

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905473

# 基于 BDS-3、GPS 和 Galileo 重叠频率观测值的 紧组合 RTK 定位方法\*

曹相<sup>1</sup>, 王庆<sup>1</sup>, 高成发<sup>2</sup>, 潘树国<sup>1</sup>

(1. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096; 2. 东南大学交通学院 南京 210096)

**摘要:**基于 BDS-3、GPS 和 Galileo 的重叠频率(BDS-3 B1C/B2a、GPS L1/L5、Galileo E1/E5a)观测值,分析了重叠频率观测值间的差分系统间偏差(DISB)稳定性,在此基础上提出了顾及系统间偏差的三系统紧组合 RTK 定位方法,并采用实测数据对常规松组合和紧组合模型的模糊度解算性能和定位精度进行了对比分析。分析结果表明,对于用相同类型接收机组成的基线,3个系统重叠频率观测值间的伪距和载波 DISB 均接近于零,可直接忽略。相比常规各系统选择各自参考卫星的松组合模型,采用共同参考卫星的系统间紧组合模型单历元模糊度解算的模型强度、固定率、固定准确率均有一定的改善,尤其在高截止高度角的不良观测环境下改进明显;在定位精度方面,紧组合模型也有一定的提升,当截止高度角为 40°时,N/E/U 3个方向上的定位精度分别可提高 15.0%、11.8%和 19.4%。

**关键词:** BDS-3; GPS; Galileo; 差分系统间偏差; RTK 定位

**中图分类号:** TH762 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.10

## Tightly combined RTK positioning method based on the overlapping-frequency observations of BDS-3, GPS and Galileo

Cao Xiang<sup>1</sup>, Wang Qing<sup>1</sup>, Gao Chengfa<sup>2</sup>, Pan Shuguo<sup>1</sup>

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In this paper the stability of the differential inter-system biases (DISBs) for the observation values of overlapping frequencies is analyzed based on the observation values of the overlapping frequencies (BDS-3 B1C/B2a, GPS L1/L5, Galileo E1/E5a) of BDS-3, GPS and Galileo. On this basis, a tightly combined triple-system real-time kinematic (RTK) positioning method considering DISBs is proposed. The ambiguity resolution (AR) performance and positioning accuracy for the conventional loosely combined model and tightly combined model are compared and analyzed with real test data. The analysis results show that for the baseline composed of the same type of receivers, the pseudorange and carrier-phase DISBs among the observation values of the overlapping frequencies for the three systems are very close to zero and thus can be ignored. Compared with those of the conventional loosely combined model where the systems select their individual reference satellites, the model strength, the fixed rate and the fixed accuracy of single-epoch AR for the tightly combined model adopting common reference satellites are all improved to some extent, and the improvement is obvious especially for the obstructed environment with high cut-off elevation angle. In the aspect of positioning accuracy, the tightly combined model also has a certain improvement. In the condition of the cut-off elevation angle of 40°, the positioning accuracies in North/East/Up directions can be improved by 15.0%, 11.8% and 19.4%, respectively.

**Keywords:** BDS-3; GPS; Galileo; differential inter-system bias (DISB); real-time kinematic (RTK) positioning

## 0 引 言

当前,随着多个全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的快速发展,融合利用多系统多频观测信号已成为导航定位技术的发展趋势<sup>[1-3]</sup>。2018 年 12 月,我国自主的卫星导航系统 BDS-3 完成基本系统建设,初步具备全球服务能力。BDS-3 在 BDS-2 基础上保留了 B1I、B3I 两个频点,同时新增了 B1C、B2a 和 B2b 3 个频点<sup>[4]</sup>。其中 B1C 和 B2a 所对应的频率分别为 1 575.42 MHz 和 1 176.45 MHz,是 BDS-3 与 GPS 和 Galileo 间的重叠频率,分别对应 GPS L1/L5 和 Galileo E1/E5a,这为 3 个系统之间的互操作和深度融合提供了契机。

