

文章编号 1004-924X(2017)07-1705-09

# 适用于立方体卫星的激光测距合作目标

罗青山<sup>1,2</sup>, 郭唐永<sup>2\*</sup>, 姚运生<sup>1,2</sup>

(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 中国地震局地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**为了给立方体卫星星载 GPS 定轨数据提供检核标准,并满足高精度测定轨道的应用要求,通过在  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  的标准立方体卫星的每个表面分布 3 个通光口径为  $1.0\text{ cm}$  的微小激光反射器,设计了质量约为  $108\text{ g}$ 、视场角满足  $360^\circ$ 、测距精度可达厘米级的激光测距合作目标。根据角锥棱镜的二面角误差、反射面形误差及入射面形误差所引起的光束附加相位,分析角锥棱镜在远场的衍射分布特性;接着,根据激光合作目标在卫星上的分布方式,计算激光合作目标的相对有效面积分布;然后,利用激光测距方程估算不同轨道高度的立方体卫星激光反射器回波光子数,并根据卫星质心改正模型估算激光测距精度;最后,以皮卫星激光合作目标测距试验为例,验证了装载在卫星上的  $1.0\text{ cm}$  微小激光反射器能够反射回足够的激光回波信号。结果表明,此种分布方式对于运行在  $250 \sim 1000\text{ km}$  轨道上的立方体卫星能够提供足够的回波信号,激光测距内精度可达厘米级,满足立方体卫星对激光测距合作目标质量轻、分布灵活、测距精度高的要求。

**关键词:**激光测距;立方体卫星;激光合作目标;有效反射面积;测距精度

**中图分类号:**P228.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172507.1705

## Laser ranging cooperative target for CubeSat

LUO Qing-shan<sup>1,2</sup>, GUO Tang-yong<sup>2\*</sup>, YAO Yun-sheng<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology,*

*China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: guoty9@gmail.com*

**Abstract:** In order to provide inspection standards for GPS-based orbit determination data of CubeSat and realize high-precision orbit measurement, a laser cooperation target which weights  $108\text{ g}$  with a field of view of  $360^\circ$  and ranging accuracy in centimeter was designed by distributing three miniature laser reflectors with aperture of  $1.0\text{ cm}$  at all surfaces of a standard CubeSats with dimensions of  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ . According to the additional phase lead by dihedral angle error of the cube corner retroreflector, as well as surface-shape errors of the reflective and incident planes, distribution merits of the cube corner retroreflector in the far field was analyzed. Then, the effective area of the laser cooperation target was calculated based on the distribution mode of laser cooperative targets on the satellite. Furthermore, the returned photon number of the laser reflector on the CubeSats with different orbital altitudes was estimated by the laser ranging equation, meanwhile the accuracy of laser

收稿日期:2016-12-27;修订日期:2017-02-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41274189);中国地震局地震研究所所长基金资助项目(No. IS201226038, No. IS201506210)

ranging was calculated based on the mass-center correction model of the satellite. Finally, a ranging test of pico-satellite laser cooperation target was performed. It is verified that 1.0 cm miniature laser reflectors loaded on the satellite can reflect enough laser echo signals. The result indicates that the distribution mode can provide sufficient echo signals for CubSats running on 250—1 000 km orbit with centimeter-level accuracy within the laser ranging, which meets the requirements of CubSats for light mass, flexible distribution and high ranging accuracy.

**Key words:** laser ranging; CubeSat; laser cooperative target; effective reflection area; range accuracy

## 1 引言

立方体卫星的标准是将  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  的卫星作为一个单元,通常其质量不超过  $1.33\text{ kg}$ <sup>[1-5]</sup>。由于采用商用现货部件,立方体卫星易于实现标准化、模块化,且具有研制成本低、周期短的特点,因此在对地观测、通讯、新技术试验等领域具有广阔的应用前景。全球约有近百所大学和科研机构对立方体卫星进行研究,包括美国国家航空航天局艾姆斯研究中心,东京工业大学、代尔福特理工大学等。我国的中国东方红卫星有限公司、深圳航天东方红海特有限公司、上海微小卫星工程中心及南京理工大学也在 2015 年 9 月将一系列立方体卫星成功进行了在轨验证<sup>[6]</sup>。

