

# 结合实时数据产品与北斗短报文的厘米级海洋精密相对定位\*

姬生月<sup>1</sup>, 杨浩<sup>1</sup>, 董蔺<sup>2</sup>, 王振杰<sup>1</sup>, 贺凯飞<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580; 2. 青岛杰瑞自动化有限公司, 山东 青岛 266061)

**摘要:**针对远海精密定位的广泛需求和传统精密定位服务费用昂贵的问题,提出利用北斗短报文设备传输导航观测数据,结合实时服务数据产品,以实现海洋的低成本厘米级精密相对定位。为了克服短报文传输频率低的缺点,采用融合空间相对定位和精密单点定位两种技术来加密分钟间隔以外的坐标,避免了传统时间基线法加密坐标存在的误差累积现象。分别基于静态和动态海洋观测数据进行仿真实验,结果表明,新方法无论在水平方向还是垂直方向上,都可以实现厘米级定位,且对时间间隔不敏感。

**关键词:**海洋;北斗短报文;实时数据产品;精密相对定位;低成本

中图分类号:P228 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2022)06-134-10



与作者互动  
听语音  
聊科研

## Centimeter-level ocean precise relative positioning by combining real-time data products and BeiDou short-message

Ji Shengyue<sup>1</sup>, Yang Hao<sup>1</sup>, Dong Lin<sup>2</sup>, Wang Zhenjie<sup>1</sup>, He Kaifei<sup>1</sup>

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;  
2. Qingdao JARI Automation Company, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** In view of the wide demand for precision positioning in the ocean and the high cost of traditional precision positioning services, it was proposed to use BeiDou short-message equipment to transmit navigation observation data, combined with real-time data products, to achieve low-cost centimeter-level precise relative positioning in the ocean. In order to overcome the shortcomings of low transmission frequency of short messages, for the first time, the two technologies of fusion spatial relative positioning and precise point positioning were used to encrypt coordinates outside the minute interval, avoiding the accumulation of errors in the encrypted coordinates of the traditional time-relative method. Simulation experiments were carried out based on static and dynamic ocean observation data. Results show that the new method can achieve centimeter-level positioning in both horizontal and vertical directions, and the results show that the new method is not sensitive to the length of time interval.

**Keywords:** ocean; BeiDou short-message; real-time data products; precise relative positioning; low-cost

随着全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的不断发展,卫星导航定位的精确性与可靠性也得到了增强<sup>[1]</sup>,同时基于海洋资源在未来的发展潜力<sup>[2-3]</sup>,结合GNSS精密导航与定位技术促进海洋领域生产发展已成为研究的热点,例如在海洋资源勘探、海上救援、水下定位等方面提供技术支持<sup>[4-7]</sup>。

精密相对定位在海洋中的应用很少,原因在于实现定位需要借助无线通信手段从基站端传输其观测数据到流动端,其服务范围不能覆盖海洋或远海<sup>[8-10]</sup>。海洋上空卫星通信由于成本昂贵普通用户无法承担,目前,远海精密导航与定位主

要依赖于国外的服务提供商,包括天宝、徠卡等公司,每年的服务费用可达几十万元,限制了精密相对定位在海洋上的普及。

北斗短报文因其低廉的服务费用,成为海洋传输基站端数据,是实现海洋精密相对导航与定位的另一种选择,具有通信抗干扰能力强、可靠性高、范围广的特点<sup>[11-12]</sup>。但北斗短报文传输数据存在两个缺点:第一,单次通信容量有限,一条短报文只能传输78.5 B的内容;第二,通信频率有限,发送两次短报文需要一定的时间间隔,民用短报文的通信间隔为1 min,且该时间间隔有变为5 min的趋势。

\* 收稿日期:2020-11-12

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(41604027,41701513,41704021,42074028);地震动力学国家重点实验室基金资助项目(LED2018B03);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(16CX02026A,18CX02054A,18CX02064A);山东省自然科学基金资助项目(ZR2020MD065,ZR2020MD042);青岛海洋科技国家实验室基金资助项目(QNLM2016ORP0401)

**作者简介:**姬生月(1974—),男,山东聊城人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail: jidifferent@gmail.com

为了克服北斗短报文传输基站端数据的一个缺点,文献[13]提出了用伪距和相位改正数取代原始伪距和相位观测值进行传输的方法,显著减少了需要传输的数据量。为了克服北斗短报文传输基站端数据的第二个缺点,即低通信频率,文献[14-17]提出了两种方法:第一种方法为增加北斗短报文设备的数目,该方法的缺点为显著增加了通信和硬件成本;第二种为空间相对定位与时间基线相结合的方法,时间基线法是利用单台接收机在不同历元采集观测数据,计算两个历元间的相对位置。如图1所示,首先在站点 $t_1$ 处架设GNSS接收机进行观测,然后快速将接收机架设到站点 $t_{i+1}$ 处进行观测,最后基于不同历元间的GNSS观测数据进行差分计算 $t_i$ 和 $t_{i+1}$ 的相对位置。但该方法定位精度会随累积时间的延长而快速降低,1 min的累积,其三维定位精度可降低到10~20 cm;5 min的累积,其三维定位精度将会更低。

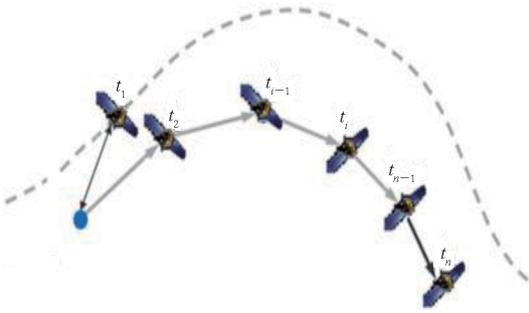


图1 时间相对定位

Fig. 1 Time-relative positioning

鉴于未来精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 服务信号将作为数据播发通道,基于北斗三号地球静止轨道卫星播发全球卫星导航系统精密轨道与钟差等的实时服务 (real-time service, RTS) 产品数据<sup>[18]</sup>,将有助于克服广播星历轨道和钟误差的影响<sup>[19-20]</sup>,提高海洋精密相对定位的精度。因此,本研究提出了空间相对定位与基于RTS产品数据的实时精密单点定位相结合的方法,并与时间基线法进行了实验对比,评估了相应的定位精度。由于目前,即使基于多频的观测数据,长距离实时动态 (real-time kinematic, RTK) 的模糊度还是很难固定,所以,本文只基于双频观测数据进行了测试,须依赖模糊度的收敛,但本文所提方法有助于未来实现海洋长距离RTK。

