2013年12月

文章编号: 2095-4980(2013)06-0875-05

基于非邻域结构似然函数的舰船检测方法

张宏稷,杨 健

(清华大学 电子工程系,北京 100084)

摘 要:提出了一种利用似然函数进行舰船检测的新方法。该方法首先利用非邻域滤波的思想构造一种包含邻域的窗结构。对于非中心的窗,利用重复的邻域窗估计出邻域窗不同位置对应的协方差矩阵;然后,利用邻域窗的协方差矩阵和中心像素的邻域窗得到的似然函数构造检测器;最后,使用实际的极化合成孔径雷达(PolSAR)数据对提出算法的有效性做验证并和已有算法进行比较。结果证明,本文方法得到了很好的实验效果。

关键词:非邻域;窗结构;似然函数;极化合成孔径雷达 **中图分类号:**TN958 **文献标识码:**A doi:10.11805/TKYDA201306.0875

Non-local structure and likelihood function based ship detection

ZHANG Hong-ji, YANG Jian

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new approach based on likelihood function is proposed to detect ships. A window structure of the neighborhood is constructed by using the idea of non-local filtering. For non-center widows, the repeating neighborhood windows are employed to estimate covariance matrices corresponding to the different positions of the neighborhood window. And then likelihood functions of the covariance matrices and the neighborhood window of center pixel are employed to compose the ship detector. The effectiveness of the proposed algorithm is proved by using the Polarimetric Synthetic Aperture Radar(PolSAR) data and is compared with existing algorithms, which demonstrates that the proposed algorithm can obtain better experimental results.

Key words: non-local; window structure; likelihood function; polarimetric Synthetic Aperture Radar

舰船检测是极化合成孔径雷达(PolSAR)应用领域中的一个重要课题。针对此问题,该领域的学者们提出了多种检测方法,如基于极化白化滤波(Polarimetric Whitening Filter, PWF)^[1]的检测器和基于强度似然比的检测器^[2]。 另外,Touzi等人将HH,HV,VV和极化熵用于舰船检测并做了细致研究,得出结论:对不同的入射角,应采用不同的极化组合来进行舰船检测^[3]。陈炯等人提出了一种基于极化交叉熵的舰船检测方法^[4]。Liu 等人比较了单极化、双极化和全极化数据的标定舰船的检测结果^[5]。最近,Ferrara 等人对海面区域金属物体的检测做了研究,使用的数据是单视复数据,包括共极化通道和交叉极化通道的 SAR 数据^[6]。杨健等^[7-8]提出了一种基于广义最优极化对比增强(Generalized Optimal Polarimetric Contrast Enhancement, GOPCE)的方法。这些方法提高了目标与杂波之间的对比度,并且有效地提高了检测性能。另一方面,近年来在图像降噪领域有许多方法得到了应用。众多方法中,最近发展的非邻域均值滤波(Non-Local Mean Filtering, NLMF)在噪声去除领域有很好的效果^[9-12]。该方法的核心内容是将含噪声像素替换为相关周围像素的平均,权值取决于邻域像素的相似度。这种方法利用了图像结构的冗余性,特别是存在纹理或周期性图案的图像。

在本文中,首先根据非邻域均值滤波的滤波方式和通常使用的检测窗来构造一种杂波区域的邻域系统,这个 系统包括 16 个 3×3 的邻域系统,每个邻域系统对应位置设成一类,共9类。然后,每个类分别得到对杂波的估 计,接着使用似然函数^[13]构造对应的检测器,对图像的舰船进行检测。由于使用了邻域平均,图像的视数明显 提高。最后,使用实际的极化 SAR 数据检验此方法的效果,并与现有方法的有效性进行比较,最终验证了该方 法的有效性。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41171317);国家自然科学基金重点资助项目(61132008);清华大学自主研究基金资助项目

876

由于非邻域滤波使用的是区域的相似性而非独立点的相似性,所以此次窗结构的基本单元是一个邻域。因此, 将窗中心设成一个邻域,周围的像素设成不同的邻域,邻域之间互不重叠,如图1所示。其中,中心窗在图形正 中,一般取3×3的邻域结构,周围用一层保护带,为了周围可以不重叠地取邻域,保护带取3的倍数9×9。最 外层同样取3的倍数为15×15,这样,最外层的保护带中3×3的邻域结构的总数为16个。即构成了邻域窗结 构,中间3×3的中心邻域,向外扩充9×9为保护带,最外面15×15为杂波选取区域。邻域大小的选取是根据 图像分辨率和目标大小来定的。通常,对于图像分辨率在5m左右,50m~100m的舰船目标,选取这样的大小 是合理的。对于更大型的舰船,可以把窗取得更大一些。对于中心邻域和杂波选取区域,可以知道每个邻域结构 的大小为3×3,具体如图2所示。

