

基于iGMAS的北斗三号组网星数据初步分析*

黄超^{1,2†} 宋淑丽¹ 陈钦明¹ 周伟莉^{1,2}

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 北斗卫星导航系统目前已经完成北斗卫星导航试验验证系统和北斗区域卫星导航系统,正在建设北斗全球卫星导航系统,简称北斗三号系统.截至2018年11月,北斗三号系统已经发射19颗组网星.为了了解新发射组网星的信号、数据质量和目前能达到的定轨精度,基于2018年5月18日至28日22个国际GNSS (Global Navigation Satellite System)监测评估系统(iGMAS)跟踪站的数据,从观测噪声和伪距多路径两方面分析比较了最早发射的8颗北斗三号组网星新旧信号的数据质量,分别用旧信号B1I、B3I和新信号B1C、B2a对北斗三号组网星和GPS进行联合定轨实验.实验结果表明,新信号B2a的数据质量与旧信号相当, B1C的数据质量略差于老信号;比较3 d解重叠弧段(48 h)轨道和钟差结果,新旧信号的结果相当, B1I/B3I和B1C/B2a定轨的3维位置精度(3D-RMS)都在35 cm左右,钟差结果基本在0.5 ns以内.

关键词 天体测量学, 北斗三号系统, iGMAS, 方法: 数据分析, 精密卫星定轨

中图分类号: P128; 文献标识码: A

1 引言

北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)是由我国自主研发,能够独立运行的全球卫星导航系统.北斗卫星导航系统按照“三步走”战略发展,目前已经完成北斗卫星导航试验验证系统和北斗区域卫星导航系统(BDS-2),正在建设北斗全球卫星导航系统,简称北斗三号系统(BDS-3)^[1].北斗三号系统将由3颗地球静止轨道卫星(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)、3颗倾斜轨道同步卫星(Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO)和24颗中高轨卫星(Medium Earth Orbit, MEO)组成,3颗GEO卫星位于东经80°、110.5°和140°,3颗IGSO卫星的倾角为55°,24颗MEO卫星平均分配于3个倾角55°的轨道面上,轨道高度21528 km.北斗三号系统计划于2020年前建成并投入使用.截至2018年11月,北斗三号系统已经发射19颗组网星,完成基本系统空间星座部署,包括18颗MEO卫星和一颗GEO卫星.

2018-11-26收到原稿, 2019-01-13收到修改稿

*国家自然科学基金项目(41730108), 国家重点研发计划(2016YFB0501503-3), iGMAS建设与运行维护项目资助

†huangchao@shao.ac.cn

北斗三号组网星目前向用户播发的信号保存了北斗二号已有的信号B1I (1561.098 MHz)、B3I (1268.52 MHz)以实现北斗二号到北斗三号的平稳过渡,增加了新的信号B1C (1575.42 MHz)、B2a (1176.45 MHz),以实现与其他全球系统的兼容互操作^[1]. 由于信号的变更,需要对跟踪站的接收机进行硬件升级,因此目前可以接收到北斗三号组网星新信号的测站有限. 与北斗二号相比,北斗三号卫星上搭载了新的国产氢原子钟,由中国航天科工集团二院203所和中国科学院上海天文台提供,与传统的Rb钟和Cs钟相比,氢原子钟有更好的长期稳定度,目前对新一代北斗试验星钟差的分析结果表明,北斗三号试验卫星C31和C32各项性能指标计算结果与GPS处于同一量级,但是比GPS稍弱一些,较北斗二号卫星钟差具有较大的提升,新型星载原子钟的预报性能与北斗区域系统的原子钟相比较有约一倍的提升^[2-5].

由于北斗三号发射时间较短且测站数量少,目前关于北斗数据质量及定轨精度的评估主要集中在北斗二号以及新一代的试验星,它们至少都提供3频数据. 国际GNSS (Global Navigation Satellite System)监测评估系统(International GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS)采用的国产接收机B1I、B2I、B3I 3个频点的多路径指标略差于天宝的多路径指标水平,部分与其指标相当^[6-7];北斗不同频率的伪距噪声各有差异,高度角增大时差异减小,所有测站中B1I的伪距噪声最大,B2I、B3I的大小关系随测站而异^[8]. 采用卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)检核的方法评定北斗二号3类卫星的轨道精度,目前对于GEO、IGSO、MEO的定轨精度分别能达到分米级、一分米、厘米级^[9]. 目前由于缺少较为精确的北斗卫星钟差结果作为参考,对北斗卫星钟差产品评估的相关研究较少.

本文基于iGMAS数据,主要对目前最早发射8颗组网星(最简系统)的新旧信号数据进行分析,卫星伪随机噪声编号(Pseudorandom Noise, PRN)及发射情况如表1. 对卫星进行定轨试验,以了解新发射组网星的信号、数据质量和目前能达到的定轨精度,8颗卫星均为MEO卫星.

