



使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差

周仁宇, 胡志刚, 蔡洪亮, 赵镇, 饶永南, 陈良, 赵齐乐

引用本文:

周仁宇, 胡志刚, 蔡洪亮, 等. 使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(9): 1298–1308.

ZHOU Ren-yu, HU Zhi-gang, CAI Hong-liang, et al. Analysis of Pseudorange and Carrier Ranging Deviation of BDS-3 Using Parabolic Directional Antenna[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(9): 1298–1308.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[GNSS水汽层析的自适应代数重构算法](#)

Adaptive Algebraic Reconstruction Algorithms for GNSS Water Vapor Tomography

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1318–1327 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190387>

[长距离GPS/BDS双系统网络RTK方法](#)

A Network Real-Time Kinematic Method for GPS and BDS Double Systems Between Long Range

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 252–261 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190352>

[一种使用抗差估计的保护水平重构方法](#)

A Method of Protection Level Reconstruction Based on Robust Estimation

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 96–102 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190043>

[BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估](#)

Positioning Performance Evaluation of BDS/QZSS and Its Combined Systems in China, Japan and Their Peripheral Areas

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 574–585,611 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180228>

[星基反演TEC与地基GNSS TEC数据融合可行性分析](#)

Feasibility of the Data Fusion Between Space-Borne and Ground-Based TEC Products

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 557–564 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180293>

DOI:10.13203/j.whugis20200182



文章编号:1671-8860(2021)09-1298-11

使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差

周仁宇¹ 胡志刚¹ 蔡洪亮² 赵 镇³ 饶永南⁴
陈 良^{1,5} 赵齐乐¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094

3 中国地质大学地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

4 中国科学院国家授时中心,陕西 西安,710600

5 上海市空间导航与定位技术重点实验室,上海,200030

摘要:对于全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS),观测值测距性能会影响系统基本服务能力。大口径抛物面天线能够较好地削弱地面设备和环境对信号采集的影响。基于抛物面天线数据分析北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 global navigation satellite system, BDS-3)的观测值特性和测距性能。结果显示,B1I、B3I、B1C、B2a和B2b 5个频点上均未发现与北斗二号卫星类似的相同量级卫星星上伪距偏差,部分频点伪距多路径存在波动,但与高度角的相关性不强,所有卫星测距偏差变化的平均量级为0.1 m。使用载波三频组合分析北斗三号卫星各个频率载波观测值的多路径变化和噪声水平,载波三频组合存在毫米量级的变化波动,但这种变化并未显示出与时间或者高度角的密切相关性,基于抛物面天线数据的载波三频组合均方根误差绝大部分小于0.6 mm。以上结果表明北斗三号卫星的伪距和载波观测值未出现系统性偏差,具有良好的测距性能。

关键词:北斗三号全球导航卫星系统;抛物面天线;伪距多路径;载波多路径;噪声水平

中图分类号:P228

文献标志码:A

2018年12月,中国宣布北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 global navigation satellite system, BDS-3)基本系统建成,正式对外提供基本的导航、定位和授时服务^[1]。北斗三号完整系统则在2020年7月正式建成^[2],对外提供服务。与北斗二号相比,北斗三号采用了新的系统设计、新体制和新技术,搭载了更高精度的国产星载原子氢钟^[3],增加了星间链路数据^[4],提高了北斗空间信号精度,进而增强了北斗系统服务性能。此外,北斗三号还更新了电离层模型和广播星历用户算法。

在星座设计方面,北斗三号和北斗二号类似,其标称导航星座仍然是混合星座^[1],包含3颗地球同步轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星,3颗倾斜同步轨道(inclined geosynchronous

satellite orbit, IGSO)卫星和24颗中轨道(medium earth orbit, MEO)卫星。其中MEO卫星在全球均匀分布,3颗GEO卫星和3颗IGSO卫星主要覆盖中国区域,进一步增强了该地区的服务性能和可靠性。北斗三号GEO卫星还会播发北斗三号和其他全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)精密轨道和钟差的改正参数,提供高精度定位服务^[5-6]。

在信号设计方面,北斗三号在北斗二号播发的B1I、B2I和B3I 3个民用导航信号的基础上公开增发B1C、B2a和B2b 3个民用信号,同时舍去了B2I。北斗系统导航信号的基本信息见表1。

在服务体系方面,北斗三号创新性地提供多种功能服务,即“1+6”服务体系。“1”是指定位导航授时(radio navigation satellite system, RNSS)

收稿日期:2020-04-20

项目资助:上海市空间导航与定位技术重点实验室基金(201901);武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费(202007)。

第一作者:周仁宇,博士生,主要从事北斗系统性能评估方法的研究。ry.zhou@whu.edu.cn

通讯作者:胡志刚,博士,副教授。zhigang.hu@whu.edu.cn

服务,这也是其他卫星导航系统的核心服务;“6”是指北斗系统独具特色的 6 大服务,分别是全球短报文通信(global short message communication, GSAC)、国际搜救(search and rescue, SAR)、星基增强(satellite-based augmentation system, SBAS)、地基增强(ground augmentation system, GAS)、精密单点定位(precise point positioning, PPP)和区域短报文通信(regional short message communication, RSMC)。

表 1 北斗系统导航信号基本信息^[7-12]Tab.1 Basic Information of BDS Navigation Signal^[7-12]

参数	频点				
	BII	B2I/B2b	B3I	B1C	B2a
频率/MHz	1 561.098	1 207.14	1 268.52	1 575.42	1 176.45
波长/cm	19.204	24.835	23.633	19.029	25.483
带宽/MHz	4.092	20.46	20.46	32.736	20.46

提供高质量的观测值是卫星导航系统的核竞争力,这也是北斗系统 7 大主体功能为用户提供优质服务的基础。文献[13]通过全球范围内的北斗跟踪站数据发现北斗二号观测值存在系统性的星上伪距偏差现象,引起了全球卫星导航系统领域的广泛关注。北斗二号星上伪距偏差与卫星高度角和卫星类型存在较强相关性,也被称为星上多路径效应,会对 RNSS、PPP^[14]、SBAS 等与测距有关的服务性能产生不利影响,还会影响频间偏差(differential code bias, DCB)产品的精度^[15],最终影响系统对用户的服务能力。文献[16]对后续发射的北斗三号试验卫星进行了跟踪研究,研究表明试验卫星和 GPS 的部分卫星也存在类似的伪距偏差,但伪距偏差量级比北斗二号明显减小。对于 2017—2019 年间发射的北斗三号卫星,文献[17]基于地面常规的测量型全向天线数据开展了伪距多路径分析以及初步的定位精度评估,并指出北斗三号的星上伪距多路径效应相对于北斗二号有明显改善。考虑到全向天线会受到地面环境中多路径的影响,无法与星上多路径误差分离,不利于分析与卫星相关的测距偏差,所以本文采用可跟踪 GNSS 信号的大口径抛物面天线对北斗三号卫星伪距测距偏差进行深入分析。此外,由于北斗三号公开播发了 5 个导航信号,本文基于载波三频组合的方法分析北斗三号的载波多路径特性。

