

一种新型卫星导航信号波形畸变特性评估新方法

贺成艳^{*①②} 卢晓春^{②③} 郭际^{①②③}

^①(地理信息工程国家重点实验室 西安 710054)

^②(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

^③(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 101408)

摘要: 全球卫星导航系统(GNSS)导航信号的波形特性将会影响导航信号质量,而信号质量优劣则直接决定了整个GNSS的服务性能极限。传统的波形畸变评估方法主要针对传统相移键控(PSK)调制信号的波形幅度和宽度开展研究,而忽视了波形不对称对跟踪误差和测距误差带来的影响。该文在国际民航组织(ICAO)所采用的传统测距码波形分析模型TMA/TMB/TMC基础上,给出了适用于各种新型二进制偏置载波(BOC)调制的波形畸变分析扩展模型。接着提出能够精细分析波形上升下降沿对称特性(WRaFES)分析模型,并从时域波形、相关函数、S曲线过零点偏差3个方面,深入仿真分析了WRaFES模型的性能特点。最后,以北斗试验卫星M1-S B1Cd信号为例,给出了基于WRaFES模型及相关曲线特性的实测分析结果。研究表明:该方法能够精确分析导航信号波形不对称性及对用户带来的影响,研究成果可为新型卫星导航信号评估提供一种新方法和新思路,同时还可为GNSS用户接收机相关参数合理选取提供建议和技术支撑。

关键词: 全球卫星导航系统; 卫星导航信号; 波形畸变; 波形不对称性

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)05-1017-08

DOI: [10.11999/JEIT180656](https://doi.org/10.11999/JEIT180656)

Evil Waveform Evaluating Method for New GNSS Signals

HE Chengyan^{①②} LU Xiaochun^{②③} GUO Ji^{①②③}

^①(State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China)

^②(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

^③(School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: The waveform characteristics of the navigation signals of Global Navigation Satellite Systems (GNSSs) will be of vital importance for signal quality, which plays an imperative and direct role in achieving high performance of GNSS services. These traditional methods for evaluating evil waveforms mainly deal with the amplitude and width of simple modulated signals such as Phase Shift Keying (PSK) signals. However, no research is done on the influences of waveform asymmetry on tracking errors and ranging errors. Based on the traditional thread models, such as Thread Model A (TMA), Thread Model B (TMB) and Thread Model C (TMC), adopted by International Civil Aviation Organization (ICAO), this paper provides a new extended general thread model suitable for new Binary Offset Carrier (BOC) modulated signals. Then a new evil waveform analysis method, Waveform Rising and Falling Edge Symmetry (WRaFES) Method, is proposed. The effects of WRaFES model are analyzed in detail in terms of time domain, correlation peak and S curve bias. Finally, by taking the B1Cd signal of the first modernized BeiDou navigation satellite System (BDS) experimental satellite named M1-S as an example, tested results of WRaFES model and correlation curves are shown in detail. Results show that the proposed methods could be able to analyze the asymmetry of signal deformation and its impact on ranging performance with high accuracy. The research brings about a new reference for new satellite navigation signal evaluation and signal system optimized design. In addition, it can

收稿日期: 2018-07-04; 改回日期: 2019-01-10; 网络出版: 2019-01-22

*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 Open Foundation (SKLGIE2017-M-2-2)

provide valuable suggestions and technical supports for GNSS users to choose reasonable receivers' correlator spacing.

Key words: Global Navigation Satellite System; Satellite navigation signal; Evil waveform; Waveform asymmetry

1 引言

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)下行信号是卫星导航系统与接收机的唯一接口,完善的信号体制设计是终端设备开发和芯片研制的首要输入条件,信号的潜在性能决定了整个卫星导航系统的性能极限^[1]。若卫星发射的信号本身存在缺陷,则即便是卫星导航系统的其它环节设计再优良,也无法弥补由此带来的整个系统在定位、测速、授时性能、抗干扰能力等关键性能上的不足。

比较典型的案例是1993年GPS SV19卫星故障。该卫星在轨运行8个月之后,L1信号功率谱出现10 dB左右的载波泄漏及谱不对称^[2]。由于C/A码与P码严重不同步(约有6 m的偏离),当SV19参与L1 C/A差分解算时,会产生3~8 m的定位偏差^[3]。随后出现大量针对信号波形畸变的分析模型,其中最具代表性的是Phelts^[4]提出的“2nd-Order Step”(2OS)模型,该模型后来被国际民航组织(ICAO)采用并一直沿用至今。模型针对测距码基带波形将波形故障分为:数字畸变(TMA)、模拟畸变(TMB)和混合畸变(TMC)^[4]。这3种故障模型主要针对GPS L1 C/A码提出的,主要对测距码正负码片宽度(TMA)、测距码波形幅度抖动失真(TMB)以及二者的混合失真进行建模分析,适用于简单BPSK或QPSK调制的测距码波形畸变评估。

