引文格式：侯雪,张献志,叶远斌. 基于GDCORS的北斗终端高精度定位算法实现及性能分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(8): 72-75. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2024.08.016

基于GDCORS的北斗终端高精度定位算法实现及性能分析

侯　雪[1,2,3]，张献志[1,2,3*]，叶远斌[1,2,3]

（1. 广东省国土资源测绘院，广东 广州 510663；2. 广东省突发事件应急卫星定位与低空遥感技术研究中心，广东 广州 510663；
3. 自然资源部华南热带亚热带自然资源监测重点实验室，广东 广州 510663）

摘　要：为了提升广东省卫星导航定位基准服务系统（以下简称“GDCORS”）的社会化应用范围，扩充GDCORS的服务对象，提出了基于时间差分和卡尔曼滤波的实时高精度定位方法，利用该方法开发了高精度定位APP，并且研制了与之配套的外接北斗定位模块，然后基于GDCORS提供的实时差分产品数据使用多种智能手机在广州市内开展了静态和动态定位测试。测试结果表明，提出的高精度定位算法实现了基于手机观测数据的米级北斗伪距差分定位，基于单频外接设备的分米级、基于多频外接设备的厘米级北斗载波相位差分定位，以上基于GDCORS的北斗终端高精度定位算法具备应用推广价值。

关键词：通用移动导航终端；GDCORS；高精度定位；北斗定位模块

中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）08-0072-04

Implementation and Performance Analysis of High-precision Positioning Algorithm for Beidou Terminal Based on GDCORS

HOU Xue[1,2,3], ZHANG Xianzhi[1,2,3], YE Yuanbin[1,2,3]

(1. Surveying and Mapping Institute Lands and Resource Department Guangdong Province, Guangzhou 510663, China;
2. Guangdong Emergency Satellite Positioning and Low Altitude Remote Sensing Technology Research Center, Guangzhou 510663, China;
3. Key Laboratory of Natural Resources Monitoring in Tropical and Subtropical Area of South China, MNR, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to enhance the social application scope and expand the service objects of GDCORS, we proposed a real-time high-precision positioning method based on time difference and Kalman filtering. We used this method to develop a high-precision positioning App, and developed an external Beidou positioning module to match it. Then, we conducted static and dynamic positioning tests in Guangzhou using the real-time differential product data provided by GDCORS. The test results show that the proposed scheme achieves meter level Beidou pseudo range differential positioning based on mobile phone observation data, meter level Beidou carrier phase differential positioning based on single frequency external equipment, and centimeter level Beidou carrier phase differential positioning based on multi frequency external equipment, which has application and promotion value.

Key words: universal mobile navigation terminal, GDCORS, high-precision positioning, Beidou positioning module

近年来，自然资源相关部门提出了充分利用新一代信息技术，持续完善自然资源调查监测评价、监管分析应用体系建设，提高自然资源态势感知能力，提升自然资源业务精细化管理水平。在此背景下，为国土执法巡查及自然资源调查等相关行业APP提供高精度[1-2]、实时快捷的定位数据迫在眉睫。本文结合广东省自然资源管理及行业对全省域CORS服务需求，开展基于GDCORS的北斗大众型终端高精度定位算法实现及性能分析，实现了基于手机观测数据的米级北斗伪距差分定位，基于单频外接设备的分米级、基于多频外接设备的厘米级北斗载波相位差分定位，为自然资源业务监测应用提供能力支撑，扩展GDCORS的社会化应用范围[3-8]。

1　GDCORS建设情况

广东省于2005年起建立广东省连续运行卫星定位服务系统（GDCORS），采用省市共建、不同行业共建、资源共享的建设模式，先后实现与气象、地震、交通、电力等行业的基准站共建共享，2020年实现与湖南、江西、广西、海南、福建等邻省行政边界区域基准站数据共享。目前，GDCORS框架网基准站共225座，并网运行站点总数达460座，平均站间距小于30 km，基准站网覆盖全省行政区域。GDCORS按

收稿日期：2024-03-05。
项目来源：广东省重点领域研发计划资助项目（2023B1111050013）；广东省科技计划资助项目（2021B1212100003）。
第一作者简介：侯雪（1989—），硕士研究生，高级工程师，从事卫星导航定位相关工作，E-mail：945409901@qq.com。
通信作者：张献志（1991—），本科，工程师，从事卫星导航定位相关工作，E-mail：9257380@qq.com。

