

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.018

北斗三号码观测值评估及定位精度分析

解雪峰¹, 胡洪², 高井祥¹

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:随着北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)完成全球组网,北斗三号(BDS-3)3个新频段观测值和定位精度需要评估。文章选取全球范围20个国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS)组织的监测站数据,从信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、伪距多路径(multipath, MP)误差和伪距定位误差方面综合对比BDS-3的6个频段码观测值数据。结果表明:6个频段的SNR从大到小依次为B2a+b、B3I、B2a、B2b、B1C、B1I;6个频段的伪距MP误差从小到大依次为B2a+b、B2a、B3I、B1C、B2b、B1I;B3I频段观测值定位精度最高,B2a+b、B2a频段定位精度相当,且优于B1C频段;目前接收机跟踪BDS-3新频段的可见卫星数相对较少,独立解算时误差较大,稳定性较差。研究结果可为BDS-3应用和发展提供参考。

关键词:北斗三号(BDS-3);信噪比(SNR);多路径(MP)效应;单频;定位精度

中图分类号:P228.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)01-0118-08

Code observation evaluation and positioning accuracy analysis of BDS-3

XIE Xuefeng¹, HU Hong², GAO Jingxiang¹

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: With the successful construction of BeiDou Navigation Satellite System(BDS), the observations and positioning performance of the three new frequency bands of BDS-3 need to be further evaluated. In this paper, data from 20 International GNSS Service(IGS) monitoring stations around the world are selected. The signal-to-noise ratio(SNR), pseudorange multipath(MP) error and pseudorange positioning error of six frequency band codes observations of the BDS-3 system are analyzed. The results show that the SNR of the six frequency bands from large to small is: B2a+b, B3I, B2a, B2b, B1C, and B1I; the pseudorange MP error of the six frequency bands from small to large is: B2a+b, B2a, B3I, B1C, B2b, and B1I; the B3I frequency band observation has the highest positioning accuracy. The positioning accuracy of the B2a+b and B2a frequency bands is at the same level and significantly better than that of the B1C frequency band. Currently, there are relatively few satellites tracked by the receiver, and the accuracy and stability are relatively poor when positioning independently. The research results can provide reference for the application and development of BDS-3.

Key words: BDS-3; signal-to-noise ratio(SNR); multipath(MP) effect; single frequency; positioning accuracy

目前,北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)已完成组网^[1]。北斗三号(BDS-3)卫星的组网改善了北斗系统的星座结构,

也增加了信号频段,分别为B1C、B2a和B2a+b。其中B1C、B2a频段分别与GPS/Galileo系统的L1/E1和L5/E5a频段一致,B2a+b频段与Galileo

收稿日期:2021-01-06

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41704036)

作者简介:解雪峰(1996—),男,安徽肥西人,中国矿业大学硕士生;

胡洪(1985—),男,江苏徐州人,博士,安徽大学讲师,硕士生导师,通信作者,E-mail:huhong@ahu.edu.cn;

高井祥(1960—),男,江苏涟水人,博士,中国矿业大学教授,博士生导师。

leo 系统的 E5 频段一致,这提升了全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)之间的兼容性和互操作性^[2-3]。

随着北斗系统全球组网的完成,BDS-3 新频段的观测值质量和精度亟待进一步评估。针对 BDS-3,文献[4-5]从卫星可见性、精度因子(dilution of precision,DOP)值和多频观测值组合等方面进行系统研究。考虑到码观测值质量与信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)、多路径(multipath,MP)误差的相关性^[6],本文从国际 GNSS 服务(International GNSS Service,IGS)组织监测站中选取 20 个测站,从 SNR、伪距 MP 误差角度对 BDS-3 的新频段信号观测数据质量进行评估,在此基础上对 BDS-3 不同频段信号的码观测值定位精度进行分析。

1 评价指标与单点定位模型

1.1 信噪比

信噪比(R_{SN})指 GNSS 接收机接收卫星调制信号中的载波信号功率(P_{signal})与噪声信号的功率(P_{noise})在 1 Hz 带宽上的比值,是衡量卫星测距信号质量的重要指标^[7],计算公式^[8]为:

$$R_{SN} = 10\lg(P_{\text{signal}}/P_{\text{noise}}) \quad (1)$$

一般地,SNR 越高表明卫星通信信号质量越好^[9]。对于 GNSS 观测值 SNR,在 RINEX 格式观测值文件中与观测值数据一起给出,单位为 dB-Hz。

1.2 多路径误差

MP 误差是指 GNSS 信号由于受到测站附近物体反射的影响进入接收机后与视线方向信号发生干涉引起的误差^[10]。受到 MP 影响的信号相对于直接进入接收机的信号具有更长的反射路径,使得观测值产生偏差^[11]。相对于载波观测值的 MP 效应,伪距 MP 效应具有更大的量级,因此在求解伪距 MP 误差时可以忽略载波观测值 MP 误差的影响。利用多频载波和伪距观测值之间的组合可以对伪距 MP 误差进行求解,第 i 频段的伪距 MP 误差 M_i 计算公式^[12]为:

$$M_i = P_i - \frac{f_i^2 + f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \lambda_i \varphi_i + \frac{2f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \lambda_j \varphi_j - D_i \quad (2)$$

