

文章编号 1004-924X(2017)04-1019-07

海洋背景下运动目标的天基红外探测场景生成系统

赵云峰^{1,2}, 李夜金^{1,2}, 张寅³, 饶鹏^{1,2*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

3. 南京航空航天大学航天学院, 江苏南京 210016)

摘要: 围绕海洋背景下飞机和海面舰船等运动目标的探测需求, 本文研究了目标和载荷在多个坐标系下的空间位置与运动特性, 建立了天基探测场景的几何模型; 通过 Pierson-Moskowitz 海洋谱模型计算海面起伏, 实现大气层外海面辐射亮度的建模仿真; 利用多种目标的三维几何模型, 实现目标辐射特性的建模仿真。在上述研究的基础上, 利用 MATLAB 平台, 开发了一套海洋背景下多种运动目标的天基红外探测场景生成系统。结果表明: 该系统生成的海洋辐射亮度均值在中波红外谱段优于 Modtran 的生成结果, 在长波红外谱段与 Modtran 的生成结果之差小于 3%。该系统可生成连续的海面背景下运动目标的辐射亮度图像, 为开发天基红外探测系统提供技术支撑。

关键词: 红外; 天基探测; 海面; 运动目标; 场景生成

中图分类号: TN21 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20172504.1019

A space-based infrared detection scene generation system for moving objects with sea background

ZHAO Yun-feng^{1,2}, LI Ye-jin^{1,2}, ZHANG Yin³, RAO Peng^{1,2*}

(1. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;*

2. *Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;*

3. *College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)*

* *Corresponding author, E-mail: peng_rao@mail.sitp.ac.cn*

Abstract: Revolving around the detection requirements for moving targets such as aircraft and sea surface ships under the sea background, a research was conducted in space position and motion characteristics of the target and load, thus a space-based detection scene model was established; then, the sea surface fluctuation was calculated through the Pierson-Moskowitz model to achieve modeling and simulation of sea radiance outside the atmospheric layer; finally, three-dimensional geometrical model of multiple targets was used to realize modeling and simulation for radiation performance of the target. Based on the above-mentioned researches, a space-based infrared detection scene generation system was developed by virtue of the MATLAB platform. The experiment indicates that sea radiance mean

收稿日期: 2016-11-15; 修订日期: 2017-01-16.

基金项目: 中科院上海技术物理研究所创新专项 (No. CX-59)

produced from such system is superior to that produced from Modtran in the section of medium-wave infrared spectrum; while in the section of long-wave infrared spectrum, it is 3% lower than that produced from Modtran. This proposed system, which is able to generate continuous radiance images of the moving target under sea background, provides a technical support for the space-based infrared detection system.

Key words: Infrared; space-based detection; ocean surface; moving targets; scene generation

1 引言

天基红外运动目标探测系统的任务是探测和跟踪存在背景辐射与其他干扰下的运动目标,包括空中目标(如各型客机、隐身飞机等)和海面目标(如渔船、大型舰艇等)。利用卫星平台探测这些运动目标可进行失事客机和渔船搜救等工作,具有极高的民用价值。同时,天基探测隐身飞机等红外弱目标具有一定的战略意义,但也存在较大的技术难度。由于这些运动目标的辐射特性和运动特性具有极大差异,而且在各自生命周期内呈现时变特性,通过实际观测或物理模拟的方法均很难得到背景辐射下多个目标、不同观测角度、不同谱段、不同时空分辨率的红外辐射特性图像。因此,建立包含多种运动目标和背景红外特性的仿真系统,可为探测系统设计提供基本依据,提高载荷设计效率,降低设计难度。

