

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 北斗三号系统信号质量分析及轨道精度验证  
作者: 王西龙, 许小龙, 赵齐乐  
DOI: 10.13203/j.whugis20200577  
收稿日期: 2021-05-23  
网络首发日期: 2021-09-15  
引用格式: 王西龙, 许小龙, 赵齐乐. 北斗三号系统信号质量分析及轨道精度验证. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200577>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式：

王西龙,许小龙,赵齐乐. 北斗三号系统信号质量分析及轨道精度验证[J].武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200577 (WANG Xilong, XU Xiaolong, ZHAO Qile. Signal quality analysis and orbit accuracy verification of BDS-3 [J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200577)

北斗三号系统信号质量分析及轨道精度验证

王西龙<sup>1</sup> 许小龙<sup>1</sup> 赵齐乐<sup>1</sup>

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

**摘要：**北斗三号系统(BDS-3)的信号体制经过重新设计, 提供B1I、B3I、B1C、B2a以及B2b 5个频点的公开服务信号。本文从伪距多路径、信噪比、无几何无电离层组合(Geometry-Free Ionosphere-Free, GFIF)观测值特性等方面, 对BDS-3卫星公开服务信号的观测数据质量进行分析评估。结果表明, BDS-3卫星信号的多路径噪声水平优于北斗二号(BDS-2)卫星且未发现与高度角相关的系统偏差, B1C受多路径及噪声的影响更为显著; 不同信号组合的GFIF序列都呈现出与卫星相关的周期性系统误差, 峰值约为2cm。对BDS-3卫星采用“一步法”精密定轨(Precise Orbit Determination, POD), 分别采用B1I&B3I与B1C&B2a的双频无电离层组合, 使用轨道边界不连续性以及卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)进行轨道精度检核, 结果表明, 在可用观测数少于B1I&B3I的情况下, B1C&B2a解算的轨道精度达到与B1I&B3I相当的水平, 轨道径向的内符合精度分别为6.1cm, 6.6cm。

**关键字：**北斗三号; 观测值质量分析; 无几何无电离层组合; 精密定轨

中图分类号: P228 文献标识码: A

北斗三号系统是中国在北斗一号和北斗二号的基础上自主建设的全球卫星导航系统, 于2016年开始发射5颗试验卫星, 对系统方案和技术体制开展试验验证<sup>[1]</sup>。2017年11月发射首颗组网卫星, 2018年12月27日完成基本系统(18颗中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星完成组网)建设并开通初始服务。2020年7月31日北斗三号系统全面建成并正式开通服务。北斗三号的标称星座由30颗卫星构成, 包括24颗MEO卫星、3颗地球同步轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星和3颗倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星<sup>[2]</sup>。系统面向全球范围内提供定位导航授时(Positioning Navigation Timing, PNT)服务, 基于MEO卫星提供全球短报文通信以及国际搜救服务; 在中国及周边地区, 基于GEO卫星提供星基增强、精密单点定位

(Precise Point Positioning, PPP)和区域短报文通信三种服务。北斗三号系统重新设计了新的信号体制, 向下兼容北斗二号B1I(1561.098MHz)、B3I(1268.52MHz)信号, 并增加了B1C(1575.42MHz)、B2a(1176.45MHz)、B2b(1207.14MHz)3个新信号, 共提供5个频点的公开导航信号。B1C、B2a两种新信号兼容GPS L1/L5, Galileo E1/E5a, 具有更宽的带宽、更高的测距精度、互操作性更好<sup>[3-6]</sup>。B2b信号包括PNT服务B2b信号以及PPP服务信号, PNT服务B2b信号与B1I/B3I/B1C/B2a信号一同为用户提供多样化PNT服务, PPP服务B2b信号由北斗三号GEO卫星在我国及周边地区播发, 可为用户提供公开、免费的高精度增强服务<sup>[7]</sup>。此外, 北斗三号卫星均配备了新一代的国产氢钟和铷钟, 设计性能较北斗二号有进一步提升<sup>[8-9]</sup>, 新型铷钟天稳设计指标 $2.0\times 10^{-14}$ , 氢钟天稳设计指标为7.0

收稿日期: 2021-05-23

项目资助: 国家自然科学基金(42030109); 中国博士后科学基金(2020M682483)

第一作者: 王西龙, 硕士, 主要研究方向为GNSS高精度数据处理。xlwang@whu.edu.cn

通讯作者: 许小龙, 博士。xuxl@whu.edu.cn

$\times 10^{-15}$ 。

北斗三号试验卫星发射后,大量学者对试验卫星的服务性能展开研究。文献[1]对试验卫星的卫星钟性能、空间信号质量以及授时精度等方面进行了评估,并预测了北斗三号系统的导航、定位与授时性能。文献[10]利用国际 GNSS 监测评估系统(International GNSS Monitoring and Assessment System, iGMAS)、北斗实验跟踪网(BeiDou Experimental Tracking Network, BETN)以及澳大利亚地球科学网的跟踪站数据对北斗三号试验卫星进行精密定轨和钟差性能分析,结果表明北斗三号实验卫星采用 ECOM5 参数太阳光压模型可获得较好的定轨结果。文献[11]利用 iGMAS 和国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)多模 GNSS 实验(Multi-GNSS Experiment, MGEX)观测数据对北斗三号试验卫星与北斗二号之间的系统间偏差进行细致分析,结果表明二者的公共信号 B1I 和 B3I 之间不存在明显的系统间偏差,在精密定轨时可视为一个系统。文献[12]使用抗多径碟型天线评估了北斗三号试验卫星传输的民用信号 B1C/B2a/B2b,结果表明试验卫星的 B1C、B2a 和 B2b 信号存在相差约 0.1 m 的伪距偏差。文献[13]基于 MGEX 和 iGMAS 的观测数据对北斗三号基本系统的 B1I/B3I/B1C/B2a 信号观测数据进行质量分析,并基于 B1I/B3I 信号的双频无电离层组合测试北斗三号基本系统卫星的定轨精度和原子钟性能,重叠阿伦方差分析表明北斗三号基本系统卫星原子钟天稳约为  $2.5 \times 10^{-15}$ , 优于 GPS BLOCK IIF 卫星。目前北斗三号系统已全面建成,针对全新的信号体制的数据质量评估十分必要。观测数据质量既可以反映出 BDS-3 卫星的实际在轨性能,也直接关系到用户的定位精度和可靠性。北斗三号系统为用户提供了多种频率信号,采用不同无电离层组合确定的卫星钟差之间会存在一定偏差,这会限制精密钟差产品对 PPP 的适用性,影响程度可以通过无几何无电离层组合加以分析<sup>[14-15]</sup>。因此,本文将基于 iGMAS 以及 MGEX 跟踪站观测数据对北斗三号系统公开导航信号

