

HY-2 卫星激光反射器理论分析及激光测距实验

罗青山^{1,2}, 郭唐永¹, 邹彤¹, 朱威¹, 姚运生^{1,2}

- (1. 中国地震局地震研究所 中国地震局地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 激光反射器作为一种被动无源光学合作目标, 是人造卫星激光测距系统中的重要组成部分。对于运行在低轨卫星中的激光反射器, 既要在较大的激光入射角范围提供服务, 又要将角反射器阵列结构所引入的综合测距误差控制在一定范围内, 以保证高精度的激光测距, 因此绝大多数采用半球形阵列结构。文中以我国海洋二号卫星激光反射器为例, 对半球形激光反射器的远场衍射分布、相对有效反射面积分布、距离更正误差分布和激光测距综合精度等核心技术参数进行理论分析。并以国内流动式卫星激光测距系统 TROS1000 对海洋二号卫星激光反射器进行追踪和激光测距实验, 测量结果表明, 激光测距内符合精度为 1.1 cm, 理论分析与实测结果相符。标志着海洋二号卫星激光反射器性能优良, 这对以后激光卫星反射器的设计具有指导意义。

关键词: 激光反射器; 人卫激光测距; 速差补偿; 相对有效反射面积

中图分类号: V423.4; P228.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1106003

Theoretical analysis of laser retro-reflectors and experiment of laser ranging for HY-2 satellites

Luo Qingshan^{1,2}, Guo Tangyong¹, Zou Tong¹, Zhu Wei¹, Yao Yunsheng^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China;
2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: As a passive optical cooperative target, the laser retro-reflector is an important part of the laser ranging system. The laser retro-reflector for low earth orbit satellites, provides services in large laser incident angle range, and need to ensure that the error introduced by array structure must be controlled in a certain range. In order to ensure the high precision of laser ranging, most of laser retro-reflectors array structure are hemispherical. In this paper, taking HY-2 satellite laser retro-reflector as an example, the main technical parameters, such as the far-field diffraction distribution, relative effective reflection area distribution, distance correction error distribution and comprehensive precision of laser ranging were analyzed theoretically. The civil TROS1000 mobile satellite laser ranging system was used to HY-2 satellite laser retro-reflector, completing laser ranging experiment. The measurement results show that laser ranging accuracy is 1.1 cm, theoretical analysis accords with the experimental

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(41274189); 中国地震局地震研究所所长基金(IS201226038, S201506210)

作者简介: 罗青山(1984-), 男, 工程师, 博士生, 主要从事人卫激光测距技术方面的研究。Email: luodashan@126.com

导师简介: 郭唐永(1957-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事人卫激光测距技术方面的研究。Email: guoty9@gmail.com

results. It marks that the laser retro-reflector of HY-2 satellite has excellent performance and has guiding significance for the future design of laser satellite retro-reflector.

Key words: laser retro-reflector; satellite laser ranging(SLR); velocity aberration; relative effective reflective area

0 引言

卫星激光测距技术是旨在利用空间技术研究地球动力学、大地测量学、地球物理学和天文学等的技术手段,是当前高精度卫星精密定位观测的主要手段之一,是现代各种定位观测手段中单点采样精度最高的一种^[1-2],其观测精度已经到达几厘米甚至几毫米,因此人造卫星(下文简称人卫)激光测距技术的一个重要用途是可以对 GPS、甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)等定轨结果进行检核。激光反射器作为一种无源的光学元件,一般安装在卫星的对地面,对地面发射的脉冲激光进行原方向反射,通过精密测量激光飞行的时间来计算星地之间的距离。目前能够用于卫星激光测距的卫星大约有 50 多颗,按照其结构大致可以分为平板结构、球形结构、半圆台结构及特殊结构四类。国内自主研发的卫星激光反射器有约 20 颗,其中包括中国科学院上海天文台负责承担的激光反射器;在北斗系列卫星^[3]、神州 4 号、天宫二号等上使用,以及武汉大学负责承担的海洋二号(HY-2)激光卫星反射器^[4-5]和中国地震局地震研究所研制的皮纳卫星激光反射器,以上卫星激光反射器中核心光学元件角锥棱镜,均是由中国地震局地震研究所研制,反射器都已经通过地面人卫激光观测站成功观测满足了使用的需要。

