

北斗卫星导航系统B1信号伪距偏差问题研究

贺成艳^{*①} 郭际^{①②} 卢晓春^① 王雪^① 饶永南^① 康立^{①②} 王萌^{①②}

^①(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

^②(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 101408)

摘要: 目前各大卫星导航系统均存在伪距偏差问题, 该现象不但不能通过差分的方式进行抵消, 在进行双频电离层误差修正时还会被进一步放大, 对卫星导航系统服务精度的提高已构成严重危害。然而目前国内对北斗系统伪距偏差产生机理研究甚少, 为了最大程度降低伪距偏差对我国北斗卫星导航系统影响, 该文首先深入并详细研究了伪距偏差产生机理及特点, 在此基础上设计了试验验证方案, 利用国内昊平观测站40 m大口径天线, 准确测试并评估了所有北斗卫星导航系统(BDS)在轨可视卫星伪距偏差结果。最后根据试验测试结果, 提出针对北斗卫星导航系统的接收机主要参数设置建议, 从而能够最大程度上减小伪距偏差问题带来的测距误差和定位误差。该文的研究成果可为GNSS信号设计及实现、GNSS监测评估及用户终端参数设置提供有价值的参考依据。

关键词: 北斗卫星导航系统; 伪距偏差; 产生机理; 试验验证

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2698-07

DOI: 10.11999/JEIT180074

Researches on Pseudo-range Biases of BeiDou Navigation Satellite System B1 Signals

HE Chengyan^① GUO Ji^{①②} LU Xiaochun^① WANG Xue^① RAO Yongnan^①

KANG Li^{①②} WANG Meng^{①②}

^①(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

^②(School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: Due to the distortions of the broadcasted satellite signals and the inconsistencies of parameter settings for different receivers, the single difference or double difference of pseudo-ranges between two receivers are different for two pair of different receivers. Bias inconsistencies will lead to adverse effects for pseudo-range-based positioning applications. Pseudo-range biases can also hinder carrier-phase ambiguity resolution. However, fewer articles deal with pseudo-range biases for BeiDou navigation satellite System (BDS). In order to mitigate the impact of biases on BDS to the greatest extent, the generation mechanisms and characteristics of pseudo-range biases are studied in detail firstly. Then based on this, experimental verification methods are designed using Haoping Radio Observatory (HRO) of Chinese Academy of Sciences to observe BDS signals. Pseudo-range biases of all visible BDS satellites are measured and evaluated with high accuracy, using the 40 meters dish antenna and modern equipment of HRO. Finally, some important parameters of BDS receivers, such as the correlator spacing and front-end bandwidth, are suggested to mitigate the ranging errors and positioning errors result from pseudo-range biases. The achievements of this paper can provide a worthy reference for GNSS signal designers, GNSS monitoring and assessment and GNSS receiver designers.

Key words: BeiDou navigation satellite System (BDS); Pseudo-range bias; Generation mechanism; Experimental verification

收稿日期: 2018-01-19; 改回日期: 2018-07-17; 网络出版: 2018-08-02

*通信作者: 贺成艳 hechengyan@ntsc.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61501430), 地理信息工程国家重点实验室开放基金(SKLGIE2017-M-2-2)

Foundation Items: The National Nature Science Foundation of China (61501430), The State Key Laboratory of Geo-information Engineering (SKLGIE2017-M-2-2)

1 引言

GNSS卫星按照星载原子钟频率发射特定调制方式的导航信号,该信号经过时间 t 后到达地面用户接收机天线。信号传播时间 t 与电磁波在空间传播速度 c 相乘,即可得到卫星与用户之间的几何距离 ρ 。通过解算至少3颗卫星到用户的距离,根据3球交会原理即可得到用户的准确位置。然而实际上由于传播时间 t 中包含有卫星钟差、接收机钟差、卫星星历误差、接收机测量噪声、多径、电离层延迟和对流层延迟等影响^[1],估算出的 t 并非真正的卫星导航信号传播时间。因此,实际应用中计算出的距离并非真正的站星几何距离,习惯上称之为伪距。

