

高精度 GPS/BDS 兼容接收机内部 噪声检测方法研究

高 晓^{1,2} 戴吾蛟^{1,2} 李施佳^{1,2}

1 中南大学测绘与国土信息工程系,湖南 长沙,410083

2 湖南省精密工程测量与形变灾害监测重点实验室,湖南 长沙,410083

摘 要:北斗产品产业化步伐不断加快,针对用户高精度的应用需求,有必要研究有效的接收机性能检测方法检定北斗产品内部噪声。研究了检定高精度 GPS/BDS 兼容接收机内部噪声水平的方法,引入站间单差残差法检定接收机内部噪声水平,并用实测零基线数据验证了该方法的有效性。结果表明,零基线单差残差法可以直观地反映接收机内部噪声水平,更适用于混合星座的北斗系统。

关键词:GPS;BDS;接收机内部噪声;零基线;单差残差

中图法分类号 P228.41

文献标志码:A

北斗系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)作为我国独立开发、自主运行的卫星导航定位系统,目前已完成“三步走”战略的第二步组网工作,可提供覆盖中国及其周边地区(范围:55°S~55°N, 55°E~180°E)的区域导航定位服务^[1]。随着北斗系统建设与北斗导航定位算法的不断完善以及北斗 GNSS 基础核心产品关键技术取得突破性进展, GPS/BDS 双模接收机将成为 GNSS 产业化领域的主流产品^[2]。GNSS 接收机投入生产实践前需评定接收机内部噪声水平^[3]。内部噪声主要指由接收机信号通道、锁相环、码跟踪环偏差等引发的信号干扰误差,是评价 GNSS 接收机性能的重要指标^[4]。如何利用科学严谨的检测方法获取高精度兼容接收机的真实内部噪声水平是目前急需解决的问题。本文针对北斗系统独特的星座设计,引入站间单差残差法检测接收机内部噪声,并用实测数据验证其有效性。结果表明,零基线单差残差法可有效地反映接收机内部噪声水平,更适用于混合星座设计的北斗系统。

1 GNSS 接收机内部噪声检定方法

1.1 零基线测试法

GNSS 接收机接收的卫星信号受到通道间偏

差、锁相环延迟及码跟踪环偏差等干扰产生的误差,称之为接收机内部噪声,该噪声对接收机性能有重要影响^[5,6]。在功分器制作工艺过关的情况下,零基线检验法是检定接收机内部噪声的常用方法^[7],其基本原理是:多台 GNSS 接收机通过功率分配器接收来自同一条天线的卫星信号,其中任意两台接收机组成的基线理论长度为 0。零基线法可以消除包括卫星钟差、星历误差、大气延迟误差、多径误差及天线相位中心偏差等一系列误差,因此,零基线检验法可以较为真实地反映接收机的质量水平^[8,9]。

1.2 零基线单差残差算法

传统零基线算法由于受到接收机钟差、噪声以及天线相位瞬时变动的影 响,解算得到的基线向量并不能完全反映接收机内部的性能^[10]。同时,由于 BDS 采用三种不同类型的观测卫星(GEO、IGSO、MEO)组合混合星座,传统的零基线定位法无法显示接收机内部噪声对于不同类型卫星的影响,因此,考虑采用零基线站间单差残差检测接收机内部噪声。由于零基线数据通过差分方法可以消除除接收机内部噪声以外的其余误差,因此,理论上差分观测数据残差序列可以直观地反映接收机的噪声水平。

载波相位的原始观测方程可表示为^[11]:

收稿日期:2013-11-10

项目来源:湖南省国土资源厅科技资助项目(2012-41);中南大学研究生自主探索资助项目(2014zzts249)。

第一作者:高晓,硕士生,主要从事 GNSS 组合数据处理与软件开发研究。E-mail: 834606637@qq.com

$$L_i^p = \rho_i^p + c \cdot (dts^p - dtr_i + dt_{sys}) + \lambda^p \cdot N_i^p + I_i^p + T_i^p + \epsilon_i^p \quad (1)$$

