



# 城市场景智能手机 GNSS/MEMS 融合车载 高精度定位

张小红<sup>1,2</sup> 陶贤露<sup>1</sup> 王颖喆<sup>1</sup> 刘万科<sup>1</sup> 朱 锋<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

<sup>2</sup> 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

**摘 要:**智能手机凭借其普遍性、便携性和低成本等优势,已成为大众用户导航与位置服务的主流终端载体,其多频多系统 GNSS(global navigation satellite system)观测值的开放进一步激发了手机高精度定位的研究。然而,受限于消费级 GNSS 器件性能,手机卫星观测值呈现出信号衰减严重、伪距噪声大、粗差周跳多等问题;并且受城市复杂环境影响,手机 GNSS 定位的连续性、可靠性也难以保证。提出一种城市场景手机 GNSS/MEMS(micro-electro mechanical system)融合的车载高精度定位方案。首先,构建了速度约束的 GNSS 差分定位模型;然后,通过手机内置 MEMS 与车辆运动约束,在挑战环境下进行 GNSS/MEMS 融合精密定位。实验结果表明,在开阔和树荫场景下,速度约束方法可达到分米至米级定位精度,相比于常规方法分别提升了 35.2% 和 78.9%;在高架场景下,GNSS/MEMS 融合定位的精度和连续性均提升显著;在隧道场景下,MEMS 推算位置累积误差约为 2.5%。实验结果初步表明,手机 GNSS 具备开阔环境下的车道级定位能力,手机 GNSS/MEMS 融合可提升城市复杂环境下车载定位的精度和连续可用性。

**关键词:**智能手机;组合导航;速度约束;实时动态差分;车辆导航

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

GNSS(global navigation satellite system)提供的精密导航与位置服务逐渐从专业领域的有限需求走向大众用户的广泛需求,以智能手机、无人机、自动驾驶汽车为代表的智能载体,构成了规模庞大的大众应用市场。根据欧洲全球导航卫星系统局在 2019 年的 GNSS 市场报告显示,全球有超过 90% 的低成本 GNSS 芯片被应用于智能手机和智能穿戴<sup>[1]</sup>。可见,内置 GNSS 模块、加速度计、陀螺仪、磁力计和气压计等 MEMS(micro-electro mechanical system)传感器的智能手机凭借其普遍性、便携性和低成本等优势,已成为导航与位置服务的主流载体。

谷歌公司于 2016 年开放了 Android 7.0 及以上版本的操作系统中原始 GNSS 观测值的获取接口,包括伪距、载波相位、多普勒和载噪比等,为基于手机原始观测值优化定位算法的学者和开发人员提供了机遇。国内外学者分析发现,手机 GNSS 信号的载噪比较于测量型设备低约 10 dB-Hz,即使在高度角大于 70°时仍波动明

显<sup>[2]</sup>;由于采用全方向辐射场型的线性极化天线,手机 GNSS 伪距噪声比测量型设备大一个数量级,且与载噪比呈现较强的相关性<sup>[3]</sup>;受到手机 duty cycle 低功耗机制以及 GNSS 芯片初始相位偏差(inertial phased biases, IPBs)的影响,载波相位观测值连续性差,且模糊度参数不具备整数特性<sup>[4]</sup>。不过,在 Android 9.0 及以下的操作系统中已经提供了关闭 duty cycle 的接口,大部分手机也都校正了 IPBs,这使得基于手机的高精度定位成为可能。在伪距定位方面,文献[5-6]基于相位历元差分测速约束伪距单点定位的滤波算法,文献[7]改进了传统的 Hatch 滤波算法,均实现了连续平滑的亚米级手机伪距定位;在相位定位方面,文献[8]基于单频观测值和实时精密产品实现了静态亚米级定位;文献[9]通过 GPS(global positioning system)/Galileo 双频无电离层组合精密单点定位模型实现了收敛后的静态亚米级定位;文献[10]基于双频观测值初步实现了复杂环境下的米级 RTK(real-time kinematic)定位;文献

收稿日期:2022-09-23

项目资助:武汉市科技计划(2020010601012185);国家自然科学基金(42274034);湖北省科技重大项目(2021AAA010)。

第一作者:张小红,博士,教授,主要从事 GNSS 高精度定位以及多源信息融合技术研究。xzhzhang@sgg.whu.edu.cn

[11]采用多系统双频 RTK 模型实现了模糊度固定。总体来说,现有研究主要集中于开阔环境下的静态或行人定位,但真实城市场景下应用于车辆导航的手机 GNSS 精密定位仍然存在较大挑战。

此外,智能手机作为天然的多传感器集成系统,其内置的自主无源 MEMS 传感器能够提供相对的位姿信息,可用于增强 GNSS 定位性能。在行人导航方面,文献[12]基于小米 8 手机双频 GNSS 原始观测和内置传感器数据,以足绑式设备安装实现了足部 PDR (pedestrian dead-reckoning) 辅助 RTK 定位的行人无缝导航;文献[13]基于类似的传感器配置,实现了多模态自适应的手机 GNSS 与 PDR 融合定位。在车载导航方面,文献[14]对比了小米 8、荣耀 play 内置的 IMU (inertial measurement unit) 与两款商用 IMU 的性能差异,发现其与车载测量型 GNSS 接收机组合后的位姿精度相当,但手机 IMU 的航向角精度稍差;文献[15]设计了一种手机内置 GNSS、IMU、磁力计等多传感器组合滤波定位算法,基于 IPIN2020 国际比赛数据集实现了精度优于 7 m (75% 概率) 的车辆定位效果。总体来说,针对手机 GNSS/MEMS 融合定位的研究主要集中在行人导航方面,围绕城市环境车载导航的研究相对较少。因此,本文提出了适用于城市场景的手机 GNSS/MEMS 融合车载高精度定位方案。首先构建速度约束的 GNSS 差分定位模型,以在真实城市场景下实现手机精密定位;然后借助手机内置的 MEMS 观测与车辆运动的虚拟约束信息,在林荫、高架、隧道等挑战环境下进行融合定位;最后通过车载实测数据进行了测试验证。