可以看出,对于每个邻域单元,把其中9个像素分别标成1~9。每个像素对应的数字代表这个像素对应的邻 域类别。这样,在图1中,中心邻域单元对应1个邻域单元,每个像素对应1类,共9类。周围邻域保护窗外的 16个杂波邻域单元,这些单元互不重叠,每个单元对应图2的邻域结构,对应位置的点为对应的类别,有16个 邻域单元,所以共9类,每类由16个点组成。如图3所示。



图1 邻域窗结构

1	2	3
4	5	6
7	8	9



Fig.2 Cell structure of the neighborhoodFig.3 Correspond图 2 邻域单元结构图 3

Fig.3 Corresponding location of neighborhood cell 图 3 邻域单元对应位置图

图 3 中,每个小块对应 1 个像素位置,黑线将每个邻域块分开。其中,中心邻域块旁边的黑色区域是隔离带。 在图 1 中,没有区分每个邻域块中的像素,在图 2 中显示了每个邻域单元的对应类别,在图 3 中,将图 1 和图 2 结合起来,其中每个中心或杂波像素都用一种灰度进行标定,每种灰度代表一个类别。其中,对中心邻域单元和 杂波邻域单元分到的同一类别,做对应处理。杂波区域处理后得到类中心,与中心邻域中对应位置的像素数据进 行相似度的计算,得到本文检测算法的值。即将 16 个杂波像素处理后的结果和 1 个目标像素的相关矩阵做融合, 然后进行检测。

2 基于似然函数的舰船检测

对于图 3 所示的结构,设不同的位置对应 9 类中的一个,则对于杂波邻域单元每类中有 16 个位置。其中相 邻像素的距离都大于 2 个像素,并且由于是海面杂波,所以相邻像素的相关性不大。综合这 2 个因素,相邻项的 间隔大,相邻像素相关度低,则可以认为杂波区域每类中的 16 个位置的相关矩阵是独立不相关的。

假设 *S* 代表邻域单元(如图 2)像素位置集(共 9 个元素),对任意一个位置 $s \in S$,杂波相关中心,相关矩阵域 $X = \{X_s = \Sigma_s\}, Y_s$ 是在 *s* 位置的中心邻域相关矩阵,相关阵域 $Y = \{Y_s\}$ 。由于似然函数 $P(Y_s | X_s)^{[14]}$ 代表已知 X, Y的概率密度,其可以看成两矩阵之间的差异,所以用它来构造检测算法。

$$P(Y \mid X) = \prod_{s \in S} P(Y_s \mid X_s) = \prod_{s \in S} \frac{n^{qn} |[Y_s]|^{n-q} \exp(-tr(n[\mathcal{Z}_s]^{-1}[Y_s]))}{K(n,q) |[\mathcal{Z}_s]|^n}$$
(1)

在式(1)中,差异用似然函数来衡量,由于像素之间的独立性,所以可以写成乘法的形式。对 Σ_s 的最大似然估计为相关矩阵的平均值^[15]。在此问题中,对于一个邻域单元有9个位置,在非中心的邻域单元中,共有16个邻域单元,每个邻域单元对应的9个位置都产生一个对应位置的 Σ_s 。这样计算9个16平均相关矩阵,会产生9个相关矩阵中心。对于中央的3×3邻域,每个位置都有一个相关矩阵中心与其对应,也就是 Σ_s 对应的 Y_s 。这样,得到了基于邻域单元的似然函数的相似性度量。

为了得到简化形式的相似性度量,希望对概率密度函数进行必要的化简,通过去除一些对差异影响较小的项, 可以达到减少计算量的效果。而且由于计算量减少,算法的可靠性也会有所提高。在式(1)中,分子的|[**Y**_]]^{n-q}项 可以去除,去除的方法可以使 n和 q=3 十分接近,比如进行多视处理使得视数 n 为 3。由于分子中 $|[\Sigma_s]|^r$ 是对杂 波区域的中心相关矩阵的估计,而且式中的计算是取其行列式,所以差别不大。而且由于是使用邻域信息,所以 度量中心邻域和杂波邻域差别需要计算 9 项的连积。这样,由于随机性 9 项的连积可以反映很大区域的杂波,所 以连积更能反映海面的平稳特性。最终认为此部分所有图像上的位置的值基本相同,因此 $|[\Sigma_s]|^r$ 部分引起的差异 可忽略不计。

