# 激光主动照亮地影中空间目标实验研究

张海峰 张忠萍* 秦 思 李 朴 吴志波 于 涌
（中国科学院上海天文台，上海 200030）

**摘要** 对于低轨道空间目标，易受到地影影响，使地面光学测量系统无法实现对地影目标光学观测，影响目标光学观测弧段和数据量。激光照亮技术为主动探测，利用地面激光跟踪与测量系统，向地影中目标发射激光束，望远镜及电荷耦合器件(CCD)相机接收目标返回的激光信号，达到 CCD 探测阈值，获取目标图像信息。采用了 532 nm 波长激光作为地面光源，开展对地影中带激光反射器卫星激光主动照亮，验证技术方法可行性。根据地面系统参数，理论分析了 CCD 的激光回波信号信噪比、卫星激光照亮星等。利用图像灰度对比法，获得了实验中所照亮卫星的视星等，并与理论计算结果进行了比较，验证了理论与实验方法的合理性。

**关键词** 激光光学；激光主动照亮；地影空间目标；照亮星等
**中图分类号** P123.1 **文献标识码** A **doi**：10.3788/CJL201441.s108003

# Experimental Study on Laser Active Illumination to Space Targets within the Shadow of Earth

Zhang Haifeng Zhang Zhongping Qin Si Li Pu Wu Zhibo Yu Yong
(*Shanghai Astronomical Observatory*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 200030, *China*)

**Abstract** Low earth orbit space targets is more impressionable to the shadow of earth, which makes the ground optical observation system unable to realize the optical observation and posts the influences on the optical measurement data. As the active detection technology, laser active illumination is to use laser track and observation system on ground and transmit the laser beam to space targets within the shadow of earth. The receiving telescope and charge coupled devices (CCD) camera on ground receive and detect the laser echoes from targets and obtain the images if the requirements of CCD detecting threshold is meet. The laser signal with 532 nm wavelength is adopted as the light sources and the observations of laser active illumination to artificial satellites with the retro-reflectors within the shadow of earth are successfully implemented to validate the feasibility of measurement technology. According to the parameters of laser track and observation system on ground, the theoretical analysis of the signal noise ratio of CCD and the magnitude of illuminated satellites are also performed. Based on the image processing method of gray correlation, the measured magnitude of laser illumination to satellites is obtained and compared to the results of theoretical calculation, which verifies the rationality of theoretical and experimental methods.

**Key words** laser optics; laser active illumination; space targets within the shadow of earth; magnitude of illuminating satellites
**OCIS codes** 120.1880; 100.2000; 040.1520; 350.1260

## 1 引 言

空间目标观测中，在轨姿态精确测定方法是一项重要的研究课题，它有利于掌握空间目标运行状态、故障航天器在轨捕获与维修等空间活动的有效开展。目前基于光学观测技术，发展了多种空间目标姿态测量方法[1-3]，在保证空间目标在轨正常运行中发挥了重要作用。众所周知，绝大多数在轨空间目标自身不发光，依赖于反射太阳光而被地基光学测量系统跟踪和观测。空间目标在绕地球运行过程中，由于地球阴影(又称地影)的存在，使得目标部分轨道弧段处于地

**收稿日期**：2013-10-20；**收到修改稿日期**：2013-11-29
**基金项目**：天文财政专项(类别Ⅲ)、国家自然科学基金天文联合基金(U1231107)、上海市空间导航与定位技术重点实验室(06DZ22101)
**作者简介**：张海峰(1981—)，男，硕士，工程师，主要从事卫星激光测距技术与应用方面的研究。E-mail：hfzhang@shao.ac.cn
* **通信联系人**。E-mail：zzp@shao.ac.cn

影中，此时无法接收到太阳光谱信号，导致目标“全黑”，从而使地面光学跟踪与测量系统无法进行目标测量和开展相关观测实验研究。相比而言，低轨道目标弧段处于地影的机会更多，地面光学跟踪测量系统可观测的时间段通常集中在太阳落下地平线后和出地平线前各 2～3 h[4]，其余时段目标弧段基本处于地影或白天。因而，研究一种可延长目标光学观测弧段技术，提高地面光学跟踪测量系统利用率，这对增加目标观测数据量、改善目标定位精度、研究测定目标在不同弧段的运行姿态等具有重要作用。

地面光电跟踪测量系统根据有无照明光源分为主动探测和被动探测。传统地面光电探测系统为被动测量系统，依赖于目标反射太阳光进行观测，其辐照强弱直接影响地面测量系统探测能力。激光信号具有亮度高、准直性、单色性、相干性好等特点，使其成为了一种理想照明光源。基于地面激光跟踪与测量系统，向空间目标主动发射激光，将目标全部或关键部位照亮，并配合相应激光探测控制方法[5]，以满足地面接收系统的探测要求，进而实现对空间目标激光主动照亮。该技术不仅可以增加被测目标亮度，还可使地面光学测量系统实现对地影中目标的观测及实验研究。国内外早已开展了激光主动照亮和成像技术研究，并研制出多种激光主动成像系统，已在实际工程得到成功应用[6-8]。

