

基于图连通密度的海面漂浮小目标检测

时艳玲* 姚婷婷 郭亚星

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要: 海面漂浮小目标由于其能量弱, 一直是海面目标检测的重难点。传统基于统计模型的漂浮小目标检测算法借助回波能量进行检测, 没有利用数据频域幅度间的关联性, 导致检测性能受损。该文借助图的处理方式, 首先利用回波数据脉冲间频域幅度的关联性计算连通密度, 生成邻接矩阵, 接着将邻接矩阵转换为拉普拉斯矩阵, 提取拉普拉斯矩阵的最大特征值作为检测特征, 提出了一种基于图的连通密度的海面漂浮小目标检测算法。通过对实测的全相参的X波段 (IPIX) 雷达数据进行连通密度的分析, 发现海杂波构成的图比较稠密, 而海面漂浮小目标构成的图比较稀疏, 故通过连通密度构成的图可以有效地检测海杂波中的漂浮小目标。进一步地, 通过与对比算法实验分析发现, 该文所提基于图的连通密度的检测算法检测性能明显优越。

关键词: 目标检测; 全相参的X波段雷达; 海杂波; 图; 连通密度

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)11-3185-08

DOI: 10.11999/JEIT201028

Floating Small Target Detection Based on Graph Connected Density in Sea Surface

SHI Yanling YAO Tingting GUO Yaxing

(School of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Due to the weak energy of the floating small targets, it is hard to be detected in sea surface. Relying on the energy, the traditional detectors based on statistical model inevitable loss the detection performance, regardless of the correlation between the frequency domain amplitudes. Therefore, in the paper, the correlation between the frequency domain amplitudes is considered by using the graph. Firstly, the connected density is calculated by the correlation between the frequency domain amplitudes of the echo pulses. Secondly, an adjacency matrix is generated based on the correlation. Thirdly, the adjacency matrix is converted to a Laplacian matrix. Lastly, the maximum eigenvalue of the Laplacian matrix is extracted as the detection feature. Thus, the detector based on the connected density of the graph is proposed for the floating small targets in sea surface. The analysis of the connected density of the measured Ice multiParameter Imaging X-band(IPIX) radar data shows that the graph composed by the sea clutter is relatively dense, whereas the graph composed by the floating small targets is relatively sparse. Thus, the connected density can effectively distinguish the floating small targets between the sea clutter. Furthermore, the experimental results show that, compared with other algorithms, the detection performance of the proposed connected density of the graph algorithm is obviously superior.

Key words: Target detection; Ice multiParameter Imaging X-band (IPIX) radar; Sea clutter; Graph; Connected density

1 引言

雷达在检测海面目标时, 不可避免地会受到海杂波的影响。海面漂浮小目标^[1]如小船、浮冰和飞机残骸等, 由于雷达截面积(Radar Cross Section,

RCS)较小, 回波能量弱, 一直是海面目标检测的重难点。传统的相干或者非相干的恒虚警率检测算法^[2-5], 利用回波能量进行检测, 只适用于RCS较大的大型舰船目标。为了避开能量检测, 于是部分学者从特征域考虑, 借助杂波与目标回波之间的差异性提取特征, 包括分形理论的赫斯特(Hurst)指数^[6]、分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier

收稿日期: 2020-12-07; 改回日期: 2021-03-21; 网络出版: 2021-04-09

*通信作者: 时艳玲 ylishi@njupt.edu.cn

Transform, FRFT)的分形维数和分形维方差^[7]、利用时频分析工具的微多普勒特征^[8]、散斑一致性因子^[9,10]、极化特征^[11-13]等,这些特征在一定程度上获得了较好的检测性能。但是上述算法具有较大的计算复杂度和对脉冲长度的要求也较大,只能适用于驻留模式的雷达系统中。

上述提到的恒虚警率检测算法和基于特征的计算算法都没有考虑数据幅度间的关联性。图作为一种描述数据间关联性的有效手段,广泛应用在离散信号处理^[14]、网络分析、计算机生物学、互联网行业等领域^[15]。图是将存在内部联系的事物表示为离散的顶点以及各顶点之间关系的数据结构,对事物做抽象的刻画。Yan等人^[16]提出一种基于图的带宽受限信号探测方法,将功率谱转换成图的2维拉普拉斯矩阵,并且在低信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)下其检测性能较好。紧接着, Yan等人^[16]对回波幅度序列进行图建模,在图中分析回波幅度序列的变化趋势,实现了海杂波背景下的目标检测。本文在文献^[17]的基础上,进一步对变化趋势的密度进行统计分析,获得每条边的连通次数,生成邻接矩阵,提出了一种基于图的连通密度的海面漂浮小目标检测算法。相较于文献^[17]只考虑到边的连通性,没有考虑边的连通密度,我们从幅度的频域出发,不仅考虑了边的连通性,也考虑了边的连通密度,即每条边上的连通次数,所以本文优化了邻接矩阵的构成,从而更为清晰地呈现出各顶点之间的关系。