1 数据源及评估方法

1.1 数据源

常见的 GNSS 测地型天线是全向天线,能够同时采集可见范围内的所有卫星信号,但是全向天线不可避免地会受到多种误差的影响,特别是地面环境中的多路径误差,由于观测环境的不同导致地面多路径误差各异,一般无法对多路径误差进行建模消除,也无法采用站间或者星间差分的方式消除。

大口径天线反射面外形采用抛物面设计,天线接收信号的波束宽度较小、方向性较强,对于直射信号能够在馈源处放大增强,同时由于抛物面的几何特性,周围环境反射引起的倾斜射入天线反射面的多路径信号无法汇聚到馈源,因此,抛物面天线能够较好地消除或削弱地面观测环境反射带来的多路径信号影响,可以被用于分析导航信号多路径及其测距性能^[18-19]。抛物面天线定向跟踪特定 GNSS 导航卫星信号,能够对卫星信号进行放大和增强,天线反射面口径越大,采集的信号强度越高,所跟踪的信号载噪比非常平稳,与卫星高度角相关性较小,可有效剥离出星上多路径等系统性偏差。因此,大口径抛物面天线采集的数据能够较好地体现导航信号自身的特性。

本文主要使用大口径抛物面天线采集北斗三号卫星数据,该天线位于中国科学院国家授时中心观测站,直径 40 m,天线周围无明显遮挡,视野较好,数据采集时间段为 2019-07-18—2019-07-27。接收机采用国防科技大学研制的测量型接收机,能够接收北斗系统所有公开频点的信号,还能够同时独立采集同一频点不同分量的信号,包括北斗三号的 B1C、B2a 和 B2b 频点导频分量和数据分量的信号,所以本文也对同一信号不同分量的测距性能进行了对比分析。试验期间,共采集 18 颗北斗三号 MEO 卫星(C19~C30, C32~C37)至少一个完整升降弧段的观测数据,包含北斗三号公开的 B1I、B3I、B1C、B2a 和 B2b 共 5 个频点。此外,为了与全向天线结果进行对比分析,本文收集了国际 GNSS 监测评估系统(international GNSS monitoring and assessment service, IGMAS)下属测站 2019-10-01—2019-10-7 期间的观测数据,以及国际 GNSS 服务(international GNSS service, IGS)下属测站 2020-03-08 的观测数据,并对这些全向天线数据进行相应处理。

1.2 评估方法

1.2.1 载噪比分析

载噪比(carrier-to-noise-power-density ratio, C/N₀)是载波信号功率和噪声功率谱密度的比值^[20],是评估导航信号质量的重要指标,直接影响着接收机的捕获、跟踪和电文解调性能。载噪比反映了信号强弱和测距精度。载噪比越大,信号越强,测距精度越高;反之,载噪比过小,表明收到的信号不稳定,可能出现较大的噪声甚至信号失锁,测距精度将受到严重影响。不同接收机接收同一信号时,载噪比存在差异,但是当同一接收机接收所有信号时,各个导航信号载噪比的相对大小关系能够在一定程度上反映各个频点之间的信号强弱。根据北斗三号空间信号接口文件描述,B1C信号导频分量和数据分量的功率比为3:1,B2a信号导频和数据分量的功率比为1:1。本文将通过抛物面天线观测数据分析部分频点各分量在用户端实际接收的载噪比情况。

1.2.2 伪距多路径组合

北斗二号卫星存在较为显著的星上伪距偏差^[13],伪距观测值存在和高度角相关的系统性误差,会影响定位精度。对于使用载波的应用,星上伪距偏差也会影响模糊度固定和定位收敛速度。

本文使用基于伪距和载波的伪距多路径组合观测值对星上伪距偏差进行分析,伪距多路径组合 M_{code}^i 的计算式为^[21]:

$$M_{\text{code}}^i = C_i + (m - 1) \cdot \lambda_j \varphi_j - m \cdot \lambda_k \varphi_k - B \quad (1)$$

$$m = \frac{\lambda_i^2 + \lambda_j^2}{\lambda_j^2 - \lambda_k^2} \quad (2)$$

式中,C和 φ 分别为伪距和载波相位观测值; λ 是对应频点的载波波长;m是多路径组合的系数;B是一个连续弧段内的伪距多路径序列均值;i,j,k分别表示3个导航频点,i表示待考察的频点,可以与j或k相同,j≠k。伪距多路径组合消除了几何距离和大气延迟误差,多路径值包含了接收机和卫星端的多路径误差、接收机的噪声以及可能存在的其它伪距测量误差等,可用伪距多路径组合来分析观测值中是否存在与高度角相关的伪距偏差,以及观测值的噪声水平。

1.2.3 载波多路径组合

北斗三号卫星播发5个频点的导航信号,可以通过特定的载波三频组合方式来分析载波的数据质量和多路径特性。载波三频组合 M_{phase} 的计算式为:

$$M_{\text{phase}} = \alpha \cdot L_i + \beta \cdot L_j + \gamma \cdot L_k - B \quad (3)$$

式中,L表示对应频点的载波观测值,单位为m;系数 α 、 β 和 γ 满足下列条件:

$$\alpha + \beta + \gamma = 0 \quad (4)$$

$$\alpha \cdot \lambda_i^2 + \beta \cdot \lambda_j^2 + \gamma \cdot \lambda_k^2 = 0 \quad (5)$$

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1 \quad (6)$$

式(4)保证了 M_{phase} 消除几何距离的影响,式(5)保证了 M_{phase} 不受一阶电离层影响,式(6)在一定程度上保证了 M_{phase} 不会明显地放大或减小测量噪声。载波三频多路径组合中只使用了载波观测值,在消去连续弧段内载波三频组合均值B后,剩余部分包含地面和星上载波多路径以及载波测量噪声的影响,可以用于分析载波观测值的测距特性。文献[22]使用该组合发现GPS早期Block IIF卫星载波上出现的异常现象,因此本文利用该组合对北斗三号卫星也进行了类似分析。北斗三号卫星播发了5个频点的信号,可根据需要选择3个不同的频率系数组合,即三频组合。考虑到不同频点间频率大小关系,本文选择了3种载波三频组合进行分析,这3种载波三频组合的系数见表2。

