

# 空间小目标的光学建模与模拟观测

赵彬<sup>1</sup> 杨苏辉<sup>1</sup> 王世涛<sup>2</sup> 赵长明<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京理工大学 光电学院, 北京 100081; <sup>2</sup>中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要** 以天基空间目标探测器的研究为背景,对近地空间的光环境进行了研究,并对平面、球面、柱面、锥面近地空间小目标进行光学建模,给出其在一定距离上的光照度与光源、探测器方位角及相位角的普遍关系式。为验证关系式的正确性,在设定条件下对模型进行了仿真分析,得到平面最亮,球面和柱面次之,锥面最暗的结论;同时在暗室中搭建空间小目标成像的模拟实验系统,以增强型电荷耦合器件(ICCD)摄像机进行静态目标成像实验。对采集的图像进行分析,得到了符合仿真结论的实验结果。说明了目标光学模型的正确性及运用微光探测器件对空间目标进行成像观测的可行性。同时也进行了动态目标成像实验,实验结果说明了减小图像噪声对运动目标定位处理的重要性,这一结论为成像器件选型提供了依据。

**关键词** 光学测量; 空间目标; 探测; 光照度; 成像

**中图分类号** O432.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3395

## Optical Modeling and Simulative Survey of Small Objects in Space

Zhao Bin<sup>1</sup> Yang Suhui<sup>1</sup> Wang Shitao<sup>2</sup> Zhao Changming<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>*School of Optical Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)  
(<sup>2</sup>*China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*)

**Abstract** Based on the research of space-based spatial object detectors, the optical environment of near-earth space was studied. Modeling of optical characteristics of small spatial object with shapes of plane, sphere, cylinder and cone was carried out, the dependence of the irradiance on objects at a certain distance to the azimuth angles, phase angles of light source and detectors were described. Under the same optical conditions, the brightest object for detector is plane, sphere and cylinder are darker, and cone is the darkest. To verify our modeling, experiments were carried out in dark room to simulate the optical detecting in space. Static and dynamic objects were captured by ICCD camera, by analyzing and processing the images, the correctness of the models and the feasibility of using low-light-imaging system to trace and survey the spatial objects were proved.

**Key words** optical measurement; spatial object; detection; irradiance; imaging

## 1 引言

随着航空、航天技术的迅猛发展,天基观测系统因其不受大气影响,观测时间受限少,对中小尺度目标能近距离观测等优点而越来越受到各国的重视。美国已发展出以“空间中段监视”实验卫星(MSX), Exoatmospheric Kill Vehicle(EKV),天基红外系统(SBIRS)等天基空间目标观测系统<sup>[1]</sup>,主要用于观

测发射后处于助推阶段和飞行中段的弹道导弹,并进行预警、监视和拦截。

我国目前在这方面研究处于起步阶段,相关研究进行的虽较多,但基本停留在理论、方案研究阶段。空间目标光学建模,从理论上计算出不同空间目标在不同光照条件下的辐射特性,是空间目标特性研究的重要组成部分。此前文献报道过这方面研

收稿日期: 2009-02-16; 收到修改稿日期: 2009-03-25

基金项目: CAST 创新基金(CAST200617)资助课题。

作者简介: 赵彬(1982—),男,博士研究生,主要从事光电信息技术与系统方面的研究。E-mail: eggman@bit.edu.cn

导师简介: 赵长明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事新型激光器件与技术 and 光电信息技术与系统等方面的研究。

E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

究成果<sup>[2~4]</sup>,但大都以地基观测系统研究为背景,只考虑太阳光直接照射目标的情形,模型验证也只通过理论计算结果与天文台观测数据的对比来进行;而已有的天基观测系统研究中,主要假设目标为点目标,并没有外形的设定<sup>[5]</sup>。本文以天基近距离空间目标探测器研究为背景,设定探测器工作于成像探测模式,全面分析空间光环境,对不同形状空间近距离小目标进行光学特性建模、仿真;并在实验室条件下,搭建模拟观测系统对目标模型进行实验验证,还初步进行了运动目标的成像模拟观测实验,为天基空间目标探测器的设计提供参考。

## 2 空间可见光环境与目标光学建模

### 2.1 空间可见光辐射的来源

在外空间,背景光有以下几部分:太阳光,地球大气外层和月球反射光,地球热辐射以及各种星体发出的光<sup>[6]</sup>。这些发光体都可作为照明空间目标的自然光源。文献<sup>[7]</sup>进行了使用 CCD 对太阳光辐射下的空间目标进行跟踪的有关分析,得到最大跟踪距离可达 3000 km 的结论。可见,选择 CCD 类固体成像器件是可取的,它们一般响应波段为 400~1100 nm。分析空间环境的可见光辐射也相应在这一波段进行。

各种星体和地球外层空间的 3.5 K 深空背景,均可以看成是比较理想的黑体,它们的电磁辐射遵从普朗克(Planck)黑体辐射公式,而峰值波长可由维恩(Wien)位移公式求出。根据这个公式可以计算出,3.5 K 深空背景辐射的峰值波长在 827.9  $\mu\text{m}$ ,这在所有光探测器响应之外,可以不予考虑。

一般将地球和大气看成一个系统:地球-大气系统。从在轨航天器高度观测地球,来自太阳的光能有 30% 被大气外层直接反射回太空,而且其光谱强度分布与入射光谱近似,而剩余部分进入大气层,一些被大气散射、吸收和内部反射,其余的到达地面为地球吸收。由于热平衡,地球又将吸收的部分能量以长波长辐射出去。地球可以看成是 300 K 的黑体,其自身辐射峰值波长在 10  $\mu\text{m}$ 。如图 1 所示,小于 2  $\mu\text{m}$  内的地球自身辐射已经很小了,所以对 CCD 而言地球自身辐射也可不予考虑。

月球自身辐射近似于 400 K 的绝对黑体辐射,峰值波长 7.24  $\mu\text{m}$  在 CCD 响应之外,其发出的可见光也主要是反射太阳光辐射;而太阳系的其他几大行星最亮时,星等数也比月球小至少 8 等,都可以不予考虑<sup>[8]</sup>。