国内外相关学者已开展了大量关于海洋背景的红外辐射特性的研究。MultiGen 公司开发的 Vega Prime 系统已实现海洋等背景的红外图像的实时生成,并广泛应用于红外仿真中^[1]。Xiangqian Wu 等人提出的粗糙海面红外辐射模型已得到实测海洋红外特性数据的验证,并被美国大气管理局(NOAA)和美国航空航天局(NASA)采用^[2-3]。王彦等仿真生成了中波红外谱段的动态海洋场景^[4]。王盈等还研究了空间目标在轨时的红外特性^[5]。虽然目前关于目标和背景辐射特性的研究较广泛,但缺乏集成多种目标和背景,能直接应用于天基探测的统一仿真系统。因此,本文在已开展的目标和背景红外特性研究的基础上,针对运动目标的天基探测需求,选取典型背景——海洋表面和典型目标——隐身飞机和海面舰艇等作为研究对象,研究天基探测场景,建立背

景红外辐射模型和目标红外辐射模型,开发了一套基于 MATLAB 平台的目标背景生成系统。该系统可读入 STK 软件生成的卫星位置序列和目标位置序列,实时生成连续的场景图像。

2 天基探测场景建立

2.1 坐标系说明

本文中使用的坐标系较多,包括目标本体坐标系、地心地固坐标系(ECEF)^[6]、卫星相机坐标系和图像坐标系。

目标本体坐标系是指目标三维建模时所使用的空间三维坐标系,目标几何模型的各点坐标均以此坐标系为参考,此坐标系通常选择目标质心作为坐标原点。

地心地固坐标系的原点位于地心, xoy 平面过地心并与地球自转轴垂直, x 轴指向 0° 经线位置, z 轴指向北极, y 轴与 x 、 z 轴构成右手系。

卫星相机坐标系以相机光心为原点,定义沿光轴指向探测方向的反方向为 z 轴, x 轴和 y 轴方向由探测器方向决定。图像坐标系是一个二维坐标系,其原点在像面中心, x 轴和 y 轴的方向与卫星相机坐标系相同。

2.2 探测场景建立

目标、卫星及其他影响探测因素的空间关系系统称为探测场景。探测场景适合在地固坐标系下建立和描述。由于目标相对地固坐标系存在机动,可将目标上各点在目标本体坐标系下的坐标转换到地固坐标系下:对于目标在本体坐标系下的任意一点 x' ,假设目标相对地固坐标系的偏航角为 u ,俯仰角为 v ,翻滚角为 w ,目标本体坐标系原点在地固坐标系中为 x_i ,则目标在地固坐标系下的坐标为:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \cos u & \sin u & 0 \\ -\sin u & \cos u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos v & 0 & -\sin v \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin v & 0 & \cos v \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \mathbf{x}_i + \mathbf{x}_t, \quad (1)$$

根据卫星和目标的位置,可计算得到卫星相对于指向点在地固坐标系下的极角 θ_{sat1} 和方位角 θ_{sat2} 。假设太阳在地固坐标系下的极角为 θ_{sun2} ,方位角为 θ_{sun1} ,则可得目标探测场景如图 1 所示。该图是国外某隐身飞机在地固坐标系下的探测场景。

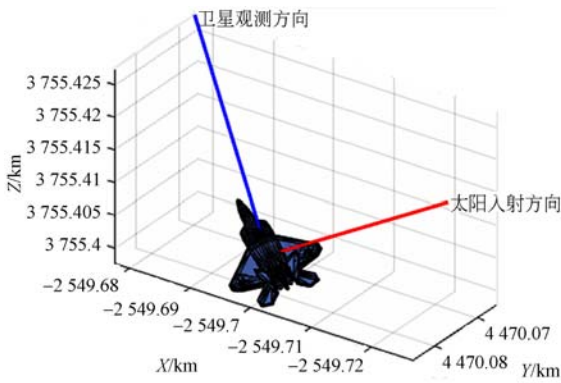


图 1 地固坐标系下的目标探测场景
Fig. 1 A target detection scene in ECEF

根据探测场景,可得目标在卫星相机坐标系和图像坐标系下的坐标。假设卫星的旋转角为 θ_s ,则目标在卫星相机坐标系下的坐标为:

$$\mathbf{x}_c = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{sat2}} & \sin \theta_{\text{sat2}} & 0 \\ -\sin \theta_{\text{sat2}} & \cos \theta_{\text{sat2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{sat1}} & 0 & -\sin \theta_{\text{sat1}} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{\text{sat1}} & 0 & \cos \theta_{\text{sat1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & 0 \\ \sin \theta_s & \cos \theta_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{sat}}), \quad (2)$$

