



引文格式:高扬,沙海,楚恒林,等.北斗 B1C、B2a 信号非理想性分析及接收约束建议[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(4):587-592.DOI:10.13203/j.whugis20200568

Citation:GAO Yang, SHA Hai, CHU Henglin, et al.Non-ideality Characteristic Analysis and Receiver Design Constraints Recommendation for BDS B1C and B2a Signals[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(4):587-592. DOI:10.13203/j.whugis20200568

# 北斗 B1C、B2a 信号非理想性分析及接收约束建议

高 扬<sup>1</sup> 沙 海<sup>1</sup> 楚恒林<sup>1</sup> 王梦丽<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京卫星导航中心,北京,100094

**摘 要:**卫星导航信号的非理想性会导致不同接收机之间出现测距偏差,是影响卫星导航系统服务精度和完好性的重要因素。首先,针对北斗系统 B1C、B2a 新体制信号的非理想性进行分析,利用大口径天线采集了全部北斗三号在轨卫星播发的 B1C、B2a 信号(共 27 颗卫星),评估了不同接收带宽、码鉴相间距下测距偏差的大小与变化特点;然后,以双频多星座星基增强服务应用为例,分析了两个信号在相应接收机中的设计约束条件。研究结果发现,在接收机常用的参数范围内,B1C、B2a 信号非理想性引入的测距偏差分别不超过 0.68 m、0.44 m;在测距偏差小于 0.1 m 的性能约束下,B1C、B2a 信号可用的约束条件参数范围优于国际民航标准草案中的相关要求。

**关键词:**B1C 信号;B2a 信号;非理想性;测距偏差;接收机设计约束

中图分类号:P228;TN967.1

文献标识码:A

收稿日期:2021-10-15

DOI:10.13203/j.whugis20200568

文章编号:1671-8860(2023)04-0587-06

## Non-ideality Characteristic Analysis and Receiver Design Constraints Recommendation for BDS B1C and B2a Signals

GAO Yang<sup>1</sup> SHA Hai<sup>1</sup> CHU Henglin<sup>1</sup> WANG Mengli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

**Abstract: Objectives:** Non-ideality of navigation satellite signals can cause ranging bias between different receivers, which is an important factor that may degrade the accuracy and integrity performance of global navigation satellite system. In civil aviation and other high integrity services, it is necessary to consider the non-ideality characteristics of the signal and define the design constraints of the user receiver, so as to reduce the impact of non-ideality and ensure service safety. **Methods:** The B1C and B2a signals of BeiDou satellite navigation system (BDS) are planned to join the international civil aviation standard, so it is necessary to study their non-ideality characteristics and define the receiver design constraints. This paper analyzed the non-ideality characteristic of BDS B1C and B2a signals. In order to avoid the influence of noise and multipath, a large aperture antenna was used to collected all the in-orbit satellite broadcasting B1C and B2a signals (including 27 satellites) to obtain pure signal samples. Then, the software receiver was used to process the signal samples under various receiving parameters to obtain the ranging biases under different receiver front-end bandwidth and code discriminator space, and the ranging bias range and variation with the receiving parameters are evaluated. Furthermore, taking the application in dual frequency multi-constellation satellite based augmentation service as an example, the receiver design constraints of the two signals were analyzed. **Results and Conclusions:** The experimental results show that the range biases introduced by the non-ideality of B1C and B2a signals are less than 0.68 m and 0.44 m, respectively, under the parameters range commonly used by receivers. Under the requirement of range bias less than 0.1 m, the applicable pa-

parameter range of receiver design constraints for B1C and B2a signals is better than the relevant requirements of the international civil aviation organization draft standard. There is sufficient margin to further consider other constraints.

