

基于频谱残留变换的红外遥感图像舰船目标检测方法

张志龙* 杨卫平 张焱 李吉成
(国防科技大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)

摘要: 该文提出一种基于频谱残留变换的红外遥感图像舰船目标检测方法。该方法首先根据海洋红外图像中自然背景和干扰的特性设计频谱残留变换的模型参数; 然后对海洋红外图像实施频谱残留变换; 最后在变换图像上进行目标检测。实验结果表明: 该方法可以有效消除红外图像中的大尺度干扰和图像噪声, 增强图像中舰船目标的信杂比, 提高舰船检测的准确性。

关键词: 红外遥感图像; 舰船目标检测; 信杂比; 视觉显著性; 谱残留模型

中图分类号: TP722.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)09-2144-07

DOI: 10.11999/JEIT141659

Ship Detection in Infrared Remote Sensing Images Based on Spectral Residual Transform

Zhang Zhi-long Yang Wei-ping Zhang Yan Li Ji-cheng

(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A ship detection algorithm based on spectral residual transform is presented to detect ship in infrared remote sensing images. Firstly, the model parameters of spectral residual transform are designed according to the prior knowledge of ship and its natural backgrounds. Secondly, the spectral residual transform of sea infrared image is implemented. Thirdly, ship detection is done on the spectral residual transform image. Experimental results reveal that the new detection algorithm can remove large scale image interference and the image noise and improve the SCR of ship image. The detecting probability of the new algorithm is higher than other conventional methods.

Key words: Infrared remote sensing images; Ship target detection; Signal Clatter Ratio (SCR); Visual saliency; Spectral residual model

1 引言

红外成像系统利用目标与环境的红外辐射差异成像, 具有温度灵敏度高、动态范围大、空间分辨率高、透雾能力强、可昼夜工作等优点。从红外大气传输特性来看, 3~5 μm 大气窗口的透过率超过 90%, 敏感的绝对温度峰值为 800 K, 适于探测高温目标, 如林火、火山、核爆、发动机尾焰等; 8~14 μm 大气窗口的透过率为 80%~90%, 敏感的绝对温度峰值为 300 K, 是常温下地物热辐射能量最集中的波段, 适于探测地物的发射率及温度。从目标背景的红外辐射特性来看, 地面和低空大气的背景辐射可以分别近似为 300 K 和 200~300 K 的黑体辐射; 而典型目标的温度通常在 500~900 K。因此, 红外成像系统是军事侦察和战场感知的利器。

随着我国高分辨率对地观测系统重大专项的实施, 红外遥感图像获取技术必将迎来新的发展机遇, 有望形成高分辨率、全天时、实时/准实时的对地观测能力, 获得越来越多的红外遥感图像。如何从海量的红外遥感图像中自动、准确、快速地识别出感兴趣目标, 已经成为制约我国航天侦察装备充分发挥军事效能的技术瓶颈, 迫切需要科研人员提出有效的解决办法。

遥感图像中感兴趣目标的检测识别问题一直以来都是遥感和视觉领域的研究热点^[1-5]。舰船目标检测与监视则是世界各海岸国家的传统任务, 学者们围绕该问题进行了广泛研究并提出了多种有效方法。前期的研究更多关注 SAR 图像舰船检测识别问题。进入 21 世纪, 光学遥感图像在海上活动监视领域的应用研究受到了更多的关注。代表性舰船检测识别系统包括欧盟的 IMPAST 和 DECLIMS, 法国的 CLS 和 BOOST, 英国的 MaST, 挪威 Eldhuset 和 MeosView 等^[6,7]。这些系统在渔业监测、油污监测、海岸安全以及军事领域发挥着重要作用。

我国海域辽阔, 海洋权益争端日渐频繁, 海上

2014-12-16 收到, 2015-05-18 改回, 2015-06-29 网络优先出版
国家自然科学基金(61101185, 61302145)和国家专项课题
(0404040604)资助课题

*通信作者: 张志龙 zhangzhilong13@sina.com

舰船目标的检测和监视在民用和军用上都有着广泛的需求。在民用方面，可以对特定海域、海湾和港口的水运交通、遇难船只搜救、渔船监视、非法移民、反毒品、海洋污染监测等方面进行监测和管理。在军事方面，可以进行战场态势感知与评估、战时海上监视、恐怖活动监视、打击海盗等。因此，利用日益丰富的高分辨率红外遥感图像，进行海上舰船目标的检测和识别，是一项具有重大理论意义和现实需求的研究课题。