针对多个 GNSS 系统之间的观测信息融合处理,一般可采用两种模型<sup>[5]</sup>:一种是各系统选择各自参考卫星的系统内差分模型,即常规松组合模型;另一种是多个系统选择共同参考卫星的系统间差分模型,也称紧组合模型。在紧组合模型中需要处理系统间偏差问题。近年来陆续有相关学者对系统间偏差问题展开了研究<sup>[6-9]</sup>。研究结果表明,对于非差观测值,伪距和载波的系统间偏差均是客观存在的,对于标准单点定位、精密单点定位等单站数据紧组合处理中必须考虑该误差因素的影响;而在相对定位中,对于各系统重叠频率观测值,在接收机类型(包括版本)相同时,站间差分后的系统间偏差(differential inter-system bias, DISB)为 0,可以直接忽略;当接收机类型不同时,DISB 一般不为 0,但随时间较为稳定,可以提前进行校正,校正后的各系统观测值即可当成“一个系统”进行处理。对于非重叠频率观测值,也有学者进行了研究<sup>[10-12]</sup>,结果表明非重叠频率观测值间的 DISB 总体也较为稳定,但由于载波 DISB 与单差模糊度的线性相关性,导致载波 DISB 通常难以进行提前校正;即使进行了校正,在接收机重启后也难以获得模糊度整数解。因此,对于非重叠频率观测值,通常采用将载波 DISB 作为参数进行实时估计的方式处理。目前已有的研究结果表明,无论是采用提前校正还是实时估计,顾及系统间偏差的紧组合模型相比常规松组合模型在定位性能上均有一定的提升,尤其是对于复杂的卫星观测环境下改进明显。

由于目前 BDS-3 系统尚未在全球范围内提供正式服务,目前关于 BDS-3 与其他系统的紧组合模型及定位性能分析较少。本文将基于实测数据,分析 BDS-3、GPS 和 Galileo 3 个系统重叠频率观测值间的差分系统间偏差特性,建立共用参考卫星的三系统紧组合定位模型,并对其模糊度解算和定位性能进行分析。

## 1 系统间偏差提取方法

为避免电离层和对流层等误差的影响,差分系统间偏差的估计通常采用零基线或短基线进行<sup>[6-12]</sup>,在此前提下,站间差分的伪距和载波观测方程可表示为:

$$\begin{cases} \Delta P_j^s = \Delta \rho^s + \Delta dt + \Delta d_j + \Delta \varepsilon_j^s \\ \Delta \phi_j^s = \Delta \rho^s + \Delta dt + \lambda_j(\Delta \delta_j + \Delta N_j^s) + \Delta \varepsilon_j^s \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta$  表示站间差分算子; $P$  和  $\phi$  分别表示以距离为单位的伪距和载波观测值;下标  $j$  表示卫星观测频率; $s$  表示卫星编号; $\rho$  表示站星距离; $dt$  表示接收机钟差; $\lambda$  表示对应频率上的波长; $d$  表示伪距的硬件延迟; $\delta$  表示载波硬件延迟,同时吸收了初始相位偏差的影响; $N$  表示整周模糊度; $e$  和  $\varepsilon$  分别表示载波和伪距的观测噪声,同时也包含多路径效应等未模型化误差的影响。

为提取伪距和载波的 DISB,需要建立不同系统间的星间差分观测方程,考虑到目前 GPS 发展的最为成熟和完善,本文以 GPS 为基准系统,BDS-3 和 Galileo 与 GPS 重叠频率上的系统间差分观测方程可表示为:

$$\begin{cases} \Delta \nabla P_j^{1c,q} = \Delta P_j^q - \Delta P_j^{1c} = \Delta \rho^{1c,q} + \Delta \nabla d_j + \Delta \nabla \varepsilon_j^{1c,q} \\ \Delta \nabla \phi_j^{1c,q} = \Delta \phi_j^q - \Delta \phi_j^{1c} = \\ \Delta \rho^{1c,q} + \lambda_j \Delta \nabla N_j^{1c,q} + \lambda_j \Delta \nabla \delta_j + \Delta \nabla \varepsilon_j^{1c,q} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta \nabla d_j = \Delta d_j^{C/E} - d_j^C \\ \Delta \nabla \delta_j = \Delta \delta_j^{C/E} - \Delta \delta_j^C \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta \nabla$  表示站间星间双差算子;上标  $1c$  表示 GPS 参考卫星标识;上标  $q$  表示 BDS-3 或 Galileo 卫星编号; $\Delta d_j^{C/E}$  和  $\Delta \delta_j^{C/E}$  为 BDS-3 或 Galileo 对应的伪距和载波硬件延迟; $\Delta d_j^C$  和  $\Delta \delta_j^C$  表示 GPS 的伪距和载波硬件延迟。 $\Delta \nabla d_j$  和  $\Delta \nabla \delta_j$  即分别表示伪距和载波的 DISB。在式(2)中,由于  $\Delta \nabla N_j^{1c,q}$  和  $\Delta \nabla \delta_j$  两类参数线性相关,载波观测方程存在秩亏情况,因此无法直接求解载波 DISB 参数。为此,可在 BDS-3 和 Galileo 系统中各选择一颗基准卫星。将基准卫星的系统间差分模糊度和载波 DISB 参数合并为一个参数  $\Delta \nabla \bar{\delta}_j$ ,则其他卫星对应的模糊度和  $\Delta \nabla \delta_j$  可被相应地重参化为系统内的双差模糊度  $\Delta \nabla N_j^{1c,q}$  和  $\Delta \nabla \bar{\delta}_j$ ,具体如式(4)所示。