然而,对于新型导航信号的波形畸变目前尚无较完善的评估模型,另外国内外还未曾针对卫星导航信号波形的不对称特性开展研究。初步研究表明:波形不对称畸变也会对信号功率谱和相关曲线产生影响,从而带来测距误差,严重情况下将会影响定位精度。

本文在传统测距码波形分析2OS模型基础上,结合GNSS新信号的数学模型,给出了一种新信号波形畸变扩展模型,同时提出了用于波形上升下降沿对称性分析的Waveform Rising and Falling Edge Symmetry(WRaFES)模型。接着仿真分析了该模型的特点,并给出了该模型应用于信号畸变特性分析的相关峰曲线评估新方法。最后以北斗试验卫星B1频点为例,给出了实测分析结果、结论及下一步研究计划。

2 传统2OS (2nd-Order Step)模型

美国斯坦福大学Phelts R.E博士提出的2OS模

型是目前对测距码波形分析最经典的畸变模型,该模型将测距码畸变归纳为2种畸变类型,分为3种模型:

(1) TMA模型:即数字畸变,主要产生于卫星信号生成单元的数字电路部分,它的扩频码正负码形宽度不一致,导致相关峰扩展,频谱中出现线性谱。

(2) TMB模型:即模型畸变,独立于数字畸变产生,主要由星上发射机基带滤波或射频滤波异常导致,它的基带信号幅度抖动失真,相关峰扭曲变形,频谱出现高频分量。

(3) TMC模型:TMA和TMB畸变的组合畸变,它的时域波形、频谱及相关函数曲线同时包含TMA和TMB的特性。

3 改进的新信号波形畸变评估模型

3.1 GNSS新信号数学模型

对于新型GNSS信号,由于一个主码片间隔内可能含有多级电平^[5],假设一个码片由 N^{sub} 个长度相等的子码片组成,不同子码片的幅度表示 A_n , $n = 1, 2, \dots, N^{\text{sub}}$ 。于是每个主码片波形可以表示为

$$g^{\text{chip}}(t) = \sum_{n=1}^{N^{\text{sub}}} A_n g^{\text{sub}} \left(t - n \frac{T_c}{N^{\text{sub}}} \right) \quad (1)$$

其中, $g^{\text{sub}}(t)$ 表示子码片形状的函数, T_c 表示一个码片时间,单位为s。

于是,任何GNSS信号都可以表示为式(2)

$$S(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} C_i g^{\text{chip}}(t - iT_c) \quad (2)$$

其中, C_i 表示为PRN码序列的幅度。

假设 $g^{\text{sub}}(t)$ 也是矩形波,于是 $S(t)$ 的功率谱密度可以表示为式(3)

$$G_S(f) = \frac{1}{T_c} \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi f T_c}{N^{\text{sub}}} \right)}{\pi^2 f^2} \left\| \sum_{n=1}^{N^{\text{sub}}} A_n e^{-j2\pi f \frac{T_c}{N^{\text{sub}}}} \right\|^2 \quad (3)$$

式(3)前半部分为可以看做是BPSK(N^{sub})的功率谱表达式,记为 $G_S^{\text{bpsk}(N^{\text{sub}})}(f)$,其中, f 表示信号 $S(t)$ 的频率。后半部分记为 $G_S^{\text{boc-mod}}(f)$ 。任何新信号的功率谱都可以表示为式(4)

$$G_S(f) = G_S^{\text{bpsk}(N^{\text{sub}})}(f) G_S^{\text{boc-mod}}(f) \quad (4)$$

3.2 新型波形畸变模型

BOC族信号波形畸变的产生有2种方式：(1)在调制前主码序列和子载波序列分别产生畸变；(2)调制后对整个的多级电平波形产生畸变。鉴于目前大多数新信号的产生方式主要基于第2种情况，因此本文后面的分析都将针对含有子载波的时域波形及相关函数进行分析。

3.2.1 扩展TMA模型

该种畸变定义为每个PRN主码码片翻转时上升沿或下降沿提前或延迟的时间。假设理想子码为 $S_i(t)$ ，畸变波形部分为 $D_e(t)$ ，则畸变信号的时域波形和理想子码的相关函数可表示为

$$S_e(t) = S_i(t) + D_e(t) \quad (5)$$

$$R_{S_i}(t) = R_{S_i}^{\text{bpsk}(N^{\text{sub}})}(t) * R_{S_i}^{\text{boc-mod}}(t) \quad (6)$$

