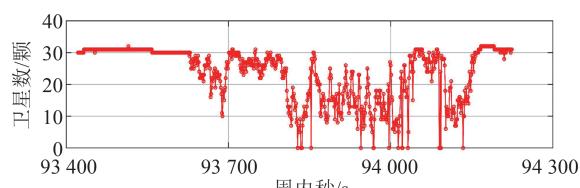


图 8 车载实验 1 可用卫星数

Fig. 8 Number of Available GNSS Satellites in Vehicle Experiment 1

表 4 车载实验 1 定位解算成功的比例统计

Tab. 4 Percentage of Epochs with Successful Positioning in Vehicle Experiment 1

定位解算方式	历元数/个	占比/%
RTK	570	71
TDCP	774	96
TDCP 解算失败	29	4

为了分析本文方法在复杂环境下的定位精度, 设计 3 种方案进行精度评估。

方案一: RTK+NHC/INS 方法, 在 RTK 模糊度固定失败时仅使用 NHC 进行 EKF 测量更新。

方案二: Ellipse E 内嵌算法, 直接输出 Ellipse E+OEM719 实时组合导航结果, 代表当前国外产品的定位精度。

方案三: RTK+TDCP/INS 方法, 采用本文的实时精密定位方法。

以 NovAtel 公司惯导解算软件 (inertial explorer, IE) 后处理解算的 XW-GI7660 数据结果为参考真值, 3 种方案的定位误差曲线如图 9 所示。对 RTK 解算失败的历元, 统计不同方案的定位误差 RMS 和最大误差, 结果见表 5。

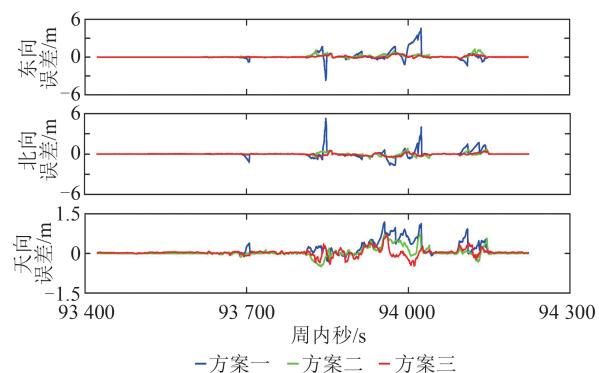


图 9 3 种方案定位误差曲线图

Fig. 9 Positioning Error Curves of Three Schemes

表 5 RTK 解算失败时 3 种方案定位误差统计/m
Tab. 5 Position Error Statistics of Three Schemes When RTK Failed/m

定位方案	平面误差		高程误差	
	RMS	最大值	RMS	最大值
方案一	1.45	6.43	0.47	1.18
方案二	0.48	1.26	0.28	0.71
方案三	0.30	0.69	0.21	0.72

从图 9、表 5 中可以看出:(1)3 种方案中,方案一的平面和高程精度都是最差的,由于 NHC/INS 缺少前向速度约束以及推算时间过长,其平面位置误差随时间快速发散。(2)方案三的平面和高程方向的误差 RMS 分别为 0.30、0.21 m,均优于方案二。相较于 Ellipse E 内部组合导航算法,本文方法利用 INS 预报的先验信息较好地剔除了 TDCP 中的粗差数据,提高了 TDCP 解算成功率与可靠性,通过 TDCP 辅助,有效抑制了 MEMS IMU 误差的快速累积,组合结果精度更高。实验 1 中,RTK 重新固定的时间间隔均小于 45 s,也就是说,在遮挡环境下小于 45 s 的 TDCP/INS 的平面和高程最大累积误差分别为 0.69、0.72 m,其中包含了 TDCP 解算失败时 NHC/INS 定位误差。在 RTK 重新获得固定解后,只需 2~3 个历元,组合结果精度即可达到厘米级,避免了 TDCP 的长时间误差累积。

2.2.2 车载实验 2

车载数据 2 于 2021-12-02 在武汉市东湖边及武汉大学校园内采集获得,行驶轨迹长度约为 3 791 m,轨迹图如图 10 所示。实验过程中车辆行驶速度曲线如图 11 所示,其中第 380 085—380 470 秒时间段受堵车影响,车辆行驶较为缓慢,其余时段在城市或武大校园限速条件下正常行驶。东湖沿路为双车道,道路狭窄且两边树荫茂密,遮挡条件比实验 1 更为严重。

实验 2 中 GNSS 可用卫星数如图 12 所示,其中蓝框区域对应的时间段卫星信号遮挡严重,多个历元 TDCP 解算失败。相较于实验 1,实验 2 在更长的时间内处于严重遮挡环境下,可用卫星不足 10 颗。对实验 2 中 RTK、TDCP 成功解算的历元占比进行统计,结果见表 6。因为观测条件更为恶劣,RTK 固定解比例仅为 32%,TDCP 无法成功解算的比例上升到 11%。由于 NHC/INS 结果误差较大,实验 2 仅对比方案二 Ellipse E+OEM719 实时组合导航结果和方案三 RTK+TDCP/INS 实时滤波结果,不同方案定位误差曲

