

GRACE 重力卫星激光反射器分析

罗青山^{1,2,3} 郭唐永^{2,3} 姚运生^{1,2,3} 邹彤^{2,3} 李欣^{2,3} 朱威^{2,3} 李世鹏^{2,3}

¹中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

²中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071

³中国地震局地震研究所地震预警湖北重点实验室, 湖北 武汉 430071

摘要 以 GRACE 重力卫星激光反射器为例, 理论分析了卫星激光反射器的激光入射角、速差补偿和相对有效反射面积, 并对激光反射器进行了可测性分析和测距误差分析。通过 TROS1000 流动卫星激光测距 (SLR) 系统对 GRACE 卫星激光反射器进行测距实验, 测距精度为 0.9 cm, 实验结果与理论分析结果基本一致。

关键词 光学器件; 卫星激光反射器; 卫星激光测距; 速差补偿; 相对有效反射面积

中图分类号 V44 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.112301

Analysis of Laser Retro-Reflector on GRACE Gravity Satellite

Luo Qingshan^{1,2,3} Guo Tangyong^{2,3} Yao Yunsheng^{1,2,3} Zou Tong^{2,3}

Li Xin^{2,3} Zhu Wei^{2,3} Li Shipeng^{2,3}

¹*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

²*Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan, Hubei 430071, China*

³*Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan, Hubei 430071, China*

Abstract Taking the laser retro-reflector on GRACE gravity satellite as an example, the main technical parameters, such as the laser incident angle of laser retro-reflector on satellite, velocity aberration compensation, and the relatively effective reflection area, are analyzed theoretically, and the testability and ranging error analyses for a laser retro-reflector on satellite are conducted as well. By using the TROS1000 mobile satellite laser ranging (SLR) system, a ranging experiment on the laser retro-reflector on GRACE satellite with a precision of 0.9 cm is conducted and the experimental result is basically consistent with the theoretical analysis result.

Key words optical devices; laser retro-reflector on satellite; satellite laser ranging; velocity aberration compensation; relatively effective reflection area

OCIS codes 230.5480; 350.1260; 230.3120

1 引言

卫星激光测距 (SLR) 技术是现代精密定位观测技术之一, 可以直接测量卫星与地面激光观测站之间的绝对距离, 测量结果确定性好且无重大偏移^[1-3]。GRACE 重力卫星属于低轨卫星, 具有卫星速度快、激光工作角度大、可观测时间短的特点, 此类卫星往往采用金字塔结构或八棱台结构的激光反射器^[4]。本文以

收稿日期: 2016-04-22; **收到修改稿日期:** 2016-06-06; **网络出版日期:** 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金 (40774013, 41274189)、中国地震局地震研究所所长基金 (IS201226038)

作者简介: 罗青山 (1984—), 男, 博士研究生, 主要从事人卫激光测距、地震观测技术方面的研究。

E-mail: luodashan@126.com

导师简介: 郭唐永 (1957—), 男, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要从事人卫激光测距技术、地震观测技术方面的研究。

E-mail: guoty@21cn.com (通信联系人)

GRACE 卫星低轨激光反射器为例,介绍了卫星激光反射器的结构,分析了激光入射角、速差补偿和相对有效反射面积,利用激光测距雷达方程对卫星进行了可测性分析,通过 TROS1000 流动卫星激光测距系统对 GRACE 卫星激光反射器进行了测距实验,对激光回波信号强度和观测数据进行了分析。

2 GRACE 卫星激光反射器

GRACE 卫星是美国国家宇航署和德国空间飞行中心联合开发的,旨在获取地球重力场的中长波部分及全球重力场的时空特征,可用于探测大气和电离层环境。激光反射器是 GRACE 卫星搭载的科学仪器之一,激光反射器由 4 块角锥棱镜和金属基座构成,如图 1 所示,4 块角锥棱镜固定在类似金字塔结构的金属基座上,整个结构呈对称分布。每个角反射器均由航空级熔石英玻璃加工而成,图 1 中红色箭头的方向为卫星轨道运行方向。卫星激光反射器对地面的卫星激光测距站发射的窄带脉冲激光信号进行反射,使其沿原方向返回,由地面站接收并精确测定激光信号往返时间间隔,从而实现卫星与观测站之间距离的精确测量。