则畸变波形产生的相关函数可表示为式(7)

$$\begin{aligned} R_{S_e,S}^{\text{TM-A}}(t) &= S_e(t) * S_i(t) = R_{D_e,S_i}(t) + R_{S_i}(t) \\ &= \left[R_{D_e,S_i}^{\text{bpsk}(N^{\text{sub}})}(t) + R_{S_i}^{\text{bpsk}(N^{\text{sub}})}(t) \right] \\ &\quad * R_{S_i}^{\text{boc-mod}}(t) \\ &= \left[R_{D_e,S_i}^{\text{bpsk}(N^{\text{sub}})}(t) * R_{S_i}^{\text{boc-mod}}(t) \right] + R_{S_i}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

其中，符号*表示卷积， $S_e(t)$ 表示含有畸变的导航信号时域波形， $S_i(t)$ 表示理想设计信号时域波形， $R_{S_i}(t)$ 表示理想设计信号 $S_i(t)$ 的自相关函数。这里的 $R_{a,b}^c(\cdot)$ 表示信号相关函数。

3.2.2 扩展TMB模型

该畸变定义为每个PRN码片翻转时幅度的振铃效应，独立于TMA畸变而产生。假设产生模拟畸变系统的脉冲响应为

$$h(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t), & t \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中， $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ 表示振荡频率， ω_n 表示无阻尼振荡频率， ζ 表示阻尼系数， ω_d 表示阻尼振荡频率，衰减因子可表示为 $\sigma_d = \zeta\omega_n$ 。则畸变波形产生的相关函数可表示为

$$\begin{aligned} R_{S_e,S}^{\text{TM-B}}(t) &= \left[h(t) * R_{S_i}^{\text{bpsk}(N^{\text{sub}})}(t) \right] * R_{S_i}^{\text{boc-mod}}(t) \\ &= h(t) * R_{S_i}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

3.2.3 扩展TMC模型

该畸变为扩展TMA和扩展TMB的混合畸变。混合畸变波形的相关函数表达式可表示为式(10)

$$\begin{aligned} R_{S_e,S}^{\text{TM-C}}(t) &= h(t) * \left[R_{D_e,S_i}^{\text{bpsk}(N^{\text{sub}})}(t) + R_{S_i}^{\text{bpsk}(N^{\text{sub}})}(t) \right] \\ &\quad * R_{S_i}^{\text{boc-mod}}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

3.2.4 波形不对称性分析WRaFES模型

传统ICAO畸变模型以及扩展TMA/TMB/TMC模型，都是针对基带波形宽度和幅度畸变提出的，国内外学者都未曾对码片波形上升下降沿不对称性进行分析。研究表明，该畸变对信号时域波形、频谱和相关函数曲线也会产生影响。前面提到的3种模型主要对波形宽度和幅度进行描述，本节提出波形上升沿下降沿不对称性分析模型，简称WRaFES模型。

本文以BPSK调制测距码波形加以说明，该方法也适用于调制子载波后的BOC信号波形。如图1所示给出了WRaFES模型示意图，其中， $W_{\pm d}$ 中的 d 表示该点到码片中心点的距离与整个码片长度比值。根据码片波形各点不对称性对用户测距的影响分析结果来看，该模型中各点选取的基本原则是：在波形上升沿和下降沿的前段、中段和后段部分多选点，尤其是多个电平波形的上升沿和下降沿中段部分，因为该部分对信号测距性能影响较大。对于含有副载波调制的多级电平码片波形，建议每级电平的上升下降沿都选取多个点进行不对称性分析。因此在实际应用中，可以根据实测信号波形的特点，选取合适的 d 的取值。图1中给出了距离码片中心点 $\pm 0.40, \pm 0.43, \pm 0.47, \pm 0.50, \pm 0.53, \pm 0.57$ 和 ± 0.60 个码片时的情况。

表1给出了WRaFES模型对波形不对称性进行量化分析时所需的模型参数，主要分为3类：包括 $\Delta\Delta$ 测试参数、对称性评价参数和非对称性评价参数。