其中: P_i 为伪距观测值; φ 为载波观测值;下标 i,j 为频段编号($i,j \in [1,6], i \neq j$); f 为载波频率; λ 为载波波长; D_i 为组合观测值的整周模糊度、硬件延迟及噪声影响。 D_i 计算公式为:

$$D_i = -\frac{f_i^2 + f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \lambda_i N_i + \frac{2f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \lambda_j N_j - H_i \quad (3)$$

其中: N 为相应频段载波观测值的整周模糊度; H 为硬件延迟及噪声。在没有周跳的情况下, D 为常量,其值通过对多个历元取平均的方法确定。MP 误差越小,观测值质量越好。

1.3 标准单点定位模型

标准单点定位伪距观测方程为:

$$P_r^s = \rho_r^s + c(d_{t_r} - d_r^s) + T_r + I_r + \varepsilon \quad (4)$$

其中:下标 r 表示接收机,上标 s 表示卫星; ρ 为接收机和卫星之间的几何距离; c 为光的真空传播速度; d_{t_r} 为接收机钟差; d_r^s 为卫星钟差; T 为对流层延迟, I 为电离层延迟,可通过萨斯坦莫宁和克罗布歇尔模型进行改正; ε 为其他误差。北斗系统播发的导航电文钟差改正中包含 B3I 信号的设备群延迟(timing group delay,TGD) T_{GD} ,其他频段的码偏差改正相对于 B3I 进行改正^[13-14],即

$$d_r^s = d_{r_{B3I}}^s - T_{GD_i} \quad (5)$$

将(4)式在接收机的坐标处进行泰勒展开,假设有 $n(n \geq 4)$ 颗卫星,则单点定位的误差方程为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{L} \quad (6)$$

其中: \mathbf{V} 为改正数向量; \mathbf{A} 为系数矩阵; \mathbf{x} 为待估参数向量; \mathbf{L} 为观测值误差向量。

对接收机坐标进行估计时,考虑各观测值精度存在差异,利用高度角随机模型确定不同卫星伪距观测值的精度,有

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\sin(e_1)} \quad (7)$$

其中: σ 为观测值中误差; σ_0 为伪距测量中误差,通常设为 0.3 m; e_1 为卫星高度角。通过(7)式可以得到观测值误差协方差矩阵,则权阵 \mathbf{P} 为:

$$\mathbf{P} = \text{diag}[\sigma_1^{-2} \quad \sigma_2^{-2} \quad \cdots \quad \sigma_n^{-2}] \quad (8)$$

基于最小二乘估计原理,得到待估参数的估计值为:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (9)$$

使用(9)式进行迭代计算,直到 \mathbf{x} 收敛,即可得到接收机的绝对坐标^[15]。

2 实验与定位性能指标分析

2.1 实验数据

为了综合评价 BDS-3 的观测值质量及定位精度,本文从 IGS 监测站中均匀选取 20 个测站,其中 12 个测站仅提供北斗二号(BDS-2)频段的信号观测值,8 个测站提供 BDS-3 新频段的信号观测值。

20 个测站分布情况如图 1 所示。

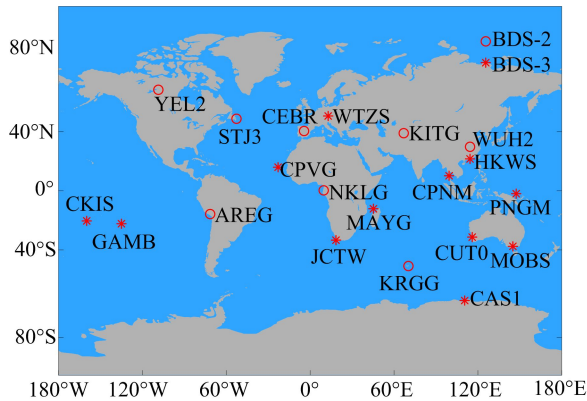


图 1 20 个 IGS 测站分布情况

BDS-3 新频段数据在 RINEX3.04 观测值文件中给出,该文件能够兼容北斗系统全部 6 个频段(B1I/B2b/B3I/B1C/B2a/B2a+b)的观测值数据。6 个频段的详细信息^[16]见表 1 所列。