在红外遥感图像中，舰船目标与背景的对比如通常较弱，亮目标与暗目标都有可能出现。同时，红外遥感图像存在一定的图像噪声和多种干扰，如海水波动、云团、小岛、浅滩、陆地复杂边缘等。因此，在检测识别之前有必要先对红外遥感图像进行舰船目标增强。

本文提出了一种基于频谱残留变换的红外遥感图像舰船目标检测方法，首先根据海洋红外图像中自然背景和干扰的特性设计频谱残留变换的模型参数，然后对海洋红外图像实施变换，在变换图像上进行舰船目标检测。实验结果表明：该方法可以有效消除红外图像中的大尺度干扰和图像噪声，增强图像中舰船目标的信杂比，提高了舰船检测的准确性。

2 基于频谱残留变换的舰船目标增强

2.1 频谱残留变换

谱残留模型是文献[8]提出的一种显著性计算模型。与其它显著性模型^[9-12]相比，该模型完全基于频域处理，可以采用快速傅里叶变换(FFT)加以实现，具有计算简单和快速的优点。其基本思想是：大多数自然图像的对数幅度谱具有近似相同的形状，因此，一幅图像的频谱中有别于相同形状的部分(即频谱的残留部分)蕴含着新的信息，是真正值得关注的部分(即目标)。假设原始图像为 $I(x)$ ，则谱残留模型的计算过程如下：

$$A(f) = \text{Amp}\{\text{FFT}[I(x)]\} \quad (1)$$

$$P(f) = \text{Pha}\{\text{FFT}[I(x)]\} \quad (2)$$

$$L(f) = \log[A(f)] \quad (3)$$

$$R(f) = L(f) - h_n(f) * L(f) \quad (4)$$

$$S(x) = g(x) * \text{FFT}^{-1}[\exp(R(f) + i \cdot P(f))] \quad (5)$$

其中： FFT 和 FFT^{-1} 表示图像的快速傅里叶变换及其反变换； $h_n(f)$ 表示频域中的低通滤波器，例如 3×3 的均值滤波器； $g(x)$ 表示空域中的低通滤波器，例如高斯型的低通滤波器； $A(f)$ 、 $P(f)$ 、 $L(f)$ 分别表示原始图像的幅度谱，相位谱，对数幅度谱；

$R(f)$ 表示谱残留； $S(x)$ 表示显著图。

作者在研究谱残留模型时发现：真正对显著图有实质贡献的其实是原始图像的相位谱 $P(f)$ ，式(3)，式(4)，式(5)的计算并非必要。对于这一点，将在实验部分进行分析和讨论。

基于上述发现，本文提出一种新的频谱残留变换模型，用以增强红外图像中的舰船目标，其计算过程如下：

$$P_M(f) = \text{FFT}[I(x)] / |\text{FFT}[I(x)]| \quad (6)$$

$$R_M(f) = BP(f) \cdot P_M(f) \quad (7)$$

$$S_M(x) = \text{FFT}^{-1}[R_M(f)] \quad (8)$$

其中， $| \cdot |$ 表示复数的取模运算； $BP(f)$ 表示频域中的带通滤波器，例如可以选择中心频率为 f_0 、截止频率为 Δf 的高斯型滤波器； $P_M(f)$ 表示本文定义的原始图像的相位谱； $R_M(f)$ 表示本文定义的谱残留； $S_M(x)$ 表示本文定义的显著图。式(6)~式(8)中用到的下标“M”用以区分本文定义的物理量。

新的频谱残留变换模型主要进行两种运算：一是原始频谱的归一化；二是频域带通。与文献[8]的谱残留模型相比，新的变换无需计算对数幅度谱，无需进行频率的低通滤波，频域的指数运算和空域的高斯滤波，因而计算速度更为快速。

另外，新的频谱残留变换有两个控制参数，即带通滤波器的中心频率 f_0 和截止频率 Δf ，可以根据目标特性进行调整，这为模型的使用创造了便利。

2.2 舰船目标的增强处理

在红外遥感图像中，舰船目标与海洋背景的对比如通常较弱，亮目标与暗目标都有可能出现。同时，红外遥感图像存在不同程度的噪声和多种形式的干扰，例如海水波动、云团、小岛、浅滩、陆地复杂边缘等。直接利用传统的双参数恒虚警算法(CFAR)^[13]会产生很多虚假目标。因此，在检测之前有必要应先对舰船目标进行增强，以提高检测的准确性。

