

选择性视觉注意机制下的多光谱图像舰船检测

正虎¹⁾, 余映¹⁾, 王斌^{1,2)}, 张立明¹⁾

¹⁾ (复旦大学电子工程系 上海 200433)

²⁾ (复旦大学波散射和遥感信息教育部重点实验室 上海 200433)

(zhding@fudan.edu.cn)

摘要: 针对现有视觉注意计算模型不适于处理维度大于4的多维图像的不足, 将选择性视觉注意机制引入到多光谱遥感图像目标检测中, 提出一种基于双四元数的视觉注意计算模型. 将多维数据构建成双四元数的形式, 利用其傅里叶变换的相位谱来提取显著性区域以用于显著目标检测; 实现了多维数据的整体处理, 并充分利用了频率域和空间域的信息. 与传统的多光谱图像目标检测方法相比, 该模型计算复杂度低、对各种参数设置的依赖性小. 模拟数据与真实多光谱遥感数据的实验结果表明, 文中方法具有良好的检测效果, 同时对噪声具有较强的鲁棒性.

关键词: 视觉注意; 双四元数; 傅里叶变换; 舰船检测; 多光谱图像

中图分类号: TN911.73

Visual Attention-Based Ship Detection in Multispectral Imagery

Ding Zhenghu¹⁾, Yu Ying¹⁾, Wang Bin^{1,2)}, and Zhang Liming¹⁾

¹⁾ (Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

²⁾ (The Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract: Since the existing computational models of visual attention are not suitable to process data with dimensions higher than four, we introduce selective visual attention mechanism into target detection on multispectral imagery, and propose a visual attention computational approach based on biquaternion. By transforming multidimensional data into biquaternion and exploiting the phase spectrum of biquaternion Fourier transform (PBFT), saliency map is generated for salient target detection. The original multidimensional data can be incorporated as a whole, and features both in spatial and frequency domain can be extracted effectively. Compared with traditional multispectral target detection methods, our method has very low computational complexity and is not sensitive to parameter setting. Experimental results on simulated and real multispectral remote sensing data show that the proposed method has excellent performance in ship detection and is robust against white noise.

Key words: visual attention; biquaternion; Fourier transform; ship detection; multispectral imagery

多光谱成像传感器在光谱维能获取各个波段对应物质的光谱信息, 同时在空间维获取场景的空间信息, 形成了包含丰富信息的多维数据体. 因此多光谱图像数据在目标检测中有着独特的优势, 其中海

上舰船检测在海洋渔业、海洋运输、军事监测等方面更有着重要意义.

常用的多光谱目标检测方法通常是基于光谱信息的统计性检测方法^[1-3], 即通过假设测量值是由

收稿日期: 2010-06-27; 修回日期: 2010-09-29. 基金项目: 国家自然科学基金(61071134); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2009A A12Z115). 丁正虎(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感图像目标检测; 余映(1977—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为模式识别与人工智能; 王斌(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号和图像处理及其在遥感数据的分析与处理、生物电磁信号的分析 and 处理中的应用; 张立明(1943—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为人工神经网络模型及其在图像识别上的应用、图像编码和处理、非线性方法.

背景、目标和噪声构成,利用统计的方法分别构造背景和目标模型,再利用假设检验得到判别目标的检测结果,其中具有代表性的方法就是 Reed 等提出的多通道恒虚警率(constant false alarm rate, CFAR)方法^[1].多通道 CFAR 方法建立在空间白化和高斯分布的假设基础上,利用广义似然比检验进行目标检测.而在实际应用中,像素间空间不相关的假设往往是不合理的,并且也很难通过预白化处理得到理想的空间白化数据.此外,在求取虚警率函数的过程中需要对样本协方差矩阵进行求逆,而由于多光谱图像的谱间相关性,在对其求逆时容易出现较大误差.

为了对目标的存在性做出判断,传统方法往往需要对所有图像区域进行验证,但实际上人们所关心的内容通常仅占图像中很小一部分.这种验证方式既造成了计算浪费,又加重了分析难度.

人类在面对复杂场景时能迅速地将自己的注意力聚焦在一些显著的目标上,从而对这些目标进行优先处理,这里面存在一个视觉选择性注意的机制.这种资源优化配置的机制使得人脑视觉皮层能在有限的神经资源下很好地处理摄入的视觉信息.显然,将该机制引入到遥感图像目标检测中是很有必要的.

