

# 地基光电探测中曝光时间影响分析

曾海瑞<sup>1\*</sup>, 孙华燕<sup>2</sup>, 张廷华<sup>2</sup>, 杨彪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>航天工程大学研究生院, 北京 101416;

<sup>2</sup>航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416

**摘要** 地基光电探测系统是获取空间目标信号的重要探测手段,而曝光时间是影响其探测性能的主要参数。以空间目标的光学特性为基础,计算出系统的极限探测距离、最小可探测尺寸和极限探测星等,分析了其与曝光时间等影响因素的定量关系。结合空间目标的像移模型,得到动态条件下,系统探测能力随曝光时间的变化关系,并进行仿真研究。研究表明:目标相对静止时,系统探测能力随曝光时间延长而增加,变化趋势趋于平缓;目标相对运动时,系统探测能力随曝光时间延长先增加后减小,并存在一个最优曝光时间,且与目标相对角速度有关。仿真结果可为地基光电探测系统曝光时间的设定提供一定的优化可行性。

**关键词** 光学器件; 空间目标; 曝光时间; 地基光电探测系统; 探测能力

中图分类号 P171.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1123001

## Analysis on Influence of Exposure Time in Ground-Based Photoelectric Detection

Zeng Hairui<sup>1\*</sup>, Sun Huayan<sup>2</sup>, Zhang Tinghua<sup>2</sup>, Yang Biao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China;

<sup>2</sup>Department of Electronic and Optical Engineering, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China

**Abstract** Ground-based photoelectric detection system is an important detection method for signal acquisition of space targets, and exposure time is the main parameter affecting its detection performance. Based on the optical properties of the space target, limit detection distance, minimum detectable size and limit detection star of the system are calculated, and the quantitative relationship between the exposure time and other influencing factors is analyzed. Combined with the image shift model of the space target, the relationship between the system detection ability and the exposure time under dynamic conditions is obtained, and a simulation study is conducted. The results show that the system detection capability increases with the exposure time and becomes stable when the target is relatively stationary. When the target is in relative motion, the system detection capability increases firstly and then decreases with the extension of the exposure time, and there is an optimal exposure time related to the target relative angular velocity. The simulation results can provide optimization feasibility for the exposure time setting of ground-based photoelectric detection system.

**Key words** optical devices; space target; exposure time; ground-based photoelectric detection system; detection ability

**OCIS codes** 230.2090; 230.0040; 350.6090

## 1 引 言

近年来,随着航天技术的应用与发展,人类空间活动的加剧,地球轨道上分布了大量人造目标,包括卫星、火箭残骸和航天器碎片等,严重影响了人类的太空活动<sup>[1]</sup>。地基光电探测系统是探测空间目标的

重要手段,特别是在中高轨的空间目标探测中占据绝对优势。通过观测并处理获取空间目标的尺寸、轨道、数量等信息,能够实现对空间目标的有效识别和监视。

地基光电探测系统的探测能力与系统结构、大气环境、曝光时间等因素有关,对这些因素进行有效

收稿日期: 2018-04-09; 修回日期: 2018-05-30; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFxxx22700)

\* E-mail: 965588021@qq.com

估计,合理设计相关参数,能够提高目标成像信噪比(SNR),增强对目标的探测能力<sup>[2]</sup>。Li等<sup>[3]</sup>利用表面元素网络分析方法,建立了空间目标光谱特征模型,分析了不同辐射波长和反射角度下光电探测系统的光通量。胡静静等<sup>[4]</sup>以最小可探测碎片尺寸为指标,研究地基光电系统探测能力与影响因素间的定量关系。沈本剑等<sup>[5]</sup>分析相机与目标的相对运动,优化了星敏感器的曝光时间,提高了星点定位精度。但以上研究均未涉及动态条件下曝光时间对空间目标探测能力的影响。

本文以空间目标的可见光辐射特性为基础,选取极限探测距离、最小可探测尺寸、极限探测星等作为系统探测能力指标,建立了各项指标的数学物理模型。分析了相对静止和相对运动条件下,给定系统的探测能力与曝光时间的定量关系。得到系统探测能力随曝光时间的变化规律,并进行仿真,从而得到对空间目标观测的最优曝光时间,有效提高了系统探测能力。实验结果可为地基光电探测系统曝光时间的设定提供一定的优化可行性。

## 2 系统对空间目标探测能力计算

地基光电探测系统对空间目标的成像过程主要由探测目标、大气环境、光学系统、光电探测器等多个环节组成,每个环节都将影响系统对目标的成像质量,即影响系统对空间目标的探测能力<sup>[6]</sup>。因此,首先从太阳的辐射特性出发,结合能量的传播特性和空间目标的反射特性,建立系统探测能力的数学物理模型,流程如图1所示。

