

北斗卫星全球激光测距观测及数据应用

张忠萍¹, 程志恩^{1,2*}, 张海峰¹, 赵 罡¹, 邓华荣¹, 吴志波¹

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 卫星轨道精确测定是卫星导航系统提供导航服务的基础。北斗卫星导航系统是我国自主研发的新一代卫星导航系统, 卫星上均装载了激光反射器, 以厘米或毫米级精度卫星激光测距作为北斗卫星精密测轨与微波测量系统的独立外部标校手段。为增强北斗卫星的激光观测能力, 上海激光测距站在白天光束监视、望远镜精跟踪、噪声滤波等方面进行了性能改进, 在国际激光联测台中首先实现同步轨道卫星白天激光观测; 基于国际激光联测机制, 组织国际激光测距站开展北斗卫星全球激光观测实验, 获取了 28 个台站对北斗卫星的激光观测数据, 弥补了国内台站地域局限性, 为国内卫星获取国外台站观测数据提供了途径。利用全球台站激光观测数据开展了北斗卫星激光独立定轨、广播星历精度检核等研究, 并将结果应用于北斗卫星导航系统性能评估。

关键词 测量; 卫星激光测距; 激光数据应用; 全球激光联测; 北斗卫星; 激光反射器

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0404004

Global Laser Ranging Observation of Beidou Satellites and Data Application

Zhang Zhongping¹, Cheng Zhien^{1,2}, Zhang Haifeng¹, Zhao Gang¹,
Deng Huarong¹, Wu Zhibo¹

¹Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Accurate determination of satellite orbit is the foundation of providing the navigational service for navigation satellite system. Beidou navigation system is the new generation of navigation satellite system which has been developed independently in China. The Beidou satellites are equipped with laser retro-reflectors and the satellite laser ranging with the precision of centimeter or millimeter-level is regarded as the independent external calibration for the accurate measurement of Beidou satellite orbit and the microwave measurement system. In order to increase the laser observation performance of Beidou satellites, the improvements of daylight laser beam monitor, telescope fine tracking, noise filtering and so on are made, which make Shanghai laser station the first one to observe the synchronous orbit satellites in the daytime among the global laser ranging stations. Based on the international laser ranging observation mechanism, the global laser ranging campaign for Beidou satellites observation experiments is being implemented. Laser observation data of about 28 laser stations are obtained, which compensate the limitation of domestic stations. This provides a way for the domestic satellites to obtain the observation data of foreign stations. Using laser observation data from the global stations, the studies of the independent orbit determination and checking the accuracy of broadcast ephemeris for Beidou satellites are carried out. The results are applied in the performance evaluation of Beidou navigation satellite system.

Key words measurement; satellite laser ranging; laser data application; global laser ranging observation; Beidou satellite; laser retro-reflectors

OCIS codes 120.1880; 120.3930; 120.6085; 280.3400

收稿日期: 2016-11-07; 收到修改稿日期: 2016-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(U1631240, 11303074, 11503068)

作者简介: 张忠萍(1960—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事卫星激光测距方面的研究。E-mail: zzp@shao.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: cze@shao.ac.cn

1 引 言

北斗卫星导航系统是中国正在实施的自主发展、独立运行的全球卫星导航系统,采用由地球静止轨道卫星(GEO)、倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)和中地球轨道卫星(MEO)组成的混合星座结构,轨道高度分别覆盖 21500 km(MEO)和 36000 km(IGSO/GEO)。截至 2016 年 11 月,已有 23 颗北斗导航卫星入网提供服务。北斗卫星导航系统致力于向全球用户提供高质量的定位、导航和授时服务。精确测定导航卫星的轨道参数,准确地预报导航卫星的运行轨道,是实现高精度导航定位的关键,获得高精度的观测数据将十分有利于卫星精密定轨。

卫星激光测距(SLR)是一种高精度卫星测轨手段,单次测距精度可达厘米级甚至毫米级^[1],是校验导航卫星微波定轨的最佳外部基准,被现行的 GLONASS、北斗、Galileo、QZSS 和 IRNSS 导航卫星所应用^[2]。为实现北斗卫星的精密定轨,以提供高精度导航定位服务,北斗卫星均装载了激光反射器阵列,在以无线电测距为主进行卫星定轨的同时,采用高精度 SLR 技术作为高精度的外部评估手段。为充分利用现有国际合作资源,采用了具有全球台站观测共享机制的激光联测方式,获取分布全球的激光台站观测数据,作为一种独立的高精度外部基准,被应用于北斗导航卫星轨道测定、检验与精度评估。

