

Realization of BDS Single-Frequency Point Positioning of Sub-Meter Accuracy

Heng Wang^{1,2}, Junping Chen², Yize Zhang^{1,2}

1 Tongji University, College of Surveying and GEO-Informatics, Shanghai 200092, China

2 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

1. wh890607@163.com

Abstract: BDS regional satellite navigation system on December 27, 2012 officially started to provide services, the system consists of 14 satellites, including five Geostationary Orbit satellites, five Inclined Geosynchronous Orbit satellites and the four Medium Earth Orbit satellites. To improve service capability of BDS in high-precision navigation and positioning in China and its surrounding areas, we carried out the research on “BDS Decimeter-level Wide-area SBAS”. The new system aims at providing users with meter to decimeter level navigation and positioning service by broadcasting more precise differential corrections. Key correction parameters of the new system are introduced in this paper. We focus on the positioning algorithms and performance evaluation for single-frequency users. Real single-frequency tracking data of stations distributing at various locations are used in the evaluation. In the data analysis, epoch-wise kinematic coordinates are compared to the known reference values and coordinate accuracy are evaluated in terms of RMS and STD. Results show that at reference stations, which are used for the differential correction calculation, the coordinate accuracy is about 0.3-0.5m for the horizontal components and 0.3-0.5m for the vertical component; while it is 0.3-0.6m for the horizontal and 0.7-0.8m for the vertical components at a non-reference station.

Keywords: SBAS; zone-divided correction; single-frequency point positioning; sub-meter

北斗亚米级单频单点定位系统实现

王恒^{1,2}, 陈俊平¹, 张益泽^{1,2}

1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海, 中国, 200092

2. 中国科学院上海天文台, 上海, 中国, 200030

1. wh890607@163.com

【摘要】 北斗区域卫星导航系统于 2012 年 12 月 27 日正式开始提供服务, 系统由 14 颗卫星组成, 包括 5 颗地球静止轨道卫星、5 颗倾斜地球同步轨道卫星和 4 颗中圆地球轨道卫星。目前系统已经实现了重点区域的服务指标。在系统稳定运行的前提下, 为进一步提升北斗系统的服务性能, 我们开展了“北斗分米级广域星基增强系统”的研究工作。本文简要介绍了该系统的一些核心参数及其使用说明。尤其是针对单频用户, 重点介绍了用户接收机基于分区综合改正数的伪距相位融合定位算法。采用中国境内分布于不同区域的用户站观测数据, 对“北斗分米级广域星基增强系统”单频用户实时动态定位性能进行了初步验证。统计结果表明: 参考站(参与广域差分改正信息解算)的单频平面精度达到 0.3~0.4m, 单频高程精度达到 0.3~0.5m, 非参考站(未参与广域差分改正信息解算)的单频平面精度为 0.3~0.6m, 单频高程精度达到了 0.7~0.8m。

【关键词】 星基增强, 广域差分改正信息, 单频单点定位, 亚米级

1 引言

传统精密定位服务主要依靠相对定位技术来实现, 但相对定位也具有依赖基准站、受距离限制等缺点, 因此单点定位技术一直受到业界用户的关注。国际 GNSS 组织 (IGS) 于 1994 年即开始提供精密轨道和钟差用于改善 GPS 系统的单站定位精度^[1], 北斗系统作为中国独立运营的区域卫星导航系统, 目前还没有

机构提供类似的服务。为此, 我们开展了“北斗分米级广域星基增强系统”的研究工作。本文基于该系统提供的差分改正信息, 对单频用户进行了实时动态定位性能的验证, 对定位结果进行了分析。

2 差分改正信息介绍

“北斗分米级广域星基增强系统”利用分布在中国区域内的数十个地面参考站连续跟踪北斗卫星信

号, 并将观测数据实时传输到数据处理中心, 处理中心据此对观测数据的各项误差源进行区分并模型化, 得到分区改正数、等效钟差以及轨道改正数等差分改正信息。差分改正信息通过地面站上传至北斗星座中的地球同步卫星并播发给用户使用。目前该系统正在逐步具备实际应用的条件。

2.1 分区改正数

距离较近的两个站所包含的轨道误差、卫星钟差以及与信号传播有关的误差基本一致, 在已知精确坐标的基准站上对每颗观测到的卫星分别计算其伪距和相位的 0-C (观测值减改正值) 残差:

$$OMC_{P_r^s} = P_{IF} - \rho_r^s - trop_r^s - dt_r + dt^s + rela^s \quad (1)$$

$$OMC_{L_r^s} = L_{IF} - \rho_r^s - trop_r^s - dt_r + dt^s + rela^s + A_r^s \quad (2)$$