卫星激光测距技术(Satellite Laser Ranging, SLR)是现代各种定位观测手段中单点采样精度最高的一种技术,其测定成果具有确定性,因此该技术的一个重要用途就是对 GPS, VLBI 等定轨结果进行检核<sup>[7]</sup>。激光合作目标是卫星激光测距的重要组成部分,作为无功耗载荷,一般安装在卫星的对地面,立方体卫星一般运行在  $250 \sim 1\,000\text{ km}$  的轨道上,属于低轨卫星<sup>[1]</sup>。此类卫星一般采用金字塔结构或八棱台结构的激光合作目标,且要求在工作视场范围内无遮挡,因此需要一定的安装面积。而立方体卫星对体积和重量的要求苛刻,无法提供阵列结构激光反射器所需要的安装面积,这大大地限制了激光合作目标在立方体卫星上的应用。

考虑到立方体卫星对体积和质量的限制,本文根据立方体卫星的结构特性设计了适用于立方体卫星的激光测距合作目标,在标准立方体卫星的每个表面分布 3 个通光口径为  $1.0\text{ cm}$  的微小激光合作目标,并对激光合作目标的远场衍射分布、相对有效反射面积、激光回波光子数和激光测

距内符合精度进行理论分析。分析结果表明:对于运行在  $250 \sim 1\,000\text{ km}$  轨道上的立方体卫星,此种分布方式能够提供足够的回波信号,激光测距内精度可达厘米级。由于立方体卫星激光合作目标的结构对称性,在卫星完成使命成为空间碎片后仍满足高精度激光测距的需求,由此表明此种分布方式满足立方体卫星对激光测距合作目标质量轻、分布灵活、测距精度高的要求。

## 2 立方体卫星激光测距合作目标设计

### 2.1 卫星激光测距合作目标工作原理

图 1 为卫星激光测距原理图。由地面人卫激光测距观测站发射一束脉冲激光,激光经光学系统发射至卫星,经卫星搭载的激光合作目标反射回激光信号,被地面接收站接收后通过精确测定激光信号往返的时间间隔,进而实现卫星和测站之间距离的精确测量。

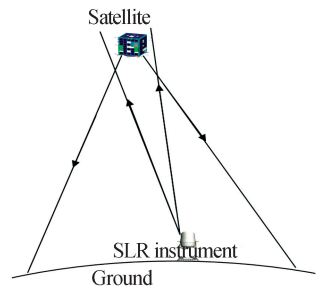


图 1 卫星激光测距示意图

Fig. 1 Sketch map of satellite laser ranging

### 2.2 激光合作目标分布方式

立方体卫星如图 2 所示,绝大多数立方体卫星将太阳能电池板集成在卫星表面,无法提供阵列结构激光反射器所需要的安装面积;且立方体卫星设计寿命较短,在任务完成后就会成为空间碎片,其姿态控制系统有可能失效。为了保证处

于不同位置的测站都能观测立方体卫星,就需要在立方体卫星的每个表面布置角反射器。为了增强反射信号,这里在每个表面分布 3 个角锥棱镜,图 2 中圆圈代表反射器单体可能放置的位置。

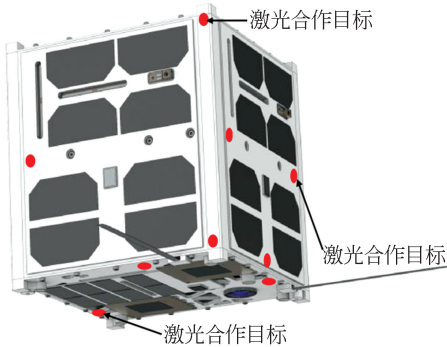


图 2 立方体结构卫星及激光合作目标分布图

Fig. 2 Possible distribution of retro-reflectors on CubeSat

### 2.3 激光合作目标的远场衍射特性分析

激光合作目标的核心元件为角锥棱镜。图 3 为适宜立方体卫星的角锥棱镜的 ZYGO 测试图,其具体技术参数如表 1 所示。根据角锥棱镜的光学特性、出射光波相位及衍射强度计算的数学模型,可以模拟出角反射器的远场衍射分布。由图 3 可知,由于在角锥棱镜的实际加工过程中存在加工误差<sup>[8]</sup>,特别是二面角偏差、入射面面形偏差及反射面面形偏差的存在,使经过角锥棱镜出射的光波面不再是一个平面光波,产生了一个附加相位<sup>[9-10]</sup>。利用角锥棱镜误差引起的反射光束相位误差模型<sup>[9]</sup>分析此光束附加相位,结果如图 4 所示。

