



# 估计接收机差分码偏差的 GPS/BDS 非组合精密单点定位模型

张 辉<sup>1,2</sup> 郝金明<sup>1,2</sup> 刘伟平<sup>1,2</sup> 周 蕊<sup>1,2</sup> 田英国<sup>1,2</sup>

1 信息工程大学,河南 郑州,450001

2 北斗导航应用技术河南省协同创新中心,河南 郑州,450001

**摘要:**在传统多系统非差非组合精密单点定位(precise point positioning, PPP)模型中,电离层延迟会吸收部分接收机码硬件延迟,其估计值可能为负数。提出了一种估计接收机差分码偏差(differential code bias, DCB)参数的 GPS(Global Positioning System)/ BDS (BeiDou Navigation Satellite System) 非组合 PPP 模型,将每个系统第 1 个频率上的接收机码硬件延迟约束为零,对接收机 DCB 进行参数估计,达到了分离电离层延迟和接收机码硬件延迟的目的,降低了接收机钟差和电离层延迟的相关程度。利用 4 个多星座实验(multi-GNSS experiment, MGEX)跟踪站的 GPS/BDS 数据进行了静态和动态 PPP 试验,结果表明,与不估计 DCB 参数的 PPP 模型相比,采用估计 DCB 参数 PPP 模型后,静态模式下定位精度和收敛速度平均提高了 29.3% 和 29.8%,动态模式下定位精度和收敛速度平均提高了 15.7% 和 21.6%。

**关键词:**多系统;精密单点定位;原始观测量;接收机差分码偏差;收敛时间

中图分类号:P228

文献标志码:A

消电离层(ionospheric free, IF)组合和非差非组合是精密单点定位(precise point positioning, PPP)常用的两种组合方式,IF 组合模型虽然能够消除电离层延迟一阶项的影响,但是会放大观测噪声,且不适用于单频和多频观测数据<sup>[1-6]</sup>。非差非组合模型对于处理多频观测数据具有更强的灵活性,避免了观测量组合引起的噪声放大,提供了更丰富的估计量,拓展了 PPP 的应用,但缺点是需要估计电离层延迟参数<sup>[7-9]</sup>。

目前,在多系统非差非组合 PPP 研究方面已经有了丰硕的成果<sup>[10]</sup>。文献[11]研究了非差非组合 PPP 电离层参数处理方法,提出对电离层参数进行频间约束、电离层先验改正模型约束并顾及电离层参数的随机特性;文献[12]进行了 4 系统双频原始观测量 PPP 试验,对电离层参数进行了空间约束和电离层先验改正模型约束;文献[13]提出一种多系统非差非组合 PPP 模型,采用单频和双频原始观测数据进行了试验验证;文献[14]研究了基于原始观测量的多系统多频数据处理模型,探讨了确保法方程满秩需要引入的约束条件;文献[15]提出一种基于原始观测量的多系统 PPP 模型,推导了满秩观测方程,并对多系统

PPP 的定位结果、接收机系统间偏差、GLONASS 码频间偏差和电离层延迟等进行了深入研究。

在多系统非差非组合 PPP 模型中,如果不估计接收机差分码偏差(differential code bias, DCB)参数,实际可估的电离层延迟将会吸收部分接收机码硬件延迟,其估计值可能为负数,这会影响电离层延迟估计量的使用<sup>[15-16]</sup>。本文提出一种估计接收机 DCB 参数的 GPS(Global Positioning System)/ BDS (BeiDou Navigation Satellite System) 非组合 PPP 模型。该模型采用约束条件将每个系统第 1 个频率上的接收机码硬件延迟约束为零,对接收机 DCB 进行参数估计,有效分离了电离层延迟和接收机码硬件延迟。利用 4 个多星座实验(multi-GNSS experiment, MGEX)跟踪站的 GPS/BDS 数据进行验证分析,结果表明,使用改进的 PPP 模型可以提高定位精度和收敛速度。

## 1 数学模型

### 1.1 无接收机 DCB 参数的 GPS/BDS 非组合 PPP 模型

精密卫星钟差是通过传统消电离层组合得到

的,因此在进行非差非组合 PPP 时需要利用 DCB 产品改正卫星差分码偏差。采用精密卫星钟差和 DCB 产品消除卫星钟差和卫星差分码偏差后,无接收机 DCB 参数的 GPS/BDS 非组合 PPP 模型可以表示为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} P_{r,f}^{T,s} = \rho_r^{T,s} + c \cdot \bar{d}t_r^T + \mu_f^T \cdot \bar{I}_{r,1}^{T,s} + \\ m_r^{T,s} \cdot \text{ZTD}_r + \epsilon_P^T \\ L_{r,f}^{T,s} = \rho_r^{T,s} + c \cdot \bar{d}t_r^T - \mu_f^T \cdot \bar{I}_{r,1}^{T,s} + \\ \bar{N}_{r,f}^{T,s} + m_r^{T,s} \cdot \text{ZTD}_r + \epsilon_L^T \end{cases} \quad (1)$$