舰船目标增强的目的在于提升目标在红外遥感图像中的信杂比，以便在增强后的图像中目标与背景杂波的对比如更强，更有利于准确检测。在红外遥感图像中，舰船目标的信号强度就是目标像素的灰度，它所反映的是目标的红外辐射强度，由目标温度决定并受成像时刻大气衰减的影响；背景包含的因素多而且复杂，因此普遍采用统计的方法加以描述，常用的统计量是背景辐射的均值和标准偏差。

假设舰船目标的信号强度为 g_t ，背景辐射强度的均值为 m_b ，背景辐射强度的标准偏差为 σ_b ，舰船目标的信杂比SCR定义为

$$\text{SCR} = \left| \frac{g_t - m_b}{\sigma_b} \right| \quad (9)$$

m_b 和 σ_b 有两种统计方法：一是统计待分析的整幅图像的均值和标准偏差；二是在局部的背景掩模中统计。图 1 是在局部范围内统计信杂比常用的一种掩模，其中心方格为待分析的目标像素，外围方格为背景区域，两者之间有保护区域防止目标信号对背景统计特性造成影响。

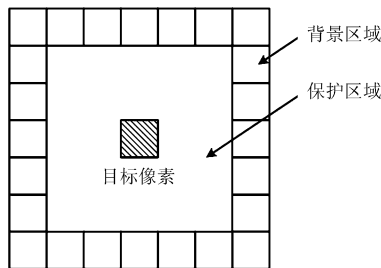


图 1 在局部范围内计算信杂比的掩模

利用频谱残留变换增强舰船目标的信杂比，关键在于根据舰船目标、自然背景干扰和图像噪声的特性，合理选择带通滤波器的类型及滤波器参数。简便起见，本文选择高斯型的带通滤波器，其频率响应函数 $BP(f)$ 可以表示为

$$BP(f) = \exp \left[-\frac{(f - f_0)^2}{2\Delta f^2} \right] \quad (10)$$

对于 512×512 的 FFT 变换，当 $f_0 = 1.8404$ ， $\Delta f = 0.3682$ 时，带通滤波器的频率响应函数如图 2 所示。由于陆地、云团、海水、复杂陆岸边缘等自然背景干扰属于图像中的低频慢变化成份，噪声属于图像中的高频成份，因此带通滤波器在去除背景干扰和抑制噪声方面具有明显的优势。

若红外遥感图像中，舰船目标的尺度大于 l_{\min} 而小于 l_{\max} ，根据离散傅里叶变换理论，当采用 512×512 的 FFT 变换时，目标对应的空间频率分别为 π/l_{\min} 和 π/l_{\max} 。因此，带通滤波器的中心频率 f_0 和截止频率 Δf 可以分别取为

$$f_0 = 0.5 \left(\frac{\pi}{l_{\min}} + \frac{\pi}{l_{\max}} \right) \quad (11)$$

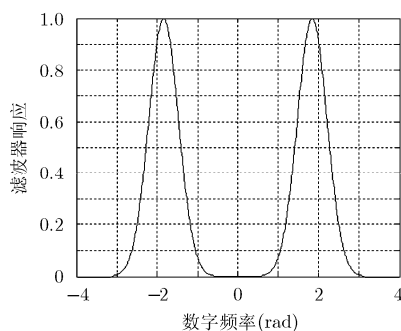


图 2 高斯型带通滤波器 ($f_0 = 1.8404$ rad, $\Delta f = 0.3682$ rad)

$$\Delta f = 0.5 \left(\frac{\pi}{l_{\min}} - \frac{\pi}{l_{\max}} \right) \quad (12)$$

根据上述参数设计的带通滤波器，能够在去除低频慢变化背景干扰和高频噪声的同时，较好地保留目标特征信息，从而有效提高目标的信杂比。

3 舰船目标的检测

经过增强处理之后，图像中的自然背景干扰和噪声得到抑制，舰船目标的信号得到增强。原始图像中的目标无论是亮目标还是暗目标，在增强后的图像中都表现为亮目标，这为采取统一的检测算法创造了便利。