$$\Delta \nabla \phi_j^{1c,q} = \Delta \rho^{1c,q} + \lambda_j \Delta \nabla N_j^{1c,q} + \lambda_j \Delta \nabla \bar{\delta}_j + \Delta \nabla \varepsilon_j^{1c,q} \quad (4)$$

$$\Delta \nabla \bar{\delta}_j = \Delta \nabla \delta_j + \Delta \nabla N_j^{1c,ex} \quad (5)$$

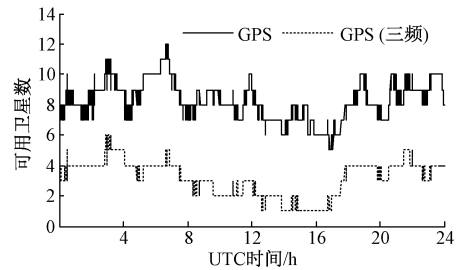
式中:上标  $1_{C/E}$  表示 BDS-3 或 Galileo 的参考卫星标识。从式(5)中可以看出,可估的载波系统间偏差实质上吸收了对应基准卫星和 GPS 参考卫星之间的双差模糊度,当基准卫星或 GPS 参考卫星变化的时候,可估的  $\Delta \nabla \bar{\delta}_j$

也会产生整数周的变化。因此在分析载波 DISB 稳定性的时候,一般仅分析其小数部分。

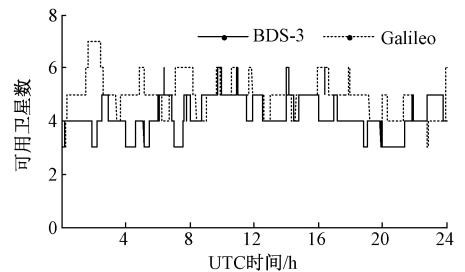
基于式(4),联立 GPS 系统内的双差观测方程以及 BDS-3 和 Galileo 与 GPS 组成的系统间双差观测方程,即可平差求解坐标参数、模糊度、伪距和载波的系统间偏差等参数。如果基线坐标精确已知,则可对坐标参数实施约束,单历元即能可靠地固定模糊度参数,并进一步求解出伪距和载波的系统间偏差。需要说明的是,BDS-3 和 Galileo 由于引入了系统间的观测方程,联合求解时的随机模型也应具备系统间差分形式,具体可参见文献[11]。

采用东南大学校园内采集的一组短基线数据进行实验,基线长度为 10.1 m。采用 ComNav 公司的两块同型号的 K708 板卡进行数据接收,采集时间为 2019 年 5 月 30 日 UTC 00:00~24:00,共 24 h,采样间隔为 15 s。采集过程中 GPS 和 BDS-3/Galileo 的可用卫星数情况分别如图 1(a)和(b)所示,由于仅有部分 GPS Block IIF 可接收到 L5 信号,因此图 1(a)中也单独给出了 GPS 三频卫星数量。

图 2 和 3 所示分别为 BDS-3/Galileo 与 GPS 之间单历元解算出的伪距和载波 DISB 情况,包括 L1-B1C、L1-E1、L5-B2a、L5-E5a 4 种情况。表 1 所示为相应的统计情况,包括平均值和标准差(standard deviation,STD)。从图 2 和 3 及表 1 中可以看出,伪距 DISB 基本在±1 m 范围内波动,4 组 DISB 的标准差均小于 0.2 m;载波 DISB 基本在±0.1 周范围内波动,4 组 DISB 的标准差均在 0.015 周以内,考虑到伪距和载波观测值各自的观测值精度,可认为伪距和载波 DISB 在 24 h 范围内均是较



(a) Number of GPS/BLOCK IIF visible satellites



(b) Number of BDS-3/Galileo visible satellites

图 1 短基线各系统可用卫星数情况

Fig.1 The number of the visible satellites of various systems for the short baseline

为稳定的。在绝对量值方面,伪距和载波的 DISB 24 h 平均值均接近于 0,表明对于该组相同接收机类型组成的基线,GPS、BDS-3、Galileo 3 个系统重叠频率间的 DISB 可直接忽略处理,可直接按照一个系统进行处理。需要说明的是,根据目前已有的研究结论<sup>[6-8]</sup>,当基线所用的接收机类型不同时,系统间偏差一般不为 0,因此该种情况下需要对其进行校正。

