

背景在椭圆轨道红外监视平台的成像特性分析

张 涛,薛永宏,丁永和,张 磊

(北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094)

摘 要: 掌握背景在椭圆轨道红外监视平台成像特性是开展红外图像数据处理的基础。首先,构建了椭圆轨道红外监视平台的几何投影模型和信号传递模型,给出了红外传感器的成像模型;其次,分析了平台姿态、背景本体相对运动、卫星轨道等因素对背景成像特性的影响,并推导给出了相关数学影响模型;最后,通过仿真试验验证了数学推导模型的正确性,并给出了背景成像特性的综合仿真结果。分析结果表明:椭圆轨道红外监视平台探测图像中,背景呈现出了新特性,对红外图像数据处理提出了新要求。

关键词: 红外成像特性; 成像模型; 椭圆轨道; 天基红外系统

中图分类号: TN21 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0326001

Analysis of imaging characteristics of background in elliptical orbit infrared surveillance platform

Zhang Tao, Xue Yonghong, Ding Yonghe, Zhang Lei

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The imaging characteristic of background in elliptical orbit infrared platform is the basis of infrared image data processing. Firstly, the geometric projection model and signal transfer model of elliptical orbit infrared platform were established, and the imaging model of infrared sensor was given. Secondly, the effect of platform attitude, relative movement of background ontology and orbit on imaging characteristic of background were analyzed and the mathematical influence model was deduced. Finally, simulation experiments verified the correctness of the model, and the synthetic simulation results of imaging characteristics of background were given. The analysis results show that new features of background are presented in the detect image of infrared surveillance platform running on the elliptical orbit, and new requirements for infrared imaging data process are requested.

Key words: infrared imaging characteristic; imaging model; elliptical orbit; space based infrared system

收稿日期:2015-07-11; 修订日期:2015-08-20

基金项目:武器装备预研基金

作者简介:张涛(1978-),男,工程师,博士,主要从事航天系统工程总体、空间信息处理、综合电子战技术方面的研究。

Email:nudtzt@sina.com

0 引言

红外监视系统因其作用距离远、隐蔽性强而被广泛应用于军事和民用领域。美国天基红外系统(SBIRS, Space based infrared system)是典型的天基红外监视系统, 主要对全球导弹和航天发射活动进行持续不断的监视预警。通常 SBIRS 系统获取的探测信号既包括感兴趣的目标信号, 又包括干扰的背景信号。了解和掌握背景在红外监视平台像平面上的成像特性对目标信号检测等技术的研究具有重要的意义。

目前已有许多学者对 SBIRS 系统的红外成像特性展开了研究。参考文献[1-3]分别研究了 SBIRS 低轨部分(SBIRS-LOW)对导弹中段目标和目标群的成像特性。由于 SBIRS 系统的低轨部分主要利用深空冷背景对导弹中段进行探测, 背景信号主要是探测器噪声, 研究主要针对目标特性展开, 对背景特性的研究较少。参考文献[4]综合辐射传输特性、地表类型等因素, 对地球背景红外成像特性进行了仿真, 但研究主要针对背景辐射特性, 由于未考虑卫星轨道特点, 对背景运动特性的研究较少。

卫星在椭圆轨道远地点附近运行速度慢, 对地持续观测时间长, 尤其大椭圆闪电轨道可长时间停留在北极上空, 弥补其他轨道卫星对背景覆盖的空隙。美国于 2006 年和 2008 年先后共发射了两颗椭圆轨道红外监视卫星, 获得了较好的探测效果。文中以 SBIRS-HEO 红外监视卫星为研究背景, 结合椭圆轨道特点、平台姿态、背景本体相对运动等因素^[5], 对背景在椭圆轨道红外监视平台的辐射特性和运动特性进行仿真分析。

1 传感器成像模型

传感器对背景的成像模型可分别通过三维空间与像平面之间物、像的几何投影模型和信号传递模型进行描述。

1.1 几何投影模型

三维空间与像平面之间物、像的几何投影模型可通过一系列坐标变换描述^[6-7], 如图 1 所示。

假设传感器视场内, 任一点的位置为 $r=(x, y, z)^T$, 卫星的位置 r_{sat} 和速度 v_{sat} 分别为 $r_{sat}=(x_{sat}, y_{sat}, z_{sat})^T$ 和 $v_{sat}=(v_{x_{sat}}, v_{y_{sat}}, v_{z_{sat}})^T$, 其中 $(\cdot)^T$ 表示矩阵转置, 则空间点