目前，用于舰船检测算法主要包括：CFAR 及其改进算法^[6,13-15]、SUMO 算法^[16]、KSW 算法等^[17]。其中，CFAR 算法由于计算简洁、阈值选取的自适应等优点，成为目前研究最深入、最广泛、最实用的一类算法。本文也采用 CFAR 算法进行舰船目标检测。

CFAR 算法的具体实现过程是：在给定的虚警概率条件下，首先由目标所处周围背景杂波的统计特性自适应求取检测阈值，然后将待检测像素和自适应阈值进行比较，判断其是否为目标点。并通过参考窗口的滑动，实现对所有像素的自适应检测。

具体来说，若中心像素 (i, j) 的强度为 $g_{(i,j)}$ ，背景杂波的均值和标准偏差分别为 $m_{(i,j)}$ 和 $\sigma_{(i,j)}$ ，根据背景杂波自适应求取的检测阈值为 $t_{(i,j)} = m_{(i,j)} + k \cdot \sigma_{(i,j)}$ ，那么对中心像素 (i, j) 的检测结果 $d_{(i,j)}$ 为

$$d_{(i,j)} = \begin{cases} 255, & g_{(i,j)} \geq t_{(i,j)} \\ 0, & g_{(i,j)} < t_{(i,j)} \end{cases} \quad (13)$$

目标周围背景杂波的统计特性由目标像素周围参考窗口内的像素确定，采用图 1 所示的空心滑动窗口。这样可以在估计目标周围背景杂波模型参数时，去除目标像素对杂波模型参数估计的影响。

滑动窗口的大小应根据目标尺度确定。例如，若目标大小为 10 像素，则滑动窗口的大小应不小于 23×23 。只有这样，保护区域才能真正发挥作用。

4 实验结果

实验部分首先将本文提出的频谱残留变换与文献[8]的谱残留模型进行对比分析；然后分析利用频谱残留变换进行舰船目标增强的效果；最后分析舰船目标检测的实际效果。

4.1 频谱残留变换与谱残留模型的对比分析

2.1 节指出，在文献[8]的谱残留模型中，式(3)~式(5)的计算并非必要。基于这一发现，作者才提出

了新的频谱残留模型。这一节通过实验对上述结论进行验证。

实验采用的原始图像如图 3(a)所示，图像大小为 512×512 ，图像中的背景是慢变化的云层，目标是进行飞行表演的 7 架飞机。图 3(b)是按照式(1)~式(5)得到的显著图，图 3(c)是按照式(6)~式(8)得到的显著图，图 3(d)是两种显著图残差的图像表示，图 3(e)是两个显著图残差的 3 维表示。

通过人眼观察图 3(b)和图 3(c)可以看出：两种计算模型得到的显著图在视觉感受上非常接近。从图 3(d)可以看出：在两种显著图的残差图像中蕴含的有意义的目标信息非常有限，说明两种显著图非常接近。从图 3(e)可以看出：两种显著图的残差是取值范围在 $[-3, 1]$ 区间的随机值，进一步说明两种显著图的相似性。

表 1 是图 3(a)中 7 个飞机(由左至右编号)在不同显著图中的信杂比。计算信杂比的方法是：以显著图中目标区域的最大亮度作为目标信号强度，以 33×33 的滑动窗口最外层像素作为背景区域估计背景均值和标准偏差，采用式(9)计算信杂比。由表 1 的数据可以看出：显著图中目标的信杂比相比原始图像有了显著提升，两种显著图中对应目标的信杂比较为接近，基于本文方法得到的目标信杂比普遍更高。这表明：两种计算模型都有增强目标信杂比的功能，本文提出的计算模型具有与文献[8]的计算模型相当甚至更优的效果，也从另一个方面解释了

图 3(d)残差图像中的目标信号产生的原因。

表 2 给出了两种计算模型完成上述运算所需的时间。由于本文提出的变换无需计算对数幅度谱，无需进行频率的低通滤波，无需进行频域的指数运算，也无需进行空域的高斯滤波，因而计算速度较文献[8]的方法有非常明显的提高。

