

文章编号:1671-5942(2014)06-0081-05

## 基于 CORS 的多基准站 BDS/GPS 融合差分网定位性能分析<sup>\* 1</sup>

李鹤峰<sup>1)</sup> 秘金钟<sup>2)</sup> 党亚民<sup>2)</sup> 吴任洪<sup>1)</sup> 王世进<sup>3)</sup> 刘国志<sup>1)</sup>

(1) 国核电力规划设计研究院, 北京 100095  
(2) 中国测绘科学研究院, 北京 100830  
(3) 中国地震局第一监测中心, 天津 30018

**摘 要** 基于 BDS/GPS CORS 试验系统, 利用伪距信息, 通过多基站差分定位技术, 对 BDS/GPS 融合差分网定位进行研究。结果表明, 多基准站 BDS/GPS 融合差分网单历元实时定位精度优于 1 m, 40 历元实时滑动平均定位精度 0.5 m 左右, 大大提高了常规伪距定位精度, 能满足大多数用户的导航定位需求(精度 0.1 ~ 10 m)。

**关键词** CORS; BDS/GPS; 融合定位; 多基站; 网络差分

**中图分类号**: P228.4

**文献标识码**: A

## STUDY ON POSITIONING WITH DIFFERENTIAL NETWORK OF BDS/GPS FUSION SYSTEM BASED ON MULTIPLE CORS REFERENCE STATIONS

Li Hefeng<sup>1)</sup>, Bei Jinzhong<sup>2)</sup>, Dang Yamin<sup>2)</sup>, Wu Renhong<sup>1)</sup>, Wang Shijin<sup>3)</sup> and Liu Guozhi<sup>1)</sup>

(1) State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Beijing 100095  
(2) Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830  
(3) First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 30018

**Abstract** Performance of positioning with differential network of BDS/GPS fusion system was analyzed using pseudo-range information through multiple reference stations differential positioning technology, based on BDS/GPS CORS test system. The experiment results indicate that positioning accuracy with multiple reference station BDS/GPS fusion system of single epoch real-time is not larger than 1 m, 40 epoch real-time moving average positioning accuracy is about 0.5 m, pseudo-range positioning accuracy is improved greatly. The method can meet demand of users for navigation and positioning.

**Key words**: CORS; BDS/GPS; fusion navigation and positioning; multiple reference stations; network difference

伪距差分定位具有易于实现、定位精度较高且方便实时定位等诸多优点, 在差分定位技术中应用最为广泛<sup>[1-3]</sup>。本文提出基于 CORS 的多基准站 BDS/GPS 融合差分网定位技术, 能够克服传统单站/单系

统差分基准站单一、作用范围有限、可靠性不强及定位精度有限等不足。实验表明, 一定距离范围内, 单历元实时定位精度平面和高程方向均优于 1 m, 40 历元实时滑动平均精度优于 0.5 m, 大大提高了伪距定

\* 收稿日期: 2013-09-24

基金项目: 国家 863 计划重点项目(2011AA120503、2013AA122501); 国家科技支撑计划项目(2012BAB16B01); 北斗分析中心建设与运行维护项目(GFZX0301040308-06)。

作者简介: 李鹤峰, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 多模融合定位与 RAIM 算法。E-mail: lehero@163.com。

位的精度和稳定性,能满足大多数用户实时导航定位的需求。

## 1 多系统多基站差分网定位

### 1.1 定位原理

传统单系统单基站 GPS 差分是将一台 GPS 接收机安放在已知基准站上,另一台接收机作为流动站架设在目标点上,根据基准站提供的已知精确坐标,计算出基准站到卫星的距离改正数,并由基准站将这一改正数实时发送出去。流动站接收机在进行 GPS 数据观测的同时,也接收到来自基准站的改正信号,然后利用观测数据和改正信息对目标点进行实时定位解算<sup>[3]</sup>。

由于单基站 GPS 差分定位系统和基准站单一,作用范围有限,随着距离的增加,大气误差相关性减弱,定位精度随之降低。多系统多基站差分网定位技术与单系统单基站基本相同,主要区别是同时利用多个 BDS/GPS 基准站,各自发送本基站差分改正信息,目标接收机根据到不同基准站的距离,将接收的差分改正数通过一定的方法内插出流动站的改正信息<sup>[4]</sup>,利用改正后的差分信息联合接收的卫星数据进行定位解算,有效提高伪距定位精度和系统的稳定性,如图 1 所示。

