

区域观测卫星激光反射器有效反射面积的设计

程志恩^{1,2}, 张忠萍¹, 张海峰¹, 李 朴¹, 汤 凯¹, 孙建锋³

(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;
3. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 卫星激光反射器阵列结构决定有效反射面积分布, 进而影响激光回波强度。在某些小型卫星应用中, 地面台站只需对卫星局部天区过境观测, 但激光反射器需数十平方厘米的有效反射面积, 且对质量和尺寸有限制, 需合理设计激光反射器阵列排布指向以满足大的有效反射面积应用需求。推导了不同指向角反射器有效反射面积计算模型, 并以某一局部天区观测的低轨卫星激光反射器为例, 给出了有效反射面积的仿真结果, 并进行了实验室测试。结果表明, 局部天区观测卫星激光反射器的有效反射面积设计与测试结果相符, 为区域观测卫星激光反射器应用奠定了基础。

关键词: 光学设计; 有效反射面积; 激光反射器

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0229005

Design of effective reflection area of laser retro-reflectors for satellite regional observation

Cheng Zhi'en^{1,2}, Zhang Zhongping¹, Zhang Haifeng¹, Li Pu¹, Tang Kai¹, Sun Jianfeng³

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The structure of laser retro-reflector array dominates the distribution of the effective reflection area and influences the intensity of echo signals. However, for the special purpose of compact experimental satellites the observational activities are only performed in the certain sky region by the ground station. But the laser retro-reflector needs tens of square centimeters of the effective reflection area, and the weight and size are limited. For that the reasonable design of the normal pointing of the cube corners within the retro-reflectors array should be implemented in order to achieve the requirements of large reflection area. The calculation model of the effective reflection area for laser retro-reflector with different normal pointing cube corner was derived and taking laser retro-reflector array designed for one of the regional observational satellites as an example, the simulated calculation and the laboratory test of the effective reflection were given. The results show that the simulations of the effective reflection area of laser retro-reflector for satellite regional observation accord with the testing results. The practicability

收稿日期: 2015-06-24; 修订日期: 2015-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(U1231107, 11303074)

作者简介: 程志恩(1988-), 男, 博士生, 主要从事卫星激光测距技术与应用方面的研究。Email: cze@shao.ac.cn

导师简介: 张忠萍(1960-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事卫星激光测距技术与应用方面的研究。Email: zzp@shao.ac.cn

of the design of laser retro-reflectors for satellite regional observation lays the foundation of its further applications in the future.

Key words: optical design; effective reflection area; laser retro-reflector

0 引言

激光反射器是激光用于远距离测距的一个重要组成部分^[1]。卫星激光反射器通常由多个角反射器组合而成。角反射器又叫角锥棱镜,是具有三个直角面相互垂直的四面体棱镜。当激光从四面体棱镜底面(即三个直角面以外的第四面)入射,依次经过三个直角面的反射后从底面出射,并与入射激光束平行,但方向相反。如果将角反射器安装在卫星对地面板上,地面测站对其发射激光,将能够接收到激光回波信号,可以实现高精度卫星激光测距和其他有关的测量^[2-3]。

有效反射面积是激光反射器的一项重要参数,决定了反射回地面观测站激光的强弱。对于轨道高度 10 000 km 以下的卫星,必须考虑由若干个不同法线方向的角反射器组成的阵列来满足测量的需要^[4]。对于低轨激光测距卫星,一般要求卫星仰角 20° 以上整个区域均可测,观测区域大,且只需数平方厘米有效反射面积即可满足卫星激光测距需求,此类卫星激光反射器一般采用八棱台或四棱台类型^[5-6]。而对于某些科学应用的小型低轨卫星,地面台站只需对卫星局部区域过境观测,但因测量系统及不同应用需求,激光反射器需数十平方厘米的有效反射面积,如天宫合作目标^[7],且对激光反射器的质量、尺寸及安装面积有一定限制。对于此类卫星激光反射器,需采用多组角反射器不同指向设计,通过有效反射面积计算模型的归算分析设计出满足有效反射面积需求的激光反射器。