视觉注意可分为 2 种形式,即不受意识支配,数据驱动的自底向上的形式^[4,5],以及与先验知识相关、受主观引导的基于任务的自顶向下的形式^[6,7].Itti 等最早提出了一个自底向上的计算模型^[4],他们在计算结构上模仿人脑形成视觉显著性的神经机制,并能够计算出对应场景图像的视觉显著图,显著图中各区域灰度级的大小表示在视觉场景中对应位置显著性的强弱;Walther 等在 Itti 的基础上提出了一种方法^[8].然而这些计算模型运算量较大、参数设置过于复杂,无法很好地在工程应用中得以实现.

近年来,基于频域的视觉显著性计算方法较好地克服了以上缺点,如 Hou 等的残谱法^[9],Guo 等^[10]和马奇等^[11]的傅里叶变换相位谱法,Yu 等的脉冲余弦变换法^[12]和 Guo 等的四元数的傅里叶变换相位谱法(phase spectrum of biquaternion Fourier transform, PQFT)^[13],他们用大量的心理实验和自然图像库的实验证明了频域视觉显著性计算方法不仅能优于空间域模型^[4,8],而且这些视觉注意的频域模型能迅速、有效地实现显著性检测,且对参数的依赖较小,更适用于工程应用.特别是用四元数综合表达图像的色彩(红绿和蓝黄拮抗)和亮度特征(PQFT)^[13]能同时处理多元的信息,比起多个单通道处理有更好

的性质.然而 PQFT 只适用于处理用红绿和蓝黄拮抗表达的彩色图像等的显著性检测;对于多光谱的遥感图像,光谱的数目往往是多于 4 个通道,如何将 PQFT 推广到高于 4 个通道的情况,并试图将选择性视觉注意机制引入到多光谱图像的船只检测问题中,是本文研究的主要目标.

为实现该目标,本文提出一种适合于处理多光谱图像数据的基于双四元数模型的视觉选择性注意方法.该方法将多光谱图像数据构建成双四元数的形式进行整体处理,利用双四元数傅里叶变换的相位谱(phase spectrum of biquaternion Fourier transform, PBFT)来获取显著图并用于显著目标检测.与传统的多光谱目标检测方法相比,本文方法不需要以对海面背景及目标的概率分布特性的一些理想化的假设作为建模的前提;作为一种自底向上的视觉注意方法,它不依赖于先验知识,也没有诸多复杂的参数设置.同时,由于双四元数的傅里叶变换存在快速实现算法^[14],本文方法能够快速计算出输入的多通道数据的视觉显著图,可满足实际应用中实时处理的要求.

1 双四元数模型

文献[15]指出,双四元数模型最早是由 Hamilton 在 1853 年提出的^[15],其形式为

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k;$$

其中 $q_0, q_1, q_2, q_3 \in \mathbb{C}$, $i \perp j, j \perp k, i \perp k, ij = k, ijk = -1$.若用符号 $I^2 = -1$ 表示复数,则任意复数 $z \in \mathbb{C}$ 可表示为 $z = \Re(z) + I\Im(z)$.那么就可以将任意双四元数写成另一种形式

$$q = \Re(q) + I\Im(q).$$

双四元数的实部和虚部可分别表示为:

$$\begin{cases} \Re(q) = \Re(q_0) + \Re(q_1)i + \Re(q_2)j + \Re(q_3)k \\ \Im(q) = \Im(q_0) + \Im(q_1)i + \Im(q_2)j + \Im(q_3)k \end{cases}$$

若 $\Re(q_0) = \Im(q_0) = 0$,则称 q 为纯双四元数.若 q 的模为 1,则称其为单位双四元数.

2 基于双四元数的视觉注意模型

早在 1996 年,Castleman 就指出图像的傅里叶变换的幅度谱对应着每个正弦成分的数值大小,而傅里叶变换的相位谱则指出了每个正弦成分在图像中的具体位置所在^[16].当利用相位谱进行图像重构时,在竖直或水平方向上周期性小的部分及非平坦

的部分将会在重构的图像中凸显出来, 而这些区域往往就是本文所需要检测的显著性目标的位置. 本课题组之前在视觉注意的频域计算模型上所做的工作^[10-13,17]已表明, 利用频域相位信息来计算图像的视觉显著性具有良好的实际效果并具有一定的生物合理性, 且计算复杂度低. 本文同样利用双四元数频域的相位谱的重构来完成多光谱图像的视觉显著性

的获取.

