

文章编号: 2095-4980(2017)06-0972-06

一种结合空间信息的星载 SAR 图像舰船目标检测算法

樊庆聚¹, 蔡正谊², 冷祥光¹, 武院生³, 计科峰¹

(1.国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2.中国运载火箭技术研究院研发中心, 北京 100076;
3.武警云南总队迪庆州支队, 云南 迪庆 674400)

摘要: 针对常规恒虚警率(CFAR)方法对低信杂比合成孔径雷达(SAR)图像舰船目标检测效果不佳的问题, 提出一种结合空间信息的星载SAR图像舰船目标检测方法。该方法通过将像素的空间信息与灰度信息相结合构造联合图像, 以提高目标与背景的对比度, 然后对联合图像进行CFAR检测。基于不同分辨率实测星载SAR图像舰船目标检测的实验结果表明, 与直接基于CFAR的方法相比, 该方法对低信杂比SAR图像具有更好的检测性能。

关键词: 合成孔径雷达; 舰船检测; 空间信息; 恒虚警率

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201706.0972

A ship detection method from spaceborne SAR imagery combined with spatial information

FAN Qingju¹, CAI Zhengyi², LENG Xiangguang¹, WU Yuansheng³, JI Kefeng¹

(1.College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;
2.China Academy of Launch Vehicle Technology R&D Center, Beijing 100076, China;
3.The Armed Police Crops of Yunnan Diqing City Team, Diqing Yunnan 674400, China)

Abstract: A ship detection method from spaceborne Synthetic Aperture Radar(SAR) imagery combined with spatial information is proposed. It combines the spatial and gray information to construct a combined image to enhance the contrast, followed by a Constant False Alarm Rate(CFAR) detection. Experimental results based on various real data demonstrate that compared to the conventional CFAR, the proposed method performs well in low SCR images in different resolutions.

Keywords: Synthetic Aperture Radar; ship detection; spatial information; Constant False Alarm Rate

合成孔径雷达(SAR)因成像幅宽大且不受天时、天候影响, 被广泛用于海上舰船目标检测。对 SAR 舰船目标检测进行研究, 无论对军事还是民事应用都有重要意义^[1-2]。经过多年发展, 基于 SAR 图像的舰船目标检测技术取得较大进步, 有着较多的成熟应用。大多数 SAR 舰船目标检测算法都是基于舰船目标与海面背景的对比度来考虑的, 最为常用的是灰度对比度信息, 基于统计特性的 CFAR 方法是其典型代表^[3]。CFAR 方法通常利用待检像素周围一定范围内的像素对背景建模, 在一定虚警率下确定检测阈值, 通过待检像素灰度值与阈值比较完成检测, 它对目标与背景的信杂比有较强的依赖性。受成像环境、极化方式及相干斑噪声影响, SAR 系统所成图像并不一定能够提供较高的信杂比^[4]。在同等虚警率下, 低信杂比区域有可能会漏检, 而强相干噪声有可能会带来较多虚警。

常规的 CFAR 检测算法只考虑了图像的灰度信息, 对低信杂比图像的检测效果往往不佳。对 SAR 图像中舰船目标来讲, 它在图像中不仅表现出灰度信息, 还表现出一定的空间分布信息^[5]。舰船目标在一定的空间范围内往往是密集存在的, 有较多的灰度相等或相似的点, 而杂波与噪声点的灰度值在一定空间范围内往往是较为孤立的, 因此舰船目标在局部区域内通常表现出比杂波或相干噪声更高的同灰度像素密集度^[6]。已经有一些研究人员结合 SAR 图像的空间信息就舰船目标检测问题做了探索^[7-9], 他们在空间信息的定义上各不相同, 在检测时也大多将空间信息作为检测方法的辅助手段。本文以同灰度像素在局部空间内的密集度来定义图像的空间信息, 对空间信息与灰度信息共同构成的联合图像进行检测, 取得了较好检测效果。

1 算法描述

考虑到目标与杂波在局部空间中的密集度差异,本文在引入像素密集度信息基础上,提出一种新的SAR图像舰船目标检测方法。算法主要包括以下几步:a)计算像素的局部灰度密集度值以获得空间分布信息;b)将空间分布图像与原图像共同构成新的联合图像;c)对联合图像进行双参数CFAR检测;d)结果输出。整个算法流程如图1所示。