本文首先对全球激光测距网、激光联测机制进行介绍,为后续我国卫星参与国际激光联测提供参考。对上海天文台研制的北斗卫星激光反射器性能及为实现北斗高轨卫星白天激光观测所开展的系统性能改进工作进行介绍,并对全球激光测距台站对参与国际联测的北斗 GEO-1、IGSO-3、IGSO-5、MEO-3 卫星激光观测情况进行了阐述。最后分析了全球激光观测数据在北斗卫星精密定轨、广播星历精度检核等方面的应用情况,为后续北斗卫星激光观测数据持续应用奠定基础。

2 全球 SLR 观测网

2.1 国际 SLR 网和中国 SLR 网概况

目前国际激光测距服务台站共计 52 个,其分布情况如图 1 所示,分属 3 个国际网,其中美国国家航空航天局(NASA)网 9 个、欧洲网 26 个、西太平洋网 17 个。为了组织国际联合观测、加强合作和协调,于 1998 年 11 月成立了“国际激光测距服务(ILRS)”组织,在卫星实现国际联测中起到了重要作用。由于各种原因,目前能提供国际联测数据的台站约有 34 个,图 2 给出了国际 SLR 网中有观测数据的台站在 2015 年观测的卫星圈数,其中横轴为台站名称,纵轴为各站对应观测的卫星圈数。这些台站望远镜口径在 0.25~1.54 m,激光器波长均为 532 nm,重复频率在 5~2000 Hz,激光输出功率在 0.2~2.5 W。

中国 SLR 网是西太平洋网的重要组成部分,成立于 1989 年,目前包括 7 个固定站和 1 个流动站,分别为中国科学院的上海站、长春站、昆明站和武汉站,国家测绘局的北京房山站,西安测绘研究所的西安站,中国科学院国家天文台在阿根廷建立的圣胡安站,以及国家地震局的 1 m 流动站(TROS1000),图 3 为各站激光测距望远镜。由于千赫兹重复频率激光测距具有目标捕获快、回波数多、测距精度高、标准点数据密度高

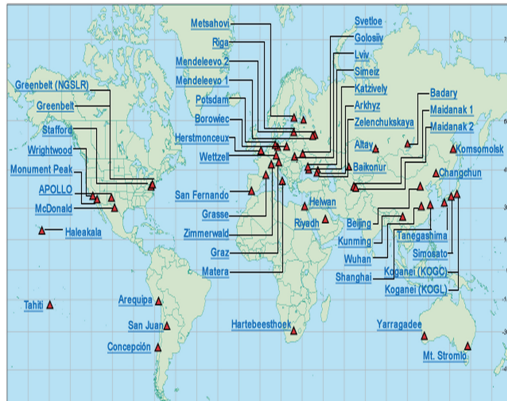


图 1 国际 SLR 网

Fig. 1 International SLR network

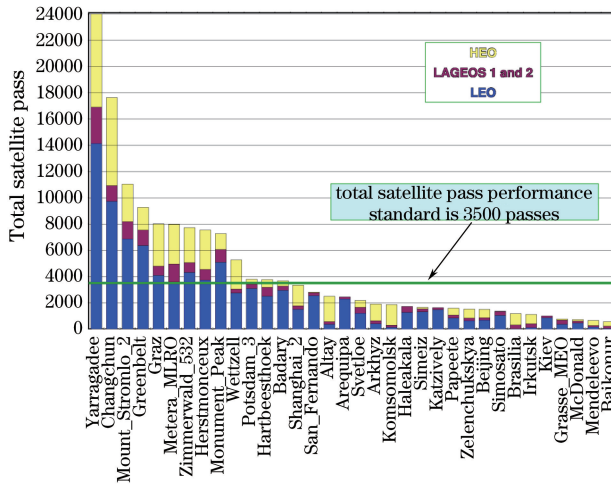


图 2 国际 SLR 网各台站 2015 年卫星观测圈数

Fig. 2 Satellite observation total passes of international SLR stations in 2015

等优点^[3-4],国内激光台站通过陆态网工程二期升级改造,几乎全部测站实现了千赫兹重复率 SLR^[4-6],部分台站系统性能得到很大提升,对北斗卫星国际联测起到了重要作用。