国内自主研发的卫星激光反射器均是石英为材质的实体棱镜加工而成^[6-7],高轨卫星以平板结构为主,低轨卫星以“类圆台”结构为主。由于低轨卫星相对于地面观测站的速度快,可供地面测站实施激光观测的时间短,且激光反射器可观测的仰角范围大,所以低轨卫星激光反射器在观测站^[8]的观测仰角范围、角锥棱镜的速差补偿的要求更高。文中以国内自主研发的 HY-2 卫星激光反射器为例,系统地分析 HY-2 卫星激光反射器的特性,对半球形激光反射器的远场衍射分布、相对有效反射面积分布、

距离更正误差分布和激光测距综合精度等核心技术参数进行理论分析。并利用国内自主研发的新一代流动式卫星激光测距系统 TROS1000 对 HY-2 卫星进行追踪和激光测距实验,实验结果表明:HY-2 卫星的激光测距误差基本控制在 1 cm 左右,所研制的激光角反射器性能优良。

1 HY-2 卫星激光反射器

1.1 HY-2 卫星简介

HY-2 卫星如图 1 所示,是国内第一颗海洋动力环境探测卫星^[9],主要是监测和探测全球海洋动力环境参数,包括海面温度、海面风场、海面高度、有效波高、海流、潮汐、大地水准面等,是海洋防灾减灾和海洋资源开发利用的重要监测、探测手段。HY-2 的成功应用为国内海洋灾害的预警报和海洋科学研究、全球气候变化提供了可靠的观测数据。HY-2 卫星已经成功发射,工作寿命 3 年。轨道高度为 965 km,近圆轨道。星上装载有微波散射计、雷达高度计、微波辐射计和校正微波辐射计、DORIS、双频 GPS 和卫星激光反射器。由图 1 可知,激光反射器安装在卫星的对地面,且反射器周围无遮挡。

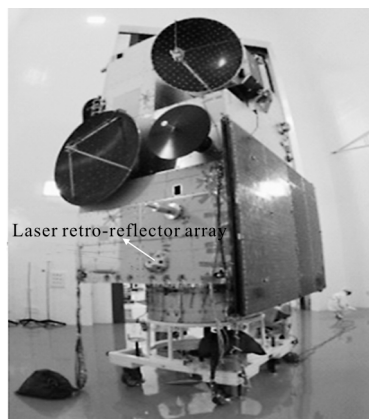


图 1 HY-2 卫星

Fig.1 Satellite of HY-2

1.2 HY-2 卫星激光反射器

HY-2 卫星激光反射器如图 2 所示,该反射器

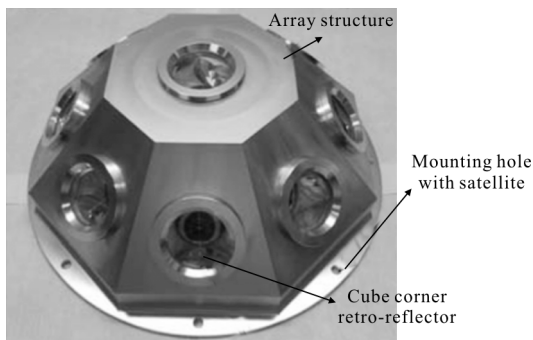


图 2 HY-2 卫星激光反射器

Fig.2 Laser retro-reflectors of HY-2

由九个角锥棱镜分布在一个半球台结构上,中间分布一个,四周分布八个。HY-2 卫星激光反射器是由武汉大学负责设计研制,其中核心部件角锥棱镜是由中国地震局地震研究所采用配重分离器法^[7]进行研制,所研制的角锥棱镜镀制的金属反射膜获得了光学反射率大于 90% 的优异成果,且角锥棱镜二面角误差精度可达到±0.2" 的高水平。HY-2 卫星反射镜单体采用通光口径为 33 mm,顶高为 26.2 mm 的石英材质角锥棱镜。其具体参数如表 1 所示。

