

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.04.015

# 北斗/GPS 双频载波相位单点定位模型及精度分析

李金龙, 王冰, 王爱兵, 朱恩慧, 袁红月

(北京卫星导航中心, 北京 100094)

**摘要:** 针对海洋工程实时米级绝对定位需求, 利用双频伪距、载波相位观测量和同时估计接收机位置、接收机钟差和载波相位模糊度, 构建了一种双频载波相位实时单点定位方法。亚太区域 14 个测站试验结果显示: 北斗水平和高程定位 RMS 分别为 1.33m 和 1.81m, GPS 为 0.60m 和 0.85m, 北斗/GPS 组合为 0.56m 和 0.72m; 船载动态试验结果显示: 北斗水平和高程定位 RMS 分别为 1.40m 和 2.46m, GPS 为 0.69m 和 0.90m, 北斗/GPS 组合为 0.65m 和 0.83m。

**关键词:** 北斗; GPS; 载波相位; 单点定位; 精度

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2021)04-0120-09

## BDS/GPS Dual-frequency Carrier-phase Single Point Positioning Model and Accuracy Analysis

LI Jin-long, WANG Bing, WANG Ai-bing, ZHU En-hui, YUAN Hong-yue

(Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** For offshore engineering real-time meter-level absolute positioning requirements, a real-time single point positioning method based on dual frequency pseudo range, carrier phase observation and simultaneous estimation of receiver position, receiver clock offset and carrier phase ambiguity is proposed. The results of static data collected from 14 stations in Asian-Pacific region show that the RMS values of BDS in horizontal and vertical directions are 1.33m and 1.81m, those of GPS are 0.60m and 0.85m and those of BDS/GPS are 0.56m and 0.72m. The results of shipborne kinematic tests show that the RMS values of BDS in horizontal and vertical directions are 1.40m and 2.46m, those of GPS are 0.69m and 0.90m and those of BDS/GPS are 0.65m and 0.83m.

**Key words:** BDS; GPS; Carrier-phase; Single point positioning; Accuracy

### 0 引言

随着国家海洋战略的逐步推进, 占地球表面 70% 的广阔海洋区域的精密定位需求将日益增大。与陆地精密定位不同, 海上精密定位无法通过与预先建立的基准点联测的方式来获得待定点的精确绝对坐标, 也无法通过实时监测站网对海洋区域电离层延迟误差进行精确建模和预报。因此, 双频无

电离层组合实时精密单点定位 (Precision Point Positioning, PPP) 技术是海上精密定位最适合的技术手段<sup>[1-3]</sup>。

近年来, PPP 技术发展日趋成熟, 实时 PPP 技术已具备工程化条件<sup>[4-5]</sup>。目前, 实时 PPP 服务主要有两种实现方式: 一种是 IGS-RTS 服务<sup>[6-8]</sup>, 即国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 组织通过 RTCM 互联网传输协议 (Networked Trans-

收稿日期: 2020-08-08; 修订日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金 (41931076, L1924033, 4210040864)

作者简介: 李金龙 (1986-), 男, 博士, 工程师, 主要从事 GNSS 服务性能监测评估以及 RTK, PPP 和 SBAS 终端算法的研究。

port of RTCM via Internet Protocol, NTRIP) 播发标准 RTCM-SSR 格式的精密轨道和钟差改正信息数据流, 用户免费注册就可通过互联网获得相应的精密差分改正信息, 结合用户观测数据即可实现实时 PPP; 另外一种是由商业公司提供的星基差分实时 PPP 服务<sup>[9]</sup>, 目前提供此类服务的公司主要有 OmniSTAR、Trimble、Fugro、Nav-Com、C-Nav、Veripos、Terra-Star、Novatel 和 Hemisphere 等。这类服务一般通过通信卫星在 L 波段播发自定义格式的实时精密差分改正信息, 用户需购买支持这类服务的专用接收机才能获得实时 PPP 服务, 而且还需定期缴纳服务费。这两种方式均可实现分米级至厘米级的实时动态定位精度, 但第二种星基差分实时 PPP 服务技术发展更为成熟, 目前已广泛应用于海底光缆敷设船、海上石油钻井平台动力定位系统和海上测量船等海洋工程精密定位应用领域。随着星基差分实时 PPP 技术发展越来越成熟, 北斗三号和 Galileo 系统已将 PPP 服务作为系统标准服务之一, 未来将成为海上精密定位的主要手段。

此外, 还有学者研究了基于星基增强系统 (Satellite-Based Augmentation Systems, SBAS) 轨道和钟差改正信息以及基于广播星历和钟差信息的 PPP 技术<sup>[10]</sup>。2011 年时, 基于广域增强系统 (Wide Area Augmentation System, WAAS) 轨道和钟差改正数的全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) PPP 精度可达 0.5m, 基于广播星历的 GPS PPP 精度在 2m 左右<sup>[11]</sup>。也有学者研究了基于广播星历的多天静态单点定位方法来获取绝对位置基准<sup>[12]</sup>。