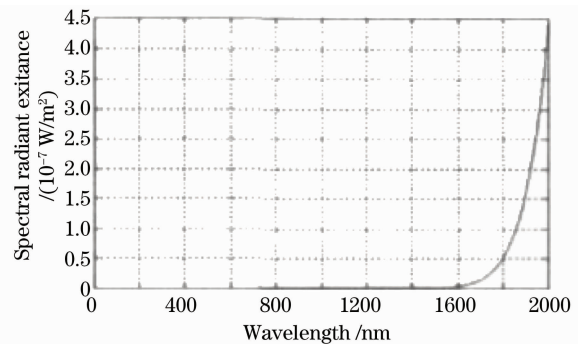


图 1 地球自身辐射谱

Fig. 1 Radiation spectrum of earth

所以,白天主要考虑的有太阳的直接辐射和地球-大气的反照辐射,傍晚和凌晨主要考虑太阳直接辐射,夜晚考虑月球反照辐射<sup>[9]</sup>。那么对目标来说,空间环境的光照条件最大时刻是太阳的直接辐射和地球-大气的反照辐射共同作用时,最小时刻是月球反照辐射单独作用时;其间随着光源与目标、探测器的相对位置不同,光照条件是连续变化的(受现有光学探测手段所限,不讨论太阳、月球、地球发光都照射不到目标的情形)。

太阳直接辐射和地球-大气反照辐射都有数据可查,而且它们之间有简单的数量关系。积分波段取 400~1100 nm。运用 Matlab 软件将太阳光谱辐照度离散化<sup>[10]</sup>,如图 2 所示,在该波段内积分求和可得总辐照度为 906.88  $\text{W}/\text{m}^2$ ;地球总反照辐射取该值的 0.3,为 272.1  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

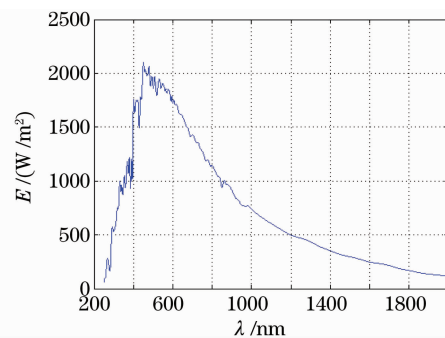


图 2 大气层上界太阳光谱辐照度

Fig. 2 Solar spectral irradiance on top of atmosphere

而月球反照辐射需要根据观测资料另外计算出来,下面具体讨论。

### 2.2 月球反照辐射的计算

依据文献<sup>[8]</sup>中的理论,若已知星体的目视星等  $m$  和色温  $T$ ,该星体在地球大气层外产生的光谱辐照度为

$$E_{\lambda}(m, T) = M_{\text{ba}}(\lambda, T) \frac{E_{\text{V}}(m)}{M_{\text{V}}(T)},$$

式中  $M_{\text{bk}}(\lambda, T)$  为黑体的光谱辐射出射度, 其值由普朗克公式给出:

$$M_{\text{bk}}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} (\text{W}/\text{m}^2),$$

式中第一辐射常数  $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$ , 第二辐射常数  $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} (\text{m} \cdot \text{K})$ , 波长单位取  $\text{m}$ .  $E_V(m)$  为  $m$  等星在地球大气层外产生的光照度, 其值为

$$E_V(m) = 2.089 \times 10^{-6} \times 10^{-m/2.5} (\text{lx}).$$

另外

$$M_V(T) = 683 \times \int_0^\infty M_{\text{bk}}(\lambda, T) V(\lambda) d\lambda (\text{lx}),$$

式中  $V(\lambda)$  为视见函数。

月球目视星等为  $-12.2$ , 色温为  $5900 \text{ K}$ , 并参考  $V(\lambda)$  的值, 本文运用 Matlab 将以上各式在  $400 \sim 760 \text{ nm}$  的积分化成间隔  $10 \text{ nm}$  的求和运算, 可得到  $E_V/M_V$  的值。随后可求得在  $400 \sim 1100 \text{ nm}$ , 月球总辐照度为  $0.0011 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

图 3 是计算得到月球在大气层外界光谱辐照度曲线。

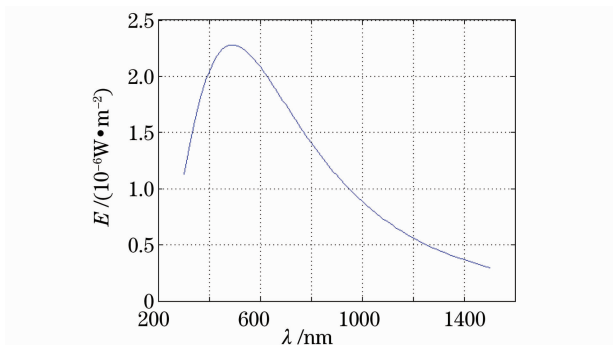


图 3 大气层上界月球光谱辐照度

Fig. 3 Lunar spectral irradiance on top of atmosphere

由此, 可以计算出环境光照度最大值为  $E_{\text{max}} = 906.88 + 272.1 \approx 1179 \text{ W}/\text{m}^2$ , 环境光照度最小值为  $E_{\text{min}} = 0.0011 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

### 2.3 空间目标的光学建模

近地空间目标的形状多种多样, 但总的来说可以归纳为平面、球面、圆柱面、圆锥面及它们的组合。非自发光的空间目标, 主要是反射空间环境中的其它光源的光辐射而发光<sup>[2~4]</sup>。下面分别对四种曲面进行光学特性分析, 建立空间目标的基本光学模型, 用于描述其在一定距离上产生的照度。

基本的空间目标面元与光源、探测器的位置关系如图 4 所示。近地空间目标受到的太阳光谱辐照度为  $E(\lambda)$ , 总辐照度  $E_{\text{sun}}$ 。空间目标面元  $ds$  的法线