表 1 北斗三号组网星信息
Table 1 Status of 8 BDS-3 networking satellites

PRN	Launch Date	Orbit
C19	2017-11-05	MEO
C20	2017-11-05	MEO
C27	2018-01-12	MEO
C28	2018-01-12	MEO
C21	2018-02-12	MEO
C22	2018-02-12	MEO
C29	2018-03-30	MEO
C30	2018-03-30	MEO

2 精密定轨策略

本文进行精密轨道与钟差确定的具体处理策略是: 采用非差处理方法, 数据预处理采用Turboedit方法进行周跳探测^[10], 剔除异常值, 采用“一步法”同时估计卫星轨道、卫星和测站钟差、对流层参数、站坐标, 具体策略和使用的模型如表2.

由于北斗全球系统尚未建成且测站较少, 目前没有机构提供北斗三号组网星的精密轨道和钟差, 因此采用的精度比较方法为计算3 d解并比较重叠弧段精度, 具体比较方法如图1, doy1-doy4为连续的4个年积日(day of year, doy). 采用BDS-3+GPS联合定轨, 对于北斗组网星分别用旧信号B1I、B3I和新信号B1C、B2a进行定轨实验, 各自连续算9个3 d解.

表 2 GPS和BDS-3联合定轨策略
Table 2 Strategy of the BDS-3/GPS combined orbit determination

Parameter	Strategy
Observation choice	Ionosphere-free Linear Combination
Elevation angle	3°
Sample	30 s
Phase Center Offset	GPS/igs08_1888.atx BDS-3/ Provided by Shanghai Astronomical Observatory
Ionosphere	First-order ionosphere are eliminated by combination of observations, ignoring the influence of higher order ionospheric effect
Atmosphere	Saastamoinen, Global Mapping Function
Estimator	Least Square
Solar radiation	Bernese model with 5 parameters
Orbit determination arc	3 days

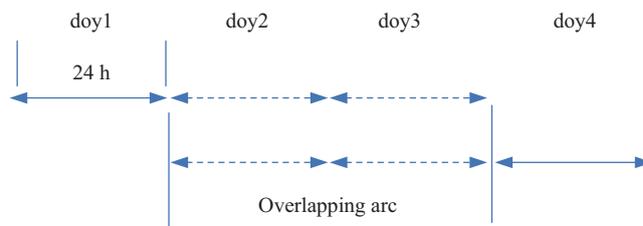


图 1 卫星轨道精度比较方法

Fig. 1 Orbit accuracy evaluation method

3 数据来源

选取全球分布均匀的150个国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS)跟踪站和90个多GNSS实验(The Multi-GNSS Experiment, MGEX)项目跟踪站以及22个iGMAS站进行定轨实验, 测站分布如图2, 分布均匀, 其中能同时观测到新信号B1C、B2a的有16个iGMAS站; 能观测到旧信号B1I、B3I的有16个iGMAS站和5个MGEX站,

各iGMAS站安装的均为国产接收机, 详细信息如表3. 统计分析的时间段为2018年5月18日至28日, 由于数据质量问题, 实际每天采用的测站数量会有所波动.