## 1 RTS数据改正卫星轨道与钟差

由于未来在国内以及周边地区可以通过地球

静止轨道卫星接收RTS产品数据,因此本研究中采用RTS数据对广播星历的轨道、钟差进行改正,减少卫星广播星历误差,通常修正后轨道误差约为3~6 cm,而钟差约为0.3 ns<sup>[19]</sup>。而实时产品数据提供的卫星轨道的径向、切向、法向修正值需要先由星固系转为地固系,才可修正卫星轨道。

首先计算卫星轨道在切向、法向和径向的单位向量,即

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \frac{\mathbf{V}}{|\mathbf{V}|} \\ \mathbf{C} = \frac{\mathbf{X} \times \mathbf{V}}{|\mathbf{X} \times \mathbf{V}|} \\ \mathbf{R} = \frac{\mathbf{A} \times \mathbf{C}}{|\mathbf{A} \times \mathbf{C}|} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{V}$ 分别是由广播星历计算出的卫星位置和速率向量。然后将上述改正信息由星固系转为地固系:

$$d\mathbf{X} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{A} \quad \mathbf{C}] \begin{bmatrix} d\mathbf{R} \\ d\mathbf{A} \\ d\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $d\mathbf{R}$ 、 $d\mathbf{A}$ 、 $d\mathbf{C}$ 分别是轨道信息中星固系下的径向、切向和法向分量修正值。依据广播星历计算的卫星位置 $\mathbf{X}_{\text{SAT}}$ ,可以计算实时卫星的精密轨道坐标:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{\text{SAT}} - d\mathbf{X} \quad (3)$$

实时精密卫星钟差 $T$ 可以由广播星历计算的钟差与RTS数据中的钟差改正数得到:

$$T = T_{\text{SAT}} - dT/V_c \quad (4)$$

式中, $T_{\text{SAT}}$ 为广播星历计算出的钟差, $dT$ 为实时钟差改正数, $V_c$ 为真空中的光速。

## 2 基于北斗短报文的空空间相对定位

### 2.1 服务端GNSS数据处理

首先在服务端计算伪距与相位改正数<sup>[13]</sup>,并通过短报文设备进行发送,改正数计算公式如下:

$$d\Phi_{b,IF}^s = (\rho_b^s + \lambda_{IF} N_{b,IF}^s + dR_b^s - \delta t_b^s + \tau_b + M_b^s Z_b^s + \varepsilon_{\Phi_{b,IF}^s}) - \Phi_{b,IF}^s \quad (5)$$

$$dP_{b,IF}^s = (\rho_b^s + dR_b^s - \delta t_b^s + \tau_b + M_b^s Z_b^s + \varepsilon_{P_{b,IF}^s}) - P_{b,IF}^s \quad (6)$$

式中: $\rho_b^s$ 代表站星几何距离; $\lambda_{IF}$ 是组合波长; $N_{b,IF}^s$ 是模糊度参数; $dR_b^s$ 和 $\delta t_b^s$ 是卫星的轨道误差和钟差; $\tau_b$ 是接收机钟差; $Z_b^s$ 和 $M_b^s$ 是天顶方向的对流层延迟与映射函数; $\varepsilon_{\Phi_{b,IF}^s}$ 和 $\varepsilon_{P_{b,IF}^s}$ 是观测噪声; $\Phi_{b,IF}^s$ 和 $P_{b,IF}^s$ 是无电离层组合相位和码观测值。

对于伪距改正数通过减去其平均值来缩小小改

正数绝对值范围,而相位改正数采用对持续观测的相同卫星的相位改正数减去其首历元对应的整周数,再减去平均值,实现缩小改正数绝对值范围的效果<sup>[15]</sup>,以此计算的单个改正数采用美国信息交换标准代码(American standard code for information interchange,ASCII)进行编码仅占用 2 B。

### 2.2 卫星数据编码

对于卫星名称采用编码发送,具体如表 1 所示。GNSS 系统类型采用数字 0 ~ 3 表示,占用 2 bit。卫星的伪随机噪声(pseudo random noise, PRN)码北斗占用 6 bit,其余系统占用 5 bit。

表 1 卫星名称信息编码处理

Tab.1 Encoding process of satellite name information

名称	范围	占用空间/bit
卫星数目	<64	6
系统类型	GPS:0	2
	Galileo:1	
	BeiDou:2	
	GLONASS:3	
PRN	GPS: <32	BeiDou:6 其他:5
	Galileo: <32	
	BeiDou: <64	
	GLONASS: <32	

按照以上数据处理方案,一条短报文可以在有限通信容量内传输 13 颗以上的卫星数据(含改正数及卫星名称信息),足以实现低成本的远海导航定位。

### 2.3 用户端实现空间相对定位

用户端通过短报文设备接收服务端发送的改正数据(参见图 2)并进行改正,其实质等于进行了站间差分,组成了基线。最后,基于如下数学模型计算用户端坐标:

$$AX + BN + MZ = L \tag{7}$$

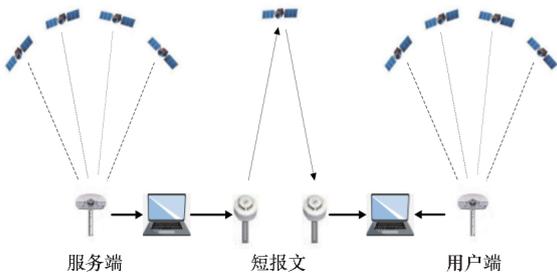


图 2 基于短报文发送基站端观测数据

Fig.2 Sending observations of base station through BeiDou short-message

式中: $N$  为模糊度参数; $Z$  为天顶方向对流层延迟参数; $A$ 、 $B$  和  $M$  为对应的系数矩阵; $L$  为多模多频 GNSS 双差伪距和相位观测向量(无电离层组合)。