对于高精度用户,利用差分系统可以消除一些误差,但遗留误差还包括多径、接收机测量噪声、各卫星信号畸变引起的误差等,该部分误差无法通过差分的方式进行消除。因此,当两台零基线或短基线接收机同时观测一颗相同卫星时,接收机之间伪距单差为均值非零的常数;当两台零基线或短基线接收机同时观测两颗相同的卫星时,接收机之间的伪距双差也得到均值非零的常数。而且不同接收机之间以及不同观测卫星之间的伪距差值不同,这种现象称为伪距偏差。该现象最早于2011年被斯坦福大学的Wong和Phelts等人在研究GPS和WAAS系统的测距和定位结果时发现。研究结果表明,由于不同卫星的信号特性不可能做到完全一致,双频用户在用双频线性组合的方式消除电离层影响的同时,会把伪距偏差的影响进一步放大。

国外对于伪距偏差的研究较早, GPS最早发现并试图解决伪距偏差现象。文献[2—4]在利用双频

技术消除电离层延迟时,均发现了伪距偏差现象,并给出了减小伪距偏差影响的建议:一方面可以通过在导航电文中播发群时延参数TGD和信号间改正参数ISCs(Inter-Signal Corrections)的方法减小该现象对用户的影响;另一方面,可以通过在ICD(接口控制文件中)明确接收机的前端带宽和相关器间隔等参数来减轻伪距偏差的影响。文献[5—8]研究了可能导致GPS信号伪距偏差的原因,文章指出:各颗卫星导航信号的失真不一致,是导致伪距偏差的根本原因。

本文针对我国北斗卫星导航系统的伪距偏差问题,首先以理论公式推导的方式,对伪距偏差现象进行详细说明。然后在此基础上对卫星信号的发射、传播和接收通道建立完整的收发模型,从卫星信号传播的整个路径出发来逐步分析可能引起伪距偏差的原因;然后从用户终端的角度出发,分别从接收机的相关器间隔、滤波器带宽和卫星俯仰角等3个主要方面,进一步分析伪距偏差可能的表现形式及特点;最后给出本文结论及对我国北斗用户的建议。

2 伪距偏差现象分析

伪距偏差现象不能通过单台接收机直接获得,需要在零基线或短基线条件下的两台接收机同时观测两颗卫星,得到的伪距观测值做单差或双差处理得到。进行单差或双差的作用是可以消除一些公共的误差。本文假定两台接收机分别为 r_1, r_2 , 两颗卫星分别为 i 和 j ,对单频数据的O-C分别进行零基线双差处理。计算过程如下:

两台接收机 r_1, r_2 分别对卫星 i, j 的单频伪距观测方程为

$$P_{r_1}^i = \rho_{r_1}^i + \delta t_{r_1} - \delta t^i + c \cdot \text{IFB}_{r_1} - c \cdot \text{TGD}^i - \text{iono}_{r_1}^i - \text{trop}_{r_1}^i - \text{rel}_{r_1}^i - \alpha_{r_1}^i + \varepsilon_{r_1}^i + \text{MP}_{r_1}^i + \text{SDM}_{r_1}^i \quad (1)$$

$$P_{r_1}^j = \rho_{r_1}^j + \delta t_{r_1} - \delta t^j + c \cdot \text{IFB}_{r_1} - c \cdot \text{TGD}^j - \text{iono}_{r_1}^j - \text{trop}_{r_1}^j - \text{rel}_{r_1}^j - \alpha_{r_1}^j + \varepsilon_{r_1}^j + \text{MP}_{r_1}^j + \text{SDM}_{r_1}^j \quad (2)$$

$$P_{r_2}^i = \rho_{r_2}^i + \delta t_{r_2} - \delta t^i + c \cdot \text{IFB}_{r_2} - c \cdot \text{TGD}^i - \text{iono}_{r_2}^i - \text{trop}_{r_2}^i - \text{rel}_{r_2}^i - \alpha_{r_2}^i + \varepsilon_{r_2}^i + \text{MP}_{r_2}^i + \text{SDM}_{r_2}^i \quad (3)$$

$$P_{r_2}^j = \rho_{r_2}^j + \delta t_{r_2} - \delta t^j + c \cdot \text{IFB}_{r_2} - c \cdot \text{TGD}^j - \text{iono}_{r_2}^j - \text{trop}_{r_2}^j - \text{rel}_{r_2}^j - \alpha_{r_2}^j + \varepsilon_{r_2}^j + \text{MP}_{r_2}^j + \text{SDM}_{r_2}^j \quad (4)$$