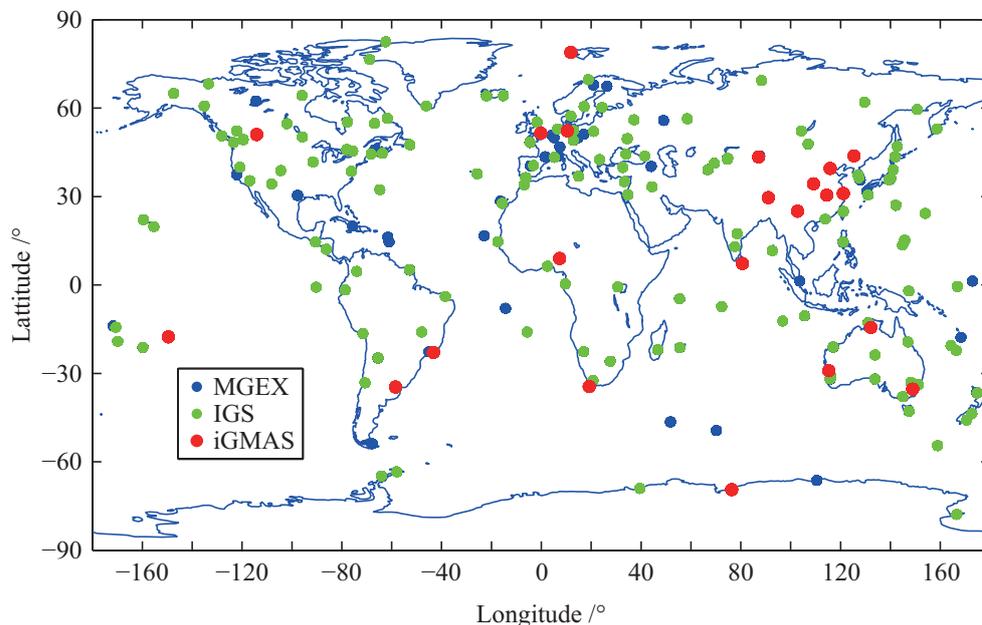


图 2 测站分布图

Fig. 2 Distribution of tracking stations

表 3 iGMAS站接收机信息

Table 3 Information of the iGMAS receivers

STATION	TYPE	RUN BY	STATION	TYPE	RUN BY
abja	gnss_ggr	CETC20	kndy	CETC-54-GMR-4016	CETC-54
bjfl	CETC-54-GMR-4016	CETC-54	kun1	UB4B0I	UNICORE
brch	CETC-54-GMR-4016	CETC-54	lha1	CETC-54-GMR-4016	CETC-54
byns	UB4B0I	UNICORE	lpgs	cet20_1.0	CETC20
canb	CETC-54-GMR-4011	CETC-54	peth	CETC-54-GMR-4011	CETC-54
chu1	gnss_ggr	CETC20	rdjn	UB4B0I	UNICORE
clgy	CETC-54-GMR-4016	CETC-54	sha1	UB4B0-12780	UNICORE
cnyr	UB4B0I	UNICORE	taht	gnss_ggr	CETC20
dwin	CETC-54-GMR-4011	CETC-54	wuh1	CETC-54-GMR-4016	CETC-54
gual	gnss_ggr	CETC20	xia1	gnss_ggr	CETC20
hmns	gnss_ggr	CETC20	xia3	CETC-54-GMR-4016	CETC-54
icuk	CETC-54-GMR-4016	CETC-54	zhon	CETC-54-GMR-4011	CETC-54

4 数据质量分析

iGMAS采用的接收机绝大多数能接收到北斗三号卫星4个信号频点的数据, 本文主要对所选时间段内观测数据的观测噪声和伪距多路径进行了分析.

4.1 伪距噪声

观测噪声为由GNSS接收机通道间的随机偏差、锁相环和码跟踪环的随机偏差、未剔除干净的对流层和电离层延迟误差以及未被模型化的轨道误差和钟差残差等引起的测距误差. 主要包括伪距噪声和载波相位噪声, 由于大多数用户只用廉价的单频导航接收机, 伪距噪声是他们很关心的基本性能^[1].

本文采用多项式拟合法进行伪距噪声的评估, 主要步骤为: (1)采用1 s采样的观测数据, 每120 s为一个拟合弧段, 每颗星、每个历元、每个频点的伪距观测值与该弧段的均值作差; (2)对每个弧段的观测值进行3次拟合, 求出理论值, 对理论值和实际值作差; (3)计算所有弧段理论值和实际值的差值并剔除粗差, 计算RMS; (4)统计所有卫星该频点RMS (Root Mean Square)的均值作为测站1 d的伪距噪声. 由于多路径效应是接收机天线及天线附件物体间构成的某种相对空间关系下产生的合成信号相对于直达信号的延迟, 在短时间内一般不会发生剧烈变化, 拟合会消除大部分伪距多路径的影响, 另外当多路径效应严重导致伪距观测值发生明显变化时, 统计的结果会作为残差被剔除, 因此伪距噪声中包括一部分多路径效应, 但影响较小^[11]. 图3给出了各测站新旧信号的伪距噪声时间序列, 各测站在统计时间段的平均结果如图4.

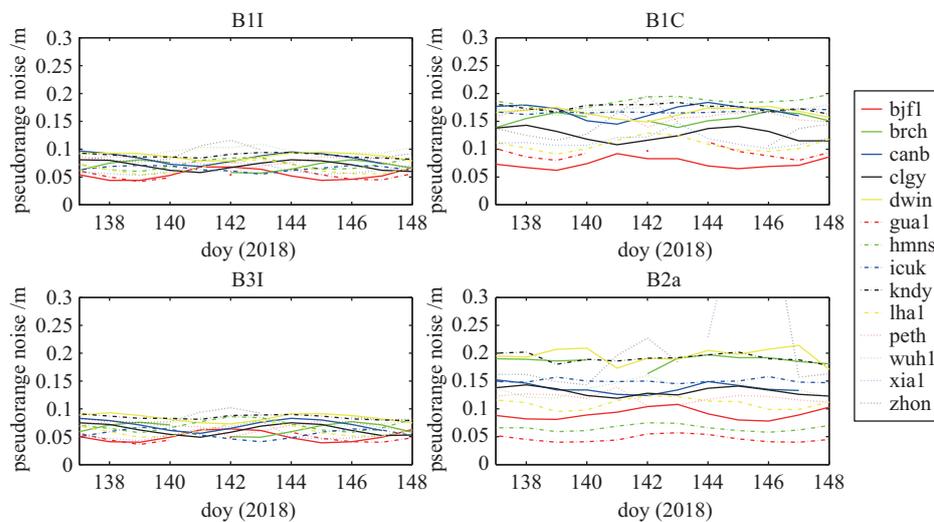


图3 iGMAS测站伪距噪声

Fig. 3 The pseudorange noise of the iGMAS stations

旧信号B1I、B3I的伪距噪声都在10 cm以内, 均值分别为7.4 cm和6.7 cm; 新信号B1C、B2a的伪距噪声均值分别为14 cm和13 cm, 新信号的伪距噪声明显大于旧信号, brch、canb、dwin、icuk、kndy、zhon 6个站新信号的伪距噪声相对较大, 使用的为同一种接收机, 伪距噪声相对较大可能与接收机类型有关, xial在统计时间内B2a频点的伪

距噪声远大于其他测站, 在1.5 m左右.