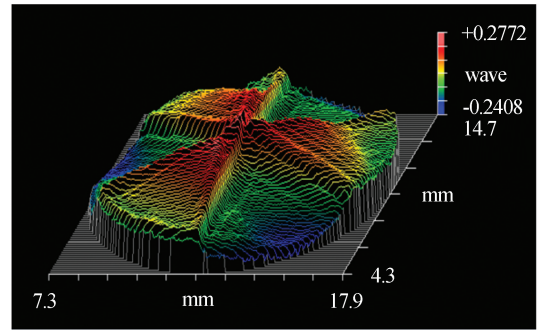


图 3 角锥棱镜 ZYGO 测试图

Fig. 3 Test results of cube corner retroreflector by ZYGO interferometer

表 1 角锥棱镜的技术参数

Tab. 1 Technical parameters of cube corner retroreflector

| 名称         | 参数                        |
|------------|---------------------------|
| 顶高/mm      | 7                         |
| 通光口径/mm    | 10                        |
| 折射率/532 nm | 1.461                     |
| PV 值       | 0.52λ                     |
| RMS 值      | 0.10λ                     |
| 二面角偏差/(°)  | (+1.3,+1.1,+1.3)          |
| 光束偏移角/(°)  | (3.5,6.5,6.3,7.8,5.1,6.4) |
| 三个反射面面形    | $N=(0.2,0.2,0.2)$         |
| 入射面面形      | $N=0.5$                   |
| 材质         | 石英                        |
| 镀膜         | Ag                        |
| 角锥分布总数     | 18                        |
| 质量/g       | 108                       |

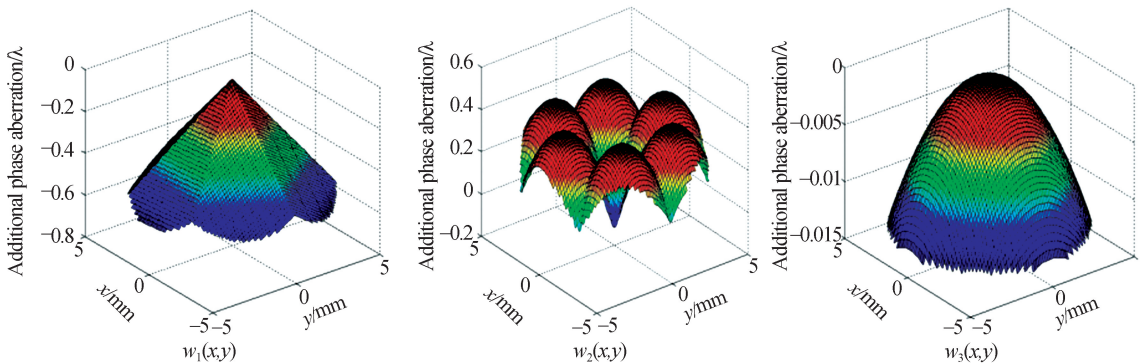


图 4 二面角误差、反射面面形误差及入射面面形误差所引起的光束附加相位

Fig. 4 Additional phase aberrations induced by errors of dihedral angle, curved reflecting surfaces and curved incidenting surfaces respectively

图 4 中,  $w_1(x, y)$ 、 $w_2(x, y)$ 、 $w_3(x, y)$  分别为二面角偏差 (+1.3'', +1.1'', +1.3'')、反射面面形误差  $N=(0.2, 0.2, 0.2)$ 、入射面面形误差  $N=0.5$  所产生的附加相位。

角锥棱镜安装在高速运行的低轨卫星上, 使

$$E(x, y) = \frac{\exp(ikz_1)}{i\lambda z_1} \iint_{\Sigma} E(x_1, y_1) \exp\{ik[\omega_1(x_1, y_1) + \omega_2(x_1, y_1) + \omega_3(x_1, y_1)]\} \exp\left\{\frac{ik}{2z_1}[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