B1I、B3I 分别对应 BDS-2 的 B1、B3 频段, B2b 频段兼容 BDS-2 的 B2 频段信号,由于本文使用的观测数据中 B2b 频段均为 BDS-2 的 B2 频段信号,因此本文将 B2b 视为 BDS-2 信号进行

评估。

本文选取 2020 年 8 月 1 日(年积日为 214 d) 20 个测站的观测值数据,采样间隔为 30 s。对各测站接收的不同频段码观测值进行质量评估和定位精度分析,重点对 BDS-3 新频段信号进行对比研究。

表 1 北斗系统 6 个频段信号调制信息

频段名称	频率/MHz	调制方式	备注
B1I	1 561.098	BPSK	
B2b	1 207.140	BPSK(10)	BDS-2 信号
B3I	1 268.520	BPSK	
B1C	1 575.420	QMBOC(6,1,4/33)	
B2a	1 176.450	BPSK(10)	BDS-3 新频段
B2a+b	1 191.795	BPSK	

2.2 信噪比分析

首先将各测站数据分为 2 组:接收 BDS-2 频段信号的 12 个测站为一组;接收 BDS-3 频段信号的 8 个测站为另一组。BDS-2 信号 12 个测站 3 个频段观测值 SNR 统计结果见表 2 所列。

表 2 BDS-2 信号 12 个测站 3 个频段 SNR 统计结果 单位: dB-Hz

测站	B1I		B2b		B3I	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
MOBS	[28.0,53.0]	43.1	[28.0,52.7]	44.2	—	—
CASI	[31.2,44.0]	40.8	[32.5,45.0]	41.2	—	—
CUT0	[23.7,54.0]	42.0	[27.5,51.2]	42.9	[22.5,51.2]	39.7
JCTW	[27.5,54.2]	41.0	[29.5,52.0]	40.0	—	—
PNGM	[23.7,52.0]	41.2	[25.0,51.5]	42.8	[18.2,52.7]	42.7
MAYG	[23.7,53.5]	40.0	[17.7,51.0]	40.1	[19.2,54.0]	41.4
GAMB	[23.7,53.0]	40.0	[34.0,53.0]	48.0	[23.0,53.5]	45.9
CKIS	[25.2,52.7]	40.6	[24.5,52.2]	41.8	[26.0,52.7]	41.2
HKWS	[27.5,52.7]	46.1	[27.5,52.7]	46.2	—	—
CPNM	[24.5,42.2]	34.5	[28.7,44.7]	39.8	—	—
WTZS	[18.2,52.0]	44.1	[18.0,53.0]	41.8	[24.0,53.0]	44.0
CPVG	[28.0,53.5]	43.1	—	—	[23.0,53.0]	42.8

由表 2 可知:不同测站对 BDS-2 信号接收情况略有差别,有个别测站无法接收到全部 3 个频段数据。整体来看,各测站 SNR 集中分布在 18.0~54.0 dB-Hz 之间,均值保持在 40.0 dB-Hz 以上,信号质量较好;仅 CPNM 站的 SNR 偏低,可能是天线原因造成的,仅该测站使用 JAVRIN-GANT_DM 型号的天线;CASI 站位于南极洲,虽然信号接收率较低,但是 SNR 在正常水平;从 SNR 均值看,B3I 最大,B2b 略优于 B1I,但各测

站对 B1I 信号的兼容性最好。

BDS-3 信号 8 个测站 6 个频段 SNR 统计结果见表 3 所列。

由表 3 可知:BDS-3 信号新频段(B1C/B2a/B2a+b)SNR 主要分布在 18.0~62.0 dB-Hz 之间,相较于 BDS-2 信号频段(B1I/B2b/B3I),BDS-3 新频段信号 SNR 均值更大,各测站均值在 42.0 dB-Hz 以上;仅 WUH2 站接收到 B2a+b 频段信号,且该频段信号 SNR 均值最大,达到

52.6 dB-Hz。整体来看,北斗系统 6 个频段 SNR 从大到小依次为 B2a + b、B3I、B2a、B2b、B1C、B1I。BDS-3 新频段中 B2a + b、B2a 频段 SNR 整体表现较好,B1C 频段 SNR 相对较低。由表 2、表 3 可知,相对于仅接收 BDS-2 信号的测站,接收 BDS-3 新频段信号的测站整体 SNR 更高。

下面以 CUT0、WUH2 测站为例,给出其各

频段信号 SNR 随高度角变化情况,如图 2 所示。

由图 2 可知,SNR 随高度角增加而增加,即高度角大的卫星信号质量更高。WUH2 站 的 BDS-3 新频段信号在高度角较大时,SNR 分布更集中,信号更加稳定。CUT0 站的 B3I 频段在高度角较大时,部分卫星 SNR 相对较低。整体来看,BDS-3 新频段信号 SNR 优于 BDS-2 信号。

