

## 北斗三号基本系统空间信号质量评估

宿晨庚<sup>\*①②</sup> 郭树人<sup>①</sup> 刘旭楠<sup>③</sup> 饶永南<sup>④</sup> 王萌<sup>④</sup>

<sup>①</sup>(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

<sup>②</sup>(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

<sup>③</sup>(自然资源部海洋减灾中心 北京 100194)

<sup>④</sup>(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

**摘要:** 全球卫星导航系统(GNSS)空间信号(SIS)质量直接影响了用户使用性能。北斗三号卫星不同于北斗二号卫星,将继续播发北斗二号老信号,同时新增播发B1C, B2a等新信号,多频多信号多分量的信号体制较北斗二号更为复杂,对导航卫星信号质量控制提出了较大挑战。2018年底北斗系统完成了18颗卫星组网,完成北斗三号基本系统建设并开始提供全球服务,有必要对北斗三号在轨卫星空间信号质量进行量化评估。传统空间信号质量评估方法侧重于单项的定性评估,而针对北斗三号复杂的信号体制,缺乏系统的、定量的分析结果。该文对标北斗系统接口控制文件(ICD),从功率特性、频域特性、时域特性、相关域特性和信号一致性等方面研究了不同参数配置对评估结果的影响,形成了一套面向新型调制方式和多频多分量复用信号的量化评估方法。基于40 m大口径天线的空间信号质量评估系统,对18颗MEO卫星进行了长时间监测跟踪和数据采集,首次对北斗三号卫星空间信号质量进行了全面量化评估。结果表明:北斗三号卫星空间信号质量良好,18颗MEO卫星一致性较好,符合ICD指标要求,可满足服务区内用户需求;评估方法可用于对后续导航卫星空间信号质量的量化评估。

**关键词:** 北斗三号; 全球卫星导航系统; 空间信号质量; 性能评估

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)11-2689-09

DOI: 10.11999/JEIT190683

## Signal Quality Assessment of BDS-3 Preliminary System

SU Chengeng<sup>\*①②</sup> GUO Shuren<sup>①</sup> LIU Xunan<sup>③</sup> RAO Yongnan<sup>④</sup> WANG Meng<sup>④</sup>

<sup>①</sup>(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

<sup>②</sup>(College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>③</sup>(National Marine Hazard Mitigation Service, Beijing 100194, China)

<sup>④</sup>(National Timing Service Center, China Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** The Signal-In-Space (SIS) quality affects directly the user performance of Global Navigation Satellite System (GNSS). Unlike BDS-2, the BDS-3 satellites not only broadcast old signals, but also broadcast new signals such as B1C and B2a at the same time. The signal structure of BDS-3 with multi-frequency, multi-signal and multi-component is more complex than BDS-2, which is a great challenge to signal quality control of BDS-3 satellites. By the end of 2018, 18 BDS-3 satellites were successfully launched and the BDS-3 preliminary system is completed to provide global services. It is necessary to evaluate the signal quality of BDS-3. Traditional signal quality assessment methods focus on the qualitative assessment of a single item, but lacks systematic and quantitative analysis results for the complex signal structure of BDS-3. Based on the Interface Control Document (ICD) of BDS, this paper studies the influence of different parameter configurations on the evaluation results from the aspects of power characteristics, frequency characteristics, time characteristics, correlation characteristics and signal consistency, and forms a set of quantitative evaluation methods for new modulations and multi-frequency, multi-component signals. Based on the signal quality assessment system with 40-meter aperture antenna, 18 MEO satellites of BDS-3 preliminary system were monitored, and the signal quality of BDS-3 satellites were comprehensively and quantitatively evaluated for the first time. The results

show that, signal qualities of BDS-3 satellites are good, and the 18 MEOs have a good consistency, which can meet the requirements of ICD and GNSS users. The evaluation methods can be also used to quantitatively evaluate the signal quality of other satellites.

**Key words:** BDS-3; Global Navigation Satellite System (GNSS); Signal quality; Performance assessment

## 1 引言

卫星导航系统空间信号质量直接影响了用户使用性能, 世界各全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)供应商均致力于提升导航卫星信号质量。导航卫星发射并在轨运行后, 系统研制建设部门及相关研究机构将会对导航卫星空间信号质量进行监测评估, 作为评判导航卫星性能的依据。国外许多研究机构如美国斯坦福大学、英国奇尔波顿天文台、德国宇航研究院(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)、欧洲空间局(European Space Agency, ESA)等均开展了空间信号质量相关研究工作, 并利用地面大口径天线对GPS, Galileo等系统新入轨卫星进行了空间信号质量评估<sup>[1-5]</sup>。国内相关单位对信号质量评估系统<sup>[6,7]</sup>和评估方法<sup>[8,9]</sup>进行了研究, 对部分内容开展了定性分析<sup>[10,11]</sup>, 但缺乏全面、定量评估。

