



利用智能手机实现GNSS原始观测值的高精度差分定位

王颖喆¹ 陶贤露¹ 朱 锋¹ 刘万科^{1,2} 张小红^{1,2} 吴明魁³

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

摘 要:受限于低成本、低功耗的全向线性极化天线和导航芯片,手机原始的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测数据存在伪距噪声大、多路径效应严重以及载波相位观测值周跳频繁等特点,从而造成定位不准、轨迹不平滑等问题。基于此,提出了一种速度约束的双频实时伪距差分(real time differential, RTD)/实时动态差分(real time kinematic, RTK)自适应切换滤波定位算法,充分发挥L5/E5a/B2a信号抗多径能力强的优势,提升定位精度和模糊度固定率;使用速度约束载体历元间位置变化的方法,有效平滑了伪距噪声;通过RTD/RTK自适应切换的方式,保证了不同观测条件下获得稳定的高精度位置信息。基于Huawei Mate40智能手机的实测定位结果表明,静态定位和行人动态定位的模糊度固定率分别为99.67%和57.99%;行人在半遮挡环境的动态定位平面精度约为0.5 m,城市典型环境下车载动态定位中超过70%历元的平面误差在1.5 m以内,实现了手机用户在城市环境下的高精度导航定位。

关键词:智能手机;GNSS观测值;差分定位;模糊度固定;城市复杂环境

中图分类号:P228

文献标志码:A

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)提供的精密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。欧洲全球导航卫星系统局(European Global Navigation Satellite Systems Agency, GSA)在2019年10月发布的第六版GNSS市场报告中指出,目前在售的位置服务设备中,智能手机和穿戴式产品占据了90%以上^[1]。可见,智能手机凭借其普遍性、易携带性和成本低等优良特性,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、多普勒和信噪比等。此前Android手机中的GNSS模块仅输出位置、

速度、方向等导航信息。现有研究多基于已有的导航信息进行优化,如文献[2]使用DGNSS-CP(differential GNSS-correction projection)算法改正手机定位坐标,可实现1 m的定位精度。手机GNSS原始观测值开放以后,学术界和产业界在评估观测值质量和优化导航定位算法方面开展了大量研究。小米公司于2018年发布了全球首款双频GPS定位手机Mi 8,内置BCM47755芯片,支持L1/L5双频卫星信号。L5信号强度衰减小、抗多径能力更强,能极大提高手机定位精度。此后,多频多模成为手机GNSS硬件的发展趋势。硬件性能的提升极大地促进了低成本终端与高精度定位算法的有机结合,促进了基于手机等大众智能终端的GNSS精密导航定位研究。

由于普遍采用体积小、全向线性极化天线和低成本、低功耗的GNSS芯片,手机GNSS信

收稿日期:2021-06-01

项目资助:国家重点研发计划(2016YFB0501803);湖北省技术创新专项(重大项目)(2019AAA043);中国第二代卫星导航系统重大专项(GFZX030302030202);武汉市科技计划项目(2020010601012185);武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金资助(19-01-06)。

第一作者:王颖喆,硕士生,主要从事低成本GNSS精密差分定位算法方面的研究。yzwang2019@whu.edu.cn

通讯作者:朱锋,博士,特聘副研究员。fzhu@whu.edu.cn

号的质量和特征受到显著影响,具体表现为信号强度低,伪距多路径误差大,载波相位观测值连续性差,半周及整周周跳频繁,模糊度不具有整数特性等^[3-6]。模糊度固定是实现厘米级定位的关键,而手机中存在的 duty cycle 机制导致相位观测值不连续,GNSS 芯片未标定初始相位偏差(initial phase biases, IPBs),使得模糊度不具有整数特性,这些因素严重制约了手机模糊度固定。

为了满足用户对高精度、平滑、连续的导航定位服务的需求,国内外学者基于智能手机 GNSS 伪距和载波相位观测值的质量和特征,对适用于手机的高精度导航定位算法进行了研究。基于伪距定位时,由于伪距观测值受多路径效应影响严重,通常需要引入平滑噪声方法,如文献[7]提出一种改进的 Hatch 滤波方法,自适应地调整相位平滑伪距的窗口大小;文献[8-10]提出了相位平滑位置的方法,通过相位测速以约束载体历元间的位置变化,达到平滑位置噪声的目的。使用单站定位时,大气残余误差和星历误差等会导致定位结果出现系统偏差,文献[11]加入了伪距差分改正数,位置精度提升了 50% 左右。基于载波相位定位时,文献[12]基于 Android 平台开发了 PPP Wizlite 软件,实现了 L1 单频精密单点定位米级精度。L5 频点信号的引入有利于构建无电离层组合观测值以消除电离层延迟误差,可实现亚米级甚至分米级静态定位和米级动态定位^[13-15],但 L5 卫星数较少,因此组合模型只适用于较理想环境。引入差分信息后,常规实时动态差分(real time kinematic, RTK)算法在开阔环境下的静态浮点解精度步入分米级^[16]。文献[17]使用多普勒平滑伪距噪声,并建立常加速度模型,解算结果相比常规 RTK 有一定提升。谷歌公司在 Android 9.0 及以上系统中提供了关闭 duty cycle 的功能模块,部分手机 GNSS 芯片校正了 IPBs,从而恢复出模糊度的整数特性。此后,在开阔场景下,相关研究能够实现手机模糊度固定,获得厘米级的静态定位结果^[18-19]。

在城市峡谷、林荫道、高架桥下、路口等复杂环境下,利用手机获取稳定的米级甚至亚米级高精度位置信息仍是目前亟需解决的问题。基于以上研究现状,本文以华为公司 2020 年 10 月发布的 Huawei Mate40 手机为研究对象,在 GNSS 原始观测值质量分析的基础上,提出一种速度约束的双频实时差分(real time differential, RTD)/RTK 自适应切换滤波定位算法,充分发挥了 L5/