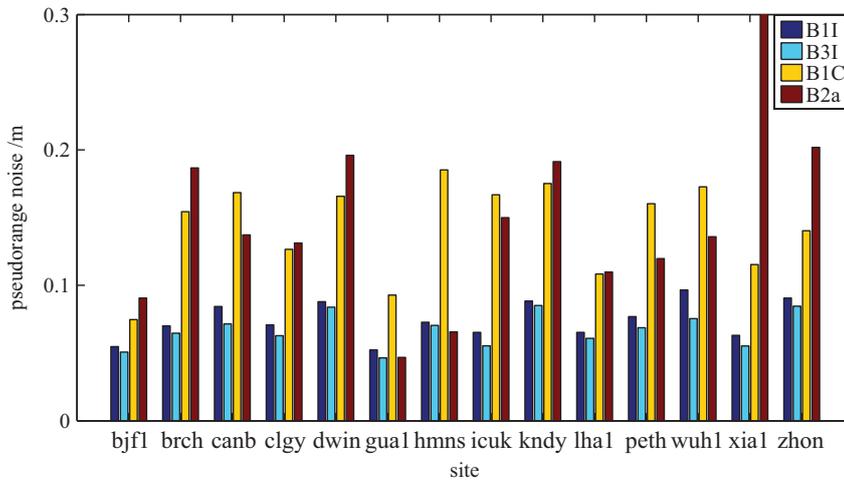


图 4 2018年5月18—28日4频点伪距噪声均值

Fig. 4 The mean pseudorange noise of 4 frequencies from May 18 to 28, 2018

4.2 载波相位噪声

载波相位噪声相比于伪距噪声要小很多, 本文采用历元间求3次差的方法进行相位噪声的评估, 处理方法为: (1)采用1 s采样的观测数据, 对每颗星、每个频点的相位观测值进行历元间3次差分,

$$\begin{cases} \Delta\varphi(t_i) &= \varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1}) \\ \Delta\Delta\varphi(t_i) &= \Delta\varphi(t_i) - \Delta\varphi(t_{i-1}) \\ \Delta\Delta\Delta\varphi(t_i) &= \Delta\Delta\varphi(t_i) - \Delta\Delta\varphi(t_{i-1}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $\varphi(t_i)$ 、 $\Delta\varphi(t_i)$ 、 $\Delta\Delta\varphi(t_i)$ 、 $\Delta\Delta\Delta\varphi(t_i)$ 分别为原始相位观测值、历元间单差观测值、历元间双差观测值和历元间3差观测值; (2)按照下式计算相位噪声,

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{1}{8(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta\Delta\Delta\varphi(t_i))^2}, \quad (2)$$

n 为历元间3差观测值的个数; (3)统计所有卫星该频点RMS的均值作为测站的相位噪声. 图5给出了各测站新旧信号的相位噪声时间序列, 各测站在统计时间段的平均结果如图6.

从图6的统计结果看, B1I、B1C的相位基本在2 mm以内, 均值分别为1.84 mm和1.48 mm, 对应的频率分别为1561.098 MHz、1575.42 MHz; B3I、B2a的相位噪声略大于2 mm, 均值分别为1.85 mm和2.02 mm, 对应的频率分别为1268.52 MHz、1176.45 MHz, 对于绝大多数测站, 频率高的信号有较小的相位噪声.