**Key words:** B1C signal; B2a signal; non-ideality; ranging bias; receiver design constraints

全球卫星导航系统通过导航信号向用户提供导航定位授时服务。由于星上器件的非线性特点,卫星实际播发的导航信号存在一定的非理想性<sup>[1-2]</sup>,接收机采用不同的接收方法或接收参数获得的测距结果将存在一定偏差,偏差大小由信号非理想程度和接收机差异程度共同决定<sup>[3-4]</sup>。随着卫星导航系统以及星基增强系统服务精度和完好性要求的不断提高,信号非理想性引入的测距误差对服务性能的影响逐渐突显,并引起了越来越多的关注,相关的研究主要包括两方面:(1)分析评估信号非理想性特点,以进行准确、定量的描述。相关研究通常针对实际的卫星信号展开,例如文献[4]评估了全球定位系统(global positioning system, GPS) L1C/A信号的测距偏差;文献[5-6]提出测距偏差曲线评估方法并对Galileo系统试验卫星信号进行长期分析;文献[7-8]展示了北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)B1I信号测距偏差现象,并进行了建模;文献[9-10]进一步对北斗全球试验系统和最简系统信号的测距偏差进行了分析;文献[11-14]对GPS畸变信号特点进行评估和建模等。(2)研究测距偏差的削弱方法,以降低其对系统服务的影响。由于信号非理想性取决于星上器件的工艺水平,不能彻底消除或大幅改善,因此通常基于信号的非理想特点,采用合理约束接收机设计的方式来实现。例如在应用于民用航空领域的星基增强服务时,通过国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)标准文件严格约束用户机设计<sup>[15]</sup>,同时配合信号质量监测功能<sup>[16-17]</sup>,共同消除信号非理想性影响,实现服务的高精度、高完好、高可靠。

B1C、B2a信号是北斗三号卫星导航系统(BDS-3)导航定位服务主用新体制信号<sup>[18]</sup>,目前已经完成了24颗中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星、3颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星的全星座部署并正式服务,下一步还将加入ICAO标准,成为双频多星座星基增强系统(dual-frequency and multi-constellation satellite based augmentation system, DFMC SBAS)服务中的被增强信号。因此,需开展B1C、B2a信号的非理想性研究,明确其在

DFMC SBAS接收机中的设计约束,以满足民航领域应用需求。

本文针对这一需求背景,对B1C、B2a信号开展相关的研究。首先,利用大口径天线采集了全部BDS-3在轨卫星播发的B1C、B2a信号(包括24颗MEO卫星和3颗IGSO卫星),以获得高载噪比、无多径、无干扰的纯净信号样本;然后,利用软件接收机对采集信号进行事后的处理评估,分析了不同接收带宽、码鉴相间距下的测距偏差大小及变化特点;最后,综合所有卫星数据结果,提出了B1C、B2a信号在DFMC SBAS接收机中设计约束条件的初步范围建议。

## 1 信号与接收方式

### 1.1 B1C信号

B1C信号是北斗新体制民用单频主用信号<sup>[18]</sup>,与GPS的L1C、Galileo的E1C信号兼容互操作。其用于测量的导频支路采用QMBOC(6, 1, 4/33)调制<sup>[19-20]</sup>,包括BOC(1, 1)和BOC(6, 1)两个分量,支持两种测量方式<sup>[21]</sup>:(1)同时使用BOC(1, 1)和BOC(6, 1)进行测量;(2)仅使用BOC(1, 1)分量测量。在民航领域应用中,北斗系统已经明确推荐采用第(2)种测量方式,因此本文仅针对该方式进行研究。

### 1.2 B2a信号

B2a信号是北斗B2频点宽带信号的下边带部分<sup>[22-23]</sup>,独立使用时可视为QPSK(10)信号,与B1C信号共同提供民用双频服务<sup>[24]</sup>,与GPS的L5、Galileo的E5a信号兼容互操作。B2a信号包括导频支路和数据支路,均采用了BPSK(10)调制方式。在民航领域应用中,北斗系统已经明确推荐使用导频支路并采用本地信号BPSK(10)的方式进行测量,因此本文仅针对该方式进行研究。