基于中国科学院上海天文台 60 cm 口径卫星激光测距(SLR)系统，采用 532 nm 波长绿色激光信号作为照亮光源，在接收终端配备电荷耦合器件(CCD)相机，对地影中空间目标进行激光主动照亮，使 CCD 相机探测到卫星反射激光信号所产生的亮度信息，实现对地影中卫星的光学测量。通过本次实验，验证本文所采用的激光照亮空间目标的理论与实验方法的可行性，为该技术在空间目标光学观测技术领域的进一步研究和发展提供了一定的参考。

## 2　激光回波光子数密度和目标照亮视星等估算

激光主动照亮目标视星等与目标返回的激光回波光子数密度密切相关。由于空间非合作(无激光反射器)目标对激光进行表面漫反射，激光回波光子数少，对这些目标开展激光主动照亮实验，则需采用高功率激光器、大口径望远镜及高性能 CCD 等，且目标轨道预报精度不高，对地影中目标搜索较为困难，难以用于验证本文所采用的激光主动照亮理论与实验方法的可行性。受限于上海天文台 SLR 系统参数，本文选取了几颗带有激光反射器人造卫星为观测目标，其轨道预报精度高，易于实现对地影中目标进行搜索和开展激光主动照亮实验研究。

### 2.1　卫星激光回波光子数密度

根据激光雷达方程、地面测量系统参数、卫星距离及反射截面积等，可估算地面望远镜接收口径处的激光回波光子数。对带有激光反射器卫星，采用光子探测方式的激光测距雷达方程如下[9]：

$$n_s = \eta_q \left(E_T \frac{\lambda}{hc}\right) \eta_t G_t \sigma \left(\frac{1}{4\pi R^2}\right)^2 A \eta_r T_a^2 \alpha, \quad (1)$$

式中 $n_s$ 为地面望远镜接收到的单次脉冲回波光子数，$\eta_q$ 为光子探测器量子效率，$E_T$ 为地面激光单脉冲能量，$\lambda$ 为激光波长(532 nm)，$h$ 为普朗克常量($6.6260693\times10^{-34}$ J·s)，$c$ 为光速(299792458 m/s)，$\eta_t$ 为激光发射系统效率，$\sigma$ 为卫星激光反射器截面积，$A$ 为地面系统有效接收面积，$\eta_r$ 为地面激光接收系统效率，$T_a^2$ 为激光在大气中的透射率(双程)，$\alpha$ 为大气湍流衰减因子，$G_t$ 为地面激光发射系统增益 $G_t=8/\theta_t^2\times\exp[-2(\theta/\theta_t)^2]$，其中 $\theta_t$ 为地面发射的激光发散角(半角)，$\theta$ 为激光指向误差。通常情况下，激光束指向误差(约 1″)相比激光发散角(10″～15″)小很多，此时地面激光发射系统增益可近似表示为 $G_t\approx8/\theta^2$。根据上述激光测距雷达方程，可计算每秒钟地面望远镜接收口径处(未经过望远镜接收光学系统和光子探测器)激光回波光子数如下：

$$n'_s = \left(E_T \frac{\lambda}{hc}\right) \eta_t \frac{8}{\theta^2} \sigma \left(\frac{1}{4\pi R^2}\right)^2 A T_a^2 \alpha f, \quad (2)$$

式中 $f$ 为地面激光发射频率，则地面望远镜接收口径处的激光回波光子密度 $N_s$[e/(m²·s)]：

$$N_s = \frac{n'_s}{A} = \left(E_T \frac{\lambda}{hc}\right) \eta_t \frac{8}{\theta^2} \sigma \left(\frac{1}{4\pi R^2}\right)^2 T_a^2 \alpha f. \quad (3)$$

对于上海天文台 SLR 系统，激光器重复频率 1 kHz，单脉冲能量 $E_t$ 大于 1.0 mJ，发散角(全角)取 10″，即 $\theta$ 为 5″，激光发射系统效率 $\eta_t$ 取 0.6，双程大气透射率 $T_a^2$ 取 0.2，大气湍流衰减因子 $\alpha$ 取 0.05。本文所选取的卫星为欧洲 Envisat、美国 BeaconC 及日本 Ajisai，作为此次技术方法实验验证的测量目标。其中 Envisat 为资源卫星，激光反射器由九个角锥棱镜组成的八棱台阵列，BeaconC 和 Ajisai 为地球动力学卫星，表面布满角锥棱镜[10]，无其他仪器设备，如图 1 所示。

图 1 Envisat、BeaconC 和 Ajisai 卫星及其激光反射器阵列

Fig. 1 Reflector array of Envisat, BeaconC and Ajisai satellites

表 1 给出了 Envisat、BeaconC 及 Ajisai 卫星在采用上述系统参数后，地面望远镜接收口径处的激光回波光子数密度。

表 1 Envisat、BeaconC 和 Ajisai 卫星激光回波光子密度

Table 1 Density of laser echoes from Envisat, BeaconC and Ajisai satellites

| Satellite | Laser energy ($E_t$) per shot /mJ | Cross section $\sigma$ /m$^2$ [11] | Range /km | $N_s$[e /(m$^2$·s)] |
|---|---|---|---|---|
| Envisat | ~1.3 | $0.3\times10^6$ | 980 | 495682 |
| BeaconC | ~1.0 | $3.6\times10^6$ | 1600 | 761036 |
| Ajisai | ~1.0 | $12\times10^6$ | 1800 | 1583698 |

