

北斗卫星导航系统伪距偏差特性及减轻措施研究

贺成艳^{1,2}, 郭 际^{1,2}, 郝振圆^{1,2}, 王鹏博^{1,2}, 杨倩倩^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心, 陕西西安 710600; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要: 随着人们对卫星导航系统定位精度需求的不断提升, 近年来伪距偏差问题越来越受到广泛关注. 然而截至目前, 国内外专家学者对北斗系统的伪距偏差问题研究甚少. 本文首先深入分析了北斗系统的伪距偏差产生根源, 在此基础上对伪距偏差随接收机参数设置变化的关系进行详细阐述. 然后基于吴平观测站的 40m 大口径天线采集的各颗北斗卫星下行信号数据, 利用软件接收机遍历并分析了在不同接收机带宽、不同相关器间隔情况下, 以及不同卫星仰角情况下北斗各颗卫星的 B1I 和 B3I 信号伪距偏差测量结果. 最后根据北斗伪距偏差的特点, 首次给出了我国北斗接收机参数设置建议. 研究表明: 在一定的接收机参数设置范围内, 本文提出的方法可以将北斗伪距偏差降低到 20cm 以内. 本文的研究成果不仅能够进一步促进广大专家学者对我国北斗伪距偏差的深入了解及广泛关注, 同时还能促进我国 BDS (BeiDou Navigation Satellite System) 及其他 GNSS (Global Navigation Satellite System) 系统接口控制文件的进一步完善.

关键词: 北斗卫星导航系统; 伪距偏差; 减轻技术; 接收机配置; 接口控制文件

中图分类号: TN911.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)05-0920-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20181039

Study on the Characteristics and Mitigation Measurements of BDS Pseudorange Biases

HE Cheng-yan^{1,2}, GUO Ji^{1,2}, HAO Zhen-yuan^{1,2}, WANG Peng-bo^{1,2}, YANG Qian-qian^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: With the increasing demands for higher positioning precision of global satellite navigation systems, pseudorange biases have been receiving more and more attentions in recent years. Unfortunately, few researches have been done on the pseudorange biases of Beidou navigation satellite system (BDS). The origin of BDS pseudorange biases are illustrated thoroughly in the beginning, and then based on which the dependency of biases on receiver configurations are studied. Our research used high-fidelity BDS satellite signal observations collected by a 40 m high-gain dish antenna in Haoping Observatory, and used software receiver technology to achieve the pseudorange biases results of BDS B1I and B3I signals from different front-end bandwidths, different correlator spacings and different satellite elevations. Finally, based on the characteristics of BDS pseudorange biases, the suggested settings of BDS receiver configurations such as front-end bandwidth and correlator spacing are clearly proposed for the first time. Research results show that the pseudorange biases of BDS signals will be less than approximately 20 cm under the condition proposed in this paper. This study will contribute to a better understanding of and special attention to pseudorange biases, and will be a significant promotion to a clear definition of the appropriate receiver parameter settings in the ICDs for BDS and other individual satellite system.

Key words: Beidou navigation satellite system; pseudorange biases; mitigation method; receiver configuration; interface control documents

1 引言

卫星导航信号是全球卫星导航系统(GNSS)的核心之一,因为导航信号的内在性能极限直接决定了整个卫星导航系统的先天性能.随着卫星导航系统的应用领域的不断扩展、服务需求不断细化,对新一代卫星导航信号的性能要求也越来越高^[1].然而,一方面由于星上器件的非线性失真和线性失真、空间传播环境影响、地面接收环境干扰及多径等影响,使得用户接收机接收到的下行导航信号存在不同程度的畸变;另一方面由于不同类型或不同生产商的用户接收机前端带宽或相关器间隔等参数设置不同,从而导致不同接收机对相同的畸变信号的处理结果不一致^[2-4],从而产生伪距偏差现象.伪距偏差不仅影响基于伪距的高精度定位服务,尤其对双频定位影响比较严重;还会对精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)产生较大影响,不同卫星相同信号之间的一致性将会大大影响载波小数周偏差(Fractional Cycle Bias, FCB)估计及模糊度解析^[5].因此,对伪距偏差的产生原因及特点进行深入透彻地分析具有重要意义.

其实在上世纪九十年代早已有相关文献对伪距偏差进行简单介绍,遗憾的是并没有引起足够的重视:文献[6]在利用GPS数据进行总电子数估算时发现,不同卫星信号之间存在伪距偏差现象.1993年GPS SVN 19卫星出现信号畸变,当该星参与差分计算时严重影响了GPS PNT服务性能.自此激起了人们对信号畸变研究的广泛兴趣.近年来,研究热点主要集中在信号畸变及其对用户测距性能的影响,以及接收机参数设置对伪距偏差的影响等方面^[7-11].研究表明:接收机参数设置不同(例如不同的前端带宽或相关器间隔),则对同一GPS卫星信号畸变引起的伪距偏差测量结果不同.