## 2 分析方法

### 2.1 信号采集与处理

信号非理想分析通常有两种方式:(1)对一台接收机的多个跟踪通道配置不同参数,同时对一颗星的信号实时测量,比较各通道测距值差

异<sup>[25-26]</sup>; (2)采集保存卫星信号数据,事后用不同接收方法重复处理,获得测距偏差。第(2)种方法更为灵活,本文采用该方式进行研究。在信号采集方面,考虑到非理想性导致的测距偏差一般为分米级,与多径误差或噪声误差接近甚至更小。因此,本文采用直径40 m的大口径天线对信号进行接收,其L频段(1.1~1.7 GHz)增益约为50 dB,波束宽度约1°,多径、噪声影响可忽略;在天线后端,采用750 Msps采样率、14 bit量化的采样设备,对导航信号进行宽带射频直接采样,确保卫星信号的原始特征;在信号处理方面,采用了软件接收机,通过软件配置模拟不同的射频特性、鉴相方法和鉴相参数,实现对测距偏差的全面分析。

## 2.2 接收方法与参数范围

影响测距偏差的接收机关键参数主要包括接收机前端带宽、码鉴相方法、码鉴相参数,可选的范围极大。考虑到使用性能、常用处理方式、当前国际民航标准制定情况等因素,本文进行以下限定:

1)前端带宽最小应该包括信号频谱主瓣的大部分能量,最大不应超过卫星信号的发射带宽。因此,对于B1C信号,BOC(1,1)分量最小带宽约为4 MHz,最大带宽约为32 MHz<sup>[19]</sup>;对于B2a信号,BPSK(10)分量的主瓣带宽为20.46 MHz,但接收机也可选用更窄的12 MHz<sup>[17]</sup>,而考虑B2a为ACEBOC(15,10)宽带信号一部分<sup>[18]</sup>,其最大带宽可取40 MHz。

2)导航信号的码环鉴相方法多样,最常用的是早-迟鉴相方法,此外还有多种抗多径方法或无模糊的鉴相方法等。目前国际民航组织正在制定的DFMC SBAS标准草案中,对GPS的L1C/A和L5信号、Galileo的E1C和E5a信号均推荐采用早-迟鉴相方法<sup>[17]</sup>。考虑北斗信号与其互操作的特点,鉴相方法也应一致。因此,本文仅针对早-迟鉴相方法进行分析。

3)在早-迟鉴相方法下,鉴相参数仅包括鉴相间距。考虑B1C信号BOC(1,1)调制自相关函数的多峰性,鉴相间距范围为0.01~0.5码片;B2a信号为BPSK(10)调制,鉴相间距范围为0.01~1.5码片。

## 2.3 基准接收机参数

由于测距偏差体现在不同的接收机配置下,分析评估需选取一个参考的基准接收方法。目前北斗尚未公开监测接收机参数,这里以其他系

统已经公布的参数为参考。欧洲、美国现有的星基增强系统监测站接收机对Galileo E1C信号、GPS L1C/A信号的接收标准统一,对Galileo E5a、GPS L5信号接收标准统一<sup>[17]</sup>。考虑B1C、B2a分别与E1C、E5a信号的互操作特性,星基增强系统监测接收机对B1C、B2a信号最大可能采用相同的方法和参数。因此,本文中以该方法和参数为参考基准。对于B1C信号,接收前端带宽为24 MHz,早-迟鉴相间距0.1码片;对于B2a信号,接收前端带宽为24 MHz,早-迟鉴相间距为1.0码片<sup>[17]</sup>。

## 3 处理结果及分析

### 3.1 B1C信号结果与分析

图1展示了24 MHz前端带宽下,每颗卫星B1C信号测距偏差随鉴相间距的变化情况(由于以鉴相间距0.1码片为基准,因此该点处的测距偏差均为0)。由图1可知,各颗卫星起伏特点和幅度有较大的差异,在全局范围内没有明显的一致性;仅在0.01~0.15码片范围内呈现了局部单调变化的特点。

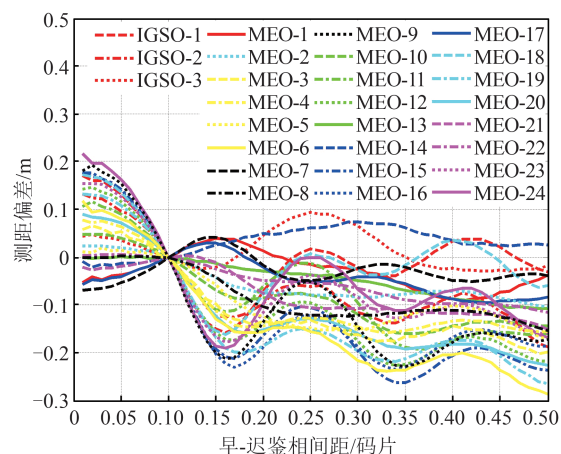


图1 24 MHz带宽下B1C信号测距偏差与鉴相间距关系  
Fig.1 B1C Ranging Bias Under Various Correlation Spaces with 24 MHz Bandwidth