图 3 中国 SLR 网各站跟踪望远镜

Fig. 3 Tracking telescopes of Chinese SLR stations

2.2 卫星激光联测机制

带有激光反射器的卫星称为激光测距卫星,有时亦称激光卫星。ILRS 通过激光测距支持激光测距卫星空间科学和技术研究,包括地球和海洋研究、大气研究、月球与行星研究、基本常数和相对论研究、航天工程等,并且通过卫星轨道参数及特殊计划需求确定联测卫星的跟踪优先级。参与国际联测的激光卫星,所属部门需向 ILRS 中央局提交申请,由卫星联测工作组审查并经 ILRS 执委会批准。经 ILRS 执委会批准,并且卫星发射及提供轨道预报后,即可开展卫星的国际联测。参与国际联测的激光卫星需提供与卫星任务、测量要求等相关信息,用于卫星管理与数据应用。

目前正在参与国际联测的激光卫星约 64 颗,可分为大地测量卫星、遥感卫星、导航卫星、实验卫星 4 类,其中导航卫星有 35 颗:GLONASS 卫星 6 颗、北斗卫星 9 颗、Galileo 卫星 14 颗、IRNSS 卫星 5 颗和 QZSS 卫星 1 颗,在导航卫星上装载激光反射器并进行国际激光联测已成为一种趋势。

3 北斗卫星全球激光观测

3.1 北斗卫星激光反射器

激光反射器是激光用于远距离测距的一个重要组成部分^[7],通常由多个角反射器组合而成,对激光具有定向反射特性。如果将激光反射器安装在卫星对地面板上,地面台站对其发射激光,将能够接收到激光回波信号,测量激光来回飞行的时间就可精确获得卫星到地面台站的距离^[8-10]。

中国科学院上海天文台从 1999 年开始研制卫星激光反射器,从 2004 年起承担了北斗卫星激光反射器的设计和研制任务,目前已研制了 20 余套北斗卫星激光反射器。图 4 和表 1 给出了北斗 MEO 和 GEO/IGSO 卫星激光反射器的实物照片和性能^[11]。

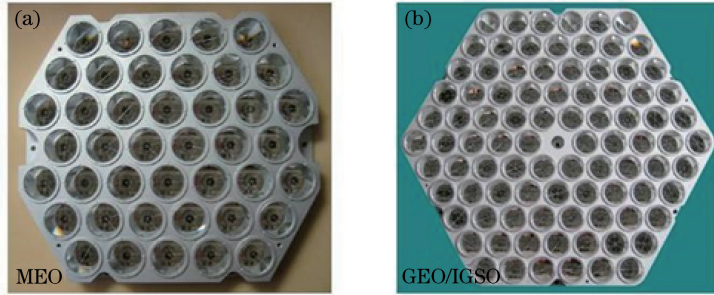


图 4 北斗(a) MEO 和(b) GEO/IGSO 卫星激光反射器

Fig. 4 Satellite laser retro-reflectors on COMPASS (a) MEO and (b) GEO/IGSO

表 1 北斗 MEO 和 GEO/IGSO 卫星激光反射器性能参数

Table 1 Performance parameters of satellite laser retro-reflectors on COMPASS MEO and GEO/IGSO

Parameter	MEO	GEO/IGSO
Size	31.2 cm×28.0 cm×3.0 cm	48.9 cm×43.0 cm×3.0 cm
Diameter of corner cube	33 mm	33 mm
Number of corner cube	42	90
Reflective area	360 cm ²	770 cm ²
Material	Fused silica	Fused silica
Dihedral offset	0.6"	0.5"
Weight	2.45 kg	4.85 kg