式中,上标  $T$  表示 GPS 和 BDS 系统; $P_{r,f}^{T,s}$  和  $L_{r,f}^{T,s}$  分别为接收机  $r$  和卫星  $s$  在频率  $f$  上的伪距和相位观测量,单位为 m; $f$  为信号频率; $\rho_r^{T,s}$  为卫星  $s$  天线相位中心至接收机  $r$  天线相位中心的几何距离; $c$  为光在真空中的速度; $\bar{d}t_r^T$  为吸收了接收机码硬件延迟的接收机钟差; $\bar{I}_{r,1}^{T,s}$  为吸收了接收机码硬件延迟的斜电离层延迟; $\mu_f^T = (\lambda_f^T/\lambda_1^T)^2$  为频率相关的比例因子, $\lambda_f^T$  为频率  $f$  上的波长; $\text{ZTD}_r$  为接收机  $r$  的天顶对流层延迟; $m_r^{T,s}$  为对流层延迟映射函数; $\bar{N}_{r,f}^{T,s}$  为吸收了相位硬件延迟和码硬件延迟的浮点相位模糊度,单位为 m; $\epsilon_P^T$  和  $\epsilon_L^T$  分别为伪距和相位观测误差,包括观测噪声和多路径误差。除 GPS/BDS 系统外,该模型还适用于其他采用码分多址信号体制的卫星导航系统。

参数的具体形式可以表示为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} \bar{d}t_r^T = dt_r^T + \left( \frac{\mu_2^T}{\mu_2^T - 1} b_{r,1}^T - \frac{1}{\mu_2^T - 1} b_{r,2}^T \right) \\ \text{ISB}_r^C = \bar{d}t_r^C - \bar{d}t_r^G \\ \bar{I}_{r,1}^{T,s} = I_{r,1}^{T,s} - \frac{c}{\mu_2^T - 1} (b_{r,1}^T - b_{r,2}^T) \\ \bar{N}_{r,f}^{T,s} = N_{r,f}^{T,s} + \\ \frac{c}{\mu_2^T - 1} [(\mu_f^T + 1)b_{r,2}^T - (\mu_f^T + \mu_2^T)b_{r,1}^T] - \\ c \left( \frac{\mu_2^T}{\mu_2^T - 1} b_{1}^{T,s} - \frac{1}{\mu_2^T - 1} b_{2}^{T,s} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $dt_r^T$  为接收机钟差; $b_{r,f}^T$  为频率  $f$  上的接收机码硬件延迟; $b_{r,1}^{T,s}$  为卫星  $s$  在频率  $f$  上的卫星码硬件延迟; $\text{ISB}_r^C$  为 BDS 相对 GPS 的接收机系统间偏差; $I_{r,1}^{T,s}$  为斜电离层延迟; $N_{r,f}^{T,s}$  为吸收了相位硬件延迟的浮点相位模糊度,单位为 m; $\bar{d}t_r^C$ 、 $\bar{d}t_r^G$  分别为 BDS 和 GPS 吸收了接收码延迟的接收机钟差。待估参数向量为  $\mathbf{X} = [\Delta \mathbf{x}_r \quad \bar{d}t_r^G \quad \text{ISB}_r^C \quad \bar{I}_{r,1}^{T,s} \quad \text{ZTD}_r \quad \bar{N}_{r,f}^{T,s}]$ ,其中  $\Delta \mathbf{x}_r$  为接收机位置向量。从式(2)中可以看出,该模型隐含的约束条件为:

$$\frac{\mu_2^T}{\mu_2^T - 1} b_{r,1}^T - \frac{1}{\mu_2^T - 1} b_{r,2}^T = 0 \quad (3)$$

