

## 北斗系统信号时域波形失真评估

康 立<sup>\*①②</sup> 卢晓春<sup>①②③</sup> 王 雪<sup>①②④</sup> 贺成艳<sup>①②</sup> 饶永南<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

<sup>②</sup>(中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室 西安 710600)

<sup>③</sup>(中国科学院大学天文与空间学院 北京 101408)

<sup>④</sup>(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 101408)

**摘 要:** 卫星导航信号时域波形是空间信号质量监测和评估(SQM)的重要内容, 本文利用大口径天线接收系统采集的离线数据对北斗 IGSO-6 卫星 B1 频点信号时域波形进行分析。首先提出利用基于码相位平均方法求取高信噪比的时域波形, 在此基础上利用标准码片波形相关技术提取出码元波形。然后建立相关函数和码元波形的统计理论联系, 利用码元波形相关函数差分分析信号边沿特性, 最后在时域波形上计算出所有北斗卫星的数字失真量, 详细评估不同卫星数字失真规律。

**关键词:** 卫星导航; 时域波形; 码相位平均; 标准码片波形相关; 数字失真

**中图分类号:** TN967.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2018)04-1002-05

**DOI:** 10.11999/JEIT170591

## Navigation Signal Chip Domain Assessment on Beidou Navigation System

KANG Li<sup>①②</sup> LU Xiaochun<sup>①②③</sup> WANG Xue<sup>①②④</sup> HE Chengyan<sup>①②</sup> RAO Yongnan<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory of Precision Navigation, Positioning and Timing, National Time service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

<sup>③</sup>(School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

<sup>④</sup>(School of Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

**Abstract:** Satellite navigation signal waveform is the key factor of signal-in-space quality monitoring. This study mainly focuses on signal waveforms analysis for BDS IGSO-6 frequency B1 by using data of big antenna receiving system. Firstly, code phase average method is proposed to get the high SNR signal waveform, and based on this way the standard chip shape correlator is utilized to extract code element chip. Then, theory between correlation function and code chip is constructed and signal edges characters by using code element chip correlation differences are analyzed. Finally, digital distortions of all BDS satellites are calculated and assessed in detail through signal waveform in time domain.

**Key words:** Satellite navigation; Signal waveform; Code phase average; Standard chip shape correlator; Digital distortion

### 1 引言

在轨运行导航卫星有效载荷发生故障会导致信号波形产生严重的失真现象, 且正常运行的导航卫星也发生细微的失真, 该类失真会导致本地参考信

号和地面接收信号的互相关函数对称性变差, S 曲线过零点发生偏移, 从而引起测距误差<sup>[1-3]</sup>。相关函数只能测量信号的测距误差, 无法详细分析信号出现的失真类型和程度, 而信号失真现象在时域波形上表现明显, 可以通过时域波形评估来分析信号失真。针对时域波形失真, 斯坦福大学提出的 2-OS 模型很好地描述了该类失真特性及其测距误差影响, 该模型是时域波形失真评估的理论基础<sup>[4]</sup>。时域波形评估的基础在于获取高信噪比的时域波形, 文献[5]提出利用 Verner 采样原理和累加平均获得一个伪码周期的清晰时域波形, 但计算过程繁琐且需要

收稿日期: 2017-07-03; 改回日期: 2018-01-25; 网络出版: 2018-03-01

\*通信作者: 康立 1039086352@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501430), 中国科学院青年创新促进会基金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501430), Youth Innovation Promotion Association Foundation of Chinese Academy Sciences

预先计算采样率, 对硬件要求较高, 实用性欠佳。国内对导航信号时域波形的研究集中在 2-OS 模型理论上, 鲜见完整的实际导航信号时域波形评估文献。

本文以中国科学院国家授时中心吴平观测站 40 m 大口径天线接收系统采集数据为对象, 针对北斗系统时域波形失真进行研究。第 2 节首先简要地介绍了信号失真模型, 第 3 节分析传统的累加平均方法的缺陷, 引入新的码相位平均方法原理及详细步骤。第 4 节分析标准码片波形相关技术原理, 第 5 节从理论上简要论证了信号码元波形和相关函数的统计表达式。本文最后利用 IGSO-6 卫星的采集数据进行验证, 在利用码相位累加平均方法获得码元波形后, 利用码元相关函数差分析码元上升沿和下降沿特性差异, 利用时域波形计算北斗系统 B1 频点所有卫星信号的数字失真量, 分析数字失真和卫星系统特性之间的联系。

