

基于北斗三号新频点的多路径 误差特性验证方法研究

戴凯阳¹ 邵搏¹ 熊帅¹ 张键¹ 雷哲哲¹

1 中国电子科技集团公司第二十研究所,西安市白沙路1号,710068

摘要:提出一种北斗三号新频点多路径误差特性验证方法,并通过接收机天线群延时实验以及实测数据验证其与国际民航组织给出的多路径误差模型的符合性。结果表明:1)实验使用的接收机天线符合 DO-373 天线群延时特性要求;2)在 B1c/L1、B2a/L5 和双频组合情况下,BDS 与 GPS 的多路径误差曲线的变化趋势基本一致,即 BDS 与 GPS 多路径误差特性基本一致;3)BDS 在 B1c、B2a 以及双频组合情况下的多路径误差特性符合国际民航组织多路径误差模型要求。

关键词:北斗系统;多路径误差模型;天线群延时;国际民航组织;双频多星座

中图分类号: P228

文献标识码: A

北斗系统在不断发展与完善的同时也需要与国际接轨,得到国际社会的认可。目前国际民航组织正在开展双频多星座(dual frequency and multi constellation,DFMC)星基增强系统(space based augmentation system,SBAS)标准与建议措施(standard and recommended practices,SARPs)的制定工作,BDS 作为被增强对象、北斗星基增强系统(Beidou navigation satellite system,BDSBAS)作为服务提供商均被写入 DFMC SBAS SARPs 中^[1-3]。在 DFMC SBAS SARPs 修订过程中需要对其中的相关内容进行验证,其中北斗系统新频点多路径误差特性验证工作是一个意义重大的议题。美国、欧洲已经分别完成了 GPS 和 Galileo 系统的多路径误差特性验证工作^[4-6],北斗系统急需开展相关研究并形成工作文件。因此,开展北斗系统多路径误差特性的验证工作不仅可以弥补国内在该方面研究的不足,而且可以助力北斗系统写入国际民航组织标准,为推动北斗系统走向国际迈出坚实一步。

国际民航组织针对导航卫星系统的多路径误差特性制定了相关规定,BDS 多路径误差特性需要被 JWG6/6 提出的 DFMC 多路径误差模型^[7]所包络。另外,导航卫星接收机数据所使用的接收机天线群延时需要满足航空无线电技术委员会发布的 DO-373 标准^[8]。因此,本文为了验证

BDS 多路径误差特性符合 DFMC 多路径误差模型的要求,首先利用符合 DO-373 天线群延时特性的天线接收 BDS 在 B1c 和 B2a 上的观测数据;然后提出一种北斗三号新频点的多路径误差特性验证方法,对观测数据进行处理并绘制多路径误差随高度角的变化曲线;最后分析其与国际民航多路径误差模型的符合性。

1 天线群延时实验

本次实验测试的接收天线为 NovAtel GNSS-750 扼流圈天线,微波暗室实验设备主要包括矢量网络分析仪(Agilent E5071B)、标准天线(CR125B)和直流耦合器(Mini-Circuits ZFBT-4R2G-FT+)。实验设备连接示意图如图 1 所示,标准天线与被测天线处于同一水平方向上。

1.1 实验方法

为了得到 NovAtel GNSS-750 扼流圈天线在北斗三号新频点(B1c 和 B2a)上的群延时参数,进行天线群延时实验。测试步骤如下:

1)搭建测试环境,将 NovAtel GNSS-750 扼流圈天线通过直流耦合器与矢量网络分析仪端口 2 连接,将标准天线与矢量网络分析仪端口 1 连接,并使 2 个天线正面法向对齐。