1.1 局部空间密集度计算

SAR图像的灰度值是不同目标对电磁波散射特性的真实反映,在同区域的同灰度像素极有可能属于同一目标。假设 $h_1(x,y)$ 代表了在图像 (x,y) 位置灰度为 h 的一个像素, $h_2(x+\Delta x,y+\Delta y)$ 代表了在另一位置灰度同样为 h 的像素,则认为2个像素 h_1,h_2 是属于同一目标类的,其中 Δx 和 Δy 代表点 h_2 在图像 x 方向和 y 方向上相对于点 h_1 的位移。

以 h_1,h_2 2点欧式距离的倒数定义两像素之间的密集关系,若2点之间的距离越近,则说明2点的密集度越高;距离越远,则代表2点的密集度越低。为了拉大目标类与杂波类在密集度上的差异,对其做取指数运算,则点 h_1,h_2 的空间密集关系 M 可以定义为:

$$M_h(x,y) = \frac{1}{\exp\left[\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}\right]}, \left((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 \neq 0\right) \quad (1)$$

对于 (x,y) 位置灰度为 h 的像素,在其周围一定的邻近范围内,它的灰度密集度 $M_h(x,y)$ 可以定义为:

$$M_h(x,y) = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} \frac{1}{\exp\left[\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}\right]}, \left(h(x+\Delta x,y+\Delta y) = h, \Delta x, \Delta y \subseteq [1, 2, \dots, (d-1)/2]\right) \quad (2)$$

式中 d 为邻域窗口的长和宽, d 选定为一个非1的奇数。

1.2 计算窗口选择

由式(2)可以看出, $M_h(x,y)$ 的计算不需要先验知识,它表达的是某一区域内同灰度像素的密集程度。通常舰船目标像素聚集存在, $M_h(x,y)$ 会比较大,而同灰度的杂波像素或相干噪声在小区域内往往稀疏存在, $M_h(i,j)$ 值会相对较小。计算窗口 d 的选取会影响当前点的密集度计算,若取较小的计算窗口会导致 $M_h(i,j)$ 值波动较大,不能准确描述当前灰度像素的密集程度,而窗口取太大又会使得 $M_h(i,j)$ 趋于平缓,变化较小,使得目标与杂波的局部密集度不易区分,同时较大窗口也会使密集度计算所需时间变长。本文选取图2(a)大小为 1877×1982 ,分辨力为30m的ENVISAT数据,图2(b)大小为 1877×1982 ,分辨力为3m的TerraSAR数据与图2(c)大小为 1000×1000 ,分辨力为3m的遥感卫星-3号(RS-3)数据,对计算窗口选取问题进行实验分析,分别选定每幅图像中属于目标区域和属于背景区域的像素各一个(其中ENVISAT与TerraSAR数据背景像素选在非均匀背景区域,RS-3数据背景像素选在均匀背景区域),计算选取像素在窗口大小为3,5,7,9,11,13,15,21,31,51,71与101时的密集度值,结果如图3(a)所示。可以看出,对于取自不同数据的不同大小、不同分辨力的3幅图像,当窗口大于11时,目标区域像素与背景区域像素的局部灰度密集度值基本不再发生变化。图3(b)给出了随着窗口变化,对不同大小图像进行密集度计算所需时间对比,可以看出,随着窗口的增大,密集度计算所需时间是呈指数增长的,且随着图幅的变大,所需时间增长会更为明显。在综合考虑密集度计算的准确性与效率情况下,选定计算窗口为 11×11 。