投影到传感器像平面的过程如下:

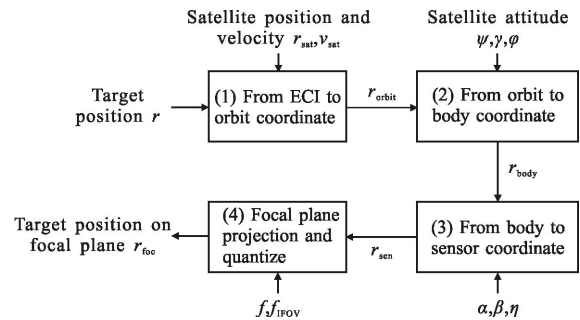


图 1 红外传感器成像模型

Fig.1 Imaging model of IR sensor

(1) 地惯坐标系中的位置 r , 通过坐标旋转和平移, 得到轨道坐标系下的位置 r_{orbit} :

$$r_{orbit}=(x_{orbit}, y_{orbit}, z_{orbit})^T=R_{ECI}^{orbit}(r-r_{sat}) \quad (1)$$

式中: $R_{ECI}^{orbit}=(x_o, y_o, z_o)=\begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix}$, x_o, y_o, z_o 分别表示轨道坐标系坐标轴在地惯坐标系中的指向矢量。

定义如下:

$$\begin{cases} x_o=(l_x, m_x, n_x)^T=y_o \times z_o \\ y_o=(l_y, m_y, n_y)^T=\frac{\dot{r}_s \times r_s}{\|\dot{r}_s \times r_s\|} \\ z_o=(l_z, m_z, n_z)^T=-\frac{r_s}{\|r_s\|} \end{cases} \quad (2)$$

(2) 轨道坐标系中的位置 r_{orbit} , 通过绕卫星姿态角旋转, 得到星体坐标系下的位置 r_{body} :

$$r_{body}=(x_{body}, y_{body}, z_{body})^T=R_{orbit}^{body} r_{orbit} \quad (3)$$

式中: $R_{orbit}^{body}=R_x(\psi)R_y(\gamma)R_z(\varphi)$, ψ, γ, φ 分别为卫星姿态的滚转角、俯仰角和偏航角, $R_x(\cdot), R_y(\cdot), R_z(\cdot)$ 分别表示绕 X、Y、Z 轴的旋转矩阵(下同, 其定义见参考文献[6])。

(3) 星体坐标系中的位置 r_{body} 通过传感器指向角旋转, 得到传感器坐标系下的位置 r_{sen} :

$$r_{sen}=(x_{sen}, y_{sen}, z_{sen})^T=R_{body}^{sen} r_{body} \quad (4)$$

式中: $R_{body}^{sen}=R_y(\pi/2-\eta)R_z(\xi)$, η, ξ 分别为传感器指向的俯仰和方位角, 这里假定传感器指向与星体坐标系 Z_{body} 重合时的俯仰角为 $\pi/2$ 。

(4) 传感器坐标系中的位置 r_{sen} , 通过投影、量化, 得到像平面坐标系下的位置 r_{foc} :

$$r_{foc}=(x_{foc}, y_{foc})^T=q(r_{sen})=\left(\left[\frac{f}{d_{foc}} \cdot \frac{x_{sen}}{z_{sen}} \right], \left[\frac{f}{d_{foc}} \cdot \frac{y_{sen}}{z_{sen}} \right] \right) \quad (5)$$

式中： $q(\cdot)$ 为像平面映射函数； f 为传感器焦距； d_{foc} 为单个像元的尺寸大小； $[\cdot]$ 表示就近取整运算。综合公式(1)~(5)，可得物与像的几何投影模型为：

$$\begin{cases} r_{\text{sen}} = R_{\text{body}}^{\text{sen}} R_{\text{orbit}}^{\text{body}} R_{\text{ECl}}^{\text{orbit}} (r - r_{\text{sat}}) \\ r_{\text{foc}} = q(r_{\text{sen}}) \end{cases} \quad (6)$$