考虑到实时米级绝对定位精度已经可以满足大部分海洋工程定位需求, 而分米级至厘米级实时 PPP 技术实现复杂, 且商业实时 PPP 服务费用昂贵, 尤其是远海区域。目前, 北斗三号系统 PPP 服务区域仅为亚太区域, Galileo 系统 PPP 服务还在测试中, 因此研究利用广播星历信息和双频载波相位与伪距观测量的实时单点定位技术实现米级绝对定位精度具有重要的现实意义和经济效益。本文通过简化 PPP 函数模型 (不估计对流层延迟参数)、优化随机模型和忽略部分 PPP 误差改正项, 从而实现基于广播星历的实时米级绝对定位。为与 PPP 技术区别, 将这种定位方式称为载波相位单点定位技术。

## 1 双频载波相位单点定位模型

非差双频无电离层组合伪距和载波相位观测

方程可表示如下

$$p_{r,IF}^s = \rho_r^s + dt_r - dt^s + v_r^s + d_{r,IF} + d_{IF}^s + e_{r,IF}^s \quad (1)$$

$$\phi_{r,IF}^s = \rho_r^s + dt_r - dt^s + v_r^s + \zeta_{r,IF} + \zeta_{IF}^s + \lambda_{IF} n_{r,IF}^s + \epsilon_{r,IF}^s \quad (2)$$

其中, s 和 r 分别为卫星和接收机标识;  $p_{r,IF}^s$  和  $\phi_{r,IF}^s$  分别为双频无电离层组合伪距和载波相位观测值;  $\rho_r^s = \|\mathbf{r}^s - \mathbf{r}_r\|$  为惯性系下信号发射时刻卫星天线相位中心  $\mathbf{r}^s$  与信号接收时刻接收机天线相位中心  $\mathbf{r}_r$  之间的几何距离;  $dt_r$  为接收机钟差;  $dt^s$  为卫星钟差 (包括相对论效应改正);  $v_r^s$  为对流层延迟误差;  $d_{r,IF}$  和  $d_{IF}^s$  分别为接收机和卫星的码硬件延迟;  $\zeta_{r,IF}$  和  $\zeta_{IF}^s$  分别为接收机和卫星未校准相位延迟 (Uncalibrated Phase Delay, UPD), 其中未校准相位延迟包括载波初始相位和硬件延迟;  $\lambda_{IF}$  为无电离层组合波长;  $n_{r,IF}^s$  为非差无电离层组合整周模糊度;  $e_{r,IF}^s$  和  $\epsilon_{r,IF}^s$  分别为无电离层组合伪距和载波相位观测值的未建模误差 (包括测量噪声、多径误差和高阶电离层延迟等)。由于钟差与码硬件延迟无法分离, 将其合并为一项, 则式 (1) 和式 (2) 可表示如下

$$p_{r,IF}^s = \rho_r^s + dt_{r,IF} - dt_{IF}^s + v_r^s + e_{r,IF}^s \quad (3)$$

$$\phi_{r,IF}^s = \rho_r^s + dt_{r,IF} - dt_{IF}^s + v_r^s + b_{r,IF}^s + \epsilon_{r,IF}^s \quad (4)$$

其中,  $dt_{r,IF} = dt_r + d_{r,IF}$ ,  $dt_{IF}^s = dt^s - d_{IF}^s$ ,  $b_{r,IF}^s = \zeta_{r,IF} + \zeta_{IF}^s - d_{r,IF} - d_{IF}^s + \lambda_{IF} n_{r,IF}^s$ 。

假设由广播导航电文信息计算得到信号发射时刻的卫星坐标向量为  $\bar{\mathbf{r}}^s$  (地心地固坐标)、卫星钟差为  $\overline{dt}_{brdc}^s$ , 令接收机坐标近似值向量为  $\bar{\mathbf{r}}_r$  (地心地固坐标), 则有

$$\rho_r^s \approx \bar{\rho}_r^s + \Delta\rho_r^s + (\mathbf{u}_r^s)^T \Delta\mathbf{r}^s - (\mathbf{u}_r^s)^T \Delta\mathbf{r}_r \quad (5)$$

$$dt_{IF}^s \approx \overline{dt}_{brdc}^s + tgd_{IF} \quad (6)$$

其中,  $\bar{\rho}_r^s = \|\bar{\mathbf{r}}^s - \bar{\mathbf{r}}_r\|$ ;  $\Delta\rho_r^s$  为地球自转效应改正;  $\mathbf{u}_r^s = \frac{\bar{\mathbf{r}}^s - \bar{\mathbf{r}}_r}{\bar{\rho}_r^s}$ ;  $\Delta\mathbf{r}^s$  为广播星历误差;  $\Delta\mathbf{r}_r$  为接收机坐标改正向量;  $tgd_{IF}$  为群延时间参数 (Timing Group Delay, TGD) 改正项。

假设根据对流层模型计算得到对流层延迟误差为  $\bar{v}_r^s$ , 接收机钟差近似值为  $\overline{dt}_{r,IF}$ , 忽略广播星历误差影响  $(\mathbf{u}_r^s)^T \Delta\mathbf{r}^s$ 、卫星钟差改正残余误差和对流层模型改正残余误差, 线性化后的非差伪距和载波相位观测值误差方程可表示如下

$$\begin{aligned} \Delta p_{r,IF}^s &= p_{r,IF}^s - g_r^s \\ &= -(\mathbf{u}_r^s)^T \Delta\mathbf{r}_r + \Delta dt_{r,IF} + e_{r,IF}^s \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta\phi_{r,IF}^s = \phi_{r,IF}^s - g_r^s - \bar{b}_{r,IF}^s$$

$$= -(\mathbf{u}_r^s)^T \Delta\mathbf{r}_r + \Delta dt_{r,IF} + \Delta b_{r,IF}^s + \epsilon_{r,IF}^s \quad (8)$$