照统筹改造、资源共享的原则，于2021年底统筹整合了广东省自然资源系统内基准站，有效加密和改善了GDCORS基准站服务网结构。2022年，在统筹整合基准站的基础上，结合国家重大工程优选了209个站点进行北斗三号设备升级，升级后GDCORS共有245座基准站支持北斗三号卫星数据，保障GDCORS全面支持北斗三号系统。GDCORS构建了以北斗为主、兼容其他系统的新型卫星导航定位服务“一张网”，全面建成广东省统一空间地理数据的重要时空基础设施，为广东省自然资源管理和社会经济发展提供了“广东精度”。

2　高精度定位解决方案

采用手机、平板等大众型智能移动端设备，使用本身或者外接的通用移动导航终端获取GNSS观测数据，在高精度定位APP中通过网络获取GDCORS的基准站差分数据，利用基于时间差分和卡尔曼滤波实时高精度定位方法进行计算，实现米级的北斗伪距定位、分米级的北斗单频载波定位、厘米级的北斗多频载波定位，同时开发了对应的SDK包，可集成其他APP中进行使用。解决方案流程见图1。

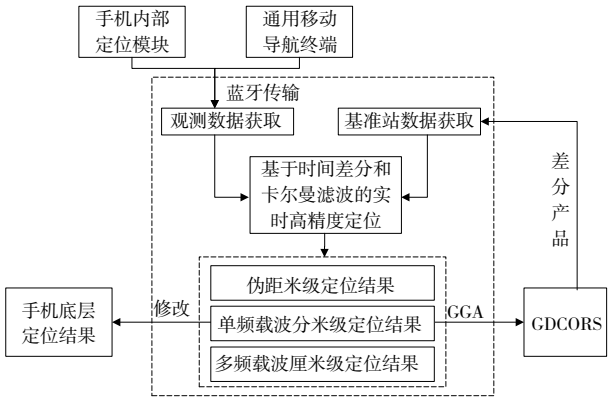


图1　高精度定位解决方案流程图

2.1　通用移动导航终端GNSS观测数据获取

Android框架在多款Android设备上支持获取GNSS原始观测数据，Android官方文档指出，要想获取GNSS原始测量数据输出，需确保设备能够捕获此类数据。大多数在2016年或之后生产并且搭载Android 7.0或更高版本的设备都可以提供GNSS数据。设备的GNSS原始观测数据包括伪距和伪距率、累计变化量或载波、硬件(HW)时钟。原始观测数据获取的方法包括android.location结构、卫星信号同步状态和伪距/相位观测值生成及获取等[9-10]。

2.2　高精度定位APP开发及外接北斗定位模块研制

高精度定位APP采用模块化、即插即用、集成安装的设计思路，按照不同的应用需求，选取相应的模块集成安装到手机中，以满足实时高精度动态定位的功能，方便、灵活定制与扩展。高精度定位APP可以用于手机等通用移动导航终端上进行高精度定位解算，软件可以获取手机等自身的卫星观测数据或者外接定位模块的卫星观测数据，通过网络连接获取CORS数据，提供不同水平的高精度定位结果。高精度定位APP主要功能模块包括：数据获取模块、数据预处理模块、定位解算模块、可视化模块、以及常用的功能接口。本软件可在Android7.0–11.0及Harmony OS版本上的手机上运行。

普适型的便携式外接北斗定位模块选用国产高性能GNSS模组和多频螺旋天线，支持北斗B1I/B2a、GPSL1/L5、Galileo E1/E5a等频点，定位芯片选择低成本的UBLOX单频芯片和双频芯片；内置大容量电池，常温工作时间不小于20 h；通过蓝牙或USB接口向移动终端传输原始观测值数据，输出频率1 Hz，精度指标设计为分米级和厘米级两类。通过各模块选型实现车规级别的稳定性，适配各种手机等通用移动导航设备，实现高兼容性。

3　基于时间差分和卡尔曼滤波实时高精度定位

3.1　基于单站时间差分的实时抗差周跳探测方法

针对复杂观测环境下，卫星载波相位观测数据经常存在周跳的问题，一种基于历元间差分定位及抗差最小二乘估计分析卫星观测值残差来进行周跳探测与修复的方法，利用历元间单差解的验后单位权中误差探测发生周跳的历元，再采用抗差最小二乘法确定发生周跳的异常卫星，最后在观测方程中增加一个周跳值待估参数修复周跳，解决单频周跳不易探测及修复的难题。