## 1 手机 GNSS/MEMS 观测数据质量分析

### 1.1 GNSS 观测数据质量分析

动态观测数据采集实验在武汉城市道路开展,华为 Mate 40 智能手机被安置在车辆前挡风玻璃下,实验设备安装如图 1 所示。该手机内置的海思 GNSS 芯片支持多频多系统原始观测值输出,包括 GPS L1/L5、Galileo E1/E5a、BDS (BeiDou navigation satellite system) B1I/B1C/B2a、GLONASS (global orbiting navigation satellite system) R1、QZSS (quasi-zenith satellite system) L1/L5。此外,星网宇达 XW-GI7660 组合导航系统也被安置在车内,并通过 IE (inertial

explorer) 软件后处理其观测数据,以提供高精度参考轨迹。本文主要围绕 Mate 40 手机 GPS、Galileo 和 BDS 三个系统的观测值进行分析。

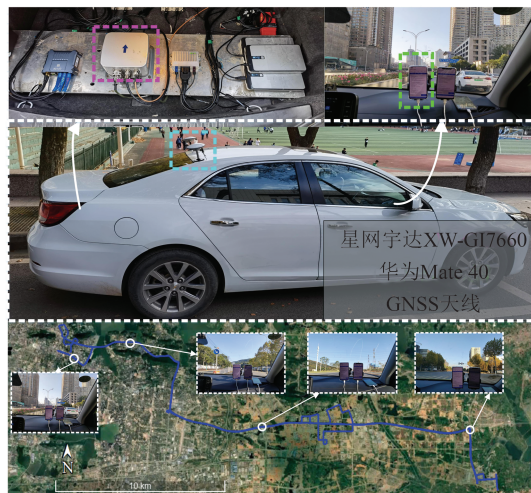


图 1 Mate 40 手机 GNSS 动态数据采集实验设备安装  
Fig. 1 Equipment Setup in the GNSS Kinematic Data Collection Experiment with Mate 40 Smartphone

动态实验中 Mate 40 手机的可见卫星数如图 2 所示。从图 2 可以看出,在车载动态实验中,GPS L1 和 L5 卫星数分别约为 7~9 颗和 4~5 颗;Galileo E1 和 E5a 卫星数相当,均约为 4~5 颗;BDS B1I 卫星包括 BDS-2 和 BDS-3 两个星座,共约 15 颗;BDS-3 B1C 和 B2a 卫星数分别约为 7~9 颗和 4~6 颗。由此可知,多频多系统 GNSS 芯片为手机高精度定位解算提供了更为冗余的观测数据。

动态实验中 Mate 40 手机的 GNSS 数据的载噪比分布如图 3 所示。从图 3 可以看出,各星座、各频点载噪比整体上集中在 30~40 dB-Hz, L5/E5a/B2a 频点的载噪比要比 L1/E1/B1I/B1C 频点低约 5 dB-Hz,且各星座低于 20 dB-Hz 的卫星占比约为 10%~20%。考虑到低载噪比时观测粗差和周跳比例将会明显增多,在可见卫星数充足时,应当尽可能剔除以保证定位结果的稳定性。

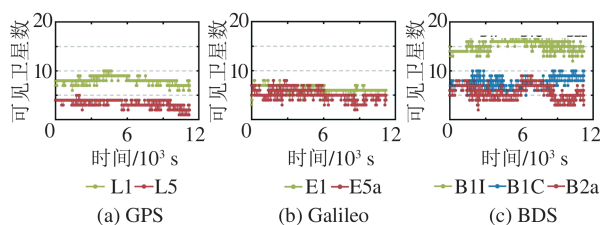


图 2 动态实验中 Mate 40 手机的可见卫星数

Fig. 2 Number of Visible Satellites of Mate 40 Smartphone in the Kinematic Experiment



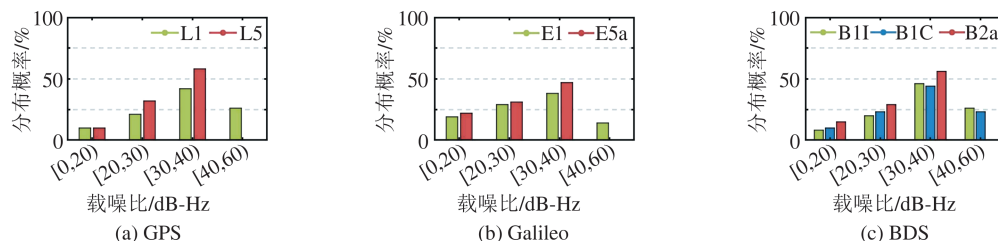


图3 动态实验中Mate 40手机GNSS数据的载噪比分布

Fig. 3 C/N0 Distribution of Mate 40 Smartphone in the Kinematic Experiment

动态实验中Mate 40手机的GNSS数据的伪距和载波相位观测值的噪声情况分别见图4、表1。站间-星间双差组合被用于提取伪距观测残差,在短基线双差组合中,卫星相关和接收机相关的误差被分别消除,大气误差也基本完全被削弱,考虑到基准站的测量型设备观测噪声很小,伪距双差残差可以代表智能手机的伪距噪声。类似地,当相位观测值连续且没有周跳发生时,模糊度不随时间变化,可以通过历元间差分进行消除,因此站间-星间-历元间三差组合被用于提取相位残差。

从图4可以看出,在实际动态导航场景中,L1/E1/B1I/B1C频点的伪距噪声RMS(root mean square)均超过了5.0 m,而L5/E5a/B2a频点的伪距噪声仅为前者的1/4。从表1可以看出,L1/E1/B1I/B1C频点的载波相位噪声有60%~70%超过了2周,而L5/E5a/B2a频点中超过2周的占比仅为20%。结果表明,相比于L1波段,在城市动态场景中L5波段的伪距噪声更小,相位观测值连续性更好,这也为智能手机GNSS精密定位的实现提供了可能。