### 3 带约束的实时精密单点定位

该方法的基本原理:利用空间相对定位得到的 1 min 或 5 min 间隔的用户精确坐标作为约束,求解实时精密单点定位数学模型中的模糊度,然后基于该模糊度计算其他时刻的用户位置。

设由空间相对定位得到的 1 min 或 5 min 间隔历元  $m$  的用户坐标为  $X'_m$ ,该历元的精密单点定位观测方程为:

$$A_m X'_m + B_m N + M_m Z = L_m \tag{8}$$

式中: $L_m$  为载波相位的消电离层组合观测向量; $A_m$ 、 $B_m$ 、 $M_m$  为对应的系数矩阵,其中  $B_m$  为方阵,对应权阵为  $P_m$ (等权)。

忽略  $M_m Z$ ,则可得到

$$N' = B_m^{-1} (L_m - A_m X'_m) \tag{9}$$

事实上,这里的  $N' = B_m^{-1} (L_m - A_m X'_m - M_m Z)$

设历元  $i$  的精密单点定位观测方程为:

$$A_i X_i + B_i N + M_i Z = L_i \tag{10}$$

方程(10)中所用的卫星与方程(8)相同,即  $B_i = B_m$ ,将得到的  $N'$ 代入方程(10),得

$$A_i X_i + B_i B_m^{-1} (L_m - A_m X'_m - M_m Z) + M_i Z = L_i \tag{11}$$

由于历元  $m$  与历元  $i$  的时间跨度不超过 5 min,且对流层延迟通过模型改正了大部分,故可以忽略  $M_m Z$  与  $M_i Z$  的差异,方程简化为:

$$A_i X_i = L_i - (L_m - A_m X'_m) \tag{12}$$

即

$$A_i X_i = L_i - B_i N' \tag{13}$$

故

$$X_i = (A_i^T P_i A_i)^{-1} A_i^T P_i (L_i - B_i N') \tag{14}$$

因此,1 min 或 5 min 间隔内其他任何历元的用户坐标都可以利用该方法计算得到。

### 4 实验测试与精度分析

#### 4.1 远海精密相对数据处理流程

结合 RTS 数据产品和北斗短报文的远海精密定位流程如图 3 所示。服务端接收 RTS 数据改正轨道和钟差,进行周跳的探测修复与误差改正后,计算相位、伪距改正数,剔除高度角不符的卫星数据,依据用户端发送的观测卫星信息,选取剩余的共视卫星数据通过北斗短报文

设备进行发送,用户端接收服务端发送的数据后组成基线进行空间相对定位(主要误差处理策略:电离层延迟采用双频消电离层组合,对流层延迟采用萨斯塔莫宁模型,海上接收机采用加装抑径圈对多路径效应进行削弱,卫星端和

接收机端天线相位中心校正分别基于天线文件和接收机厂家提供的改正数值,固体潮汐和相位缠绕采用模型改正)。在获取分钟间隔的用户端精确坐标的基础上,利用带约束的精密单点求得其他历元的精确坐标。

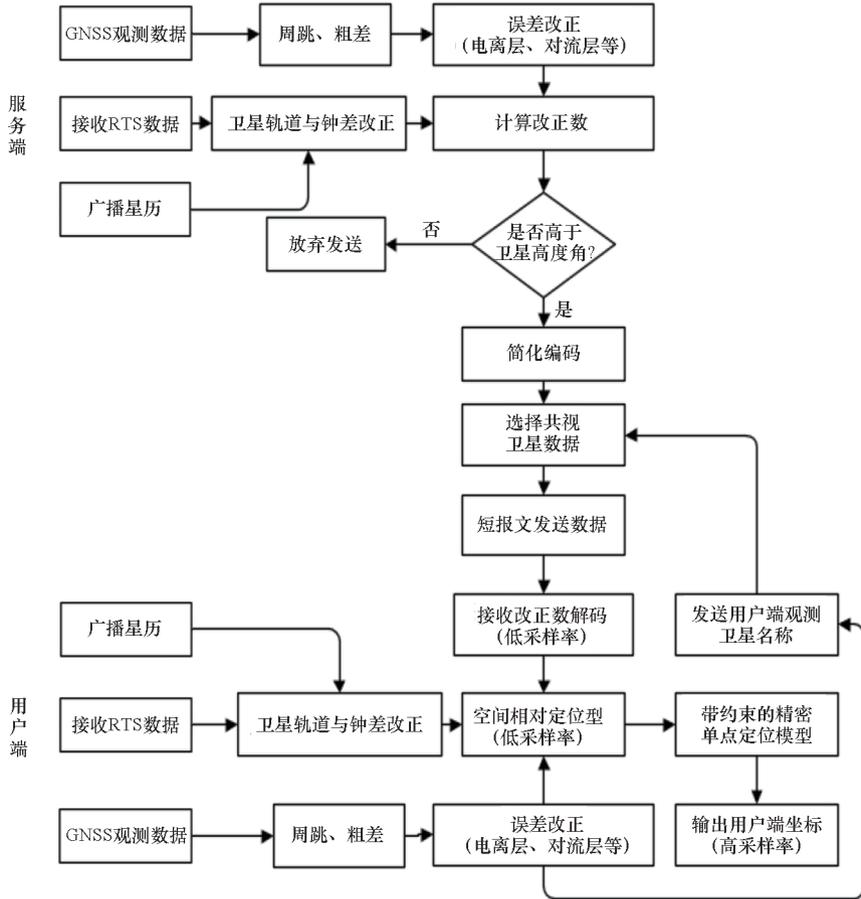


图3 数据处理流程

Fig. 3 Data processing flow

由于基于北斗短报文的软件开发尚未完成,只能通过事后模拟数据处理的各个流程。为了评估本研究在北斗短报文设备发送频率为 1 min 或 5 min 的远海精密相对定位的精度,分别通过国际全球卫星导航系统服务 (international GNSS service, IGS) 站点静态数据和实测海洋动态 GNSS 数据进行了仿真实验测试。