2)设置矢量网络分析仪测试频点,在 B1c 频

收稿日期:2020-11-23

项目来源:中国电子科技集团公司产业发展资金(20201121)。

第一作者简介:戴凯阳,工程师,主要从事 GNSS 高精度定位算法和 SBAS 性能评估研究,E-mail:kaiyang.dai@aliyun.com。

通讯作者:邵搏,高级工程师,主要从事星基增强系统技术及相关软件开发等研究,E-mail:night_boris83@163.com。

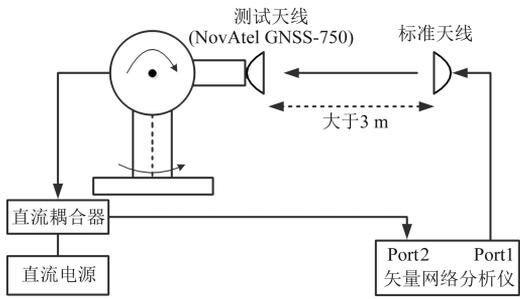


图 1 微波实验设备连接示意图
Fig. 1 Test equipment connection diagram

点 1 575.42 MHz(或 B2a 频点 1 176.45 MHz)校准矢量网络分析仪。

3)启动直流电源,设置输出电压值为 5 V。

4)将天线的高度角调整为 0°,控制转台水平方向转动 1 周,同时记录矢量网络分析仪在指定方位角 $Azi(0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ \dots, 330^\circ, 340^\circ, 350^\circ)$ 的天线群延时值 $\tau(Azi, Ele)$,其中 Azi 为方位角, Ele 为高度角。

5)控制转台转动以使被测天线在高度角方向转动 5°,重复步骤 4),逐步增大高度角数值,直至完成垂直方向 90°的测试,同时记录指定高度角 $Ele(5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, \dots, 80^\circ, 85^\circ, 90^\circ)$ 的数据。

6)计算高度角 $Ele = 85^\circ$ 时各个方位角的 $\tau(Azi, Ele = 85^\circ)$ 的均值 $\bar{\tau}(Azi, Ele = 85^\circ)$ 。

7)根据 DO-373 天线群延时要求 $\Delta\tau = \max \|\tau(Azi, Ele) - \bar{\tau}(Azi, Ele = 85^\circ)\|$, 计算各个角度与 $\bar{\tau}(Azi, Ele = 85^\circ)$ 的差值,并将最大值作为当前 Ele 对应的最大天线群延时,验证其是否满足式(1)^[8]:

$$\begin{cases} \Delta\tau \leq (1.5 - 0.02125)(Ele - 5^\circ) \text{ ns}, & 0^\circ \leq Ele \leq 45^\circ \\ \Delta\tau \leq 0.65 \text{ ns}, & Ele \geq 45^\circ \end{cases} \quad (1)$$

1.2 实验结果

图 2 给出 NovAtel GNSS-750 扼流圈天线在 B1c 和 B2a 频点的天线群延时方位图,可以看出,各频点的天线群延时主要跟高度角相关。

图 3 给出在 B1c 和 B2a 频点的最大天线群延时随高度角的变化曲线,图中虚线为 DO-373 天线群延时要求包络线,实线为实测各高度角对应的最大天线群延时曲线。可以看出,NovAtel GNSS-750 扼流圈天线各高度角最大天线群延时被要求曲线包络,证明其在 B1c 和 B2a 频点上的天线群延时特性符合 DO-373 的要求。