其中,  $\bar{b}_{r,IF}^s$  为  $b_{r,IF}^s$  的近似值;  $\Delta dt_{r,IF}$  为接收机钟差改正数;  $\Delta b_{r,IF}^s$  为模糊度偏差改正项;  $g_r^s = \bar{\rho}_r^s + \Delta\rho_r^s + \overline{dt}_{r,IF} - \overline{dt}_{brdc}^s - tgd_{IF}^s + \bar{v}_r^s$ 。假设某一历元同时可见  $n$  颗卫星, 则载波相位单点定位数学模型可表示如下

$$E \begin{pmatrix} \Delta p_{r,IF}^1 \\ \vdots \\ \Delta p_{r,IF}^n \\ \Delta\phi_{r,IF}^1 \\ \vdots \\ \Delta\phi_{r,IF}^n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -(\mathbf{u}_r^1)^T & 1 & & & & \\ & \vdots & & & & \\ & -(\mathbf{u}_r^n)^T & 1 & & & \\ & -(\mathbf{u}_r^1)^T & 1 & 1 & & \\ & \vdots & & & \ddots & \\ & -(\mathbf{u}_r^n)^T & 1 & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta r_r \\ \Delta dt_{r,IF} \\ \Delta b_{r,IF}^1 \\ \vdots \\ \Delta b_{r,IF}^n \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$D \begin{pmatrix} \Delta p_{r,IF}^1 \\ \vdots \\ \Delta p_{r,IF}^n \\ \Delta\phi_{r,IF}^1 \\ \vdots \\ \Delta\phi_{r,IF}^n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} (\sigma_{\Delta p,IF}^1)^2 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & (\sigma_{\Delta p,IF}^n)^2 & & & \\ & & & (\sigma_{\Delta\phi,IF}^1)^2 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & (\sigma_{\Delta\phi,IF}^n)^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于 PPP, 由于对各项误差均进行精确修正或建模, 因此随机模型主要由伪距和载波相位测量噪声决定, 一般伪距和载波观测量之间权比为 1/100。而对于模型(7)和(8), 由于广播星历误差、卫星钟差改正残余误差和对流层模型改正残余误差等影响, 随机模型应该由观测误差和各项模型改正残余误差两部分组成, 即有

$$(\sigma_{\Delta p,IF}^s)^2 = (\sigma_{p,IF}^s)^2 + (\sigma_{sys}^s)^2 \quad (11)$$

$$(\sigma_{\Delta\phi,IF}^s)^2 = (\sigma_{\phi,IF}^s)^2 + (\sigma_{sys}^s)^2 \quad (12)$$

其中,  $\sigma_{p,IF}^s$  和  $\sigma_{\phi,IF}^s$  分别为无电离层组合伪距和载波相位观测噪声标准差;  $\sigma_{sys}^s$  为主要取决于卫星

导航系统空间信号精度的误差影响标准差(包括卫星轨道径向误差、卫星钟差改正残余误差和 TGD 改正误差等)。在本文试验中,  $\sigma_{\phi,IF}^s = a + b/\sin(el)$ , 其中,  $a = 0.003\text{m}$ ,  $b = 0.003\text{m}$ ,  $el$  为卫星高度角,  $\sigma_{p,IF}^s = 100\sigma_{\phi,IF}^s$ 。考虑到北斗与 GPS 广播星历精度情况<sup>[13]</sup>, 试验中不区分北斗卫星类型  $\sigma_{BDS}^s$  取 0.3m、 $\sigma_{GPS}^s$  取 0.1m。由于不估计天顶对流层延迟参数, 且精度要求仅为米级, 因此与传统 PPP 相比, 双频载波单点定位方法收敛速度更快, 基本与载波相位平滑伪距收敛过程相当。载波相位单点定位与 PPP 的比较如表 1 所示。

表 1 PPP 与载波相位单点定位比较

Tab. 1 Comparison of precise single point positioning with carrier-phase single point positioning

项目	双频 PPP	双频载波单点定位	
观测数据	双频伪距+载波	双频伪距+载波	相同
电离层延迟误差	双频消电离层组合	双频消电离层组合	
卫星轨道和钟差	精密星历和钟差	广播星历和钟差	
对流层延迟误差	模型改正+参数估计	模型改正	差异
相位绕转效应	改正	忽略	
卫星天线相位中心偏差及变化	改正	无需改正+忽略	
接收机天线相位中心偏差及变化	改正	忽略	
潮汐影响	模型改正	忽略	
待估参数	三维位置+接收机钟差+天顶对流层参数+模糊度	三维位置+接收机钟差+模糊度	
收敛时间	30~60min	更快	
动态定位精度	分米级至厘米级	米级	