首先, 将 Landsat 多光谱图像的 6 个常用波段 (舍弃热红外波段) 构造成一幅纯双四元数图像, 即一个图像矩阵中的每个元素都是一个纯双四元数; 然后计算其双四元数傅里叶变换的相位谱并完成重构. 其具体流程如图 1 所示.

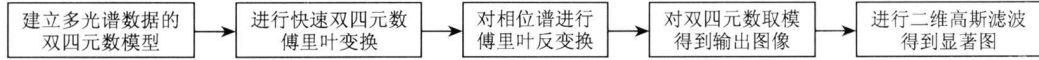


图 1 本文方法的具体流程图

Ell 等首先提出了彩色图像的四元数傅里叶变换^[18], 而 Said 等又在其基础上提出了双四元数傅里叶变换 (biquaternion Fourier transform, BiQFT) 的快速算法^[14]. 文献[14]通过一个线性变换将 BiQFT 分解为 4 个普通的复数二维傅里叶变换.

位纯双四元数.

令 $\|F[u, v]\| = 1$, 则 $F[u, v]$ 中仅包含了相位谱信息, 然后计算 $F[u, v]$ 的傅里叶反变换, 结果记为 $\tilde{f}(n, m)$.

所需的显著图由

$$SM(n, m) = G * \|\tilde{f}(n, m)\|^2$$

计算得到. 其中 G 为一个二维高斯低通滤波器 ($\sigma = 2$). 最后将显著图的灰度值归一化到 $[0, 1]$ 区间, 以便于后面的目标检测.

3 基于视觉显著性的多光谱图像舰船检测

得到显著图后, 就需要确定一个合理的阈值将舰船目标与背景区分开来. 显然, 对于不同的多光谱数据该阈值是变化的, 这就需要根据得到的显著图的灰度分布的统计特性, 计算一个自适应的阈值, 该阈值需要在满足可接受的虚警率下尽可能提高目标像素的检测精确度. 一个简单而有效的阈值计算公式为

$$T_D = \mu_{SM} + c \cdot \sigma_{SM} \quad (2)$$

其中 μ_{SM} 是显著图的灰度均值, 而 σ_{SM} 是显著图的灰度标准差, c 是从多组不同多光谱数据检测实验中获得的一个经验值. 通常, 对于从多光谱数据中得到的灰度值已经归一到 $[0, 1]$ 区间的显著图, 目标像素只占像素总数目较小一部分, 而绝大部分都是背景像素. 若其中存在显著目标, 则整幅显著图的背景区域较暗, 其灰度方差往往很小; 否则, 其方差则很大. 因此, 选择一个合适 c 就可使得在没有舰船时计算所得的阈值会变得较大, 从而避免了虚警. 本文中取 $c = 6$. 确定阈值后, 最终的舰船目标检测结果为

$$D(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{当 } SM(n, m) \geq T_D \text{ 时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

本文的基于视觉显著性的多光谱图像舰船检测的算法流程如下:

对于如下的双四元数形式的信号

$$f(t) = f_0(t) + f_1(t)i + f_2(t)j + f_3(t)k = [\Re(f_0(t)) + \Re(f_1(t))i + \Re(f_2(t))j + \Re(f_3(t))k] + I[\Im(f_0(t)) + \Im(f_1(t))i + \Im(f_2(t))j + \Im(f_3(t))k],$$

通过一个线性变换, 可将基 i, j, k 变换为复正交基 μ, ν, ξ , 其中 $\mu \perp \nu, \nu \perp \xi, \mu \perp \xi, \mu\nu = \xi, \mu\nu\xi = -1, \mu, \nu, \xi$ 都是纯双四元数.

