

文章编号: 0258-7025(2004)06-0673-04

卫星激光合作目标中角反射器的 密接布阵设计

王古常, 王小兵, 孙 斌, 郭延龙, 陈 波, 程 勇

(武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075)

摘要 用于卫星合作目标的角反射器阵列的设计, 国际上普遍采用的是圆形布阵方案。采用正六边形密接布阵设计, 获得了轻量化、高稳定性的卫星激光合作目标。角反射器阵列尺寸为 $280\text{ mm} \times 160\text{ mm}$, 重量小于 2 kg , 共有 38 个角反射器单元; 单元底面加工成正六边形, 对边距为 31.5 mm , 有效通光口径为 30 mm , 高为 25 mm ; 考虑到星载角反射器的速差效应及其补偿要求, 经计算机数值模拟, 将单个角反射器的综合角度误差确定为 $5^\circ \pm 0.5''$, 并在加工时对每个直二面角人为引入约 $1''$ 的角度误差。该设计虽然在一定程度上增加了阵列基座的加工难度, 但计算表明, 在设计尺寸一定的情况下, 与传统圆形布阵相比, 合作目标阵列的重量减轻 15.5% , 而有效反射系数及回波光光子数均提高 10.3% 。

关键词 激光技术; 激光合作目标; 角反射器; 密接布阵; 有效反射系数

中图分类号 TN 202; P 225.2 **文献标识码** A

A Kind of Compact Design on Cube Corner Retro-Reflector Array in Laser Cooperative Target on Satellite

WANG Gu-chang, WANG Xiao-bing,

SUN Bin, GUO Yan-long, CHEN Bo, CHENG Yong

(Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Noncommissioned Officers School, Wuhan, Hubei 430075, China)

Abstract The laser retroreflectors as a laser cooperative target on satellite are traditionally arranged in circle array. 38 hexagon retro reflectors, each with the effective incident aperture of 30 mm and the height of 25 mm , are designed, thus a light and high stable cooperative target with the size of $280\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ and the weight less than 2 kg is obtained. After numerical simulation, a single retroreflector demands the integrated dihedral angle error of $5^\circ \pm 0.5''$, considering velocity aberration compensation. So an angle error of each dihedral of $\sim 1''$ is introduced deliberately. Such a design increases the machining difficulty of the array floor. But comparing with a traditional design, computation results shows the new compact one decreases 15.5% of the weight, and increases 10.3% of both the effective reflection coefficient and the echo photons at the same dimension.

Key words laser technique; laser cooperative targets; cube corner retro-reflector; compact array; effective reflection coefficient

1 引 言

卫星激光合作目标技术是指安装在卫星表面上的激光角反射器或反射器阵列 (Laser Retroreflector Array, 简称 LRA), 为卫星激光测距

(Satellite Laser Ranging, 简称 SLR) 系统提供跟踪目标, 以增大激光脉冲回波能量, 增加测程, 提高测距精度的一门技术。它广泛应用于导弹、人造卫星、月球等的激光测距系统中, 并已成为这些应用得以实现的关键技术之一。用角反射器阵列作为合作目

收稿日期: 2003-07-11; 收到修改稿日期: 2003-11-12

作者简介: 王古常 (1967—), 男, 武汉军械士官学校光电技术研究所高级讲师, 硕士, 主要从事军用激光技术的研究。

E-mail: gdyjs@263.net

标,不但可以减小合作目标的尺寸和重量,提高合作目标视场角,还可对激光传输中因大气非均匀性引起的畸变进行光学补偿(准相位共轭作用),减小光束发散角^[1]。角反射器阵列设计包括角反射器的分布效应和卫星质心改正、角反射器的有效反射面积、角反射器的远场衍射花样、卫星速度光行差的修正以及角反射器的安装和环境适应性等^[2]。目前,对角反射器阵列的设计,国际上普遍采用的是圆形布阵方案。随着卫星搭载的有效载荷的增加,合作目标的体积和重量受到了严格约束。本文采用正六边形密接布阵的设计思想,使合作目标在体积和重量受限的情况下,获得了最大的有效反射面积,提高了接收光子数。

2 单个反射器及其有效反射面积分析

单个角反射器是由三个互相垂直的反射表面组成,有空心和实心之分。理想角反射器具有空间定向反射特性,即以任意方向入射的空间光线经过理想角反射器的三个反射面后,仍以与入射光线严格平行的方向返回^[3]。在不同的使用场合,考虑到安装需要,常常将底面三角形各角切割成各种形状,如正六边形和内接圆形等。

应用到卫星激光合作目标中,为保证最大有效反射面积,角反射器底面入射面大多为圆形或正六边形。当激光正入射时,圆形和正六边形角反射器单元的最大有效反射面积 A 分别为