## 2.2 激光主动照亮的卫星视星等估计

天文学上定义零视星等在地球大气层外的照度 $E_0=2.65\times10^{-6}$ lx。根据两个光亮度相差 100 倍的星体，其相差 5 个视星等的定义，即相差一个视星等，其亮度相差 $100^{1/5}\approx2.512$ 倍[12]，则视星等为 $m$ 的星体所产生的照度为：

$$E_m = E_0\times10^{-m/2.512} = 2.65\times10^{-6}\times10^{-m/2.512}. \tag{4}$$

若已知目标照度 $E_m$，则可计算目标的星等为：

$$m = 2.512\lg\left(\frac{E_0}{E_m}\right) = 2.512\lg\left(\frac{2.65\times10^{-6}}{E_m}\right). \tag{5}$$

根据光度学上定义，光照度是通过发光物体或照射物体单位面积上的光通量，而光通量是描述单位时间内光源辐射或辐照所产生的视觉响应强弱的能力，是根据人眼对光的响应程度而定义的量，其单位为“流明”。另外，光通量也是描述光源发光总量或照射物体光总量的大小，与光功率等价，其量纲也可表示为瓦特(W)，即单位时间内通过某一截面的辐射能。流明和瓦特有着一定的对应关系，而此对应关系又取决于人眼对不同颜色光的感觉。这就引入了视见函数 $V(\lambda)$ 的概念[13]，表示人眼对光的敏感程度随波长变化的关系。人眼对波长 555 nm 光最为敏感，此时 1 W 相当于 683 lm，并将此波长的视见函数 $V(\lambda=555\ \text{nm})$ 定为 1，其他波长的视见函数都小于 1。对不同波长的光，1 W 的光功率相当于 $V(\lambda)\times683$ lm。图 2 给出了不同波长视见函数 $V(\lambda)$ 变化情况，其中对于 532 nm 波长的激光，其视见函数 $V(\lambda=532\ \text{nm})$ 约为 0.8804。

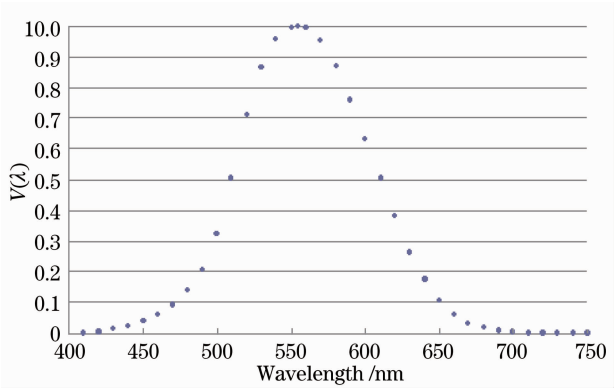


图 2 不同波长的视见函数

Fig. 2 Visual function with different wavelengths

根据 2.1 节计算的卫星激光回波光子密度，其对应的辐射能为 $N_s\times hv\times A_r$(W)或光通量为 $0.8804\times683\times N_s\times hv\times A_r$(lm)，则对应的光照度 $E=0.8804\times683\times N_s\times hv\times A_r/A_r=0.8804\times683\times N_s\times hv$ (lx)。根据(5)式，可计算出在卫星处于地影时，经地面激光主动照射后，得到的相对于地面的视星等。表 2 给出了地影中 Envisat, BeaconC 和 Ajisai 卫星经上海天文台 SLR 系统激光主动照射后，相对于地面的视星等的理论计算结果。

上述理论计算过程中，由于系统某些参数，比如激光能量波动、实际传输距离、大气透射率、大气衰减因子等，理论计算中所采用的估计值可能与实际

测量系统略有差别，使得视星等理论计算结果与实际测量结果存在一定差异。

表 2　Envisat、BeaconC 和 Ajisai 卫星激光主动照亮相对于地面的视星等

Table 2　Magnitude on ground of Envisat, BeaconC and Ajisai satellites by laser active illumination

| Satellite | $N_s$[e /( m$^2$·s)] | Luminous flux /($10^{-10}$ lx) | Magnitude |
|---|---|---|---|
| Envisat | 495682 | 1.1129 | 10.99 |
| BeaconC | 761036 | 2.2120 | 10.53 |
| Ajisai | 1583698 | 3.5558 | 9.73 |

## 3　CCD 相机信噪比分析

激光主动照亮空间目标实验中，激光接收终端的探测器为 CCD 相机。从目标所反射的激光回波光子能否在 CCD 上呈现星象，主要取决于所探测的激光回波光子数与 CCD 本底噪声数之间比例关系，即信噪比。当信噪比大于 CCD 最低信噪比时即可呈现目标星象，反之激光信号将被淹没在噪声信号中，无法呈现目标图像。从 CCD 相机信噪比出发，与 2.1 节中所计算的激光回波光子数比较，进而验证本次激光主动照亮卫星实验方法的可行性。