由于图1中各卫星在变化趋势、幅度上存在较大差异,本文进一步遍历信号带宽和鉴相间距两个参数,在每组参数下,取所有卫星中测距偏差绝对值的最大值,以获得更为保守的评估,结果如图2所示。图2以等高线方式给出了B1C信号测距偏差与带宽和鉴相间距的关系,并用黑色和蓝色虚线框给出了建议接收机约束区域。

由图2可知:(1)关于测距偏差的变化范围,从全局看,不同参数的接收机相比于参考接收机的偏差绝对值最大为0.34 m。考虑理论上最坏



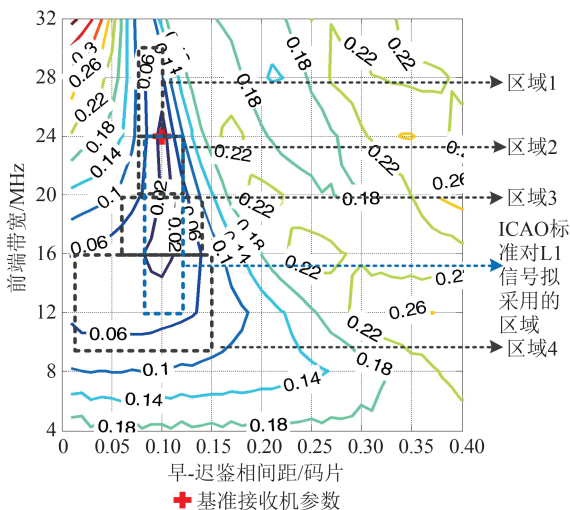


图2 B1C信号测距偏差与信号带宽和鉴相间距关系

Fig.2 B1C Ranging Bias Under Various Signal Bandwidths and Correlation Spaces

情况,即测距偏差符号相反,则不同接收机之间的偏差最大不超过0.68 m。(2)关于测距偏差随接收机参数的变化特点,其左半部分(鉴相间距为0~0.25码片),等高线呈现以基准接收机参数为中心、向外逐渐变大的特点;右半部分(鉴相间距为0.25~0.4码片),等高线变化无明显规律,偏差大多在0.2 m以上随机分布。考虑到右半部分误差普遍较大且无趋势性特点,本文仅对左半部分进行分析。带宽越宽时,等高线的密度越大(图2左上部分),即测距偏差对接收机参数的变化越敏感;带宽越窄时,等高线的密度相对稀疏(图2左下部分),即测距偏差对接收机参数的变化不敏感。在带宽18 MHz以下,鉴相间距0~0.25码片的等高线分布相对最为疏松,即测距偏差对接收机参数变化的容忍性较高。(3)关于DFMC SBAS用户接收机可选用参数范围,DFMC SBAS中对信号畸变导致的误差的分配一般在1 m左右<sup>[17]</sup>,本文对正常信号取保守值,以畸变情况的1/10,即0.1 m为门限评估用户接收机的可用参数范围。为便于描述,这里采用多个矩形区域叠加方式描述可用区域,如图2中黑色虚线框所示,具体包括4个区域,各区域参数范围见表1。

表1除了给出B1C信号可用区域外,同时也给出了ICAO的DFMC SBAS标准草案中拟对其他GNSS系统L1频段信号(包括GPS L1C/A, GLONASS L1OC, Galileo E1C)的建议使用区域<sup>[17]</sup>,对应图2中蓝色虚线框部分。可见,B1C目前可用的区域包括了标准建议范围,约束条件相比于标准要求更为宽松。