3.2 北斗卫星白天激光观测

实现北斗高轨卫星的白天激光测距将获得更多的观测数据,有利于北斗卫星国际联测及观测数据的应用。但白天 SLR 背景噪声大,约为夜晚背景噪声的 10^6 倍^[12],并且由于高轨卫星距离远及千赫兹 SLR 低脉冲能量,高轨卫星白天激光测距回波率和信噪比低。同时由于白天背景光强,卫星不可见,给瞄准及搜索卫星带来困难。因此,要实现同步轨道高轨卫星的白天激光测距难度较大。为此,上海 SLR 站进行了针对性的系统升级改造:1) 在白天激光测距中,卫星星象和激光光束无法直接显示,如果卫星预报较差、激光光束指向有偏差,则很难开展卫星测量。如果在白天能监视激光束指向,则只需进行卫星位置的搜索即可开展测距,测距成功率将大幅提高。因此,在千赫兹重复率激光束白天监视中,采用可外控、曝光时间在微秒级、具备图像叠加功能的电荷耦合器件(CCD),实现了千赫兹重复率激光束白天监视^[13]。2) 白天测距时卫星星象不可见,采用盲跟踪搜索测量方式。千赫兹 SLR 采用的激光一般为高斯分布,对于距离远、回波弱的高轨卫星测距,只有光束中心强的那部分光斑击中卫星才能获得有效的回波。因此,为实现高成功率的高轨卫星白天激光观测,对望远镜的指向精度、激光束抖动、跟踪精度等提出了很高的要求。上海激光测距站采用具有物理含义的十二参数望远镜指向模型,使望远镜指向误差优于 5",满足了高轨卫星白天测距要求。与此同时,应用英国 Renishaw 公司的光栅编码器,配合美国 Copley 驱动器,应用增量式比例积分微分(PID)算法进行伺服控制,实现了精度优于 1"的精确跟踪。3) 更换主副镜,经测试更换后的主副镜组合光学反射率达 75%,有效提高了卫星激光测量能力^[14]。4) 采用了 30"~50"接收视场光阑孔、透射率达 50%的超窄带滤波片及纳秒级控制精度距离门控电路等,实现了白天背景噪声的高效滤除^[15]。

上海 SLR 站基于 60 cm 口径千赫兹 SLR 系统,在激光器输出功率仅有 0.8 W 的情况下,在国际联测台站中首先实现了距离 38000 km 北斗同步轨道卫星 (COMPASS-I3, I5, G1) 的高成功率白天测距。图 5 为 2013 年 8 月 16 日 COMPASS-I3 同步轨道卫星白天测量的实时界面,上半部分为微弱信号实时识别处理结果,下半部分为实时测量数据点图,中间一条密集的实线为有效回波信号,其他点为噪声点。

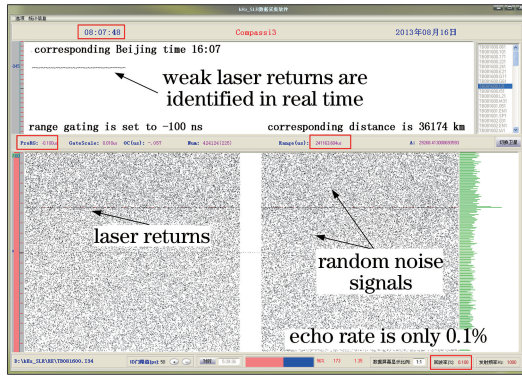


图 5 COMPASS-I3 卫星白天千赫兹激光测距结果

Fig. 5 Results of kHz laser ranging of COMPASS-I3 satellite in the daytime

3.3 北斗卫星激光联测情况

上海天文台作为中国 SLR 网的协调单位,组织实施了北斗卫星的国际联测。2007 年 4 月发射的北斗区域导航卫星 MEO-1 卫星,于 2008 年 11 月参加国际联测,直至 2012 年 6 月停止观测。2012 年 3 月,利用全球激光台站,组织开展对北斗区域导航卫星 3 类轨道 4 颗卫星 (GEO-1、IGSO-3、IGSO-5 和 MEO-3) 国际联测,至今仍在联测中,为北斗区域导航系统定轨软件评测、空间信号精度评估、卫星轨道精度外部校正等提供多台站、长弧段观测数据,这 4 颗北斗卫星基本信息如表 2 所示。并且从 2015 年起发射的北斗全球导航卫星将有多颗参加国际联测,截至 2016 年 8 月已有 5 颗北斗全球导航卫星参加国际联测。

表 2 参加国际 SLR 北斗区域导航卫星概况

Table 2 Overview of Beidou regional navigation satellites for international SLR

Information	COMPASS-G1	COMPASS-I3	COMPASS-I5	COMPASS-M3
Orbit type	GEO	IGSO	IGSO	MEO
Altitude	35793 km	35790 km	35790 km	21528 km
Inclination	1.53°	55.6°	55.6°	55.0°
Longitude of central sub-satellite point	140°E	120°E	95°E	—
Launch date	2010-01-17	2011-04-10	2011-12-01	2012-04-29
First SLR tracking date	2012-04-28	2012-04-27	2012-07-06	2012-07-11