(1) $\Delta\Delta$ 测试参数描述了波形上升下降过程中的中间点附近对称性，假设该参数服从均值为0的高斯分布；

(2)对称性评价参数主要用于评价波形上升下降过程的不对称性，同样假设该参数服从均值为0的高斯分布；

(3)非对称性评价参数可用于表示波形上升和

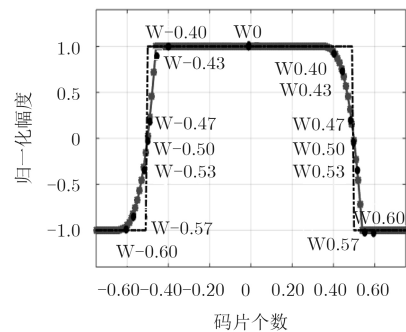


图1 WRaFES波形不对称分析

表1 WRaFES参数列表

△△测试参数		对称性面积比参数:	
$M1 = \frac{(W_{-0.50} - W_{0.50}) - (W_{-0.47} - W_{0.47})}{W_0}$		$M24 = 20 \times \lg \left[\frac{\int_{t=-0.60T_c}^{t=-0.40T_c} s(t)dt}{\int_{t=0.40T_c}^{t=0.60T_c} s(t)dt} \right]$	
$M2 = \frac{(W_{-0.53} - W_{0.53}) - (W_{-0.50} - W_{0.50})}{W_0}$			
对称性评价参数:		非对称性评价参数:	
$M3 = \frac{(W_{-0.40} - W_{0.40})}{W_0}$	$M4 = \frac{(W_{-0.43} - W_{0.43})}{W_0}$	$M10 = \frac{W_{-0.40}}{W_0}$	$M11 = \frac{W_{0.40}}{W_0}$
$M5 = \frac{(W_{-0.47} - W_{0.47})}{W_0}$	$M6 = \frac{(W_{-0.50} - W_{0.50})}{W_0}$	$M12 = \frac{W_{-0.43}}{W_0}$	$M13 = \frac{W_{0.43}}{W_0}$
$M7 = \frac{(W_{-0.53} - W_{0.53})}{W_0}$	$M8 = \frac{(W_{-0.57} - W_{0.57})}{W_0}$	$M14 = \frac{W_{-0.47}}{W_0}$	$M15 = \frac{W_{0.47}}{W_0}$
$M9 = \frac{(W_{-0.60} - W_{0.60})}{W_0}$		$M16 = \frac{W_{-0.50}}{W_0}$	$M17 = \frac{W_{0.50}}{W_0}$
		$M18 = \frac{W_{-0.53}}{W_0}$	$M19 = \frac{W_{0.53}}{W_0}$
		$M20 = \frac{W_{-0.57}}{W_0}$	$M21 = \frac{W_{0.57}}{W_0}$
		$M22 = \frac{W_{-0.60}}{W_0}$	$M23 = \frac{W_{0.60}}{W_0}$

下降过程中各个点的畸变。假设上升下降过程成对参数的互差服从均值为0的高斯分布;

(4)对称性面积比参数主要用于评价波形上升沿与下降沿的所覆盖的面积比。

4 仿真分析

4.1 扩展TMA/TMB/TMC模型

新型调制信号的模拟畸变、数字畸变和混合畸变表现形式及特点与传统的畸变特点类似,相关曲线也同样会出现平顶、偏移、不对称等特点^[6],信号时域波形和功率谱特性也跟BPSK测距码畸变类似。由于篇幅原因,在此不再赘述。下面仅给出BOC(1, 1)的数字畸变信号功率谱。

图2中的虚线表示理想BOC(1, 1)信号功率谱,实线表示数字畸变为0.06个码片的BOC(1, 1)信号功率谱。可以看出,数字畸变会使得功率谱各旁瓣间交汇处出现码频泄漏现象。传统2OS模型只适用于简单调制信号如BPSK/QPSK的建模分析,而扩展后的TMA/TMB/TMC模型能够对任意GNSS新信号的数模畸变进行较精确建模,从而深入研究GNSS新信号的功率谱特性及其它信号性能。

4.2 WRaFES模型

为了分析上升下降过程中各部分不对称性对信

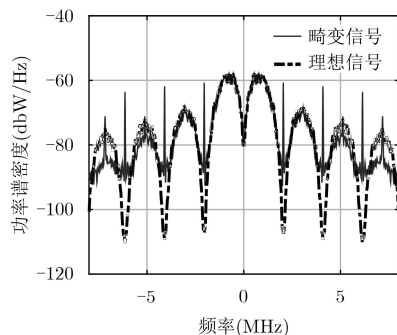


图2 BOC(1, 1)数字畸变功率谱: $\Delta = 0.06 T_c$

号性能产生的影响,本文设计了任意波形发生器,可以产生任意形状上升沿下降沿的矩形波。本文给出了以下4种情况的分析结果:(1)理想对称矩形波形;(2)对称非理想波形(指波形上升和下降有缓慢变化过程,而非理想波形的上升下降沿突变);(3)单独点非对称非理想波形(保持其它点不变,只变化某一个点);(4)完全非对称非理想波(上升沿和下降沿完全不对称的非理想波)。

由于第(2)种波与第(3)种波只一个点不重合,因此,图3中仅给出了第(1)和第(4)种波示意图。其中“上升沿面积大”和“下降沿面积大”属于第(4)种波。“理想波形”是第(1)种波。

本文主要从WRaFES模型参数、相关峰曲线特性、S曲线过零点偏差3个方面来分析上升沿下降沿不对称的影响。

(1) WRaFES模型参数分析:由于参数较多,故本文仅给出对各项参数特性的研究结果,其中各参数的实测结果将在第5节展示。研究表明:

(a) $\Delta\Delta$ 测试参数描述了波形上升下降中间点前后的不对称性,其中M1表示翻转点附近大于零部分的码片上升下降沿不对称性, M2表示翻转点附近小于零部分的码片上升下降沿不对称性;

(b)对称性评价参数M3至M9主要用于评价波形

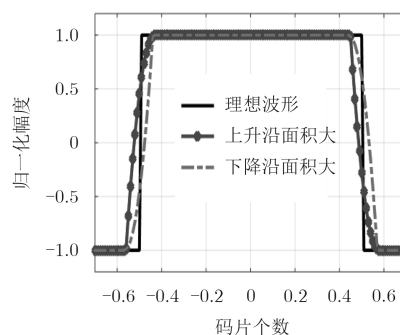


图3 WRaFES波形不对称分析

上升下降沿过程中位置对等点的不对称性；

(c)非对称性评价参数M10至M23之间两两比较(例如M10和M11, 以及M12和M13), 分别用于表示波形上升和下降过程中各个点的畸变情况；

(d)对称性面积比参数M24主要用于评价由于波形不对称带来的上升下降沿覆盖面积比。

实际应用时, 可利用该模型分析实测导航信号波形不对称性, 并建立评价指标模板, 分析实测数据与评价指标间的符合性。

(2)相关峰曲线特性: 以BOC(1, 1)信号为例, 各相关器输出如图4所示。

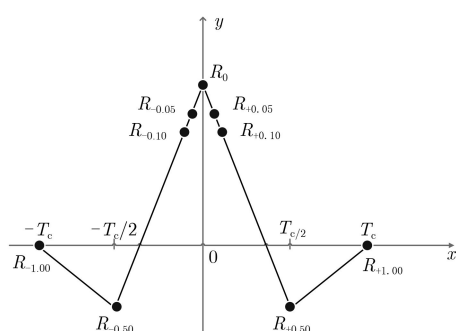


图4 BOC(1, 1) SQM相关器输出

图4中, 在正负一个码片间隔内, 相关峰曲线的绝对值最大值是即时相关器输出, 记为 R_0 , 距离最大值0.05码片、0.10码片、0.50码片和1.00码片的相关器输出分别记为 $R_{-0.05}$, $R_{0.05}$, $R_{-0.10}$, $R_{0.10}$, $R_{-0.50}$, $R_{0.50}$, $R_{-1.00}$, $R_{1.00}$, 设 $R = [R_{-1.00}, R_{-0.50}, R_{-0.10}, R_{-0.05}, R_0, R_{0.05}, R_{0.10}, R_{0.50}, R_{1.00}]$ 为相关器输出, 假设相关器输出服从高斯分布^[7], 则其均值 $u_R = \sqrt{2(C/N_0)TR(d_I)}$ 、方差 $\sigma_R^2 = 1$, 协方差为 $\sigma_{R1,R2} = R(d_{R1,R2})$ 。其中, $R(\cdot)$ 表示相关函数曲线, d_I 表示距离相关曲线 $R(\cdot)$ 中心点的距离, T 为相干积分时间, $d_{R1,R2}$ 为相关器R1和R2的距离, C/N_0 表示信号载噪比。

相关峰评估参数为

$$P_i = \begin{cases} \frac{R_{-m} - R_m}{R_0}, & i = 3, 4, 5, 6 \\ \frac{R_n}{R_0}, & i = 7, 8, \dots, 14 \\ P_1 = P_4 - P_3, P_2 = P_5 - P_4 \end{cases} \quad (11)$$

其中当 $i=3, 4, 5, 6$ 时, m 取值分别为0.05, 0.10, 0.50, 1.00; 当 $i=7, 8, \dots, 14$ 时, n 取值分别为-0.05, 0.05, -0.10, 0.10, -0.50, 0.50, -1.00, 1.00。因此可以计算各参数理论均值和方差如表2所示。

假设归一化信号幅度为1, 每个码片取100个采样点, 整个码片上升下降过程各13个点, 每个码片幅度为1的点为87个。本文中仿真分析了28种情况: 1~13代表波形下降过程中, 等间隔分布的第1, 2, ..., 13共13个点绝对值分别大于正常值0.3的情况; 14表示上升沿下降沿完全对称情况; 15表示完全不对称; 16~28代表上升过程中, 等间隔分布的13个点绝对值分别大于正常值0.3的情况。

研究结果表明:

(1)码片波形的不对称会产生相关曲线的不对称: 若波形下降过程的面积大于上升过程的面积, 则相关曲线右峰高于左峰, 反之亦然;

(2)波形的不对称除了产生相关峰曲线的左右不对称外, 还会产生相对于理想相关曲线的左右偏移;

(3)相关曲线评估参数中:

(a) P_3, P_4, P_9, P_{10} 对波形的不对称比较敏感, P_{13} 和 P_{14} 不敏感;