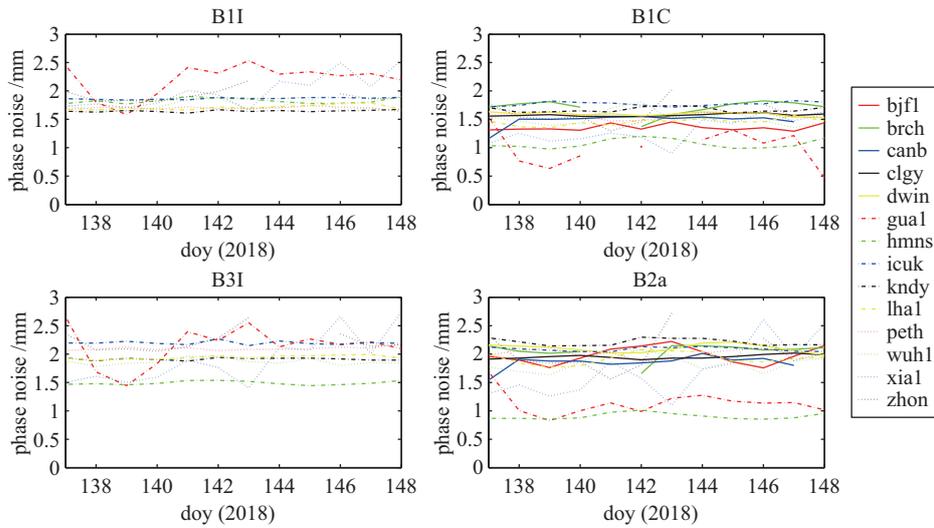


图 5 iGMAS测站载波相位噪声

Fig. 5 Phase noise of iGMAS stations

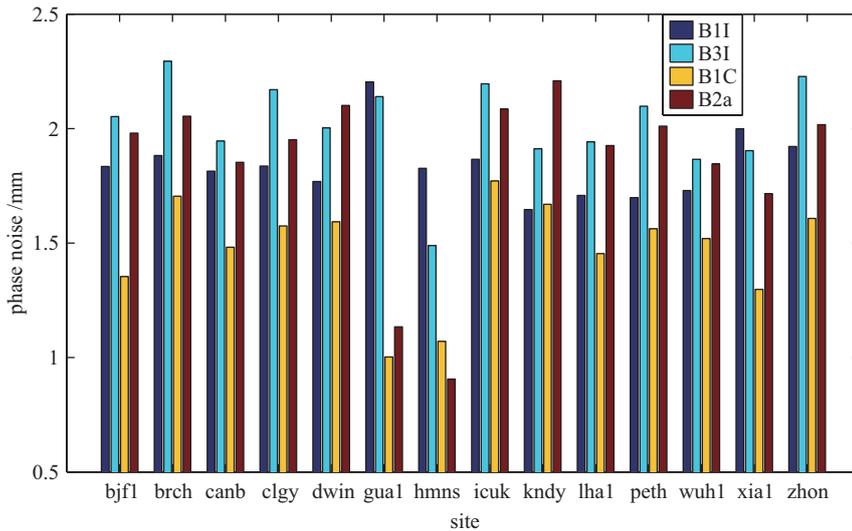


图 6 2018年5月18—28日4频点相位噪声均值

Fig. 6 The mean phase noise of 4 frequencies from May 18 to 28, 2018

4.3 伪距多路径

多路径误差是由于接收机接收到卫星发射信号的同时还接收到来自接收机周围建筑物等的反射信号. 两信号的干涉叠加导致卫星信号到接收机天线的时延产生了一个附加的时延量^[11]. 此外, 不同类型接收机所受多路径效应的影响也不相同, 接收机内部工作机理与多路径效应的产生也密不可分^[10]. 伪距多路径直接影响卫星轨道测定和用户导航定位精度. 本文采用双频观测值计算伪距多路径, 对伪距和相位进行组合消除对流

层、电离层影响, 计算伪距多路径采用的方法如(3)式:

$$\begin{cases} MP_i = P_i - (1 + \frac{2}{\alpha-1})\varphi_i\lambda_i + (\frac{2}{\alpha-1})\varphi_j\lambda_j \\ MP_j = P_j - (1 + \frac{2}{\alpha-1})\varphi_i\lambda_i + (\frac{2}{\alpha-1})\varphi_j\lambda_j \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\alpha = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2$, f_i 、 f_j 为对应频点的频率, MP_i 、 MP_j 分别表示接收机观测到卫星在 f_i 、 f_j 频率上包含了伪距多路径、载波相位多路径和整周模糊度信息的计算量, P_i 、 P_j 为伪距观测值, φ_i 、 φ_j 为载波相位观测值, λ_i 、 λ_j 为载波波长, 对于新信号采用的组合方法为分别与 B1I 进行组合. 伪距多路径为逐历元计算, 然后取各历元的均值, 采用 30 s 采样的观测数据足以计算测站单天准确的伪距多路径值. 对于同一颗卫星在连续观测且无周跳的情况下组合的模糊度参数不会变化, 在无周跳的多个历元间按下式进行计算:

$$\overline{MP}_k = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m \left(MP_k^t - \frac{\sum_{t=1}^m MP_k^t}{m} \right)^2}, \quad (4)$$

式中, \overline{MP}_k 为多路径效应影响的评估值; MP_k^t 表示在第 t 个历元接收机观测到卫星在第 k 频率上包含伪距多路径、载波相位多路径和整周模糊度信息的计算量; m 表示滑动窗口的历元个数, 使用值为 50. 图 7 给出了各测站新旧信号的伪距多路径时间序列, 各测站在统计时间段的平均结果如图 8.