值得注意的是,与突出单个频点伪距观测量的伪距多路径组合不同,载波三频组合的系数受到不同频点频率的限制,在特定组合中,只能尽量使某个频点的系数绝对值较小,从而分析系数绝对值较大的频点载波多路径特性。对于系数绝对值较小的频点,即使其载波观测值上出现显著随时间变化的偏差,载波三频组合也不会随之出现明显偏差。以表2中的组合2为例,B3I频点的系数为-0.024 4,如果B3I频点的载波观测值出现系统性偏差,组合观测值中由于B3I频点观测值引入的偏差会被组合系数缩小到约为原始误差的1/40。本文选择的3种载波三频组合,组合1用于分析B2b和B3I频点载波观测值偏差;组合2用于分析B1I和B1C频点载波观测值偏差;组合3用于分析B2a和B2b频点载波观测值偏差。

表2 三频组合系数表

Tab.2 Coefficients of Triple-Frequency Combination

组合	三频组合	α	β	γ
1	B1I,B2b,B3I	-0.183 4	-0.597 4	0.780 7
2	B1I,B1C,B3I	0.719 0	-0.694 6	-0.024 4
3	B1C,B2a,B2b	-0.084 6	-0.661 0	0.745 6

2 北斗三号观测数据特性分析

2.1 载噪比变化

使用抛物面天线和全向天线分别采集 C20 卫星一个完整升降弧段的数据,信号载噪比和高度角随时间的变化情况如图 1 所示。图 1(a)中数据采用大口径抛物面天线采集,测站位于陕西省商洛市,采集时段为 2019-07-19 6:00—14:00,采样率为 1 s。由图 1(a)可以看出,在整个卫星升降的过程中,抛物面天线采集的数据同一个频点载噪比的变化范围约为 5 dBHz,载噪比变化和高度角的相关性较小,这是因为抛物面天线削弱了地面环境的干扰,同时天线的反射面积较大,所以信号较强。但是同时可以看出,抛物面天线信号的载噪比在接近天线正上方,即高度角接近 90°时,载噪比反而有一定下降,这是因为在接近天顶时,卫星高度角和方位角变化的速率较快,特别

是方位角,在短时间内就可能有较大变化,抛物面天线自身需要不停地调整姿态对准卫星信号方向,由于自身巨大的体积和重量,其运动速率有一定限制,所以当抛物面天线无法及时调整自身姿态、未能完全指向卫星时,其信号的强度会有略微下降,这不是因为卫星自身的信号变化引起的。

图 1(b)中数据采用全向天线采集,测站位于北京市,采集时段为 2019-10-02 22:00—2019-10-03 6:00,采样率为 30 s。由图 1(b)可以看出,使用全向天线采集的数据,其载噪比变化和高度角相关性较强,随着高度角升高,载噪比变大,在低高度角会出现一定的跟踪失锁。因此在 GNSS 处理中,高度角较小的观测数据质量较差,应该赋予较低的权重,高度角较大的观测数据质量相对较高,应该赋予较高权重。

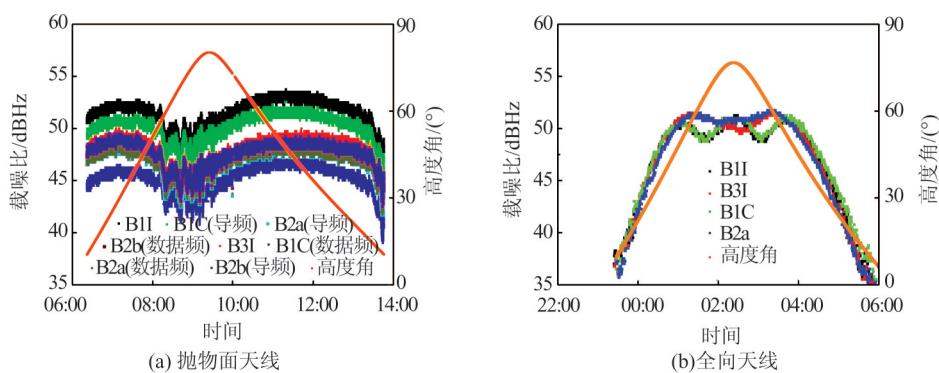


图 1 C20 卫星载噪比
Fig.1 C/N_0 of C20 Satellite

对于本文中使用抛物面天线采集的所有 18 颗北斗三号卫星数据,计算上述卫星各个频点在 0~90°高度角范围内不同区间的平均载噪比,高度角区间间隔为 5°,结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,各颗卫星的信号载噪比在不同高度角区间的变化幅度较小,一般不超过 5 dBHz;此外,所有卫星均存在接近天顶方向时载噪比略有下降的现象,这和图 1(a)中 C20 卫星载噪比在时间序列上的变化情况一致。以 B1I 频点为例,由图 2(a)可以看出,不同卫星在 B1I 频点上的载噪比存在差异,这是因为各颗卫星入射信号的方位角和高度角不一样,所以载噪比不完全相同。其他频点的结果如图 2(b)~2(h)所示,载噪比变化和 B1I 结果类似,所有北斗三号卫星载噪比在不同高度角上均未出现明显异常现象。比较图 2(c)、2(d)以及图 2(e)、2(f)可以看出,B1C 导频信号载噪比高于数据频信号载噪比,B2a 导频信号载噪比和

数据频信号载噪比相当,这个现象与系统公布的 B1C 和 B2a 信号内部分量的功率相对大小关系一致,即 B1C 频点导频和数据频的功率比是 3:1, B2a 频点导频和数据频功率比为 1:1^[10-11]。对于抛物面天线采集到的不同频点的数据,不同信号载噪比的相对大小关系为 B1I>B1C(导频)>B3I>B2a(导频、数据频)≈B2b(导频、数据频)>B1C(数据频)。

2.2 伪距多路径偏差分析

图 3 是使用全向天线数据计算得到的典型卫星多路径序列。由图 3(a)和图 3(d)可以看出,北斗二号 C11 卫星 B1I 频点的多路径组合偏差在时间序列上呈现“V”字型,在高度角序列上随着高度角升高而降低,存在较为明显的系统性偏差,变化幅度为 1.5 m。相似的系统性偏差在 B2I 和 B3I 均存在,并且 IGSO 系列卫星和 MEO 系列卫星变化幅度不完全一致,这也表明目前北斗二号

中仍然存在系统性星上伪距偏差,会造成伪距观测值较大的测距误差。从图3(b)、3(c)、3(e)和3(f)中可以看出,北斗三号C21卫星的B1C频点和C36卫星的B2a频点的多路径序列没有

