

引文格式: 陈俊平, 张益泽, 于超, 等. 北斗卫星导航系统精密定位报告算法与性能评估[J]. 测绘学报, 2022, 51(4): 511-521. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220024.  
CHEN Junping, ZHANG Yize, YU Chao, et al. Processing algorithms and performance evaluation of BDS RDSS location reporting service[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(4): 511-521. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220024.

## 北斗卫星导航系统精密定位报告算法与性能评估

陈俊平<sup>1,2,3</sup>, 张益泽<sup>1</sup>, 于超<sup>1,2</sup>, 丁君生<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院上海天文台上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030

## Processing algorithms and performance evaluation of BDS RDSS location reporting service

CHEN Junping<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yize<sup>1</sup>, YU Chao<sup>1,2</sup>, DING Junsheng<sup>1,2</sup>

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

**Abstract:** RDSS (radio determination satellite service) short message is a characteristic service of the BeiDou satellite navigation system (BDS), which realizes user short-message communication and location reporting. The BDS RDSS based location reporting was realized for the first time on its first-generation system (BDS-1) using two GEO (geo-stationary earth orbit) satellites, and its accuracy was limited by the accuracy of the digital elevation model (DEM) database, which was used to assist its realization of 3D positioning service using two satellites only. Starting from its regional System (BDS-2), BDS has developed new technology of the location reporting in the Master Control Center (MCC) by integrating the RNSS (radio navigation satellite system) and RDSS observations. In the new development, the RNSS range and carrier phase observations of user stations are transmitted to the MCC through RDSS link, and the RNSS observations are used to determine users' precise positions in the MCC. Supported by the various types of precise spatio-temporal data, e.g. precise satellite orbits and clocks, the precision of user positioning is thus greatly improved. In this paper, we introduce the three location reporting processing algorithms used in the MCC central station, and evaluates their performance with respect to the sampling rates and baseline length. Data of the 50 BDS tracking stations in Mainland China is used to validate the performance. Results show that the precision of the location reporting realized in the MCC reaches 0.51 m and 0.94 m for horizontal and height components, respectively. The positioning precision shows little relation to both the baseline length and sampling rates, while the precision of BDS-2+BDS-3 combined solutions is improved by around 50% over the solutions using BDS-2 observations only.

**Key words:** BeiDou satellite navigation system; precise positioning; RDSS location reporting; zone correction

**Foundation support:** The Program of Shanghai Academic Research Leader; The National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0504300); The Key Research and Development Program of Guangdong Province (No. 2018B030325001); The National Natural Science Foundation of China (No. 11673050); The Key Program of Special Development Funds of Zhangjiang National Innovation Demonstration Zone (No. ZJ2018-ZD-009)

**摘 要:** RDSS 短报文是北斗卫星导航系统(以下简称北斗系统)的特色服务,实现了用户报文通信和位

置报告。北斗系统早期的位置报告基于双星 RDSS 观测值,其精度受限于数字高程数据的精度。从 BDS-2 开始,北斗系统发展了融合 RNSS 和 RDSS 体制的位置报告方法,其基于北斗 RDSS 体制,将用户接收机的观测数据向中心站进行回传,并在中心站实现精密位置的解算和报告,提升了服务覆盖范围和定位精度。本文介绍了北斗精密定位报告系统采用的中心站处理算法,并采用分布于中国不同区域的 50 个北斗观测站数据对系统性能进行评估。分析了 RDSS 入站频度、用户站与监测站的基线长度等因素对用户定位的影响。结果表明,基于北斗分区综合改正数的精密单点定位的精度最优,其在 2 min 响应时间内的平面和高程精度(RMS)分别为 0.51 m 和 0.94 m。北斗精密定位报告精度与基线长度相关性较小,在仅采用 BDS-2 数据的情况下,定位精度下降可达 1 倍以上,而在相同时长情况下,提高 RDSS 入站申请频度对定位性能不产生影响。

**关键词:**北斗卫星导航系统;精密定位;RDSS 位置报告;分区综合改正数

**中图分类号:**P228

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-1595(2022)04-0511-11

**基金项目:**上海市优秀学术带头人计划;国家重点研发计划(2018YFB0504300);广东省重点研发计划(2018B030325001);国家自然科学基金(11673050);上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重大项目(ZJ2018-ZD-009)

卫星无线电测定业务(radio determination satellite service, RDSS)是北斗独特测量体制,它使得北斗系统除了提供定位、授时、导航(PNT)服务之外,还具备位置报告、短报文通信功能,通过将位置信息进行回传,为抢险救灾、海上救援等应用的态势感知和指挥调度提供基础信息数据保障<sup>[1-2]</sup>。

位置报告是北斗 RDSS 的一项重要服务。在北斗系统建设历程中, RDSS 定位技术也在不断发展。BDS-1 采用两颗地球同步轨道卫星(GEO)的 RDSS 测量数据,结合数字高程,实现了双星 RDSS 定位,其单个坐标分量的定位精度优于 25 m<sup>[3]</sup>。从 BDS-2 开始,北斗系统将 RDSS 定位与基于卫星无线电导航业务(radio navigation satellite system, RNSS)的定位技术进行有机结合<sup>[1,4-11]</sup>,通过北斗卫星将用户的观测数据和时空信息进行上报,实现定位计算与位置报告功能。其中, BDS-2 的 RDSS 位置报告服务基于 5 颗 GEO 卫星,而 BDS-3 则设计利用 3 颗 GEO 卫星实现重点区域的位置报告,利用 14 颗中圆轨道卫星(MEO)进行全球位置报告服务。

北斗位置报告针对的应用场景是无本地参考站支持、无通信手段等观测条件恶劣情况下的定位和位置报告,包含快速定位报告和精密定位报告两种类型。其中,快速定位在 3 颗卫星 RNSS 观测值的基础上增加其中 1 颗卫星的四程 RDSS 观测值,从而摆脱原来 RDSS 定位对高程约束的依赖,实现基于少量数据的快速定位<sup>[6-7]</sup>;其响应时间小于 10 s,设计的平面和高程精度优于 10 m<sup>[5]</sup>。

精密定位采用 RNSS 观测数据进行定位,其响应时间小于 2 min,设计的平面和高程精度优于 1 m<sup>[5]</sup>。本文介绍北斗精密定位报告服务的中心站处理算法及系统设计,并采用我国中东部 50 个测站的数据对精密定位报告的性能进行了评估。