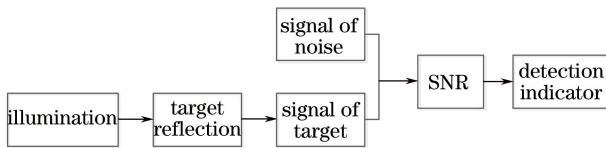


图1 探测能力计算流程图

Fig. 1 Flow chart of detection capability calculation

### 2.1 太阳辐照度特性分析

空间目标本身不具有发光特性,其信号来源主要是太阳光的辐射能量。一般认为太阳是绝对温度为5900 K的黑体,由普朗克方程可知,其在一定光谱范围的辐射出射度 $M_e$ 可表示为<sup>[7]</sup>

$$M_e = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left\{ \frac{1}{\exp[hc/(\lambda k_B T)]} - 1 \right\}, \quad (1)$$

式中: $h$ 为普朗克常数; $c$ 为真空中的光速; $k_B$ 为玻尔兹曼常数; $T$ 为太阳的黑体温度; $\lambda$ 为波长。

太阳对目标的单色辐照度 $E_e(\lambda)$ 为<sup>[7]</sup>

$$E_e(\lambda) = \frac{M_e(\lambda) \cdot A_s}{4\pi R_{se}^2}, \quad (2)$$

式中: $R_{se}$ 为日地平均距离; $A_s$ 为太阳表面积。在可见光0.38~0.76  $\mu\text{m}$ 波段,可计算太阳对空间目标的辐照度为

$$E_0 = \int_{0.38}^{0.76} E_e(\lambda) d\lambda = 670 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (3)$$

### 2.2 空间目标信号分析

太阳辐射能量传播到目标表面后,经反射到达探测面,如图2所示。通过建立目标反射模型,可计算出探测器接收到的目标光子数,得到目标的信噪比。

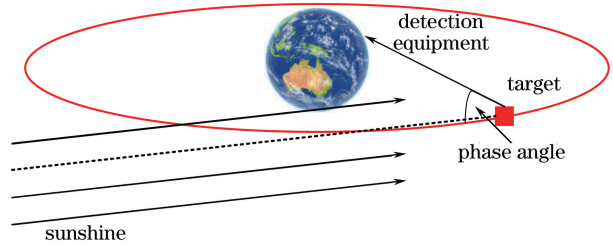


图2 空间目标探测示意图

Fig. 2 Space target observation diagram

#### 2.2.1 目标反射信号计算

空间目标的辐照度特性与自身形状尺寸、姿态、表面材料的双向反射分布函数(BRDF)、以及太阳-目标-测站的夹角等有关<sup>[8]</sup>。针对不同形状的空间目标的光学建模可参考文献<sup>[9]</sup>。但是由于空间目标的形状较为复杂,并且表面材料种类较多,难以精确计算其辐照度,所以本文将空间目标简化为一个等效反射球体(朗伯辐射体)<sup>[10]</sup>,则其在探测处的辐照度为

$$E_1 = \frac{E_0 \rho \tau}{\pi R^2} \frac{A_{obj}}{4} [\sin \theta + (\pi - \theta) \cos \theta], \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为目标表面的平均反射率; $\tau$ 为大气透射率(与天顶角 $z$ 有关); $A_{obj}$ 为空间目标的等效截面积; $R$ 为斜距,即目标相对探测系统的距离; $\theta$ 为相位角,即太阳-目标-测站的夹角。

得到空间目标的辐照度后,空间目标反射的信号单位时间内经过入瞳处的光能量为<sup>[7]</sup>

$$\Phi = E_1 S \tau_0, \quad (5)$$

式中: $S$ 为光学系统的入瞳面积,为 $\pi(D/2)^2$ , $D$ 为光学系统的有效通光口径; $\tau_0$ 为光学系统的光谱透射率。

探测器上的每个像元响应的光电子数为

$$N_s = \frac{\Phi \eta \epsilon t}{(hc/\lambda)n}, \quad (6)$$

式中： $\eta$  为平均量子效率； $\epsilon$  为像元填充因子； $t$  为曝光时间； $\bar{\lambda}$  为波长的平均值； $n$  为目标成像的像元数。

### 2.2.2 信噪比计算

地基光电探测系统在对空间目标探测时，噪声来源有：探测背景噪声、光子噪声、探测器噪声、驱动电路、温度环境等固有噪声和引入噪声等。本文只考虑主要噪声，即探测背景噪声、暗电流噪声、光子噪声和电子读出噪声<sup>[10]</sup>。以上提及的空间目标成像系统中的各种噪声是相互独立的。以电子数为单位定义信噪比，则系统的信噪比为

$$R_{SN} = \frac{N_s}{N_{noise}} = \frac{N_s}{\sqrt{N_B + N_s + N_D + N_R}}, \quad (7)$$