### 4.2 静态数据实验与精度分析

选取位于西班牙的 IGS 参考站 EBRE、VILL, 基线长度约 377 km, 站点位置如图 4 所示。下载相应站点于 2019 年积日 266 的四系统 (GPS/Galileo/BeiDou/GLONASS) 双频观测值数据, 观测值采样间隔为 1 s, 数据时间为 2019 年 9 月 23 日 00:00:00—07:00:00 (GPS 时间)。以 EBRE 作为基准站, VILL 为流动站, 截止高度角为 15°, 坐标真值采用 IGS 提供的周解文件中的坐标。



图4 IGS 站点位置

Fig. 4 IGS station location

静态实验中首先对基准站数据进行重采样得到采样率为 1 min 和 5 min 的 GNSS 观测数据 (数据采样率对应短报文发送频率间隔), 结合 RTS 数据进行预处理计算改正数, 与流动站数据组成基线进行空间相对定位, 在空间相对坐标的基础

上采用带约束的精密单点定位加密其他历元坐标。

图 5 为基于广播星历的空间相对定位与时间基线法相结合的方法 1 min 时间间隔定位结果, 而图 6 为基于融合空间相对定位与精密单点定位的方法 1 min 时间间隔的定位结果。其中红色点代表空间相对定位的定位结果, 蓝色点代表在此基础上通过时间基线或精密单点定位进行加密得到的定位结果。从图 5 可以明显看出时间基线法在 1 min 内的累积误差, 在北向 (north, N) 与东向 (east, E) 上的大多数定位误差不超过 5 cm, 在天向 (up, U) 的定位误差大于 E、N 方向, 但大多数定位误差不超过 12 cm, 少数历元会超过 15 cm。图 6 所示的定位结果明显优于图 5, E、N 方向上的大多数定位误差不超过 3 cm, 在 U 方向上定位误差大多数不超过 5 cm。

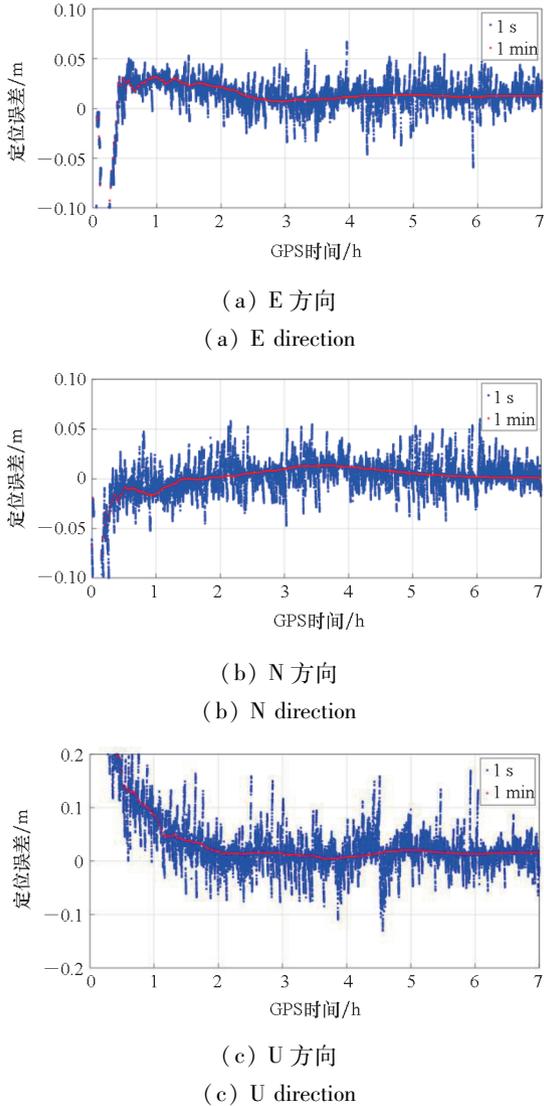


图 5 静态数据实验下时间基线定位误差(1 min)  
Fig. 5 Time-relative positioning error under static of data experiment(1 min)

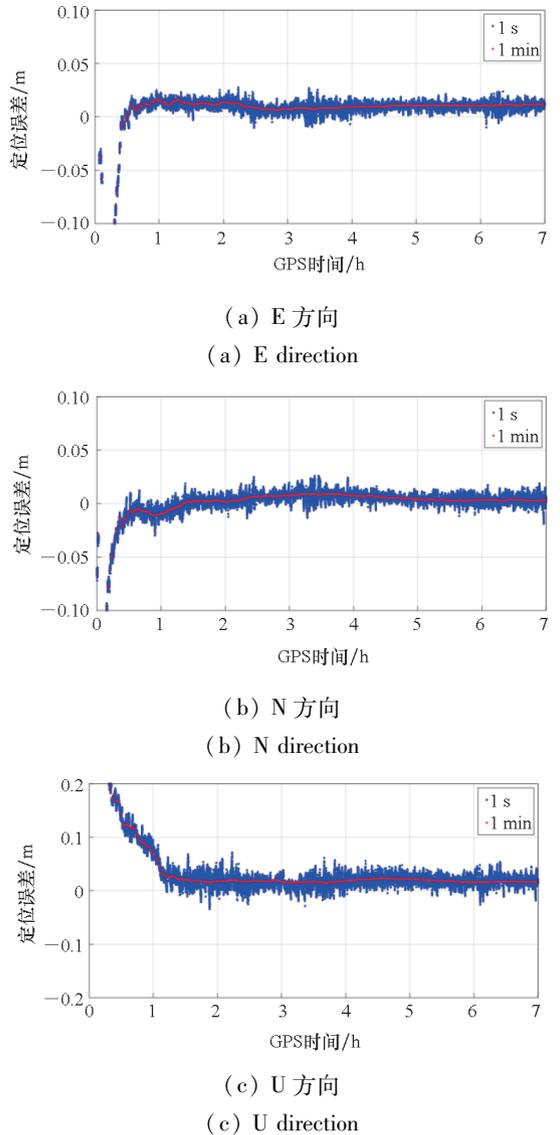
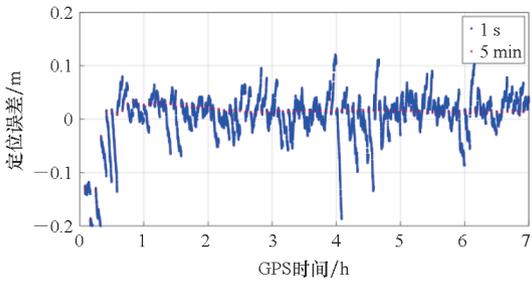