B1I/B3I/B1C/B2a/B2b 的伪距多路径、信噪比(signal to noise ratio, SNR)、无几何无电离层组合观测值特性等方面进行对比分析,并评估北斗三号系统不同信号组合的卫星精密定轨性能。

## 1 观测值数据质量分析

### 1.1 伪距多路径组合特性分析

利用伪距多路径组合(multipath, MP)观测值序列可以提取包含伪距多路径和观测噪声偏差的多路径误差,主要通过单频伪距观测值和双频相位观测值组合得到:

$$MP_i = P_i - \frac{f_i^2 + f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \lambda_i \varphi_i + \frac{2f_j^2}{f_i^2 + f_j^2} \lambda_j \varphi_j - B_i \quad (1)$$

式(1)中,  $f$  为信号频率,  $P$  和  $\varphi$  分别为伪距观测值和相位观测值,  $\lambda$  为载波的波长,  $B$  为组合模糊度和硬件延迟,可通过对 MP 序列去均值消去其常数部分<sup>[16]</sup>。MP 组合不仅消除了电离层和对流层延迟,也消除了钟差和卫星至接收机之间的几何距离。当忽略相位多路径及硬件延迟的小数部分后,MP 组合可以用来评估伪距多路径偏差以及观测噪声水平<sup>[17]</sup>。

选取 2020 年第 200 天的大约 20 个 iGMAS 测站与 50 个 MGEX 测站的观测数据分析 BDS-3 卫星各频点的多路径误差,同时将 BDS-2 卫星 B1I、B3I 频点考虑在内。

从图1可以看到, BDS-3 卫星信号的多路径误差水平整体表现要明显优于 BDS-2 卫星。BDS-2 卫星信号存在与高度角相关的伪距多路径误差,且随着高度角的增大,多路径误差逐渐减小。为了进一步分析各频点多路径误差水平,表1中统计了各频点不同高度角区间多路径误差的均方根误差 RMS 值(单位: m)。整体来看, BDS-3 卫星的多路径误差在低高度角时波动较大约为  $\pm 0.3\text{m}$ , 随着高度角的增加多路径误差逐渐减小约为  $\pm 0.1\text{m}$ , 并且序列整体近似于零均值分布,与高度角没有明显的数值关系。这说明 BDS-3 卫星信号在设计时已经改正了



BDS-2卫星存在的伪距系统性偏差。BDS-3的各频点的多路径误差也存在较明显的差别，B2b信号表现最优，低高度角时多路径误差约为0.14m，当高度角较高时，多路径误差减小至±0.05m左右。B1C信号的多路径量级要大于其他四个信号，低高度角时约

信噪比是指载波信号强度和噪声强度的比值。它主要受天线的增益参数、接收机相关器状态及多路径误差的影响，是反映载波相位观测质量的重要指标之一<sup>[18]</sup>。信噪比可以从观测文件中直接获得，其数值越大，表示信号强度越强。

为±0.31m，高度角较高时约为±0.13m。通过后续对BDS-3信号的信噪比水平的研究可知，这是因为B1C信号的观测值噪声水平要大于其他四个信号，表明B1C频率的信号受到多路径及噪声影响比其他频率更显著。

### 1.2 信噪比分析

选取了2020年6月共30天的iGMAS测站HMNS与MGEX测站UNB3的观测数据进一步分析BDS-3公开信号的信噪比水平。HMNS配备“GNSS\_GGR”型接收机，UNB3配备“TRIMBLE ALLOY”型接收机，皆可跟踪BDS-3所有的公开信号。