式中:  $E(x_1, y_1)=1$ , 为入射平面光波的振幅分布;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数,  $\lambda$  为光波长,  $k = 532 \text{ nm}$ ;  $w_1(x_1, y_1)$ 、 $w_2(x_1, y_1)$ 、 $w_3(x_1, y_1)$  分别为二面角误差、反射面面形误差及入射面面形误差所引起的光束附加相位;  $z_1$  为测站至卫星之间的距离,  $(x, y)$  为地面接收系统所在平面的直角坐标,  $(x_1, y_1)$  为卫星激光合作目标所在平面的直角坐标,  $\Sigma$  为孔径积分域。

根据基尔霍夫衍射公式, 将入射到角锥棱镜底面的光波看作是平面光波, 假设其振幅  $E(x_1, y_1)=1$ , 图 5 给出了远场衍射光强分布。由图 5 可知, 在角直径约为  $22''$  的范围内有光强分布, 能够覆盖低轨立方体卫星的最大光行差。因此, 通光口径为  $10 \text{ mm}$  的微小角锥棱镜能够满足低轨立方体卫星的速差补偿需求。

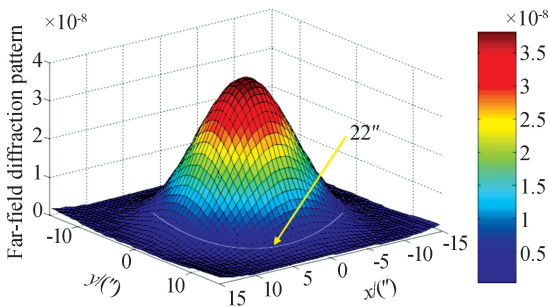


图 5 角锥棱镜的远场衍射分布图

Fig. 5 Far-field diffraction pattern of cube corner retroreflector

## 2.4 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的通光口径及其分布方式。立方体卫星具有对称性, 以立方体卫星的几何中心为坐标原点,  $x$  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 6 所示。

得反射回的光束方向相对于入射光速方向产生一个速差角。根据速差公式<sup>[11]</sup> 计算低轨立方体卫星的最大光行差约为  $11''$ , 根据出射波相位及衍射强度计算的数学模型<sup>[11-12]</sup>, 在正入射条件下激光合作目标的远场衍射场为:

对于单个激光合作目标, 通光口径为  $D$ , 激光正入射时, 反射面积为  $\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2$ 。激光合作目标安装在高速运行的卫星上, 不能保证激光总是正入射, 因此, 相对有效反射面积是激光入射角  $i_0$  的函数。当激光以  $i_0$  斜入射时, 归一化相对有效反射面积公式为<sup>[13-14]</sup>:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \left( \arcsin \sqrt{1-2 \tan^2 i} - \sqrt{2} \tan i \sqrt{1-2 \tan^2 i} \right) \cos i_0, \quad (2)$$

式中:  $i = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin i_0\right)$ , 为光线折射角;  $n = 1.461$ , 为石英材料的折射率;  $\eta$  是相对有效反射面积, 取值在  $0 \sim 1$ 。激光反射器的总有效反射面积为各个角反射器的相对有效反射面积之和。

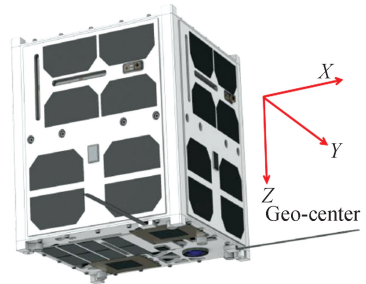


图 6 立方体卫星坐标系定义

Fig. 6 Definition of CubeSat coordinate system

在图 6 所示的坐标系下, 根据立方体卫星激光反射器的排布方式及相对有效反射面积的计算公式, 图 7 给出了在单个角锥棱镜的相对反射面积取 1 时激光反射器相对有效反射面积的等高线分布图。其中, 同心圆虚线表示激光入射角的等高线 ( $0 \sim 90^\circ$ , 间隔为  $20^\circ$ ), 最外围表示方位角的等高线 ( $0 \sim 360^\circ$ , 间隔为  $30^\circ$ )。激光合作目标分布在卫星立方体结构的 6 个表面, 由图 7 可知, 每个表面分布的反射器可对任何角度的激光进