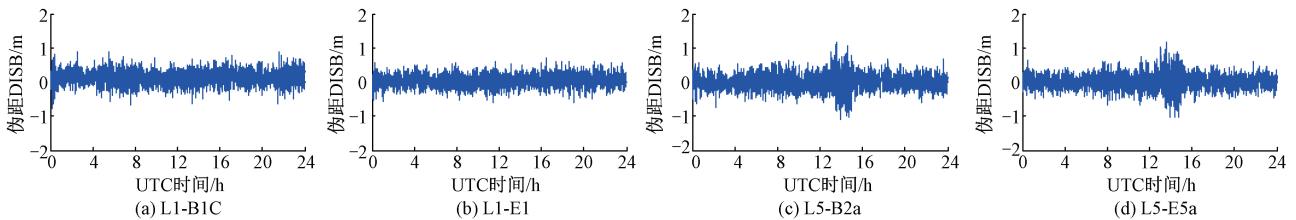


图 2 GPS、BDS-3 和 Galileo 重叠频率的伪距 DISB

Fig.2 The pseudorange DISB among the overlapping frequencies for BDS-3, GPS and Galileo

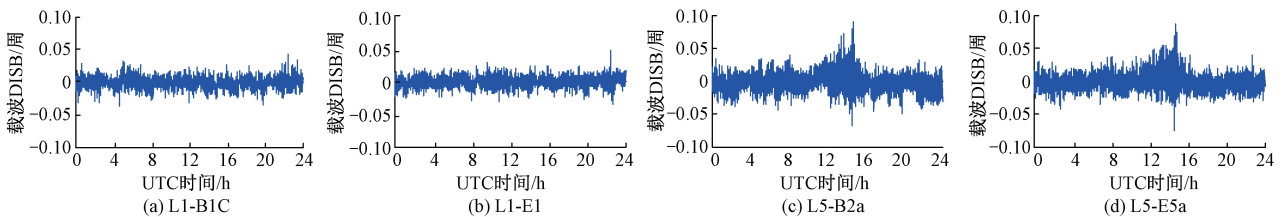


图 3 GPS、BDS-3 和 Galileo 重叠频率的载波 DISB

Fig.3 The carrier-phase DISB among the overlapping frequencies for BDS-3, GPS and Galileo

**表 1 GPS、BDS-3、Galileo 重叠频率间的 DISB 统计量**  
**Table 1 The statistics of DISB among the overlapping frequencies for BDS-3, GPS and Galileo**

观测类型	统计量	1 575.42 MHz		1 176.45 MHz	
		L1-B1C	L1-E1	L5-B2a	L5-E5a
伪距	平均值/m	0.128	0.034	-0.001	0.007
	STD/m	0.190	0.162	0.216	0.204
载波	平均值/周	-0.001	-0.001	-0.002	-0.001
	STD/周	0.008	0.007	0.014	0.013

## 2 紧组合定位模型

根据第 1 节中的结论,对于相同类型接收机组成的基线,GPS、BDS-3 和 Galileo 间的重叠频率观测值可当成一个系统进行处理。此时,可构建共用一个参考卫星的紧组合定位模型,同样选择 GPS 作为基准系统,将 GPS 的参考卫星作为 BDS-3 和 Galileo 卫星的参考卫星,此时组成的紧组合观测方程可表示为式(6);为便于比较分析,式(7)给出了常规松组合模型所对应的观测方程。

$$\left. \begin{cases} \Delta \nabla P_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \Delta \nabla e_j^{1,c} \\ \Delta \nabla \phi_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \lambda_j \Delta \nabla N_j^{1,c} + \Delta \nabla \varepsilon_j^{1,c} \end{cases} \right\} \text{GPS}$$

$$\left. \begin{cases} \Delta \nabla P_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \Delta \nabla d_j^{GC} + \Delta \nabla e_j^{1,c} \\ \Delta \nabla \phi_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \lambda_j \Delta \nabla N_j^{1,c} + \lambda_j \Delta \nabla \bar{\delta}_j^{GC} + \Delta \nabla \varepsilon_j^{1,c} \end{cases} \right\} \text{GPS-BDS-3}$$

$$\left. \begin{cases} \Delta \nabla P_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \Delta \nabla d_j^{GE} + \Delta \nabla e_j^{1,c} \\ \Delta \nabla \phi_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \lambda_j \Delta \nabla N_j^{1,c} + \lambda_j \Delta \nabla \bar{\delta}_j^{GE} + \Delta \nabla \varepsilon_j^{1,c} \end{cases} \right\} \text{GPS-Galileo}$$