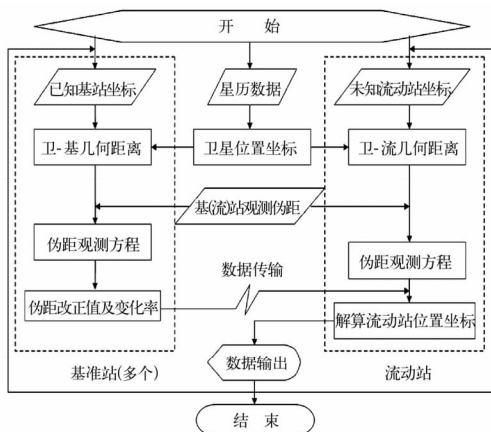


图 1 多基准站实时差分定位基本流程

Fig. 1 Real time differential positioning process of multiple reference stations

### 1.2 数学模型

BDS/GPS 多基站差分网定位示意图如图 2 所示,测站 A、B、C 为 3 个基准站, U 为流动站,利用基准站已知坐标可计算出 A、B、C 的伪距改正值。A、B、C、U 在一定的距离范围内,除卫星钟和接收机钟的误差影响之外,对流层、电离层延迟误差、卫星轨道误差等具有空间相关性,根据基准站伪距改正值计算出流动站 U 的误差改正数,能够消除或大大削

弱用户观测误差的影响<sup>[5]</sup>。

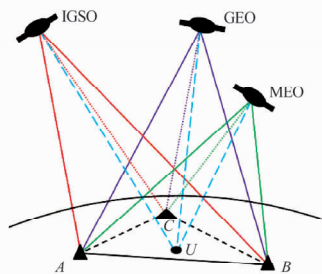


图 2 BDS/GPS 差分网差分定位示意图

Fig. 2 Sketch of positioning with BDS/GPS differential network

以 BDS 单系统的某颗 MEO 卫星为例,基准站 A ( $X_a, Y_a, Z_a$ )、B ( $X_b, Y_b, Z_b$ )、C ( $X_c, Y_c, Z_c$ ) 同时观测到该 MEO 卫星  $M(X^m, Y^m, Z^m)$ , 相应的伪距观测方程为:

$$\begin{aligned}\rho_{Ba}^m &= R_{Ba}^m + c\delta t_{Ba} - c\delta t^m + \delta\rho_{Ba,ion}^m + \delta\rho_{Ba,tro}^m \\ \rho_{Bb}^m &= R_{Bb}^m + c\delta t_{Bb} - c\delta t^m + \delta\rho_{Bb,ion}^m + \delta\rho_{Bb,tro}^m \\ \rho_{Bc}^m &= R_{Bc}^m + c\delta t_{Bc} - c\delta t^m + \delta\rho_{Bc,ion}^m + \delta\rho_{Bc,tro}^m\end{aligned}\quad (1)$$

其中,  $\rho_{Ba}^m$ 、 $R_{Ba}^m$  分别为 BDS 系统 A 基准站到 MEO 卫星的伪距观测值和几何距离,  $\delta_{Ba}$  为 A 基准站中 BDS 接收机钟差,  $\delta^m$  为 MEO 卫星钟差,  $\delta\rho_{Ba,ion}^m$ 、 $\delta\rho_{Ba,tro}^m$  分别为 A 基准站中 BDS 系统的伪距电离层和对流层改正,  $c$  为光速。B、C 基准站相应的参数与 A 相同, 各项单位为 m。

由式(1)通过伪距与几何距离相减可以得到 A、B、C 3 基准站的伪距改正数  $\delta\rho_{Ba}^m$ 、 $\delta\rho_{Bb}^m$ 、 $\delta\rho_{Bc}^m$ :

$$\begin{aligned}\delta\rho_{Ba}^m &= -c\delta t_{Ba} + c\delta t^m - \delta\rho_{Ba,ion}^m - \delta\rho_{Ba,tro}^m \\ \delta\rho_{Bb}^m &= -c\delta t_{Bb} + c\delta t^m - \delta\rho_{Bb,ion}^m - \delta\rho_{Bb,tro}^m \\ \delta\rho_{Bc}^m &= -c\delta t_{Bc} + c\delta t^m - \delta\rho_{Bc,ion}^m - \delta\rho_{Bc,tro}^m\end{aligned}\quad (2)$$