表 3 BDS-3 信号 8 个测站 6 个频段 SNR 统计结果 单位: dB-Hz

测站	B1I		B2b		B3I	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
WUH2	[30.2,53.0]	43.8	[24.0,55.0]	46.2	[23.7,55.5]	43.5
AREG	[18.5,54.5]	45.6	[18.0,55.0]	46.8	[24.0,56.0]	47.3
NKLG	[18.5,54.5]	43.4	[18.5,55.2]	41.9	[24.5,56.0]	44.8
KRGG	[23.7,51.5]	43.4	[21.7,52.0]	43.2	[19.5,51.2]	43.1
KITG	[18.0,53.2]	43.1	[18.2,54.0]	44.6	[23.7,55.0]	45.1
CEBR	[18.0,53.2]	42.0	[18.5,54.7]	40.2	[23.0,53.5]	43.7
STJ3	[18.5,52.5]	46.0	[19.0,53.0]	46.0	[23.7,53.0]	46.2
YEL2	[18.5,52.7]	45.0	[21.0,52.7]	43.0	[24.7,53.0]	44.8

测站	B1C		B2a		B2a+b	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
WUH2	[21.2,51.7]	44.3	[21.0,58.2]	48.8	[22.5,62.0]	52.6
AREG	[23.7,52.7]	44.2	[22.7,53.5]	45.1	—	—
NKLG	[23.2,54.2]	42.8	[23.5,54.2]	44.4	—	—
KRGG	[25.0,50.5]	44.5	[25.5,53.2]	46.0	—	—
KITG	[23.5,51.5]	43.6	[22.7,53.5]	44.9	—	—
CEBR	[23.0,52.0]	43.6	[22.7,54.7]	45.5	—	—
STJ3	[22.5,51.0]	44.8	[22.5,53.0]	45.2	—	—
YEL2	[23.2,50.5]	44.3	[23.2,52.7]	44.6	—	—

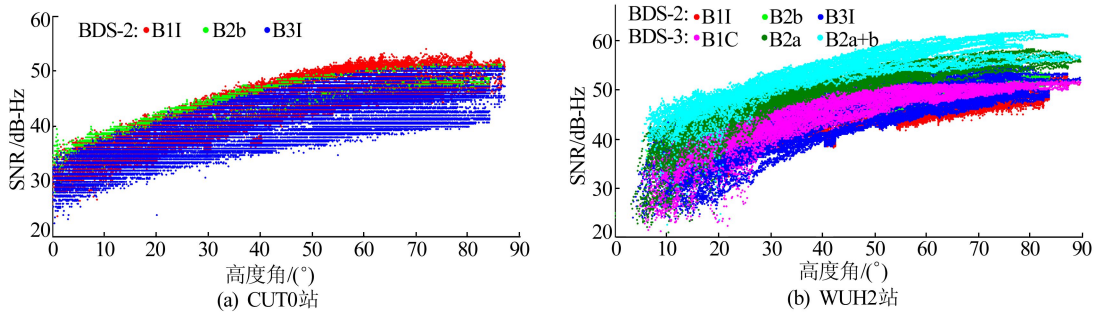


图 2 CUT0、WUH2 测站各频段 SNR 随高度角变化情况

2.3 多路径误差分析

MP 误差是由测站周围物体(如建筑物、水面等)对卫星信号的影响造成的,具有很大的随机性,难以通过模型进行有效消除。本文通过不同频率码观测值和载波观测值线性组合的方法,求得码观测值 MP 误差,其中包含码观测值噪声的共同影响。利用(2)式、(3)式在多个历元求均值消去模糊度参数,求得各频段码观测值 MP 误差。BDS-2 信号 12 个测站 MP 误差分布均值和标准

差(standard deviation, STD)见表 4 所列。

BDS-3 信号 8 个测站 6 个频段伪距 MP 误差统计结果见表 5 所列。

从表 4 可以看出,各测站的伪距 MP 误差呈均值近似为 0 的正态分布。从各频段的误差分布标准差来看,各测站 3 个频段误差标准差平均值分别为 0.476、0.445、0.420 m。均值越接近 0,其标准差越小,即误差分布越集中,抗 MP 表现越好。