相比GPS系统,截至目前国内外对北斗系统伪距偏差的研究甚少.2016年底,在进行北斗信号性能监测评估过程中发现,北斗区域卫星和试验卫星均有不同程度的伪距偏差.当不同厂家接收机以零基线方式连接并输出伪距测量结果,通过单差或双差的方式处理并经地面监测与试验验证后,发现在BDS-2星之间、北斗试验星之间、二号星与试验星之间,均存在大小不等的伪距偏差现象,最大伪距偏差可达米级.然而,相比GPS系统,我国北斗系统的主要特点是:信号体制不同、卫星种类更多、参与卫星研制的生产商更多、用户接收机种类繁多并且参数设置迥异等,因此北斗系统的伪距偏差与GPS系统伪距偏差特点相差较大,我们无法将GPS系统伪距偏差的研究成果直接应用于北斗系统中.

鉴于伪距偏差影响的严重性,美国于2013年在GPS接口控制文件中对GPS接收机参数设置给出了明确建议.然而,其他GNSS还未曾在其接口控制文件中对接收机参数做任何限制.

本文将针对我国北斗卫星导航系统的伪距偏差问题,重点研究伪距偏差产生原因、我国北斗卫星B1I和B3I民用信号的伪距偏差特点以及减小伪距偏差影响的有效措施.文章首先深入分析了引起伪距偏差的根本原因;然后在此基础上研究了影响伪距偏差的主要因素:信号畸变以及接收机参数设置;接着基于软件接收机技术以及大口径天线高精度测量数据,研究了所有北斗区域卫星的B1I及B3I信号单频和双频无电离层组合的伪距偏差特点,以及伪距偏差与接收机前端带宽及相关器间隔之间的关系;在文章的最后,结合我国北斗卫星实测信号的伪距偏差特点,首次给出了减小我国北斗伪距偏差的几种有效措施.希望本文的研究成果能够为促进我国北斗系统接口控制文件的进一步完善做出一定的贡献.

2 伪距偏差产生原因分析

研究表明:卫星下行信号的码片波形失真是导致伪距偏差的根本原因.然而,接收机参数的不同设置也会影响伪距偏差测量结果.

本文将从卫星和接收机两个方面深入分析伪距偏差的产生原因.从卫星星上信号产生的角度,可以得知码片波形失真是如何影响测距的;从接收机数据处理的角度,可以得知不同参数的接收机是如何影响伪距偏差测量结果的.

2.1 卫星信号畸变

以北斗区域卫星信号为例,其理想码片波形为典型的矩形方波.理想信号产生后需要经过星上各器件、空间环境及接收机通道后才能到达接收机数据处理单元进行测距解算.因此为了便于分析比较,图1给出理想通道和畸变通道情况下的信号波形情况.将整个信号传输通道定义为 $H_i(f)$,其中 $i=0$ 时表示理想情况下没有任何失真的传输通道, $i=1$ 则表示存在一定程度的失真.如果理想无失真信道的带宽 B 足够宽,我们可以认为信号经过 $H_0(f)$ 后无失真,而信号经过有失真的通道后会产生畸变.实际情况是信号传输通道必然会在某种程度的失真.实际上理想带限通道带来的信号失真不会引起伪距偏差,不同卫星信号的传输通道特性不一致是伪距偏差产生的根本原因.

当有畸变的导航信号与接收机本地复现码进行相关运算时,会导致相关峰曲线产生畸变,从而影响跟踪和测距,最终可能会影响定位精度,以图2为例进行详细说明.

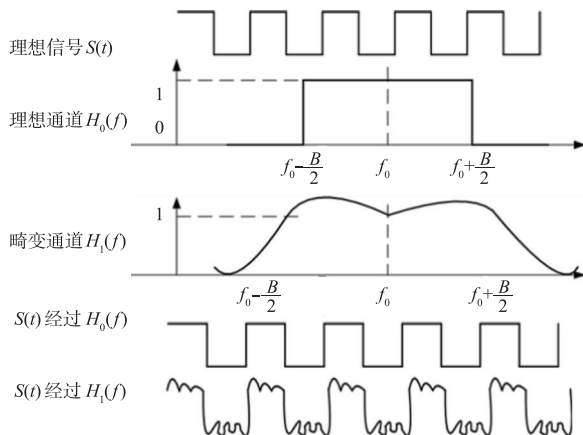


图1 信号畸变产生示意图

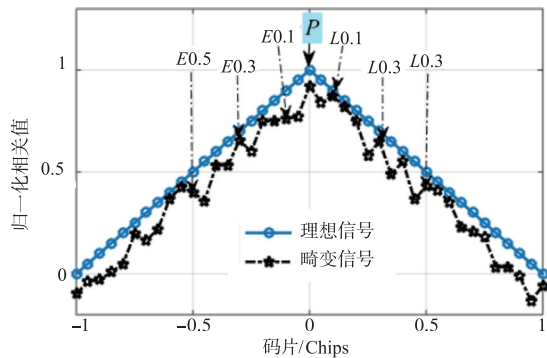


图2 理想信号及畸变信号的相关曲线

为了向读者详细展示信号畸变是如何影响伪距偏差测量结果的,本文以超前减滞后鉴相器(Early Minus Late, EML)输出的跟踪偏差随相关器间隔的变化情况来介绍信号畸变与伪距偏差之间的关系^[12-15].图2以示意图的形式给出了理想信号自相关函数曲线以及理想信号与畸变信号的互相关函数曲线.为了便于分析比较,这里给出的畸变信号存在较大程度的失真.从图中可以明显看出,畸变信号的相关曲线相比理想相关曲线,有较严重的扭曲变形以及不对称,从而导致不同相关器间隔下的跟踪误差相差较大,如图3所示.