综上所述,对得到的反映差异的概率密度函数取对数并求反,去掉可忽略项得到如下表达式:

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y}) = \sum \boldsymbol{E}(\boldsymbol{Y}_s) = \sum_{s \in S} tr\left(\left[\boldsymbol{\Sigma}_s\right]^{-1}\left[\boldsymbol{Y}_s\right]\right)$$
(2)

式中, *E*(*Y*)代表总差异为概率密度函数取对数后求反得到的结果去除可忽略项的函数形式,其由邻域单元的 9 个位置对应的像素差异 *E*(*Y_s*)组成。其中 *E*(*Y_s*)由概率密度函数中的不可忽略的项组成。其形式和 PWF^[1]的形式 有一定的类似。所以,总差异可以看成是邻域单元中,对 9 个位置分别进行 PWF 后,将所得到的结果进行加和 处理。

3 实验对比效果

实验所用数据是 Radarsat-2 天津塘沽港的极化 SAR 数据, 成像波段为 C 波段,成像时间是 2011 年 6 月 23 日。图 4 是该 极化 SAR 图像的极化总功率(SPAN)图像,图像的近海区域有若 干水面目标,如舰船等。其中,白框框出的是近海的一个杂波 区域。由于在此区域中,杂波比较均匀,成像数据没有较大的 成像系统误差,所以用来统计杂波的统计特性,作为数据模拟 和检测阈值的依据,此区域通过人工经验确定。

在实验中, 对单视数据首先进行多视处理, 使视数 n 和 q=3相当, 从而满足 $|[\Sigma_s]|^n$ 可忽略项的条件。在实际算法中, 使用 邻域单元时, 对非中心的杂波像素做了一定处理, 对其功率 SPAN 较大的区域, 计算杂波中心时, 将其去除, 可以减少杂波 中心的波动, 这样, 将 $|[\Sigma_s]|^n$ 去除就是合理的。因此, 得到的 检测器的表达式(2)是合理的。

由于相关矩阵是正数,由式(2)得到的检测器的值恒为正数,取图 4 方框内的数据作为杂波拟合。这里取对数后利用 Parzen 窗^[13]方法进行拟合,得到的效果如图 5 所示。

由于杂波区域数据量大,所以可以看出杂波区域的检测值 呈现类似正态分布,所以拟合参数可以用数据的标准差后位数 来计算。得到的模拟概率分布如图 5 所示,可以看出其很好地 模拟了杂波区域检测器的概率分布。

拟合的杂波检测值的概率分布函数随虚警率是严格单调下降的,所以本文使用二分法来搜索阈值,然后取指数,就是检测器的阈值^[16]。利用上述方法,得到虚警率为 10⁻⁵的各检测器的检测结果如图 6~9 所示。



Fig.4 PolSAR SPAN image 图 4 极化 SAR 总功率图像



图 5 本方法杂波区域的分布

从图 6~9 中,可以看出,与 SPAN 相比,本文方法检测出了更多的目标区域,并且检测出了图像中上部的小目标,如图 9 中的虚线框所示;而与 PWF 相比,图像下部的噪声虚警,即海面杂点明显减少;和 GOPCE^[8]相比,杂点也明显减少,并且本文方法能清晰地检测出舰船目标,其邻域内的扩散杂波很少,轮廓清晰,从而验证了本文方法的有效性。

未检测前本方法的检测值和 PWF 的检测值显示如图 10~11 所示,由于视数^[17]是评价一个检测量好坏的重要 因素,PWF 就是使单像素处理后视数最大的方法,所以,将图 4 方框内的视数进行统计得到本文方法的视数为 2.479 3,PWF 的视数为 2.660 6。可以看出,由于使用了邻域单元,图像在没有使用先验信息的情况下,视数有 了明显改善,从而反映出更好的检测效果。



Fig.6 SPAN detection result 图 6 SPAN 检测结果



Fig.8 PWF detection result 图 8 PWF 检测结果



Fig.10 Detection value of proposed method 图 10 本文方法检测值

这里,给出该算法在运算效率方面与其他算法的比较, 作为以后使用者在实际应用中取舍算法的参考。在 CPU 为 i3(2.93 GHz),操作系统为 WIN7 的 64 位旗舰版主机上,用 Matlab2011b 版本进行仿真计算,使用文中数据进行测试。测 试结果如表 1 所示。可以看出,简化算法达到了一定的效果, 但算法的计算量较大,可以考虑并行计算或者 GPU 方法来解 决这一问题。



