

星载光电成像系统对空间点目标成像的弥散与拖尾特性研究

吕建明 牛燕雄 刘海霞 张颖 许冰 牛海莎 刘雯文 杨露

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 星载光电成像系统对空间点目标成像进行探测、识别时,由于受到系统衍射、像差及系统与目标相对运动等因素的影响,点目标成像会产生弥散与拖尾现象。以空间目标可见光反射特性和系统点扩散理论为基础,建立了目标成像弥散的数学物理模型,对系统的衍射、像差造成点目标成像弥散进行了理论分析与数值模拟研究;分析了系统与目标的相对运动关系,推导了单帧积分时间内目标在像平面上拖尾长度的表达式,定量研究了轨道高度、观测角等对拖尾长度的影响。结果表明,像差使目标成像的弥散程度增大,像斑中心强度下降;在成像系统参数及其轨道高度一定的条件下,目标的拖尾长度随着目标轨道高度的降低、观测角的增大而增大。

关键词 成像系统;星载光电探测;空间点目标;弥散与拖尾;建模与仿真

中图分类号 O432.2; V474.2 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.091101

Research on Dispersion and Striation Characteristic of Satellite Photoelectric Imaging System for Space Point Target Imaging

Lü Jianming Niu Yanxiong Liu Haixia Zhang Ying Xu Bing Niu Haisha
Liu Wenwen Yang Lu

Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract When a satellite photoelectric imaging system is carried out on detection and recognition for space point target imaging, the point target will produce the phenomena of dispersion and striation because of the influence of diffraction and aberration of the system and the relative motion between the system and the target. A mathematical model of target imaging dispersion is derived based on the visible light reflectance characteristic of space target and the point spread theory of system, and the effect of diffraction and aberration on dispersion characteristic of the target imaging are analyzed and simulated; the relative motion relationship between the system and the target is analyzed. Expression for the striation length on image plane of the target is deduced within single frame integration time, and the influence of orbit altitude and observation angle on the striation is studied. Results show that the aberration makes dispersity increase and intensity of image patch decrease; striation length increases with the target's orbit altitude reducing and observation angle increasing under the condition of certain parameters and orbit altitude of imaging system.

Key words imaging systems; satellite photoelectric detection; space point target; dispersion and striation; modeling and simulation

OCIS codes 110.2970; 110.2990; 000.4430

1 引言

基于星载光电成像系统的空间目标(主要指卫星)探测与识别是空间态势感知的主要内容,而目标成像特性的研究是实现对其检测与识别的前提,在探测距离较远时,空间目标在像平面上没有形状和纹理等信息,目标成像的弥散与拖尾特性是检测与识别的重要依据。通过开展空间点目标成像特点的研究,可为星

收稿日期: 2014-03-03; 收到修改稿日期: 2014-04-08; 网络出版日期: 2014-08-18

作者简介: 吕建明(1990—),男,硕士研究生,主要从事光电对抗、目标探测与识别方面的研究。

E-mail: lvjianming_1990@126.com

导师简介: 牛燕雄(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事光电对抗方面的研究。

E-mail: niuyx@buaa.edu.cn(通信联系人)

载光电成像系统图像的仿真提供模拟数据,从而预先进行检测识别算法的开发,对空间目标的探测与识别等空间突防技术具有重要的应用价值。

美国早在1996年发射的“中段试验卫星(MSX)”装载了可见光传感器(SBV),开辟了天基空间监视的先河,SBV的信号处理器通过提取目标的拖尾信息,实现空间目标的探测^[1]。Levesque^[2]提出了一种基于成像拖尾的卫星目标检测方法,并实现卫星位置的获取。国内的赵彬等^[3]分析了空间小目标成像的亮度特性,潘海斌等^[4]对空间目标能量分布特性进行了研究。但他们均未考虑实际情况目标在CCD像平面上的弥散,而且目前大部分文献^[5-6]都利用高斯分布来模拟点目标的弥散特性,均未涉及像差对弥散特性的影响分析。高源等^[5]对天基观测时空间目标和探测器的相对切向速度进行了分析,但未对拖尾长度进行定量研究。