## 2 信号失真模型

卫星导航信号失真模型分为 3 类: 数字失真、模拟失真和混合失真。数字失真使得数字信号中正码片和负码片的码片宽度发生改变, 码片的过零点产生偏移。2-OS 模型中将载波通道模型建立为二阶线性系统模型, 它包含衰减因子  $\sigma$  和振荡频率  $f_d$  两个参数<sup>[6]</sup>, 对应的时域信号表达式为

$$e(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - e^{-\sigma t} \left[ \cos(2\pi f_d t) + \frac{\sigma}{2\pi f_d} \sin(2\pi f_d t) \right], & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

混合失真则是数字失真和模拟失真的联合。

## 3 时域波形平均

传统的相干累加平均法没有考虑到码多普勒的影响, 发生数字失真后基带信号码片宽度相互累加导致数字失真被人为地消除<sup>[7,8]</sup>。本文以码相位为基础, 通过配置码相位单元来获得平均信号, 码相位平均方法示意图如图 1 所示。

具体方法步骤如下:

(1) 利用软件接收机稳定跟踪后去除载波, 读取  $N$  个伪码周期的基带信号和伪码码速率数值;

(2) 设置理想无失真信号码相位单元的分辨率, 分辨率  $\mathfrak{R}_{id}$  计算式为

$$\mathfrak{R}_{id} = f_c / N_b \quad (2)$$

那么, 接收信号的码相位分辨率  $\mathfrak{R}_{re}$  为

$$\mathfrak{R}_{re} = f'_c / N_{re} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中,  $f_c$  为标称的伪码码速率且  $f_c = 2.046$  MHz,  $f'_c$  接收信号的实时码速率,  $N_b$  为每个伪码周期内设置的码相位单元数, 它直接决定码相位单元的分辨率,  $N_{re}$  为每个伪码周期内基带信号的采样点数, 一般  $N_b \geq N_{re}$ ;

(3) 依次对基带信号中的每个采样点做以下判决:

$$K_i = \text{Ceil}(\mathfrak{R}_{re} / \mathfrak{R}_{id} \cdot i), \quad i = 1, 2, \dots, N_{re} \quad (4)$$

Ceil 为取整运算,  $K_i$  为第  $i$  个采样点对应的码相位单元格数, 将第  $i$  个采样点的幅度值“放入”该单元格中;

(4) 将获得的码相位单元格作平均运算。

需要注意的是, 该方法的理想信号码相位分辨率  $\mathfrak{R}_{id}$  是和基带信号平均效果成反比的, 为了平衡分辨率和平均效果的矛盾, 建议设置的点数为

$$N_b = \max(N_{re}) + 1 \quad (5)$$

通过  $N$  次信号平均, 基带信号功率增大至  $N^2$  倍, 同时噪声功率增加  $N$  倍, 那么累加后信号信噪比提升表达式为

$$G = 10 \cdot \lg N \quad (6)$$

## 4 码元特性抽取

码元是信号时域波形的基础, 各个类型的失真现象均能映射到码元特性上, 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<sup>[9]</sup>, 如图 2 所示。

在标准码片波形相关技术中, 本地伪码只在码片上升沿赋值, 当码片中边沿的采样点符号从 -1 跳变成 1 时, 对应的本地参考伪码赋值为 1, 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。

## 5 码元与相关函数的联系

相关函数可直接测量出信号失真造成的测距偏差, 但从相关函数上无法监测和评估信号失真类型和程度, 通过观测基带信号码元可以直接评估信号失真参数, 一个伪码周期内的信号序列可表示为

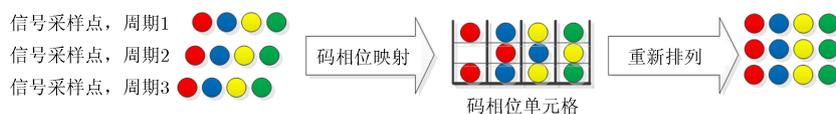


图 1 码相位平均示意图

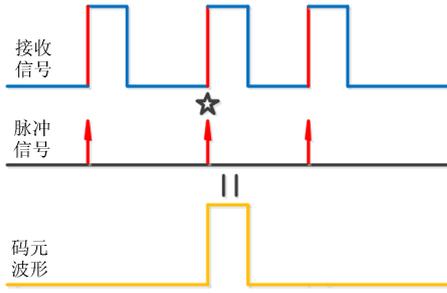


图 2 标准码片波形相关技术原理图

$$r(t_k) = \sum_{k=0}^{M-1} \varepsilon_k c(t_k - kT_c) \quad (7)$$

式中,  $T_c$  为码片时间宽度,  $\varepsilon_k$  为码片正负符号,  $c(t)$  为矩形码片,  $M$  为单个伪码周期内码片数, 信号自相关函数为