表 4 BDS-2 信号 12 个测站 3 个频段 MP 误差统计结果

单位:m

测站	B1I		B2b		B3I	
	均值	STD	均值	STD	均值	STD
MOBS	4.4E-2	0.956	1.6E-3	0.404	—	—
CAS1	-5.9E-6	0.228	-2.6E-7	0.207	—	—
CUT0	-5.1E-7	0.583	4.9E-3	0.551	1.6E-3	0.387
JCTW	2.1E-6	0.458	4.3E-3	0.442	—	—
PNGM	4.9E-7	0.450	1.3E-2	0.838	7.2E-3	0.387
MAYG	-1.9E-6	0.458	-1.6E-6	0.365	2.6E-6	0.436
GAMB	1.6E-7	0.434	-6.8E-4	0.497	1.1E-17	0.260
CKIS	-4.8E-6	0.568	-2.2E-6	0.415	1.9E-3	0.881
HKWS	6.7E-7	0.311	-8.8E-7	0.237	—	—
CPNM	3.9E-6	0.465	8.7E-4	0.558	—	—
WTZS	-6.5E-4	0.491	-1.2E-6	0.381	-3.6E-4	0.412
CPVG	2.4E-6	0.310	—	—	8.7E-7	0.300

表 5 BDS-3 信号 8 个测站 6 个频段 MP 误差统计结果

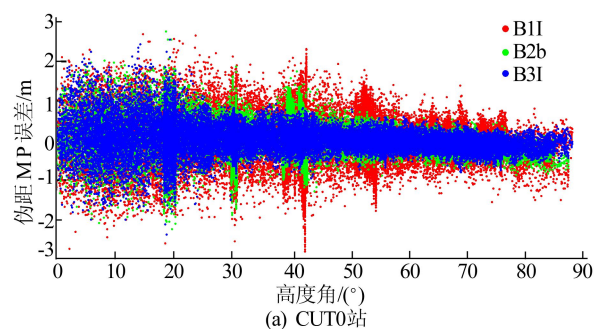
单位:m

测站	B1I		B2b		B3I	
	均值	STD	均值	STD	均值	STD
WUH2	9.6E-2	1.001	-2.3E-2	0.891	1.3E-2	0.931
AREG	1.1E-6	0.326	-1.2E-2	0.610	1.1E-6	0.169
NKLG	7.0E-6	0.415	9.0E-7	0.421	-3.4E-4	0.410
KRGG	-6.4E-7	0.300	-2.0E-6	0.225	2.1E-6	0.176
KITG	-9.1E-7	0.343	5.8E-7	0.287	-1.9E-6	0.211
CEBR	-1.1E-6	0.497	3.6E-6	0.513	1.8E-6	0.328
STJ3	-1.4E-3	0.597	-7.3E-3	0.706	1.3E-3	0.662
YEL2	2.2E-3	0.934	-2.1E-7	0.308	-1.8E-3	0.645

测站	B1C		B2a		B2a+b	
	均值	STD	均值	STD	均值	STD
WUH2	7.3E-2	0.945	-8.3E-3	0.468	1.1E-3	0.458
AREG	-2.0E-6	0.250	-5.5E-7	0.196	—	—
NKLG	3.3E-3	0.423	-7.7E-5	0.160	—	—
KRGG	2.4E-6	0.349	2.1E-7	0.190	—	—
KITG	2.7E-6	0.368	-8.6E-7	0.149	—	—
CEBR	1.2E-6	0.396	2.0E-6	0.311	—	—
STJ3	-1.4E-3	0.662	-6.5E-3	0.634	—	—
YEL2	8.6E-4	0.425	-1.5E-2	0.604	—	—

由表 5 可知,各测站 B1I、B2b、B3I、B1C、B2a 5 个频段的伪距 MP 误差标准差均值分别为 0.551、0.495、0.442、0.477、0.339 m。仅 WUH2 站接收 B2a+b 频段信号,其 MP 误差标准差为 0.458 m。由此可见,同一测站 BDS-3 新频段信号观测值在抑制 MP 误差方面比 BDS-2 信号更优,B2a+b 频段最优,其次是 B2a、B1C 频段。表 5 中 BDS-2 信号对 MP 误差抑制的整体表现与表 4 中的 12 个测站统计结果一致。5 个频段 MP 误差均值从小到大依次为 B2a、B3I、B1C、B2b、B1I。从 WUH2 站看,B2a+b 频段相对于其他频段,抗 MP 方面表现更好。