与此同时,用户站 U 在该时刻同样观测到该 MEO 卫星,相应的伪距观测方程表示为:

$$\rho_{Bu}^m = R_{Bu}^m + c\delta t_{Bu} - c\delta t^m + \delta\rho_{Bu,ion}^m + \delta\rho_{Bu,tro}^m\quad (3)$$

根据 A、B、C 3 个基准站到用户站 U 距离的不同,通过反距离加权法<sup>[3-4]</sup>内插出用户站的差分改正信息  $\delta\rho_{Bu}^m$ :

$$\delta\rho_{Bu}^m = \alpha\delta\rho_{Ba}^m + \beta\delta\rho_{Bb}^m + \gamma\delta\rho_{Bc}^m\quad (4)$$

其中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为利用反距离得到的权值,且满足  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。将式(2)代入式(4)并整理,可得由基准站内插出的差分信息  $\delta\rho_{Bu}^m$ :

$$\begin{aligned}\delta\rho_{Bu}^m &= -\alpha c\delta t_{Ba} - \beta c\delta t_{Bb} - \gamma c\delta t_{Bc} + c\delta t^m - (\alpha\delta\rho_{Ba,ion}^m + \beta\delta\rho_{Bb,ion}^m + \gamma\delta\rho_{Bc,ion}^m) - (\alpha\delta\rho_{Ba,tro}^m + \beta\delta\rho_{Bb,tro}^m + \gamma\delta\rho_{Bc,tro}^m)\end{aligned}\quad (5)$$

将式(5)改正到用户站观测方程式(3)上,联合  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ,整理可得:

$$\rho_{Bu}^m + \delta\rho_{Ba}^m = R_{Bu}^m + c[\delta t_{Bu} - (\alpha\delta t_{Ba} + \beta\delta t_{Bb} + \gamma\delta t_{Bc})] + \delta\rho_{Bu,ion}^m - (\alpha\delta\rho_{Ba,ion}^m + \beta\delta\rho_{Bb,ion}^m + \lambda\delta\rho_{Bc,ion}^m) + \delta\rho_{Bu,tro}^m - (\alpha\delta\rho_{Ba,tro}^m + \beta\delta\rho_{Bb,tro}^m + \lambda\delta\rho_{Bc,tro}^m) \quad (6)$$

当流动站与基准站距离在一定范围之内时,大气误差改正可近似地认为相等,即  $\delta\rho_{Ba,ion}^m = \delta\rho_{Bb,ion}^m = \delta\rho_{Bc,ion}^m, \delta\rho_{Ba,tro}^m = \delta\rho_{Bb,tro}^m = \delta\rho_{Bc,tro}^m$ 。考虑到  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ , (6) 式可以改写为:

$$\rho_{Bu}^m + \delta\rho_{Bu}^m = R_{Bu}^m + c[\delta t_{Bu} - (\alpha\delta t_{Ba} + \beta\delta t_{Bb} + \gamma\delta t_{Bc})] \quad (7)$$

同理,对于 GPS 系统的差分改方程为:

$$\rho_{Gu}^m + \delta\rho_{Gu}^m = R_{Gu}^m + c[\delta t_{Gu} - (\alpha\delta t_{Ga} + \beta\delta t_{Gb} + \gamma\delta t_{Gc})] \quad (8)$$

式(7)、(8)即为多基站差分网定位流动站通过基准站改正后的伪距观测方程。式中伪距观测值  $\rho_{Bu}^m, \rho_{Gu}^m$  已知,差分改正信息  $\delta\rho_{Bu}^m, R_{Gu}^m$  已知,卫星到用户站间的实际距离  $R_{Bu}^m, R_{Gu}^m$  均是含有流动站位置  $(X, Y, Z)$  的未知参数。将流动站双系统中 BDS、GPS 两个接收机钟差与配有权值的各基准站 BDS 接收机钟差影响的距离关系式  $\delta t_{Bu} - (\alpha\delta t_{Ba} + \beta\delta t_{Bb} + \gamma\delta t_{Bc}), \delta t_{Gu} - (\alpha\delta t_{Ga} + \beta\delta t_{Gb} + \gamma\delta t_{Gc})$  都整体看作一个未知数,然后通