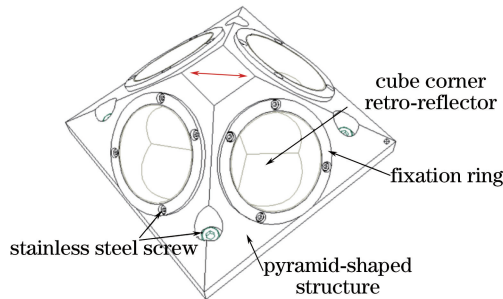


图 1 GRACE 卫星激光反射器

Fig. 1 Laser retro-reflector on GRACE satellite

3 激光反射器参数分析

3.1 激光入射角

GRACE 卫星激光反射器所在轨道高度为 485~500 km,卫星、地心、观测站之间的相对位置关系如图 2 所示,其中 S、O_E、A 分别为卫星、地心、地面观测站; H_s 为卫星轨道高度; R_E 为地球半径,取值 6371 km; e_s 为卫星激光测距站观测仰角; i 为激光入射角,是激光与卫星对地面法线的夹角; Z 为天顶角; V_T 为卫星相对于地球运动的线速度; V_N 是卫星观测站和卫星连线的线速度分量。由图 2 相对位置关系可知

$$\frac{\sin(e_s + 90^\circ)}{H_s + R_E} = \frac{\sin i}{R_E} \quad (1)$$

一般卫星激光反射器要求观测仰角范围为 $20^\circ \sim 85^\circ$ ^[5]。由(1)式可知,当观测仰角为 20° 时,激光入射角 i 最大为 61° ,因此激光反射器视场范围为 $-61^\circ \sim 61^\circ$ 。由于 GRACE 卫星激光反射器采用了金字塔结构设

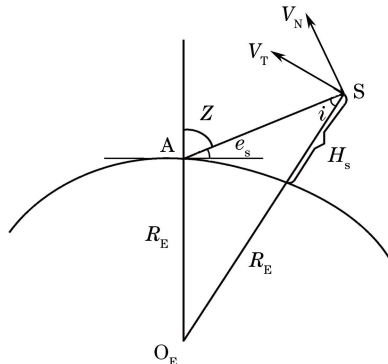


图 2 卫星、SLR 测站和地心位置关系

Fig. 2 Positional relationships among satellite, SLR station, and Earth's core

计,4个角锥棱镜均匀分布在侧面,每个结构倾角为 45° ,在激光入射角为 61° 时,激光与角锥棱镜受光面法线的夹角约为 16° 。角锥棱镜镀制了金属反射膜,光线在角锥棱镜内部始终进行全发射^[5],这样能保证视场范围内的激光测距。

3.2 速差补偿

激光反射器安置于高速运动的 GRACE 卫星上,其相对于地面卫星激光测距站具有极高的相对切向速度,会导致激光反射器反射的光束相对于入射光束有一个角位移,因此卫星激光反射器在设计时需要进行速差效应补偿^[6]。圆轨道卫星的速差角 θ 为

$$\theta = \frac{2V_T}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{R_E}{R_E + H_s}\right)^2 \sin^2(90^\circ - e_s)}, \quad (2)$$