假设相机的像元角分辨率为 $IFOV$,则目标在图像坐标系下的坐标为 $(\frac{1}{-IFOV} \cdot \frac{x_c}{z_c}, \frac{1}{-IFOV} \cdot \frac{y_c}{z_c})$ 。

3 海洋红外辐射特性研究

3.1 海面建模

海洋表面可认为是在大尺度近似周期性的波浪上叠加着小尺度近似随机性的泡沫、浪花和波

纹。目前,有关海洋表面的研究方法主要有 4 种,包括海上实际观测、卫星海洋遥感、物理模拟和建模数值仿真。其中,建模数值仿真的优势在于无需物理实验和实际探测,可适应多种海况、多种空间分辨率和探测范围。因此,本文通过 Pierson-Moskowitz(P-M)海洋谱模型实现海面的数值仿真。

P-M 谱是由 Pierson 和 Moskowitz 提出的。Moskowitz 于 1964 年对北大西洋上 1955~1960 年的观测资料进行了 46 次谱分析,同年 Pierson 和 Moskowitz 将 5 个平均谱进行无因次化,最后得到有因次频率,即为 P-M 谱^[7-8]:

$$S(\omega) = \alpha \frac{g^2}{\omega^5} \exp \left\{ -\beta \left(\frac{g}{U\omega} \right)^{-4} \right\}, \quad (3)$$

其中, $S(\omega)$ 是海洋表面起伏的功率谱, α 和 β 是无量纲经验常数, $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$, g 是重力加速度, U 是海面上 19.5 m 高的平均风速。

根据 P-M 海洋谱,可利用蒙特卡罗法进行海面建模,其思想是:对白噪声做傅里叶变换,在频域用海洋谱进行滤波处理,再作傅里叶逆变换,最终得到海面的高度起伏^[9]。依据上述的建模仿真过程,代入三级海况时的海面起伏,如图 2 所示。仿真结果表明,海面起伏在 $-0.86 \sim 0.91$ m 之间,符合 3 级海况浪高为 0.5~1.25 m 的实际情况。

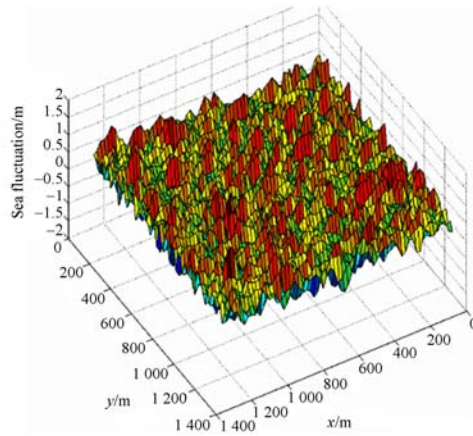


图 2 海洋表面起伏仿真
Fig. 2 Sea surface fluctuation simulation

3.2 海面辐射特性计算

在大气层外的载荷接收来自海洋背景的红外辐射主要包括 4 部分:海面自身的辐射、海面反射的太阳辐射、海面反射的天空辐射和大气路径的热辐射。因此,海洋背景在卫星相机入瞳处的总

辐射亮度为:

$$L_{bg_total} = (L_{sun_f} + L_{sky_f} + L_{sea}) \tau_a + L_{atm}, \quad (4)$$

其中, L_{sun_f} 为反射太阳辐射的辐射亮度, L_{sky_f} 为反射天空辐射的辐射亮度, L_{sea} 为海面自身辐射的辐射亮度, τ_a 为大气透过率, L_{atm} 为大气辐射的辐射亮度。 τ_a 、 L_{sky_f} 和 L_{atm} 通过 Modtran 仿真获得, 以下介绍 L_{sun_f} 和 L_{sea} 的计算过程。