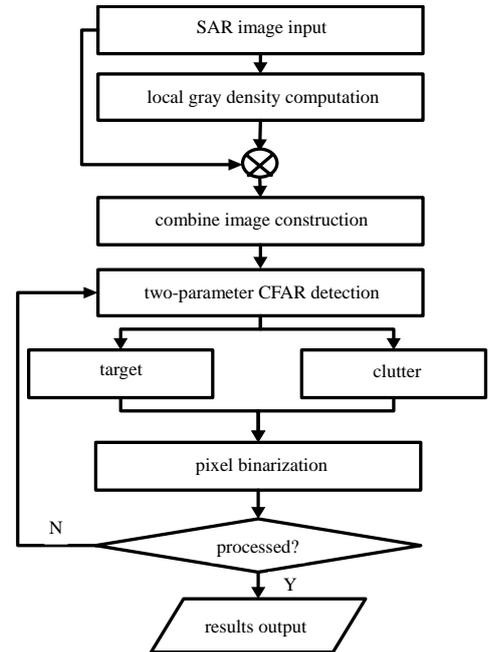
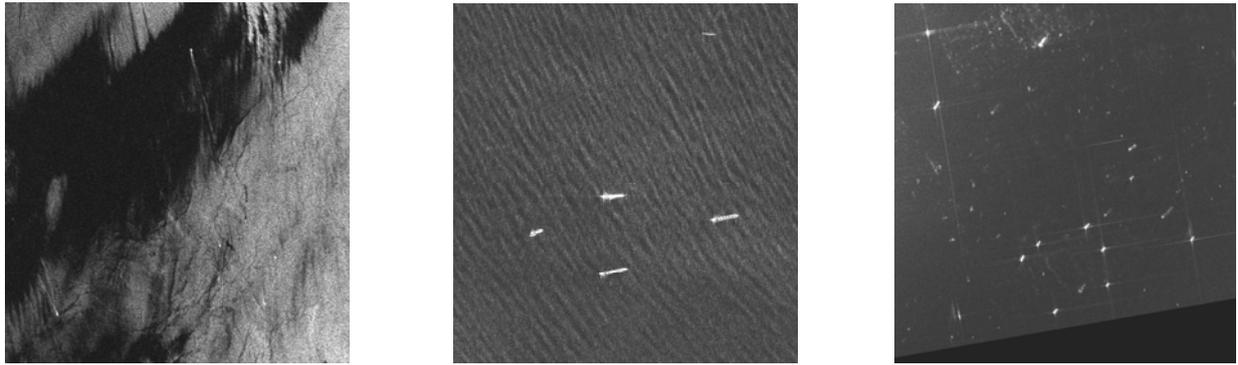


Fig.1 Flow chart of the algorithm
图1 算法流程图



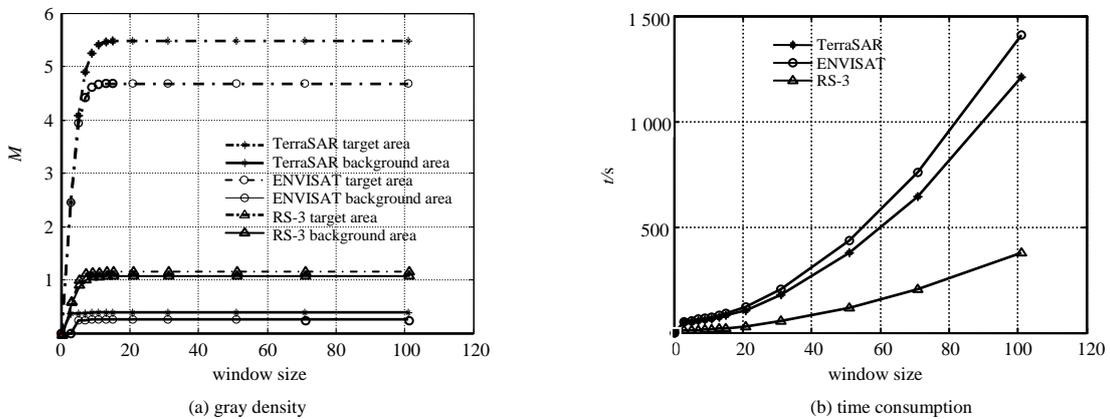
(a) ENVISAT data

(b) TerraSAR data

(c) RS-3 data

Fig.2 Test images

图 2 实验图像



(a) gray density

(b) time consumption

Fig.3 Verification of the local pixel gray density calculation window

图 3 局部像素灰度密集度计算窗口验证

1.3 联合图像构建

对图 3(a)结果进行分析可以看出,通常目标区域的像素经过密集度计算后,会得到普遍高于背景区域像素的密集度值,这与前文分析吻合。当背景杂波为非均匀杂波时,区域内的像素灰度起伏较大,杂波区域经密集度计算会得到一个较低的局部灰度密集度值,所得空间图像可以提供较高的信杂比,如 ENVISAT 与 TerraSAR 数据结果所示。而对于相对均匀的杂波区域,由于计算窗口内同一灰度的杂波像素点较多,均匀杂波区域得到的局部灰度聚集度值也会比较高。此时,处于均匀杂波区域的杂波点可能会得到接近甚至是超过真实舰船像素的灰度密集度值,导致空间信息图像信杂比降低。因此,若直接对所得空间图像进行检测并不是十分可靠。