表1 B1C信号接收机可用参数范围

Tab.1 Applicable Receiver Parameters for B1C

区域名称	前端带宽/MHz	鉴相间距/码片
B1C 信号区域 1	24~30	0.08~0.1
B1C 信号区域 2	20~24	0.08~0.12
B1C 信号区域 3	16~20	0.06~0.13
B1C 信号区域 4	10~16	0.01~0.15
ICAO 对 GNSS 系统 L1 信号拟采用的区域 <sup>[17]</sup>	12~24	0.08~0.12

### 3.2 B2a信号结果与分析

图3展示了24 MHz前端带宽下,每颗卫星B2a信号测距偏差随鉴相间距的变化情况(由于以鉴相间距1.0码片为基准,因此该点处的测距偏差均为0)。由图3可知,各颗卫星的起伏特点有一定的相似性,总体呈现了单调变化的特点,且鉴相间距越大,曲线的斜率越高,不同卫星变化的幅度有一定差异。

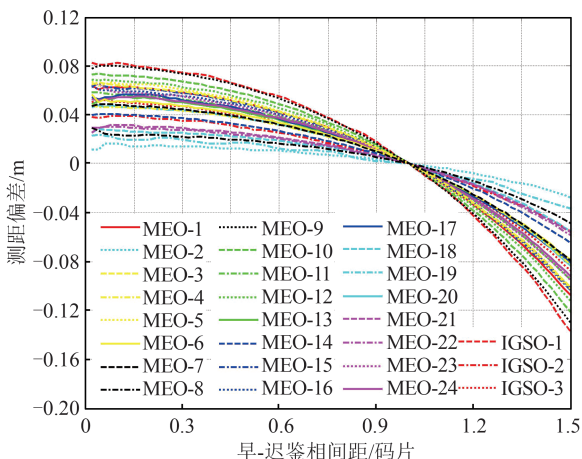


图3 24 MHz滤波带宽下B2a信号测距偏差与鉴相间距关系

Fig.3 B2a Ranging Bias Under Various Correlation Spaces with 24 MHz Bandwidth

本文进一步遍历信号带宽和鉴相间距两个参数,在每组参数下,取所有卫星中测距偏差绝对值的最大值,以获得更为保守的评估,结果如图4所示。图4以等高线方式给出了B2a信号测距偏差与带宽和鉴相间距的关系,并用黑色和蓝色虚线框给出了建议接收机约束区域。

由图4可知:(1)关于测距偏差的变化范围,从全局看,不同参数的接收机相比于基准接收机的偏差绝对值最大为0.22 m。考虑理论上最坏情况,即测距偏差符号相反,则不同接收机之间的偏差最大不超过0.44 m。(2)关于测距偏差随接收机参数的变化特点,与B1C特点类似,带宽越宽时,等高线的密度越大(图4上半部分),即测距偏