线见图 13。对 RTK 解算失败的历元,统计不同方案的定位误差 RMS 和最大误差,结果见表 7。



图 10 车载实验 2 轨迹图

Fig. 10 Trajectory of Vehicle Experiment 2

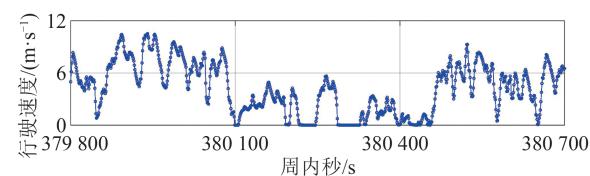


图 11 车载实验 2 行驶速度

Fig. 11 Velocity of Vehicle Experiment 2

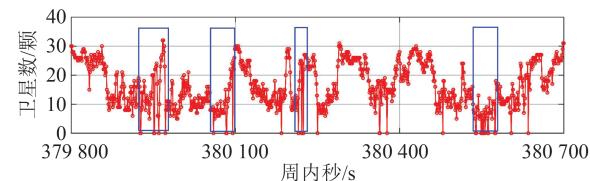


图 12 车载实验 2 可用卫星数

Fig. 12 Number of Available GNSS Satellites in Vehicle Experiment 2

表 6 车载实验 2 定位解算成功的比例统计

Tab. 6 Percentage of Epochs with Successful Positioning in Vehicle Experiment 2

定位解算方式	历元数	占比/%
RTK	286	32
TDCP	805	89
TDCP 解算失败	95	11

从图 13、表 7 中可以看出,方案三的平面和高程方向误差 RMS 分别为 0.74、0.27 m,优于方案二,且很少出现突变情况。由于树荫遮挡更加严重,多条路段 RTK 重新固定的时间间隔超过 70 s,最长达到 94 s,其中 TDCP 无法解算的比例从 4% 增加到 11%,相较于实验 1,实验 2 结果定位精度有所下降。尤其在图 12 蓝框区域对应的时间段,均出现多个历元 TDCP 解算失败,方案三的定位误差曲线呈现快速变大的现象。当

TDCP 解算失败时,组合系统只有 NHC 辅助, NHC/INS 定位只有侧向和高程两个方向有较好的约束,缺少前向速度约束,平面误差呈现快速上升趋势。因为 TDCP 属于相对定位, TDCP 辅助不能消除前期的累积误差,使得高程方向误差统计结果小于平面方向,同时随着推算时间变长,组合结果精度逐渐下降。因此,在 RTK 解算失败时, TDCP/INS 定位误差主要受推算时间过长和 TDCP 解算失败时 NHC 辅助定位误差较大等因素的影响。

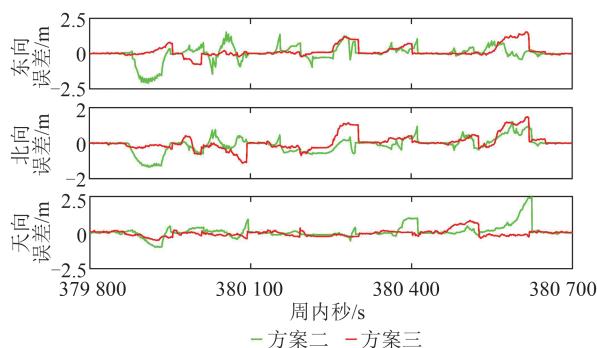


图 13 不同方案定位误差曲线图

Fig. 13 Positioning Error Curves of Different Schemes

表 7 RTK 解算失败时不同方案定位误差统计/m

Tab. 7 The Position Error Statistics of Different Schemes When RTK Failed/m

定位方案	平面误差		高程误差	
	RMS	最大值	RMS	最大值
方案二	0.82	2.45	0.50	2.48
方案三	0.74	2.12	0.27	0.85

3 结语

本文提出了一种 GNSS RTK+TDCP/INS 实时精密定位方法,即合理利用 RTK 的绝对定位精度、短时间 TDCP 相对定位精度和 GNSS 观测中断下的 INS 推算,来实现城市复杂环境下的实时精密定位。采用 Ellipse E MEMS 级 IMU 和 NovAtel OEM719 接收机进行开阔和复杂环境下车载实验,结果表明:

1) 在开阔环境下,TDCP/INS 定位误差随时间缓慢累积,但短时间内依然可以维持分米级的定位精度。

2) 在除隧道等密闭环境外的城市道路上,多系统 GNSS 的 TDCP 解算成功率接近 90%,将 RTK+TDCP 辅助 INS 方法应用到城市环境具有可行性。

3) 在 RTK 解算失败的连续时间小于 45 s 的

复杂环境下,TDCP/INS 结果平面和高程误差 RMS 分别为 0.30、0.21 m,最大误差为 0.69、0.72 m,可以维持分米级的定位精度。随着推算时间的增加,定位误差会逐渐累积增大。