式中 c 为真空中的光速, V_T 为卫星相对于地球运动的线速度。

当卫星运行至卫星激光观测站上空(即 $e_s = 90^\circ$)时,卫星相对速度最大。由(2)式可知,最大速差角为 $\theta_{\max} = \frac{2V_T}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{R_E^2 \cdot g}{R_E + H_s}} = 10.48''$,其中 g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。为补偿卫星速差效应,角锥棱镜在设计时需具有一定发散角,使得返回的激光信号可覆盖地面观测站。采用单角补偿速差效应设计 GRACE 重力卫星,其角锥棱镜的三个二面角设计为 $(0, 0, -3.8'')$ 。该设计引起的光束偏移角为 $\alpha = 1.63n\delta$,其中 n 为熔石英材料的折射率值,取 1.461 ; δ 为设计的角锥棱镜二面角偏差值,即 $-3.8''$,则 $\alpha = 9.1''$ 。加工角锥棱镜过程也会引入光束偏移角偏差约 $2''$,因此光束偏移角约为 $11''$,可覆盖最大速差角^[6]。

3.3 相对有效反射面积

卫星相对有效反射面积的大小直接决定了激光回波信号的强弱,是一个非常重要的参数^[5]。卫星激光反射器在轨运行过程中相对于卫星激光观测站的位置不固定^[7],此处以激光反射器底面中心为坐标原点, z 轴指向地心, x 轴指向轨道运行方向, y 轴符合右手定则,坐标系如图3(a)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,就可以计算出各个角反射器的有效反射面积 η ^[6]:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \left\{ \arcsin \left[\sqrt{1 - 2 \tan^2 \left[\arcsin \left(\frac{1}{n} \sin i_0 \right) \right]} \right] - \sqrt{2} \tan \left[\arcsin \left(\frac{1}{n} \sin i_0 \right) \right] \sqrt{1 - 2 \tan^2 \left[\arcsin \left(\frac{1}{n} \sin i_0 \right) \right]} \right\} \cos i_0, \quad (3)$$

式中 i_0 为激光相对于角锥棱镜的光线入射角。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。在图3(a)所示的坐标系下,根据 GRACE 卫星激光反射器排布方式及有效反射面积计算公式,图3(b)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通光口径两个因素决定。GRACE 卫星金字塔结构激光反射器的4个侧面倾角为 45° ,而角锥棱镜在激光入射夹角为 45° 的情况下能提供有效的反射面积,因此金字塔结构激光反射器能够满足各个方位观测站的测距需求。

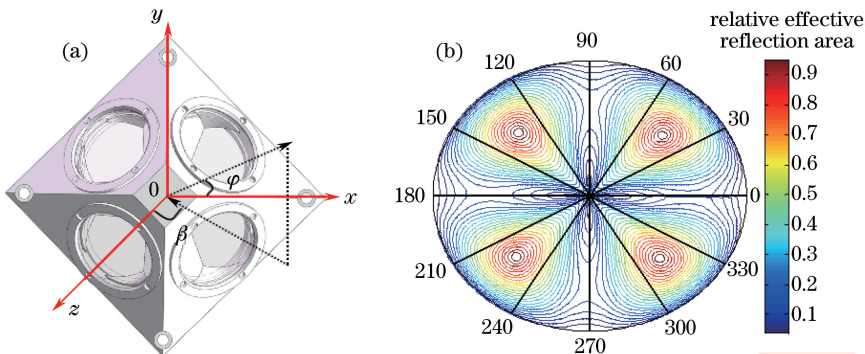


图3 (a)卫星激光反射器坐标系;(b)相对有效反射面积分布

Fig. 3 (a) Coordinate system of laser retro-reflector on satellite; (b) distribution of relative effective reflection area

4 激光反射器可测性分析

4.1 TROS1000 流动卫星激光测距系统及激光测距雷达方程

TROS1000 流动卫星激光测距系统是目前世界上口径最大的流动卫星激光测距系统^[8],其基本技术参数如表 1 所示。

表 1 TROS1000 流动卫星激光测距系统基本技术参数

Table 1 Basic technique parameters for laser ranging system of TROS1000 mobile satellite

| Parameter | Value |
|--|--------------|
| Telescope receiving aperture | 1 m |
| Laser pulse energy E | about 1.0 mJ |
| Laser emission frequency | 1000 Hz |
| Laser divergence θ_t | about 15" |
| Quantum efficiency η | about 20% |
| Optical transmission system efficiency K_t | about 80% |
| Optical receiving system efficiency K_r | about 80% |

