

北斗星基增强系统性能提升初步评估

陈俊平^{1,2}, 胡一帆^{1,3}, 张益泽^{1,3}, 周建华⁴

(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. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; 4. 北京卫星导航中心, 北京 100049)

摘要: 介绍了北斗星基增强系统及广域差分改正数算法. 采用 10 个测站 6 d 的相位平滑伪距和相位观测数据, 初步评估了北斗星基增强系统性能提升后的用户定位性能. 结果表明: 用户相位平滑伪距增强定位精度在东、北和天顶 3 个方向上分别达到 0.3 m、0.4 m 和 0.8 m, 相对于普通导航平均三维提高了 53%; 基于精密单点定位技术的用户相位增强定位坐标平均在 7 min 内收敛到 1 m 以内, 收敛之后水平坐标精度能达到 0.1 m, 高程坐标精度能达到 0.2 m, 两项指标都优于基于外部后处理精密轨道钟差的精密单点定位结果.

关键词: 北斗卫星导航定位系统; 星基增强系统; 广域差分信息; 实时动态精密单点定位

中图分类号: P228.1

文献标志码: A

Preliminary Evaluation of Performance of BeiDou Satellite-based Augmentation System

CHEN Junping^{1,2}, HU Yifan^{1,3}, ZHANG Yize^{1,3}, ZHOU Jianhua⁴

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100049, China)

Abstract: BeiDou navigation satellite system (BDS) integrates legacy PNT and authorized differential service, where differential service is provided by the satellite-based augmentation system (SBAS). The latest progress of the BDS SBAS development were introduced and the performance of pseudo-range based and carrier phase based user differential positioning was evaluated. Observations of 10 stations in Chinese mainland were used. The results show that the coordinate accuracy of the pseudo-range differential positioning (SBAS SPP) reaches 0.4 m, 0.3 m and 0.8 m in the North,

East and Up directions respectively, which shows an improvement of 53% over the legacy SPP. For the evaluation of carrier phase based positioning, kinematic precise point positioning (SBAS PPP) was performed and compared to the kinematic PPP results based on post processing precise satellite orbits and clocks (POST PPP). The results show that the SBAS PPP kinematic coordinate estimates converge to 1 meter in 7 mins on average and the coordinate accuracy reaches 0.1 meter in horizontal and 0.2 meter in vertical component after convergence. Compared to the results of POST PPP, SBAS PPP shows better accuracy and shorter converge time, which indicates that the accuracy of BDS satellite orbits has been increased and clocks still have to be improved.

Key words: BeiDou satellite navigation system; satellite-based augmentation system; wide-area differential information; real-time kinematic PPP

北斗卫星导航系统融合了基本服务(legacy PNT)与星基增强服务(SBAS), 为用户提供公开服务与授权服务. 其中, 公开服务为用户免费提供基本导航信息, 而授权服务为授权用户提供差分完好性等信息以提高其服务性能^[1-5]. 近年来, 我国北斗星基增强系统在基本导航参数的基础上, 利用服务区域内均匀分布的地面监测站数据, 计算差分改正数, 并通过 GEO 卫星(geosynchronous satellite)向用户进行广播. 考虑到国际竞争的加剧以及系统更高的服务性能的需求, 北斗系统开通服务之后, 系统持续进行了系统服务性能提升的研究与建设工作. 其中, 星基增强系统性能提升主要包括: 一是提升现有差分信息的改正精度, 从而在不改变系统播发协议以及用户算法的前提下, 实现服务范围内用户米级定位精度; 二是增加轨道改正数、分区综合改正数

收稿日期: 2016-09-01

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2014AA123102); 国家自然科学基金(11673050, 11273046)

第一作者: 陈俊平(1980—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为卫星导航高精度数据分析. E-mail: junping@shao.ac.cn

通讯作者: 周建华(1962—), 女, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为卫星导航地面运行与控制系统.

E-mail: julianma@263.net.cn

等的设计,提高星基增强用户实时改正的精度,进而用户能够利用相位观测数据进行定位;三是对播发协议中未定义的预留资源重新编排与设计,实现新增参数的上行注入,从而用户只需升级其软件,就能实现分米级定位精度。

北斗广域分米级星基增强系统设计的用户增强定位的模式为:向授权伪距用户播发实时广域差分所得的等效钟差改正数和轨道改正数,使用户的实时 SBAS 伪距定位 95% 精度能达到水平方向优于 1.0 m,高程方向优于 1.5 m;向授权的相位定位用户除了播发以上改正数之外,再增加服务半径为 500 km 的分区综合改正数,使用户的 SBAS 实时动态相位精密单点定位(PPP)在 10 min 内收敛到 1 m 以内,1 h 后水平方向达到 0.3 m,高程方向达到 0.4 m。