出现明显的与时间或者高度角相关的系统性偏差,卫星高度角较小时,多路径组合值的离散程度较大,随着卫星高度角增大,多路径偏差变小。

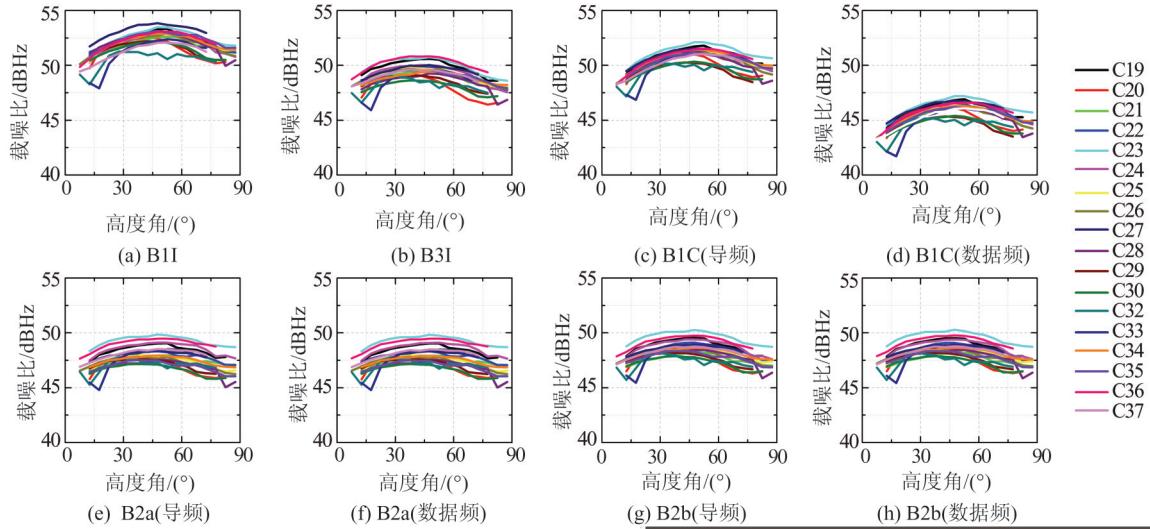


图2 北斗三号抛物面天线数据载噪比随高度角变化

Fig.2 C/N_0 Variation with Elevation Angle of BDS-3 from Parabolic Antenna

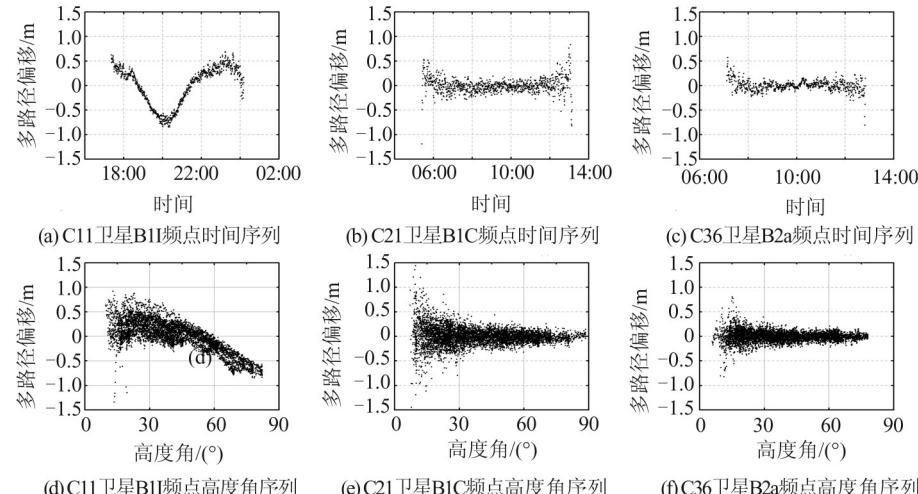


图3 全向天线伪距多路径的时间/高度角序列

Fig.3 Code Multipath in Time Series and Elevation Angle Series from Omnidirectional Antenna

使用大口径抛物面天线观测数据计算的北斗三号的典型卫星伪距多路径时间序列和高度角序列如图4所示。相较于全向天线数据,抛物面天线数据计算的伪距多路径值噪声相比全向天线更小,伪距多路径序列的变化范围一般不超过0.1 m。由图4(a)可以看出,B1I频点的多路径相对于其他4个频点,其多路径值的起伏略大。由图4(b)可以看出,在卫星升降过程中,位于同一高度角时,其多路径偏移也存在一定差异,所以在卫星上升和下降时,多路径偏移相对于高度角的变化轨迹不完全重合。由图4中展示的5颗

北斗三号卫星不同频点的多路径序列可以看出,伪距多路径误差虽然仍存在较小量级的波动,但与高度角的相关性并不强,其多路径值序列显示了良好且稳定的测距性能。

为了进一步分析整个北斗三号整体的多路径随高度角变化特性,对使用抛物面天线采集到的所有18颗北斗三号卫星数据进行处理,计算了这些卫星不同频点的多路径值,按照 5° 间隔统计了它们在不同高度角区间的均值,结果如图5所示。由图5可知:

1)由图5(e)和5(f)可以看出,在B2a频点导

频和数据频的多路径偏移与高度角存在较弱的相关性, 多路径偏移随高度角上升而变大, 图 3(f)中使用全向天线数据计算所得到的B2a多路径偏移无法体现B2a频点多路径和高度角存在的相关性, 这是因为全向天线数据会受到较大的测量噪声和地面多路径等误差影响, 这也是使用抛物面天线采集数据的优势。和北斗二号卫星超过1 m的系统性偏差相比, 北斗三号B2a频点上出现的随高度角变化的多路径偏移量显著减小, 除C29卫星之外, 其余卫星B2a频点的多路径偏移变化范围为-0.1~0.1 m。

2) 从图5(a)可知, 当高度角小于15°时, B1I

频点多路径偏移存在较大的波动, 最大可到0.3 m。从图5(b)、5(c)、5(d)、5(g)和5(h)可以看出, 北斗三号卫星B3I、B1C和B2b频点的多路径偏移的变化幅度较小, 测距性能较为稳定。

3) 由图5(c)、5(d)和图5(g)、5(h)可以看出, B1C和B2b频点上的导频分量和数据频分量多路径序列较为接近, 未出现显著随高度角变化的情形。

总之, 北斗三号卫星不同频点均未发现和北斗二号相同量级的星上伪距偏差, 虽然部分频点伪距多路径存在一定程度的波动, 但没有出现随高度角显著变化的现象, 和北斗二号相比, 北斗三号的测距性能有进一步提升。