E5a/B2a 信号衰减减小、抗多径能力更强的优势,使用速度约束方法,利用多普勒测速(standard point velocity, SPV)和相位历元差分测速(time-differenced carrier phase, TDCP)来约束载体历元间的位置变化,有效平滑了伪距噪声;通过 RTD/RTK 自动切换,在观测环境良好时发挥了载波相位的高精度特性。

1 GNSS 观测噪声分析

Huawei Mate40 手机支持 GPS L1+L5、GLONASS R1、Galileo E1+E5a、BDS-2 B1I、BDS-3 B1I+B1C+B2a、QZSS L1+L5 五系统多频的 GNSS 原始观测值输出。为针对 Huawei Mate40 手机 GNSS 原始观测值制定有效的数据处理策略和适用的导航定位算法,本文选取一组半开阔环境下的短基线行人动态数据(数据详细说明见§3.1),从卫星数和观测值残差两个方面对其观测值特性进行分析。观测值残差包含观测噪声和多路径误差等综合误差项,提取方式见表 1,其中,伪距多路径误差计算公式如下:

$$MP_i = P_i - \frac{a+1}{a-1} \cdot \lambda_i \cdot \varphi_i + \frac{2}{a-1} \cdot \lambda_j \cdot \varphi_j \quad (1)$$

$$a = \left(\frac{f_i}{f_j} \right)^2 \quad (2)$$

式中, MP_i 表示频点 i 的伪距多路径; P_i 为频点 i 的伪距观测值; λ_i 和 λ_j 分别为频点 i 和频点 j 的波长; φ_i 和 φ_j 分别为频点 i 和频点 j 的相位观测值; f_i 和 f_j 分别为频点 i 和频点 j 的频率。计算得到的 MP_i 包含频点 i 和频点 j 的相位模糊度线性组合,在无周跳的情况下为常数,通过对连续观测时段求多历元平均的方式得到 MP_i 序列均值,并将其扣除,即可得到每个频率上的伪距多路径误差。统计观测值残差均方根值(root mean square, RMS)时,剔除了高度角小于 15° 和载噪比低于 25 dB/Hz 的卫星。Huawei Mate40 无法解码 GLONASS 的载波相位观测值,因此不统计。

表 1 观测值残差提取方式

Tab.1 Extracting Method of GNSS Measurements Errors

| 观测值残差 | 提取方式 |
|-------|-----------------|
| 伪距残差 | 双频伪距多路径公式计算 |
| 多普勒残差 | 站间单差+星间单差 |
| 相位残差 | 站间单差+星间单差+历元间单差 |

图 1 给出了单频和双频的可视卫星数序列,其中,单频为 L1/E1/B1I/B1C/R1,双频为 L5/

E5a/B2a。单频卫星总数在 45~50 颗,双频卫星总数在 15 颗左右。多频多模解算有助于增加估计器的冗余度,从而提高解算精度和稳定性。

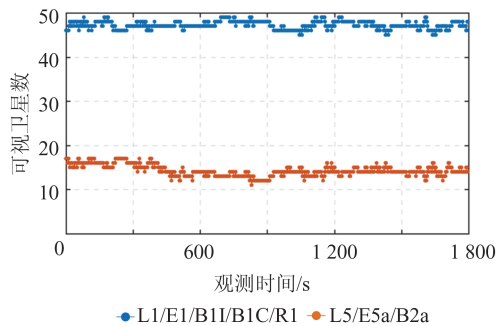


图 1 可视卫星数时间序列

Fig. 1 Time Series of Number of Satellites

图 2 和图 3 分别给出了 L1/E1/B1I/B1C 和 L5/E5a/B2a 频点的伪距多路径误差序列,可见, L5 频点的伪距残差明显小于 L1 频点,验证了 L5 信号抗多径能力更强的特点。

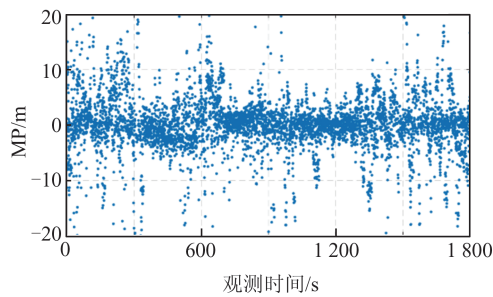


图 2 L1/E1/B1I/B1C 频点的 MP 序列

Fig.2 MP Time Series on L1/E1/B1I/B1C

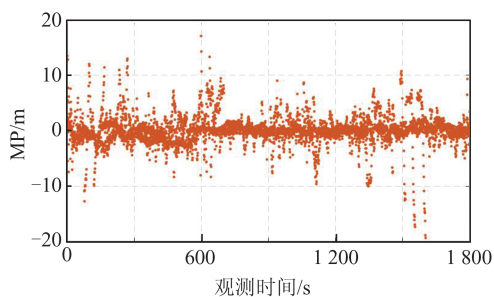


图 3 L5/E5a/B2a 频点的 MP 序列

Fig.3 MP Time Series on L5/E5a/B2a

表 2 给出了各系统各频点的观测值残差 RMS。表 2 中 G 代表全球导航系统(global positioning system, GPS), J 代表准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS), E 代表伽利略(Galileo), C 代表北斗导航卫星系统(BeiDou satellite navigation system, BDS), R 代表 GLONASS。可知, L1 和 L5 频点的伪距多路径误差之比约为 3:1。各系统和各频点的相位残差

约 0.05~0.10 m,多普勒残差约 0.2~0.3 m/s,残差量级均明显小于伪距,因此可以采用相位或多普勒平滑伪距的方法,以削弱多路径等误差对定位结果的影响。