台站测量能力决定于望远镜口径和激光器功率,且受天气因素影响大。为满足高轨/同步轨道卫星激光测量要求,选取分布广、望远镜口径大、激光器功率高的台站参与北斗卫星国际激光联测。根据北斗卫星观测实验需求,采用了日常观测、加强观测、加密观测不同测量模式。利用双边、多边等多种沟通渠道,对国内部分台站进行升级改造,并与国际激光测距组织进行了大量协调,调动了遍布全球的近 30 个激光测距台站对北斗 GEO-1、IGSO-3、IGSO-5 和 MEO-3 卫星实施了长周期、高密度的国际激光联测。从 2012 年 4 月至 2014 年 12 月,获得北斗 GEO-1、IGSO-3、IGSO-5 和 MEO-3 卫星观测弧段总数分别为 848、1173、1744 和 2131 圈,总观测弧段数为 5896 圈,各台站的观测圈数如表 3 所示,表 3 中“—”表示卫星不在台站观测范围内或不适用。激光观测数据距离偏差均在 ±3 cm 以内,为北斗 SLR 数据应用提供了大量可靠的高精度观测数据。

表 3 北斗卫星全球激光观测圈数统计

Table 3 Total passes of Beidou satellites global laser ranging observation

Station	Satellite					Remarks (country/telescope aperture/laser information)
	GEO-1	IGSO-3	IGSO-5	MEO-3	Subtotal	
Shanghai	92	99	108	51	350	China/0.6 m/1 mJ@1000 Hz
Changchun	335	358	331	248	1272	China/0.6 m/1 mJ@1000 Hz
Beijing Fangshan	9	31	28	10	78	China/0.6 m/1 mJ@1000 Hz
Yarragadee	359	483	505	297	1644	Australia/0.76 m/100 mJ@10 Hz
Mt Stromlo	32	102	48	150	332	Australia/1 m/21 mJ@60 Hz
Koganei	19	4	1	3	27	Japan/1.5 m/50 mJ@20 Hz
Komsomolsk	2	2	3	2	9	Russia/0.25 m/2.5 mJ@300 Hz
Grasse	—	26	115	113	254	France/1.54 m/250 mJ@10 Hz
Matera	—	—	160	229	389	Italy/1.5 m/100 mJ@10 Hz
Wettzell	—	36	117	143	296	Germany/0.75 m/100 mJ@20 Hz
Simeiz	—	—	2	—	2	Ukraine/1 m/80 mJ@10 Hz
Katzively	—	—	7	8	15	Ukraine/1 m/100 mJ@10 Hz
Greenbelt	—	—	—	92	92	USA/0.762 m/100 mJ@10 Hz
Monument Peak	—	—	—	110	110	USA/0.762 m/100 mJ@10 Hz
Tahiti	—	—	—	42	42	France/0.762 m/100 mJ@10 Hz
SanJuan	—	—	—	117	117	China&. Argentina/0.6 m/50 mJ@20 Hz
Hartebeesthoek	—	—	—	16	16	South Africa/0.762 m/100 mJ@10 Hz
Herstmonceux	—	—	56	114	170	UnitedKingdom/0.5 m/0.5 mJ@2000 Hz
Zimmerwald	—	1	140	204	345	Switzerland/1 m/10 mJ@110 Hz
Graz	—	25	111	140	276	Austria/0.5 m/0.4 mJ@2000 Hz
McDonald	—	—	—	2	2	USA/0.75 m/80 mJ@10 Hz
Simosato	—	—	—	24	24	Japan/0.75 m/60 mJ@5 Hz
Golosiiv	—	—	—	3	3	Ukraine/1 m/15 mJ@15 Hz
Concepcion	—	—	—	3	3	Chile/—
Altay	—	6	7	2	15	Russia/0.6 m/2.5 mJ@300 Hz
Svetloe	—	—	2	2	4	Russia/0.25 m/2.5 mJ@300 Hz
Zelenchukskya	—	—	3	4	7	Russia/0.25 m/2.5 mJ@300 Hz
Arkhyz	—	—	—	2	2	Russia/0.25 m/2.5 mJ@300 Hz
Total	848	1173	1744	2131	5896	

