

激光雷达合作目标设计及其在空间交会对接中的应用

张海峰¹,程志恩¹,李 朴¹,王元明¹,张忠萍¹,吴登喜²

- (1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;
2. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要: 激光雷达合作目标是激光交会对接雷达测量系统重要组成部分。针对激光交会对接雷达系统测量需求,首次采用远近场双合作目标设计方式,实现对激光信号原路返回,用于目标飞行器在远场时快速搜索捕获,近场时精确测量。对于远场合作目标采用了多维阵列构型,通过仿真分析,在有效视场 $90^\circ \times 105^\circ$ 范围内最小有效反射面积不低于 100 cm^2 ,保证了对激光信号反射能力和目标捕获能力。所设计的激光雷达合作目标满足了激光交会对接雷达系统应用要求。

关键词: 空间交会对接; 激光雷达合作目标; 远近场目标; 航天应用

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2556-06

Design of lidar cooperative target and its application to space rendezvous and docking

Zhang Haifeng¹, Cheng Zhien¹, Li Pu¹, Wang Yuanming¹,
Zhang Zhongping¹, Wu Dengxi²

- (1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. The 27 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: Lidar cooperative target is one important part of lidar rendezvous and docking measuring system. According to the requirements of lidar rendezvous and docking measuring system, the optimal design for the structure of lidar cooperative targets to make laser signals return back along incoming path was performed by using the method of the far and near field cooperative targets in order to fast search for and capture to objective spacecraft in the far field and implement accurate measurement in the near field. For the far field cooperative target the multi-dimensional structure of reflector array were adopted and the minimum reflective area can be reached to more than 100 cm^2 within the effective field of view of $90^\circ \times 105^\circ$ to make sure of the ability of laser signal reflection and acquisition of objective spacecraft. The designed lidar cooperative targets in this paper meet the requirement of lidar rendezvous and docking measuring system.

Key words: space rendezvous and docking; lidar cooperative target; far and near field targets; application in aerospace activity

收稿日期: 2015-01-11; 修订日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(U1231107, 11303074)

作者简介: 张海峰(1981-), 男, 硕士, 主要从事卫星激光测距技术与应用方面的研究。Email: hfzhang@shao.ac.cn

0 引言

空间交会对接是指在同一个运行轨道上的两个航天器(目标航天器与追踪航天器)之间距离逐步达到零,最终实现对接机构的连接,在机械上联成一体,形成更大的航天器复合体^[1]。掌握航天器交会对接技术是一个国家建立长期无人轨道运行、短期有人照料的载人空间试验平台的首要任务。两航天器间距离、视线角、速度等参数的精确测定是完成空间交会对接中的关键技术之一。空间交会对接中,测量手段通常有微波雷达、GPS 导航定位技术、光学成像敏感器和激光雷达^[2]。其中,激光雷达具有波束窄、分辨率高、体积小、质量轻、精度高等优点^[3],空间交会对接激光雷达由主机、信息处理机及合作目标组成^[4-5]。合作目标是激光雷达测量系统的重要组成部分^[6],由多个角锥棱镜所组成的反射器阵列,安装在目标飞行器对接面,使追踪飞船上激光雷达测量系统所发射的激光信号原路返回,由其接收探测系统完成对目标飞行器的搜索、捕获,实时获取目标飞行器相对距离、位置等测量参数,为目标航天器与追踪航天器的对接提供高精度的测量数据^[7]。其中,德国耶拿光学研制的用于空间航天器交会对接的激光雷达合作目标具有代表性,安装在国际空间站,合作目标由3个组件按照一定方式安装在 $\phi 1\ 500\ \text{mm}$ 截面上,每个组件有7个圆切割的角锥棱镜按照等间隔排列安装在1个球冠上形成,在距离730 m时,最大视场范围可达 $40^\circ \times 40^\circ$ ^[8]。日本RVR激光交会雷达合作目标由8个15 mm角反射器组成,其中1只倾斜 30° 放置,视场 6° ,工作距离在500 m左右^[8]。

