



# 北斗三号最简系统卫星信号质量分析

何义磊<sup>1</sup>

1 中国铁路设计集团有限公司,天津,300308

**摘要:**截至2018年5月,中国共发射了8颗北斗三号(BDS-3)中圆地球轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星,组成北斗三号最简系统,播发了B1C、B2a和B2b新卫星信号,仅有17个国际全球导航卫星系统监测评估系统(international global navigation satellite system monitoring and assessment system, iGMAS)跟踪站能够接收到BDS-3卫星信号。选用17个iGMAS观测站10 d的观测数据,从数据完整率、信噪比、多路径效应、电离层延迟和周跳方面进行质量分析,并与GPS L1/L5和Galileo E1/E5a重叠频率对比,评价当前BDS-3卫星信号性能以及iGMAS测站的接收能力。结果表明,装有GNSS\_GGR接收机的iGMAS测站的伪距观测值含有较大的粗差,个别装有CETC-54-GMR-4011接收机的跟踪站的周跳现象较严重。通过分析多路径效应可知,BDS-3卫星各个信号中不存在与高度角有关的系统偏差。BDS-3最简系统卫星观测数据质量与GPS L1/L5和Galileo E1/E5a相当,能够满足北斗卫星导航系统正常的工作需求。

**关键词:**北斗三号卫星;最简系统;iGMAS;评估指标;质量分析

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)是由中国自主运营的全球导航卫星系统,需要经过3个阶段来实现完整系统<sup>[1]</sup>。其分别于2003年和2012年底完成了北斗一号(BDS-1)和北斗二号(BDS-2)的部署,为亚太地区提供定位、导航和授时(positioning, navigation, and timing, PNT)服务<sup>[2]</sup>,并计划于2020年完成北斗三号(BDS-3)基本星座的建设,向全球用户提供服务。在2015—2016年间先后发射了2颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)和3颗中圆地球轨道(medium Earth orbit, MEO)北斗三号试验卫星(BDS-3e),检验了BDS-3卫星系统的性能。2017-11—2018-05期间,共发射了8颗正式BDS-3卫星(C19、C20、C21、C22、C27、C28、C29、C30),实现了BDS-3最简系统的建设,其发射信息见表1,其中PRN为pseudo random noise(伪随机噪声码)。图1为2018-05-18 8颗BDS-3卫星轨迹。

BDS-3卫星播发了新的卫星信号,构建了星间链路且应用了氢/铷原子钟等新技术。BDS-3e卫星的发射吸引了全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)领域诸多学

者的眼球,竟相对BDS-3卫星的性能改善展开研究。文献[3-5]分别利用国际GNSS监测评估系统(international GNSS monitoring and assessment system, iGMAS)和多模GNSS实验(multi-GNSS experiment, MGEX)观测数据对BDS-3e卫星进行精密定轨和钟差精度分析,并分析两者对精密单点定位精度的影响。文献[6]和文献[7]分别从信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)和伪距多路径误差角度对BDS-3e卫星的5种信号进行评估。文献[6]的结果表明BDS-3e的观测数据质量与GPS和伽利略(Galileo)卫星同频点相当;文献[7]发现BDS-3e中IGSO卫星SNR略小于MEO卫星,伪距多路径误差小于BDS-2,未发现与高度角有关的系统误差。文献[8]分析了BDS-3e卫星的伪距多路径误差,研究表明B2a信号抗多路径性能优于B1C信号。文献[9]基于MGEX和iGMAS的观测数据对BDS-3e B1I和B3I信号观测数据进行质量分析,指出BDS-3e卫星信号的各项指标整体较BDS-2更佳。

目前BDS-3卫星仍处于调试阶段,尚未对用户提供服务,针对BDS-3的研究还相对缺乏,需

要对其进一步探究和分析。观测数据质量能够很好地评估 BDS-3 卫星性能,因此,本文主要从观测数据的角度对当前 BDS-3 最简系统卫星进行分析,更全面地评价其性能提升水平。本文将从数据完整性、信噪比、多路径效应、电离层延迟和周跳等方面,全方位多角度评价 BDS-3 卫星观测数据,验证当前 BDS-3 最简系统卫星的性能和 iGMAS 观测站的接收情况。

表 1 北斗三号卫星状态

Tab.1 Status of New-Generation BDS-3 Satellites

PRN	发射日期	状态	PRN	发射日期	状态
C19	2017-11-05	测试	C22	2018-02-12	测试
C20	2017-11-05	测试	C21	2018-02-12	测试
C27	2018-01-11	测试	C29	2018-03-29	测试
C28	2018-01-11	测试	C30	2018-03-29	测试

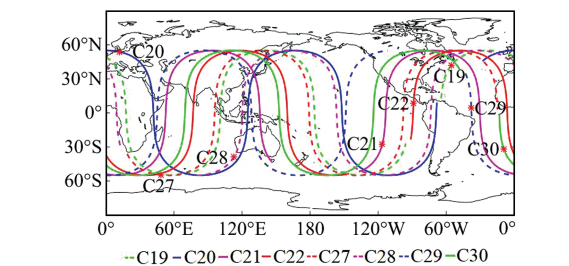


图 1 2018 年 5 月 18 日 BDS-3 卫星星下点轨迹图

Fig. 1 Ground Tracks of the New-Generation BDS-3 on 18 May, 2018

表 2 不同卫星信号的频率分配情况

Tab.2 Frequency Distribution of Different Satellite Signals

系统	频率/Hz					
	1 575.420	1 561.098	1 268.520	1 227.600	1 207.140	1 176.450
BDS-2		B1I	B3I		B2I	
BDS-3	B1C	B1I	B3I		B2b	B2a
GPS	L1			L2		L5
Galileo	E1				E5b	E5a

