北斗导航卫星伪距偏差特性及减弱方法

常志巧¹, 刘利^{1*}, 胡小工², 郭睿¹, 王冬霞¹, 周善石², 蒲俊宇¹

1. 32021 部队, 北京 100094;

2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

*联系人, E-mail: lliu@shao.ac.cn

收稿日期: 2020-07-20; 接受日期: 2020-09-30; 网络出版日期: 2020-12-15

国家自然科学基金(编号: 42004028, 41874043, 41804030)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2016YFB0501900)资助项目

摘要 导航卫星信号的非理想特性会引起伪距测量产生偏差, 具体表现为相同类型接收机具有相同伪距偏差, 不同类型接收机的伪距偏差不一致. 当提供导航定位服务产品的接收机技术状态与用户端不一致时, 伪距偏差将引起导航定位服务性能降低. 本文利用超短基线双差伪距O-C (Observation Minus Computation)方法计算了BDS (Beidou Satellite Navigation System)的伪距偏差, 发现在早期试验卫星阶段的不同状态接收机之间存在较大的伪距偏差现象, 设计了接收机环路参数调整、改变抗多径算法和卫星预失真滤波器参数调整三种减弱伪距偏差的方法. 分别试验验证结果表明, 接收机环路参数调整能大幅降低卫星之间的伪距偏差, B1I各颗卫星伪距偏差标准差由0.63 m降低至0.36 m; 抗多径算法会造成额外的伪距偏差, 窄相关算法能大幅减小伪距偏差, B1I各颗卫星伪距偏差标准差由0.36 m降低至0.18 m; 调整卫星预失真滤波器参数能在一定程度上减小伪距偏差, 单颗卫星伪距偏差降低约0.3–0.4 m. 最后, 针对BDS卫星伪距偏差解算无固定参考基准的问题, 设计了一种基于外频标非实时双差O-C方法, 利用该方法分别处理了BDS和GPS (Global Positioning System)数据, 并对两个系统卫星伪距偏差的特性进行比较分析. 结果表明, BDS和GPS卫星都存在伪距偏差; GPS卫星L2C伪距偏差与BDS-3卫星B1C数据支路相当; GPS卫星L1CA伪距偏差与其兼容互操作的BDS-3卫星B1C导频支路相当; L5C与其兼容互操作的BDS-3卫星B2a信号相比伪距偏差更大.

关键词 北斗卫星导航系统, 伪距偏差, 双差, 预失真滤波器参数, 相关间距

PACS: 95.75.Wx, 95.75.Pq, 94.20.Vv, 95.10.Eg

1 引言

采用相同的卫星轨道、钟差对不同类型接收机BDS (Beidou Satellite Navigation System)卫星进行O-C (Observation Minus Computation)计算时, 发现不

同类型接收机的O-C存在不一致的现象, 如图1所示. 首先利用北斗二号定轨参考站解算卫星精密轨道和卫星精密钟差, 然后固定该轨道钟差, 分别对并置的定轨类型接收机和试验接收机观测的伪距进行双频组合O-C计算, 计算时段为2015年2月3日至2月6日. 图1(a)

引用格式: 常志巧, 刘利, 胡小工, 等. 北斗导航卫星伪距偏差特性及减弱方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019509

Chang Z Q, Liu L, Hu X G, et al. Pseudorange-bias characteristics and the weakening method of BDS satellites (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019509, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0247](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0247)

图 1 (网络版彩图)不同类型接收机O-C结果比较. (a) 定轨类型接收机O-C; (b) 试验接收机O-C

Figure 1 (Color online) Comparison of O-C between different receivers. (a) O-C of the precise orbit determination type receiver; (b) O-C of the experimental receiver.

为与定轨参考站相同类型的接收机的O-C结果, 各颗卫星之间未见明显分层; 图1(b)为试验参考站接收机的O-C结果, 卫星之间分层现象显著.

通过系列机理分析发现该现象是由BDS卫星信号畸变引起的伪距偏差产生. 卫星信号畸变会引起互相关函数变形, 从而导致S曲线的过零点随着相关间距 δ 的变化而不同^[1,2]. 该现象早在1993年3月GPS (Global Positioning System) Block II SVN 19 (PRN 19)的信号畸变中被发现, 使得采用不同类型接收机的差分定位精度严重降低^[3]. 尽管这种信号畸变在异常情况时最显著, 后来发现在正常健康的卫星中信号畸变仍然存在^[4-7]. 文献[8]提出采用不同相关间距的误差变化特性对模拟信号畸变特性进行描述, 得出了相关间距相差越大, 信号畸变引起的伪距偏差越大, 接收机相关间距0.1–1.0码片差异会导致最大的信号畸变, 平均偏差为0.3 m. 0.2–0.1码片的相关间距差异会导致平均偏差为0.15 m. 文献[9]综合比较了定向天线和全向天线采集信号计算的伪距偏差特性, 发现两种观测方法得出的伪距偏差具有相似的范围和趋势, 不一致性主要反应在观测噪声和多路径影响量级上.