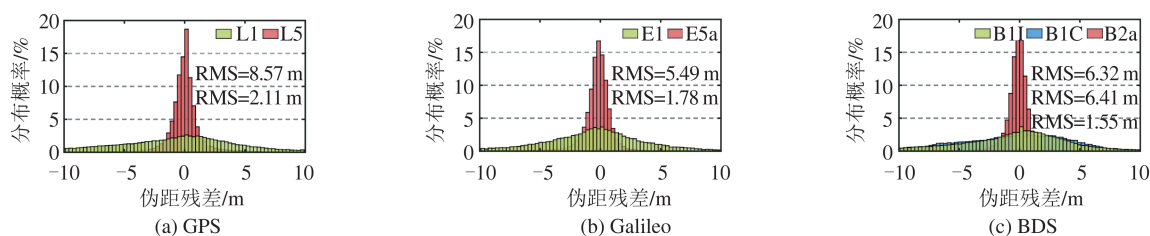


图4 动态实验中Mate 40手机GNSS数据的伪距残差

Fig. 4 Pseudorange Residuals of Mate 40 Smartphone in the Kinematic Experiment

表1 动态实验中Mate 40手机载波相位残差统计/%

Tab. 1 Statistics of Carrier Phase Residuals of Mate 40 Smartphone in the Kinematic Experiment/%

系统	频率	> 2周	> 5周	> 10周
GPS	L1	70.20	40.83	17.66
	L5	10.85	2.60	0.96
Galileo	E1	70.61	45.61	27.28
	E5a	19.00	6.83	3.49
BDS	B1I	65.84	34.98	15.01
	B1C	71.39	37.96	14.76
	B2a	14.56	5.82	3.25

## 1.2 MEMS观测数据质量分析

智能手机的载体坐标系( $b$ 系)定义为右、前、上,其内置的MEMS三轴加速度计和陀螺仪支持输出100 Hz采样率的观测值,将时长约为10 h的Mate 40手机水平静置观测数据用于MEMS噪声分析。图5给出了其中1 h的观测值序列。从图5可以看出,加速度计三轴噪声水平相似,平

均标准差(standard deviation,STD)约为0.83 mg;陀螺仪的Y轴噪声比X轴和Z轴稍大,平均STD约为157°/h。

Allan方差作为一种频率稳定度的时域表征,反映了相邻采样间隔内的平均频率波动的方差,它对各类噪声的幂律谱项都是收敛的,能够准确识别噪声类型并精确提取噪声的特征参数,被广泛应用于惯性仪器的噪声特性研究。基于上述10 h的静态观测数据,计算加速度计和陀螺仪的Allan方差如图6所示,斜率为 $-1/2$ 、0和 $+1/2$ 的曲线分别代表了角度随机游走、零偏不稳定性以及速度随机游走。加速度计的三轴零偏不稳定性分别为1.8 mGal、4.5 mGal和33.5 mGal,陀螺仪的三轴零偏不稳定性分别为0.23°/h、0.10°/h和6.39°/h。由此可知,相比于高精度的战术级惯导设备,手机内置的MEMS传感器具有更大的初始零偏,需要进行误差标定后才能进行惯性解算。此外,得益于手机陀螺仪的零偏不稳定性较好,在GNSS短时失锁时有望保持航向角推算精度。

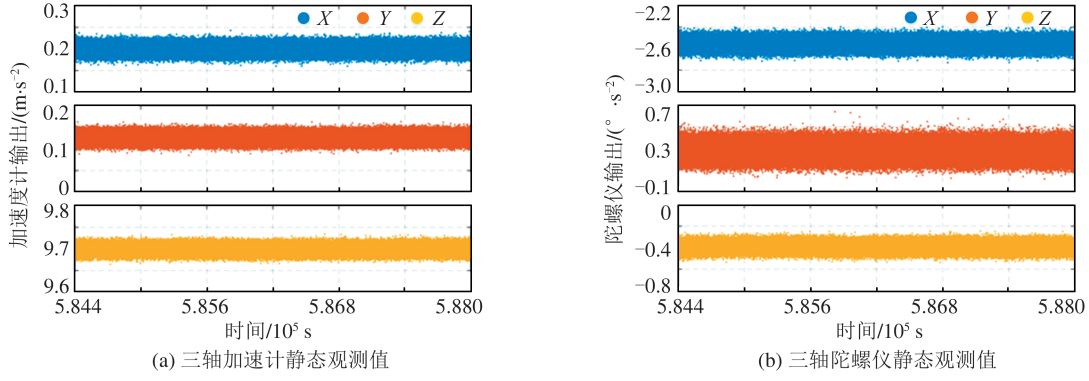


图 5 Mate 40 手机三轴加速计静态观测值和三轴陀螺仪静态观测值

Fig. 5 Static Observations of Three-Axis Accelerometers and Gyroscopes of Mate 40 Smartphone

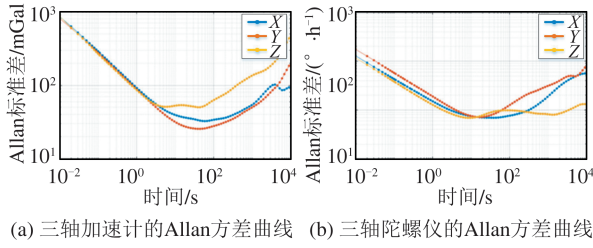


图 6 Mate 40 手机三轴加速计和三轴陀螺仪的 Allan 方差曲线

Fig. 6 Allan Variance Curves of Three-Axis Accelerometers and Gyroscopes of Mate 40 Smartphone

## 2 手机 GNSS/MEMS 融合高精度定位方法

### 2.1 速度约束的 GNSS 差分定位模型

在短基线 RTK 定位中,双频非组合的伪距和载波相位双差观测方程如下:

$$\begin{cases} \nabla\Delta P_{r,b,f}^{ij} = \nabla\Delta\rho_{r,b,f}^{ij} + \epsilon_{\nabla\Delta P} \\ \lambda_f \cdot \nabla\Delta\phi_{r,b,f}^{ij} = \nabla\Delta\rho_{r,b,f}^{ij} + \lambda \cdot \nabla\Delta N_{r,b,f}^{ij} + \epsilon_{\nabla\Delta\phi} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\nabla\Delta$ 为双差算子;上标*i*和*j*表示卫星编号;下标*r*、*b*和*f*分别表示流动站、基准站和频率; $\nabla\Delta P_{r,b,f}^{ij}$ 和 $\nabla\Delta\phi_{r,b,f}^{ij}$ 分别为双差伪距和相位; $\nabla\Delta\rho_{r,b,f}^{ij}$ 为双差卫地距; $\lambda_f$ 为载波相位波长; $\nabla\Delta N_{r,b,f}^{ij}$ 为双差模糊度; $\epsilon_{\nabla\Delta P}$ 和 $\epsilon_{\nabla\Delta\phi}$ 分别为双差观测值的噪声。考虑到手机 GNSS 观测噪声与载噪比的相关性更强<sup>[5-6]</sup>,构建伪距观测值定权模型如下:

$$\sigma_i = \sqrt{a + b \times 10^{-\text{CNR}_i/10}} \quad (2)$$

式中, $\sigma_i$ 代表第*i*个观测值的非差观测噪声;CNR(carrier to noise ratio)代表载噪比;*a*和*b*为经验参数,与各卫星系统及频点有关,可通过事先的噪声提取与建模获得,伪距和相位的噪声标准差权比设置为 100:1。

RTK 定位中获得高精度位置的关键在于准确估计浮点模糊度,进而通过载波相位计算更为

精确的卫地距,降低 GNSS 后方交会定位的误差。然而,受限于低成本 GNSS 器件和复杂多变的观测环境,手机的伪距误差达到数米甚至几十米,相位观测值的连续性也较差,这导致动态场景下手机 RTK 定位的浮点模糊度初始化频繁且收敛较慢,无法获得连续精确的定位结果。为此,引入 GNSS 测速的结果对 RTK 浮点解施加约束,状态向量 *X* 和状态模型如下:

$$X = [x \ y \ z \ \nabla\Delta N]^T \quad (3)$$

$$X_k = \Phi_{k,k-1} \cdot X_{k-1} + B_{k-1} \cdot u_{k-1} + Q_{k-1} \quad (4)$$

式中, $(x, y, z)$ 和 $\nabla\Delta N$ 分别表示三维坐标和双差模糊度; $\Phi_{k,k-1}$ 表示相邻历元的状态转移矩阵,这里设置为单位阵; $u_{k-1}$ 为状态模型的控制输入项,来自于手机 GNSS 测速结果,且测速方差和模糊度的过程噪声共同构成了状态噪声向量 $Q_{k-1}$ ;控制输入的系数矩阵 $B_{k-1}$ ,将速度转换为位移,即 $B_{k-1} = I \cdot \Delta t$ 。相较于传统 RTK 模型,上述状态模型减小了采用 SPP(single point positioning)结果初始化带来的位置误差,削弱了手机伪距噪声和粗差的影响,在位置域提升了浮点解滤波初值的精度。

值得注意的是,上述模型依赖于手机 GNSS 测速的性能,本文为此综合考虑了多普勒测速(single point velocity, SPV)和载波相位历元差分测速(time difference carrier phase, TDCP)。当前后历元连续观测的相位数超过 4 个且卫星几何构型较好时,TDCP 能够实现厘米级测速;当连续相位数不足或周跳探测不完全时,SPV 能够提供分米级的测速结果作为补充。测速方程分别为:

$$\begin{aligned} -\lambda \cdot D &= \frac{(r_R - r^S) \cdot (\dot{r}_R - \dot{r}^S)}{\rho} + c \cdot \Delta t_R - \\ &c \cdot \Delta t^S + \Delta T + \Delta I + \epsilon_D \end{aligned} \quad (5)$$

$$\lambda \cdot \Delta \phi = \Delta \rho + c \cdot \Delta t_R - c \cdot \Delta t^S + \Delta T - \Delta I + \varepsilon_{\Delta \phi} \quad (6)$$

式中,  $D$  为多普勒观测值;  $r_R$  和  $r^S$  分别为接收机和卫星的位置向量;  $\dot{r}_R$  和  $\dot{r}^S$  分别为接收机和卫星的速度向量;  $\Delta t_R$  和  $\Delta t^S$  分别为接收机和卫星的钟速;  $\Delta T$  和  $\Delta I$  为对流层和电离层延迟的变化率, 由于大气随时间变化一般较为缓慢, 通常可以忽略不计;  $\Delta \rho$  为历元间的卫地距变化;  $\varepsilon_D$  和  $\varepsilon_{\Delta \phi}$  分别为多普勒和相位历元差观测值的噪声。

## 2.2 GNSS/MEMS 松组合定位模型

智能手机内置的 MEMS 传感器可提供三轴比力  $f^b$  和角速度  $\omega_{ib}^b$  观测值, 经过惯性导航算法处理, 能够获得载体的位置  $r$ 、速度  $v$  和姿态  $R$  等状态。选取地心地固系 ( $e$  系) 为导航坐标系, 惯性导航的微分方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{r}^e \\ \dot{v}^e \\ \dot{R}_b^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v^e \\ R_b^e \cdot f^b - 2 \cdot \Omega_{ie}^e \cdot v^e + g^e \\ R_b^e \cdot (\Omega_{ib}^b - \Omega_{ie}^e) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $b$  表示载体坐标系;  $\Omega$  为  $\omega$  的反对称阵;  $g^e$  为当地重力加速度。将式 (7) 离散化并递推求解导航状态参数的过程, 即为惯性机械编排。由于初始状态误差与器件测量误差的存在, 机械编排作为惯导系统的响应函数, 会将这些误差传递到导航解上, 并随着递推时间的增加而发散。其误差微分方程为:

$$\begin{cases} \delta \dot{r}^e = \delta v^e \\ \delta \dot{v}^e = f^e \times \phi + R_b^e \cdot \delta f^b - 2 \cdot \omega_{ie}^e \times \delta v^e + \delta g^e \\ \delta \dot{\phi} = -\omega_{ie}^e \times \phi - R_b^e \cdot \delta \omega_{ib}^b + \delta \omega_{ie}^e \\ \delta \dot{f}^b = (1/\tau_f) \cdot \delta f^b \\ \delta \dot{\omega}_{ib}^b = (1/\tau_\omega) \cdot \delta \omega_{ib}^b \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\delta r^e$ 、 $\delta v^e$  和  $\phi$  分别表示位置、速度和姿态误差;  $\delta f^b$  和  $\delta \omega_{ib}^b$  分别表示加速度计和陀螺仪的仪器误差;  $\tau$  为相关时间系数。本文主要考虑零偏误差, 并建模为一阶高斯马尔科夫模型。