假定测站i在历元t的位置为p，在历元$t+1$的位置为流动站q，组成历元间单差观测方程如下：

$$\lambda\Delta\varphi=\rho_{\mathrm{q}}^{\mathrm{s}}-\rho_{\mathrm{p}}^{\mathrm{s}}-c\Delta t-\lambda\Delta N+\Delta\epsilon$$

式中，$\Delta\varphi$、$\rho_{\mathrm{p}}^{\mathrm{s}}$、$\rho_{\mathrm{q}}^{\mathrm{s}}$、$\Delta t$、$\Delta N$、$\Delta\epsilon$、$c$和$\lambda$分别为历元间单差观测值；历元$t$的卫地距、历元$t+1$的卫地距、接收机钟变化量、周跳值、观测噪声、光速和载波波长。相邻历元间电离层延迟和对流层延迟的变化量有限，卫星钟变化微小，历元间单差观测值可基本消除电离层、对流层及卫星钟差的影响，故在上式不考虑这些误差。残余的电离层、对流层及卫星钟差被吸收至$\Delta\epsilon$中。

即使相邻历元的观测值都是同一台接收机观测值，历元间单差观测值也消除不了接收机钟差影响，

需作为参数估计。假定观测值未发生周跳，则前后历元的整周模糊度相等可通过历元间单差消除，因此共存在3个坐标参数和1个接收机钟差参数，如需确定发生周跳的观测值或进行周跳修复，需保证至少存在4颗卫星的观测数据未发生周跳。采用相对定位模式可解出测站 i 在历元 $t+1$ 处的观测值验后单位权中误差。观测值未发生周跳，验后单位权中误差一般在毫米级。如果发生周跳即 ΔN 不为零，验后单位权中误差会显著增大。因此可根据验后单位权中误差探测发生周跳的历元。

3.2 基于三差的位置变化量求取

以基线形式线性化的相位双差观测方程为：

$$\lambda\varphi_{ij}^{pq}=-\left(\bar{u}^{q}-\bar{u}^{p}\right)\boldsymbol{b}+\lambda\boldsymbol{N}_{ij}^{pq}$$

式中，$\bar{u}^{q}=\left(u_i^{q}+u_j^{q}\right)/2$ $\bar{u}^{p}=\left(u_i^{p}+u_j^{p}\right)/2$；$\boldsymbol{b}$ 为基线向量。在假设无周跳的前提下，上一历元 k 与当前历元 $k+1$ 间的三差观测方程可写为：

$$\lambda\left(\varphi_{ij,\ k+1}^{pq}-\varphi_{ij,\ k}^{pq}\right)=-\left(\bar{u}_{k+1}^{q}-\bar{u}_{k+1}^{p}\right)\boldsymbol{b}_{k+1}+\left(\bar{u}_{k}^{q}-\bar{u}_{k}^{p}\right)\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{k}}$$

设历元间基线向量变化 $\Delta\boldsymbol{b}=\boldsymbol{b}_{k+1}-\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{k}}$，则上式可变形为：

$$\lambda\Delta\varphi_{ij}^{pq}=-\bar{u}_{k+1}^{pq}\Delta\boldsymbol{b}-\left(\bar{u}_{k+1}^{pq}-\bar{u}_{k}^{pq}\right)\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{k}}$$

式中，$\Delta\varphi_{ij}^{pq}=\varphi_{ij,k+1}^{pq}-\varphi_{ij,k}^{pq}$，$\bar{u}_{k}^{pq}=\bar{u}_{k}^{q}-\bar{u}_{k}^{p}$。考察上式右边第二项的系数 $\bar{u}_{k+1}^{pq}-\bar{u}_{k}^{pq}=\bar{u}_{k,k+1}^{q}-\bar{u}_{k,k+1}^{p}$，在历元间隔不大时，该项值十分微小；$\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{k}}$ 为上一历元的基线向量，量级较大。当上一历元没有得到 $\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{k}}$ 的固定解时，由于 $\bar{u}_{k+1}^{pq}-\bar{u}_{k}^{pq}$ 量级很小，此时可采用上一历元 $\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{k}}$ 的近似解代替，如基线向量浮点解、伪距差分解等，由此造成上式的模型误差可以忽略不计。无论 $\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{k}}$ 采用何种解，统一记为 $\tilde{\boldsymbol{b}}_{\boldsymbol{k}}$，则上式可以变为：

$$l_{TD}=-\bar{u}_{k+1}^{pq}\Delta\boldsymbol{b}$$

式中，常数项 $l_{TD}=\lambda\Delta\varphi_{ij}^{pq}+\left(\bar{u}_{k+1}^{pq}-\bar{u}_{k}^{pq}\right)\tilde{\boldsymbol{b}}_{\boldsymbol{k}}$。上式即为新形式的三差方程，以基线向量变化量 $\Delta\boldsymbol{b}$ 为待估量。