信号畸变导致的伪距偏差会反过来影响定位精度^[8-10]. 当提供导航定位服务产品的接收机技术状态与用户端不一致时, 伪距偏差将引起导航定位服务性能降低. 文献[9]指出信号畸变引起的伪距偏差使精

度、完好性、可用性性能受到负面影响, 双频无线电层组合放大了伪距偏差的影响. 为了更有效地减弱伪距偏差对定位误差的影响, 文献[11]提出限制用户接收机相关间距的方法, 使单频伪距偏差对最差用户误差的影响从21%–91%降低至4%–8%, 双频伪距偏差对误差的影响从44%–264%降低至7%–22%. 伪距偏差同样会降低精密单点定位的性能, 一方面在基于模糊度整数解的PPP (Precise Point Positioning)中, 伪距偏差使得参考网络提供的FCB (Fractional Cycle Bias)误差增大, 导致用户无法正确恢复模糊度整数特性; 另一方面在基于实数解的PPP中, 伪距偏差使得收敛时间和定位误差增大^[12].

BDS-2已于2012年12月27日正式开始运行^[13], 作为北斗区域系统向全球系统迈进的重要一步. 北斗三号系统于2015年3月至2016年2月成功发射了5颗新一代导航试验卫星, 2017年11月发射了第一颗全球组网卫星^[14], 2020年7月31日, 北斗三号系统已全面开通, 可为全球用户提供连续、稳定、可靠的定位、导航、授时服务. 伪距观测数据质量关系到用户定位、导航授时的精度, 成为国内外学者研究的热点, 大量研究表明早期BDS卫星的伪距观测受多路径误差影响具有系统特性. 对于GEO (Geostationary Orbits)卫星, 卫星相对于地面接收机的相对视运动速度慢, 多径误差波动主要呈现低频现象^[15,16], 而MEO (Medium Earth Orbits)和IGSO (Inclined Geostationary Orbits)卫星伪距多路径误差存在卫星端引起的系统偏差, 该系统偏差与高度角和频率强相关^[17,18]; 文献[19]利用一个测站的观测数据对所有试验星公开信号进行了系统分析, 结果表明BDS-3卫星信号质量与GPS的L1/L2/L5信号和伽利略卫星的E1/E5a/E5b信号质量相当, 并认为其基本消除了存在于BDS-2卫星信号中的伪距多径缓变偏差问题. 本文分析的伪距偏差不指多径引起的偏差, 而特指由于信号畸变导致的距离观测值的偏差, 在卫星信号一定的条件下, 相同软硬件条件的接收机具有相同的伪距偏差. 本文重点讨论接收机状态不一致条件下的伪距偏差差异. 该差异不能通过卫星和接收机硬件延迟吸收, 与卫星端载荷非理想特性和接收机端的参数设置都有关. 本文从卫星信号和接收机终端两方面入手尝试减弱伪距偏差的方法并进行试验验证.

2 分析方法

2.1 短基线双差O-C方法

伪距偏差的常数特性使得利用单台接收机不能分离伪距偏差和卫星及接收机通道延迟, 通常采用两台接收机的观测组合分析相对伪距偏差. 文献[20]指出采用零基线方法分析能定量给出伪距偏差的大小, 由于两个接收机共用一个天线, 可以完全消除接收机相关的误差, 计算的伪距偏差精度较高. 但该方法需要单独布设零基线, 使得数据的连续稳定较难保证. 本文利用BDS地面监测网络两台并置的不同技术状态接收机的短基线双差O-C方法估计BDS卫星伪距偏差. 由于并置接收机之间的距离不超过100 m, 通过双差后处理, 消除了大部分误差, 理论上双差O-C应该为0 (包含多径误差的均值). 顾及伪距偏差的原始伪距观测方程为

$$P = \rho + d_{\text{orb}} + d_{\text{sta}} + d_{\text{trop}} + c(dt - dT) + d_{\text{ion}} + d_{\text{rtgd}} + d_{\text{stgd}} + d_{\text{mp}} + d_{\text{sdm}} + \varepsilon_p, \quad (1)$$

其中, P 为伪距观测量; ρ 为利用卫星位置和测站坐标计算的星地距离; d_{orb} 为轨道误差引起的误差; d_{sta} 为测站位置误差引起的误差; d_{trop} 为对流层延迟误差; dt 为接收机钟差; dT 为卫星钟差; d_{ion} 为电离层延迟量; d_{rtgd} 为接收机通道延迟; d_{stgd} 为卫星通道延迟; d_{mp} 为多路径误差; d_{sdm} 为由信号畸变引起的伪距偏差; ε_p 为观测噪声.