本次实验选用了日本 WATEC 公司研制的 WAT-120N＋工业型相机，如图 3 所示，主要由 CCD 器件、控制盒、光机接口等组成，具有图像记忆功能，可选择高速或低速电子快门，曝光时间多档可调，最低探测光照度为 0.00002 lx(F1.4)。

图 3　WAT-120N＋型号 CCD 相机

Fig. 3　WAT-120N＋ CCD camera

该 CCD 相机安装在望远镜接收终端内，接收视场约 7″，探测从卫星返回的激光信号，会聚于 CCD 光敏面，在驱动电路所提供的驱动脉冲作用下，CCD 完成光电荷转换、存储、转移和读取过程，将二维光学信息转换为一维电信号。然后进行视频信号合成，将 CCD 输出电信号转换为标准格式视频信号输出。其主要性能参数见表 3 所示[14]。

表 3　WATEC CCD 相机主要性能参数

Table 3　Main parameters of WATEC CCD

| | | |
|---|---|---|
| Pick-up element | | 1/2″ interline transfer CCD image sensor |
| CCD Chip | | Sony ICX419ALB |
| Total number of pixels | | 795(H)×596(V) |
| Number of effective pixels | | 752(H)×582(V) |
| Unit cell size | | 8.6 μm(H)×8.3 μm(V) |
| Sync. Mode | | Internal |
| Scanning mode | | 2:1 Interlace |
| Exposure time | HIGH | OFF(1/50), 1/125,1/250,1/500,1/1000,1/2000 s |
| | LOW | 1,2,4,8,16,32,64,128,256 frame |
| QE@ 400 nm | | 60% |
| Peak QE @ 500 nm | | 95% |
| Video output | | 1Vp-p 75 Ω (Unbalanced) |
| MGC | | 8～38 dB |
| Power supply | | DC＋12 V±10% |
| Current consumption | | Max is 180 mA |
| Operating temperature | | －10 ℃～＋40 ℃ |

对于空间目标，相对于地面台站距离远，在无大气干扰情况下，目标即可认为点光源。而在经过大气和接收光学系统后，点光源在望远镜焦面上扩散成一个圆面，并在 CCD 上占据一定像素数($n\times n$)。假设 CCD 一次曝光时间为 $t$，单位时间内：$n\times n$ 个像素从星象收集到的总光子数为 $S$，天光背景每个像素上积累的光子数为 $B$，每个像素因暗流积累的电荷为 $D$，CCD 每个像素读取噪声为 $N_r$。假如 CCD 量子效率为 $Q$，则一次曝光时间内接收的目标光子数为 $QSt$。CCD 噪声由以下部分组成[15]：

1）信号引起的随机散粒噪 $N_1=\sqrt{QSt}$；

2）每个像素天光背景引起的随机散粒噪声 $N_2=\sqrt{QBt}$；

3）每个像素暗流引起的随机散粒噪声 $N_3=$

$\sqrt{Dt}$；

4）每个像素读出时引起的系统随机噪声 $N_4 = N_r$。

对于各不相干的随机噪声，总噪声数应为上述各部分平方和的均方根值。对于 $n$ pixel×$n$ pixel，一次曝光时间内的总噪声数为：

$$N = \sqrt{N_1^2 + n^2 N_2^2 + n^2 N_3^2 + n^2 N_4^2}. \quad (6)$$

则信噪比 $S/N$ 为：

$$S/N = QSt/\sqrt{N_1^2 + n^2 N_2^2 + n^2 N_3^2 + n^2 N_4^2}. \quad (7)$$

根据 2.1 节获得曝光时间 $t$ 内，地面接收望远镜处激光回波光子数密度 $N_s$，可计算出一次曝光时间内接收到激光回波光子数：

$$S_{signal} = N_s \eta_r A_r t Q, \quad (8)$$

则信号引起的光子随机散粒噪声 $N_1 = \sqrt{N_s \eta_r A_r t Q}$。$n$ pixel×$n$ pixel 接收到天光背景光子数为：

$$N_2 = \sqrt{T_a \eta_r A_r t S_0 \times 10^{-0.4 \times m_{Vsky}} \Delta\lambda \theta^2 \times Q}, \quad (9)$$

式中 $S_0$ 为亮度为零等星在可见光波段（400～700 nm）内每平方米、每纳米、每秒到达地球海平面平均光子数，取 $9\times10^7$ [e/(m$^2$·nm·s)]，$m_{Vsky}$ 为 1 平方角秒天光所对应星等，$\theta$ 为一个像素对天空张角，为$(h/f)\times206265''$，$h$ 为 CCD 像元尺寸（取 8.6 μm），$f$ 为 CCD 位置的望远镜焦距（取3.5 m），则 $\theta$ 约为 0.506″。目标星象所占像素数取决于大气视宁度和望远镜光学成像参数，对于上海天文台 SLR 系统所在站址视宁度和望远镜光学成像参数[15-16]，目标星象所占像素数 $n$ 取 5×5。