2018年底, 北斗系统发射18颗北斗三号MEO卫星, 完成基本系统建设, 开始向全球提供服务, 预计2020年前后完成全球系统建设, 提供更多优质服务<sup>[12,13]</sup>。北斗三号卫星信号并非完全沿用北斗二号卫星信号, 而是结合用户需求、服务规划和卫星资源进行了现代化升级, 增加了B1C<sup>[14]</sup>, B2a<sup>[15]</sup>等新信号实现兼容互操作和性能提升。北斗三号卫星信号带宽更宽、分量更多, 对导航卫星空间信号质量提出了新的挑战。以B1频点为例, 卫星需要同时播发载波频率不同的B1I, B1C等信号, 发射带宽为北斗二号卫星的8倍, 对卫星通道特性和信号质量控制提出较高要求。北斗三号实现性能能否满足公开服务承诺是系统和用户关注的焦点。因此, 对北斗三号进行全面、系统的信号质量评估非常必要。

为全面监测与评估北斗基本系统空间信号质量, 本文介绍了40 m大口径天线的空间信号质量评估系统, 给出了适应北斗卫星特点的量化评估方法, 并从功率特性、频域特性、时域特性、相关域特性、信号一致性等角度给出了北斗三号18颗卫星空间信号质量评估结论。

## 2 北斗三号信号体制

北斗三号MEO卫星公开信号格式如表1所示。MEO卫星将继续播发B1I, B3I信号保障已有用户单频和双频正常使用, 同时增加了现代化新信号B1C和B2a实现性能提升和兼容共用。其中, B1C

和B2a实现与GPS L1/L5, Galileo E1/E5a的兼容与互操作。目前, B1I, B3I, B1C, B2a接口控制文件已发布。

北斗三号卫星相对北斗二号卫星状态更为复杂, 播发的信号带宽更宽、信号分量更多。其中B1频点需要实现中心频率不同的B1I, B1C和授权信号等多分量的共同播发, 卫星载荷非理想特性将会对信号质量产生较大的影响, 因此对载荷通道设计提出较高要求。本文将重点针对北斗三号卫星新增B1C信号和B2a信号进行评估, 分析新卫星、新状态、新信号下的空间信号质量控制情况。

## 3 评估系统

本文评估利用的GNSS空间信号质量评估系统, 能够实现对GNSS信号的连续监测和信号质量的精细评估。系统的核心设备是40 m大口径天线, 增益51.2 dBi @1.1 GHz, 采用单脉冲自跟踪方式。评估系统高增益信号接收链路包括天线、通道、终端、校准、时频参考等部分, 通过铯原子钟维持高稳定的时频性能, 利用大口径天线实现高增益的信号接收, 高精度校准设备能够在线测定接收通道性能变化, 高性能采集设备则实现低失真的数据采集<sup>[9]</sup>。评估系统的频率测量精度优于0.1 Hz, 功率测量精度优于0.2 dB, 时延测量精度优于0.2 ns, 能够满足对北斗及其它GNSS系统的空间信号质量监测和精细化评估要求。

为保证采集数据的准确性, 系统具备通道校准功能, 可对频率准确性、增益稳定性、幅频、相频、时延等进行标校, 可剔除自身设备因素对评估结果的影响, 能够真实反映接收信号的原始观测数据。为减小地面电磁环境和气象环境影响, 有专门的高精度干扰抵消系统及气象监测系统, 最大限度减小地面引入的误差, 更加真实地反映星上信号特性。文献<sup>[6]</sup>对评估系统结构、系统性能以及系统关键指标测试给出了详细论述。

表1 北斗三号MEO卫星已公开信号格式

频带	信号分量	中心频率(MHz)	调制方式
B1	B1I	1561.098	BPSK(2)
	B1C	1575.42	QPSK(6, 1, 1/11)
B2	B2a	1176.45	QPSK(10)
B3	B3I	1268.52	BPSK(10)

## 4 评估内容与方法

传统信号质量评估以定性分析为主，有利于发现导航信号问题，但缺乏量化评估结果。本文针对北斗三号信号特点，对照公开信号ICD(Interface Control Document)文件，从功率特性、频域特性、时域特性、相关域特性和信号一致性等角度，对北斗三号卫星进行评估，并给出了量化评估方法。评估内容如图1所示。

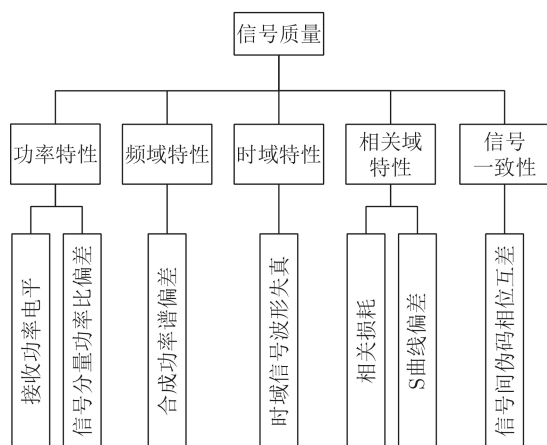


图1 评估内容

### 4.1 合成功率谱

信号频谱直观反映了信号的频域特征，是分析带内信号的频谱畸变的基础。现代化信号一般由多信号分量恒包络复用组成，实际获得的频谱并非单一信号分量频谱，而是合成功率谱。通过比较实际信号合成功率谱和理论信号合成功率谱偏差可以直观反映出传输通道非线性带来的影响。

