

扫描探测系统多尺度舰船目标的空间特性分析

宋文韬^{1,2,3}, 胡勇^{1,2*}, 巩彩兰^{1,2}, 匡定波¹

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

²中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于相机模型, 建立多分辨率下的成像链路仿真, 对不同尺度和采样体制下的舰船目标结构和方向特征进行分析。结果表明: 对于长度在百米级的舰船, 当空间分辨率高于 12 m 时, 形状和方向特性能够保持稳定; 当空间分辨率低于 12 m 时, 随着分辨率下降, 很难通过单帧图像信息来识别目标类型和判断目标的方向; 与单采样相比, 过采样虽然能够提高图像的空间分辨率, 但目标边缘的扩散更明显, 不利于目标形状特征的提取; 对于具有对称结构的舰船目标, 两种采样体制对运动目标方向的捕捉和判断能力相当。

关键词 传感器; 光学遥感; 系统仿真; 相机模型; 图像多分辨率; 舰船目标

中图分类号 TP722.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0728010

Spatial Characteristics Analysis of Multi-Scale Ship Target in Scanning Detection System

Song Wentao^{1,2,3}, Hu Yong^{1,2*}, Gong Cailan^{1,2}, Kuang Dingbo¹

¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This study presents an imaging chain simulation based on the camera model under multi-resolution conditions. The structure and directional characteristics of ship target are analyzed under different scales and sampling systems. For a 100-m-long boat, the shape and directional characteristics are stable when the image spatial resolution is >12 m. When the spatial resolution is <12 m, as resolution decreases, identifying the target type and obtaining the target direction using single-frame information become difficult. Compared with single sampling, oversampling can improve the spatial resolution of the image; however, diffusion of the target edge becomes more evident, which degrades the extraction of the target shape characteristics. For a ship target with symmetrical structure, these two sampling systems can equally capture and determine a moving target's direction.

Key words sensors; optical remote sensing; system simulation; camera model; image multi-resolution; ship target
OCIS codes 280.4788; 040.1880

1 引 言

随着各国对海洋资源的日益重视, 舰船目标的检测和识别在军事、民用领域中均具有越来越重要的研究价值。相比传统的雷达探测, 光学遥感具有灵敏度高、隐蔽性强、环境适应性好、抗干扰能力强等特点, 因此得到更加广泛的应用。

舰船目标探测能力是星载光学舰船探测系统的

关键。现有的探测性能分析大多针对弱小目标^[1], 且一般以信噪比和探测距离作为研究指标^[2], 以目标能量和背景杂波分布作为主要研究特征^[3]。

对于具有一定纹理结构特征的舰船目标, 为了进一步精确分析, 一般会在检测之后, 利用空间特征对目标进行精确识别^[4-5]。舰船目标在不同尺度下表现出不同的特点, 为了对其检测性能进行分析, 必须研究适用于探测的分辨率, 重点研究空间特征。

收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-03-20; 录用日期: 2019-04-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0602103)、中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX-55)

* E-mail: huyong@mail.sitp.ac.cn

对于扫描型线列探测器,过采样是一种提高遥感图像分辨率的方式,能有效提高目标的检测性能^[6-7]。

现有目标检测性能研究的主要对象局限于小目标,特征局限在辐射维,本文针对这两个不足,围绕舰船的空间结构特征,从目标识别和追踪的角度,利用高分辨率图像模拟实际场景,建立相机仿真模型,定量分析不同尺度和采样体制对目标结构、方向特征的影响,从而为仪器设计提供一定的参考。

2 基于高分辨率图像退化的扫描图像仿真方法

2.1 不同采样体制扫描成像的原理和特点

线列探测器是一行整齐排列的光敏元,输出图像的一个像元对应一个光敏元。常规采样体制的焦面线阵由单列组成,相应地,过采样体制采用两列线阵焦平面结构,并错开 1/2 个像元。过采样原理示意图如图 1 所示,其中 1~6 为探测器的两行光敏元, T_0 为相机成像的起始时刻, dt 为采样的间隔时间。由于两行探测器有 0.5 pixel 的错位,因此可以实现交轨方向的过采样;探测器扫描的采样间隔也为 0.5 pixel,即顺轨方向上每隔 0.5 pixel,瞬时视场进行一次采样,可以实现扫描方向的过采样^[8]。