3.3 基于位置变化量的滤波模型

通过上述任一途径得到的基线向量历元间位置变化量，即可将该变化量视为状态方程中的控制向量，而该变化量与真值的差异视为系统的动态噪声，其方差与位置变化量的方差保持一致，则系统的状态方程和观测方程分别可表示为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_k=\boldsymbol{X}_{k-1}+U_{k-1}+\Omega_{k-1}\\ l_k=\boldsymbol{b}_k\boldsymbol{X}_k+\Delta_k\end{cases}$$

式中，U 为北斗三差解算得到的位置变化量 Δx；动态噪声的方差 $D\Omega$ 则为位置变化量的方差 $D\Delta x$。

如果观测方程中含有伪距和载波相位观测值，则状态向量 $\boldsymbol{X}=[x\ N]T$。相应地，控制向量、动态噪声及其方差矩阵中的模糊度部分以零值进行扩展，即

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k\\ N\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{k-1}\\ N\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{x}_{k-1}\\ 0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Omega_{k-1}\\ 0\end{bmatrix}\quad D_{\Omega}=\begin{bmatrix}D_{\Delta x}&0\\0&0\end{bmatrix}$$

对应的观测方程则可表示为：

$$\begin{bmatrix}l_{P_k}\\ l_{\phi_k}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}b_k&0\\ b_k&\lambda\boldsymbol{E}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k\\ N\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta_{1k}\\ \Delta_{2k}\end{bmatrix}$$

该方法没有回避待估动态参数的运动状态难以描述的问题，而是巧妙利用三差解信息将无规律的载体运动模型转化为简单的位移变化模型，也解决了普通动态系统的卡尔曼滤波状态方程中坐标参数难以模型化问题，适用面广。另外，该方法同时采用了伪距和相位观测值，提高了滤波过程中状态参数的精度水平，从而加快了模糊度的收敛速度。

3.4 附有频率约束信息的模糊度固定正确性检验

除了利用模糊度成功率、模糊度孔径检验等方法外，在相对定位模糊度固定监测中，多频条件下的频率约束可以辅助监测模糊度固定的正确性。

当采用2个及以上频率观测值时，可以采用频率约束进行模糊度判别。在相对定位中，通过站星双差可以消除与卫星及接收机直接相关的误差项，在短基线情形下还可以削弱大气延迟误差的影响，则双差的载波相位观测方程可以简写为：

$$\begin{cases}\Delta\nabla\varphi_1=\Delta\nabla\rho/\lambda_1-\Delta\nabla N_1+\Delta\nabla\varepsilon_{\varphi_1}\\ \Delta\nabla\varphi_2=\Delta\nabla\rho/\lambda_2-\Delta\nabla N_2+\Delta\nabla\varepsilon_{\varphi_2}\end{cases}$$

式中，φ 的单位为周，数字下标表示不同的频点。将上式在频率间相减可以得到：

$$\Delta\nabla N_2=\left(\lambda_1/\lambda_2\right)\bullet\left(\Delta\nabla\varphi_1+\Delta\nabla N_1\right)-\Delta\nabla\varphi_2$$

则根据误差传播率，有：

$$\delta_{\Delta\nabla N_2}^2=\delta_{\Delta\nabla\varphi_2}^2+\left(\lambda_1/\lambda_2\right)^2\delta_{\Delta\nabla\varphi_1}^2$$

假设 $\nabla\Delta\varphi_1$、$\nabla\Delta\varphi_2$ 的观测噪声均为0.1周，则计算出的 $\delta_{\nabla\Delta N_2}$ 噪声约为0.13周。若 $\nabla\Delta N_1$ 为正确的模糊度整数解，则由上式计算得到的 $\nabla\Delta N_2$ 在误差范围内（例如0.2周）应为整数，否则说明该组模糊度候选解可能存在错误固定，不能接受模糊度的固定解，而只能使用其浮点解。

4 实验结果与分析

4.1 实验设计

为了验证基于GDCORS的北斗大众型终端高精度

定位算法的定位性能，采用自主开发的高精度定位APP，基于华为Mate40、小米MIX3、真我GT neo、一加Ace2四款手机的GNSS观测数据与GDCORS基准站差分数据进行伪距和载波相位差分定位测试，另外基于华为mate40和外接北斗定位模块的GNSS观测数据与GDCORS基准站差分数据进行伪距和载波相位差分定位测试，测试内容包括静态定位测试和动态定位测试。