以接收机 r_1 与卫星 i 为例, $P_{r_1}^i$ 为伪距观测值, $\rho_{r_1}^i$ 为理论距离, δt_{r_1} 为接收机钟差, δt^i 为卫星钟差, IFB_{r_1} 为接收机频间差, TGD^i 为卫星频间差, c 为光速, $\text{iono}_{r_1}^i$ 为电离层延迟, $\text{trop}_{r_1}^i$ 为对流层延迟, $\text{rel}_{r_1}^i$ 为相对论效应延迟, $\alpha_{r_1}^i$ 为伪距测量偏差(即接收通道时延), $\varepsilon_{r_1}^i$ 为热噪声, $\text{MP}_{r_1}^i$ 表示多径误差, $\text{SDM}_{r_1}^i$ 为信号畸变引起的误差。

由于两台接收机零基线连接,所受的电离层延迟、对流层延迟和相对论效应延迟基本一致,卫星频间差对不同接收机来说是一致的,接收机频间差

对不同卫星来说也是一致的,因此对两台接收机的O-C进行双差处理时,可以将接收机钟差、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消除,伪距测量多径在长弧段内也认为是零均值的。因此双差后的O-C序列均值为两台接收机的伪距测量偏差。

为了对比分析北斗2号与北斗试验卫星的信号性能差异及特点,本文选取了北斗2号与试验卫星共有的民用信号——B1频点I支路信号作为分析对象来开展伪距偏差问题的深入分析与研究。在对北

斗2号B1I信号伪距偏差进行测量过程中,选取了4个不同厂家的接收机进行零基线试验,将其中一台接收机分别与其他3台接收机做双差处理,通过查看互差均值来分析B1I频点的伪距偏差现象。本文在进行双差计算时选取C01卫星为基准星,将

1号接收机、2号接收机和3号接收机伪距测量值分别与4号接收机做双差处理。需要说明的是,由于1号接收机在观测过程中无法正常接收C05和C12号卫星数据,因此在表1中表中有几处出现了无数据现象。

表1 北斗二号卫星B1I信号伪距偏差(m)

接收机	卫星											
	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C14
1号-4号	0.10	0.40	0.02	-	0.23	-0.01	0.31	0.24	0.65	0.37	-	0.49
2号-4号	-0.05	0.27	0.10	0.34	0.16	-0.10	0.14	0.17	0.40	0.18	0.57	0.22
3号-4号	0.00	0.42	0.22	0.53	0.08	0.08	0.18	0.20	0.77	0.67	0.72	0.48

由表1分析可知:不同接收机间和不同卫星之间的伪距差出现了非零均值的常数,而且不同卫星或不同接收机之间的偏差大小不一。因此下一节将针对伪距偏差问题的产生机理展开深入分析。

3 伪距偏差产生机理分析

卫星导航信号从产生发射到空间传播,再到地面接收,若整个传输通道特性非理想,即通道传递函数 $H(f)$ 幅频特性和相频特性均不理想,则此时到达地面接收系统的卫星信号与本地复现码做相关运算时,相关函数会发生非线性畸变,进而引起相关曲线非对称,导致码跟踪环鉴相曲线锁定点有偏差,最终会导致测距误差^[9-12],如图1所示。

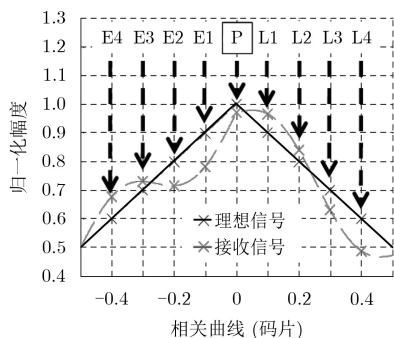


图1 本地码和卫星实测信号的互相关示意图

以具有代表性的非相干超前减滞后功率型鉴相器为例,设其相关器的超前-滞后间距为 δ ,则其S曲线计算式可表示为^[9]

$$\text{Curve}(\varepsilon, \delta) = \left| \text{CCF} \left(\varepsilon - \frac{\delta}{2} \right) \right|^2 - \left| \text{CCF} \left(\varepsilon + \frac{\delta}{2} \right) \right|^2 \quad (5)$$