表 2 观测值残差 RMS 统计表

Tab.2 RMS Statistics of GNSS Measurements Errors

| 系统 | 频点 | MP/m | 相位三差 残差/m | 多普勒双差 残差/m·s ⁻¹ |
|----|-----|------|--------------|-------------------------------|
| G | L1 | 4.89 | 0.051 | 0.24 |
| | L5 | 1.90 | 0.089 | 0.37 |
| R | R1 | — | — | 0.23 |
| E | E1 | 6.22 | 0.057 | 0.25 |
| | E5a | 2.41 | 0.092 | 0.38 |
| | B1I | 5.78 | 0.065 | 0.27 |
| C | B1C | 4.61 | 0.044 | 0.20 |
| | B2a | 2.30 | 0.097 | 0.37 |
| | L1 | 4.11 | 0.034 | 0.23 |
| J | L5 | 1.66 | 0.043 | 0.36 |

2 高精度差分定位方法

基于以上 GNSS 原始观测值特性分析,本文提出一种速度约束的双频 RTD/RTK 自适应切换滤波定位算法,算法总流程如图 4 所示。首先,对手机 GNSS 原始观测值进行粗差剔除和周跳探测等验前质量控制;其次,进行伪距单点定位(standard point positioning, SPP)、SPV 测速和 TDCP 测速,根据解算卫星数、验后残差等指标选择最优速度;将最优速度代入 Kalman 滤波器中完成时间更新,分别纳入手机和基站组成的伪距差分观测方程和相位差分观测方程进行量测更新,得到 RTD 解和 RTK 浮点解;滤波结束后,根据有效相位数大于 5,且位置精度因子(position dilution of precision, PDOP)小于 5,从而判断 RTK 解的可靠性,若不可靠,则输出 RTD 解;否则进入模糊度固定流程:使用最小二乘模糊度降相关平差法(least squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)固定模糊度,并进行 LAMBDA 检验,以判断固定解是否可靠。检验指标为:①ratio 值大于 2.5;②模糊度精度因子小于 0.1;③模糊度固定为整数的卫星数大于 8 颗。通过以上检验,输出 RTK 固定解,否则输出 RTK 浮点解。

2.1 观测模型

2.1.1 伪距差分定位模型

本文使用短基线双频非组合伪距差分定位模型,观测方程如下:

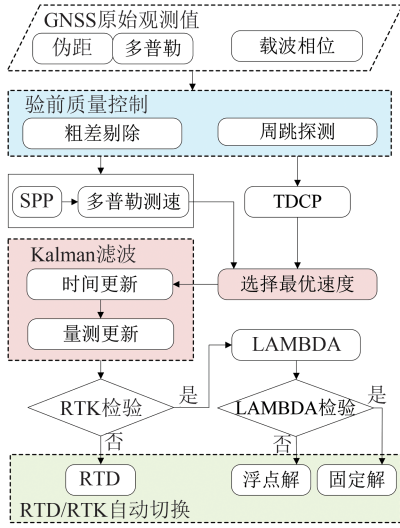


图4 本文算法流程

Fig.4 Architecture of the Proposed Algorithm

$$\bar{\rho} = \rho + c \cdot (\delta t_R - d_R) + \delta_{mul} + \delta_{RTD} + \epsilon_\rho \quad (3)$$

$$\delta_{RTD} = \delta_{trop} + \delta_{ion} + \delta_{eph} + \delta_{isc} \quad (4)$$

式中, $\bar{\rho}$ 代表经卫星钟差和大气误差模型改正后的伪距观测值; ρ 代表卫星到测站的几何距离; δt_R 代表接收机钟差; 本文对不同系统和不同频点的接收机钟差分别进行估计; d_R 为接收机端的伪距硬件延迟, 可以吸收到接收机钟差中; δ_{mul} 和 ϵ_ρ 分别为多路径误差和伪距观测噪声; δ_{RTD} 为伪距差分改正数, 即参考站通过伪距单点定位估计出接收机钟差, 并将其与其他已知量扣除从而得到的残余量, 包含参考站的对流层延迟残余误差 δ_{trop} 、电离层延迟残余误差 δ_{ion} 、卫星星历误差 δ_{eph} 和卫星端的伪距硬件延迟 δ_{isc} 等。

2.1.2 载波相位差分定位模型

本文使用短基线双频非组合相位差分定位模型, 将伪距和载波相位观测值在流动站 A 和参考站 B 之间作一次差, 并在卫星 i 和参考星 j 之间作一次差, 即可得到双差观测方程:

$$\nabla \Delta P_{AB}^j = \nabla \Delta \rho_{AB}^j + \epsilon_{\nabla \Delta \rho} \quad (5)$$

$$\lambda \cdot \nabla \Delta \varphi_{AB}^j = \nabla \Delta \rho_{AB}^j + \lambda \cdot \nabla \Delta N_{AB}^j + \epsilon_{\nabla \Delta \varphi} \quad (6)$$

式中, $\nabla \Delta$ 为双差算子; $\nabla \Delta P_{AB}^j$ 、 $\nabla \Delta \varphi_{AB}^j$ 分别为双差伪距观测值和双差相位观测值; $\nabla \Delta \rho_{AB}^j$ 为双差卫地距; λ 为波长; $\nabla \Delta N_{AB}^j$ 为双差模糊度; $\epsilon_{\nabla \Delta \rho}$ 、 $\epsilon_{\nabla \Delta \varphi}$ 为双差观测噪声。

2.1.3 随机模型

基于已有的研究发现, 手机 GNSS 观测噪声与载噪比的相关性更强^[20], 因此构建如下适用于手机的信噪比加权模型:

$$\sigma_i = \sqrt{a + b \times 10^{-\frac{CNR_i}{10}}} \quad (7)$$

式中, σ_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, 与卫星系统及频点有关。本文事先提取并分析了手机的伪距噪声, 确定了各系统和各频点的 a 和 b , 伪距和载波相位的噪声标准差之比设为 100:1。