激光交会雷达系统工作模式、最大作用距离、跟踪测量精度等直接决定着激光雷达合作目标的结构设计、安装方式、有效反射面积等性能^[9]。中国科学院上海天文台在已有用于卫星轨道精密测定的合作目标设计与研制基础上^[10-11],针对国内首次进行的空间交会对接航天任务中激光雷达对接技术特点和系统应用要求,开展了激光雷达合作目标的设计与研制,以满足激光交会雷达测量系统在距离20 km~0.8 m范围内对目标飞行器的视线距离、视线角、速

度等参数测量要求。

1 激光雷达合作目标设计与仿真分析

1.1 任务要求

根据激光交会对接雷达测量系统的任务应用特点:1)远距离时(20 km~60 m),实现对目标飞行器的快速搜索和捕获;2)近距离时(60~0.8 m)时,实现对目标飞行器的精确测量。上述特点决定了激光雷达合作目标在远距离时需具有宽视场范围($\geq 90^\circ$)和较高的有效反射面积($\geq 100\ \text{cm}^2$),以提高激光信号反射能力,有利于对目标飞行器快速搜索和捕获;近距离时,要求激光信号在目标飞行器表面某一固定位置反射,减少光束多位置反射效应,以提高测量精度。

基于上述任务要求,提出了远近场双目标相结合的激光雷达合作目标构型设计,其中远场目标满足对目标飞行器的快速搜索和捕获要求,近场目标满足对目标飞行器的精确测量要求。

1.2 远场合作目标设计

合作目标有效视场范围与激光入射方向有直接关系,其有效反射面积与激光入射角有关。当激光零角度入射时,反射面积最大。为保证激光在不同入射方向时,合作目标具有较高的有效反射面积,则需保证激光具有较小入射角。在此情况下,必需采用由多个不同法线指向的平面反射器所组成的阵列结构。考虑到合作目标最小有效反射面积和载荷质量要求,对角锥棱镜数目和平面阵列结构设计提出了严格要求。

1.2.1 单个角锥棱镜结构设计

单个角锥棱镜是由正四面体熔石英材料加工而成,通常采用底面内接圆或三角切割方式,不同的切割方式具有不同的有效反射面积。图1给出了同一个正四面体熔石英材料采用不同切割方式时,其相对有效反射面积的对比情况。

由图可知,在相同的激光入射角情况下,1/6切割方式具有较高的反射面积。在质量限制的条件下,为满足激光雷达合作目标的高有效反射面积要求,单个角锥棱镜采用了底面1/6切割方式。

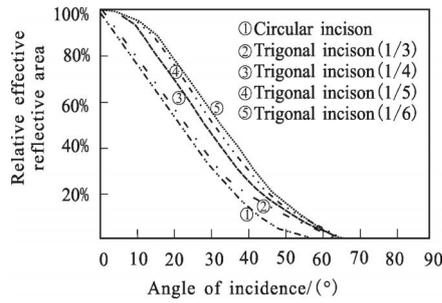


图 1 相对有效反射面积与入射角及切割系数之间关系
Fig.1 Relation of relative reflective area with incidence angle and way of incision

1.2.2 远场合作目标阵列结构

在满足合作目标外形尺寸、质量条件下,通过建立激光雷达合作目标有效反射面积仿真计算模型,综合考虑单个角锥棱镜有效口径、单个平面阵列中角锥棱镜数目、平面阵列数以及空间排布方式等因素,经过多次设计和优化改进,以有效视场范围和最低有效反射面积为依据,设计了满足激光交会雷达测量系统要求的合作目标结构。所设计的远场合作目标共采用 86 块 1/6 切割的角锥棱镜,分别安装在 8 个不同法线指向的平面阵列,如图 2 所示,各个

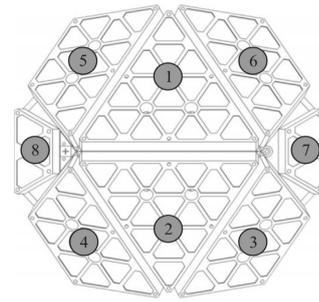


图 2 远场合作目标阵列排布设计
Fig.2 Design of structure of far field cooperative targets array