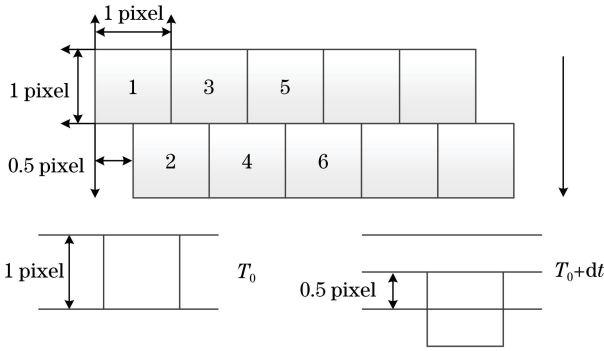


图 1 过采样原理示意图

Fig. 1 Principle of oversampling

2.2 高分辨率场景退化模型

本研究采用高分辨率图像模拟实际场景,针对常规采样和过采样体制进行建模。观测环境设置在晴朗的天气条件下,此时能见度较高,图像受大气的影响较小。场景中的细节经过遥感器成像后会发生退化,该退化过程一般可以利用遥感器总的点扩展函数(PSF)进行刻画,PSF 反映了遥感器的空间响应特性。PSF 对光谱信号进行空间卷积,可以分别建立探测器各环节 PSF 的模型,系统的 PSF 由各部分 PSF 的卷积给出^[8],即

$$f_{\text{PSF}} = f_{\text{PSF-opt}} f_{\text{PSF-det}} f_{\text{PSF-el}}, \quad (1)$$

式中: f_{PSF} 为系统 PSF; $f_{\text{PSF-opt}}$ 为光学 PSF; $f_{\text{PSF-det}}$ 为探测器 PSF; $f_{\text{PSF-el}}$ 为电子学 PSF。采样模型示意图如图 2 所示。

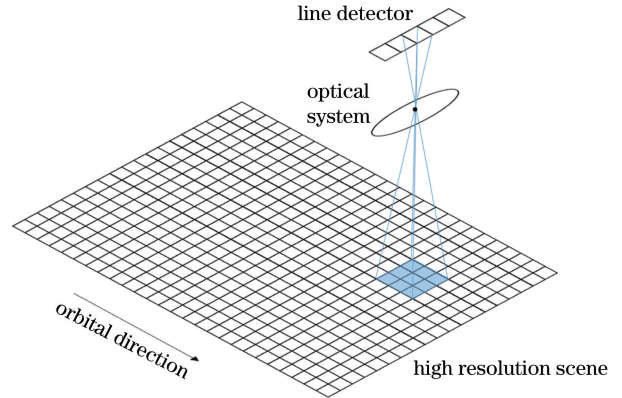


图 2 采样模型示意图

Fig. 2 Schematic of sampling model

2.2.1 光学 PSF

光学 PSF 为点光源在图像上的能量空间分布,弥散斑的能量分布为高斯型,表达式^[9]为

$$f_{\text{PSF-opt}}(x, y) = \frac{1}{2\pi ab} \exp(-x^2/a^2) \exp(-y^2/b), \quad (2)$$

式中: x 和 y 分别为交轨和顺轨方向坐标; a 和 b 分别为交轨和顺轨方向的光学 PSF 宽度。

2.2.2 探测器 PSF

从空间区域上来说,探测器对物方辐射信息具有空间采样和空间滤波的作用。像元宽度为 d 的单个探测器的 PSF 为

$$f_{\text{PSF-det}}(x, y) = \text{rect}(x/d) \text{rect}(y/d), \quad (3)$$

式中: rect 为矩形函数,满足

$$\text{rect}(x/d) = \begin{cases} 0, & |x/d| > 1/2 \\ 1/2, & |x/d| = 1/2 \\ 1, & |x/d| < 1/2 \end{cases}. \quad (4)$$