由于 $\|R_{\text{body}}^{\text{sen}} R_{\text{orbit}}^{\text{body}} R_{\text{ECl}}^{\text{orbit}}\| = 1$ ，因此 $\|r_{\text{sen}}\| = \|r - r_{\text{sat}}\|$ ，将公式(6)两边同时除以 $\|r - r_{\text{sat}}\|$ ，并记地惯坐标系下单位目标视线矢量为 v_{eci} ，则有：

$$\begin{cases} r_{\text{sen}} = R_{\text{body}}^{\text{sen}} R_{\text{orbit}}^{\text{body}} R_{\text{ECl}}^{\text{orbit}} v_{\text{eci}} \\ r_{\text{foc}} = q(v_{\text{sen}}) \end{cases} \quad (7)$$

1.2 信号传递模型

与单个传感器像元相比，地球大气背景可看作是大面积的朗伯辐射源^[8]。朗伯辐射源具有良好的辐射各向同性。假设地球大气背景辐射亮度为 L ，传感器像元角分辨率为 f_{IFOV} ，则背景辐射在大椭圆轨道红外凝视卫星传感器入瞳处产生的辐射照度为：

$$E_{\text{sen}}^{(B)} = L \cdot f_{\text{IFOV}}^2 \cdot \cos(\theta_0) \quad (8)$$

式中： θ_0 为入射光线与传感器口面法线的夹角，对扫描传感器通常认为 $\theta_0 = 0$ 。由背景辐射的均匀性可知，像平面上任意一个像元获取的背景辐射照度为：

$$E_{\text{foc}}^{(B)} = E_{\text{sen}}^{(B)} \cdot \tau_0 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4d_{\text{foc}}^2} = L \cdot f_{\text{IFOV}}^2 \cdot \cos(\theta_0) \cdot \tau_0 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4d_{\text{foc}}^2} \quad (9)$$

式中： τ_0 为传感器系统的效率； D 为传感器光学口径大小。若假设红外传感器成像积分时间为 t_d ，则可得单个像元获得的背景辐射能量为：

$$Q_{\text{foc}}^{(B)} = \int_0^{t_d} \int_{y_c - \frac{d_{\text{foc}}}{2}}^{y_c + \frac{d_{\text{foc}}}{2}} \int_{x_c - \frac{d_{\text{foc}}}{2}}^{x_c + \frac{d_{\text{foc}}}{2}} E_{\text{foc}}^{(B)} dx dy dt = d_{\text{foc}}^2 \cdot \int_0^{t_d} E_{\text{foc}}^{(B)} dt \quad (10)$$

式中： (x_c, y_c) 为当前像元中心点在像平面的安装位置。由公式(9)和公式(10)可知，传感器获取的地球大气背景辐射能量仅与光学系统口径、像元尺寸、角分辨率等参数相关，与卫星轨道等平台参数无关。

1.3 成像模型

综合公式(7)和公式(10)可知，传感器对背景成像模型为：

$$\begin{cases} r_{\text{foc}} = q \left(R_{\text{body}}^{\text{sen}} R_{\text{orbit}}^{\text{body}} R_{\text{ECl}}^{\text{orbit}} \frac{r - r_{\text{sat}}}{\|r - r_{\text{sat}}\|} \right) \\ Q_{\text{foc}}(r_{\text{foc}}) = Q_{\text{foc}}^{(B)}(r_{\text{foc}}) \end{cases} \quad (11)$$