表 1 角锥棱镜技术参数

Tab.1 Technical parameters of corner cube prism

Item	Parameter
Vertex length/mm	26.2
Clear aperture of the front face/mm	33
Index of refraction(532 nm)	1.461
Flatness of cubes' surfaces	<0.10 λ
Dihedral angle offset/(")	(+1.9,+1.9,+1.8)
Material	Quartz
Coated or not	Coated with Ag
Number of cube corner prism	9

1.3 远场衍射分布

HY-2 卫星的轨道高度为 965 km,轨道倾角为 99.35°,偏心率为 0.001 17,卫星运行周期为 104.5 min,重访周期为 14 天。其最大速度光行差约为 10",为补偿卫星速度光行差的影响,采用分裂衍射中心法,即将角锥棱镜的三个二面角设计为(1.9",

1.9",1.8"),以其远场衍射、光斑分裂来补偿光行差的影响。

根据出射波相位及衍射强度计算的数学模型^[10-11],得到正入射条件下激光反射器的远场衍射场计算:

$$E(x,y) = \frac{\exp(ikz_1)}{i\lambda z_1} \iint_{\Sigma} E(x_1,y_1) \cdot \exp\{ik[w_1(x_1,y_1)+w_2(x_1,y_1)+w_3(x_1,y_1)]\} \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2z_1}[(x-x_1)^2+(y-y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

式中: $E(x_1,y_1)$ 为振幅分布; $w_1(x_1,y_1)$ 为角锥棱镜的二面角偏差引起的相位分布; $w_2(x_1,y_1)$ 为角锥棱镜的三个小面面形误差引起的相位分布; $w_3(x_1,y_1)$ 为角锥棱镜的大面面形误差引起的相位分布^[12], $w_1(x_1,y_1)$ 、 $w_2(x_1,y_1)$ 、 $w_3(x_1,y_1)$ 具体表达式在参考文献[12]中列出。 (x,y) 为观察平面的直角坐标; $k=2\pi/\lambda$ 为波数; λ 为光波长,值为 532 nm; z_1 为测站至卫星之间的距离, (x_1,y_1) 为孔径平面的直角坐标; Σ 为孔径积分域。

根据基尔霍夫衍射公式, $E(x_1,y_1)=1$,图 3 给出了远场衍射光强分布图,角度单位为"。HY-2 卫星的最大光行差约 10",由图 4 远场衍射分布图可知,在角直径约为 20" 的范围内有光强分布,能够覆盖 HY-2 卫星最大光行差。

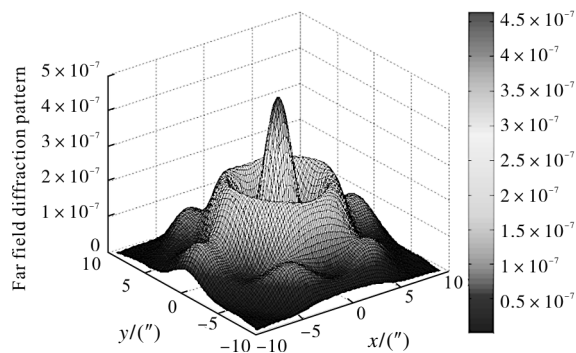


图 3 角锥棱镜远场衍射分布图

Fig.3 Far-field diffraction pattern of corner cube prism

1.4 相对有效反射面积分布

激光回波信号的强弱取决于角锥棱镜通光孔径的大小及其分布方式^[13-14],由于是卫星激光合作目标在轨运行过程中相对于人卫激光观测站的位置不固定,无法以具体台站为中心的坐标系来计算激光

反射器有效反射面积, HY-2 卫星具有对称性, 以角锥棱镜的光学轴的交点作为坐标原点, x 轴指向卫星轨道运行方向, z 轴指向地心, y 轴符合右手定则, 坐标