Fig.7 GOPCE detection result 图 7 GOPCE 检测结果



Fig.9 Detection result of proposed method 图 9 本文方法检测结果



Fig. 11 PWF detection value 图 11 PWF 检测值

表1各算法的运行时间比较

Table1 Comparison of running time of algorithms		
algorithms	running time/s	
the proposed algorithm	258	
algorithm without simplification	277	
SPAN	0.812	
PWF	2.04	
GOPCE	36.1	

4 结论

本文首先回顾了舰船检测的方法,以及近些年研究的一种非局域滤波方法。然后,根据非局域滤波的特点,

构造了一种基于邻域单元的窗结构。利用似然函数构造中心邻域单元和外围杂波邻域单元的差异的度量,将此度量的可忽略部分去除,得到的结果可以看成是邻域单元不同位置的极化白化滤波器结果的和,最后确定此和式为最终检测量的表达式。此外,用实际数据对该方法的有效性进行了实验验证。实验结果证明,本方法既能有效地减少目标周围的虚假像素,又能得到比较连续的目标,且海面和目标附近杂点明显减少,从而为目标尺寸的准确估计及目标识别奠定了良好的基础。

参考文献:

- Novak L M, Burl M C. Optimal speckle reduction in POL-SAR imagery and its effect on target detection[C]// Proceedings of SPIE Millimeter Wave and Synthetic Aperture Radar. Orlando, USA: [s.n.], 1989:84-90.
- [2] Chaney R D,Bud M C,Novak L M. On the Performance of Polarimetric Target Detection Algorithms[J]. IEEE Aerospace Electronic Systems Magazine, 1990,5(11):10-15.
- [3] Touzi R, Charbonneau F, Hawkins R H. Ship-Sea Contrast Optimization When using Polarimetric SARs[C]// Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, Australia: [s.n.], 2001:426-428.
- [4] CHEN J,CHEN Y,YANG J. Ship Detection using Polarization Cross-Entropy[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009,6(4):723-727.
- [5] LIU C,Vachon P W,Geling G W. Improved ship detection with airborne polarimetric SAR data[J]. Canada Journal of Remote Sensing, 2005,31(1):122-131.
- [6] Ferrara G,Migliaccio M,Nunziata F,et al. Generalized-K(GK)-based observation of metallic objects at sea in full-resolution synthetic aperture radar(SAR) data: A multipolarization study[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011,36(2):195-204.
- [7] YANG J,DONG G,PENG Y,et al. Generalized Optimization of Polarimetric Contrast Enhancement[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004,1(3):171-174.
- [8] YANG J,ZHANG H,Yamaguchi Y. GOPCE Based Approach to Ship Detection[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012,9(6):1089-1093.
- [9] Yaroslavsky L P. Digital Signal Processing-An Introduction[M]. New York:Springer-Verlag, 1985.
- [10] Buades A,Coll B,Morel J M. A non-local algorithm for image denoising[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego,USA:[s.n.], 2005:60-65.
- [11] Buades A,Coll B,Morel J M. On image denoising methods[J]. Technical Note,Centre de Mathematiques et de Leurs Applications(CMLA), 2004,15(5):1-40.
- [12] Buades A,Coll B,Morel J M. Denoising image sequences does not require motion estimation[C]// Proceedings of IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. Comos,Italy:[s.n.], 2005:70-74.
- [13] Duda R O, Hart P E, Stork D G. Pattern classification [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [14] Lee J S,Grunes M R,Kwok R. Classification of Multi-look Polarimetric SAR imagery based on Complex Wishart Distribution[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994,15(11):2299-2311.
- [15] Boerner W M,YAN W,XI A,et al. On the Basic Principles of Radar Polarimetry: the Target Characteristic Polarization State Theory of Kennaugh, Huynen's Polarization Fork Concept and its Extension to the Partially Polarized Case[J]. Proceedings of IEEE, 1991,79(10):1538-1550.
- [16] Van Trees H L. Detection, estimation and modulation theory. Part I:Detection, estimation and linear modulation theory[M]. New York:John Wiley & Sons, 1968.
- [17] J S Lee, Jurkevich I, Dewaele P, et al. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review [J]. Remote Sensing Review, 1994,8(4):311-340.

作者简介:



张宏稷(1985--),男,哈尔滨市人,在读博 士研究生,主要从事极化 SAR 图像海面舰船检 测的研究.email:vedasg@163.com. 杨 健(1965-),男,湖北省襄樊市人,教授,博士生导师,主要从事雷达极化、雷达遥 感等理论的建模、最优极化处理以及模糊理论 等研究.