在该约束条件下,电离层延迟与接收机码硬件延迟无法分离,受此影响,电离层延迟的估计值可能为负数。

## 1.2 估计接收机 DCB 参数的 GPS/BDS 非组合 PPP 模型

采用精密卫星钟差和 DCB 产品改正卫星钟差和卫星差分码偏差,引入约束条件  $b_{r,1}^T = 0$ ,对接收机 DCB 进行参数估计,估计接收机 DCB 参数的 GPS/BDS 非组合 PPP 模型可以表示为:

$$\begin{cases} P_{r,1}^{G,s} = \rho_r^{G,s} + c \cdot \bar{d}t_r^G + I_{r,1}^{G,s} + m_r^{G,s} \cdot \text{ZTD}_r + \\ \epsilon_P^G \\ P_{r,2}^{G,s} = \rho_r^{G,s} + c \cdot \bar{d}t_r^G + c \cdot \text{DCB}_r^G + \mu_2^G \cdot I_{r,1}^{G,s} + \\ m_r^{G,s} \cdot \text{ZTD}_r + \epsilon_P^G \\ P_{r,1}^{C,s} = \rho_r^{C,s} + c \cdot \bar{d}t_r^G + c \cdot \text{ISB}_r^C + I_{r,1}^{C,s} + \\ m_r^{C,s} \cdot \text{ZTD}_r + \epsilon_P^C \\ P_{r,2}^{C,s} = \rho_r^{C,s} + c \cdot \bar{d}t_r^G + c \cdot \text{ISB}_r^C + c \cdot \text{DCB}_r^C + \\ \mu_2^C \cdot I_{r,1}^{C,s} + m_r^{C,s} \cdot \text{ZTD}_r + \epsilon_P^C \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L_{r,1}^{G,s} = \rho_r^{G,s} + c \cdot \bar{d}t_r^G - I_{r,1}^{G,s} + \bar{N}_{r,1}^{G,s} + \\ m_r^{G,s} \cdot \text{ZTD}_r + \epsilon_L^G \\ L_{r,2}^{G,s} = \rho_r^{G,s} + c \cdot \bar{d}t_r^G - \mu_2^G \cdot I_{r,1}^{G,s} + \bar{N}_{r,2}^{G,s} + \\ m_r^{G,s} \cdot \text{ZTD}_r + \epsilon_L^G \\ L_{r,1}^{C,s} = \rho_r^{C,s} + c \cdot \bar{d}t_r^G + c \cdot \text{ISB}_r^C - I_{r,1}^{C,s} + \\ \bar{N}_{r,1}^{C,s} + m_r^{C,s} \cdot \text{ZTD}_r + \epsilon_L^C \\ L_{r,2}^{C,s} = \rho_r^{C,s} + c \cdot \bar{d}t_r^G + c \cdot \text{ISB}_r^C - \mu_2^C \cdot I_{r,1}^{C,s} + \\ \bar{N}_{r,2}^{C,s} + m_r^{C,s} \cdot \text{ZTD}_r + \epsilon_L^C \end{cases} \quad (5)$$

式中,上标  $G$  和  $C$  分别表示 GPS 和 BDS 系统; $\text{DCB}_r^G$  和  $\text{DCB}_r^C$  分别为 GPS 和 BDS 接收机差分码偏差;其他符号的含义与上文相同。

参数的具体形式可以表示为:

$$\begin{cases} \bar{d}t_r^G = dt_r^G + b_{r,1}^G \\ \text{ISB}_r^C = dt_r^C - dt_r^G + b_{r,1}^C - b_{r,1}^G \\ \bar{N}_{r,f}^{T,s} = N_{r,f}^{T,s} - c \cdot b_{r,1}^T - \\ c \left( \frac{\mu_2^T}{\mu_2^T - 1} b_{1}^{T,s} - \frac{1}{\mu_2^T - 1} b_{2}^{T,s} \right) \\ \text{DCB}_r^G = b_{r,2}^G - b_{r,1}^G \\ \text{DCB}_r^C = b_{r,2}^C - b_{r,1}^C \end{cases} \quad (6)$$

待估参数向量为:

$$\mathbf{X} = [\Delta \mathbf{x}_r \quad \bar{d}t_r^G \quad \text{ISB}_r^C \quad \text{DCB}_r^T \quad I_{r,1}^{T,s} \quad \text{ZTD}_r \quad \bar{N}_{r,f}^{T,s}] \quad (7)$$

该模型利用约束条件将每个系统第 1 个频率上的接收机码硬件延迟  $b_{r,1}^T$  约束为零,利用 DCB 参数估计每个系统的接收机差分码偏差,分离了电离层延迟和接收机码硬件延迟,降低了接收机