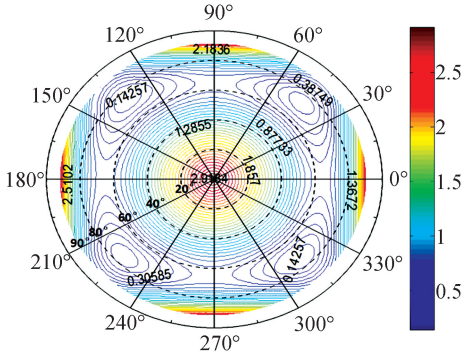


图 7 立方体卫星的相对有效反射器面积分布

Fig. 7 Distribution of CubSat's relative effective reflection area

行有效反射,即能够对地面处于不同方位的激光测距站的激光进行有效反射。

立方体卫星的反射器分布在卫星的各个表面,由于具有对称性,激光合作目标的视场角达到 360°。无论卫星处于何种姿态,均能对激光信号进行有效反射,因此在立方体卫星完成任务成为空间碎片后,仍能采用 SLR 技术对它进行有效的观测。

### 2.5 激光回波光子数估算

激光回波光子数决定着激光测距的能力,是卫星激光反射器非常重要的一项性能指标<sup>[14]</sup>。本文利用我国自主研制的新一代流动卫星激光测距系统 TROS1000<sup>[15-17]</sup> 估算立方体卫星的激光测距回波光子数。

激光测距的雷达方程如下:

$$N_s = \frac{16 \cdot E \cdot S \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta \cdot \alpha}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t \cdot \theta_s} \quad (3)$$

式中: $N_s$  为激光回波在接收器件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,对于 532 nm 波长的激光  $S=2.67 \times 10^{18}$ ; $A_s$  为激光反射器的有效反射面积; $A_r=0.75 \text{ m}^2$ ,为接收系统面积; $K_t$  为激光发射系统的效率,取值为 0.8; $K_r$  为接收光学系统的效率,取值为 0.8; $T^2$  为双程大气透过率,仰角为 20°时  $T^2=0.2$ ; $\eta=0.2$ ,为单光子雪崩二极管的量子效率; $\alpha=0.05$ ,为衰减因子(大气抖动等引起的激光能量损耗); $R$  为卫星到测站之间的距离; $\theta_t=15''$ ,为激光光束发散

角; $\theta_s=30''$ ,为卫星激光反射器的发散角。

立方体卫星一般在 250~1 000 km 的轨道上,在卫星仰角为 20°时估算  $N_s$ 。地面接收站单光子接收系统中光电转换产生的光电子数服从泊松分布<sup>[18]</sup>,即有:

$$P(n, N_s) = \frac{N_s^n}{n!} e^{-N_s} \quad (4)$$

由于 TROS1000 流动激光测距系统的激光发射频率及光电探测频率为千赫兹,因此理论上每秒钟可接收  $N=1\,000 \times P(n, N_s)$  个激光回波信号。

表 2 为立方体卫星在不同轨道高度下理论上能够产生的有效回波信号数量。在轨道高度为 1 000 km 时,理论有效回波数达每秒 33 个,由此可知,立方体卫星激光合作目标在 250~1 000 km 的轨道上能够提供足够的有效回波光子数。

表 2 不同轨道高度下激光回波数估算

Tab. 2 Estimation of laser echoes at different orbital altitudes

| 轨道高度  | 卫星斜距  | 有效反射面积/m <sup>2</sup> | 光电子数  | 回波信号数/S <sup>-1</sup> |
|-------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|
| 250   | 529   | $9.66 \times 10^{-5}$ | 7.76  | 999                   |
| 500   | 1 192 | $7.54 \times 10^{-5}$ | 0.539 | 416                   |
| 800   | 1 767 | $6.36 \times 10^{-5}$ | 0.094 | 89                    |
| 1 000 | 2 119 | $4.71 \times 10^{-5}$ | 0.033 | 33                    |

## 3 激光测距合作目标测距误差预估

### 3.1 质心误差改正概率模型

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交点作为光学中心<sup>[19]</sup>,如图 8 所示。不同的激光入射角会导致距离更正值有所差距,图 8 中 A 为激光入射点, $C_{opt}$  为光学中心,立方体卫星的角锥棱镜分布在表面,光学中心与几何中心重合,建立坐标系如图 6 所示,质心改正公式<sup>[20]</sup>如下:

$$R(i) = R_s \cos i - L \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \quad (5)$$