式中, P_{IF} 、 L_{IF} 分别表示伪距和相位的无电离层组合观测值, ρ_r^s 表示卫星与接收机之间的几何距离, $trop_r^s$ 表示对流层延迟, dt_r 为接收机钟差, dt^s 为卫星钟差, $rela^s$ 为相对论效应引起的误差, A_r^s 为按距离表达的非整数的模糊度。

由于基准站精确坐标已知, 故卫星到接收机的几何距离可以计算出来, 对流层延迟通过模型进行改正, 接收机钟差利用伪距观测值事先计算出来, 卫星钟差通过广播星历求得, 相对论误差通过模型进行改正, 因此该 0-C 残差中将包含模糊度 (对相位而言)、对流层延迟残余误差、轨道误差、钟差残余误差以及其它公共误差, 此即分区综合改正数。分区改正数与距离相关, 因此在使用时应选取用户接收机所在分区的相应改正数。

2.2 等效钟差及轨道误差

用户在进行天线相位中心、相对论效应、潮汐影响等一系列公共误差的改正后, 仍然受到剩余误差的影响^[2]。针对影响区域卫星导航系统基本服务精度的各种因素, 北斗系统利用区域均匀分布的已知精确坐标的地面参考站, 对各部分误差计算出服务区域内卫星星历及钟差的预报误差所引起的平均用户距离误差。由于卫星钟差与轨道误差强相关, 同时求解轨道误差与卫星钟差误差会导致法方程严重病态, 因此将钟差与轨道误差分步求解, 分别得到卫星钟差误差, 即等效钟差, 以及轨道误差。

3 单频单点定位数学模型

3.1 观测方程

利用北斗伪距和载波相位进行定位的基本观测方程为:

$$\Phi_r^s = \rho_r^s + (dt_r - dt^s) \cdot c - I_r^s + m \cdot T_r^s + A_r^s + \xi + \phi_\phi + b_\phi + \varepsilon_\phi \quad (6)$$

$$P_r^s = \rho_r^s + (dt_r - dt^s) \cdot c + I_r^s + m \cdot T_r^s + \xi + b_p + \varepsilon_p \quad (7)$$

式中, Φ_r^s 表示按距离表达的相位观测值, P_r^s 表示伪距观测值, ρ_r^s 表示卫星与接收机之间的几何距离, dt_r 表示接收机钟差, dt^s 表示卫星钟差, c 表示真空状态下的光速, I_r^s 表示电离层延迟, m 为对流层投影函数, T_r^s 表示天顶对流层延迟, A_r^s 为按距离表达的非整数的模糊度, ξ 表示固体潮、相对论效应、天线相位中心等引起的一类误差, ϕ 表示天线相位缠绕, b_ϕ 表示硬件延迟, b_p 表示差分码偏差 (DCB), ε_ϕ 和 ε_p 分别表示相位和伪距观测噪声^[3]。

单频单点定位不能像双频那样通过组成无电离层组合观测值消除电离层的影响, 考虑到伪距观测值和相位观测值中包含的电离层延迟大小相等且方向相反, 将其组成半和观测值, 并联立伪距观测方程^[4], 则有:

$$\Phi_{r,LC}^s = \frac{\Phi_r^s + P_r^s}{2} = \rho_r^s + (dt_r - dt^s) \cdot c + m \cdot T_r^s + A_{r,LC}^s + \xi + \phi_{LC} + b_{LC} + \varepsilon_\phi \quad (3)$$

$$P_r^s = \rho_r^s + (dt_r - dt^s) \cdot c + I_r^s + m \cdot T_r^s + \xi + b_p + \varepsilon_p \quad (4)$$

式中, $A_{r,LC}^s = \frac{1}{2} \cdot A_r^s$, $\phi_{LC} = \frac{1}{2} \cdot \phi_\phi$, $b_{LC} = \frac{1}{2} \cdot (b_\phi + b_p)$ 。

3.2 周跳探测

单频周跳探测相较于双频来说手段更少, 考虑到实时定位的特点, 本文主要利用伪距/相位组合观测值来进行单频的周跳探测^[3], 组合观测值表达如下:

$$\Lambda = P_r^s - \Phi_r^s = 2I_r^s - A_r^s + b_p - b_\phi - \phi_\phi + \varepsilon_\Lambda$$

