

北斗系统导航信号标称失真研究

康立^{1,2,3}, 王雪^{1,2,3}, 熊定喜⁴, 饶永南^{1,2}, 卢晓春^{1,2,3}, 贺成艳^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心, 陕西西安 710600; 2. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室, 陕西西安 710600;
3. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 101408; 4. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 北斗卫星导航系统(BDS)信号均存在细微的标称失真, 传统的研究聚焦于单星信号失真, 无法从系统上定量测量各信号由于标称失真带来的测距偏差. 该文以大口径天线接收系统采集数据结合软件接收机, 从时域波形、通道特性和测距偏差上分析北斗系统 B1I 信号标称失真. 首先利用码相位累加平均方法和标准码片相关技术提取信号时域失真细节, 并计算各卫星数字失真量. 其次, 运用最小二乘法估计信号通道特性, 对比分析所有卫星信号通道特性; 最后以 S 曲线过零点偏差(S-Curve Bias, SCB)定量分析 B1I 信号自然测距偏差及最大测距偏差. 文章从多维度定量对比研究了北斗系统 B1I 信号标称失真, 给卫星导航空间信号质量评估和接收机设计提供了新的思路.

关键词: 卫星导航; 标称失真; 测距偏差; 时域波形; 通道特性

中图分类号: V474 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)12-2848-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.005

Nominal Deformations Analysis of BDS Navigation Signal

KANG Li^{1,2,3}, WANG Xue^{1,2,3}, XIONG Ding-xi⁴, RAO Yong-nan^{1,2}, LU Xiao-chun^{1,2,3}, HE Cheng-yan^{1,2}

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

2. Key laboratory of Precision Navigation, Positioning and Timing, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

4. Beijing Tracking and Communication Technology Institution, Beijing 100094, China)

Abstract: Beidou satellite navigation system (BDS) contains subtle nominal deformations. The traditional research focuses on deformation of single satellite and cannot quantitatively calculate the ranging biases due to nominal deformations. This paper analyzes BDS B1I signal nominal deformations based on time waveform, channel characteristics and ranging biases. The data are from big antenna receiving system combined with software receivers. Firstly, the cumulative averaging method and standard chip correlation technique are used to extract the details of signal deformations, and the digital distortion value of each satellite is calculated. Then, channel characteristics of all satellite signals are analyzed based on least square method. Lastly B1I signal natural ranging biases and the maximum ranging biases are analyzed quantitatively by S-curve bias. The nominal deformations of B1I signal are comparatively studied from multiple dimensions and the results presented could provide a new thought for signal-in-space assessment and receiver design.

Key words: satellite navigation; nominal deformations; ranging biases; time waveform; channel characteristics

1 引言

GNSS 播发的所有导航信号均包含来源于卫星有效载荷信号产生和发射器件的细微失真, 此类失真定义为标称失真^[1]. 一般来说, 标称失真的观测和计算是非常具有挑战性的, 通过低增益天线和硬件接收机可以实时监测标称失真, 但由于空间噪声、多径和干扰的

影响, 标称失真对信号测距的影响难以提取, 加之硬件接收机带宽和相关间隔设置固定, 无法从全维度上分析标称失真带来的测距偏差^[2]. 其次, 国内大多数卫星导航空间信号质量评估相关文献聚焦于单星信号质量, 主要从功率谱、星座图、时域波形和相关函数等方面研究失真对信号质量的影响^[3]. 对于北斗系统而言, 目前未出现信号质量严重恶化的事件, 单星信号质量分

析逐渐不能满足导航系统和用户的要求。

本文利用中科院国家授时中心吴平观测站(Hao-ping Radio Observation, HRO)40m 大口径天线接收系统对北斗系统所有卫星进行数据采集,采用软件接收机对下行导航信号进行处理,在时域上利用新型码相位累加平均方法获取清晰的时域波形,并在此基础上采用标准码片相关技术提取码元进行比对分析.利用最小二乘法对北斗各卫星通道模型进行估计,从通道特性上研究信号的标称失真.最后,从测距偏差方面分析各卫星之间不同的标称失真量对导航系统测距性能的影响。