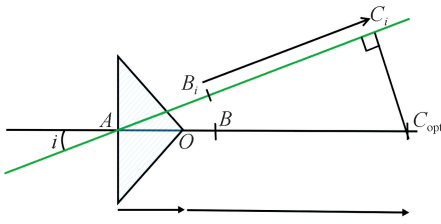


图 8 质心改正模型示意图

Fig. 8 Correction for Com model of optical mass center

其中： $i$  为激光入射角； $R_s = 50 \text{ mm}$ ，为立方体卫星表面到几何中心的距离； $L = 7 \text{ mm}$ ，为角反射器的正高； $n = 1.461$ ，为角锥棱镜材料的折射率。 $R(i)$  的平均值就是质心的改正值，多个角锥棱镜能够在同一角度反射光子，且每个角锥棱镜的反射概率为  $S_k$ ，则在同一角度下的质心改正值为：

$$\langle \Delta R \rangle = \frac{\sum_k S_k \cdot \Delta R_k}{\sum_k S_k} \quad (6)$$

立方体卫星激光合作目标分布在卫星立方体结构的 6 个表面。由卫星距离改正值分布图 9 可知，激光从不同的角度入射其距离改正值不同，质心误差改正值不会超过 9 mm，不同激光入射角度的距离改正标准偏差约为 3 mm。

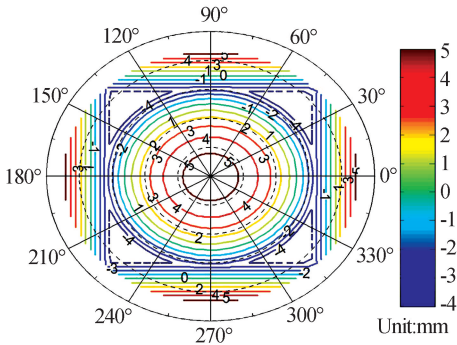


图 9 立方体卫星距离改正值分布

Fig. 9 Distribution of CubSat's range correction value

卫星激光测距通过精确测定激光信号从观测站至卫星之间的往返时间间隔，进而精确测量卫星和测站之间的距离。时间间隔是由主波开启计时，回波停止计时。激光测距误差来源主要有测距系统仪器的测量误差、卫星反射器误差、系统延迟测量误差和气象参数采集及大气修正模型误差，这些误差的组成及数值估计如表 3 所示。

表 3 激光测距误差分析

Tab. 3 Analysis of measuring errors for satellite laser ranging system (mm)

| 误差源             | 偶然误差 | 系统误差    |
|-----------------|------|---------|
| 测距系统仪器误差        | ~8.0 |         |
| 激光脉宽            | ~4.5 |         |
| 时间间隔测量(TDC502)  | ~3.2 |         |
| 起始信号探测(PIN)     | ~3   |         |
| 回波信号探测(C-SPAD)  | ~5   |         |
| 频标误差(HP58503A)  | ~0.4 |         |
| 立方体卫星(cubeSat)  |      | ~3      |
| 系统延迟测量误差        |      | ~2.2    |
| 地靶距离标定误差(近地靶)   |      | ~1      |
| 地靶常规标校误差        |      | ~2      |
| 气象参数采集及大气修正模型误差 |      | ~3~10   |
| 综合测距误差          |      | ~9.3~13 |

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量化的误差项，也将影响到激光测距结果<sup>[21-22]</sup>。

### 4 激光测距试验

我国于 2015 年 9 月 20 日 7 时 01 分“长征六号”运载火箭一次性将 20 颗微小卫星成功送入轨道。其中 3 颗皮卫星如图 10 所示，它们由航天东方红卫星有限公司研制，其主要目标是探测轨道空间的大气密度。皮卫星的结构尺寸为 245 mm × 245 mm × 243 mm，质量约为 5 kg，运行周期为

