

北斗系统GEO-3卫星临退役期B1信号质量研究

石慧慧^{*①②③} 王 萌^{①②③} 饶永南^{①②} 卢晓春^{①②④} 王 雪^{①②③}

^①(中国科学院国家授时中心 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 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(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 101408)

摘 要: 北斗2号系统于2012年正式向亚太地区提供服务, 其中GEO-3卫星已退役, 由GEO-7卫星替代。研究卫星临退役期间的信号质量特性不仅能够分析北斗2号系统卫星载荷状态, 而且为其它临退役星的信号特性估计提供重要的参考价值, 同时对北斗3号系统GEO卫星载荷信号质量控制与优化具有重要的借鉴意义。该文利用吴平观测站40 m大口径天线的多源多手段数据, 分析了GEO-3卫星B1民用信号的功率谱、地面接收功率、S曲线过零点偏差(SCB)的长期变化趋势, 给出了相应的统计结果, 提出了针对卫星载荷信号质量优化的相关建议, 也对超期服役卫星的决策提供了参考。

关键词: 北斗卫星导航系统; 临退役卫星; 地面接收功率; S曲线过零点偏差

中图分类号: TN911.6; TN927.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1573-08

DOI: 10.11999/JEIT190383

Researches on Pro-retirement Signal Quality of BeiDou Navigation Satellite System GEO-3 Satellite B1 Signal

SHI Huihui^{①②③} WANG Meng^{①②③} RAO Yongnan^{①②}
LU Xiaochun^{①②④} WANG Xue^{①②③}

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

^②(Key Laboratory of Precision Navigation, Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

^③(School of Electronic and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

^④(School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: The BDS-2 (BeiDou-2 System) officially provided services to the Asia-Pacific region in 2012. The GEO-3 satellite has been retired and replaced by the GEO-7 satellite. Studying the signal quality characteristics of the satellite during the pro-retirement period can not only analyze the satellite payload status of the BDS-2, but also provide important reference value for other signal characteristics of the pro-retirement satellite. At the same time, it has important enlightenment and reference significance for the signal quality controlling and optimizing of the GEO satellite load of the BDS-3. Using the multi-method monitoring data of the 40 m large-diameter antenna of the Hao-ping Radio Observatory(HRO), the power spectrum, the ground receiving power and S-Curve Bias (SCB) of the GEO-3 satellite B1 civil signal are analyzed. The long-term trend of these characteristics is given, and the corresponding statistical results are given. Relevant suggestions for satellite payload signal quality optimization are proposed.

Key words: BeiDou navigation satellite System(BDS); Pro-retirement satellite; Ground receiving power; S-Curve Bias (SCB)

收稿日期: 2019-05-28; 改回日期: 2019-09-19; 网络出版: 2020-01-21

*通信作者: 石慧慧 shihuihui@ntsc.ac.cn

基金项目: 国家重大专项(GFZX0306ZXWX004HT01)

Foundation Item: The National Key Projects of China (GFZX0306ZXWX004HT01)

1 引言

GPS SV19卫星在1993年由于射频电路故障导致载波泄漏从而引起3~8 m定位偏差,为了保障导航系统的服务性能,尤其是精密单点定位(PPP)、泥石流等地质灾害监测方面的应用,应该对导航信号性能进行实时监测,对星上发射机等相关载荷进行状态跟踪与信号质量控制,以免类似恶性事件的产生。北斗2号系统(BDS-2)于2012年正式向亚太地区提供服务,北斗3号卫星工程于2018年12月27日正式向“一带一路”国家和地区提供基本导航服务,迈出从区域走向全球的“关键一步”。卫星导航系统空间信号质量的优劣直接关系着系统的高精度服务水平,因此空间信号质量评估工作必不可少。

为了通过星上载荷通道预失真技术调整卫星信号发射通道特性,使得载荷通道特性在发射带宽内的幅度失真和群时延失真得到抑制,北斗3号卫星星上载荷新增了信号质量控制模块。因此本文的研究对新一代卫星载荷信号质量优化与控制具有重要借鉴意义。