1 激光反射器有效反射面积计算

1.1 单个角反射器的有效反射面积

单个角反射器有效反射面积的计算是根据通光孔径沿光轴方向在通光孔上的投影面积来决定。根据光学成像原则,底面像的投影和底面的重合部分即为有效反射面积^[8-9]。角反射器通常采用内切圆切割,三个直角反射面镀金属膜角反射器的相对有效

反射面积与激光入射角的关系如下^[2,9]:

$$\eta = \frac{2}{\pi} [\arcsin(\sqrt{1-2\tan^2 i_r}) - \sqrt{2} \tan i_r \sqrt{1-2\tan^2 i_r}] \cos i_o \quad (1)$$

式中: $i_r = \arcsin(\sin i_o / n)$, η 为相对有效反射面积; i_o 为光束入射角; i_r 为光束折射角; n 为角反射器介质的折射率,对于熔石英材料, $n=1.461$ (对应波长 532 nm)。相对有效反射面积随激光入射角的变化如图 1 所示,从图中可以看出,相对有效反射面积随激光入射角的增大而减小。假定单个角反射器通光口径为 D ,反射率为 ρ ,则光束入射角为 i_o 时单个角反射器有效反射面积为 $A = \eta \pi (D/2)^2 \cdot \rho$ 。

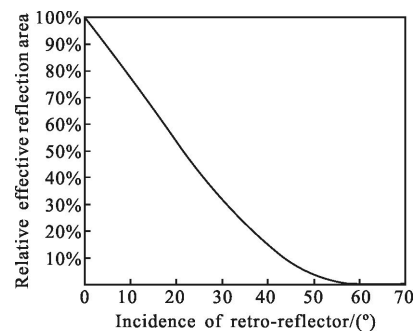


图 1 相对有效反射面积随入射角的变化

Fig.1 Relative effective reflection area vs incidence angle

1.2 激光反射器阵列有效反射面积

引用参考文献[4]中对角反射器法线偏转角 α 和 β 、星固坐标系、测站地平坐标系、地心坐标系及卫星在任意位置点 (az, el) 的定义,计算激光反射器阵列有效反射面积。

在测站地平坐标系和地心坐标系中,地面测站发射的激光束方向的单位矢量同为:

$$L = \begin{bmatrix} \cos(el)\cos(az) \\ \cos(el)\sin(az) \\ \sin(el) \end{bmatrix} \quad (2)$$

在地心坐标系中,卫星位置的单位矢量为:

$$S = \begin{bmatrix} \sin(e)\cos(az) \\ \sin(e)\sin(az) \\ \cos(e) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: e 为卫星的地心角 $\angle SEO$ 。从 $\triangle SEO$ 可得:

$$e = \arcsin[\rho \cos(\epsilon) / r_s]$$

式中： ρ 为卫星对测站的斜距； r_s 为卫星的地心距。假设卫星轨道为圆形轨道，卫星到测站的斜距 ρ 可由下式得到：

$$\rho = -R_E \cos \theta_A + \sqrt{(R_E \cos \theta_A)^2 + h(h + 2R_E)}$$

式中： R_E 为地球半径，取 6 378 km； h 为卫星轨道高度； θ_A 为卫星的天顶距(卫星仰角的余角)。

在星固坐标系中，角反射器法线的单位矢量为：

$$n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \sin \alpha \\ -\sin \beta \\ \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

星固坐标系与地心坐标系的变换公式为：

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ 0 & -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $\theta_1 = \arccos(\cos(\epsilon) / \cos(c))$ ； $\theta_2 = \pi - c$ ， $c = \arcsin(\sin(\epsilon) \cdot \cos(\alpha z))$ 。

在地心坐标系中，角反射器法线的单位矢量为：

$$N = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ 0 & -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

激光束对角反射器的入射角可表示为 $i = \arccos(-L \cdot N)$ ，入射角是卫星方位、仰角以及角反射器法线偏转角 α 和 β 的函数。求得入射角即可求得单个角反射器的有效反射面积，对阵列内每个角反射器的有效反射面积叠加，即可计算出激光反射器阵列的总有效反射面积。