通常,真实目标像素与背景像素在灰度上有一定差异,均匀杂波区域的灰度水平可能还要更低一些。考虑到真实目标像素与背景像素的灰度差异,在局部灰度密集度求解公式基础上,将原图像与密集度计算所得空间图像做乘运算,定义如式(3)。虽然均匀背景区域可以得到较高的密集度值,但是通过乘法操作,该区域的联合图像像素灰度值往往会小于舰船目标区域联合图像的灰度值,可以有效提高目标与背景间的信杂比,对于所得联合图像,重新将灰度量化到与原图像同样的灰度范围。本文在对联合图像进行检测时采用的的局部双参数 CFAR,它可以有效应对 SAR 图像的局部变化,具有较好的通用性。

$$M_h(x,y) = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} \frac{1}{\exp\left[\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}\right]} \otimes h(x,y), \quad (h(x+\Delta x, y+\Delta y) = h, \Delta x, \Delta y \subseteq [1, 2, \dots, (d-1)/2]) \quad (3)$$

2 实验分析

为验证本文算法效果,设计 2 个验证实验。实验在双核主频 3.1 G, 内存 4 G 的台式电脑上进行。实验一采用图 2(a)所示 ENVISAT 图像,图像属中低分辨力图像。实验二采用与图 2(b)同一成像条件下的 TerraSAR 图像,图像属高分辨力图像,大小为 556×825。图 2(c)所示 RS-3 图像由于信杂比较高,采用本文算法与常规 CFAR 算法在检测性能上没有多少差异,因此该数据没有被用于本文算法验证。

2.1 ENVISAR SAR 图像实验结果

对图 2(a)进行目视解译，真实目标如图 4(a)方框位置所示，可见图中存在 7 个真实舰船目标。除个别舰船目标与周边杂波信杂比较高外，其余目标均被淹没在海杂波中，常规的 CFAR 检测方法很难在此类图像中取得好检测效果。图 4(b)是经密集度计算后所得空间图像，可以看出，虽然强杂波区域的信杂比得到有效提高，但是原均匀杂波区域信杂比被明显降低。图 4(c)是本文方法最终构建的联合图像，可以明显看出，经与原图像相乘操作后，新构建联合图像的信杂比可以得到普遍较大的提升。图 5 分别给出了原始图像、空间图像与联合图像的灰度三维图，通过对比可以发现，联合图像比空间图像和原图像在信杂比上都有了明显提升。