过多模融合定位时空统一的方法<sup>[6]</sup>,将 BDS、GPS 双系统进行融合定位,通过最小二乘按常规绝对定位的方法对 5 个未知参数进行定位解算,即可求出流动站未知坐标  $(X, Y, Z)$ <sup>[3,7]</sup>。

## 2 实验分析

实验数据来自中国测绘科学研究院在广西南宁建立的 BDS/GPS CORS 网。选取 DaWa、WuMi、LiLi 3 个 CORS 站构成差分网基准站,选取 DaSa、TaLu 2 个 CORS 站构成网内和网外流动站,各 CORS 站点精确坐标已知。根据已知坐标得到基准站和流动站空间位置分布(图 3)。

为研究多基站 BDS/GPS 融合差分网定位性能,作者基于 C++ 平台编写了多基站 BDS/GPS 融合差分网定位软件 V1.0。按方案①网内 BDS 单系统、GPS 单系统、BDS/GPS 融合系统,方案②网外 BDS 单系统、GPS 单系统、BDS/GPS 融合系统,方案③

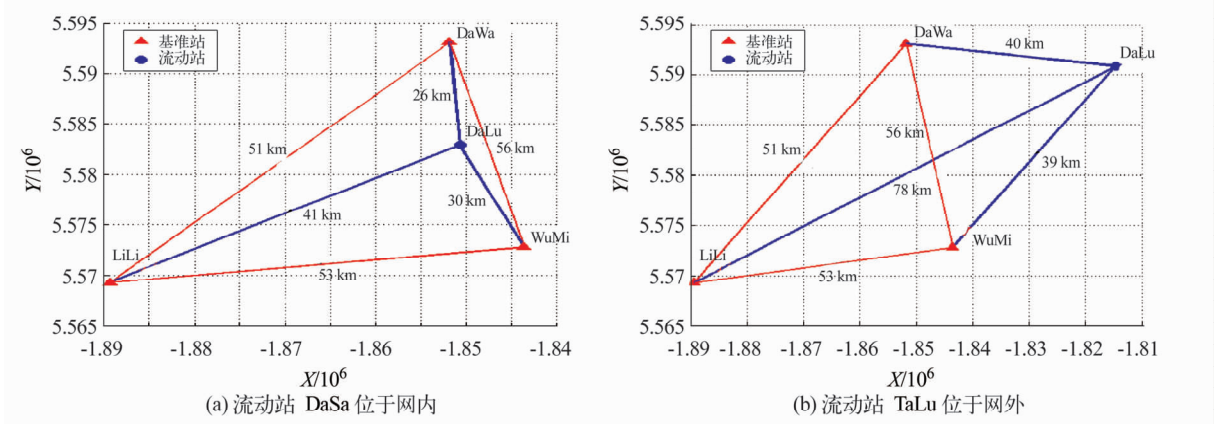


图 3 基准站/流动站平面位置分布

Fig. 3 Plane positon of reference station/roving station

网外单基准站 BDS/GPS 融合系统,方案④网内网外滑动平均等不同情况,分别对流动站进行差分网定位解算,以验证多基站差分网定位在精度、稳定性、可靠性等方面的优势。选取 GPST 2013-07-25 00:00:00 ~ 23:59:59,采样率为 1 s,卫星截止高度角为 10°,共计近 24 h 的数据进行多基站差分网定位解算,将各方案定位结果与流动站已知精确坐标求差,各分量对应残差图如图 4 ~ 7 所示。

将以上各方案定位结果进行统计,如表 1 所示。通过图、表对比方案①、方案②的多基站差分网定位结果可以看出,单 GPS 系统定位精度高于单 BDS 系统,而 BDS/GPS 融合(本文按等权)后,定位精度较 BDS 有大幅提高,与 GPS 精度相当,优于 1 m,大大高于常规伪距单点定位精度。从图 4、5 可以看出,