为了更直观地描述 MP 误差的分布情况,以 CUT0 站和 WUH2 站为例,给出各频段伪距 MP 误差随高度角的变化情况,如图 3 所示。



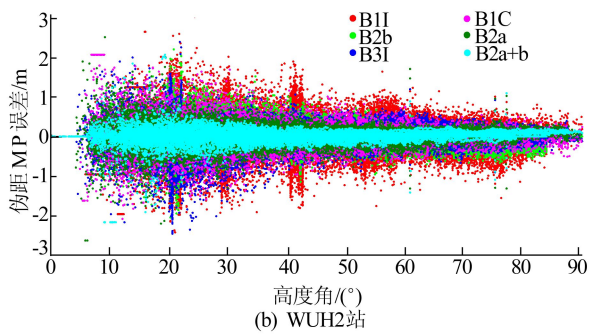


图 3 CUT0、WUH2 测站伪距 MP 误差随高度角变化情况

从图 3 可以看出,不同频段码观测值 MP 误差约为 3 m,且随着高度角增大逐渐减小至 1 m 左右。CUT0 站和 WUH2 站不同频段的伪距 MP 误差分布不同。

在 CUT0 站,BDS-2 信号 3 个频段的 MP 误差从小到大依次为 B3I、B2b、B1I; B3I 对 MP 效应的抑制更加明显,尤其是在大高度角下,B3I 码观测值 MP 误差小于 0.5 m;B1I 码观测值 MP 误差最大,且明显高于另外 2 个频段。

在 WHU2 站的 BDS-3 新频段信号中,B2a+b、B2a在高度角较大时,其 MP 效应显著减小,基本降低至观测值噪声水平,具有良好的抗

MP 效应;BDS-2 信号中的 B1I 表现较差,MP 误差明显高于其他 2 个频段的观测值。

2.4 定位精度分析

为了研究北斗系统不同频段观测值质量,本文利用各测站不同频段的观测值进行伪距单点定位,对比分析不同频段的伪距观测值精度。

基于标准单点定位伪距观测方程对各频段的数据分别进行求解,卫星截止高度角统一设置为 10°。

为了评价解算精度,计算各测站解算点位误差标准差 S_{TD} ,计算公式为:

$$S_{TD} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2}$$

(10)

其中: (X, Y, Z) 为点位的坐标参考值,从 IGS 发布的全球监测站坐标文件中获取,视为真值; (X_i, Y_i, Z_i) 为解算得到的坐标值; m 为历元数。

BDS-2、BDS-3 信号各测站不同频段码观测值解算点位误差 STD 及对应频段下的平均卫星数分别如图 4、图 5 所示。

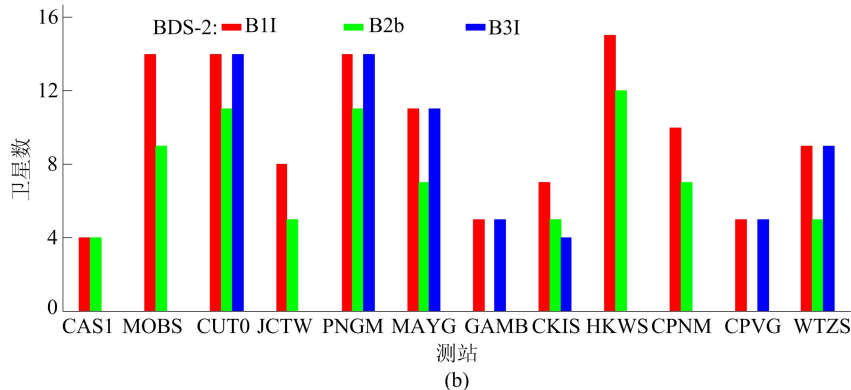
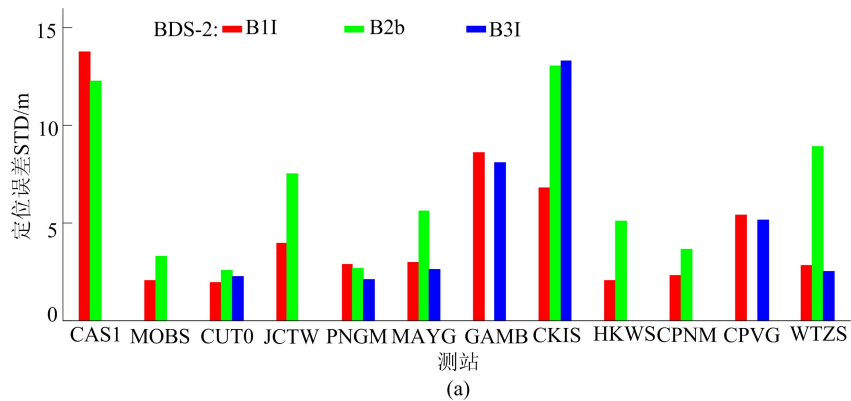