系如图 4 所示。当激光入射到反射器时, 只要知道激光束相对各个角反射器的入射角就可以计算相对有效面积 η , 相对有效反射面积计算公式如下:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \left[\arcsin \left(\sqrt{1 - 2 \tan^2 \left(\arcsin \left(\frac{1}{n} \sin i_0 \right) \right)} \right) - \sqrt{2} \tan \left(\arcsin \left(\frac{1}{n} \sin i_0 \right) \right) \sqrt{1 - 2 \tan^2 \left(\arcsin \left(\frac{1}{n} \sin i_0 \right) \right)} \right] \cos i_0 \quad (2)$$

式中: i_0 为激光相对于角锥棱镜的光线入射角; n 为石英材料的折射率; η 是相对有效反射面积, 取值范围在 0~1 之间。则激光反射器总有效反射面积为各个角反射器有效反射面积之和。

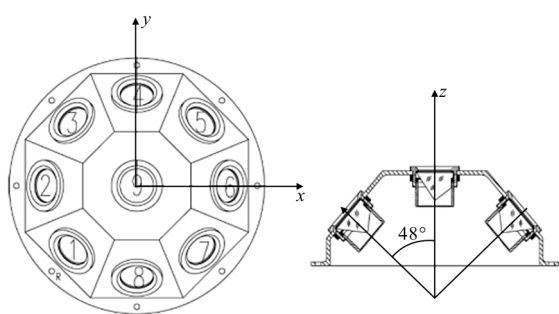


图 4 HY-2 卫星激光反射器坐标系定义

Fig.4 Definition of coordinate system for HY-2

在图 4 所示的坐标系下, 根据 HY-2 卫星激光反射器排布方式及相对有效反射面积计算公式, 图 5 给出了在单个角锥棱镜相对反射面积取 1 时激光反射器有效反射面积分布图, 卫星激光反射器有效反射面积分布由角锥棱镜的排布方式和角锥棱镜透光口径两个因素决定。由相对有效反射面积分布图可知, HY-2 有效反射面积分布比较均匀, 且可以对与地面处于不同方位的激光测距站的激光进行有效反射。

2 卫星激光反射器误差分析

2.1 距离改正概率模型

对于由多个角锥棱镜组成的阵列而言, 通常以角锥棱镜的光学轴的交点作为光学中心^[15], 由于不同的激光入射角会导致不同的距离改正值, 如图 4 坐标系的距离改正公式如下:

$$R(i) = R_s \cos i - L \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \quad (3)$$

式中: $R(i)$ 的平均值就是质心的改正值, i 为激光入射角; R_s 为角锥棱镜入射面到光学中心的距离; L 为角反射器的正高; n 为制造角锥棱镜材料的折射率。由于有多个角锥棱镜, 棱镜能够在同一角度反射光子, 定义角锥棱镜的反射概率为 S_k , 则在同一角度下的

$$\text{质心改正值为 } \langle \Delta R \rangle = \frac{\sum_k S_k \cdot \Delta R_k}{\sum_k S_k}; S_k(\gamma_k) = \left(1 - \frac{\gamma_k}{0.85} \right)^2;$$

$$\cos(\gamma_k) = (C \cdot N(k)); \gamma_k \leq 0.85。$$

$N(k)$ 为各个角锥棱镜的光学轴指向, 如表 2 所示, HY-2 卫星包含 9 块角锥棱镜, 其各个角锥棱镜光学指向如表 2 所示, 则 HY-2 卫星激光反射器距离改正值分布如图 6 所示, 激光从不同的角度入射, 其距离改正值不同, 该值不会超过 10 mm, 不同激光入射角度的距离改正标准偏差值为 3.2 mm。

表 2 各个角锥棱镜光学轴指向

Tab.2 Optical axis orientation of the individual corner cube prism

LRR# <i>i</i>	Location	Optical axis
9	Central	$n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
1.8	Lateral	$n = \begin{pmatrix} \sin(\phi) \cdot \cos(i-1) \cdot \frac{\pi}{4} \\ \sin(\phi) \cdot \sin(i-1) \cdot \frac{\pi}{4} \\ \cos(\phi) \end{pmatrix}$