(6)

$$\left. \begin{cases} \Delta \nabla P_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \Delta \nabla e_j^{1,c} \\ \Delta \nabla \phi_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \lambda_j \Delta \nabla N_j^{1,c} + \Delta \nabla \varepsilon_j^{1,c} \end{cases} \right\} \text{GPS}$$

$$\left. \begin{cases} \Delta \nabla P_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \Delta \nabla e_j^{1,c} \\ \Delta \nabla \phi_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \lambda_j \Delta \nabla N_j^{1,c} + \Delta \nabla \varepsilon_j^{1,c} \end{cases} \right\} \text{BDS-3}$$

$$\left. \begin{cases} \Delta \nabla P_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \Delta \nabla e_j^{1,c} \\ \Delta \nabla \phi_j^{1,c} = \Delta \rho^{1,c} + \lambda_j \Delta \nabla N_j^{1,c} + \Delta \nabla \varepsilon_j^{1,c} \end{cases} \right\} \text{Galileo}$$

(7)

比较式(6)和(7)可以发现,在式(6)所示的紧组合模型中,由于 BDS-3 和 Galileo 卫星无需再单独设置参考卫星,因此相比式(7)所示的松组合模型,每个系统均可多出两个观测方程,同时多了一个模糊度参数(系统间偏差已忽略或提前改正)。对于三系统而言,紧组合模型在模糊度解算阶段多出了 2 个多余观测量;而当模糊度固

定后,解算坐标时,紧组合模型相比松组合模型多出了 4 个多余观测量(2 个伪距+2 个载波),等同于增加了 2 颗卫星。这对于可视卫星较少的复杂观测环境,具有显著的增益效果。关于紧组合和常规松组合在模糊度固定和坐标解算方面的性能对比,将在下一节中具体分析。

## 3 实验分析

为对比分析松组合和紧组合两种模型的定位性能,采用第 1 节中的短基线数据进行单历元解算实验,主要评估两种模型的模糊度固定效果和定位精度。考虑到目前 GPS 仅有少量卫星能够接收到 L5 信号,因此定位实验部分仅对 L1/B1C/E5a 频率观测值进行解算分析。

在模糊度解算方面,主要评估模糊度解算的先验模型强度和实际固定效果,分别用模糊度精度因子(ambiguity dilution of precision, ADOP)<sup>[13]</sup>和次优/最优模糊度方差比值(Ratio)<sup>[14]</sup>两种指标进行表征,其计算表达式分别如下:

$$ADOP = |\mathbf{Q}_N|^{1/n} \tag{8}$$

$$Ratio = \frac{\|\hat{\mathbf{N}} - \tilde{\mathbf{N}}_2\|_{\mathbf{Q}_n}}{\|\hat{\mathbf{N}} - \tilde{\mathbf{N}}_1\|_{\mathbf{Q}_n}} \tag{9}$$

式中: $\hat{\mathbf{N}}$ 和 $\mathbf{Q}_N$ 分别表示模糊度浮点解向量和其对应的方差协方差矩阵; $|\cdot|$ 表示取行列式运算符; $n$ 表示模糊度参数的个数; $\tilde{\mathbf{N}}_1$ 和 $\tilde{\mathbf{N}}_2$ 表示采用最小二乘降相关(least-squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)算法<sup>[15]</sup>搜索出的最优和次优整数解; $\|\cdot\|_{\mathbf{Q}_n}^2 = (\cdot)^T \mathbf{Q}_N^{-1} (\cdot)$ 表示二次型。式(8)和(9)中,ADOP 主要反映模型的先验强度,当 ADOP 值小于 0.12 周时,可认为模糊度固定的先验成功率高于 99.9%;Ratio 则体现的是模糊度实际解算效果,其值一般设置为 2.0~3.0。本文后续实验中,采用 2.0 作为阈值,即当 Ratio  $\geq 2$  时,认为模糊度可固定为整数。

为对比分析两种模型在不同卫星观测环境下的定位性能,设置了 4 组不同截止高度角进行解算,分别为 10°、20°、30°和 40°。4 组实验的模糊度固定情况统计如表 3 所示,其中可解算历元数是指双差载波定位方程数不少于 4 个的历元数;固定历元数是指模糊度固定的 Ratio 值大于等于 2 的历元数;固定错误历元数是指在固定的历元中模糊度固定出错的历元数,模糊度真值通过多历元平滑解获得。从表 2 中可以看出,当截止高度角为 10°~30°时,两种模型的固定效果基本相当,均基本实现了模糊度的准确固定;当截止高度角为 40°时,松组合模型的可解算历元数 5 617,而紧组合模型的可解算历元数依然为 5 760,这是因为此时可用卫星数较少,当某系统仅存在 1 颗可用卫星时,无法构