4 全球激光数据应用于北斗卫星定轨与检核

4.1 激光观测数据独立定轨

卫星精密定轨需要全弧段观测数据支持,全球激光联测可实现卫星的全弧段观测,弥补了区域观测的局限性。利用全球激光联测数据及 SLR 资料进行动力学单星精密定轨的整体解算方案^[16]对北斗卫星进行独立定轨,对于 G1、I3 和 I5 星,SLR 定轨残差均方根值(RMS)好于 1 cm;对于 M3 星,SLR 定轨残差 RMS 约为 2 cm。观测数据利用率均在 80%以上。

两条首日相差 5 天的 7 天弧段将有 2 天的重叠,利用这段重叠部分的符合程度检验定轨精度。图 6 显示了 2 天重叠弧段残差的典型分布,分别为 I5 星[(a)图,2012 年 9 月 6 日至 7 日]和 M3 星[(b)图,2012 年 9 月 12 日至 13 日]。图中横轴表示时间,纵轴表示重叠轨道在 R/T/N 三个方向上的残差,单位为 m。对于这段 I5 星的重叠轨道,R 方向残差 RMS 为 0.43 m,T 方向残差 RMS 为 1.46 m,N 方向残差为 1.42 m,3-D 位置偏差 RMS 为 2.08 m。M3 星在 R 方向残差 RMS 为 0.11 m,在 T 方向与 N 方向的残差 RMS 分别为 0.22 m 和 0.66 m,3-D 位置偏差 RMS 为 0.71 m。G1 星和 I3 星也有类似的结果,重叠轨道 3-D 位置精度约为米级,R 方向精度为分米级。

北斗导航卫星发播 L 波段 3 个频率的导航定位信号, L 波段精密轨道与 SLR 精密轨道相互独立, 二者的位置偏差也是定轨精度的反映。以 L 波段轨道为参考轨道, 图 7 显示了 I5 星[(a)图, 2012 年 10 月 18 日至 24 日]和 M3 星[(b)图, 2012 年 9 月 27 日至 10 月 3 日]SLR 轨道与 L 波段轨道的差异。图中横轴表示时间, 纵轴表示 SLR 轨道与 L 波段轨道在 R/T/N 三个方向上的差异。由数据可知, I5 星两种轨道符合程度: R 方向残差 RMS 为 0.61 m, T 方向和 N 方向残差 RMS 接近 1 m, 3-D 位置偏差 RMS 为 1.65 m; M3 星两种轨道符合程度: R 方向残差 RMS 为 0.16 m, T 方向和 N 方向的残差 RMS 分别为 0.57 m 和 0.74 m, 3-D 位置偏差 RMS 为 0.94 m。

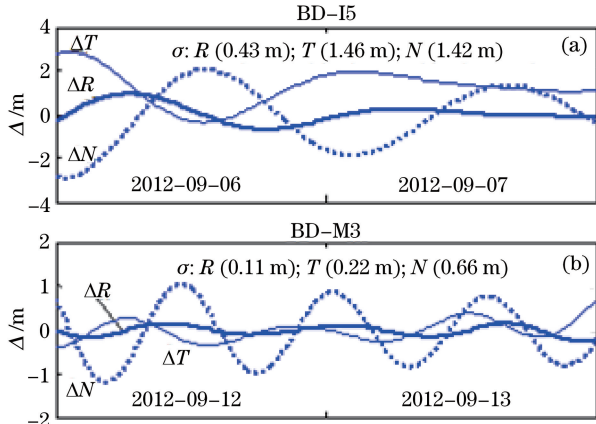


图 6 COMPASS(a) -I5 星和(b) -M3 星的 SLR 重叠轨道精度

Fig. 6 Accuracy of SLR overlapping orbits for COMPASS (a) -I5 and (b) -M3

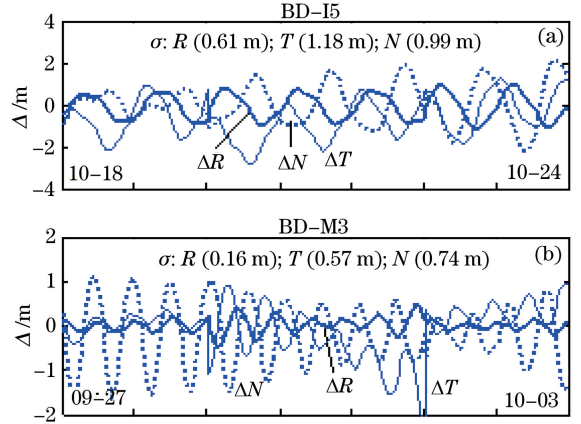


图 7 COMPASS(a) -I5 和(b) -M3 SLR 轨道与 L 波段轨道的差异

Fig. 7 Differences between SLR orbits and L-band orbits for COMPASS (a) -I5 and (b) -M3