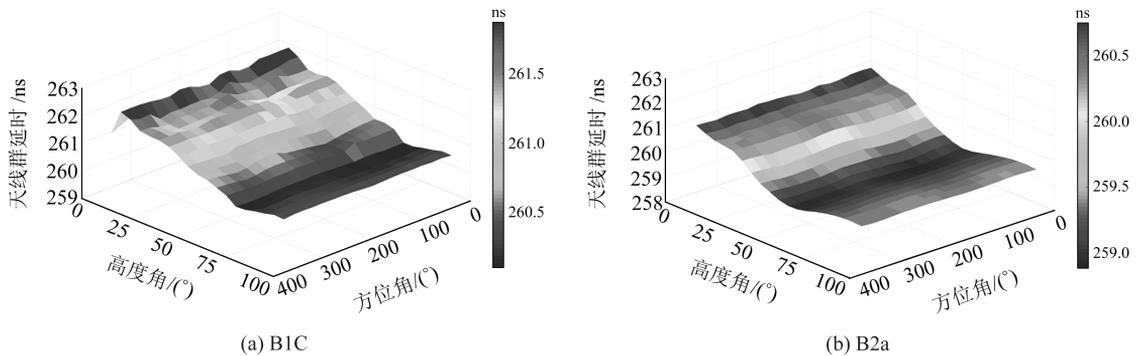


图 2 B1c 和 B2a 频点天线群延时方位图
Fig. 2 Antenna group delay on B1c and B2a

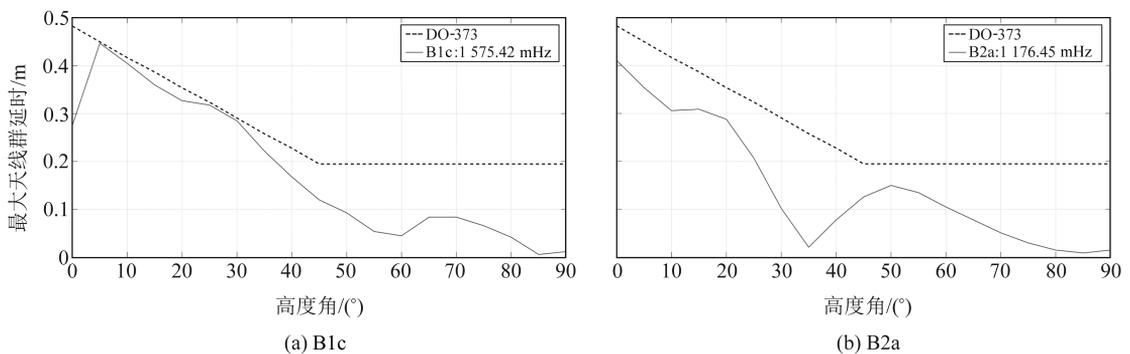


图 3 B1c 和 B2a 频点的最大天线群延时随高度角变化曲线
Fig. 3 Maximum antenna group delay varies with elevation angles on B1c and B2a

2 多路径误差特性分析

利用 NovAtel GNSS-750 扼流圈天线采集原

始观测数据,在西安某单位楼顶架设接收机天线,接收机型号为 Septentrio PolaRx5。采集 2020-09-01~08 的观测数据,包括 BDS B1c/B2a 频点

以及 GPS L1/L5 频点。

2.1 多路径误差特性分析基本原理

基于采集的 BDS B1c/B2a 和 GPS L1/L5 频点上的伪距观测量和载波相位观测量,给出本文验证方法的具体实施步骤(图 4)。

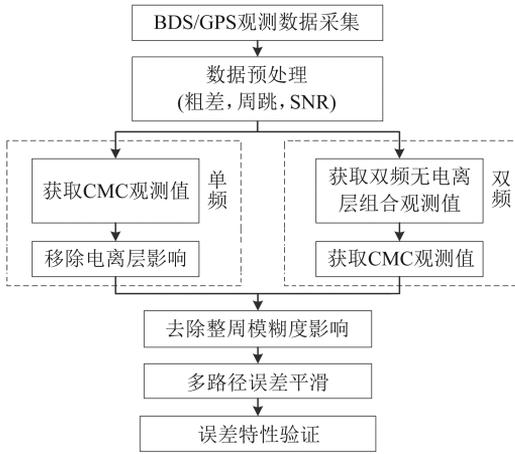


图 4 多路径误差特性验证流程

Fig. 4 Verification flow chart of multipath error characteristics

北斗三号监测站采集到北斗三号卫星的观测数据和导航电文信息,其新频点 B1c、B2a 基本观测方程如下^[9]:

$$\rho_{B1c} = r + c(dt_u - dt^s) + T + I_{B1c} + MP_{\rho, B1c} + \epsilon_{\rho, B1c} \quad (2)$$

$$\varphi_{B1c} = r + c(dt_u - dt^s) + T - I_{B1c} + N_{B1c}\lambda_{B1c} + MP_{\varphi, B1c} + \epsilon_{\varphi, B1c} \quad (3)$$

$$\rho_{B2a} = r + c(dt_u - dt^s) + T + I_{B2a} + MP_{\rho, B2a} + \epsilon_{\rho, B2a} \quad (4)$$

$$\varphi_{B2a} = r + c(dt_u - dt^s) + T - I_{B2a} + N_{B2a}\lambda_{B2a} + MP_{\varphi, B2a} + \epsilon_{\varphi, B2a} \quad (5)$$