(b) P_1 仅对波形上升下降过程中的两端处的不对称敏感: 其值随着码片波形下降沿面积增大而增大; 该参数与WRaFES模型中的M3, M4, M8和M9相关性较大;

(c)与 P_1 相反, P_3 主要对上升下降过程中间部分的不对称敏感: 其值随着下降沿面积增大而增大; 该参数与WRaFES模型中的M1, M2, M5—M7相关性较大;

(d) P_4 对波形上升和下降整个过程都比较敏感: 该参数值随着下降沿面积增大而增大; 该参数与

表2 相关特性参数均值和方差

参数	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
均值	0	0	0	0	0	0	0.85
方差	$\frac{0.6}{2T(C/N_0)}$	$\frac{2.4}{2T(C/N_0)}$	$\frac{0.6}{2T(C/N_0)}$	$\frac{1.2}{2T(C/N_0)}$	$\frac{2.0}{2T(C/N_0)}$	$\frac{2.0}{2T(C/N_0)}$	$\frac{2.775}{2T(C/N_0)}$
参数	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
均值	0.85	0.70	0.70	-0.50	-0.50	0	0
方差	$\frac{2.775}{2T(C/N_0)}$	$\frac{0.51}{2T(C/N_0)}$	$\frac{0.51}{2T(C/N_0)}$	$\frac{0.75}{2T(C/N_0)}$	$\frac{0.75}{2T(C/N_0)}$	$\frac{1.0}{2T(C/N_0)}$	$\frac{1.0}{2T(C/N_0)}$

WRaFES模型中的各参数均有相关性,与M24相关性较大;

(e) P_7 和 P_9 主要对波形上升和下降过程中的后半段比较敏感:其值随着下降沿面积增大而增大;该参数与WRaFES模型中的M10, M12, M21和M23相关性较大;

(f) P_2, P_8, P_{10} 主要对波形上升和下降过程中的前半段比较敏感:其值随着下降沿面积增大而减小;该参数与WRaFES模型中的M11, M13, M20和M22相关性较大。

(3) S曲线过零点偏差分析:理论上,接收机码环鉴相曲线(S曲线)的过零点,也即码环的锁定点,应位于码跟踪误差为零处。而实际上,由于信道传输失真、多径等的影响,码环鉴相曲线常锁定在相位有偏差的地方^[8]。本文仿真分析了前面提到的各类畸变对S曲线过零点偏差的影响。

图5给出了码片波形上升沿和下降沿不对称产生的S曲线过零点偏差(S Curve Bias, SCB)影响分析。图中的1~13代表波形下降过程中,等间隔分布的第1, 2, ..., 13共13个点绝对值分别大于正常值0.3的情况,其中第1个点最靠近下降沿初始位置,第13个点最接近下降沿结束位置;第1~7个点大于零,第8~13个点小于零。因此图5(a)给出的是当下降过程中某点的值大于上升过程中相应点值的情况;图5(b)与图5(a)恰好相反,此时下降过程中的面积小于上升时的面积。

研究结果表明:码片波形上升下降过程中中间点附近的不对称,如图5中的第6, 7, 8, 9条曲线,主要影响相关峰曲线中主峰和次峰的顶峰附近对称性,而越远离码片波形翻转中间点的不对称的影响区域离相关峰顶峰位置越远,但影响范围一般不会超过距离相关峰顶峰位置正负0.05~0.06码片附近的曲线对称性,因此将主要影响相关器间隔为0.10附近S曲线过零点偏差;码片波形的不对称会在一定程度上影响SCB值的大小,下降过程的波形积分

面积小于上升过程的面积时,不管相关器间隔取值多少,带来的SCB普遍大于下降过程面积较大的情况。码片波形的不对称还会影响码片间隔小于0.10码片和大于0.90码片间隔时的SCB曲线抖动值,而且上升下降过程面积比不对称越大,带来的SCB抖动也越大。

5 实测结果

本文的数据来自于中国科学院国家授时中心吴平观测站(HRO)40 m大口径天线采集数据。该系统于2015年5月正式投入运行,有着多个高精度校准通道,利用光纤进行数据传输,能够提供高精度GNSS信号观测服务。

本文以2015年7月25日成功发射的第1颗北斗试验星M1-S为例,给出利用上述模型得到的实测统计结果。由于平稳过渡期间试验卫星B1频段(包含北斗区域信号B1I以及全球信号)各分量采用POCET方式进行恒包络复用,因此单独分析每一支路的信号就需要考虑信号分离技术。具体做法是:对进行载波剥离和导航电文剥离后的基带信号首先进行重采样,保证每个码片含有整数个采样点,由于扩频码的周期性、扩频码之间良好的正交性以及噪声的随机性,利用周期累加方法对扩频码进行多个周期累加平均,以此来达到各支路信号分离目的。