方向与太阳光线夹角为  $\varphi_s$ , 与探测器视线夹角为  $\varphi_d$ , 探测器距离目标距离为  $R$ 。假设空间目标表面是理想漫反射体, 服从朗伯定律, 平均反射率为  $\rho$ 。具体到不同形状的目标, 坐标系的建立和变量的选取不尽相同。目标照度表达式的推导思路基本与文献[2]相似。但因为此处推导的是空间目标照度, 故本文不需要考虑大气影响, 光源辐射值也采用了大气层上界的值。选取合适的坐标系可将最终照度表达式化为不含积分的最简形式。针对最为复杂的圆锥面目标照度表达式, 做了更为详尽的分析, 指出了其照度随各个影响因素而变化的一般规律。

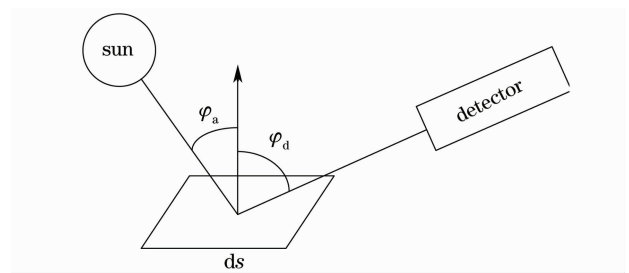


图 4 空间目标面元与光源、探测器的位置关系

Fig. 4 Ubteity of spatial target, light source and detector

1) 平面目标(面积为  $S_p$ , 坐标系如图 4 所示)

$$E_D = \frac{E_{\text{sun}} \rho}{\pi R^2} S_p \cos \varphi_s \cos \varphi_d;$$

$$\varphi_s, \varphi_d \in (0, \pi/2)$$

2) 球面目标(半径为  $r$ , 坐标系如图 5 所示)

$$E_D = \frac{E_{\text{sun}} \rho}{\pi R^2} \frac{\pi r^2}{4} [(\pi - \beta) \cos \beta + \sin \beta];$$

$$\text{相位角 } \beta \in [0, \pi]$$

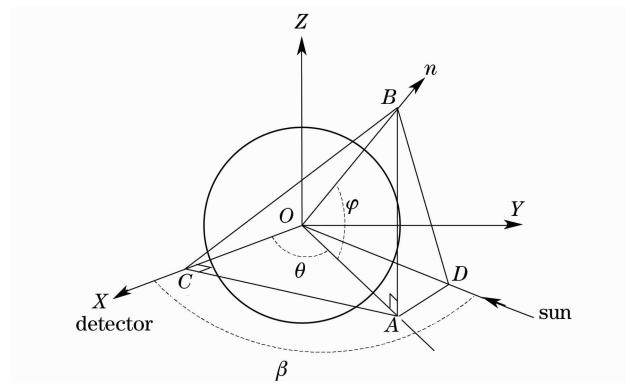


图 5 球面目标模型

Fig. 5 Model of spherical target

(3) 圆柱面目标(柱面高度  $H$ , 底面直径  $d$ , 坐标系如图 6 所示)

$$E_D = \frac{E_{\text{sun}} \rho d H}{4 \pi R^2} \sin \varphi_s \sin \varphi_d [(\pi - \beta) \cos \beta + \sin \beta];$$

$$\varphi_s, \varphi_d \in (0, \pi), \beta \in [0, \pi]$$

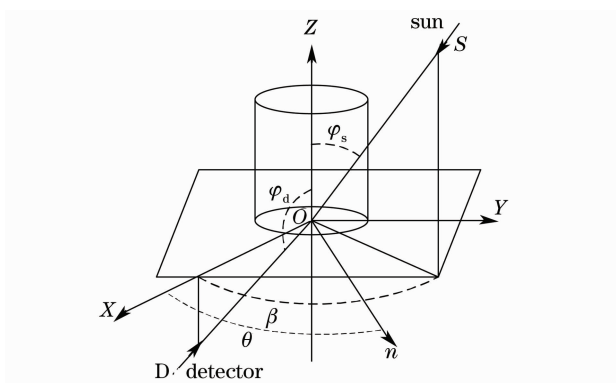


图 6 柱面目标模型

Fig. 6 Model of cylindrical target

(4)圆锥面目标(半顶角为  $\alpha$ , 底面直径  $d$ , 母线  $l$ , 坐标系如图 7 所示)

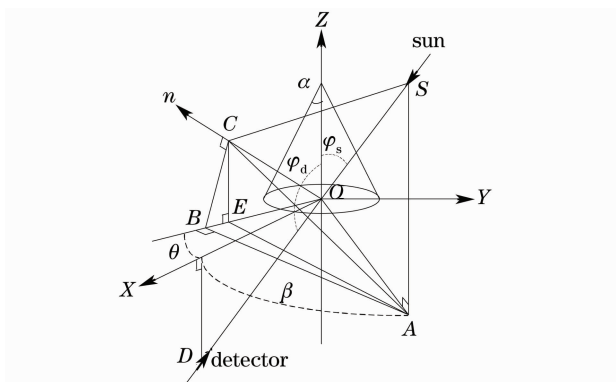


图 7 锥面目标模型

Fig. 7 Model of conic target

圆锥面不同于平面、球面和柱面,  $\varphi_s, \varphi_d$  的变化会分别引起光照面积和观测面积的变化, 最终影响照度表达式的积分区间变化。以下进行分析:

能被阳光直接照射到的锥面部分, 其各小面元的法线与太阳光线夹角必定小于  $\pi/2$ , 即  $\cos\angle\text{COS} > 0$ ,  $\theta_s$  是太阳照射面积的  $\theta$  范围, 有

$$\cos\angle\text{COS} = \cos(\beta - \theta_s)\cos\alpha\sin\varphi_s + \sin\alpha\cos\varphi_s > 0.$$