实验中，CCD 曝光时间 $t$ 设置为 16 frame 档，等效为 16×1/50 s=0.32 s，量子效率取 0.8，每个像素单位时间内因暗流积累电荷 $D$ 取 0.08[e/(pixel·s)]和读出噪声 $N_r$ 取 5 e/pixel，地面望远镜有效接收面积 $A_r$ 为 0.251 cm$^2$（主镜 60 cm，副镜20 cm），望远镜接收系统效率 $\eta_r$ 为 0.7，大气透射率（单程）$T_a$ 取 0.45，天光背景星等 $m_{Vsky}$ 取 16 等（上海佘山地区）。根据 2.1 节计算的 Ajisai、BeaconC 和 Envisat 卫星激光回波光子数密度，表 4 给出了 CCD 一次曝光时间内接收的激光光子数、噪声数及信噪比。

表 4 激光主动照射 Envisat、BeaconC 和 Ajisai 卫星时的 CCD 信噪比估计

Table 4 Estimated CCD signal to noise ratio of laser active illumination to Envisat, BeaconC and Ajisai satellites

| Satellite | $S_{signal}$/e | $N_{noise}$/e | $S/N$ |
|---|---|---|---|
| Envisat | 22324 | 153 | 146 |
| BeaconC | 34275 | 188 | 182 |
| Ajisai | 71326 | 269 | 265 |

根据上述激光主动照射卫星时的 CCD 信噪比，及 WAT-120N+ CCD 相机的探测特性，采用上述系统参数，经卫星返回的光子数是可以在 CCD 上呈现出目标星象，表明本次开展的激光主动照亮卫星实验在理论上是可行的。

## 4 激光主动照亮地影中卫星实验测量结果及分析

### 4.1 激光主动照亮实验系统

本次测量实验是基于上海天文台 60 cm 口径

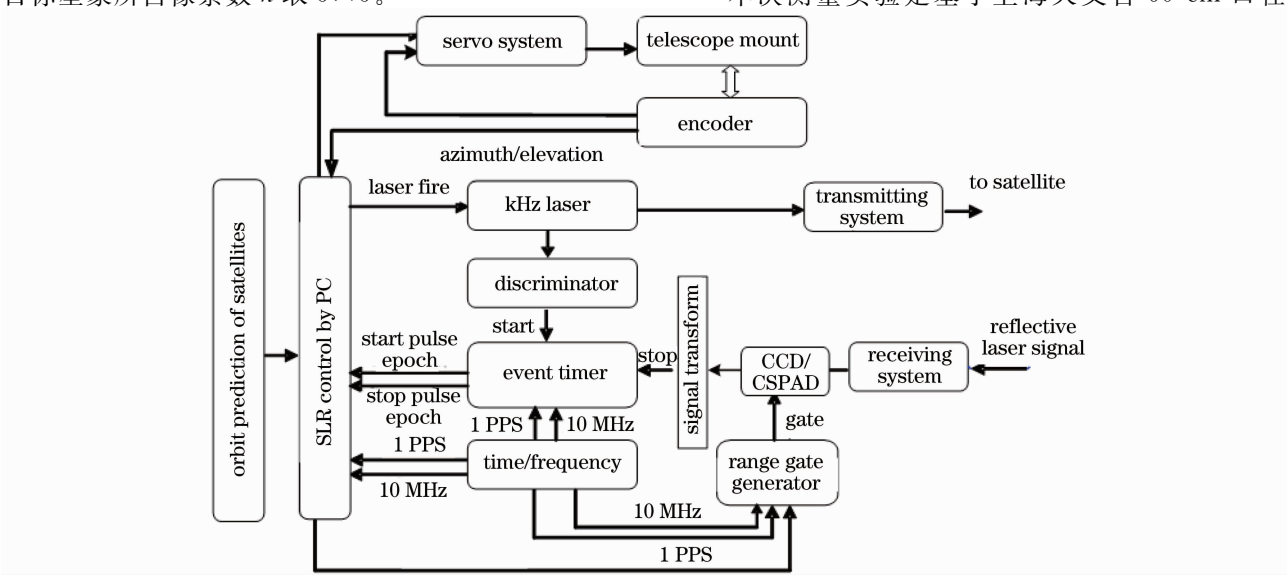


图 4 上海天文台 SLR 系统框图

Fig. 3 Diagram of SLR system of Shanghai Astronomical Observatory

SLR 系统，包括激光器、跟踪望远镜、激光发射和接收、测量控制等，如图 4 所示。激光主动照亮目标实验流程如下：1）根据卫星预报轨道，望远镜精确跟踪地影中卫星；2）设置 CCD 曝光时间；3）激光器向卫星发射激光，调整望远镜和激光束指向，对卫星进行搜索，直到 CCD 上呈现卫星照亮后的图像；4）在卫星照亮时所在的天区，寻找与卫星方位和高度相近的恒星，拍摄其图像信息，用于后续卫星照亮星等计算。为避免亮恒星导致 CCD 饱和，所选择的恒星亮度暗于 5 星等。