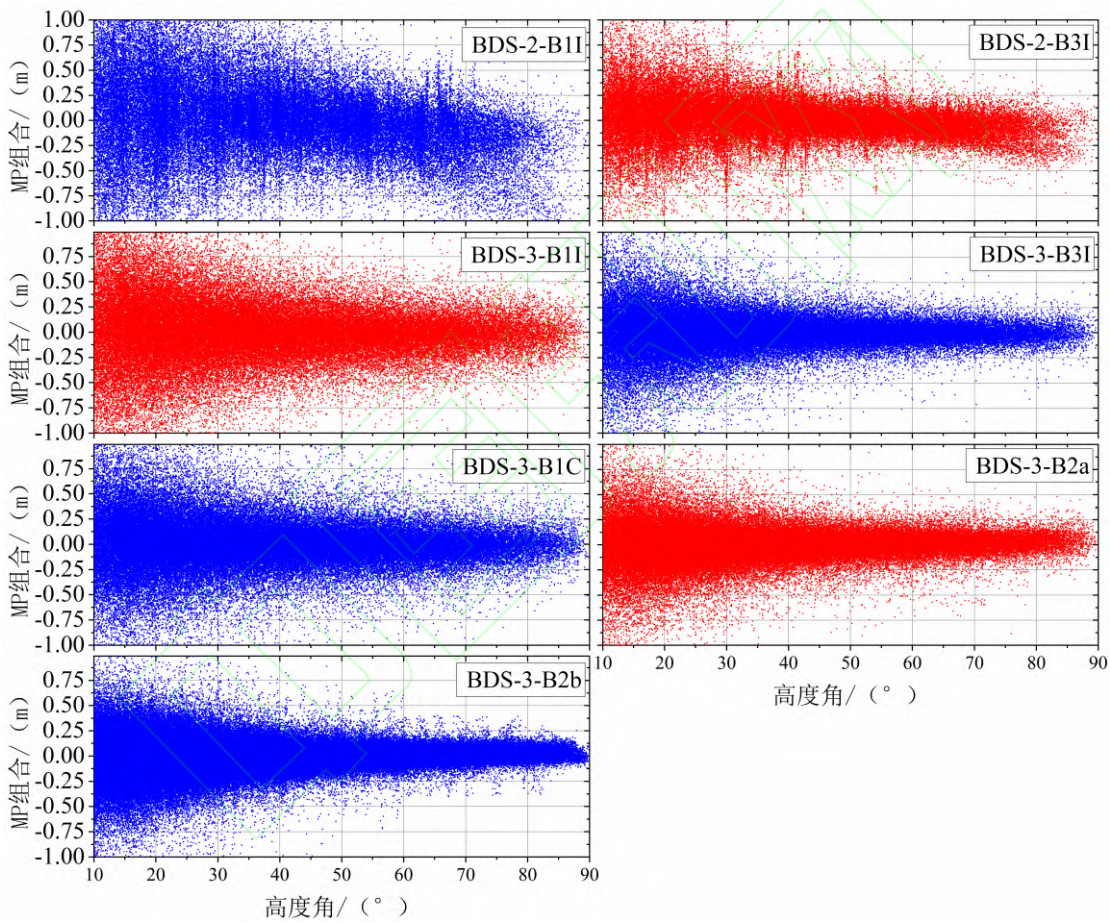


图 1 BDS-2、BDS-3 卫星各频点 MP 组合随高度角变化情况

Fig. 1 Variation of MP combination of BDS-2 and BDS-3 satellites with elevation angle

表 1 各频点不同高度角区间的多路径误差统计值（单位：m）

Tab. 1 Statistics of multipath of signals in different height angle intervals

高度角(°)	BD2-B1I	BD2-B3I	B1I	B3I	B1C	B2a	B2b
10~20	0.71	0.44	0.56	0.38	0.45	0.33	0.27
20~30	0.49	0.27	0.38	0.24	0.33	0.23	0.19
30~40	0.36	0.21	0.29	0.18	0.26	0.17	0.14

40~50	0.29	0.17	0.24	0.13	0.21	0.13	0.10
50~60	0.26	0.14	0.21	0.11	0.18	0.11	0.08
60~70	0.30	0.12	0.19	0.10	0.17	0.11	0.06
70~80	0.39	0.17	0.18	0.09	0.15	0.10	0.07
80~90	0.55	0.21	0.17	0.10	0.15	0.10	0.06