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (1)$$

$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} L^2 \quad (2)$$

式中, D 为圆形角反射器底面直径, L 为正六边形角反射器底面边长。

由于卫星合作目标在天际运行,不能保证激光总是正入射,因此,有效反射面积 $A(\phi)$ 是随入射角 ϕ 变化的函数。当激光以 ϕ 斜入射时,归一化有效反射面积 NEA 变为^[4]

$$NEA = \frac{A(\phi)}{A} = \frac{2}{\pi} [(\sin^{-1} \mu) - \sqrt{2} \mu \tan(\phi_{ref})] \cos(\phi) \quad (3)$$

式中, ϕ_{ref} 为光束折射角, $\phi_{ref} = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi}{n} \right)$, n 为熔融石英玻璃的折射率; $\mu = [1 - 2 \tan^2(\phi_{ref})]^{1/2}$ 。

图 1 给出了不同底面形状的角反射器归一化有

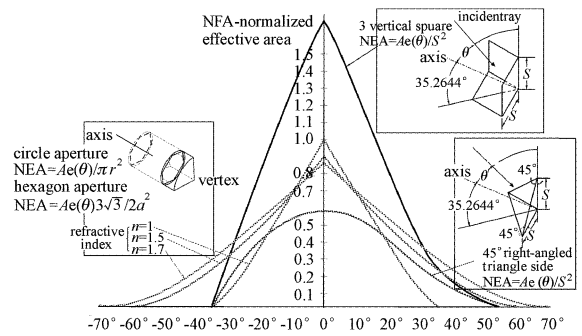


图 1 角反射器归一化有效反射面积与入射角之间的关系

Fig. 1 Relationship between normalized effective reflection rea of CCR and incident angle

效反射面积与入射角 ϕ 之间的关系^[6]。

有效反射面积表明了入射角对于回波能量的影响,在长距离上还取决于反射器反射光束的衍射。对于一个角反射器阵列来说,光束中心反射的能量还与反射器的数目,或者等效地说,还与反射器所占的面积成正比。从图 1 可知,空心角反射器的反射回波能量最为理想,曾被日本 ADEOS-1 卫星采用,但其使用方式仅为单体,难以构成阵列;以圆形或六边形为底面的角反射器的反射回波能量虽然不及空心角反射器,但因加工和布阵等易于实现,而被大多数卫星作为合作目标使用,如中国上海天文台在“BD-1(F₃)”上采用圆形布阵方案,而美国 GPS35 采用的虽是六边形角反射器,但在布阵方式上仍采取与圆形类似形式。

3 远场衍射花样的数值模拟

由于角反射器三个直角误差的大小和分布会直接影响反射光束的远场光强 (I) 大小与分布,为此,利用公式

$$I = |E_L(x', y')|^2 \quad (4)$$

其中

$$E_L(x', y') = \left(-\frac{i}{\lambda L} \right) \exp \left[ik \left(L + \frac{x'^2 + y'^2}{2L} \right) \right] \times F \left\{ A(x, y) E_{in} \cdot e^{ik(ax+\beta y)} \cdot \exp \left[\frac{ik(x^2 + y^2)}{2L} \right] \right\} \quad (5)$$

对角反射器的光强分布进行计算机数值模拟^[6],结果如下:

1) 当三个直角误差相同时,角反射器各区域的反射光都偏离中心,光强呈环状分布(图 2(a))。人们正是利用这一光强分布特性,通过引入一个合适

的直角误差 δ , 使 6 个分离光斑之一的中心恰好落在接收望远镜的中心, 实现对光行差 α 的补偿。直角误差对光行差的补偿由下式确定

$$\alpha = 3.267\delta \quad (6)$$

2) 当三个二面角误差都不相同时, 反射光强远场不具有环状分布特性, 能量集中在某些特殊方向上, 这些特殊方向上的峰值强度比 1) 情况下大得多

(图 2(b)), 落在望远镜接收中心, 就可以补偿光行差。对于具有三轴稳定姿态控制的卫星, 可以通过适当设计和选择在卫星上的安装方向, 在补偿速差的同时, 增加接收望远镜处的反射光强度。这对于降低角锥反射器加工成本和减小发射激光能量具有重要意义。