表 1 两种显著图中目标的信杂比

| 飞机编号 | 文献[8]的显著图 | 本文的显著图 | 原始图像 |
|------|-----------|---------|---------|
| 1 | 29.7465 | 30.3857 | 6.9225 |
| 2 | 22.4455 | 26.5565 | 18.3048 |
| 3 | 25.9342 | 29.9337 | 10.5236 |
| 4 | 38.9517 | 42.9811 | 11.9352 |
| 5 | 16.1000 | 29.3706 | 4.6467 |
| 6 | 17.4212 | 18.1739 | 5.0363 |
| 7 | 22.1618 | 34.3066 | 8.2687 |

表 2 两种计算模型的耗时

| | 文献[8]的模型 | 本文的模型 |
|-------|----------|-------|
| 耗时(s) | 1.125 | 0.160 |

4.2 舰船目标增强结果

这一节分析舰船目标的增强效果。主要从视觉效果和增强前后舰船目标的信杂比变化两方面进行分析。

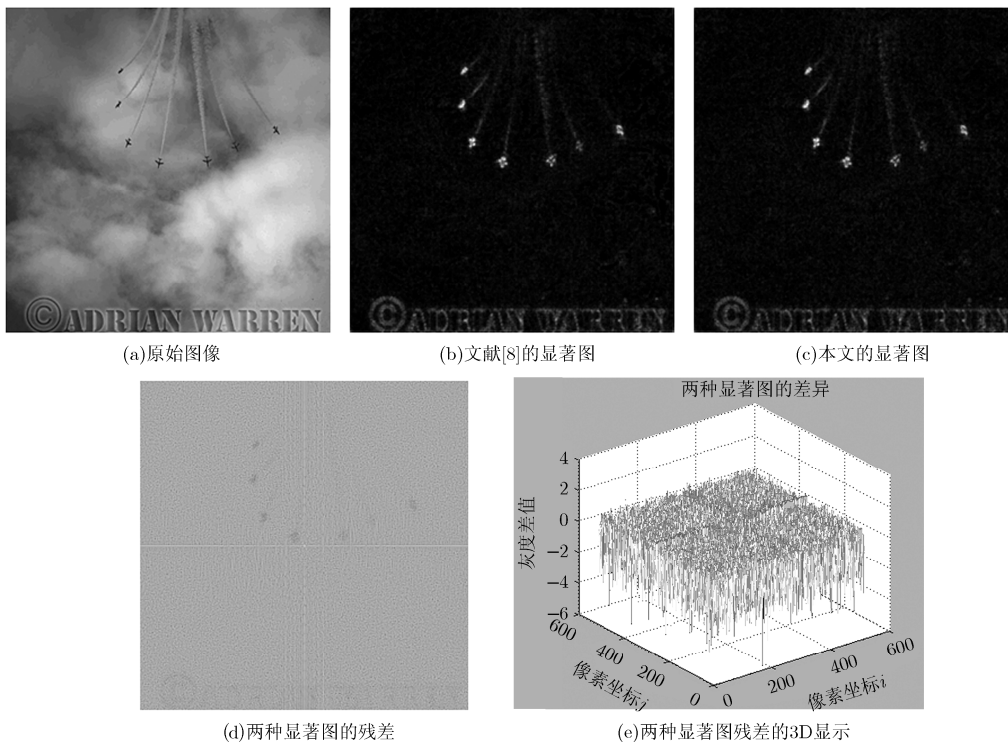


图 3 两种计算模型得到的显著图及其差异

实验采用两种红外图像：图 4(a) 是美国 Landsat5 拍摄的近红外图像，有明显的条纹噪声，空间分辨率 30 m，包含 2 个舰船目标(按从左至右方式编为“舰船 1”和“舰船 2”)；图 5(a) 是机载中波红外图像，分辨率优于 1 m，包含 3 个舰船目标(按从左至右方式编为“舰船 1”、“舰船 2”、“舰船 3”)。图 4(b) 和图 5(b) 是采用谱残留模型得到的舰船目标增强结果。图 4(c) 和图 5(c) 是采用本文方法分别针对两种红外图像得到的舰船目标增强结果。表 3 是两种方法针对 Landsat5-Band5 近红外图像提升舰船目标信杂比的情况。表 4 是两种方法针对机载中波红外图像提升舰船目标信杂比的情况。