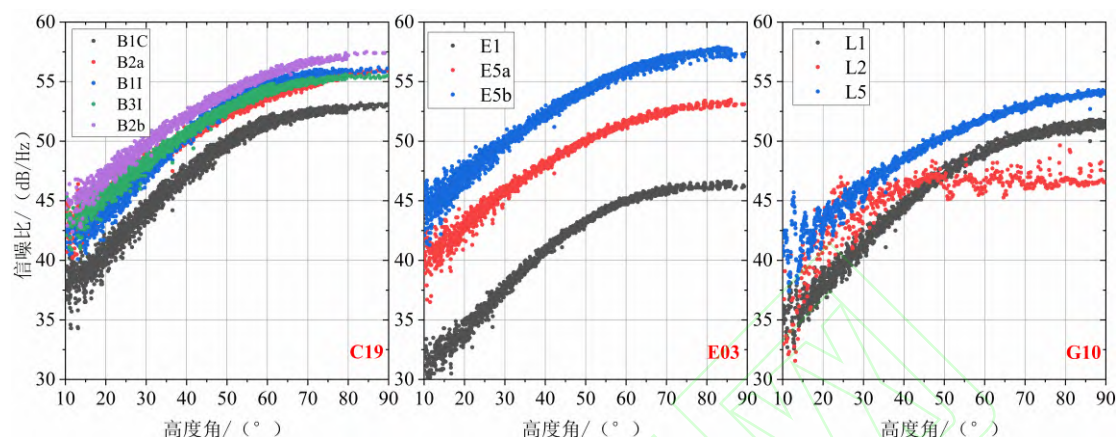


图 2 HMNS 站信噪比随高度角变化情况

Fig. 2 Variation of SNR with Altitude Angle at HMNS Station

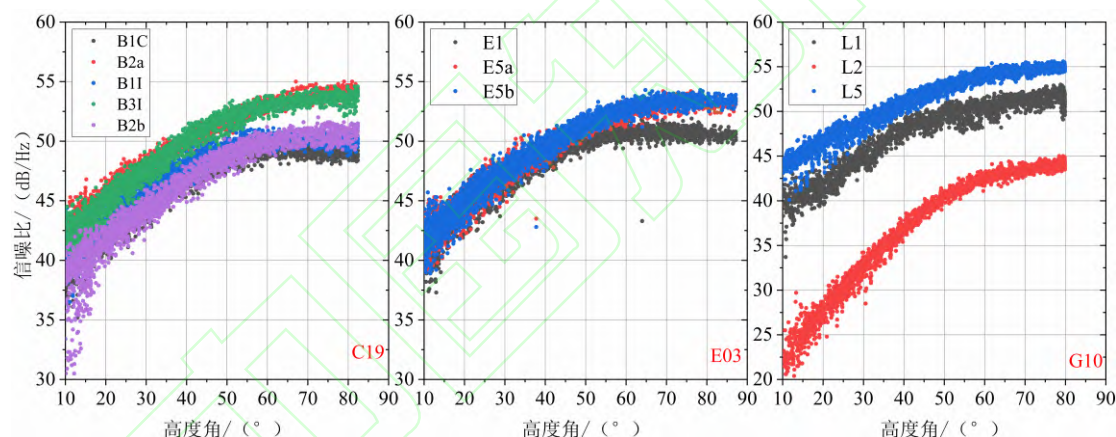


图 3 UNB3 站信噪比随高度角变化情况

Fig. 3 Variation of SNR with Altitude Angle at UNB3 Station

图 2 与图 3 中给出两个测站 BDS-3 MEO 卫星 C19、GPS Block II F 卫星 G10 以及 Galileo FOC 卫星 E03 信号的信噪比随高度角变化情况，这三颗卫星均属于各自系统目前的主要卫星类型，具有一定的代表性。从图 2 可以看到，B1C 的信噪比要比其他四个信号低大概 3dB/Hz，在高度角 10° 左右为 37~40dB/Hz，高度角 80° 左右时为 53dB/Hz。而其他四个信号信噪比在低高度角为 40~45dB/Hz，高度角较高时为 55~57dB/Hz。B1C 信号的结构由两个部分组成，即数据分支和导频分支，类似于 GPS L1C 和 Galileo E1OS。导航电文数据仅在数

据分支上进行调制，这可以减少信号采集时间并提高微弱信号的准确性。数据与导频分支的功率比为 1:3，可以将跟踪阈值提高 4.8 dB。B1C 地面接受的最小功率电平为 -159 dBW，比 Galileo E1OS 和 GPS L1C 信号低 1.5 dB。这些设计可能是导致 B1C 信噪比较弱以及其信号性能较弱的原因。

UNB3 站表现出不同的趋势，B2b/B1I/B1C 的信噪比在高度角 10° 左右时约为 35~40dB/Hz，高度角 80° 左右时为 50 dB/Hz，这与 E1/L1 信号处于同一水平。B2a/B3I 与 E5a/L5 表现出类似的信号比水平，高度角为 10° 左右时约为 40~45dB/Hz，



高度角  $80^\circ$  时为 53dB/Hz。实验结果表明，无论 iGMAS 测站还是 MGEX 测站，BDS-3 公开信号的信噪比水平十分优异，与相对成熟的 GPS 以及 Galileo 系统处于同一水平。

### 1.3 GFIF组合特性分析

在 GNSS 中，无电离层组合基于电离层一阶延迟与信号频率平方成反比的特性，通过选取适当的系数，可以使双频伪距或相位观测值形成不含一阶电离层延迟的组合观测值。双频无电离层组合观测值保留了接收机与卫星的几何距离、对流层延迟等与频率无关的误差项<sup>[19]</sup>。

BDS-3 卫星向用户提供多个频点的公开导航信号，为深入分析观测值误差特性提供了便利条件。选取不同的频率对分别形成无电离层组合观测值，对无电离层组合观测值差分可以进一步消除接收机与卫星的几何距离、对流层延迟等误差项，形成无几何无电离层组合 GFIF 观测值。

$$\begin{aligned} GFIF(i, j, k) &= IF(i, j) - IF(i, k) \\ &= \frac{f_i^2(f_j^2 - f_k^2)}{(f_i^2 - f_j^2)(f_i^2 - f_k^2)} R_i \\ &\quad - \frac{f_j^2}{f_j^2 - f_i^2} R_j - \frac{f_k^2}{f_i^2 - f_k^2} R_k \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $f$  为信号频率， $i, j, k$  表示信号频率标识，因此  $f_i > f_j > f_k$ ， $R$  代表载波相位观测值。

鉴于前文已对伪距多路径组合进行了分析，本节中主要分析相位观测值的 GFIF 组合。图 4 与图 5 中给出了 BDS-3 MEO 卫星 C26, GPS Block II F 卫星 G26 以及 Galileo FOC 卫星 E01 的 GFIFP 组合序列，数据分

别来自于 iGMAS 测站 HMNS 以及 MGEX 测站 UNB3 2020 年第 200 天的观测值文件。BDS-3 的 B1C/B1I/B2a/B3I/B2b 5 个频点信号分别用 1/2/5/6/7 表示，GPS 的 L1/L2/L5 信号用 1/2/5 表示，1/5/7 则代表 Galileo 的 E1/E5a/E5b。从图 4 可以看到，BDS-3 的 C26 卫星的 GFIFP 组合序列既不符合白噪声特性也不符合零均值分布，可以发现明显的周期性偏差。不同的三频信号组合的变化趋势大致相同，最大变化幅度都约为  $\pm 2\text{cm}$ 。MGEX 测站的结果与 iGMAS 测站大致相同，这表明该偏差与测站无关。在之前的研究中，针对 BDS-2 卫星 B1I/B2I/B3I 三频信号的 GFIFP 组合序列也呈现出类似的问题，通过站间差分可以消除这一周期性系统误差，表明其与卫星有关<sup>[20]</sup>。GPS Block II F 卫星 GFIFP 组合的周期性偏差则更为显著，其变化幅度达到了  $\pm 4\text{cm}$ 。Galileo FOC 卫星 E01 表现出不同的趋势，序列没有发现明显的偏差，呈现零均值分布，显示出 E1/E5a/E5b 载波相位良好的一致性。