式中： $N_{noise}$  为一定时间内接收到的总噪声电子数；

$N_B$  为背景噪声产生的光电子数； $N_D$  为暗电流噪声产生的光电子数； $N_R$  为电子读出噪声产生的光电子数。

### 2.3 探测指标计算

为使探测器能提取出目标信号，在对空间目标进行成像时，系统成像信噪比必须大于等于由探测概率和虚警概率确定的信噪比阈值  $R_{sn}^{[7]}$ ，即

$$\frac{N_s}{\sqrt{N_B + N_s + N_D + N_R}} \geq R_{sn}. \quad (8)$$

经过推导得

$$N_s \geq \frac{R_{sn}^2 + \sqrt{R_{sn}^4 + 4(N_B + N_D + N_R)R_{sn}^2}}{2}. \quad (9)$$

联立(5)、(6)式，可得目标到达入瞳处照度的表达式为

$$E_1 \geq \frac{2hcn [R_{sn}^2 + \sqrt{R_{sn}^4 + 4(N_B + N_D + N_R)R_{sn}^2}]}{\pi D^2 \bar{\lambda} \tau_0 t \eta \epsilon}. \quad (10)$$

将(4)式代入(10)式，可得到系统极限探测距离与系统各参数的关系式为

$$R \leq \sqrt{\frac{E_0 \rho \tau A_{obj} D^2 \tau_0 t \eta \epsilon \bar{\lambda} [\sin \theta + (\pi - \theta) \cos \theta]}{8hcn [R_{sn}^2 + \sqrt{R_{sn}^4 + 4(N_B + N_D + N_R)R_{sn}^2}]}}. \quad (11)$$

由于目标为球体，令  $A_{obj} = \pi r_{obj}^2$ ，当目标相对探测系统的斜距已知时，可得到最小可探测尺寸与系统各参数的关系式为

$$r_{obj} \geq \sqrt{\frac{8hcn R^2 [R_{sn}^2 + \sqrt{R_{sn}^4 + 4(N_B + N_D + N_T)R_{sn}^2}]}{\pi D^2 E_0 \tau \rho \tau_0 t \eta \epsilon \bar{\lambda} [\sin \theta + (\pi - \theta) \cos \theta]}}. \quad (12)$$

已知在地球大气层外，星等为  $m_{obj}$  的空间目标在入瞳处的光子流为<sup>[11]</sup>  $\phi_s = 5.0 \times 10^{10-0.4m_{obj}}$  photon  $\cdot$  m<sup>-2</sup>  $\cdot$  s，考虑大气消光，则空间目标在探测处的辐照度与星等关系为

$$E_1 = \phi_s h c \tau / \bar{\lambda} = 5.0 \times 10^{10-0.4m_{obj}} \cdot h c \tau / \bar{\lambda}. \quad (13)$$

将(13)式代入(10)式，可得系统极限探测星等与系统各参数的关系式为

$$m_{obj} \leq 25 - 2.5 \lg \frac{n [R_{sn}^2 + \sqrt{R_{sn}^4 + 4(N_B + N_D + N_R)R_{sn}^2}]}{2.5 \pi D^2 \tau \tau_0 t \eta \epsilon}. \quad (14)$$

### 2.4 空间目标的像移模型

由于大部分空间目标以圆轨道或近圆轨道运动<sup>[12]</sup>，作为典型案例，着重研究圆轨道空间目标的运动特性对像移的影响。并设定地基光电系统以凝视模式进行观测，即指向赤经、赤纬一定，一定程度上抵消了地球自转的影响<sup>[4]</sup>。

对于不同轨道高度的空间目标，其运动速度为

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{(H + R_e)}}, \quad (15)$$

式中： $\mu$  为地心引力常数； $H$  为轨道高度； $R_e$  为地球赤道半径。

如图 3 所示，根据正弦定理可知：

$$\frac{R_e}{\sin \varphi} = \frac{(R_e + H)}{\sin(180^\circ - \Psi)}, \quad (16)$$

式中： $z$  为目标的天顶距； $\varphi$  为地心与探测系统在空间目标处的夹角； $\Psi$  为天顶角。

根据余弦定理，可以得到斜距  $R$  与轨道高度  $H$  的关系为

$$R = \sqrt{(R_e + H)^2 + R_e^2 - 2(R_e + H)R_e \cos(\Psi - \varphi)}. \quad (17)$$

由(15)式可知，对于轨道高度为  $H$  的空间目标，其运动速度大小  $v$  可以确定，但是方向未定。如图 3 所示，将经过目标点，且目标与地心连线垂直的平面定义为“运动面”，该“运动面”包括了所有可能的运动方向；在空间目标处模拟一个与光学系统