北斗星基增强系统的基本工作流程为:首先将参考站采集的高精度多频载波和伪距等观测值以及广播电文参数,通过传输链路将数据实时传输到运行处理中心;然后运行处理中心利用参考站采集的数据实时进行轨道改正数、钟差改正数以及分区综合改正数的处理及完好性验证,生成精密定位所需的广域差分与完好性信息;再将各颗卫星的差分改正数以及各个分区的分区综合改正数编排进广播电文,并通过 GEO 卫星等链路向用户广播;最后,用户终端实时接收差分改正数信息及相应的完好性参数,采用伪距或者相位进行定位计算,实现广域实时定位服务。

基于 BDS(BeiDou satellite system)的广域分米级星基增强系统,本文首先介绍北斗广域差分改正数的分类和计算的基本原理。然后采用 BDS 增强系统计算得到的广域差分改正数,选取位于中国大陆东南西北和中部的 5 个目标区域中各 2 个用户站,分别从基于相位平滑伪距观测值的动态定位(standard point positioning, SPP)和基于相位观测值的实时动态精密单点定位(PPP)对其性能进行评估分析,验证其所能获得的定位精度。

1 广域差分改正参数

目前北斗系统星基增强系统定义的广域差分参数包含了等效钟差和格网电离层改正。等效钟差参数的改正精度与轨道误差分量有关,由于轨道确定时采用的数据仅来源服务范围内布设的区域参考

站,实时定轨的结果在轨道切向和法向误差相对较大,造成了服务区边缘区域的用户差分服务精度比中心位置用户精度差^[4]。等效钟差改正数在本质上没有对轨道、钟差进行区分,其影响为:轨道法向误差和轨道切向误差在不同视向投影的误差最大可达轨道在这两个方向误差的 25%。

对现有方案进行优化升级的北斗星基增强系统采用了卫星钟差改正与轨道改正分离的方案,将轨道误差在等效钟差中无法包含的部分进行分离。为了使用户精密定位收敛时间缩短,提高用户定位的可靠性、稳定性,系统还在轨道、钟差改正数的基础上叠加了分区综合改正数。

1.1 卫星实时钟差改正数

针对影响区域卫星导航系统基本服务精度的各种因素,北斗系统利用已知高精度位置坐标,在区域内均匀分布的地面参考站,计算得到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(user range error, URE)。在此基础上,将伪距残余误差解算至卫星钟差改正数,即播发给用户的等效钟差^[3-5]。

为了提高钟差改正数,采用伪距相位综合的差分改正算法,其过程为:首先利用伪距解算得到卫星钟差改正的绝对值;然后利用相位差分获取卫星钟差改正历元间的变化;最后将基于伪距解算得到的卫星钟差改正绝对值作为虚拟基准观测值,同时将相位差分获取的卫星钟差改正历元间变化作为相对变化观测值。考虑不同的权重,将两种虚拟观测值联合进行平差,得到综合的卫星钟差改正数^[6]。

用户使用时,只需要获取相应时刻卫星钟差改正数,对获取的广播电文中的卫星钟差进行改正即可。

1.2 卫星实时轨道改正数

由于卫星钟差误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,影响误差分离结果的准确性。因此,将卫星钟差误差与轨道误差分步求解^[5]。

其过程为:先固定轨道,求解得到卫星钟差改正数,即等效钟差,其包含了卫星钟差误差和轨道误差在视向投影的均值;然后将卫星钟差改正数作为已知量代入,求解轨道改正数,该改正数包含了不同视向情况下的轨道法向误差改正和轨道切向误差改正;再采用与伪距相位综合解算卫星实时钟差改正数类似的算法,最后将基于伪距解算得到的卫星轨

道改正值绝对值作为虚拟基准观测值, 同时将相位差分获取的卫星轨道改正历元间变化作为相对变化观测值. 考虑不同的权重, 将两种虚拟观测联合进行平差, 得到综合的轨道改正数^[6].

用户使用时, 只需要获取相应时刻卫星轨道改正数, 对由广播电文计算获取的卫星轨道进行改正即可.

1.3 分区综合改正数

以上轨道和钟差改正数提供的是广域范围内的改正, 其存在一些局限性: 一是对于 GEO 卫星, 由于相对地球静止, 其对于地面观测站的高度角和方位角基本不变, 在卫星运行过程中测站不能对 GEO 卫星形成动态的观测值约束, 因此参数求解的精度相对较差; 再者局域误差特性无法改正. 因此, 用户仍然无法利用高精度相位观测进行定位计算. 考虑到传播误差在一定的区域内具有大致相同的特性, 设计采用分区综合改正数技术来提高用户定位精度. 当两个站距离较近时, 轨道、钟差以及与空间信号传播有关的误差项的一致性较强, 而较小的不一致的剩余误差中随时间变化较慢的误差视为常量被模糊度参数所吸收. 该技术的提出大大缩短了相位定位收敛时间, 从而拓展了星基增强系统的服务.