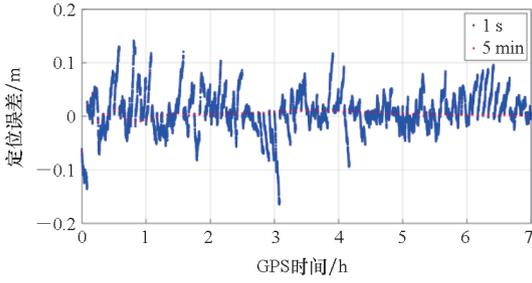
图 6 带约束的精密单点定位误差(1 min)  
Fig. 6 Precise point positioning error with constraints(1 min)

图 7 和图 8 分别为对应 5 min 时间间隔的结果明显要差一些, 但在 E、N 方向的误差大多数保持在 10 cm 以内, U 方向的误差大多数保持在 18 cm 以内, 存在少数历元 U 方向误差最大可至 40 cm 左右。同样地, 与图 7 相比, 图 8 的定位结果要好, 且与图 6 类似, 在 E、N 方向的误差大多数保持在 3 cm 以内, U 方向的误差大多数保持在 7 cm 以内。

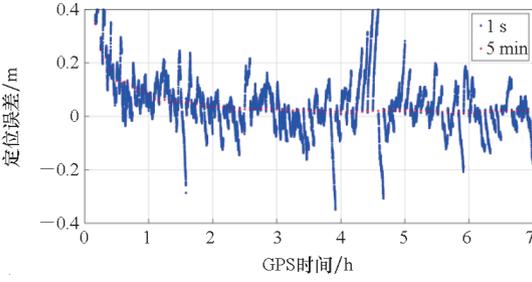
将定位 1 h 后的结果按时段统计相应的均方根 (root mean square, RMS) 误差值, 每小时统计一次 (参见表 2), 可以明显看出, 短报文发送频率的时间间隔由 1 min 增加至 5 min 对时间基线法的定位精度有较大的影响, 例如 4 h 至 5 h, 单时段 U 方向误差 RMS 值由 4.212 cm 升至 14.66 cm。反观空间相对定位与精密单点定位相融合的方法在两种发送频率下都取得了较高的定位精度, U 方向的 RMS 变化值保持在毫米级别, 三维方向的 RMS 值都在 5 cm 以内。



(a) E 方向  
(a) E direction



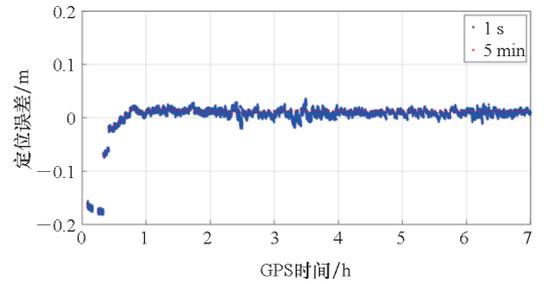
(b) N 方向  
(b) N direction



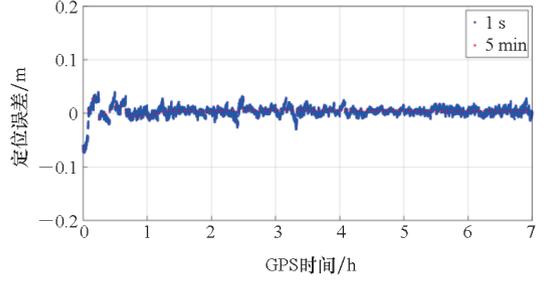
(c) U 方向  
(c) U direction

图 7 时间基线定位误差(5 min)

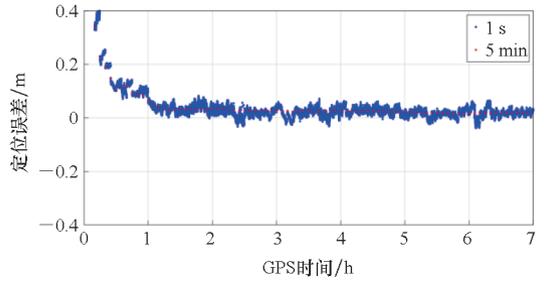
Fig. 7 Time-relative positioning error(5 min)



(a) E 方向  
(a) E direction



(b) N 方向  
(b) N direction



(c) U 方向  
(c) U direction

图 8 带约束的精密单点定位误差(5 min)

Fig. 8 Precise point positioning error with constraints(5 min)

表 2 定位误差 RMS

Tab. 2 Positioning error RMS

单位:cm

时段/ h	短报文发送时间间隔 1 min						短报文发送时间间隔 5 min					
	时间基线法			空间相对定位 结合精密单点定位			时间基线法			空间相对定位 结合精密单点定位		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
1—2	2.547	1.339	5.224	1.293	0.553	3.168	2.945	3.982	9.580	1.367	0.699	3.956
2—3	1.544	1.403	3.278	0.970	0.713	1.887	2.963	3.540	7.371	1.090	0.915	2.536
3—4	1.579	1.772	3.033	0.907	0.967	1.778	3.521	4.342	7.794	1.086	0.850	2.575
4—5	1.849	1.317	4.212	1.005	0.672	2.368	4.741	2.617	14.660	1.008	0.673	3.015
5—6	1.919	1.715	3.180	1.050	0.488	1.989	3.456	2.713	8.349	1.021	0.622	2.007
6—7	1.837	1.226	2.516	1.100	0.535	2.112	3.741	3.637	6.267	1.072	0.697	2.551