$$R(\tau) = \sum_{i=0}^{M-1} \left[ \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^{M-1} \varepsilon_i \varepsilon_j c(t_i - iT_c) c(\tau - (t_j - jT_c)) + \varepsilon_i \varepsilon_j c(t_i - iT_c) c(\tau - (t_i - iT_c)) \right] \quad (8)$$

当伪码具有良好的随机性且伪码长度  $M$  充分大时, 对于  $i \neq j$  项, 由于伪码序列具有随机性, 式(8)中第 1 个累加项

$$\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^{M-1} \varepsilon_i \varepsilon_j c(t_i - iT_c) c(\tau - (t_j - jT_c))$$

数值趋于 0, 因而在相关函数中的权重可以忽略不计, 那么自相关函数可进一步表达为

$$R(\tau) \approx M \sum_{k=0}^{N_{\text{code}}} c(t_k) c(\tau - kt_k) \quad (9)$$

式(9)表明: 自相关函数在统计意义上是码元波形的自相关函数的累加。

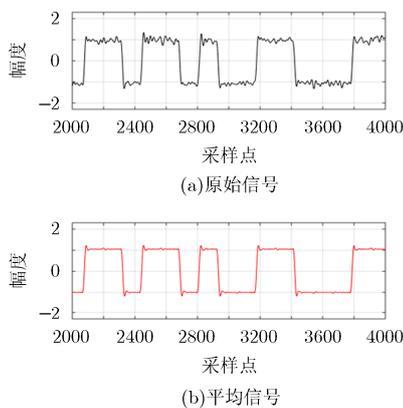


图 3 时域波形对比图

## 6 分析结果

### 6.1 平均运算

IGSO-6 卫星是北斗系统最新的入网卫星, 该卫星 B1 频点采用 QPSK(2) 调制方式, 通过大天线采集的信号信噪比约为 37 dB, 取 2 s 时长的基带信号, 平均次数为 2000 次, 码相位平均后信号信噪比提升约 33 dB, 所以平均后的信号信噪比提升至 70 dB, 平均前后基带信号波形图、电平柱状图和功率谱图形如图 3 和图 4 所示。

对比图 3 中原始信号波形, 平均后的信号波形非常清晰, 边沿过冲效应明显, 码片平坦部分不受噪声影响。从图 4 柱状图中可以看出, 原始信号受高斯白噪声干扰, 信号电平近似呈正态分布, 码片电平分布区间大, 而平均后信号电平极为集中, 电平分布区间缩小, 表明平均方法去噪效果极佳。对比传统的累加平均方法获得的基带信号功率谱, 在码相位平均信号功率谱中能见到非常清晰的伪码时钟泄露现象, 利用该平均信号计算得到的数字失真量为 4.03 ns, 可得知码相位平均方法是非常有效且可对基带信号进行无损伤提取 waveform 的方法。

### 6.2 码片时域特性分析

利用上文的码元提取方法, 可得到基带信号单个码元波形如图 5 所示, 利用极高信噪比的码元波形不同部分和本地参考信号作相关可直观地将码片不同部位进行差异对比分析<sup>[10,11]</sup>, 如式(10)所示:

$$\text{Error}_R(\tau) = \sum_{k=0}^{N_{\text{code}}} c'_r(t_k) \text{sign}(c'_{rr}(\tau_k - kt_k)) - \sum_{k=0}^{N_{\text{code}}} \text{sign}(c'_r(t_k)) \text{sign}(c'_r(\tau_k - kt_k)) \quad (10)$$

式中,  $\text{Error}_R(\tau)$  为接收信号码元不同部位归一化相关函数和理想归一化相关函数的误差,  $c'_r$  为接收信号提取的码元波形的观测部分,  $\text{sign}(c'_r(t_k))$  为对应