式中, ρ_{B1c} 和 φ_{B1c} 分别为 B1c 频点伪距和载波相位观测量, c 为光速, dt_u 和 dt^s 分别为接收机钟差和卫星钟差, T 为对流层延迟, I_{B1c} 为 B1c 频点电离层延迟, $MP_{\rho, B1c}$ 和 $MP_{\varphi, B1c}$ 分别为 B1c 频点伪距和载波相位上的多路径误差, $\epsilon_{\rho, B1c}$ 和 $\epsilon_{\varphi, B1c}$ 分别为 B1c 频点伪距和载波相位上与接收机相关的噪声误差, N_{B1c} 为 B1c 频点载波相位整周模糊度, λ_{B1c} 为 B1c 频点波长, ρ_{B2a} 和 φ_{B2a} 分别为 B2a 频点伪距和载波相位观测量, I_{B2a} 为 B2a 频点电离层延迟, $MP_{\rho, B2a}$ 和 $MP_{\varphi, B2a}$ 分别为 B2a 频点伪距和载波相位上的多路径误差, $\epsilon_{\rho, B2a}$ 和 $\epsilon_{\varphi, B2a}$ 分别为 B2a 频点伪距和载波相位上与接收机相关的噪声误差, N_{B2a} 为 B2a 频点载波相位整周模糊度, λ_{B2a} 为 B2a 频点波长。

1) 在 φ_{B1c} 和 φ_{B2a} 上进行周跳探测和标记,并剔除信噪比较低的数据。周跳探测主要使用无几

何距离组合(geometry-free, GF)周跳探测方法,检测量 b 为:

$$b = \varphi_{B1c}\lambda_{B1c} - \varphi_{B2a}\lambda_{B2a} \quad (6)$$

对检测量前后历元作差,此处差值阈值设置为 0.05 m,当差值大于 0.05 m 时,则认为当前历元发生周跳,对观测数据进行标记。

剔除信噪比低的历元观测值, B1c 频点信噪比门限为 29 dBHz, B2a 频点上信噪比门限为 27 dBHz。

2) 利用 B1c 和 B2a 频点上的伪距观测量和载波相位观测量计算伪距与载波的差值(code minus carrier, CMC)。

针对单频 B1c 或 B2a 频点,利用双频载波观测值消除单频 CMC 数据中的电离层延迟:

$$CMC_{B1c} = \rho_{B1c} - \varphi_{B1c} = 2I_{B1c} + MP_{\rho, B1c} + \epsilon_{\rho, B1c} - MP_{\varphi, B1c} - \epsilon_{\varphi, B1c} - N_{B1c}\lambda_{B1c} \quad (7)$$

$$CMC_{B2a} = \rho_{B2a} - \varphi_{B2a} = 2I_{B2a} + MP_{\rho, B2a} + \epsilon_{\rho, B2a} - MP_{\varphi, B2a} - \epsilon_{\varphi, B2a} - N_{B2a}\lambda_{B2a} \quad (8)$$

$$I_{B1c} = \frac{f_{B2a}^2}{f_{B1c}^2 - f_{B2a}^2}(\varphi_{B1c} - \varphi_{B2a}) \quad (9)$$

$$I_{B2a} = \frac{f_{B1c}^2}{f_{B2a}^2 - f_{B1c}^2}(\varphi_{B2a} - \varphi_{B1c}) \quad (10)$$

$$CMC_{I_free, B1c} = CMC_{B1c} - 2I_{B1c} = MP_{\rho, B1c} + \epsilon_{\rho, B1c} - N_{B1c}\lambda_{B1c} \quad (11)$$

$$CMC_{I_free, B2a} = CMC_{B2a} - 2I_{B2a} = MP_{\rho, B2a} + \epsilon_{\rho, B2a} - N_{B2a}\lambda_{B2a} \quad (12)$$

式中, CMC_{B1c} 和 CMC_{B2a} 分别为 B1c 和 B2a 频点上的 CMC, $CMC_{I_free, B1c}$ 和 $CMC_{I_free, B2a}$ 分别为 B1c 和 B2a 频点消除单频电离层影响后的 CMC 值。因为伪距上的多路径误差与噪声远大于载波上的,因此式(7)和式(8)中 $-MP_{\varphi, B1c} - \epsilon_{\varphi, B1c} \approx 0$ 和 $-MP_{\varphi, B2a} - \epsilon_{\varphi, B2a} \approx 0$, 式(11)和式(12)中 $-N_{B1c}\lambda_{B1c}$ 和 $-N_{B2a}\lambda_{B2a}$ 为常数。