其实现过程主要为: 首先在基准站上, 固定其精确坐标, 根据其伪距观测值计算近似接收机钟差; 然后扣除近似接收机钟差以及其他各项误差, 求取参考站上的相位残差; 再将参考站对于每颗卫星的相位残差建模, 通过卫星向用户播发. 以上分区改正数处理技术不要求参考站精确的钟差, 因其误差将完全被用户钟差吸收; 不需要知道参考站准确模糊度信息, 因其将与用户模糊度重新组合成新的模糊度. 用户使用时仅需要在其观测值上加上以上改正即可.

2 星基增强性能提升系统性能分析

通过上述方法, 北斗星基增强系统的服务性能得到提升. 以下分别从基于相位平滑伪距观测值^[7]的动态定位(SPP)和基于相位观测值的实时精密动态定位^[8]对其性能进行分析.

2.1 试验数据说明

试验中, 选取分别位于中国大陆东南西北和中部 5 个目标区域, 每个区域中选取 1 个距离解算分区综合改正数参考站较近的北斗用户站(距离小于 50 m)和 1 个较远的用户站(距离在 300~700 km), 各个测站在北斗参考框架下的坐标事先已精确确定. 其中, 测站 st01、st06 位于东部, st02、st07 位于南部, st03、st08 位于西部, st04、st09 位于北部, st05、st10 位于中部, 测站分布如图 1 所示. 获取所选测站 2016 年 5 月 1 日至 2016 年 5 月 6 日 6 d 的观测数据. 按照使用参数的不同, SPP 处理中包含星基增强和基本导航; PPP 处理中包含了星基增强和精密后处理. 数据处理输入以及参数设置^[9-11]如表 1 所示(其中 SAAS 模型表示 Saastamoinen 模型).

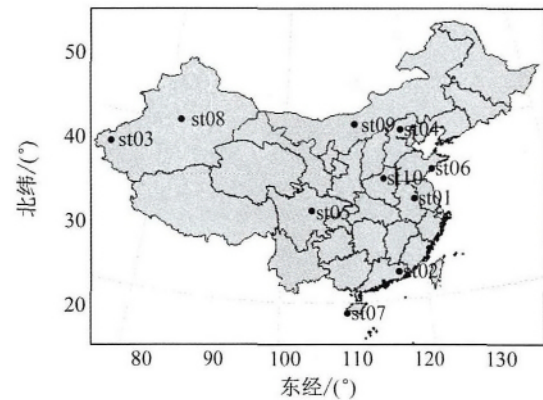


图 1 测站分布

Fig. 1 Station distribution

表 1 数据处理策略

Tab. 1 Data processing strategy

定位方法	处理方法	观测数据	截止高度角/(°)	卫星星历钟差	对流层延迟模型	实时轨道和钟差	分区综合改正数	固体潮汐	相对论、地球自转	坐标、接收机钟差	模糊度
SPP	星基增强	相位平滑伪距	10	广播星历	SAAS	采用	不采用	模型改正	模型改正	白噪声	无
	基本导航	相位平滑伪距	10	广播星历	SAAS	不采用	不采用	模型改正	模型改正	白噪声	无
PPP	星基增强	相位平滑伪距和相位	10	广播星历	SAAS+参数估计	采用	采用	模型改正	模型改正	白噪声	浮点解
	精密后处理	相位平滑伪距和相位	10	精密轨道和钟差	SAAS+参数估计	不采用	不采用	模型改正	模型改正	白噪声	浮点解

表 1 中,考虑到卫星实时钟差改正数短时间内的稳定性,实时轨道改正数的动力学性质,以及 GEO 卫星上资源的限制,模拟接收卫星实时钟差和轨道改正数的频率是 6 min 1 次,即此刻接收到的卫星钟差改正数,为之后 6 min 的数据流所调用;与之类似模拟接收到的分区综合改正数的频率为 3 min,用户只接收其所在分区的相位综合改正数. PPP 处理将基于星基增强的结果与基于 GFZ (GeoForschungsZentrum) 后处理精密轨道、钟差的结果进行对比.

2.2 SPP 结果对比分析

图 2 为 st01 站单天 SPP 星基增强(图 2a)与基本导航定位(图 2b)结果的对比图. 图例中 3 列数据依次为坐标误差在 N、E、U (north, east, up) 方向上分量的 RMS(均方根值 R)、STD(标准差 S)和 Mean(平均值 M). 因 RMS、STD 和 Mean 之间的数学关系,此处仅分析 RMS 和 Mean. 由图 2 的图例可知,星基增强 SPP 坐标误差 U 方向 RMS 为 0.466 m, N

和 E 方向 RMS 分别为 0.275 m、0.292 m,明显优于基本导航 SPP 坐标误差 U 方向的 1.105 m, N 和 E 方向的 1.001 m、0.394 m. 基本导航 SPP 坐标误差 U 和 N 方向 Mean 为 -0.085 m 和 0.033 m, 优于星基增强 SPP 的 -0.177 m 和 0.122 m. 但一般情况下伪距用户定位时长通常很短,甚至只有几个历元. 基本导航中广播星历 1 h 更新一次,而更新前后 2 h 的卫星轨道和钟差没有完全衔接,因此图 2b 中的定位结果存在 1 h 一次的跳变. 星基增强增加了实时轨道和钟差改正,使得更新前后 2 h 的卫星轨道和钟差能很好地衔接上,因此图 2a 中就不存在类似图 2b 的跳变.