钟差与电离层延迟的相关程度。

## 2 试验与分析

为了验证本文提出模型的有效性,选择 MGEX 网中能够观测到较多北斗卫星的 CUT0、JFNG、MAL2 和 MRO1 4 个测站 2016 年年积日 19~24 天的 GPS/BDS 观测数据,数据采样率为 30 s。采用 3 种试验方案进行对比分析。

方案 1 采用无接收机 DCB 参数的非组合 PPP 模型。

方案 2 采用本文提出的估计接收机 DCB 参数的非组合 PPP 模型。

方案 3 采用 IF 组合 PPP 模型。

上述 3 种方案除采用的 PPP 模型不同外,其他数据处理策略相同,每种方案均进行静态和动态试验。表 1 给出了具体的数据处理策略。

表 1 数据处理策略

类别	处理策略
观测量	伪距和相位观测量;GPS:L1,L2;BDS:B1,B2
估计方法	卡尔曼滤波
截止高度角	7°
观测值加权	采用高度角定权模型
卫星天线相位中心	GPS 的天线相位中心偏差(phase center offset, PCO)和相位中心变化(phase center variation, PCV)采用 igs08.atx 提供的改正值;BDS 的 PCO 和 PCV 采用欧洲航天局提供的改正值
接收机天线相位中心	GPS 的 PCO 和 PCV 采用 igs08.atx 提供的改正值;BDS 采用与 GPS 相同的 PCO 和 PCV 改正值
相位缠绕	改正
潮汐效应	改正固体潮、海潮和极潮
卫星轨道和钟差	采用德国地学中心提供的精密轨道和精密钟差产品
卫星差分码偏差	采用 MGEX 提供的产品
对流层延迟	Saastamoinen 模型和随机游走过程
电离层延迟	作为白噪声估计 <sup>[15]</sup>
接收机坐标	在静态/动态模型下作为常数/白噪声估计
接收机钟差	作为白噪声估计
接收机系统间偏差(inter system bias, ISB)	在一天中作为常数估计 <sup>[15]</sup>
接收机 DCB 模糊度	在一天中作为常数估计 在连续弧段作为常数估计

根据上述方案进行试验,统计了定位结果和 IGS(International GNSS Service)公布的坐标之间差值的均方根(root mean square, RMS),表 2 给出了收敛后的静态平均定位误差 RMS。采用无 DCB 参数模型时, CUT0、JFNG、MAL2 和

MRO1 站的静态 3D 定位精度分别为 6.3 cm、6.0 cm、3.5 cm 和 6.0 cm;采用估计 DCB 参数模型时,4 个测站的静态 3D 定位精度分别为 3.5 cm、3.3 cm、3.5 cm 和 4.3 cm,平均提高了 29.3%。表 3 给出了收敛后的动态平均定位误差 RMS。采用无 DCB 参数模型时,4 个测站的动态 3D 定位精度分别为 9.9 cm、10.6 cm、9.7 cm 和 9.6 cm;采用估计 DCB 参数模型时,4 个测站的动态 3D 定位精度分别为 8.6 cm、7.7 cm、9.2 cm 和 7.9 cm,平均提高了 15.7%。上述结果表明,估计 DCB 参数模型在定位精度方面略优于无 DCB 参数模型,较为接近 IF 组合的定位精度。估计 DCB 参数模型分离了电离层延迟和接收机码硬件延迟,优化了 PPP 模型,对于改善定位精度具有一定作用。

表 2 静态平均定位误差 RMS 和收敛时间

Tab. 2 The Average of RMS of Positioning Error and Convergence Time in Static Mode

测站	模型	E/cm	N/cm	U/cm	收敛时间/min
CUT0	无 DCB	2.2	1.3	5.7	54.9
	估计 DCB	1.6	1.1	2.7	25.8
	IF	1.2	0.6	1.8	24.8
JFNG	无 DCB	1.9	1.0	5.5	60.6
	估计 DCB	2.6	0.7	1.7	56.4
	IF	0.9	0.5	2.7	22.4
MAL2	无 DCB	1.5	1.1	2.9	56.6
	估计 DCB	1.5	1.1	2.9	32.7
	IF	1.0	0.9	1.9	19.4
MRO1	无 DCB	1.8	1.4	5.4	31.1
	估计 DCB	1.9	1.5	3.4	25.8
	IF	1.1	0.5	1.3	19.3

表 3 动态平均定位误差 RMS 和收敛时间

Tab. 3 The Average of RMS of Positioning Error and Convergence Time in Kinematic Mode