以M1-S B1Cd支路信号为例,信号分离后的基带信号波形如图6所示,其中实线表示理想信号波形,虚线表示实测信号波形。

从图6中可以明显看出,该码片波形的上升沿和下降沿的开始与结束端附近对称性稍差,上升下降过程中间点附近对称性较好。下面将利用本文提出的方法对该波形进行WRaFES参数统计分析,并分析相关峰曲线特性。同时根据实测数据情况建立检测门限,评估实测信号是否存在畸变以及畸变的程度。

本文给出了接收机稳定跟踪后1000 ms的各参数各周期统计分析结果。为了便于将各参数分析比

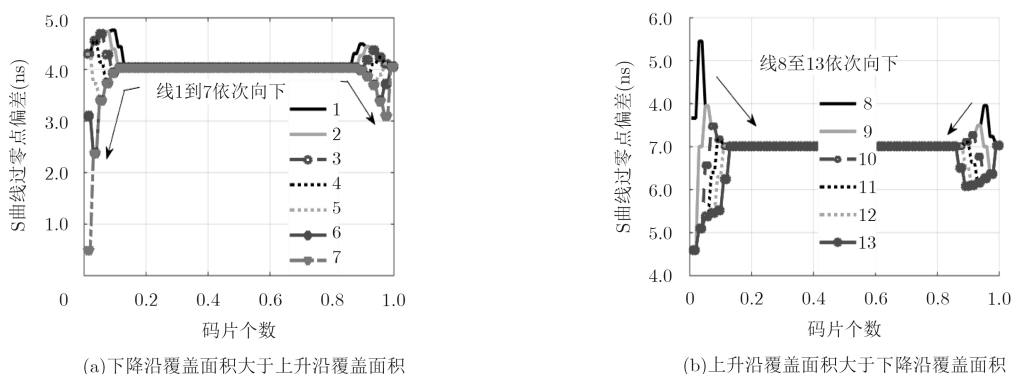


图5 码片上升下降沿不对称带来的SCB影响分析

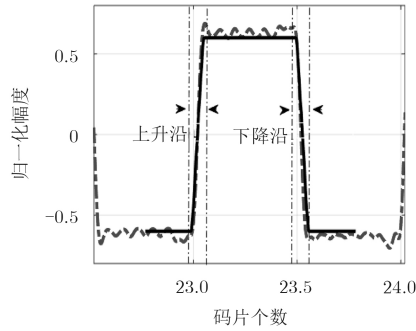


图6 分离后的BDS M1-S B1Cd基带信号波形

较，在表3给出计算结果时，本文根据各参数特点及表示的含义将参数结果显示顺序作了调整。分析结果表明在观测期间：

- (1)信号各个码片上升沿下降沿特性稳定，无明显突变现象；
- (2)码片上升和下降过程中对称性稍差：下降过程中各点的数值相比上升过程中对应点的数值绝对值稍大；
- (3)码片翻转时刻对称性稍差：翻转点附近大于零的部分对称性较小于零的部分好；
- (4)该分析结果与信号实际特性相符，证明了WRaFES模型的有效性和可行性。

假设相关器输出结果服从高斯分布^[7]，则相关曲线各参数检测门限可以表示为

$$\text{Thred}_i = \text{Mean}_i \pm \sigma_i \text{erf}^{-1}(1 - P_{fa}) \quad (12)$$

其中， $\text{erf}^{-1}(\cdot)$ 表示误差函数的逆， P_{fa} 表示期望误警概率， Mean_i 为第*i*个参数的均值， σ_i 为第*i*个参数的均方差。实际应用中，可以根据实测环境情况设置相应的均值及检测门限。

由于本文数据采用高精度大口径天线采集，因此可以认为实测信号具有理论均值和方差特性。此时的 $P_{fa} = 10^{-5}$ ， $C/N_0 = 65 \text{ dB} \cdot \text{Hz}$ ，则各参数实测结果以及各参数门限值如表4所示。

分析结果表明实测M1-S B1Cd支路信号相关曲线存在一定程度的不对称。结合前文4.3节中对相关峰曲线参数特性的分析，可以得出以下结论：

- (1)距离相关峰中心0.1~0.50码片区间段的对称性稍好于距离相关峰中心0.1~0.05码片区间段的对称性；
- (2)在距离相关峰中心0.05~0.50码片区间段内，距中心0.10码片处的对称性稍差，这与图5仿真分析结果以及信号实际特性相符，证明了该相关曲线模型的有效性和可行性；
- (3)从相关曲线各参数均值和标准差统计结果看，实测结果均较小，满足门限指标要求。但是由于在某些区间内相关曲线的对称性稍差，建议用户在进行相关器间隔选取时，避开这些对称性差的区间，从而尽可能地减小波形不对称带来的测距误差。