基于此研究背景,本文突破传统信号质量评估单一数据源的局限性,利用高性能的数据采集设备、测试测量仪器实现GEO-3卫星B1信号的多源多手段数据采集,以信号畸变模型和信号质量评估标准为依据利用多源数据融合处理方法实现该卫星临退役期间信号质量的长期评估。通过对2018年1月至6月期间GEO-3卫星B1信号进行监测,从功率谱、地面接收功率、相关特性等参数出发,以理论分析、测试方法和公式推导为基础介绍了这些参数的概念;然后利用实测数据对B1频点功率谱、地面接收功率与B1频点民用信号(I支路)的相关特性开展了长期特性分析,最后给出本文结论及对北斗2号卫星信号质量监测与北斗3号卫星信号质量控制的建议。

2 监测评估原理

为了更好地实现对星上导航信号高精度高逼真的监测和评估,减少空间传输过程和接收环节等附加因素对信号质量评估的影响,包括美国斯坦福大学、德国宇航研究院和中国科学院国家授时中心、中电集团第54所等在内的国内外科研机构均采用大口径抛物面天线接收空间GNSS信号进行信号质量监测评估^[1-9]。然而从国内外信号质量评估相关文献来看,目前的研究成果多利用单一数据源对信号进行单次与短期分析,缺乏对信号长期特性变化趋势的对比与研究,缺乏对卫星服务寿命末期的信号质量特性进行评估。为此开展卫星服务寿命末期信号质量长期特性的评估,监测其退役前的信号质量变化趋势,填补了在轨卫星下行信号质量监测评估的空白。

导航信号的两大关键组成部分为伪随机码与载波,下面针对伪随机码与载波有可能受到的影响进行仿真,并给出受影响后的相关峰与功率谱。

(1)斯坦福大学Phelts博士提出的“2nd-Order Step”(2-OS)模型是用来描述导航卫星有效载荷畸变的重要理论模型^[10]。载荷可分为数字器件和模拟器件两个部分。数字畸变主要产生于导航卫星有效载荷信号生成单元的数字电路部分,当发生数字畸变时,基带信号的正码片和负码片时间宽度产生了一致现象,更具体来说,正码片下降沿过零点出现偏移,如图1所示,且数字畸变信号的相关峰和功率谱与理想信号相比,均出现了形状上的变化。

模拟失真则发生在载荷的模拟部分,是由整个载荷通道特性决定的,在2-OS模型中将载荷通道模型建立为2阶线性系统模型。利用BPSK调制信号对模拟畸变的全部抖动过程,即上升时间、下降时间、信号的振铃抖动最大点、信号保持部分等进行仿真,模拟畸变信号与理想信号的对比情况见图2。