2.2.3 电子学 PSF

电子学 PSF 表征电子滤波去除探测器输出噪声信号时产生退化的程度,是一个低通滤波过程。调制传递函数(MTF)是 PSF 在傅里叶域的幅度,对应的电子学 PSF 为

$$f_{\text{PSF-el}} = \frac{2\nu_0}{1 + (2\pi\nu_0 x)^2} \frac{2\nu_0}{1 + (2\pi\nu_0 y)^2}, \quad (5)$$

式中: ν_0 为空间频率,取值为 8 cycle/pixel。

3 实验方法与结果

3.1 多尺度图像金字塔

利用 2.2 节中的仿真模型进行多次成像仿真实

验,对分辨率为 0.6 m 的高分辨率舰船影像进行常规采样和过采样两种探测体制成像。选择长度为 120~180 m 的多个舰船目标,对不同目标的高分辨率图像建立 2×2 倍至 30×30 倍采样的多分辨率金字塔,过采样的瞬时视场角为常规采样的 2 倍,降尺度过程如图 3 所示,结果如图 4 所示(图像缩放至相同大小)。

3.2 目标分割与特性提取

采用标准化的恒虚警率检测算法来分割目标,设定恒虚警率为 10^{-4} ,对检测出的像素进行特征提取。舰船具有规则的几何形状,不同类型的舰船形状存在差异,主要体现在舰船的大小及长宽^[10]上。