## 1 北斗精密定位位置报告系统组成

北斗系统位置报告系统(图 1)的基本原理是利用北斗 RDSS 链路将用户的 RNSS 伪距、载波相位观测数据回传至地面运控系统,充分利用中心站各种观测信息和各类精密参数,在中心站采用 RDSS 和 RNSS 观测数据实现广义 RDSS 定位服务<sup>[1,4-5]</sup>。它的组成包括中心处理系统和 RDSS/RNSS 双模用户终端两个部分。用户终端是位置报告系统的应用服务单元,它对可视范围内各卫星进行实时观测,并将观测数据通过传输链路回传到中心站,同时接收传输链路发送的定位结果。中心处理系统的主要功能是接收中心站发来的各类实时数据,对所有请求精密定位的 RDSS 用户进行数据处理和位置报告。

系统工作时,北斗监测站(参考站)在本地钟控制下实时采集所有可视导航卫星的信号,从而测得各卫星的伪距、载波相位、星地时间同步、站间时间同步和气象参数等观测量,通过北斗卫通链路(或地面网链路)实时传送给中心站。中心站利用这些信息进行精密定轨、精密时间同步、电离层延迟模型、广域差分等处理,生成用户定位使用的精密轨道、钟差、电离层延迟量、广域差分改正数等信息。

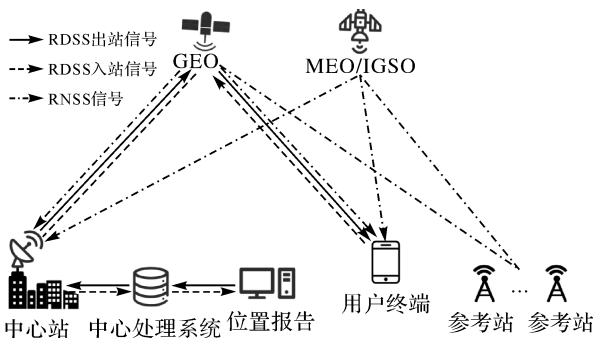


图 1 北斗精密定位报告系统组成

Fig.1 BDS RDSS location reporting system in the BDS MCC central station

用户终端在本地钟控制下实时采集所有可视北斗卫星的 RNSS 导航信号,测得各卫星的 RNSS 伪距、载波相位等观测量,同时响应来自中心站 S 频点 RDSS 询问信号,将测量得到的各卫星 RNSS 伪距、载波相位等信息通过 RDSS 入站链路传送给中心站。BDS-2 的 RDSS 入站链路资源设计上支持单站 6 颗卫星 3 个频点,或者单站 9 颗卫星 2 个频点 RNSS 观测值的回传;考虑到 BDS-2 5 颗 GEO、5 颗 IGSO(倾斜地球同步轨道)、4 颗 MEO 卫星的星座设计,以上设计能力能够保证 BDS-2 用户回传所有可见卫星的双频 RNSS 观测数据。而 BDS-3 则扩大了入站资源,其链路资源支持单站回传所有北斗可见卫星的 RNSS 观测数据。

中心站 RDSS 业务处理系统根据 RDSS 入站用户类型分离出精密定位用户,将精密定位用户的 RNSS 观测数据和 RDSS 观测数据、监测站观测数据和系统精密信息实时发送给中心处理系统。中心处理系统利用用户的 RDSS、RNSS 观测量,结合监测站观测数据和系统精密信息完成用户的精密定位计算。在北斗系统 RDSS 入站用户容量范围内,对所有入站精密定位用户的数据进行并行处理。

在此基础上,中心处理系统将用户定位结果发送给中心站 RDSS 业务处理系统,基于 RDSS 出站功能将定位结果报告给用户和位置报告指挥控制部门,其出站信息格式的表达能够精确到优于 1 cm 的精度。在以上整个精密定位报告流程中,用户从申请定位开始至收到定位结果为止,整个过程总时延小于 1 s。

## 2 北斗精密定位报告中心站处理算法

北斗精密定位报告的用户定位计算在中心站

完成,一方面能够实现用户位置信息上报,另一方面由于中心站有各类精密产品,其定位精度也优于在用户端的处理。RDSS 精密定位用户请求定位后,中心处理系统首先计算用户概略位置,并根据用户概略位置,按照一定的距离阈值(一般为 500 km,可扩展至 1000 km),搜索得到用户周围的监测站,综合周围监测站的数据与用户站数据进行用户定位计算。精密定位采用了 3 种定位方法同时处理相同的观测数据,并根据 3 种方法各自定位结果的精度进行择优综合,给出最终的定位结果。

### 2.1 区域伪距差分定位

采用区域伪距差分定位方法,中心处理系统计算离用户较近监测站的观测残差改正数,并提供给用户站定位使用,从而修正公共误差,提高定位精度。

数据处理时,首先对选定的监测站  $i$ ,计算其对可视北斗卫星  $j$  的伪距观测残差  $\delta_i^j$

$$\delta_i^j = P_i^j - [\rho_i^j + c \cdot (\tau_i - \tau^j) + T_i^j + I_i^j] \quad (1)$$

式中, $P$  为伪距观测值; $c$  为光速; $\rho$  为理论星地距,可根据已知监测站坐标和卫星精密星历计算; $\tau_i$ 、 $\tau^j$ 、 $T$ 、 $I$  分别为监测站钟差、卫星钟差、对流层延迟、电离层延迟,也都精确已知,由中心站相应信息处理系统提供。

把各选定的监测站对相同可视卫星观测残差按照一定的加权方法计算综合改正数  $\delta^j$ ,加权方法可采用加权平均、平面模型等,式(2)为加权平均模型

$$\delta^j = \frac{1}{\sum_{i=1}^n P_i} \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_i^j \quad (2)$$

式中, $P_i$  为不同监测站观测残差的权; $n$  为监测站的个数。

在此基础上,采用精密卫星轨道、钟差及监测站计算得到的综合改正数  $\delta^j$ ,对相同时刻用户站  $u$  的伪距观测值列立观测方程,进行定位解算。其观测方程为

$$P_u^j = \rho_u^j + c \cdot (\tau_u - \tau^j) + T_u^j + I_u^j + \delta^j + \zeta_u^j \quad (3)$$

式中, $\zeta$  为剩余残差;其他变量含义同式(1)。卫星钟差  $\tau^j$  由中心站提供,电离层延迟可通过无电离组合消除或者利用中心站精密电离层参数进行改正,对流层延迟通过经验模型改正或者与监测站钟差参数  $\tau_u$  及坐标参数一起解算。