理想情况下,接收机在跟踪过程中的鉴别器曲线过零点的偏移量为零.而在实际应用中由于接收到的卫星下行信号存在不同程度的畸变,因此实测鉴别曲线的过零点会产生锁定点偏差.又由于不同卫星相同信号间的畸变程度不同,所以会产生伪距偏差.

下面以简化示意形式简要介绍跟踪偏差计算方法如下:首先将早迟相关器输出结果作差,然后将差值乘以一个因子A,如式(1)所示:

$$\varepsilon(\tau) = [E(\tau/2) - L(\tau/2)] \times A \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{2P} \times \frac{1}{f_B} \times c \quad (2)$$

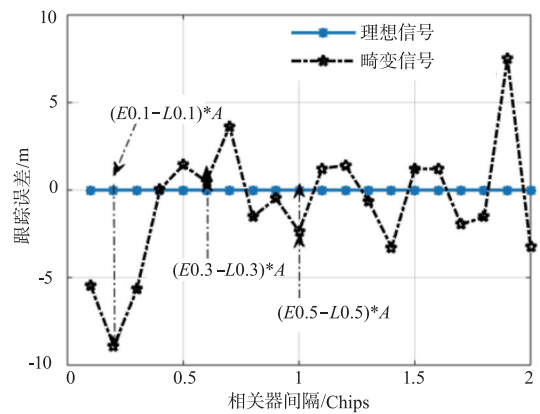


图3 不同相关器间隔下的跟踪偏差

其中 τ 表示接收机早迟相关器间隔, $\varepsilon(\tau)$ 表示跟踪偏差, $E(\tau/2)$ 和 $L(\tau/2)$ 分别表示早、迟相关器输出, P 表示即时相关器输出, f_B 代表北斗信号测距码频率, c 代表光速.

图3给出的是从图2中理想相关曲线和畸变信号相关曲线计算得到的跟踪偏差.从图中可以很直观地看出信号畸变对用户测距的影响及影响程度.

对于目前市场上常见的北斗用户接收机而言,由于各个厂家的接收机相关器间隔、滤波器特性、前端带宽及鉴相方式等差别较大,因此不同接收机对相同畸变信号计算得到的跟踪偏差不同,这也初步解释了为何不同接收机对相同畸变信号测量得到的伪距偏差不同^[16].下面将从理论公式推导的方式详细介绍.

2.2 接收机影响分析

以上主要是从卫星信号本身的畸变入手,研究伪距偏差的产生原因.本节将主要从接收机数据处理的角度,探讨接收机参数的不同如何影响伪距偏差测量结果.

伪距观测方程可以表示如下:

$$P_{B_k,m}^i = \rho_m^i + c\delta t_m - c\delta t^i + c \cdot I_{FB(m)} - c \cdot T_{gd}^i - i_{ono(m)}^i - t_{rop(m)}^i - r_{el(m)}^i - \alpha_m^i + \varepsilon_m^i + M_{P(m)}^i + S_{erro(m)}^i \quad (3)$$

$$P_{B_k,n}^j = \rho_n^j + c\delta t_n - c\delta t^j + c \cdot I_{FB(n)} - c \cdot T_{gd}^j - i_{ono(n)}^j - t_{rop(n)}^j - r_{el(n)}^j - \alpha_n^j + \varepsilon_n^j + M_{P(n)}^j + S_{erro(n)}^j \quad (4)$$

$$P_{B_k,m}^j = \rho_m^j + c\delta t_m - c\delta t^j + c \cdot I_{FB(m)} - c \cdot T_{gd}^j - i_{ono(m)}^j - t_{rop(m)}^j - r_{el(m)}^j - \alpha_m^j + \varepsilon_m^j + M_{P(m)}^j + S_{erro(m)}^j \quad (5)$$

$$P_{B_k,n}^i = \rho_n^i + c\delta t_n - c\delta t^i + c \cdot I_{FB(n)} - c \cdot T_{gd}^i - i_{ono(n)}^i - t_{rop(n)}^i - r_{el(n)}^i - \alpha_n^i + \varepsilon_n^i + M_{P(n)}^i + S_{erro(n)}^i \quad (6)$$

其中下标 i, j 表示卫星, B_k 为BDS-2卫星信号频点(k 取值为1,2,3),下标 m, n 表示接收机, $P_{B_k,m}^i$ 为伪距观测值, ρ_m^i 为理论距离, δt_m 为接收机钟差, δt^i 为卫星钟差, $I_{FB(m)}$ 为接收机频间差, T_{gd}^i 为卫星频间差, c 为光速, $i_{ono(m)}^i$ 为电离层延迟, $t_{rop(m)}^i$ 为对流层延迟, $r_{el(m)}^i$ 为相对论

效应延迟, α_m^i 为伪距测量偏差(接收通道时延), ε_m^i 为热噪声, $M_p^i(m)$ 为多径误差, $S_{\text{erro}(m)}^i$ 为信号畸变引起的误差。