平面阵列法线之间具有一定夹角,角度大小取决于合作目标的视场角和有效反射面积要求。

1.2.3 远场合作目标有效反射面积分析

合作目标有效反射面积与所采用的角锥棱镜切割形式、通光口径、光学反射效率、阵列结构等因素有关。通常情况下,有效反射面积无法进行直接测量,通常方法是利用角锥棱镜相对有效反射面积计算公式,获取入射激光相对于阵列中每个角锥棱镜的入射角,推算出每个角锥棱镜有效反射面积。所有角锥棱镜有效反射面积总和即为合作目标阵列的有效反射面积。对于三角形等边切割时,角锥棱镜相对有效反射面积公式^[12]:

$$\eta(k,n,i) = \begin{cases} \left(1 - 2 \left(\frac{\sin(i)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(i)}}\right)^2\right) \cdot \cos(i) & 0 \leq i \leq \arctan \frac{(1-3k)n}{\sqrt{6+(1-3k)^2(1-n^2)}} \\ \frac{4}{3} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{6}}{2} \frac{\sin(i)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(i)}} - \frac{9}{4} k^2\right) \cdot \cos(i) & \arctan \frac{(1-3k)n}{\sqrt{6+(1-3k)^2(1-n^2)}} \leq i \leq \arctan \frac{(2-3k)n}{\sqrt{6+(2-3k)^2(1-n^2)}} \\ \frac{4}{3} \cdot \left(1 - \frac{3}{2} k\right) \left(1 - \frac{\sqrt{6}}{2} \frac{\sin(i)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(i)}}\right) \cdot \cos(i) & \arctan \frac{(2-3k)n}{\sqrt{6+(2-3k)^2(1-n^2)}} \leq i \leq \arctan \frac{n}{\sqrt{2.5-n^2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: η 为相对有效反射面积; i 为激光束入射角; n 为角锥棱镜材料的折射率,对于熔石英材料,取 1.455; k 为三角形等边切割角锥棱镜的切割系数。

对于此次设计的远场合作目标,单个角锥棱镜采用 1/6 切割,即 $k=1/6$,单个角锥棱镜入射面的最大通光面为 8.22 cm^2 ,此反射面积是在激光入射角为零度,且光学反射率为 100%时的结果。

对于上述所设计的远场合作目标阵列,建立如图 3 所示的坐标系 $O-XYZ$:坐标原点 O 位于阵列①和阵列②水平交线的中点; X 轴正方向垂直于安装底面向外; Y 轴为阵列①和阵列②水平交线的方向,向右为正方向; Z 轴与 X 、 Y 轴满足右手螺旋关系。考

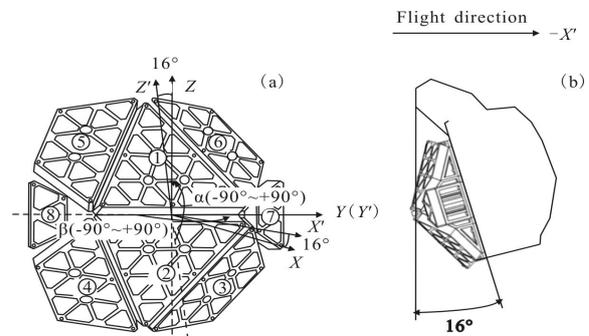


图 3 $O-XYZ$ 坐标系及偏置安装图
Fig.3 Coordination of $O-XYZ$ and inclined installation of far field cooperative targets

考虑到 TG1 目标飞行器与神舟飞船航天器实际交会对接方式,远场合作目标在目标飞行器安装时采用了斜置安装,安装面法线与目标飞行器飞行方向夹角 16° ,如图 3 所示。此安装方式满足了神舟飞船与 TG1 飞行器交会对接方式和对激光雷达合作目标视场范围要求。