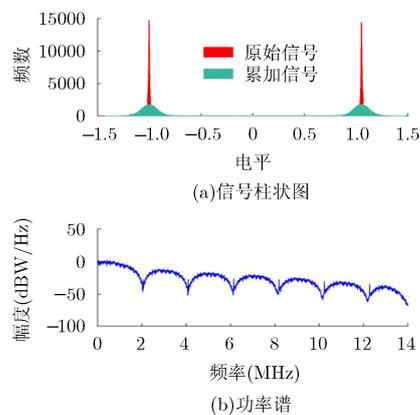


图 4 时域波形柱状图和功率谱图形

的理想码元波形。

从图 6 可得知, IGSO-6 卫星地面接收信号上升沿和下降沿的相关函数差基本重合, 这表明该信号波形的边沿特性一致。其中, 最大差值发生在相关间隔为 0.06 码片处, 这种现象是由于振铃效应引起的, 在此处信号波形出现振荡, 这种振铃效应会带来一定的测距误差<sup>[12-14]</sup>。

### 6.3 数字失真分析

为了避免不同导航电文符号下的伪码波形宽度失真因累加平均而抵消, 计算数字失真量时应按导航电文符号分为两路, 图 7 给出了 IGSO-6 卫星 I 支路信号数字失真量统计结果。不同导航电文符号下信号波形的数字失真量绝对值相等, 其平均值约为 3.97 ns, 正码片的时间宽度大于负码片的时间宽度。从图中可观测到不同电文符号下的相同边沿数字畸变量相等, 因而可以得出结论: 数字失真并非仅由伪码产生器产生, 导航电文调制器件对数字失真现象有着决定性影响<sup>[15]</sup>。

本文采集了所有北斗卫星下行导航信号, 并统计出 B1 频点两个支路信号数字失真量, 如表 1 所示。所有卫星中 I 支路发生最小数字失真的卫星是 G7, 仅为 0.12 ns, 发生最大数字失真的卫星是 I6, 其数值达到了 3.97 ns; Q 支路中数字失真最小的卫星是 I1-S, 数值约为 0.11 ns, 发生最大数字失真的

是 G7, 数值为 3.14 ns。所有卫星两个支路数字失真量均不一致, 这可能是由于 Q 支路为授权信号, 基带信号产生单元配置的原子钟特性和 I 支路并不一致, G7 和 I1 的不同支路数字失真差异最大。同时可以看出不同轨道的卫星平均数字失真量关系为: MEO<GEO<IGSO。这可能由于不同轨道的卫星载荷性能各异, 所发生的数字失真量也不相同。

## 7 结束语

本文对北斗系统 B1 频点时域信号评估进行了研究, 利用新的码相位平均方法获得信噪比达到 70 dB 的时域波形, 对比传统的时域累加平均方法, 码相位平均方法考虑码多普勒的影响, 保留了信号细节特征, 是信号时域波形获取的重要方法。运用标准码片波形相关技术准确地抽取出平均后信号的码元波形, 在统计关系上将码元和自相关函数联系起来。利用本地参考波形和接收信号码元波形相关函数与理想波形的相关函数差分析了信号的时域特性, 计算出 IGSO-6 卫星 I 支路信号的不同调制电文的边沿数字失真数值, 发现该卫星数字失真产生于导航电文调制器件中而非产生于基带信号产生器件。本文后续并分析了北斗系统所有卫星 B1 频点数字失真, 发现 I/Q 支路数字失真呈现不同的特征, 且数字失真量和卫星载荷种类存在一定的联系。

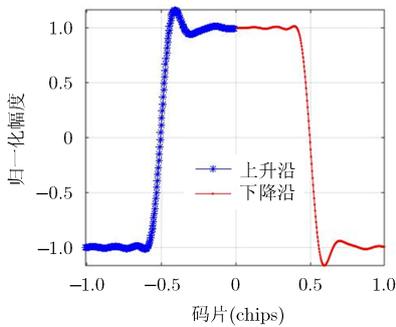


图 5 码元波形示意图

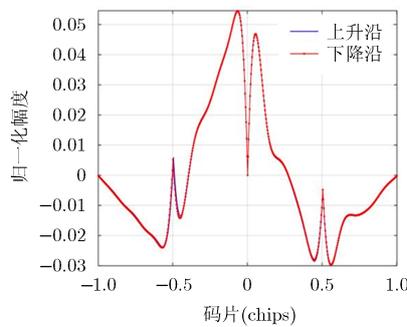


图 6 码元相关函数差

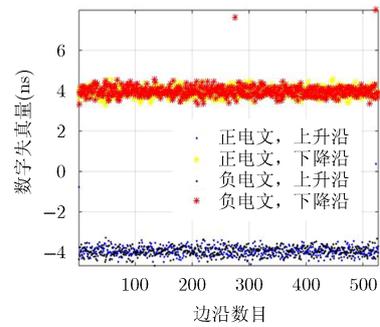


图 7 数字失真统计图

表 1 北斗系统 B1 频点信号数字失真统计表(ns)