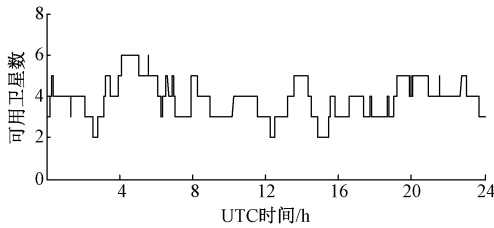
成系统内的双差方差,此时松组合模型便无法利用该卫星;而在紧组合模型中,由于仅需一颗共用的参考卫星,因此该卫星仍然可参与解算。且如第2节中分析可知,紧组合模型增加了多余观测量,因此模型强度相比松组合模型有所提高,在截止高度角为40°时,模糊度固定率从松组合的5 052/5 617提升至5 729/5 760,同时模糊度固定错误历元数也从48降低为0。

表2 松组合和紧组合模型的单历元模糊度固定情况统计

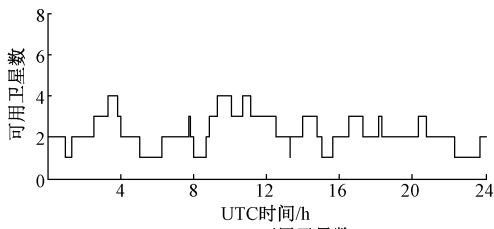
Table 2 The statistics of the single-epoch ambiguity resolution fixing for the loosely-and tightly-combined models

截止 高度角/ (°)	松组合模型			紧组合模型		
	可解算 历元数	固定 历元数	固定错误 历元数	可解算 历元数	固定 历元数	固定错误 历元数
10	5 760	5 757	0	5 760	5 757	0
20	5 760	5 759	0	5 760	5 760	0
30	5 760	5 756	0	5 760	5 760	0
40	5 617	5 052	48	5 760	5 729	0

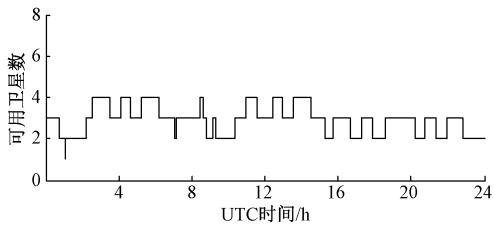
为进一步体现紧组合的模糊度固定率高于松组合,图4所示为截止高度角为40°时的各系统可用卫星数、ADOP以及Ratio情况。从图4中可以看出,总体上紧组合模型的ADOP值明显小于松组合,Ratio值明显大于松组合,表明在可视卫星较少的不良观测环境下,紧组合模型能显著提升模糊度固定的性能。



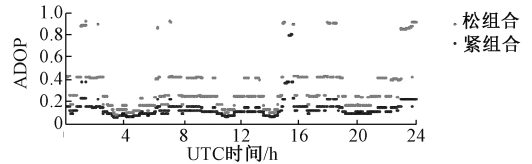
(a) GPS可用卫星数  
(a) The number of GPS visible satellites



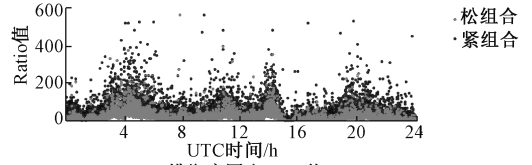
(b) BDS-3可用卫星数  
(b) The number of BDS-3 visible satellites



(c) Galileo可用卫星数  
(c) The number of Galileo visible satellites



(d) 模糊度精度因子  
(d) Ambiguity dilution of precision (ADOP)