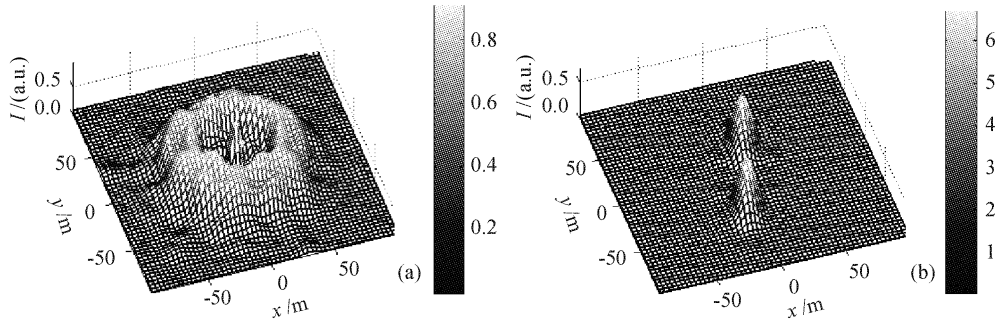


图 2 二面角误差引起的远场光强分布

(a) $\delta_a = \delta_b = \delta_c = 2''$, 正入射时; (b) $\delta_a = 3''$, $\delta_b = \delta_c = 0''$, 正入射时

Fig. 2 Far field intensity distribution with the dihedral angle error (incident angle is 0)

(a) $\delta_a = \delta_b = \delta_c = 2''$, normal incidence; (b) $\delta_a = 3''$, $\delta_b = \delta_c = 0''$, normal incidence

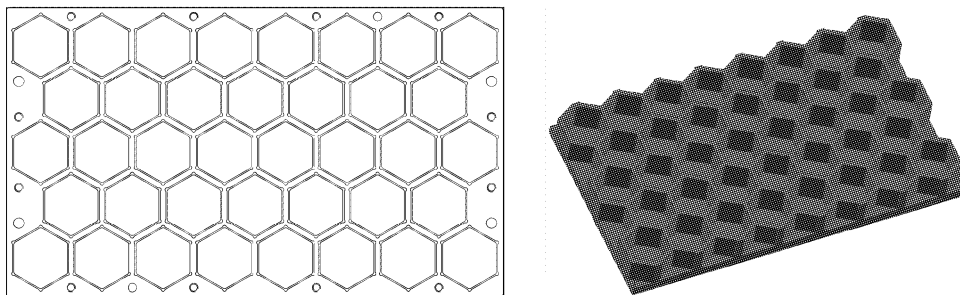


图 3 合作目标基座设计

Fig. 3 Design of the substrate of the laser cooperative targets

4 布阵设计

在合作目标尺寸和重量受约束的情况下(为便于分析计算, 取合作目标尺寸为 $280 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$; 重量为 $M \leq 2 \text{ kg}$), 采用正六边形密接布阵设计方案, 并和圆形布阵方案进行对比。

4.1 单个角反射器设计

单个角反射器的设计主要考虑材料、尺寸与形状、角度误差及分布等。

针对星载环境和三面消应力的特殊要求, 角反射器的材料选用抗宇宙辐射的宇航级熔融石英玻璃(进口), 其光学特性、光学均匀性、双折射、颗粒不均匀性、气泡和条纹等主要技术参数均达到或超过国家建材部 Jc185-80 标准。

减小棱镜尺寸虽然可以在一定程度上实现衍射发散角对光行差的补偿, 降低反射器阵列的重量, 但减弱了回波的强度, 对激光测距没有贡献, 所以角反射器单元尺寸通常在 $20 \sim 40 \text{ mm}$ 范围内。本设计采用底面为正六边形的角反射器, 对边距为 31.5 mm , 有效通光口径为 30 mm , 高为 25 mm 。在角反射器的加工过程中, 应对三个二面角人为引入约 $1''$ 的角度误差, 使得角反射器的综合角度误差控制在 $5^\circ \pm 0.5''$ (可由 Zygo 干涉仪检测)。

4.2 角反射器安装

在优化尺寸、重量和环境适应性的前提下, 38 个角反射器分别安装在铝合金基座上(如图 3 所示)。

该基座经整体加工而成, 具有重量轻、刚度好的特点, 能适应星际环境温度的剧烈变化, 使得每个角

反射器在独立安装时能获得良好的稳定性。

4.3 计算

4.3.1 有效反射系数及重量

设合作目标的底面面积为 S , 则各角反射器的有效反射面积之总和在 S 中所占比例称为有效反射系数。显然, 有效反射系数越高, 有效反射面积就越大, 能接收的光子数就越多。计算得正六边形和圆形布阵方案(图 4)的有效反射系数分别为

$$\eta_{\text{six}} = \sum_{i=1}^{38} \Delta S_i \cdot (S)^{-1} = 0.7289 \quad (7)$$

$$\eta_{\text{circle}} = \sum_{i=1}^{38} \Delta S_i \cdot (S)^{-1} = 0.6610 \quad (8)$$