### 2.2 基于分区综合改正数的精密单点定位

精密单点定位(PPP)是常用的一种单站定位

模型,该定位模型采用非差伪距和载波相位观测值,并且输入精密的卫星轨道、卫星钟差等精密参数<sup>[12]</sup>。受监测站局域布设以及中心站数据处理实时性的影响,采用北斗中心站提供的精密轨道和钟差参数,很难满足精密定位报告 2 min 内优于 1 m 定位精度的指标要求,为此,中心站 PPP 定位处理还采用了北斗中心站计算的实时分区综合改正数来进一步提高定位精度<sup>[13-16]</sup>。对于双频用户终端采用无电离层组合观测模型,其观测模型为

$$\left. \begin{aligned} P_{u,IF}^j &= \rho_u^j + c \cdot (\tau_u - \tau^j) + T_u^j + dP^j + \zeta_u^j \\ L_{u,IF}^j &= \rho_u^j + c \cdot (\tau_u - \tau^j) + \lambda \cdot N_u^j + T_u^j + dL^j + \epsilon_u^j \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $\zeta$ 、 $\epsilon$  为伪距和载波的剩余残差; $\lambda$  和  $N$  分别为载波相位的波长及其整周模糊度;IF 代表无电离层组合; $dP^j$ 、 $dL^j$  分别为伪距和载波相位分区综合改正数;其他变量含义同式(1)。卫星钟差  $\tau^j$  由中心站提供,对流层延迟通过经验模型改正或者与测站钟差参数  $\tau_u$  和坐标参数一起解算。

对于单频用户终端采用半合法无电离层组合观测模型

$$\left. \begin{aligned} P_u^j &= \rho_u^j + c \cdot (\tau_u - \tau^j) + I_u^j + T_u^j + dP^j + \zeta_u^j \\ \frac{P_u^j + L_u^j}{2} &= \rho_u^j + c \cdot (\tau_u - \tau^j) + \frac{\lambda \cdot N_u^j}{2} + \\ &T_u^j + \frac{dP^j + dL^j}{2} + \zeta_{pl}^j \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, $\zeta_u^j$ 、 $\zeta_{pl}^j$  为单频伪距及伪距载波组合的剩余残差;其他变量含义同式(4)。

### 2.3 双差相对定位

双差相对定位利用离用户距离较近的监测站测量数据与用户数据构成双差观测量,确定用户相对监测站的位置,并基于监测站的已知坐标得到用户精确坐标。测站 1、2 对卫星  $k$ 、 $j$  的双差观测模型为

$$\nabla \Delta \phi_{12}^{kj} = \rho_2^k - \rho_2^j - \rho_1^k + \rho_1^j - \lambda \cdot \nabla \Delta N^{kj} + \epsilon \quad (6)$$

式中, $\nabla \Delta$  为双差符号;下标表示测站;上标代表卫星。

双差定位通过组成双差,可消除轨道、电离层及对流层等大部分误差的影响。采用双差相对定位处理时,双差组合的原始观测值可采用单频、双频无电离层组合、双频宽巷组合等<sup>[17]</sup>,实现互相对比验证。如果可用的监测站超过 1 个,则可对不同基线的结果进行相互验证并择优。

以上 3 种定位模式各有特点:区域伪距差分定位只采用了伪距观测值,计算模型简单,速度快,但是其受到伪距噪声和多路径误差影响大;精

密单点定位采用了非差载波相位观测值,其收敛速度受到精密参数及改正数精度的影响;而采用双差相对定位,监测站的分布及其与用户站之间距离(即误差相关性情况)将影响用户定位的收敛性和定位精度。精密定位中心处理系统针对定位速度快、定位指标高的要求,设计了完备的各类结果择优策略,最终输出综合的定位结果。

## 3 北斗精密定位报告精度评估

### 3.1 数据选择和处理策略

对北斗精密定位报告系统的定位精度进行评估,采用双频实测数据进行验证。数据观测时间为 2020 年 12 月 2 日—2020 年 12 月 4 日,测试中选取分布于我国中东部的 50 个北斗连续观测站。由于北斗 RDSS 精密定位用户的入站资源能力能够保证其回传所有可见卫星的双频观测数据,试验中没有对这些观测站进行 RDSS 入站,直接通过网络实时获取这些测站的 RNSS 观测数据。测试测站及北斗系统监测站的分布如图 2 所示,在进行位置报告定位精度评估之前,其坐标均采用北斗导航接收机单天的观测数据进行后处理计算,其参考坐标精确优于 2 cm。测试测站距离最近的监测站约为 100 km,最远不超过 500 km。在区域伪距差分定位和精密单点定位模式下,中心站会根据用户的概略位置提供相应的综合改正数;而在双差相对定位模式中,位置报告系统会根据用户概略位置选择最近的监测站的观测数据。

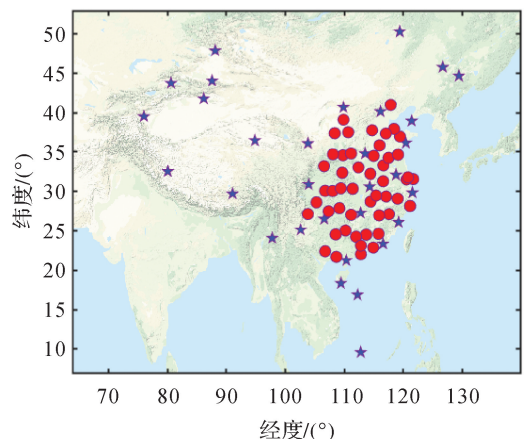


图 2 北斗系统测站(蓝色)和测试用户站(红色)分布情况  
Fig.2 Distribution of BDS tracking stations (blue) and user stations (red)

分别采用以上区域伪距差分定位(SPP)、精密单点定位(PPP)和双差相对定位 3 种模式进行定位验证。考虑到普通精密定位用户 RDSS 入站

申请频度为 20 s,精密定位的数据采样率也设为 20 s。按照精密定位位置报告 2 min 的响应需求,在数据处理中每隔 2 min 对定位中的所有参数进行重新初始化。将每 2 min 最后 1 个历元的定位结果作为精密定位位置报告的结果,并将其与精确已知坐标进行比较,统计其精度指标(RMS)。具体的数据处理策略见表 1。数据处理中,不同卫星的随机误差定义为

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{obs}}^2 + \sigma_{\text{sisre}}^2 \quad (7)$$

式中,  $\sigma_{\text{obs}}$ 、 $\sigma_{\text{sisre}}$  分别为观测值的误差和空间信号的误差。北斗系统 3 类卫星中,GEO 卫星空间信号误差较大,随机模型中对其进行了降权处理。

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 定位误差统计分析

对每个测站 3 d 内每 2 min 的定位结果进行统计,SPP、PPP 和双差 3 种定位模式下的平面和高程定位误差直方图如图 3 所示。由图 3 可以看出,3 种模式误差分布基本相同,其中高程方向上

误差差异最大,所有结果中误差小于 1 m 的比例分别达到了 67%、67%、65%。3 种模式精密定位结果的三维中误差(RMS)分别为 1.29、1.07、1.14 m。