(e) 模糊度固定Ratio值  
(e) Ratio of ambiguity fixing

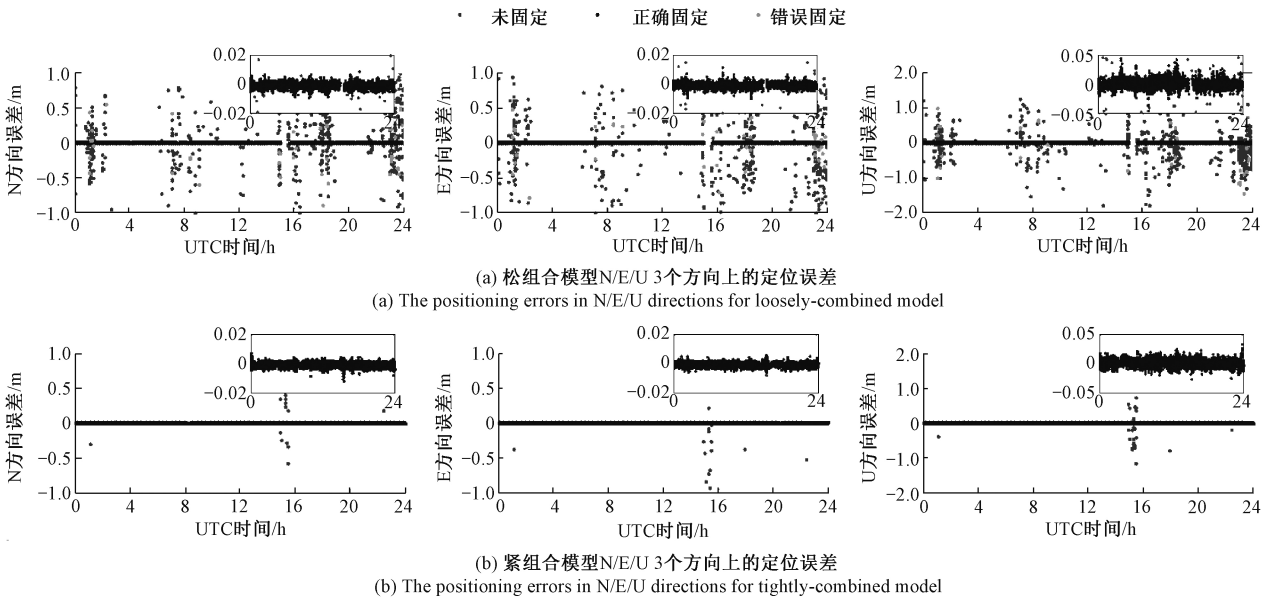
图4 截止高度角为40°时的各系统可用卫星数、ADOP和Ratio值

Fig.4 The numbers of the visible satellites, ADOP and Ratio for various systems under the condition of the cut-off elevation angle of 40°

表3所示为不同截止高度角模糊度正确固定时的定位精度统计,相应地,图5所示为截止高度角为40°时松组合和紧组合定位结果对比。从表3中可以看出,与表2中模糊度解算统计相类似,当截止高度角为10°~30°时两种模型的定位精度基本相当;而当截止高度角达到40°时,紧组合模型正确固定模糊度时N/E/U 3个方向上的定位精度相比于松组合模型,可由2.0 mm/1.7 mm/7.2 mm提升至1.7 mm/1.5 mm/5.8 mm,分别提升了15.0%、11.8%和19.4%。对比图5(a)和(b)可以看出紧组合模型获得了更多历元的有效定位,主要表现在固定解历元更多且错误固定的历元数大幅减少。综合上述指标可以看出,紧组合模型相比松组合模型能够获得更好的定位性能。

表3 不同截止高度角模糊度正确固定时的定位精度统计  
Table 3 The statistics of the positioning accuracy for correct ambiguity fixing under different cut-off elevation angles

截止 高度角	松组合模型			紧组合模型		
	N方向/ m	E方向/ m	U方向/ m	N方向/ m	E方向/ m	U方向/ m
	10°	0.001 1	0.001 2	0.002 8	0.001 0	0.001 1
20°	0.001 2	0.001 2	0.003 1	0.001 1	0.001 2	0.003 0
30°	0.001 4	0.001 4	0.004 2	0.001 2	0.001 3	0.003 9
40°	0.002 0	0.001 7	0.007 2	0.001 7	0.001 5	0.005 8

图 5 截止高度角为  $40^\circ$  时松组合和紧组合定位结果对比Fig.5 The positioning result comparison of the loosely-and tightly-combined models under the condition of the cut-off elevation angle of  $40^\circ$ 

## 4 结 论

基于 BDS-3、GPS 和 Galileo 的重叠频率观测值,本文分析了 3 个系统重叠频率观测值间的 DISB 稳定性,在此基础上提出了三系统紧组合 RTK 定位方法,并基于实测数据对紧组合模型和常规松组合模型的定位性能进行了分析。

DISB 稳定性的分析结果表明,对于所用相同类型接收机组成的基线,重叠频率观测值间的伪距和载波 DISB 均接近于零,可直接忽略;在此基础上构建的三系统紧组合模型,相比常规松组合模型,能够有效增加多余观测数,通过不同截止高度角的定位实验表明:在可用卫星较少的复杂观测环境中,紧组合模型能有效提升历元利用率、模糊度固定率以及模糊度固定成功率;同时,紧组合模型相比松组合模型的定位精度也有显著的提升,在截止高度角为  $40^\circ$  时,N/E/U 3 个方向上的定位精度分别可提高 15.0%、11.8% 和 19.4%。在后续研究中,将进一步融合各个系统的非重叠频率观测值,以进一步提升 RTK 定位的性能。

## 参考文献

[ 1 ] TEGEDOR J, ØVSTEDAL O, VIGEN E. Precise orbit determination and point positioning using GPS, Glonass,

Galileo and BeiDou [ J ]. Journal of geodetic science, 2014, 4(1) : 65-73.