由图 3 st01 站多天定位结果直方图(图例中 SBAS SPP N 表示星基增强 SPP 在 N 方向上误差的单天 RMS, Legacy SPP N 表示基本导航 SPP 在 N 方向上误差的单天 RMS,其他图例意义与之类似)和表 2 多站多天定位结果统计表可知,各站多天星基增强 SPP 的平均定位结果 RMS 在 N、E、U 3 个方向上分别达到了 0.4 m、0.3 m 和 0.8 m,相对于基本导航 SPP 的 1.0 m、0.6 m 和 1.5 m,在各方向上的定位精度提高了 29%~74%左右,平均三维精度提高了 53%.

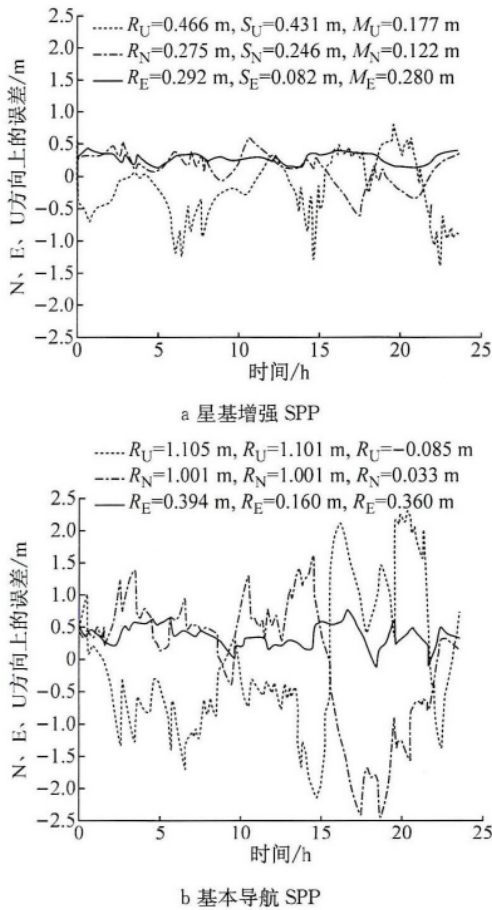


图 2 st01 站 2016-05-04 星基增强定位和 SPP 基本导航结果

Fig. 2 SPP result for station st01 under SBAS service and legacy PNT on May 4, 2016

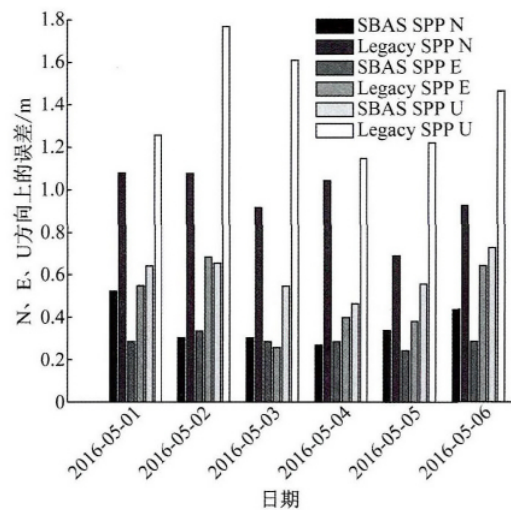


图 3 st01 站多天 SPP 基本导航和星基增强定位结果
Fig. 3 SPP result over 6 days for station st01 under legacy PNT and SBAS services

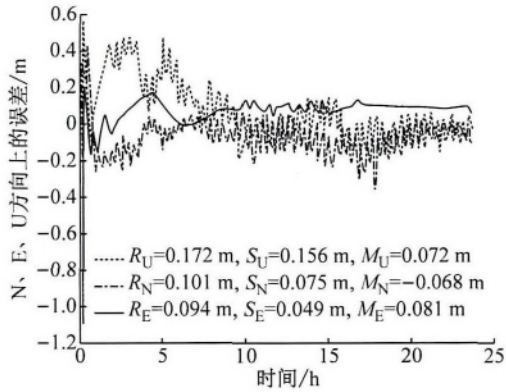
2.3 PPP 结果对比分析

PPP 处理结果包括:基于广播星历加上星基增强差分改正数(以下称为 SBAS),基于 GFZ 后处理精密轨道、钟差的结果(以下称为 POST). 图 4 为 st04 单天 SBAS 和 POST PPP 的定位结果.