上式给出了背景与目标在传感器像平面上的位置关系以及能量传递关系。按照传感器设计的动态范围及量化位数，对每个像元获取的背景与目标能

量 $Q_{\text{foc}}(r_{\text{foc}})$ 进行进一步能量转换及量化，即可得到其灰度图像。

2 成像影响因素分析

由传感器成像模型可以看出，影响其成像特性的主要因素包括：平台姿态、背景本体相对运动、卫星轨道等，下面将逐一对其进行分析。

2.1 平台姿态

在椭圆轨道下，卫星平台沿轨道运行时，为确保传感器始终指向地面，必须时刻调整卫星平台姿态，如图 2 所示。

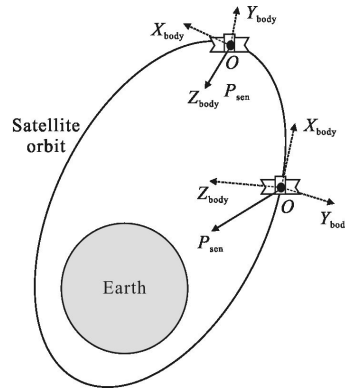


图 2 卫星姿态与传感器指向关系示意图

Fig.2 Sketch map of satellite attitude and sensor point

为最大限度地减小卫星姿态变化对背景成像特性的影响，一种可行卫星姿态控制策略是使卫星星体坐标系 Z_{body} 轴始终指向地心，确保传感器始终指向地面； X_{body} 轴位于轨道面内垂直于 Z_{body} 轴，且指向飞行方向； Y_{body} 轴由 Z_{body} 轴和 X_{body} 轴通过右手系确定。

此时，传感器始终指向地面，其相对背景的运动主要由卫星轨道变化引起，平台姿态对成像特性的影响可以忽略。

2.2 背景本体相对运动

为研究背景本体相对运动对其成像特性的影响，在假定卫星姿态、轨道等因素不变的条件下，将公式(7)对时间求导可得：

$$\dot{r}_{\text{foc}}^{(B)} = \frac{dr_{\text{foc}}}{dt} = \frac{dq(r)}{dr^T} \Big|_{r=r_{\text{sen}}} \cdot \frac{dv_{\text{sen}}}{dt} \quad (12)$$

其中

$$\frac{dq(r)}{dr^T} = \frac{f}{d_{\text{foc}}} \cdot A(r) = \frac{f}{d_{\text{foc}}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{z} & 0 & \frac{-x}{z^2} \\ 0 & \frac{1}{z} & \frac{-y}{z^2} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\frac{dv_{sen}}{dt} = R_{body}^{sen} R_{orbit}^{body} R_{ECI}^{orbit} \frac{dv'}{dt} \Big|_{v' = \frac{r-r_{sat}}{\|r-r_{sat}\|}} =$$

$$R_{body}^{sen} R_{orbit}^{body} R_{ECI}^{orbit} \frac{\dot{r} - ((r-r_{sat})^T \dot{r})(r-r_{sat})}{\|r-r_{sat}\|^3} =$$

$$\frac{R_{body}^{sen} R_{orbit}^{body} R_{ECI}^{orbit} \cdot \dot{r} - ((v')^T \dot{r})v_{sen}}{\|r-r_{sat}\|} \quad (14)$$

注意到 $A(v_{sen})v_{sen}=0$, 公式(13)和(14)代入公式(12)后得出, 背景在像平面的运动特性为:

$$\dot{r}_{foc}^{(B)} = \frac{f}{d_{foc}} \cdot A(v_{sen}) R_{body}^{sen} R_{orbit}^{body} R_{ECI}^{orbit} \frac{\dot{r}}{\|r-r_{sat}\|} \quad (15)$$

公式(15)表明背景本体相对运动 \dot{r} 是导致其在像平面运动特性的主要因素。

背景本体相对运动由两部分合成: 一是背景中云层等的运动, 通常速度较慢, 小于 100 m/s; 二是地球自转引起的背景运动, 当卫星轨道倾角接近于 90° 时, 其影响尤为明显。

2.3 卫星轨道

假定卫星姿态、背景本体相对运动等因素随时间恒定, 将公式(7)对时间求导可得

$$\dot{r}_{foc} = \frac{dr_{foc}}{dt} = \frac{dq(r)}{dr^T} \Big|_{r=v_{sen}} \cdot \frac{dv_{sen}}{dt} \quad (16)$$

式中: $\frac{dq(r)}{dr^T}$ 如公式(13)所示, $\frac{dv_{sen}}{dt}$ 将表示为

$$\frac{dv_{sen}}{dt} = \left(R_{body}^{sen} R_{orbit}^{body} \frac{dR_{ECI}^{orbit}}{dt} v' + R_{body}^{sen} R_{orbit}^{body} R_{ECI}^{orbit} \frac{dv'}{dt} \right) \Big|_{v' = \frac{r-r_{sat}}{\|r-r_{sat}\|}} \quad (17)$$

