

DOI:10.13203/j.whugis20160178



文章编号:1671-8860(2018)02-0175-08

GPS/BDS 接收机端系统偏差稳定性对整周模糊度固定的影响

隋 心^{1,2} 施 闯² 徐爱功¹ 郝雨时¹

1 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新, 123000

2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

摘 要:GNSS 接收机端的 UPD 与接收到的信号频率有关,这导致 GPS 和 BDS 系统间的双差模糊度不具有整数特性,为了恢复其整数特性,两系统间的系统偏差需要进行估计或改正。在顾及 GPS 和 BDS 之间的时间系统、坐标系统和频率间偏差的基础上,推导出 GPS/BDS 系统偏差计算模型,并利用不同实验对系统偏差的稳定性进行验证。实验结果表明,不同品牌接收机在 GPS/BDS 系统偏差方面在一定条件下均具有稳定性;天线类型和天线连接线长度没有对 GPS/BDS 系统偏差产生显著影响。加入系统偏差改正的 GPS/BDS 紧组合定位在恶劣环境下表现良好,可将模糊度固定平均所需时间缩短 33%,模糊度固定成功率提高 31%。

关键词:GPS;BDS;非校正相位延迟;系统偏差;整周模糊度

中图法分类号:P228

文献标志码:A

多 GNSS 系统组合定位可以提高定位的精度、可靠性以及可用性,因此目前很多科研团队致力于该领域的应用研究。在多 GNSS 环境下,由于可观卫星个数的增加,不同 GNSS 系统的信号组合能够有效缩短初始化时间,延长基线解算长度^[1]。目前,世界上已经建成的全球导航卫星系统包括美国 GPS 系统、俄罗斯 GLONASS 系统。处于建设阶段的系统包括中国的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)以及欧洲的 Galileo 系统。

在多系统组合定位过程中,建立的数学模型通常需要在每一个系统内选择 1 颗参考卫星,模糊度固定分别在各自系统内部进行,这种解算方法被称为松组合^[2],该方法通常应用于具有不同频率的 GNSS 系统间的组合定位中;另一方面,如果系统间的频率相同,在组建双差观测方程过程中所有 GNSS 系统可以只选择 1 颗参考卫星,这种解算方法被称为紧组合^[3]。文献[4-5]采用松组合方式对短基线条件下的 GPS/BDS 组合相对定位进行了研究。文献[6-7]对 GPS-Galileo 具

有相同频率观测值的系统偏差(Inter-system bias, ISB)稳定性进行研究,结果表明:对于同类型接收机,ISB 为零,采用紧组合方式进行组合相对定位时可以不用考虑;对于不同类型或不同厂家的接收机,ISB 不为零,但具有稳定性,因此可以根据已经准确计算的 ISB 对 Galileo 观测数据进行校正,然后采用紧组合方式进行组合相对定位。由于紧组合解算方法只选择一颗参考卫星,在已有先验 ISB 校正参数条件下可以增加多余观测量个数,因此也可以增强平差模型。特别在一些十分恶劣的观测环境下,每个 GNSS 系统都只能跟踪到较少的几颗卫星,采用松组合很难甚至不能实现整周模糊度固定。而采用紧组合解算方法可以组建系统间双差观测方程,实现任意系统间的双差模糊度固定。然而,当引入紧组合解算方法后,也会产生一些新的问题。对于 GPS/BDS 组合定位来说,除了要考虑 GPS 与 BDS 之间的时间系统偏差和坐标系统偏差之外,还要考虑不同系统信号相对于接收机硬件延迟的差异^[8]以及不同系统信号频率不一致对模糊度固定的影响^[9]。

收稿日期:2016-08-16

项目资助:国家重点研发计划(2016YFC0803102);辽宁省教育厅创新团队项目(LT2015013);辽宁省教育厅辽宁省高等学校基本科研项目(LJ2017QL007);辽宁省科技厅博士启动基金(201501126)。

第一作者:隋心,博士,讲师,主要从事 GNSS 精密数据处理与应用研究。xinsui@whu.edu.cn

通讯作者:徐爱功,博士,教授。xu_ag@126.com

短基线实验对不同品牌接收机的 ISB 稳定性进行测试,实验结果表明部分品牌接收机类型具有稳定性。由于 ISB 不仅受到接收机品牌的影响,还可能会受到天线类型、天线连接线长度以及接收机重启等因素的影响^[10],因此有必要设计一个理论严谨的 ISB 估计方法以及更加细致的实验对 ISB 的影响因素进行分析,以此检验 ISB 是否可以作为一个已知的校正参数对系统间双差载波相位进行改正,进而实现系统间双差模糊度固定。由于本文主要关注 ISB 的稳定性对模糊度固定的影响,因此在文中出现的 ISB 则特指相位观测值的系统偏差。

1 GPS/BDS 系统偏差计算模型

为了进行 GPS/BDS 组合定位数据处理,首先需要两者进行时空基准统一。在坐标系统方面,GPS 采用 WGS-84 坐标系统,BDS 采用 CGCS2000 坐标系统,鉴于两个坐标系统在定义和实现上的微小差别,可以认为在相同历元下 CGCS2000 和 WGS-84 在坐标系的实现精度范围内,两者的坐标是一致的^[11],本文在数据处理过程中采用的是 WGS-84 坐标系统的参考椭球参数。在时间系统方面,BDT 和 GPST 有 14 s 的差异,因此可以采用公式 $BDT = GPST - 14 \text{ s}$ 将两者进行统一。