令

$$\frac{-\sin\alpha\cos\varphi_s}{\cos\alpha\sin\varphi_s} = T,$$

则

$$(\beta - \theta_s) \in [-\arccos(T), \arccos(T)],$$

解得

$$\theta_s \in [\beta - \arccos(T), \beta + \arccos(T)].$$

同理推得

$$\theta_d \in [-\arccos(T'), \arccos(T')],$$

$$T' = \frac{-\sin\alpha\cos\varphi_d}{\cos\alpha\sin\varphi_d},$$

式中  $\theta_d$  是探测器观测面积的  $\theta$  范围。那么, 照度表达

式中  $\theta$  的积分范围就是  $\theta_s, \theta_d$  范围的交集, 要依据具体的  $\varphi_s, \varphi_d, \alpha, \beta$  来确定。图 8 给出了  $\alpha = 30^\circ, \beta = 180^\circ$  这一特例时,  $\theta$  的积分范围随  $\theta_s, \theta_d$  变化的曲线。

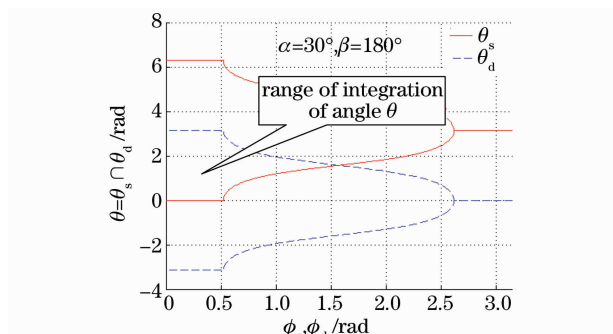


图 8  $\theta$  的积分范围

Fig. 8 Range of integration of angle  $\theta$

最终得到  $E_D$  的表达式:

$$E_D = \frac{E_{\text{sun}}\rho}{\pi R^2} \frac{ld}{4} \int_{\theta_s \cap \theta_d} [\cos(\beta - \theta)\cos\alpha\sin\varphi_s + \sin\alpha\cos\varphi_s] \cdot [\cos\theta\cos\alpha\sin\varphi_d + \sin\alpha\cos\varphi_d] d\theta.$$

$\varphi_s, \varphi_d \in (0, \pi), \beta \in [0, \pi]$

### 2.4 空间目标照度的仿真分析

设目标距离 100 km, 表面反射率 0.33, 截面  $1 \text{ m}^2$ 。那么, 对平面、球面、柱面、锥面目标有

$$S_p = \pi r^2 = dH = \frac{dl\cos\alpha}{2} = 1.$$

#### 2.4.1 环境光照度不变, $\varphi_s, \varphi_d, \beta$ 变化

首先在光照度值  $E_{\text{max}} = 1179 \text{ W/m}^2$  条件下, 分析以上各目标自身  $\varphi_s, \varphi_d, \beta$  变化时, 给定距离处的照度。

需要说明的是, 柱面给出在锥面必须给定  $\varphi_s, \varphi_d$  才能确定积分范围。为了简化积分式, 取  $\varphi_s, \varphi_d$  都为  $90^\circ$  时的特例, 此时  $\theta$  的范围就是  $[\beta - \pi/2, \pi/2]$ , 锥面照度表达式简化成

$$E_D = \frac{E_{\text{sun}}\rho}{\pi R^2} \frac{dl\cos^2\alpha}{8} [(\pi - \beta)\cos\beta + \sin\beta],$$

$$\beta \in [0, \pi]$$

现给出  $\alpha = 30^\circ$  时, 锥面照度表达式:

$$E_D = \frac{E_{\text{sun}}\rho\sqrt{3}}{\pi R^2} \frac{1}{8} [(\pi - \beta)\cos\beta + \sin\beta].$$

图 9~图 12 分别给出了平面、球面、柱面和锥面的照度曲线。(其他光照条件的曲线变化趋势是一样的)。

然后在环境照度,  $\varphi_s, \varphi_d$  都相等, 只有  $\beta$  变化时, 对各目标产生照度进行同等条件下的比较, 如图 13 所示。