为便于对合作目标有效反射面积计算和分析,建立了 $O'-X'Y'Z'$ 坐标系:坐标原点 O' 与 $O-XYZ$ 的坐标原点 O 重合; Y' 轴与 Y 轴重合; X' 轴为 $O-XYZ$ 坐标系绕 Y 轴旋转 16° 得到;旋转后的 Z 轴为 Z' 轴。此时在 $O'-X'Y'Z'$ 坐标系下,入射激光束矢量方向可采用相对位置(方位 β 和俯仰 α)来表示,直观描述入射激光方向与有效反射面积分布关系。

采取如下计算过程,获取激光从不同方向入射时远场合作目标有效反射面积分布:

(1) 根据 8 个平面阵列法线之间角度关系,分别获得在 $O-XYZ$ 坐标系下方向矢量: $(\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3, \vec{n}_4, \vec{n}_5, \vec{n}_6, \vec{n}_7, \vec{n}_8)$ 。

(2) 根据合作目标斜置安装方式,通过坐标变换获得 8 个平面阵列法线在 $O'-X'Y'Z'$ 坐标系矢量: $\vec{n}_i = R_y(-16^\circ) \cdot \vec{n}_j, (i, j=1-8)$ 。

(3) 某一方向入射光线相对于 8 个平面阵列入射角从方位角 β 和高度角 α 处入射的光线,在 $O'-X'Y'Z'$ 与坐标系中,其矢量可表示为: $\vec{n} = (\cos\alpha \cdot \cos\beta, \cos\alpha \cdot \sin\beta, \sin\alpha)$

则入射光线与平面阵列 j 法线矢量的夹角即为入射角 i ,可以通过下式求得:

$$i = \arccos - 1 \left(\frac{\vec{n} \cdot \vec{n}_j'}{|\vec{n}| \cdot |\vec{n}_j|} \right) \quad (2)$$

(4) 远场合作目标阵列有效反射面积计算

对于平面阵列 j , 相对有效反射面积 $\eta_j (k=1/6, n=1.455, i)$, 则有效反射面积为: $S_{Ej} = \eta_j \cdot S_0 \cdot e \cdot M_j, (j=1-8)$ 。其中, S_0 为单角锥棱镜最大通光面积(取 8.22 cm^2), e 为光学反射效率(取 0.9), M_j 为构成阵列 j 的角锥棱镜数量。8 个平面阵列有效反射面积之和 $S_E = \sum_{j=1}^8 S_{Ej}$,

即为远场合作目标阵列总有效反射面积。当入射光线方位角和高度角发生变化时,有效反射面积也将

随之发生变化。

通过 Matlab 仿真计算,获得远场合作目标有效反射面积(cm^2)随方位角(β)、高度角(α)分布情况,如图 4 所示,其中方位角 $\beta: -90^\circ \sim +90^\circ$, 俯仰角 $\alpha: -90^\circ \sim +90^\circ$, 圆心处俯仰角为 0° , 虚线间隔 20° , 旋转方向表示方位角变化, 间隔 30° 。

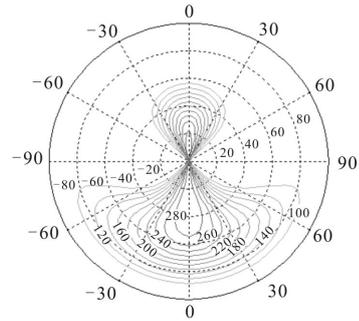


图 4 远场合作目标的有效反射面积分布图

Fig.4 Distribution of effective area of far field cooperative targets

根据图 4 计算结果,在方位角 $\beta: -30^\circ \sim +30^\circ$ 和仰角 $\alpha: -70^\circ \sim 25^\circ$ 范围内,远场合作目标有效反射面积最小 177.4 cm^2 , 最大 295.9 cm^2 ; 在方位角 $\beta: -45^\circ \sim -30^\circ, +30^\circ \sim 45^\circ$ 和仰角 $\alpha: -70^\circ \sim 35^\circ$ 范围内,远场合作目标有效反射面积最小 100 cm^2 , 最大 213.9 cm^2 。由此可见,所设计的远场合作目标在 $90^\circ \times 105^\circ$ 视场范围内最小有效反射面积不低于 100 cm^2 , 满足了激光雷达测量系统对合作目标的视场角范围和有效反射面积要求。