由图 4 的实验结果可以看出，经过目标增强处理之后，图像中包含的条纹噪声得到明显抑制，舰船目标的信号强度得到显著提升。由图 5 的实验结果可以看出，经过目标增强处理之后，图像中包含的陆地干扰也得到明显抑制，舰船目标在整个图像中的信号强度提升非常显著。表 3 和表 4 的数据进一步表明：两种增强算法在提升目标信号强度方面具有显著的效果，其中本文方法效果尤为突出。

4.3 舰船目标检测结果

这一节在舰船目标增强的基础上进行目标检测

表 3 Landsat5-Band5 近红外图像中舰船目标的信杂比

| | 原始图像 | 文献[8]的模型 | 本文的模型 |
|------|---------|----------|---------|
| 舰船 1 | 30.7127 | 44.1742 | 78.7125 |
| 舰船 2 | 24.4999 | 43.6113 | 63.7448 |

表 4 机载中波红外图像中舰船目标的信杂比

| | 原始图像 | 文献[8]的模型 | 本文的模型 |
|------|--------|----------|---------|
| 舰船 1 | 5.2886 | 18.1102 | 23.9956 |
| 舰船 2 | 3.9375 | 17.9938 | 17.7489 |
| 舰船 3 | 5.5138 | 16.2474 | 23.5150 |

实验。CFAR 算法的滑动窗口的大小为 33×33 ，形状如图 1 所示，计算检测阈值 $t_{(i,j)} = m_{(i,j)} + k \cdot \sigma_{(i,j)}$ 的参数 $k = 10$ 。图 6(b) 和图 7(b) 分别是 CFAR 算法基于原始图像得到的检测结果；图 6(c) 和图 7(c) 分别是 CFAR 算法基于本文方法增强后的图像得到的检测结果。

图 6 的结果表明：在相同的检测阈值条件下，基于原始图像的 CFAR 算法漏检了 1 个目标，而基于增强图像的 CFAR 算法成功检出了所有目标。图 7 的实验结果表明：在相同的检测阈值下，基于原始图像的 CFAR 算法出现了 6 个虚警，而基于增强图像的 CFAR 算法则只出现了 3 个虚警。这两组实验表明：本文方法由于在检测前对目标进行了增强处理，在此基础上采用 CFAR 检测比直接在原始图像上进行目标检测具有更高的检测率和更低的虚警率。

5 结束语

随着我国高分辨率对地观测系统重大专项的实施，从海量的高分辨率红外遥感图像中自动、准确、快速地识别出感兴趣目标，将成为制约我国航天侦察装备充分发挥效能的技术瓶颈，迫切需要科研人员提出有效的解决办法。

本文研究了红外遥感图像中舰船目标的检测问题。基本思路是先增强舰船目标的信号强度，再进行目标检测。在谱残留模型的启发下，本文提出了一种新的频谱残留变换模型，并通过视觉观察、残差分析、信杂比测算等方法分析了这种变换模型在增强效果、计算量方面所具有的优势。在此基础上，研究了利用频谱残留变换进行红外遥感图像舰船目标增强的技术，提出了模型参数的设计方法，并通过实验验证了利用该方法去除背景干扰和图像噪声的可行性。进一步，研究了基于目标增强结果检测舰船目标的技术，并与直接在原始图像上进行检测的方法进行了对比，实验结果表明，本文提出的检