锁定点偏差 $\varepsilon_{\text{bs}}(\delta)$ 满足

$$\text{Curve}(\varepsilon_{\text{bs}}(\delta), \delta) = 0 \quad (6)$$

S曲线偏差的定义为

$$\text{SCB} = \max(\varepsilon_{\text{bs}}(\delta)) - \min(\varepsilon_{\text{bs}}(\delta)) \quad (7)$$

图1中的实线代表理想信号相关曲线,虚线表示实际接收到的卫星信号有畸变的相关曲线。从图中可以看出:实测信号相关曲线严重不对称,因此在不同的相关器间隔下,S曲线的锁定点偏差不同,从而导致不同相关器间隔的接收机同时观测两颗卫星时,伪距做双差处理后仍然存在无法抵消的非零常数,也即伪距偏差。

由于伪距偏差是卫星信号的非理想特性以及用户接收机参数(主要是前端带宽和相关器间隔两个参数)设置的不同共同引起的^[13],因此为了便于从公式推导,先假设接收机的前端带宽均相同,仅相关器间隔不同,这时有以下几种可能性:

(1)两台接收机(不同相关器间隔)同时观测一颗卫星,做单差处理:

$$\rho_{mn} = c[\delta t_{u,m} - \delta t_{u,n}] + \varepsilon_{\rho,m} - \varepsilon_{\rho,n} + \text{MP}_{\rho,m} - \text{MP}_{\rho,n} + \text{SDM}_{\rho,m} - \text{SDM}_{\rho,n} \quad (8)$$

(2)两台接收机(不同相关器间隔)同时观测两颗卫星,做双差处理:

$$\rho_{mn}^{ij} = \varepsilon_{\rho,mn}^{ij} + \text{MP}_{\rho,mn}^{ij} + \text{SDM}_{\rho,mn}^{ij} \quad (9)$$

其中,m和n表示接收机,i和j表示卫星。

信号畸变量一般为常数,假设 $\varepsilon_{\rho,mn}^{ij}$ 和 $\text{MP}_{\rho,mn}^{ij}$ 相比信号畸变带来的伪距差较小,而且均为零均值噪声分布,则此时可以通过一段时间平均的方式求出信号畸变量。

(3)两台接收机(相同相关器间隔)同时观测一颗卫星,做单差处理:

$$\rho_{mn} = c[\delta t_{u,m} - \delta t_{u,n}] + \varepsilon_{\rho,m} - \varepsilon_{\rho,n} \quad (10)$$

可以看到,多径和信号畸变都被抵消。

(4)两台接收机(相同相关器间隔)同时观测两颗卫星,做双差处理:

$$\rho_{mn}^{ij} = \varepsilon_{mn}^{ij} \quad (11)$$

只剩噪声,认为是零均值的。

双频定位时使用无电离层组合, 如式(12):

$$P_{B1B3,r1}^i = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_3^2} \cdot P_{B1,r1}^i - \frac{f_3^2}{f_1^2 - f_3^2} \cdot P_{B3,r1}^i \quad (12)$$

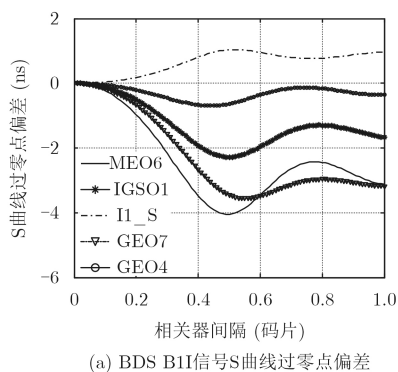
双频短基线O-C双差结果为

$$\begin{aligned} \text{omc}_{B1B3,r1,r2}^{i,j} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_3^2} \cdot \text{omc}_{B1,r1,r2}^{i,j} \\ &\quad - \frac{f_3^2}{f_1^2 - f_3^2} \cdot \text{omc}_{B3,r1,r2}^{i,j} \end{aligned} \quad (13)$$

可以发现, B1I频点的伪距测量偏差会分别被放大2.9倍。若进行电离层消除的两个频点的伪距测量偏差符号相反, 则双频无电离层组合的伪距测量偏差会被严重放大。

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一致, 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。因此, 即便是接收到的信号存在非理想特性, 处于零基线或短基线的不同接收机若参数设置相同, 则在进行伪距双差处理时仍将得到零均值的高斯噪声。