### 4.3 海洋数据实验与精度分析

2019 年 9 月 23 日,在山东省青岛市唐岛湾区域海上船上上架设了 3 台接收机,并在岸边架设 1 台天宝接收机(命名为 SHOR),与架设于山东省济南市山东建筑大学的天宝接收机(命名为 JINA)进行同步观测,基线长度约为 282 km,岸边接收机与海上接收机距离不超过 1 km,详细位置与实验仪器如图 9 所示。本实验只采用了船上带有抑径圈的天宝 ALLOY 接收机(命名为 BUOY)的观测数据。接收机采集了四系统(GPS/Galileo/BeiDou/GLONASS)双频观测值数据,观测值采样间隔为 1 s,数据时间为 2019 年 9 月 23 日 00:04:00 到 00:08:00(GPS 时间)。



(a) 实验地点 (a) Experimental location  
(b) 实验设备 (b) Experimental device

图 9 实验地点及仪器

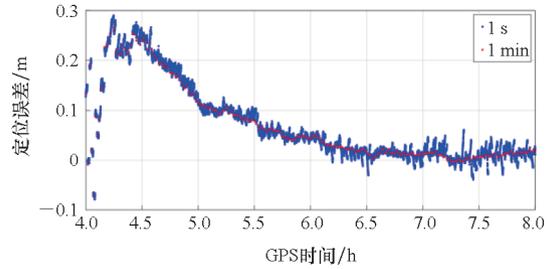
Fig. 9 Experimental location and device

海洋实验中可以形成三条基线, JINA - SHOR、JINA - BUOY、SHOR - BUOY。首先利用 Bernese5.2 软件对 JINA 站点静态数据进行 PPP 处理,得到 JINA 站的精确坐标。然后对静态长基线 JINA - SHOR,采用静态相对定位处理得到 SHOR 站点的精确坐标。最后对于长度 1 km 以内的短基线 SHOR - BUOY,处理得到固定模糊度后的各个历元精确坐标。本实验中,三条基线可以形成闭合环,可以用来验证长基线 JINA - BUOY 的定位精度。

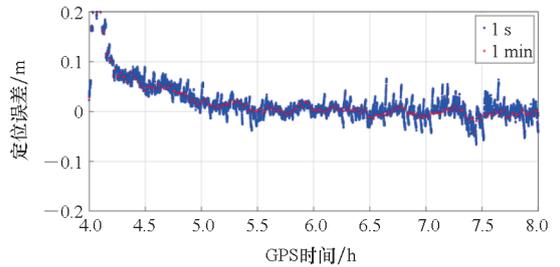
同样对 JINA 站数据进行重采样得到采样率为 1 min 和 5 min 的 GNSS 观测数据(数据采样率对应短报文发送频率间隔),结合 RTS 数据进行预处理计算改正数,与 BUOY 站数据组成基线进行空间相对定位,在求得空间相对定位坐标的基础上采用带约束的精密单点定位加密其他历元坐标。

图 10 和图 11 为对应 1 min 时间间隔两种方法的定位结果。同样可以看出,融合空间相对定位与精密单点定位的方法的定位结果比空间相对定位与时间基线相结合的方法要好。图 10 中,在 E、N 方向的大多数定位误差不超过 6 cm,在 U 方向的定位误差高于水平方向,大部分保持在 12 cm

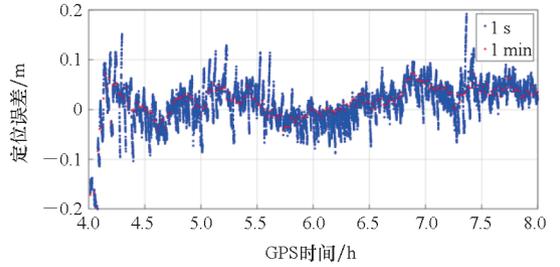
以内,少数历元定位误差稍大,也保持在 20 cm 以内。图 11 中,在 E、N 方向上的大多数定位误差不超过 3 cm,在 U 方向上的大多数定位误差不超过 7 cm。



(a) E 方向  
(a) E direction



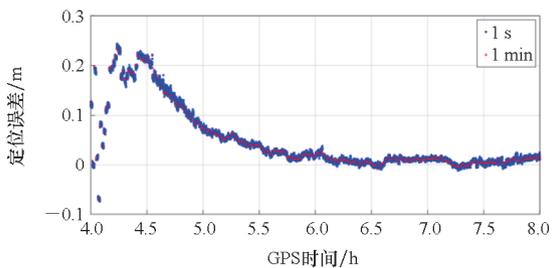
(b) N 方向  
(b) N direction



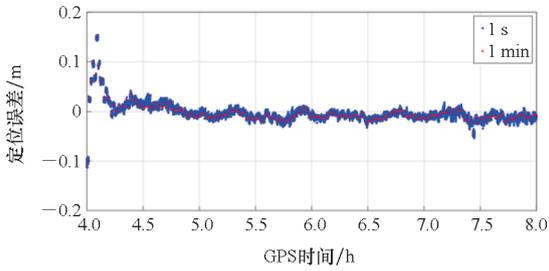
(c) U 方向  
(c) U direction

图 10 海洋数据实验下时间基线定位误差(1 min)  
Fig. 10 Time-relative positioning error under ocean data experiment(1 min)