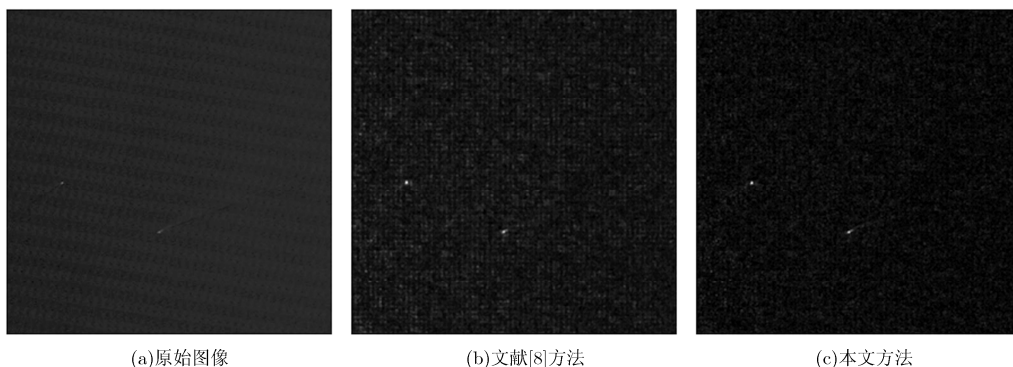


图 4 对 Landsat5-Band5 红外图像的增强结果

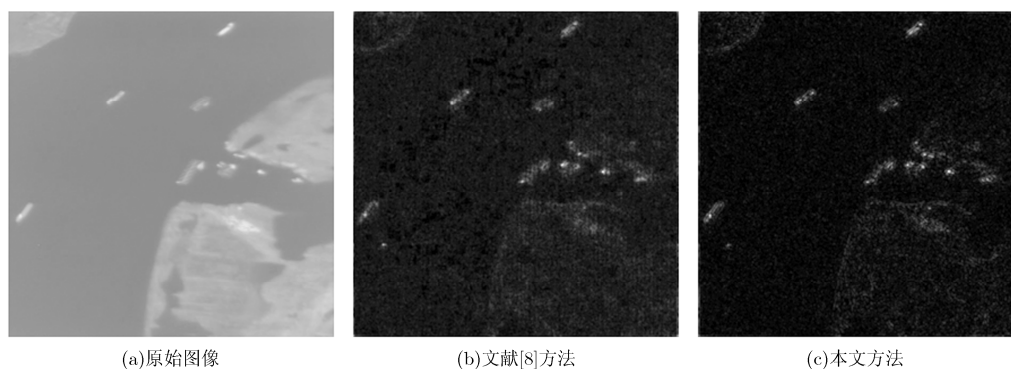


图5 对机载中波红外图像的增强结果

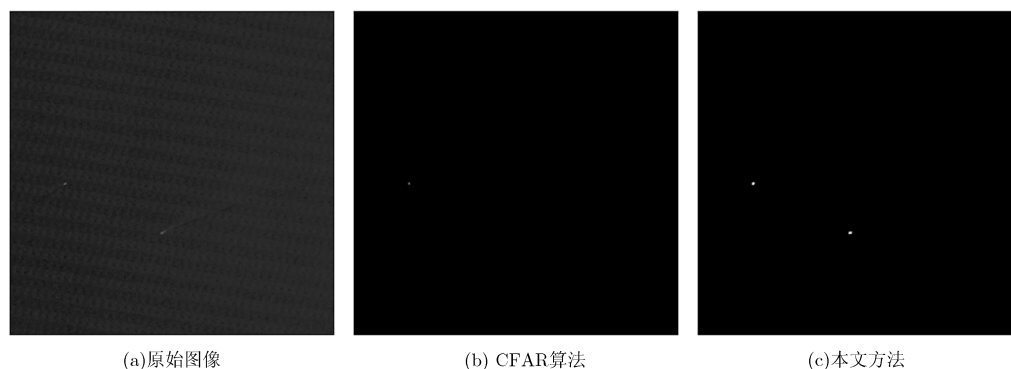


图6 对 Landsat5-Band5 红外图像的检测结果

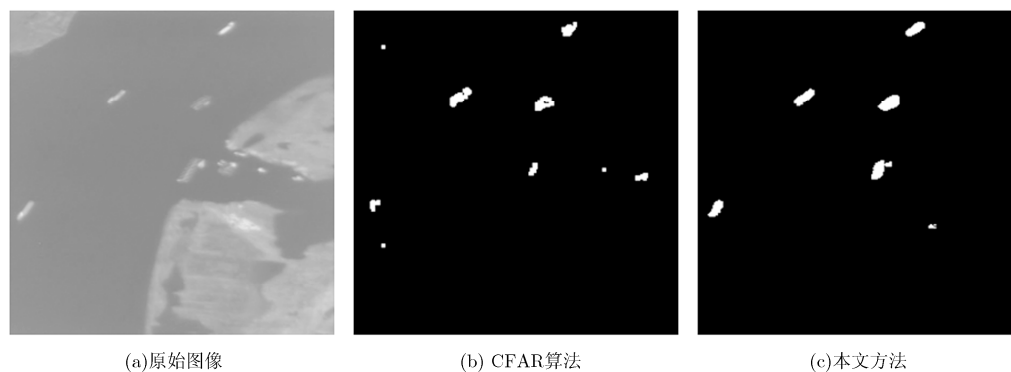


图7 对机载中波红外图像的检测结果

测方法具有更高的准确性。

现有研究需要深入和完善的地方在于：(1)分析频谱残留变换结果中图像高频随机噪声产生的原因，并在模型中加以修正；(2)有必要根据舰船目标的图像特性深入研究带通滤波器的选型和参数设计，完善滤波器选型和模型参数设计的理论。