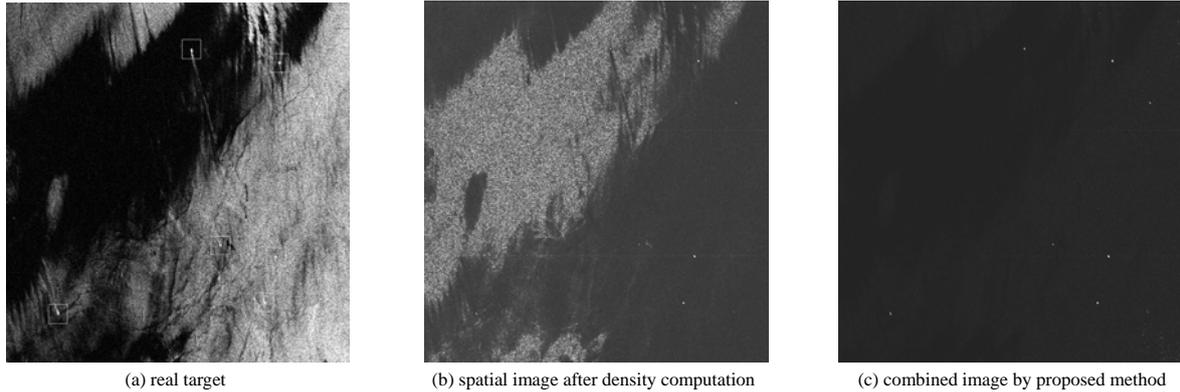


Fig.4 Results of spatial reconstruction
图 4 空间重建结果

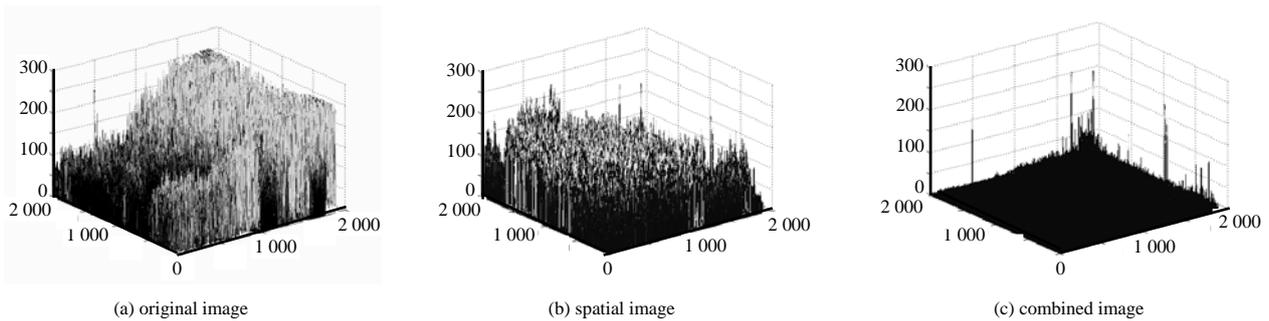


Fig.5 3D maps of different stages
图 5 不同阶段三维图像

利用双参数 CFAR 对原图像、空间图像和联合图像进行检测，设置虚警率为 1×10^{-3} ，检测结果如图 6 所示。图 6(a)是直接利用 CFAR 对高海杂原图像检测的结果，可以看出整个图像区域中有 6 个真实目标检出，1 个目标被漏检(图中右上圆圈位置)，对比原图可以发现，漏检目标位于原图信杂比较低区域，同时图中还有一个较大的虚警目标被检出(图中左侧圆圈位置)，它在形态上与真实舰船目标比较相似；图 6(b)是直接对空间图像进行检测的结果，可以看出该方法也有 6 个目标被检出，漏检目标位于原图均匀杂波区域，这是由密集度计算方法对均匀杂波区域计算缺陷导致的，而且直接对空间图像进行检测，得到虚警也较多；图 6(c)是本文联合图像的检测结果，该方法没有目标漏检，且本方法检出虚警均为相对孤立的小目标，便于后续鉴别操作。需要说明的是，本文算法需要先计算原图像的空间信息，这个过程需要一定的时间，因此该方法需要更多的时间消耗。

为更有效地分析本文方法检测效果，引入品质因子作为评价指标对算法检测效果进行衡量，其表达式为：

$$FoM = \frac{N_d}{N_f + N_r} \tag{4}$$

式中： N_d 为检测出的真实目标数； N_f 为虚警目标数； N_r 为实际存在目标数，表 1 给出了定量分析结果。

表 1 ENVISAT SAR 图像检测结果对比
Table1 Comparison of detection results on ENVISAT image

data	N_d	N_f	N_r	FoM	t/s
original image	6	1	7	0.75	3.73
combined image	7	0	7	1.00	12.59