对于北斗/GPS 联合单点定位, 忽略北斗与

GPS 坐标系统之间的差异, 仅考虑北斗和 GPS 时

间系统之间的差异,即估计 2 个接收机钟差参数。试验中,采用电离层残差组合法进行载波相位观测值的周跳探测,探测到周跳后不修复而是对模糊度参数项进行重新初始化。

## 2 数值验证

### 2.1 静态数据试验

静态试验数据为 2017 年年积日 82~84 共 3d 14

个测站数据,除北京架设的 BSNC 站外,其余 13 个为 MGEX 站,所有数据采样间隔为 30s,数据处理时高度截止角设为 10°。静态数据试验测站概况如表 2 所示,静态数据试验测站空间分布情况如图 1 所示,表 3 给出了试验期间 14 个测站北斗、GPS 和北斗/GPS 联合情况下的水平精度因子(Horizontal Dilution of Precision,HDOP)、垂直精度因子(Vertical Dilution of Precision,VDOP)和可见卫星数(NSAT)的平均值。

表 2 静态试验测站概况

Tab. 2 Overview of static test stations

测站	接收机	天线	概略位置		
			B/(°)	L/(°)	H/m
BSNC	ComNav M300	HX-CSX605A	40.1	116.3	50.9
CKSV	TRIMBLE NETR9	TPSCR.G3	23.0	120.2	59.6
CUT0	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	-32.0	115.9	24.0
DAE2	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	36.4	127.4	116.8
DLTV	TRIMBLE NETR9	JAVRINGANT_DM	11.9	108.5	1585.3
EUSM	TRIMBLE NETR9	JAVRINGANT_DM	5.1	100.5	18.8
GAMG	SEPT POLARX4TR	LEIAR25.R4	35.6	127.9	930.0
HKSL	LEICA GR50	LEIAR25.R4	22.4	113.9	95.3
HKWS	LEICA GR50	LEIAR25.R4	22.4	114.3	63.8
JFNG	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	30.5	114.5	71.3
JNAV	TRIMBLE NETR9	JAVRINGANT_DM	21.0	105.8	34.8
KMNM	TRIMBLE NETR9	TPSCR3_GGD	24.5	118.4	49.1
LHAZ	LEICA GR25	LEIAR25.R4	29.7	91.1	3624.7
NNOR	SEPT POLARX4	SEPCHOKE_MC	-31.0	116.2	234.9

表 3 试验期间(3d)测站平均 DOP 值和可见卫星数

Tab. 3 Averaged DOP values and the number of visible satellites during the test (three days)

测站	北斗			GPS			北斗/GPS		
	HDOP	VDOP	NSAT	HDOP	VDOP	NSAT	HDOP	VDOP	NSAT
BSNC	1.6	2.0	9.0	1.3	2.0	7.3	0.8	1.2	16.2
CKSV	1.3	2.4	9.8	0.9	1.7	9.0	0.7	1.1	18.7
CUT0	1.3	1.9	10.2	1.0	1.7	8.7	0.7	1.1	18.9
DAE2	1.7	3.0	8.8	1.1	1.7	8.5	0.7	1.2	17.3
DLTV	1.0	1.7	11.4	1.0	1.8	8.8	0.6	1.1	20.1
EUSM	1.0	1.7	11.7	0.9	1.6	9.8	0.6	1.0	21.5
GAMG	1.7	2.9	8.8	1.0	1.6	8.7	0.7	1.2	17.6
HKSL	1.2	1.8	10.8	0.9	1.6	9.1	0.7	1.1	19.8
HKWS	1.2	1.8	10.8	0.9	1.6	9.1	0.7	1.1	19.8
JFNG	1.3	1.9	10.3	1.0	1.6	8.8	0.7	1.1	19.0
JNAV	1.1	1.8	11.0	1.0	1.7	8.9	0.7	1.1	19.9
KMNM	1.3	2.1	10.3	0.9	1.6	9.0	0.7	1.1	19.3
LHAZ	1.7	3.7	7.9	1.1	1.8	8.4	0.8	1.3	16.3
NNOR	1.4	2.1	9.9	1.1	1.9	8.2	0.7	1.2	18.1
平均值	1.3	2.2	10.0	1.0	1.7	8.7	0.7	1.1	18.8

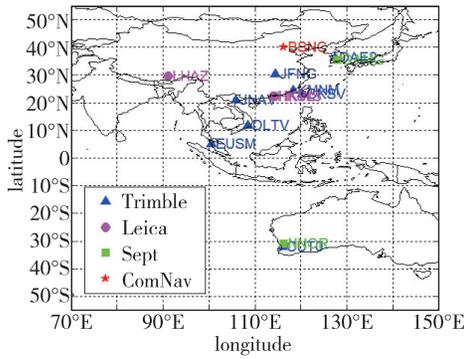


图1 静态数据试验测站空间分布情况

Fig. 1 Spatial distribution of the static test stations

从表3可知,测站BSNC、DAE2、GAMG和LHAZ的北斗平均可见卫星数或VDOP与其他测站相比差异明显,除了测站地理位置不一样导致的差异外,还存在如下原因:

- 1) ComNav M300 接收机由于固件版本原因,不能收集北斗 C13 卫星数据,故 BSNC 测站没有 C13 观测数据;
- 2) 由于北斗 C05 卫星在 DAE2 和 GAMG 测站的高度角小于  $10^\circ$ ,故 DAE2 和 GAMG 测站数据处理未包含 C05 观测数据;
- 3) LHAZ 测站由于未知原因,北斗卫星仅有高度角大于  $20^\circ$  卫星观测数据,而 C04 卫星高度角约

为  $10^\circ$ ,因此 LHAZ 测站没有 C04 观测数据。

此外,尽管亚太地区北斗平均可见卫星数达到 10 颗,大于 GPS 的 8.7 颗,但北斗平均 HDOP 和 VDOP 值分别为 1.3 和 2.2,反而大于 GPS 的 1.0 和 1.7,这主要由于北斗特殊的星座构成所致,试验期间为 5 颗地球静止轨道(Geosynchronous Orbit, GEO)卫星、6 颗倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星和 3 颗中圆地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星。

从表4可知,北斗 B1/B2 双频伪距单点定位平均水平定位精度为 2.15m,高程定位精度为 3.21m,三维定位精度为 3.88m;GPS L1/L2 双频伪距单点定位平均水平定位精度为 1.45m,高程定位精度为 2.57m,三维定位精度为 2.96m;北斗/GPS 双频伪距单点定位平均水平定位精度为 1.17m,高程定位精度为 1.83m,三维定位精度为 2.19m。北斗二号双频伪距单点定位精度差于 GPS 的原因如下:1)北斗空间星座几何构型弱于 GPS (见表3);2)北斗空间信号质量与 GPS 相比仍存在一定差距<sup>[13]</sup>。此外,通过分析 E、N 和 U 方向定位误差的偏差、标准偏差(Standard Deviation, STD)和均方根(Root Mean Square, RMS)(见表5)可知,北斗双频伪距单点定位在 E、N、U 方向均存在明

表4 双频伪距单点定位误差统计结果(RMS)

Tab. 4 Statistical results of the dual-frequency pseudo-range single point positioning errors (RMS)

测站	北斗			GPS			北斗/GPS		
	水平	高程	三维	水平	高程	三维	水平	高程	三维
BSNC	2.34	2.60	3.50	2.32	2.93	3.74	1.20	1.64	2.03
CKSV	2.07	3.20	3.81	1.23	2.46	2.75	1.09	1.69	2.01
CUT0	2.80	3.50	4.48	1.86	3.04	3.56	1.73	2.23	2.82
DAE2	2.72	4.71	5.43	1.51	2.30	2.75	1.21	1.85	2.21
DLTV	2.06	2.89	3.54	1.71	3.45	3.84	1.34	2.23	2.60
EUSM	1.64	3.59	3.95	1.25	2.71	2.99	1.03	2.54	2.74
GAMG	2.49	3.80	4.54	1.16	1.67	2.04	0.98	1.38	1.69
HKSL	1.70	1.94	2.58	1.23	2.42	2.72	0.98	1.36	1.68
HKWS	1.83	2.00	2.71	1.32	2.64	2.95	1.05	1.41	1.75
JFNG	2.11	2.93	3.61	1.34	2.28	2.64	1.10	1.70	2.02
JNAV	2.11	2.92	3.60	1.22	2.62	2.89	1.18	1.92	2.26
KMNM	1.85	2.73	3.29	1.24	2.33	2.64	0.99	1.58	1.86
LHAZ	2.00	4.83	5.23	1.46	2.56	2.95	1.09	2.35	2.59
NNOR	2.44	3.27	4.08	1.38	2.63	2.97	1.47	1.83	2.34
平均值	2.15	3.21	3.88	1.45	2.57	2.96	1.17	1.83	2.19

表 5 14 个测站双频伪距单点定位偏差、STD 和 RMS 平均值

Tab. 5 Averaged bias, STD and RMS of the dual-frequency pseudo-range single point positioning errors for 14 stations m

测站	北斗			GPS			北斗/GPS		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
偏差	-1.34	-0.45	0.79	0.06	-0.05	0.30	-0.61	-0.23	0.51
STD	0.87	1.24	2.82	0.90	1.10	2.53	0.61	0.70	1.66
RMS	1.62	1.40	3.21	0.92	1.11	2.57	0.87	0.78	1.83

显偏差,尤其是 E 方向偏差达到 1.34m,而 GPS 定位 E 和 N 方向的偏差在厘米级,高程方向也仅为 0.3m。而从内符合精度(STD)来看,北斗与 GPS 并无显著差异。由此可见,北斗双频伪距单点定位精度差于 GPS 的主要原因应该是北斗伪距单点定位结果存在的系统性偏差,由于北斗坐标系与 GPS 坐标系统差异在厘米级,因此原因可能与文献[14]分析的北斗广播星历偏差有关。

从表 6 可知,北斗双频载波单点定位平均水平定位精度为 1.33m,高程定位精度为 1.81m,三维定位精度为 2.26m,相对北斗双频伪距单点定位结果改善百分比分别为 38.1%、43.6%和 41.8%;GPS 双频载波单点定位平均水平定位精度为 0.6m,高程定位精度为 0.85m,三维定位精度为 1.04m,相对其双频伪距单点定位结果改善百分比分别为 58.6%、66.9%和