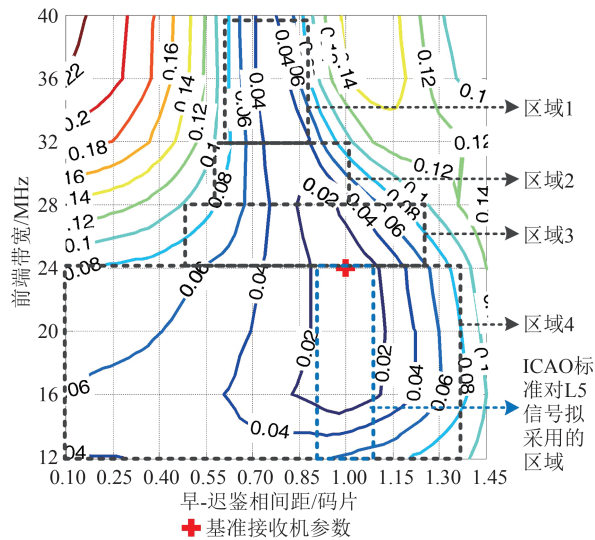


图 4 B2a 信号测距偏差与信号带宽和鉴相间距关系

Fig.4 B2a Ranging Bias Under Various Signal Bandwidths and Correlation Spaces

差对接收机参数的变化越敏感;带宽越窄时,等高线的密度相对稀疏(图 4 下半部分),即测距偏差对接收机参数的变化不敏感。在带宽 28 MHz 以下,鉴相间距 1.15 码片以内的范围,等高线分布相对最为疏松,测距偏差对接收机参数变化的容忍性较高。(3)关于 DFMC SBAS 用户接收机可选用参数范围,对 B2a 信号,同样以测距偏差不大于 0.1 m 为门限,评估用户接收机的可用参数范围。与 B1C 类似,为便于描述,采用多个矩形区域叠加方式描述可用区域,如图 4 中黑色虚线框所示,具体包括 4 个区域,各区域参数范围见表 2。表 2 中同时也给出了 ICAO 的 DFMC SBAS 标准草案中拟对其他 GNSS 系统 L5 频段信号(包括 GPS L5Q、GLONASS L3OC、Galileo E5a-Q)的建议使用区域,对应图 4 中蓝色虚线框部分。可见,B2a 目前可用的区域包括了标准建议范围,约束条件相比于标准要求更为宽松。

表 2 B2a 信号接收机可用参数范围

Tab.2 Applicable Receiver Parameters for B2a

区域名称	前端带宽/MHz	鉴相间距/码片
B2a 信号区域 1	32~40	0.6~0.8
B2a 信号区域 2	28~32	0.6~1.0
B2a 信号区域 3	24~28	0.5~1.2
B2a 信号区域 4	12~24	0.1~1.4
ICAO 对 GNSS 系统 L5 信号拟采用的区域 <sup>[17]</sup>	12~24	0.9~1.1

## 4 结 语

本文基于对 BDS-3 在轨卫星实际信号的采

集和分析,评估了 B1C、B2a 信号非理想性可能引入的测距偏差范围,分析了测距偏差随信号带宽和鉴相间距的变化规律,并以 DFMC SBAS 监测站接收机为参考基准,给出了测距偏差小于 0.1 m 约束下用户接收机可用的设计约束参数范围。得到如下结论:(1)在接收机一般可采用的前端带宽、鉴相间距范围内,B1C 测距偏差不大于 0.68 m,B2a 测距偏差不大于 0.44 m。(2)对 B1C、B2a 信号,测距偏差对接收机参数变化的敏感性随信号带宽的降低而降低,B1C 信号在带宽 18 MHz 以下、鉴相间距 0.25 码片以内,B2a 信号在带宽 28 MHz 以下,鉴相间距 1.15 码片以内,测距偏差对接收机参数变化的敏感度较低,这些区域可作为接收机参数的优选区域。(3)以 DFMC SBAS 监测接收机为参考基准,在测距偏差小于 0.1 m 约束要求下,B1C、B2a 信号用户接收机可选参数范围优于国际民航标准中对同类信号的要求,有充足的余地进一步考虑其他方面约束需求。

## 参 考 文 献

- [1] Pagot J B, Thevenon P, Julien O, et al. Estimation of GNSS Signals' Nominal Distortions from Correlation and Chip Domain[C]// The 2015 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, California, USA, 2015.
- [2] Phelts R E, Walter T, Enge P, et al. Signal Deformation Monitoring for Dual-Frequency WAAS [C]// The 2013 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, California, USA, 2013.
- [3] Wong G, Phelts R E, Walter Tet al. Alternative Characterization of Analog Signal Deformation for GNSS-GPS Satellites [C]//The 2011 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, California, 2011.
- [4] Wong G, Phelts R E, Walter T, et al. Characterization of Signal Deformations for GPS and WAAS Satellites [C]//The 2010 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, California, 2010.
- [5] Soellner M, Kurzhals C, Kogler W, et al. One Year in Orbit: GIOVE-B E1 CBOC Signal Quality Assessment[J]. *GPS World*, 2009, 20(9):28-38.
- [6] Gunawardena S, Carroll M, Raquet J, et al. High-Fidelity Signal Deformation Analysis of Live Sky Galileo E1 Signals Using a Chip Shape Software GNSS Receiver [C]//ION GNSS+, Tampa, Florida, USA, 2015.
- [7] Wanninger L, Beer S. BeiDou Satellite-Induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Thera-