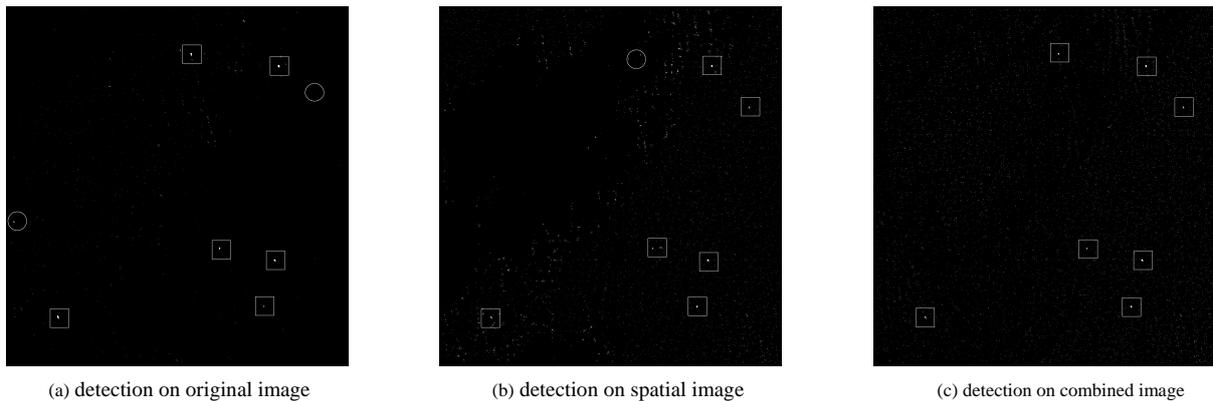


Fig.6 Detection results on ENVISAR image
图 6 ENVISAR SAR 图像检测结果

2.2 TerraSAR 图像实验结果

为了验证本文算法对高分辨图像的检测效果,以 TerraSAR 图像进行验证,实验数据如图 7(a)所示。该图像成像于近岸区域,图像中存在大片来自陆地区域的方位向鬼影干扰,且鬼影区域较大,亮度较高,因此常规方法很难取得较好检测效果。首先对实验图像进行人工判读,真实目标位置如图 7(a)方框位置所示,图 7(b)为本文方法构建的联合图像。设置不同的虚警率进行验证,检测结果如图 7(c)~(f)所示,检测结果均经过同样结构元素的形态学操作。其中图 7(c)与图 7(d)是虚警率为 10^{-3} 时的检测结果,对比图 7(a)、7(c)可以看出,在低虚警率情况下,直接对原低信杂比图像进行 CFAR 检测,有 2 个目标漏检同时有 2 个虚警检出,而基于图 7(b)联合图像的目标被全部检出且不存在虚警,如图 7(d)所示。为了减少原始图像目标漏检,将虚警率提高至 0.2,再分别对原图像和联合图像进行检测,结果如图 7(e)和图 7(f)所示,两图像中所有目标均被检出,但是直接对原图进行检测会产生较多虚警,而联合图像的检测结果中则没有虚警。同样以品质因子对检测性能进行评价,对比结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,本文算法在低虚警率与较高虚警率时的品质因子都明显高于直接对原图像的检测结果,说明本文方法对低信杂比图像检测具有明显优势。