## 2 定轨性能分析

为了分析 BDS-3 卫星的精密定轨性能，选取了 iGMAS 和 IGS 大约 70 个测站 2020 年 90-210 天的观测数据，测站分布如图 6 所示，红色五角星表示 iGMAS 测站，黑色三角形表示 MGEX 测站。所有测站均能跟踪 BDS-3 的 4 个公开频点信号。分别采用 B1I&B3I 和 B1C&B2a 的双频无电离层组合对 BDS-3 卫星“一步法”定轨，定轨弧段为 24 小时，太阳光压模型采用附加切向常量加速度的 ECOM5 参数模型<sup>[21]</sup>。使用轨道边界不连续

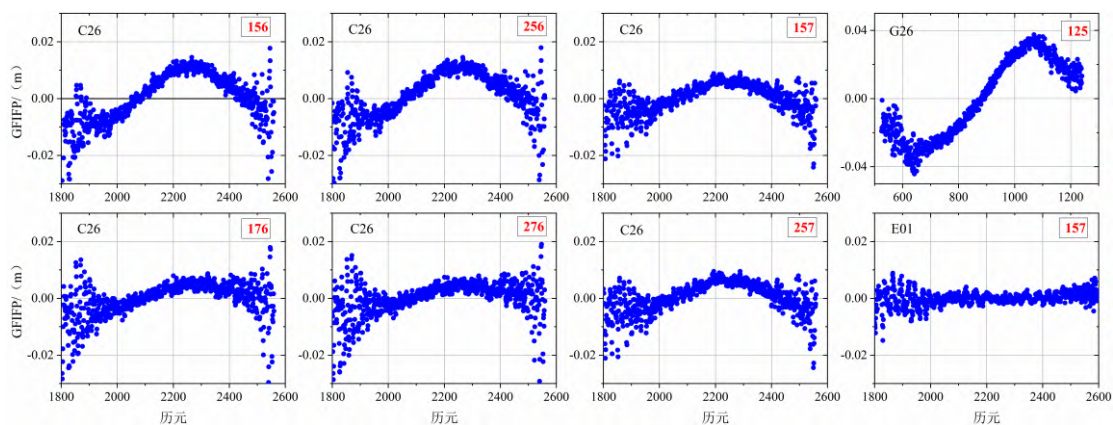


图 4 HMNS 站 GFIFP 组合序列

Fig. 4 GFIFP Combination Sequence of HMNS Station

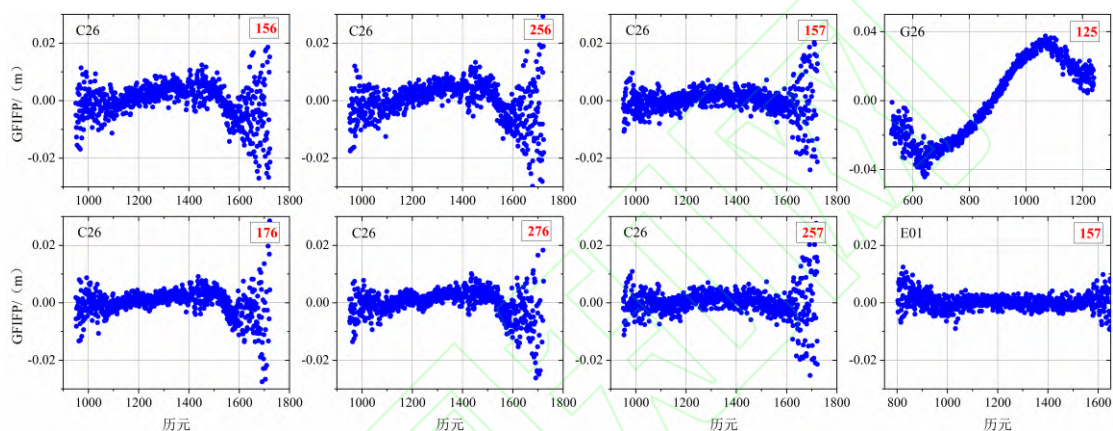


图 5 UNB3 站 GFIFP 组合序列

Fig. 5 GFIFP Combination Sequence of UNB3 Station

与激光检核的方法进行轨道精度评定。

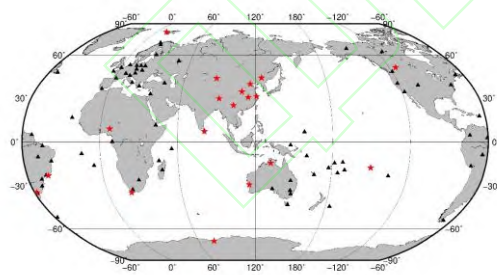


图 6 精密定轨所用测站全球分布情况

Fig. 6 The Distribution of Stations Used in POD

单天弧段定轨的参考历元设为当天的零点，弧段结束历元与下一天的零点相差一个积分输出步长。通过轨道积分将当天的轨道外推一个输出步长至下一天的零点，并与下一天解得的轨道作差，其差值称为轨道的边界不连续性，通过计算边界不连续性可以

检验轨道的内符合精度。表 2（单位为 cm）为分别采用 B1I&B3I 和 B1C&B2a 组合解得的各卫星轨道的天边界不连续性在各方向上的 RMS 以及 3D RMS 统计值。

从表 2 的统计结果来看，B1I&B3I 解算的北斗三号卫星切向、法向、径向的平均定轨精度分别为 10.7cm、6.2cm、6.1cm，3D 位置精度平均为 13.8cm。新信号 B1C&B2a 的轨道精度与旧信号 B1I&B3I 相比，切向精度较差，平均为 13.5cm，其他两个方向与 B1I&B3I 解算精度相当，个别卫星的径向精度甚至优于 B1I&B3I，法向和径向精度分别为 7.4cm、6.6cm，3D 位置精度平均为 16.8cm。进一步给出各卫星的可用观测数（以 2020 年 150 天为例）如图 7 所示，新信号 B1C&B2a 的可用观测数明显要少于旧信号 B1I&B3I，这也导致其定轨精度略差于 B1I&B3I。