2 区域观测卫星激光反射器设计及有效反射面积分布

2.1 区域观测卫星激光反射器阵列结果

对于区域观测卫星激光反射器有效反射面积的设计，根据上述有效反射面积计算模型，在满足激光反射器质量、安装面积等情况下，对单个角反射器通光口径、入射面法线指向、角反射器个数等进行优选，最终给出可满足卫星应用需求的激光反射器设计结果。

对于某一区域观测的低轨卫星，其要求激光反射器质量小于 500 g，安装面积小于 130 cm²，方位角在 0°~90°、仰角大于 45°时，激光反射器的有效反射面积大于 20 cm²。设计了由 10 个不同指向角反射器

组成的激光反射器阵列，10 个角反射器法线的偏转角 α 和 β 见表 1。角反射器均采用内切圆切割、直角反射面镀膜反射膜，单个角反射器通光口径为 33.2 mm，角锥光学反射率取 0.92。

表 1 10 个角反射器法线的指向角

Tab.1 Normal pointing angle of 10 cube corners

Normal pointing angle(α, β)	Number of cube corner
($\alpha_1=30^\circ, \beta_1=8^\circ$)	4
($\alpha_2=12^\circ, \beta_2=15^\circ$)	2
($\alpha_3=-8^\circ, \beta_3=23^\circ$)	4

2.2 区域观测卫星激光反射器有效反射面积

根据上述激光反射器有效反射面积计算模型及阵列内单个角反射器入射面法线指向，计算了所设计的区域观测卫星激光反射器有效反射面积分布情况。图 2 给出了有效反射面积仿真分布结果。图中以等高线的形式给出，等高线所标数值为有效反射面积，单位为 cm²。图中大圆是地平圈，圆圈从外向里，卫星相对测站的天顶距分别为 80°、60°、40°、20°，中心为天顶，即卫星仰角依次为 10°、30°、50°、70°、90°；旋转方向为卫星相对测站的方位角。从图中可以看出，方位角在 0°~90°、仰角大于 45°时，激光反射器的有效反射面积大于 25 cm²，可满足卫星应用要求。

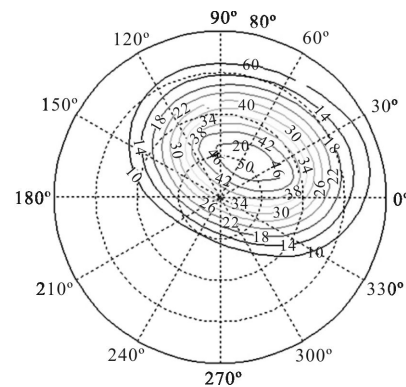


图 2 激光反射器有效反射面积仿真分布图

Fig.2 Simulated calculation of the effective reflection area of laser retro-reflector

3 区域观测卫星激光反射器有效反射面积测试验证

3.1 激光反射器有效反射面积的测试

激光反射器阵列的有效反射面积不便于直接测

试,因此只能采用间接的测量方法。利用中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术实验室的测试设备,对激光反射器阵列的有效反射面积进行了测试,测试原理如图 3 所示。激光器发射的激光经透镜准直扩束,功率密度均匀的激光照射到反射器上,反射器反射激光经主透镜和分光镜后会聚到功率计靶面上。单个角反射器的通光口径为 33.2mm,激光垂直入射角反射器的有效反射面积为 8.65cm²,通过测量激光垂直入射单个角反射器反射的能量,标定出有效反射面积与能量的转化关系,测量从整个激光反射器阵列反射回来的总能量即可得到激光反射器阵列的有效反射面积。测试系统采用的光源是MephistoOEM 激光器;激光功率计为 model2936-R,探头为 918D-ST-IR;主透镜焦距 10m,通光口径 500mm。