表 1 数据处理策略

Tab.1 Strategies of data processing

参数	策略
数据时间	2020 年 12 月 2 日—2020 年 12 月 4 日
观测值	北斗 B1B3 双频观测数据
处理时长	每 2 min 重新初始化
截止高度角/(°)	10
数据采样率/s	20
加权策略	高度角加权
卫星轨道和钟差	主控站精密参数
对流层延迟	SHAtropE+GMF 模型改正 <sup>[18]</sup>
电离层延迟	双频无电离层组合
相对论、相位缠绕	模型改正
潮汐改正	模型改正
观测值精度	伪距 0.3 m,相位 0.3 cm
定位模式	2 min 静态

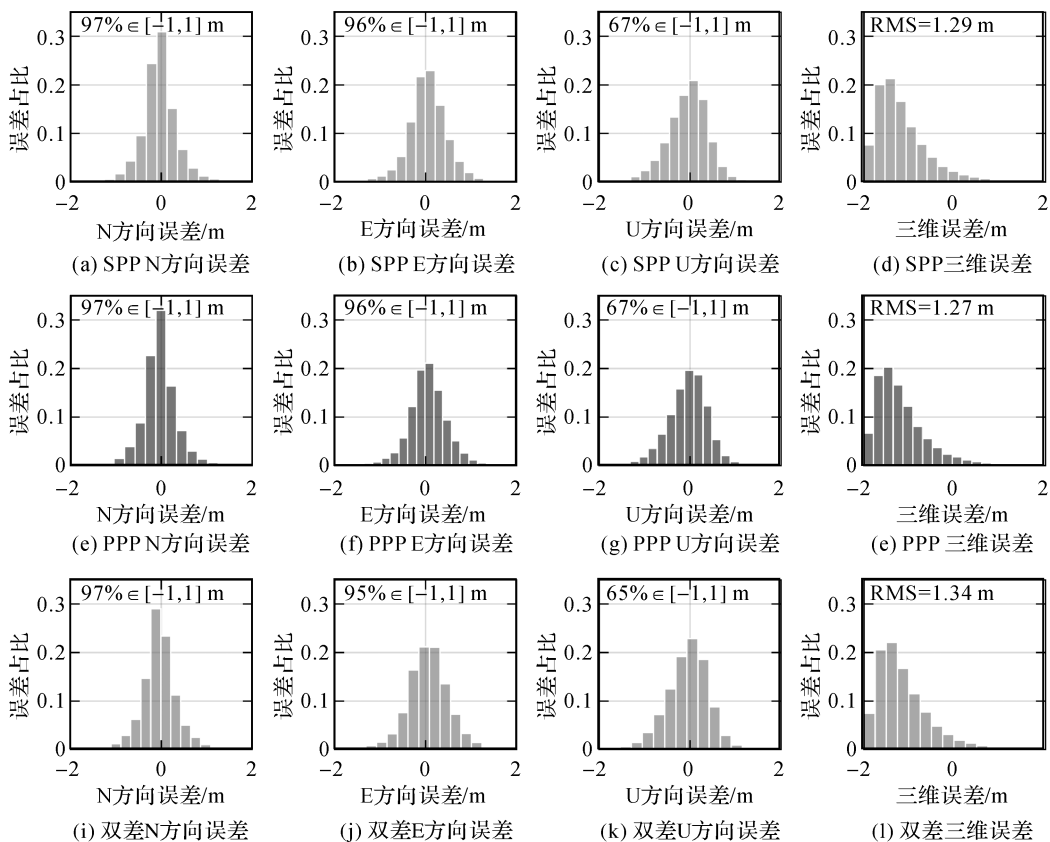


图 3 3 种定位模式下的用户定位误差直方图分布

Fig.3 The histogram distribution of user positioning errors of the three positioning models

3 种定位模式总体定位误差统计情况见表 2。3 种定位模式平面坐标的 RMS 均优于 0.6 m;在

高程方向上,PPP 和双差定位模式均满足 1 m 以内的定位精度指标,而区域伪距差分 SPP 在高程

上则达到了 1.1 m。PPP 模型的定位精度最高,其平面和高程的定位精度分别为 0.51 m 和 0.94 m,可能的原因是 PPP 模型中采用的分区综合改正数是由北斗系统每个分区内所有监测站综合计算得到,其误差修正总体效果较好。双差定位模型精度比 PPP 略差,主要原因是仅采用单基线,误差综合消除的效果可能存在不足。而区域伪距差分 SPP 模型由于未采用相位观测值,其定位精度较另外两种略差。此外,在采样率 20 s 的情况下,2 min 的数据仅有 6 个历元的数据点,在此情况下 PPP 和双差定位误差还没有较好收敛,伪距观测值的噪声对定位精度仍然存在较大影响。

表 2 3 种模式的定位结果

Tab.2 Positioning results for the three models m

定位模式	SPP	PPP	双差
平面	0.58	0.51	0.55
高程	1.10	0.94	0.98

### 3.2.2 定位误差空间分布

进一步分析各个测试站的定位精度,分析各个测站的平面和高程定位精度的空间分布情况,结果如图 4 所示。由图 4 可以看到,平面定位误差在空间上整体分布较均匀,而较多南部区域测站高程的精度则存在超过 1 m 的情况。平面最大误差为 1.87 m,高程最大误差达到了 2.12 m。

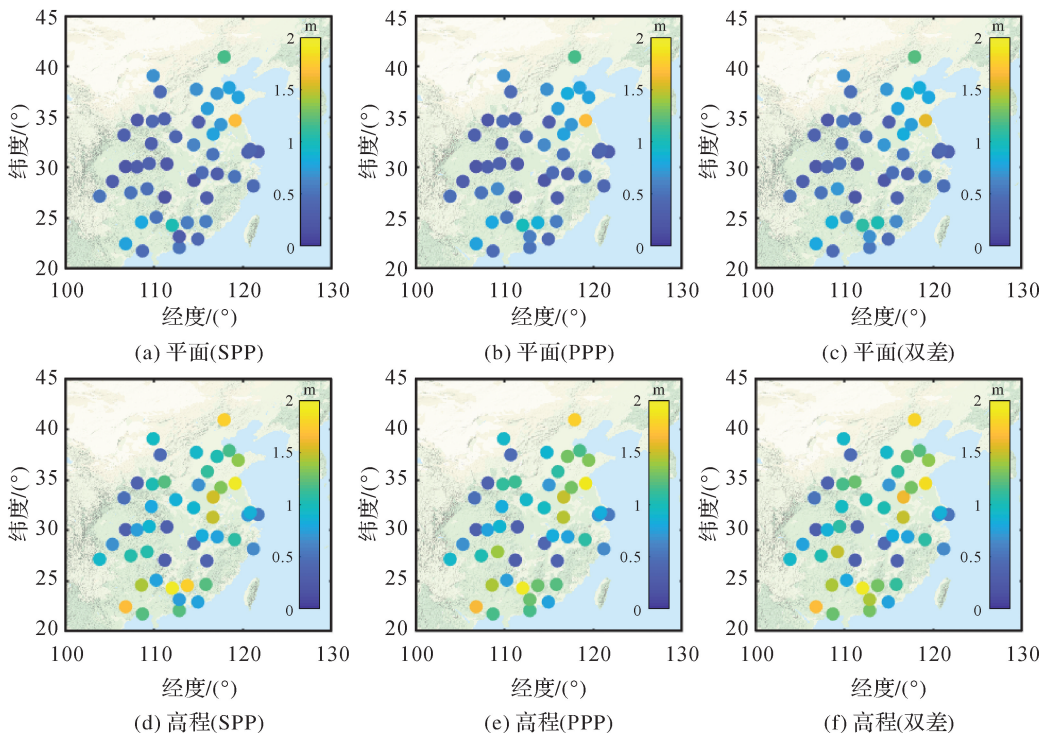


图 4 3 种定位模式下的用户定位误差 RMS 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of user positioning RMS error of the three positioning models