本文以空间目标反射背景辐射和系统点扩散理论为基础,建立了目标成像弥散的数学物理模型,分析了系统与目标的相对运动关系,推导了目标在像平面上拖尾长度的表达式,数值模拟研究了空间点目标成像的弥散、拖尾特性与影响因素的关系,得到了弥散与拖尾随各影响因素变化的规律,结果可为星载光电成像系统图像的模拟提供数据基础,为空间小目标检测识别算法的设计提供参考。

2 空间点目标在像平面上的弥散特性

星载光电成像系统是搭载在空间运行卫星上的光电成像系统。空间目标光学观测信号传输的路径都是真空,分析弥散特性时,不考虑大气扰动,同时忽略加工装调等因素,重点分析系统的衍射和像差对弥散特性的影响。由于光学系统衍射、像差等因素影响,单个点目标的焦平面成像为一个小的弥散斑^[7]。从空间背景的辐射特性出发,根据星载光电成像系统的传输特性,分析空间目标经系统成像的弥散特性,流程如图1所示。下面将结合具体步骤对目标弥散特性进行分析与研究。

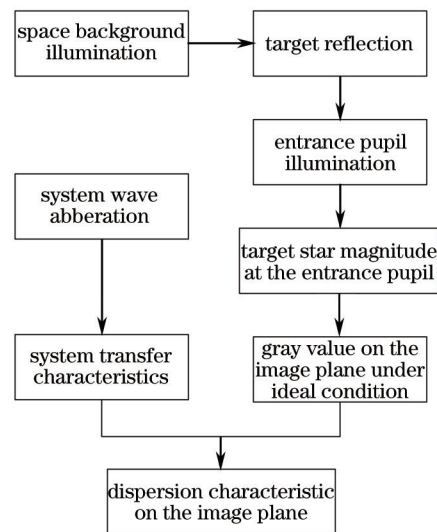


图1 弥散特性建模流程图

Fig.1 Dispersion characteristic model flowchart

2.1 空间背景辐照特性建模

对于空间目标,可见光背景辐射主要包括太阳直接辐射和地球反射辐射。由普朗克黑体辐射公式,太阳的辐射出射度 M 及其到目标表面的辐照度 E_{sun} 为

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} d\lambda, \quad (1)$$

$$E_{\text{sun}} = \frac{R_{\text{sun}}^2 M}{A_u^2}, \quad (2)$$

式中 λ 为波长; $c_1 = 3.741844 \times 10^8 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$, 为第一黑体辐射常数; $c_2 = 14388 \text{ (}\mu\text{m} \cdot \text{K)}$, 为第二黑体辐射常数; 太阳平均温度 $T = 5900 \text{ K}$; 太阳半径 $R_{\text{sun}} = 6.9599 \times 10^8 \text{ m}$; A_u 为太阳与空间目标的距离,由于空间目标与太阳较其与地球的距离大得多,因此可视为日地平均距离, $A_u = 1.49597892 \times 10^{11} \text{ m}$ 。

假设地球为漫反射体,对太阳辐射的反射遵守 Lambert-Beer 定律且各处均匀,反射率取平均反射率 $\rho = 0.35$ 。则地球反射辐照度为

$$E_{\text{earth}} = \rho E_{\text{sun}}. \quad (3)$$

2.2 理想条件下空间目标成像的灰度计算

星载光电成像系统主要利用空间目标反射背景辐射进行目标探测。对天基探测而言,辐射的传输损耗可以忽略不计。目标有效反射截面与成像系统入瞳面的几何位置关系^[8]如图 2 所示,其中 n_r 为目标有效反射截面的法线方向, n_{si} 为太阳辐射入射方向, n_{ei} 为地球反射辐射入射方向, n_d 为成像探测系统入瞳面的法线方向, OO' 为目标与探测器的距离, θ_r 为 n_r 与 OO' 的夹角,观测角 θ_d 为 n_d 与 OO' 的夹角。