等式右边 b_p (DCB) 和 b_ϕ (硬件延迟) 可以认为在较短时间内是稳定的, ϕ_ϕ (相位缠绕) 可以通过模型较准确地改正, 剩下的不确定量主要是 I_r^s (电离层延迟) 和 ε_Λ (噪声, 主要是伪距观测噪声), 因此电离层延迟和伪距噪声的影响是本方法能否探测出周跳的关键。此外, 本文还配合使用了多项式拟合法进行周跳探测, 其中多项式阶数为四阶, 拟合窗口为 14 个历元。如探测到周跳, 则该历元重新初始化模糊度参数。

3.3 误差项处理

本文在对伪距观测值进行电离层延迟改正时主要采用了系统提供的格网模型，考虑到该格网模型是基于区域参考站建立的，一些偏远地区格网点数据不够，此时程序将会调用 Klobuchar 模型进行改正，精度虽然有所下降，但对于伪距观测值来说影响并不大。

对流层干延迟部分利用模型进行改正，湿延迟部分则作为参数进行估计。其他误差项，如卫星天线相位中心、潮汐影响、相对论效应等等，都通过现有的模型进行改正。

剩余的综合误差通过前述的差分改正信息进行改正。

3.4 参数估计

实时动态定位为了减轻计算负荷通常采用卡尔曼滤波或者序贯平差方法，本文选用了卡尔曼滤波进行参数估计^[5]：

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k/k-1} + K_k (y_k - h(\hat{x}_{k/k-1})) \quad (9)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} \quad (10)$$

式中， K_k 为增益矩阵， \hat{x}_k 和 P_k 分别是状态向量和它的协方差阵， H_k 为线性化后的观测模型的系数阵， R_k 为观测误差的协方差阵， y_k 为观测向量， h 为观测向量的各项改正，下标 k 表示更新后的量， $k/k-1$ 表示更新前的量。待估参数包括测站坐标、接收机钟差、对流层天顶湿延迟以及模糊度参数。根据使用的接收机性能，一般将相位观测误差设为 3mm 左右，伪距观测误差一般设为相位观测误差的 100 倍左右。参数初值通过伪距单点定位来提供，为避免粗差影响，对伪距单点定位残差进行判断，如超过阈值，则逐次剔除数据并重新迭代，直至残差符合条件。

4 数据计算与精度分析

4.1 参考站数据测试

本文首先对参与差分改正信息解算的参考站接收机观测数据进行验证，选取了位于北京、南京以及汕头的三个参考站，数据采集时间为 2016 年 1 月 16 日，采样率为 1s，按 30s 间隔计算了单频动态定位结果，并与测站的真实坐标作差，分别绘制了加入差分改正和不加差分改正正在 E、N、U 三个方向上的定位结果，结果见下图：