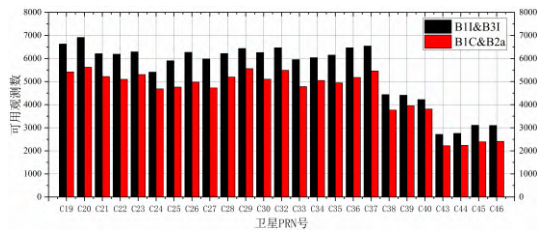


图 7 BDS-3 卫星可用观测数

Fig. 7 Available Observations of BDS-3 Satellites

卫星激光测距是一种双程测距光学系统，由于较高的测量精度，广泛应用于卫星轨道确定以及轨道精度检核，通过估计卫星

与激光站之间的距离检验轨道的外符合精度。作为一种双向测距系统，SLR 测站发射激光，照射卫星上的激光后向反射阵列（Laser Retroreflector Array, LRA）后原路返回，通过将激光发射和接收之间的时间间隔乘以光的真空速度来计算距离<sup>[22]</sup>。SLR 的测距精度优于 1 cm，是用于轨道精度验证的有效测量方法。目前北斗三号卫星中有 4 颗（C20、C21、C29、C30）参与国际激光测距服务组织（International Laser Ranging Service, ILRS）的日常观测。

图 8 中给出了 C20 卫星使用 SLR 数据

表 2 轨道边界不连续性比较结果

Tab. 2 Comparison Results of Orbit Boundary Discontinuities

卫星	B1I&B3I				B1C&B2a			
	切向	法向	径向	三维	切向	法向	径向	三维
C19	11.3	5.3	5.8	13.7	16.5	7.3	6.1	19.1
C20	9.8	4.9	5.4	12.3	15.1	6.9	5.4	17.5
C21	12.3	5.5	6.1	14.8	15.3	6.7	6.6	18.0
C22	10.2	4.8	5.0	12.3	15.9	6.4	5.6	18.0
C23	9.2	5.3	5.1	11.8	14.5	6.5	5.8	16.9
C24	9.0	5.2	4.7	11.5	13.0	6.8	6.0	15.9
C25	9.1	5.5	4.9	11.6	12.0	7.4	6.1	15.4
C26	8.6	6.2	4.8	11.6	12.4	7.6	6.4	15.9
C27	7.0	5.6	5.1	10.3	10.7	6.9	5.3	13.8
C28	8.9	5.5	5.7	11.9	11.9	6.9	5.9	15.0
C29	10.1	5.8	5.0	12.6	11.3	7.1	5.0	14.2
C30	8.8	4.9	4.8	11.2	11.1	6.9	5.1	14.0
C32	9.9	5.3	5.6	12.5	14.5	6.9	5.9	17.1
C33	11.8	5.7	4.9	14.0	17.4	7.2	5.6	19.6
C34	9.0	6.3	5.8	12.4	12.6	7.6	5.9	15.8
C35	10.6	6.0	5.5	13.3	13.3	7.0	5.7	16.1
C36	9.9	6.1	5.4	12.8	13.7	7.1	6.8	16.9
C37	9.4	5.3	5.5	12.1	13.3	6.6	6.1	16.1
C38	16.0	9.0	8.0	20.0	13.5	9.4	8.2	18.4
C39	14.4	7.9	9.7	19.1	12.5	8.5	8.9	17.6
C40	11.4	7.8	9.6	16.8	12.4	8.8	9.4	17.9
C43	11.7	7.5	6.8	15.5	13.7	7.7	8.1	17.7
C44	12.2	7.1	6.5	15.6	13.8	7.9	8.1	17.9
C45	13.6	7.6	8.3	17.6	13.6	8.8	8.2	18.1
C46	13.1	7.8	7.9	17.1	12.8	8.3	8.2	17.3
均值	10.7	6.2	6.1	13.8	13.5	7.4	6.6	16.8

分别对 B1I&B3I 以及 B1C&B2a 轨道进行检

核的残差分布。绝对值大于 20cm 的残差已



被剔除，保留并使用 98% 的原始数据。详细情况以及相应的统计项（平均值 MEAN、标准差 STD、均方根误差 RMS）在表 3 中均已给出。

可以看到，SLR 检核结果与轨道边界不连续性的结果保持一致，C20/C21/C29/C30 卫星 B1I&B3I 轨道 SLR 残差的 RMS 分别为 3.3cm、3.6 cm、3.0 cm、3.2 cm，而 B1C&B2a 轨道 SLR 残差 RMS 分别为 3.6 cm、4.2 cm、3.4 cm、4.1 cm。B1I&B3I 以及 B1C&B2a 无电离层组合的载波相位与伪距残差在图 9 给出（以 2020 年第 150 天为例），B1C&B2a 组合的表现更为出色。

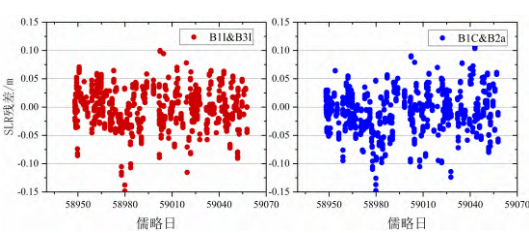


图 8 C20 卫星 SLR 残差序列

Fig. 8 SLR Residual Sequence of C20 Satellite

统计结果表明，B1I&B3I 的载波和伪距残差 RMS 分别为 8.4mm、0.70m，B1C&B2a 的载波和伪距残差绝对平均值分别为 7.9mm、0.48m。从评估结果看，在当前 BDS-3 卫星星座条件下，B1C&B2a 与 B1I&B3I 的