2 标称失真模型

ICAO 组织针对标称失真提出了 2-OS 模型,失真模型可分为三类:数字失真、模拟失真和混合失真.数字失真发生在有效载荷基带信号产生单元的数字部分,发生数字失真时伪码信号中正码片和负码片的时间宽度不再相等.模拟失真是描述导航卫星有效载荷通道特性的模型,它包含两个衰减因子 σ 和振荡频率 f_d 参数,模型的 s 域表达式为:

$$H(s) = \frac{\sigma^2 + (2\pi f_d)^2}{s^2 + 2\sigma s + \sigma^2 + (2\pi f_d)^2} \quad (1)$$

混合失真模型是模拟失真和数字失真的联合,在实际情况中导航卫星有效载荷不会单独出现数字失真或者模拟失真,该模型是差分系统信号质量监测技术的重要理论基础^[4,5].

3 时域波形提取

时域波形是观测导航信号标称失真细节特征的最佳评估手段,通过接收信号波形分析可以有效、快捷地判断信号失真类型并计算失真参数.卫星导航信号到达接收系统后,虽然信号功率得到了大幅度提升,但仍然不能解除噪声对时域波形的影响.假设空间噪声为高斯白噪声,民用导航信号具有严格的周期性,在获得基带信号波形后,将多个伪码周期信号进行累加平均运算,令累加次数为 N ,民用信号功率增加为 N^2 倍,噪声功率上升为 N 倍,可得累加平均后基带信号信噪比提升分贝数为:

$$G = 10 \cdot \lg(N) \quad (2)$$

考虑接收信号存在多普勒效应,本文采用码相位的累加平均算法来获取高信噪比的时域波形,保留时域波形各类畸变特征.为了更加深入地研究信号产生失真后时域波形的特征,需要抽取基带信号的码元特性,可通过标准码片波形相关技术来获得准确的码元^[6],本地伪码只在码片上升沿赋值,其余采样点赋值 0,利用只包含脉冲的本地伪码和接收信号相关可获得

信号的码元波形。

4 通道模型估计与分析

4.1 通道估计原理

卫星导航信号从产生到接收系统共经历三个通道:星上有效载荷通道、空间传播通道和地面接收通道,星上有效载荷由于器件性能稳定,其通道特性可认为是不随时间改变而改变的,空间传播通道色散效应在小带宽内可以忽略不计,接收通道特性可以直接测量.忽略信号的非线性效应,同时假设信号仅受高斯白噪声 $n(t)$ 的影响,下行导航信号 $y_r(t)$ 可表达为:

$$y_r(t) = x(t) * h(t) + n(t) \quad (3)$$

上式中 $x(t)$ 为理想无失真信号, $h(t)$ 为信号通道传输函数, $*$ 为卷积运算,以模型输出和系统输出的偏差的方差为准则函数,通过最小二乘法可求解出通道函数的向量表达式 \mathbf{h} 为:

$$\mathbf{h} = (\mathbf{x}^H \mathbf{x})^{-1} \mathbf{x}^H \mathbf{y}_r \quad (4)$$

式(4)中 \mathbf{H} 为矩阵转置运算,该方法要求获得合路信号理想信号,但北斗系统 B1 频点正交支路信号伪码未知.本文数据采集率为 250MHz,每个授权信号码片上的采样点数 n 为 122.18,利用伪码码片宽度恒定的特点,将正交支路信号完整的码片内的采样点进行求和可获得精准的授权伪码符号,授权信号一个伪码周期内的伪码符号求解表达式如下:

$$C_Q(k) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^{122} s_Q(\text{floor}(i + (k-1) \cdot n)) \right) \quad (5)$$

式中 sign 为符号函数, s_Q 为正交支路信号, k 的取值范围为 $\{1, 2046\}$, floor 为取整函数, floor 函数保证信号下标为整数且不随时间而产生累加偏差偏移,通过上式可获得正交支路授权信号伪码序列。