利用大口径天线与数据采集设备采集信号，采用Welch周期图法获得信号功率谱曲线。设数据采集信号为 $x(n)$ ，将其分为长度为 $N$ 的各小段数据并对各段数据加窗，则各段信号的离散傅里叶变换为

$$X(e^{jw}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-jwn} \quad (1)$$

然后取其幅频特性的平方再除以 $N$ ，即可得到Welch周期图法的谱估计

$$\hat{S}_{NX}(w) = \frac{1}{N} |X(e^{jw})|^2 \quad (2)$$

利用Welch方法求解采集信号功率谱，计算功率谱的分辨率，确保信号功率谱分辨率优于1 kHz。以仿真信号功率谱作为理想参考标准，在相同的功率谱分辨率情况下将采集数据功率谱和仿真信号功率谱相减，在信号发射带宽内计算功率谱残差，求解其均值，利用均值调整理想功率谱的幅度大小，使得理想信号功率谱和采集信号功率谱在幅度上保

持一致。在各信号分量指定的带宽内求解两个功率谱残差的1阶值，同时求解信号功率谱残差的均值，该偏差定义为合成功率谱偏差。

### 4.2 功率特性

ICD文件对最小接收电平有具体要求，通过评估功率特性可分析最小接收电平的符合情况，通过对比分析信号分量功率比与理论功率比差异可以反映调制过程中的失真情况。由于现代化信号为多路复用信号，包括有用信号和交调信号，难以直接测量单一信号的绝对功率电平，本文利用各信号功率占该频段总功率的占比来间接获得某一信号的实际接收功率电平。

利用大口径天线长时间跟踪某颗可见卫星，频谱分析仪同步测量接收信号发射带宽内信号功率，取其中大于1.5 h的稳定数据段进行累加平均，得到某一频段的信号总功率 $P_0$ 。

采集信号经过带宽为发射带宽的FIR滤波器，利用软件接收机进行高精度跟踪及数据处理，记录每秒各支路I/Q信号分量即时相关输出幅值。统计连续 $N$ 个码周期结果累加平均值，得到各信号的功率值

$$E(j) = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{P_{I_i}^2 + P_{Q_i}^2} \right)^2 \quad (3)$$

其中， $i$ 代表为第 $i$ 个码周期， $N$ 为码周期重复次数。

进一步可得到各信号分量占总功率的百分比 $E(a)/E(s)$ 、 $E(b)/E(s)$ 、 $E(c)/E(s)$ ，其中 $E(a)$ 、 $E(b)$ 、 $E(c)$ 代表各信号分量功率值， $E(s)$ 表示所有基带信号功率值。

利用实际测得的总功率 $P_0$ 和各信号分量的实际功率占比 $E(j)/E(s)$ 即可得到各信号分量的实际接收功率电平。通过比较各信号分量实际功率比与理想功率比可得由于载荷失真带来的有效功率比偏差。

### 4.3 相关损耗

相关损耗定义为由于星上载荷失真导致的实际接收信号功率与理想信号功率之间的功率损失。相关损失直接引起信号接收功率下降，信号载噪比降低，进而影响用户的测距精度发生变化。

首先对接收信号进行载波剥离以及多普勒去除得到基带信号，将实际基带信号与本地参考码互相关后进行归一化处理，可得到归一化相关函数曲线CCF( $\tau$ )

$$\text{CCF}(\tau) = \frac{\int_0^{T_p} S_{\text{BB-PreProc}}(t) \cdot S_{\text{Ref}}^*(t - \tau) dt}{\sqrt{\left( \int_0^{T_p} |S_{\text{BB-PreProc}}(t)|^2 dt \right) \cdot \left( \int_0^{T_p} |S_{\text{Ref}}(t)|^2 dt \right)}} \quad (4)$$

其中,  $S_{\text{BB-PreProc}}(t)$ 为发射带宽下卫星基带信号;  $S_{\text{Ref}}(t)$ 为本地参考信号; 积分时间 $T_p$ 为主码周期。

信号的相关功率为互相关函数的顶点数值, 以dB为单位表达为

$$P [\text{dB}] = \max_{\text{over all } \varepsilon} [20 \lg (|\text{CCF}(\varepsilon)|)] \quad (5)$$

相关损耗CL表达式为

$$\text{CL} [\text{dB}] = P_{\text{Ideal}} [\text{dB}] - P_{\text{real}} [\text{dB}] \quad (6)$$

其中,  $P_{\text{Ideal}}$ 表示理想信号功率,  $P_{\text{real}}$ 表示实际接收信号功率。

由于理想仿真信号为无限带宽, 实际卫星信号为有限带宽, 为评估载荷失真引起的相关损耗, 应规避带限影响。计算理想无失真信号在本地理想FIR滤波器发射带宽下的相关损耗 $\text{CL}_{\text{Ideal}}$ , 反映带限引入的功率损失。在相同条件下求得实际接收信号的相关损耗 $\text{CL}_{\text{Receive}}$ , 两者相减可得星上载荷失真导致的相关损耗。

$$\text{CL}_{\text{Distortion}} [\text{dB}] = \text{CL}_{\text{Receive}} [\text{dB}] - \text{CL}_{\text{Ideal}} [\text{dB}] \quad (7)$$

#### 4.4 S曲线偏差

理想情况下, 接收机码环鉴相曲线(S曲线)的过零点, 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、多径等的影响会引起码环锁定存在偏差, 由于用户接收机设置带宽和相关器间隔之间的差异, 会造成严重的测距误差<sup>[16]</sup>。S曲线过零点偏差反映了不同相关器间隔情况下的测距表现。