光轴垂直的“像平面”，该像平面平行于 CCD 像面。可知“像平面”与“运动面”之间的夹角为  $\varphi$ ，令两平面的交线为水平线。点  $O$  为地心， $O'$  为探测系统， $T$  为目标。

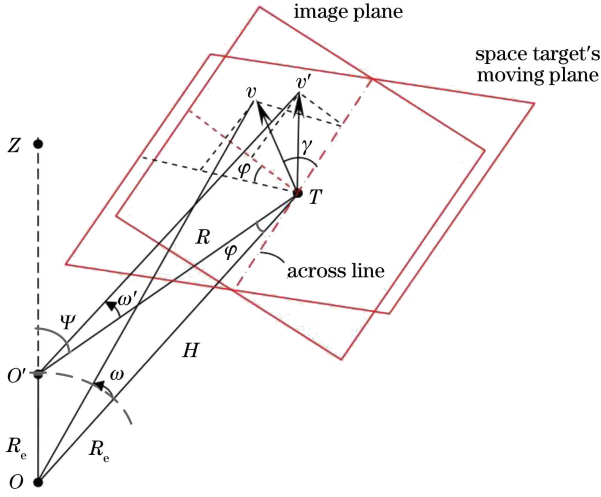


图 3 空间目标运动在像平面的投影<sup>[12]</sup>  
Fig. 3 Space target's projection on image plane<sup>[12]</sup>

已知空间目标的运动速度与两平面交线的夹角为  $\gamma$ ，则空间目标在像平面上的角速度  $\omega'$  为<sup>[12]</sup>

$$\omega' = \sqrt{\omega_x'^2 + \omega_y'^2} = \frac{v}{R} \sqrt{\cos^2 \gamma + \cos^2 \varphi \sin^2 \gamma}, \quad (18)$$

式中： $\omega_x'$ 、 $\omega_y'$  为空间目标在像面上的角速度沿水平轴  $x$  和垂直轴  $y$  方向上的投影。且当  $\gamma=0$  时， $\omega'$  取最大值，为  $v/R$ ；当  $\gamma=\pi/2$  时， $\omega'$  取最小值，为  $v \cos \varphi / R$ 。联立(15)、(18)式，可得到角速度  $\omega'$  与轨道高度  $H$  关系为

$$\omega' = \sqrt{\frac{(\cos^2 \gamma + \cos^2 \varphi \sin^2 \gamma) \mu}{(H + R_e) R^2}}. \quad (19)$$

由于中高目标距离探测器较远，所以在一定曝光时间内，可视作目标点在像面上作匀速运动。基于几何成像模型，考虑像面尺寸远远小于焦距  $f$ ，所以当曝光时间为  $t$  时，像移表达式为

$$L = t \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \approx f \cdot t \cdot \sqrt{\omega_x'^2 + \omega_y'^2} = f t \omega', \quad (20)$$

式中： $v_x$ 、 $v_y$  分别为目标点在像面上沿  $x$ 、 $y$  轴的像移速度。

将(19)式代入(20)式，可得到像移  $L$  与轨道高度  $H$  关系为

$$L = f \cdot t \cdot \sqrt{\frac{(\cos^2 \gamma + \cos^2 \varphi \sin^2 \gamma) \mu}{(H + R_e) R^2}}. \quad (21)$$

### 3 系统探测能力分析

由(11)、(12)式可知，地基光电探测系统探测能

力与光学系统有效通光口径、透射率、观测相位角、曝光时间、探测器的平均量子效率、信噪比阈值、暗电流噪声、背景噪声等参数有关。所以对于系统设备而言，可通过改变有效通光口径等系统参数来增强探测能力；但对于已给定设备而言，往往需要通过调整曝光时间来增强探测能力，实现最有效的观测。下面利用探测能力指标与影响因素的关系，着重分析在不同条件下空间目标的探测能力与曝光时间的关系，并进行数值模拟。

设定基本参数如下<sup>[10,13]</sup>：光学系统的平均量子效率  $\eta=0.7$ ；光谱透射率  $\tau_0=0.6$ ；有效通光口径  $D=0.15$  m；焦距  $f=0.4$  m；像元填充因子  $\epsilon=0.4$ ；暗电流产生的光电子数  $N_D=18$ ；电子读出噪声产生的光电子数  $N_R=6$ ；背景噪声产生光电子数  $N_B=187$ ；大气透射率  $\tau=0.5$ ；空间目标表面的平均反射率  $\rho=0.3$ ；目标等效截面积  $A_{obj}=0.64\pi$  m<sup>2</sup>；目标所占像元数  $n=16$ ；像斑宽度  $d=4$ ；像元尺寸  $a=9$  μm；平均波长  $\bar{\lambda}=555$  μm；信噪比阈值  $R_{sn}=3$ 。