由于不同卫星导航信号的非理想特性不同, 因



此不同的用户接收机同时接收不同卫星的导航信号时, 测量得到的伪距值不同, 从而产生伪距偏差现象。由于在轨运行卫星的导航信号很难做调整, 而且在实现过程中不可能保证所有卫星信号特性完全一致, 因此本文将主要从用户端研究伪距偏差影响, 包括相关器间隔的设置、滤波器带宽以及不同卫星俯仰角对北斗2号卫星导航信号伪距偏差测量结果的影响, 并最终给出用户端接收机参数设置范围建议, 从而最大程度上减小由信号非理想特性导致的伪距偏差给用户带来的影响。

4 伪距偏差与相关器间隔

接收机主要是利用本地复现的理想测距码与接收的卫星下行信号测距码进行相关运算进行捕获、跟踪以及测距计算的。在实际应用中, 接收机相关器间隔选取合适与否, 直接决定了码跟踪测量精度^[14-16]。

2017年11月, 利用吴平观测站的40 m天线GNSS信号观测评估系统采集的数据, 按照前述方法分析计算可视北斗B1I信号相关间隔1码片以内的S曲线过零点偏差。由于篇幅限制, 图2仅给出了几颗比较有代表性的卫星信号分析结果。

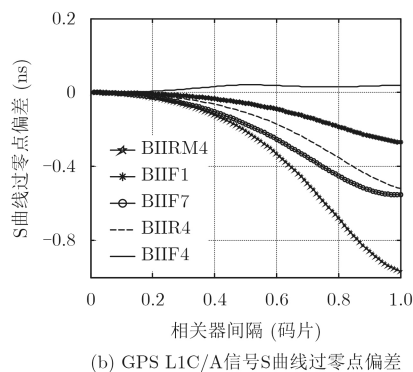


图2 单边8 MHz带宽条件下, 北斗卫星B1I频点信号及GPS L1C/A信号S曲线过零点偏差随相关器间隔的变化情况

分析结果表明: 首先, 在单边带宽均为8 MHz条件下, 北斗系统信号间的差异性约是GPS的5倍, 而且GPS不同卫星信号之间的一致性较北斗信号好; 其次, 在相同带宽条件下, 北斗系统不同卫星B1I信号的S曲线过零点偏差随相关器间隔的变化相差比较大; 另外, 对北斗系统同一颗卫星而言, 不同相关器间隔下的过零点偏差相差也比较大; 最后, 相同类型卫星信号的S曲线过零点偏差曲线比较接近, 不同类型卫星之间的S曲线过零点偏差相差较大, 说明北斗系统同类型卫星信号之间的差异性较小。

由于北斗系统伪距偏差相比GPS系统偏差较大, 因此本文将主要以北斗信号为研究对象, 重点研究针对北斗B1I信号的伪距偏差特性。假设参考接收机的相关器间隔为0.5码片, 则本文给出了不

同卫星B1I信号的S曲线过零点偏差随相关器间隔变化的分析结果。需要说明的是由于篇幅限制, 本文图3—图5仅给出了几颗比较有代表性的卫星信号分析结果。

从图3及数据分析结果可以看出, 若用户接收机相关器间隔取0.2码片, 则用户接收机与参考接收机同时接收相关卫星信号并做伪距双差处理时, 带来的伪距偏差最大约为3 ns; 若用户接收机相关器间隔取0.6码片, 则用户接收机与参考接收机同时接收相关卫星信号时, 带宽的误差最大约为0.8 ns。因此, 若此时用户接收机相关器间隔的设置比较接近参考接收机的相关器参数设置时, 带来的伪距偏差较小。例如取值为[0.4码片 0.6码片]时, 带来的伪距偏差最大为0.8 ns。