式中,上标代表观测卫星;下标代表测站; L_i^p 为测站*i*到卫星*p*的载波相位观测值(m); ρ 为相应的卫地距(m); c 为真空光速; dts 、 dtr 分别为卫星钟差与接收机钟差; λ 为载波波长; N 为整周模糊度; I 、 T 分别为电离层时延与对流层时延; ϵ 为相位观测值噪声。

对于零基线数据,采用差分模型可以消除绝大部分误差影响,因此,站间单差(single difference,SD)相位观测方程可以表示为:

$$L_{ij}^p = \rho_{ij}^p - c \cdot dtr_{ij} + \lambda^p \cdot N_{ij}^p + \epsilon_{ij}^p \quad (2)$$

式中, $L_{ij}^p = L_j^p - L_i^p$; $dtr_{ij} = dtr_j - dtr_i$; $N_{ij}^p = N_j^p - N_i^p$ 。

确定参考卫星*q*后,双差观测方程为:

$$L_{ij}^{pq} = \rho_{ij}^{pq} + \lambda^p \cdot N_{ij}^{pq} + \epsilon_{ij}^{pq} \quad (3)$$

其中, $\rho_{ij}^{pq} = \rho_{ij}^q - \rho_{ij}^p$; $N_{ij}^{pq} = N_{ij}^q - N_{ij}^p$ 。

将式(2)进行相应变换^[12]:

$$\begin{aligned} L_{ij}^p &= \rho_{ij}^p - c \cdot dtr_{ij} + \lambda^p \cdot N_{ij}^p + \epsilon_{ij}^p = \\ &\rho_{ij}^q - c \cdot dtr_{ij} + \lambda^p \cdot (N_{ij}^p - N_{ij}^q + N_{ij}^q) + \epsilon_{ij}^p = \\ &\rho_{ij}^q + \lambda^p \cdot N_{ij}^{pq} + (\lambda^p \cdot N_{ij}^q - c \cdot dtr_{ij}) + \epsilon_{ij}^p \end{aligned} \quad (4)$$

对于零基线,基准站与流动站坐标是相同的,因此,利用式(3)容易反算出双差模糊度,则式(4)仅余基准星单差模糊度与接收机相对钟差两个未知参数。将上述两个参数合并为一个参数,利用同一历元多个观测数据进行最小二乘解算。得到该参数之后,代入式(4)即可计算每颗卫星每个历元的站间单差残差值。

零基线单差残差模型的优势在于其可以分析每一颗观测卫星的残差序列,避免了双差模型中由于参考卫星变换引发的序列不平稳变动问题。同时,单差残差模型可以避免星间差分计算时不同类型卫星的噪声水平不一致产生的影响,有利于BDS观测数据的残差分析。由于零基线单差残差消除了除接收机内部噪声误差以外的其余误差,因此,零基线单差残差序列主要反映了接收机内部噪声水平对观测值的影响,可用来评估接收机内部的噪声水平。

2 仪器检测实例与数据分析

本次实验所用的仪器为上海司南导航公司产品,接收机板卡型号为K505,支持GPS/BDS双星五频(GPS: L_1/L_2 ;BD2: $B1/B2/B3$)数据采集。

利用该型号板卡采集GPS/BDS双星静态零基线数据,采样时间为2013年4月1日12:00~15:00(GPST),采样频率为1 Hz,卫星截止高度角为 10° 。

利用零基线静态观测数据进行动态后处理计算,结果如图1所示。图1中,大写字母G、C分别代表GPS与BDS(下文字母含义一致)。为避免放大噪声,放弃双频数据线性组合模式,数据直接参与解算。由图1可知,GPS、BDS以及组合系统解算结果无明显阶跃现象,定位精度优于标称精度(RTK精度,水平为 $10 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6}$,高程为 $20 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6}$)。由于零基线定位结果主要受接收机内部噪声的影响,因此,接收机内部噪声水平可通过基线解标准差进行评估,GPS与BDS单系统基线解标准差分别为2.03 mm、2.31 mm,组合系统基线解标准差为1.14 mm。