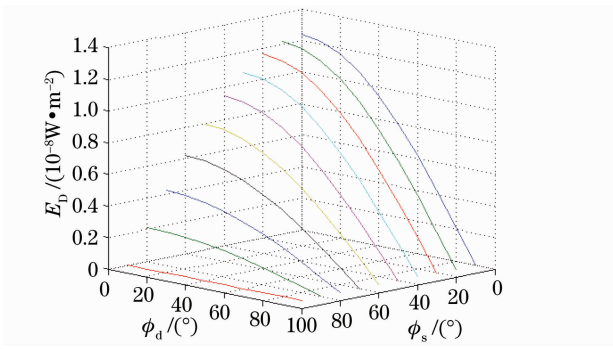


图 9 平面目标照度曲线

Fig. 9 Irradiance curve of plane target

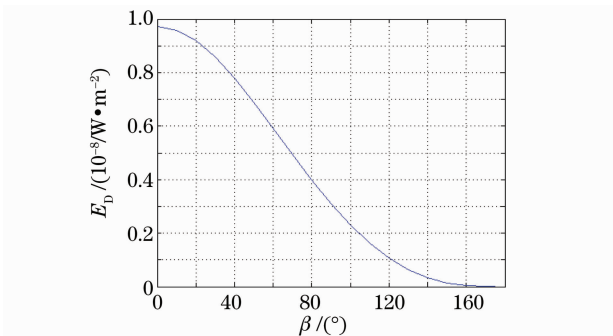


图 10 球面目标照度曲线

Fig. 10 Irradiance curve of sphere target

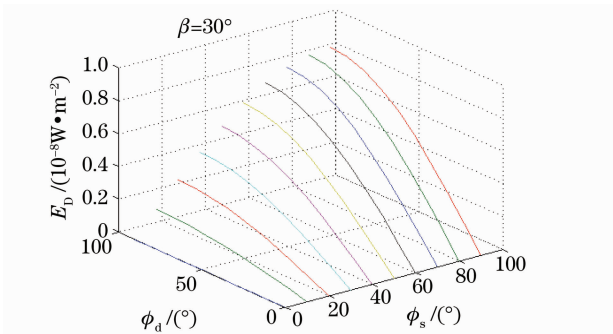


图 11 柱面照度曲线

Fig. 11 Irradiance curve of cylindrical target

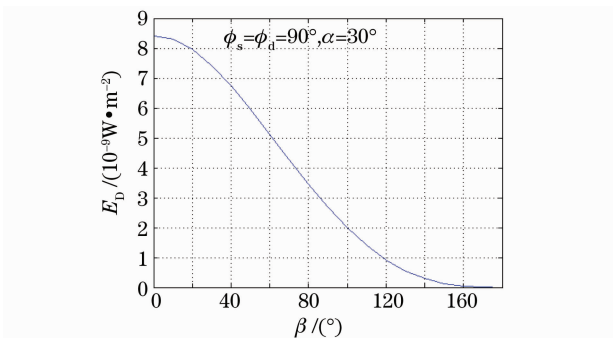


图 12 锥面照度曲线

Fig. 12 Irradiance curve of conic target

可以看出,平面最亮,球面和柱面次之且照度相等,锥面最暗。

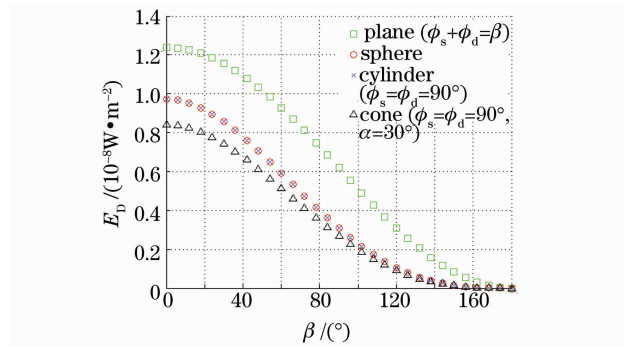


图 13 不同目标在同等条件下照度

Fig. 13 Irradiance curve of four targets on the same condition

究其原因:平面所有面元法线都有统一的取向,所以它对光的反射是强强叠加的,故最亮;柱面和球面照度表达式在给定条件下简化成同一形式,故亮度相等;而对锥面,因为  $\frac{dl \cos \alpha}{2} = 1$  及  $dl > 2$ , 结合锥面照度表达式可得

$$E_D < \frac{E_{\text{sun}} \rho}{4\pi R^2} [(\pi - \beta) \cos \beta + \sin \beta],$$

不等式右端恰是球面的照度表达式,可见此条件下锥面照度与球面变化趋势类似,但比球面暗。

### 2.4.2 环境光照度变化, $\varphi_s, \varphi_d, \beta$ 不变

各种目标随光源照度变化都遵循各自的照度表达式所描述的关系。以球面目标为例,在相位角  $\beta = 0$  时,计算最大和最小环境光照度下 100 km 处的照度分别为:  $E_{D_{\text{max}}} = 9.73 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$ ,  $E_{D_{\text{min}}} = 9.075 \times 10^{-15} \text{ W/m}^2$ 。利用  $1 \text{ W/m}^2 = 20 \text{ lx}$  换算<sup>[11]</sup>,  $E_{D_{\text{max}}} = 1.946 \times 10^{-7} \text{ lx}$ ,  $E_{D_{\text{min}}} = 1.815 \times 10^{-13} \text{ lx}$ , 相当于 2.8~17.9 等星。且当相位角增大时,所有目标还会更暗。所以,对空间目标进行有效观测需用微光成像系统。特别是在运动目标的跟踪、测量等场合,高帧频下有效成像要求缩短积分时间,这就必须依赖于提高增益<sup>[12]</sup>。

## 3 空间目标观测的验证实验

实验分为静态成像实验和动态成像实验。静态成像实验,用于验证所建立的目标光学模型的正确性;动态成像实验,用于初步实验研究微光成像系统对运动空间小目标的观测可行性,并为探测器选型提供实验依据。

### 3.1 静态成像实验

在暗室中建立了一套模拟空间目标成像的实验系统。模型置于足够大黑色背景中,保证成像探测器 ICCD、目标、光源在同一水平面上,则  $\varphi_s, \varphi_d$  都为

90°;点光源、ICCD 与目标模型连线夹角 30°(即相位角  $\beta$ ,光源位于 ICCD 与模型连线的右侧)。为保证光源仅对模型照明而不影响到周围环境,将一个亮度微弱的点光源置于一面开口的小盒中,开口朝向模型及背景,如图 14 所示。

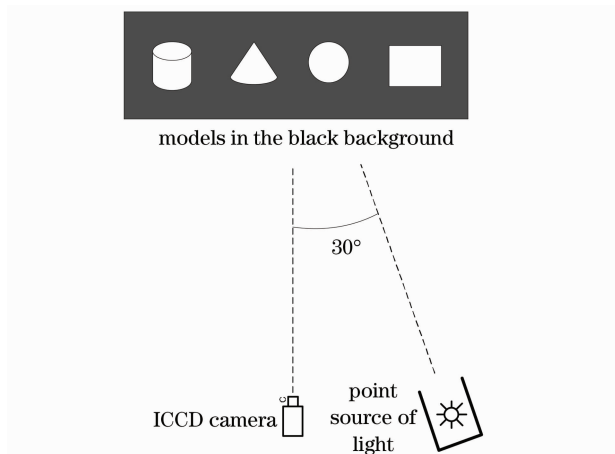


图 14 静态实验系统图

Fig. 14 Diagram of static object experiment

成像器件选用了 WATEC 的 WAT-902H 型 ICCD 相机,自制了近似漫反射表面的四个空间目标模型,实物如图 15 所示。

同一环境照度下,以 ICCD 对距离 195cm 处的不同形状目标模型进行成像。通过调节微弱点光源的亮度来改变环境照度。观察不同照度下的图像

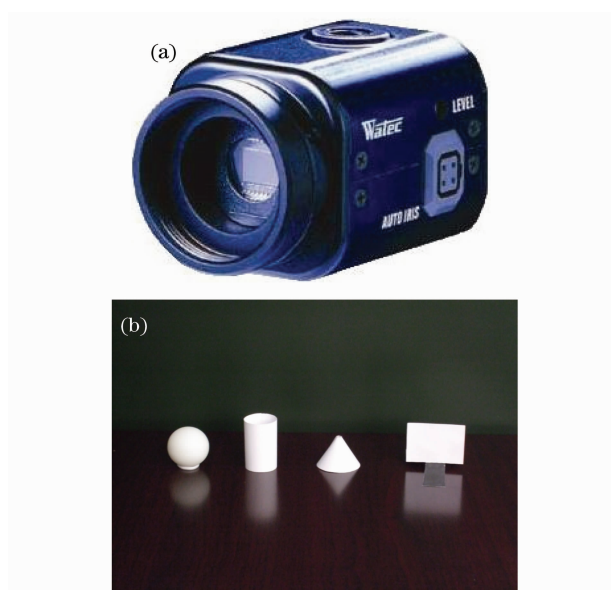


图 15 实验用 ICCD 相机及目标模型  
Fig. 15 ICCD camera and target models used in experiments