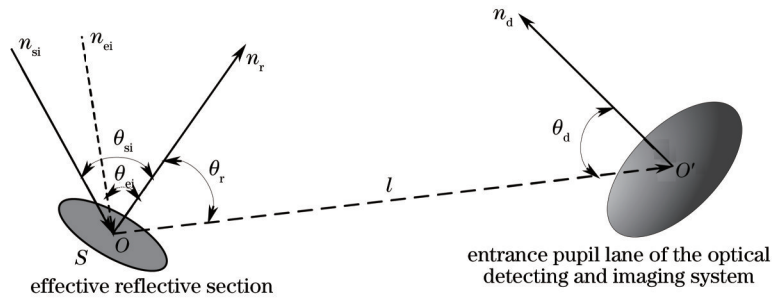


图 2 目标有效反射截面与成像系统入瞳面的几何位置关系

Fig.2 Irradiance on detector entrance pupil plane from target surface element

目标所接收的辐照度 E_o 为

$$E_o = E_{\text{sun}} \cdot \cos \theta_{si} + E_{\text{earth}} \cdot \cos \theta_{ei}. \quad (4)$$

根据余弦及距离平方反比定律,得出空间目标反射辐射在成像系统入瞳面处的辐照度 E 为

$$E = \rho_1 E_o \cos \theta_r \cos \theta_d S / l^2, \quad (5)$$

式中 ρ_1 为空间目标表面材料的平均反射率,取 0.81^[9]; S 为目标有效反射面积。 θ_{si} 、 θ_{ei} 、 θ_r 、 θ_d 反映了目标的姿态以及目标、成像系统、背景辐射源的相对位置关系。假设 $S = 3 \text{ m}^2$, $l = 1000 \text{ km}$, 当 $\theta_{si} = 45^\circ$, $\theta_{ei} = 30^\circ$, $\theta_r \in [0, 90^\circ]$, $\theta_d \in [0, 90^\circ]$ 时,在可见光 $0.38 \sim 0.78 \text{ }\mu\text{m}$ 波段,空间目标在成像系统入瞳处的辐照度变化情况如图 3 所示。

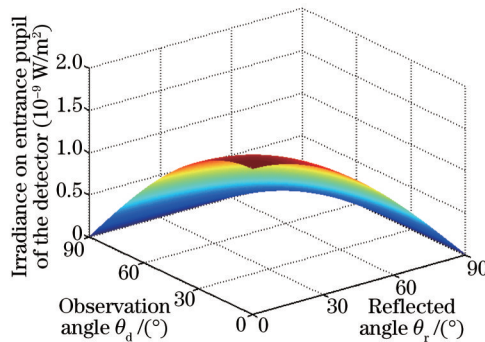


图 3 目标在系统入瞳处的辐照度与反射角和观测角的关系

Fig.3 Relation of irradiance on detector entrance pupil plane, reflected angle and observation angle

由图 3 得知,在探测距离、目标表面反射率、目标尺寸一定的条件下,目标的姿态及其与探测器、深空背景辐射源的相对位置不同时,目标在成像系统入瞳处的辐照度差异较大,对其进行弥散特性分析和成像模拟时,不可忽略上述因素影响。