本文选取 2018-05-18—2018-05-27(年积日 138—147 天)的 17 个 iGMAS 测站的 GNSS 观测数据。利用笔者开发的多系统 GNSS 观测数据质量分析软件<sup>[10]</sup>,基于 GNSS 双频观测数据,从数据完整性、信噪比、多路径效应、电离层延迟和周跳 5 个方面评价 8 颗 BDS-3 卫星的 B1C 和 B2a 频点的观测数据质量,对比分析 BDS-3 卫星 B1I 和 B3I 信号,以及 GPS 和 Galileo 卫星同频率信号,验证 BDS-3 卫星信号的性能水平,并对 17 个

1 数据获取

iGMAS 始建于 2011 年,其主要任务是建立全球多模 GNSS 跟踪网,进行数据采集、存储和处理分析。目前已建成 24 个观测站,其中仅有 17 个测站能够接收到 BDS-3 卫星(C19~C22、C27~C30)的观测数据。图 2 为 17 个测站分布图。

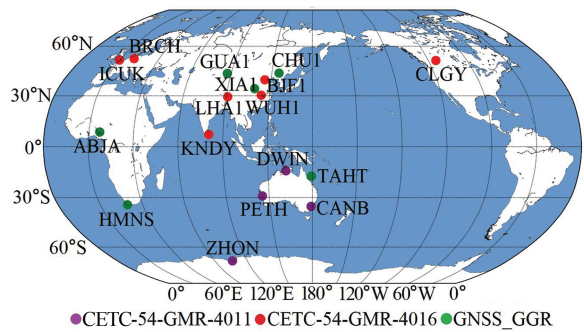


图 2 17 个 iGMAS 观测站分布图

Fig.2 Distribution of 17 Selected Stations from iGMAS

BDS-3 卫星共播发 5 个频点的卫星信号,在保留 BDS-2 卫星 B1I 和 B3I 信号的基础上,增加了与 GPS L1/L5 和 Galileo E1/E5a/E5b 的重叠信号 B1C、B2a 和 B2b,BDS/GPS/Galileo 卫星信号的频率分配如表 2 所示<sup>[6]</sup>。BDS-3 卫星的 B2b 频点替代了 BDS-2 卫星的 B2I 频点,但目前仅有 5 个装备 GNSS\_GGR 接收机的测站具备接收 B2b 频点数据能力,且其伪距观测值存在较大的粗差<sup>[2]</sup>,因此本文不对 B2b 频点进行重点分析。

iGMAS 观测站接收 BDS-3 卫星信号的能力进行评估。

2 数据完整性分析

数据完整性是评价接收机观测数据的主要指标之一,表示观测时段内数据的可用性和完好性,能反映测站周围环境以及接收机性能的好坏,其值越小,表明数据质量越差,通常要求不得

低于85%。数据完整率可以表示为：

$$I = \frac{H}{E}$$
 (1)

其中,  $I$  为数据完整率;  $H$  和  $E$  分别为某颗卫星的完整观测值数量和理论观测值数量。

通常在定义完整观测值时只考虑伪距和载波相位观测值, 但多谱勒观测值和信噪比同样具有重要作用, 因此本文将其定义为同时具备上述4种观测值, 以确保同一接收机通道观测值的完

整性。理论观测值则可以通过卫星高度角是否大于截止高度角判断得出。

通常数据完整率会随设置的卫星高度截止角变化而变化, 为了避免此影响, 将其设为  $0^{\circ}$ 。图3中体现了17个测站8颗BDS-3卫星在年积日138—147天间的B1C和B2a频点的数据完整率平均值, 对17个测站的数据完整率取平均值, 具体见表3。