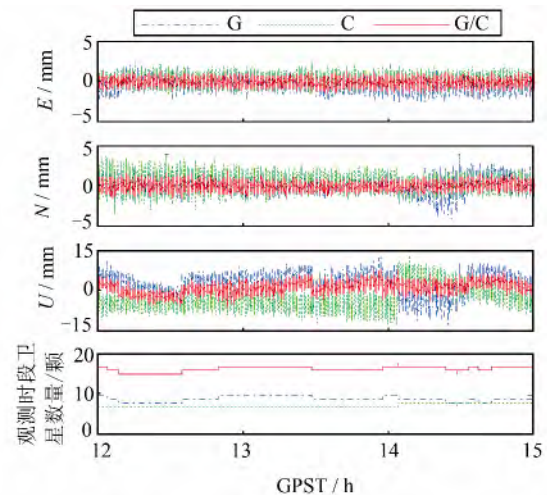


图1 零基线动态数据处理结果

Fig. 1 Time Sequences of Zero-Baseline Kinematic Positioning Results

Q-Q图(quantile-quantile plot)作为散点图,可用于鉴别样本是否服从正态分布。本文采用Q-Q图检验组合系统三方向定位结果的分布规律,结果如图2所示。可以看出,组合系统水平方向定位结果基本服从正态分布,高程方向除少数历元定位结果较差,整体较好地服从正态分布。由于零基线差分消除了除接收机内部噪声以外的误差,因此可认为接收机内部噪声对GNSS观测数据的影响呈现正态分布特征。

《全球定位系统测量型接收机检定规程》规定:零基线测试时,1.5 h观测数据静态解基线向量及长度应在1 mm以内,则认为接收机内部噪声水平满足测量要求^[6]。将零基线数据按照1 h时长划分为3个时段,对每个时段观测数据进行静态相对定位计算,结果如表1所示。可见,利用

该接收机采集的零基线数据静态解满足规程要求,三个方向以及长度均小于 1 mm。

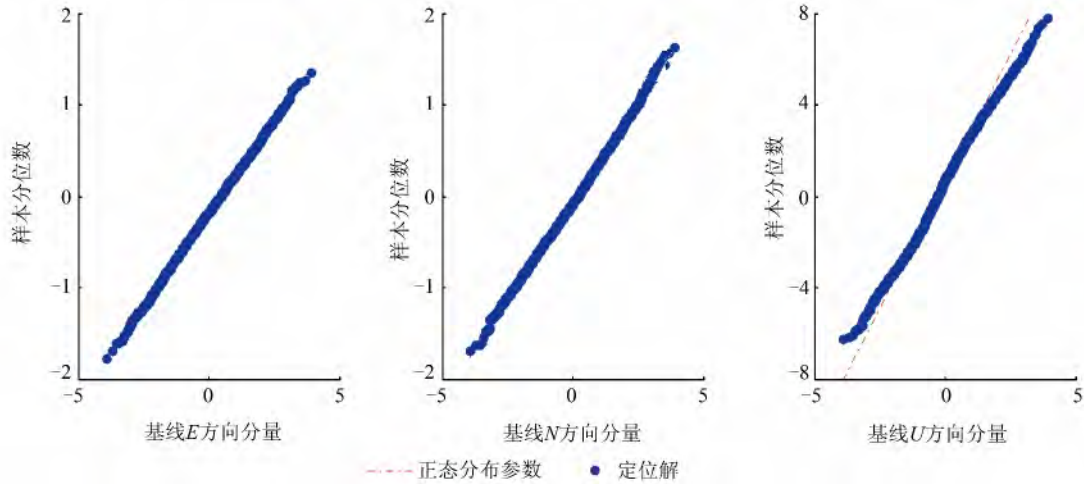


图 2 零基线动态定位结果 Q-Q 图正态分布检验

Fig. 2 Q-Q Plot of Zero-Baseline Kinematic Positioning Solutions Using Normal Distribution Test

表 1 零基线数据静态相对定位结果/mm

Tab. 1 Static Relative Positioning Solutions Using Zero-Base Data/mm

	12:00~13:00			13:00~14:00			14:00~15:00		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
GPS	-0.18	-0.08	-0.18	-0.46	-0.32	0.21	-0.43	-0.31	-0.20
BDS	0.04	0.15	-0.12	0.05	0.15	-0.25	0.09	0.09	0.01
GPS/BDS	-0.11	-0.07	-0.14	-0.27	-0.28	0.26	-0.16	-0.12	0.27