中,各模型的亮度和可辨认程度,并作记录。

由图 16 可以看出,随着环境照度的增加,四个目标模型的轮廓也越来越清晰,能够明显分辨出形状来;平面和柱面先于锥面和球面清晰起来。最清晰的一副图像中,甚至可以察觉出光源位置的大概方位——仔细观察图像,柱面、锥面、球面目标上都有较明显的明暗变化,能够判断出光源位于目标右侧。

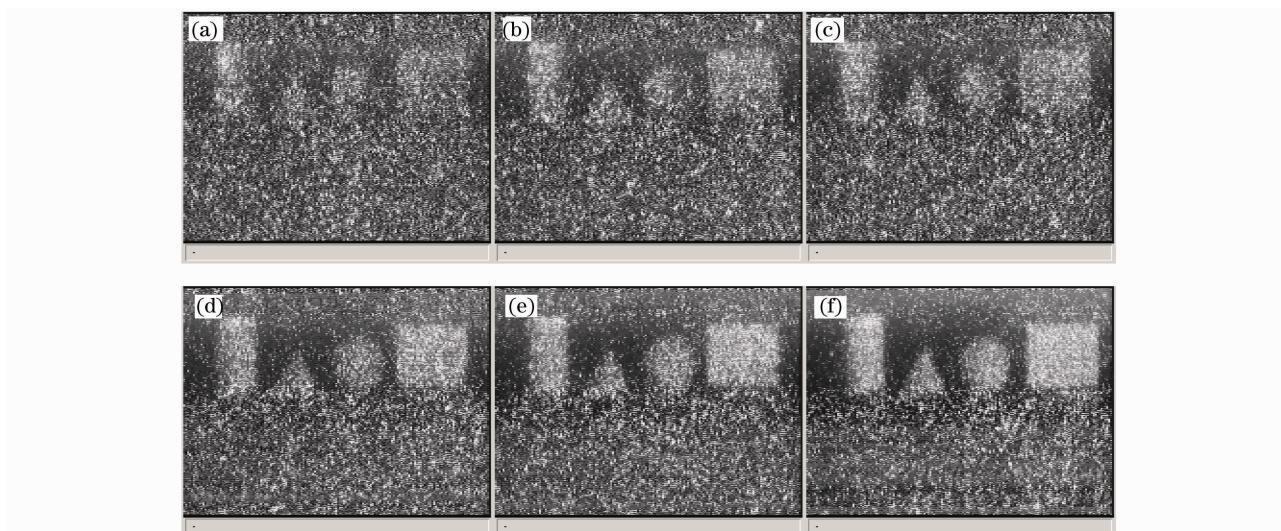


图 16 静态成像实验结果。目标处环境照度为:(a)  $58.2 \times 10^{-6}$  lx(为没有任何光源时的照度,是暗室能达到的最低照度);  
(b)  $75.1 \times 10^{-6}$  lx;(c)  $77.2 \times 10^{-6}$  lx;(d)  $19.6 \times 10^{-5}$  lx;(e)  $24.6 \times 10^{-5}$  lx;(f)  $62.1 \times 10^{-5}$  lx

Fig. 16 Results of static object imaging experiment, environmental irradiance: (a)  $58.2 \times 10^{-6}$  lx (the lowest irradiance that dark room can reach);(b)  $75.1 \times 10^{-6}$  lx; (c)  $77.2 \times 10^{-6}$  lx; (d)  $19.6 \times 10^{-5}$  lx; (e)  $24.6 \times 10^{-5}$  lx, (f)  $62.1 \times 10^{-5}$  lx

实验结果说明了理论模型中的结论：在同等环境照度和相位角的情况下，平面比柱面和球面明亮，锥面最暗。

### 3.2 动态成像实验

因为空间目标都是高速运动着的，选择能对运动目标有效成像的成像器件才能胜任空间目标的观测任务。在实验室现有条件下，我们做了初步的运动目标模拟观测实验，获得的实验结果能对空间目

标探测器设计中的成像器件选型问题提供依据。

在静态实验使用的黑色背景中，用 V 形导轨搭建一个小倾角的斜坡。让一个大质量、表面光滑(但仍满足漫反射表面)的白色小球从小倾角斜坡顶端自由滚下(在此条件下，可忽略导轨对小球的摩擦力，视作重力作用下的匀加速运动)。实验系统及实物模型如图 17 所示。