将以上观测方程在接收机1, 2和星间 j, k 分别求差可以得到双差伪距观测方程:

$$\begin{aligned} \Delta \nabla P_{12}^{jk} = & \Delta \nabla \rho_{12}^{jk} + \Delta \nabla d_{\text{orb}12}^{jk} + \Delta \nabla d_{\text{sta}12}^{jk} + \Delta \nabla d_{\text{trop}12}^{jk} \\ & + \Delta \nabla d_{\text{ion}12}^{jk} + \Delta \nabla d_{\text{mp}12}^{jk} + \Delta \nabla d_{\text{sdm}12}^{jk} + \Delta \nabla \varepsilon_{p12}^{jk}. \end{aligned} \quad (2)$$

由于并置接收机之间的距离较近, 经过双差后消除了由轨道引起的误差, 由测站位置误差引起的误差, 对流层、电离层等误差, 残余多路径误差, 由信号畸变引起的伪距偏差以及观测噪声. 双差观测量O-C可以近似为

$$\Delta \nabla P_{12}^{jk} - \Delta \nabla \rho_{12}^{jk} \approx \Delta \nabla d_{\text{mp}12}^{jk} + \Delta \nabla d_{\text{sdm}12}^{jk} + \Delta \nabla \varepsilon_{p12}^{jk}. \quad (3)$$

多路径误差与卫星和接收机之间的相对几何构型

相关, 在一定的周期内对超短基线的双差O-C进行平均可以消除大部分多路径和噪声的影响(周期通常取为24 h). 因此, 双差O-C的平滑可以反映由于信号畸变引起的伪距偏差:

$$\Delta \nabla P_{12}^{jk} - \Delta \nabla \rho_{12}^{jk} \approx \Delta \nabla d_{\text{sdm}12}^{jk}. \quad (4)$$

选择某颗参考卫星为基准, 通过超短基线双差O-C平滑方法可以获取两台接收机之间相对于参考卫星的相对伪距偏差.

2.2 基于外频标非实时双差O-C方法

利用式(4)计算两颗卫星之间的伪距偏差, 要求两台接收机在同一时刻同时观测到卫星 j 和 k 的伪距观测量, 要求参考卫星必须全弧段可视, 其余卫星才能成功与该参考卫星组成双差观测量. 现有卫星导航系统星座主要以MEO卫星为主, 选择任意MEO为参考卫星时, 卫星共视时间较短或部分卫星无共视时间, 导致双差O-C计算伪距偏差时误差较大或无计算结果. 当两台并置接收机采用共同的外频标时, 接收机钟差相同, 首先对每颗卫星计算站间单差O-C, 然后再选取参考卫星, 对单差O-C平均值进一步计算星间单差, 从而得到所有卫星相对于参考卫星的伪距偏差. 具体步骤为

(1) 对原始伪距观测方程计算站间单差O-C:

$$\begin{cases} \nabla P_{12}^j = \nabla \rho_{12}^j + \nabla d_{\text{orb}} + \nabla d_{\text{sta}} + \nabla d_{\text{trop}} \\ \quad + \nabla d_{\text{ion}} + \nabla d_{\text{rtgd}} + \nabla d_{\text{mp}} + \nabla d_{\text{sdm}} + \nabla \varepsilon_p, \\ \nabla P_{12(\text{O-C})}^j = \nabla P_{12}^j - \nabla \rho_{12}^j = \nabla d_{\text{rtgd}} + \nabla d_{\text{sdm}} \\ \quad + \nabla d_{\text{mp}} + \nabla \varepsilon_p. \end{cases} \quad (5)$$

站间单差O-C消除了由轨道和测站误差引起的距离误差、对流层延迟、电离层延迟及卫星通道延迟, 主要包含两台接收机的通道延迟差异 ∇d_{rtgd} 和伪距偏差 ∇d_{sdm} .

(2) 对站间单差O-C求均值 $\nabla P_{12(\text{O-C})}^j$:

$$\nabla P_{12(\text{O-C})}^j \approx \nabla d_{\text{rtgd}} + \nabla d_{\text{sdm}}. \quad (6)$$

通道延迟差异 ∇d_{rtgd} 和伪距偏差 ∇d_{sdm} 两项误差在数据采集范围内认为是常数, 对 $\nabla P_{12(\text{O-C})}^j$ 求均值认为消除了多路径和观测噪声的影响.