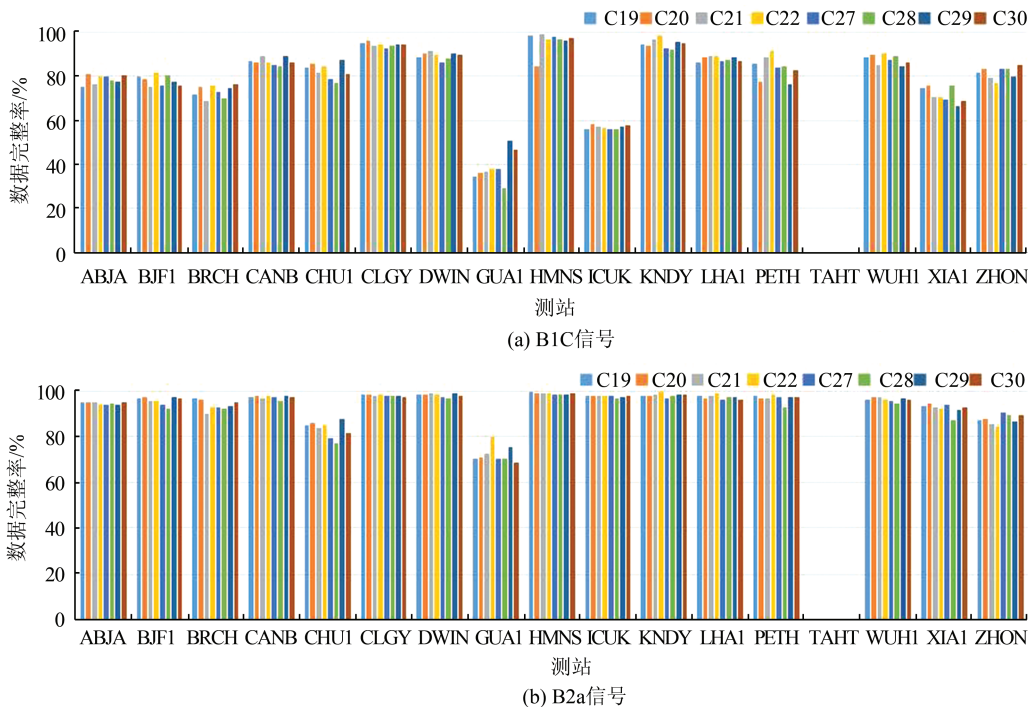


图3 各测站B1C和B2a频点数据完整性

Fig. 3 Data Integrity for B1C and B2a of Selected Stations

从图3中可以看出, 各站之间B1C频点的数据完整率具有明显差异, 且BDS-3卫星间也差异较大, 其范围在29%~99%之间。GUA1站和ICUK站分别为40%和60%左右, 其余站均能达到70%以上。各站之间B2a频点的数据完整率具有良好的一致性, 且BDS-3卫星间也差异甚小, 其范围在68%~99%之间。GUA1和ICUK站在70%~80%之间, 其余站均能达到90%以上。TAHT还不能跟踪到B1C/B2a/B2b卫星信号, 因此图3中没有数据统计, 本文不再对其进行分析。表3中, B2a频点数据完整率在92%~94%之间, 而B1C频点在79%~81%之间, 显然B2a频点在数据完整性方面比B1C频点更优。

图4为CLGY站连续10 d的GPS、Galileo和BDS-3卫星各频点的数据完整率时序图。对比BDS-3 B1I/B3I/B1C/B2a频点可知, B1I、B3I和B2a频点的数据完整率较为稳定, 分别约为

99.5%、98.5%和97.5%, 而B1C频点具有明显的波动性, 在92%~96%之间浮动。对比3个系统卫星重叠频率的数据完整率, 对于GPS L1/BDS-3 B1C/Galileo E1频点, L1频点最为稳定, 约99.5%; 而E1频点和B1C频点类似, 具有明显的波动性; L1和E1频点均优于B1C频点, 分别约3%~8%和1%~4%。对于GPS L5/BDS-3 B2a/Galileo E5a频点, L5频点较为稳定, 约99%; 而E5a频点同样有明显的波动性; B2a频点小于L5频点, 约1%~2%, 但大于E5a频点, 约0.2%~7%。

表3 BDS-3 B1C/B2a 频点数据完整性/%

Tab. 3 Data Integrity for B1C/B2a of BDS-3/%

信号	C19	C20	C21	C22	C27	C28	C29	C30
B1C	80.0	80.0	79.8	81.2	79.0	79.1	80.2	80.6
B2a	94.2	94.4	93.6	94.5	93.2	92.1	94.3	93.6



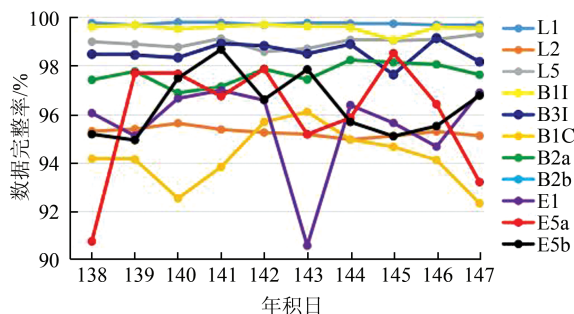


图4 CLGY站 GPS/BDS/Galileo的数据完整性

Fig. 4 Data Integrity for GPS/BDS/Galileo of CLGY

### 3 SNR 分析

SNR是载波信号功率与噪声功率的比值,单位为dB-Hz,可用来衡量测距信号质量的优劣,反映载波相位的测距精度和接收机的性能。一般

可从RINEX文件中获得或通过信号强度计算得到,其值越大,说明观测精度越高,卫星信号质量越好。图5中体现了17个测站8颗BDS-3卫星在年积日138—147天间的B1C和B2a频点的SNR平均值,对17个测站的SNR取平均值并汇总在表4中。从图5中可以看到,各站之间B1C频点的SNR具有明显差异,但BDS-3卫星间具有较好的一致性,其范围在34~46 dB-Hz之间。仅ABJA和XIA1站在38 dB-Hz左右,其余站均能达到40 dB-Hz以上。各站之间B2a频点的SNR差异较小,且BDS-3卫星间具有较好的一致性,其范围在42~49 dB-Hz之间。从表4中可知,B2a频点的SNR在46 dB-Hz左右,B1C频点的SNR在42 dB-Hz左右,很显然B2a频点在信噪比方面比B1C频点更优。