#### 3.1 极限探测距离与曝光时间的关系

由(11)式可知，对于给定的地基光电探测系统，其对空间目标的极限探测距离与曝光时间和相位角有关，通常曝光时间越长，收集到的目标信号越多，极限探测距离越远；但是曝光时间增大，可能导致像元饱和以及对比度下降，所以需要合理地调整曝光时间，对不同距离的空间目标进行有效观测。为定量研究系统极限探测距离在不同相位角的影响下随曝光时间的变化，根据(11)式，对不同曝光时间下系统的极限探测距离进行仿真研究。

仿真结果如图 4 所示，相位角一定时，随曝光时间的延长，系统的极限探测距离逐渐增大。当曝光时间小于 0.2 s 时，极限探测距离增加显著；在 0.2~1 s 内变化时，其增长较快，所以此阶段可以通过延长曝光时间来有效提升探测极限距离。而当曝光时间持续增大时，极限探测距离增幅减小，曲线变化趋势趋于平缓。 $\theta=\pi/6$ ，曝光时间为 0.2 s 时， $R$  为 13732 km；曝光时间为 1 s 时， $R$  为 22332 km。曝光时间一定时，相位角的不同也会影响极限探测距离。随着相位角的增大，探测距离逐渐减小，并且当曝光时间较小时，相位角的变化对探测距离影响并不明显；但随着曝光时间的增加，相位角的影响愈加明显。因此，在一定范围内可通过延长曝光时间来有效提高系统的极限探测距离，实现对更高轨道空间目标的观测。

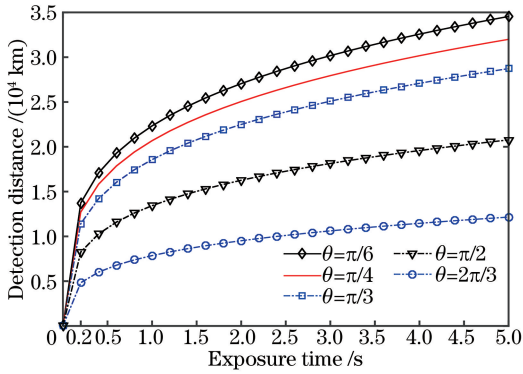


图 4 极限探测距离与曝光时间的关系

Fig. 4 Relationship between limit detection distance and exposure time

### 3.2 最小可探测尺寸与曝光时间的关系

由(12)式可知,对于处于同一个轨道的不同空间目标,尺寸大小决定了其是否能被探测系统观测到,而空间目标往往是一些尺寸较小的目标,需要合理调整曝光时间来探测。当观测距离  $R$  为  $2 \times 10^4$  km时,根据(12)式,可得到不同相位角情况下,系统对目标的最小可探测尺寸与曝光时间的关系,如图 5 所示。

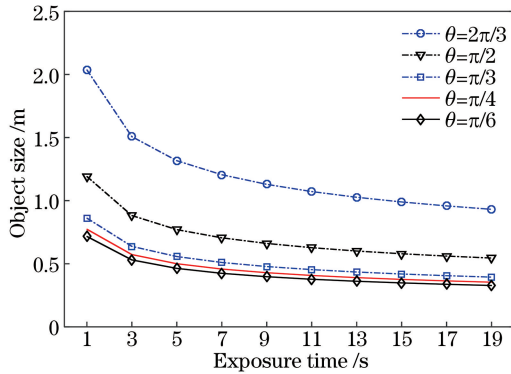


图 5 最小可探测尺寸与曝光时间的关系

Fig. 5 Relationship between minimum detectable size and exposure time

由图 5 可知,当相位角一定时,系统对目标的最小可探测尺寸随着曝光时间的增大而减小,当曝光时间小于 5 s 时,最小可探测尺寸明显下降;由 1 s 改变为 5 s 时,最小可探测尺寸降幅约为 36.4%;且当相位角  $\theta$  为  $0.5\pi$ ,曝光时间为 5 s 时,系统最小可探测尺寸为 1 m。但是当曝光时间大于 11 s 时,变化趋于平缓,曝光时间由 15 s 变化至 19 s 时,最小可探测尺寸降幅约为 6%。当曝光时间一定时,最小可探测尺寸与相位角成正相关,相位角越大,最小可

探测尺寸越大,系统探测能力越弱,并且随着相位角增大,最小可探测尺寸增大趋势变大。

### 3.3 极限探测星等与曝光时间的关系

由(14)式可知,系统对空间目标的极限探测星等与曝光时间和有效通光口径有关。通常系统有效通光口径越大,则系统集光越多且灵敏度越高,从这方面分析口径越大越好,但是实际上一味地增大口径代价太高<sup>[13]</sup>。因此,可结合延长曝光时间来有效提高系统的极限探测星等。图 6 定量分析了曝光时间对极限探测星等的影响。