数字图像中反映的是目标的灰度等级,因此要将辐照度转化为灰度。这里首先将辐照度转化为星等,再转化为灰度。取太阳为参考星,其等效视星等值为 -26.74 ,则辐照度为 E 的空间目标在成像系统入瞳处的等效视星等值 M_s 为^[10]

$$M_s = -26.74 - 2.5 \ln(E/E_{\text{sun}}). \quad (6)$$

理想成像条件下,点目标在 CCD 焦面上成像占据一个像素,利用灰度与星等的关系^[11],得出目标在像平

面上的灰度 G 为

$$G = \frac{255}{2.51^{M_s - 5}} \quad (7)$$

2.3 星载光电成像系统的传输特性分析

成像系统可以分为物平面到入瞳面、入瞳面到出瞳面、出瞳面到像平面这三个部分。为了确定系统的传输特性,可以将第二部分的透镜系统看成一个“黑箱”来处理,其两端为入瞳面和出瞳面,只要确定这一组件的边端性质,就完全描述了系统的传输特性^[12]。

2.3.1 系统像差建模

像差会影响成像系统的传输特性,通过波前像差函数^[12]来描述像差,运用 Zernike 多项式对波前像差函数进行建模。其中,作为基函数的 Zernike 多项式^[13]表达为

$$Z_n^m(\rho, \theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta), & m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta), & m < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 (ρ, θ) 为系统出瞳面的极坐标, $0 \leq \rho \leq 1$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$, $n \geq 0$; m 值为 $-n, -n+2, -n+4, \dots, n$; N_n^m 为归一化因素, $R_n^{|m|}(\rho)$ 为径向多项式,表示为

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}} \quad (9)$$

$$R_n^{|m|}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [0.5(n+|m|)-s]! [0.5(n-|m|)-s]!} \rho^{n-2s} \quad (10)$$

当 $m=0$ 时, $\delta_{m0}=1$; 当 $m \neq 0$ 时, $\delta_{m0}=0$ 。则波前像差函数的表达为^[14]

$$W(\rho, \theta) = \sum_n \sum_{m=-n}^n W_n^m Z_n^m(\rho, \theta) = \sum_n \left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=-n}^{-1} W_n^m [-N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta)] + \\ \sum_{m=0}^n W_n^m [N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta)] \end{array} \right\} \quad (11)$$

式中 W_n^m 是该像差模式($\binom{n}{m}$)的波前均方误差。 n 和 m 分别为径向多项式的阶数和方位角的频数, k 为多项式的阶数。

2.3.2 像差对系统传输特性的影响分析

成像系统的传输特性主要体现在点扩展函数上,线性空间不变光学系统点扩展函数的一般形式为^[13]

$$F_{ps}(x, y) = \frac{1}{\lambda^2 z_i^2 A_p} \left\| F_T \left\{ p(x, y) \cdot \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(x, y) \right] \right\} \right\|^2 \quad (12)$$

式中 F_T 为傅里叶变换; z_i 为系统出瞳面到像平面的距离; A_p 为出瞳面积; $W(x, y)$ 为出瞳处的波前像差函数; $p(x, y)$ 为出瞳函数,设该系统的出射光瞳为圆形,直径为 D ,则出瞳函数可表示为

$$p(x, y) = \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D/2} \right) = \begin{cases} 1, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq D/2 \\ 0, & \sqrt{x^2 + y^2} > D/2 \end{cases} \quad (13)$$

当系统为衍射受限系统时,像差 W 为零,其点扩展函数为

$$F_{ps}(x, y) = \frac{1}{\lambda^2 z_i^2 A_p} \left\| F_T [p(x, y)] \right\|^2 \quad (14)$$

在系统出瞳直径 D 为 3 mm,探测波段 λ 为 760 nm,波前均方误差(RMSE)为 0.14 μm 的条件下,对衍射和像差影响下系统的点扩展函数进行数值模拟,结果如图 4 所示。

由图 4 看出,衍射作用下系统的点扩展程度较小,像差使点扩展函数在权值和形状上发生了较大变化,像差作用下点扩展函数的峰值明显小于无像差时系统的点扩展函数的峰值,而且扩展程度增加。