假设一台 GNSS 接收机同时接收到 GPS 和 BDS 的相位和伪距观测值。顾及卫星及接收机端非校正相位延迟(UPD)的 GPS 相位观测方程可表示为^[12,13]:

$$\begin{aligned} \varphi_{r,j}^s &= \rho_r^s + dt_r - dt^s + \alpha_{r,j}^s + \\ &\lambda_j^G (\Delta\varphi_{r,j}^G - \Delta\varphi_{r,j}^s + N_{r,j}^s) + \epsilon_{r,j}^s \end{aligned} \quad (1)$$

式中, s 为 GPS 卫星编号; r 为接收机编号; j 为跟踪卫星的频段编号; $\varphi_{r,j}^s$ 为相位观测值(m); ρ_r^s 为接收机 r 和 GPS 卫星 s 的几何距离; dt_r 为 GPS 的接收机钟差; dt^s 为 GPS 卫星钟差; $\alpha_{r,j}^s$ 为大气延迟; λ_j^G 为 GPS 卫星第 j 频段的波长; $\Delta\varphi_{r,j}^G$ 为 GPS 的接收机端 UPD; $\Delta\varphi_{r,j}^s$ 为 GPS 卫星端 UPD; $N_{r,j}^s$ 为整周模糊度; $\epsilon_{r,j}^s$ 为所有其他相位误差。为了对不同 GNSS 系统的波长和接收机端 UPD 进行区分,分别用上标 G 和 B 来代表 GPS 和 BDS。由于 GPS 和 BDS 均采用码分多址技术,BDS 的相位观测方程与 GPS 非常相似,只是在接收机钟差方面存在差异。GPS 的接收机钟差为 dt_r ,考虑到 GPS 和 BDS 的时间系统偏差

$d_{\text{GBTO}}(\text{m})$ ^[14],可以将 BDS 的接收机钟差表示为 $dt_r + d_{\text{GBTO}}$ 。因此,BDS 的相位观测方程可表示为:

$$\begin{aligned} \varphi_{r,j}^q &= \rho_r^q + dt_r - dt^q + \alpha_{r,j}^q + \\ &\lambda_j^B (\Delta\varphi_{r,j}^B - \Delta\varphi_{r,j}^q + N_{r,j}^q) + d_{\text{GBTO}} + \epsilon_{r,j}^q \end{aligned} \quad (2)$$

式中,上标 q 为 BDS 卫星编号。

在两台 GNSS 接收机 1 和 2 间求单差,与卫星有关的误差项可以被消除。在数据处理过程中卫星端的 UPD 可以认为是一常数,因此在形成站间单差观测方程时也可以被消除。GPS 站间单差相位观测方程可表示为:

$$\begin{aligned} \varphi_{12,j}^s &= \varphi_{2,j}^s - \varphi_{1,j}^s = \rho_{12}^s + dt_{12} + \alpha_{12,j}^s + \\ &\lambda_j^G (\Delta\varphi_{12,j}^G + N_{12,j}^s) + \epsilon_{12,j}^s \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $j=1, \dots, f$; $s=1_G, \dots, m_G$; f 为频段的数量; m_G 为观测到的 GPS 卫星数量。

与 GPS 相似,BDS 站间单差相位观测方程可表示为:

$$\begin{aligned} \varphi_{12,j}^q &= \varphi_{2,j}^q - \varphi_{1,j}^q = \rho_{12}^q + dt_{12} + \alpha_{12,j}^q + \\ &\lambda_j^B (\Delta\varphi_{12,j}^B + N_{12,j}^q) + \epsilon_{12,j}^q \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $j=1, \dots, f$; $q=1_B, \dots, m_B$; f 为频段的数量; m_B 为观测到的 BDS 卫星数量。在式(3)、式(4)中, d_{GBTO} 被消去。本文采用的实验数据均为零基线或短基线观测数据,因此可以认为单差后的大气延迟项可以被忽略,即 $\alpha_{12,j}^s = 0 \forall j, s, \alpha_{12,j}^q = 0 \forall j, s$ 。

对上述的单差观测方程进行星间求差,该过程可分为系统内部求差和系统间求差两部分。对于系统内部求差,与接收机有关的误差被消除。对于接收机端的 UPD,其与接收到的信号频率有关。GPS 和 BDS 均采用码分多址技术,每一系统卫星均具有相同的频率,因此在各系统内部,这种相位延迟是统一的,但是在各系统之间,该相位延迟将不同^[15]。因此对于系统内部求差,接收机端的 UPD 可以被消除,形成的双差观测方程与经典的双差观测方程相同。如果将 $s=1_G$ 作为 GPS 系统的参考卫星,可以得到:

$$\varphi_{12,j}^{1_G s} = \varphi_{12,j}^s - \varphi_{12,j}^{1_G} = \rho_{12}^{1_G s} + \lambda_j^G N_{12,j}^{1_G s} + \epsilon_{12,j}^{1_G s} \quad (5)$$

式中, $s=2_G, \dots, m_G$ 。将 $q=1_B$ 作为 BDS 系统的参考卫星,BDS 双差观测方程可表示为:

$$\varphi_{12,j}^{1_B q} = \varphi_{12,j}^q - \varphi_{12,j}^{1_B} = \rho_{12}^{1_B q} + \lambda_j^B N_{12,j}^{1_B q} + \epsilon_{12,j}^{1_B q} \quad (6)$$

其中, $q=2_B, \dots, m_B$ 。此时 GPS 和 BDS 的双差模糊度均具有整数特性。

对于系统间求差,为了形成最大线性无关双差观测值组并且不出现秩亏现象^[6],本文只对 BDS 和 GPS 的参考卫星进行求差:

$$\varphi_{12,j}^{1G1B} = \varphi_{12,j}^{1B} - \varphi_{12,j}^{1G} = \rho_{12}^{1G1B} + \lambda_j^B (\Delta\varphi_{12,j}^B + N_{12,j}^{1B}) - \lambda_j^G (\Delta\varphi_{12,j}^G + N_{12,j}^{1G}) + \varepsilon_{12,j}^{1G1B} \quad (7)$$