6 结束语

本文首先以传统的ICAO模型出发，推导出了适用于各种GNSS新型信号的扩展畸变模型，并通过仿真分析验证了模型的正确性；接着提出了一种用于分析波形不对称性的WRaFES模型，可作为传统及扩展后的TMA/TMB/TMC模型的有效补充，解决了传统方法无法进行导航信号波形不对称性分析的难题；最后，以2015年7月25日发射的第1颗北斗全球试验卫星M1-S B1频点B1Cd信号为例，利用本文提出的WRaFES模型及相关评估方法，对

表3 BDS M1-S B1CdWRaFES 参数统计结果

参数	M1	M2	M5	M6	M7	M24	M14	M15	M16	M17	M18	M19
均值	0.0132	0.0149	0.0118	0.0014	0.0162	0.0091	0.5775	0.5893	0.0010	0.0003	0.5766	0.5928
标准差	0.1233	0.1396	0.1568	0.1292	0.1708	1.6188	0.0942	0.1359	0.0896	0.0942	0.1223	0.1571
参数	M3	M4	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M20	M21	M22	M23
均值	0.0008	0.0110	0.0339	0.0247	1.0391	1.0383	0.9369	0.9481	0.9321	0.9659	1.0425	1.0673
标准差	0.2455	0.1999	0.2571	0.3510	0.1557	0.2294	0.1089	0.1809	0.1941	0.2557	0.2759	0.3286

表4 BDS M1-S B1Cd实测相关特性参数统计结果

参数	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
均值	0.0148	-0.0002	-0.0022	0.0114	0.0099	-0.0048	0.8663
标准差	0.0352	0.0488	0.0369	0.0369	0.0526	0.0745	0.0076
参数	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
均值	0.8698	0.7160	0.7060	-0.5013	-0.5099	0.0151	0.0211
标准差	0.0079	0.0121	0.0136	0.0593	0.0636	0.0576	0.0728

实测数据进行精细分析, 试验结果表明: 观测时间段内该颗卫星B1Cd信号波形出现不对称, 从而导致相关曲线在某些区间对称性稍差, 影响信号测距性能, 这与实际卫星信号质量分析结果相吻合。

下一步工作将重点研究不同类型的多径和干扰对卫星导航信号波形畸变的影响, 并分别建立一套能够区分并评估不同多径和干扰特性的卫星导航信号畸变评价参数。另外, 研究针对不同SQM参数的自适应相关器间隔选取方法, 从而可以在提高信号畸变检测准确度的同时降低检测时间, 提高接收机对异常信号检测灵敏度。

致谢

感谢吴平观测站相关人员帮助开展卫星信号数据采集工作, 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).
 - [2] EDGAR C, CZOPEK F, and BARKER L B. A cooperative anomaly resolution on PRN-19[C]. Proceedings of 1999 Institute of Navigation GPS, Nashville, Tennessee, USA, 1999: 2269–2271.
 - [3] 贺成艳, 郭际, 卢晓春, 等. GNSS导航信号常见畸变产生机理及对测距性能影响分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(7): 1611–1620. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2015.07.22](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2015.07.22).
HE Chengyan, GUO Ji, LU Xiaochun, *et al.* Generation mechanisms of GNSS navigation signal distortions and influence on ranging performance[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(7): 1611–1620. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2015.07.22](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2015.07.22).
 - [4] PHELTS R E. Multicorrelator techniques for robust mitigation of threats to GPS signal quality[D]. [Ph.D. dissertation], Stanford University, 2001: 1–345.
 - [5] FONTANELLA D, PAONNI M, and EISSFELLER B. A novel evil waveforms threat model for new generation GNSS signals: theoretical analysis and performance[C]. Proceedings of the 20105th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Noordwijk, Netherlands, 2010: 1–8. doi: [10.1109/NAVITEC.2010.5708037](https://doi.org/10.1109/NAVITEC.2010.5708037).
 - [6] MISRA P and ENGE P. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance[M]. 2nd ed. Lincoln, MA, Ganga-Jamuna Press, 2006: 1125–1134.
 - [7] JAHROMI A J, BROUMANDAN A, DANESHMAND S, *et al.* Galileo signal authenticity verification using signal quality monitoring methods[C]. Proceedings of 2016 International Conference on Localization and GNSS, Barcelona, Spain, 2016: 1–8. doi: [10.1109/ICL-GNSS.2016.7533684](https://doi.org/10.1109/ICL-GNSS.2016.7533684).
 - [8] 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]. [博士论文], 中国科学院大学, 2013: 1–205.
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: 1–205.
- 贺成艳: 女, 1986年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为卫星导航信号接收处理、信号质量评估等。
卢晓春: 女, 1970年生, 研究员, 研究方向为卫星导航定位系统设计和建设。
郭际: 男, 1955年生, 研究员, 研究方向为天文测时、数据误差分析、导航系统建设等。