首先将实际基带信号与本地参考码互相关后进行归一化处理得到相关函数曲线, 以具有代表性的非相干超前减滞后功率型鉴相器为例, 设其相关器的超前一滞后间距为 $\delta$ , S曲线的表达式为

$$\text{SCurve}(\varepsilon, \delta) = \left| \text{CCF} \left( \varepsilon - \frac{\delta}{2} \right) \right|^2 - \left| \text{CCF} \left( \varepsilon + \frac{\delta}{2} \right) \right|^2 \quad (8)$$

S曲线过零点偏差 $\varepsilon_{\text{bias}}(\delta)$ 满足

$$\text{SCurve}(\varepsilon_{\text{bias}}(\delta), \delta) = 0 \quad (9)$$

绘制接收信号S曲线过零点偏差 $\varepsilon_{\text{bias}}(\delta)$ 随超前一滞后间距 $\delta$ 的变化曲线, 由于实际情况下不能准确确定绝对零点, 将变化曲线最大值和最小值做差得到S曲线偏差。

S曲线偏差大小与接收前端带宽和相关器间隔密切相关。不同接收前端带宽对S曲线偏差结果影响较大(如图2所示), 为了客观反映实际接收机误差大小, 本文设置接收机前端带宽为各信号的主瓣带宽。

B2a信号采用QPSK调制方式, 存在唯一相关峰, 相关器间隔范围为0-1码片。B1C信号采用了

正交复用二进制偏移载波调制(Quadrature Multiplexed Binary Offset Carrier, QMBOC), 存在多种跟踪方式, 可分为仅数据(B1Cd)、导频窄带(B1Cpa)、导频宽带(B1Cp)、联合跟踪(B1C)。其中B1Cd和B1Cpa为BOC(1,1)调制, 相关器间隔范围一般选取为0~0.5码片; B1Cp为QMBOC调制方式, 自相关函数存在平台区域(如图3所示), 该区域斜率接近于零, 容易出现较大的测距偏差, 一般应避免接收机相关器间隔落入该范围, 因此本文选取相关器间隔范围为0~0.15码片和0.37~0.46码片。此外, 虽然接收机不直接使用平台, 但也应约束平台处单调变化, 避免因平台不规则波动导致捕获过程中错误牵引到平台处, 可增加对S曲线过零点是否唯一作为评判准则, 如图4所示。

#### 4.5 时域信号波形失真

导航信号波形失真直接导致相关峰幅度衰减及相关曲线变形, 从而引起测距偏差。理想信号正负

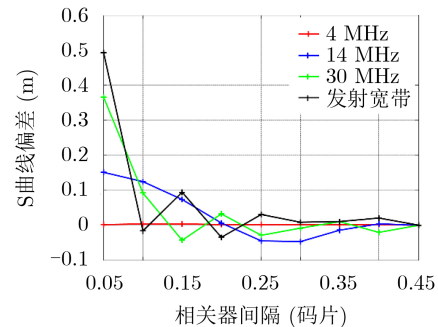


图2 不同带宽滤波后的S曲线偏差变化

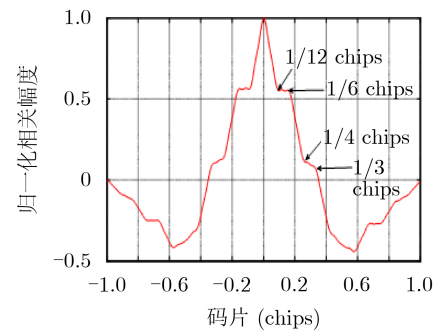


图3 QMBOC自相关函数

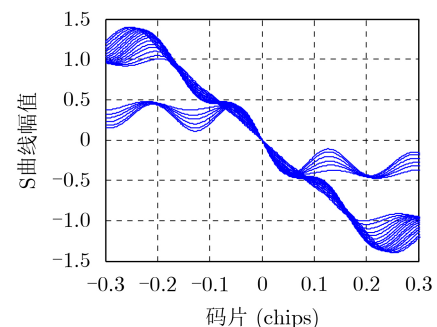


图4 QMBOC信号S曲线

码片宽度是相等的，当基带信号发生数字畸变时，两种码片时间宽度发生改变。假设信号正码片发生了数字畸变，且畸变量 $\Delta$ 为正如图5，正码片下降沿过零点发生偏移、宽度增大，相邻的负码片宽度减小了 $\Delta$ 。

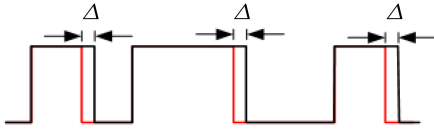


图5 数字畸变分析示意图

码片占空比计算可统计码片过零点处采样点，对上升沿和下降沿过零点附近的点进行线性拟合，求得拟合后两个边沿的过零点，两个零点的间隔为码片持续时间。统计码周期内正负码片对应时长，并与理想码片长度做差，获得“1”和“0”码片与理想码片的时间差序列，分别统计两时间序列的标准差和均值。

4.6 信号一致性

信号分量之间相位特性是信号调制参数的重要表现，现代化信号采用多路复用信号，信号之间码相位关系复杂，频间及频内伪码相位一致性可反映信号中各分量码相位偏差情况的稳定性。