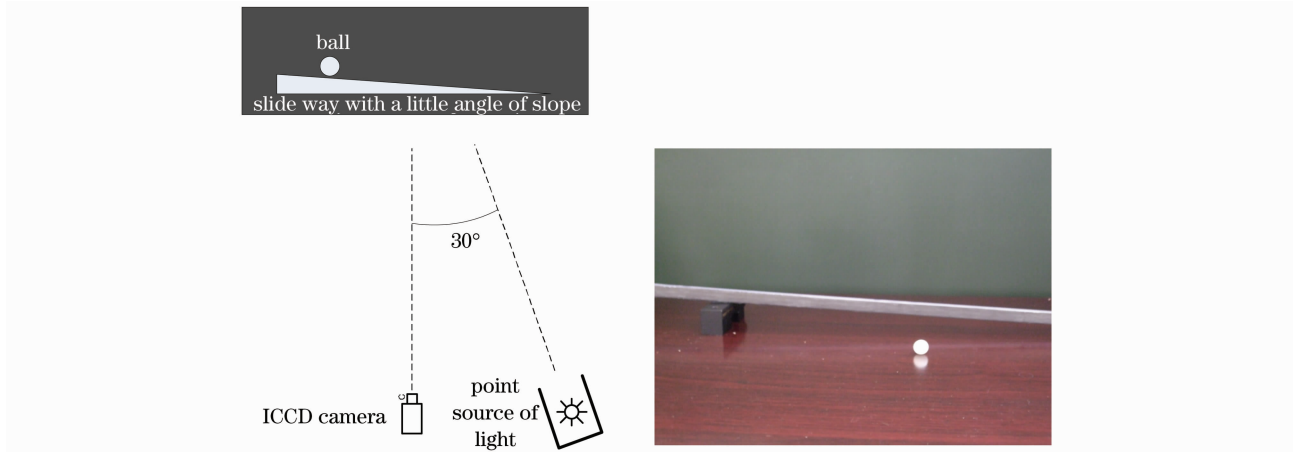


图 17 动态实验系统图及实物模型

Fig. 17 Diagram of dynamic objects experiment and models

在距离运动目标 195 cm 处，环境照度  $62.1 \times 10^{-5}$  lx 条件下，ICCD 采集了一段帧频为 30 frame/s 动态视频。对视频进行处理，捕捉运动中的小球，并

对其进行定位，给出球形心的坐标、运动轨迹。处理过程如图 18~图 20 所示。

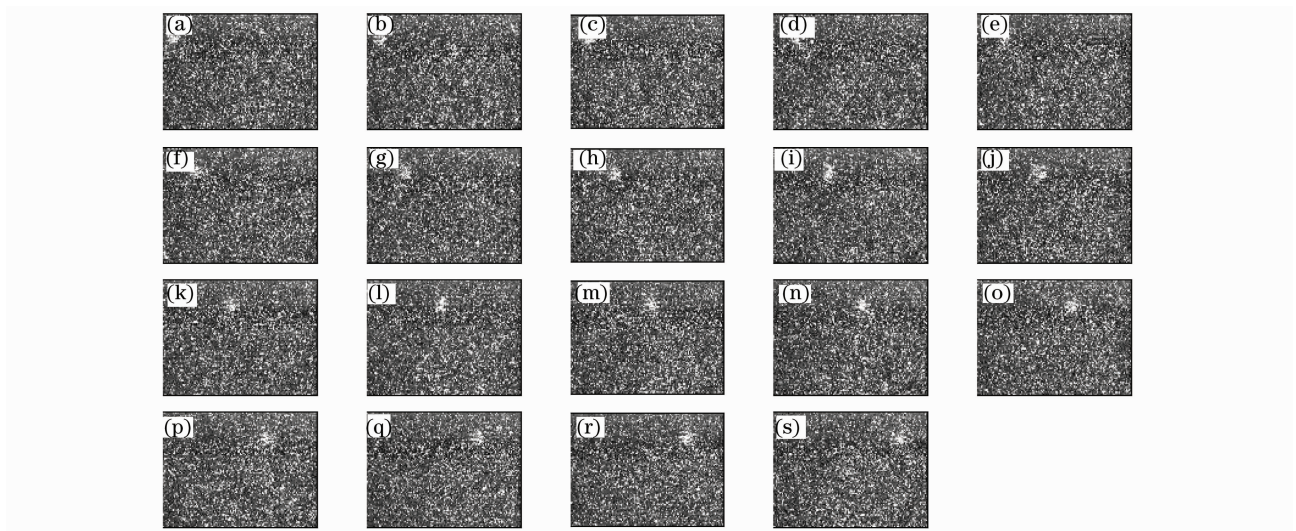


图 18 视频中每帧原始图像

Fig. 18 Images from the video captured in dynamic objects experiment

以上各图反映了图像处理的过程，求取了球形心运动轨迹，近似为一条直线，轨迹点间距基本呈逐渐加大趋势，反映了一些匀加速运动的特征。但也有个别轨迹点间距呈缩小趋势。分析球心轨迹不严

格呈直线、球形心轨迹间距反常的原因是：ICCD 成像噪声过大，特别是级联器件内部噪声大<sup>[13,14]</sup>，使得目标轮廓不清晰，在图像处理过程中影响了对球形心的准确定位。

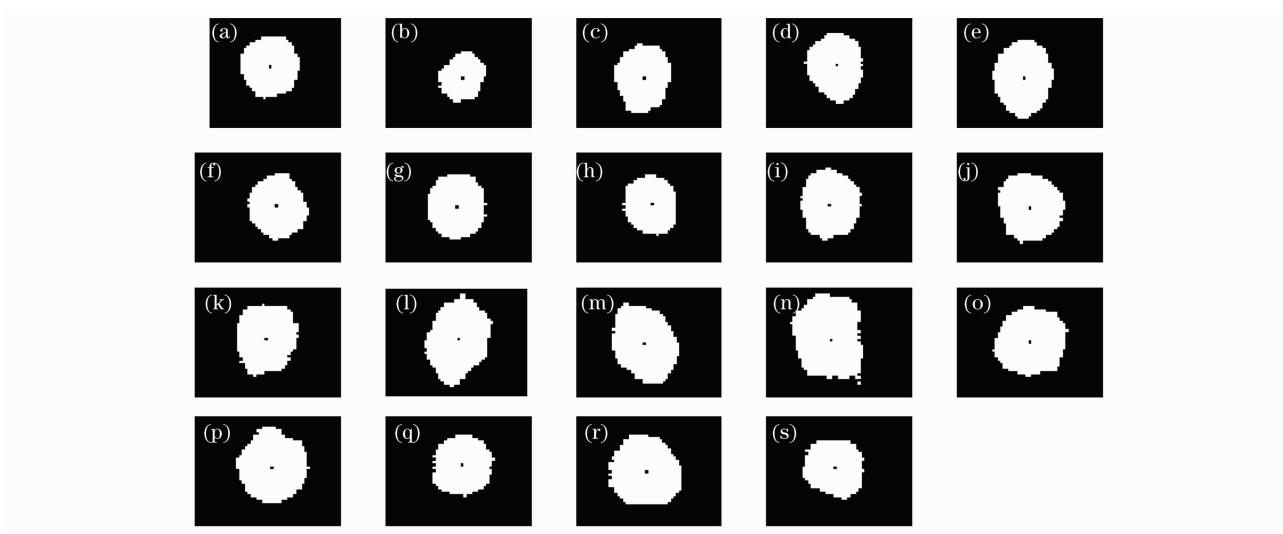


图 19 每帧中目标的形心(图中黑点代表形心)