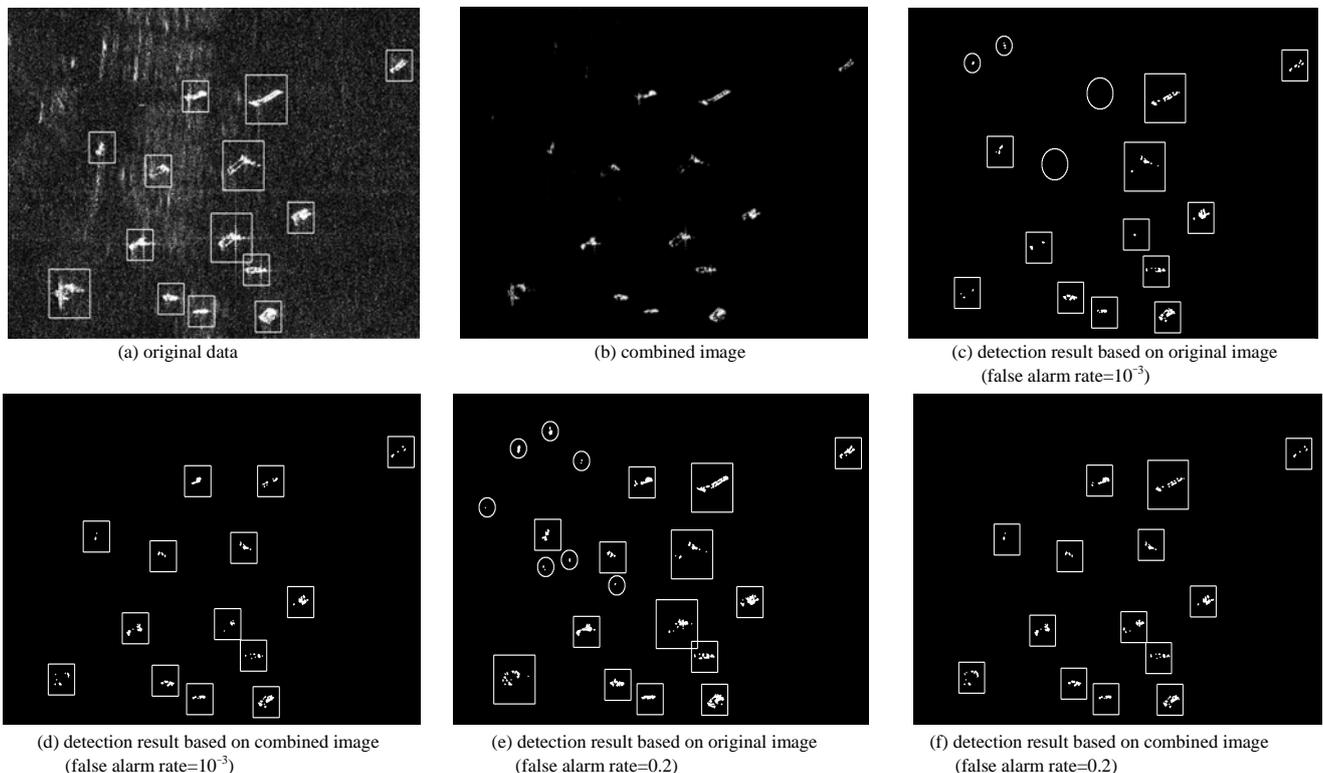


Fig.7 Detection results on TerraSAR image
图 7 TerraSAR 图像检测结果

3 结论

本文针对传统 CFAR 检测算法对低信杂比 SAR 图像检测效果不佳的问题,提出了一种结合空间信息的 SAR 图像舰船目标检测算法。该算法通过计算像素灰度的局部密集度来获取图像的空间信息,空间信息图像可以有效提高目标与背景杂波的信杂比。但是对于均匀杂波区域,仅仅依靠空间信息不能很好地区分目标与杂波,考虑到目标与杂波背景的灰度差异,文中将空间信息图像与原灰度图像进行相乘得到联合图像,联合图像对不同类型杂波图像都可以得到较高信杂比。基于不同分辨力实测星载 SAR 图像舰船目标检测的实验结果表明,与直接基于 CFAR 的方法相比,该方法对低信杂比 SAR 图像具有更好的检测性能。

参考文献:

- [1] PROIA N,PAGÉ V. Characterization of a Bayesian ship detection method in optical satellite images[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010,7(2):226-230.
- [2] VACHON P W,ADLAKHA P,EDEL H,et al. Canadian progress toward marine and coastal applications of synthetic aperture radar[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2000,21(1):33-40.
- [3] CRISP D J. The state of the art in ship detection in synthetic aperture radar imagery[R]. Defence Science and Technology Organisation Salisbury(Australia) Info Science Lab., 2004.
- [4] 王超,张红,吴樊,等. 高分辨SAR图像船舶目标检测与分类[M]. 北京:科学出版社, 2013. (WANG Chao,ZHANG Hong, WU Fan,et al. Ship target detection and classification in high resolution SAR image[M]. Beijing:Science Press, 2013.)
- [5] LENG X,JI K,YANG K,et al. A bilateral CFAR algorithm for ship detection in SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015,12(7):1536-1540.
- [6] WANG X,CHEN C. An automatic ship detection method based on local gray-level gathering characteristics in SAR imagery[J]. Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis, 2013,12(1):33-41.
- [7] WANG C,JIANG S,ZHANG H,et al. Ship detection for high-resolution SAR images based on feature analysis[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014,11(1):119-123.
- [8] WANG W,LIU B,HU H,et al. Radiometric-spatial analysis for ship detection in high resolution synthetic aperture radar images[C]// 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne,VIC,Australia:IEEE, 2013: 1309-1312.
- [9] 焦智灏,杨健,宋建设,等. 基于特征选择与GOPCE的舰船检测方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5): 702-706. (JIAO Zhihao,YANG Jian,SONG Jianshe,et al. Ship detection based on feature selection and GOPCE[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5):702-706.)

作者简介:



樊庆聚(1986-),男,山东省郯城县人,硕士,主要研究方向为遥感信息处理.email: fanqingju007@163.com.

蔡正谊(1974-),男,西安市人,副研究员,长期从事航天预先研究项目管理工。

冷祥光(1991-),男,江西省修水县人,在读博士研究生,主要研究方向为遥感信息处理。

武院生(1978-),男,山东省东明县人,助理工程师,主要研究方向为成像技术与图像自动目标识别。

计科峰(1974-),男,陕西省长武县人,博士,副教授,主要研究方向为SAR图像处理、解译与目标识别。

表2 TerraSAR 图像检测结果对比

TerraSAR image detection results($P_{fa}=10^{-3}$)					
data	N_d	N_f	N_r	FoM	t/s
original image	12	2	14	0.75	17.55
combined image	14	0	14	1.00	101.33
TerraSAR image detection results($P_{fa}=0.2$)					
data	N_d	N_f	N_r	FoM	t/s
original image	14	7	14	0.667	17.55
combined image	14	0	14	1.000	101.33