2.4 空间点目标在像平面上的弥散特性模拟

实际成像时,系统对空间点目标成像的弥散模型为

$$F_{ps}(x, y) \otimes G(x, y) = I(x, y) \quad (15)$$

式中 $G(x, y)$ 为目标在理想成像条件下的灰度分布函数, $I(x, y)$ 为目标经系统所成图像的能量弥散分布函

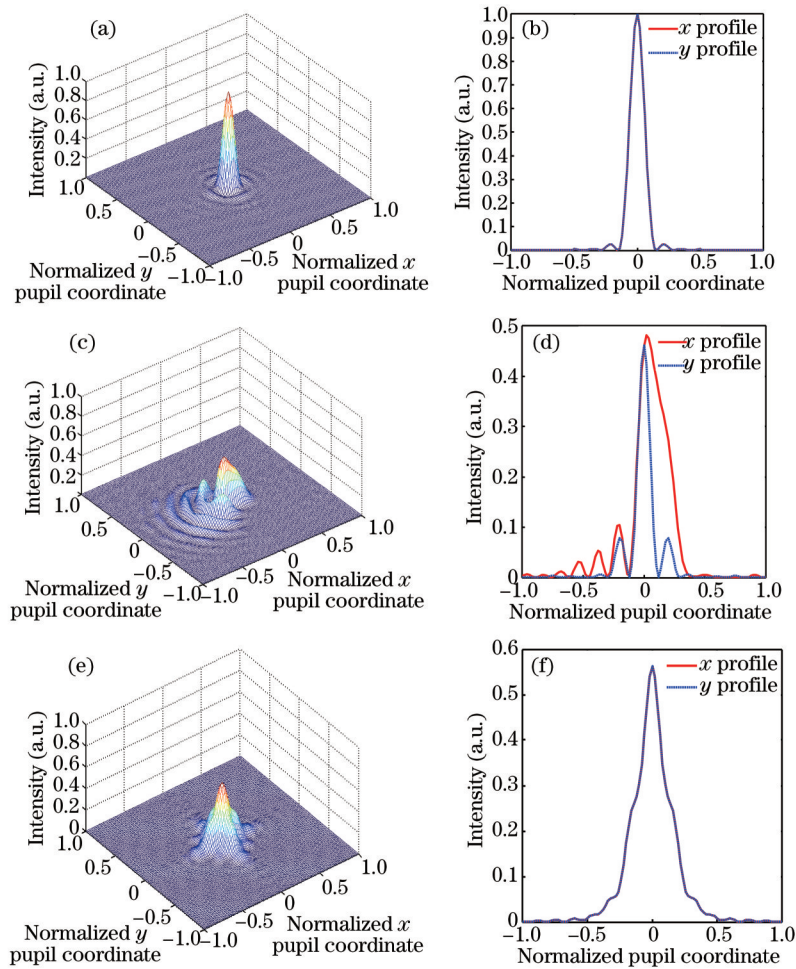


图4 系统点扩展函数三维图及 x 和 y 向轮廓。(a)~(b)衍射作用下的点扩展函数;(c)~(d)彗差作用下的点扩展函数;(e)~(f)像散作用下的点扩展函数

Fig.4 Point spread function (PSF) and its x and y profile of system. (a)~(b) PSF distorted by diffraction; (c)~(d) PSF distorted by coma; (e)~(f) PSF distorted by astigmatism

数, \otimes 代表卷积。在 $\theta_{si} = 45^\circ$, $\theta_{ci} = 30^\circ$, $\theta_r = 80^\circ$, $\theta_d = 60^\circ$, 探测距离 $l = 1000$ km 的情况下, 对空间目标在像平面上的弥散进行模拟仿真, 结果如图5所示。