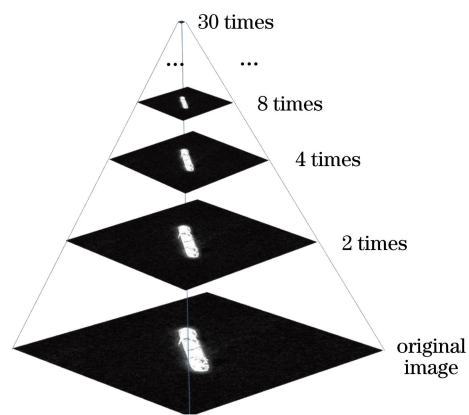


图 3 图像多分辨率金字塔
Fig. 3 Image multi-resolution pyramid

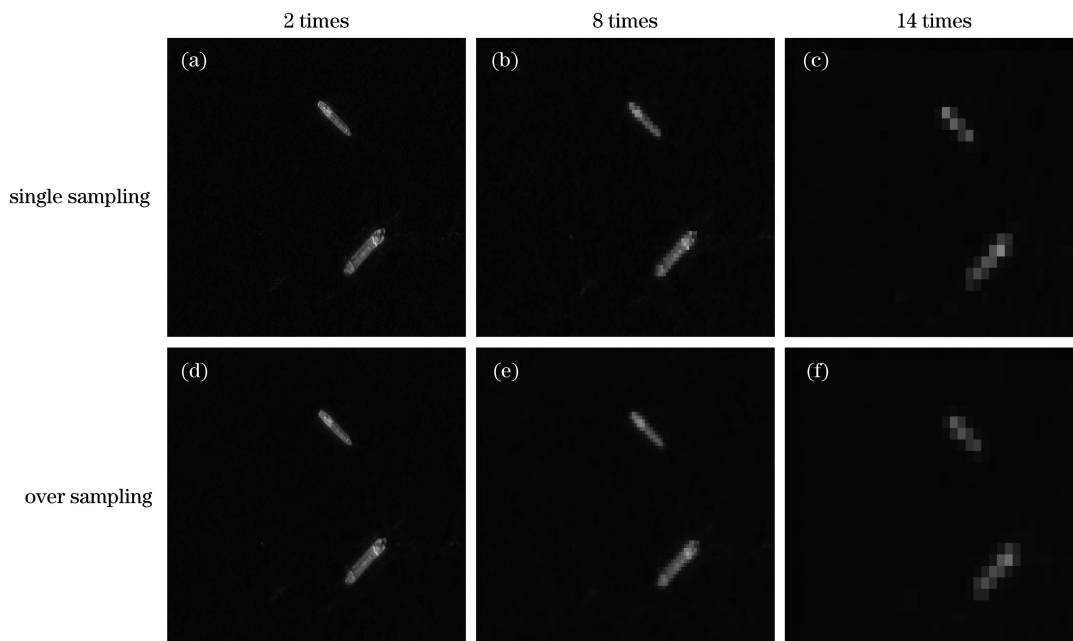


图 4 目标多分辨率仿真结果
Fig. 4 Results of target multi-resolution simulation

将图像中舰船目标最小外接矩形的长轴定义为舰船的长度,记为 L ;将红外图像中舰船目标最小外接矩形的短轴定义为舰船的宽度,记为 W 。将舰船长度与舰船宽度的比值即长宽比记为 R ,则

$$R = \frac{L}{W} \quad (6)$$

进一步探测舰船就需要获得舰船的运动方向,以便对舰船进行追踪。定义与区域具有相同标准二阶中心矩的椭圆长轴与水平正方向的夹角为舰船的角度 θ 。

3.3 目标特性统计结果

目标的空间特性包括面积、长宽比和运动方向。图 5 所示为两个不同目标由图像计算出的面积随下采样倍数的变化,图像的下采样倍数即图像的分辨

率(0.6 m)变化倍数,亦即下采样倍数。图 6 所示为两个不同目标的长宽比随下采样倍数的变化。图 7 所示为多个目标的运动方向随下采样倍数的变化。

4 结果讨论与分析

4.1 不同分辨率目标的特性分析

定义目标的平均面积比为

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{j=1}^n S_j} \quad (7)$$

式中: A_i 为经过探测器的目标计算面积; S_j 为高分辨率影像目标的实际面积; n 为目标个数; i, j 为目标序号。对不同分辨率与采样体制进行计算,结果如图 8 所示。

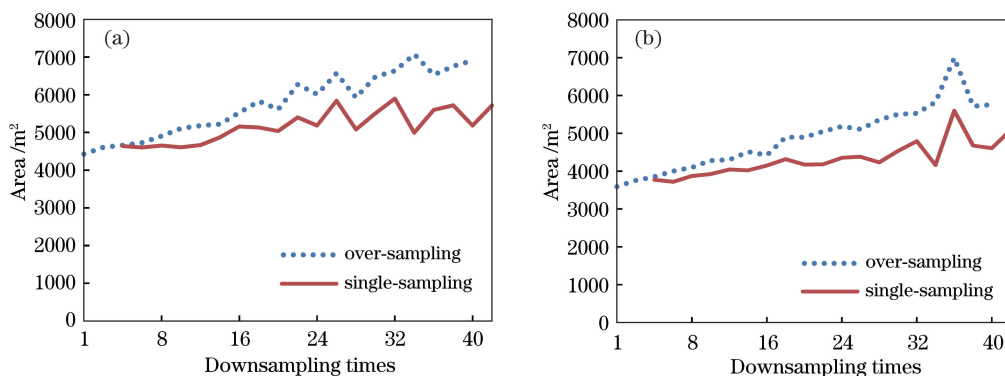


图 5 两个不同目标的面积随下采样倍数的变化。(a)目标 1;(b)目标 2

Fig. 5 Variation of area with down-sampling times for two different targets. (a) Target 1; (b) target 2