64.9%;北斗/GPS 双频载波单点定位平均水平定位精度为 0.56m,高程定位精度为 0.72m,三维定位精度为 0.92m,相对其双频伪距定位结果改善百分比分别为 52.1%、60.7%和 58.0%。

表 7 中给出了 14 个测站双频载波单点定位偏差、STD 和 RMS 平均值统计结果。虽然与双频伪距单点相比,北斗双频载波单点定位偏差有所减少,尤其是 E 方向,但仍然明显大于 GPS 结果。从内符合(STD)精度来看,北斗双频载波单点定位也差于 GPS。除了星座几何构型和空间信号质量等原因外,北斗 GEO 和 IGSO 卫星相对于用户的空间位置变化缓慢,不利于模糊度偏差快速收敛,也是北斗载波相位定位差于 GPS 的一个重要原因。图 2 所示为 JENG 测站伪距单点定位和载波相位单点定位的定位误差序列图。

表 6 双频载波单点定位误差统计结果(RMS)

Tab. 6 Statistical results of the dual-frequency carrier-phase single point positioning errors (RMS) m

测站	北斗			GPS			北斗/GPS		
	水平	高程	三维	水平	高程	三维	水平	高程	三维
BSNC	1.22	1.67	2.06	0.62	0.83	1.04	0.64	0.61	0.88
CKSV	1.15	1.82	2.15	0.57	0.88	1.05	0.58	0.81	0.99
CUT0	1.50	1.69	2.26	0.55	0.65	0.85	0.52	0.51	0.73
DAE2	1.70	3.13	3.57	0.56	0.77	0.95	0.56	0.65	0.86
DLTV	1.53	1.57	2.19	0.65	0.95	1.15	0.63	0.77	1.00
EUSM	1.13	1.69	2.04	0.71	0.96	1.19	0.59	0.81	1.00
GAMG	1.23	1.85	2.22	0.48	0.62	0.78	0.47	0.52	0.70
HKSL	1.19	1.31	1.77	0.57	0.87	1.04	0.54	0.70	0.88
HKWS	1.20	1.28	1.75	0.52	0.77	0.93	0.53	0.66	0.85
JFNG	1.22	1.72	2.10	0.58	0.81	1.00	0.55	0.71	0.90
JNAV	1.48	1.55	2.15	0.66	0.92	1.14	0.59	0.77	0.97
KMNM	1.54	2.12	2.62	0.64	0.98	1.17	0.64	0.95	1.14
LHAZ	1.18	2.35	2.63	0.64	1.07	1.25	0.53	0.90	1.05
NNOR	1.39	1.54	2.07	0.63	0.88	1.08	0.53	0.71	0.89
平均值	1.33	1.81	2.26	0.60	0.85	1.04	0.56	0.72	0.92
改善百分比/%	38.1	43.6	41.8	58.6	66.9	64.9	52.1	60.7	58.0

表 7 14 个测站双频载波单点定位偏差、STD 和 RMS 平均值

Tab. 7 Averaged bias, STD and RMS of the dual-frequency carrier-phase single point positioning errors for 14 stations m

测站	北斗			GPS			北斗/GPS		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
偏差	-0.72	-0.58	0.13	-0.10	-0.10	0.10	-0.18	-0.23	0.17
STD	0.63	0.65	1.67	0.40	0.39	0.82	0.35	0.31	0.68
RMS	0.98	0.91	1.82	0.43	0.41	0.86	0.41	0.38	0.73