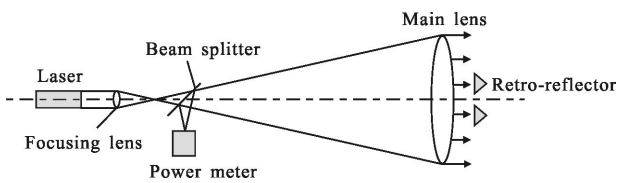


图 3 有效反射面积测试原理图

Fig.3 Principle of optical system of measuring the effective reflection area

测试时将 10 个角反射器按所设计的法线指向安装在卫星对地面底板上,再将底板安装在二维转台上。首先将卫星底板 Z_s 轴与入射激光束光轴平行,再使底板绕 Y_s 轴逆时针旋转 φ,绕 X_s 轴顺时针旋转 ψ。激光从不同位置入射时激光反射器反射的激光功率值见表 2。

表 2 激光反射器在不同角度 φ 和 ψ 时反射功率的记录结果(单位:μW)

Tab.2 Reflected power of laser retro-reflectors at the different angle of φ & ψ (Unit: μW)

ψ	φ							
	-41°	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
0°	6.33	8.80	9.04	8.14	6.33	4.52	3.02	1.58
10°	7.86	11.58	11.37	10.38	8.72	6.38	4.12	2.33
20°	7.07	10.13	10.89	10.65	9.69	7.52	4.84	2.74
30°	4.54	7.48	8.57	8.85	8.52	6.75	4.60	2.67
41°	2.93	4.88	5.60	6.00	5.69	4.90	3.64	2.23

对激光垂直入射单个角反射器时所反射的激光功率进行多次测量,单个角反射器反射功率的平均值为 1.81 μW,即激光反射器有效反射面积与反射功率转换关系为 4.78 cm²/μW。表 3 给出了由表 2 记录的功率值换算为有效反射面积的测试结果。

表 3 激光反射器在不同角度 φ 和 ψ 时测量的有效反射面积(单位:cm²)

Tab.3 Measured effective reflection area of laser retro-reflectors at the different angle of φ & ψ (Unit: cm²)

ψ	φ							
	-41°	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
0°	30.3	42.1	43.2	38.9	30.3	21.6	14.4	7.6
10°	37.6	55.4	54.3	49.6	41.7	30.5	19.7	11.1
20°	33.8	48.4	52.1	50.9	46.3	35.9	23.1	13.1
30°	21.7	35.8	41.0	42.3	40.7	32.3	22.0	12.8
41°	14.0	23.3	26.8	28.7	27.2	23.4	17.4	10.7

3.2 测试结果分析

在卫星底板旋转不同角度 φ 和 ψ 时,入射激光束在星固坐标系下的单位矢量为:

$$L_1 = \begin{bmatrix} L_{1x} \\ L_{1y} \\ L_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ 0 & \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据星固坐标系与地心坐标系的转换公式,卫星在不同方位 az 和仰角 el 时,测站发射激光束方向在星固坐标系下的单位矢量为:

$$L_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & -\sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ 0 & -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \cos(el)\cos(az) \\ \cos(el)\sin(az) \\ \sin(el) \end{bmatrix} \quad (8)$$

解方程 L₁=L₂,即可得到在卫星底板旋转不同角度 φ 和 ψ 时,激光束入射方向所对应的卫星方位和仰角。根据求得对应的结果,得到在卫星底板旋转不同角度 φ 和 ψ 时,激光反射器有效反射面积仿真结

果如表 4 所示。

表 4 激光反射器有效反射面积仿真结果(单位: cm^2)

Tab.4 Simulated calculation of the effective reflection area of laser retro-reflectors (Unit: cm^2)

ψ	φ							
	-41°	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
0°	27.0	36.8	39.1	37.5	32.6	25.5	17.5	10.7
10°	30.2	45.5	47.3	47.3	42.3	34.5	24.1	14.5
20°	28.5	39.9	46.3	48.7	46.7	40.6	27.5	16.8
30°	22.8	32.0	37.6	40.8	40.3	35.5	25.4	16.0
41°	15.2	21.2	25.3	27.5	27.0	23.5	18.3	12.1