双频组合计算方法为:

$$\rho_{I_free} = \frac{f_{B1c}^2 \cdot \rho_{B1c} - f_{B2a}^2 \cdot \rho_{B2a}}{f_{B1c}^2 - f_{B2a}^2} \quad (13)$$

$$\varphi_{I_free} = \frac{f_{B1c}^2 \cdot \varphi_{B1c} - f_{B2a}^2 \cdot \varphi_{B2a}}{f_{B1c}^2 - f_{B2a}^2} \quad (14)$$

$$CMC_{I_free} = \rho_{I_free} - \varphi_{I_free} \quad (15)$$

式中, ρ_{I_free} 和 φ_{I_free} 分别为无电离层组合的伪距和载波相位观测量, f_{B1c} 和 f_{B2a} 分别为 B1c 和 B2a 频点的频率, CMC_{I_free} 为无电离层组合的 CMC。

3) 利用 CMC 数据的平均值来消除整周模糊度的影响,即消除步骤 2) 中的常数项。遇到步骤 1) 中探测出现的周跳标记,则重启该过程:

$$\widehat{CMC}_X(t) = CMC_X(t) - \frac{1}{N} \sum CMC_X(t) \quad (16)$$

式中, $CMC_X(t)$ 为 t 时刻的 $CMC_{L_{free}}$ 、 $CMC_{L_{free},B1c}$ 或者 $CMC_{L_{free},B2a}$, $\widehat{CMC}_X(t)$ 为 t 时刻消除整周模糊度的 CMC 数据。

4) 为了削弱 $\widehat{CMC}_X(t)$ 序列中高频噪声的影响, 将 $\widehat{CMC}_X(t)$ 输入到 100 s 平滑滤波器中。同样, 此步骤在发生周跳的时刻需要重启滤波器:

$$\overline{CMC}_X(t) = \frac{1}{\delta} \widehat{CMC}_X(t) + \left(1 - \frac{1}{\delta}\right) \overline{CMC}_X(t-1) \quad (17)$$

式中, δ 为滤波器数据长度, 取 100, $\overline{CMC}_X(t)$ 为

t 时刻平滑后的 CMC 数据。

5) 独立的样本点 \overline{CMC}_X (此处每 100 s 取一个样本点) 按 2° 高度角区间进行分区, 并统计区间内数据的标准差 $\sigma_{MP\&AGDV_X}$, 绘制 $\sigma_{MP\&AGDV_X}$ 随高度角变化的曲线, 分析国际民航给出的 DFMC 多路径误差模型^[7] 是否能够包络该曲线。

2.2 结果分析

按照上述方法对 2020-09-01~09-08 的 BDS 和 GPS 双频观测数据进行处理, 得到 B1c/L1、B2a/L5 以及双频的多路径误差 $\sigma_{MP\&AGDV}$ 随高度角变化曲线, 如图 5~7 所示。