式中,由于 GPS 和 BDS 的接收机端 UPD 不同,并且由于 $\lambda_j^B \neq \lambda_j^G$,这将导致 $\lambda_j^B \Delta\varphi_{12,j}^B$ 与 $\lambda_j^G \Delta\varphi_{12,j}^G$ 无法被消去,同时也使双差模糊度 $\lambda_j^B N_{12,j}^{1B} - \lambda_j^G N_{12,j}^{1G}$ 不具有整数特性。为了消除不同波长的影响,便于 ISB 计算,式(7)中的双差模糊度可表示为:

$$\lambda_j^B (\Delta\varphi_{12,j}^B + N_{12,j}^{1B}) - \lambda_j^G (\Delta\varphi_{12,j}^G + N_{12,j}^{1G}) = \lambda_j^B N_{12,j}^{1G1B} + \lambda_j^B \Delta\varphi_{12,j}^{GB} + (\lambda_j^B - \lambda_j^G) (\Delta\varphi_{12,j}^G + N_{12,j}^{1G}) \quad (8)$$

可以发现,如果能够将式(8)中等号右侧的第 2 项和第 3 项消除,那么式(7)便和式(5)、式(6)一致,组合系统的数据解算方法与单系统将相同。由于存在等号右侧的第 2 项和第 3 项,此时的双差模糊度便不再具有整数特性。第 2 项是由于接收机端 UPD 对于 GPS 和 BDS 不同所造成的 ISB。第 3 项是由于 GPS 和 BDS 波长不同对整周模糊度固定所造成的影响。由于 GPS 的 L1/L2 频率和 BDS 的 B1/B2 频率非常接近,它们分别为 0.190 3、0.192 0 m 和 0.244 2、0.248 3 m。如果参考卫星的单差模糊度的计算精度能够分别低于 11 周和 6 周,那么可以忽略上述影响。参考卫星的单差模糊度初值可以根据多历元的 P 码和载波相位数据进行计算^[9,16]。

由于 $\Delta\varphi_{12,j}^{GB}$ 与 $N_{12,j}^{1G1B}$ 强相关,因此无法将两者进行分离,但由于此时的 $N_{12,j}^{1G1B}$ 具有整数特性, $\Delta\varphi_{12,j}^{GB}$ 的整数部分可以被 $N_{12,j}^{1G1B}$ 吸收,因此只需考虑 $\Delta\varphi_{12,j}^{GB}$ 的小数部分即可。 $\Delta\varphi_{12,j}^{GB}$ 可分解为:

$$\Delta\varphi_{12,j}^{GB} = \Delta\tilde{\varphi}_{12,j}^{GB} + z_{12,j} \quad (9)$$

式中, $\Delta\tilde{\varphi}_{12,j}^{GB}$ 为 $\Delta\varphi_{12,j}^{GB}$ 的小数部分; $z_{12,j}$ 为 $\Delta\varphi_{12,j}^{GB}$ 的整数部分。综合考虑式(7)~(9),系统间双差观测方程最终可表示为:

$$\varphi_{12,j}^{1G1B} = \varphi_{12,j}^{1B} - \varphi_{12,j}^{1G} = \rho_{12}^{1G1B} + \lambda_j^B \bar{N}_{12,j}^{1G1B} + \lambda_j^B \Delta\tilde{\varphi}_{12,j}^{GB} + \varepsilon_{12,j}^{1G1B} \quad (10)$$

式中, $\bar{N}_{12,j}^{1G1B} = N_{12,j}^{1G1B} + z_{12,j}$ 为经过合并之后的双差模糊度,具有整数特性。参数 $\bar{N}_{12,j}^{1G1B}$ 和 $\Delta\tilde{\varphi}_{12,j}^{GB}$ 线性相关, $\bar{N}_{12,j}^{1G1B}$ 具有整数特性,而 $\Delta\tilde{\varphi}_{12,j}^{GB}$ 为小数,为了能够对两者进行有效分离,需要对其增加约束条件,这里对 $\Delta\tilde{\varphi}_{12,j}^{GB}$ 附加约束:首先为 $\Delta\tilde{\varphi}_{12,j}^{GB}$ 设定

一个先验值,然后采用 0.5 周的中误差对其约束,将以上约束信息加入到观测方程,在参数解算过程中采用附有约束条件的最小二乘方法进行平差,使得最终估计的 $\Delta\tilde{\varphi}_{12,j}^{GB}$ 参数满足 $\Delta\tilde{\varphi}_{12,j}^{GB} \in [-0.5, 0.5]$ 。

联合式(5)、式(6)和式(10)便可同时估计位置参数、双差模糊度参数以及 ISB 参数。对以上公式进行线性化,误差方程可表示为:

$$v = Ax + Db + Cy + l, P \quad (11)$$

式中, x 为位置参数; b 为双差模糊度参数; y 为 ISB 参数; P 为观测值的权阵。

为了计算未知参数的最小二乘解,法方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} A^T P A & A^T P D & A^T P C \\ & D^T P D & D^T P C \\ \text{sym} & & C^T P C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ b \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P l \\ D^T P l \\ C^T P l \end{bmatrix} \quad (12)$$

对法方程进行解算,便可获得双差模糊度以及 ISB 参数的浮点解,采用 LAMBDA 方法固定双差模糊度^[22],然后对 ISB 参数进行修正,最终计算出准确的 ISB 参数。