为了便于理论分析, 这里我们假设所有接收机零基线连接于同一个高增益大口径天线, 所以此时可认为无地面多径的影响。又由于接收机之间是零基线连接, 因此可以认为各台接收机所收到的相同卫星信号的电离层延迟、对流层延迟和相对论效应延迟相同。因此对两台接收机的伪距观测值进行 O-C 双差处理时, 能够消除接收机钟差、卫星钟差、接收机频间差、卫星频间差、电离层延迟、对流层延迟、相对论效应延迟等误差项, 得到伪距偏差。

研究结果表明: 当接收机之间的参数设置不同时, 不管是单差还是双差处理, 均无法消除信号畸变、多径及热噪声带来的测距偏差; 而如果两台接收机的参数设置相同时, 则单差或双差处理均可消除信号畸变及多径的影响, 双差处理后仅剩噪声的影响。

更进一步研究表明: 若各颗卫星信号的畸变特性完全一致, 或各台接收机的参数设置完全相同, 则在进行双差处理时, 完全可以消除由于卫星信号畸变或者接收机参数的不同导致的伪距偏差现象。而实际上各颗卫星发播的下行信号畸变是不可能完全一致的, 因此不同配置的接收机之间会出现伪距测量偏差。

3 北斗系统伪距偏差特点

本节将结合 BDS-2 卫星 B1I 和 B3I 民用信号实测数据, 深入分析北斗伪距偏差的特点, 及其对单频用户、双频用户的影响。

3.1 单频伪距偏差

由于硬件接收机的带宽及相关器间隔等参数在出厂时已基本固化很难再做调整, 因此本文利用软件接收机对高增益数据进行分析, 软件接收机的好处是能够对接收机的相关参数进行遍历, 从而得到不同相关器间隔、不同带宽等条件下的伪距偏差。

以 BDS-2 系统 IGS03 及 MEO3 卫星为例, 图 4 给出了这两颗卫星在不同相关器间隔及不同带宽情况下实测伪距偏差结果。可以看出: 不同卫星相同信号之间的一致性较差, 不同卫星信号的伪距偏差各不相同; 伪距偏差随相关器间隔及前端带宽的变化而变化。

图 5 ~ 图 8 展示了实测北斗伪距偏差随相关器间隔及前端带宽变化关系曲线。需要说明的一点是, 由于伪距偏差是相对值, 各颗卫星的共有偏差不会给定位带来任何影响, 因此我们在分析过程中, 将不同卫星的相同频点相同支路信号分量间伪距偏差的共有偏差去掉, 然后再分析我们所关注的卫星信号之间的

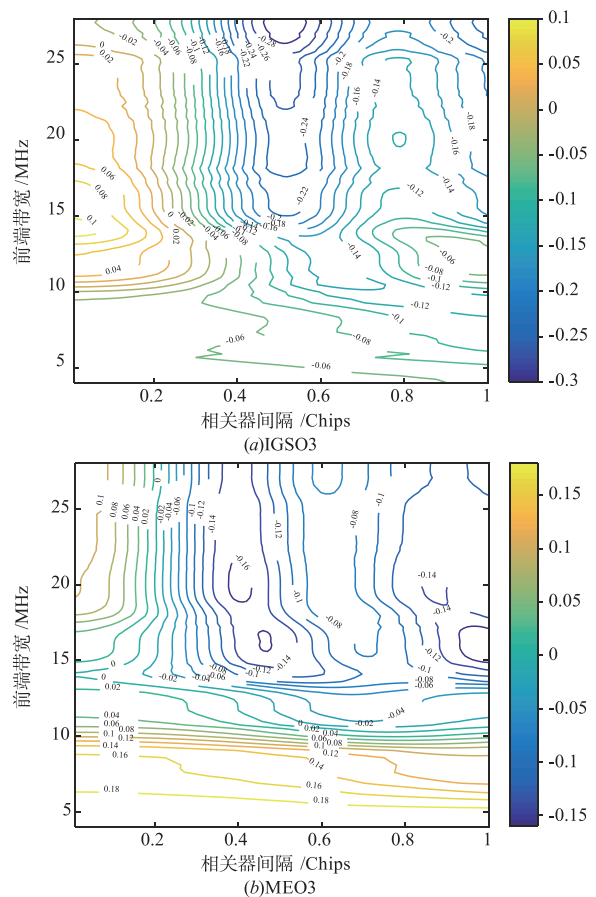


图4 在不同相关器间隔和不同前端带宽下, BDS-2 IGS03和MEO3的B1I信号实测伪距偏差。参考接收机带宽为20MHz, 相关器间隔为0.2码片间隔

偏差情况。其中图 5 同时给出了去均值前后的伪距偏差结果, 图 6 ~ 图 8 直接给出去除共有偏差后的份结果。

图 5 上图中的黑色实线代表各颗卫星的共有偏差, 下图是去除共有偏差后的各颗卫星伪距偏差情况。假设参考接收机取 0.2 个码片间隔。可以看出: 除了 MEO4、GEO4 及 GEO1 之外, 当用户接收机相关器间隔取 0.01 ~ 0.28 码片时, B1I 伪距偏差小于 10cm。