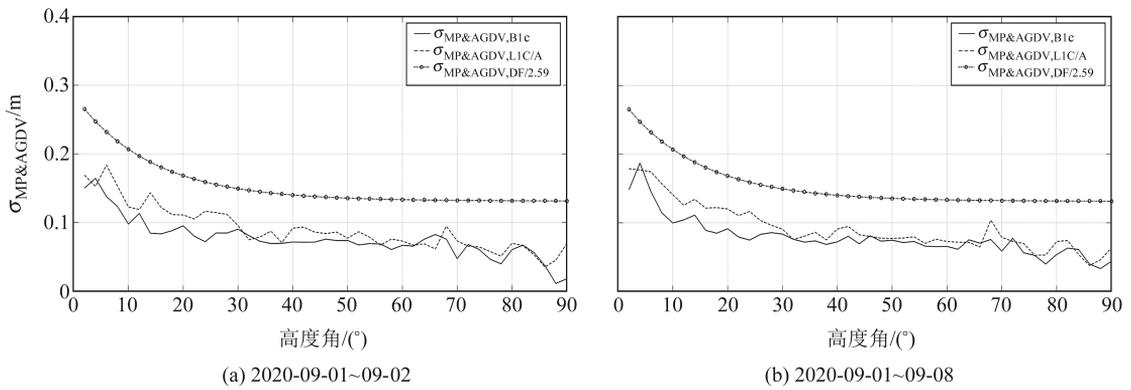


图 5 BDS B1c 和 GPS L1 频点 $\sigma_{MP\&AGDV}$ 随高度角变化曲线

Fig. 5 The curves of $\sigma_{MP\&AGDV}$ varies with elevation angles on BDS B1c and GPS L1

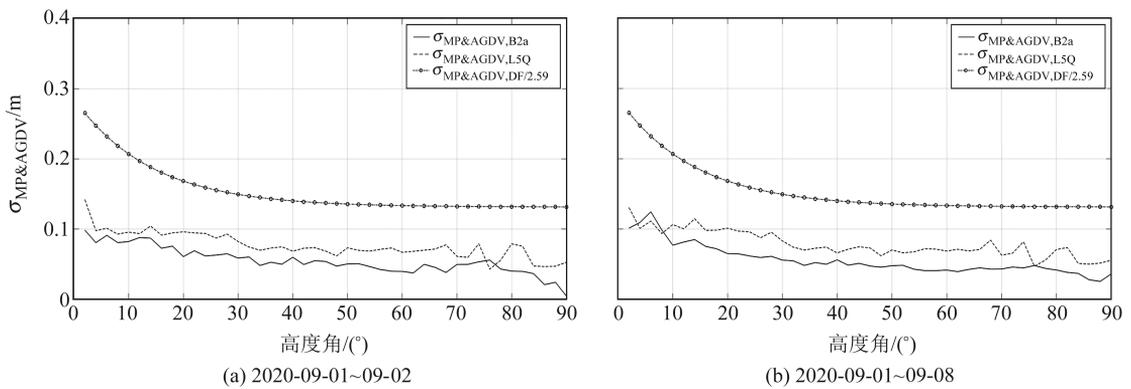


图 6 BDS B2a 和 GPS L5 频点 $\sigma_{MP\&AGDV}$ 随高度角变化曲线

Fig. 6 The curves of $\sigma_{MP\&AGDV}$ varies with elevation angles on BDS B2a and GPS L5

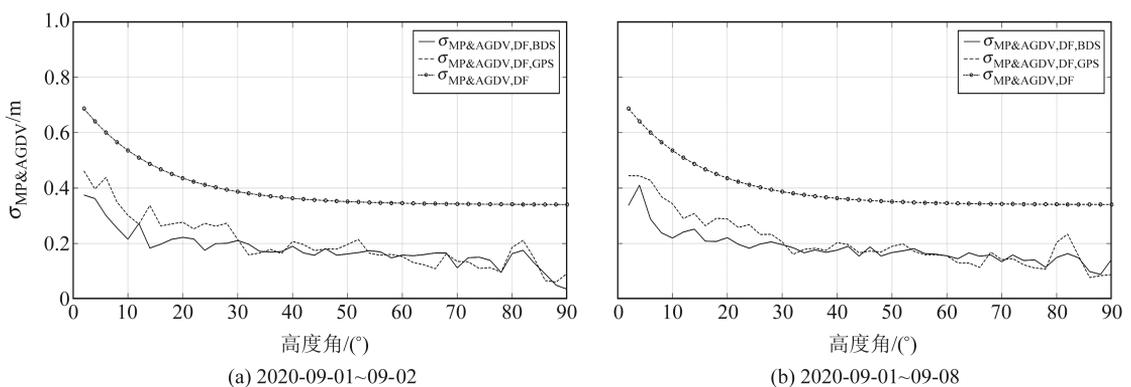


图 7 BDS 和 GPS 双频组合频点 $\sigma_{MP\&AGDV}$ 随高度角变化曲线

Fig. 7 The curves of $\sigma_{MP\&AGDV}$ varies with elevation angles on BDS and GPS dual-frequency combination

从图 5~7 可以看出:

1) 基于 2 d 和 8 d 数据得到的 BDS/GPS 多路径误差曲线的变化趋势几乎保持一致, 即多路径误差曲线的变化趋势基本上不受天数影响。

2) BDS 与 GPS 分别在 B1c/L1、B2a/L5 和双频组合情况下的多路径误差曲线的变化趋势基本一致, 即 BDS 与 GPS 多路径误差特性基本一致。

3) BDS 在 B1c、B2a 以及双频组合情况下的多路径误差特性符合 DFMC 多路径误差模型的要求。

3 结 语

本文首先基于微波暗室实验分析了 NovAtel GNSS-750 天线的天线群延时特性, 验证该天线的群延时特性符合 DO-373 的要求; 然后提出一套可用于分析验证北斗三号新频点多路径误差特性的方法, 并给出明确的处理流程和实施步骤; 最后基于此天线, 进行 BDS 和 GPS 原始双频观测数据的采集和处理。结果表明, BDS 的多路径误差特性与 GPS 基本一致, 并且能够满足国际民航提出的 DFMC 多路径误差模型要求。本文能够为北斗系统多路径误差特性分析提供理论依据和实施思路, 并且为北斗系统写入国际民航组织标准增砖添瓦。

致谢: 感谢欧洲 DLR 课题组提供参考资料。

参考文献

- [1] JWGs6 Flimsy32. DFMC SBAS SARPs Part A Version 2.4 [Z]. Montréal, Canada, 2020
- [2] JWGs6 Flimsy33. DFMC SBAS SARPs Part B Version 2.2 [Z]. Montréal, Canada, 2020
- [3] NSP6 Flimsy7. Proposed Amendments to Annex 10, Volume I: Satellite-Based Augmentation System(SBAS) Provisions[Z]. Montréal, Canada, 2020
- [4] Circiu M S, Caizzone S, Felux M, et al. Development of the Dual-Frequency Dual-Constellation Airborne Multipath Models[J]. Navigation, 2020, 67(1): 61-81
- [5] Vergara M, Sgammin M, Thoelert S, et al. Tracking Error Modeling in Presence of Satellite Imperfections[J]. Navigation, 2016, 63(4)
- [6] Caizzone S, Circiu M S, Elmarissi W, et al. Antenna Influence on GNSS Pseudorange Performance for Future Aeronautics Multifrequency Standardization [J]. Navigation, 2019, 66(1): 99-116
- [7] JWGs6 Flimsy8. DFMC SBAS SARPs Part B Version 2.2 [Z]. Montréal, Canada, 2020
- [8] RTCA DO-373. MOPS for GNSS Airborne Active Antenna Equipment for the L1/E1 and L5/E5a Frequency Bands [Z]. 2018
- [9] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017(Xie Gang. Principles of GPS and Receiver Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017)

Research on Validation Method of Multipath Error Characteristics of BDS-3 New Frequencies

DAI Kaiyang¹ SHAO Bo¹ XIONG Shuai¹ ZHANG Jian¹ LEI Zhezhe¹

¹ The 20th Research Institute of CETC, 1 Baisha Road, Xi'an 710068, China

Abstract: We provide a validation method of multipath model of BDS-3 new frequencies. We use antenna group delay test and measured data to verify the multipath error characteristics of BDS meet the requirements of DFMC multipath model. The results show that: 1) The receiving antenna used in the experiment meet the requirements of DO-373. 2) In the case of B1c/L1, B2a/L5 and dual-frequency combination, the trend of multipath error curve of BDS and GPS are basically the same; that is, the characteristics of multipath error of BDS and GPS are basically the same. 3) The multipath error characteristics of BDS in the case of B1c, B2a and dual-frequency combination can meet the requirements of the DFMC multipath model.

Key words: BDS; multipath error model; antenna group delay; ICAO; DFMC

Foundation support: CETC Industry Development Fund, No. 20201121.

About the first author: DAI Kaiyang, engineer, majors in GNSS high-precision positioning algorithm and SBAS performance evaluation, E-mail: kaiyang.dai@aliyun.com.

Corresponding author: SHAO Bo, senior engineer, majors in SBAS and related software development, E-mail: night_boris83@163.com.