在松组合模型中, GNSS 的位置  $r_{\text{GNSS}}^e$  和速度  $v_{\text{GNSS}}^e$  被用于校正 MEMS 的推算误差和仪器误差, 其状态方程和观测方程构建如下:

$$\begin{cases} X_k = [\delta r^e \quad \delta v^e \quad \phi \quad \delta f^b \quad \delta \omega_{ib}^b] \\ X_k = \Phi_{k, k-1} \cdot X_{k-1} + Q_{k-1} \\ (r_{\text{MEMS}}^e + l^e) - r_{\text{GNSS}}^e = \delta r^e + l^e \times \phi + W_{r_{\text{GNSS}}} \\ (v_{\text{MEMS}}^e - \vartheta) - v_{\text{GNSS}}^e = \delta v^e - \vartheta \times \phi - (R_b^e \cdot l^b \times) \cdot \delta \omega_{ib}^b + W_{v_{\text{GNSS}}} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\vartheta = R_b^e \cdot (l^b \times) \cdot \omega_{ib}^b + (\omega_{ie}^e \times) \cdot R_b^e \cdot (l^b \times)$ ; 状态向量  $X_k$  由机械编排的位置、速度和姿态误差

以及 IMU 的零偏误差共同构成; 状态转移矩阵  $\Phi_{k, k-1}$  可由式 (8) 离散化得到;  $l^b$  和  $l^e$  分别为 GNSS 相对于 IMU 的杆臂误差在  $b$  系和  $e$  系的投影;  $Q$  和  $W$  分别为状态噪声向量和观测噪声向量。

式 (7)~式 (9) 的详细推导可参考文献 [16]。此外, 地面载体运动学约束也可转换为虚拟观测信息, 如侧向和高程速度约束 (non-holonomic constraint, NHC)、零速更新 (zero velocity update, ZUPT)、零角速更新 (zero angular rate update, ZARU) 等, 能够在 GNSS 失锁时削弱机械编排的误差累积。

## 2.3 城市场景 GNSS/MEMS 融合定位方案

本文设计的手机 GNSS/MEMS 融合高精度定位方案流程如图 7 所示, 主要由 3 个模块构成。(1) 在 GNSS 数据质量控制部分, 剔除高度角低于  $10^\circ$ 、信噪比低于 20 dB 的卫星, 减少使用受非直射信号和多路径信号干扰的观测值; 比较伪距变化率、相位变化率和多普勒观测值之间的差值, 通过一致性检验分别拒绝较大粗差和周跳的伪距与相位观测值; 通过预报位置和速度计算伪距和多普勒的验前残差, 并采用 Grubbs 准则剔除离群值。(2) 在 GNSS 差分定位部分, 先估计载体前后历元的位移, 然后依据 §2.1 中速度约束的滤波模型进行浮点解估计, 再进行部分法模糊度解算, 若成功, 则输出固定解; 否则输出浮点解; 若相位完全丢失, 则输出伪距差分解。(3) 在 GNSS/MEMS 松组合模块, 通过 §2.2 中组合模型估计惯性器件误差, 并采用惯性机械编排为当前历元提供较为可靠的预报位置与预报速度, 在 GNSS 完全失效时实现短时递推导航。

该方案中, MEMS 的辅助作用体现在 3 个方面: (1) 在数据预处理中, 预报位置和速度可提升验前残差计算精度; (2) 在滤波定位模型中, 当 SPV 或 TDCP 测速失败时, 预报速度可以保证式 (4) 的正常推算, 提升 GNSS 滤波解的精度; (3) 在 GNSS 完全失效时, 则采用预报导航解保持手机定位的连续性。这是一种介于松组合和紧组合之间的半紧组合方案<sup>[17]</sup>, 它以 MEMS 的预报位置信息为纽带带来增强手机 GNSS 的定位性能。相比于常规的松组合方案, 它能够提升 GNSS 数据的利用率; 相比于常规的紧组合方案, 它避免了 GNSS 观测粗差污染整个组合滤波器。但是, 该方案需要两个独立的滤波器分别完成 GNSS 定位和 MEMS 误差校正的任务, 会增加一定的计算量。



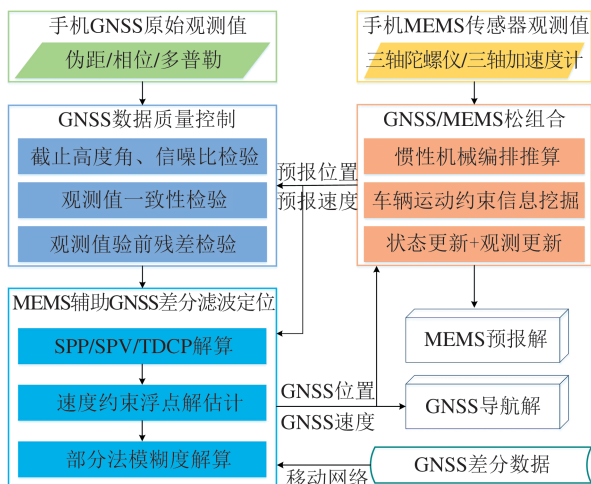


图 7 手机 GNSS/MEMS 融合高精度定位流程图

Fig. 7 Flowchart of Smartphone GNSS/MEMS Integrated High-Precision Positioning

### 3 车载实测分析与验证

#### 3.1 定位实验说明

本文通过一组车载实测数据进行验证与分析,测试设备为华为 Mate 40 智能手机,参考系统为星网宇达 XW-GI7660 组合导航系统,实验设备安装方式已在图 1 给出,并通过 IE 软件后处理得到参考轨迹。2021-11-14,车载实验在武汉大学周边开展,测试轨迹如图 8 所示,沿途依次经过了开阔天空(A)、树荫遮挡(B)、地下隧道(C)、高架遮挡(D)等典型城市导航场景。测试沿途的可见卫星数和连续相位数如图 9 所示,除隧道场景外,整体可见卫星数均接近 40 颗;但是连续相位数仅在开阔场景超过 15,其余场景均不足 10,这给手机连续高精度定位带来了较大的挑战。