2.2 测速模型

手机伪距观测值受多路径效应影响严重, 导致定位结果变差, 轨迹不连续, 本文使用单站非组合 SPV 和 TDCP 测速以约束载体前后历元的位置变化。当前后历元连续观测的载波相位数超过 4 个时, 测速精度可达厘米级; 当连续相位数不足 4 个或周跳未探测完全时, 测速结果会出现较大跳变。SPV 精度差于 TDCP, 但在遮挡环境下结果更稳定, 因此本文联合 SPV 和 TDCP 测速, 从中选择较优的速度结果, 从而保证速度信息的高精度和稳定性。

1) 多普勒测速

多普勒单站测速方程如下:

$$-\lambda \cdot D = \frac{(\mathbf{r}_R - \mathbf{r}^S)(\dot{\mathbf{r}}_R - \dot{\mathbf{r}}^S)}{\rho} - c \cdot \Delta t^S + c \cdot \Delta d t_R + \Delta T - \Delta I + \epsilon_D \quad (8)$$

式中, D 为多普勒观测值; \mathbf{r}_R 、 \mathbf{r}^S 分别为接收机和卫星的位置向量; $\dot{\mathbf{r}}_R$ 、 $\dot{\mathbf{r}}^S$ 分别为接收机和卫星的速度向量; Δt^S 、 $\Delta d t_R$ 分别为卫星钟速和接收机钟速, 各系统和各频点仅估计一个接收机钟速; ΔT 、 ΔI 分别为对流层延迟变化率和电离层延迟变化率, 由于大气随时间变化缓慢, 其误差变化率可以忽略不计; ϵ_D 为多普勒观测噪声。

2) 相位历元差分测速

载波相位历元差分单站测速方程如下:

$$\lambda \cdot \Delta \varphi = \Delta \rho - c \cdot \Delta t^S + c \cdot \Delta d t_R + \Delta T - \Delta I + \epsilon_{\Delta \varphi} \quad (9)$$

式中, $\Delta \rho$ 为历元间的卫地距变化; $\Delta d t_R$ 含义同前, 各系统和各频点仅估计一个 $\Delta d t_R$; T 为对流层误差; I 为电离层误差; T 和 I 在历元间求差后, 其残余误差可以忽略不计; $\epsilon_{\Delta \varphi}$ 为载波相位历元差分观测噪声。

2.3 滤波模型

RTD 模式下, Kalman 滤波导航模型的待估状态包含载体三维坐标 (x y z) 以及接收机钟差 δt_R ; RTK 模式下, 待估状态包含载体三维坐标以及双差模糊度 $\nabla \Delta N$ 。状态向量表示如下:

$$\mathbf{X}_{RTD} = [x \ y \ z \ \delta t_R]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_{RTK} = [x \ y \ z \ \nabla \Delta N]^T \quad (11)$$

状态更新方程为:

$$X_k = \Phi_{k,k-1} \cdot X_{k-1} + B_{k-1} \cdot u_{k-1} + W_{k-1} \quad (12)$$

式中, $\Phi_{k,k-1}$ 为第 $k-1$ 历元到第 k 历元的状态转移矩阵, 本模型中为单位阵; u_{k-1} 为系统方程的控制输入; W_{k-1} 为系统噪声向量, 其协方差的设置取决于历元间状态变化量的计算精度和给定的接收机钟、模糊度的过程噪声, 本算法中为 TD-CP 或 SPV 计算出的历元间位置变化量 ($dx \ dy \ dz$); B_{k-1} 为输入系数矩阵。 $\Phi_{k,k-1}$ 、 B_{k-1} 的计算式分别为:

$$\Phi_{k,k-1} = I \quad (13)$$

$$B_{k-1} = I \cdot \Delta t \quad (14)$$

RTD 模式下, 通过当前历元的接收机钟速 Δdt_R 将上一历元的钟差估计值传递下来作为先验状态, 使用随机游走的方式估计接收机钟差。RTK 模式下, 双差模糊度采用上一历元的估计值作为先验状态, 使用随机游走的方式估计。计算公式如下:

$$u_{k-1,RTD} = [dx \ dy \ dz \ \Delta dt_R]^T \quad (15)$$

$$u_{k-1,RTK} = [dx \ dy \ dz \ 0]^T \quad (16)$$

3 定位性能分析

3.1 实验数据

实验设备为 Huawei Mate40, 分别进行静态实验、行人动态实验和车载动态实验, 并采用武汉大学测绘学院研制的低成本 GNSS 精密导航定位软件按照事后仿真实时处理模式进行处理, 以对比分析单频和双频的定位性能。静态实验在开阔环境下进行, 如图 5 所示, 由于未标定手机 GNSS 天线相位中心的位置, 故采用后处理 RTK 固定解的历元平均值作为手机的参考真值。



图 5 静态实验图

Fig.5 Environment of the Static Test

行人动态实验在半开阔环境下进行, 操场外有树荫遮挡。由于手持模式下难以获得手机

的参考轨迹, 因此将其与 NovAtel 组合导航定位系统 SPAN 一同放置在小推车上, 量取惯性测量单元中心到手机顶部的杆臂, 通过事后 RTK/惯性导航系统紧组合双向平滑解算得到手机的参考轨迹, 实验设备和路线分别如图 6、图 7 所示。

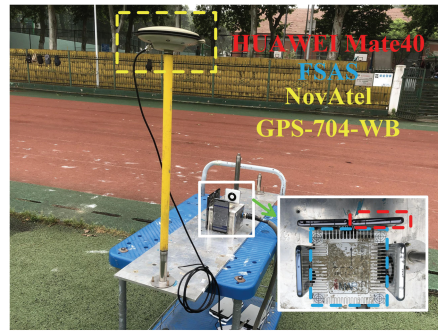


图 6 行人动态实验设备

Fig.6 Installation of the Pedestrian Dynamic Test



图 7 行人动态实验路线

Fig.7 Reference Trajectory of the Pedestrian Dynamic Test

车载动态实验在城市复杂环境下进行。为模拟大众用户使用手机进行车载导航的实际应用场景, 实验设备和路线分别如图 8、图 9 所示, 实验环境包含高楼遮挡、树荫遮挡、立交、城市公路等典型场景, 手机的参考轨迹由 NovAtel 组合导航定位系统 SPAN-FSAS 提供。具体数据信息见表 3, 解算策略见表 4。表 4 中 C-2 代表 BDS-2, C-3 代表 BDS-3。