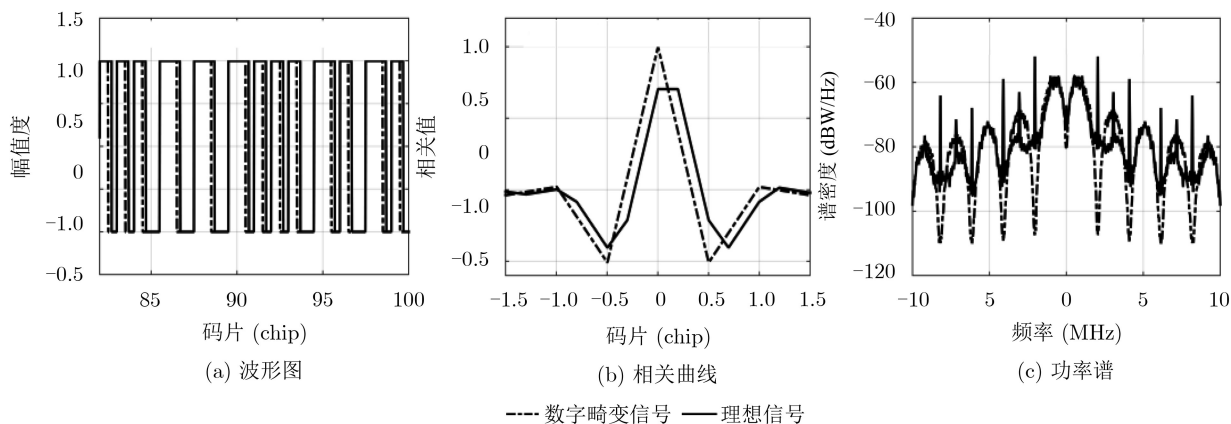


图1 数字畸变信号与理想信号之间的对比图

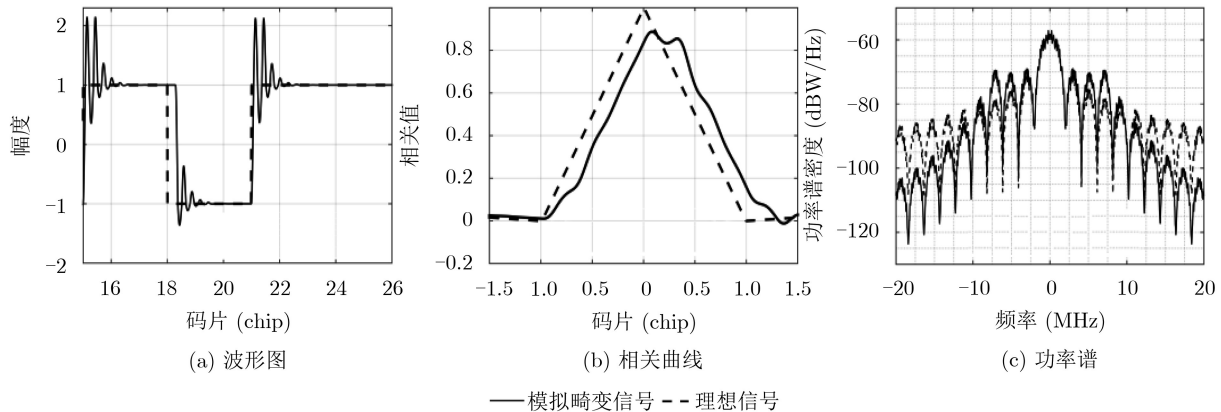


图2 模拟畸变信号与理想信号之间的对比图

(2) 导航卫星上发射机异常, 通常为星上滤波器高低端不对称, 可能会造成信号功率谱不对称, 随着谱不对称程度的增加, 将会对信号的性能产生影响, 增加信号测距误差。在导航卫星信号基于模拟正交调制方案产生时, 在调制过程中若载波抑制不足至载波泄漏至输出端就可能造成信号中心频点及第一旁瓣零点处存在高于信号正常功率谱包络的能量, 即可能造成载波泄漏现象, 该现象会影响信号接收信噪比, 进而影响接收机相关器输出结果, 降低系统的导航定位性能^[11]。根据载波泄漏机理, 利用BPSK信号仿真实现了载波泄漏现象, 如图3所示。

通过以上仿真, 对导航信号(码片与载波两部分)可能受到的干扰及其表现形式进行了分析, 这对后续的试验提供了理论基础。

3 监测评估系统与分析方法

本文数据均来自于中国科学院国家授时中心吴平观测站以40 m大口径天线为核心的GNSS空间信号质量评估系统。该40 m天线类型为卡塞格伦天线, 采用后馈的方式接收信号, 在L波段内增益大于50 dBi, 波束宽度约为0.3°, 天线的跟踪精度约为0.015°, 导航信号从天线主反射面至直径40 m的副反射面后, 汇聚到主反射面中心的馈源, 经过光

纤传输至位于主控机房的评估系统。高精度的信号质量评估要求接收系统失真小, 该系统配备通道校正子系统, 可快捷地对通道的幅频特性和群时延特性进行测量, 最大限度地减小地面接收系统对信号质量的影响^[12]。

NI数据采集设备采样率为250 MHz, 数据类型为整型, 比特位数为14。安捷伦N9030信号分析仪, B1频点信号通道功率测量时的参数设置情况如下: 视频带宽VBW: 30 kHz; 分辨率带宽RBW: 30 kHz; 积分带宽: 4.092 MHz。

3.1 地面接收功率测试方法

各大卫星导航系统公布的接口文档中均包含对地面接收功率最小值的限定, 地面接收功率是信号质量评估中的关键参数。由于导航信号在空间传播时可能受到各类误差因素的影响, 为了准确衡量GEO-3卫星临退役前的功率变化特性, 本节以40 m高增益天线作为硬件支撑, 利用安捷伦N9030信号分析仪对信号主瓣带宽内的通道功率进行监测。

在进行功率测量时, 信号分析仪检波方式采用均方根检波, 不插入电压平均功能, 也不进行踪迹平均。待功率数据测试完毕后, 将获得的功率值 P 减去系统增益 G 即可获得精确的地面接收功率 $\hat{P}$, 即

$$\hat{P} = P - G \quad (1)$$

3.2 相关特性分析方法

理想情况下, 接收机码环鉴相曲线(S曲线)的过零点应位于码跟踪误差为0处, 而实际上由于信道传输失真、噪声等影响会给码环带来锁定偏差。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曲线的算式为^[7,9]