1.3 近场目标设计与布局

为保证激光交会雷达测量系统在近场时的测量精度及所需的反射面积,近场合作目标采用单个角锥棱镜设计方式,底面 $1/6$ 切割方式,有效反射面积约 19.5 cm^2 , 如图 5 所示,降低了多角锥棱镜产生的激光脉冲展宽效应,满足激光雷达系统对目标飞行器在近距离对接过程中厘米级精度测量要求。

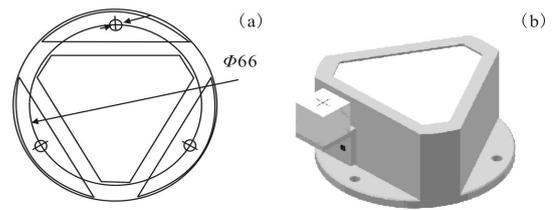


图 5 近场合作目标结构设计

Fig.5 Design of structure of near field cooperative targets

2 激光雷达合作目标在交会对接中应用

2.1 激光雷达合作目标

此次研制的激光雷达合作目标如图 6 所示。经测试,远场合作目标最大外形尺寸 $429.6\text{ mm} \times 425.2\text{ mm} \times 174.5\text{ mm}$,总质量为 8.5 kg 。近场合作目标最大外形尺寸 $\Phi 78.0 \times 38.0\text{ mm}$,质量为 0.19 kg ,满足激光雷达测量系统的技术要求。

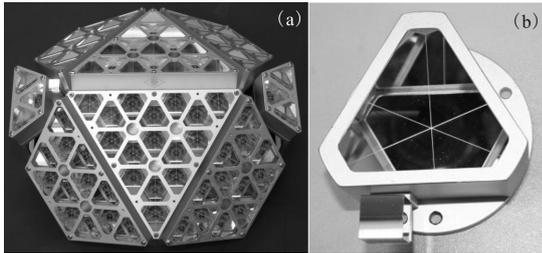


图 6 激光雷达合作目标实物图及安装位置

Fig.6 Production of lidar cooperative targets and installation on objective spacecraft

2.2 在空间交会对接中应用

国内首个用于空间交会对接的目标飞行器 TG1 于 2011 年 9 月 29 日 21 时 16 分在酒泉卫星发射中心发射。2011 年 11 月 2 日,神舟八号首次实现了与目标飞行器 TG1 的无人自动交会对接。图 7 给出了神舟八号与目标飞行器 TG1 的实时交会对接画面(来自 CCTV),左下图给出了交会对接过程中神舟八号上激光交会雷达测量系统向目标飞行器 TG1 上的激光雷达合作目标发射激光束的演示图,图(d)为安装在神舟八号上的摄像机所拍摄到了目标飞行器 TG1 对接面上的远场目标和近场目标实际安装位置。

2012 年 6 月和 2013 年 6 月神舟九号、神舟十号飞船先后成功与目标飞行器 TG1 进行了多次空间交会对接航天任务,激光雷达合作目标性能良好、工

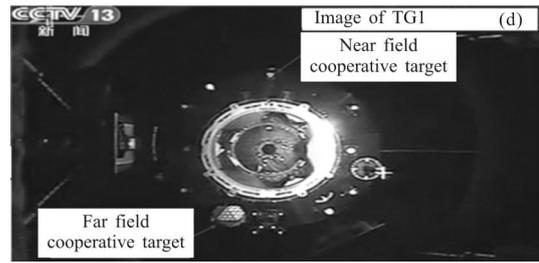
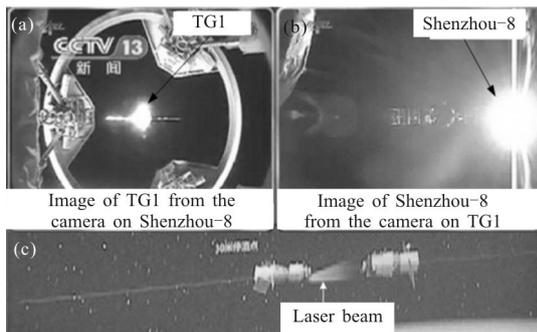