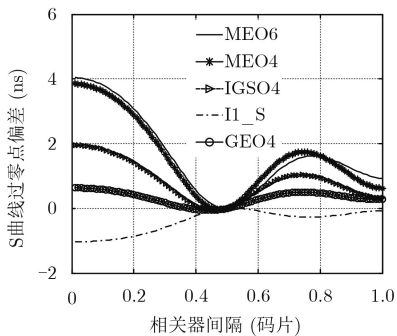


图3 参考接收机相关器间隔为0.5码片时的S曲线过零点偏差

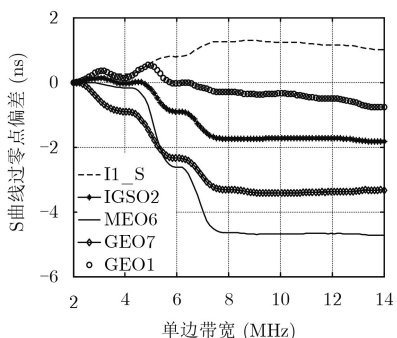


图4 相关器间隔为0.5码片条件下,北斗卫星B1I频点信号S曲线过零点偏差随滤波器带宽的变化情况

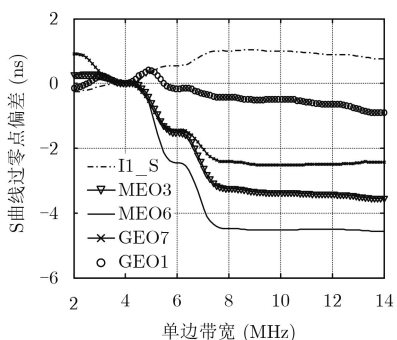


图5 参考接收单边带宽为4 MHz时的S曲线过零点偏差

5 伪距偏差与滤波器带宽

接收机前端带宽的作用是保证有用信号通过的同时,滤除掉带外干扰信号的影响。若前端带宽较

宽,则会引入干扰信号或其他支路信号的影响,影响测距精度。

利用上一节所采用的吴平观测站采集数据,本小节将重点研究滤波器带宽对伪距偏差的影响。为了减小滤波器对分析结果的影响,试验过程中采用的滤波器是锐截止FIR滤波器并假定除滤波器带宽外接收机其他参数均相同。

图4给出了不同滤波器带宽情况下的S曲线过零点偏差变化情况。分析结果表明:在相同相关器间隔条件下,不同卫星B1I信号的S曲线过零点偏差随带宽的变化相差较大;另外,对同一颗卫星而言,不同滤波器带宽下的过零点偏差相差也较大;相同类型的卫星S曲线过零点偏差曲线比较接近,不同类型卫星之间的S曲线过零点偏差相差较大。

假设参考接收机的滤波器单边带宽为4 MHz,则不同卫星B1I信号的S曲线过零点偏差随滤波器带宽变化的分析结果如图5所示。

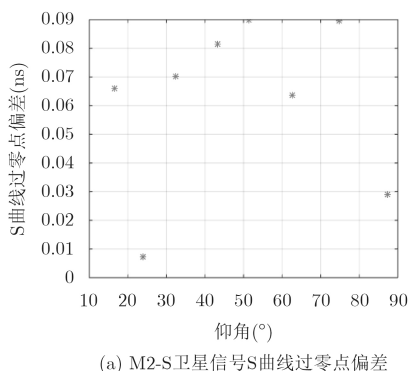
分析结果表明:若用户接收机单边带宽取2 MHz,则用户接收机与参考接收机同时接收相同卫星信号并做伪距双差处理时,带来的伪距偏差最大约为1.0 ns;若用户接收机单边带宽取8 MHz,则用户接收机与参考接收机同时接收相同卫星信号并做伪距双差处理时,带来的伪距偏差最大约为2.8 ns。

因此,若此时用户接收机的滤波器带宽设置比较接近参考接收机的带宽参数设置时,带来的伪距偏差较小。例如取值为[2 MHz 5 MHz]时,带来的伪距偏差最大为1.0 ns。

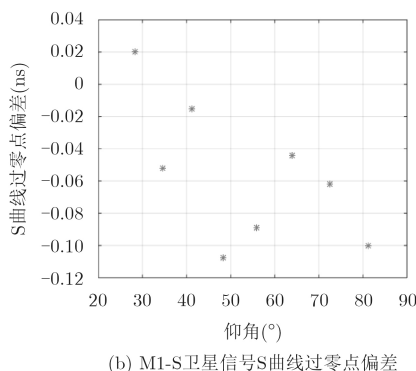
6 伪距偏差与卫星仰角

为了研究卫星俯仰角对伪距偏差的影响,利用吴平观测站的40 m天线GNSS信号观测评估系统,对每颗卫星仰角变化每隔约10°采集一组数据,最后统计分析各颗卫星信号在不同俯仰角下的伪距偏差结果,分析结果如图6所示。