融合系统使单系统中不稳定点(图中最大残差)得到有效补偿,整体较单系统更加稳定。还可以看出,通过多基站差分网定位技术解算,位于网内的流动站 DaSa 定位精度较网外的 TaLu 高。分析其原因,一方面是通过多基站拟合出流动站的大气误差改正网内点较网外点更为切合,故而定位精度较高;另一方面是网外点 TaLu 站距各基准站的距离较网内点 DaSa 站远,也会造成定位精度随着距离增大而相应降低。对比方案②、方案③可以看出,BDS/GPS 多基站差分网定位精度明显优于各单基站定位精度。这是由于传统差分定位基准站单一,大气误差相关性会随着距离的增加而减弱,精度随之降低,致使定位范围有限。利用多个基准站,通过不同站点的权值分配可以内插出流动站点相对准确的改正信息,

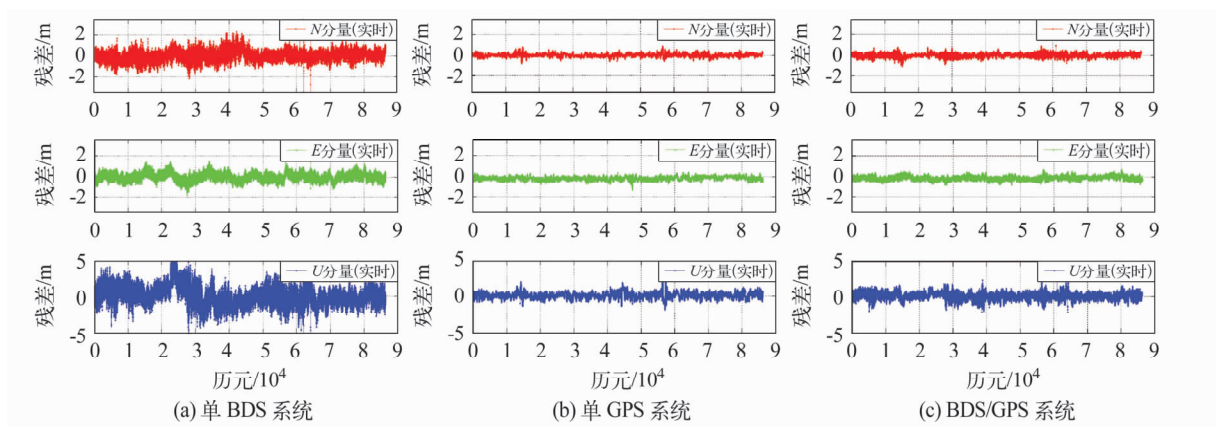


图4 方案①网内点 DaSa 单历元实时定位  $N$ 、 $E$ 、 $U$  分量残差

Fig. 4 Residual of single epoch real-time positioning in  $N$ ,  $E$ ,  $U$  direction within GNSS network

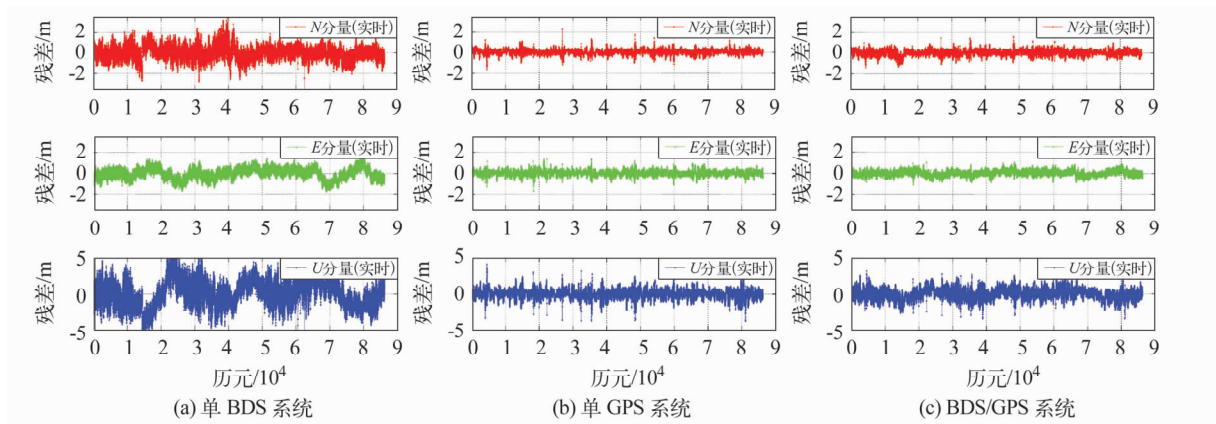


图5 方案②网外点 TaLu 单历元实时定位  $N$ 、 $E$ 、 $U$  分量残差

Fig. 5 Residual of single epoch real-time positioning in  $N$ ,  $E$ ,  $U$  direction outside GNSS network