同频信号的载波频率和传输路径相同，码伪距受电离层和外界干扰影响基本相同。计算公式为

$$\Delta\rho = \rho_I - \rho_Q \quad (10)$$

其中， $\rho_I$ 和 $\rho_Q$ 分别表示相同频点不同支路测距码伪距。频间信号应对各伪距观测量去除电离层误差。

剔除接收通道误差情况下，统计 $\Delta\rho$ 一段时间的均值和方差，均值代表固定偏差，方差代表抖动情况。

5 评估结果与分析

为了监测北斗系统空间信号质量状态，本文利用40 m天线采集在轨卫星数据，对18颗BDS-3 MEO卫星公开服务信号B1C, B2a的信号质量进行了分析，主要结论分别介绍如下。

5.1 功率谱

北斗三号卫星B1C和B2a信号典型功率谱特性如图6、图7所示。

计算实际测试功率谱与理论合成功率谱在各信号所在频谱带宽内的功率谱偏差均值如表2所示。

结果表明：18颗BDS-3 MEO卫星实际测试功率谱与理论合成功率谱拟合度较好，偏差最大值未超过0.5 dB，反映了MEO卫星发射通道特性较好。

5.2 功率特性

5.2.1 接收功率电平

北斗ICD文件给出了MEO卫星各信号地面最小接收功率电平，其中B1C不低于-159 dBW, B2a不低于-156 dBW，对于新信号包括了数据和导频的合路功率。图8记录了北斗三号18颗MEO卫星B1频段地面接收功率变化情况，总功率不小于-154 dBW，绝对变化量在5 dB以内，所有卫星的接收功率相对稳定。

经分析，各卫星不同信号接收功率如表3所示。将不同卫星统计平均，得到各信号统计结果见表4。

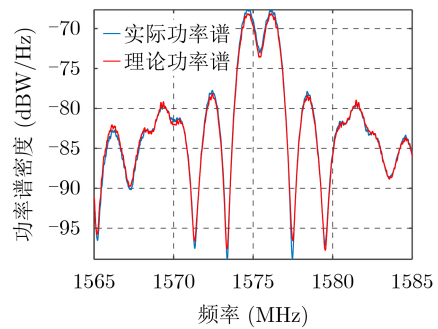


图6 B1C信号功率谱

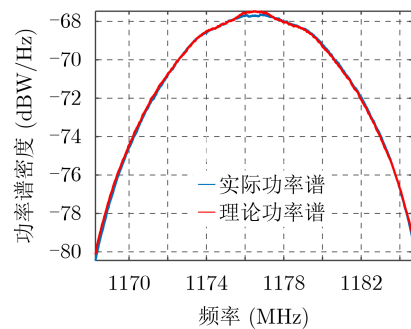


图7 B2a信号功率谱

表2 合成功率谱偏差均值(dB)

信号	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
B1C	-0.2607	-0.2052	-0.2055	-0.1863	-0.2502	-0.1209	-0.0700	-0.0572	-0.3877
B2a	0.2578	0.3046	0.3912	0.0886	0.4154	0.4034	0.2321	0.3359	0.2825
信号	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
B1C	-0.2323	-0.4660	-0.1585	-0.0055	-0.1714	-0.3182	-0.1586	-0.0923	-0.1014
B2a	0.3229	0.4614	0.3818	0.4357	0.3222	0.2351	0.1408	0.2956	0.2135

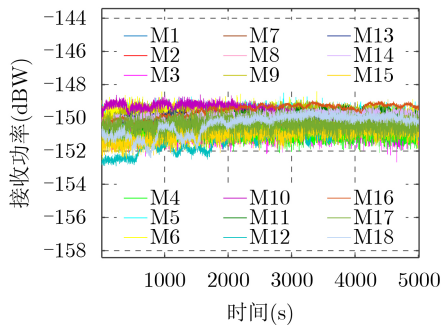


图8 北斗三号卫星B1频段地面接收功率

结果表明：18颗BDS-3 MEO卫星地面接收功率均符合ICD指标要求，实际接收功率普遍大

于ICD规定的最小接收功率值，且功率变化较为稳定。

### 5.2.2 有效功率比偏差

B1C, B2a采用了导频通道和数据通道，在理想无限带宽下，B1C导频数据功率比为3:1, B2a导频数据功率比为1:1。根据各信号分量功率电平可以获得B1C和B2a导频与数据通道功率比，如表5所示。该结果包括了带限和星上载荷失真带来的信号分量功率比的变化，其中B2a信号变化较小，B1C由于导频和数据通道带宽与功率谱不同，受到带限和载荷失真影响不一致，功率比变化大于B2a，但仍在合理范围。

表3 地面接收功率电平(dBW)

信号	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
B1C	-155.305	-154.415	-155.156	-155.620	-155.423	-154.715	-155.581	-155.570	-154.734
B2a	-151.629	-151.563	-151.872	-153.208	-152.554	-151.776	-152.154	-152.317	-151.440
信号	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
B1C	-154.750	-155.363	-155.324	-154.974	-154.951	-156.105	-155.029	-156.162	-155.5577
B2a	-151.353	-152.373	-152.183	-151.097	-151.748	-153.673	-152.034	-153.691	-152.0471

表4 地面接收功率统计值(dBW)