图 6 分析结果表明, 假设参考接收机带宽取 20MHz, 此时若用户接收机带宽取值 15 ~ 28MHz 时, B1I 伪距偏差小于 10cm, IGS06 及 MEO4 除外。

假设参考接收机取 40MHz 与 1 个码片间隔。从图 7 和图 8 可以看出: 当用户接收机相关器间隔取 0.01 ~ 1.0 码片时, B3I 伪距偏差小于 10cm, IGS05、IGS01、GEO3、GEO1 和 MEO4 除外; 若用户接收机带宽取值 20 ~ 50MHz 时, B3I 伪距偏差小于 10cm, IGS05、IGS01、GEO3 及 MEO4 除外。

以上是针对单频用户的伪距偏差影响分析, 由于实际应用中经常会利用双频无电离层组合的方式实现高精度定位, 因此下面我们将重点讨论伪距偏差对双

频用户的影响.

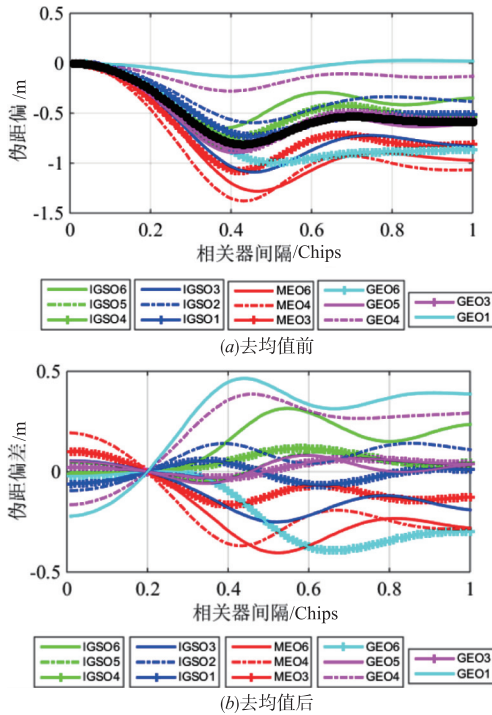


图5 去均值前后 BDS-2 B11伪距偏差随相关器间隔变化情况: 参考接收机20MHz, 0.2码片间隔; 用户接收机20MHz

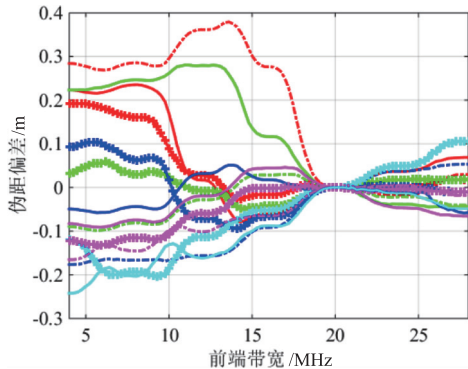


图6 去均值后BDS-2 B11伪距偏差随前端带宽变化情况: 参考接收机20MHz, 0.2码片间隔; 用户接收机0.2码片间隔

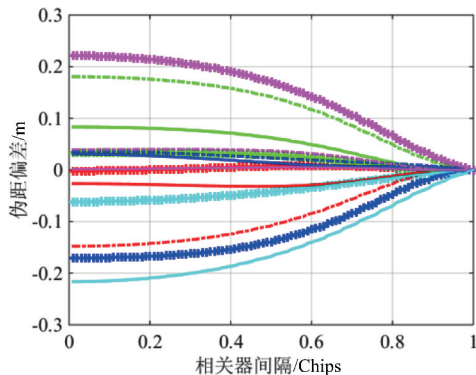


图7 去均值后BDS-2 B3I伪距偏差随相关器间隔变化情况: 参考接收机40MHz, 1.0码片间隔; 用户接收机40MHz

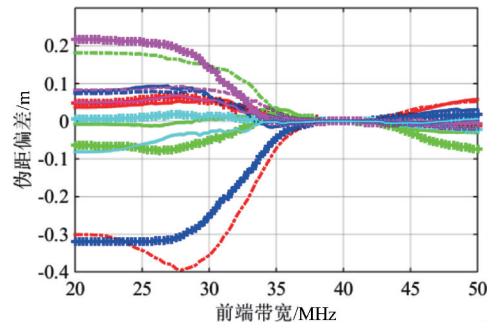


图8 去均值后BDS-2 B3I伪距偏差随前端带宽变化情况: 参考接收机40MHz, 1.0码片间隔; 用户接收机1.0码片间隔

3.2 双频伪距偏差

假设接收机 m 和 n 同时收到了第 i 颗卫星和第 j 颗卫星的 B1I/B3I 双频信号, 则双频定位时经常采用的无电离层组合的伪距观测方程可以表示如下:

$$P_{B1B3mn}^{ij} = \frac{f_{B1}^2}{f_{B1}^2 - f_{B3}^2} P_{B1mn}^{ij} - \frac{f_{B3}^2}{f_{B1}^2 - f_{B3}^2} P_{B3mn}^{ij}$$

$$= 2.9437 \times P_{B1mn}^{ij} - 1.9437 \times P_{B3mn}^{ij} \quad (7)$$

可以发现, 双频组合时 B1I 信号的伪距测量偏差会分别被放大约 2.9 倍, B3I 信号被放大约 1.9 倍; 双频线性组合伪距测量误差将被放大约 3.5 倍. 若两个频点的伪距测量偏差符号相反, 则此时双频组合的伪距偏差最严重.