在新的复正交基系统中, $f(t)$ 可描述为

$$f(t) = f_0(t) + f'_1(t)\mu + f'_2(t)\nu + f'_3(t)\xi = [f_0(t) + f'_1(t)\mu] + [f'_2(t) + f'_3(t)\mu]\nu.$$

当处理二维图像数据时, 则用 $f(n, m)$ 来表示 $f(t)$. 最终, 可得双四元数快速傅里叶变换的公式为

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left(e^{-2\pi i \mu \left(\frac{mv+nu}{M+N} \right)} [\Re(f_0(n, m)) + \Re(f'_1(n, m))\mu] + e^{-2\pi i \mu \left(\frac{mv+nu}{M+N} \right)} I[\Im(f_0(n, m)) + \Im(f'_1(n, m))\mu] + e^{-2\pi i \mu \left(\frac{mv+nu}{M+N} \right)} [\Re(f'_2(n, m)) + \Re(f'_3(n, m))\mu]\nu + e^{-2\pi i \mu \left(\frac{mv+nu}{M+N} \right)} I[\Im(f'_2(n, m)) + \Im(f'_3(n, m))\mu]\nu \right) \quad (1)$$

其中, (n, m) 和 (u, v) 分别为每个像素点在时域和频域的位置; 而 M 和 N 则是图像的长和宽. 之后还需要进行一个线性反变换, 将正交基 μ, ν, ξ 变换到原来的基 i, j, k .

用式(1)计算双四元数图像 $f(n, m)$ 的傅里叶变换并记为 $F[u, v]$, 其可写成极坐标形式为

$$F[u, v] = \|F[u, v]\| e^{i\Phi[u, v]};$$

其中, $\Phi[u, v]$ 是 $F[u, v]$ 的相位谱, 而 μ_i 是一个单

Step1. 将 Landsat 多光谱图像的 6 个常用波段(舍弃热红外波段和全色波段)构建成一幅纯双四元数图像 $f(m, n)$.

Step2. 利用式(1)计算 $f(m, n)$ 的双四元数傅里叶变换, 结果记为 $F[u, v]$, 将 $F[u, v]$ 的幅度谱白化得到 $F_{\text{phase}}[u, v]$.

Step3. 计算 $F_{\text{phase}}[u, v]$ 的双四元数傅里叶反变换, 得到时域的重构 $\hat{f}(n, m)$.

Step4. 计算 $\hat{f}(n, m)$ 的模得到初步显著图, 然后用二维高斯低通滤波器滤除高频噪点.

Step5. 采用式(2)得到划分阈值, 并通过式(3)将显著图转化为二值化的检测结果.

4 实验结果

本文对多组模拟数据和真实多光谱遥感数据进行

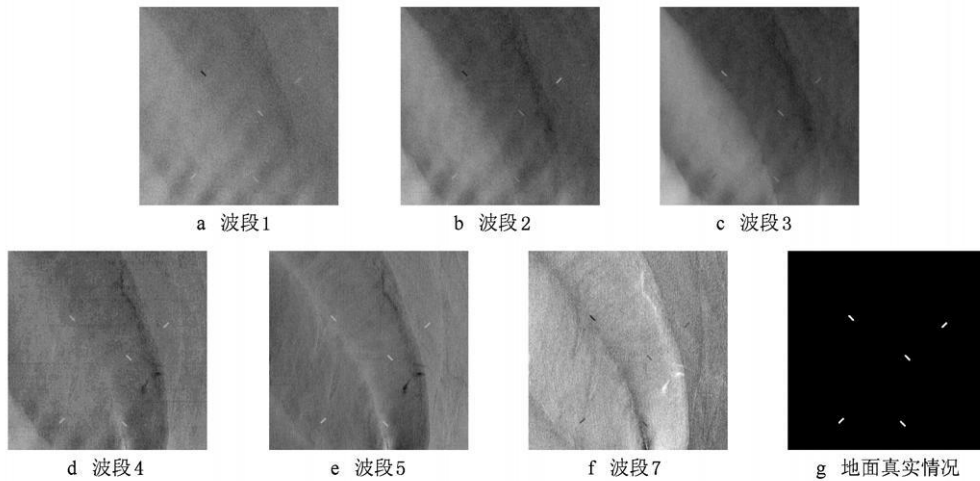


图 2 多光谱遥感图像模拟数据及地面真实情况

图 3a, 3b 分别给出了利用 PBFT 方法得到的显著图以及检测结果. 为便于对比, 图 3c 给出了多通道 CFAR 方法^[1]的检测结果. 在 CFAR 方法中使用的参数为 $J=6, N=64, P_{\text{FA}}=10^{-5}$ (使用 6 个波段, 每个波段被分割成 64 个子图, 预设虚警率为 10^{-5}), 这组参数是经过调试后检测效果最佳的一组参数. 本文实验中, PBFT 方法能在很低的虚警率下将舰船目标有效地检测出来, 而 CFAR 方法的检测结果则相对较差. 2 种方法检测效果对比的量化分析如表 1 所示, 其中虚警率表示背景中被误认为是