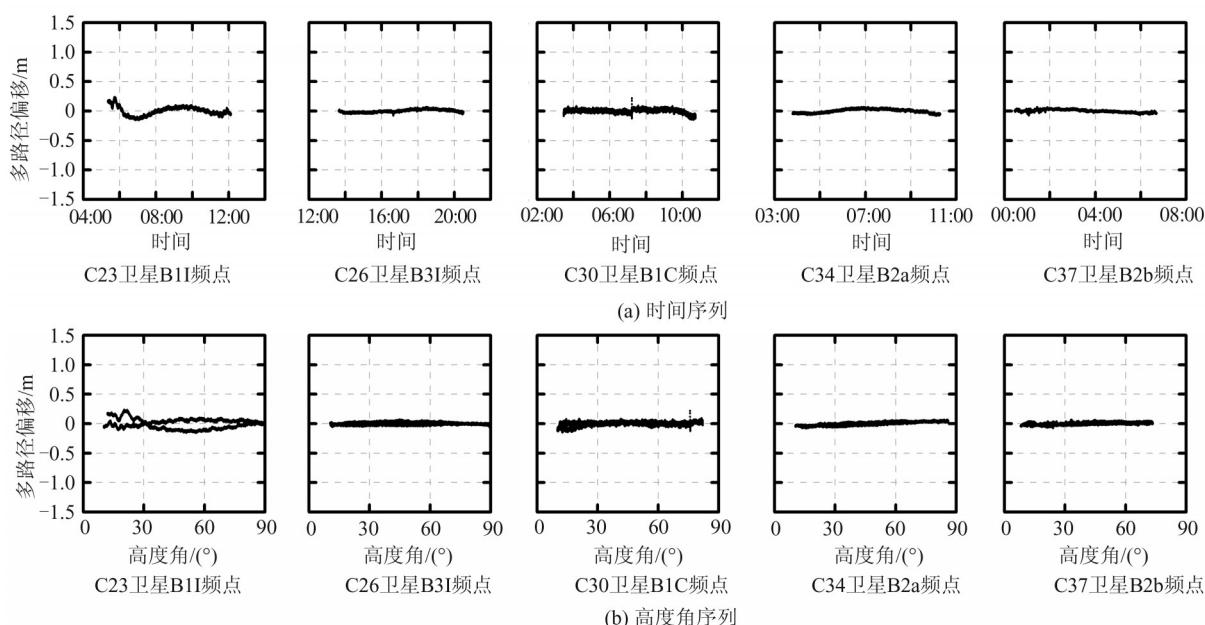


图4 抛物面天线伪距多路径的时间/高度角序列

Fig.4 Code Multipath in Time Series and Elevation Angle Series from Parabolic Antenna

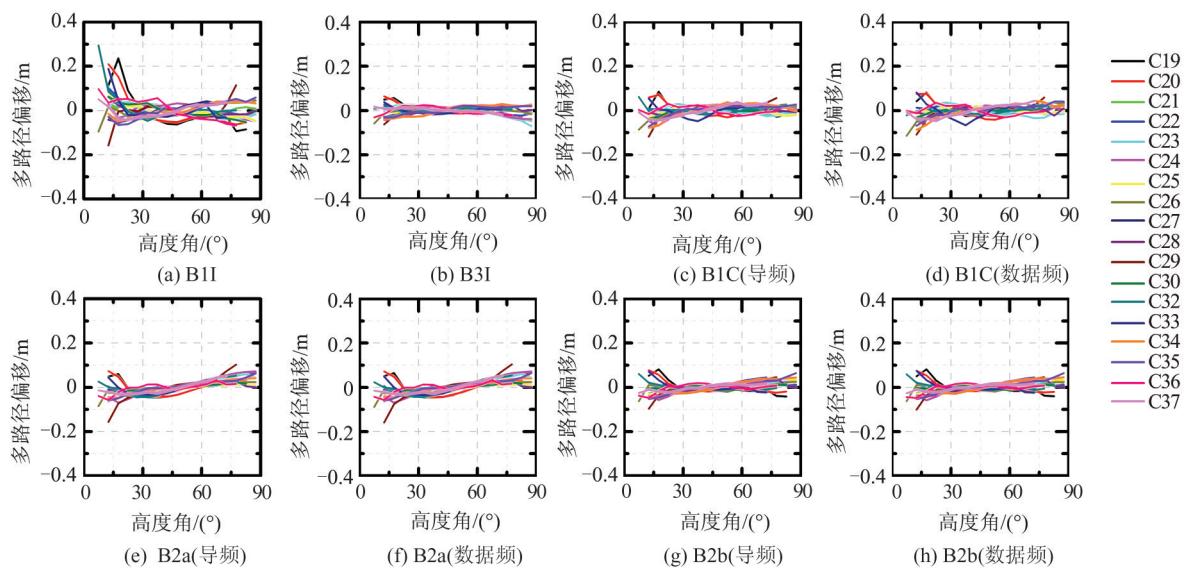


图5 北斗三号抛物面天线伪距多路径偏移随高度角变化

Fig.5 Code Multipath Variation with Elevation Angle of BDS-3 from Parabolic Antenna

根据伪距多路径计算(式(1)),一个连续弧段的伪距多路径序列均值为零,并且消除了几何距离和大气延迟等误差,多路径偏移序列包含了接收机噪声、地面环境多路径以及卫星或者导航信号自身引起的噪声或者误差。同时,使用抛物面天线采集数据能够较好消除地面多路径误差,40 m的天线口径保证了信号本身的强度和稳定性,接收机噪声相对较小,这些误差被较好地消除或削弱之后,计算抛物面天线数据伪距多路径组合的均方根(root mean square, RMS)值,均方根的大小能够反映由卫星信号自身引起的伪距观测噪声水平。

本文18颗北斗三号卫星伪距多路径序列RMS值的计算结果如表3所示。由表3可以看出:(1)C19卫星B1I频点的RMS值最大,为0.177 m,C32卫星B3I频点的RMS值最小,为0.014 m。比较不同频点的RMS均值,B1I频点