表 1 给出了利用实测 BDS-2 各颗卫星 B1I 与 B3I 信号, 根据式(3) ~ (7) 计算得到的在不同相关器间隔下的单频和双频伪距偏差.

由于篇幅原因, 这里暂不给出在不同前端带宽条件下的双频无电离层组合详细结果. 本文仅给出研究结论如下:

- (1) BDS-2 各颗卫星中, 若前端带宽不变, 则在不同相关器间隔情况下 MEO4 的双频伪距偏差最大;
- (2) BDS-2 各颗卫星中, 若相关器间隔不变, 则在不同前端带宽情况下 GEO3 的双频伪距偏差最大;
- (3) 若进行双频组合的各个单频伪距偏差的符号相反, 则双频无电离层组合时伪距偏差将会被严重放大.

4 北斗伪距偏差减轻建议

综上所述, 可以看出伪距偏差其实是一个相对值, 是用户接收机与参考接收机之间、或用户接收机之间的伪距差. 一般而言, 差分增强用户利用零基线连接的参考接收机输出的差分改正信息进行定位结果改善, 从而达到增强的目的. 因此, 本文讲的伪距偏差均是在一定的参考接收机配置基础上的. 由前面的分析可知, 若参考接收机与用户接收机之间参数设置不匹配, 则不同的参考接收机参数设置以及不同的用户接收机参数设置均会得到不同的伪距偏差.

表 1 不同相关器间隔条件下双频无电离层伪距偏差组合

BDS PRN	B1-Frequency			B3-Frequency			B1/B3 Dual-Frequency Bias (m) : $K1 \times \text{Bias}_{B1} - K3 \times \text{Bias}_{B3}$
	Ref. (B1-chip)	User (B1-chip)	Bias (m)	Ref. (B3-chip)	User (B3-chip)	Bias (m)	
1 (GEO 1)	0.2	0.5	-0.4001	1.0	0.6	-0.0290	-1.1214
2 (GEO6)	0.2	0.5	0.0424	1.0	0.6	0.1167	-0.1020
3 (GEO3)	0.2	0.5	-0.3277	1.0	0.6	-0.0843	-0.8008
4 (GEO4)	0.2	0.5	-0.1207	1.0	0.6	0.0085	-0.3718
5 (GEO5)	0.2	0.5	0.2964	1.0	0.6	0.0489	0.7775
6 (IGS01)	0.2	0.5	0.1012	1.0	0.6	0.0231	0.2530
7 (IGS02)	0.2	0.5	-0.2489	1.0	0.6	0.0094	-0.7510
8 (IGS03)	0.2	0.5	0.0840	1.0	0.6	0.0190	0.2103
9 (IGS04)	0.2	0.5	-0.0157	1.0	0.6	-0.1156	0.1785
10 (IGS05)	0.2	0.5	-0.2597	1.0	0.6	-0.0342	-0.6980
11 (MEO3)	0.2	0.5	0.3746	1.0	0.6	0.0313	1.0419
12 (MEO4)	0.2	0.5	0.0014	1.0	0.6	0.1412	-0.2703
13 (IGS06)	0.2	0.5	0.0412	1.0	0.6	0.0051	0.1114
14 (MEO4)	0.2	0.5	0.4316	1.0	0.6	-0.1400	1.5426

注:K1 和 K3 为式(7)中的放大因子,其中 $K1 = 2.9437, K3 = 1.9437$.

如图 9 所示,当参考接收机相关器间隔取 0.2 码片,用户接收机相关器间隔分别取 0.1 码片、0.3 码片和 1.0 码片时,可以明显看到:当用户接收机的相关器间隔越接近参考接收机的相关器间隔取值时,伪距偏差越小。

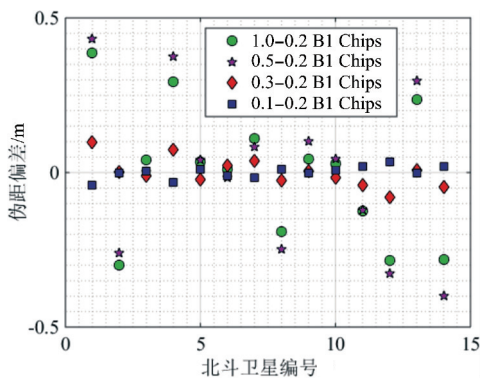


图 9 不同相相关器间隔下 BDS-2 各颗卫星 B1I 伪距偏差分析结果

因此为了减小伪距偏差,一种有效可行的方法是尽量减小用户接收机的参数设置范围,使其尽量接近参考接收机的参数取值。GPS 就是利用这种方法在其 ICD 中对接收机参数设置进行明确限定的。另一种可行的方法是尽量保证各种厂家接收机参数设置的一致性,而不需要用户接收机与参考接收机参数尽量匹配,因为在进行单差或双差处理时,相同的接收机参数能够消除信号畸变或多径带来的误差。这两种方法的解决思路基本一致,都是从用户的角度对接收机参数取