图 4 BDS-2 信号标准单点定位误差 STD 及平均卫星数

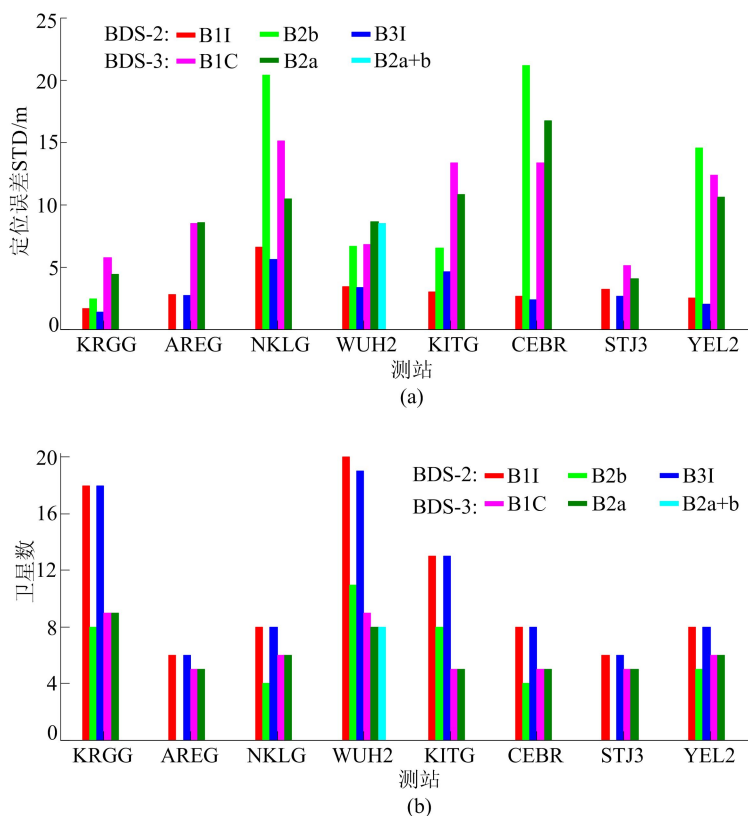


图 5 BDS-3 信号标准单点定位误差 STD 及平均卫星数

从图 4 可以看出: B2b 频段的卫星数相对于另外 2 个频段较少, B1I、B3I 频段卫星数基本相当; PNGM、MAYG、GAMB、CPVG 和 WTZS 测站的 B1I、B3I 频段可用卫星数相当, 但解算点位误差 B3I 均优于 B1I; B2b 频段由于可用卫星相对较少, 其解算误差普遍偏大, 尤其是当可见卫星数量为 4~5 颗时, 点位误差 STD 达到 15 m 左右。整体来看, 可用卫星数量大于 10 颗时, 点位解算误差 STD 能够达到 5 m 以内, 具备良好的定位导航能力。

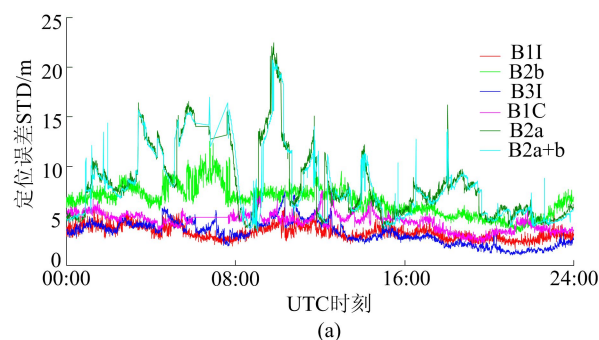
从图 5 可以看出: 相对于 BDS-2 信号, BDS-3 新频段信号的接收情况较差, 各测站的平均卫星数量为 5~6 颗, 仅达到定位导航的基本需求; 在可用卫星数相同的情况下, B3I 频段观测值定位精度最高; 比较 BDS-3 3 个新频段信号, 在相同卫星数下, 各测站 B2a 频段观测值定位精度普遍高于 B1C 频段; 在 WUH2 站, B2a+b 频段定位精度与 B2a 相当, 更精确的结论还有待更多的数据加以验证。

整体来看, BDS-2 信号定位精度更高, 这是由于目前提供其 3 个频段信号的卫星数更多; 在相同的可用卫星数下, 3 个频段的精度有待进一步验证; 目前, 接收机能较好地跟踪 BDS-2 信号,

在亚太地区大部分测站均能达到 8 颗以上的卫星可见性, 定位误差 STD 约为 5 m; 各测站接收机对 BDS-3 新频段信号跟踪情况较差, 平均可见卫星数量为 5~6 颗, 定位误差 STD 在 10 m 以上, 有待接收机对 BDS-3 新频段信号的全面兼容。

为了更清晰地反映解算误差的变化情况, 以 WUH2 站为例, 给出 6 个频段协调世界时 (Coordinated Universal Time, UTC) 下 24 h 数据解算误差 STD 和卫星数时间序列, 如图 6 所示。