图 8 车载动态实验设备

Fig.8 Installation of the Vehicle Dynamic Test



图9 车载动态实验路线和环境
Fig.9 Navigation Route and Environment of the Vehicle Dynamic Test

表3 实验数据基本信息

Tab.3 Information of Experimental Data

| 参数 | 静态数据 | 行人动态数据 | 车载动态数据 |
|----------|--------------------------------------|------------|------------|
| 采集地点 | 武汉大学 | 武汉大学 | 武汉市 |
| 采集时间 | 2021-03-20 | 2021-05-12 | 2021-05-12 |
| 参考站接收机 | Trimble Alloy | | |
| 参考站天线 | UniStrong UA91 3D choke-ring antenna | | |
| 流动站 | Huawei Mate40 | | |
| 基线长度/km | <0.1 | <0.4 | <6 |
| 数据时长/min | 30 | 30 | 45 |
| 采样间隔/s | 1 | | |

表4 解算策略

Tab.4 Data Processing Strategies

| 参数 | 单频解算 | 双频解算 |
|-------|--------------|-----------------|
| 频点 | G/J:L1 | G/J:L1/L5 |
| | E:E1 | E:E1/E5a |
| | C-2:B1I | C-2:B1I |
| | C-3:B1I | C-3:B1I/B1C/B2a |
| | R:R1 | R:R1 |
| 星历 | 广播星历 | |
| 电离层模型 | Klobuchar | |
| 对流层模型 | Saastamoinen | |
| 截止高度角 | 15° | |
| 截止信噪比 | 25 dB/Hz | |

3.2 静态定位性能

图10和图11分别给出了单频和双频解算模式下前50s的平面位置误差序列。可知,单频解算的模糊度首次固定时间(time to first fix, TTFF)为12s,全时段数据(30min)的固定率为99.28%,双频解算时,TTFF缩短至5s,固定率提升到99.67%。由于未标定手机GNSS天线相位中心,固定解的绝对精度难以统计,因此使用标准差(standard deviation, STD)来评估固定解的稳定性和相对精度,统计结果见表5。由表5可知,双频解算的固定解平面相对精度在1cm以内,高程相对精度在1~2cm,相比于单频解算分别提升了29%和6%。

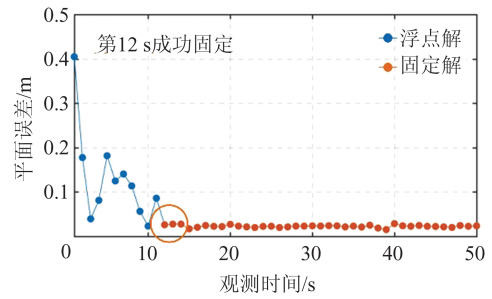


图10 单频解算平面误差序列
Fig.10 Horizontal Errors of Single-Frequency Positioning

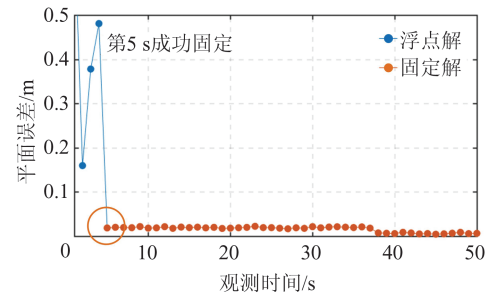


图11 双频解算平面误差序列
Fig.11 Horizontal Errors of Dual-Frequency Positioning

表5 静态定位固定解STD统计表/cm

Tab.5 STD Statistics of Fixed Positioning Errors of the Static Test/cm

| 频数 | 东向 | 北向 | 高程 |
|----|------|------|------|
| 单频 | 0.36 | 0.75 | 1.21 |
| 双频 | 0.41 | 0.43 | 1.14 |

表6给出了测速精度,可知,SPV的平面精度约为5cm/s,高程精度优于0.1m/s,TDCP测速精度在平面和高程方向上均优于1cm/s,双频解算在两种测速模式下的精度均优于单频解算。该组数据观测条件良好,单频和双频解算结果均为纯RTK解。

表6 静态测速误差统计表/(m·s⁻¹)

Tab.6 Velocity Errors Statistics of the Static Test/(m·s⁻¹)

| 模式 | 频数 | 东向 | | 北向 | | 高程 | |
|------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | RMS | 95% | RMS | 95% | RMS | 95% |
| SPV | 单频 | 0.036 | 0.070 | 0.041 | 0.080 | 0.087 | 0.167 |
| | 双频 | 0.032 | 0.062 | 0.031 | 0.061 | 0.075 | 0.148 |
| TDCP | 单频 | 0.003 | 0.006 | 0.002 | 0.005 | 0.006 | 0.011 |
| | 双频 | 0.003 | 0.006 | 0.002 | 0.003 | 0.006 | 0.010 |