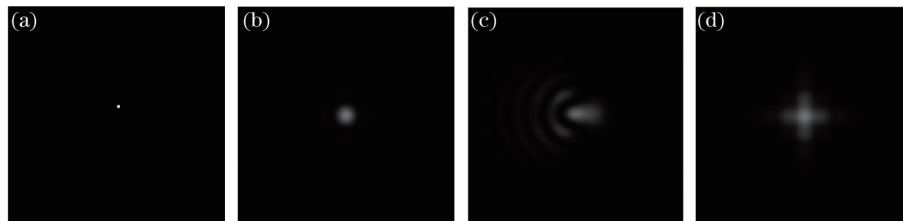


图5 空间点目标成像弥散分布图。(a)理想成像;(b)衍射作用下的弥散分布图;(c)彗差作用下的弥散分布图;(d)像散作用下的弥散分布图

Fig.5 Dispersion distribution map of space point target imaging. (a) Imaging under ideal imaging condition; (b) dispersion distribution map affected by diffraction; (c) dispersion distribution map affected by coma; (d) dispersion distribution map affected by astigmatism

由图5得出, 由于衍射的影响, 目标在像平面上的像由点像弥散为多像素, 其能量分布近似为高斯分布。像差使系统的传输特性发生改变, 目标成像扩展程度加剧, 像斑中心强度下降。

3 空间点目标在像平面上的拖尾特性

空间目标与星载光电成像系统的相对运动关系如图6所示, D 为成像系统, T 为空间目标, H 为系统轨

道高度, h 为空间目标轨道高度, v 为目标的运动速度, φ 为目标运动平面与成像系统像平面的夹角, θ 为观测视线与目标运动方向夹角, 这里称为观测角。根据三角关系, $\theta + \varphi = 90^\circ$ 。

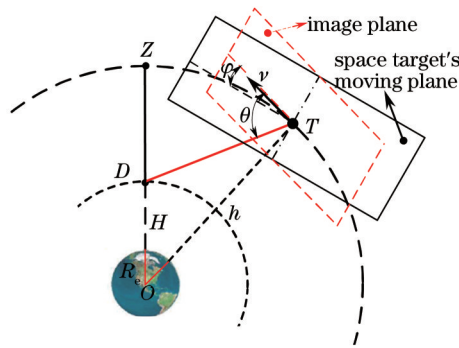


图6 空间目标运动分析示意图

Fig.6 Diagram of space target motion

根据轨道活力公式, 对不同轨道高度的目标, 其速度大小为^[5]

$$v^2 = \mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right), \quad (16)$$

式中 $\mu = 398613.52 \text{ km}^3/\text{s}^2$, 为开普勒常数; a 为空间目标轨道的半长轴; r 为目标距地心的距离, 考虑到卫星多为圆或近圆椭圆轨道, a 与 r 近似相等。又目标地心距 $r = R_c + h$, 其中 $R_c = 6378 \text{ km}$, 为地球半径, 则(16)式变为

$$v = \sqrt{\mu / (R_c + h)}. \quad (17)$$

在最大相对速度原则下, 空间目标与成像系统的最大相对角速度 w_{\max} 为

$$w_{\max} = \frac{\sqrt{\mu / (R_c + h)} + \sqrt{\mu / (R_c + H)}}{|h - H|}. \quad (18)$$

同理, 在最小相对速度原则下, 目标与系统的最小相对角速度 w_{\min} 为

$$w_{\min} = \frac{|\sqrt{\mu / (R_c + h)} - \sqrt{\mu / (R_c + H)}|}{h + H}. \quad (19)$$

根据目标与系统的相对角速度, 可计算空间点目标在像平面上的运动速率 v' 为

$$v' = \frac{w \times 180^\circ / \pi}{s} \cos \varphi = \frac{w \times 180^\circ / \pi}{s} \sin \theta, \quad (20)$$

式中 w 为目标与系统的相对角速度 (rad/s), s 为系统采用 CCD 的空间分辨率 [(°)/pixel]。则目标在像平面上的拖尾长度为

$$L = v' t, \quad (21)$$

式中 t 为探测器的单帧积分时间。

参照 SBV 的参数, 设定系统的轨道高度 H 为 898 km, 所采用的探测器参数如表 1 所示^[1], 则分辨率 $s = 1.4/420 = 0.003$ [(°)/pixel]。基于最大和最小相对速度原则, 对目标在像平面上的拖尾长度随轨道高度和观测角的变化规律进行数值模拟, 结果如图 7 所示。