平均RMS值在5个频点中最大,为0.080 m;其次是B1C频点和B2a频点;B2b频点RMS均值相对较小,为0.035 m;B3I频点RMS均值在5个频点中最小,为0.026 m。(2)B1C导频分量RMS均值为0.047 m,小于数据频分量0.054 m;B2a频点导频分量RMS均值和数据频分量相当,均为0.043 m。B1C和B2a频点不同信号分量的RMS统计结果表明,信号的噪声水平跟卫星信号设计的发射功率相关,发射功率较大的分量,噪声较小,测距精度较高,发射功率相当的分量其噪声水平也相近。(3)比较不同卫星的RMS均值,C19和C29卫星平均RMS值相对偏大,接近0.09 m,其余卫星平均RMS值在0.035~0.067 m之间。对于本文使用抛物面天线采集的18颗北斗三号卫星数据,所有频点伪距多路径RMS均值为0.045 m,因此可以认为,由卫星或者信号本身引起的平均伪距测距误差为0.045 m,优于0.1 m。

表3 北斗三号卫星多路径序列均方根 /m
Tab.3 RMS of Multipath Series of BDS-3 Satellites /m

卫星号	卫星频点								卫星均值
	B1I	B3I	B1C (导频)	B1C (数据频)	B2a (导频)	B2a (数据频)	B2b (导频)	B2b (数据频)	
C19	0.177	0.041	0.082	0.084	0.072	0.073	0.070	0.069	0.083
C20	0.132	0.034	0.065	0.068	0.052	0.052	0.049	0.048	0.063
C21	0.075	0.028	0.045	0.051	0.048	0.048	0.029	0.029	0.044
C22	0.094	0.024	0.041	0.044	0.049	0.049	0.030	0.029	0.045
C23	0.068	0.030	0.037	0.046	0.043	0.043	0.028	0.028	0.040
C24	0.078	0.028	0.058	0.068	0.055	0.054	0.044	0.044	0.054
C25	0.066	0.020	0.031	0.045	0.023	0.024	0.032	0.032	0.034
C26	0.077	0.023	0.040	0.052	0.033	0.033	0.032	0.032	0.040
C27	0.050	0.025	0.043	0.047	0.029	0.029	0.033	0.033	0.036
C28	0.060	0.025	0.042	0.050	0.024	0.024	0.026	0.026	0.035
C29	0.128	0.031	0.079	0.081	0.091	0.092	0.058	0.060	0.077
C30	0.059	0.019	0.033	0.036	0.029	0.029	0.021	0.021	0.031
C32	0.067	0.014	0.035	0.037	0.040	0.040	0.020	0.020	0.034
C33	0.085	0.020	0.046	0.054	0.037	0.038	0.038	0.040	0.045
C34	0.043	0.031	0.044	0.052	0.033	0.032	0.032	0.032	0.037
C35	0.054	0.022	0.035	0.043	0.036	0.036	0.037	0.036	0.037
C36	0.067	0.022	0.031	0.039	0.032	0.033	0.024	0.024	0.034
C37	0.062	0.026	0.066	0.073	0.042	0.041	0.024	0.024	0.045
频点均值	0.080	0.026	0.047	0.054	0.043	0.043	0.035	0.035	0.045

2.3 载波多路径偏差分析

高精度应用中主要使用载波相位观测值,因此使用载波三频组合的方法对全向天线和抛物面天线采集的载波观测值进行了相应处理,进一步分析载波相位观测值是否存在和卫星相关的测距偏差。图6为IGS所属WUH2测站2020-03-08的

载波三频组合时间序列结果。

从图6可以看出,各颗卫星不同的载波三频组合多路径误差均未出现随时间变化的明显偏差,在卫星出现后和消失前的低高度角阶段,载波三频组合值离散程度较高,随着高度角增大,离散程度变小,载波三频组合序列更加集中。

WUH2 站的载波三频组合的变化范围为 $-10\sim10$ mm, 远小于表 1 中北斗系统各个频点的载波波长。从图 6 可知, 在全向天线载波观测值中, 没有发现北斗三号存在系统性的误差。

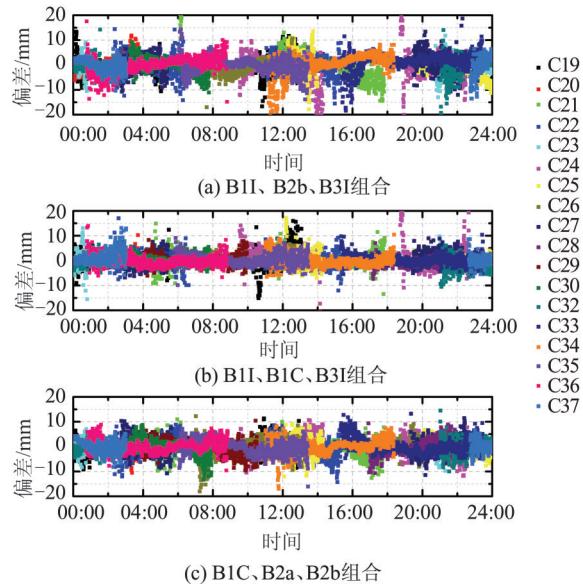


图 6 北斗三号 WUH2 站载波相位三频组合偏差时间序列

Fig.6 Time Series of Carrier Phase Triple-Frequency Combination of BDS-3 at WUH2 Station

对本文中使用抛物面天线采集的数据计算载波三频组合值, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看出:(1)不同的载波三频组合在整个弧段上非常平稳, 在卫星高度较低时也未出现较大噪声。(2)由图 7(a)、7(b)和 7(c)可知, 本文中所选取的 3 种载波三频组合均未出现系统性偏差, 根据表 2 中不同组合系数绝对值的大小关系可知, (B1I, B2b, B3I) 组合反映了 B2b 频点和 B3I 频点没有明显随时间变化的偏差; (B1I, B1C, B3I) 组合反映了 B1I 频点和 B1C 频点没有明显随时间变化的偏差; 而(B1C, B2a, B2b) 组合则反映了 B2a 频点和 B2b 频点没有明显的随时间变化的偏差; 3 组载波三频组合的结果综合表明, 本文中 18 颗北斗三号卫星 5 个频点均没有明显随时间变化的星上载波偏差。(3)比较图 7(c)和 7(d)可知, 导频数据载波三频组合和数据频类似, 均未出现明显的系统性偏差。

对上述载波三频组合序列计算相应的 RMS 值, 结果如图 8 所示。从图 8 可以看出, 本文选取的 3 种载波三频组合 RMS 相差较小, 大部分卫星载波三频组合 RMS 值变化范围为 $0.3\sim0.6$ mm, 除少数卫星的(B1I, B2b, B3I) 组合外, 其余卫星的所有三频组合 RMS 值均小于 0.6 mm。基于上

述 RMS 统计结果, 认为卫星或者卫星信号对载波观测值观测量的影响一般小于 0.6 mm, 这也充分体现北斗三号系统载波相位观测量具有良好的噪声水平和测距性能。