信号	B1C	B2a
均值	-154.38	-152.15
标准差	0.47	0.74

### 5.3 相关损耗

北斗ICD文件给出了由于星上载荷失真导致的相关损耗指标，其中B1C不超过0.3 dB, B2a不超过0.6 dB。经评估，各卫星相关损耗结果如表6所示，不同卫星统计平均结果如表7所示。

结果表明：18颗MEO卫星均符合ICD指标要求，其中B2频点性能最优，不同卫星之间差异较小，各支路相关损失均值在0.05左右波动，标准差为0.01。

### 5.4 S曲线偏差

图9、图10以B1C信号为例，给出了不同卫星的S曲线过零点偏差。

在合理的相关器间隔范围内，取S曲线过零点偏差最大变化范围，得到各卫星S曲线偏差如表8所示。其中，B1Cp<sup>1</sup>表示相关器间隔为0~0.15码片，B1Cp<sup>2</sup>表示相关器间隔为0.37~0.46码片。

将不同卫星间S曲线偏差进行统计平均，得到各信号的统计结果如表9所示。

结果表明：18颗MEO卫星B1C和B2a信号S曲线偏差均值最大不超过0.3 ns，且S曲线过零点唯一。B1Cd, B1Cp(0.37~0.46码片), B1Cpa, B2ad, B2ap星间均值小于0.1 ns, B1Cp(0~0.15码片)均值0.15 ns。

### 5.5 时域信号波形失真

北斗三号卫星B1C、B2a典型的时域波形如图11、图12所示。各卫星各信号的时域波形失真如图10所示。

结果表明：18颗MEO卫星时域失真较小，未出现明显畸变现象，均值在0.1 ns左右，最大值小于4 ns。

表5 信号各支路功率比

信号分量	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
B1Cp/B1Cd	2.707	2.838	2.794	2.701	2.769	2.796	2.755	2.731	2.660
B2ap/B2ad	0.997	0.998	0.991	0.998	0.995	0.994	0.999	0.999	1.000
信号分量	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
B1Cp/B1Cd	2.657	2.604	2.680	2.733	2.834	2.566	2.752	2.697	2.918
B2ap/B2ad	0.997	0.999	1.000	0.994	0.998	0.997	0.997	1.000	1.002

表 6 相关损耗分析结果(dB)

信号分量	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
B1Cp	-0.381	-0.491	-0.441	-0.373	-0.444	-0.415	-0.050	-0.202	-0.165
B1Cd	-0.051	-0.159	-0.097	-0.025	-0.071	-0.123	0.141	0.044	0.182
B1C	-0.296	-0.405	-0.352	-0.283	-0.348	-0.340	-0.001	-0.139	-0.076
B2ad	0.056	0.039	0.021	0.051	0.055	0.054	0.060	0.042	0.053
B2ap	0.055	0.039	0.019	0.051	0.058	0.055	0.061	0.047	0.055
B2a	0.055	0.039	0.020	0.051	0.113	0.056	0.06	0.044	0.054
信号分量	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
B1Cp	-0.203	-0.345	-0.306	-0.444	-0.555	-0.317	-0.251	-0.241	-0.095
B1Cd	0.143	0.115	0.014	0.024	-0.030	0.205	-0.032	0.030	0.204
B1C	-0.114	-0.227	-0.224	-0.323	-0.42	-0.183	-0.195	-0.171	-0.018
B2ad	0.052	0.023	0.055	0.056	0.053	0.060	0.055	0.032	0.038
B2ap	0.053	0.025	0.056	0.058	0.051	0.059	0.056	0.033	0.038
B2a	0.052	0.024	0.055	0.057	0.052	0.059	0.055	0.032	0.038

表 7 相关损耗统计结果(dB)

信号分量	B1Cp	B1Cd	B1C	B2ad	B2ap	B2a
均值	-0.32	0.03	-0.23	0.05	0.05	0.05
标准差	0.14	0.11	0.13	0.01	0.01	0.02

表 8 S曲线偏差分析结果(ns)

信号分量	B1Cd	B1Cpa	B1Cp <sup>1</sup>	B1Cp <sup>2</sup>	B2ad	B2ap
M1	0.005	0.006	0.164	0.138	0.158	0.167
M2	0.148	0.132	0.107	0.142	0.069	0.074
M3	0.117	0.067	0.019	0.075	0.097	0.128
M4	0.052	0.007	0.056	0.021	0.080	0.080
M5	0.111	0.060	0.273	0.186	0.076	0.174
M6	0.053	0.012	0.083	0.097	0.090	0.084
M7	0.140	0.148	0.073	0.070	0.078	0.075
M8	0.052	0.11	0.122	0.112	0.029	0.024
M9	0.005	0.062	0.134	0.100	0.188	0.182
M10	0.126	0.120	0.138	0.064	0.128	0.049
M11	0.111	0.168	0.036	0.029	0.026	0.027
M12	0.053	0.005	0.138	0.113	0.044	0.134
M13	0.050	0.046	0.277	0.183	0.119	0.128
M14	0.096	0.051	0.164	0.083	0.065	0.075
M15	0.167	0.156	0.177	0.092	0.135	0.142
M16	0.037	0.025	0.269	0.166	0.151	0.143
M17	0.007	0.066	0.247	0.164	0.129	0.126
M18	0.073	0.011	0.148	0.132	0.103	0.088