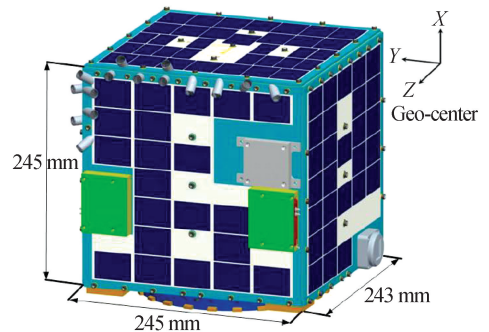


图 10 皮卫星结构示意图

Fig. 10 Structural profile of pico-satellites

1年,中国地震局地震研究所根据皮卫星的应用需求及皮卫星对激光反射器体积和质量的苛刻限制,在皮卫星的侧面和对地面共分布了15个通光口径为1.0 cm的微小激光合作目标,其具体分布方式参见文献[23]中的表1。在卫星发射升空,顺利进入预定轨道、经过姿态调整具备卫星激光测距的条件后,2015年12月19日TROS1000流动人工激光测距系统在山东荣成对皮卫星进行了卫星追踪和激光测距试验,并顺利接收到激光回波信号。图11为皮卫星激光合作目标激光测距试验接收到的回波,其横坐标为时间,纵坐标为实际测得的数据与预报数据之间的残差数据O-C,图中每个点表示信号探测装置开启后接收到的噪声和信号,连接线是有效回波信号,离散的点表示噪声。

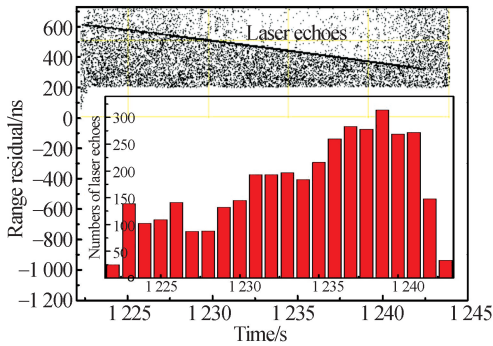


图11 皮卫星激光回波数据

Fig. 11 Laser echoes of pico-satellites

这圈观测时间弧段长为0.35 min,总共3 808个点,根据卫星激光测距数据测量精度评估方法<sup>[14]</sup>,其激光测距精度为1.2 cm。图11中柱状图为对每秒皮卫星激光回波的统计结果,在观测期间其回波数最大值为314/s。激光测距试验验证了通光口径为1.0 cm的微小激光合作目标能够提供足够的回波光子数。

## 5 结 论

人工激光测距技术是目前空间大地测量技术中精度最高的一种,已在导航卫星、地球动力学卫星及对地观测卫星等领域得到了广泛的运用。对于低轨立方体卫星,受限于体积和重量的限制,阻碍了激光合作目标在立方体卫星上的应用。考虑到微小激光合作目标作为一种被动式光学器件,极易被安置在卫星表面,且根据立方体卫星的结构特性,在各个表面安置3个微小激光测距合作目标,此类分布方式可以保证立方体卫星在250~1000 km的轨道上提供充足的激光回波信号,测距精度可达厘米级,且在卫星完成任务成为空间碎片后仍然能够用人工激光测距技术对其实施激光测距。此类微小激光合作目标不仅会在卫星轨道精密定轨方面发挥重要作用,还对今后卫星激光反射器的设计具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] 廖文和. 立方体卫星技术发展及其应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(6): 792-797.  
LIAO W H. A survey of CubeSat technology development and applications [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2015, 47(6): 792-797. (in Chinese)
- [2] 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.  
GONG D. Review on mapping space remote sensor optical system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 714-724. (in Chinese)
- [3] 陈雪芹, 耿云海, 王峰, 等. 敏捷小卫星对地凝视姿态跟踪控制[J]. 光学精密工程, 2015, 20(5): 1031-1040.  
CHEN X Q, GENG Y H, WANG F, et al.. Star-

- ing imaging attitude tracking control of agile small satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 20(5): 1031-1040. (in Chinese)
- [4] 谢长熊, 徐月同, 夏晨晖, 等. 皮卫星及其星箭分离机构的热-结构耦合与间隙设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1800-1807.  
XIE CH X, XU Y T, XIA CH H, et al.. Design of clearance fit between Pico-satellite and its separation mechanism based on thermal-structure coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1800-1807. (in Chinese)
- [5] 李林, 王栋, 谭陆洋, 等. 微小卫星星敏传感器支架的优化设计与试验[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1352-1358.  
LI L, WANG D, TAN L Y, et al.. Optimization design and test for bracket of star sensor in micro-satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6):