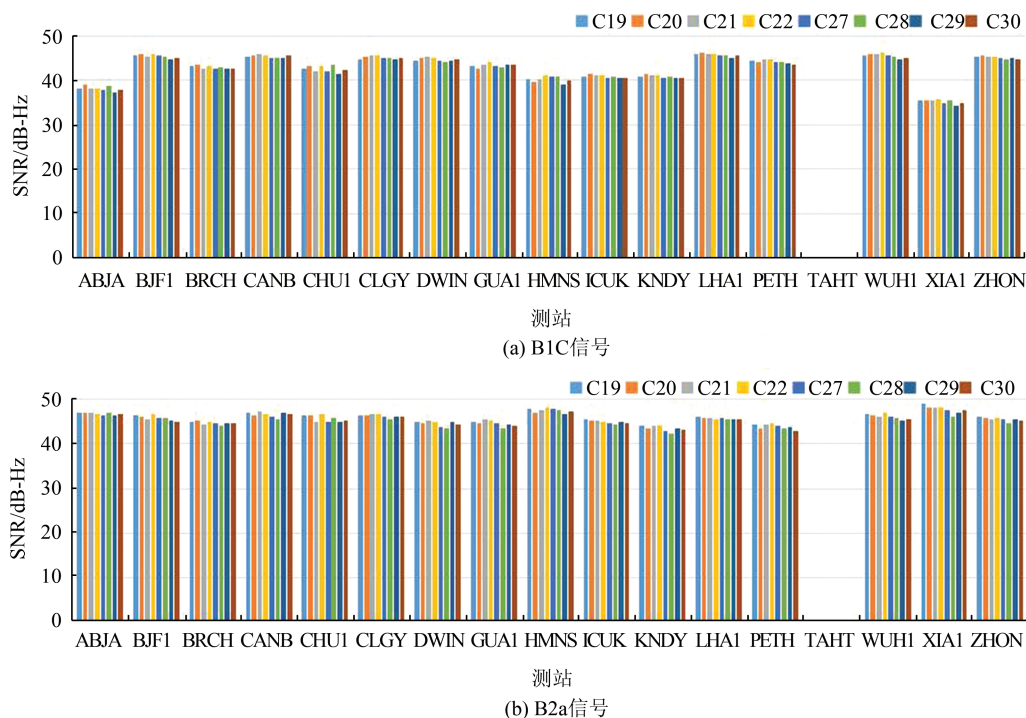


图5 各测站B1C和B2a频点信噪比

Fig. 5 SNR for B1C and B2a of Selected Stations

将各卫星信号SNR按卫星高度角 $5^\circ$ 间隔分段取均值,图6中分别显示了CLGY站年积日142天各系统卫星信号的SNR与高度角变化的关系,其中各频点的SNR与卫星高度角呈正相关,即随高度角增加呈上升趋势。同一高度角时,B1C频点的SNR小于B1I/B3I/B2a频点约1~3 dB-Hz。在低高度角时,B1C频点的SNR约为42 dB-Hz,而在天顶方向时增大到约为50 dB-Hz。在低高度角时,B3I、B2a和B1I频点SNR有1~2 dB-Hz的差距,并随高度角的增加差距在逐渐缩小,在 $60^\circ$ 左右时三者基本重合,从43

dB-Hz左右增大到天顶方向约52 dB-Hz。对于GPS L1/BDS-3 B1C/Galileo E1频点,B1C频点的SNR小于L1频点0.5~2.5 dB-Hz,但大于E1频点0.5~1.5 dB-Hz。对于GPS L5/BDS-3 B2a/Galileo E5a频点,B2a频点的SNR小于L5频点2~3 dB-Hz,但大于E5a频点1~2 dB-Hz。

表4 BDS-3 B1C/B2a 频点信噪比/dB-Hz

Tab. 4 SNR for B1C/B2a of BDS-3 /dB-Hz

信号	C19	C20	C21	C22	C27	C28	C29	C30
B1C	42.9	43.1	43.0	43.2	42.7	42.8	42.3	42.6
B2a	46.1	45.8	45.8	46.1	45.5	45.0	45.4	45.3



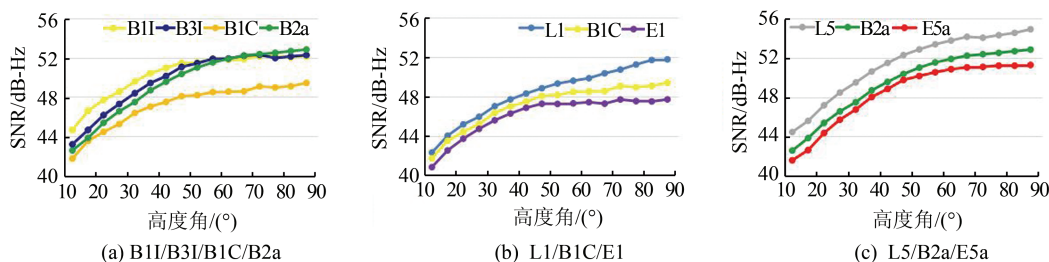


图6 年积日142天CLGY站各信号的SNR

Fig. 6 SNR for Each Signal of CLGY on DOY142

#### 4 多路径效应误差分析

多路径效应(multipath effect, MP)主要受GNSS接收机周围环境的影响,具有明显的周期性,不能将噪声从其中完全剥离<sup>[9]</sup>,因此本文提及的MP涵盖了伪距多路径误差与随机噪声的共同影响。抗多路径性能是评价接收机性能的重要指标,可利用伪距和载波相位观测值的线性组合求得,其值越小,说明抗多路径性能越好。