将公式(13)和公式(17)代入公式(16), 简化后可得到

$$\dot{r}_{foc} = \frac{f}{d_{foc}} \cdot A(r) \left(R_{body}^{sen} R_{orbit}^{body} \frac{dR_{ECI}^{orbit}}{dt} \frac{r-r_{sat}}{\|r-r_{sat}\|} + R_{body}^{sen} R_{orbit}^{body} R_{ECI}^{orbit} \frac{\dot{r}_{sat}}{\|r-r_{sat}\|} \right) \quad (18)$$

由公式(18)可知, 卫星轨道对背景成像特性的影响主要由括号中的两部分组成。第一部分, $\frac{dR_{ECI}^{orbit}}{dt}$

可认为是缓变量; 第二部分 $\frac{\dot{r}_{sat}}{\|r-r_{sat}\|}$ 表征卫星运动速度与高度的比值, 是时变量。当椭圆轨道的偏心率较大时, 第二部分的影响尤为显著。

3 仿真试验与分析

首先分别对背景本体相对运动和卫星轨道等因素的影响进行仿真分析。仿真中假定传感器像元角分辨率为 40 μrad ^[9], 卫星运行于 Molniya 轨道, 轨道根数见表 1^[7]。

表 1 轨道根数

Tab.1 Orbit parameters

Item	Semimajor axis/km	Eccentricity	Right ascension of ascending node/(°)
Value	26 553.4	0.740 969	270.0
Item	Inclination/(°)	Argument of perigee/(°)	Mean anomaly/(°)
Value	63.4	0.0	0.0

3.1 背景本体相对运动

卫星在 Molniya 轨道运行时, 在近地点段星下点运动速度快, 难以进行成像工作, 通常在远地点段传感器开机工作。仿真当卫星分别处于 35 000 km 和 40 000 km 高度时, 背景本体相对运动导致的成像特性运动趋势如图 3 所示, 图中数值的单位为 $\mu\text{rad/s}$ 。

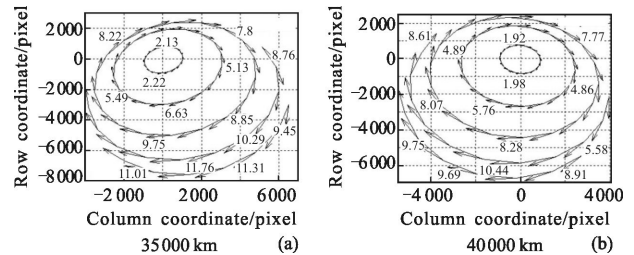


图 3 背景本体相对运动引起的像运动趋势

Fig.3 Trend of image movement caused by relative movement of background ontology

从仿真结果可以看出, 背景本体相对运动导致的成像特性运动趋势表现为旋转运动, 且不同纬度区域旋转运动速度不同, 纬度越低旋转运动趋势越大。背景成像特性的运动趋势与地球自转趋势相匹配, 也验证了公式(15)分析的正确性, 即地球自转是引起背景本体相对运动和成像特性运动的主要因素。进一步仿真计算不同纬度区域背景本体相对运动导致的旋转速度如图 4 所示, 在低纬度地区, 由背景本体相对运动导致的像旋转速度可高达 11 $\mu\text{rad/s}$ 。

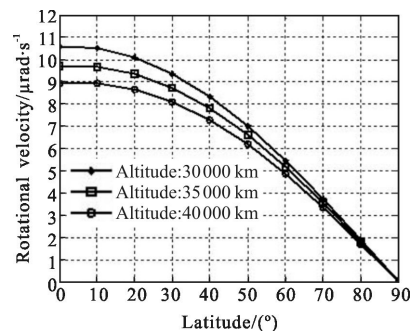


图 4 不同纬度背景在像平面运动速度

Fig.4 Velocity of image movement under different latitudes

3.2 卫星轨道

卫星运行于远地点段, 分别仿真当卫星处于上升段、下降段以及最高点时, 背景成像特性的运动趋势如图 5 所示, 图中数值的单位为 $\mu\text{rad/s}$ 。