测站	模型	E/cm	N/cm	U/cm	收敛时间/min
CUT0	无 DCB	3.9	3.5	8.3	18.6
	估计 DCB	3.9	2.2	7.4	17.8
	IF	2.8	1.5	4.4	16.8
JFNG	无 DCB	3.8	4.0	9.0	43.6
	估计 DCB	4.6	2.7	5.4	29.3
	IF	2.9	1.8	3.6	23.9
MAL2	无 DCB	3.2	2.1	8.8	22.1
	估计 DCB	2.9	2.0	8.5	12.5
	IF	2.1	1.5	4.5	10.1
MRO1	无 DCB	4.4	2.6	8.0	18.0
	估计 DCB	3.6	1.7	6.7	16.9
	IF	3.2	1.6	5.1	15.9

收敛时间也是模型有效性的一个重要内容,设静态收敛标准为水平和高程的定位精度均优于 0.1 m,动态收敛标准为水平和高程的定位精度均优于 0.2 m。图 1 和图 2 分别给出了静态和动态 PPP 的平均收敛时间。从图 2 中可以看出,估

计 DCB 参数模型的收敛速度明显优于无 DCB 参数模型,与 IF 组合模型较为接近。采用无 DCB 参数模型时,CUT0、JFNG、MAL2 和 MRO1 站的静态平均收敛时间分别为 54.9 min、60.6 min、56.6 min 和 31.1 min;采用估计 DCB 参数模型时,收敛时间分别缩短了 53.1%、6.9%、42.3% 和 16.9%,平均缩短了 29.8%。采用无 DCB 参数模型时,4 个测站的动态平均收敛时间分别为 18.6 min、43.6 min、22.1 min 和 18.0 min;采用

估计 DCB 参数模型时,收敛时间分别缩短了 4.5%、32.7%、43.4% 和 6.0%,平均缩短了 21.6%。图 3 和图 4 分别给出了 MRO1 站静态和动态定位误差序列。由图 3 和图 4 可知,与无 DCB 参数模型相比,估计 DCB 参数模型的定位误差序列收敛速度更快,且较为稳定。上述结果表明,估计 DCB 参数模型削弱了接收机 DCB 的影响,降低了接收机钟差与电离层延迟的相关程度,有助于加快收敛速度。

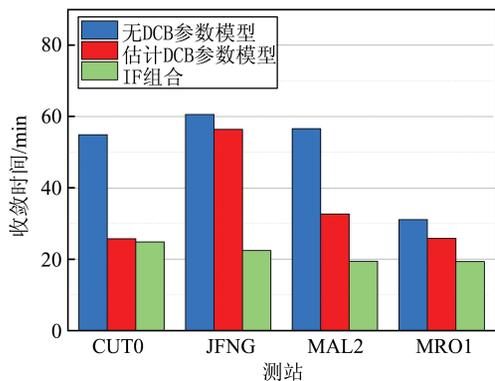


图 1 静态 PPP 平均收敛时间

Fig. 1 Convergence Time of PPP in Static Mode

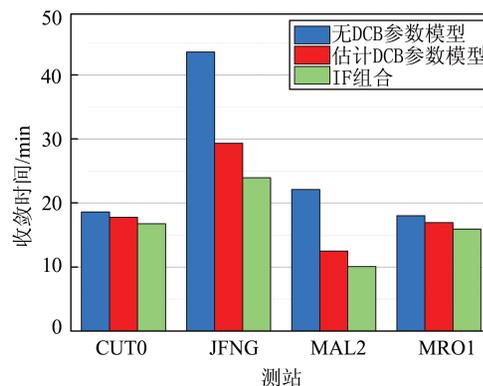


图 2 动态 PPP 平均收敛时间

Fig. 2 Convergence Time of PPP in Kinematic Mode

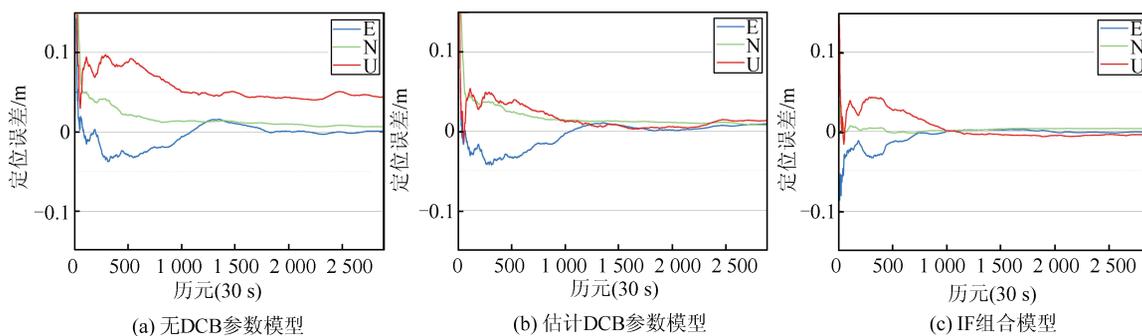


图 3 2016 年 021 天 MRO1 站静态定位误差序列

Fig. 3 Positioning Errors of PPP in Static Mode at Station MRO1 on Day 021 in 2016