图 8 车载测试轨迹及沿途观测环境

Fig. 8 VehicleTest Track and Observation Conditions Along the Track

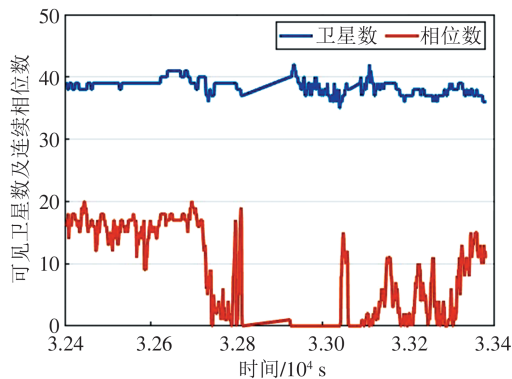


图 9 测试沿途的可见卫星数和连续相位数

Fig. 9 Number of Visible Satellites and Consecutive Carrier Phases Along the Track

为了验证本文方案的定位性能,采用了 3 种处理策略进行对比,配置信息见表 2。由表 2 可以看出,在常规差分定位中,每个历元仅采用 SPP 得到初始位置;在本文改进的差分定位中,依据 §2.2 所述的速度约束状态模型得到位置预报值;在 GNSS/MEMS 融合处理中,采用 §2.3 所提的 MEMS 辅助 GNSS 高精度定位方案。

表 2 3 种解算策略的配置信息

Tab. 2 Configuration Information of Three Positioning Strategies

处理策略	定位信息	说明
常规差分	GNSS	SPP 提供初始位置
改进差分	GNSS	速度约束状态模型
GNSS/MEMS 融合	GNSS+MEMS+ 运动约束	MEMS 辅助 GNSS

#### 3.2 定位性能分析

开阔天空场景包括 32 401.0~32 725.0 s 和 33 336.0~33 380.0 s(GPS 第 2 184 周)两个时段。图 10 给出了 3 种处理策略的轨迹对比,可以发现,3 种方法均能实现连续、平滑定位,且与参考轨迹均符合较好。统计结果表明,整体上来说,三者的水平位置误差均在亚米至分米级,这表明在开阔天空场景下,仅采用手机原始观测值能够实现车道级导航。此外,图 11 给出了松组合模块的零偏估计结果,可以发现,三轴加速度计和三轴陀螺仪的零偏经过约 100 s 后均稳定收敛。这表明开阔天空下连续可靠的 GNSS 导航解可用于校正 MEMS 机械编排的累积误差,并估计出惯导的器件误差,以提升其航位推算能力,也验证了本文松组合模型的有效性。

树荫遮挡场景包括 32 726.0~32 807.0 s 和 33 176.0~33 335.0 s(GPS 第 2 184 周)两个时段。



图10 开阔天空场景下3种处理策略的轨迹对比  
Fig. 10 Track Comparison of Three Different Positioning Strategies Under Open Sky Conditions

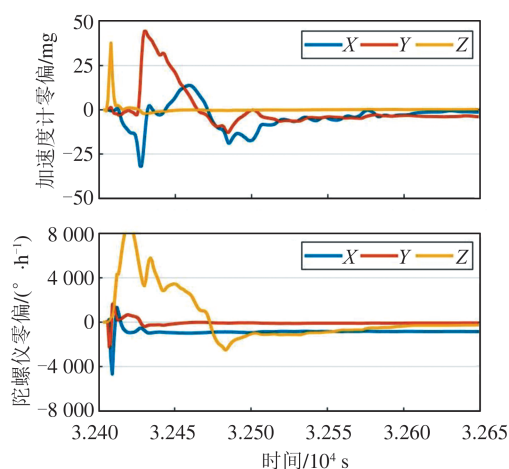


图11 三轴加速度计和三轴陀螺仪的零偏估计结果  
Fig. 11 Zero Bias Estimation Results of Three-Axis Accelerometer and Three-Axis Gyroscope

从图12的轨迹对比可以发现,由于可见卫星数的下降和观测粗差的增加,常规差分定位轨迹频繁出现数米级的跳变,在树荫严重遮挡时位置误差最大超过50 m,定位结果几乎不可用;而改进方法得益于速度约束的状态模型,通过历元间位置预报的方式提升了差分定位初始坐标的精度,削弱了观测粗差对定位结果的影响,使得手机仍能实现米级精度的导航定位。图13的测速结果进一步验证了本文中速度约束模型的有效性,通过精确的速度估计,在位置域平滑了伪距噪声,从而提升了树荫遮挡场景下手机GNSS定位的精度与连续性。

高架遮挡场景处于33 051.0~33 175.0 s (GPS第2 184周)时段。从图14的轨迹对比可知,常规差分定位几乎完全失效,最大位置误差超过100 m;改进方法的定位误差最大也超过了

20 m,整体定位精度仅为15 m左右;而GNSS/MEMS融合定位结果更加接近参考轨迹,整体定位精度约为10 m。从图8的实景环境可知,该路段为头顶高架遮挡,卫星观测受非视距误差和多路径影响严重,且载波相位连续跟踪数量也下降明显。此时,MEMS辅助GNSS定位的优势得以体现,一方面通过MEMS预报位置与速度算得观测值验前残差,大量的观测粗差可以被识别;另一方面,当GNSS测速失败时,MEMS预报速度可以保证式(4)的正常推算,维持GNSS滤波解的精度。

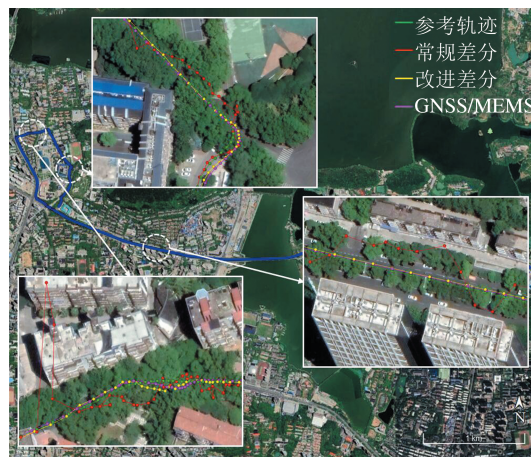


图12 树荫遮挡场景下3种处理策略的轨迹对比  
Fig. 12 Track Comparison of Three Different Positioning Strategies Under Tree Occlusion Conditions