(3) 对站间单差 O-C 均值计算星间单差

$$\Delta \nabla P_{12(O-C)}^{jk} ;$$

$$\Delta \nabla P_{12(O-C)}^{jk} = \nabla P_{12(O-C)}^j - \nabla P_{12(O-C)}^k \approx \Delta \nabla d_{\text{sdm } 12}^{jk} \quad (7)$$

3 减弱北斗伪距偏差的措施及效果分析

3.1 接收机环路参数调整方法

本文选取 B1I, B3I 信号来分析接收机环路参数调整对伪距偏差的影响. 选取定点经度位于中国中部的 BDS-2 PRN3 GEO 卫星为参考卫星, 可同时计算其他卫星相对于 PRN3 卫星 B1I, B3I 信号的伪距偏差. 伪距偏差计算时段为 2015 年 11 月 2 日全天, 在轨卫星包括 BDS-2 卫星和 4 颗试验卫星, 数据采样率为 60 s. 图 2(a) 为并置的两台接收机的双差 B1I O-C 序列, 图中圆圈代表试验卫星, 其余符号代表 BDS-2 卫星. 从图中可以看出试验卫星相对于 BDS-2 卫星具有显著的系统性偏差, 在 BDS-2 卫星之间也存在较小的系统性偏差. 通过修改其中一台接收机的 B1I 环路参数, 伪距偏差得到减弱. 图 2(b) 是接收机升级后的双差 B1I O-C 序列, BDS-2 卫星之间几乎无显著的系统性偏差, 试验卫星与 BDS-2 卫星的伪距偏差大幅减小, 但仍然存在系统性偏差.

表 1 列出了接收机环路参数调整前后伪距偏差的变化, 调整后 BDS-2 卫星之间无显著的系统性偏差, 但试验卫星与 BDS-2 卫星之间还存在系统性偏差, 表现

在 PRN32 偏差均值为 0.66 m, PRN33 偏差均值为 -0.86 m, PRN34 偏差均值为 -0.76 m. 由于未调整 B3I 的环路参数, B3I 两次伪距偏差差异较小.

3.2 卫星失真滤波器参数调整效果分析

从图 2(b) 和表 1 可以看出, 调整环路参数后, 由于硬件等因素仍然存在差异, 两台接收机之间仍然存在伪距偏差. 只有从源头改善卫星信号的畸变程度, 才能从根源上减弱伪距偏差. 文献 [21] 将星上载荷等效为滤波器和高功放两个非理想器件进行分析, 文献 [12] 通过比较得出由高功放导致的信号畸变引起的伪距偏差远小于滤波器的影响. 北斗全球试验及组网卫星都具备调整信号生成端滤波器参数的功能, 通过滤波器参数调整使天线出口端的导航信号特性接近理想, 从而保证测距性能满足需求. 2016 年 3 月 30 日对 I2S, M1S 和 M2S 卫星进行了 B1 频点的滤波器参数重注, 表 2 给出了北京、新疆和四川三个地面站 B1I 频点滤波器参数调整前后的伪距偏差 (以 BDS-2 PRN3 卫星为参考). 从表中可以看出经过滤波器参数调整, I2S 伪距偏差从 0.54 m 降低至 -0.13 m, M1S 伪距偏差从 -0.99 m 降低至 -0.63 m, M2S 伪距偏差的变化不显著. 图 3 给出了滤波器参数调整前后伪距偏差序列图, 可以直观地看出经过滤波器参数调整伪距偏差减小.

3.3 抗多径算法对伪距偏差的影响分析

北斗接收机同时可以输出窄相关伪距与抗多径伪

图 2 (网络版彩图) 调整环路参数前(a)、后(b)不同接收机之间的伪距偏差

Figure 2 (Color online) Comparison of pseudorange biases between (a) before and (b) after adjusting receiver loop parameters.

表 1 环路参数调整前后伪距偏差特性比较(单位: m)

Table 1 Comparison of pseudorange-bias characteristics before and after loop parameter adjustment (unit: m)

PRN	原始B1I伪距		原始B3I伪距	
	调整前	调整后	调整前	调整后
1	-0.74	-0.21	0.02	0.06
2	-0.38	0.03	-0.23	-0.15
4	-0.64	0.05	-0.03	-0.05
6	-0.40	-0.19	0.13	0.12
7	-0.50	-0.17	0.07	0.04
8	0.01	0.11	0.05	0.04
9	-0.39	-0.08	0.03	0.04
10	0.10	-0.04	-0.07	-0.08
11	0.21	0.02	-0.02	0.05
12	0.56	0.09	-0.01	0.10
14	-0.10	-0.08	0.18	0.13
31	-1.51	0.03	0.74	0.76
32	-1.19	0.66	0.30	0.27
33	-1.49	-0.86	0.46	0.46
34	-1.26	-0.76	0.20	0.18
STD	0.63	0.36	0.24	0.23
MAX	2.07	1.52	0.96	0.91

距, 但无论卫星和接收机都未考虑这两类观测数据的通道时延, 将相同时刻、同一接收机同一历元同一频点的抗多径伪距和窄相关伪距作差, 将二者互差的统计结果列于表3. 从表中可以看出, B1I频点抗多径伪距与窄相关伪距存在明显偏差, 且每颗卫星偏差量级不同, 有些卫星如PRN1, RPN4偏差量级仅有0.2 m, 但其他卫星如PRN2, PRN3偏差甚至接近2.0 m.