4.2 接收系统通道特性分析

本地接收系统通道特性在卫星导航信号通道估计中是一个不可忽略的因素,在 40m 大口径天线接收系统已配备通道校准子系统,通过测量获得如图 1 所示的通道群时延特性曲线,接收通道群时延最大抖动约为 0.62ns,在主瓣带宽内最大抖动约为 0.2ns.假设接收通道的频率响应为 $H_c(j\omega)$,可通过式(6)得到接收通道和理想信号的互相关函数 R_c :

$$R_c = \text{IFFT}(H_c(j\omega) \cdot \text{FFT}(x(t) * x(t))) \quad (6)$$

式中 FFT 和 IFFT 为傅里叶变换和其逆变换,再求解互相关函数的 S 曲线过零点偏差即可评估接收通道给信号带来的测距偏差。

5 测距偏差模型

在软件接收机跟踪稳定后,利用本地生成的参考伪码 $x_{\text{ref}}(t)$ 和解调后获得的基带信号 $y_r(t)$ 进行互相关

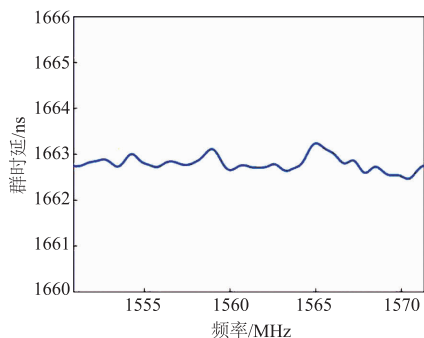


图1 B1频段接收通道特性图

运算可得到用于计算测距偏差的互相关曲线,对其进行归一化运算得到:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{\int_0^{T_c} y_r(t) \cdot x_{ref}(t - \tau) dt}{\sqrt{\left(\int_0^{T_c} |y_r(t)|^2 dt\right) \cdot \left(\int_0^{T_c} |x_{ref}(t)|^2 dt\right)}} \quad (7)$$

式中, T_c 为信号周期. 设置不同的相关器间隔 d , 根据下式可得到相应的 S 曲线过零点偏差:

$$\tau(d) = \arg\{R_{xy}(\tau + d) - R_{xy}(\tau - d) = 0\} \quad (8)$$

S 曲线过零点偏差是对失真信号测距偏差的一个标准度量参数, 测距偏差受到多个因素影响, 在相关间隔 d_i 的情况下表达式为:

$$\tau_i(d_i) = I + T + \text{SDM}_{d_i,i} + \text{MP} + \sum_{j=1}^k \text{CC}_{d_i,j} + \varepsilon_{d_i} \quad (9)$$

式(9)中 $\tau_i(d_i)$ 为第 i 颗卫星相关间隔 d_i 时的测距偏差, I 和 T 为电离层和对流层给信号带来的测距偏差, $\text{SDM}_{d_i,i}$ 为该相关器件下的标称失真引入的测距偏差, MP 为多径信号偏差, CC_j 为第 j 颗卫星引入的互相关干扰偏差, ε 为噪声产生的偏差. 对于高增益天线接收系统而言, 高信噪比采集信号可直接忽略噪声带来的偏差. 同时, 本文采用软件接收机处理信号, 接收机钟差可不予考虑, 利用硬件接收机进行双频测量, 可以实时观测电离层效应, 将电离层和对流层的影响降至最低, 本地接收系统通道特性可进行准确标校以去除其影响, 因而通过采集数据的分析可以直接观测导航卫星有效载荷信号标称失真产生的测距偏差. 在实际情况中依据码跟踪环路中相关间隔 d_0 假定标称失真带来的测距偏差为零, 可得到 i 卫星标称失真引入的测距偏差表达式为:

$$B_i = \tau(d_k) - \tau(d_0), k = (0, 1) \quad (10)$$

在得到所有卫星的测距偏差曲线后, 取其均值可得到卫星导航系统的测距公共误差, 此误差在定位解算方程式中被消除, 不会造成用户定位产生偏差, 只会影响用户授时精度, 将各卫星测距偏差减去公共偏差后得到的偏差曲线定义为测距自然偏差, 该偏差能够真实反应 B1I 信号之间的测距差异, 是衡量测距性能的

重要标准^[7].