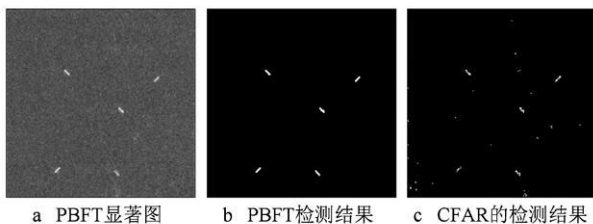


图 3 模拟数据检测结果

行了实验, 以验证所提出的 PBFT 方法的实际检测效果. 所有实验均在双核 AMD CPU 2.11 GHz CPU, 2.00 GB 内存的 Windows 平台下进行; 程序代码是在 Matlab 2009a 上编写运行的.

4.1 模拟多光谱遥感数据的实验结果

为更好地模拟真实情况, 本文中的模拟数据是从真实 Landsat7 遥感数据中截取海面部分作为背景, 依据不同波段的反射特性不同将不同颜色的舰船目标加入到每个波段中, 舰船目标的形状模型也是依照真实数据设计. 最终得到的 6 个波段的模拟数据如图 2 所示, 其中每个波段的灰度对比度都进行了调整以便于肉眼观察, 图像的大小为 256×256 , 实际地面分辨率为 30 m.

舰船目标的像素数目与所有背景像素数目的比值, 而检测精确度则表示被正确检测出来的舰船目标像素数目与所有舰船目标像素数目的比值.

表 1 基于模拟数据的 2 种方法的检测性能对比

方法	虚警率/%	检测精确度/%	运算时间/s
PBFT	0.006	98.95	0.44
CFAR	0.092	87.37	2.20

从表 1 可以看出, PBFT 方法的检测效果要好于 CFAR 方法; 此外运算速度也快了很多, 这是因为 PBFT 的主要运算时间都耗在了四元数的傅里叶正反快速变换上, 而该快速变换可分解为 4 个普通的复数二维快速傅里叶变换 (two-dimensional fast Fourier transform, 2-D FFT) 加上一个简单的线性的正反变换. 线性变换的时间非常小基本可以忽略, 而 2-D FFT 的计算复杂度又相对较低, 对于大小为 $M \times N$ 的图像, 其计算复杂度为 $O(MN \log(MN))$.

因此, 四元数的傅里叶快速变换其实耗时很小. 相比而言, CFAR 方法的整体计算复杂度则为 $O((MN)^2)$, 显然高于本文方法.

PBFT 方法对白噪声具有较强的抵制能力, 为验证该性能, 本文在模拟数据的每个波段中人为地加入不同强度的高斯白噪声, 并分析其对检测性能的影响, 具体的检测精确度的变化曲线如图 4 所示.

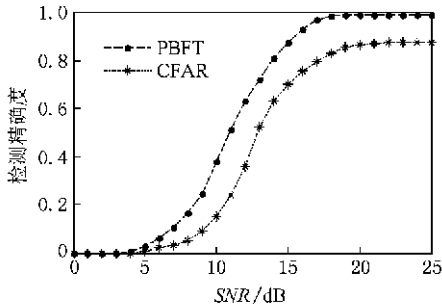
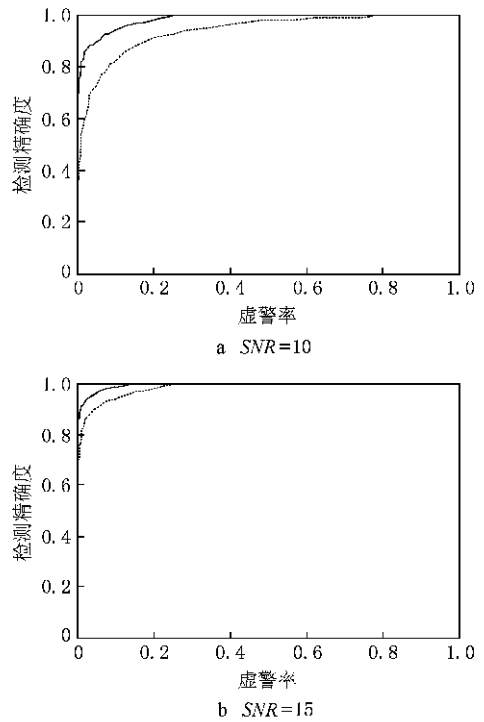