可见, 与圆形布阵相比, 六边形密接布阵有效反射系数提高了 10.3%。

另设合作目标的厚度为 31.5 mm, 经计算, 圆形布阵的重量为 1.788 kg, 六边形密接布阵的重量为 1.548 kg。所以, 在设计尺寸一定的情况下, 六边形密接布阵的重量减轻了 15.5%。

4.3.2 接收的回波光光子数

根据测距方程^[7]

$$N_s = \frac{16E \cdot P \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta \cdot \alpha}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_r^2} \quad (9)$$

式中, N_s 为卫星回波在接收光敏面上产生的平均光电子数, E 为激光脉冲能量(532 nm), 武汉站取 250 mJ, P 为每焦耳能量的光子数, 取 2.8×10^{18} (532 nm), A_s 为卫星上反射器的有效面积, A_r 为接收镜的有效面积, 武汉取 0.251 m², K_t 为发射系统的效率, 武汉取 0.6, K_r 为接收光学系统的效率, 武汉取 0.65, T^2 为双程大气透过率, 地面高度 40 度附近, 取 $T^2 = 0.3$, η 为接收光电器件的量子效率, 对 SPAD, 取 0.20, β 为衰减因子(包括卫星反射效率、大气抖动、湍流等影响), 取 13 dB, ρ 为卫星距离, 对本课题合作目标为 20000 km, θ_t 为激光光束发散角(经过发射望远镜), 武汉取 13", θ_r 为卫星反射器的发射角, 对本专题合作目标, 取 5"。

在轨高为 20000 km 时, 估算得, 武汉站对六边形密接布阵和圆形布阵可以接收到的光子数分别为 34.4 个和 31.2 个, 提高了 10.3%。

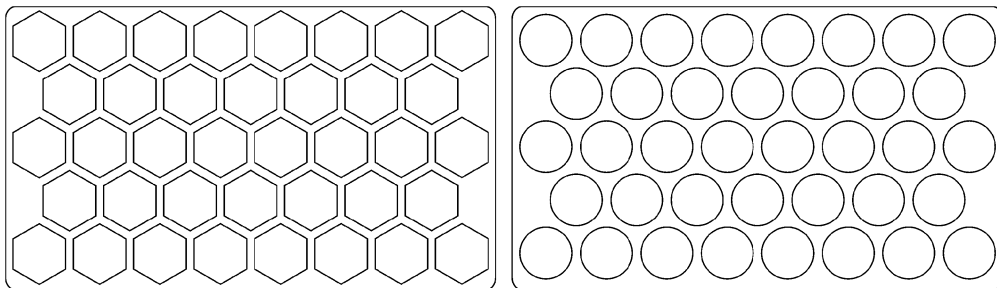


图 4 六边形和圆形布阵方案之比较

Fig. 4 Compare of arrays in hexagon and circle design

参 考 文 献

- 1 Wang Shaomin, Zhao Daomu Zhao. Matrix Optics [M]. Beijing: High Educational Press, 2000. 160~168
王绍民, 赵道木. 矩阵光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 160~168
- 2 Fan Jianxing. Research on design and distribution effects of satellite laser retro-reflectors [D]. Doctor Dissertation, Zhejiang University, 2000
范建兴. 卫星激光反射器的设计和分布效应研究[D]. [学位论文]浙江大学, 2000
- 3 Cheng Yong, Sun Bin, Wang Xiaobing et al.. Novel approach to improve laser beam quality and stability [J]. Chinese J. Quantum Electron., 1999, 16(3):217~220
程 勇, 孙 斌, 王小兵等. 一种改善激光光束质量和稳定性的新途径[J]. 量子电子学报, 1999, 16(3):217~220
- 4 Ye Shuhua, Huang Cheng. Astro-Geodynamics [M]. Jinan: Shangdong Science and Technology Press, 2000. 102~118

- 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. 102~118
- 5 Radio Corporation of America. Electro-optics Handbook [M]. 1974. 2nd edition, Chinese version; Shi! Si, Wu Suo. Beijing: National Defence Industry Press, 1978. 187~190
[美]无线电公司. 电光学手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978. 187~190
- 6 Ye Yidong, Peng Yong, Cheng Tianjiang et al.. Numerical simulating of cube corner retroreflector [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(4):485~490
叶一东, 彭 勇, 陈天江等. 角锥后向反射器的数值模拟研究[J]. 光学学报, 2003, 23(4):485~490
- 7 Yang Fuming, Xiao Jikun, Chen Wanzhen et al.. Design and actual result of daylight satellite laser ranging system [J]. Science China (Series A), 1998, 28(11):1048~1056
杨福民, 肖积焜, 陈婉珍等. 白天卫星激光测距系统的设计与实测结果[J]. 中国科学(A 辑), 1998, 28(11):1048~1056