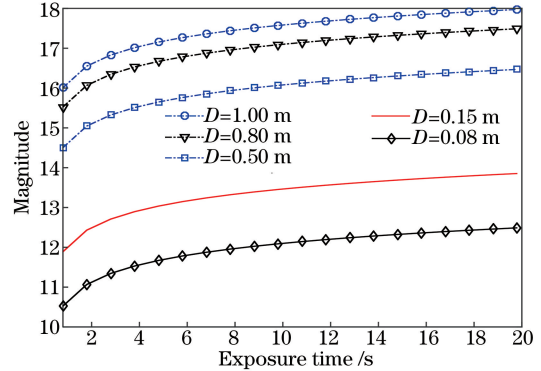


图 6 极限探测星等与曝光时间的关系

Fig. 6 Relationship between limit detection magnitude and exposure time

由图 6 可知,在不同有效通光口径下,系统对空间目标的极限探测星等随曝光时间的变化趋势大体相同:随着曝光时间的增加,系统极限探测星等先较快增长,后趋于平缓。曝光时间一定时,随着有效通光口径的增大,系统的极限探测星等也增加。这是由于更大的口径使得系统在一定时间获取到更多的目标辐射信号,单个像元目标产生的光电子数大大增加,从而使目标的信噪比增大。

### 3.4 动态条件下曝光时间的影响

以上分析基于空间目标未在像面发生移动,但在实际空间目标观测过程中,当系统未对目标进行跟踪时,目标相对系统往往是运动的,导致成像过程中会发生像移,并产生运动模糊,这对空间目标信息的获取造成一定困难。

由像移模型可知,空间目标的相对运动导致目标成像长度拉长,使得成像像元增多。根据(20)式,将动态条件下目标的成像像元数代入(14)、(12)式,即可得到目标相对系统具有一定角速度时,极限探测星等和最小可探测尺寸与曝光时间的关系为

$$m_{\text{obj}} \leq 25 - 2.5 \lg \frac{(n_0 + t\omega'd/a) [R_{\text{sn}}^2 + \sqrt{R_{\text{sn}}^4 + 4(N_{\text{B}} + N_{\text{D}} + N_{\text{R}})R_{\text{sn}}^2}]}{2.5\pi D^2 \tau \tau_0 t \eta \epsilon}, \quad (22)$$

$$r'_{obj} \geq \sqrt{\frac{8hc(n_0 + t\omega'd/a)R^2 [R_{sn}^2 + \sqrt{R_{sn}^4 + 4(N_B + N_D + N_R)R_{sn}^2}]}{\pi D^2 E_0 \tau \rho \tau_0 t \eta \epsilon \lambda [\sin \theta + (\pi - \theta) \cos \theta]}} \quad (23)$$

式中： $n_0$  为静态条件下目标成像像元数。

仿真结果分别如图 7、图 8 所示。当目标相对系统存在一定角速度而其他条件相同时，随着曝光时间的延长，系统极限探测星等先迅速增大，后逐渐减小；而最小可探测尺寸先迅速变小，后逐渐变大。系统对空间目标的探测能力呈迅速增强后逐渐减弱的变化趋势，且与目标相对系统静止时相比，系统探测能力有所下降。分析图 7(b) ( $D = 0.15 \text{ m}$ ) 与图 8(b) ( $\theta = \pi/3$ ) 可知，当曝光时间一定时，系统的探测能力随着角速度的增大而减小。图 7(b) 中  $\omega'$  分别为 15, 30, 45 ( $''$ )/s 和 1, 2 ( $'$ )/s 时，极限探测星等最大时的曝光时间分别对应为 1.52, 0.83, 0.58 s 和 0.46, 0.27 s。

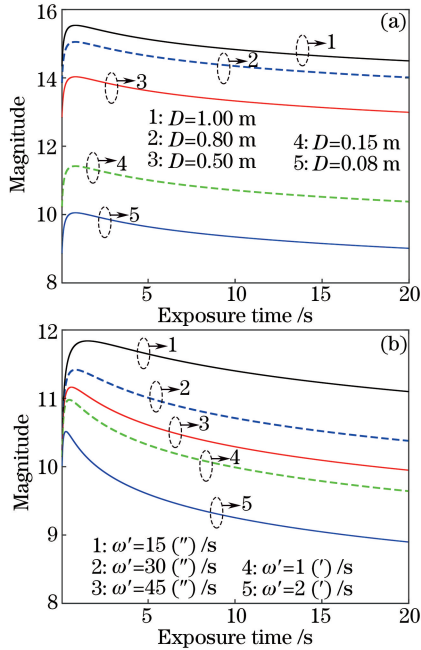


图 7 动态条件下极限探测星等与曝光时间关系。(a) 同一角速度  $\omega' = 30$  ( $''$ )/s; (b) 不同角速度  
Fig. 7 Relationship between limit detection magnitude and exposure time under dynamic conditions. (a) Same angular speed  $\omega' = 30$  ( $''$ )/s; (b) different angular speeds