区域差分 SPP、分区综合正 PPP 两种定位模式都采用了多个监测站综合给出的改正数,通常距离其最近的监测站在计算综合改正数中所占的权重最大。而双差定位中选取了最近监测站,其定位精度可能与最近监测站的距离相关。图 5 统计了用户站定位精度与最近监测站距离的关系。由图 5 可知,由于数据时长短,整体定位误差噪声较大,定位精度与距离不存在明显的相关特性。

### 3.2.3 定位误差收敛情况

进一步分析精密定位误差的收敛情况,讨论观测数据时长对定位精度的影响。

对以上所有定位结果统计每个历元(每 20 s)定位误差绝对值的均值,比较 3 种定位模式下该绝对值随观测数据累计的变化情况。同时将定位误差按照测站与最近监测站的距离分为 <250、250~400 km、400~500 km 3 个区间分别进行统计,如图 6 所示,随着数据的积累,3 种模式下定位误差在平面和高程上均呈现出收敛的趋势。但受数据时长的限制,定位误差主要仍取决于伪距观测值的精度,因此 3 种定位模式的收敛速度均较慢。SPP 定位模式中,由于估计的参数较少,各参数间相关性较 PPP 和双差定位模式更小一

些,因此其初始定位误差更小。随着数据的累积和模糊度的逐步收敛,后两种定位模式的误差收敛更快,最终也优于 SPP 的结果。由图 6 可知,

当用户站距离最近参考站越近,由于公共误差改正效果更精细,其总体收敛性能也更优。

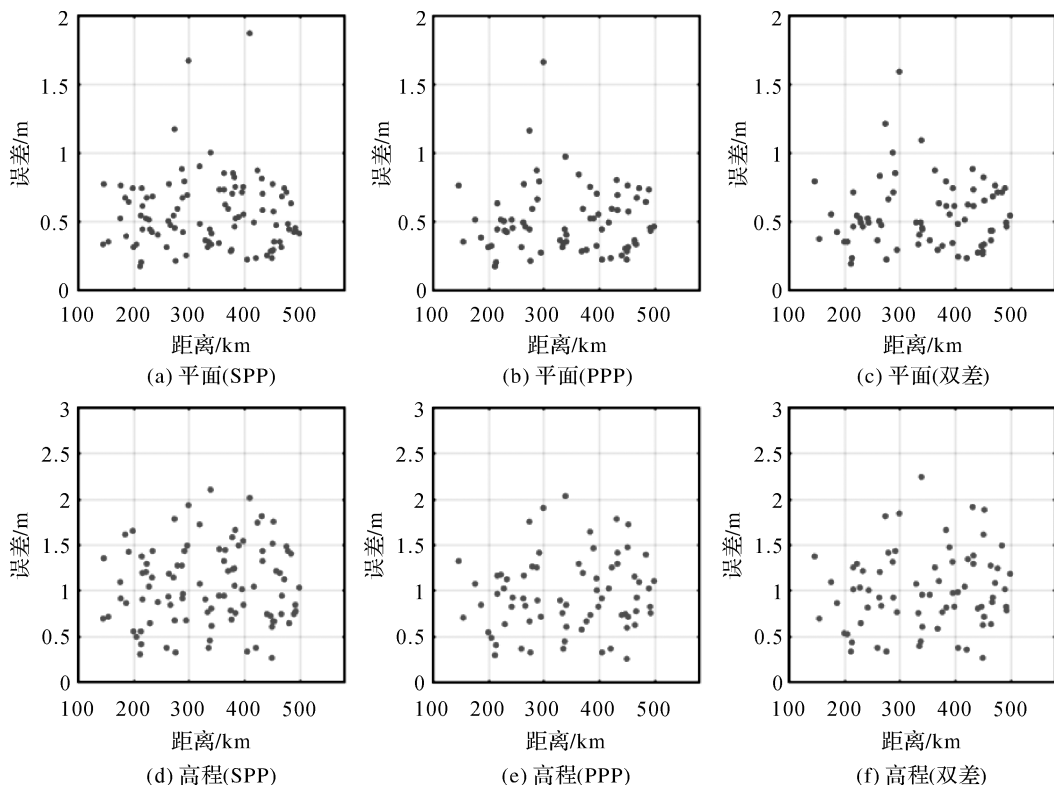


图 5 3 种模式下的用户定位误差与距离监测站距离关系

Fig.5 The relationship between user positioning error and its distance to the center station, where similar patterns are observed for the three models

### 3.2.4 定位误差影响因素

#### 3.2.4.1 BDS-2 与 BDS-3 融合优势

BDS-3 的开通增加了用户可见卫星的数量,从而有助于定位精度的改善。取其中 1 个测站 1 d 的结果进行分析,图 7 对比了仅 BDS-2、BDS-2 与 BDS-3 融合情况下定位情况的差异。图 7 中每 2 min 显示 1 个点,1 d 内共 720 个点。图中结果显示仅采用 BDS-2 系统的观测数据,3 种定位模式下的平面和高程精度都降低了 1 倍以上。由图 8 中该测站的可用卫星数和 PDOP (position dilution of precision) 的对比可以看出,BDS-3 卫星的加入大大增加了用户可见卫星数,同时改善了用户定位几何构型,从而改善了用户定位精度。

#### 3.2.4.2 入站频度(观测数据采样率的影响)

提高 RDSS 用户的入站频度,能够提供更多的观测数据。如果将目前 20 s 的入站频度提高至 5 s 的频度,则可用数据量将从最多 6 个历元增加到 24 个历元。取其中 1 个测站 1 d 的结果

进行分析,对比两种采样率情况下定位精度的差异。图 9 显示两种情况结果几乎一致,表明改变采样率对结果不产生影响。影响定位精度的在于数据的时长,在相同时长情况下,提高采样率无法提高精密定位报告的性能。