表 1 探测器参数

Table 1 Parameters of the detector

Parameter	Value
Spectral range / μm	0.38~0.78
Field of view / ($^\circ$)	1.4×1.4
Frame integration time / s	0.625
Frame sizes / pixel ²	420×420

由图 7 看出, 在探测器参数及其轨道高度一定的情况下, 轨道较低的目标拖尾长度较大, 随着观测角的增加, 目标在像平面上的拖尾长度增大。在最大相对速度原则下, 由图 7(a)、(b) 可以得出, 在观测角大于

20°, 轨道高度小于 45000 km 的空间目标, 其拖尾长度大于 1 pixel, 在像平面上形成明显的条痕。在最小相对速度原则下, 由图 7(c) 可以得出, 当观测角小于 20° 时, 对于不同轨道高度的空间目标而言, 其在像平面上的拖尾长度都小于 1 pixel, 此时, 空间目标在像平面上基本不会产生条痕。对于单帧图像上没有明显条痕信息的空间目标检测, 可以通过将连续几帧图像进行叠加, 形成目标成像的条痕轨迹, 进而实现空间目标的检测。而且, 通过上述计算得出了不同轨道高度和观测角下的空间目标拖尾长度, 可为模拟星载光电成像系统的图像提供数据基础。

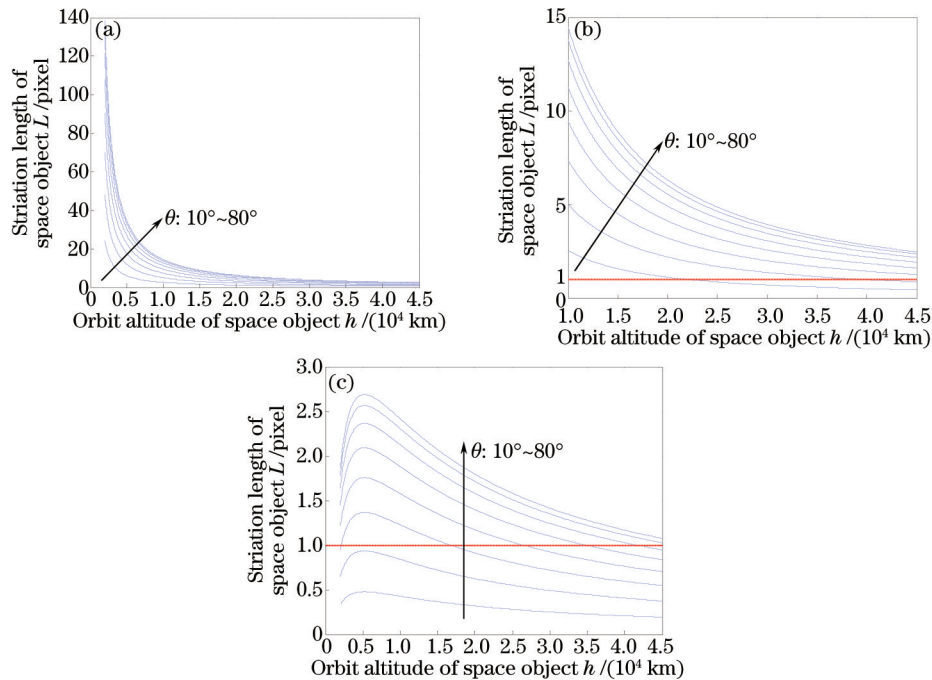


图7 空间目标在像平面上的拖尾长度。(a) 基于最大相对速度原则的拖尾长度; (b) 图 a 的局部放大图; (c) 基于最小相对速度原则的拖尾长度

Fig.7 Striation length of space object on the image plane. (a) Striation length based on maximum relative velocity principle; (b) partial enlarged drawing of figure a; (c) striation length based on minimum relative velocity principle