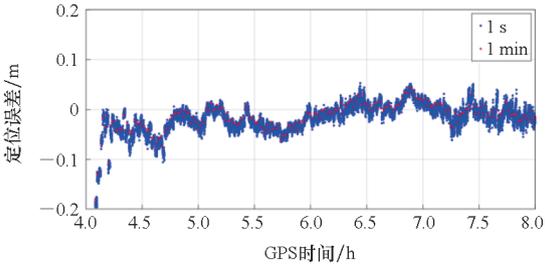
图 12 和图 13 为对应 5 min 时间间隔两种方法的定位结果,同样地,融合空间相对定位与精密单点定位的结果比空间相对定位与时间基线相结合



(a) E 方向  
(a) E direction



(b) N 方向  
(b) N direction

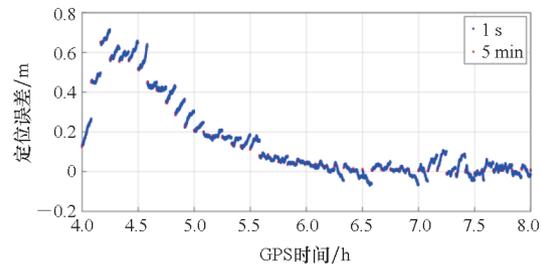


(c) U 方向  
(c) U direction

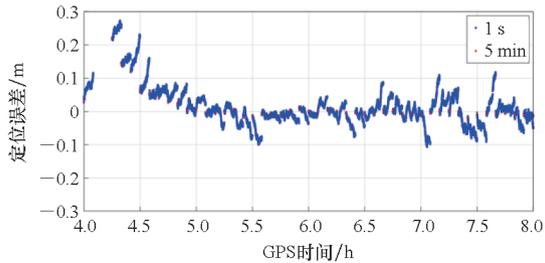
图 11 带约束的精密单点定位误差(1 min)

Fig.11 Precise point positioning error with constraints(1 min)的方法要好。与图 10 相比,图 12 的定位结果明显要差一些,但 E、N 方向的大多数定位误差不超过 11 cm,在 U 方向的定位误差较大,大多数保持在 20 cm 以内,主要由于时间基线法采用广播星历进行历元间差分,随着差分周期的增长,星历误差和钟差不断累积,因此图 12 的精度比图 10 要低。

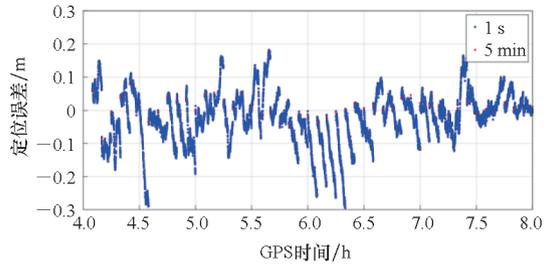
与图 11 相比,图 13 的定位结果要稍差一些,但 E、N 方向大多数定位误差不超过 4 cm,而 U 方



(a) E 方向  
(a) E direction



(b) N 方向  
(b) N direction

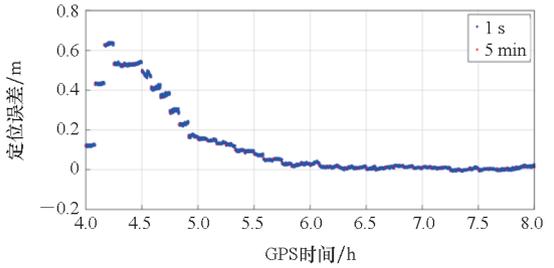


(c) U 方向  
(c) U direction

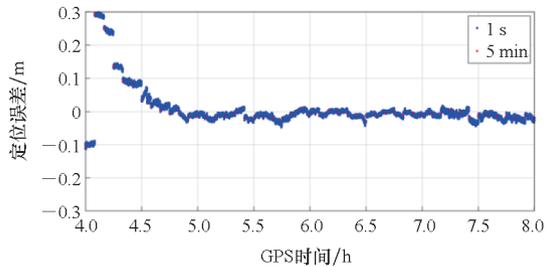
图 12 时间基线定位误差(5 min)

Fig.12 Time-relative positioning error(5 min)

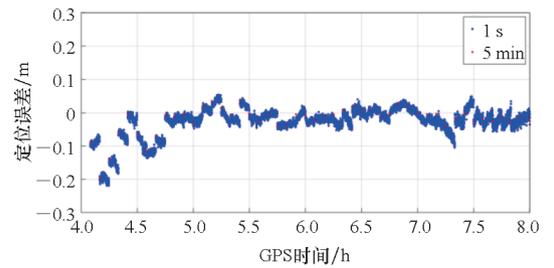
向的定位误差最大保持在 10 cm 以内,主要由于经过 RTS 数据的轨道钟差改正,星历误差得到了很大的削弱,但是对流层采用模型改正,存在偏差,且会随着时间累积,因此 5 min 间隔的精度不如 1 min 间隔的精度。



(a) E 方向  
(a) E direction



(b) N 方向  
(b) N direction



(c) U 方向  
(c) U direction

图 13 带约束的精密单点定位误差(5 min)

Fig.13 Precise point positioning error with constraints(5 min)

将定位 1 h 后的结果按时段统计相应的 RMS 值,每小时统计一次(参见表 3),可以看出,随着短报文发送频率的时间间隔增加,时间基线法定位误差的整体 RMS 值明显升高,例如 6 h 至 7 h,单时段 U 方向误差 RMS 值由 3.454 cm 升至

10.116 cm,E、N 方向的变化值低于 U 方向。而空间相对定位与精密单点定位融合的方法受短报文发送频率变化的影响较小,在 3 个时段的三维方向上,RMS 变化值都维持在 1.5 cm 以内,整体 RMS 误差保持在 5 cm 以内。

表 3 定位误差 RMS  
Tab.3 Positioning error RMS

单位:cm

时段/ h	短报文发送时间间隔 1 min						短报文发送时间间隔 5 min					
	时间基线法			空间相对定位 结合精密单点定位			时间基线法			空间相对定位 结合精密单点定位		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
5—6	7.981	1.457	3.764	4.220	1.120	3.186	14.044	3.054	6.597	9.634	1.652	2.424
6—7	2.391	1.369	3.454	1.138	1.087	1.678	2.717	2.523	10.116	1.605	1.018	1.966
7—8	1.869	1.847	4.562	0.957	1.419	1.899	3.825	4.370	4.904	0.920	1.695	3.151