利用零基线单差残差法计算观测卫星的站间单差残差。图 3 是观测时间较长的 GPS 卫星 (PRN:G19) 观测时段内的单差残差序列。由图 3 可知,该接收机内部噪声对 GPS 载波相位观测值的影响较小,单差残差序列在零基线附近呈随机分布,并无明显系统性分布趋势。统计残差标准偏差 (standard deviation, STD) 值, L_1 频点为 0.47 mm, L_2 频点为 0.82 mm。可见, L_2 频点的 STD 值明显大于 L_1 频点。对比残差标准差与动态定位基线解标准差可以发现,利用残差标准差评估接收机内部的噪声水平更为合理。

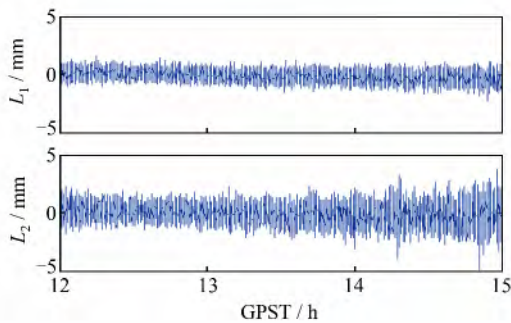


图 3 测段 GPS 卫星单差残差序列 (PRN:G19)
Fig. 3 SD Residuals of GPS Satellite (PRN:G19)

选择 GPS 卫星 G19 单差残差序列检验其分布规律,结果如图 4 所示。由图 4 可知,接收机内

部噪声一定程度上影响了载波测量噪声的正态分布特性,导致 GPS 观测数据单差残差序列与正态分布并不完全吻合。由于接收机内部噪声量级较小,对 GPS 观测数据的质量影响也很小,因此, GPS 单差残差序列整体上与正态分布接近。

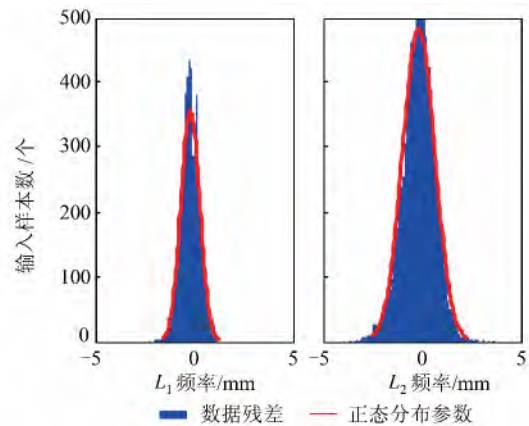


图 4 GPS 卫星单差残差正态分布检验 (PRN:G19)
Fig. 4 Normal Distribution Test Results with SD Residuals of GPS Satellites (PRN:G19)

利用单差残差法计算 BDS 卫星 (PRN:C01、C10) 的残差,结果如图 5 与图 6 所示,图中自上而下分别为 $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 三个频点的单差残差序列。由图 5、图 6 可知,尽管 C01 与 C10 分属不同类型的观测卫星,由于零基线差分模型消除了大

部分误差的影响,因此,两颗卫星的残差序列并未表现出系统性差异。接收机内部噪声对不同类型观测卫星的影响基本相同,单差残差序列表现为随机分布,无明显的趋势性波动。

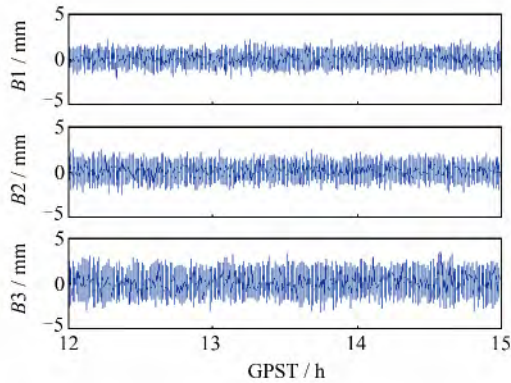


图5 测段 BDS 卫星单差残差序列 (PRN:C01)
Fig. 5 SD Residuals Sequence of BDS Satellite (PRN: C01)