为了进一步对比抗多径和窄相关伪距的伪距偏差, 将天宝接收机和北斗接收机并置, 利用2017年7月

表 2 B1I频点滤波器参数调整前后伪距偏差(单位: m)

Table 2 Pseudorange biases of B1I signal before and after filter parameter adjustment (unit: m)

地面站	PRN32		PRN33		PRN34	
	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
北京	0.25	-0.18	-1.11	-0.69	-0.66	-0.68
新疆	0.63	-0.03	-0.92	-0.49	-0.38	-0.42
四川	0.75	-0.17	-0.93	-0.71	-0.53	-0.57
平均	0.54	-0.13	-0.99	-0.63	-0.52	-0.56

图 3 (网络版彩图)滤波器参数调整前后伪距偏差序列图
Figure 3 (Color online) Pseudorange bias serials before and after filter parameters adjustment.

10日全天数据进行了双差O-C计算, 图4为抗多径伪距与窄相关伪距的伪距偏差对比, 从图中可以看出北斗接收机伪距与天宝接收机相比均存在常数偏差, 抗多径伪距最大偏差接近2 m, 各颗卫星标准差为0.363 m; 而窄相关伪距偏差明显较小, 最大为0.72 m, 各颗卫星标准差为0.184 m. 因此, 为了减小伪距偏差对用户接收机的影响, 建议在地面控制端采用窄相关伪距生成星历及钟差参数.

4 北斗三号卫星与GPS卫星伪距偏差对比分析

4.1 北斗三号组网卫星伪距偏差

采用2.2节提出的基于外频标非实时双差O-C方法对BDS-3在轨24颗MEO和3颗IGSO卫星的公开信号B1C, B2a, B2b, B1I, B3I进行了连续7 d的伪距偏差分

表 3 抗多径伪距与窄相关伪距互差序列统计结果(m)

Table 3 Statistical results of difference between anti-multipath pseudorange and narrow correlation pseudorange serials (unit: m)

PRN	B1I		B2I		B3I	
	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值
1	0.38	0.20	0.24	0.01	0.04	-0.02
2	0.11	-1.62	0.11	-0.26	0.04	-0.19
3	0.09	-1.11	0.07	-0.47	0.05	-0.21
4	0.13	-0.29	0.12	-0.43	0.09	-0.12
5	0.22	-1.21	0.22	-0.43	0.14	-0.18
6	0.09	-0.39	0.12	-0.32	0.07	-0.03
7	0.11	-0.85	0.22	-0.29	0.09	-0.04
8	0.12	-1.23	0.10	-0.43	0.08	-0.13
9	0.09	-0.79	0.09	-0.27	0.07	-0.11
10	0.12	-1.10	0.12	-0.52	0.11	-0.19
11	0.21	-1.29	0.19	-0.52	0.13	-0.09
12	0.54	-1.56	0.26	-0.45	0.24	0.07
14	0.14	-1.66	0.16	-0.53	0.14	-0.10

图 4 (网络版彩图)北斗接收机与天宝接收机伪距偏差

Figure 4 (Color online) Pseudorange biases between Beidou receiver and Trimble receiver.

析(B1C, B2a, B2b信号分别具有导频支路信号B1Cp, B2ap, B2bp和数据支路信号B1Cd, B2ad, B2bd), 观测时段为2020年4月24日–2020年4月30日, 双差参考卫星取为PRN19, 表4列出了所有卫星相对于PRN19的伪距偏差, 将所有卫星的偏差求标准差可以反映各颗卫星的伪距偏差的离散程度, 将最大偏差和最小偏差作差可以反映各颗卫星之间的最大偏差. 通过标准差和最大偏差可以看出, 组网卫星之间整个B1频点伪距偏差

较其他频点大; B1C数据支路伪距偏差最大, 各卫星标准差为0.14 m, 最大偏差为0.64; B1C导频支路伪距偏差较数据支路减小; 平稳过渡信号B1I伪距偏差大小介于B1C数据支路和导频支路之间; B2a数据支路和导频支路伪距偏差几乎一致, 为所有信号中最小, 各卫星标准差为0.02 m, 最大偏差约0.09 m; 所有信号伪距偏差的大小关系大致为B1Cd>B1I>B1Cp>B2bd>B2bp>B3I>B2ad≈B2ap.

图5(a)和(b)分别为B1C数据支路和B2a导频支路连续7 d单差O–C序列图, 上子图描述了所有组网卫星, 下子图描述了伪距偏差差异最大的两颗卫星的单差O–C序列. 从图5(a)可以看出各卫星存在显著的伪距偏差, 代表PRN39的绿点和代表PRN46的粉色三角形存在显著的分层现象. 从图5(b)可以看出各颗卫星之间的伪距偏差较小, 下子图中伪距偏差差异最大的两颗卫星未见显著的分层现象.