6 实测数据结果分析

本文所有采集数据均来源于 HRO 观测站, 大口径天线系统在 B1 频段增益约为 78dB, 采集时长为 10s, 数据比特位数为 14, 软件接收机码环阶数为 2, 码环相关间隔设置为 0.2 码片.

6.1 时域波形结果

利用 40m 大口径天线接收的导航信号信噪比约为 40dB, 噪声对信号的相关影响可以直接忽略不计, 但噪声信号仍然对信号时域波形产生较大影响, 图 2 为 GEO-1 卫星累加平均前后时域波形对比图, 累加平均前信号波形保持部分出现无规律性抖动, 无法从波形中提取各类失真, 而累加平均后信号波形保持部分特征非常清晰.

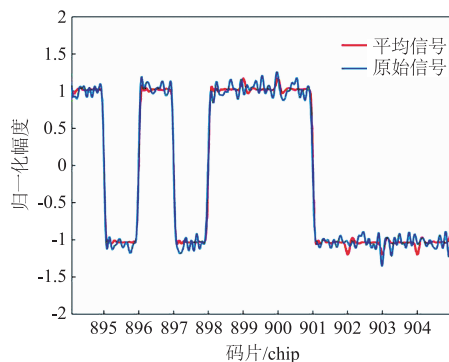


图2 原始信号和平均信号对比图

从图 3 可以得知, 北斗区域系统各卫星时域码元波形表现出不同的特征, 所有卫星都出现不同程度的振铃效应, GEO 类卫星振荡幅度整体较小, IGSO 和 MEO 类卫星振荡幅度较大, 振荡幅度最大的是 MEO-4 卫星, 其过冲幅度达到了 20%.

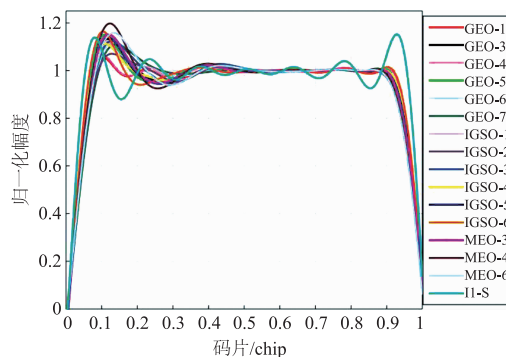


图3 码元波形图

得到累加平均后的基带信号后, 采用一阶拟合方法计算每个伪码码片的上升沿和下降沿过零点, 将各过零点依次相减得到伪码码片的时间宽度, 数字失真量即为接收信号和理想信号时间宽度之差, 取其均值

可得到数字失真的最佳估计量. 如表 1 所示, 从图中可以得到的 2 个结论: (1) 北斗系统所有卫星 B1I 信号均存在数字失真现象; (2) 数字失真最大的卫星为 IGSO 类卫星, 最大失真数值为 3.97ns; 北斗区域系统的数字失真量均小于 5ns, 属于正常的标称失真范围.

表 1 I 支路数字失真统计表

卫星编号	G1	G3	G4	G5	G6	G7	II-S	II
数字失真(ns)	1.47	1.64	0.96	2.53	0.34	0.12	0.16	3.87
卫星编号	I2	I3	I4	I5	I6	M3	M4	M6
数字失真(ns)	1.54	1.75	2.96	1.83	3.97	1.94	0.87	0.14

6.2 通道估计结果

得到通过最小二乘法可得到通道特性曲线如图 4, 取 5 倍码速率带宽作为参考带宽, GEO-1 卫星通道幅频抖动约为 6.44dB, 群时延抖动约为 17ns. 图 5(a) 给出辨识前后信号功率谱对比图, 图 5(b) 为 I 支路信号相关曲线图形, 从功率谱对比图中可得知辨识后信号功率和接收信号功率符合度非常高. 由于通道群时延特性对信号测距影响较大, 通过检验辨识前后相关曲线能够有效地判断通道群时延估计的准确度, 在相关曲线对比图中可得知, 辨识后信号和接收信号的相关函数在一个码片内重合度达到了 99.83%, 由此可知最小二乘法通道估计方法能够真实反映信号通道特性.