对于海面反射的太阳辐射采用 Cox-Munk 模型计算^[10-11]。该模型由 CHARLES Cox 和 WALTER Munk 两人共同研究, 并于 1954 年提出。该模型认为海面可由多个小波面构成。每个小波面的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)为 $\rho(\mu, \phi; \mu', \phi')$, 可通过该模型进行推导。根据以上推导的 BRDF 可计算海面反射的太阳辐射:

$$L_{sun_f} = L_{sun} \cdot \rho(\mu, \phi; \mu', \phi') \cdot \tau_i \cdot d\omega \cdot \cos \theta, \quad (5)$$

其中, L_{sun} 为太阳辐射亮度, τ_i 为太阳辐射入射的大气透过率, $d\omega$ 为太阳相对海洋表面的立体角。

海洋自身辐射的辐射亮度可由多种模型计算。漫射灰体模型将海面发射率视为常数, 一般取为 0.98。平静海面发射率模型则认为海面发射率与出射角 θ' 有关, 有: $\epsilon = 0.98[1 - (1 - \cos \theta')^5]$ ^[12]。本文中海面发射率同样由 Cox-Munk 模型计算。利用得到的海面发射率可计算海面自身辐射 L_{sea} 。

利用上述结果, 可进行海洋背景辐射亮度仿真。设置入射天顶角为 20° , 入射方位角为 0° , 出射天顶角为 20° , 出射方位角为 180° , 仿真可得海洋背景(白天)的辐射亮度图像, 如图 3 所示。该

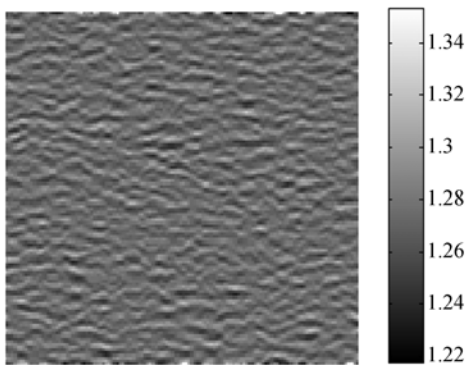


图 3 海洋表面辐射亮度图像(单位 $W/(Sr * m^2)$)

Fig. 3 Radiation brightness image for sea surface ($W/(Sr * m^2)$)

图像显示海洋表面辐射亮度存在海浪纹理, 接近真实海面辐射亮度。

假设入射天顶角为 20° , 入射方位角为 0° , 出射方位角为 180° , 可得海面的辐射亮度平均值与出射天顶角($0^\circ \sim 60^\circ$)的关系如表 1 和表 2 所示。表 1 给出了中波红外谱外谱段(MWIR)使用本文算法和 Modtran 算法所得到的海面辐射亮度, 以及本文算法结果与 Modtran 结果的比值。表 2 给出了长波红外谱段(LWIR)的相应结果。

表 1 海面辐射亮度的仿真结果(MWIR, 单位: $W/(Sr * m^2)$)

Tab. 1 Simulation results of sea surface radiance (MWIR, $W/(Sr * m^2)$)

算法	出射天顶角						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
本文算法	1.07	1.20	1.27	1.19	1.01	0.862	0.740
Modtran 算法	0.913	0.910	0.900	0.882	0.856	0.816	0.754
比值(无单位)	1.17	1.31	1.41	1.34	1.18	1.05	0.98

表 2 海面辐射亮度的仿真结果(LWIR, 单位: $W/(Sr * m^2)$)

Tab. 2 Simulation results of sea surface radiance (LWIR, $W/(Sr * m^2)$)