参 考 文 献

- [1] Gu Shengfeng, Dai Chunqi, He Chengpeng, et al. Analysis of Semi-tightly Coupled Multi-GNSS PPP-RTK/VIO for Vehicle Navigation in Urban Areas [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1852-1861. (辜声峰, 戴春齐, 何成鹏, 等. 面向城市车载导航的多系统 PPP-RTK/VIO 半紧组合算法性能分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1852-1861.)
- [2] Li W, Li W Y, Cui X W, et al. A Tightly Coupled RTK/INS Algorithm with Ambiguity Resolution in the Position Domain for Ground Vehicles in Harsh Urban Environments [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(7): 2160.
- [3] Deng C L, Tang W M, Liu J N, et al. Reliable Single-Epoch Ambiguity Resolution for Short Baselines Using Combined GPS/BeiDou System [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 375-386.
- [4] Zhu Feng. Precise Positioning and Attitude Determination Method and Key Technologies Based on GNSS/SINS/Vision Multi-sensor Fusion [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (朱锋. GNSS/SINS/视觉多传感器融合的精密定位定姿方法与关键技术 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.)
- [5] Shin E H. Estimation Techniques for Low-Cost Inertial Navigation [D]. Calgary, Alberta, Canada: University of Calgary, 2005.
- [6] Wu H M. On-the-Fly GPS Ambiguity Resolution with Inertial Aiding [D]. Calgary, Alberta, Canada: University of Calgary, 2004.
- [7] Li T, Zhang H P, Gao Z Z, et al. High-Accuracy Positioning in Urban Environments Using Single-Frequency Multi-GNSS RTK/MEMS-IMU Integration [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 205.
- [8] Yu H, Han H Z, Wang J, et al. Single-Frequency GPS/BDS RTK and INS Ambiguity Resolution and Positioning Performance Enhanced with Positional Polynomial Fitting Constraint [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2374.
- [9] Li Zhaozhe, Dai Wujiao, Zheng Bin, et al. Performance Analysis of Multi-mode RTK/SINS Compact Combination Positioning in Complex Urban Environment [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2021, 9(5): 54-65. (李兆哲, 戴吾蛟, 郑彬, 等.)

- 复杂城市环境多模 RTK/SINS 紧组合定位性能分析[J]. 导航定位学报, 2021, 9(5): 54-65.)
- [10] Li X, Li X X, Huang J X, et al. Improving PPP-RTK in Urban Environment by Tightly Coupled Integration of GNSS and INS[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(12): 132.
- [11] Han Houzeng. Research on High Precision Dynamic Positioning Model of BDS/GPS Aided by Inertial Navigation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017. (韩厚增. 惯导辅助 BDS/GPS 高精度动态定位模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.)
- [12] Meng Fanxiao, Sun Hongxing, Ding Xuewen. BDS/GPS/INS Tight-Coupling System Using Differential Pseudo-Range and Pseudo-Range Rate Between Satellites[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2017, 5(2): 86-92. (孟凡效, 孙红星, 丁学文. 星间差伪距/伪距率 BDS/GPS/INS 紧组合系统[J]. 导航定位学报, 2017, 5(2): 86-92.)
- [13] Liu Wanke, Nong Qi, Tao Xianlu, et al. OD/SINS Adaptive Integrated Navigation Method with Non-holonomic Constraints[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(1): 9-17. (刘万科, 农旗, 陶贤露, 等. 非完整约束的 OD/SINS 自适应组合导航方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(1): 9-17.)
- [14] Zhang Q, Hu Y Q, Niu X J. Required Lever Arm Accuracy of Non-holonomic Constraint for Land Vehicle Navigation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(8): 8305-8316.
- [15] Wang Dingjie. Practical Approaches to Accuracy Enhancement for MEMS-Based Inertial Navigation Aided by GNSS[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (王鼎杰. 卫星辅助增强微惯性导航精度方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.)
- [16] Guo L, Wang F H, Sang J Z, et al. Characteristics Analysis of Raw Multi-GNSS Measurement from Xiaomi Mi8 and Positioning Performance Improvement with L5/E5 Frequency in an Urban Environment[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 744.
- [17] Chen C, Chang G B. Low-Cost GNSS/INS Integration for Enhanced Land Vehicle Performance[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(3): 035009.
- [18] Gan Yu, Sui Lifen, Zhang Qinghua, et al. GNSS/INS Integrated Navigation Using Time-Differenced Carrier Phase[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(6): 5-8. (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.)
- [19] Zhao Y W. Applying Time-Differenced Carrier Phase in Nondifferential GPS/IMU Tightly Coupled Navigation Systems to Improve the Positioning Performance[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(2): 992-1003.
- [20] Wang Fuhong, Liu Jiyu. A New Algorithm Detecting Cycle Slips in Satellite-Borne GPS Carrier Phase Measurements for Precise Orbit Determination[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(9): 772-774. (王甫红, 刘基余. 星载 GPS 载波相位测量的周跳探测方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(9): 772-774.)