本文的创新如下:本文避开海面漂浮小目标能量弱这一缺陷,借助图的处理方式,不仅考虑边的连通性,也考虑边的连通密度,生成邻接矩阵,接着将邻接矩阵转换为拉普拉斯矩阵,提取拉普拉斯矩阵的最大特征值作为检测特征,并且本文所提的

特征计算复杂度与运行时间和其他算法相比都有所提升。

本文的章节安排如下:在第2节介绍雷达回波信号模型;在第3节对雷达回波信号的幅度序列进行频域预处理后对图建模,对图的连通密度做特征提取,并利用所提的特征构建基于连通密度的检测器;在第4节介绍实测数据,对所提特征给出实验结果与性能分析,并与其他算法对比;第5节对文章内容进行总结。

2 信号检测模型

在海杂波背景下,对天线阵元的情况考虑,在相干处理时间间隔内发射脉冲,接收端对雷达回波信号解调、匹配滤波、采样等处理。可以将雷达接收到的回波判断是否包含目标的检测问题描述为2元假设检验,即在假设 H_0 和假设 H_1 的情况下,判断不同观测值在一定变换后的检测统计量是否超过门限。雷达接收到的回波为

$$\left. \begin{aligned} H_0 : x(n) &= c(n), n = 1, 2, \dots, N \\ H_1 : x(n) &\neq c(n), n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, $x(n)$ 表示雷达接收的脉冲回波数据的幅度, $c(n)$ 表示没有任何目标的情况下的纯海杂波序列幅度, n 表示离散时间的观测样本数。 H_0 表示目标不存在, H_1 表示目标存在。

3 图的构建和基于连通密度的检测器

本文将图的算法应用于特征提取与目标检测,将雷达接收到的回波不同频点的频谱幅度之间关联性转换成图,下面将详细介绍图的构建及提取特征的步骤,具体流程图如图1所示。

3.1 图的构建

步骤1 预处理。为了更好地探索雷达接收的回波不同频点的频谱幅度之间关联性,本文先对回

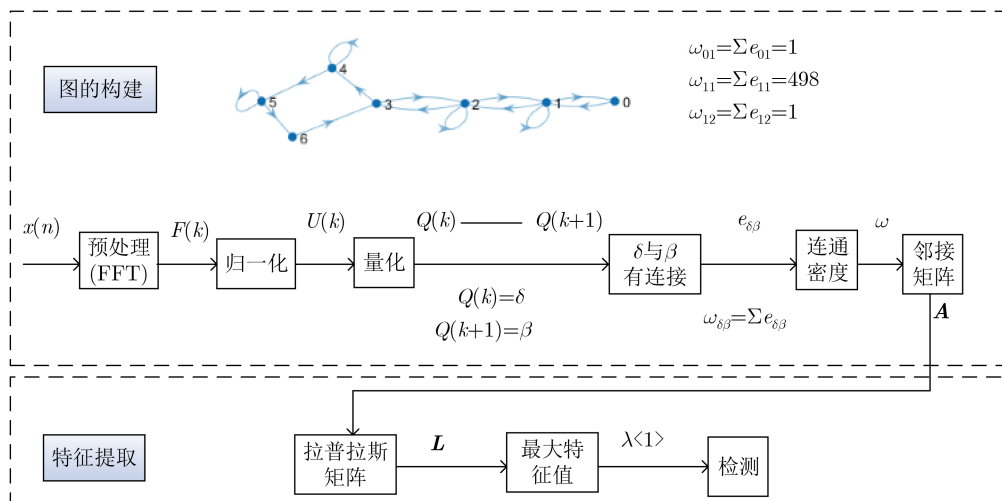


图1 图的构建及特征提取流程图

波数据做预处理，进行频域变换，即快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)

$$F(k) = \sum_{n=1}^{n=N} x(n)e^{-j(2\pi/N)nk}, k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

步骤2 归一化。为了简化计算方式，减小数据之间的差异性，对预处理后的数据做最大最小标准的归一化处理，将数据映射在[0, 1]之间，即为

$$U(k) = \frac{F(k) - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \quad (3)$$

其中

$$\theta_{\max} = \max_{1 \leq k \leq N} F(k) \quad (4)$$

$$\theta_{\min} = \min_{1 \leq k \leq N} F(k) \quad (5)$$

即 θ_{\max} 表示 $F(k), k = 1, 2, \dots, N$ 中最大值， θ_{\min} 表示 $F(k), k = 1, 2, \dots, N$ 中的最小值。