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

其中, 归一化相关函数CCF定义为^[7,9]

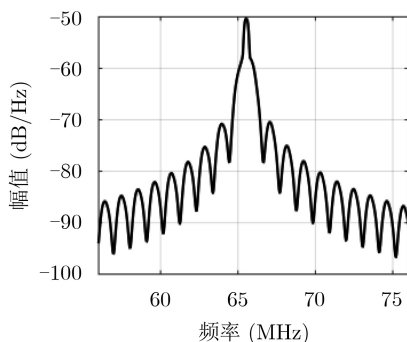


图3 载波泄漏下的功率谱频率

$$\begin{aligned}
 \text{CCF}(\varepsilon) &= \frac{\int_0^{T_P} S_{\text{BB-PreProc}}(t) \cdot S_{\text{Ref}}^*(t - \varepsilon) dt}{\sqrt{\left(\int_0^{T_P} |S_{\text{BB-PreProc}}(t)|^2 dt \right) \cdot \left(\int_0^{T_P} |S_{\text{Ref}}(t)|^2 dt \right)}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中, $S_{\text{BB-PreProc}}$ 为接收的预处理基带信号, S_{Ref}^* 为本地参考信号, T_P 为积分时间, ε 表示延迟。

锁定点 $\varepsilon_{\text{bias}}(\delta)$ 偏差满足

$$\text{SC}(\varepsilon_{\text{bias}}(\delta), \delta) = 0 \quad (4)$$

本文将绘制接收信号鉴相曲线锁定点偏差 $\varepsilon_{\text{bias}}(\delta)$ 随超前—滞后间距 δ 的变化曲线。

4 试验结果

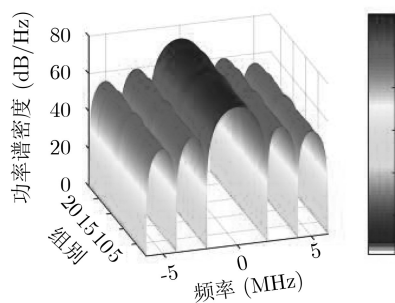
我国北斗卫星导航系统星座构成与国外导航系统不同, 在北斗2号与北斗3号系统中均采用了独有的静止轨道GEO卫星^[13], 其中北斗2号系统GEO-3卫星于2010年6月2日晚23:23成功发射, 并于2018年9月29日停止提供服务, 由GEO-7卫星替代。北斗2号卫星设计寿命为8年, 但是实际上的卫星使用寿命一般要比设计时间更加长一些, 在本文中将临近设计寿命的前一年认为临退役期。按照卫星导航系统长期管理机制, 在卫星服役末期由于燃料、星上载荷元器件老化等问题会导致该卫星提供

的导航服务性能有所下降, 甚至不能够满足导航服务指标要求, 但是为了整体上提升卫星资源利用率, 一般会在卫星燃料耗尽前根据卫星状态转为其它用途, 不会立刻对卫星进行离轨控制, 进入坟墓轨道^[14]。因此对卫星临近设计寿命时的状态与功能进行监测就显得至关重要。

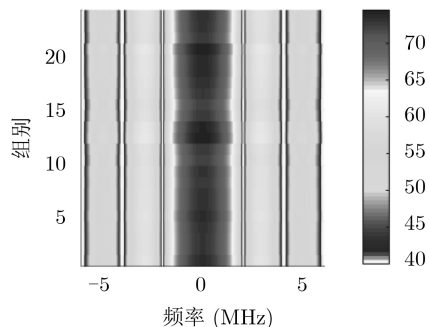
4.1 功率谱长期特性分析

本节采用GNSS信号功率谱分析的常用方法: Welch周期图法^[15]对GEO-3卫星B1频点功率谱进行分析。其调制方式为QPSK(2), 主瓣频率为 $-2.046 \sim 2.046$ MHz。图4展示了对2018年1月至6月GEO-3卫星B1频点离线采集数据功率谱分析结果, 给出了24组数据谱变换的3维功率谱和功率谱色温图。