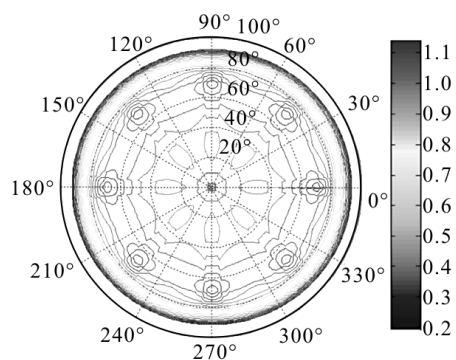


图 5 HY-2 卫星相对有效反射器面积分布图

Fig.5 Distribution of HY-2 satellite's relative effective reflection area

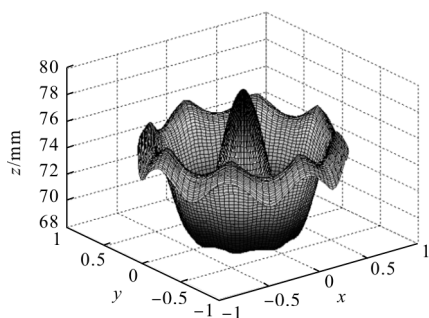


图 6 HY-2 卫星距离改正值分布图

Fig.6 Distribution of HY-2 range correction value

2.2 综合测距精度分析

卫星激光测距的测距误差可以分为系统仪器误差、卫星激光反射器误差、系统延迟测量误差、气象参数采集误差和大气修正模型误差等^[16-20]。如表 3 所示,系统综合误差精度的估算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta \sigma_i^2} \quad (4)$$

式中: σ 为系统的综合测距精度; σ_i 为系统的单项误差。

表 3 卫星激光测距系统误差分析

Tab.3 Analysis of measuring error for satellite laser ranging system

Various error sources	Accidental error/mm	Systematic error/mm
Instrumental error	-8.0	
Laser pulse width(50 ps)	-4.5	
Time-interval measurement (TDC502)	-3.2	
Initial signal detection(PIN)	-3	
Echo signal detection(C-spada)	-5	
Frequency standard error(HP58503A)	-0.4	
Reflector error(HY-2)		-3.2
System time delay measurement error		-2.2
Target distance calibration error		-1
Target conventional standard error		-2
Meteorological parameter collection and atmospheric correction model error		-3-10
Composite error		-9.4-13.4

HY-2 卫星的单个综合测距误差为 9.4~13.4 mm。除上述误差项外,还存在激光能量波动、真空光速

误差、大气折射率误差、大气湍流等一些无法定量的误差项,也将影响到激光测距的结果^[21-22]。

3 HY-2 卫星追踪及激光测距实验

图 7 为国内自主研发的新一代流动式卫星激光测距系统 TROS1000^[22-23]在山东荣成对 HY-2 卫星进行追踪和激光测距界面截图。图 7 为微光电视中监测到 HY-2 卫星的影像,图 8 是 HY-2 卫星进行激光测距界面截图。图 8 中两根粗线为设置的距离门宽度,两根粗线的中间分布代表信号探测装置开启后接收到的噪声和信号,细线表示有效回波信号,离散的白色的点表示噪声。激光测距实验对 HY-2 卫星观测 1.2 min,总共 2 835 个点,其内符合精度为 11 mm,实验结果表明,实测结果与理论结果相符。