表 3 BDS-3 卫星轨道 SLR 检核精度（单位：cm）

Tab. 3 The SLR Validation Accuracy of the BDS-3 Satellite's Orbit (Unit: cm)

卫星	B1I&B3I			B1C&B2a		
	MEAN	STD	RMS	MEAN	STD	RMS
C20	-0.2	3.3	3.3	-0.9	3.5	3.6
C21	-0.2	3.6	3.6	-1.7	3.8	4.2
C29	-0.9	2.9	3.0	-1.7	2.9	3.4
C30	-1.1	3.1	3.2	-2.4	3.3	4.1

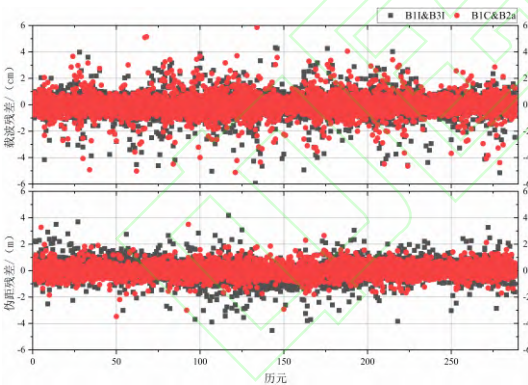


图 9 载波相位与伪距无电离层组合残差图

Fig. 9 The Phase and Pseudoranges Ionosphere-free Combination Residuals

轨道精度相当，随着北斗三号全球卫星导航系统的全面建成，地面接收机的软硬件更新，新信号 B1C&B2a 将会有更好的表现。

### 3 结语

在北斗一号、北斗二号基础上，北斗三号系统目标是实现全球覆盖、达到更优的性能。本文针对北斗三号播发的 5 个公开导航

信号 B1I/B3I/B1C/B2a/B2b，详细分析了新信号体制的伪距多路径、信噪比、无几何无电离层组合观测值特性以及北斗三号卫星精密定轨性能评估。伪距多路径组合序列分析结果表明：①北斗三号卫星的多路径误差要小于北斗二号卫星且未发现与高度角相关的系统偏差。其中，B2b 信号表现最优，低高度角时多路径误差约为 0.14m，当高度角较高时，多路径误差减小至  $\pm 0.05m$  左右，B1C 的多路径误差明显大于其他四个信号，受到多路径及噪声的影响更为显著；②在信噪比方面，B1C 表现出与多路径相似的现象，与其他四个信号相比信噪比低大概 3dB/Hz。无论 iGMAS 测站还是 MGEX 测站，BDS-3 公开信号的信噪比水平十分优异，与 GPS 和 Galileo 系统处于同一水平；③利用三频信号分析 BDS-3 GFIF 观测值特性，不同信号组合的 GFIFP 序列都呈现出与卫星有关的周期性系统误差，该问题同样存在于北斗二号卫星，这会限制精密钟差产品对 PPP 的适用性。④最后针对 B1I&B3I 和

B1C&B2a 的双频无电离层组合验证北斗三号卫星精密定轨性能,在目前的卫星星座条件下,B1I&B3I 和 B1C&B2a 两种组合的轨道精度相当,轨道径向的内符合精度为 6.1cm,6.6cm。使用激光观测数据检核的结果进一步验证了轨道外符合精度。B1C&B2a 无电离层组合定轨的载波与伪距残差 RMS 统计值分别为 7.9mm、0.48m,优于 B1I&B3I 组合的 8.4mm、0.70m,随着北斗三号系统的全面建成,地面跟踪站接收机软硬件更新,新信号 B1C&B2a 将会表现出更优异的性能。

### 参考文献

[1]Yang Y, Xu Y, Li J, Yang C. Progress and performance evaluation of Beidou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3demonstration system. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(5):584-594. (杨元喜,许扬胤,李金龙,杨诚.北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析[J].中国科学:地球科学,2018,48(5):584-594.)

[2]Guo S, Cai H, Meng Y, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica sinica*, 2019, 48(7): 810-821.(郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(7): 810-821.)

[3]China Satellite Navigation Office . Beidou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B1C (Version 1.0) [EB/OL] . (2017-12-27) . [http: // www. beidou. gov. cn](http://www.beidou.gov.cn). (中国卫星导航系统管理办公室. 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 ) [EB/OL] . ( 2017-12-27 ) . [http: // www.beidou.gov.cn](http://www.beidou.gov.cn). )

[4]China Satellite Navigation Office . Beidou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B2a (Version 1.0) [EB/OL] . (2017-12-27) . [http: // www. beidou. gov. cn](http://www.beidou.gov.cn). (中国卫星导航系统管理办公室. 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 ) [EB/OL] . ( 2017-12-27 ) . [http: //](http://www.beidou.gov.cn)

[www.beidou.gov.cn](http://www.beidou.gov.cn). )

[5]China Satellite Navigation Office . Beidou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B1I (Version 3.0) [EB/OL] . (2019-02-27) . [http: // www. beidou. gov. cn](http://www.beidou.gov.cn). (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统 空间信号接口控制文件 公开服务信号 B1I ( 3.0 版 ) [EB/OL] . ( 2019-02-27 ) . [http: // www.beidou.gov.cn](http://www.beidou.gov.cn). )

[6]China Satellite Navigation Office . Beidou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B3I (Version 1.0) [EB/OL] . (2018-02-09) . [http: // www. beidou. gov. cn](http://www.beidou.gov.cn). (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统 空间信号接口控制文件 公开服务信号 B3I ( 1.0 版 ) [EB/OL] . ( 2018-02-09 ) . [http: // www.beidou.gov.cn](http://www.beidou.gov.cn). )

[7]China Satellite Navigation Office . Beidou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B2b (Version 1.0) [EB/OL] . (2020-08-03) . [http: // www. beidou. gov. cn](http://www.beidou.gov.cn). (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统 空间信号接口控制文件 公开服务信号 B2b ( 1.0 版 ) [EB/OL] . ( 2020-08-03 ) . [http: // www.beidou.gov.cn](http://www.beidou.gov.cn). )

[8]Lv Y, Geng T, Zhao Q, et al. Characteristics of BeiDou-3 Experimental Satellite Clocks[J]. *Remote Sensing*,2018,10(11).