激光测距雷达方程为

$$N_s = \frac{16 \cdot E \cdot S \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta \cdot \alpha}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_s^2}, \quad (4)$$

式中 N_s 为激光回波在接收器件的光敏面上产生的平均光电子数; E 为激光单个脉冲能量, 约为 1 mJ; S 为每焦耳能量的光子数, 532 nm 激光的 S 约为 2.67×10^{18} ; A_s 为激光反射器的有效反射面积, 取 $9.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$; A_r 为接收系统的面积, 取 0.75 m^2 ; K_t 为激光发射系统的效率, 取 0.8; K_r 为接收光学系统的效率, 取 0.8; T^2 为双程大气透射率, 仰角为 20° 时取 0.2; η 为单光子雪崩二极管的量子效率, 取 0.2; α 为衰减因子, 取 0.05; R 为卫星的斜距, 仰角为 20° 时取 1277 km; θ_t 为激光光束发散角, 取 15"; θ_s 为卫星激光反射器的发散角, 取 24"。

对于 GRACE 卫星, 当仰角为 20° 时, N_s 为 2.71。光电转换产生的光电子数是服从泊松分布的, 当仰角为 20° 时, 产生一个光电子的概率为 0.933, 即理论上每秒钟有 933 个回波信号。这表明激光反射器反射信号的强度满足了地面卫星激光测距站的需求。

4.2 GRACE 卫星激光反射器测距试验

TROS1000 流动卫星激光测距系统对 GRACE 卫星进行测距, 测距结果如图 4 所示。由图可以得到信号探测装置接收到的回波信号情况^[9-12], 其中离散的红色点表示噪声。激光回波数据每秒统计结果如图 5 所示。统计时段卫星仰角从 20° 降至 17° , 可以看出随着观测仰角的下降, 激光每秒回波数呈下降趋势。这是观测站到卫星的斜距增加和激光反射器的有效反射面积降低导致的。柱状图中回波数据波动是由于激光回波数据还受到光束指向、大气扰动等因素的影响^[13]。

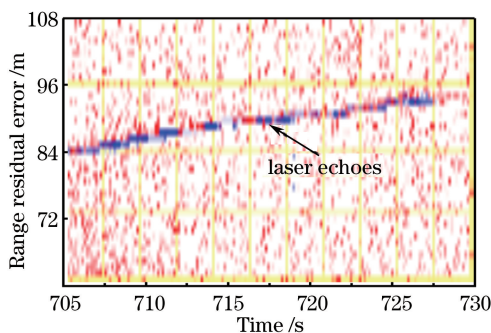


图 4 GRACE 卫星激光测距结果

Fig. 4 Laser ranging results from GRACE satellite

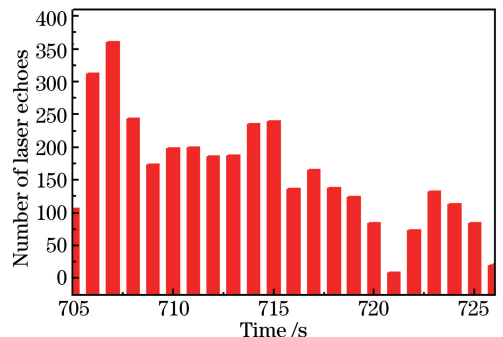


图 5 卫星激光回波统计结果

Fig. 5 Statistical results of laser echoes from satellite

4.3 测距精度分析

图 6 为激光回波数据拟合残差分布图。定义测距精度 R_{MS} 为卫星预报的距离和实际测到的卫星距离之间的残差的均方根值, 这里为 0.9 cm, 与理论分析结果基本一致。