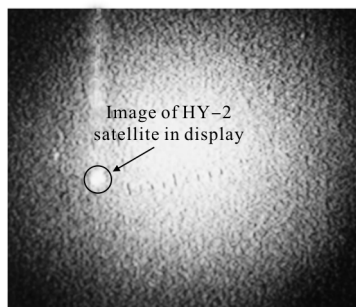


图 7 海洋二号卫星显示影像

Fig.7 Image of HY-2 satellite in display

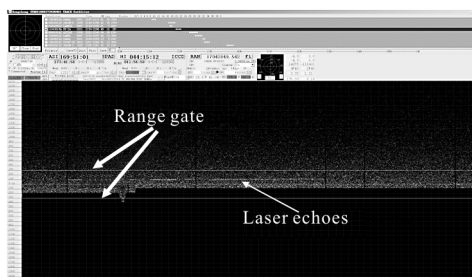


图 8 海洋二号卫星激光测距截图

Fig.8 Laser ranging screenshot of HY-2 satellite

4 结论

HY-2 卫星是国内第一颗海洋动力环境探测卫星,对 HY-2 卫星轨道实施厘米级定轨是海洋动力环境卫星提供服务的基础。卫星搭载了激光反射器,以厘米级精度卫星激光测距作为卫星精密测轨的独立标校手段。HY-2 卫星至发射升空以来,全球多个

人卫激光测距站对其成功实施了激光测距,其测量弧段范围从仰角 $14.7^{\circ}\sim 87.7^{\circ}$,且大多对 HY-2 卫星的激光测距误差内符合精度基本控制在 1.0 cm 左右,标志着 HY-2 卫星激光发射器性能优良。文中对 HY-2 卫星远场衍射分布、相对有效反射面积、距离改正值分布和激光测距综合精度进行了分析,最后利用 TROS1000 流动式激光测距仪对 HY-2 卫星进行追踪和激光测距实验,实验结果表明,实测结果与理论结果相符,这对以后设计卫星激光反射器提供了依据。

参考文献:

- [1] Li Yuqiang, Li Rongwang, Li Zhulian, et al. Application research on space debris laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3324–3329. (in Chinese)
李语强, 李荣旺, 李祝莲, 等. 空间碎片激光测距应用研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3324–3329.
- [2] Zhou Chenghao, Wang Zhile, Zhu Feng. Review on optical synthetic aperture imaging technique [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 25–38. (in Chinese)
周程灏, 王治乐, 朱峰. 大口径光学合成孔径成像技术发展现状[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 25–38.
- [3] Gong Dun. Review on mapping space remote sensor optical system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 714–724. (in Chinese)
巩盾. 空间遥感测绘光学系统研究综述[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 714–724.
- [4] Zhao Gang, Zhou Xuhua, Wu Bin. Precise orbit determination of Haiyang-2 using satellite laser ranging [J]. *Chin Sci Bull*, 2012, 57(36): 3475–3483. (in Chinese)
赵罡, 周旭华, 吴斌. 海洋二号卫星 SLR 精密定轨 [J]. 科学通报, 2012, 57(36): 3475–3483.
- [5] Liu Jiyu. Some suggestions on cm-level orbit determination for Chinese HY-2 satellite [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2005, 25(6): 1–3. (in Chinese)
刘基余. 海洋二号卫星厘米级定轨的实施建议[J]. 海洋测绘, 2005, 25(6): 1–3.
- [6] Dong Dengfeng, Zhou Weihu, Ji Rongyi, et al. Design of precise tracking system of laser tracker [J]. *Optics and Precising Engineering*, 2016, 24(2): 309–318. (in Chinese)
董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 309–318.
- [7] Luo Qingshan, Guo Tangyong, Li Cuixia, et al. Study of corner cube prism processing technology [J]. *Optical Technique*, 2015, 41(6): 520–523. (in Chinese)
罗青山, 郭唐永, 李翠霞, 等. 角锥棱镜加工工艺研究[J]. 光学技术, 2015, 41(6): 520–523.
- [8] Xu Deyan. Specifications and inspections of the trihedral retro-reflector and cylindrical lens or mirror [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, 8(4): 10–13. (in Chinese)
徐德行. 角锥棱镜和柱面镜的技术表述与检测 [J]. 光学与光学技术, 2010, 8(4): 10–13.
- [9] Liu Jiyu, Liu Zhongmou. Orbit determination with SLR for ocean altimetry satellites [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2010, 30(1): 76–78. (in Chinese)
刘基余, 刘仲谋. 海洋测高卫星的激光定轨[J]. 海洋测绘, 2010, 30(1): 76–78.
- [10] Zhou Hui, Li Song, Zheng Guoxing, et al. Influence of satellite retroreflector precision on far-field diffraction pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 29(1): 60–66. (in Chinese)
周辉, 李松, 郑国兴, 等. 卫星角反射器精度对远场衍射模式的影响[J]. 光学学报, 2008, 29(1): 60–66.
- [11] Luo Qingshan, Guo Tangyong, Yao Yunsheng, et al. Theoretical analysis for retro-reflector on GRACE satellite. [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53 (11): 112301. (in Chinese)
罗青山, 郭唐永, 姚运生, 等. GRACE 重力卫星激光反射器分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 112301.
- [12] Huang Jian, Xian Hao, Jiang Wenhan, et al. The reflected beam's phase aberration induced by the fabrication errors of corner cube retroreflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29 (7): 1951–1955. (in Chinese)
黄健, 鲜浩, 姜文汉, 等. 角锥棱镜的误差引起的反射光束相位误差分析[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1951–1955.
- [13] 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. (in Chinese)
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.
- [14] Zhou Hui, Li Song, Zheng Guoxing. Structural design for common satellite retroreflector array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 37(8): 692–697. (in Chinese)
周辉, 李松, 郑国兴. 常用卫星角反射器阵列的结构设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 37(8): 692–697.
- [15] Zhang Haifeng, Cheng Zhien, Li Pu, et al. Optical and mechanical design of laser retro-reflector for a nano-satellite and analysis of laser ranging [J]. *Journal of Spacecraft*