[9]Mao Y, Wang Q, Hu C, et al. Analysis of the Characterization for BDS-3 Satellite Clock Error[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 53-61.(毛亚,王潜心,胡超,杨鸿毅,张铭彬. BDS-3 卫星钟差特性分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(1):53-61.)

[10]Zhao Q, Wang C, Guo J, et al. Precise orbit and clock determination for BeiDou-3 experimental satellites with yaw attitude analysis[J]. *GPS Solutions*,2018,22(1).

[11]Li X, Yuan Y, Zhu Y, et al. Precise orbit determination for BDS3 experimental satellites using iGMAS and MGEX tracking networks[J]. *Journal of*

*Geodesy*,2019,93(1).

[12]Zhou R, Hu Z, Zhao Q, et al. Elevation-dependent pseudorange variation characteristics analysis for the new-generation Beidou satellite navigation system[J]. *GPS Solutions*,2018,22(3).

[13]Xu X, Wang X, Liu J, et al. Characteristics of BD3 Global Service Satellites: POD, Open Service Signal and Atomic Clock Performance[J]. *Remote Sensing*,2019,11(13).

[14]Montenbruck O, Hugentobler U, Dach R, et al. Apparent clock variations of the Block IIF-1 (SVN62) GPS satellite[J]. *GPS Solutions*,2012,16(3).

[15]Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. Initial assessment of the COMPASS /BeiDou-2 regional navigation satellite system[J]. *GPS Solutions*,2013,17(2).

[16]Li X, Zhang X. Comparison of Satellite-Induced Code Bias between BDS-2 and BDS-3 Satellites[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018,38(2):191-194. (李昕,张小红.BDS-2 和 BDS-3 卫星伪距多路径偏差特性比较[J].大地测量与地球动力学,2018,38(2):191-194.)

[17]HE Y. 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.)

[18]Wang G. Analysis of Beidou Observation Value Characteristics and Its Application in Fixed Application of PPP Ambiguity[D]. 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].武汉大学,2016.)

[19]Xu Y, Yang Y, He H, 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.)

[20]Zhao Q, Wang G, Liu Z, et al. Analysis of Beidou Satellite Measurements with Code Multipath and Geometry-Free Ionosphere-Free Combinations[J]. *Sensors*,2016,16(1).

[21] Guo J , Xu X , Zhao Q , et al. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(2):143-159.

[22]Xu X, Li M, Li W, et al. Performance Analysis of Beidou-2/Beidou-3e Combined Solution with Emphasis on Precise Orbit Determination and Precise Point Positioning. *Sensors* 2018, 18, 135.

## Signal Quality Analysis and Orbit Accuracy Verification of BDS-3

Wang Xilong<sup>1</sup> Xu Xiaolong<sup>1</sup> Zhao Qile<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** On July 31, 2020, China's third generation Beidou satellite navigation system (BDS-3), which operates independently, will be fully completed and officially opened for service. The signal system of BDS-3 has been redesigned to provide public service signals of five frequencies: B1I, B3I, B1C, B2a and B2b. Based on the observations of international global navigation system monitoring and assessment service (iGMAS) and Multi-GNSS experiment (MGEX) tracking stations, this paper analyzes the characteristics of pseudoranges multipath error, signal to noise ratio, Geometry-Free Ionosphere-Free (GFIF) combined observations of the new signal system, as well as the precise orbit determination (POD) performance evaluation of BDS-3 satellites. The results show that the multipath noise level of BDS-3 satellites signal is better than that of BDS-2 satellites, and there is no systematic deviation related to altitude angle, B1C is more significantly affected by multipath and noise; the GFIF sequences of different signal combinations of BDS-3 satellites show periodic systematic error related to satellite, and the peak value is about 2cm. For BDS-3 satellites, the "one-step" POD method is used. The two frequencies ionospheric free combination of B1I & B3I and B1C & B2a is adopted respectively. The orbit



boundary discontinuity and satellite laser ranging (SLR) carried out an orbit accuracy check, and the results show that when the number of available observations is less than B1I & B3I, the orbit accuracy of B1C & B2a is equivalent to that of B1I & B3I, and the radial internal coincidence accuracy is 6.1cm and 6.6cm respectively.

**Key words:** BDS-3; Quality analysis of observations; Geometry-Free Ionosphere-Free combination; Precise orbit determination

**First Author:** Wang Xilong, postgraduate, mainly specializes in precise GNSS precise data processing. E-mail: xlwang@whu.edu.cn.

**\*Corresponding Author:** Xu Xiaolong, postdoctoral, mainly specializes in GNSS precise orbit determination and positioning. E-mail: xuxl@whu.edu.cn

**Foundation Support:** The National Natural Science Foundation of China (No. 42030109) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2020M682483)



您感兴趣的其他相关论文:

**利用卫星分布概率对 BDS-3 性能的评估**

崔浩猛, 王解先, 王明华, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(6): 938-946

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190172>

**基本导航模式下 BDS-3 卫星地影期间的定轨精度分析**

李晓杰, 刘晓萍, 祖安然, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(6): 854-861

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190110>