4.2 GPS卫星伪距偏差

同样采用2.2节提出的基于外频标非实时双差O–C方法对GPS在轨卫星的公开信号L1CA, L2C, L5C进行连续6 d的伪距偏差分析, 观测时段为2020年4月23日–2020年4月28日, 双差参考卫星取为3号卫星, 表5列出了所有卫星相对于3号卫星的伪距偏差, 通过标准

表 4 BDS-3 卫星公开信号伪距偏差

Table 4 Pseudorange biases of open signal for BDS-3 satellites

PRN	B1Cd	B1Cp	B2ad	B2ap	B2bd	B2bp	B1I	B3I
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	-0.04	0.03	-0.02	-0.02	0.01	-0.05	0.12	-0.02
21	0.05	0.05	-0.01	-0.01	0.10	-0.05	0.18	0.01
22	-0.07	0.06	-0.02	-0.01	0.08	0.10	0.21	-0.02
23	0.07	0.04	0.00	0.01	0.04	0.06	0.16	0.01
24	-0.05	0.09	0.01	0.00	0.09	0.08	0.14	-0.02
25	0.13	0.04	-0.01	0.00	0.12	0.14	0.10	-0.04
26	0.08	0.01	0.01	0.02	0.16	0.19	0.18	-0.08
27	-0.02	-0.14	0.00	0.01	0.09	0.11	0.27	-0.07
28	-0.02	-0.08	-0.03	-0.02	0.06	0.08	0.22	-0.03
29	0.09	0.02	0.02	0.03	0.17	0.18	0.18	-0.07
30	0.04	-0.06	-0.01	-0.01	0.18	0.21	0.31	-0.06
32	0.07	0.06	0.02	0.02	0.10	0.08	0.18	0.00
33	0.34	0.02	0.01	0.01	0.12	0.08	0.19	0.00
34	0.11	0.05	0.01	0.01	0.15	0.17	0.13	-0.05
35	0.07	0.03	0.00	0.00	0.13	0.12	0.09	-0.07
36	-0.14	0.04	0.02	0.02	0.04	0.00	0.03	0.06
37	0.10	0.07	-0.04	-0.03	0.08	0.08	0.17	0.06
38	-0.11	0.08	0.04	0.05	0.01	-0.04	-0.10	-0.07
39	-0.23	0.09	0.04	0.05	0.07	0.05	-0.09	-0.03
40	-0.05	0.00	0.03	0.04	0.06	0.03	-0.06	0.00
41	-0.17	0.10	-0.05	-0.04	0.01	-0.03	0.16	0.00
42	0.19	0.10	-0.01	0.00	0.08	0.07	0.17	0.04
43	-0.02	-0.07	-0.04	-0.02	0.07	0.07	0.30	0.01
44	-0.01	-0.07	-0.03	-0.02	0.16	0.15	0.16	-0.02
45	0.19	0.16	0.02	0.04	0.04	-0.01	0.31	-0.03
46	0.41	0.18	0.01	0.01	0.12	0.09	0.29	0.05
STD	0.14	0.07	0.02	0.02	0.05	0.07	0.11	0.04
MAX	0.64	0.32	0.09	0.09	0.18	0.26	0.41	0.14

差和最大偏差可以看出, GPS 卫星之间 L2C 伪距偏差最大, 各卫星标准差为 0.15 m, 最大偏差为 0.67 m, GPS 卫星之间 L2C 伪距偏差与 BDS-3 B1C 数据支路相当; L1CA 伪距偏差与其兼容互操作的 BDS-3 B1C 导频支路相当; L5C 伪距偏差最小, 各卫星标准差为 0.07 m, 最大偏差为 0.30, L5C 与其兼容互操作的 BDS-3 B2a 信号相比伪距偏差更大. GPS 所有公开信号伪距偏差的大小关系大致为 $L2C > L1CA > L5C$.

图 6(a) 和 (b) 分别为 L2C 和 L5C 信号的单差 O-C 序列图, 上子图描述了所有卫星单差 O-C 序列, 下子图描述了伪距偏差差异最大的两颗卫星的单差 O-C 序列. 从图 6(a) 可以看出对于 L2C 信号各卫星存在显著的伪距偏差, 代表 PRN8 的粉色点和代表 PRN31 的青色菱形存在显著的分层现象. 从图 6(b) 可以看出对于 L5C 信号各颗卫星之间的伪距偏差较图 6(a) 减小, 但依然存在伪距分层现象.

图 5 (网络版彩图)北斗三号卫星之间的伪距偏差. B1C数据支路(a)和B2a导频支路(b)伪距偏差
Figure 5 (Color online) Pseudorange biases between BDS-3 satellites. Pseudorange biases of (a) B1C data branch and (b) B2a pilot branch.