图7中体现了17个测站8颗BDS-3卫星在年积日138—147天间的B1C和B2a频点的MP平

均值。从图7中可以看出,ABJA站B1C和B2a频点的MP值最大值分别超过17 m和11 m,而CHU1和XIA1站B2a频点的MP值也超过了3 m,由图2可知三者均为GNSS\_GGR类型接收机。此外,其余各站的B1C和B2a频点的MP值有较大差异,但不同BDS-3卫星间无明显差异,将TAHT、ABJA、CHU1、XIA1站以外的13个测站的MP值取平均并汇总在表5中。从表5可知,B2a频点的MP值在0.21~0.23 m之间,而B1C频点的MP值在0.31~0.33 m之间,很显然B2a频点在抑制多路径效应方面比B1C频点更优。



图7 各测站B1C和B2a频点伪距多路径误差

Fig. 7 Pseudorange Multipath Error for B1C and B2a of Selected Stations

将各卫星信号MP按卫星高度角5°间隔分段并计算均方根(root mean square, RMS),即为MP-RMS,图8中分别显示了CLGY站年积日142天各系统卫星信号的MP-RMS与高度角变化的关系,其中各频点的MP-RMS与卫星高度角呈负相关,即随高度角增加呈下降趋势。BDS-3信号中未发现与高度角相关的系统误差,改善了

BDS-2卫星中存在的问题。同一高度角时,B1C频点的MP-RMS大于B1I/B3I/B2a频点,在低高度角时B1C频点约为1 m,B1I/B3I/B2a频点约为0.6 m,而在天顶方向时三者均减小到约0.1 m。对于GPS L1/BDS-3 B1C/Galileo E1频点,B1C和E1频点的MP-RMS仅在低高度角时有较小差异,E1频点约为0.7 m,在其他高度角时几乎

重合,在天顶方向时减小到 0.1 m 左右;而 L1 频点的 MP-RMS 在低高度角时为 0.5 m,在天顶方向时减小到约为 0.1 m,明显优于 B1C 频点。对于 GPS L5/BDS-3 B2a/ Galileo E5a 频点,B2a 和 L5 频点的 MP-RMS 仅在低高度角时有较小差异,L1 频点约为 0.4 m,在其他高度角时几乎重合,在天顶方向时减小到 0.1 m;而 E5a 频点的 MP-RMS 在低高度角时为 0.37 m,在天顶方向时减小到约为 0.1 m,略优于 B2a 频点。因此,

BDS-3 B1C 和 B2a 信号在抑制伪距多路径方面略差于 GPS 和 Galileo 卫星重叠频率,但仍处于同一水平。

表 5 BDS-3 B1C/B2a 频点伪距多路径误差/m

Tab. 5 Pseudorange Multipath Error for B1C/B2a of BDS-3/m

信号	C19	C20	C21	C22	C27	C28	C29	C30
B1C	0.31	0.32	0.32	0.32	0.31	0.33	0.32	0.31
B2a	0.21	0.22	0.21	0.21	0.22	0.23	0.21	0.23

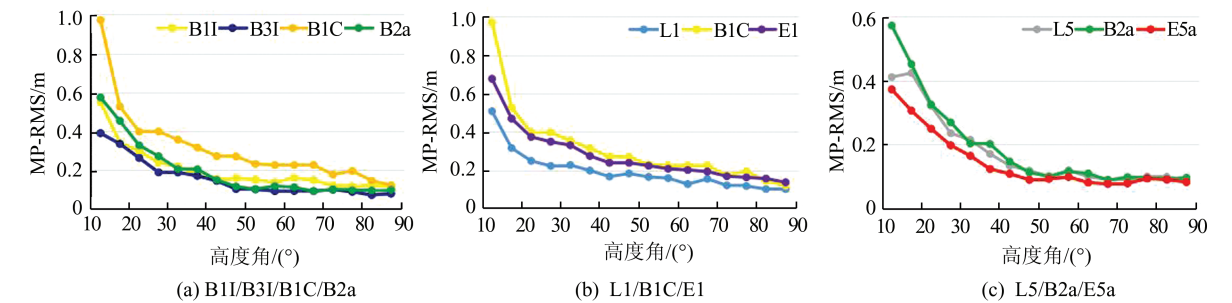


图 8 年积日 142 天 CLGY 站各信号的 MP-RMS  
Fig. 8 MP-RMS for Each Signal of CLGY on DOY 142

5 电离层延迟分析

电磁波信号在通过电离层时会使载波相位和伪距的传播速度发生变化,从而在距离上产生差异,称之为电离层延迟。电离层延迟变化率

(ionospheric delay rate, IOD)是单位时间内电离层的变化情况,当  $IOD \geq 4$  m/min 时,判定电离层变化过于强烈。图 9 中体现了 17 个测站 8 颗 BDS-3 卫星在年积日 138—147 天间的 B1C 和 B2a 频点的 IOD-RMS 平均值。