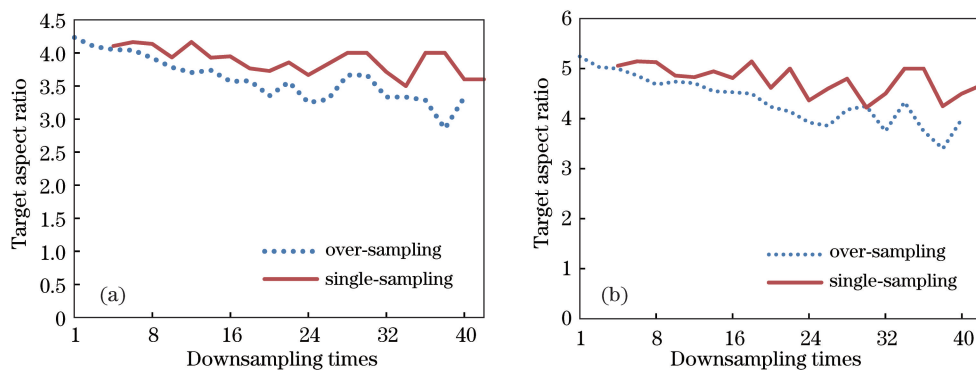


图 6 两个不同目标的长宽比随下采样倍数的变化。(a)目标 1;(b)目标 2

Fig. 6 Variation of aspect ratio with down-sampling times for two different targets. (a) Target 1; (b) target 2

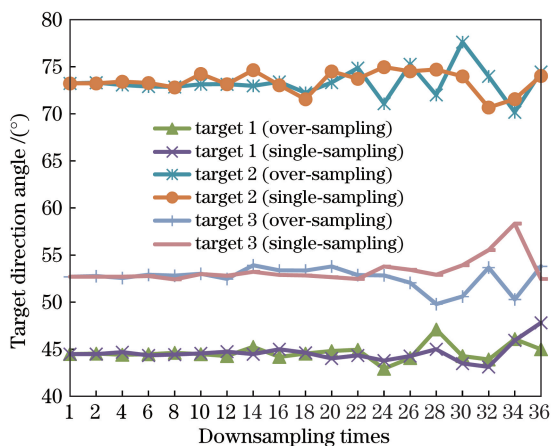


图 7 多个目标的运动方向随下采样倍数的变化

Fig. 7 Variation of motion direction with down-sampling times for multiple targets

对于目标的边缘,探测器的空间响应使得行列探测器的能量扩散到邻近像元。这种扩散现象随着分辨率的降低对目标像元的影响越来越大,目标越接近点目标,扩散现象越明显。

定义目标形状偏移率为

$$k_{\Delta} = \frac{k_d - k_0}{k_0}, \quad (8)$$

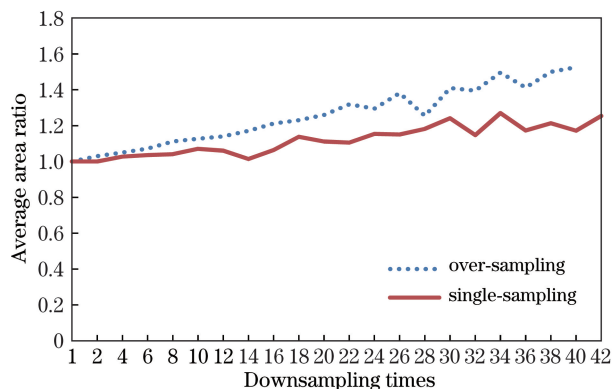


图 8 目标平均面积比随下采样倍数的变化

Fig. 8 Variation of target average area ratio with down-sampling times

式中: k_d 为经过探测器成像后目标的长宽比; k_0 为原始图像的长宽比。

图 9 所示为单采样目标形状偏移率随下采样倍数的变化。长宽比是判断舰船类型的主要特征,由图 9 可知:对于长度为百米级的舰船,当下采样倍数为 20,即分辨率高于 12 m 时,目标形状偏移率变化不超过 10%,能够保持较稳定的目标形状特征;当分辨率低于 12 m 时,随着分辨率降低,舰船的轮廓

形状逐渐模糊,向点目标退化,此时很难通过舰船的形状特征来判断舰船类型。

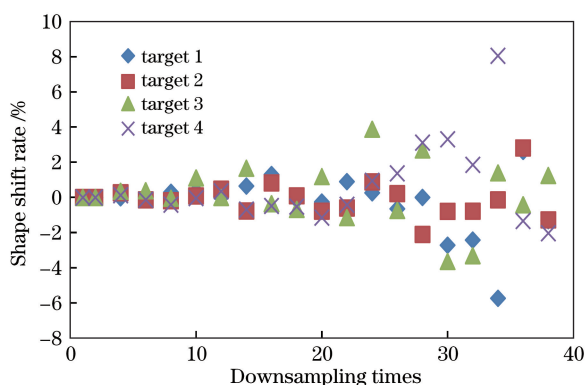


图 9 单采样目标形状偏移率随下采样倍数的变化

Fig. 9 Variation of shape shift rate with down-sampling times for single-sampling targets