- py[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4): 639-648.
- [8] Lou Yidong, Gong Xiaopeng, Gu Shengfeng, et al. The Characteristic and Effect of Code Bias Variations of BeiDou[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(8): 1040-1046. (楼益栋, 龚晓鹏, 辜声峰, 等. 北斗卫星伪距码偏差特性及其影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(8): 1040-1046.)
- [9] Xu Yangyin, Yang Yuanxi, He Haibo, et al. Quality Analysis of the Range Measurement Signals of Test Satellites in BeiDou Global System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1214-1221. (许扬胤, 杨元喜, 何海波, 等. 北斗全球卫星导航系统试验卫星测距信号质量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(8): 1214-1221.)
- [10] He Yilei. Quality Analysis of Satellite Signal for BDS-3 Simplest System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 394-402. (何义磊. 北斗三号最简系统卫星信号质量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 394-402.)
- [11] Edgar C, Czopek F, Barker B. A Co-operative Anomaly Resolution on PRN-19[C]//ION GPS, Nashville, Tennessee, 1999.
- [12] Enge P, Phelts E, Mitelman A. Detecting Anomalous Signals from GPS Satellites [C]//ICAO, Toulouse, France, 1999.
- [13] Phelts R E, Shallberg K, Walter T, et al. WAAS Signal Deformation Monitor Performance: Beyond the ICAO Threat Model[C]//The ION 2017 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, USA, 2017.
- [14] Zhang Zhengwen, Kou Yanhong, Liu Jiansheng. Impact Analysis of GNSS Signal Imperfections on Intersystem and Intrasystem Interference[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 471-475. (张铮文, 寇艳红, 刘建胜. 发射信号不完善性对卫星导航系统内及系统间干扰的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(4): 471-475.)
- [15] International Civil Aviation Organization. ISBN 978-92-9258-504-4. ICAO International Standards and Recommended Practices. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Volume I Radio Navigation Aids Seventh Edition [S]. Canada: International Civil Aviation Organization, 2018.
- [16] Wong G. Impact of Nominal Signal Deformations on Satellite Navigation Systems [D]. California: Stanford University, 2014.
- [17] Pagot J B. Modelling and Monitoring of New GNSS Signal Distortions in the Context of Civil Aviation [D]. Toulouse, France: Signal and Image Processing, Institute National Polytechnique de Toulouse (INPT), 2016.
- [18] Lu M Q, Li W Y, Yao Z, et al. Overview of BDS III New Signals [J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 19-35.
- [19] China Satellite Navigation Office. BDS-SIS-ICD B1C-1.0 BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B1C (Version 1.0) [S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2017. (中国卫星导航系统管理办公室. BDS-SIS-ICD B1C-1.0 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)[S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2017.)
- [20] Yao Z, Lu M, Feng Z M. Quadrature Multiplexed BOC Modulation for Interoperable GNSS Signals [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(17): 1234.
- [21] Yao Z, Lu M. Optimized Modulation for Compass B1C Signal with Multiple Processing Modes [C]//The 24th International Meeting of the Satellite Division, Portland, Oregon, USA, 2011.
- [22] China Satellite Navigation Office. BDS-SIS-ICD B2a-1.0 BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B2a (Version 1.0) [S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2017. (中国卫星导航系统管理办公室. BDS-SIS-ICD B2a-1.0 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)[S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2017.)
- [23] Yao Z, Lu M. Dual-frequency Constant Envelope Multiplex with Non-equal Power Allocation for GNSS [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(25): 1624-1625.
- [24] Lu M Q, Yao Z. Constant Envelope Combination for Components on Different Carrier Frequencies with Unequal Power Allocation [C]//ION ITM, San Diego, CA, USA, 2013.
- [25] Gunawardena S, Graas F. Analysis of GPS Pseudorange Natural Biases Using a Software Receiver [C]//ION GNSS, Nashville, Tennessee, USA, 2012.
- [26] Gunawardena S, Graas F. High Fidelity Chip Shape Analysis of GNSS Signals Using a Wideband Software Receiver [C]//ION GNSS, Nashville, Tennessee, USA, 2012.