#### 3.2.4.3 与采用 IGS 事后产品定位结果的比较

北斗精密定位报告采用的卫星轨道、钟差产品为北斗中心站计算得到,其用到的观测数据为区域监测站网 + BDS-3 星间链路,产品精度与 IGS 采用全球观测网后处理产品精度有些差距。为消除轨道、钟差误差的影响,区域差分 SPP、分区综合正 PPP 都利用了中心站提供的实时差分改正数。为进一步验证以上误差对 3 种模式精密定位报告的影响,对以上数据采用 IGS 事后精密轨道、钟差产品按照相同的 3 种模型重新进行定位解算,3 种模式的结果对比如图 10 所示。与北斗中心站处理系统的结果相比,采用 IGS 精密轨道和钟差产品定位的统计精度基本相同,其差异

仅在毫米量级。

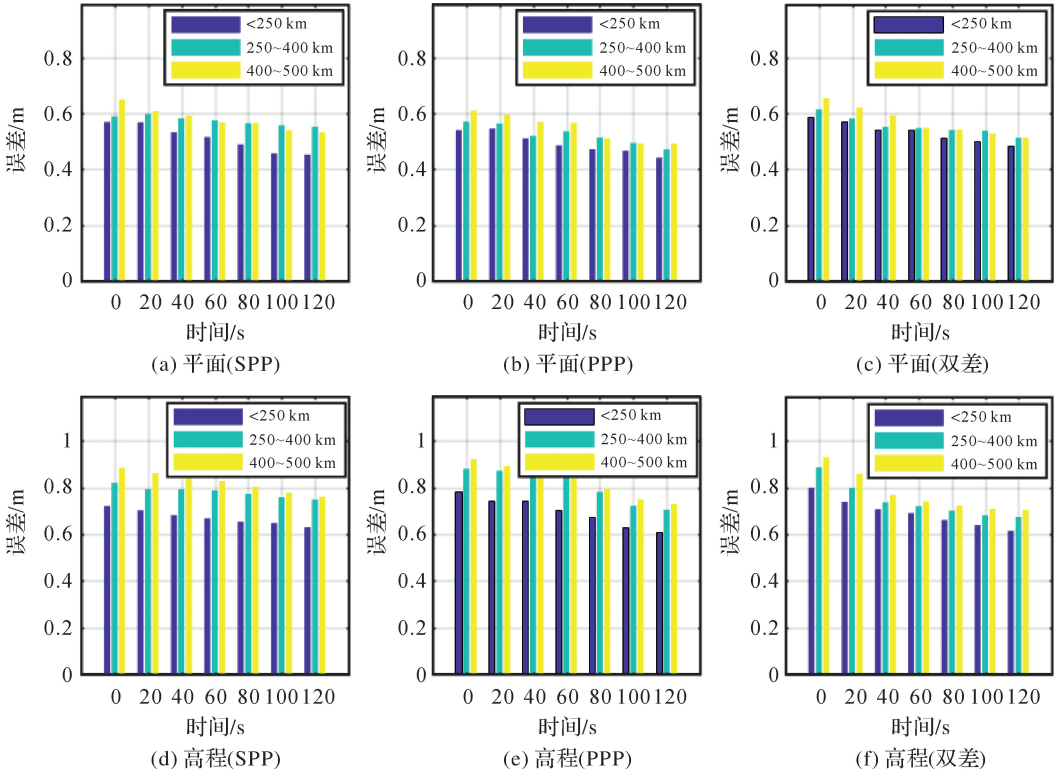


图 6 不同基线长度区间的定位收敛情况

Fig.6 Positioning convergence performance under different baseline length intervals of the three models

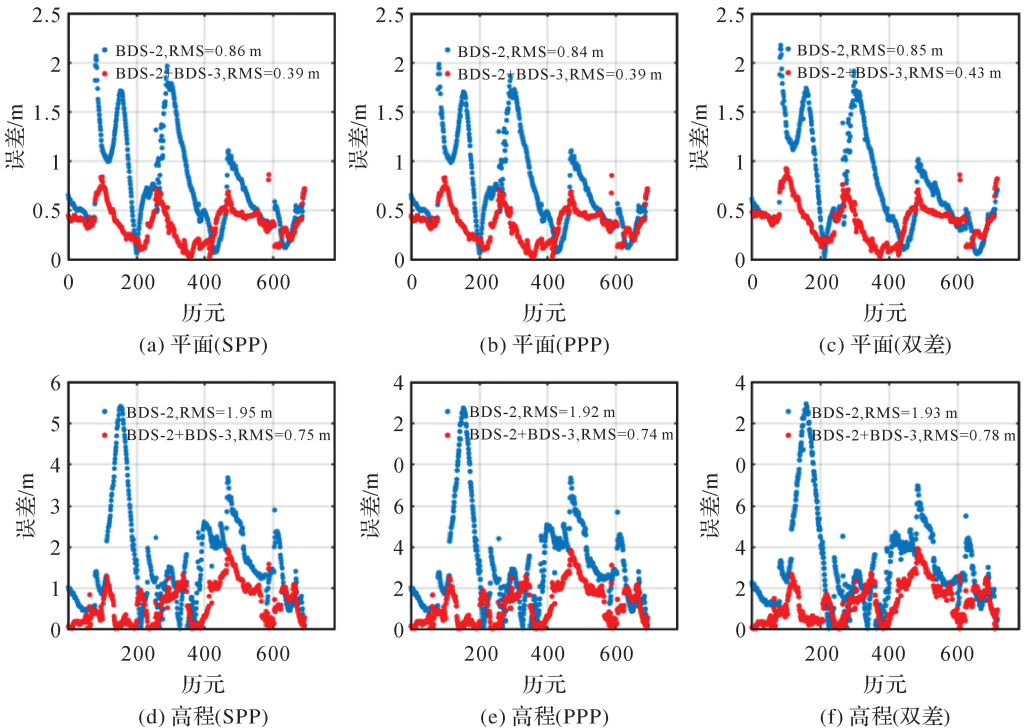


图 7 仅采用 BDS-2 系统、BDS-2 与 BDS-3 融合情况下精密定位比较

Fig.7 Comparison of precise positioning errors using BDS-2 data only and the combined BDS-2+BDS-3 observations