2 GPS/BDS 系统偏差稳定性分析

系统偏差可能会受到接收机品牌、天线类型、天线连接线长度以及接收机重启等因素的影响。为了对 GPS/BDS 系统偏差稳定性进行分析,利用上述 ISB 计算模型以及不同实验对以上影响因素进行验证。实验采用 7 款不同品牌(分别用 A、B、C、D、E、F、G 进行表示)接收机进行测试,其中,采用 A、B 两款接收机对上述所有可能的影响因素进行验证;采用 C、D、E、F、G 共 5 款接收机观测数据验证接收机品牌及重启对系统偏差稳定性的影响。本文所采用的观测数据均为单频观测数据(L1/B1)。

2.1 接收机品牌对系统偏差稳定性影响分析

在武汉大学卫星导航定位技术研究中心楼顶架设 3 个观测站,测站编号分别为 WHU1、WHU2 和 WHU3,各测站间距离约为 1 m。在 2014 年 6 月 19-21 日期间,各测站均配备 A 接收机、与该类型接收机配套使用的 A 天线和长 2 m 的天线连接线。每天进行一个时段观测,采样间隔设为 5 s,观测时长为 3 h,时段观测结束后接收机关机。为了获取更加准确的 ISB 估值,采用长时间的观测数据对其解算:将每天 3 h 连续观测数据分割为 3 个时段,每时段时长为 1 h。利用以

上3 d的9个时段观测数据计算GPS/BDS的 ISB值,结果见表1。

表1 2014年6月19-21日利用A接收机短基线数据计算ISB/周

Tab.1 The Result of ISB Using Short Baseline Data of Receiver A on June 19,2014/Cycle

| 时段编号 | WHU1-WHU2 | | | WHU1-WHU3 | | | WHU2-WHU3 | | |
|------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | 6月19日 | 6月20日 | 6月21日 | 6月19日 | 6月20日 | 6月21日 | 6月19日 | 6月20日 | 6月21日 |
| 1 | 0.00 | 0.05 | 0.05 | 0.01 | 0.05 | 0.05 | 0.00 | 0.06 | 0.00 |
| 2 | 0.01 | 0.04 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 0.05 | 0.01 |
| 3 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.01 |
| 平均值 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.01 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.05 | 0.01 |

表2为2014年12月15日利用A接收机3个时段观测数据计算的GPS/BDS的ISB值,结果与表1的结果符合较好,所有ISB互差均小于0.06周,因此可以认为A接收机的GPS/BDS ISB在较长时间跨度下仍具有较好的稳定性。基于该结论我们可以进一步认为,一旦对A接收机的GPS/BDS ISB进行标定,那么在以后的数据处理过程中,该系统偏差可以作为常数来看待。此外,在表1~2中所有ISB值均十分接近于0,这个结果和GPS/Galileo ISB的特性是一致的:对于相同型号的GNSS接收机,其ISB接近于0^[6-7]。

为了对B接收机的GPS/BDS ISB稳定性进行测试,在2014年7月1-3日期间,对卫星导航定位技术研究中心楼顶上的3个观测站所使用仪

器重新进行配置。每个测站均配备B接收机、与该类型接收机配套使用的B天线和2 m长的天线连接线。观测方案以及数据处理方案同上述A接收机ISB稳定性测试实验。ISB计算结果见表2~3。

表2 2014年12月15日利用A接收机短基线数据计算ISB/周

Tab.2 The Result of ISB Using Short Baseline Data of Receiver A on December 15,2014/Cycle

| 时段编号 | WHU1-WHU2 | WHU1-WHU3 | WHU2-WHU3 |
|------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |
| 2 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| 3 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |
| 平均值 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |

表3 2014年7月1-3日利用B接收机短基线数据计算ISB/周

Tab.3 The Result of ISB Using Short Baseline Data of Receiver B on July 1,2014/Cycle

| 时段编号 | WHU1-WHU2 | | | WHU1-WHU3 | | | WHU2-WHU3 | | |
|------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| | 7月1日 | 7月2日 | 7月3日 | 7月1日 | 7月2日 | 7月3日 | 7月1日 | 7月2日 | 7月3日 |
| 1 | 0.16 | 0.00 | 0.18 | 0.28 | 0.22 | 0.40 | 0.14 | 0.23 | 0.28 |
| 2 | 0.12 | 0.00 | 0.15 | 0.27 | 0.23 | 0.41 | 0.16 | 0.21 | 0.27 |
| 3 | 0.11 | 0.00 | 0.16 | 0.24 | 0.23 | 0.43 | 0.13 | 0.21 | 0.30 |
| 平均值 | 0.13 | 0.00 | 0.16 | 0.26 | 0.23 | 0.41 | 0.14 | 0.22 | 0.28 |

从表3可以发现对于B接收机,在接收机不重启情况下,相同接收机对的各时段ISB值十分接近,均小于0.5周,这部分结果与上述A接收机的结果是一致的。但不同的是,大部分B接收机的ISB值并不接近于0,最大的已达到0.43周。此外,不同B接收机对的ISB值之间并不统一,最大ISB平均值之差可达0.25周。在接收机重启情况下,相同接收机对的ISB值发生变化,ISB平均值变化范围已大于0.1周。通过以上分析可以认为B接收机在同一连续观测时段内,相同接收机对的GPS/BDS ISB符合较好,具有较好稳定性。但对于不同的B接收机对来说ISB并不相同,不能采用一个统一的数值对所有的同型号接收机进行标定。此外,接收机重启对ISB产生影响,重启前后ISB发生变化。表3的结果也表明ISB与双差模糊度相似,由3个测站所组成的