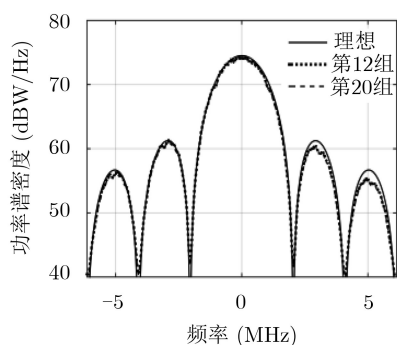
从图4(a)中可以看出B1频点信号功率谱主瓣谱线包络较平滑, 对称性较好, 无载波泄漏现象发生。图4(b)中可以明显看出第12组和第20组数据功率谱密度在主瓣带宽内颜色最深部分明显宽于其它组数据, 为此图中给出了利用平滑算法画出实际信号的功率谱包络, 并且与理想信号功率谱包络进行对比, 通过考察二者之间的相似度来定量评价由于信道引起的谱失真程度。从图4(c)和图4(d)中可以看出, 这两组数据B1信号主瓣和旁瓣清晰, 与理想谱拟合度较好, 拟合残差绝对值小于1 dB/Hz, 可以判断信号功率谱正常, 无明显畸变。



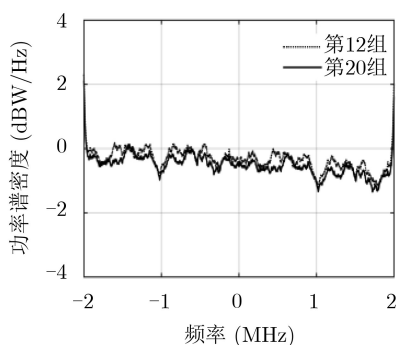
(a) 3维功率谱



(b) 功率谱色温图



(c) 与理想谱对比图



(d) 与理想谱残差

图4 2018年1月至6月GEO-3卫星B1频点功率谱

4.2 地面接收功率长期特性分析

地面接收功率主要是利用吴平观测站40 m大口径天线及接收通道接收GEO-3卫星射频信号, 信号经过天线、低噪声放大器、射频传输通道直接接入信号分析仪实现信号的通道功率和功率谱观测, 然后根据通道功率测试结果反推到地面接收天线口面的信号接收功率^[12]。

在2018年1月至6月, 对GEO-3卫星B1频点地面接收功率进行了长期监测, 采集了22组地面接收功率数据, 数据更新周期为1 s, 每组数据的监测时长为2 h。以2018年6月25日的地面接收功率为例, 图5中给出了原始功率数据和平滑后数据的对比曲线。从图5(a)中可以看出: 观测时间段内, 该卫星地面接收功率原始测量数据抖动范围很小, 其

峰峰值约为1 dB, 标准方差为0.36 dB。这一方面验证了40 m大口径天线接收通道的高稳定性接收能力, 以及地面纯净的电磁环境特性; 另一方面, 也反映了该卫星地面接收功率稳定性较好, 在观测时间段内未出现功率的明显波动。

对其进行平滑处理后得到图5(b), 可见平滑后的曲线迹线细且较光滑, 更能看出其数值变化情况。因此, 在2018年1月至6月的长期变化趋势分析中, 采用平滑后数据的均值作为每一天的功率统计值进行长期特性的研究和分析, 如图6所示。其中, 1月3日至4月18日期间内, B1频点地面接收功率呈现下降趋势, 从-156.42 dBW下降到-158.57 dBW, 下降了2.15 dB。在4月18日之后, B1频点信号可能进行了功率调整, 其趋势基本保持平稳。