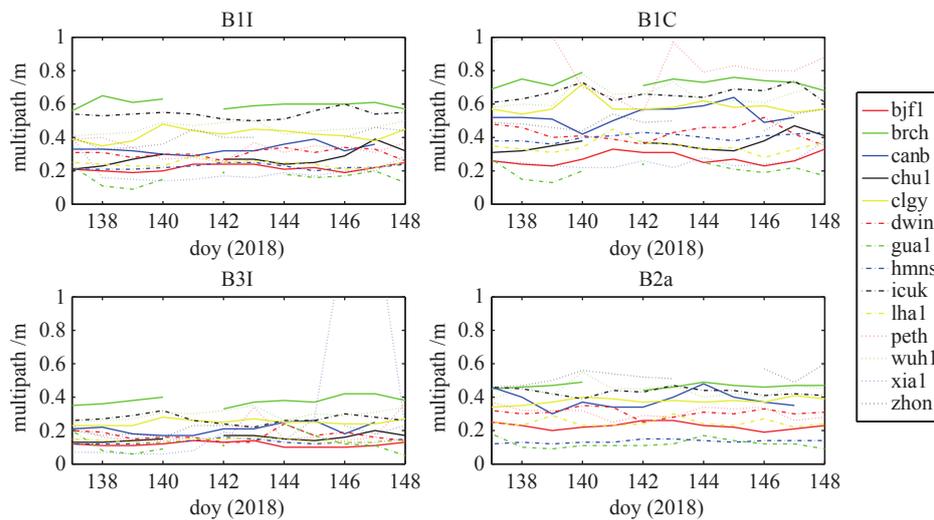


图 7 iGMAS 测站的伪距多路径

Fig. 7 The pseudorange multipath of the iGMAS stations

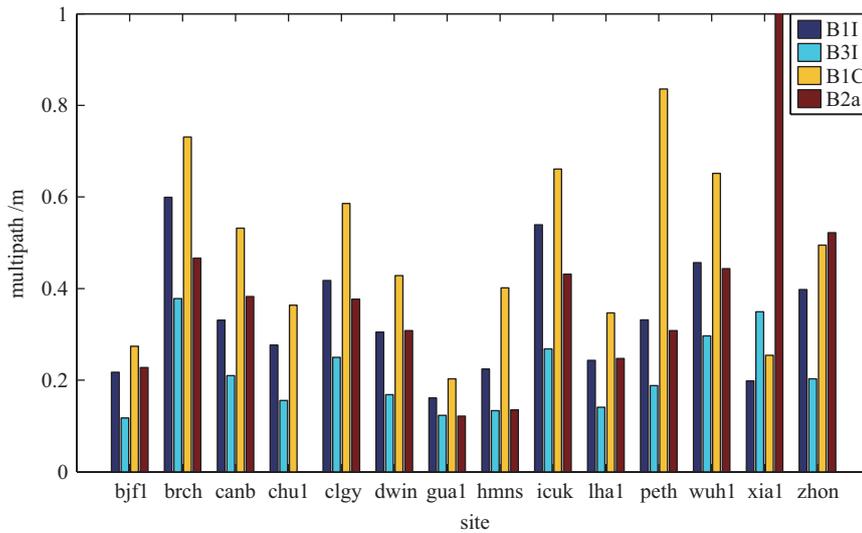


图 8 2018年5月18—28日4频点伪距多路径

Fig. 8 The mean pseudorange multipath of 4 frequencies from May 18 to 28, 2018

从伪距多路径的结果可以看出, 旧信号B1I、B3I伪距多路径基本都在0.5 m以内, 均值分别为0.34 m、0.21 m; 剔除异常值xia1后, B2a伪距多路径的均值为0.33 m, B1C的均值为0.48 m, 对于B1C, brch、canb、clgy、icuk、peth、wuh1 6个测站的伪距多路径超出0.5 m, 6个测站使用的为同一种接收机, 而且4.1节中伪距噪声相对较大的几个测站伪距多路径也较大, 与伪距噪声结果类似, xial在统计时间内B2a频点的伪距噪声也远大于其他测站, 在3.5 m左右. B3I、B2a、B1I、B1C抑制多路径的能力依次增强, 对应的测距码速率分别为10.23 Mcps、10.23 Mcps、2.046 Mcps、1.023 Mcps, 高码速率的信号频点具有更优的抑制多路径能力^[7].

5 轨道钟差精度分析

对2018年doy连续9 d的精密定轨及钟差结果进行评估, 分别用B1I、B3I和B1C、B2a进行定轨实验, 两种方案分别得到9个弧段的3 d解轨道和钟差. 各卫星在每个弧段可用观测值的个数如图9所示, 与新信号相比, 有5个MGEX站提供旧信号的观测数据, 因此旧信号的可用观测值数较多.

采用比较48 h重叠弧段的方法进行轨道精度评估, C30最后两天定轨精度较差, 相位残差大, 未对C30这两天的结果进行统计, 以下图中的日期均为3 d解首日对应的年积日.