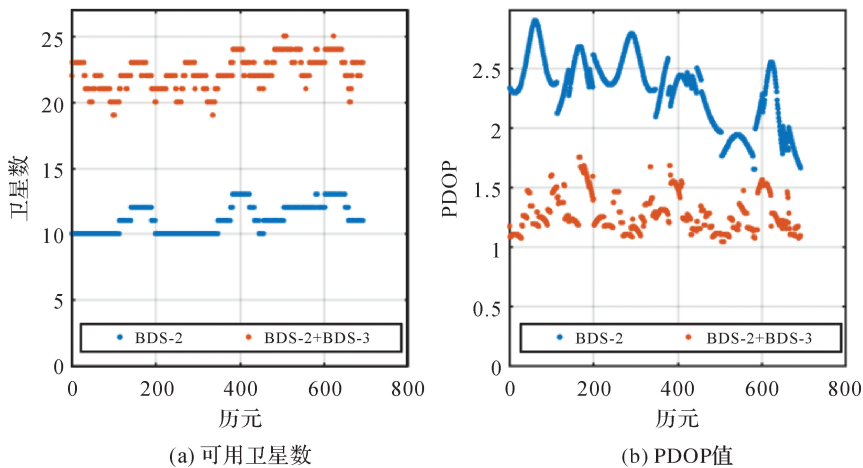


图 8 BDS-2、BDS-2 与 BDS-3 融合情况下可用卫星数及 PDOP 值对比

Fig.8 Comparison of the number of available satellites and PDOP values in the case of BDS-2 only and BDS-2+BDS-3 combination

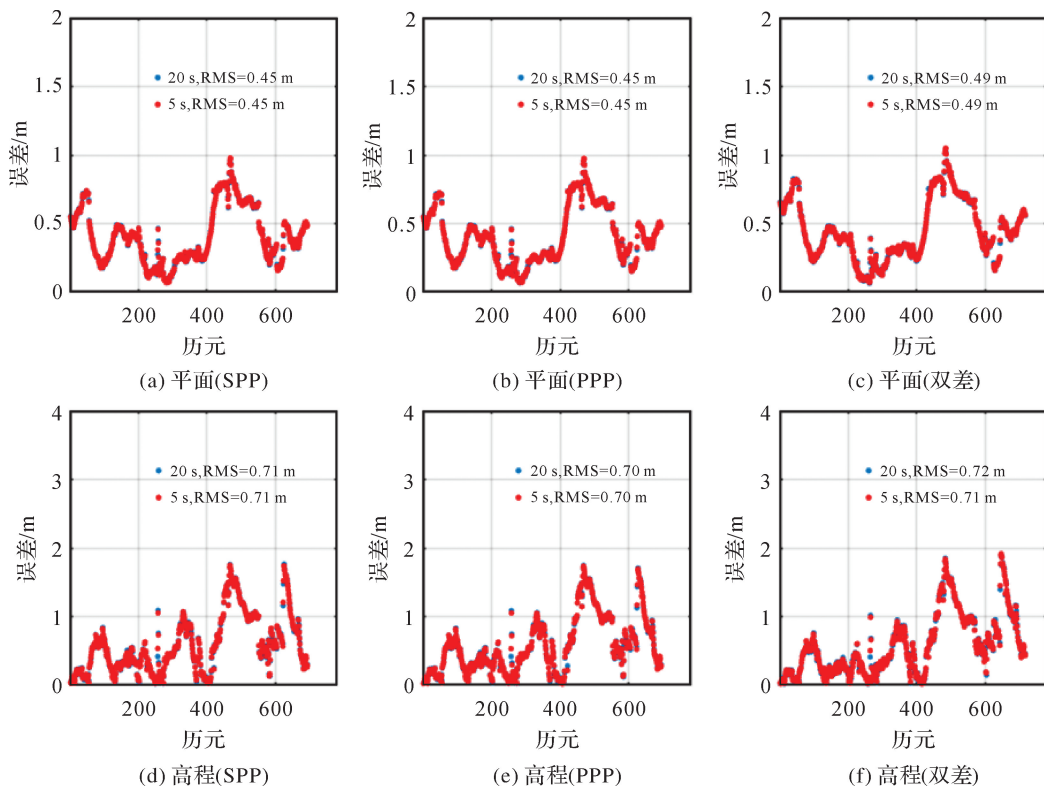


图 9 不同采样率(5 s 及 20 s)情况下的精密定位结果比较

Fig.9 Comparison of precise positioning results under data sampling rate of 5 s and 20 s

### 4 总结及展望

精密定位报告是北斗系统的特色服务,本文介绍了系统组成、工作流程和中心站数据处理算法。基于中心站的位置报告充分利用了中心站提供的各类精密参数信息和分布于我国境内的监测站实时观测数据,能够实现对 RDSS 入站用户的

精密定位位置报告。

利用分布于我国东部区域 50 个测站数据评估的结果表明:区域伪距差分定位(SPP)、精密单点定位(PPP)和双差相对定位 3 种模式平面精度都能满足系统优于 1 m 的指标要求,SPP 在高程方向上达到了 1.1 m,略差于指标要求。比较 3 种定位模型,整体定位误差分布相近,基于分区综合

改正的 PPP 性能最优:平面和高程的定位精度 (RMS)分别为 0.51 m 和 0.94 m。在仅采用 BDS-2 数据的情况下,定位精度下降可达 1 倍以上。对入站申请频度进行分析,对比目前 20 s 的入站

频度及提高至 5 s 的频度的结果,定位精度不受影响。与北斗中心站处理系统的结果相比,采用 IGS 精密轨道和钟差产品的定位结果仅存在毫米级的差异。

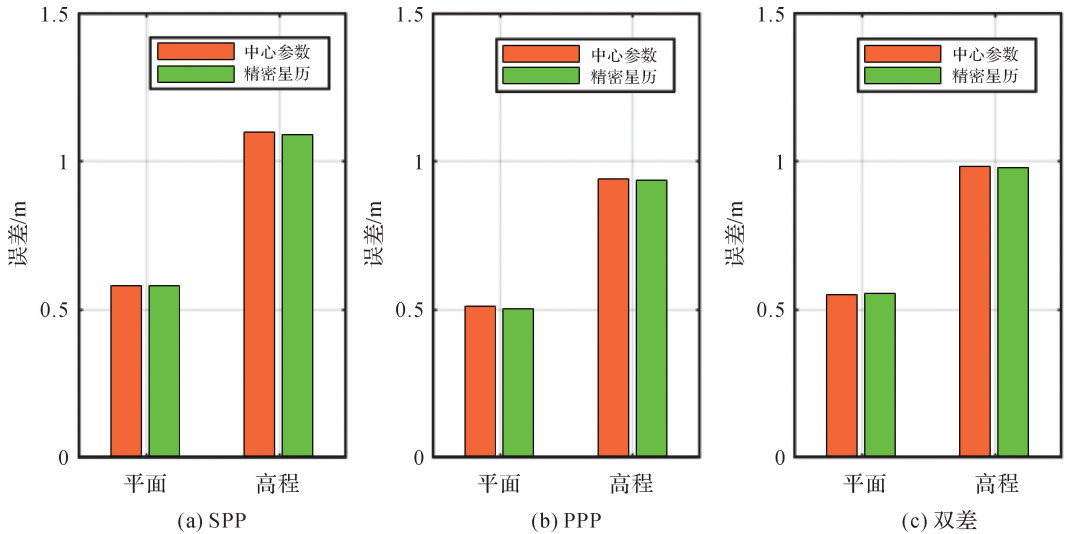


图 10 采用 IGS 精密星历定位结果与北斗中心站精密定位报告结果的比较

Fig.10 Comparison between positioning results using precise products of the IGS and BDS MCC