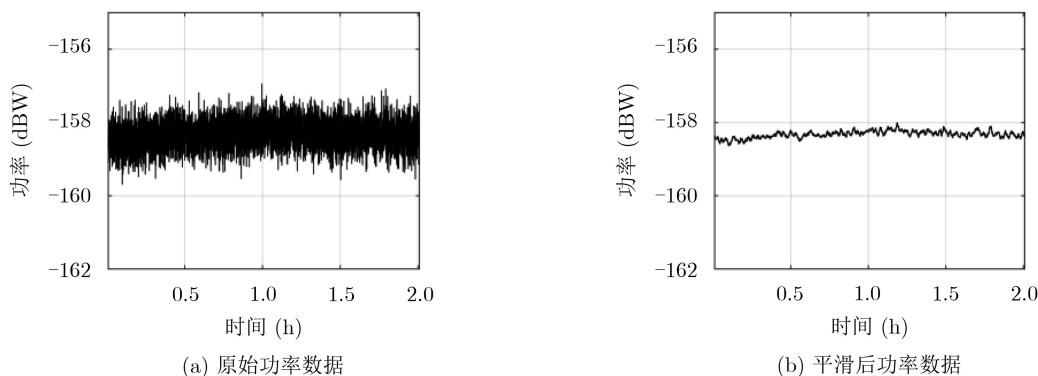


图5 2018年6月25日GEO-3卫星B1频点地面接收功率曲线

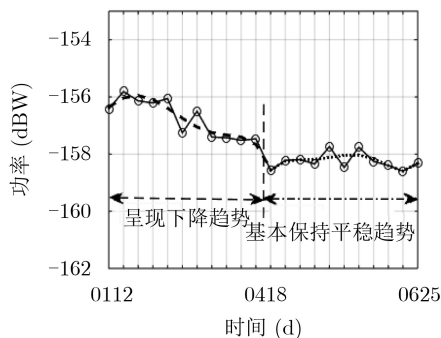


图6 2018年1月至6月GEO-3卫星B1频点地面接收功率均值变化趋势

北斗系统空间信号接口控制文件中规定当卫星仰角大于 5° , 在地球表面附近的接收机右旋圆极化天线为0 dB增益时, 卫星发射的导航信号到达接收机天线输出端的I支路最小保证电平为-163 dBW, 即B1频点(包含I/Q两支路)的最小保证电平为-160 dBW。通过对图6中功率变化趋势进行推测, 如果4月18日未对该卫星信号功率进行调整, 则该卫星B1频点功率很有可能会下降到-160 dBW之下, 即功率下降到满足不了导航服务性能的程度。这时候是将其

推进坟墓轨道, 还是转为其它运用从而提高卫星应用的服务周期, 需要对其性能进行监测才可以做出决策。比如通信卫星在设计寿命末期, 由于燃料的限制, 不能够对其进行频繁的控轨, 所以某些通信卫星转为透明转发器继续使用, 这也对载荷设计方提出了建议: 可以提前规划卫星的不同使用场景。

4.3 相关特性分析

导航信号的S曲线过零点偏差是唯一能够定量分析信号测距偏差的评估参数, 在信号发射带宽下, S曲线过零点偏差能够定量分析载荷通道特性给信号带来的测距偏差^[16]。在本节数据分析中, 软件接收机民用信号B1I码环相关间隔设为0.4码片, 载波环环路带宽设置为10 Hz。根据北斗ICD的要求, BII数据分析时选取的工作带宽(3 dB)为16 MHz(以B1I信号载波频率为中心)。选取2018年1月至6月的数据进行测试与分析, 一共采集了22组数据, 平均每周1组数据。由于篇幅限制, 图7仅给出了几组有代表性的数据。

图7(a)为GEO-3卫星B1I信号的SCB变化趋势, 可以看出, 半年来B1I信号在鉴相器间隔0.5码

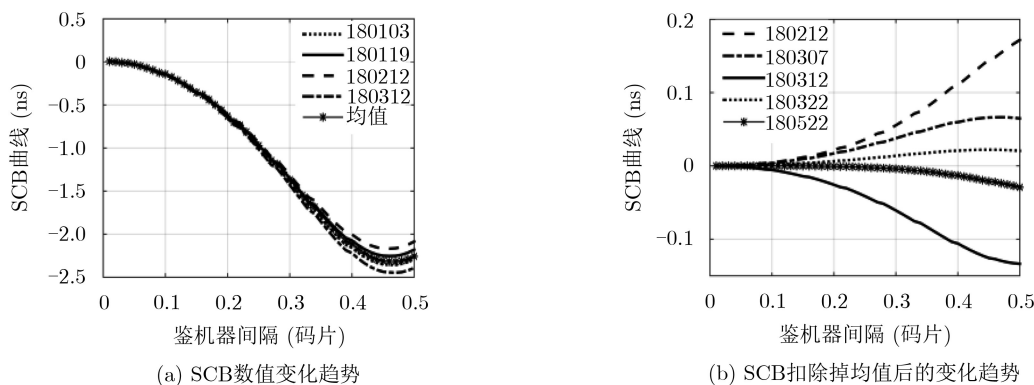


图7 2018年1月至6月GEO-3卫星B1I信号SCB分析

片之内的SCB数值均比较集中,在0.45码片时测距偏差为2.0~2.5 ns。为了排除随机噪声的影响,将图7(a)中SCB数值减去均值,得到图7(b)中扣除掉均值后的SCB变化趋势,其总体波动范围为-0.13~0.17 ns。即卫星上载荷通道特性给信号带来的测距偏差总体变化范围在-0.04~0.05 m。