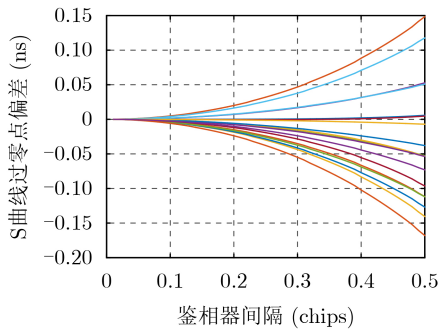


图 9 B1Cd S曲线过零点偏差

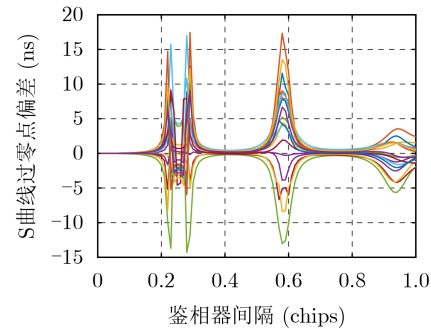


图 10 B1Cp S曲线过零点偏差

表 9 S曲线偏差统计结果

信号分量	B1Cd	B1Cpa	B1Cp <sup>1</sup>	B1Cp <sup>2</sup>	B2ad	B2ap
均值	0.08	0.07	0.15	0.10	0.10	0.10
标准差	0.05	0.05	0.08	0.05	0.04	0.05

### 5.6 信号一致性

北斗ICD文件给出了信号一致性指标，任意信号分量间伪码相位互差不超过10 ns。经评估，各卫星信号一致性实测结果如表11所示。

结果表明：BDS-3 MEO卫星均符合ICD指标要求，结果均值为10<sup>-4</sup>量级。

## 6 结束语

北斗三号卫星将播发多频、多载波、多分量的卫星导航信号，对卫星空间信号质量控制提出较大的挑战。针对GNSS现代化信号特性，本文给出了

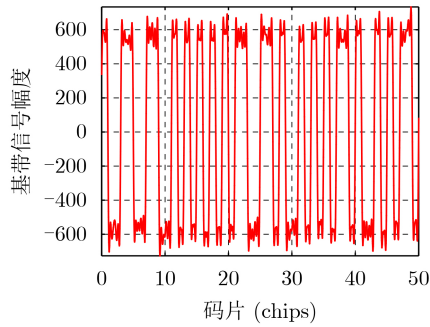


图 11 B1C时域波形图

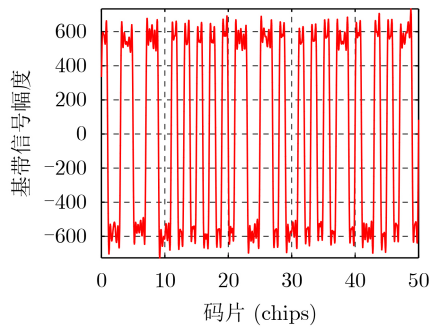


图 12 B2a时域波形图

表 10 正/负码片与理想码片长度偏差均值和最大值(ns)

信号分量	B1Cp		B1Cd		B2ap		B2ad	
	均值	最大值	均值	最大值	均值	最大值	均值	最大值
M1	0.101	3.381	0.117	3.277	0.024	2.714	-0.027	2.576
M2	0.055	3.612	0.016	3.390	-0.013	2.607	-0.033	2.676
M3	0.192	3.412	0.012	2.773	0.031	3.276	-0.032	3.092
M4	0.085	3.540	0.054	2.914	0.006	2.301	-0.023	2.113
M5	0.048	3.396	0.141	3.568	-0.001	2.282	0.053	2.256
M6	0.107	3.359	0.045	2.805	0.032	2.330	0.058	2.416
M7	0.018	3.399	0.055	3.492	0.012	2.145	-0.069	2.116
M8	0.081	3.284	0.022	2.927	0.015	2.939	-0.035	3.096
M9	0.112	3.394	0.206	2.668	0.054	2.244	-0.008	2.367
M10	0.101	3.435	0.167	2.801	0.062	2.246	0.013	2.407
M11	0.164	3.415	0.300	3.338	0.061	2.448	-0.036	2.274
M12	0.055	3.568	0.139	2.597	0.069	2.467	-0.084	2.340
M13	0.159	3.436	0.109	3.212	0.021	2.255	-0.048	2.336
M14	0.018	3.333	0.011	2.746	0.128	2.663	0.041	2.415
M15	0.188	3.672	0.049	3.080	-0.041	2.727	0.027	2.795
M16	0.095	3.331	0.010	2.702	-0.036	2.678	0.002	2.680
M17	0.173	2.681	0.008	2.783	0.031	2.292	0.036	2.474
M18	0.169	3.542	0.075	2.897	0.055	2.486	0.085	2.273

一套定量的空间信号质量评估项目和评估方法，首次对北斗三号基本系统18颗MEO卫星进行空间信号质量评估，结果表明：北斗三号卫星空间信号质量优异，新增播发的B1C和B2a信号的功率特性、

表 11 信号一致性测试结果(ns)