Fig. 19 Centroids(the black points) of the ball in every images



图 20 目标形心运动轨迹

Fig. 20 Track of centroids of the ball

综合以上实验结果来看,图像中的噪声是影响图像中目标提取和识别的主要原因;特别是在对运动目标的观测中,减小图像噪声对目标的准确定位是至关重要的。要克服噪声影响,可使用噪声小,特别是器件内部引入噪声小的成像器件。微光成像器件中的 EMCCD 就具有这一特点,它摒弃了微通道板和荧光屏这类引入较大噪声的器件,而自身的内部高增益可以相对大幅降低读出噪声,使得成像质量有可观的改善<sup>[15]</sup>。EMCCD 是在空间应用领域代替 ICCD 等微光成像器件的最佳选择。限于实验室条件,未能进行 EMCCD 的相关成像实验。

## 4 结 论

在建模时运用的漫反射体假设,对大部分空间目标都是适用的。与以往文献相比,本文给出了更简洁直观模型表达式,且详细探讨了较为复杂的锥面表达式的积分范围。文献[4]的研究说明,由于

实际情况与漫反射假设的偏差,引起观测值与计算值之间的误差在 0.5 个星等左右<sup>[4]</sup>。

在特定情况下的仿真和模拟实验结果,证明了空间小目标光学模型的正确性,也一定程度上说明了运用微光成像系统对空间目标进行观测的可行性。该模型可为空间目标探测系统设计提供目标特性参考,模拟实验也为空间小目标观测的探测器选型提供了依据。后续模型完善需要将实际的目标表面特性,以及空间目标及各光源的轨道运行参数考虑在内,使模型更加准确,更具有可预测性。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Yanping, Shu Rui, Tao Kunyu *et al.*. Study of photoelectric detecting and identifying of space target [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 68~76  
周彦平,舒锐,陶坤宇等.空间目标光电探测与识别技术研究[J].*光学技术*, 2007, **33**(1): 68~76
- 2 Li Bincheng. Analyzing light characteristic of spatial target[J]. *Optical Engineering*, 1989, **80**(2): 21~26  
李斌成.空间目标的光学特性分析[J].*光学工程*, 1989, **80**(2): 21~26
- 3 Zhang Guangming, Guo Junhai. Reflecting the radiation of sun by spatial target[J]. *Aircraft Control Technology*, 1994, **1**(2): 26~31  
张光明,郭军海.空间目标反射太阳辐射的研究[J].*飞行器测控技术*, 1994, **1**(2): 26~31
- 4 Chen Rongli, Han Le, Che Chicheng *et al.*. Research on unilluminant space target visual detection technique[J]. *Scope on Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1438~1441  
陈荣利,韩乐,车驰骋等.非自发光空间目标的可见光探测技术研究[J].*光子学报*, 2005, **34**(9): 1438~1441
- 5 Zhang Keke, Fu Danying, Zhou Feng *et al.*. The study on detect ability calculation method of space object visible camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, **27**(4): 22~26  
张科科,付丹鹰,周峰等.空间目标可见光相机探测能力理论计算方法研究[J].*航天返回与遥感*, 2006, **27**(4): 22~26
- 6 Dong Jihui, Hu Qiquan. Detectiong space debris with lidar[J].



- Laser Technology*, 2007, **31**(2): 185~191  
董吉辉, 胡企铨. 空间碎片的激光雷达探测 [J]. 激光技术, 2007, **31**(2): 185~191
- 7 Dong Jihui, Hu Qiquan. Analysis of working distance of CCD gaze imaging tracking system in space[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 173~177  
董吉辉, 胡企铨. 空间 CCD 凝视成像跟踪系统的作用距离分析 [J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 173~177
- 8 Xu Genxing. *Optical Characteristic of the Object and Environment* [M]. Beijing: Astronavigation Press, 1995  
徐根兴. 目标和环境的光学特性 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995
- 9 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible-light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254  
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射 [J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 10 Zhao Bin, Zhao Changming, He Jianwei *et al.*. The study of active medium for solar-pumped solid-state lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1797~1801  
赵 彬, 赵长明, 何建伟 等. 太阳光抽运固体激光工作物质的研究 [J]. 光学学报, 2007, **27**(10): 1797~1801
- 11 Bai Tingzhu, Jin Weiqi. *Principle and Technology of Opto-Electrical Imaging* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006  
白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006
- 12 Song Fenghua. *Modern Spatial Opto-Electrical System and Applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004  
宋丰华. 现代空间光电系统及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 13 Zuo Fang, Gao Zhiyun. Research on SNR and image detecting property of low light level imaging system [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, **26**(2): 185~187  
左 昉, 高稚允. 微光成像系统信噪比及图像探测特性研究 [J]. 兵工学报, 2005, **26**(2): 185~187
- 14 Shen Feng. Noise factor and gain variation factor in photoelectron multiplied cascaded system[J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2002, **19**(5): 471~475  
沈 锋. 电子倍增级联系统中的噪声因子和增益起伏因子 [J]. 量子电子学报, 2002, **19**(5): 471~475
- 15 Chen Chen, Xu Wujun, Wong Dongshan *et al.*. The noise sources and SNR analysis of electronic multiplying CCD [J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(11): 634~637  
陈 晨, 许武军, 翁东山 等. 电子倍增 CCD 噪声来源和信噪比分析 [J]. 红外技术, 2007, **29**(11): 634~637