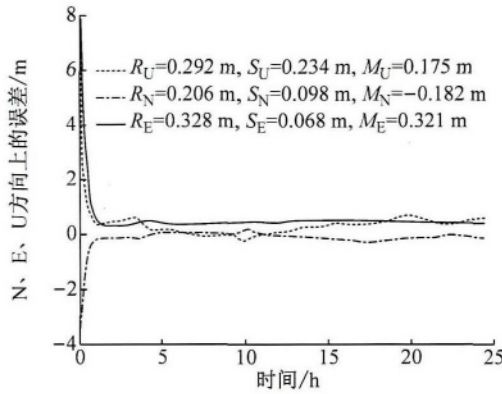
表 2 多站多天 SPP 定位结果比较

Tab. 2 Comparison of SPP results for legacy PNT and SBAS service

测站名	RMS/m								提升水平/%			
	N		E		U		三维		N	E	U	三维
	星基增强	基本导航	星基增强	基本导航	星基增强	基本导航	星基增强	基本导航				
st01	0.359	0.953	0.284	0.483	0.595	1.408	0.751	1.767	62.3	41.2	57.7	57.5
st02	0.537	0.759	0.371	0.595	0.859	1.414	1.079	1.712	29.2	37.6	39.3	37.0
st03	0.388	0.790	0.294	0.938	0.909	1.707	1.031	2.102	50.9	68.7	46.7	50.9
st04	0.297	0.849	0.109	0.275	0.587	1.149	0.667	1.455	65.0	60.4	48.9	54.2
st05	0.375	1.428	0.356	0.575	0.812	1.987	0.963	2.514	73.7	38.1	59.1	61.7
平均	0.391	0.956	0.283	0.573	0.752	1.533	0.894	1.895	56.2	49.2	50.4	52.9



a SBAS PPP



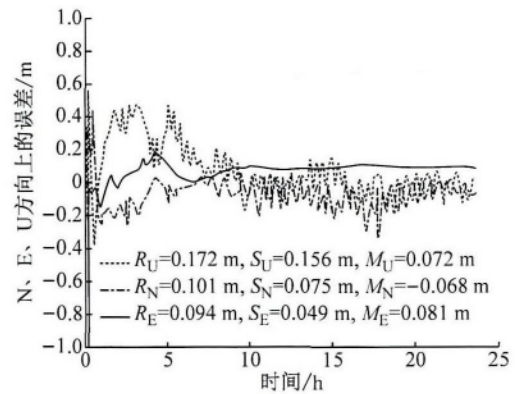
b POST PPP

图 4 st04 站 2016-05-03 SBAS PPP 和 POST PPP 的定位结果

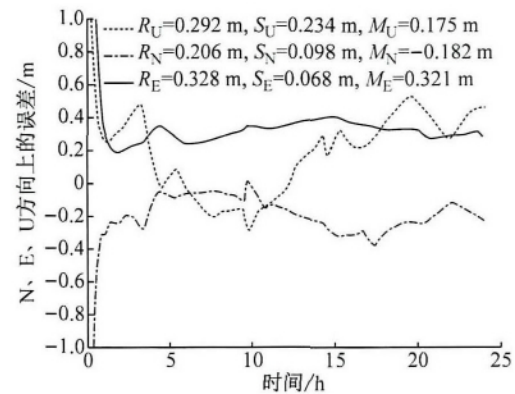
Fig. 4 SBAS PPP and POST PPP result for station st04 on May 3, 2016

图 4a 为 SBAS PPP 定位结果,图 4b 为 POST PPP 定位结果. 图例中的 3 行分别为坐标收敛后(本文将 N、E、U 3 个方向的坐标序列收敛到 1 m 后且不再超出 1 m 视为坐标收敛)定位偏差在 N、E、U 方向上的 RMS、STD 和 MEAN. 由图 4 可见,SBAS PPP 能快速收敛,由图例可知 SBAS PPP 坐标误差 U 方向 RMS 为 0.172 m,N 和 E 方向 RMS 分别为 0.101 m、0.094 m,明显优于 POST PPP 坐标误差 U 方向的 0.292 m,N 和 E 方向的 0.206 m、0.328 m;SBAS PPP 坐标误差 U 方向 Mean 为 0.072 m,

N 和 E 方向 Mean 分别为 -0.068 m、0.081 m,明显优于 POST PPP 坐标误差 U 方向的 0.175 m,N 和 E 方向 -0.182 m 和 0.321 m;将图 4a、b 中 y 轴尺度范围均固定在 [-1 m,1 m],得图 5.