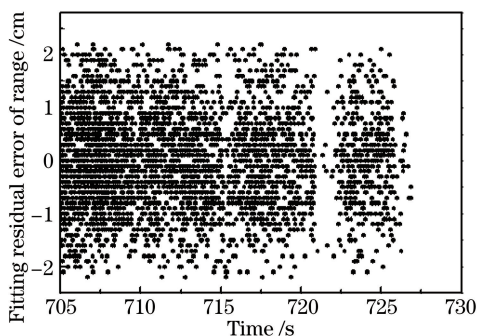


图 6 GRACE 卫星激光回波拟合残差分布

Fig. 6 Distribution of fitting residual errors of laser echoes from GRACE satellite

卫星激光测距系统的时间间隔是主波开启计时, 回波停止计时。激光测距误差来源主要分偶然误差和系统误差, 偶然误差各项数值估计如表 2 所示, 系统误差各项数值估计如表 3 所示。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^[13]。

表 2 卫星激光测距偶然误差项

Table 2 Accidental error terms from laser ranging of satellite

| Various error source | Accidental error /mm |
|---------------------------------|----------------------|
| Laser pulse width error | 4.5 |
| Time-interval measurement error | 3.2 |
| Initial signal detection error | about 3 |
| Echo signal detection error | about 5 |
| Frequency standard error | about 0.4 |

表 3 激光测距系统误差项

Table 3 Systematic error terms from laser ranging of satellite

| Various error source | Systematic error /mm |
|--|----------------------|
| Reflector range correction error | 2-6 |
| System time delay measurement error | about 2.2 |
| Meteorological parameter collection and atmospheric correction model error | 3-10 |

5 结 论

金字塔结构激光反射器是一种特殊结构的卫星激光反射器, 基于该结构的反射器, 低轨卫星可用较少的角锥棱镜进行卫星激光测距。激光测距结果表明, 此类结构卫星激光反射器性能良好, 对卫星激光反射器的设计具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- HirooKunimori, Toshimichi Otsubo, Tadashi Ishii, *et al.* Design of engineering model of corner cube retro-reflector by evaluating far field diffraction pattern[C]. Proceedings of International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2012: 6-1.
- Otsubo T, Appleby G M. System-dependent center-of-mass correction for spherical geodetic satellites[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2003, 108(B4): ETG9.
- 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]. 强激光与离子束, 2011, 23(2): 367-370.
- 4 Zhou Hui, Li Song, Zheng Guoxing. Structural design for common satellite retroreflector array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 692-697.
- 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, 38(4): 692-697.
- 5 Wang Yuanming, Yang Fuming, 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.
- 6 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.
- 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.
- 7 Liu Jiyu, Liu Zhongmou. Orbit determination with SLR for ocean altimetry satellites[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(1): 76-78.
- 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.
- 8 Guo T Y, Wang P Y, Li X, *et al.* Progress of the satellite laser ranging system TROS1000[J]. Geodesy and Geodynamics, 2015, 6(1): 67-72.
- 9 Sun Mingguo, Gao Pengqi, Shen Ming, *et al.* Combined tracking and orbit determination for space objects using laser and optics measurements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 071203.
- 孙明国, 高鹏骐, 沈鸣, 等. 空间目标的激光和光学两种观测技术联合定位[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 071203.
- 10 Tang Rufeng, Li Yuqiang, Li Xi, *et al.* Spin rate determination of AJISAI based on high frequency satellite laser ranging[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608010.
- 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.
- 11 Li Xi, Tang Rufeng, Li Zhulian, *et al.* Laser ranging data processing based on the analysis of the binary image[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208005.
- 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.
- 12 Zhai Dongsheng, Tang Rufeng, Huang Kai, *et al.* Analysis on detection performance of satellite laser ranging based on Geiger mode APD arrays[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608007.
- 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): 0608007.
- 13 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.
- 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.