### 4.2　激光主动照亮实验结果

利用上述 SLR 测量系统分别在 2012 年 12 月和 2013 年 1 月对 Envisat、BeaconC 和 Ajisai 卫星进行了激光主动照亮实验，实验结果如图 5 所示。

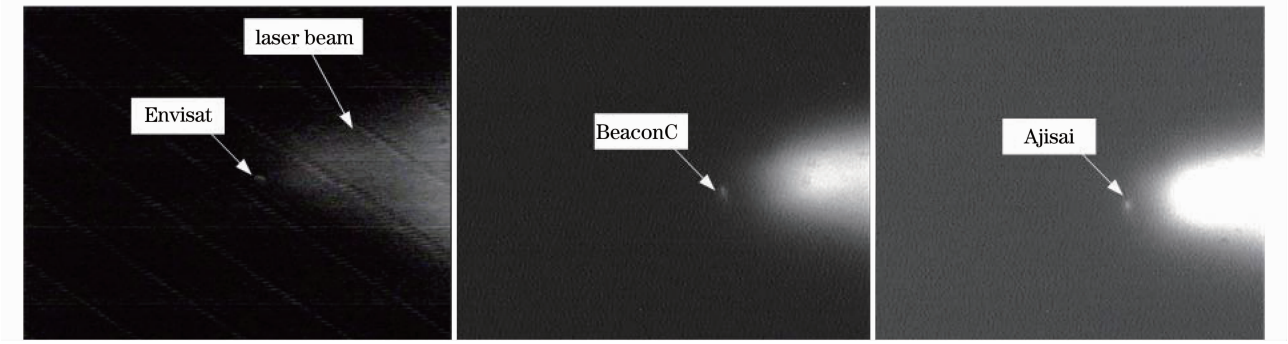


图 5　地面激光主动照亮地影中 Envisat、BeaconC 和 Ajisai 卫星的图像

Fig. 5　Images of laser active illumination to Envisat, BeaconC and Ajisai satellites within the shadow of the earth

为获取激光主动照亮后的卫星视星等，采用了灰度对比法[17]，即在相同条件或状态下，对于同等辐射强度（亮度）的目标或恒星在 CCD 上产生的图像灰度相同，且在 CCD 上图像灰度与照度成线性关系。基于此原理，(5)式中的照度可替换为图像灰度值，表示为

$$m_{\mathrm{B}} - m_{\mathrm{A}} = 2.512\lg(G_{\mathrm{A}}/G_{\mathrm{B}}). \tag{8}$$

假定恒星和卫星图像灰度值分别为 $G_{\mathrm{A}}$ 和 $G_{\mathrm{B}}$，则根据已知恒星视星等 $m_{\mathrm{A}}$，代入(8)式中，即可得到照亮后的卫星视星等 $m_{\mathrm{B}}$。应用 Matlab 软件分别在卫星和恒星图像上设定正方形区域，区域大小取决于目标星象，如图 6 所示。对选定的图像区域，计算像素灰度值的平均值 $B$ 和均方根 $\sigma$，采用“$3\sigma$”判则[12,15]进行图像噪声灰度值计算。以最终迭代收敛时的$(B+3\sigma)$为阈值，对选定区域内像素灰度值进行扣除，得到图像中目标有效灰度值 $G$。