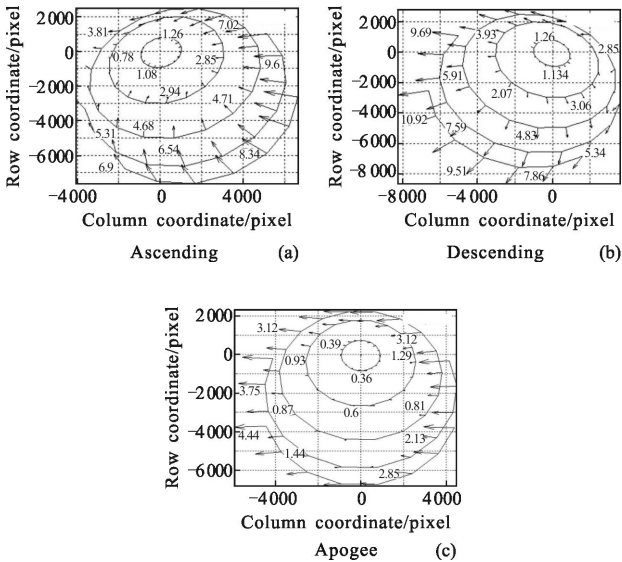


图 5 卫星轨道引起的背景在像平面运动趋势

Fig.5 Trend of image movement caused by satellite orbit

从仿真结果可以看出, 卫星轨道导致的背景成像特性运动趋势表现为缩放运动, 且不同纬度区域缩放运动速度不同, 纬度越低缩放运动趋势越大。进一步仿真计算不同纬度区域卫星轨道导致的缩放速度如图 6 所示, 在低纬度地区缩放速度可高达 $16 \mu\text{rad/s}$ 。