值范围进行限制。

图 10 ~ 图 13 中明确给出了下述四种情况下北斗实测 B1I 和 B3I 信号伪距偏差最大值的等高线图及接收机参数的建议取值范围。

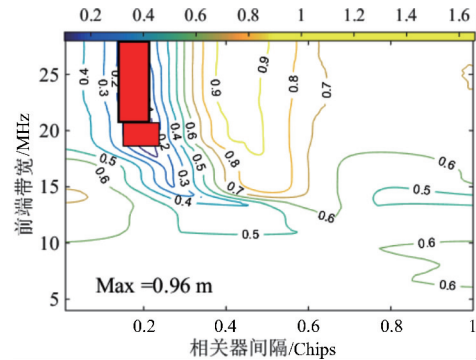


图 10 当参考接收机取 0.2 B1I 码片和 20MHz 带宽时, BDS-2 卫星 B1I 信号用户接收机参数的建议取值范围

图中红色矩形框内的接收机相关器间隔及前端带宽为建议取值范围。从图中可以看出,当用户接收机与参考接收机参数越接近时,测量得到的伪距偏差值越小。

综上所述,伪距偏差对北斗系统的服务性能,尤其是高精度服务性能有不可忽视的影响,希望越来越多的专家学者更加关注北斗系统伪距偏差,同时也希望本文的研究成果能够进一步促进我国北斗信号接口控制文件中对高精度用户接收机参数设置范围的相关约束,从而进一步保障北斗系统的高质量高可靠服务。

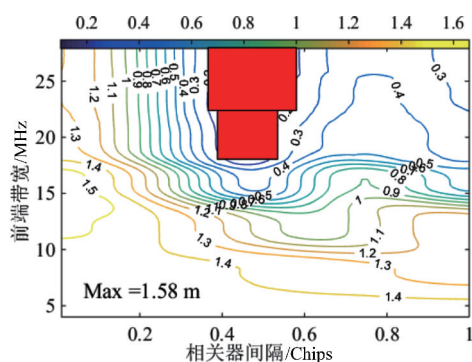


图11 当参考接收机取0.5 B1I码片和28MHz带宽时, BDS-2卫星B1I信号用户接收机参数的建议取值范围

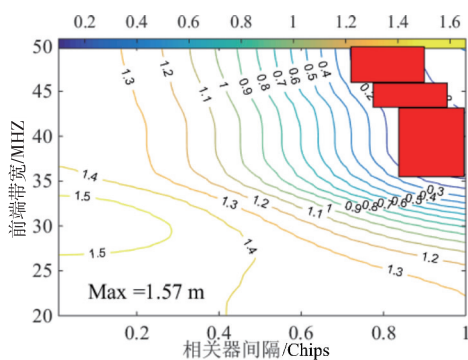


图12 当参考接收机取0.8 B3I码片和50MHz带宽时, BDS-2卫星 B3I信号用户接收机参数的建议取值范围

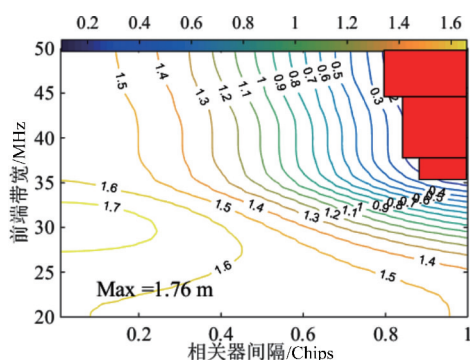


图13 当参考接收机取1.0 B1I码片和40MHz带宽时, BDS-2卫星 B3I信号用户接收机参数的建议取值范围

5 结论

卫星导航信号畸变以及不同卫星信号之间畸变特性的不一致性是伪距偏差产生的根本原因。然而,由于不同类型的用户接收机参数设置各不相同,从而最终导致接收机在进行定位解算时出现伪距偏差现象。

本文系统全面的研究了伪距偏差产生的原因以及 BDS-2 卫星导航系统伪距偏差特点,并针对我国北斗卫星导航系统信号特点,提出了几种有效可行的北斗伪距偏差解决方案,并提议在我国北斗 ICD 中对用户接收机的几个重要参数设置进行明确规定。研究结果表

明:当用户接收机参数设置与参考接收机参数设置比较接近时,理论上可以将最大伪距偏差降低至 20cm 或者 10cm 以内,从而进一步保证北斗系统的高精度高可靠服务。同时,本文也倡议其他 GNSS 系统关注其伪距偏差,为全球人民在利用 GNSS 开展各项活动时的生活和生命安全提供重要保障。