定义目标方向偏移为

$$\theta_{\Delta} = \theta_d - \theta_0, \quad (9)$$

式中: θ_d 为经过探测器成像后目标的方向角; θ_0 为原始图像中目标的方向角。目标方向偏移结果如图 10 所示。

舰船的速度约为 40 km/h,利用图像中舰船的运动方向可以准确跟踪和预测舰船的位置,相邻两帧图像的误差在 2 km 以内,对于重访周期为 90 min 的太阳同步轨道卫星,偏离角度应在 2° 以内。由图 10 可知:当下采样倍数低于 20 时,即分辨率高于 12 m 时,目标方向较稳定,误差不超过 2° ;当分

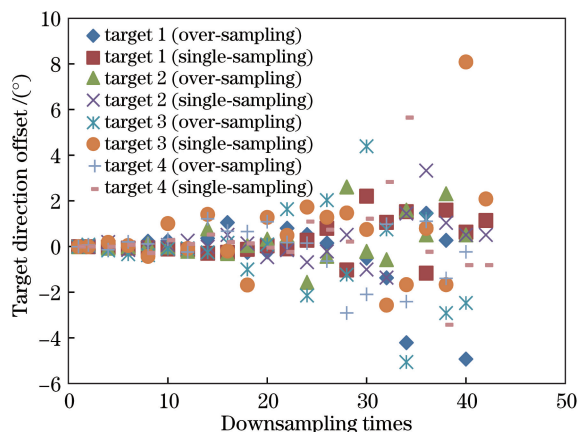


图 10 多个目标方向偏移随下采样倍数的变化

Fig. 10 Variation of direction offset with down-sampling times for multiple targets

辨率低于 12 m 并逐渐降低时,通过单帧图像判断目标运动方向误差也逐渐增大,如果对运动方向进行精确计算,则需要更多信息。

4.2 不同采样体制下目标的特性分析

与常规采样不同,过采样两行探测器在顺轨和交轨方向上都会进行重复采样,因此目标的边缘扩散在探测元件上更加显著,在过采样图像中更多的邻近像元都会采集到目标能量。从舰船目标的角度来看,扩散导致相同分辨率的舰船的过采样图像面积更大,如图 11 所示,对于舰船边缘部分,过采样图像在各方向都有扩散,使舰船过采样图像的长宽比变小,更接近方形。

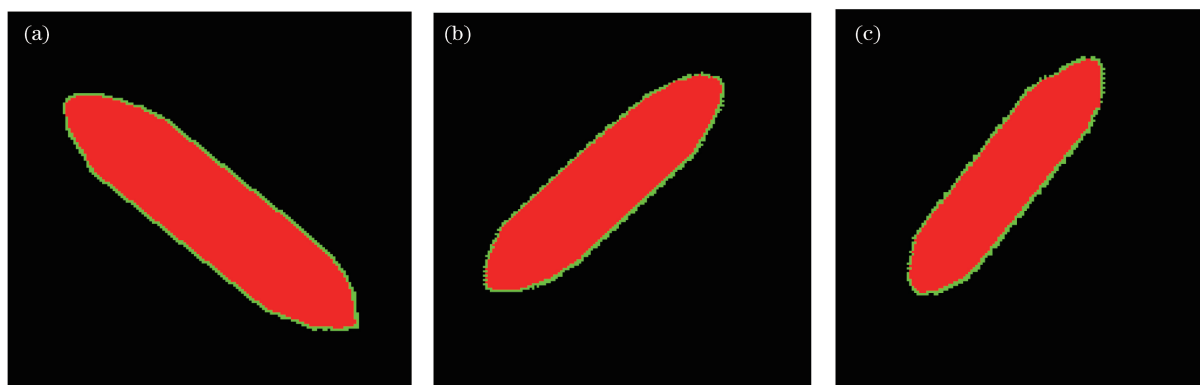


图 11 不同采样体制下目标的对比(内圈表示单采样,外圈表示过采样)。(a) 目标 1;(b) 目标 2;(c) 目标 3

Fig. 11 Comparison of targets under different sampling systems (inner ring for single-sampling, outer ring for over-sampling).