从卫星跟踪数看, BDS-2 的 B1I、B3I 频段相当, 卫星数最多, 其次是 B2b 频段; BDS-3 新频段信号的卫星数相对较少, 在全天的解算中精度更低, 当可用卫星数较少时, 解算误差波动较大。



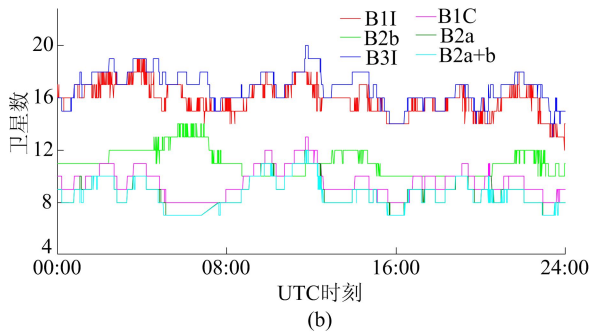


图 6 WUH2 站 6 个频段定位误差 STD 和卫星数时间序列

因此,目前 BDS-3 新频段信号能满足定位导航的基本需求,要达到较高精度和可靠性,还需要接收机跟踪更多 BDS-3 新频段信号卫星。

3 结 论

本文在全球范围的 IGS 监测站中选取 20 个测站,对比分析北斗系统不同频段观测值 SNR 和伪距 MP 误差,对北斗系统码观测值质量进行评估;结合各测站不同频率观测值伪距定位的误差情况,综合对比 BDS-2、BDS-3 信号的定位能力,得出如下结论:

(1) 北斗系统观测值 SNR 分布在 18.0~62.0 dB-Hz 之间,且随高度角增加而增大。6 个频段 SNR 从大到小依次为 B2a+b、B3I、B2a、B2b、B1C、B1I。

(2) 各频段 MP 误差随高度角增大而降低,个别频段在大高度角下伪距 MP 误差降至噪声水平。6 个频段伪距 MP 误差从小到大依次为 B2a+b、B2a、B3I、B1C、B2b、B1I。

(3) 在定位方面,B3I 频段观测值定位精度优于其他频段。BDS-3 信号中 B2a、B2a+b 频段观测值定位精度差异较小,且优于 B1C 频段。相对于 BDS-3 信号,BDS-2 信号的可见卫星数更多,定位精度在 5 m 左右;BDS-3 新频段信号的可见卫星数相对较少,独立定位精度在 10 m 以上,且易发生较大的跳变,要达到更高的精度和可靠性,需要接收机支持更多 BDS-3 信号卫星。

[参 考 文 献]

[1] 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(4.0 版)[R]. 北京:中国卫星导航系统管理办公室,2019.

- [2] 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.
- [3] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报,2010,39(1):1-6.
- [4] LI J L, YANG Y X, HE H B, et al. Benefits of BDS-3 B1C/B1I/B2a triple-frequency signals on precise positioning and ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2020, 24:100.
- [5] WANG M H, WANG J X, DONG D N, et al. Performance of BDS-3: satellite visibility and dilution of precision [J]. GPS Solutions, 2019, 23:56.
- [6] 张明远,周星宇,陈华. 北斗三号新信号 B2a 和 B2(B2a+b) 质量分析及星座几何性能评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(6):629-633.
- [7] BRUNNER F K, HARTINGER H, TROYER L. GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA- Δ model [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73:259-267.
- [8] AN J W, LEE J M. Improvement of GPS position estimation using SNR and Doppler[C]//2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). [S. l.]: IEEE, 2017:1645-1650.
- [9] 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.
- [10] WANG G X, DE JONG K, ZHAO Q L, et al. Multipath analysis of code measurements for BeiDou geostationary satellites[J]. GPS Solutions, 2015, 19:129-139.
- [11] 高晓,杨志强,康军梅,等. 基于三频 SNR 数据探测北斗 GEO 卫星多径效应[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018,43(2):213-218.
- [12] CAI C S, HE C, SANTERRE R, et al. A comparative analysis of measurement noise and multipath for four constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo [J]. Survey Review, 2016, 48(349):287-295.
- [13] 胡玉坤,刘根友,段鹏硕,等. GNSS 卫星中 DCB 的使用方法[J]. 测绘通报, 2016(5):11-13.
- [14] 王彬,刘经南,隋心. BDS 与 GPS 群延迟的异同分析与应用[J]. 测绘科学, 2015, 40(10):142-145.
- [15] 徐绍铨,张华海,杨志民,等. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2008:68-69.
- [16] ZHANG X H, WU M K, LIU W K, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: new-generation navigation signals[J]. Journal of Geodesy, 2017, 91:1225-1240.

(责任编辑 张淑艳)