在实际应用中,接收机内部鉴相器间隔的选取直接决定了码跟踪测量精度,因此将鉴相器间隔为0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5码片处不同时间段的SCB数值进行画图,得到图8中的5个典型码片处的SCB数值变化趋势情况。分析结果表明:从整体上来看,5个典型码片处SCB数值的变化趋势均基本保持平稳,说明随着时间的推移,星上载荷器件的老化没有导致B1频点SCB数值发生明显的恶化,但是由于接收机鉴相器间隔越大信号受到的干扰越多,SCB数值受到的影响越大,因此随着码片的增大,0.4码片与0.5码片处的曲线出现了随机抖动。

GNSS接收机主要是通过码相关器对接收到的卫星信号与其内部复制的理想测距码做相关运算从而实现卫星信号的捕获、跟踪以及测距计算的。因此,卫星下行信号的相关特性显得尤为重要,直接关系到卫星信号的测距性能^[17]。在实际应用中,卫星信号相关特性可能受到卫星有效载荷性能异常、空间传播环节和本地接收通道滤波器带限等因素的影响。其中空间传播环节主要受

电离层和对流层的影响,可以利用硬件接收机通过双频组合实现电离层效应实时观测,将电离层和对流层的影响降至最低^[18,19]。本地接收通道的影响可以通过天线接收系统的通道标校子系统对通道的幅频特性和群时延特性进行准确测量,接收通道给B1频点信号引入的测距偏差为ps级,故大口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^[7,8]。因此通过分析高增益天线接收系统采集数据的相关特性可以直接对导航卫星有效载荷性能异常造成的测距偏差进行定量分析。当该卫星的相关特性发生恶化且在用户接收机的可视范围内时,该卫星参与定位解算时,可能会给用户带来更大的定位偏差。通过对该卫星临退役期间的相关特性进行分析,可以对其测距偏差的变化动态进行实时掌控,避免相关特性恶化对用户接收设备正常使用造成的影响。

5 结束语

本文利用国家授时中心吴平观测站40 m天线系统,自2018年1月起对GEO-3卫星B1频点民用信号进行了长时间监测,利用功率谱、地面接收功率、相关特性这些评估参数对其临退役期间的信号质量长期特性进行了详细的分析。在观测时间段内B1民用信号的各个参数性能均符合指标要求,暂不影响用户设备的正常使用,但是从各参数的长期变化趋势可以发现,各个参数在观测时间段内均发生了不同程度的抖动,尤其是地面接收功率在4月18日之前呈现明显的下降趋势,4月18日可能进行了功率调整,该日之后变化趋于平稳。从中可以看出对临退役卫星信号质量进行长期分析的必要性:只有对其信号质量进行长期监测与分析,才能及时发现星上有效载荷性能异常对信号测距性能造成的恶化,避免对用户端定位等导航功能的正常使用造成影响。同时本文的研究成果可供北斗3号卫星导航系统星上有效载荷信号质量控制模块提供参考。这也对超期服役的卫星控制提供了建议与参考。