- 1352-1358. (in Chinese)
- [6] 赵志明, 施思寒, 孙骥, 等. 希望-2 卫星及在轨应用[J]. 国际太空, 2016(3): 7-11.  
ZHAO ZH M, SHI S H, SUN J, *et al.*. Hope-2 satellite and its in-orbit application [J]. *Space International*, 2016(3): 7-11. (in Chinese)
- [7] 衷路萍, 邹贤才, 吴林冲, 等. 利用 SLR 检核 GOCE 卫星精密轨道[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(8): 719-722.  
ZHONG L P, ZOU X C, WU L CH, *et al.*. Evaluation of GOCE precise orbit using SLR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(8): 719-722. (in Chinese)
- [8] 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.  
LUO Q SH, GUO T Y, LI C X, *et al.*. Study of corner cube prism processing technology [J]. *Optical Technique*, 2015, 41(6): 520-523. (in Chinese)
- [9] 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.  
HUANG J, XIAN H, JIANG W H, *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)
- [10] 刘万里, 欧阳健飞, 曲兴华. 激光光束入射角度变化对角锥棱镜测量精度的影响[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 286-291.  
LIU W L, OUYANG J F, QU X H. Effect of incident laser beam angle varying on cube corner retro-reflector measurement accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 286-291. (in Chinese)
- [11] 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, 2009, 29(1): 60-66.  
ZHOU H, LI S, ZHENG G X, *et al.*. Influence of satellite retroreflector precision on far-field diffraction pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 60-66. (in Chinese)
- [12] 聂辉, 翁兴涛, 李松. 角锥棱镜的远场衍射特性[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1470-1474.  
NIE H, WENG X T, LI S. The far-field diffractive characteristics of cube-corner prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1470-1474. (in Chinese)
- [13] 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): 268-273.  
LUO Q SH, GUO T Y, YAO Y SH, *et al.*. Analysis of laser retro-reflector on GRACE gravity satellite [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 268-273. (in Chinese)
- [14] 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.  
ZHANG H F, CHENG ZH E, LI P, *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)
- [15] 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.
- [16] WANG P Y, ZHU W, ZOU T, *et al.*. A correction method of encoder bias in satellite laser ranging system [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2013, 4(3): 61-64.
- [17] WANG P Y, GUO T Y, GAO H, *et al.*. Key technologies implementation of high-repetition-rate satellite laser ranging [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2013, 4(1): 51-54.
- [18] 张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 高精度千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果[J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1177-1183.  
ZHANG ZH P, ZHANG H F, WU ZH B, *et al.*. kHz repetition satellite laser ranging system with high precision and measuring results [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(15): 1177-1183. (in Chinese)
- [19] 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.  
ZHANG ZH P, ZHANG H F, DENG H R, *et al.*. Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescopes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0102002. (in Chinese)
- [20] 赵群河, 王小亚, 何冰, 等. 卫星激光反射器质心改正的概率模型[J]. 测绘学报, 2015, 44(4): 370-376.  
ZHAO Q H, WANG X Y, HE B, *et al.*. Probability model of center-of-mass calibration of

satellites' retro-reflectors used for laser ranging [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(4): 370-376. (in Chinese)

- [21] 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]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(2): 367-370.

LI X, WANG P Y, ZOU T, *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. (in Chinese)

- [22] 翟东升, 汤儒峰, 李祝莲, 等. 激光脉冲特性对漫反射激光测距系统精度的影响研究[J]. *天文研究与技术*, 2016, 13(3): 326-332.

ZHAI D SH, TANG R F, LI ZH L, *et al.*. A study into laser pulse's impact on the precision and accuracy of the diffuse laser ranging system [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2016, 13(3): 326-332. (in Chinese)

- [23] 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]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(2): 021002.

LUO Q SH, GUO T Y, ZOU T, *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)

#### 作者简介:



**罗青山**(1984—),男,湖北襄阳人,博士研究生,工程师,2008年于邢台学院获得学士学位,2011年于河北大学获得硕士学位,主要从事人卫激光测距技术及地震观测技术方面的研究。E-mail: luodashan@126.com

#### 通讯作者:



**郭唐永**(1957—),男,湖北鄂州人,研究员,博士生导师,1982年于华中科技大学获得学士学位,1986年于上海技术物理研究所获得硕士学位,主要从事人卫激光测距技术及地震观测技术方面的研究。E-mail: guoty9@gmail.com

#### 导师简介:



**姚运生**(1962—),男,湖北武汉人,研究员,博士生导师,1983年于武汉地质学院获得学士学位,1990年于中国地质大学获得硕士学位,2003年于中国地震局工程力学研究所获得博士学位,现为中国地震局地震研究所所长,主要从事防灾减灾工程及防护工程方面的研究。E-mail: yunsheng@eqhb.gov.cn