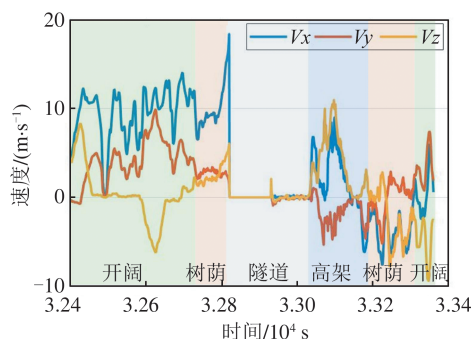


图13 车载实验的全程测速结果  
Fig. 13 Velocity Estimation Results of Vehicle Test

地下隧道场景处于32 808.0~33 050.0 s (GPS第2 184周)时段,即武昌区八一路地下通道,全程约为827 m。从图15可以发现,由于GNSS信号完全丢失,仅GNSS/MEMS融合方案在隧道内有定位结果,其最大位置误差达到21.2 m,累积定位误差约为2.5%。值得注意的是,在MEMS推算时车辆运动学约束信息(NHC、ZUPT和ZARU)也被用于松组合模型,以抑制机械编排误差的快速累积。从图15的隧



道出口处轨迹放大对比可知,在红绿灯等待时为静止状态,常规 RTK 定位结果未能成功收敛,而改进 RTK 方法中的速度约束模型使得其结果逐渐收敛,且 GNSS/MEMS 融合结果也因运动学约束信息的引入而未发生漂移。



图 14 高架遮挡场景下 3 种处理策略的轨迹对比  
Fig. 14 Track Comparison of Three Different Positioning Strategies Under Viaduct Occlusion Conditions

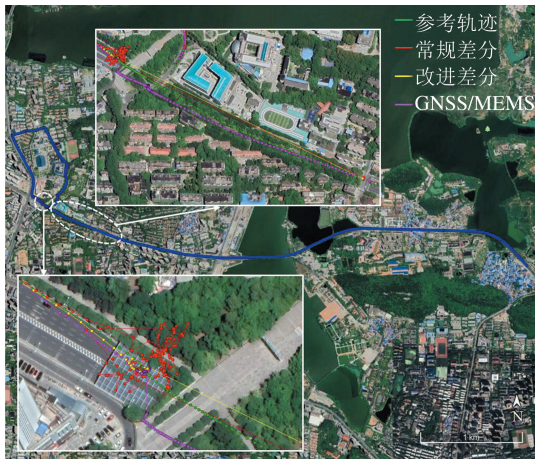


图 15 地下隧道场景下 3 种处理策略的轨迹对比  
Fig. 15 Track Comparison of Three Different Positioning Strategies Under Underground Tunnel Conditions

本文分别统计了 4 类典型场景下 3 种处理策略的定位误差 RMS,见表 3。由表 3 可以看出,在开阔天空场景下,改进方法的水平和高程位置精度分别优于 0.5 m 和 0.3 m;在树荫遮挡场景下,常规方法的水平位置误差增大至 8.27 m,改进方法仍优于 2 m;在高架严重遮挡场景下,常规方法的水平位置精度不足 40 m,改进方法也仅约为 17.69 m,而 GNSS/MEMS 融合结果则改善至 12.57 m 左右;在地下隧道 GNSS 完全失锁场景,MEMS 航位推算误差约为 18 m。

表 3 不同场景下 3 种处理策略的定位误差 RMS 统计/m  
Tab. 3 Position Errors Statistics of Three Different Positioning Strategies Under Different Conditions/m

场景	方向	常规差分	改进差分	GNSS/ MEMS 融合
开阔天空	水平	0.71	0.46	0.49
	高程	1.32	0.24	0.26
树荫遮挡	水平	8.27	1.74	1.55
	高程	15.54	3.70	3.69
高架遮挡	水平	41.66	17.69	12.57
	高程	25.90	10.23	9.10
地下隧道	水平	—	—	17.05
	高程	—	—	6.25

4 结 语

本文提出了城市场景 MEMS 辅助智能手机 GNSS 车载高精度定位方案。通过构建速度约束的 GNSS 差分定位模型,约束载体历元间位置变化,改善了树荫遮挡场景下手机定位精度低、连续性差的问题;通过引入 MEMS 观测与车辆运动的虚拟约束信息,辅助手机 GNSS 数据质量控制与滤波定位,改善了高架遮挡场景和隧道场景下手机定位可用性差的问题。

车载实测结果表明,在开阔和树荫场景下,改进的差分定位方法可达到分米至米级定位精度,相比于常规方法分别提升了 35.2% 和 78.9%;在高架严重遮挡时,GNSS/MEMS 融合定位的精度和连续性均最优,相比于常规方法和改进方法分别提升了 69.8% 和 28.9%;在隧道场景下,MEMS 推算的位置累积误差约为 2.5%。

本文的研究结果初步表明,智能手机 GNSS 在开阔观测环境下具备优于 0.5 m 的车道级定位能力,但在林荫、高架、隧道等环境下定位性能下降明显,通过 GNSS/MEMS 融合可进一步提升上述挑战环境下手机定位的精度、连续性和可用性。

参 考 文 献

[1] European GNSS Agency (GSA). GNSS Market Report[EB/OL]. [2022-04-22] [https://www.europa.eu/system/files/reports/market\\_report\\_issue\\_6\\_v2.pdf](https://www.europa.eu/system/files/reports/market_report_issue_6_v2.pdf)

[2] Paziewski J, Fortunato M, Mazzoni A, et al. An Analysis of Multi-GNSS Observations Tracked by Recent Android Smartphones and Smartphone-only Relative Positioning Results [J]. *Measurement*,