### 5 结论

本文结合北斗短报文设备和 RTS 产品数据,融合空间相对定位技术和精密单点定位技术,基于四系统(GPS/Galileo/BeiDou/GLONASS)双频的静态数据和实测海洋数据进行测试,结果表明,该方案可以达到厘米级别的定位精度,甚至三维方向的定位精度优于 5 cm,其定位性能明显优于基于广播星历的空间相对定位与时间基线相结合的方法。同时,该方案定位成本低廉,以传输 26 颗卫星数据为例,仅需 2 套短报文设备便可以完成数据传输,即年通信费用 2 200 元左右。

该方案目前的缺点:由于无法固定模糊度,所需收敛时间较长,至少半个小时。随着卫星导航系统以及相关技术的发展和建设,未来基于多频观测数据的模糊度解算方面的有关研究一定能取得突破性进展,届时可在本方案的基础之上,完善基于北斗短报文的海洋长距离 RTK,对于促进未来北斗产业与海洋应用结合发展具有重要的实用意义。

### 参考文献 (References)

[1] 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 Y X. Progress, contribution and challenges of compass/Beidou satellite navigation system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6. (in Chinese)

[2] 王芳. 新时期海洋强国建设形势与任务研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2020(5): 11-19.  
WANG F. Research on the situation and tasks of building a

strong maritime power in the new era[J]. Journal of Ocean University of China (Social Sciences), 2020(5): 11-19. (in Chinese)

[3] 刘笑阳. 海洋强国战略研究: 理论探索、历史逻辑和中国路径[D]. 北京: 中共中央党校, 2016.  
LIU X Y. Research on the strategy of maritime power[D]. Beijing: Party School of the Central Committee of C. P. C., 2016. (in Chinese)

[4] 张静远, 谌剑, 李恒, 等. 水下地形辅助导航技术的研究与应用进展[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(3): 128-135.  
ZHANG J Y, SHEN J, LI H, et al. Research and application progress on underwater terrain-aided navigation technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(3): 128-135. (in Chinese)

[5] 杨元喜, 徐天河, 薛树强. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(1): 1-8.  
YANG Y X, XU T H, XUE S Q. Progresses and prospects in developing marine geodetic datum and marine navigation of China[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(1): 1-8. (in Chinese)

[6] 李姗姗. 水下重力辅助惯性导航的理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.  
LI S S. Research on the theory and method of underwater gravity-aided inertial navigation [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2010. (in Chinese)

[7] 李科, 王智明, 李胜全, 等. 海上导航信息远程传输监控技术研究与应用[J]. 海洋测绘, 2013, 33(1): 22-25.  
LI K, WANG Z M, LI S Q, et al. Research and application of the technique for monitoring and remote transmission of maritime navigation information[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2013, 33(1): 22-25. (in Chinese)

[8] 王磊, 宋蕾. 利用北斗短信功能实现海上测量信息的回传[J]. 海洋测绘, 2011, 31(3): 25-27.  
WANG L, SONG L. Equipment status information returned using COMPASS SMS [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2011, 31(3): 25-27. (in Chinese)

- [9] 管健安. 基于 CORS 系统精密定位服务若干技术问题研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
GUAN J A. Application and certain technical question research of precise positioning service based on CORS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [10] 吴北平. GPS 网络 RTK 定位原理与数学模型研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2003.  
WU B P. Principle and mathematical model research for GPS network RTK[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2003. (in Chinese)
- [11] 成方林, 张翼飞, 刘佳佳. 基于“北斗”卫星导航系统的长报文通信协议[J]. 海洋技术, 2008, 27(1): 26 - 28, 31.  
CHENG F L, ZHANG Y F, LIU J J. Long message communication protocol based on the “BeiDou” satellite navigation system[J]. Ocean Technology, 2008, 27(1): 26 - 28, 31. (in Chinese)
- [12] 李英成, 薛艳丽, 李西林, 等. 北斗短报文的无人机飞行监管技术与装备研究[J]. 测绘科学, 2019, 44(6): 47 - 51.  
LI Y C, XUE Y L, LI X L, et al. Research on UAV flight supervision technology and equipment based on BeiDou short message [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(6): 47 - 51. (in Chinese)
- [13] LI B F, ZHANG Z T, ZANG N, et al. High-precision GNSS ocean positioning with BeiDou short-message communication[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(2): 125 - 139.
- [14] LI X X, GE M R, GUO B F, et al. Temporal point positioning approach for real-time GNSS seismology using a single receiver [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(21): 5677 - 5682.
- [15] JI S Y, SUN Z R, WENG D J, et al. High-precision ocean navigation with single set of BeiDou short-message device[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(9): 1589 - 1602.
- [16] BALARD N, SANTERRE R, COCARD M, et al. Single GPS receiver time-relative positioning with loop misclosure corrections[J]. GPS Solutions, 2006, 10(1): 56 - 62.
- [17] MICHAUD S, SANTERRE R. Time-relative positioning with a single civil GPS receiver[J]. GPS Solutions, 2001, 5(2): 71 - 77.
- [18] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件: 精密单点定位服务信号 PPP-B2b[R]. [出版地不详: 出版者不详], 2020.  
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document: precise point positioning service signal PPP-B2b [R]. [S. l. : s. n. ], 2020. (in Chinese)
- [19] 孙山, 丁克良, 李德元. RTS 产品和精密产品在精密单点定位中的比较和分析[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集: S05 精密定位技术, 2018: 150 - 154.  
SUN S, DING K L, LI D Y. Comparison and analysis of RTS product and precise product in precise point positioning[C]// Proceedings of the 9th China Satellite Navigation Conference: S05 Precision Positioning technology, 2018: 150 - 154. (in Chinese)
- [20] NIE Z X, WANG B Y, WANG Z J, et al. An offshore real-time precise point positioning technique based on a single set of BeiDou short-message communication devices[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(9): 1 - 11.