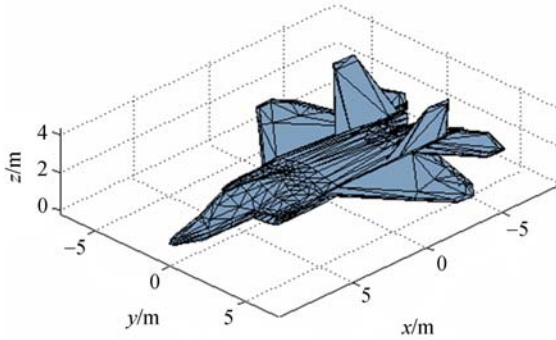
算法	出射天顶角						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
本文算法	30.3	30.3	30.1	29.7	29.5	28.8	27.5
Modtran 算法	30.4	30.4	30.3	30.0	29.7	29.2	28.3
比值(无单位)	0.997	0.997	0.993	0.99	0.993	0.986	0.972

由表 1 可知: 对于中波红外谱段, 两种方法得到的海面背景辐射亮度在出射角较小或较大时相差较小, 而当出射角在 20° 左右时相差较大, 最大达 41%, 本文仿真方法的辐射亮度随出射角的增大先增大后减小, 这与表中结果一致, 而 Modtran 仿真结果则一直递减。这表明, 本文中建立的模型可有效反映入射和出射方位角相差 180° 且入射天顶角接近出射天顶角时, 海洋表面发生的类似镜面反射现象, 使辐射亮度达到最高, 而 Modtran 模型则认为海面近似为灰体, 因此, 本文建立的模型更为精确。由表 2 可知, 对于长波红外谱段, 两种方法所得结果相差小于 3%。这是因为长波红外谱段反射的太阳辐射几乎为零, 类似镜面反射的现象的影响极小。综上可知, 本文建立的海洋表面辐射亮度模型优于 Modtran 内置的海洋表面辐射模型。

4 目标红外辐射特性研究

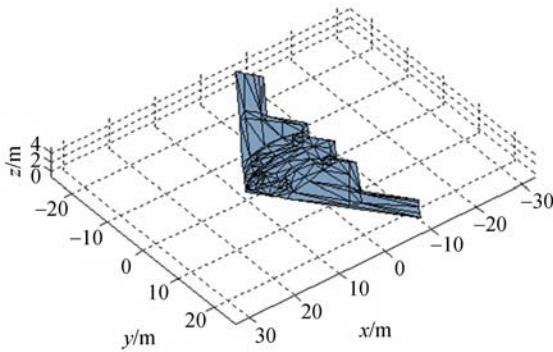
4.1 目标三维几何模型

本文研究的典型目标包括:小型隐身飞机、大型隐身飞机和大型海面舰艇。对这 3 种目标建立三维模型,如图 4 所示。



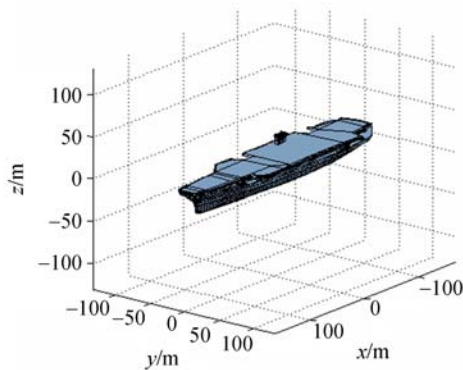
(a) 小型隐身飞机

(a) Small-scale stealth aircraft



(b) 大型隐身飞机

(b) Large-scale stealth aircraft



(c) 大型海面舰艇

(c) Large-scale sea surface ship

图 4 多种运动目标的三维模型

Fig. 4 3D models of multiple moving objects

4.2 目标辐射特性

目标的红外辐射包含两部分,即目标自身的辐射和反射的太阳辐射,可表达为:

$$I_{\text{target}} = (I_s + I_f) \tau_a, \quad (6)$$

其中, I_{target} 为目标在卫星相机入瞳处的辐射强度, I_s 为目标自身的辐射强度, I_f 为目标反射太阳辐射的辐射强度, τ_a 为大气透过率。

4.2.1 目标自身辐射

本文将目标假定为灰体,因此目标自身辐射可等效为目标在卫星探测方向投影的辐射,由此得到下式:

$$I_s = A_{\text{target}} L_s, \quad (7)$$

其中, A_{target} 为卫星探测方向上的目标投影面积, L_s 为目标自身的辐射亮度,可用普朗克辐射定律计算。

4.2.2 目标反射的太阳辐射

卫星可观测到的目标表面上任意一点反射太阳辐射的辐射亮度为:

$$L_f = \frac{(1 - \epsilon_t) \cdot L_{\text{sun}} \cdot \tau_t \cdot d\omega \cdot \cos \theta_2}{\pi}, \quad (8)$$

其中, τ_t 为太阳辐射入射到目标表面的大气透过率, θ_2 为太阳入射方向和目标表面该点法线方向的夹角。

因此,目标反射太阳辐射的辐射强度为:

$$I_f = \bar{L}_f \cdot A_{\text{target}}, \quad (9)$$

其中 \bar{L}_f 为 L_f 的平均值。

5 系统运行结果与分析

综合上述建模过程,利用 MATLAB GUI 软件平台,开发了海洋背景下运动目标的天基红外探测场景生成系统,其界面如图 5 所示。左侧为参数输入区,可输入多个场景参数、目标参数、背景参数和卫星参数,点击“生成多帧场景”后,系统将进行多帧场景仿真。探测场景区域显示目标的空间位置、姿态和卫星、太阳的方向。辐亮度图像区域显示目标和背景叠加的辐射亮度图像。目标特性输出区域将输出目标辐射特性信息、目标位置、目标卫星距离等信息。

该系统将生成特定载荷参数下的目标背景图像和对比度等信息,以指导载荷设计。图 6 是

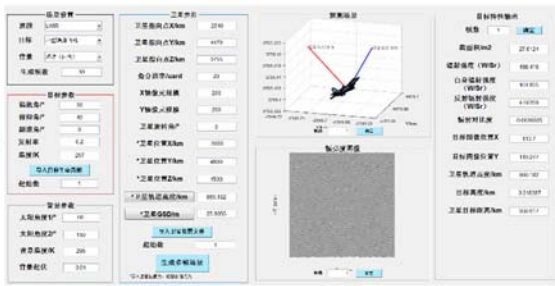
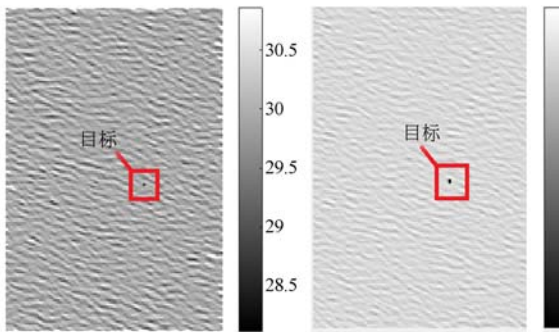


图 5 场景生成系统界面

Fig. 5 Interface of scene generation system

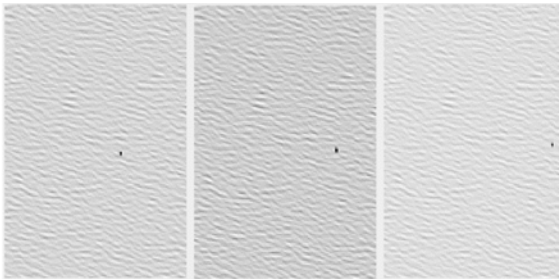


(a) 小型隐身飞机 (b) 大型隐身飞机

(a) Small-scale stealth aircraft (b) Large-scale stealth aircraft

图 6 不同目标辐射亮度图像(单位 $W/(Sr \cdot m^2)$)

Fig. 6 Radiance brightness images of different targets ($W/(Sr \cdot m^2)$)



(a) 第一帧 (b) 第二帧 (c) 第三帧

(a) The first frame (b) The second frame (c) The third frame

图 7 大型隐身飞机连续多帧图像

Fig. 7 Continuous multi-frame images of large-scale stealth aircraft

参考文献:

[1] MULTIGEN-PARADIAM CORP. Vega Prime User's Guide[EB/CD]. 2002. 4.
 [2] WU X Q, SMITH W L. Emissivity of rough sea surface for 8-13 μm : modeling and verification.