图 4 检测精确度随信噪比的变化曲线

近年来, 接受者操作特性 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线被广泛用于评价显著图对人眼注视区域所在的预测能力^[19-20]. 本文同样利用 ROC 曲线来对 PBFT 方法获得显著图进行一定的性能评估. 通常人们采用自然图像的数据库来获得测试人的注视轨迹数据, 本文实验由于针对的是多光谱数据的显著性检测, 因此并未采用自然图像的数据库来获得人眼注视点数据, 而是直接采用多光谱遥感模拟数据中的地面真实情况作为替代. 给定某一阈值 T , 视觉显著图可划分为目标区域和背景区域. 根据人眼注视点数据, 每幅图像划分为注视点和非注视点, 落在目标区域的注视点称为正确的点, 落在目标区域的非注视点称为虚警的点. 所有注视点中正确的点所占比率称为正确率 (true positive rate, TPR), 在所有非注视点中虚警的点所占比率称为虚警率 (false positive rate, FPR). 实际上, FPR 和 TPR 就是表 1 中所描述的虚警率和检测精确度. 通过连续改变阈值 T , 在二维坐标系上可得到不同的坐标点 (TPR, FPR), 将所有坐标点连接起来所得的曲线就称为 ROC 曲线. 若以横轴 FPR 为自变量, 对 ROC 曲线进行积分, 则可得到 ROC 曲线下的面积. 该面积越大, 则表示显著图对人眼注视点的预测能力越强. 本文在模拟数据中加入了强度不同的高斯白噪声, 以检验 PBFT 方法在不同信噪比下的 ROC 曲线性能变化. 为了对比, 文中同样给出了 CFAR 方法的 ROC 曲线特性, 如图 5 所示. 显然, PBFT 方法的 ROC 曲线特性要优于 CFAR 方法.



注: ——表示 PBFT 方法, - - - -表示 CFAR 方法

图 5 不同噪声强度下的 ROC 曲线对比

4.2 真实多光谱遥感数据的实验结果

图 6 所示为一组 2008 年 4 月拍摄的中国东海部分区域的 Landsat7 多光谱数据, 这里截取了 256×256 大小的 6 个波段的数据, 其地面分辨率为 30m. 本文分别用 PBFT 方法和 CFAR 方法进行舰船目标检测, 结果如图 6 所示. 在 CFAR 方法中使用的参数为 $J=6, N=64, P_{FA}=10^{-5}$.

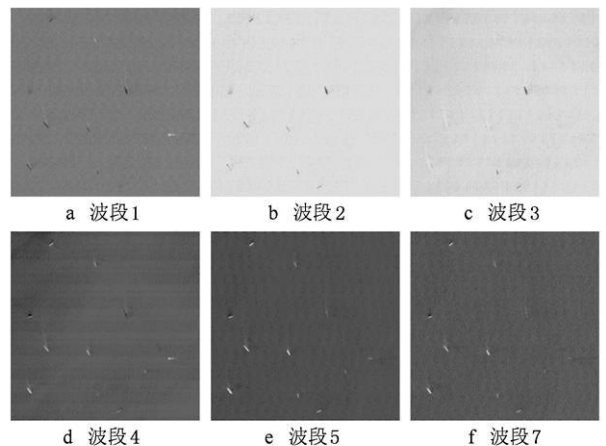


图 6 2008 年 4 月拍摄的中国东海部分区域的真实 Landsat7 遥感数据

图 6 中, 由于反射特性的不同, 同一波段中的不同船只的灰度值变化非常大, 有些船只比其周围背景亮, 而有些比它的背景暗; 此外, 由于光照条件拍摄

入射角等的不同,造成了同一船只的不同位置的像素的灰度值也不同.这些都给检测带来了很大困难,对于单一阈值的 CFAR 方法的影响尤为明显.如图 7c 所示,CFAR 方法检测结果中丢失了一个非常明显的船只(图中已用箭头指出),而且还有部分船只的大部分像素已经丢失,基本只剩下一些孤立的像素点;而 PBFT 方法却能在很小的虚警率下,将各个目标有效地检测出来.这是因为该方法并不在乎这些舰船目标是比其附近的背景亮还是暗,只要它们与其背景的亮度反差足够大、能形成足够的视觉显著性,就能在结果中很好地凸显出来.