a SBAS PPP



b POST PPP

图 5 st04 站 2016-05-03 SBAS PPP 和 POST PPP 的定位 y 轴固定在 [-1 m,1 m] 的结果

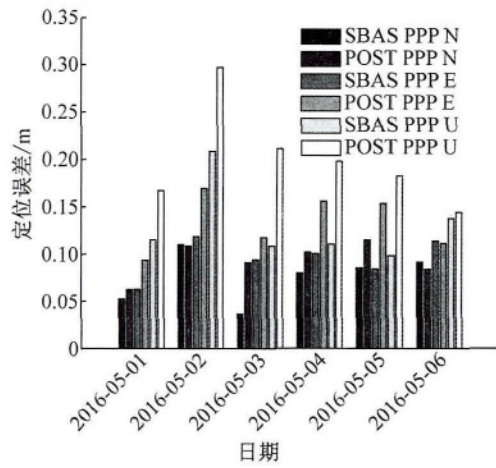
Fig. 5 SBAS PPP and POST PPP for station st04 on May 3, 2016, where the y-axis is set to [-1,1] meter

图 5 更清晰地反映了坐标偏差的变化. 通过对比发现 POST PPP 中存在系统性偏. 这种偏差的存在是因为 st04 站的精确坐标是基于北斗参考框架,而 GFZ 精密轨道和钟差产品的坐标框架则是最新国际参考框架 ITRF 2008. 以下进一步通过动态坐

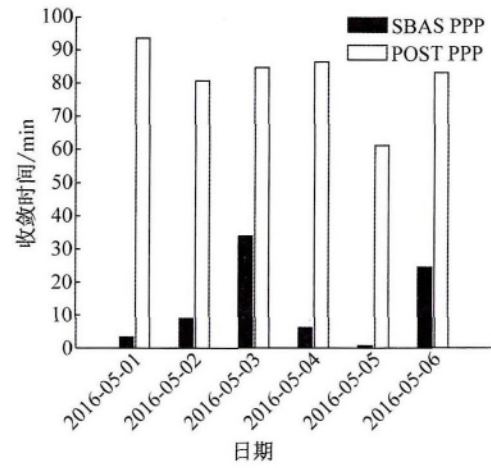
标的离散度(即标准偏差 STD)来衡量定位精度. 从以上 st04 的 STD 比较可知, SBAS PPP 在 N、E、U 方向精度均优于 POST PPP, U 方向最明显. 这也说明目前北斗后处理轨道、钟差产品精度还不高, 其主要是因为 GFZ 采用的北斗地面网络分布较差, 尤其

是中国区域所用测站较少. 而星基增强系统通过提供轨道、钟差实时改正数以及分区综合改正数, 精细化了各种误差模型, 从而提高了用户服务精度.

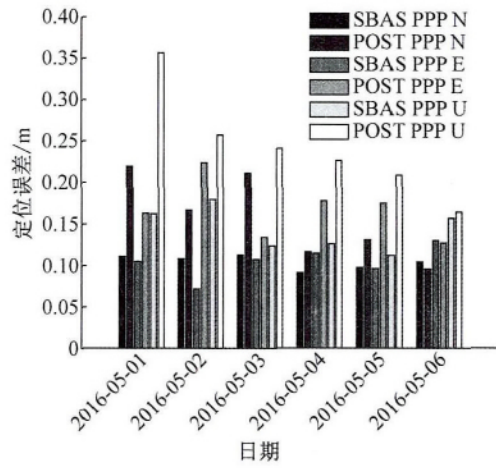
图 6 展示了 st02、st03、st07、st08 站多天的定位精度和收敛时间.