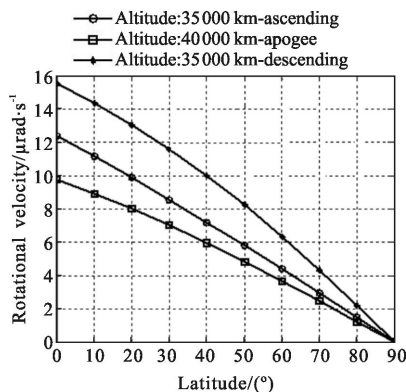


图 6 不同纬度背景在像平面运动速度

Fig.6 Velocity of image movement under different latitudes

3.3 背景成像特性综合仿真

综合信号传递、背景本体相对运动、卫星轨道等

因素, 仿真当卫星处于远地点段不同轨道高度时, 背景的宏观成像特性、运动趋势及微观成像特性分别如图 7、图 8 和图 9 所示。

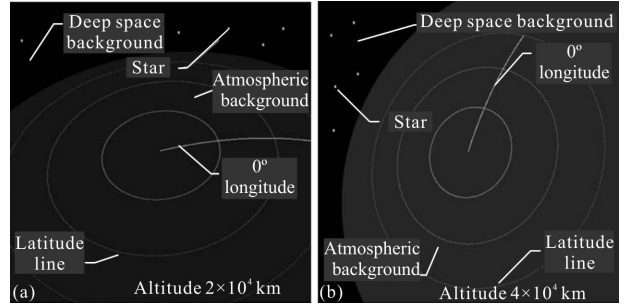


图 7 背景宏观成像特性

Fig.7 Macroscopical imaging characteristic of background

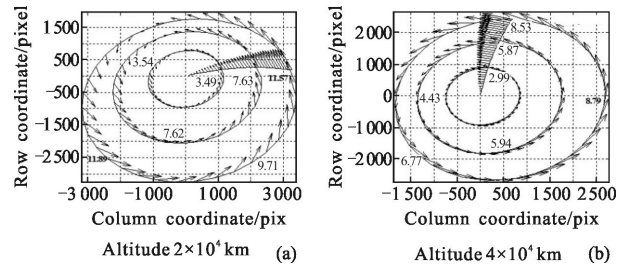


图 8 背景运动趋势

Fig.8 Movement tendency of background

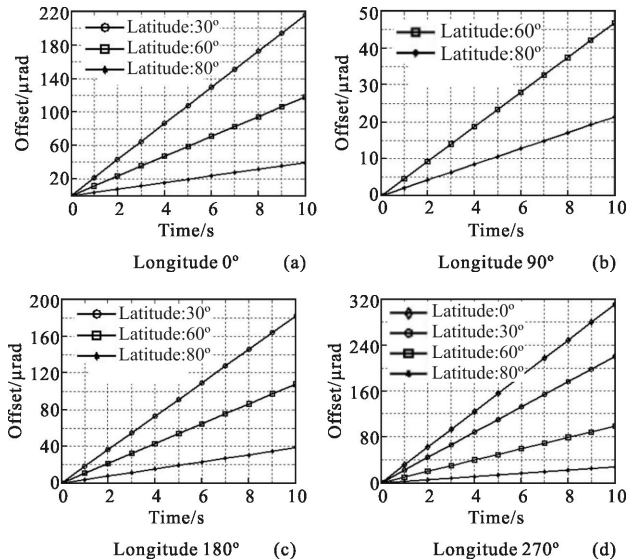


图 9 背景微观成像特性

Fig.9 Microcosmic imaging characteristic of background

从图 7 的仿真结果可以看出: 在宏观上椭圆轨道红外监视平台探测图像中既包括地球大气背景, 也包括临边大气背景和深空背景。单帧图像中背景复杂、类型多样, 增大了监视平台红外目标检测的难

度,要求目标检测算法必须具备多类型背景自适应处理能力。

从图8和图9背景运动趋势及其速度仿真结果可以看出,在椭圆轨道红外监视平台探测图像中,背景随时间的运动既包括旋转运动,也包括缩放运动;且不同纬度区域旋转、缩放运动的速度不同。背景呈现出的复杂运动趋势增大了序列图像目标检测时,帧间图像配准的难度,要求序列图像目标检测算法设计时必须采用新的帧间图像配准方法或新的目标检测技术途径。

4 结论

红外图像数据处理方法的研究与背景在传感器像平面的成像特性密切相关。理论分析、仿真试验结果表明:背景在椭圆轨道红外监视平台探测图像中呈现新的特性,对目标检测、帧间图像配准等提出了新的要求。未来天基红外系统设计时,必须采用一体化设计思想,综合考虑传感器、平台和轨道等变化对数据处理方法的影响,提高系统的整体性能。

参考文献:

- [1] Lin Liangkui, Xie Kai, Xu Hui, et al. Research on infrared imaging simulation of midcourse ballistic object target complex [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(3): 218-223. (in Chinese)
林两魁, 谢恺, 徐晖, 等. 中段弹道目标群的红外成像仿真研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(3): 218-223.
- [2] Liu Tao, Jiang Weidong, Li Xiang, et al. Simulation calculation of dynamic infrared radiation characteristics of the target in ballistic midcourse [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 23(12): 5-8. (in Chinese)
刘涛, 姜卫东, 黎湘, 等. 弹道中段目标动态红外辐射特性仿真计算研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 23(12): 5-8.
- [3] Liu Tao, Yang Degui, Jiang Weidong, et al. IR imaging modeling and simulation of ballistic target group outside atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 589-594. (in Chinese)
刘涛, 杨德贵, 姜卫东, 等. 大气层外弹道式目标群红外成像建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 589-594.
- [4] Zhang Weiqing, Xuan Yimin, Han Yuge. Approach of generating infrared picture about the earth background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 39-44. (in Chinese)
张伟清, 宣益民, 韩玉阁. 地球红外辐射背景成像方法研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 39-44.
- [5] Sun Jiabing. Principles and Applications of Remote Sensing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009. (in Chinese)
孙家柄. 遥感原理与应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
- [6] Sheng Weidong. Research on target tracking technologies for space-based optical sensor network [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
盛卫东. 天基光学传感器网络目标跟踪技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [7] Xue Yonghong, An Wei, Zhang Tao, et al. Real-time line of sight calibration algorithm for high earth orbit infrared scanning sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0628003. (in Chinese)
薛永宏, 安玮, 张涛, 等. 高轨红外相机视轴指向实时校正算法[J]. 光子学报, 2013, 33(6): 0628003.
- [8] Sun Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared Physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)
孙建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [9] Zhang Guangming, Sun Shengli, Zhang Wei, et al. Model and application of image plane illumination for the space-based infrared detecting of boost-phase missile [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(6): 425-428. (in Chinese)
张光明, 孙胜利, 张伟, 等. 导弹助推段天基红外探测的像面照度模型及其应用[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(6): 425-428.