图 7 目标飞行器 TG1 与神舟八号交会对接时的实时画面

Fig.7 Real-time video pictures of space rendezvous and docking between TG1 and Shenzhou-8 spacecrafts

作状态稳定,在国内自主航天器交会对接航天任务中起到了重要作用。

3 结束语

激光雷达合作目标是激光交会雷达系统中重要组成部分。中国科学院上海天文台在卫星精密测轨激光反射器研制技术基础上,针对激光交会雷达测量系统对激光雷达合作目标的技术要求,提出了远近场双目标的激光雷达合作目标设计思想,其中远场目标用于目标航天器快速搜索、捕获和跟踪;近场目标用于目标航天器精确测量。通过对合作目标结构优化设计,远场合作目标采用了由 86 个底面 $1/6$ 切割方式的角锥棱镜所组成的多维平面阵列,在 $90^\circ \times 105^\circ$ 视场范围内实现了最小有效反射面积 100 cm^2 ;近场合作目标采用了底面 $1/6$ 切割的单个大口径角锥棱镜,有效反射面积约 19.5 cm^2 ,满足了激光雷达交会对接技术的应用需求。所设计的激光雷达合作目标,在神舟八号、九号、十号飞船与目标飞行器 TG1 空间交会对接中,性能良好、工作状态稳定,验证了产品设计的有效性和可靠性,在国内载人航天工程多次空间交会对接试验中起到了重要作用,也为今后开展星间高精度激光测距的合作目标研制奠定了基础。

参考文献:

- [1] Lin Laixing. The Space Rendezvous and Docking Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 1-17, 108-120. (in Chinese)
林来兴. 空间交会对接技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 1-17, 108-120.

- [2] Ma Tingting, Wei Chenxi. Development of the space rendezvous and docking technology [J]. *Aerospace China*, 2004(7): 30–34. (in Chinese)
马婷婷,魏晨曦. 空间交会对接测量技术的发展[J]. 中国航天, 2004(7): 30–34.
- [3] Shi Zhiyong, Pan Xiaosheng, Zhang Qian. High-precision pulsed laser measuring distance by time delay method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22 (2): 252–258. (in Chinese)
施智勇, 潘晓声, 张谦. 利用延时法进行高精度脉冲激光测距[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 252–258.
- [4] Yang Ran, Zhang Gaofei, Zhang Zichen, et al. Design and experiment of a laser ranging scheme for aerospace applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (3): 700–706. (in Chinese)
杨冉, 张高飞, 张紫辰, 等. 激光雷达在航天器交会对接中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 700–706.
- [5] Wang Cun'en. The application of Lidar system in the space rendezvous and docking[J]. *Infrared and Laser Technology*, 1991, 20(5): 6–12. (in Chinese)
王存恩. 激光雷达在航天器交会对接中的应用[J]. 红外与激光技术, 1991, 20(5): 6–12.
- [6] Liu Yan, Zhang Chao, Li Qing. Underwater laser localization method using cooperative targets [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 169–174. (in Chinese)
刘艳, 张超, 李卿. 基于合作目标的激光水下定位[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 169–174.
- [7] Li Li, Ren Ximing. Analysis of RVD LIDAR key technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (s3): 108–111. (in Chinese)
李丽, 任熙明. 空间交会对接激光雷达关键技术分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s3): 108–111.
- [8] Martin Pfennigbauer. Echo Digitizing imaging LIDAR for rendezvous and docking [C]// *Laser Radar Technology and Applications XIV*, SPIE, 2009, 7323: 732302–1–9.
- [9] 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)
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.
- [10] 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.
- [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. (in Chinese)
- [12] Zhong Shengyuan. The theoretical calculation of characteristics of cube corner reflector [J]. *Laser & Infrared*, 1973, 3(12): 1–15. (in Chinese)
钟声远. 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.