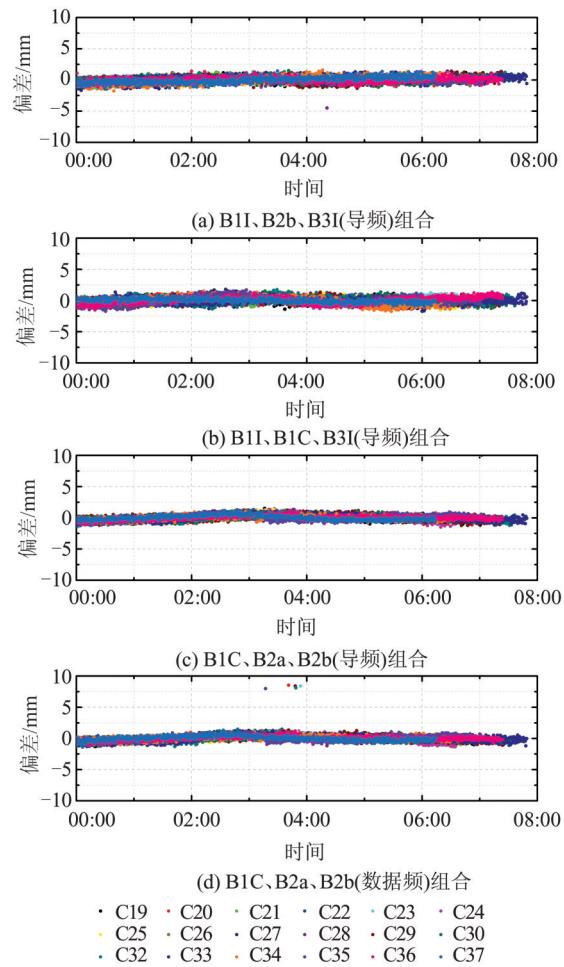


图 7 北斗三号抛物面天线载波三频组合时间序列

Fig.7 Time Series of Carrier Phase Triple-Frequency Combination of BDS-3 from Parabolic Antenna

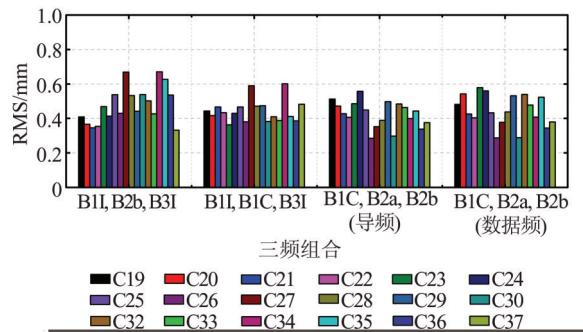


图 8 抛物面天线载波三频组合均方根值
Fig.8 RMS of Carrier Phase Triple-Frequency Combination from Parabolic Antenna

3 结语

本文主要基于大口径抛物面天线数据, 对北

斗三号卫星数据质量和观测值偏差进行了分析和评估。主要结论如下:

1)抛物面天线观测数据可清晰地反映同一频点不同卫星的载噪比之间没有出现显著的差异,载噪比变化幅度较小。不同频点之间载噪比的相对大小关系为B1I>B1C(导频)>B3I>B2a(导频、数据频)≈B2b(导频、数据频)>B1C(数据频)。特别地,B1C(导频)>B1C(数据频)和B2a(导频)≈B2a(数据频)的关系符合北斗三号发布的空间信号接口文件中对于这两种信号不同分量功率的定义。

2)在星上伪距多路径方面,抛物面天线数据分析结果表明,北斗三号卫星各个频点中均未发现与北斗二号卫星类似的相同量级系统性偏差。部分频点存在变化波动,但与高度角的相关性不强,所有卫星变化波动的平均量级为0.1 m。各频点星上伪距多路径RMS值的相对关系为B3I<B2b(导频、数据频)<B2a(导频、数据频)<B1C(导频)<B1C(数据频)<B1I。C19、C20和C29卫星B1I频点多路径的RMS值大于0.1 m,其余卫星的所有频点均小于0.1 m。所有卫星多路径序列的平均RMS值为0.05 m。因此,基于本文抛物面天线数据的结果,认为北斗三号星上伪距偏差(包括多路径和噪声)一般不会超过0.1 m。

3)在星上载波多路径方面,使用载波三频组合分析了北斗三号卫星各个频率载波观测值的多路径变化和噪声大小。结果表明,北斗三号卫星载波相位观测值上未出现与时间或者高度角密切相关的系统性偏差。多个载波三频组合的RMS统计结果表明,不同组合之间没有显著差异。抛物面天线数据采集的载波三频多路径组合RMS值绝大部分小于0.6 mm,表明由卫星端引入的载波测距误差一般不会超过0.6 mm。

大口径抛物面天线优良的观测性能能够较好地削弱地面设备和环境的影响,其观测结果能够很好地反映出系统或者卫星星上可能存在的系统误差,对北斗三号以及其他GNSS系统星上系统性偏差分析和诊断具有一定参考意义。

致谢:感谢中国科学院国家授时中心、IG-MAS和IGS提供的相关数据。

参 考 文 献

- [1] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 2.0)[EB/OL]. (2018-12-27)[2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201812/P020181227529449178798.pdf> (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(2.0版)[EB/OL]. (2018-12-27)[2020-04-20]. [http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201812/P020181227529449178798.pdf\)](http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201812/P020181227529449178798.pdf)
- [2] Chen Zhonggui, Wu Xiangjun. General Design of the Third Generation BeiDou Navigation Satellite System[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(6): 835-845 (陈忠贵, 武向军. 北斗三号卫星系统总体设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 835-845)
- [3] Wu Z Q, Zhou S S, Hu X G, et al. Performance of the BDS3 Experimental Satellite Passive Hydrogen Maser[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2): 1-13
- [4] Xie X, Geng T, Zhao Q L, et al. Precise Orbit Determination for BDS-3 Satellites Using Satellite-Ground and Inter-Satellite Link Observations [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 1-12
- [5] Wang Le, Xie Shichao, Huang Guanwen, et al. BDS-3 Satellite Real-Time Orbit Correction Parameters Generation and Service Performance Analysis [J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(4): 51-56 (王乐, 解世超, 黄观文, 等. 北斗三号实时轨道改正数生成及服务性能分析[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(4): 51-56)
- [6] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Precise Point Positioning Service Signal PPP-B2b(Beta Version)[EB/OL]. (2019-12-27)[2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227331847498839.pdf> (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗系统空间信号接口控制文件PPP-B2b(测试版)[EB/OL]. (2019-12-27)[2020-04-20]. [http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227331847498839.pdf\)](http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227331847498839.pdf)
- [7] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document [EB/OL]. (2016-11-07)[2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201805/P020180507527106075323.pdf> (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗系统空间信号接口控制文件[EB/OL]. (2016-11-07)[2020-04-20]. [http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201805/P020180507527106075323.pdf\)](http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201805/P020180507527106075323.pdf)
- [8] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B3I(Version 1.0)[EB/OL]. (2018-02-09)[2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201802/P020180207527106075323.pdf>