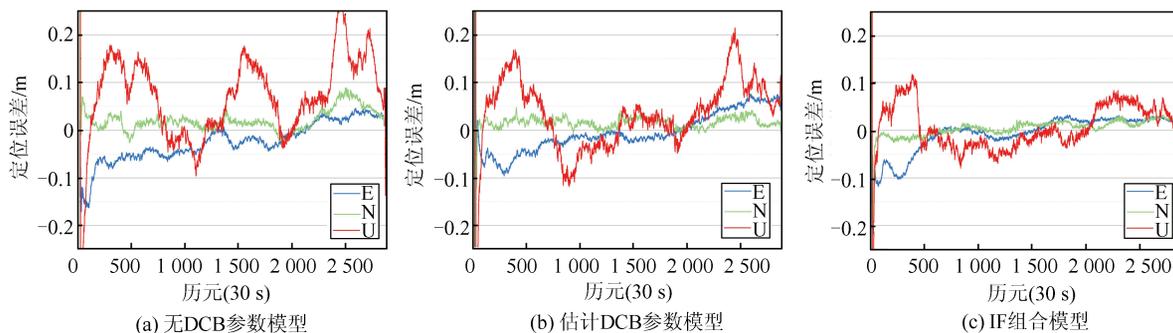


图 4 2016 年 021 天 MRO1 站动态定位误差序列

Fig. 4 Positioning Errors of PPP in Kinematic Mode at Station MRO1 on Day 021 in 2016

为了验证估计 DCB 参数模型能够分离电离层延迟和接收机码硬件延迟,对电离层延迟估计值进行了分析。图 5 给出了 MRO1 站无 DCB 参

数模型的垂直电离层延迟,红点为 BDS 卫星穿刺点处的垂直电离层延迟,其他彩色点为 GPS 卫星穿刺点处的垂直电离层延迟。从图 5 中可以看

出,BDS 卫星的垂直电离层延迟估计值为负数,原因是在无 DCB 参数模型中电离层延迟受到了接收机码硬件延迟的影响,这不利于电离层延迟估计值的使用。采用估计 DCB 参数模型后,所有卫星的垂直电离层延迟估计值均为正数。为进一步验证该估计值的正确性,统计了全球电离层数据(global ionosphere maps, GIM)内插值与垂直电离层估计值之间差值的 RMS, CUT0、JFNG、MAL2 和 MRO1 站的电离层差值 RMS 分别为 0.709 m、0.831 m、1.341 m 和 0.744 m。其中 MAL2 站位于电离层较为活跃的低纬度地区,因此 RMS 值较大。考虑到 GIM 的精度为 2~8 TECU,该模型提取的电离层延迟处于合理范围内。上述结果表明,在估计接收机 DCB 参数模型中,电离层延迟和接收机码硬件延迟得到了有效分离。

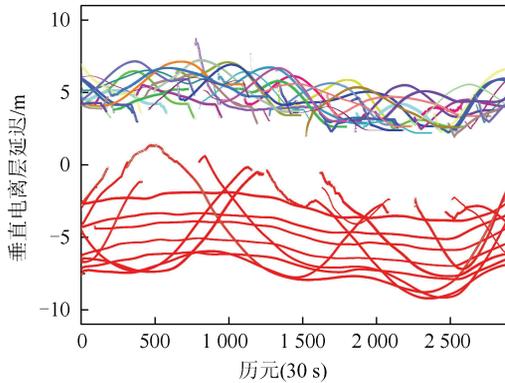


图 5 无 DCB 参数模型 2016 年 022 天 MRO1 站的垂直电离层延迟

Fig. 5 Vertical Ionospheric Delays for PPP Model Without DCB Parameters at Station MRO1 on Day 022 in 2016