图10给出了新旧信号单方向平均解算精度(One-dimensional RMS, 1D-RMS)的序列. 从表3的统计结果来看, 旧信号解算3个方向平均精度为23.12 cm, 切向、径向、法向的平均定轨精度分别为33.43 cm、17.49 cm、7.84 cm, 3维位置精度(Three-dimensional RMS, 3D-RMS)平均为40.03 cm, C27、C29分别在doy143和doy141结果较差, 去掉这两天对应两颗卫星的结果后, 切向、径向、法向的平均定轨精度分别为31.76 cm、16.89 cm、7.52 cm, 3D-RMS平均为37.87 cm. 表4中, 新信号解算3个方向平均精度为19.89 cm, 切向、径向、法向的平均定轨精度分别为28.02 cm、16.17 cm、6.98 cm,

3D-RMS平均为34.45 cm. 从新旧信号轨道精度的统计来看, 径向精度较差, 在30 cm左右, 其他两个方向基本在20 cm以内. C21、C27、C29新信号的解算精度相对较好, 其余卫星新旧信号解算精度相当. 由于目前绝大多数接收机未进行升级, 不能接收到B3I、B1C、B2a 3个频点的数据, 因此北斗三号组网星的定轨精度要远低于北斗二号卫星. 以C19为参考星, 对卫星钟差的精度进行评价, 比较重叠弧段精度基本在0.5 ns以内, 新信号的钟差结果要优于旧信号.

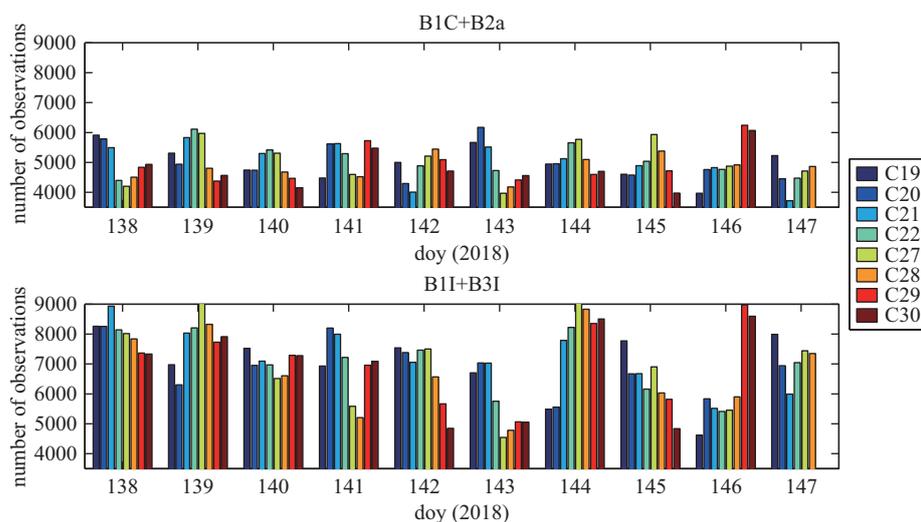


图 9 组网星可用观测数

Fig. 9 Available observation statistics of the networking satellites

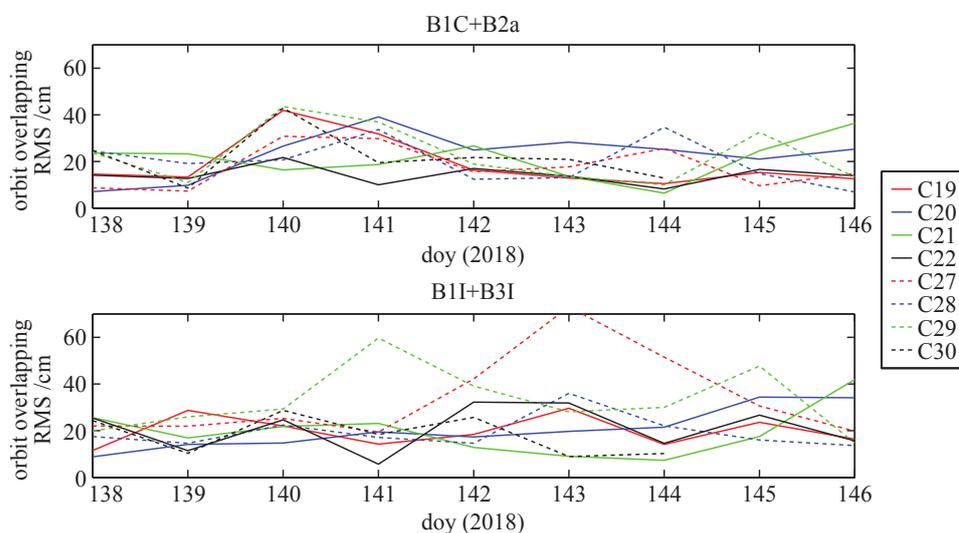


图 10 2018年5月18—28日组网星定轨重叠弧段精度序列

Fig. 10 The BDS-3 orbit overlapping RMS of 8 satellites from May 18 to 28, 2018

表 4 B1I+B3I和B1C+B2a新旧信号定轨重叠弧段精度结果(单位: 厘米)
 Table 4 The BDS-3 orbit overlapping RMS with B1I + B3I and B1C + B2a
 (unit: cm)