通过对各颗北斗卫星在不同俯仰角条件下的S曲线过零点偏差统计分析,结果表明:卫星俯仰角对伪距偏差影响基本在厘米级(<0.15 ns)。



(a) M2-S卫星信号S曲线过零点偏差



(b) M1-S卫星信号S曲线过零点偏差

图6 带宽为2 MHz且相关器间隔0.1码片时,不同卫星俯仰角条件下的北斗B1I信号S曲线过零点偏差分析结果

7 结束语

伪距偏差产生的根本原因是卫星导航信号的畸变,而且这种信号畸变对于不同的卫星来说表现形式并不完全相同。因此当接收机中复现的测距码与卫星下行信号测距码做相关运算时,不同卫星信号得到的相关曲线不同,导致不同卫星信号的S曲线过零点偏差也不同,从而会带来不同的测距误差。这也就从根本上解释了为什么会带来文章引言部分提到的伪距偏差现象。

针对我国北斗卫星导航系统出现的伪距偏差问题,本文利用吴平观测站40 m天线系统采集各颗北斗卫星信号数据,同时选取零基线条件下的4个不同厂家的接收机开展相关试验及验证工作。首先根据观测过程中得到的伪距偏差现象及表现特点,从理论分析、公式推导和试验验证几个方面,研究了伪距偏差产生的根本原因,然后详细论证分析了在不同相关器间隔、不同滤波器带宽和不同卫星俯仰角条件下伪距偏差对用户的影响,最终得出结论如下:

(1)卫星俯仰角对伪距偏差的影响较小(厘米级),因此可以忽略;

(2)不同用户接收机之间滤波器带宽设置的差异,会严重影响伪距偏差测量结果:接收机间滤波器带宽设置的差异越小,带来的伪距偏差越小;

(3)不同用户接收机之间相关器间隔设置的差异,同样会严重影响伪距偏差测量结果:接收机间相关器间隔设置的差异越小,带来的伪距偏差越小。

因此,本文针对北斗卫星导航用户终端,给出接收机参数设置范围建议如下:

(1)在已知参考接收机滤波器带宽和相关器间隔条件下,用户终端的相应参数设置尽量与参考接收机的参数设置接近;例如当参考接收机相关器间隔为0.20码片情况下,建议用户接收机相关器间隔取[0.10 0.25]码片,或当参考接收机相关器间隔为0.50码片情况下,建议用户接收机相关器间隔取[0.38码片 0.60码片],此时带来的最大伪距偏差不超过0.2 m。

(2)在未知参考接收机滤波器带宽和相关器间隔条件下,建议各类用户终端尽量统一相应参数设置范围,或者说不同生产厂家的接收机滤波器带宽和相关器间隔之间的差异应尽可能地小,从而最大程度上减小由于下行卫星导航信号的非理想特性导致的伪距偏差给用户带来的影响。

致谢 感谢吴平观测站相关人员的帮助及数据采集,感谢北斗在轨验证与技术试验团队的各位专家对本试验提出的宝贵意见及建议。

参考文献

- [1] 陈西宏,刘赞,刘继业,等.低仰角下对流层散射延迟估计方法[J].电子与信息学报,2016,38(2):408-412. doi:10.11999/JEIT160776.
CHEN Xihong, LIU Zan, LIU Jiye, et al. Estimating tropospheric slant scatter delay at low elevation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 408-412. doi: 10.11999/JEIT160776.
- [2] WONG G, PHELTS R E, WALTER T, et al. Bounding errors caused by nominal GNSS signal deformations[C]. Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2011: 1-9.
- [3] COCO D S, COKER C, DAHLKE S R, et al. Variability of GPS satellite differential group delay biases[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(6): 931-938.
- [4] SARDON E and ZARRAOA N. Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases?[J]. *Radio Science*, 1997, 32(5): 1899-1910.
- [5] HAUSCHILD A and MONTENBRUCK O. A study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(2): 159-171. doi: 10.1007/s10291-014-0426-0.
- [6] HAUSCHILD A and MONTENBRUCK O. The effect of correlator and front-end design on GNSS pseudorange biases for geodetic receivers[J]. *Navigation*, 2016, 63(4): 443-453. doi: 10.1002/navi.165.
- [7] JEFFERSON D C, HEFLIN M B, and MUELLERSCHOEN R J. Examining the C1-P1 pseudorange bias[J]. *GPS Solutions*, 2001, 4(4): 25-30.
- [8] WONG G, CHEN Yuhuan, PHELTS R E, et al. Measuring code-phase differences due to inter-satellite hardware differences[C]. Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, USA, 2012: 1-12.
- [9] 贺成艳, GNSS空间信号质量评估方法研究及测距性能影响分析[D]. [博士学位],中国科学院大学(国家授时中心),2013.
HE Chengyan, Research on evaluation methods of GNSS signal quality and the influence of GNSS signal on ranging performance[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [10] HE Chengyan, GUO Ji, LU Xiaochun, et al. A new evil waveforms evaluating method for new BDS navigation signals[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2): 37-49. doi: 10.1007/s10291-018-0698-x.
- [11] 廉昕,王元钦,侯孝民,等.一种脉冲超宽带测控信号捕获方法[J].