图 6 和图 7 分别给出了 MRO1 站静态和动态 PPP 接收机 DCB 估计结果。由图 6 和图 7 可知,在静态模式下接收机 DCB 收敛后十分稳定,

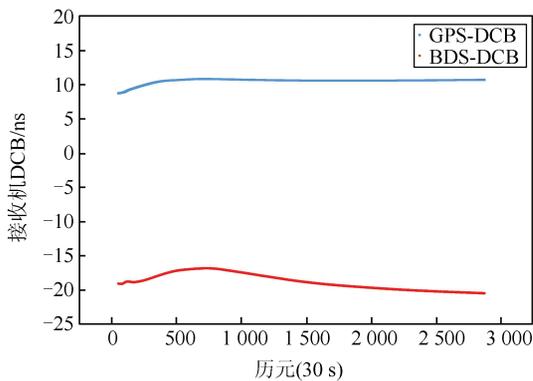


图 6 2016 年 021 天 MRO1 站静态 PPP 接收机 DCB 序列

Fig. 6 Receiver DCBs of PPP in Static Mode at Station MRO1 on Day 021 in 2016

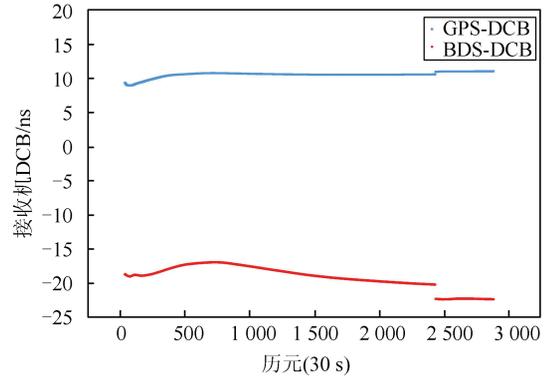


图 7 2016 年 021 天 MRO1 站动态 PPP 接收机 DCB 序列

Fig. 7 Receiver DCBs of PPP in Kinematic Mode at Station MRO1 on Day 021 in 2016

在动态模式下接收机 DCB 序列虽然出现了中断,但在中断前后都较为稳定。以 MGEX 提供的 DCB 产品为参考值,统计了接收机 DCB 估计值与参考值之间差值的 RMS。估计 DCB 参数模型 CUT0、JFNG、MAL2 和 MRO1 站 GPS-DCB 的 RMS 分别为 1.65 ns、2.26 ns、1.42 ns 和 1.63 ns, BDS-DCB 的 RMS 分别为 1.72 ns、4.15 ns、4.79 ns 和 1.61 ns。

### 3 结 语

在传统多系统非差非组合 PPP 模型中,由于电离层延迟和接收机码硬件延迟高度相关,电离层延迟估计值可能为负数。针对该问题,本文提出一种估计接收机 DCB 参数的 GPS/BDS 非组合 PPP 模型,并推导了参数的具体形式。该模型采用约束条件将每个系统第 1 个频率上的接收机码硬件延迟约束为零,对接收机 DCB 进行参数估计,削弱了接收机码硬件延迟对电离层延迟的影响。采用 4 个 MGEX 跟踪站的 GPS/BDS 数据进行了验证分析,试验结果表明,与无接收机 DCB 参数的 PPP 模型相比,采用估计接收机 DCB 参数的 PPP 模型可以提高定位精度并加快收敛速度,静态模式下定位精度和收敛速度平均提高了 29.3% 和 29.8%,动态模式下定位精度和收敛速度平均提高了 15.7% 和 21.6%。

### 参 考 文 献

[1] Zumberge J, Heflin M, Jefferson D, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. Jour-