- TT&C Technology*, 2016, 35(1): 21–27. (in Chinese)
- 张海峰, 程志恩, 李朴, 等. 纳卫星激光反射器光机设计及激光测距分析[J]. 飞行器测控学报, 2016, 35(1): 21–27.
- [16] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Deng Huarong, et al. Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0102002. (in Chinese)
- 张忠萍, 张海峰, 邓华荣, 等. 双望远镜的空间碎片激光测距试验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0102002.
- [17] Tang Rufeng, Li Yuqiang, Li Xi, et al. Spin rate determination of AJISAI based on high frequency satellite laser ranging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0608010. (in Chinese)
- 汤儒峰, 李语强, 李熙, 等. 基于高重频卫星激光测距测算 AJISAI 卫星自转速率 [J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608010.
- [18] Li Xi, Tang Rufeng, Li Zhulian, et al. Laser ranging date processing based on the analysis of the binary image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1208005. (in Chinese)
- 李熙, 汤儒峰, 李祝莲, 等. 基于二值图像的卫星激光测距数据处理[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208005.
- [19] Zhai Dongsheng, Tang Rufeng, Huang Kai, et al. Analysis on detection performance of satellite laser ranging based on geiger mode APD arrays [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 068007. (in Chinese)
- 翟东升, 汤儒峰, 黄凯, 等. 基于 G-APD 阵列的卫星激光测距系统探测性能分析 [J]. 中国激光, 2015, 42(6): 068007.
- [20] Xue Li, Zhai Dongsheng, Li Yuqiang, et al. Ranging capability analysis for laser ranging system using superconducting nanowire detectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0304001. (in Chinese)
- 薛莉, 翟东升, 李语强, 等. 基于超导探测器的激光测距系统作用距离分析[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0304001.
- [21] Cheng Zhien, Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, et al. Design of effective reflection area of laser retro-reflectors for satellite regional observation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0229005. (in Chinese)
- 程志恩, 张忠萍, 张海峰, 等. 区域观测卫星激光反射器有效反射面积的设计 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0229005.
- [22] Guo Tangyong, Wang Peiyuan, Li Xin, et al. Progress of the satellite laser ranging system TROS1000 [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2015, 6(1): 67–72.
- [23] Luo Qingshan, Guo Tangyong, Zou Tong, et al. Design of laser retro-reflectors and experiment of laser ranging for PN1B satellite. [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(2): 021002. (in Chinese)
- 罗青山, 郭唐永, 邹彤, 等. PN1B 微小卫星激光反射器设计及激光测距试验[J]. 强激光与离子束, 2017, 29(2): 021002.