这是由于曝光时间较短时，系统接收目标辐射能量不多，导致探测能力不足。随着曝光时间延长，接收目标辐射能量增多，系统探测能力自然变强。当曝光时间足够长时，此时曝光时间大于目标在像元上的积分时间，延长曝光时间使得像移的距离过长，引入的噪声信号越来越多，从而导致目标信噪比

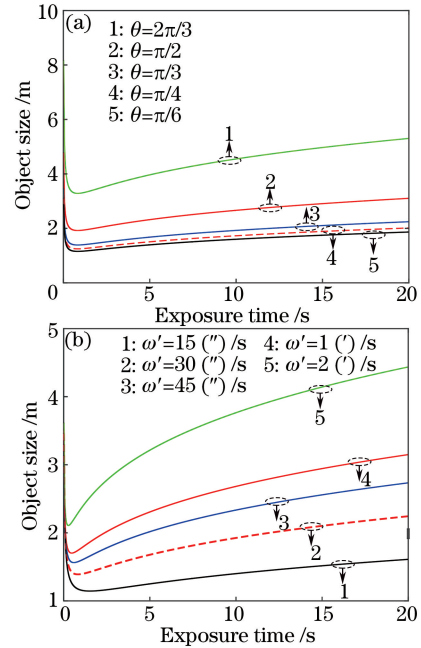


图 8 动态条件下最小可探测尺寸与曝光时间关系。(a) 同一角速度  $\omega' = 30$  ( $''$ )/s; (b) 不同角速度  
Fig. 8 Relationship between minimum detectable size and exposure time under dynamic conditions. (a) Same angular speed  $\omega' = 30$  ( $''$ )/s; (b) different angular speeds

降低，系统探测能力下降。所以存在某个最优曝光时间：一方面能对目标辐射能量进行有效积累；另一方面能减少只有噪声信号的叠加，且此曝光时间与相对角速度有关。

根据(15)式，可得到空间目标的运行速度与轨道高度的关系，如图 9(a) 所示。将不同轨道高度下目标的运行速度代入(18)式，即可得到不同轨道高度下，空间目标相对系统的角速度与天顶距的关系，如图 9(b) 所示。图 9 表明：在天顶距一定的条件下，随着轨道高度的增加，空间目标运行速度减小，且目标相对系统的角速度也逐渐减小；对于同一轨道高度的空间目标，随着天顶距的增大，其相对系统的角速度逐渐减小。

得到不同轨道高度下的空间目标相对系统的角速度后，结合(22)式，令  $\gamma = 0, z = 30^\circ$ ，可得到不同轨道高度条件下，系统对目标的极限探测星等随曝光时间变化的关系，如图 10 所示。对同一轨道高度的空间目标进行观测时，随着曝光时间的增加，系统的极限探测星等先迅速增大，后逐渐减小，并存在一

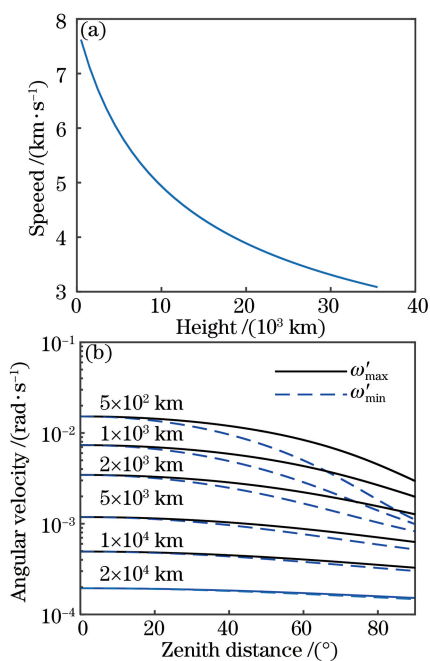


图 9 不同高度和天顶距下的空间目标的运动特性。  
(a)速度;(b)角速度

Fig. 9 Movement characteristics of space targets with different heights and zenith distances. (a) Speed; (b) angular velocity