相同参数下不同目标的辐射亮度图像,系统输出两目标的辐射对比度分别为-0.064 和-0.372,由此可得该参数的载荷对于小型隐身飞机的探测能力较弱,但具备探测大型隐身飞机的可行性。

此外,该系统可输出连续的多帧辐射亮度图像,为模拟连续探测和跟踪运动目标奠定基础。图 7 是大型隐身飞机连续多帧图像,目标在图中呈现黑色斑点状,可见随着时间的推移目标在图像中产生位移,依据此图像可进行目标的连续探测模拟。

6 结 论

通过研究探测场景以及目标与背景的辐射特性,开发了一套基于天基平台探测的运动目标辐射特性仿真系统。海洋背景的辐射特性研究表明,本模型得到的海面辐射亮度图像纹理清晰,效果较好,且在中波红外谱段均值优于 Modtran 仿真结果,长波红外谱段与 Modtran 仿真结果相小于 3%。目标辐射特性的研究涵盖了多种类型的飞机和大型水面舰艇,覆盖了空中和海上的重要目标。总之,该系统可连续实时生成多个谱段海洋背景下飞机和海面舰船等多种运动目标的辐射亮度图像,并输出目标的辐射对比度、辐射强度等有效信息。可用于指导天基光电载荷参数及性能指标设计,提高探测系统优化设计的自动化水平和效率,并有助于模拟卫星光电载荷对运动目标的连续探测和跟踪过程。

[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(12):2609-2619.

[3] 王彦, 谢晓方, 孙海文, 等. 中波段动态海洋红外场景仿真[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(12):3604-3609.

WANG Y, XIE X F, SUN H W, *et al.*. Simulation of dynamic infrared sea scene in mid band[J].

- Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3604-3609. (in Chinese)
- [4] 王盈, 黄建明, 魏祥泉. 空间目标在轨红外成像仿真[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9):2593-2597. WANG Y, HUANG J M, WEI X Q. Infrared imaging simulation of space target in orbit[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2593-2597. (in Chinese)
- [5] MCCARTHY D D, PETIT G. IERS Conventions (2003) [J]. *IERS Technical Note*, 2004, 32:95.
- [6] PIERSON W J, MOSCOWITZ L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii [J]. *Geophys. Res*, 1964, 69(24):5181-5190.
- [7] 韩玉阁, 宣益民, 王树芳. 海洋表面红外成像模拟[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8):1742-1743. HAN Y G, XUAN Y M, WANG SH F. The IR imaging simulation of the sea surface [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(8): 1742-1743. (in Chinese)
- [8] 王毅. 海面光辐射散射特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013. WANG Y. *Research on the light radiation and scattering characteristic of sea surface* [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [9] COX C, MUNK W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11):838-850.
- [10] LIN Z, STAMNES S, JIN Z, et al.. Improved discrete ordinate solutions in the presence of an anisotropically reflecting lower boundary: Upgrades of the DISORT computational tool [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2015, 157(4):119-134.
- [11] WISON D M. A method of computing ship contrast temperatures including results Based on weather ship [J]. *J Environment Data*, 1979, 24(4):189-202.

作者简介:



赵云峰(1989—),男,河南焦作人,博士研究生,2012年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事红外光电技术研究。E-mail: zhaoyf_08@163.com

导师简介:



饶鹏(1977—),男,湖北武汉人,研究员,2000年于华中科技大学获得学士学位,2008年、2014年于中国科学院上海技术物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事空间光电精密仪器设计和机器视觉技术的研究。E-mail: peng_rao@mail. sitp. ac. cn