[ 2 ] LI X, GE M, DAI X, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo [ J ]. Journal of Geodesy, 2015, 89(6) : 607-635.

[ 3 ] 刘国良, 蒋廷臣, 潘树国, 等. 基于抗差方差分量的伪距/多普勒联合测速方法 [ J ]. 仪器仪表学报, 2019, 40 ( 1 ) : 62-69.

LIU G L, JIANG T CH, PAN SH G, et al. Pseudo-range /Doppler joint velocity measurement method based on robust variance component estimation [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1) : 62-69.

[ 4 ] YANG Y X, GAO W G, GUO SH R, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system [ J ]. Navigation, 2019, 66(1) : 7-18.

[ 5 ] JULIEN O, ALVES P, CANNON M E, et al. A tightly coupled GPS/GALILEO combination for improved ambiguity resolution [ C ]. Proceedings of the European Navigation Conference (ENC-GNSS'03), 2003; 1-14.

[ 6 ] ODIJK D, TEUNISSEN P J G. Characterization of between-receiver GPS-Galileo inter-system biases and their effect on mixed ambiguity resolution [ J ]. GPS Solutions, 2013, 17(4) : 521-533.

- [ 7 ] PAZIEWSKI J, WIELGOSZ P. Accounting for Galileo-GPS inter-system biases in precise satellite positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89 ( 1 ): 81-93.
- [ 8 ] ODOLINSKI R, TEUNISSEN P J G, ODIJK D. Combined Bds, Galileo, Qzss and Gps single-frequency Rtk[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 151-163.
- [ 9 ] 张小红, 吴明魁, 刘万科. BeiDou B2/Galileo E5b 短基线紧组合相对定位模型及性能评估[J]. *测绘学报*, 2016, 45(增刊2): 1-11.  
ZHANG X H, WU M K, LIU W K. Model and performance analysis of tightly combined BeiDou B2 and Galileo E5b relative positioning for short baseline[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(Suppl.2): 1-11.
- [ 10 ] GAO W, GAO CH F, PAN SH G, et al. Inter-system differencing between GPS and BDS for medium-baseline RTK positioning [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9 ( 9 ): 948.
- [ 11 ] GAO W, MENG X L, GAO CH F, et al. Combined GPS and BDS for single-frequency continuous RTK positioning through real-time estimation of differential inter-system biases[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 20.
- [ 12 ] CHEN H, JIANG W P, LI J CH. Multi-GNSS relative positioning with fixed inter-system ambiguity[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 454.
- [ 13 ] ODIJK D, TEUNISSEN P J G. ADOP in closed form for a hierarchy of multi-frequency single-baseline GNSS models[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(8): 473-492.
- [ 14 ] TEUNISSEN P J G, VERHAGEN S. The GNSS ambiguity ratio-test revisited: A better way of using it [J]. *Survey Review*, 2009, 41(312): 138-151.
- [ 15 ] TEUNISSEN P J G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS integer ambiguity estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1-2): 65-82.

## 作者简介



**曹相**, 2008 年于东南大学获得硕士学位, 现为东南大学博士研究生, 主要研究方向为 GNSS 高精度导航定位及其检定技术。  
E-mail: caoxiang163@163.com

**Cao Xiang** received her M. Sc. degree in 2008 from Southeast University. Now, she is a Ph. D. candidate in Southeast University. Her main research interests include GNSS high-precision navigation positioning and its metrology detection technique.



**王庆**(通信作者), 1996 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 GNSS 理论与算法以及智慧城市时空信息处理。  
E-mail: w3398a@263.net

**Wang Qing** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southeast University in 1996. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Southeast University. His main research interests include GNSS theory and algorithm, and spatiotemporal information processing of smart city.



**高成发**, 2004 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 GNSS 高精度定位与交通工程测量。  
E-mail: gaochfa@163.com

**Gao Chengfa** received his Ph. D. degree from Southeast University in 2004. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Southeast University. His main research interests include GNSS high-precision positioning and traffic engineering survey.



**潘树国**, 2007 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 GNSS 高精度定位与环境智能感知。  
E-mail: psg@seu.edu.cn

**Pan Shuguo** received his Ph. D. degree from Southeast University in 2007. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Southeast University. His main research interests include GNSS high-precision positioning and environment intelligent sensing.