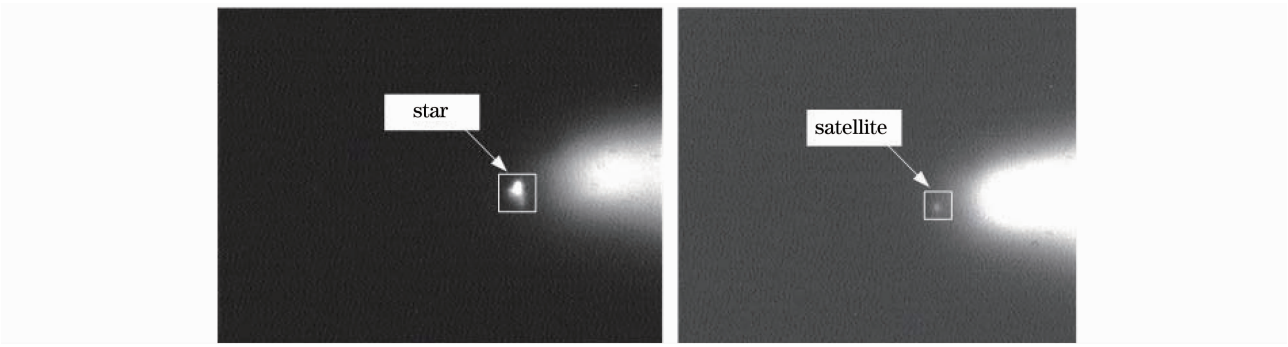


图 6　恒星和卫星图像灰度值计算

Fig. 6　Calculation of image grey of star and satellite

利用上述灰度计算方法，对激光主动照亮的 Envisat、BeaconC 和 Ajisai 卫星图像及对应恒星图像进行处理，获取卫星和恒星图像的灰度值 $G_{\mathrm{A}}$ 和 $G_{\mathrm{B}}$。另外，由于恒星星表中所给出的视星等是大气层外的值，而表 2 中是经过大气后的卫星照亮视星等，故在利用(8)式计算照亮卫星视星等时，需根据恒星仰角对星表中恒星视星等进行大气消光修正，修正量为 $\mathrm{d}M_k(Z)=\mathrm{d}M_k0/\cos Z$[12]，其中 $\mathrm{d}M_k0$ 为天顶处大气消光值（一般为 0.5 星等），$Z$ 为天顶距（仰角余角），即(8)式中的 $m_{\mathrm{A}}$ 需用大气消光修正后的 $m'_{\mathrm{A}}=m_{\mathrm{A}}-\mathrm{d}M_k(Z)$ 代替。本次实验中对三颗卫星激光主动照亮后，通过图像处理获得了相对于地面上的视星等计算结果，如表 5 所示。

上述三颗卫星的实验测量结果与 2.2 节获得的激光照亮理论视星等相差分别为－0.9 等、－0.36 等和－0.24 等，即实际照亮星等偏小于理论计算结

果。由于激光主动照亮卫星视星等理论计算中，大气透过率和衰减因子均为估计量，导致计算结果存在一定误差。上述实验结果验证了本文所采用的激光主动照亮卫星理论与实验方法的合理性。

表 5 Envisat、BeaconC 和 Ajisai 卫星激光主动照亮的视星等实验结果

Table 5 Measured magnitude of laser active illumination to Envisat, BeaconC and Ajisai satellites

| Satellites | Elevation /(°) | Gray value | | Magnitude of star | | Measured magnitude of satellites ($m_B$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Satellites ($G_B$) | Star ($G_A$) | Catalog ($m_A$) | Extinction correction ($m'_A$) | |
| Envisat | 50 | 757 | 78225 | 5.39 | 6.04 | 11.09 |
| BeaconC | 43 | 2033 | 216034 | 5.09 | 5.82 | 10.89 |
| Ajisai | 47 | 4586 | 121153 | 5.74 | 6.42 | 9.97 |

### 4.3 非合作目标激光主动照亮的理论分析

对于地影中空间非合作目标激光照亮，上述理论与实验方法同样适用。非合作目标激光测距雷达方程如下[9]：

$$n_s = \eta_q\left(E_T\frac{\lambda}{hc}\right)\eta_t\sigma\frac{1}{4\pi\theta^2R^4}A\eta_r T_a^2\alpha, \tag{9}$$

式中 $\theta$ 为地面发射的激光发散角(全角)，$\sigma$ 为目标横截面积，其他参数含义与(1)式中的相同，则每秒钟地面望远镜接收口径处的回波光子数密度 $N'_s$：

$$N'_s = \left(E_T\frac{\lambda}{hc}\right)\eta_t\sigma\frac{1}{4\pi\theta^2R^4}T_a^2\alpha f. \tag{10}$$

根据(5)式，假定地面站接收到的激光回波光子数密度降低到原来的 1/20 时，则目标照亮星等数将增加 5 等，即表 2 中的星等将分别变为 15.99 等、15.53 等和 14.73 等。而对于米级以上接收口径望远镜，在应用天文级 CCD 及良好天光观测条件下，上述星等是可以探测到的。

在大气参数和激光发散角相同情况下，对于距离 1000 km、横截面积 1 $m^2$ 非合作目标，假定望远镜接收口径处的激光回波光子数密度降低到表 1 中所述的 1/20 时，根据(3)式和(10)式可计算出所需要的激光器输出功率 $P=E_t f$，为 10～100 kW。在目前的高能激光器发展中，化学、固体和自由电子激光器输出功率已达到数十千瓦到上百千瓦[18]，而激光主动照亮中对地面激光器工作模式未作特定要求，只需与地面激光收发光学系统及 CCD 探测系统相匹配即可，因此用于非合作目标激光主动照亮的地面高功率激光光源是可行的。对于天光观测条件良好的台站，大气透过率和衰减因子的综合效果可使激光回波光子数密度增加 20 倍，则在激光器输出功率不变情况下，激光发散角可扩大约 4.5 倍，即由原来 10″，可增加到 45″，宽激光发散角将有利于轨道预报精度不高的非合作目标搜索。另外，对于大尺寸非合作目标，激光回波数相对较强，再考虑地面跟踪望远镜系统对星等探测能力的提高，可降低激光器输出功率或增加激光发散，进一步利于对非合作目标的搜索捕获。

## 5 结 论

地影中空间目标无太阳光反射，使地面可见光学测量系统无法对其观测，为此提出了激光主动照亮卫星的理论与实验方法。基于上海天文台 60 cm SLR 系统对地影中带有激光反射器的卫星开展了激光照亮实验研究，应用 WATEC CCD 获取了卫星照亮后的图像信息，采用已知视星等恒星图像灰度对比法，经图像处理得到了照亮后的卫星视星等，与理论计算结果基本一致，验证了本文采用的理论与实验方法的合理性。空间目标中绝大部分为无激光反射器的非合作目标，对这些目标精密监测将是航天活动重要的研究课题。基于本次对带有激光反射器合作目标开展的激光照亮实验及研究成果，从理论上定性分析了采用超高功率激光器、大口径望远镜及高性能天文级 CCD 探测系统等，对非合作空间目标主动照亮的可行性，为今后开展非合作目标激光主动照亮技术研究提供了一定的参考。