卫星	G1	G3	G4	G5	G6	G7	I1-S	I1
I 支路	1.473	1.643	0.960	2.527	0.337	0.122	0.157	3.873
Q 支路	3.056	1.681	1.081	1.245	1.416	3.135	0.114	0.465
卫星	I2	I3	I4	I5	I6	M3	M4	M6
I 支路	1.535	1.753	2.959	1.833	3.971	1.942	0.865	0.141
Q 支路	1.688	0.447	1.742	2.910	2.278	0.355	0.322	0.677

## 参 考 文 献

[1] THOELERT S, ERKER S, and MEURER M. New signals in

the sky — A high gain antenna analysis of GPS IIF and COMPASS[C]. Proceedings of the 23rd International Technical

- Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, OR, 2010: 21–24.
- [2] THOELERT S and FURTHNER J. GNSS survey — Signal quality assessment of the latest GNSS satellites[C]. Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, California, 2013: 608–615.
- [3] HE Chengyan, GUO J, and LU Xiaochu. Generation mechanisms of GNSS navigation signal distortions and influence on ranging performance[J]. *Systems Engineering & Electronics*, 2015, 37(7): 1611–1620. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.07.22.
- [4] MITELMAN A M, PHELTS R E, AKOS D M, *et al.* A real-time signal quality monitor for GPS augmentation systems[C]. Proceedings of ION GPS, Salt Lake City, 1997: 862–871.
- [5] 刘建成, 范建军, 冯晓超. 卫星导航信号畸变导致的测距偏差的估计方法[J]. 宇航学报, 2015, 36(11): 1296–1302. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.11.011.
- LIU Jiancheng, FAN Jianjun, and FENG Xiaochao. Estimation method of ranging bias caused by navigation satellite signal distortion[J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(11): 1296–1302. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.11.011.
- [6] THEVENON P, TESSIER Q, MAILLARD D, *et al.* Detection performances of evil waveform monitors for the GPS L5 signal[C]. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Florida, 2014: 3312–3322.
- [7] GABRIEL W, PHELTS R E, WALTER T, *et al.* Characterization of signal deformations for GPS and WAAS satellites[C]. Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, 2010: 3143–3151.
- [8] MITELMAN A M, PHELTS R E, AKOS D M, *et al.* Signal deformations on nominally healthy GPS satellites[C]. Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2004.
- [9] GUNAWARDENA S and VAN GRAAS F. High fidelity chip shape analysis of GNSS signals using a wideband software receiver[C]. Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, 2012: 874–883.
- [10] THOELERT S and ENNEKING C. GNSS Nominal signal distortions-estimation validation and impact on receiver performance[C]. Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Florida, 2015: 1902–1923.
- [11] GRACE X G, LIANG Heng, and GABRIEL W. GPS in mid-life with an international team of doctors-analyzing IIF-1 satellite performance and backward-compatibility[C]. Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, 2010: 1597–1604.
- [12] PAGOT J B, THEVENON P, and JULIEN O. Estimation of GNSS signals' nominal distortions from correlation and chip domain[C]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Dana Point, 2015: 415–427.
- [13] GUNAWARDENA S and VAN GRAAS F. GPS-SPS inter-PRN pseudorange biases compared for transversal SAW and LC filters using live sky data and chip shape software receiver processing[C]. Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, California, 2015: 393–403.
- [14] 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.
- [15] HAUSCHILD A and MONTENBRUCK O. The effect of correlator and front-end design on GNSS pseudorange biases for geodetic receivers[C]. Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Florida, 2015: 2835–2844.
- 康立: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为卫星导航空间信号质量评估.
- 卢晓春: 女, 1970年生, 研究员, 从事精密卫星导航与时间同步研究.
- 王雪: 男, 1979年生, 研究员, 从事卫星导航信号体制及空间信号质量研究.
- 贺成艳: 女, 1987年生, 副研究员, 从事卫星导航空间信号处理研究.
- 饶永南: 男, 1983年生, 副研究员, 从事卫星导航信号测试与评估.