表 5 GPS卫公开信号伪距偏差
Table 5 Pseudorange biases of open signal for GPS satellites

PRN	L1CA	L2C	L5C	PRN	L1CA	L2C	L5C
1	-0.06	0.08	-0.03	19	0.12	-	-
2	0.11	-	-	20	0.06	-	-
3	0.00	0.00	0.00	21	0.04	-	-
5	0.08	-0.06	-	22	-0.01	-	-
6	0.00	-0.12	-0.04	24	-0.07	-0.17	-0.05
7	0.04	0.01	-	25	-0.10	-0.03	-
8	-0.05	0.22	-0.15	26	-0.03	0.04	-
9	-0.10	0.00	0.01	27	-0.12	-0.12	-0.04
11	0.11	-	-	28	0.07	-	-
12	0.04	-0.20	-	29	0.11	-0.21	-
13	0.06	-	-	30	0.03	-0.14	-0.01
14	0.12	-	-	31	0.02	-0.45	-
15	0.09	-0.03	-	32	0.00	0.14	-0.02
16	0.04	-	-	STD	0.08	0.15	0.07
17	0.04	-0.13	-	MAX	0.36	0.67	0.30
18	0.24	0.11	0.14	-	-	-	-

5 讨论和结论

卫星信号畸变引起的伪距偏差与卫星端信号变形和接收机端环路参数、抗多径算法等相关, 由于不同卫星信号畸变程度不同, 使得该偏差不能通过接收机硬件延迟吸收; 由于不同技术状态的接收机伪距偏差不同, 使得该偏差不能通过卫星硬件延迟

吸收. 因此, 当提供导航产品的接收机技术状态与用户端不一致时, 伪距偏差将引起导航产品和用户端伪距观测量不自洽, 导致系统服务性能降低. 本文从接收机端和卫星端两方面设计了调整接收机环路参数、改变多径算法和调整卫星预失真滤波器参数3种减弱伪距偏差的方法, 得出接收机环路参数调整能大幅降低卫星之间的伪距偏差; 抗多径支路能造

图 6 (网络版彩图) GPS卫星之间的伪距偏差. GPS卫星L2C (a)和L5C (b)伪距偏差

Figure 6 (Color online) Pseudorange biases between GPS satellites. Pseudorange biases of (a) L2C signal and (b) L5C signal for GPS satellites.

成额外伪距偏差, 窄相关观测能大幅减小伪距偏差; 调整卫星预失真滤波器参数能在一定程度上减小伪距偏差.

针对BDS卫星伪距偏差解算无固定参考基准的问题, 设计了一种基于外频标非实时双差O-C方法, 利用该方法计算了BDS组网卫星各公开信号伪距偏差, 所有信号伪距偏差的大小关系大致为 $B1Cd > B1I > B1Cp > B2bd > B2bp > B3I > B2ad \approx B2ap$. 比较了BDS,

GPS卫星公开信号的伪距偏差特性, 得出BDS和GPS卫星都存在伪距偏差的结论; 除了兼容互操作信号L5C比北斗B2a信号伪距偏差大, 其余GPS公开信号与北斗相应信号伪距偏差相当.

本文所有的图表、结论是在一定接收机技术状态下获取的, 获取的伪距偏差是两台接收机的相对偏差, 采用不同接收机类型获取的相对伪距偏差在大小、符号方面可能存在差异.

致谢 感谢中国科学院上海天文台唐成盼博士提供的技术支持.

参考文献

- 1 Yang J. Design and Simulation of GNSS New Navigation Signal (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011 [杨健. GNSS新型导航信号的设计与仿真. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2011]
- 2 Meng Q F. Research on Multi-Frequency Point and Multi-Signal Composite Generation Technology of New System Satellite Navigation System (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Taiyuan: North University of China, 2013 [孟庆丰. 新体制卫星导航系统的多频点多信号复合生成技术研究. 硕士学位论文. 太原: 中北大学, 2013]
- 3 Edgar C, Czopek F, Barker B. A co-operative anomaly resolution of PRN-19. In: Proceedings of the ION GPS 1999. Nashville, 1999
- 4 Mitelman A M, Phelts R E, Akos D M, et al. Signal deformations on nominally healthy GPS satellites. In: Proceedings of the ION NTM. San Diego, 2004. 26–28
- 5 Pini M, Akos D, Esterhuizen S, et al. Analysis of GNSS signals as observed via a high gain parabolic antenna. In: Proceedings of the ION GNSS 2005. Long Beach, 2005. 1686–1695
- 6 Phelts R E, Akos D M. Effects of signal deformations on modernized GNSS signals. *J GPS*, 2006, 5: 2–10
- 7 Wong G, Phelts R E, Walter T, et al. Characterization of signal deformations for GPS and WAAS satellites. In: Proceedings of the ION GNSS 2010. Portland, 2010. 3143–3151
- 8 Wong G, Phelts R E, Walter T, et al. Alternative characterization of analog signal deformation for GNSS-GPS satellites. In: Proceedings of the