步骤3 量化。量化使噪声降低，可提高信噪比(SNR)，于是对归一化数据进行均匀量化，量化间隔为 $1/\gamma$ ，量化过程为

$$Q(k) = \begin{cases} i, & \frac{i-1}{\gamma} < U(k) < \frac{i}{\gamma}, \quad i = 1, 2, \dots, \gamma \\ 0, & U(k) = 0, \quad i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中，当 $F(k)$ 与 θ_{\min} 相等时， $U(k)$ 恰好为0，这种情况下定义 $i = 0$ 时， $Q(k) = 0$ 。

步骤4 图的构建。把量化后的每段序列转换成对应的图，图由顶点集 V 和边集 E 构成，即

$$G = (V, E) \quad (7)$$

其中，量化等级为 $N_\gamma = \{1, 2, \dots, i, \dots, \gamma\}$ 。当 $i = 0$ 时， $Q(k) = 0$ 这一特殊情况，重新定义量化等级为 $N_{\gamma+1} = \{0, N_\gamma\}$ ，把量化级 $N_{\gamma+1}$ 中的元素 i 映射到顶点集 V 的元素 v 上，使得

$$i \rightarrow v \quad (8)$$

于是得到图 G 的顶点集 V 为

$$V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_\gamma\} \quad (9)$$

根据顶点之间的关系建立边集 E 若顶点 v_δ 相对应的量化值是 $Q(k)$ ，其下一个量化数据为 $Q(k+1)$ ，对应的顶点为 v_β ，则表示顶点 v_δ 与 v_β 之间是连接的，记为边 $e_{\delta\beta}, e_{\delta\beta}$ 为 v_δ 到 v_β 的边，是有向边，否则认为这两个顶点之间没有连接，即图的边集 E 为

$$E = \{e_{\delta\beta} | (\delta, \beta) \in N_{\gamma+1} \times N_{\gamma+1}\} \quad (10)$$

其中

$$e_{\delta\beta} = \begin{cases} 1, & v_\delta \text{与} v_\beta \text{之间是连接的} \\ 0, & v_\delta \text{与} v_\beta \text{之间不是连接的} \end{cases} \quad (11)$$

将 $e_{\delta\beta}$ 出现的次数累加，次数累加值称为顶点 v_δ 与 v_β 之间的连通密度 $\omega_{\delta\beta}$

$$\omega_{\delta\beta} = \sum e_{\delta\beta} \quad (12)$$

若顶点 v_δ 与 v_β 不连通，则 $\omega_{\delta\beta} = 0$ ，并将 $\omega_{\delta\beta}$ 作为图 G 的邻接矩阵 A 的元素

$$A = \begin{bmatrix} \omega_{00} & \omega_{01} & \cdots & \omega_{0\gamma} \\ \omega_{10} & \omega_{11} & \cdots & \omega_{1\gamma} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{\gamma 0} & \omega_{\gamma 1} & \cdots & \omega_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 基于连通密度的检测器

对邻接矩阵 A 的每行求和为

$$d_\delta = \sum_{\beta=0}^{\gamma} \omega_{\delta\beta} \quad (14)$$

将 d_δ 组成对角矩阵，构建图 G 的度矩阵为

$$D = \text{diag}(d_0, d_1, \dots, d_\delta, \dots, d_\gamma) \quad (15)$$

$\text{diag}()$ 是一个由 d_δ 向量构成的对角线矩阵。则图对应的拉普拉斯矩阵 L 为

$$L = D - A \quad (16)$$

在图的算法中，用图的顶点和边表示事物之间的关联，其中拉普拉斯矩阵的特征值被广泛分析，如连通度、直径、带宽、二部宽、最大割等等，有关研究称次小拉普拉斯特征值或最大拉普拉斯特征值为图的代数连通度^[18]，并且图的代数连通度可以等价于图顶点间的连通性^[19]。本文对幅度序列所构成的拉普拉斯矩阵特征值的分布特性以及图连通密度的对应关系的分析，提取图连通密度的拉普拉斯矩阵的最大特征值作为目标检测的特征，展现杂波与目标之间的差异性。拉普拉斯矩阵的所有特征值为

$$\lambda \langle 1 \rangle \geq \lambda \langle 2 \rangle \geq \dots \geq \lambda \langle \gamma + 1 \rangle \quad (17)$$

其中， $\lambda \langle 1 \rangle$ 为拉普拉斯矩阵的最大特征值。根据蒙特卡罗模拟实验得到阈值 ζ ，将 $\lambda \langle 1 \rangle$ 作为检测统计量与阈值 ζ 进行比较

$$\lambda \langle 1 \rangle \underset{H_1}{\overset{H_0}{\geq}} \zeta \quad (18)$$