3.3 行人动态定位性能

图12给出了单频和双频解算在东/北/高程方向的误差序列,可知,双频解算结果的误差序列更接近于零,整体波动较小,且收敛更快,高程

方向最明显,说明双频解算的位置精度和平滑性均优于单频解算结果。

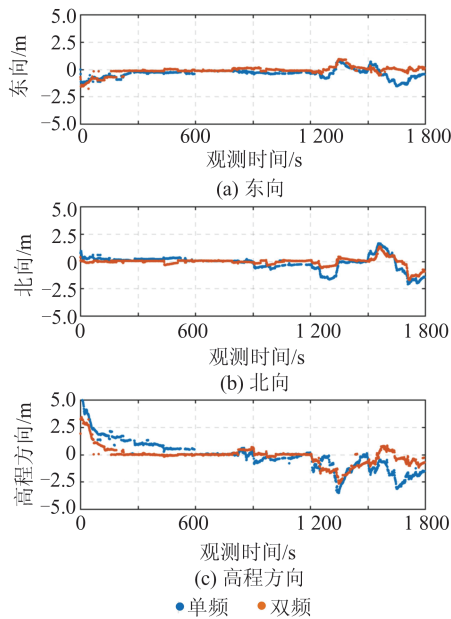


图 12 单、双频解算误差序列

Fig.12 Positioning Errors of Single-Frequency and Dual-Frequency Solution

表 7 统计了行人动态差分定位误差,可知,单频解算的平面精度约 0.9 m,高程精度大于 1 m,双频解算的平面精度约 0.5 m,提升了 37%,高程精度优于 1 m,提升了 40%。单频解算的 TTFF 超过 2 min,双频解算的 TTFF 缩短至 70 s,固定率提高到 57.99%。表 8 统计了测速误差,可知,SPV 精度在 0.1~0.2 m/s,TDSCP 测速精度在厘米级,双频解算精度均优于单频解算。该组数据观测条件良好,单频和双频解算结果均为纯 RTK 解。表 8 中 95% 表示 95% 置信度。

表 7 行人动态定位误差统计表

Tab.7 Positioning Errors Statistics of the Pedestrian Dynamic Test

| 频数 | 东向/m | | 北向/m | | 高程/m | | 固定率/% | TTFF/s |
|----|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| | RMS | 95% | RMS | 95% | RMS | 95% | | |
| 单频 | 0.55 | 1.20 | 0.66 | 1.60 | 1.39 | 2.93 | 23.09 | 263 |
| 双频 | 0.38 | 0.93 | 0.38 | 1.06 | 0.83 | 1.90 | 57.99 | 70 |

3.4 车载动态定位性能

车载模式下,手机放置于车内,GNSS 观测值的质量因此受到较大影响,即使在开阔环境下也难以固定。图 13 给出了单频和双频解算结果轨迹,当经过树荫遮挡场景时,如图 13 中 A 区域,双频结果轨迹更符合参考轨迹。

该路段的平面误差序列如图 14(a)所示,单

频解算的平面精度为 3.51 m,双频解算提升了 30%,为 2.47 m;在经过高楼遮挡场景时,如图 13 中 B 区域,单频结果不连续且与参考轨迹偏离较大,该路段的平面误差序列如图 14(b)所示,单频和双频解算的平面精度分别为 2.73 m 和 2.06 m;在经过较开阔的场景时,如图 13 中 C 区域,单频和双频解算结果较平滑,与参考轨迹均相差不大,误差序列如图 14(c)所示,平面精度分别为 0.92 m 和 0.56 m。

表 8 行人动态测速误差统计表/(m·s⁻¹)

Tab.8 Velocity Errors Statistics of the Pedestrian Dynamic Test/(m·s⁻¹)

| 模式 | 频数 | 东向 | | 北向 | | 高程 | |
|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | RMS | 95% | RMS | 95% | RMS | 95% |
| SPV | 单频 | 0.098 | 0.194 | 0.091 | 0.194 | 0.183 | 0.364 |
| | 双频 | 0.089 | 0.176 | 0.080 | 0.166 | 0.165 | 0.327 |
| TDSCP | 单频 | 0.057 | 0.117 | 0.063 | 0.136 | 0.073 | 0.146 |
| | 双频 | 0.055 | 0.114 | 0.059 | 0.123 | 0.066 | 0.143 |

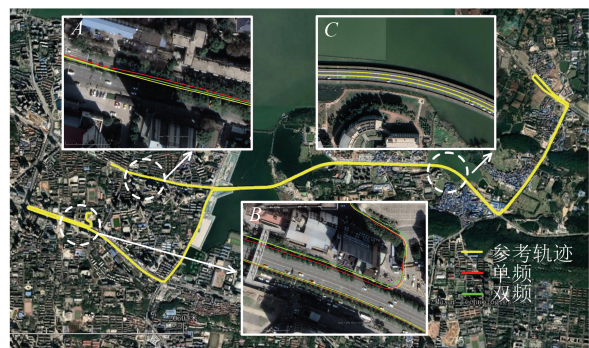


图 13 单、双频解算轨迹

Fig.13 Positioning Trajectories of Single-Frequency and Dual-Frequency Solutions

表 9 给出了平面和高程误差的分段统计百分比,可知,双频解算的平面和高程误差在各分段误差区间的占比超过单频解算结果的 10%~20%。单频解算时,约 65% 的历元可以达到平面误差 1.5 m 以内,双频解算时,约 77% 的历元可以达到平面误差 1.5 m 以内,这说明了利用智能手机实现车道级导航的可能。表 10 给出了测速误差的分段统计百分比,可知,SPV 和 TDSCP 测速误差均有超过 90% 的历元在 0.5 m/s 以内,由于车辆运动状态变化大,实验环境变化显著,且手机放置在车内,导致相位噪声变大,且连续性变差,因此难以达到静态和行人实验中的厘米级、分米级精度。双频测速误差在两种模式下均小于单频测速。