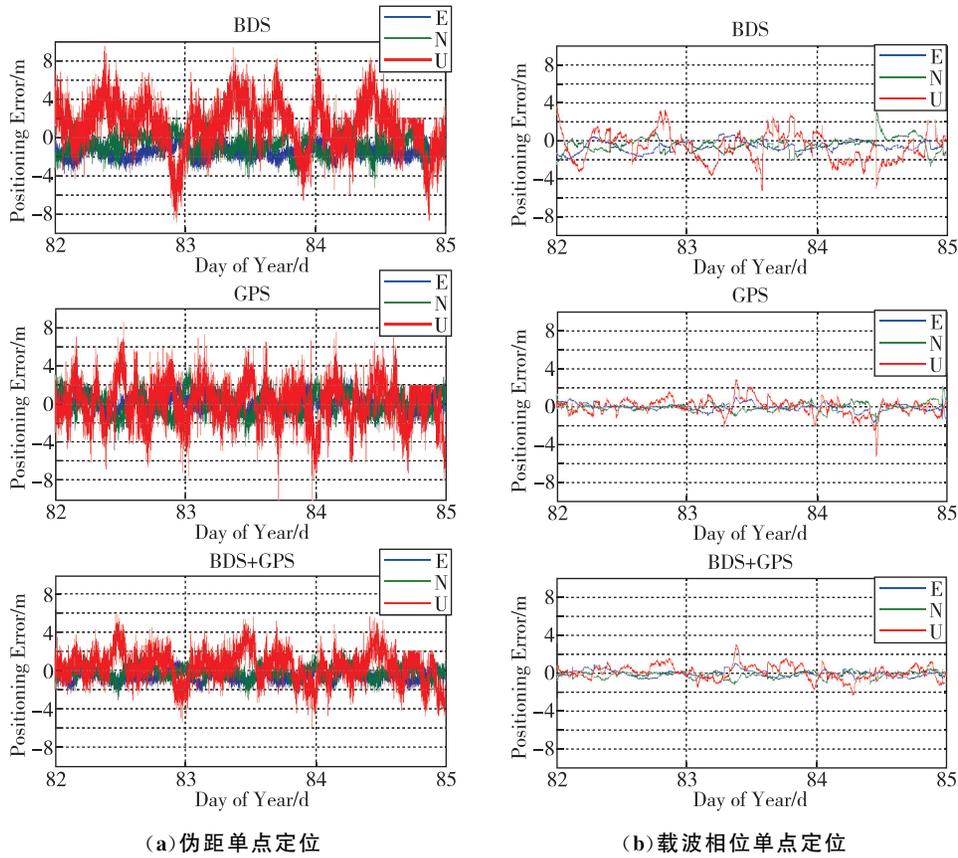


图 2 JFNG 测站定位误差

Fig. 2 Positioning errors of the JENG station

2.2 船载动态数据试验

船载动态试验数据采集于 2017 年 4 月 15 日 9 时 30 分—16 日 8 时 35 分,在我国南海海域使用上海司南导航公司 M300 型接收机,以 1s 采样间隔采集了约 23h 的船载动态数据,船载动态试验运动轨迹如图 3 所示。

试验以合众思壮公司的星基差分实时 PPP 服务“中国精度”接收机的实时 PPP 固定解为参考基准(精度约 0.1m),2 台接收机通过功分器连接到一个天线。由于试验船的航速仅为 15 节且 2 台接收机的接收机钟差均小于 1ms,因此可忽略 2 台接收机时标差异带来的坐标比对误差。北斗、GPS 和北斗/GPS 组合伪距单点定位和载波相位单点定位误

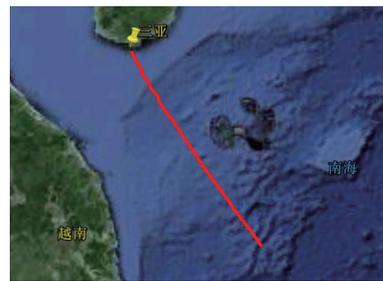


图 3 船载动态试验轨迹图

Fig. 3 Shipborne kinematic test track

差序列如图 4 所示,其中 15 日 13 时—20 时期间,由于参考基准接收机数据输出线缆松动,未能记录数据,故无法给出该时段内定位误差序列,动态试验定位误差的统计结果如表 8 所示。

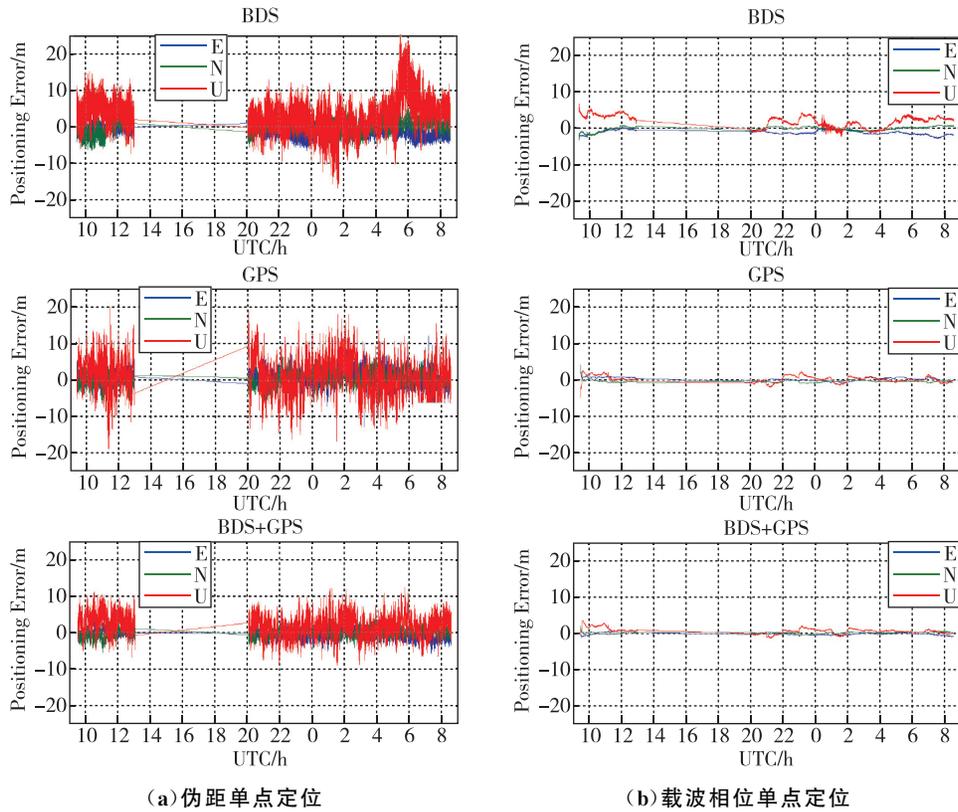


图 4 船载动态试验定位误差

Fig. 4 Positioning errors of the shipborne kinematic test

表 8 船载动态试验定位误差统计结果(RMS)