北斗卫星 SLR 数据独立定轨重叠弧段检验结果与 SLR 数据独立定轨与 L 波段定轨比较结果精度基本一致。北斗卫星全球激光联测数据独立定轨精度可达米级, 为北斗卫星导航系统工程状态确定、在轨备份方案制订、卫星控制策略制订、系统可靠性研究提供了依据。

4.2 激光数据对北斗卫星广播星历轨道检验

SLR 测得的是地面测站到卫星激光反射器的距离, 将 SLR 数据进行误差修正后即可得到 SLR 理论的星地距离, 这些误差修正项包括: 测站的潮汐(包括固体潮/海潮/极潮)改正、测站板块运动改正、测站偏心改正、距离的大气延迟改正、距离的广义相对论改正、卫星质心改正。通过比较误差修正后的高精度激光距离观测量和广播星历计算的星地距离, 实现利用激光数据对广播星历精度的评定, 获得视向精度。利用 2012 年 7 月到 10 月的全球激光联测数据对北斗卫星 G1、I3、I5、M3 广播星历轨道进行检验, 结果如图 8 所示。

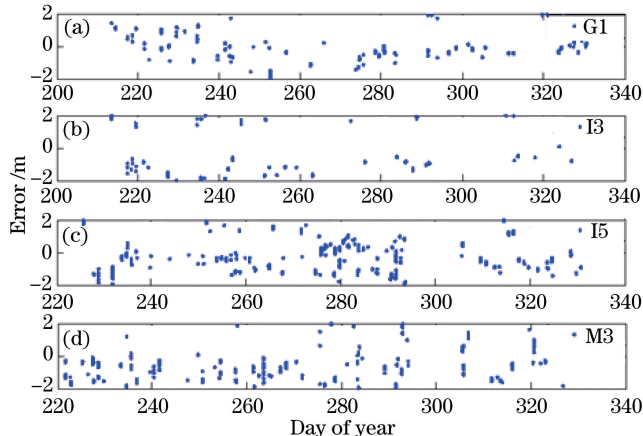


图 8 COMPASS (a) -G1 (b) -I3 (c) -I5 (d) -M3 卫星激光观测数据评估广播星历的视向精度

Fig. 8 Accuracy evaluation of broadcast ephemeris by laser observation data for COMPASS (a) -G1; (b) -I3; (c) -I5; (d) -M3

图中横轴为时间,纵轴为轨道检验视向精度,单位为 m。检验结果(RMS)表明:广播星历视向精度,G1 卫星约为 0.80 m,I5 卫星约为 0.91 m,M3 卫星约为 1.09 m,I3 卫星略差为 1.43 m,北斗卫星广播星历轨道视向精度优于 1.5 m。