(a) Target 1; (b) target 2; (c) target 3

过采样图像在各方向都有扩散,对于舰船这类具有对称性的目标而言,膨胀对单帧目标方向的判断影响较小。但当目标向点目标退化时,由于目标的对称形状特征很难维持,因此二者像素个数偏差导致常规采样和过采样的目标方向计算产生较大

差异。

5 结 论

建立了遥感器探测仿真模型,从不同采样体制和分辨率角度,针对舰船的识别问题,对目标的空间

特性(包括长宽比、面积、运动方向)进行了比较研究。结果表明:对于舰船目标的识别,分辨率越高,对目标的识别就越准确。对于识别长度在百米级的舰船,建议采用空间分辨率为 12 m 以上的传感器。同样,舰船的运动方向性在一定尺度内具有稳定性。但当分辨率降低到 12 m 以下时,通过单帧图片判断舰船的方向准确性有所降低。相比于单采样,过采样虽然能够提高图像的空间分辨率,但目标边缘的扩散更明显,不利于目标形状特征的提取,影响目标识别的精度。对于具有对称结构的舰船目标,两种采样体制对运动目标方向的捕捉和判断能力相当。

参 考 文 献

- [1] Lin L K, Wang S Y, Wang T B. Simulation and analysis of point target detection performance for infrared scanning over-sampling system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0528001.
林两魁, 王少游, 王铁兵. 红外扫描过采样系统点目标检测性能分析与仿真[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0528001.
- [2] Meng Q Y, Zhang W, Long F N. Analysis on detection ability of space-based space target visible camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2079-2084.
孟庆宇, 张伟, 龙夫年. 天基空间目标可见光相机探测能力分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2079-2084.
- [3] 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.
- [4] Liu Z Y, Zhou F G, Chen X W, *et al.* Iterative infrared ship target segmentation based on multiple features[J]. *Pattern Recognition*, 2014, 47(9): 2839-2852.
- [5] Song M Z, Qu H S, Jin G. Weak ship target detection of noisy optical remote sensing image on sea surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1011004.
宋明珠, 曲宏松, 金光. 含噪光学遥感图像海面弱小舰船目标检测 [J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1011004.
- [6] Wang S T, Zhang W, Jin L H, *et al.* Point target detection based on temporal-spatial over-sampling system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(1): 68-72.
王世涛, 张伟, 金丽花, 等. 基于时-空过采样系统的点目标检测性能分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(1): 68-72.
- [7] Dong Y C, Chen F S, Su X F, *et al.* Temporal-spatial oversampling system and its performance analysis in point target detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2498-2507.
董玉翠, 陈凡胜, 苏晓锋, 等. 时空过采样系统及其在点目标检测中的性能仿真 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2498-2507.
- [8] Liu F Y, Hu Y, Rao P, *et al.* Quantitative detection of point target with different sampling systems[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(6): 776-782.
刘丰轶, 胡勇, 饶鹏, 等. 不同采样体制对点目标的定量检测性能影响 [J]. *红外与毫米波学报*, 2017, 36(6): 776-782.
- [9] Dong Y C. Research on method of the optimal band selection of spot target detection in specific background [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 44-48.
董玉翠. 特定背景下点目标探测最优波段选择方法的研究 [D]. 上海: 中国科学院大学, 2015: 44-48.
- [10] Xiong W, Xu Y L, Cui Y Q, *et al.* Geometric feature extraction of ship in high-resolution synthetic aperture radar images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(1): 01110001.
熊伟, 徐永力, 崔亚奇, 等. 高分辨率合成孔径雷达图像舰船目标几何特征提取方法 [J]. *光子学报*, 2018, 47(1): 01110001.