在 ψ 或 φ 分别为 0 时, 激光反射器有效反射面积的计算值与测量值随 φ 或 ψ 的变化曲线如图 4 所示。对比激光反射器有效反射面积的计算值与测试结果可以看出, 仿真结果与测试结果基本一致, 验证了激光反射器有效反射面积仿真计算模型及设计结果的正确性。

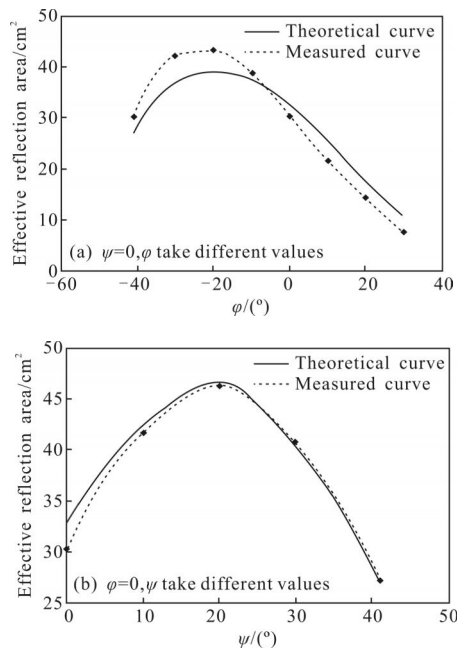


图 4 激光反射器有效反射面积计算值与测量值对比

Fig.4 Comparison the simulated calculation of effective reflection area of laser retro-reflectors with the measured value

4 结论

激光反射器作为无源被动光学载荷, 在卫星应用中发挥了重要作用。根据不同卫星应用要求, 需设计不同类型的激光反射器。针对区域天区观测的低

轨卫星激光反射器, 且在反射器质量、尺寸等有限情况下需具有较大有效反射面积的应用要求, 采用了多组不同指向角锥的平面排列设计方法。根据激光反射器有效反射面积计算模型, 设计了 3 组不同指向、共 10 个角反射器所组成的反射器阵列, 使卫星在观测方位角 $0^\circ \sim 90^\circ$ 、仰角 45° 以上时, 激光反射器的有效反射面积超过 25 cm^2 , 可满足卫星应用要求。

通过对所设计的区域观测卫星激光反射器有效反射面积的实验室测试, 有效反射面积理论计算结果与测试结果相符合, 验证了文中所推导的有效反射面积计算模型。该计算模型可应用于其他角反射器入射面法线不指向地心的卫星激光反射器阵列的设计和有效反射面积计算, 为将来不同应用需求的卫星激光反射器阵列设计奠定了基础。

参考文献:

- [1] Zhong Shengyuan. Theoretical calculation of corner-cube reflector[J]. *Laser & Infrared*, 1973, 3(12): 1-15. (in Chinese)
- [2] Wang Yuanming, Yang Fumin, Chen Wanzhen. Calculation and measurement of the effective reflective area of space-borne retro-reflectors [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(10): 25-29. (in Chinese)
- [3] Zhou Hui, Li Song, Shi Yan, et al. Design of satellite laser retro-reflector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(11): 25-29. (in Chinese)
- [4] Hu Jingfu, Li Xin, Yang Fumin, et al. Calculation of distribution of effective reflection area for space-borne laser retro-reflector array [J]. *Science in China Ser G*, 2004, 34(1): 114-120. (in Chinese)
- [5] Zhou Hui, Li Song, Zheng Guoxing. Structural design for common satellite retroreflector array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 692-697. (in Chinese)
- [6] Neubert R, Grunwaldt L, Neubert J. The retro-reflector for the CHAMP satellite: final design and realization [C]//11th International Workshop on Laser Ranging, 1998: 260-270.
- [7] Zhang Haifeng, Cheng Zhien, Li Pu, et al. Design of lidar cooperative target and its application to space rendezvous and docking [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2556-2561. (in Chinese)
- [8] Fan Jianxing. Research on design and distribution effects of satellite laser retro-reflectors [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000: 13. (in Chinese)
- [9] Ye Shuhua, Huang Cheng. Astro-Geodynamics [M]. Jinan: Shangdong Science and Technology Press, 2000: 102. (in Chinese)