- nal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5 005-5 017
- [2] Zhang Xiaohong, Guo Fei, Li Xingxing, et al. Study on Precise Point Positioning Based on Combined GPS and GLONASS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(1): 9-12(张小红, 郭斐, 李星星, 等. GPS/GLO-NASS组合精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(1): 9-12)
- [3] Ren Xiaodong, Zhang Keke, Li Xingxing, et al. Precise Point Positioning with Multi-constellation Satellite Systems; BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(12): 1 307-1 313(任晓东, 张柯柯, 李星星, 等. BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS多系统融合精密单点[J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1 307-1 313)
- [4] Chen J, Zhang Y, Wang J, et al. A Simplified and Unified Model of Multi-GNSS Precise Point Positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1): 125-134
- [5] Tu R, Ge M, Zhang H, et al. The Realization and Convergence Analysis of Combined PPP Based on Raw Observation[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(1): 211-221
- [6] Guo F, Li X, Zhang X, et al. Assessment of Precise Orbit and Clock Products for Galileo, BeiDou, and QZSS from IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX)[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 279-290
- [7] 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
- [8] Zhang Hongping, Gao Zhouzheng, Niu Xiaoji, et al. Research on GPS Precise Point Positioning with Un-differential and Un-combined Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(12): 1 396-1 399(章红平, 高周正, 牛小骥, 等. GPS非差非组合精密单点定位算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(12): 1 396-1 399)
- [9] Zhang Xiaohong, Zuo Xiang, Li Pan. Mathematic Model and Performance Comparison Between Ionosphere-Free Combined and Uncombined Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5): 561-565(张小红, 左翔, 李盼. 非组合与组合PPP模型比较及定位性能分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(5): 561-565)
- [10] Zhang H, Gao Z, Ge M, et al. On the Convergence of Ionospheric Constrained Precise Point Positioning (IC-PPP) Based on Undifferential Uncombined Raw GNSS Observations[J]. *Sensors*, 2013, 13(11): 15 708-15 725
- [11] Gu Shengfeng. Research on the Zero-Difference Uncombined Data Processing Model for Multi-frequency GNSS and Its Applications[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013(辜声峰. 多频GNSS非差非组合精密数据处理理论及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [12] Li X, Zhang X, Ren X, et al. Precise Positioning with Current Multi-constellation Global Navigation Satellite Systems; GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8 328-8 341
- [13] Lou Y, Zheng F, Gu S, et al. Multi-GNSS Precise Point Positioning with Raw Single-Frequency and Dual-frequency Measurement Models[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 849-862
- [14] Chen Hua. An Efficient and Unified GNSS Raw Data Processing Strategy[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015(陈华. 基于原始观测值的GNSS统一快速精密数据处理方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2015)
- [15] Liu T, Yuan Y, Zhang B, et al. Multi-GNSS Precise Point Positioning (MGPPP) Using Raw Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(3): 253-268
- [16] Hakansson M, Jensen A B O, Horemuz M, et al. Review of Code and Phase Biases in Multi-GNSS Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 849-860

(下转第 592 页)

ture information of the waveform. Then, elevations of positioning point candidates are also improved using VLL algorithm compared with the elevation structure information, which can eliminate the position errors of stereo images. Experiments show that the method proposed is effective in big footprint space-borne laser altimeter positioning, and the elevation positioning accuracy is 0.16 m, plane positioning accuracy is the same with stereo images.

**Key words:** space-borne laser altimeter; full waveform; vertical line locus (VLL); geometric positioning; elevation structure

**First author:** YUE Chunyu, PhD, specializes in the theories and methods of satellite photogrammetry, remote sensing image processing and application. E-mail: ycy1893@163.com

**Corresponding author:** SUN Shijun, PhD, professor. E-mail: sunsj26@sina.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41401411, 41401410; the High Resolution Earth Observation Special Fund, No. GFZX040136; the National Key Technology Research and Development Program of the Earth Observation and Navigation Special Fund of China, No. 2016YFB0500802.

(上接第 500 页)

## GPS/BDS Precise Point Positioning Model with Receiver DCB Parameters for Raw Observations

ZHANG Hui<sup>1,2</sup> HAO Jinning<sup>1,2</sup> LIU Weiping<sup>1,2</sup> ZHOU Rui<sup>1,2</sup> TIAN Yingguo<sup>1,2</sup>

1 Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 BeiDou Navigation Technology Collaborative Innovation Center of Henan, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** Due to ionospheric delays caused by the receiver code biases in the traditional multi-GNSS precise point positioning (PPP) using raw observations, the estimates can be negative values. An improved model of Global Positioning System/BeiDou Navigation Satellite System (GPS/BDS) PPP with receiver differential code bias (DCB) parameters for raw observations is proposed in which receiver code biases on the first frequency of each system are constrained to zero and receiver DCB parameters are estimated. Ionospheric delays and receiver code biases are separated by the presented model. Additionally, the singularity between receiver clock offsets and ionospheric delays is reduced. GPS/BDS data from 4 stations of the Multi-GNSS experiment (MGEX) network are processed in static and kinematic modes. The results show that with the proposed PPP model, the average positioning accuracy and convergence time in static/kinematic mode are improved by 29.3% and 15.7%, 29.8% and 21.6%, respectively, in comparison with the traditional PPP model.

**Key words:** multi-constellation; precise point positioning; raw observation; receiver differential code bias; convergence time

**First author:** ZHANG Hui, PhD candidate, majors in multi-constellation GNSS precise positioning. E-mail: zh\_ljpd@163.com