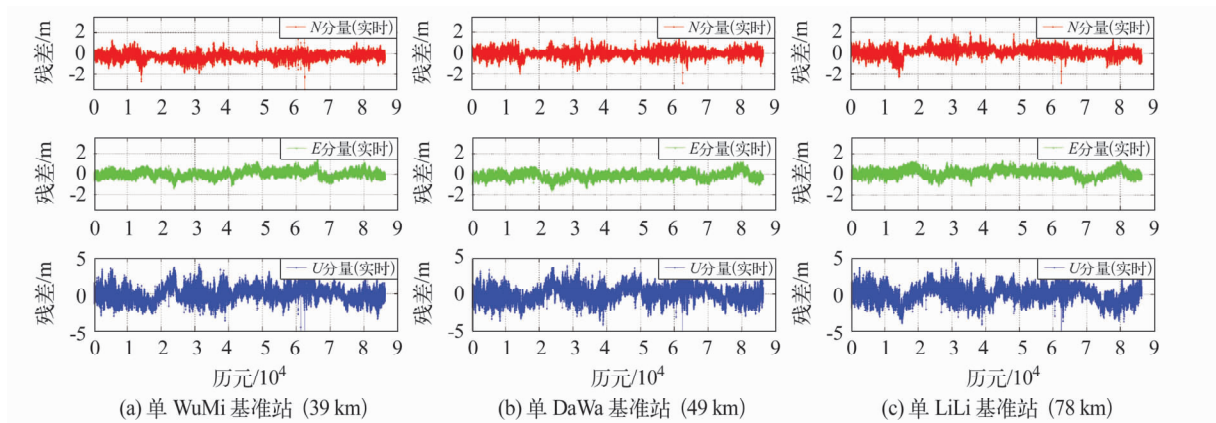


图6 方案③网外点 BDS/GPS 单历元实时定位  $N$ 、 $E$ 、 $U$  分量残差

Fig. 6 Residual of BDS/GPS single epoch real-time positioning in  $N$ ,  $E$ ,  $U$  direction outside GNSS network

避免基准站单一的不足,使定位结果更可靠,范围更广。方案④是在单历元实时定位基础上,依次将连续 40 个历元的滑动平均值作为实时定位结果。可以看出,滑动平均各分量的定位精度较单历元实时都有一定程度的提高。网内站、网外站提高最高的都为  $U$  分量, DaSa、TaLu 站  $U$  分量分别提高了 14.4%、7.9%。这是由于在实时定位解算时,  $U$  分