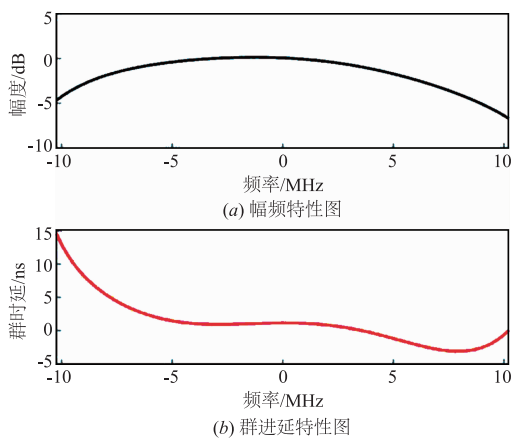


图 4 GEO-1 卫星通道特性图

表 3 本地接收通道给信号引入的测距偏差统计表

卫星	G1	G3	G4	G5	G6	G7	II-S	II	I2	I3	I4	I5	I6	M3	M4	M6
SCB(ps)	13	22	34	23	12	43	87	54	66	15	48	9	65	55	67	43

可知, 接收通道给 B1 频点信号引入的测距偏差均小于 0.1ns, 因此大口径天线接收系统的通道特性给信号带来的测距偏差可以直接忽略不计.

如图 6 给出了北斗系统 B1I 信号在参考相关间隔下的自然测距偏差, 由图可知, II-S 卫星自然测距偏差在相关间隔为 0.44 码片时达到了 2.30ns, MEO-6 卫星

在扣除本地接收通道群时延后, 表 2 给出了所有卫星 B1 频点信号通道特性统计结果, 通道幅频抖动最大的是 GEO-7 卫星, 达到了 15dB, 抖动最小的卫星为 II-S. 群时延抖动最大卫星是 MEO-4, 其数值为 78.5ns, 群时延最小为 GEO-6, 数值约为 7.5ns. 同时, 群时延均最大的卫星为 MEO 类卫星, 从此现象可以预判 MEO 类卫星测距偏差是所有卫星中最大的.

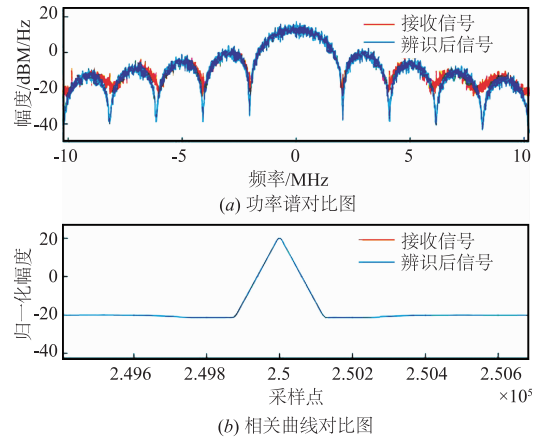


图 5 GEO-1 卫星功率谱和相关曲线对比图

6.3 测距偏差分析

经过校准系统测量得到接收通道频率响应后, 结合式(6)~(8)可求解接收通道特性对理想信号测距的影响, 考虑到每颗卫星伪码特性并不完全一致, 遍历仿真所有卫星的理想伪码求解其 S 曲线过零点偏差, 得到最大测距偏差如下表所示:

表 2 北斗系统通道抖动特性统计表

卫星编号	G1	G3	G4	G5	G6	G7	II-S	II
幅频(dB)	6.4	9.6	7.1	9.5	11.3	15	0.8	8.5
群时延(ns)	16.5	30.6	12.4	34.4	7.5	42.6	9.6	18.8
卫星编号	I2	I3	I4	I5	I6	M3	M4	M6
幅频(dB)	11.2	11.6	7.71	8.5	5.4	8.4	12	13
群时延(ns)	14	55.4	12.1	34.9	28.3	44.0	78.5	49.0