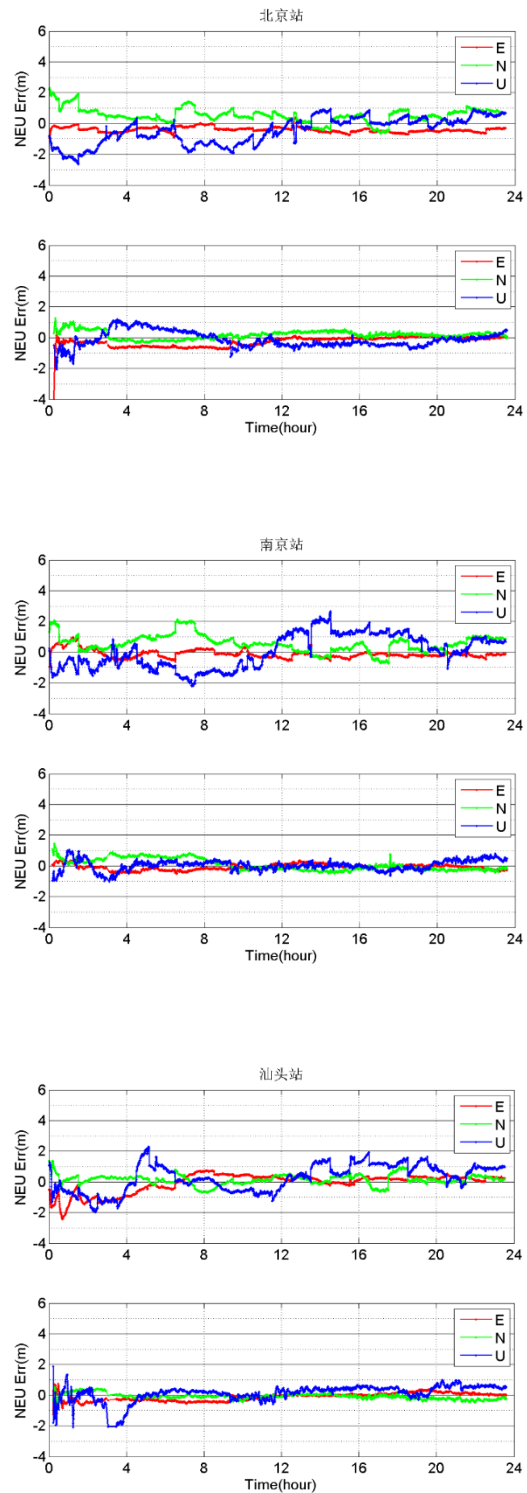


Figure 1. Comparison of results of single-frequency real-time kinematic point positioning with and without differential corrections at reference stations. Up: without differential corrections, below: with differential corrections

图 1. 利用参考站观测数据进行加差分改正与不加差分改正的单频实时动态定位结果对比。每组上图为不加差分改正定位结果，下图为加下图为加入差分改正定位结果

如图 1 所示, 加入差分改正后的定位结果相对于未加差分改正的结果有较明显的改善, 无论是收敛时间还是收敛后的精度。星历切换时的跳跃得到了有效抑制, 波动减小很多。尽管如此, 从图中可以看到, 加入差分改正后的定位结果仍然存在一些跳跃, 怀疑是一些小周跳未能探测出来, 本文为了避免周跳探测过于严格, 导致过多不必要的模糊度初始化, 给出了较为宽松的阈值, 所以一些小周跳有可能无法探测出来。

Table 1. Comparison of RMS of single-frequency real-time kinematic point positioning with and without differential corrections at reference stations.

表 1. 利用参考站观测数据进行加差分改正与不加差分改正的定位结果 RMS 值对比

RMS (m)	北京站		南京站		汕头站	
	未加差分改正	加差分改正	未加差分改正	加差分改正	未加差分改正	加差分改正
East	0.435	0.377	0.292	0.193	0.623	0.271
North	0.707	0.313	0.784	0.384	0.352	0.197
Up	0.988	0.524	1.094	0.333	0.927	0.497
3D	1.290	0.717	1.378	0.544	1.171	0.599

Table 2. Comparison of STD of single-frequency real-time kinematic point positioning with and without differential corrections at reference stations.

表 2. 利用参考站观测数据进行加差分改正与不加差分改正的定位结果标准差对比

STD (m)	北京站		南京站		汕头站	
	未加差分改正	加差分改正	未加差分改正	加差分改正	未加差分改正	加差分改正
East	0.163	0.283	0.269	0.179	0.620	0.247
North	0.461	0.254	0.543	0.376	0.322	0.181
Up	0.863	0.507	1.093	0.330	0.887	0.472

从表 1 可以看出, 加入差分改正后, 参考站的单频平面精度达到 0.3~0.4m, 高程精度达到 0.3~0.5m, 高程方向的精度相对水平方向要低一些, 各个方向的精度都有所改善, 改善幅度最少也有约 13%, 大多数改善 40%~60%。表 2 给出了两种模式下标准差的对比结果, 除了北京站在 E 方向出现例外, 其它情况下各站点各个方向都表现为加差分改正后的结果标准差更小, 这表示加入差分改正后的定位结果离散度更小, 更为稳定。

4.2 普通站数据测试

为了验证更一般化的情况, 本文对普通站点观测

数据进行了验证。测试数据接收自某国产型号接收机, 数据采集地点位于成都市, 采集时间为 2016 年 1 月 27 日, 采样率为 30s, 接收机所处环境为某科技园区, 附近存在一些干扰源, 可能对数据质量带来一定影响。下图给出了单频实时动态定位的结果:

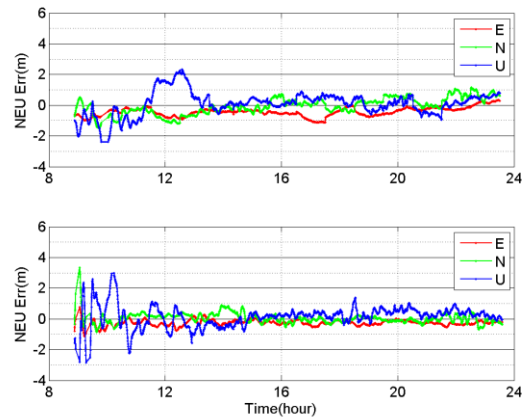


Figure 2. Comparison of results of single-frequency real-time kinematic point positioning with and without differential corrections at a non-reference station. Up: without differential corrections, below: with differential corrections

图 2. 普通站观测数据进行加差分改正与不加差分改正的单频实时动态定位结果对比。上图为不加差分改正定位结果, 下图为加入差分改正定位结果

Table 3. Comparison of RMS and STD of single-frequency real-time kinematic point positioning with and without differential corrections at a non-reference station.