4.2　结果分析

静态测试于2023年9月21日进行，分别在上午9：00时和下午13：00时各采集了1 h的定位数据，统计其内、外符合精度。其中4款手机定位精度均优于2 m，达到米级精度要求；华为Mate40+单频RTK模块定位精度优于0.5 m，达到分米级精度要求；华为Mate40+双频RTK模块定位精度优于0.07 m，达到厘米级精度要求。

动态测试于2023年9月22日进行，分别在上午9：00时和下午13：00时开始在耕地巡查路线上使用车载采集了55 km的动态定位数据，测试过程中在车辆顶部固定安装了一台专业RTK设备，量取专业RTK设备与待测设备天线间的距离作为参考值，在根据定位结果计算距离时，只选取专业RTK设备获得固定解的历元数据，得到距离内、外符合精度结果如表1所示。其中4款手机定位精度均优于1.5 m，达到米级精度要求；华为Mate40+单频RTK模块定位精度优于0.4 m，达到分米级精度要求；华为Mate40+双频RTK模块定位精度优于0.07 m，达到厘米级精度要求。

表1　动态定位测试统计结果

时间	设备	内符合精度/m	外符合精度/m
9:00–11:00	华为Mate40	0.675	0.917
	小米MIX3	0.785	1.225
	真我GT neo	0.685	0.945
	一加Ace2	0.823	1.357
	华为Mate40+单频RTK模块	0.159	0.286
	华为Mate40+双频RTK模块	0.012	0.057
13:00–15:00	华为Mate40	0.712	0.978
	小米MIX3	0.923	1.334
	真我GT neo	0.704	0.965
	一加Ace2	0.964	1.454
	华为Mate40+单频RTK模块	0.198	0.303
	华为Mate40+双频RTK模块	0.018	0.063

5　结　语

本文结合广东省自然资源管理及行业对全省域CORS服务需求，开展了基于GDCORS的北斗大众型终端高精度定位算法实现及性能分析工作，提出了基于时间差分和卡尔曼滤波的实时高精度定位方法，并基于此完成了高精度定位APP开发及外接北斗定位模块研制。经过静态、动态定位测试结果表明，本文提出的算法实现了基于手机观测数据的米级北斗伪距差分定位，基于单频外接设备的分米级、基于多频外接设备的厘米级北斗载波相位差分定位，能为国土执法巡查及自然资源调查等相关行业APP提供高精度、实时快捷的定位数据，具备可推广性。随着手机硬件设备性能的不断提升，后续研究可继续提高基于手机观测数据的定位精度，并结合实际应用需求，探索更多外接设备的实现形式。

参考文献

[1] 张垠,涂锐,洪菊,等. Android智能手机GNSS数据质量分析[J]. 全球定位系统,2021,46(4):85-92

[2] Liu Y, Gao C, Chen B, et al. Pseudo-range Single Point and Differential Positioning Accuracy Test Based on Android Smartphone[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心,北京市经济和信息化局,北京市顺义区人民政府. 第十届中国卫星导航年会论文集:S01 卫星导航行业应用, 2019

[3] 汪亮,李子申,周凯,等. 面向Android智能终端的多模GNSS实时非差精密定位[J]. 导航定位与授时,2019,6(3):1-10

[4] 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):1 053-1 062

[5] 袁良雄,王浩,申志恒. 基于扩展天线的智能手机GNSS RTK定位性能研究[J]. 全球定位系统,2023,48(3):77-84

[6] 赵硕,秘金钟,徐彦田,等. 双频智能手机GNSS数据质量及定位精度分析[J]. 测绘科学,2020,45(2):22-28

[7] 高成发,陈波,刘永胜. Android智能手机GNSS高精度实时动态定位[J]. 测绘学报,2021,50(1):18-26

[8] 李志华,刘东晓,李忠忠. Android架构下的北斗高精度定位技术研究[J]. 产业创新研究,2022,5(8):29-31

[9] 谭理庆. 安卓智能手机多模GNSS观测数据质量评估及定位算法研究[D]. 武汉:武汉大学,2020

[10] 陈春花,陈冲,赵亚枝. 安卓智能手机GNSS数据质量分析[J]. 全球定位系统,2020,45(3):22-27