在相关间隔为 0.5 码片时自然测距偏差为 1.36ns, 当相关间隔大于 0.6 码片时, 卫星之间的自然测距偏差达到平稳状态, 但所有卫星测距偏差差异仍然较大. 同时, 测距偏差最小的 II-S 卫星和其他卫星之间差异最大, 当 II-S 在用户接收机的可视范围内时, 该卫星参与定位解算时, 由于和其他卫星之间存在一定的差异, 它可

能会给用户带来更大的定位偏差。

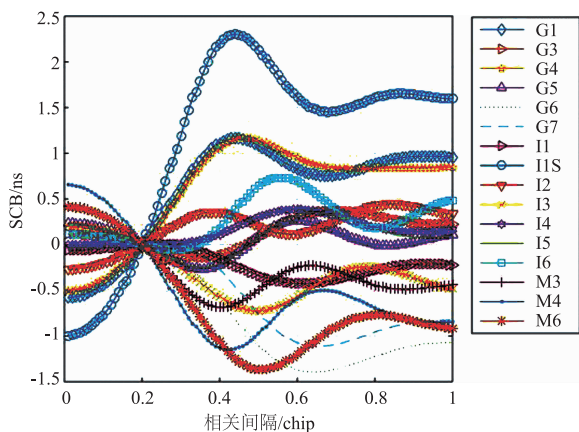
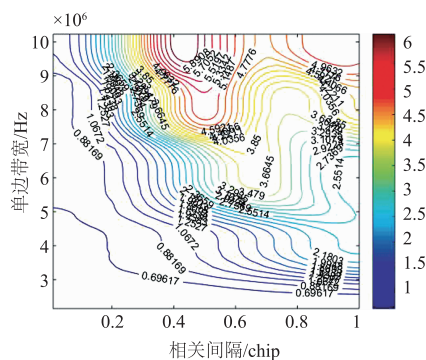


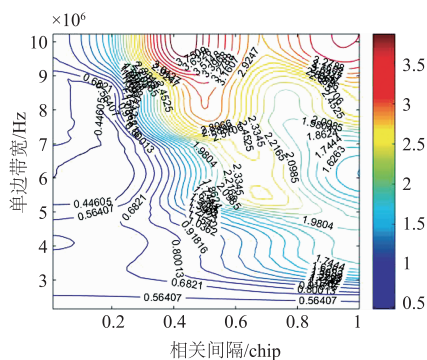
图6 自然测距偏差统计图

图7(a)给出了不同带宽和相关间隔下的最大误差分布曲线,北斗系统不同卫星之间的最大测距偏差最小值约为0.51ns,最大值约为6.26ns,通过最大误差分



(a) 所有卫星最大偏差图

布曲线可得到下述现象:一,随着接收带宽的增大,不同相关间隔下的最大测距偏差值均呈现递增趋势;二,当相关间隔取0.5码片,系统最大测距偏差值达到最大值;通过通道特性求解可知,卫星有效载荷群时延特性随带宽的增大而逐渐恶化,因而接收带宽越大,标称失真给信号带来的测距偏差就越大。在相关间隔为0.5码片、接收带宽为10MHz范围内测距偏差抖动值取到最大值,该现象和图4相呼应,在实际情况中应避免将接收机带宽和相关间隔设置在此范围中。同时,考虑到I1-S卫星测距性能和其他卫星测距性能不一致,图7(b)给出了去除I1-S卫星后的最大测距偏差抖动分布曲线。在没有I1-S卫星参与解算的最大测距偏差分布趋势图中,最大偏差值约为3.9ns,最小偏差值约为0.32ns,图7(b)分布趋势和图7(a)相似,该现象说明:I1-S由于和其他卫星存在其不一致性特性,确实给B1I信号测距带来较大的偏差,在可见卫星数目足够的情况下,关闭接收机中I1-S卫星接收通道能够减小用户的测距偏差。