量上的噪声不能有效剔除,通过实时滑动平均能够有效削弱噪声的影响,各分量定位精度均达到 0.5 m 左右,时效性也能达到实时或近实时。

### 3 结 论

1) BDS/GPS 融合定位能有效增强 GPS 系统的可靠性和稳定性,很大程度上提高当前 BDS 区域系



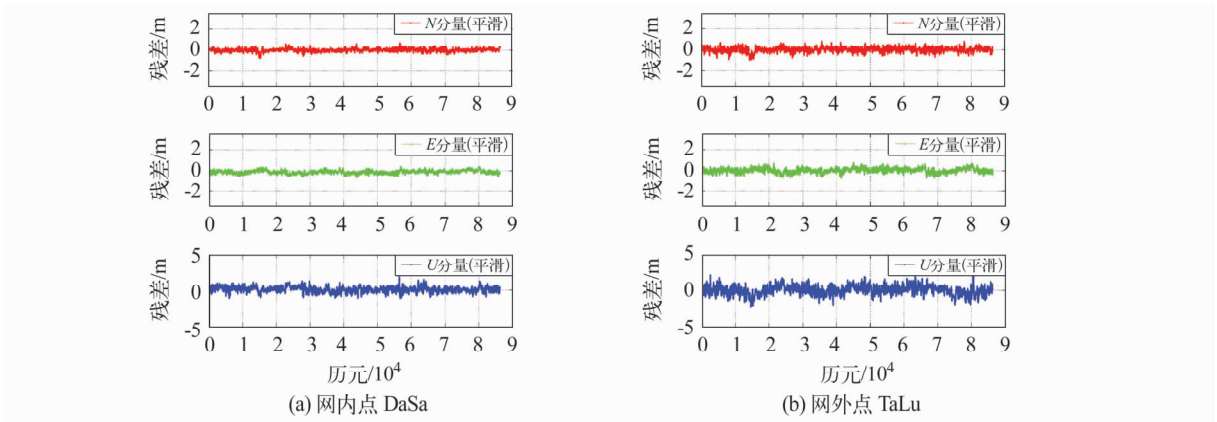


图7 方案④BDS/GPS 多基准站 40 历元实时滑动平均  $N$ 、 $E$ 、 $U$  分量残差

Fig.7 Moving average residual of BDS/GPS 40 epoch real-time in  $N$ 、 $E$ 、 $U$  direction

表 1 不同方案定位结果残差中误差 (RMS) 统计表

Tab.1 RMS of different positioning schemes

基 准 站	流 动 站	距 离 /km	多基站单历元									单基站单历元			多基站实时滑动		
			实时/m									实时/m			平均值/m		
			BDS			GPS			BDS/GPS			BDS/GPS			BDS/GPS		
			$N$	$E$	$U$	$N$	$E$	$U$	$N$	$E$	$U$	$N$	$E$	$U$	$N$	$E$	$U$
DaWa	网内 DaSa	30													0.146	0.204	0.38
WuMi		26	0.439	0.337	1.262	0.170	0.250	0.428	0.167	0.216	0.444				(↑12.2%)	(↑6.0%)	(↑14.4%)
LiLi		44															
DaWa	网外 TaLu	39										0.321	0.313	0.909	0.234	0.222	0.616
WuMi		49	0.609	0.483	1.714	0.251	0.253	0.628	0.251	0.236	0.669	0.390	0.366	0.938	(↑6.8%)	(↑6.0%)	(↑7.9%)
LiLi		78										0.410	0.367	0.996			

统的定位精度；

2) 基于 CORS 信息, BDS/GPS 融合差分网能够克服传统单系统/单基站差分定位的不足, 大大提高差分定位作用范围和伪距定位精度；

3) 多基准站 BDS/GPS 融合伪距差分网定位, 实时平面和高程方向精度均优于 1 m, 40 历元实时滑动平均定位精度能达到 0.5 m 左右, 完全能够满足大多数用户的实时导航定位需求。

参 考 文 献

1 黄丁发. 差分 GPS 连续运行参考站(网)建设研究[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(4): 375 – 378. (Huang Dingfa. On construction of continuous operation reference system for differential GPS satellite navigation and positioning[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35(4): 375 – 378)

2 刘经南. 连续运行卫星定位服务系统——城市空间数据的基础设施[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(3): 259 – 264. (Liu Jingnan. Continuous operational reference system infrastructure of urban spatial data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(3): 259 – 264)

3 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大

学出版社, 2010. (Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS surveying and data processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010)

4 李永川. 多基站 GPS 测量内插模型的比较分析[J]. 地矿测绘, 2005, 21(3): 1 – 3. (Li Yongchuan. Comparison and analysis of interpolation method on multiple reference station-based GPS surveying[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2005, 21(3): 1 – 3)

5 高星伟. GPS/GLONASS 伪距差分定位数据处理[J]. 测绘通报, 2000(6): 1 – 3. (Gao Xingwei. Data processing for pseudo-range differentials of GPS/GLONASS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2000(6): 1 – 3)

6 李鹤峰. BDS 与 GPS、GLONASS 多模融合导航定位时空统一[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(4): 73 – 78. (Li Hefeng. Research on spatio temporary unification of BDS/GPS/GLONASS multi-mode fusion navigation and positioning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(4): 73 – 78)

7 党亚民, 秘金钟, 成英燕. 全球导航卫星系统原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2007. (Dang Yamin, Bei Jinzhong, Cheng Yingyan. Principals and applications of global navigation satellite system[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007)