三角闭合基线,ISB的代数和为零。这说明如果已知三角闭合基线中的两个接收机对的ISB值,那么就可以计算出第3个接收机对的ISB值。

上述实验中,A接收机的系统偏差始终保持稳定且近似为0周,但B接收机的稳定性受到接收机重启的影响。为了进一步验证接收机品牌及重启对系统偏差稳定性的影响,采用C、D、E、F、G共5款接收机的短基线数据进行实验验证,短基线数据的采样间隔和观测时长均为5 s和1 h,C、D、E、F接收机分别进行了3个时段观测,各时段间进行接收机重启,G接收机进行了2个时段观测,时段间也进行接收机重启,所有接收机在各时段所使用的天线及天线连接线长度均未发生变化。ISB计算结果见表4。实验结果表明C、E接收机的ISB能够保持稳定,各时段间ISB的最大互差为0.05周,并且这些时段的ISB也十分接

近于 0 周,该结果与 A 接收机结果相似。对于 D、F、G 接收机,各时段间 ISB 的最大互差分别为 0.6、0.34、0.14 周,均大于 0.1 周,说明这 3 款接收机的 ISB 结果不够稳定,受到接收机重启的影响。需要说明的是,对于这 5 款接收机,也分别对每个观测时段的数据进行分割,分割后各时段的 ISB 计算结果与 A、B 接收机的实验结果相似,同样表明在连续观测时段内部 ISB 是稳定的。

表 4 不同品牌接收机短基线数据计算 ISB/周

Tab.4 The Result of ISB Using Short Baseline Data of Different Brand Receivers/Cycle

| 接收机品牌 | 基线长度/m | 时段 1 | 时段 2 | 时段 3 |
|-------|--------|-------|-------|-------|
| C | 4.27 | -0.01 | -0.06 | -0.01 |
| D | 54.21 | -0.12 | 0.48 | 0.48 |
| E | 8.42 | -0.01 | -0.01 | -0.01 |
| F | 25.47 | 0.05 | -0.29 | -0.05 |
| G | 25.17 | 0.02 | -0.12 | |

表 5 2014 年 7 月 3 日、4 日和 7 日利用 A 和 B 接收机短基线数据计算 ISB/周

Tab.5 The Result of ISB Using Short Baseline Data of A and B Receivers on July 3,2014/Cycle

| 时段编号 | WHU1-WHU2 | | | WHU1-WHU3 | | | WHU2-WHU3 | | |
|------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|-------|-------|
| | 7月3日 | 7月4日 | 7月7日 | 7月3日 | 7月4日 | 7月7日 | 7月3日 | 7月4日 | 7月7日 |
| 1 | 0.03 | 0.49 | 0.23 | 0.18 | 0.23 | 0.19 | 0.11 | -0.28 | -0.06 |
| 2 | 0.04 | 0.46 | 0.23 | 0.13 | 0.23 | 0.14 | 0.08 | -0.26 | -0.06 |
| 3 | 0.02 | 0.46 | 0.22 | 0.15 | 0.24 | 0.14 | 0.09 | -0.27 | -0.06 |
| 平均值 | 0.03 | 0.47 | 0.23 | 0.15 | 0.23 | 0.16 | 0.09 | -0.27 | -0.06 |

接收机的 ISB 表现出较好稳定性,因此可以认为 A 和 B 混合接收机的 ISB 稳定性主要受到 B 接收机的 ISB 稳定性影响。

为了进一步验证接收机重启对混合接收机的 ISB 稳定性影响,分别采用 C、E 混合接收机以及 D、F 混合接收机的观测数据进行处理,ISB 计算结果见表 6。对于 C、E 接收机,表 4 的实验结果表明 C、E 接收机的 ISB 始终保持稳定,并且均接近于 0 周。在表 6 中,C 和 E 混合接收机的 ISB 没有受到接收机重启的影响,仍然保持稳定,但 ISB 更加接近于 -0.1 周。对于 D、F 接收机,表 4 的实验结果表明这两款接收机的 ISB 均受到接收机重启的影响,在表 6 中,D 和 F 混合接收机的 ISB 仍然受到接收机重启的影响,该结果与 A 和 B 混合接收机结果相似。因此可以认为对于混合接收机来说,只要存在一款接收机的 ISB 受到接收机重启的影响,那么混合接收机的 ISB 稳定性也将受到接收机重启的影响。

需要说明的是,由于在该实验中采用不同品牌接收机进行 GPS/BDS 组合相对定位数据处理,那么必须顾及 BDS 的卫星类型间偏差^[23],因此在数据处理过程中我们在 BDS GEO 卫星单差

在实际应用中混合接收机联合作业应用广泛,因此有必要对混合接收机间的 ISB 稳定性进行测试。在 2014 年 7 月 3 日、4 日和 7 日,分别对上述 3 个测站所使用仪器重新进行配置。测站 WHU1 配备 A 接收机、A 天线和 2 m 长的天线连接线;测站 WHU2 和 WHU3 配备 B 接收机、B 天线和 2 m 长的天线连接线。观测方案以及数据处理方案同上述 A 和 B 接收机 ISB 稳定性测试实验。ISB 计算结果见表 5。

从表 5 可以发现,对于 A 和 B 混合接收机,在接收机重启情况下,GPS/BDS 的 ISB 发生变化,各时段间不同接收机对的 ISB 平均值变化范围大于 0.1 周,可以认为 ISB 不具有稳定性;但在同一连续观测时段内,GPS/BDS ISB 符合较好,仍具有较好稳定性。该结果与 B 接收机 ISB 稳定性测试实验结果十分相似。在上述实验中 A

模糊度上加一个 0.5 周常数,使 BDS 系统内部 IGSO/MEO 卫星与 GEO 卫星构成的双差模糊度具有整数特性,能够进行整周模糊度固定。

表 6 混合接收机短基线数据计算 ISB/周

Tab.6 The Result of ISB Using Short Baseline Data of Mixed Receivers/Cycle

| 混合接收机 | 基线长度/m | 时段 1 | 时段 2 | 时段 3 |
|-------|--------|-------|-------|-------|
| C-E | 5.27 | -0.09 | -0.07 | -0.09 |
| D-F | 44.59 | 0.33 | 0.38 | -0.44 |