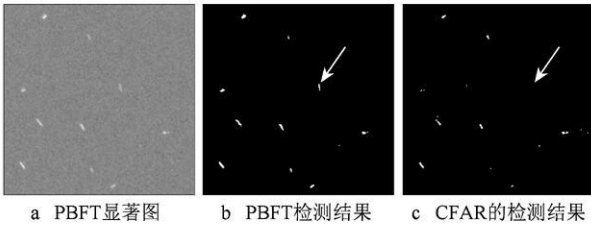


图 7 真实数据检测结果

本文还考察了 PBFT 方法对于较复杂海面背景下的舰船目标的检测效果.图 8 所示为一组 2000 年 6 月拍摄的中国东海区域的 Landsat7 多光谱数据,这里截取了 256×256 大小的 6 个波段的数据,其地面分辨率为 30m.对其分别应用 PBFT 方法和 CFAR 方法进行舰船目标检测,结果如图 9 所示.在 CFAR 方法中使用的参数同图 6.

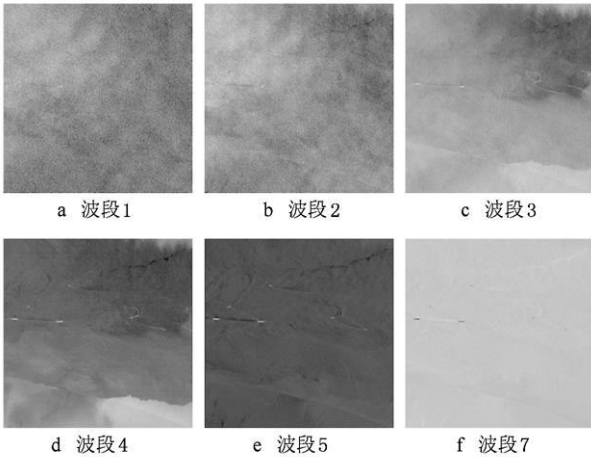


图 8 2000 年 6 月拍摄的中国东海部分区域的真实 Landsat7 遥感数据

从图 8 中可以看出,海面背景比较复杂,非常不均匀,明显的海浪、洋流和舰船尾迹等使得人们很难对海杂波的统计分布特性进行较精确的建模,使得 CFAR 方法的检测效果比较差;而 PBFT 方法是基

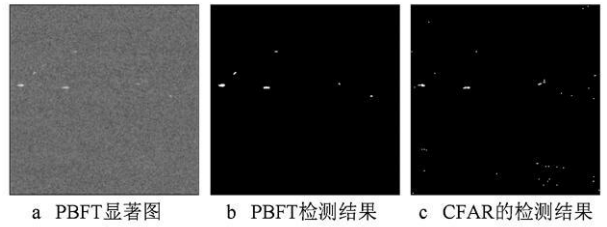


图 9 对图 8 真实数据检测结果

于视觉显著性机制的,不需要对海杂波等进行建模,也不需要各种理想化的假设为前提,对于复杂背景有良好的自适应能力,其结果如图 9 所示.

除了检测精度高、计算复杂度低之外,本文方法对参数设置的依赖也较小.文中主要涉及 2 个参数:高斯低通滤波器中的值 σ 和式(9)中的参数 c .对于 σ 值,根据文献[10-13],本文选取 $\sigma = 2$.实际上, σ 的取值范围相对是比较宽的,具体是取 2 或取 3 等对最终得到的显著图的影响是相对较小的;对于参数 c ,下面的实验可证明本文选取 $c = 6$ 对不同的 Landsat7 多光谱图像都是适用的.

本文中分别选取了 2000 年和 2008 年拍摄的中国东海部分海域的真实 Landsat7 多光谱数据各 10 组(每组数据包含 6 个波段,图像大小为 256×256);控制参数以 0.5 为步长从 0 递增至 20,观察虚警率和检测精确度的变化规律,并将 20 组数据的结果以平均曲线的形式给出,如图 10 所示.可以看出, c 的取值范围在 4~8 之间,都可以得到较好的结果.