4 结 论

从弥散和拖尾两个方面对空间点目标的成像特性进行了研究, 在星载光电探测条件下, 空间点目标的弥散特性主要取决于星载光电成像系统的传输特性。像差作用下, 成像系统点扩展函数的峰值明显降低, 扩展程度加剧, 进而造成目标成像更加弥散, 像斑中心强度下降, 建立的模型可有效描述目标成像的弥散特性; 当成像系统参数及其轨道高度一定时, 目标的拖尾长度随着目标轨道高度的降低、观测角的增大而增大, 空间目标表现出明显的运动特性, 在图像中呈条痕状。仿真结果可为目标检测、识别算法的深入研究提供数据基础和指导, 对提高空间目标探测与识别技术具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 J Sharma, G H Stokes, C von Braun, *et al.*. Toward operational space-based space surveillance[J]. Lincoln Laboratory J, 2002, 13(2): 309-334.
- 2 Levesque M. Automatic reacquisition of satellite positions by detecting their expected streaks in astronomical images [C]. Maui: Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2009.
- 3 Zhao Bin, Yang Suhui, Wang Shitao, *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.
- 4 Pan Haibin, Cong Mingyu, Zhang Wei, *et al.*. Imaging model study of space objects from space remote sensor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11): 1699-1702.

- 潘海斌, 丛明煜, 张伟, 等. 航天遥感器的空间目标成像模型研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1699-1702.
- 5 Gao Yuan, Lin Zaiping, Li Jun, *et al.*. Imaging simulation algorithm for star field based on CCD PSF and space target's striation characteristic[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2008, 23(2): 58-62.
- 高源, 林再平, 李俊, 等. 基于 CCD 点扩散和拖尾特性的星空模拟方法研究[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(2): 58-62.
- 6 Li Jun, Gao Yuan, An Wei, *et al.*. Study on Simulation of space-based optical surveillance images[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(15): 3951-3954, 3961.
- 李俊, 高源, 安玮, 等. 天基光学空间目标监视图像仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(15): 3951-3954, 3961.
- 7 Macumber D, Gadaleta S, Floyd A, *et al.*. Hierarchical closely-spaced objects (CSO) resolution for IR sensor surveillance[C]. SPIE, 2005, 5913: 591304.
- 8 Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao, *et al.*. Analysis of influence of attitude variation on visible characteristics of space target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2748-2752.
- 袁艳, 孙成明, 张修宝, 等. 姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2748-2752.
- 9 Sun Chengming, Yuan Yan, Huang Fengzhen, *et al.*. Modeling and simulation on infrared imaging characteristics of space target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 563-568.
- 孙成明, 袁艳, 黄锋振, 等. 空间目标红外成像特性建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 563-568.
- 10 Tan Bin, Yao Dongsheng, Xiang Chunsheng, *et al.*. Star magnitude computing model of space target like prism[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(7): 33-37.
- 谈斌, 姚东升, 向春生, 等. 类柱体空间目标的星等计算模型研究[J]. 光电工程, 2008, 35(7): 33-37.
- 11 Chen Weizhen, Zhang Chunhua, Wang Xuwei, *et al.*. Moving target simulation of space observation serial images[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(3): 300-303.
- 陈维真, 张春华, 王学伟, 等. 空间观测序列图像目标运动成像仿真[J]. 激光与红外, 2008, 38(3): 300-303.
- 12 Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. Boston: McGraw-Hill, 1996.
- 13 Maeda P Y. Zernike polynomials and their use in describing the wavefront aberrations of the human eye[OL]. <ftp://130.216.208.118/jtur014/references/introductory/zernike-aberrations.pdf>.
- 14 Řeřábek M, Páta P, Koteň P. High order optical aberration influence to precision of astronomical image data processing [C]. SPIE, 2007, 6584: 658409.