图7为BDS卫星C01单差残差分布规律测试图。可以看出,接收机内部噪声同样影响了BDS载波相位观测数据,导致其残差序列并非严格意义的正态分布,但接收机内部噪声的影响较

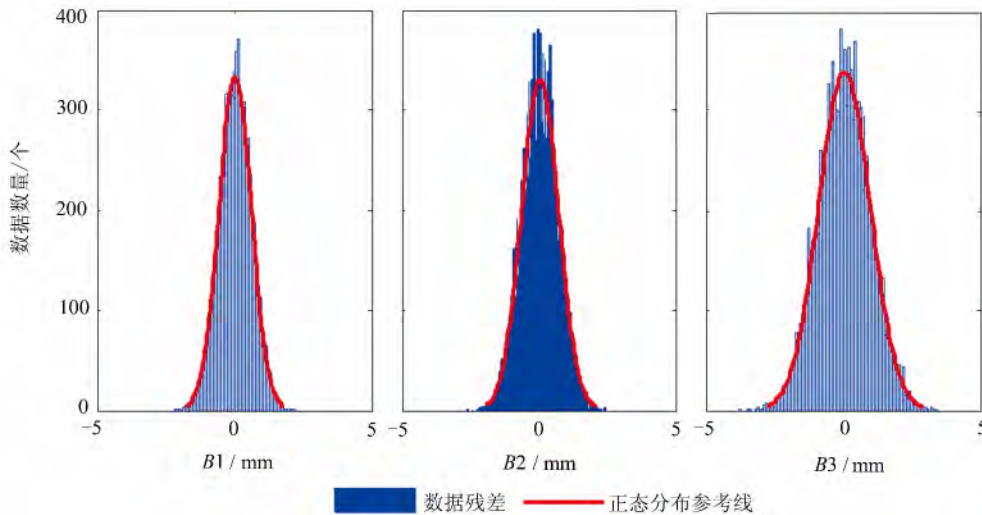


图7 BDS 卫星单差残差正态分布检验结果 (PRN:C01)
Fig. 7 Normal Distribution Test Results with SD Residuals of BDS Satellites (PRN: C01)

3 结 语

北斗卫星系统发展迅猛,产品产业化进程也不断加快,这就必然要求成品的检验与测试结果满足市场需要。本文针对北斗系统特有的混合星座设计,引入单差残差法检定接收机内部噪声。通过零基线实测数据计算单差残差序列,并对GPS/BDS残差序列进行对比分析。结果表明,零

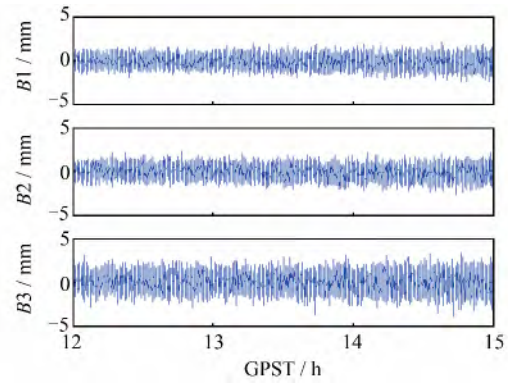


图6 测段 BDS 卫星单差残差序列 (PRN:C10)
Fig. 6 SD Residuals Sequence of BDS Satellite (PRN:C10)

小,三个频点残差序列整体上依然符合正态分布的特征。

同时,统计 BDS 观测卫星单差序列,所有卫星残差均值的绝对值均小于 0.2 mm,STD 值均小于 1.4 mm,不同类型观测卫星的残差标准差基本相同。因此,对比传统零基线检定法计算结果,零基线单差残差更加直观、准确地反映了接收机内部噪声水平。

基线单差残差序列可有效检定接收机内部噪声水平,更适用于混合星座设计的北斗系统。

参 考 文 献

[1] Gao Weiguang, Su Mudan, Li Junzheng, et al. A Performance Evaluation of BeiDou Navigation Satellite System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(11): 1 352-1 355 (高为广,苏牡丹,李军正,等.北斗卫星导航系统试运行服务性能评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版,