表 3. 普通站观测数据进行加差分改正与不加差分改正的定位结果 RMS 值及标准差对比

	RMS (m)		STD (m)	
	未加差分改正	加差分改正	未加差分改正	加差分改正
East	0.518	0.315	0.290	0.186
North	0.540	0.313	0.538	0.310
Up	0.761	0.677	0.751	0.656
3D	1.0677	0.809	--	--

从表 3 可以看出加差分改正后的定位结果在各个方向都有所改善, 水平方向精度提升 40%左右, 提升效果明显, 高程方向精度提高稍低, 为 11%。结合图 2, 在定位开始之后, 加差分改正的定位结果中高程方向出现较大幅度波动, 且持续了两三个小时后才趋于平缓, 这也是导致高程方向 RMS 值偏大的原因, 这部分高程方向的波动是因为接收机刚开机阶段信号不稳定, 数据质量较差, 滤波先验信息给的不合适使得差分改正

信息尤其是分区改正数（仅对相位观测值进行改正）加剧了这部分定位结果的波动。为更好地说明结果的可靠性，之后，又在该地区连续采集了四天数据进一步验证定位效果，结果见表 4：

Table 4. RMS of single-frequency real-time kinematic point positioning with differential corrections at a non-reference station.

表 4.普通站观测数据进行加差分改正改正的定位结果 RMS 值/m

日期	East	North	Up	3D
16-12-20	0.522	0.338	0.606	0.869
16-12-21	0.340	0.232	0.737	0.844
16-12-22	0.283	0.238	0.435	0.570
16-12-23	0.339	0.316	0.656	0.803

从表 4 可以看出，加差分后的定位效果仍然保持较好的水平，总体来看，平面精度可以达到 $0.3 \sim 0.6\text{m}$ ，高程精度可以达到 $0.7 \sim 0.8\text{m}$ 。

5 结论

本文基于“北斗分米级广域星基增强系统”对北斗观测数据进行了单频单点定位的验证。利用参考站数据得到的验证结果精度提升明显，一般接收机得到的验证结果也有一定改善，基本实现了亚米级的单频单点定位要求。需说明的是，本文采用的观测数据都是以静态方式接收的，接收机安置在固定站点并未发生移动，所以本文进行的动态定位事实上是一种模拟动态条件，真实的动态环境获得的观测数据更容易受到干扰，数据质量可能会更差一些。此外，本文使用的差分改正信息还未具备在线播发条件，而是事后通过时间匹配进行理论上的实时定位验证，因此未来将会进行真正意义上的实时动态验证。

单频单点定位面临的困难之一是周跳探测问题，本文采用的策略尚不能可靠实现小周跳的探测，为此需要进一步研究更有效的方法。此外，本文采用卡尔曼滤波进行参数估计存在先验信息难确定的问题，不同的数据需要适当调整先验信息才能获得较好的定位结果，因此需要对该方法进行改进或者换用其他参数估计方法，如序贯最小二乘法。

参考文献：

- [1] Kouba J, Heroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products [J]. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12-28
- [2] Cao Yueling, Zhou Shanshi, Hu Xiaogong, et al. Realization of Wide Area Differential Augmentation System and Integrity Monitoring by the Regional Satellite Navigation System [A]. China Satellite Navigation Conference [C], 2011. 曹月玲, 周善石, 胡小工等。区域卫星导航系统的广域差分增强服务及完好性[A], 中国卫星导航年会[C], 2011
- [3] Oskar Sterle, Bojan Stopar, et al. Single-frequency precise point positioning: an analytical approach [J]. J Geod (2015) 89:793-810
- [4] Leick A (2004) GPS satellite surveying, 3rd edn. Wiley, Hoboken, NJ
- [5] Liu Dajie, Yu Zhenglin. Dynamic Surveying System and Kalman Filtering[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1988, 04:254-262. 刘大杰, 于正林。动态测量系统与卡尔曼滤波[J], 测绘学报, 1988, 04:254-262