- 2021, 175: 109162
- [3] Liu Wanke, Shi Xiang, Zhu Feng, et al. Quality Analysis of Raw GNSS Observation of Google Nexus 9 Smart Tablet Terminal[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1749-1756 (刘万科, 史翔, 朱锋, 等. 谷歌 Nexus 9 智能终端原始 GNSS 观测值的质量分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(12): 1749-1756)
- [4] Li G C, Geng J H. Characteristics of Raw Multi-GNSS Measurement Error from Google Android Smart Devices [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 90
- [5] Zhang X H, Tao X L, Zhu F, et al. Quality Assessment of GNSS Observations from an Android N Smartphone and Positioning Performance Analysis Using Time-Differenced Filtering Approach [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 70
- [6] Liu W K, Shi X, Zhu F, et al. Quality Analysis of Multi-GNSS Raw Observations and a Velocity-Aided Positioning Approach Based on Smartphones [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(8): 2358-2377
- [7] Wen Q, Geng J H, Li G C, et al. Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Using an External Survey-Grade Antenna Enhanced Dual-Frequency Android GNSS Data [J]. *Measurement*, 2020, 157: 107634
- [8] Laurichesse D, Cedric R, Francois-Xavier M, et al. Smartphone Applications for Precise Point Positioning [C]//Proceedings of the ION GNSS 2017, Portland, Oregon, USA, 2017
- [9] Guo Fei, Wu Weiwang, Zhang Xiaohong, et al. Realization and Precision Analysis of Real-Time Precise Point Positioning with Android Smartphones [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 1053-1062 (郭斐, 吴维旺, 张小红, 等. Android 智能手机实时精密单点定位软件实现及精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(7): 1053-1062)
- [10] Fortunato M, Critchley-Marrows J, Siutkowska M, et al. Enabling High Accuracy Dynamic Applications in Urban Environments Using PPP and RTK on Android Multi-Frequency and Multi-GNSS Smartphones [C]//2019 European Navigation Conference (ENC), Warsaw, Poland, 2019
- [11] Wang Yingzhe, Tao Xianlu, Zhu Feng, et al. High Accuracy Differential Positioning with Smartphone GNSS Raw Measurements [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1941-1950 (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): 1941-1950)
- [12] Niu Z, Nie P, Tao L, et al. RTK with the Assistance of an IMU-Based Pedestrian Navigation Algorithm for Smartphones [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(14): 3228
- [13] Guo Lei. GNSS/MEMS PDR Integration for Outdoor Pedestrian Precise Seamless Navigation Based on Smart Terminals [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021 (郭磊. 智能终端 GNSS/MEMS PDR 融合行人室外高精度无缝导航关键技术 [D]. 武汉: 武汉大学, 2021)
- [14] Yan W L, Bastos L, Magalhães A. Performance Assessment of the Android Smartphone's IMU in a GNSS/INS Coupled Navigation Model [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 171073-171083
- [15] Kuang Jian, Ge Wenfei, Zhang Quan, et al. Smartphone Built-in Sensors Based Vehicle Integrated Positioning Method [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, 28(6): 701-708 (旷俭, 葛雯斐, 张全, 等. 基于手机内置传感器的车辆组合定位方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(6): 701-708)
- [16] Zhu Feng. The Key Technology and Algorithm of PPP/SINS Integration [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015 (朱锋. PPP/SINS 组合导航关键技术与算法实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2015)
- [17] Zhu Feng. GNSS/SINS/Vision Multi-Sensors Integration for Precise Positioning and Orientation Determination [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)

## MEMS-Enhanced Smartphone GNSS High-Precision Positioning for Vehicular Navigation in Urban Conditions

ZHANG Xiaohong<sup>1,2</sup> TAO Xianlu<sup>1</sup> WANG Yingzhe<sup>1</sup> LIU Wanke<sup>1</sup> ZHU Feng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>2</sup> Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** **Objectives:** Smartphones have become the mainstream terminal carrier of navigation and location services for mass users by virtue of their ubiquity, portability, and low cost. With the opening of their multi-frequency and multi-constellation global navigation satellite system (GNSS) observations, the research on high-precision positioning of smartphones has been further stimulated. However, limited by the performance of consumer-grade GNSS devices, the satellite observations of smartphones present problems such as serious signal attenuation, large pseudorange noise, and many cycle slips; and also affected by the complex urban environment, the continuity and reliability of smartphone GNSS positioning is also difficult to guarantee. **Methods:** A smartphone GNSS/MEMS (micro-electro mechanical system) integrated high-precision positioning scheme for vehicular navigation in urban conditions is proposed. Firstly, a velocity-constrained GNSS differential filtering positioning model is constructed to realize precise positioning in a general observation environment; then, through the built-in MEMS of smartphone and virtual constraints of vehicle motion, GNSS precise positioning is enhanced in challenging environments. **Results:** The experiment results show that, in open sky and tree occlusion conditions, the improved method can achieve decimeter-to-meter positioning accuracy, which is 35.2% and 78.9% higher than conventional method, respectively; in viaduct occlusion conditions, the accuracy and continuity of GNSS/MEMS fusion positioning are the best; in tunnel conditions, the cumulative position error of the MEMS mechanization is about 2.5%. **Conclusions:** The results preliminarily show that smartphone GNSS has lane-level positioning capabilities in open-sky environments, and GNSS/MEMS fusion can improve the accuracy and continuity of smartphone positioning in urban challenging environments.

**Key words:** smartphone; integrated navigation; velocity constraint; real-time kinematic; vehicular navigation

**First author:** ZHANG Xiaohong, PhD, professor, majors in precise positioning technology of GNSS and multi-source information fusion technology. E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

**Foundation support:** The Science and Technology Project of Wuhan(2020010601012185); the National Natural Science Foundation of China (42274034); the Science and Technology Major Project of Hubei Province (2021AAA010).

**引文格式:** ZHANG Xiaohong, TAO Xianlu, WANG Yingzhe, et al. MEMS-Enhanced Smartphone GNSS High-Precision Positioning for Vehicular Navigation in Urban Conditions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1740-1749. DOI: 10.13203/j.whugis20220611(张小红, 陶贤露, 王颖喆, 等. 城市场景智能手机 GNSS/MEMS 融合车载高精度定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(10): 1740-1749. DOI: 10.13203/j.whugis20220611)