- ION ITM 2011. San Diego, 2011. 497–507
- 9 Wong G, Phelts R E, Walter T, et al. Bounding errors caused by nominal GNSS signal deformations. In: Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland, 2011
 - 10 Wong G, Chen Y-H, Phelts R E, et al. Measuring code-phase differences due to inter-satellite hardware differences. In: Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville, 2012
 - 11 Wong G, Chen Y H, Phelts R E, et al. A mitigation of nominal signal deformations on dual-frequency WAAS position errors. In: Proceedings of the ION GNSS+. Tampa, 2014. 3129–3147
 - 12 Xiao X. Study on the Influence of GNSS Signal Distortion on Precision Single Point Positioning (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018 [肖璇. GNSS信号畸变对精密单点定位的影响研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2018]
 - 13 Liu L, Shi X, Li J, et al. The definition and using method of the COMPASS basic navigation message (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 079509 [刘利, 时鑫, 栗靖, 等. 北斗基本导航电文定义与使用方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 079509]
 - 14 Chen J P, Hu X G, Tang C P, et al. SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 269511
 - 15 Schempp T, Burke J, Rubin A. WAAS benefits of GEO ranging. In: Proceedings of ION-GNSS 21st International Technical Meeting. Savannah, 2008
 - 16 Chang Z Q, Hu X G, Guo R, et al. Comparison between CNMC and hatch filter & its precision analysis for BDS precise relative positioning (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 079508 [常志巧, 胡小工, 郭睿, 等. CNMC与Hatch滤波方法比较及其在北斗相对定位中的精度分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 079508]
 - 17 Montenbruck O, Rizos C, Weber R, et al. Getting a grip on multi-GNSS—The international GNSS service MGEX campaign. *GPS World*, 2013, 24: 44–49
 - 18 Wanninger L, Beer S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: Diagnosis and therapy. *GPS Solut*, 2015, 19: 639–648
 - 19 Zhang X, Wu M, Liu W, et al. Initial assessment of the COMPASS/Beidou-3: New-generation navigation signals. *J Geod*, 2017, 91: 1225–1240
 - 20 Hauschild A, Montenbruck O. A study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing. *GPS Solut*, 2016, 20: 159–171
 - 21 Rapisarda M, Angeletti P, Casini E. A simulation framework for the assessment of navigation payload non-idealities. In: Proceedings of the Workshop on GNSS Signals & Signal Processing. New York, 2007

Pseudorange-bias characteristics and the weakening method of BDS satellites

CHANG ZhiQiao¹, LIU Li^{1*}, HU XiaoGong², GUO Rui¹, WANG DongXia¹,
ZHOU ShanShi² & PU JunYu¹

¹ Troops 32021, Beijing 100094, China;

² Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

The nonideal characteristics of a navigation satellite signal will cause a pseudorange bias, which is manifested by the same type of receiver with the same pseudorange biases and different types of receivers with different pseudorange biases. When the technical state of receivers providing the navigation product is inconsistent with that of the users, the pseudorange bias will cause degradation of navigation and positioning service performance. In this paper, the pseudorange bias of BDS (Beidou Satellite Navigation System) is calculated using the ultrashort baseline pseudorange double-difference O-C (Observation Minus Computation) method. A large bias of B1I is obtained between two different juxtapositional receivers in the early stage of the experimental satellites. Thereafter, three methods, including the adjustment of the parameters of the loop of the receiver, a change in the multipath reduction algorithm, and an adjustment of the filter parameter of the predistortion of the satellite, are designed to reduce the bias. Experimental results indicate that the adjustment of parameters of the loop of the receiver can significantly reduce the pseudorange bias between the satellites, and the standard deviation of the pseudorange bias of B1I can be reduced from 0.63 to 0.36 m. Compared with the antimultipath observation, the observation of a narrow correlation can significantly reduce the pseudorange bias, and the standard deviation of the pseudorange bias of B1I can be reduced from 0.36 to 0.18 m. Further, an adjustment of the filter parameters of the predistortion of the satellite can reduce the pseudorange bias of a single satellite by 0.3–0.4 m. There is no fixed reference satellite to evaluate the pseudorange biases of BDS satellites. A non-real-time double-difference O-C method that is based on the same external time and frequency controls of different receivers is designed to calculate the pseudorange bias. Employing this method, the characteristics of the pseudorange biases of BDS and GPS (Global Positioning System) satellites are compared. It is confirmed that (1) pseudorange biases exist in both BDS and GPS satellites, (2) the pseudorange bias of the L2C signal of GPS satellites is equivalent to that of the B1C data branch of BDS satellites, (3) the pseudorange bias of L1CA of GPS satellites is equivalent to the interoperable B1C pilot branch of BDS satellites, and (4) the pseudorange bias of L5C of GPS satellites is larger than that of the interoperable B2a signal of BDS satellites.

BDS, pseudorange biases, double difference, predistortion filter parameters, correlator spacing

PACS: 95.75.Wx, 95.75.Pq, 94.20.Vv, 95.10.Eg

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0247](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0247)