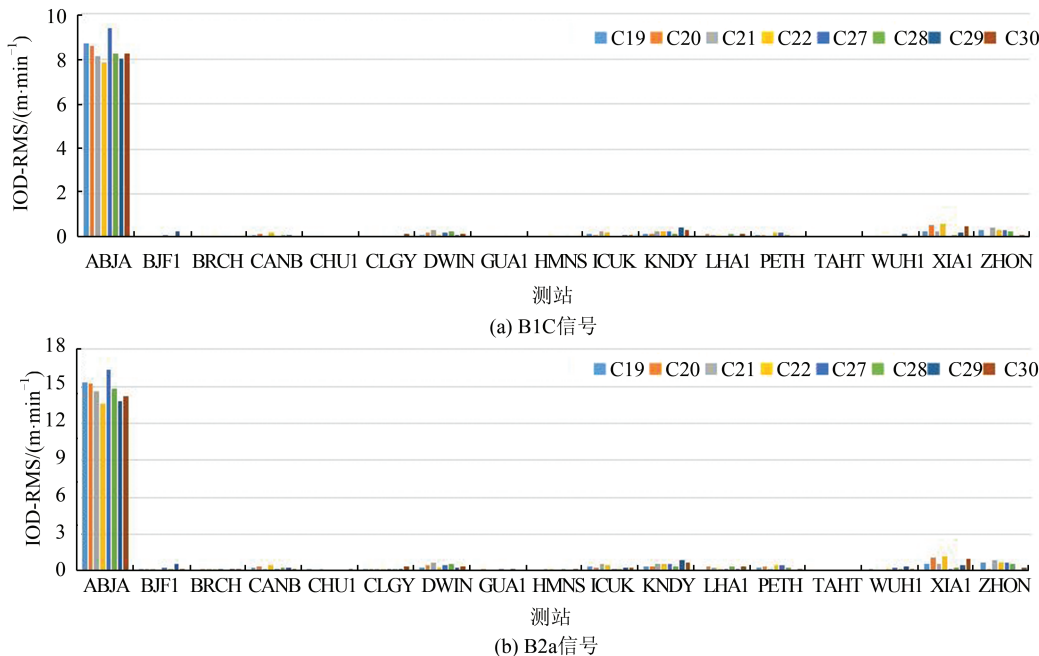


图 9 各测站 B1C 和 B2a 频点 IOD-RMS  
Fig.9 IOD-RMS for B1C and B2a of Selected Stations

从图9中可以看出,ABJA站B1C和B2a频点的IOD-RMS最大值分别超过9 m/min和16 m/min,大于4 m/min的限差,说明ABJA站电离层延迟误差非常大。

此外,其余各站的B1C和B2a频点的IOD-RMS值虽有较大差异,但均小于1 m/min,将TAHT、ABJA站以外的15个测站的IOD-RMS取平均并汇总在表6中。从表6中可知,B1C频点的IOD-RMS在0.14~0.19 m/min之间,B2a频点的IOD-RMS在0.25~0.34 m/min之间,很显然B1C频点在削弱电离层延迟方面比B2a频点更优。

表6 BDS-3 B1C/B2a频点IOD-RMS/(m·min<sup>-1</sup>)

Tab.6 IOD-RMS for B1C/B2a of BDS-3/(m·min<sup>-1</sup>)

信号	C19	C20	C21	C22	C27	C28	C29	C30
B1C	0.14	0.16	0.17	0.19	0.15	0.14	0.16	0.18
B2a	0.25	0.29	0.30	0.34	0.27	0.25	0.28	0.32

将各卫星信号IOD按卫星高度角5°间隔分段并计算RMS(IOD-RMS),图10中分别显示了CLGY站年积日142天各系统卫星信号的IOD-RMS与高度角变化的关系,其中各频点的IOD-RMS与卫星高度角呈负相关。

同一高度角时,B1C和B2a频点的IOD-RMS分别与B1I和B3I频点大小相当,在低高度角时,B1C/B1I和B2a/B3I的IOD-RMS分别为0.04 m/min和0.07 m/min,在天顶方向时分别减小到0.005 m/min和0.008 m/min。对于GPS L1/BDS-3 B1C/Galileo E1频点,三者的IOD-RMS仅在低高度角时有较小差异,在0.03~0.06 m/min之间,在天顶方向时减小到0.005 m/min。对于GPS L5/BDS-3 B2a/Galileo E5a频点,三者的IOD-RMS同样仅在低高度角时有较小差异,在0.06~0.1 m/min之间,在天顶方向时减小到0.008 m/min。

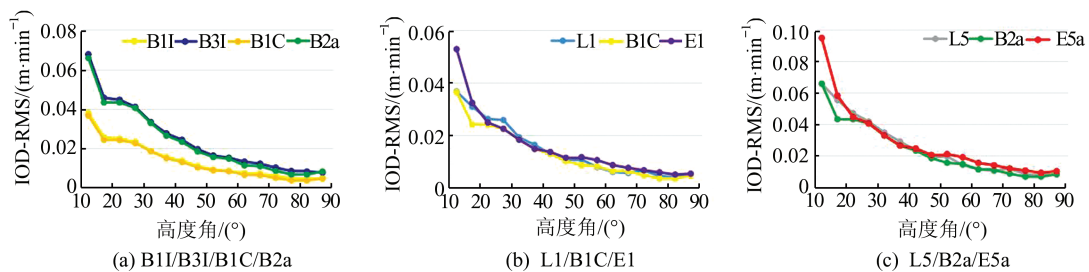


图10 年积日142天CLGY站各信号的IOD-RMS

Fig. 10 IOD-RMS for Each Signal of CLGY on DOY 142

## 6 周跳分析

周跳是GNSS数据处理时的一个重要参数,能反映出载波相位观测数据质量的好坏和接收机修复周跳的能力。本文同时使用电离层残差组合(geometry-free, LG)和Melbourne-Wübbena(MW)组合来进行周跳探测,并使用周跳比(cycle slip ratio, CSR)来表示观测值的周跳状况,其值越低,说明接收机抑制周跳能力越强。计算公式为:

$$C = \frac{1000}{O/S} \quad (2)$$

式中,C表示CSR;O/S为观测值数量与周跳数的比值。

图11中体现了17个测站8颗BDS-3卫星在年积日138—147天间的B1C和B2a频点的CSR平均值。从图11中可以看出,ABJA站B1C/B2a频点组合的CSR超过700,说明周跳现象极其严

重,ABJA站观测数据各方面质量都很差,不建议在后续的数据解算中使用。DWIN、PETH和ZHON站中有少数卫星周跳现象较多,从图2可知三者均为CETC-54-GMR-4011类型接收机,说明其B1C和B2a频点易发生周跳现象。在不考虑ABJA站的情况下,约70%的BDS-3卫星CSR小于10,而CSR大于10的现象主要表现在DWIN、PETH和ZHON这3个测站中,将剩余12个测站的B1C/B2a频点组合CSR取平均并汇总在表7中。从表7中可知,8颗BDS-3卫星CSR在3.7~8.6之间,其中C21、C22和C28卫星CSR较大,在8.5左右。

图12为CLGY站连续10 d的BDS-3 B1I/B3I与B1C/B2a、GPS L1/L5和Galileo E1/E5a双频组合的CSR均值时序图。由图12可知,4种组合的CSR均未超过8,其中B1I/B3I组合CSR最优,大小控制在0~1之间;而B1C/B2a、L1/L5和E1/E5a组合CSR大小相当,在1~8之间波动。



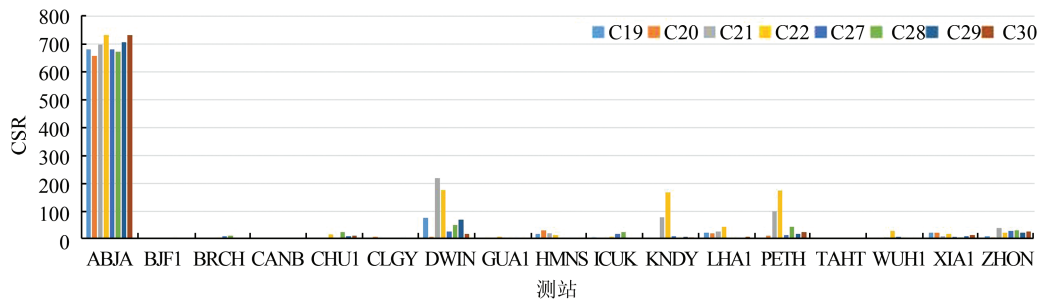


图 11 各测站 B1C/B2a 频点 CSR

Fig. 11 CSR for B1C/B2a of Selected Stations

## 7 结 语

本文选用 17 个 iGMAS 观测站的 GNSS 观测数据,从数据完整性、信噪比、多路径效应、电离层延迟和周跳 5 个方面评价 BDS-3 卫星 B1C/B2a 信号的观测数据质量,对比分析了 B1I/B3I 信号、GPS L1/L5 和 Galileo E1/E5a 信号的性能,检验了 BDS-3 卫星信号性能以及 iGMAS 观测站的接收能力。实验结果表明:(1)部分 GNSS\_GGR 接收机捕获的 B1C 和 B2a 信号伪距观测值中含有较大的粗差,CETC-54-GMR-4011 接收机捕获的 B1C 和 B2a 信号较易出现周跳。(2)BDS-3 卫星的 B1I 和 B3I 信号的数据完整性优于 B1C 和 B2a 信号,GPS L1 和 Galileo E1 信号略优于 B1C 信号,B2a 信号优于 Galileo E5a 信号,但略次于 GPS L5 信号。(3)B1I/B3I/B2a 信号的 SNR 优于 B1C 信号,B1C/B2a 信号的 SNR 分别优于 E1/E5a 信号,但次于 L1/L5 信号。(4)BDS-3 卫星消除了与高度角有关的系统误差,B1I/B3I/B2a 信号抑制伪距多路径的效果优于 B1C 信号,B1C/B2a 信号分别与 L1/E1 和 L5/E5a 信号相当。(5)B1C/B1I 信号削弱电离层延迟的效果优于 B2a/B3I 信号,B1C/B2a 信号分别与 L1/E1 和 L5/E5a 信号相当。(6)B1I/B3I 组合抑制周跳发生的效果优于 B1C/B2a 组合,B1C/B2a、L1/L5 与 E1/E5a 组合效果相当。总的来说,BDS-3 最简系统卫星性能更加优越,可以满足 BDS 日常的工作需求,同时新增的 B1C 和 B2a 信号与 GPS 和 Galileo 重叠频率的观测数据质量相当,实现了兼容互操作性,为下一步 BDS-3 基本系统的构建夯实基础。