北斗精密定位报告系统除了采用回传观测数据在中心站进行处理的模式之外,还包含通过 RDSS 链路向用户播发改正数的方式进行用户端处理。特别是针对基于全球短报文的精密定位服务,由于单条短报文长度不得超过 40 个汉字 (560 bit),用户很难实现观测数据的回传。因此可以将卫星轨道改正数、卫星钟差改正数、分区综合改正数、载波相位小数等实时精密修正参数通过北斗卫星进行播发,用户基于北斗通信链路接收精密修正参数,进行自主精密定位并将定位结果通过通信链路上报,从而实现全球的精密定位位置报告。

## 参考文献:

- [1] 谭述森. 广义卫星无线电定位报告原理及其应用价值[J]. 测绘学报, 2009, 38(1): 1-5.  
TAN Shusen. Theory and application of comprehensive RDSS position and report[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(1): 1-5.
- [2] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.  
YANG Yuanxi. Progress, contribution and challenges of compass/BeiDou satellite navigation system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6.
- [3] 赵树强, 许爱华, 张荣之, 等. 北斗一号卫星导航系统定位

- 算法及精度分析[J]. 全球定位系统, 2008(1): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9268.2008.01.004.
- ZHAO Shuqiang, XU Aihua, ZHANG Rongzhi, et al. Positioning algorithm and precision analysis of BeiDou-I satellite navigation system[J]. GNSS World of China, 2008(1): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9268.2008.01.004.
- [4] 谭述森. 广义 RDSS 全球定位报告系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.  
TAN Shusen. The comprehensive RDSS global position and reporting system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [5] 谭述森. 北斗系统创新发展与前景预测[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1284-1289. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017.20170329.  
TAN Shusen. Innovative development and forecast of BeiDou system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1284-1289. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017.20170329.
- [6] 焦诚, 窦长江, 樊家琛, 等. 基于卫星导航 RNSS/RDSS 组合业务的三星定位算法[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(8): 1-4. DOI: 10.11809/scbgxb2016.08.024.  
JIAO Cheng, DOU Changjiang, FAN Jiacheng, et al. Tri-satellite quick positioning algorithm based on generalized RNSS/RDSS[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(8): 1-4. DOI: 10.11809/scbgxb2016.08.024.

- [7] XING Nan, SU Ranran, ZHOU Jianhua, et al. Analysis of RDSS positioning accuracy based on RNSS wide area differential technique[J]. *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2013, 56(10): 1995-2001. DOI: CNKI;SUN;JGXG.0.2013-10-025.
- [8] 赵姣姣, 曲江华, 袁洪. 北斗 RNSS-RDSS 组合模糊度解算方法[J]. *测绘学报*, 2016, 45(4): 404-410. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150164.  
ZHAO Jiaojiao, QU Jianghua, YUAN Hong. A new ambiguity resolution method using combined RNSS-RDSS of BeiDou[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(4): 404-410. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150164.
- [9] 蔡洪亮, 孟轶男, 耿长江, 等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估: 定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. *测绘学报*, 2021, 50(4): 427-435. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200549.  
CAI Hongliang, MENG Yinan, GENG Changjiang, et al. BDS-3 performance assessment: PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(4): 427-435. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200549.
- [10] 原玉磊, 黄杰, 陶静. 一种北斗无高程 RDSS 定位模型及其误差分析[J]. *计算机应用与软件*, 2017, 34(3): 114-118. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2017.03.020.  
YUAN Yulei, HUANG Jie, TAO Jing. A BeiDou RDSS positioning model and its error analysis without elevation[J]. *Computer Applications and Software*, 2017, 34(3): 114-118. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2017.03.020.
- [11] 张天桥, 王宏兵, 原亮, 等. 北斗 RDSS 定位报告与 SARSAT 卫星搜救业务性能比较分析[J]. *测绘科学与工程*, 2014, 34(6): 74-78.  
ZHANG Tianqiao, WANG Hongbin, YUAN Liang, et al. Comparative performance-analysis between BDS RDSS position report and the SARSAT service[J]. *Geomatic Science and Engineering*, 2014, 34(6): 74-78.
- [12] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5005-5017. DOI: 10.1029/96JB03860.
- [13] 陈俊平, 张益泽, 周建华, 等. 分区综合改正: 服务于北斗分米级星基增强系统的差分改正模型[J]. *测绘学报*, 2018, 47(9): 1161-1170. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170156.  
CHEN Junping, ZHANG Yize, ZHOU Jianhua, et al. Zone correction: a SBAS differential correction model for BDS decimeter-level positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(9): 1161-1170. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170156.
- [14] CHEN Junping, WANG Ahao, ZHANG Yize, et al. BDS satellite-based augmentation service correction parameters and performance assessment[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 766-783. DOI: 10.3390/rs12050766.
- [15] CHEN Junping, ZHANG Yize, YU Chao, et al. Models and performance of SBAS and PPP of BDS[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(4): 1-14. DOI: 10.1186/s43020-022-00065-3.
- [16] 陈俊平, 王阿昊, 张益泽, 等. 北斗广域差分米级定位的分区切换算法[J]. *测绘学报*, 2019, 48(7): 822-830. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180545.  
CHEN Junping, WANG Ahao, ZHANG Yize, et al. PPP algorithm using BDS new SBAS differential corrections[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 822-830. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180545.
- [17] 阳仁贵, 袁运斌, 欧吉坤. 相位实时差分技术应用于飞行器交会对接研究[J]. *中国科学: 物理学、力学、天文学*, 2010, 40(5): 651-657. DOI: CNKI;SUN;JGXX.0.2010-05-023.  
YANG Rengui, YUAN Yunbin, OU Jikun. Real-time GNSS carrier phase differential technique for spacecraft rendezvous and docking[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2010, 40(5): 651-657. DOI: CNKI;SUN;JGXX.0.2010-05-023.
- [18] CHEN Junping, WANG Jungang, WANG Ahao, et al. SHAtropE—a regional gridded ZTD model for China and the surrounding areas[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 165-181. DOI: 10.3390/rs12010165.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2021-07-13

修回日期: 2022-03-05

第一作者简介: 陈俊平(1980—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为卫星大地测量。

First author: CHEN Junping(1980—), male, researcher, majors in satellite geodesy.

E-mail: junping@shao.ac.cn