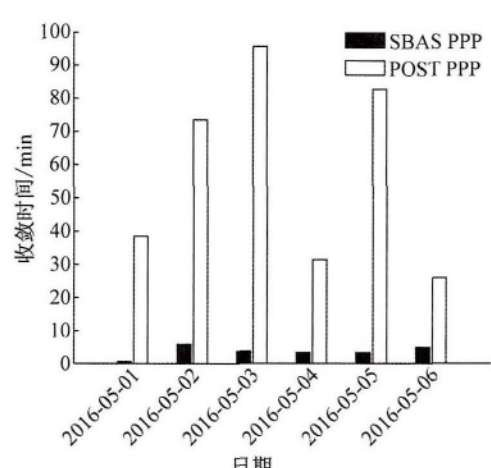
a st02 定位误差



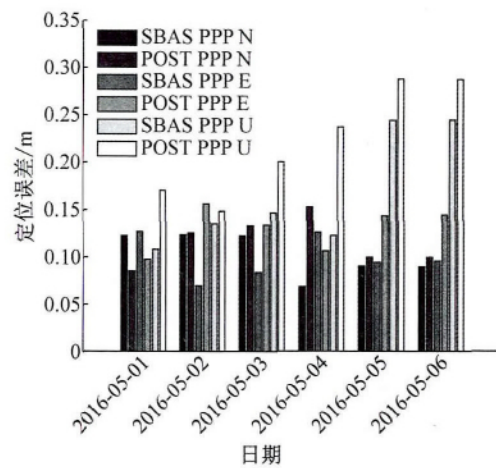
b st02 定位收敛时间



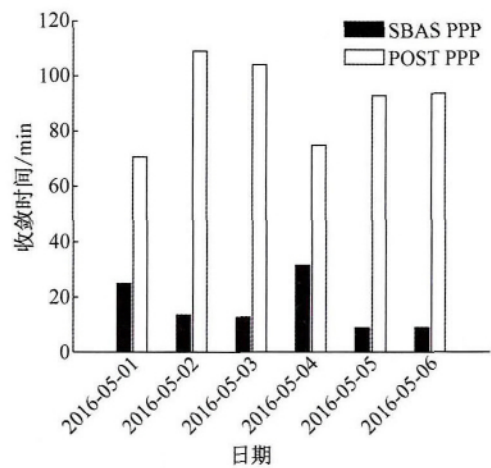
c st03 定位误差



d st03 定位收敛时间



e st07 定位误差



f st07 定位收敛时间

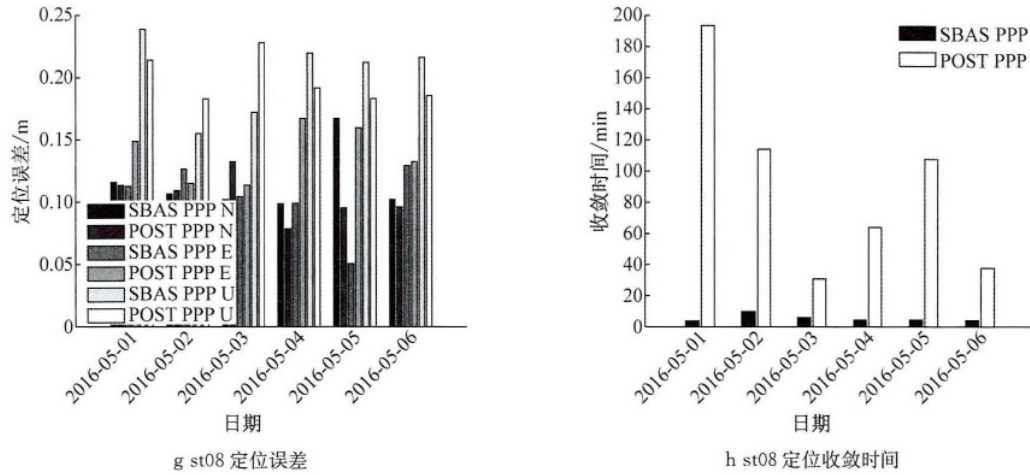


图 6 测站 st02、st03、st07、st08 SBAS 和 POST PPP 的定位结果以及收敛时间的统计

Fig. 6 Coordinate precision and convergence time of SBAS PPP and POST PPP for stations st02, st03, st07 and st08

由图 6 可知, st02、st03、st07 和 st08, 4 个站 SBAS PPP 的收敛时间明显短于 POST PPP. 但是 st07 和 st08, 2 个站 SBAS PPP 定位精度在 U 方向

并没有明显优于 POST PPP. 将所有测站 PPP 定位结果统计列于表 3.

表 3 多站多天 SBAS PPP 和 POST PPP 定位结果及收敛时间统计

Tab. 3 Coordinate precision and convergence time of SBAS PPP and POST PPP

测站名	时间/min		STD/m						提升水平/%				距离/km		
	SBAS	POST	N		E		U		三维		N	E		U	三维
			SBAS	POST	SBAS	POST	SBAS	POST	SBAS	POST					
st01	2.7	52.2	0.078	0.080	0.072	0.112	0.137	0.184	0.173	0.230	3.1	35.6	25.7	24.8	<0.05
st02	12.6	81.4	0.075	0.093	0.095	0.133	0.129	0.199	0.177	0.257	19.5	28.5	35.3	31.1	<0.05
st03	3.3	57.8	0.115	0.188	0.106	0.175	0.168	0.270	0.230	0.373	38.5	39.4	37.7	38.3	<0.05
st04	4.5	53.2	0.077	0.124	0.082	0.119	0.154	0.307	0.191	0.352	37.6	31.0	49.7	45.7	<0.05
st05	5.9	99.2	0.074	0.092	0.066	0.108	0.107	0.140	0.146	0.199	19.7	38.9	23.5	26.6	<0.05
st06	9.1	92.1	0.076	0.089	0.081	0.114	0.214	0.199	0.241	0.246	13.7	29.2	-7.4	2.0	459
st07	16.3	90.7	0.103	0.116	0.099	0.130	0.167	0.221	0.220	0.281	11.4	23.9	24.6	21.7	341
st08	4.9	91.2	0.115	0.104	0.104	0.140	0.202	0.198	0.255	0.264	-10.6	25.8	-2.4	3.4	694
st09	6.3	36.0	0.085	0.097	0.096	0.113	0.253	0.215	0.284	0.262	12.6	15.0	-17.8	-8.4	582
St10	3.8	70.6	0.086	0.102	0.080	0.109	0.184	0.205	0.218	0.254	15.5	27.1	10.5	14.2	471
平均	6.9	72.4	0.089	0.108	0.089	0.125	0.172	0.214	0.213	0.272	16.1	29.4	17.9	21.7	