为了体现本文提出的速度约束的双频 RTD/

RTK自适应切换滤波定位算法与常规RTK算法相比的优势,共采用3种方案对该组车载算例进行双频解算,3种方案采用的策略见表11。

图15给出了3种方案在东向和北向的定位误差序列,其中,解类型为3代表RTD解,5代表RTK解。

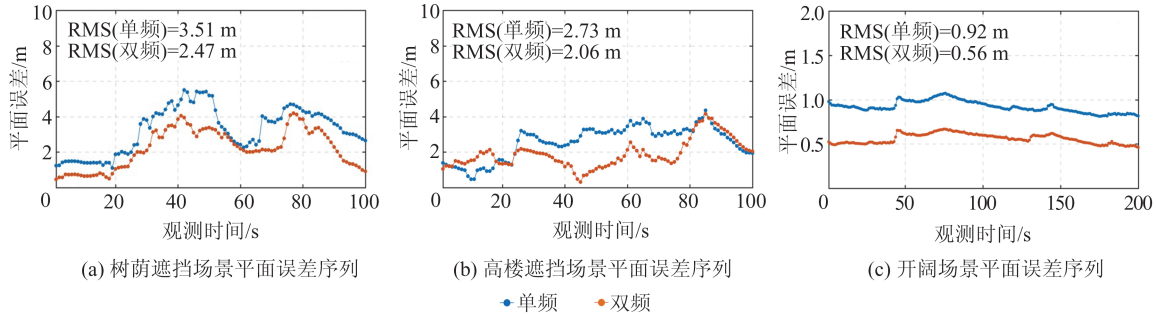


图14 平面误差序列

Fig.14 Horizontal Positioning Errors

表9 车载动态定位误差分段统计表/%

Tab.9 Positioning Errors Distribution Statistics of the Vehicle Dynamic Test/%

| 频段 | 平面误差 | | | 高程误差 | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | <1.0 m | <1.5 m | <2.0 m | <1.0 m | <2.0 m | <3.0 m |
| 单频 | 48.31 | 65.48 | 76.03 | 46.07 | 60.40 | 74.74 |
| 双频 | 58.71 | 77.28 | 86.07 | 53.05 | 83.75 | 92.35 |

表10 车载动态测速误差分段统计表/%

Tab.10 Velocity Errors Distribution Statistics of the Dynamic Vehicle Dynamic Test/%

| 模式 | 频段 | 平面误差 | | 高程误差 | |
|------|----|----------|----------|----------|----------|
| | | <0.1 m/s | <0.5 m/s | <0.1 m/s | <0.5 m/s |
| SPV | 单频 | 46.18 | 96.76 | 33.53 | 90.92 |
| | 双频 | 49.78 | 97.41 | 37.05 | 93.67 |
| TDCP | 单频 | 42.32 | 90.66 | 73.57 | 95.00 |
| | 双频 | 43.44 | 91.06 | 77.27 | 96.06 |

当采用方案一,即本文提出的算法时,RTD解占8.31%,RTK解占91.69%,全程解算结果在东向和北向的定位误差RMS分别为0.85 m和1.09 m,整体较为平滑。当采用方案二,即纯

RTK解算时,东向和北向的定位误差在第480 s、1 000 s和1 700 s前后波动较大,超过5 m,全程解算结果在东向和北向的定位误差RMS分别为0.99 m和1.47 m,因此,RTD/RTK自动切换的策略改善了在连续相位观测数不足时出现的定位结果跳变的问题。当采用方案三,即无速度约束时,东向和北向的定位结果在400~1 100 s以及2 500~2 600 s时严重发散,误差达到数十米,全程解算结果在东向和北向的定位误差RMS分别为2.74 m和5.55 m,因此,速度约束的策略有利于提升定位结果的平滑性和连续性。

表11 3种方案解算模式说明

Tab.11 Strategy of Three Positioning Schemes

| 方案 | 频段 | 解类型 | 速度约束 |
|-----|----|-----------|------|
| 方案一 | 双频 | RTD/RTK切换 | 有约束 |
| 方案二 | 双频 | 纯RTK | 有约束 |
| 方案三 | 双频 | RTD/RTK切换 | 无约束 |

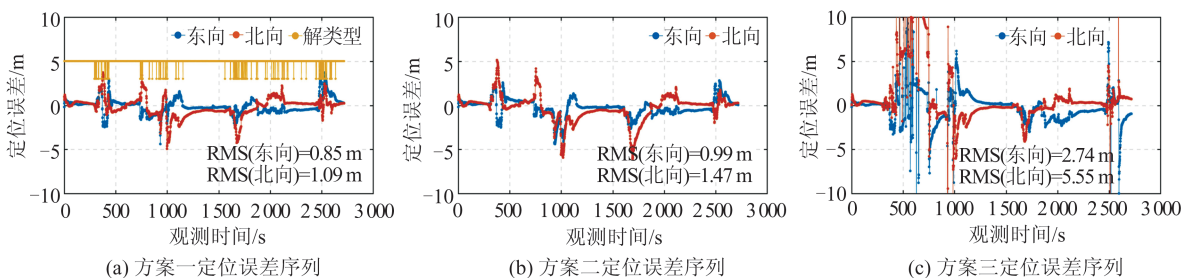


图15 3种方案定位误差序列

Fig.15 Horizontal Positioning Errors of Open Environment for Three Schemes

4 结 语

本文提出了一种速度约束的双频 RTD/RTK 自适应切换滤波定位算法,充分发挥了 L5/E5a/B2a 信号抗多径能力强的优势;通过 SPV 和 TDCP 测速获取高精度速度信息,以此来约束载体历元间的位置变化;通过 RTD/RTK 自动切换,在观测环境良好时发挥了载波相位的高精度特性,同时在连续相位观测数不足时,自动切换为伪距差分定位,解决了定位结果不稳定、不连续的问题。

本文以 Huawei Mate40 为对象,对比分析了静态、行人动态和车载动态 3 种模式下的单频和双频 GNSS 差分定位性能。实验表明,双频解算有效提高了定位结果的精度、连续性和平滑性,提高了测速精度,缩短了模糊度首次固定时间,提升了固定率和固定解的稳定性。各场景和各模式下的定位性能分析结果验证了双频 RTD/RTK 自适应切换滤波定位算法在城市复杂环境下的适用性和有效性:①在开阔场景下,静态定位 5 s 后即可实现模糊度固定,观测 30 min 的固定率超过 99%,达到厘米级定位精度,SPV 和 TDCP 测速精度均在厘米级;②在半开阔场景下,行人动态定位 70 s 后模糊度固定成功,观测 30 min 的固定率超过 50%,整体精度在平面方向上约 0.5 m,高程方向优于 1 m,SPV 精度在 0.1~0.2 m/s,TDCP 测速精度在厘米级;③城市场景下的车载动态定位中,超过 70% 历元的平面误差小于 1.5 m,SPV 和 TDCP 测速误差在分米级。