参考文献

- [1] Cheng Gong, Han Jun-wei, Guo Lei, *et al.*. Object detection in remote sensing imagery using a discriminatively trained mixture model[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, (85): 32-43.
- [2] Cheng Gong, Han Jun-wei, Zhou Pei-cheng, *et al.*. Multi-class geospatial object detection and geographic image classification based on collection of part detectors[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, (98): 119-132.
- [3] Han Jun-wei, Zhou Pei-cheng, Zhang Ding-wen, *et al.*. Efficient, simultaneous detection of multi-class geospatial targets based on visual saliency modeling and discriminative learning of sparse coding[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, (89): 37-48.
- [4] An Zhen-yu, Shi Zhen-wei, Teng Xichao, *et al.*. An automated airplane detection system for large

- panchromatic image with high spatial resolution[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(12): 2768-2775.
- [5] Zhang Wan-ceng, Sun Xian, Wang Hong-qi, *et al.* A generic discriminative part-based model for geospatial object detection in optical remote sensing images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 99(1): 30-44.
- [6] 张亮. SAR 图像舰船目标检测方法研究[D]. [硕士论文], 国防科学技术大学, 2007.
- Zhang Liang. Detection of ship in SAR image[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- [7] 陈海亮. 基于特征的光学遥感图像舰船目标检测技术研究[D]. [硕士论文], 国防科学技术大学, 2010.
- Chen Hai-liang. Feature based method for ship detection in optical remote sensing image[D]. [Master dissertation], Graduate School of National University of Defense Technology, 2010.
- [8] Hou X and Zhang L. Saliency detection: a spectral residual approach[C]. Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007), Minneapolis, Minnesota, USA, 2007: 1-8.
- [9] Harel J, Koch C, and Perona P. Graph-based visual saliency[C]. Proceedings of the 20th Neural Information Processing Systems (NIPS 2006), Vancouver, British Columbia, Canada, 2006: 545-552.
- [10] Achanta R, Estrada F, Wils P, *et al.* Salient region detection and segmentation[C]. Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision Systems (ICVS 2008), Santorini, Greece, 2008: 66-75.
- [11] Achanta R, Hemami S, Estrada F, *et al.* Frequency-tuned salient region detection[C]. Proceedings of the 2009 Computer Vision and Pattern Recognition, 2009(CVPR 2009), Miami, Florida, USA, 2009: 1597-1604.
- [12] Itti L, Koch C, and Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [13] 许军毅, 计科峰, 雷琳, 等. 基于GLRT的光学卫星遥感图像舰船目标检测[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(4): 616-622.
- Xu Jun-yi, Ji Ke-feng, Lei Lin, *et al.* Ship target detection from optical satellite remote sensing image based on GLRT [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(4): 616-622.
- [14] Smith M E and Varshney P K. Intelligent CFAR processor based on data variability[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(3): 837-847.
- [15] Farrouki A and Barkat M. Automatic censoring CFAR detector based on ordered data variability for nonhomogeneous environments[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(1): 43-51.
- [16] Harm G. Developments in detection algorithms at JRC[C]. The Third Meeting of the DECLIMS Project, Vancouver, BC, 2004: 1-7.
- [17] 唐沐恩, 林挺强, 文贡坚. 遥感图像中舰船检测方法综述[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(1): 29-36.
- Tang Mu-en, Lin Ting-qiang, and Wen Gong-jian. Overview of ship detection methods in remote sensing image[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(1): 29-36.
- 张志龙: 男, 1976年生, 副研究员, 主要从事红外精确制导、图像处理、目标识别等方面的教学科研工作.
- 杨卫平: 男, 1968年生, 副教授, 主要从事自动目标识别、红外精确制导方面的教学科研工作.
- 张 焱: 女, 1975年生, 副研究员, 主要从事红外自动目标识别方面的教学科研工作.
- 李吉成: 男, 1970年生, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理、红外自动目标识别、多传感器信息融合方面的科研工作.