2.2 天线类型对系统偏差稳定性影响分析

2014 年 6 月 22 日,3 测站均配备 A 接收机,其中 WHU1 和 WHU2 两测站的接收机连接 A 天线,WHU3 测站的接收机连接 B 天线。天线连接线的长度均为 2 m。进行一个时段观测,观测时长为 3 h。将 3 h 连续观测数据分割为 3 个时段,每时段时长为 1 h。利用以上 3 个时段观测数据计算 GPS/BDS 的 ISB 值,结果见表 7。

实验结果表明虽然 WHU3 采用了与其他两站不同的天线类型,但是计算得到的所有 ISB 值均十分接近,差值均小于 0.07 周,并且该结果与表 1-2 的结果也十分接近,ISB 平均值的最大互差为 0.05 周,ISB 互差均小于 0.08 周,因此可以

说明不同天线类型没有对 GPS/BDS 的 ISB 产生显著影响。

表 7 不同天线类型条件下 ISB 计算结果/周

Tab.7 The Result of ISB Under the Condition of Different Antenna Types/Cycle

| 时段编号 | WHU1- WHU2 | WHU1- WHU3 | WHU2- WHU3 |
|------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| 2 | 0.03 | 0.04 | 0.01 |
| 3 | 0.08 | 0.07 | 0.02 |
| 平均值 | 0.05 | 0.04 | 0.02 |

2.3 天线连接线长度对系统偏差稳定性影响

2014年6月23日,3测站均配备A接收机和A天线。WHU1和WHU2两测站使用2m长天线连接线;WHU3测站使用20m长天线连接线。观测方案以及数据处理方案同§2.2。ISB计算结果见表8。

从表8可以发现,计算得到的所有ISB值仍然十分接近,最大差值为0.06周,与表1~2的结果符合较好,ISB平均值的最大互差为0.04周,ISB互差均小于0.07周,因此可以说明不同天线连接线长度没有对GPS/BDS ISB产生显著影响。

表 8 不同天线连接线长度条件下 ISB 计算结果/周

Tab.8 The Result of ISB Under the Condition of Different Antenna Cable Length/Cycle

| 时段编号 | WHU1- WHU2 | WHU1- WHU3 | WHU2- WHU3 |
|------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 0.07 | 0.03 | 0.02 |
| 2 | 0.01 | 0.03 | 0.01 |
| 3 | 0.03 | 0.06 | 0.06 |
| 平均值 | 0.04 | 0.04 | 0.03 |

3 附有 ISB 校正参数的 GPS/BDS 紧组合定位对模糊度固定影响

上述测试结果表明,对于GPS/BDS的ISB,不同品牌接收机在一定条件下均具有稳定性:A、C、E接收机的ISB始终保持稳定;B、D、F、G接收机在连续观测情况下稳定。基于这一前提,可以将ISB作为一个已知的参数对原始载波观测值进行校正,实现附有ISB校正参数的GPS/BDS紧组合定位。目前GPS/BDS组合定位主要采用松组合模式,因此在这里将紧组合模式下的模糊度固定性能与松组合进行比较,以此评价附有ISB校正参数的紧组合对整周模糊度固定的影响。为了能够较好地检测紧组合对模糊度固定的

影响,分别在良好和恶劣观测环境下进行测试。

3.1 良好观测环境下松组合与紧组合模糊度固定性能比较

在武汉大学校园内采集5km长度基线静态数据。所有测站均配备A接收机及对应天线。基线观测时长为3h,采样间隔为5s,卫星高度截止角设为10°。观测期间卫星轨迹图和卫星数量及PDOP值图见图1~2。为了进行比较,分别从模糊度固定平均所需时间和计算时长为30s的模糊度固定成功率这两方面进行评价。采用RATIO≥3作为模糊度固定成功的标准,统计结果见表9。

表 9 良好观测环境下不同定位模式对模糊度固定影响

Tab.9 Impact of Ambiguity Resolution on Different Positioning Mode under Good Observing Condition

| 组合类型 | 模糊度固定平均 所需时间/历元 | 计算时长为30s的 固定成功率/% |
|------|--------------------|----------------------|
| 松组合 | 2.38 | 88 |
| 紧组合 | 2.29 | 91 |