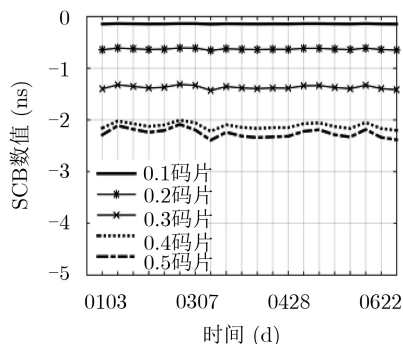


图8 2018年1月至6月GEO-3卫星B1I信号典型码片处SCB数值

参 考 文 献

- [1] SPELAT M, HOLLREISER M, CRISCI M, *et al.* GIOVE-A signal-in-space test activity at ESTEC[C]. ION GNSS 2006, Fort Worth, USA, 2006: 26–29.
- [2] SOELLNER M, KURZHALS C, HECHENBLAIKNER G, *et al.* GNSS offline signal quality assessment[C]. ION GNSS 2008, Savannah, USA, 2008: 909–920.
- [3] 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](https://doi.org/10.1007/s10291-014-0426-0).
- [4] THOELERT S, ERKER S, and MEURER M. GNSS signal verification with a high gain antenna-calibration strategies and high quality signal assessment[C]. The 22th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Anaheim, USA, 2009: 289–300.
- [5] 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](https://doi.org/10.1002/navi.165).
- [6] 卢晓春, 周鸿伟. 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 Xiaochun and ZHOU Hongwei. Methods of analysis for GNSS signal quality[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, 40(5): 528–533.
- [7] 康立, 卢晓春, 王雪, 等. GPS L1频点授权信号质量评估[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 905–911. doi: [10.11999/JEIT170440](https://doi.org/10.11999/JEIT170440).
KANG Li, LU Xiaochun, WANG Xue, *et al.* Authorized signals quality assessment on GPS L1[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 905–911. doi: [10.11999/JEIT170440](https://doi.org/10.11999/JEIT170440).
- [8] 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, 2018, 40(4): 1002–1006. doi: [10.11999/JEIT170591](https://doi.org/10.11999/JEIT170591).
KANG Li, LU Xiaochun, WANG Xue, *et al.* Navigation signal chip domain assessment on Beidou navigation system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 1002–1006. doi: [10.11999/JEIT170591](https://doi.org/10.11999/JEIT170591).
- [9] 贺成艳, 郭际, 卢晓春, 等. 北斗卫星导航系统B1信号伪距偏差问题研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2698–2704. doi: [10.11999/JEIT180074](https://doi.org/10.11999/JEIT180074).
HE Chengyan, GUO Ji, LU Xiaochun, *et al.* Researches on pseudo-range biases of BeiDou navigation satellite system B1 signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2698–2704. doi: [10.11999/JEIT180074](https://doi.org/10.11999/JEIT180074).
- [10] PHELTS R E. Multicorrelator techniques for robust mitigation of threats to GPS signal quality[D]. [Ph.D. dissertation], Stanford University, 2001.
- [11] 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.
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.
- [12] 卢晓春, 贺成艳, 王雪, 等. 卫星导航信号评估系统设计及信号性能评估[J]. 时间频率学报, 2017, 39(3): 225–246.
LU Xiaochun, HE Chengyan, WANG Xue, *et al.* Design of GNSS monitoring and assessment system and assessment of GNSS signal-in-space[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2017, 39(3): 225–246.
- [13] 吴鹏. 卫星导航系统GEO卫星多径机理与多径抑制方法研究[D]. [博士论文], 西北工业大学, 2017.
WU Peng. Research on the mechanism and mitigation algorithm of GEO satellite multipath error[D]. [Ph.D. dissertation], Northwestern Polytechnical University, 2017.
- [14] 姚凡凡, 黄霄腾, 刘淮. GEO卫星寿命末期异常情况下离轨控制策略[J]. 飞行器测控学报, 2017, 36(1): 38–44.
YAO Fanfan, HUANG Xiaoteng, and LIU Zhun. End-of-lifetime deorbiting control strategy for GEO satellites under abnormal circumstances[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2017, 36(1): 38–44.
- [15] 石慧慧. GPS信号仿真与实测数据离线分析[D]. [硕士论文], 中国科学院大学, 2013.
SHI Huihui. Simulation of GPS signal and GPS offline signal analysis[D]. [Master dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [16] 刘建成, 范建军, 冯晓超, 等. 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](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2015.11.011).
LIU Jiancheng, FAN Jianjun, FENG Xiaochao, *et al.* 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](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2015.11.011).
- [17] 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).
- [18] 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. doi: [10.1007/s10291-018-0698-x](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0698-x).

- [19] 周鸿伟, 魏蛟龙, 张小清, 等. 导航卫星有效载荷非理想特性研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(7): 118–123.
ZHOU Hongwei, WEI Jiaolong, ZHANG Xiaoqing, *et al.* Research on non-ideal property of payload core device on navigation satellite[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2014, 42(7): 118–123.

石慧慧: 女, 1987年生, 助理研究员, 主要从事GNSS导航信号分析处理及信号质量监测评估等方面的工作.

王 萌: 女, 1993年生, 博士生, 研究方向为GNSS信号质量评估及通道预失真研究.

饶永南: 男, 1982年生, 副研究员, 硕士生导师, 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.

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.

责任编辑: 陈 倩