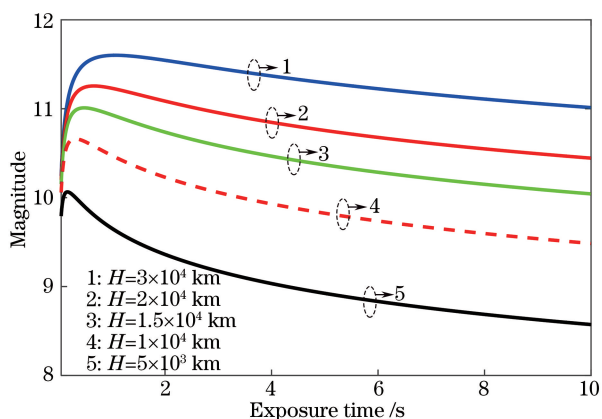


图 10 不同高度下极限探测星等与曝光时间关系  
Fig. 10 Relationship between limit detection magnitude and exposure time at different heights

个最优曝光时间,使得系统极限探测星等最高,且此最优曝光时间与轨道高度有关。曝光时间确定后,随着轨道高度的增加,系统的极限探测星等也会增大。

## 4 结 论

根据空间目标的光学辐射特性,结合信噪比公式,建立了地基光电探测系统对空间目标的极限探测距离、最小可探测尺寸和极限探测星等的计算模型,并分析了在空间目标相对静止和动态条件下,系

统各个探测指标与曝光时间等影响因素的关系。通过仿真研究发现,目标相对系统静止、曝光时间较小时,可通过延长曝光时间有效提高系统的探测能力。但是曝光时间增长到一定值时,变化趋于平缓,且容易达到饱和,此时可以通过增大通光口径有效提升探测能力。而当目标相对系统运动时,会存在最优曝光时间。仿真结果可以为空间目标探测中系统曝光时间优化提供一定的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] Wang J L. Development of technologies for detection and identification of space objects with ground-based E-O systems [J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2015, 34(6): 489-499.  
王建立. 空间目标地基光电探测与识别技术的发展 [J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(6): 489-499.
- [2] Gao Y, Zhao J Y, Liu J C, et al. Ground-based photoelectric surveillance for mid-high orbit target [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10): 2584-2590.  
高扬, 赵金宇, 刘俊池, 等. 中高轨道目标的地基光电监视 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2584-2590.
- [3] Li H S. Space target optical characteristic calculation model and method in the photoelectric detection target [J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3689-3694.
- [4] Hu J J, Liu J, Cui S X, et al. Analysis of the detection ability for the GEO region of the ground-based electro-optic telescope [J]. Astronomical Research & Technology, 2017, 14(1): 39-44.  
胡静静, 刘静, 崔双星, 等. 地基光电望远镜对 GEO 空间碎片探测能力分析 [J]. 天文研究与技术, 2017, 14(1): 39-44.
- [5] Shen B J, Tan J C, Yang J K, et al. Exposure time optimization of the star sensor [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(12): 22-26.  
沈本剑, 谭吉春, 杨建坤, 等. 星敏感器曝光时间的优化 [J]. 光电工程, 2009, 36(12): 22-26.
- [6] Tan B T, Chen H B, Wang Q S, et al. Evaluation on detecting ability of electro-optical systems to space targets [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 011013.  
谭碧涛, 陈洪斌, 王群书, 等. 光电系统对空间目标探测能力综合评估方法 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 011013.
- [7] Zhang Y, Niu Y X, Lü J M, et al. Modeling and performance evaluation on satellite-borne photoelectric imaging system [J]. Laser and Optoelectronics Progress,

- 2015, 52(2): 021101.  
张颖, 牛燕雄, 吕建明, 等. 星载光电成像系统建模与性能评估[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 021101.
- [8] Liu C H, Li Z, Xu C, *et al.* BRDF model for commonly used materials of space targets based on deep neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1129001.  
刘程浩, 李智, 徐灿, 等. 基于深度神经网络的空间目标常用材质 BRDF 模型[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1129001.
- [9] Zhao B, Yang S H, Wang S T, *et al.* Optical modeling and simulative survey of small objects in space[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3395-3403.  
赵彬, 杨苏辉, 王世涛, 等. 空间小目标的光学建模与模拟观测[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3395-3403.
- [10] Chen W Z, Zhang C H, Zhou X D. A study on luminosity features and signal noise ratio of space target[J]. Infrared Technology, 2007, 29(12): 716-719.  
陈维真, 张春华, 周晓东. 空间目标的光度特性及其成像信噪比研究[J]. 红外技术, 2007, 29(12): 716-719.
- [11] Zhang J H, Yao D S, Tan B. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1178-1182.  
张己化, 姚东升, 谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1178-1182.
- [12] Huang Z F, Wang J Z, Chen Z P. Motion characteristics analysis of space target and stellar target in opto-electronic observation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(4): 67-72.  
黄宗福, 汪金真, 陈曾平. 光电探测中空间目标和恒星目标运动特性分析[J]. 光电工程, 2012, 39(4): 67-72.
- [13] Zhang Y, Niu Y X, Yang L, *et al.* Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111004.  
张颖, 牛燕雄, 杨露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111004.