表 7 BDS-3 B1C/B2a 频点 CSR

Tab. 7 CSR for B1C/B2a of BDS-3

信号	C19	C20	C21	C22	C27	C28	C29	C30
B1C/ B2a 组合	3.8	5.3	8.5	8.6	5.5	8.4	3.7	4.4

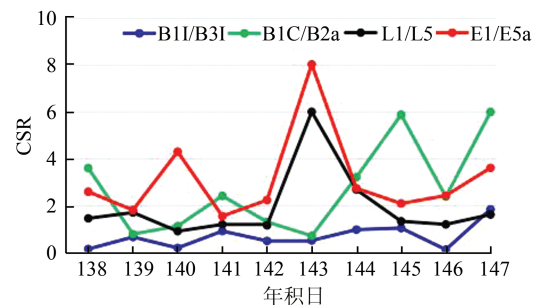


图 12 CLGY 站不同频点组合的 CSR

Fig. 12 CSR for Different Frequency Combination of CLGY

致谢:感谢国际 GNSS 监测评估系统(iGMAS)提供数据产品。

## 参 考 文 献

- [1] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenge of the BeiDou Satellite Navigation System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1-6(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)
- [2] Li Xingxing, Xie Weiliang, Huang Jiaxing, et al. Estimation and Analysis of Differential Code Biases for BDS3/BDS2 Using iGMAS and MGEX Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93 (3): 419-435
- [3] Li Xingxing, Yuan Yongqiang, Zhu Yiting, et al. Precise Orbit Determination for BDS3 Experimental Satellites Using iGMAS and MGEX Tracking Networks[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(1): 103-117
- [4] Yan Xingyuan, Wang Le, Huang Guanwen, et al. Precise Orbit and Clock Offset Determination for BeiDou-3 Test Satellites and the Accuracies Analysis [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018, 35(1): 27-31(燕兴元, 王乐, 黄观文, 等. BeiDou-3 试验卫星精密定轨及钟差精度分析[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(1): 27-31)
- [5] Guo Huijun, Guo Jing, Zhao Qile, et al. Precise Orbit Determination for BeiDou-3 Experimental Satel-

- lites and Its Impact on PPP[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(12):1 263-1 267(郭慧军, 郭靖, 赵齐乐, 等. 北斗三期试验卫星精密定轨及对PPP定位影响的分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(12):1 263-1 267)
- [6] Zhang Xiaohong, Wu Mingkui, Liu Wanke, et al. Initial Assessment of the COMPASS/BeiDou-3: New-Generation Navigation Signals[J]. *Journal of Geodesy*, 2017(1):1-16
- [7] Yang Yuanxi, Xu Yangyin, Li Jinlong, et al. Development and Performance Prediction of BeiDou-3: System-Test Verification Data Analysis [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2018, 48(5):584-594(杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 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)
- [8] Xu Yangyin, Yang Yuanxi, He Haibo, 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):1 214-1 221(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): 1 214-1 221)
- [9] He Yilei, Wang Qianxin, Wang Zhiwen, et al. Quality Analysis of Observation Data of BeiDou-3 Experimental Satellites[C]. China Satellite Navigation Conference, Harbin, China, 2018(何义磊, 王潜心, 王志文, 等. 北斗三号试验卫星观测数据质量分析[C]. 中国卫星导航学术年会, 哈尔滨, 2018)
- [10] He Yilei, Wang Qianxin. Quality Analysis and Pre-process Software for Multi-GNSS Observation Data V1.0 [P]. Software Copyright: 2017SR426408, 2017-08-07(何义磊, 王潜心. 多系统GNSS观测数据质量分析及预处理软件V1.0[P]. 软件著作权: 2017SR426408, 2017-08-07)

## Quality Analysis of Satellite Signal for BDS-3 Simplest System

HE Yilei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China

**Abstract:** Eight new-generation BeiDou global satellites (BDS-3) had been launched into medium Earth orbit (MEO) successfully until May 2018. They constitute the BDS-3 simplest system, and transmit several new navigation signals, namely B1C, B2a, and B2b, and only 17 iGMAS tracking stations can track BDS-3 satellite signals. The 10 days real Multi-GNSS data of 17 iGMAS(international global navigation satellite system monitoring and assessment system) tracking stations are selected for quality analysis in terms of data integrity, signal to noise ratio(SNR), multipath effect, ionospheric delay and cycle slip. By comparing with the GPS L1/L5 signals and Galileo E1/E5a signals, the performance of the current BDS-3 satellites signals and the receiving capability of the iGMAS tracking stations are obtained. The results show that, there are large gross errors in pseudorange observations of iGMAS tracking stations which are equipped with GNSS\_GGR receivers, and the cycle slips of several tracking stations equipped with CETC-54-GMR-4011 receivers are serious. The analysis of code multipath shows that the elevation-dependent system biases seem to be not exist for all the available signals of BDS-3 satellites. The observations quality of the BDS-3 simplest system satellites' is comparable to that of GPS L1/L5 and Galileo E1/E5a signals, which can meet the normal working requirements of BeiDou satellite navigation system.

**Key words:** BDS-3; simplest system; iGMAS; evaluation indicator; quality analysis

**Author:** HE Yilei, master, specializes in quality analysis of GNSS measurements. E-mail: heyilei@cumt.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China(41874039).

**引文格式:** HE Yilei. Quality Analysis of Satellite Signal for BDS-3 Simplest System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3):394-402. DOI:10.13203/j.whugis20180379(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. DOI:10.13203/j.whugis20180379)