- 电子与信息学报, 2017, 39(8): 2000–2006. doi: [10.11999/JEIT161213](https://doi.org/10.11999/JEIT161213).
- LIAN Xin, WANG Yuanqin, HOU Xiaomin, *et al.* Acquisition scheme for impulse radio UWB TT&C signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 2000–2006. doi: [10.11999/JEIT161213](https://doi.org/10.11999/JEIT161213).
- [12] 刘晓明, 张鹤, 吴皓威, 等. 高动态环境下长码扩频信号快捕算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(6): 1398–1405. doi: [10.11999/JEIT150860](https://doi.org/10.11999/JEIT150860).
- LIU Xiaoming, ZHANG He, WU Haowei, *et al.* Rapid DSSS signal acquisition algorithm under high dynamic environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(6): 1398–1405. doi: [10.11999/JEIT150860](https://doi.org/10.11999/JEIT150860).
- [13] WONG G, PHELTS R E, WALTER T, *et al.* Alternative characterization of analog signal deformation for GNSS-GPS satellites[C]. Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, USA, 2011: 497–507.
- [14] 高洪兴, 杨东凯, 张波, 等. 基于GNSS卫星反射信号的海冰厚度探测[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1096–1100. doi: [10.11999/JEIT160765](https://doi.org/10.11999/JEIT160765).
- GAO Hongxing, YANG Dongkai, ZHANG Bo, *et al.* Remote sensing of sea ice thickness with GNSS reflected signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1096–1100. doi: [10.11999/JEIT160765](https://doi.org/10.11999/JEIT160765).
- [15] 王燕, 李晴, 付进, 等. 超短基线定位系统融合分类解模糊技术研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1348–1354. doi: [10.11999/JEIT160825](https://doi.org/10.11999/JEIT160825).
- WANG Yan, LI Qing, FU Jin, *et al.* Resolving ambiguity using fusion classification for ultra-short baseline positioning systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1348–1354. doi: [10.11999/JEIT160825](https://doi.org/10.11999/JEIT160825).
- [16] 陈昌川, 周杨, 张天骐. TDDM-BOC信号组合码序列及信息序列盲估计[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(11): 2760–2766. doi: [10.11999/JEIT160042](https://doi.org/10.11999/JEIT160042).
- CHEN Changchuan, ZHOU Yang, and ZHANG Tianqi. Blind estimation of the combination code Sequence and information sequence for TDDM-BOC signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(11): 2760–2766. doi: [10.11999/JEIT160042](https://doi.org/10.11999/JEIT160042).
- 贺成艳: 女, 1986年生, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事卫星导航信号接收处理、信号质量评估等方面的研究.
- 郭 际: 男, 1955年生, 研究员, 主要从事天文测时、数据误差分析、导航系统建设等方面的工作.
- 卢晓春: 女, 1970年生, 研究员, 主要从事卫星导航定位系统设计和建设工作.
- 王 雪: 男, 1979年生, 研究员, 主要从事卫星导航信号体制验证、信号分析处理及信号质量评估等方面的工作.
- 饶永南: 男, 1982年生, 副研究员, 主要从事卫星导航信号接收系统测试、信号分析处理等方面的工作.
- 康 立: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为卫星导航信号分析处理及信号质量评估.
- 王 萌: 女, 1993年生, 博士生, 研究方向为卫星导航信号质量评估.