- 2012,37(11):1 352-1 355)
- [2] Shi C,Zhao Q L,Hu Z G ,et al. Precise Relative Positioning Using Real Tracking Data from COMPASS GEO and IGSO Satellites[J]. *GPS Solutions* , 2012,DOI 10.1007/s10291-012-0264-x
- [3] Gourevitch S. Measuring GPS Receiver Performance: A New Approach[J]. *GPS World* , 1996, 7 (10):56-62
- [4] Du Juan,Zhang Hui,Liu Xing,et al. Precision Detection Method of GPS/BD2 Compatible Receivers Based on Zero-Baseline[J]. *Ship Electronic Engineering* ,2013,33(7):121-123(杜娟,张会,刘星,等. 基于零基线的 GPS/BD2 兼容接收机精度检测方法研究[J]. *舰船电子工程* ,2013,33(7):121-123)
- [5] Dai Shuicai,Zhu Jianjun,Zhang Xuezhuang,et al. The Evaluation and Test on Interior Noise Level of GPS Receiver[J]. *Science of Surveying and Mapping* ,2007,32(5):17-21(戴水财,朱建军,张学庄,等. GPS 接收机内部噪声水平的评价与检测方法[J]. *测绘科学* ,2007,32(5):17-21)
- [6] State Bureau of Surveying and Mapping. Specification for Check off and Test of GPS Receiver of Surveying Model(CH8016-95) [S]. Beijing:Surveying and Mapping Press,1995:1-3(国家测绘局. 全球定位系统(GPS)测量型接收机检定规程(CH8016-95) [S]. 北京:测绘出版社,1995:1-3)
- [7] You Zhendong. Research on the Interior Performance Test of GNSS Receiver[D]. Wuhan:Wuhan University,2005(游振东. GNSS 接收机内部性能检测方法的研究[D]. 武汉:武汉大学,2005)
- [8] Amiri-Simkooei A R,Tiberius C C J M. Assessing Receiver Noise Using GPS Short Baseline Time Series[J]. *GPS Solutions* ,2007,11(1):21-35
- [9] Langley R B. GPS Receiver System Noise[J]. *GPS World* ,1997,8(7):40-45
- [10] Dai Shuicai. Research on Check off and Test Techniques of GPS Receiver [D]. Changsha:Central South University,2004(戴水财. GPS 接收机检测技术研究[D]. 长沙:中南大学,2004)
- [11] Li Zhenghang,Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan:Wuhan University Press,2005(李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 武汉:武汉大学出版社,2005)
- [12] Zhang Xiaohong,Ding Lele. Quality Analysis of the Second Generation Compass Observables and Stochastic Model Refining[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* ,2013,38(7): 832-836(张小红,丁乐乐. 北斗二代观测值质量分析及随机模型精化[J]. *武汉大学学报·信息科学版* ,2013,38(7):832-836)

Interior Performance Test of High Precision GPS/BDS Compatible Receivers

GAO Xiao^{1,2} DAI Wujiao^{1,2} LI Shijia^{1,2}

1 School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2 Key Laboratory of Precise Engineering of Surveying & Deformation Disaster Monitoring of Hunan Province, Changsha 410083, China

Abstract: As the pace of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) product industrialization is accelerating, research on the internal performance of BDS receiver is in great demand. This paper focuses on a method for internal noise levels in high-precision GPS/BDS compatible receivers. A single difference residual method is introduced to test for internal noise based on measured data. Results show that the single difference residual method can test for internal noise in GPS/BDS compatible receivers effectively and is more applicable to BDS designed with hybrid constellations.

Key words: GPS; BDS; interior noise; zero-baseline; single difference residual

First author: GAO Xiao, postgraduate, specializes in the GNSS data processing and software development. E-mail: 834606637@qq.com

Foundation support: The Science and Technology Project in the Land and Resources Department of Hunan Province, No. 2012-41; the Postgraduate Independent Exploration Project of Central South University, No. 2014zzts249.