## 参 考 文 献


1 Hao Gangtao, Du Xiaoping. Advances in optical measurement of position and pose for space non-cooperative target [J]. Laser & Optoeletronics Progress, 2013, 50(8): 080028.
郝刚涛，杜小平. 空间非合作目标位姿光学测量研究现状[J]. 激光与光电子学进展，2013，50(8)：080028.

2 Dai Dongkai, Wang Shengshu, Hu Chunsheng, *et al*.. Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0312005.
戴东凯，王省书，胡春生，等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. 光学学报，2012，32(3)：0312005.

3 Wang Hu, Luo Jianjun, Bai Yu. Optics system design of the middle-wave infrared camera for spatial non-cooperative targets [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): s122001.
王 虎，罗建军，白 瑜. 空间非合作目标中波红外探测相机光学系统设计[J]. 光学学报，2012，32(12)：s122001.

4 Veis G. Optical tracking of artificial satellites[J]. Space Science Reviews, 1963, 2(2): 250－296.

5 Guo Huichao, Sun Huayan, Fan Youchen. Development status of range-gated laser active imaging technology under atmospheric condition[J]. Laser & Optoeletronics Progress, 2013, 50(10): 100004.
郭惠超，孙华燕，范有臣. 大气条件下距离选通激光主动成像技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展，2013，50(10)：100004.
6 Wang Zhi, Yang Jian, Jin Guang. Technology of laser active illuminated imaging[J]. J Changchun University of Science and Technology, 2004,27(2): 31－34.
王　智，杨　简，金　光. 激光主动照明成像技术[J] 长春理工大学学报，2004，27(2)：31－34.
7 Sun Zhihui, Deng Jiahao, Yan Xiaowei. Progress and current state of the development of laser imaging detection system and its key techniques[J]. Science & Technology Review, 2008, 24(3): 74－79.
孙智慧，邓甲昊，闫小伟. 国外激光成像探测系统的发展现状及其关键技术[J]. 科技导报，2008，26(3)：74－79.
8 Larochelle V, Mathieu P, Simard J R. Two generations of canadian active imaging systems: ALBEDOS and ELEVISS[C]. SPIE, 1999, 229: 229－243.
9 Degnan J J. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review [J]. Geodynamics Series, 1993, 25: 133－162.
10 International Laser Ranging Service. Alphabetized List of Current Satellites Tracked by SLR and Theiry Different Identification Schemes, Bin Size and Basic Orbit Information[EB/OL], http://ilrs.gsfc.nasa.gov/missions/satellite_missions/current_missions/index.html.
11 David A A. Cross section of ILRS satellites[C]. ILRS Technical Workshop, Koetzting, Germany, 2003.
12 Huang Kunyi. The Observation of Artificial Satellites by Camera and Data Processing[M]. Shanghai: Science Press, 1982. 182－190.
黄坤仪. 人造卫星的照相观测和资料处理[M]. 上海：科学出版社，1982. 182－190.
13 Yuan Xucang. Applied Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988. 167－168.
袁旭沧. 应用光学[M]. 北京：国防工业出版社，1988. 167－168.
14 SONY. Diagonal 8 mm (Type 1/2) CCD Image Sensor for CCIR B/W Video Cameras[M/OL]. http://www.sony.net/Products/SC-HP/datasheet/01/data/E01912A41.pdf.
15 Liu Wei. Study on the Method of Optoelectronic Technique Used for Deep Space Craft Monitor[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008. 21－23.
刘　薇. 光电手段用于深空飞行器监测的研究[D]. 长春：长春理工大学，2008. 21－23.
16 Yu Erhui, Shen Hongjun. The design of the optical system of the second generation satellite laser ranging system[J]. Annals of Shanghai Astronomical Observatory of Chinese Academy of Science, 1986, 8: 114－120.
于尔慧，沈洪均. 第二代人卫激光测距仪的光学系统设计[J]. 中国科学院上海天文台年刊，1986，8：114－120.
17 Xu Min, Wang Jianli, Wang Jianjun, *et al*.. Application of CCD in satellite magnitude measurement [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008,29(1): 447－450.
续　敏，王建立，王建军，等. CCD 在卫星星等测量中的应用[J]. 半导体光电，2008，29(1)：447－450.
18 Zong Siguang, Wu Ronghua, Cao Jing, *et al*.. Developmens and trends of high energy laser weapons[J]. Laser & Optoeletronics Progress, 2013, 50(8): 080016.
宗思光，吴荣华，曹　静，等. 高能激光武器技术与应用进展[J]. 激光与光电子学进展，2013，50(8)：080016.

**栏目编辑：** 李志兰