5 结 论

SLR 技术的高测距精度优势,作为卫星导航系统重要测量手段已在国际上得到广泛应用。作为我国自主研发的北斗卫星导航系统,北斗卫星均装载了自主设计的具有重量轻、回波信号较强和测量精度高性能的激光反射器,应用了 SLR 技术。利用全球激光测距观测共享工作机制,组织协调全球 28 个激光测距台站对北斗区域导航卫星 GEO-1、IGSO-3、IGSO-5、MEO-3 4 颗卫星的激光联测,提供了大量可靠的高精度观测数据,验证了全球激光测距台站对北斗卫星激光观测能力。全球激光数据应用于北斗卫星定轨和检验结果表明:北斗卫星全球激光联测数据独立定轨精度可达米级,可应用于北斗卫星精密轨道和广播星历轨道检验,为北斗卫星导航系统提供了高精度外部评估手段,在北斗卫星导航系统关键性能评估中起到了重要作用。我国正在发展北斗全球导航系统,后续将发射更多北斗卫星参与国际激光联测,服务于北斗卫星导航系统建设,也为后续我国其他航天任务卫星参与国际激光联测奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Ye Shuhua, Huang Cheng. Astro-geodynamics[M]. Jinan: Shangdong Science and Technology Press, 2000.
叶叔华, 黄 斌. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
- [2] Liu Jiyu. The current status and development on refining GNSS ephemeris by means of satellite laser ranging-transmitting/receiving issue (9) of GNSS navigation signals[J]. Digital Communication World, 2014, 12:1-11.
刘基余. 卫星激光测距用于 GNSS 星历精化的现况与发展-GNSS 导航信号的收发问题之九[J]. 数字通信世界, 2014, 12: 1-11.
- [3] Zhang Zhongping, Wu Zhibo, Zhang Haifeng, *et al.* Experiment of high-repetition-rate SLR[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(12): 1267-1270.
张忠萍, 吴志波, 张海峰, 等. 高重复频率卫星激光测距实验研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(12): 1267-1270.
- [4] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al.* kHz repetition satellite laser ranging system with high precision and measuring results[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(15): 1177-1183.
张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 高精千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果[J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1177-1183.
- [5] Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.* 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002.
郑向明, 李祝莲, 伏红林, 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002.
- [6] Li Xin, Wang Peiyuan, Zou Tong, *et al.* Experiment on kHz laser ranging at Wuhan satellite laser ranging station[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 367-370.
李 欣, 王培源, 邹 彤, 等. kHz 激光器在武汉卫星观测站的测距实验[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 367-370.
- [7] Sheng Yuan. Theoretical calculation of corner-cube reflector[J]. Laser & Infrared, 1973, 3(12): 1-15.
声 远. 关于角体合作目标性质的理论计算[J]. 激光与红外, 1973, 3(12): 1-15.
- [8] Wang Yuanming, Yang Fumin, Chen Wanzhen. Calculation and measurement of the effective reflective area of space-born retro-reflectors[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(10): 25-29.
王元明, 杨福民, 陈婉珍. 卫星激光反射器有效反射面积的计算与测试[J]. 光电工程, 2007, 34(10): 25-29.
- [9] Zhou Hui, Li Song, Shi Yan, *et al.* Design of satellite laser retro-reflector[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(11): 25-29.
周 辉, 李 松, 石 岩, 等. 卫星角反射器的设计[J]. 光电工程, 2005, 32(11): 25-29.
- [10] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al.* Experiment of laser ranging to space debris based on high power solid-state laser system at 200 Hz repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s108005.
张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 基于 200 Hz 重复率高功率全固态激光器空间碎片激光测距试验[J]. 中国激光, 2014,

41(s1): s108005.

- [11] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Chen Wanzhen, *et al.* Design and performances of laser retro-reflector arrays for Beidou navigation satellites and SLR observations[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(5): 811-817.
- [12] Yang Fumin, Xiao Chikun, Chen Wanzhen, *et al.* Design and observations of satellite laser ranging system for daylight tracking at Shanghai Observatory[J]. *Science in China Series A: Mathematics*, 1999, 42(2): 198-206.
- [13] Wu Zhibo, Zhang Haifeng, Li Pu, *et al.* Report on satellite laser ranging observations at Shanghai Astronomical Observatory in 2011[J]. *Annals of Shanghai Astronomical Observatory, CAS*, 2012, (33): 28-35.
吴志波, 张海峰, 李 朴, 等. 2011年上海天文台卫星激光测距观测报告[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2012, (33): 28-35.
- [14] Wu Zhibo, Zhang Haifeng, Li Pu, *et al.* Report on satellite laser ranging system at Shanghai Astronomical Observatory in 2012[J]. *Annals of Shanghai Astronomical Observatory, CAS*, 2013, (34): 37-44.
吴志波, 张海峰, 李 朴, 等. 2012年上海天文台卫星激光测距观测报告[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2013, (34): 37-44.
- [15] Wu Zhibo, Zhang Haifeng, Li Pu, *et al.* Report on satellite laser ranging observations at Shanghai Observatory in 2013 [J]. *Annals of Shanghai Astronomical Observatory, CAS*, 2014, (35): 11-20.
吴志波, 张海峰, 李 朴, 等. 2013年上海天文台卫星激光测距观测报告[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2014, (35): 11-20.
- [16] Huang Cheng, Feng Chugang. SLR data processing and its software implementation [M]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 2003.
黄 斌, 冯初刚. SLR数据处理及其软件实现[M]. 上海: 上海天文台, 2003.