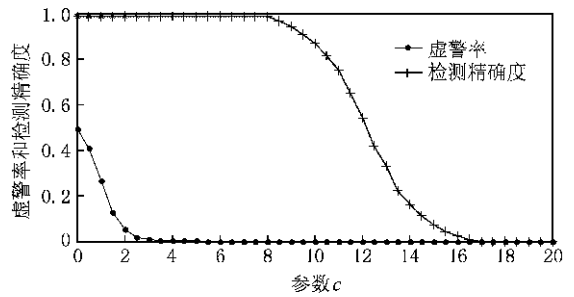


图 10 虚警率和检测精确度与参数 c 的关系

5 总 结

本文将选择性视觉注意机制引入到多光谱图像的目标检测问题中,并通过双四元数形式将现有的频域视觉计算模型进行了拓展,使其能用于多光谱数据的显著图计算.根据双四元数的一些几何特性,若将多维数据以双四元数的形式进行整体处理,可

以将光谱维的一些隐藏信息有效地提取出来;而如果只是将其简单地单独投影到某个通道,那么有些特征是不会凸显出来的。同时,本文利用双四元数傅里叶变换的相位谱来重构图像,可以有效地将空间维度的信息特征提取出来。在不同条件下的多组实验表明,本文方法具有良好的检测性能,其检测精度高、运算速度快,且对复杂背景有着良好的自适应能力。此外,本文方法具有一定的通用性,可尝试将其应用于其他显著性目标检测任务,如沙漠中的军事目标的检测等。但是,当图像中存在某些与所检测目标形状相似的显著物体时,本文方法的检测虚警就会上升,这时就需要人们利用一定的先验知识加以识别区分,即需要将自底向上和自顶向下2种形式的视觉注意形式结合起来,这也是我们今后研究的一个内容。

参考文献(References):

- [1] Reed I S, Yu X L. Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1990, 38(10): 1760-1770
- [2] Yu X L, Reed I S, Stocker A D. Comparative performance analysis of adaptive multispectral detectors [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(8): 2639-2656
- [3] Yu X L, Hoff L E, Reed I S, *et al.* Automatic target detection and recognition in multiband imagery: a unified ML detection and estimation approach [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(1): 143-156
- [4] Itti L, Koch C, 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
- [5] Treisman A M, Gelade G. A feature-integration theory of attention [J]. *Cognitive Psychology*, 1980, 12(1): 97-136
- [6] Niebur E, Koch C. *The attentive brain* [M]. Cambridge: The MIT Press, 1998: 163-186
- [7] Wolfe J M, Butcher S J, Lee C, *et al.* Changing your mind: on the contributions of top-down and bottom-up guidance in visual search for feature singletons [J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2003, 29(2): 483-502
- [8] Walther D, Koch C. Modeling attention to salient proto-objects [J]. *Neural Networks*, 2006, 19(9): 1395-1407
- [9] Hou X D, Zhang L Q. Saliency detection: a spectral residual approach [C] // *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 1-8
- [10] Guo C L, Ma Q, Zhang L M. Spatiotemporal saliency detection using phase spectrum of quaternion Fourier transform [C] // *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 1-8
- [11] Ma Qi, Zhang Liming. A fast computation of attention selection map and its application in image quality Assessment [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2009, 21(7): 973-983 (in Chinese)
(马奇,张立明.快速注意力选择计算及其在图像质量评价中的应用[J].*计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, 21(7): 973-983)
- [12] Yu Y, Wang B, Zhang L M. Pulse discrete cosine transform for saliency-based visual attention [C] // *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Development and Learning*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 1-6
- [13] Guo C L, Zhang L M. A novel multiresolution spatiotemporal saliency detection model and its applications in image and video compression [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(1): 185-198
- [14] Said S, Le Bihan N, Sangwine S J. Fast complexified quaternion Fourier transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(4): 1522-1531
- [15] Hamilton W D R. On the geometrical interpretation of some results obtained by calculation with biquaternions [C] // *Proceedings of the Royal Irish Academy*. 1853, (5): 388-390
- [16] Castleman K R. *Digital image processing* [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall Press, 1996
- [17] Bian P, Zhang L M. Visual saliency: a biologically plausible contourlet-like frequency domain approach [J]. *Cognitive Neurodynamics*, 2010, 4(3): 189-191
- [18] Ell T A, Sangwine S J. Hypercomplex Fourier transforms of color images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 22-35
- [19] Bruce N D B, Tsotsos J K. Saliency, attention, and visual search: an information theoretic approach [J]. *Journal of Vision*, 2009, 9(3): Article No. 5
- [20] Gao D, Mahadevan V, Vasconcelos N. On the plausibility of the discriminant center-surround hypothesis for visual saliency [J]. *Journal of Vision*, 2008, 8(7): Article No. 13