致谢

感谢吴平观测站相关人员的帮助及数据采集,感谢北斗性能评估试验团队的各位专家对本试验提出的宝贵意见及建议,感谢编辑老师和审稿专家们的宝贵指导意见。

参考文献

- [1] 姚铮,陆明泉. 新一代卫星导航系统信号设计原理与实现技术[M]. 北京:电子工业出版社,2016.
- [2] Wong G, Chen Y H, et al. Mitigation of nominal signal deformations on dual-frequency WAAS position errors[A]. Proceedings of the ION GNSS 2014[C]. Tampa, Florida, USA: Institute of Navigation, 2014. 3129 - 3147.
- [3] Phelts R E, Blanch J, et al. The effect of nominal signal deformation biases on ARAIM users[A]. Proceedings of the ION ITM 2014[C]. San Diego, California, USA: Institute of Navigation, 2014. 56 - 67.
- [4] He C, Guo J, Lu X, et al. A new evil waveforms evaluating method for new BDS navigation signals[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 1 - 13.
- [5] Hauschild A, Montenbruck O. The effect of correlator and front-end design on GNSS pseudorange biases for geodetic receivers[A]. Proceedings of the ION GNSS + 2015[C]. Tampa, Florida, USA: Institute of Navigation, 2015. 2835 - 2844.
- [6] Coco DS, Clayton C, et al. Variability of GPS satellite differential group delay biases[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1991, 27(6): 931 - 938.
- [7] Wong G, Phelts RE, et al. Alternative characterization of analog signal deformation for GNSS-GPS satellites[A]. Proceedings of the ION ITM 2011[C]. San Diego, CA, USA: Institute of Navigation, 2011. 497 - 507.
- [8] Lestarquit L, Gregoire Y, et al. Characterizing the GNSS correlation function using a high gain antenna and long coherent integration-application to signal quality monitoring[A]. Proceedings of the IEEE/ION PLANS 2012[C]. Myrtle Beach, SC, USA: Institute of Navigation, 2012. 877 - 885.
- [9] Gunawardena S, Van Graas Frank. An empirical model for computing GPS SPS pseudorange natural biases based on high fidelity measurements from a software receiver[A].

Proceedings of the ION GNSS + 2013 [C]. Nashville, Tennessee, USA; Institute of Navigation, 2013. 1341 – 1358.

- [10] Hauschild A, Montenbruck O. A study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing [J]. GPS Solutions, 2016, 20: 159 – 171.
- [11] Wong G, Chen Y, et al. Measuring code-phase differences due to inter-satellite hardware differences [A]. Proceedings of the ION GNSS 2012 [C]. Nashville, Tennessee, USA; Institute of Navigation, 2012. 2150 – 2158.
- [12] 代振, 王平波, 等. 非高斯背景下的自适应限幅检测研究 [J]. 电子学报, 2020, 48(3): 426 – 430.
Dai Z, Wang P B, et al. Adaptive limiter detection in non-Gaussian noise background [J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 426 – 430. (in Chinese)
- [13] 解辉, 马俊涛, 等. 基于改进传播算子的 DS-SS 信号扩频序列盲估计方法 [J]. 电子学报, 2020, 48(3): 9 – 16.
Xie H, Ma J T, et al. Blind estimation of the spread spectrum sequence of DS-SS signals based on improved propagator method [J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 9 – 16. (in Chinese)
- [14] 徐恒舟, 朱海, 等. 一种宽范围低复杂度的载波频偏估计算法 [J]. 电子学报, 2019, 47(12): 2550 – 2555.
Xu H Z, Zhu H, et al. A wide-range low-complexity carrier frequency offset estimation algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(12): 2550 – 2555. (in Chinese)
- [15] 余婉婷, 于宏毅, 等. 辐射源信号波形已知的超视距目标直接定位方法 [J]. 电子学报, 2019, 47(11): 2368 – 2377.
Yu W T, Yu H Y, et al. A direct position determination method for over-the-horizon target on known radiation source waveforms [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(11): 2638 – 2377. (in Chinese)
- [16] He C, Lu X, Guo J, et al. Initial analysis for characterizing and mitigating the pseudorange biases of BeiDou Navigation Satellite System [J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 1 – 10.

作者简介



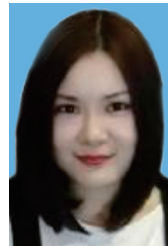
贺成艳 女, 1986 年 12 月生于山东省枣庄市. 博士, 中科院国家授时中心副研究员, 硕士生导师, 2020 年度陕西省青年科技新星, 主要从事卫星导航信号处理及信号质量评估技术等研究工作.
E-mail: hechengyan@ntsc.ac.cn



郭际 男, 1955 年 5 月出生于陕西省. 研究员, 博士生导师, 中国科学院国家授时中心前主任, 现任国家授时中心特聘研究员. 主要从事导航系统设计 with 建设、天文测时、数据误差分析和国际地球自转联测等工作.



郝振圆 男, 1996 年 6 月生于山东省济南市. 硕士研究生, 中国科学院国家授时中心, 研究方向为北斗系统基带数字信号处理及伪距偏差问题研究.



王鹏博 女, 1997 年 5 月生于陕西省西安市. 硕士研究生, 中国科学院国家授时中心, 研究方向为卫星导航基带信号处理及信号质量评估技术研究.



杨倩倩 女, 1996 年 3 月生于山东省聊城市. 硕士研究生, 中国科学院国家授时中心, 研究方向为 GNSS 卫星导航信号处理与评估技术.