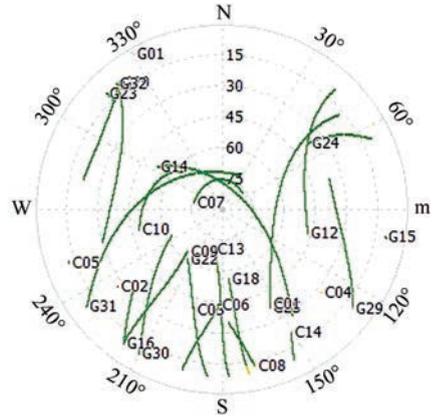


图 1 良好观测环境下卫星轨迹图

Fig.1 Sky Plot under Good Observing Condition

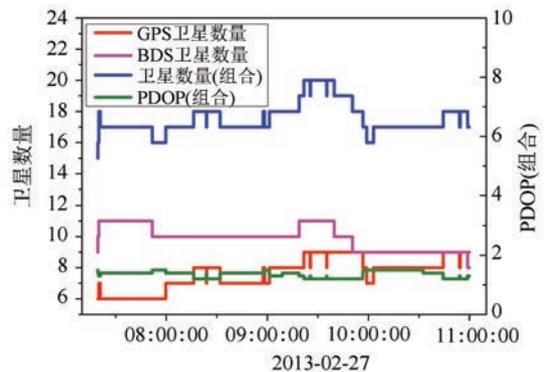


图 2 良好观测环境下卫星个数和 PDOP 值

Fig.2 Number of Satellites and PDOP under Good Observing Condition

实验结果表明,在良好观测环境下,加入 ISB

改正的 GPS/BDS 紧组合定位比松组合在模糊度固定方面的性能略有提高,但并不显著。

3.2 恶劣观测环境下松组合与紧组合模糊度固定性能比较

在武汉大学校园内采集一条约 5 km 长度基线静态数据。一个测站安置在比较开阔的操场上,另一个测站安置在一个 4 层楼下,测站与楼的距离约为 1.5 m。两个测站均配备 A 接收机及对应天线。基线观测时长为 1 h 24 min,采样间隔为 1 s,卫星高度截止角设为 10° 。观测期间卫星轨迹图和卫星数量及 PDOP 值图见图 3~4。不同定位模式下模糊度固定平均所需时间和计算时长为 5 s 的模糊度固定成功率统计结果见表 10。

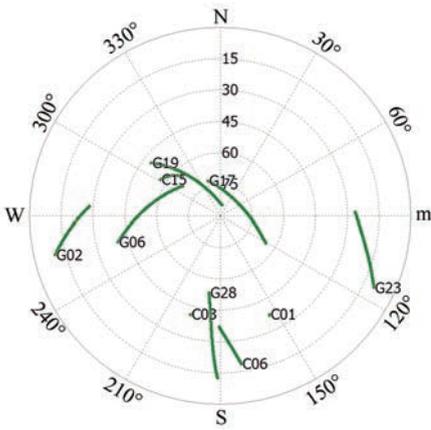


图 3 恶劣观测环境下卫星轨迹图

Fig.3 Sky Plot under Poor Observing Condition

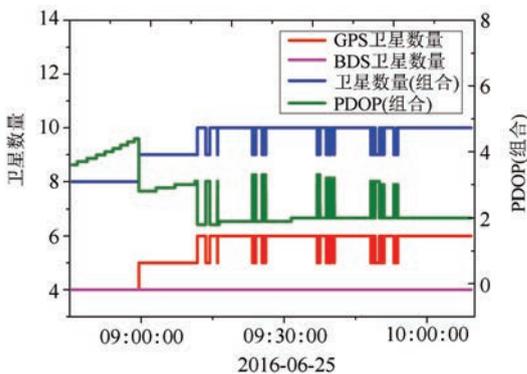


图 4 恶劣观测环境下卫星个数和 PDOP 值

Fig.4 Number of Satellites and PDOP under Poor Observing Condition

通过图 4 可以发现,在恶劣的观测环境下, GPS/BDS 的组合 PDOP 值最小值大于 1.9,部分时间段的 PDOP 值已经大于 4。表 10 的统计结果表明在恶劣观测环境下,模糊度固定平均所需时间由松组合的 6 历元缩短为 4 个历元,提高了 33%。在模糊度固定成功率方面,当计算时长为

5 s 时,紧组合相对于松组合提高了 31%。因此在恶劣观测环境下加入 ISB 改正的 GPS/BDS 紧组合定位相对于松组合能够显著改善模糊度固定性能。

表 10 恶劣观测环境下不同定位模式对模糊度固定影响
Tab.10 Impact of Ambiguity Resolution on Different Positioning Mode under Poor Observing Condition

| 组合类型 | 模糊度固定平均所需时间/历元 | 计算时长为 5 s 的固定成功率/% |
|------|----------------|--------------------|
| 松组合 | 6 | 65 |
| 紧组合 | 4 | 85 |

4 结 论

本文针对 GPS/BDS 的紧组合相对定位进行研究。在紧组合数据处理过程中,由于 GPS 和 BDS 在接收机端的 UPD 不同导致系统间的混合双差模糊度将不具有整数特性,为了解决该问题,两系统间的 ISB 必须要进行估计或改正。本文在顾及 GPS 和 BDS 之间的时间系统、坐标系统和频率间偏差的基础上,推导出 GPS/BDS ISB 计算模型。以此为基础,利用不同实验对 ISB 的稳定性进行验证,实验结果表明,在一定条件下不同类型接收机的 ISB 均具有一定的稳定性,这使得加入 ISB 改正的 GPS/BDS 紧组合定位成为可能。为了分析加入 ISB 改正的紧组合定位对模糊度固定性能的影响,分别从良好和恶劣两种实验环境进行测试。实验结果表明,采用 L1 和 B1 单频数据在良好观测环境下, GPS/BDS 紧组合相对于松组合没有显著改善模糊度固定性能,但在恶劣环境下紧组合相对于松组合可将模糊度固定平均所需时间缩短 33%,模糊度固定成功率提高 31%。由于受到实验条件限制,本文只对 7 种品牌的接收机进行实验分析,在下一步研究中,需要对更多品牌的 GPS/BDS 接收机的 ISB 稳定性进行测试,并且需要对接收机重启对 ISB 产生影响的原因进行更深入的分析。

参 考 文 献

- [1] Wang Shijin, Bei Jinzhong, Li Dehai, et al. Real-time Kinematic Positioning Algorithm of GPS/BDS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5), 621-625 (王世进, 秘金钟, 李得海, 等. GPS/BDS 的 RTK 定位算法研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, 39(5): 621-625)
- [2] Zhang W, Cannon M E, Julien O, et al. Investigation of Combined GPS/GALILEO Cascading Ambi-