Frequency	RMS	C19	C20	C21	C22	C27	C28	C29	C30	mean
B1I+B3I	A	26.94	28.18	23.96	25.18	52.7	30.8	51.41	28.29	33.43
	C	19.02	19.12	20.01	23.86	20.68	9.17	18.19	9.84	17.49
	R	6.97	6.28	6.26	6.56	10.81	7.39	10.9	7.56	7.84
	1D-RMS	19.83	20.46	19.54	21.03	33.98	19.32	32.71	18.07	23.12
B1C+B2a	A	24.47	25.31	28.31	18.64	26.77	30.11	35.57	35	28.02
	C	19.04	28.02	21.29	14.48	12.21	14.04	12.01	8.23	16.17
	R	5.87	7.29	5.64	5.29	6.92	7.44	8.29	9.1	6.98
	1D-RMS	18.80	23.03	21.08	14.21	17.78	19.99	22.61	21.61	19.89

6 结论

本文介绍了北斗三号目前的建设情况, 采用iGMAS数据, 对北斗三号系统“最简系统”8颗组网星的数据质量进行了分析, 并进行了定轨实验。

分析组网星新旧信号的观测噪声和伪距多路径结果: 旧信号的数据质量略好于老信号, 其中旧信号B1I、B3I的伪距噪声都在10 cm以内, 满足15 cm的质量控制要求, 新信号B1C、B2a的伪距噪声分别为14 cm、13 cm; B1I、B3I、B2a伪距多路径基本都在0.5 m以内。B1I、B1C的相位噪声基本在2 mm以内, B3I、B2a的相位噪声略大于2 mm。新信号B1C伪距多路径均值为0.48 m, 对同一测站而言, B3I频点的伪距多路径要明显小于其他频点。

由于目前绝大多数接收机不能接收组网星B3I、B1C、B2a 3个频点的数据, 数据来源较少, 因此BDS-3组网星的定轨精度要低于BDS-2卫星, 组网星精密定轨结果表明: 新旧信号的定轨结果相当, 单方向平均定轨精度能达到20 cm左右, 8颗星新旧信号的平均3D-RMS分别为37.87 cm和34.45 cm, 钟差结果在0.5 ns以内。后续随着组网星的运行和发射、测站数量的增加, 北斗三号的性能也需要不断进行分析。

致谢 感谢上海天文台iGMAS分析中心给予的帮助和支持, 感谢IGS提供的数据。

参考文献

- [1] 杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 584
- [2] 谭述森. 测绘学报, 2017, 46: 86
- [3] 陈金平, 胡小工, 唐成盼, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2016, 46: 119502
- [4] Wu Z, Zhou S, Hu X, et al. GPS Solutions, 2018, 22: 43
- [5] 毛亚, 王潜心, 胡超, 等. 天文学报, 2018, 59: 6
- [6] He Y, Wang Q, Wang Z, et al. CSNC, 2018: 275
- [7] 高余婷, 王利, 黄观文, 等. 大地测量与地球动力学, 2018, 38: 187
- [8] 赵齐乐, 戴志强, 孙宾姿, 等. 测绘科学, 2016, 41: 182

- [9] Guo J, Xu X, Zhao Q, et al. *JGeod*, 2016, 90: 143
[10] Blewitt G. *GeoRL*, 2013, 17: 199
[11] 夏林元. GPS观测值中的多路径效应理论研究及数值结果. 武汉: 武汉大学, 2001

Preliminary Analysis of BDS-3 Data Based on iGMAS

HUANG Chao^{1,2} SONG Shu-li¹ CHEN Qin-ming¹ ZHOU Wei-li^{1,2}

(1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT The Beidou Navigation Satellite Demonstration System and the Beidou Regional Satellite Navigation System are accomplished, and the Beidou Global Satellite Navigation System (BDS-3) is under construction. Nineteen networking satellites have been launched by the end of November 2018. To assess new and old signals of new satellites, the data quality is analyzed from two aspects of observation noise and pseudo-range multipath based on the data of iGMAS stations from May 18 to 28, 2018. The accuracies of BDS-3/GPS combined orbit determination with B1I/B3I and B1C/B2a are compared. The results show that the data quality of the new signal B2a is similar to that of B1I/B3I, and the data quality of B1C is slightly worse than that of B1I/B3I. Comparing the accuracy of orbits and clock corrections of overlapping arc (48 hours), the results with B1C/B2a are slightly better than those with B1I/B3I. The average 3D-RMS of precise orbit determination with B1C/B2a and B1I/B3I are around 35 cm. The RMS values of clock corrections are less than 0.5 ns.

Key words astrometry, BDS-3, iGMAS, methods: data analysis, precise orbit determination