参 考 文 献

- [1] European GNSS Agency (GSA). GNSS Market Report [EB/OL]. https://www.euspa.europa.eu/system/files/reports/market_report_issue_6_v2.pdf, 2019
- [2] Yoon D, Kee C, Seo J, et al. Position Accuracy Improvement by Implementing the DGNSS-CP Algorithm in Smartphones[J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 910
- [3] European GNSS Agency (GSA), European Space Agency (ESA), Nottingham Geospatial Institute, et al. Using GNSS Raw Measurements on Android Devices [EB/OL]. https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_raw_measurement_web_0.pdf, 2017
- [4] Paziewski J, Sieradzki R, Baryla R. Signal Characterization and Assessment of Code GNSS Positioning with Low - Power Consumption Smartphones [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 1-12
- [5] 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): 1 749-1 756 (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): 1 749-1 756)
- [6] Li G C, Geng J H. Characteristics of Raw Multi-GNSS Measurement Error from Google Android Smart Devices [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 1-16
- [7] Geng J H, Jiang E M, Li G C, et al. An Improved Hatch Filter Algorithm Towards Sub-Meter Positioning Using only Android Raw GNSS Measurements Without External Augmentation Corrections [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1 679
- [8] 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): 1-11
- [9] Guo L, Wang F H, Sang J Z, et al. Characteristics Analysis of Raw Multi-GNSS Measurement from Xiaomi Mi 8 and Positioning Performance Improvement with L5/E5 Frequency in an Urban Environment [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 744
- [10] 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): 2 358-2 377
- [11] Guo Lei, Wang Fuhong, Sang Jizhang, et al. A New Inter-epoch Position Variation Constrained Navigation Algorithm for Stand-Alone GNSS Receiver [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 21-27 (郭磊, 王甫红, 桑吉章, 等. 一种新的利用历元间位置变化量约束的 GNSS 导航算法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 21-27)
- [12] Laurichesse D, Rouch C, Marmet F X, et al. Smartphone Applications for Precise Point Positioning [C]//The 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, 2017
- [13] Elmezayen A, El-Rabbany A. Precise Point Positioning Using World's First Dual-Frequency GPS/Galileo Smartphone [J]. *Sensors*, 2019, 19(11): 2 593
- [14] Wu Q, Sun M F, Zhou C J, et al. Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GNSS Observations on Smartphone [J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2 189
- [15] Chen B, Gao C F, Liu Y S, et al. Real-Time Precise Point Positioning with a Xiaomi MI 8 Android Smartphone [J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2 835

- [16] Dabove P, Di Pietra V. Towards High Accuracy GNSS Real-Time Positioning with Smartphones [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(1): 94-102
- [17] Zhang K S, Jiao W H, Wang L, et al. Smart-RTK: Multi-GNSS Kinematic Positioning Approach on Android Smart Devices with Doppler-Smoothed-Code Filter and Constant Acceleration Model[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(9): 1 662-1 674
- [18] Geng J H, Li G C. On the Feasibility of Resolving Android GNSS Carrier-Phase Ambiguities [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(12): 2 621-2 635
- [19] Wanninger L, Heßelbarth A. GNSS Code and Carrier Phase Observations of a Huawei P30 Smartphone: Quality Assessment and Centimeter-Accurate Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 1-9
- [20] Shi Xiang. Continuous Smoothing Positioning Algorithm Based on GNSS Observations of Smartphones [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019 (史翔. 基于智能手机 GNSS 观测值的连续平滑定位算法 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019)

High Accuracy Differential Positioning with Smartphone GNSS Raw Measurements

WANG Yingzhe¹ TAO Xianlu¹ ZHU Feng¹ LIU Wanke^{1,2} ZHANG Xiaohong^{1,2} WU Mingkui³

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

² Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: Objectives: The demand for smartphones to provide stable high accuracy navigation and positioning service is increasing. However, limited by low-cost and low-power hardware of smartphones, there are high pseudo-range noise, serious multipath effects and frequent cycle slips, which lead to poor positioning performance. **Methods:** The paper supposes a velocity-constraint dual-frequency RTD(real time differential)/RTK(real time kinematic) automatic switching navigation model. Firstly, L5/E5a/B2 signals are more resistant to multipath effects and help to improve the positioning performance. Secondly, the multipath noise is smoothed effectively by using velocity-constraint filtering model. Finally, RTD/RTK automatic switching strategy improves the stability and accuracy of positioning, especially under urban environment where continuous carrier phase measurements are insufficient. **Results and Conclusions:** This paper assesses the positioning performance of the Huawei Mate40 and the results show that the fixed rates of static positioning and pedestrian positioning are 99.67% and 57.99% respectively. Horizontal positioning accuracy of the pedestrian test is about 0.5 m. The vehicle positioning results show that more than 70% epochs can reach lane-level accuracy, which shows that the method supposed in this paper can basically meet the smartphone users' needs of high accuracy navigation and positioning service under urban environment.

Key words: smartphone; GNSS raw measurements; differential positioning; ambiguity resolution; urban environment

First author: WANG Yingzhe, postgraduate, majors in low-cost high precise GNSS navigation. E-mail: yzwang2019@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHU Feng, PhD, associate researcher. E-mail: fzhu@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2016YFB0501803); Major Special Projects of Technological Innovation in Hubei Province (2019AAA043); the Major Project of China's Second-Generation Navigation Satellite System (GFZX030302030202); the Wuhan Science and Technology Project (2020010601012185); Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University (19-01-06).

引文格式: 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. DOI:10.13203/j.whugis20210280 (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. DOI: 10.13203/j.whugis20210280)