(b) 去除I1-S后最大测距偏差图

图7 北斗系统B1I信号最大测距偏差分布图

7 结论

针对卫星导航系统信号标称失真,本文从时域波形、通道估计和测距偏差三个评估参数对北斗所有卫星B1I信号进行了详细的分析,通过时域波形分析发现北斗系统B1I信号时域波形码元特性不一致现象,MEO卫星振铃幅度和数字失真量最大,GEO卫星码片信号保持部分存在等幅振荡现象。通过辨识前后信号功率谱和相关曲线两个方面平行对比验证了最小二乘法通道估计的有效性,结果表明MEO卫星通道幅频特性和群时延特性最差,I1-S卫星群时延抖动最小。最后利用S曲线过零点偏差定量求解所有卫星的测距偏差,在消除公共误差后评估了标称失真给各卫星带来的测距偏差,I1-S卫星单星测距偏差最小,但和其他卫星存在不一致性,因而在该卫星参与定位解算时会带来额外的偏差,同时,在不同带宽和相关间隔下测量各信号的最大测距偏差,由于通道特性随带宽增大而逐

渐恶化,测距偏差亦随信号带宽增大而递增,且在相关间隔为0.5码片时取得最大测距偏差。本文研究成果可供后续的北斗三代卫星导航系统空间信号质量研究提供参考。

参考文献

- [1] SANJEEV GUNAWARDENA, FRANK V G. High fidelity chip shape analysis of GNSS signals using a wideband software receiver [A]. Proceeding of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation [C]. Nashville TN, USA: ION, 2012. 874-883.
- [2] SANJEEV GUNAWARDENA. Analysis of GPS-SPS inter-PRN pseudorange biases due to receiver front-end components [A]. Proceeding of the 27th International Technical Meeting of the ION Satellite Division [C]. Tampa, Florida, USA: ION, 2014. 2611-2624.
- [3] 卢晓春,周宏伟. GNSS空间信号质量分析方法研究[J].

中国科学:物理学力学天文学,2010,40(5):528-533.

LU X C, ZHOU H W. GNSS signal-in-space quality analysis and research[J]. China Science: Physics, Mechanics and Astronomy, 2010, 40(5): 528-533. (in Chinese)

- [4] ALAN S B, DIERENDONCK V, ANDREW J, et al. A real-time signal quality monitor for GPS augmentation systems[A]. Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation[C]. Salt Lake City, USA; ION, 2000. 189-198.
- [5] PAUL THEVENON, QUENTIN TESSIER, DENIS MAILLARD, et al. Detection performances of evil waveform monitors for the GPS L5 signal[A]. Proceeding of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation [C]. Tampa, Florida, USA; ION, 2014. 3312-3322.
- [6] 康立, 卢晓春, 王雪, 等. 北斗系统信号时域波形失真评估[J]. 电子与信息学报, 2017, 40(4): 1002-1006.
KANG Li, LU Xiao-chun, WANG Xue, et al. Navigation signal chip domain assessment on Beidou navigation system [J]. JEIT, 2018, 40(4): 1002-1006. (in Chinese)
- [7] THOELERT S. GPS IIR-M L1 transmit power redistribution; analysis of GNSS receiver and high-gain antenna data [A]. Proceeding of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation [C]. Portland, Oregon, USA; ION, 2017. 1589-1602.

作者简介



康立 男, 1990年5月出生于湖南省汨罗市. 现于中国科学院国家授时中心导航与通信研究室博士在读. 从事GNSS新型导航信号质量评估研究工作.

E-mail: 1039086352@qq.com



王雪 男, 1979年3月出生于辽宁省锦州市, 现为中国科学院国家授时中心导航与通信研究室研究员. 从事导航技术研究工作.

E-mail: wangxue@ntsc.ac.cn



熊定喜 男, 1992年出生于湖北松滋. 现为北京空间信息中继传输技术研究中心助理工程师, 主要研究方向为导航信号质量评估技术和卫星轨道控制技术.

E-mail: xdi1992@163.com