- guity Resolution Schemes [C]. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS/GNSS '03), Portland, Ore, USA, 2003
- [3] Julien O, Cannon M E, Alves P, et al. Triple Frequency Ambiguity Resolution Using GPS/Galileo [J]. *European Journal of Navigation*, 2004, 2(2): 51-57
- [4] Deng C, Tang W, Liu J, et al. Reliable Single-epoch Ambiguity Resolution for Short Baselines Using Combined GPS/BeiDou System [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 375-386
- [5] Teunissen P J G, Odolinski R, Odijk D. Instantaneous BeiDou/GPS RTK Positioning with High cut-off Elevation Angles [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(4): 335-350
- [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] Montenbruck O, Hauschild A, Hessels U. Characterization of GPS/GIOVE Sensor Stations in the CONGO Network [J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(3): 193-205
- [9] Lou Yidong, Gong Xiaopeng, Gu Shengfeng, et al. An Algorithm and Results Analysis for GPS+BDS Inter-System Mix Double-Difference RTK [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(1), 1-5(楼益栋, 龚晓鹏, 辜声峰, 等. GPS/BDS混合双差分RTK定位方法及结果分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2016, 36(1):1-5)
- [10] Wanninger L. Carrier-phase Inter-frequency Biases of GLONASS Receivers [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(2): 139-148
- [11] Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Cheng Yingyan, et al. Parameters of the CGCS2000 Ellipsoid and Comparisons with GRS80 and WGS84 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3):189-194(程鹏飞, 文汉江, 成英燕, 等. 2000国家大地坐标系椭球参数与GRS80和WGS84的比较[J]. *测绘学报*, 2009, 38(3):189-194)
- [12] Hofmann-wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More[M]. Berlin: Springer, 2008
- [13] Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B8): 10 187-10 203
- [14] Zhang H, Li X, Zhu L, et al. Research on GNSS System Time Offset Monitoring and Prediction[C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014, Nanjing, China, 2014
- [15] Dach R, Schaer S, Lutz S, et al. Combining the Observations from Different GNSS[C]. Proceedings of EUREF 2010 Symposium, Gävle, Sweden, 2010
- [16] Wang J. An Approach to GLONASS Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 2000, 74(5): 421-430
- [17] 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
- [18] Nadarajah N, Teunissen P J G, Raziq N. BeiDou Inter-satellite-type Bias Evaluation and Calibration for Mixed Receiver Attitude Determination [J]. *Sensors*, 2013, 13(7): 9 435-9 463

The Stability of GPS/BDS Inter-system Biases at the Receiver End and its Effect on Ambiguity Resolution

SUI Xin^{1,2} SHI Chuang² XU Aigong¹ HAO Yushi¹

¹ School of Geomatic, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

² GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Uncalibrated phase delay at the receiver end may depend on the frequency of the signal received, which leads to mixed double difference ambiguity between GPS and BDS and, lost integer character. In order to solve this problem, inter-system biases between GPS and BDS need to be estimated or corrected. Taking the biases of time system, coordinate system and frequency between GPS

多项式模型进行时间预报的研究[J].大地测量与地球动力学,2010(2):77-82)

- [8] Guo H R, Yang Y X, He H B, et al. Numerical Prediction Methods for Clock Deviation Based on

Two-way Satellite Time and Frequency Transfer Data[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2008, 11(2): 143-147

Time Synchronization Method base on Combined Satellite-Ground and Inter-satellite Observation

TANG Guifen¹ YANG Weifeng² SU Ranran¹ XIA Aimin²

¹ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

² Haidian Information Center, Beijing 100063, China

Abstract: Inter-satellite observations realize continuous tracing for mobile satellites, to enhance accuracy of satellite clock comparisons. This paper focuses on time comparison technology combining satellite-ground and Inter-satellite observations, and derives a time comparison model for satellite-ground and inter-satellite observations. It details a method to calculate satellite-ground clock error from inter-satellite clock error. Theoretically, the prediction accuracy of mobile satellite clocks can be greatly enhanced after adding inter-satellite clock error. However, the heterogeneous nature of observation devices results in a discontinuity in the sequence of clocks, which affects the prediction accuracy of satellite clocks. We research a detection and compensation technology for slight jump clock error, and propose a combined method with traditional gross error detection and subtraction adjacent epochs, which can eliminate the heterogeneous clock errors caused by inconsistent observation equipment to enhance prediction accuracy. An experiment with real and simulation data verified the validity and effectiveness for the proposed theories and methods.

Key words: satellite-ground observation; inter-satellite observation; time compare; satellite-clock error; satellite-clock predict

First author: TANG Guifen, PhD, senior engineer, specializes in the satellite navigation. E-mail: guifentang@nudt.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41174027.

(上接第 182 页)

and BDS into consideration, a computing model of GPS-BDS inter-system bias is deduced, based on which, different experiments verify the stability of inter-system biases. Experimental results show that GPS-BDS inter-system biases of different brand receivers have stability under certain conditions. GPS-BDS inter-system biases are not influenced by antenna type and antenna cable length significantly. GPS-BDS tight combining with inter-system biases corrected performs well under poor observing condition, and improves the mean time-to-ambiguity-fixing by 33%, and the success rate of ambiguity-fixing by 31%.

Key words: GPS; BDS; uncalibrated phase delay; inter-system bias; ambiguity resolution

First author: SUI Xin, PhD, lecturer, specializes in GNSS data processing and application. E-mail: xinsui@whu.edu.cn

Corresponding author: XU Aigong, PhD, professor. E-mail: xu_ag@126.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program, No. 2016YFC0803102; the Innovation Team Project of Education Bureau of Liaoning Province, No. LT2015013; the General Science Research Project of Education Bureau of Liaoning Province, No. LJ2017QL007; the Doctoral Scientific Research Foundation of Liaoning Province, No.201501126.