- P020180209620480385743.pdf (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗系统空间信号接口控制文件B3I (1.0 版) [EB/OL]. (2018-02-09) [2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201802/P020180209620480385743.pdf>)
- [9] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B1I(Version 3.0) [EB/OL]. (2019-02-27) [2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201902/P020190227592987952674.pdf> (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗系统空间信号接口控制文件B1I (3.0 版) [EB/OL]. (2019-02-27) [2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201902/P020190227592987952674.pdf>)
- [10] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B1C (Version 1.0) [EB/OL]. (2017-12-27) [2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201712/P020171226741342013031.pdf> (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗系统空间信号接口控制文件B1C (1.0 版) [EB/OL]. (2017-12-27) [2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201712/P020171226741342013031.pdf>)
- [11] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B2a (Version 1.0) [EB/OL]. (2017-12-27) [2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201712/P020171226742357364174.pdf> (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗系统空间信号接口控制文件B2a (1.0 版) [EB/OL]. (2017-12-27) [2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201712/P020171226742357364174.pdf>)
- [12] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B3I (Beta Version) [EB/OL]. (2019-12-27) [2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227325641753862.pdf> (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗系统空间信号接口控制文件B3I (测试版) [EB/OL]. (2019-12-27) [2020-04-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227325641753862.pdf>)
- [13] Wanninger L, Beer S. BeiDou Satellite-Induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Therapy[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4): 639-648
- [14] Wang Guangxing. On the Analysis of BeiDou Observations' Characteristics and Its Application in PPP Integer Ambiguity Resolution [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016 (王广兴. 北斗观测值特性分析及其在PPP模糊度固定应用中的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016)
- [15] Xu Lei, Chang Guobin, Gao Jingxiang, et al. Estimation of BDS DCB Based on Closure Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(4): 520-529 (徐磊, 常国宾, 高井祥, 等. 附加闭合差约束的BDS频间偏差估计模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(4): 520-529)
- [16] Zhou R Y, Hu Z G, Zhao Q L, et al. Elevation-Dependent Pseudorange Variation Characteristics Analysis for the New-Generation BeiDou Satellite Navigation System [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 1-11
- [17] Cheng Junlong, Wang Wang, Ma Liye, et al. Preliminary Analysis of Observation Quality and Positioning Precision for BDS-3 Satellites [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(8): 1-7 (程军龙, 王旺, 马立烨, 等. 北斗三号观测数据质量及定位精度初步评估[J]. 测绘通报, 2019(8): 1-7)
- [18] Park K D, Davis J L, Jarlemark P O J, et al. Multipath Characteristics of GPS Signals as Determined from the Antenna and Multipath Calibration System [C]. The 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Fairfax, VA, USA, 2002
- [19] Blum R, Dötterböck D, Pany T. GNSS Signal Waveform Estimation with 2.4 m Dish Antenna and a Synthetic Aperture Antenna [C]//The 30th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, 2017
- [20] He Wentao, Xu Jianhua, Ye Tianchun. Adaptive C/N Estimation Method of GPS Weak Signal [J]. *Application of Electronic Technique*, 2010, 36(6): 111-114 (何文涛, 徐建华, 叶甜春. GPS弱信号的自适应载噪比估计算法[J]. 电子技术应用, 2010, 36(6): 111-114)
- [21] Simsky A. Three's the Charm. Triple-Frequency Combinations in Future GNSS [J]. *Inside GNSS*, 2006, 1(5): 38 - 41
- [22] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. Three's the Challenge: A Close Look at GPS SVN62 Triple-Frequency Signal Combinations Finds Carrier-Phase Variations on the New L5 [J]. *GPS World*, 2010, 21(8): 8-19

Analysis of Pseudorange and Carrier Ranging Deviation of BDS-3 Using Parabolic Directional Antenna

ZHOU Renyu¹ HU Zhigang¹ CAI Hongliang² ZHAO Zhen³ RAO Yongnan⁴
CHEN Liang^{1,5} ZHAO Qile¹

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

3 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4 National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

5 Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China

Abstract: Objectives: For global navigation satellite system (GNSS), the ranging performance of observation would influence the system service capability. Methods: Parabolic antenna with large-diameter could greatly reduce the impact of the ground equipment and the environment on signal acquisition. Based on data from parabolic antenna, observation characteristics and ranging performance of BeiDou-3 global satellite navigation system (BDS-3) are analyzed. Results: The results show that, regarding the pseudorange deviation on BeiDou-3 satellite, no systematic deviation of the same magnitude, compared with BeiDou-2, is found on the signal of B1I, B3I, B1C, B2a, and B2b. There are fluctuations on some signals. However, the correlation with elevation angle is not strong, and the average magnitude of all satellite fluctuations is 0.1 m. This paper analyzes the multipath variation and noise level of carrier observation for BeiDou-3 satellite of each signal using triple-frequency combinations. The fluctuations of carrier phase triple combination are of the millimeter level, and those fluctuations do not closely correlate with the elevation or time. The root mean square of the triple-frequency carrier combination from parabolic antenna is mostly less than 0.6 mm. Conclusions: The results indicate that no systematic bias occurs in code and phase observation of BDS-3, and the system has a good ranging performance.

Key words: BeiDou-3 global satellite navigation system (BDS-3); parabolic antenna; code multipath; carrier phase multipath; noise level

First author: ZHOU Renyu, PhD candidate, specializes in performance evaluation of BeiDou system. E-mail: ry.zhou@whu.edu.cn

Corresponding author: HU Zhigang, PhD, associate professor. E-mail: zhigang.hu@whu.edu.cn

Foundation support: Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques (201901); Special Research Fund of LIES-MARS, Wuhan University (202007).

引文格式: ZHOU Renyu, HU Zhigang, CAI Hongliang, et al. Analysis of Pseudorange and Carrier Ranging Deviation of BDS-3 Using Parabolic Directional Antenna[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(9): 1298–1308. DOI: 10.13203/j.whugis20200182(周仁宇,胡志刚,蔡洪亮,等.使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差[J].武汉大学学报·信息科学版,2021,46(9):1298–1308.DOI:10.13203/j.whugis20200182)