从所有测站的统计可知, SBAS PPP 的平均收敛时间为 6.9 min, 明显优于 POST PPP 的平均收敛时间 72.4 min. SBAS PPP 在 N、E、U 方向上的平均定位精度为 0.089 m、0.089 m 和 0.172 m, 优于 POST PPP 的 0.108 m、0.125 m 和 0.214 m, 达到了分米级的服务指标. 其中, 除了 st06、st08、st09 之外, 其他测站 SBAS PPP 的精度相对于 POST PPP 有较显著的提高, 这进一步表明北斗后处理的轨道和钟差精度还需要提高. 其原因为 st06、st07、st08、st09、st10 距离参考站较远, 其和参考站的空间相关性较差, 分区综合改正数中包含的各种误差模型的残余项不能很好地修正用户站中的模型误差. 测站 st06、st08 的 SBAS PPP 相对 POST PPP 改善效果

不明显, st09 的 SBAS PPP 略差, 这与这些站距离参考站的距离有关, 其中 st08 和 st09 距离参考站的距离分别达到了 694 km 和 582 km, 超过了分区综合改正数 500 km 的服务半径. 在距离较远的情况下, 测站的大气误差与参考站的大气误差空间相关性较差, 从而分区综合改正数中包含的各种误差模型的残余项不能很好地修正用户站中的模型误差.

3 结论

本文介绍了 BDS 星基增强性能提升系统的基本情况, 对其播发的广域差分中的钟差改正数、轨道改正数和分区综合改正数的算法进行了简要阐述.

利用北斗实测数据对北斗星基增强性能提升系统的性能进行了评估验证。

采用基于相位平滑伪距观测值的动态定位评估结果表明:系统性能提升后,用户伪距定位精度在 N、E、U 3 个方向上分别达到 0.4 m、0.3 m 和 0.8 m,相比系统基本导航服务平均三维定位精度提高了 53%。

采用相位定位性能的评估从收敛时间和定位精度两方面进行,并与基于外部后处理精密轨道钟差的 PPP 定位结果进行对比.结果表明:用户坐标平均能在 7 min 内收敛到 1 m 以内,收敛之后水平坐标精度能达到 0.1 m,高程坐标精度能达到 0.2 m;且这两项指标都优于基于外部后处理精密轨道钟差的 PPP 定位结果.以上评估结果表明,BDS 星基增强系统开展的性能提升,能够满足伪距用户米级以及相位用户分米级的定位精度需求。

参考文献:

- [1] 佚名. 北斗卫星导航系统简介[J]. 电波科学学报, 2010, 25(5):1025.
Anonymity. A brief introduction of Beidou satellite navigation system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010(5):82.
- [2] YANG Y X, LI J L, WANG A B, *et al.* Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of Beidou regional navigation satellite system[J]. Science China Earth Science, 2013, 57(1):144.
- [3] 陈刘成, 胡小工, 封欣, 等. 区域导航系统实时广域差分修正模型与方法[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2010(1):45.
CHEN Liucheng, HU Xiaogong, FENG Xin, *et al.* The models and arithmetic for WADS real-time corrections of regional satellite navigation system [J]. Annals Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, 2010(1):45.
- [4] CAO Y L, HU X G, ZHOU J H, *et al.* Kinematic wide area differential corrections for Beidou regional system basing on two-way time synchronization [C] // China Satellite Navigation Conference (CSNC). Nanjing: China's Satellite Navigation System Management Office, 2014:277-288.
- [5] 曹月玲, 胡小工, 周善石, 等. 基于星间链路的 BDS 导航系统实时星历和钟差分离修正[J]. 天文学进展, 2015, 33(1):122.
CAO Yueling, HU Xiaogong, ZHOU Shanshi, *et al.* The method of real-time wide area differential corrections of BDS with inter satellite links[J]. Progress in Astronomy, 2015, 33(1):122.
- [6] 陈俊平. 低轨卫星精密定轨研究[D]. 上海:同济大学, 2007
CHEN Junping. Research on LEO satellite orbit determination [D]. Shanghai: Tongji University, 2007
- [7] WU X L, ZHOU J H, GANG W, *et al.* Multipath error detection and correction for GEO/IGSO satellites[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(7):1297.
- [8] 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.
- [9] 张小红, 左翔, 李盼, 等. BDS/GPS 精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(3):250.
ZHANG Xiaohong, ZUO Xiang, LI Pan, *et al.* Convergence time and positioning accuracy comparison between BDS and GPS precise point positioning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3):250.
- [10] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉:武汉大学, 2002.
YE Shirong. Theory and its realization of GPS precise point positioning using un-differenced phase observation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002.
- [11] 许长辉, 高井祥, 周锋, 等. 精密单点定位的可靠性研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(6):709.
XU Changhui, GAO Jingxiang, ZHOU Feng, *et al.* Reliability analysis of precise point positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(6):709.