Tab. 8 Statistical results of positioning errors for shipborne kinematic test (RMS)

测站	北斗			GPS			北斗/GPS		
	水平	高程	三维	水平	高程	三维	水平	高程	三维
伪距单点定位	2.56	5.41	5.98	2.63	4.84	5.51	1.69	3.35	3.76
载波单点定位	1.40	2.46	2.83	0.69	0.90	1.14	0.65	0.83	1.06
改善百分比/%	45.3	54.5	52.7	73.8	81.4	79.3	61.5	75.2	71.8

从图 4 可以看出,载波相位单点定位对于抑制伪距单点定位中的高频和低频误差均有显著效果,这主要得益于载波相位观测量更高的测量噪声和更小的多径误差影响,从而可以显著改善单点定位精度。从表 8 可知,船载动态试验情况下,载波相位单点相对伪距单点定位改善显著。北斗单系统情形下,水平、高程和三维改善百分比分别为 45.3%、54.5%和 52.7%;GPS 单系统情形下,改善百分比分别为 73.8%、81.4%和 79.3%;北斗/GPS 组合情形下,改善百分比分别为 61.5%、75.2%和 71.8%。

综合表 4、表 6 和表 8 的静态与船载动态试验结果可知,北斗载波相位单点定位水平精度优于 1.5m,三维定位精度优于 3m;GPS 和北斗/GPS 组合定位水平精度优于 0.7m,三维定位精度优于

1.2m。此外,不管是伪距单点定位还是载波相位单点定位,北斗/GPS 组合定位的精度均优于 GPS 或北斗单系统,但北斗/GPS 组合载波相位单点定位精度相对于 GPS 单系统改善有限。

### 3 结论

基于导航卫星实时播发的广播星历和钟差信息以及双频伪距、载波相位观测量,通过简化的 PPP 函数模型和优化的随机模型构建了一种双频载波相位单点定位方法。多站多天静态数据和船载动态数据试验显示:该方法可实现北斗单系统水平定位精度优于 1.5m,位置定位精度优于 3m;GPS 单系统和北斗/GPS 双系统组合水平定位精度优于 0.7m,位置定位精度优于 1.2m。由于该方法不需

要接收精密差分改正信息、也不需要增加额外硬件设备,只需更新现有 GNSS 双频测量型接收机软件,即可实现全球区域实时米级绝对定位,因此可广泛应用于海洋工程领域,具有较好的经济效益和应用前景。需要说明的是,该方法在可获取卫星精密轨道和钟差的情况下仍然适用,因此也可以利用北斗三号 and Galileo 系统播发的精密差分改正信息进一步提高定位精度。

### 参考文献

- [1] 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, 103(B3): 5005-5017.
- [2] 张小红, 左翔, 李盼. 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): 250-256.  
Zhang Xiaohong, Zuo Xiang, Li Pan. Convergence time and positioning accuracy comparison between BDS and GPS precise point positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(3): 250-256 (in Chinese).
- [3] 李博峰, 葛海波, 沈云中. 无电离层组合、Uofc 和非组合精密单点定位观测模型比较[J]. *测绘学报*, 2015, 44(7): 734-740.  
Li Bofeng, Ge Haibo, Shen Yunzhong. Comparison of ionosphere-free, Uofc and uncombined PPP observation models[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(7): 734-740(in Chinese).
- [4] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1399-1407.  
Zhang Xiaohong, Li Xingxing, Li Pan. Review of GNSS PPP and its application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1399-1407 (in Chinese).
- [5] Choy S, Bisnath S, Rizos C. Uncovering common misconceptions in GNSS precise point positioning and its future prospect[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 13-22.
- [6] El-Diasty M, Elsobeiey M. Precise point positioning technique with IGS Real-Time Service (RTS) for maritime applications[J]. *Positioning*, 2015, 6(4): 71-80.
- [7] Elsobeiey M, Al-Harbi S. Performance of real-time precise point positioning using IGS real-time service [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 565-571.
- [8] Hadas T, Bosy J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 93-105.
- [9] Choy S, Kuckartz J, Dempster A G, et al. GNSS satellite-based augmentation systems for Australia[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 835-848.
- [10] Rho H, Langley R B. The usefulness of WADGPS satellite orbit and clock corrections for dual-frequency precise point positioning [C]//Proceedings of ION GNSS 20<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth, TX, 2007:939-949.
- [11] Heßelbarth A, Wanninger L. SBAS orbit and satellite clock corrections for precise point positioning [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4):465-473.
- [12] 康艳超, 王乐, 谢威, 等. 基于广播星历的北斗绝对位置基准建立与精度分析[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(2): 117-125.  
Kang Yanchao, Wang Le, Xie Wei, et al. Establishment and accuracy analysis of BDS absolute position datum based on broadcast ephemeris[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(2):117-125(in Chinese).
- [13] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides; a multi-GNSS perspective[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 321-333.
- [14] 张益泽, 陈俊平, 周建华, 等. 北斗广播星历偏差分析及改正[J]. *测绘学报*, 2016, 45(S2): 64-71.  
Zhang Yize, Chen Junping, Zhou Jianhua, et al. Analysis and application of BDS broadcast ephemeris bias[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(S2): 64-71(in Chinese).

(编辑:孟彬)