信号分量	B1Cd-B1Cp		B2ad-B2ap	
	均值	标准差	均值	标准差
M1	$2.26 \times 10^{-4}$	0.076	$9.9 \times 10^{-6}$	0.013
M2	$6.90 \times 10^{-5}$	0.070	$3.70 \times 10^{-5}$	0.012
M3	$2.03 \times 10^{-4}$	0.079	$6.74 \times 10^{-5}$	0.015
M4	$3.14 \times 10^{-4}$	0.076	$3.65 \times 10^{-5}$	0.016
M5	$5.40 \times 10^{-5}$	0.071	$1.43 \times 10^{-7}$	0.014
M6	$2.09 \times 10^{-4}$	0.083	$1.25 \times 10^{-5}$	0.013
M7	$5.30 \times 10^{-5}$	0.089	$1.82 \times 10^{-6}$	0.013
M8	$1.16 \times 10^{-4}$	0.082	$1.62 \times 10^{-5}$	0.014
M9	$2.60 \times 10^{-4}$	0.098	$9.06 \times 10^{-5}$	0.013
M10	$5.20 \times 10^{-5}$	0.098	$7.99 \times 10^{-6}$	0.013
M11	$1.30 \times 10^{-5}$	0.085	$8.59 \times 10^{-5}$	0.013
M12	$8.20 \times 10^{-5}$	0.072	$8.64 \times 10^{-5}$	0.015
M13	$1.15 \times 10^{-4}$	0.081	$5.67 \times 10^{-5}$	0.012
M14	$1.37 \times 10^{-4}$	0.083	$3.77 \times 10^{-5}$	0.013
M15	$1.98 \times 10^{-4}$	0.098	$7.98 \times 10^{-5}$	0.018
M16	$7.70 \times 10^{-5}$	0.090	$1.77 \times 10^{-5}$	0.014
M17	$1.93 \times 10^{-4}$	0.076	$3.67 \times 10^{-6}$	0.013
M18	$4.08 \times 10^{-4}$	0.070	$2.44 \times 10^{-5}$	0.012

频域特性、时域特性、相关域特性和信号一致性等满足接口控制文件要求和系统服务承诺要求；文中给出的量化评估项目和评估方法有助于对北斗卫星信号量化评估，可支撑系统测试评估、完好性监测和故障定位，也可用于对其他GNSS系统的空间信号质量评估。

参考文献

- [1] HEGARTY C J and ROSS J T. Initial results on nominal GPS L5 signal quality[C]. The 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2010.
- [2] THOELERT S, ERKER S, MONTENBRUCK O, *et al.* GPS SVN49—L1 anomaly analysis based on measurements with a high gain antenna[C]. The 4th European Workshop on GNSS Signals and Signal, Oberpfaffenhofen, 2009.
- [3] THOELERT S, ERKER S, MEURER M, *et al.* New signals in the SKY—a high gain antenna analysis of GPS IIF and COMPASS[C]. The 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2010.
- [4] SPELAT M, HOLLREISER M, CRISICI M, *et al.* GIOVE—a signal in space test activity at ESTEC[C]. The 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Fort Worth, 2006: 26–29.

- [5] SOELLNER M, KURZHALS C, HECHENBLAIKNER G, *et al.* GNSS offline signal quality assessment[C]. International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Savannah, USA, 2008: 909–920.
- [6] 卢晓春, 贺成艳, 王雪, 等. 卫星导航信号评估系统设计与信号性能评估[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 225–246. doi: [10.13875/j.issn.1674-0637.2016-03-0225-22](https://doi.org/10.13875/j.issn.1674-0637.2016-03-0225-22).  
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*, 2016, 39(3): 225–246. doi: [10.13875/j.issn.1674-0637.2016-03-0225-22](https://doi.org/10.13875/j.issn.1674-0637.2016-03-0225-22).
- [7] 欧阳晓风. 北斗导航系统信号质量分析与评估技术[D]. [硕士学位论文], 国防科学技术大学, 2013.  
OUYANG Xiaofeng. Evaluation technology and analysis of BDS signal quality[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2013.
- [8] 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 (Physic, Mechanica & Astronomica)*, 2010, 40(5): 528–533.
- [9] 杨再秀, 郭晓峰, 杨丽云. GNSS信号质量关键指标测试方法研究[J]. 无线电工程, 2015, 45(6): 55–58.  
YANG Zaixiu, GUO Xiaofeng, and YANG Liyun. Measurement methods of GNSS signal quality key assessment indexes[J]. *Radio Engineering*, 2015, 45(6): 55–58.
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(3.0版)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2018.  
China Satellite Navigation System Management Office. Development of the BeiDou navigation satellite system (version 3.0)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2018.
- [13] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, *et al.* Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 7–18. doi: [10.1002/navi.291](https://doi.org/10.1002/navi.291).
- [14] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号B1C(1.0版)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2017.  
China Satellite Navigation System Management Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B1C (version 1.0)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2017.
- [15] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号B2a(1.0版)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2017.  
China Satellite Navigation System Management Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B2a (version 1.0)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2017.
- [16] 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).
- 宿晨庚: 男, 1988年生, 助理研究员, 研究方向为卫星导航信号设计与试验评估.
- 郭树人: 男, 1972年生, 研究员, 研究方向为卫星导航总体设计.
- 刘旭楠: 女, 1988年生, 助理研究员, 研究方向为卫星导航与遥感应用.
- 饶永南: 男, 1983年生, 副研究员, 研究方向为卫星导航信号测试与评估.
- 王 萌: 女, 1993年生, 博士生, 研究方向为导航信号质量评估算法研究.

责任编辑: 马秀强