若 $\lambda \langle 1 \rangle$ 小于 ζ ，则判为 H_1 ，表示目标存在；否则判为 H_0 表示目标不存在，为纯杂波。

接下来对本文所提的图的连通密度进行计算复杂度分析，该算法的计算复杂度主要体现在预处理的快速傅里叶变换、量化部分和拉普拉斯矩阵的特征值分解部分，FFT的计算复杂度为 $O(N \lg N)$ ；量化部分的计算复杂度为 $O(N)$ ，拉普拉斯矩阵的维数为 $(\gamma + 1) \times (\gamma + 1)$ ， γ 为量化等级，而特征值

分解的计算复杂度为 $O((\gamma + 1)^3)$ ，通过后面的实验我们发现量化等级的取值一般为 $\gamma = 6$ ，故本文所提的图的连通密度算法的计算复杂度非常低。而基于分形理论的Hurst指数^[6]特征的计算复杂度为 $O(N^3)$ ，主要体现在利用最小二乘法拟合部分，因此，相比较而言，图连通密度的计算复杂度要小的多。

4 实验结果与性能分析

本节首先对实验中所用到的实测数据做相关介绍；然后对回波序列经预处理后所构成的图给出合理性分析，并进一步验证图的连通密度性能；最后将本文所提特征的性能与FFT、Hurst指数^[20]以及平均恒虚警率检测器^[5]进行对比实验。

本文中使用的数据是来自加拿大McMaster大学的Haykin教授^[21]利用IPIX雷达在真实的海洋环境中测得，测试目标是用金属丝网包裹直径约为1 m的聚苯乙烯泡沫塑料球形块，漂浮在海面上，随海浪上升、下降，包括了各种活动情况下的海杂波数据，被雷达监测等领域的研究人员广泛应用。实验中采用的是1993年测得的10组数据，为了方便使用，对10组数据集进行编号，在表1中依次列出它们数据名称、风速、浪高、角度、目标单元以及受目标单元相邻的受影响单元。每组数据集由根据发射和接收信号方式不同得到4种极化，即HH, VV, HV, VH，每种极化包含14个距离单元，一个距离单元的采样数据为131072(即131.072 s)。

4.1 连通性分析

实验对所提特征进行合理性分析，图2(a)—图2(c)为数据#54在HH极化下的杂波(第1单元)和目标(第8单元)时域幅度分布图、512点的频谱幅度分布图和纹理分布图，从图2(a)观察雷达回波幅度的起伏特性可以看出杂波的幅度较集中，而目标幅度起伏差异大；于是将幅度通过FFT预处理后构建

成图，由于数据很长，实验中将其观测样本分段为 $M = 10000$ 段，每段数据观测长度为 $N = 512$ ，为了保证有足够多的数据，我们将两段数据进行部分重叠处理，重叠度为 $P = 502$ ，即每次滑动10个点，其中 $\gamma = 6$ ，图2(b)展现了通过FFT变换后的512点频谱幅度分布图，可以看出目标与杂波频域幅度要比时域幅度具有更大的差异性。图3(a)和图3(b)对数据#54HH极化下杂波单元数据(第1单元)和目标单元数据(第8单元)中邻接矩阵构成的图，其中的0, 1, 2, 3, 4, 5, 6为量化的7个顶点，带箭头的线段表示生成的边。从图3可以看出纯杂波幅度构成的图比较稠密，而目标幅度构成的图比较稀疏。正是由于目标和杂波的幅度起伏不同，从而造成图的连通差异性很大，并且从图2(c)的纹理分布可以看出目标比杂波的拖尾要长，杂波相较于目标的数据更为集中，这也会造成图3中杂波生成的图比目标生成的图更为稠密。图4为数据#54在HV极化和VH极化下拉普拉斯矩阵最大特征值的平均值，从图4可

表1 IPIX雷达数据说明

数据编号	数据名称	风速 (km/h)	浪高 (m)	角度 (°)	目标单元	受影响单元
1	#17	9	2.2	9	9	8, 10, 11
2	#26	9	1.1	97	7	6, 8
3	#30	19	0.9	98	7	6, 8
4	#31	19	0.9	98	7	6, 8, 9
5	#40	9	1.0	88	7	5, 6, 8
6	#54	20	0.7	8	8	7, 9, 10
7	#280	10	1.6	130	8	7, 9, 10
8	#310	33	0.9	30	7	6, 8, 9
9	#311	33	0.9	40	7	6, 8, 9
10	#320	28	0.9	30	7	6, 8, 9

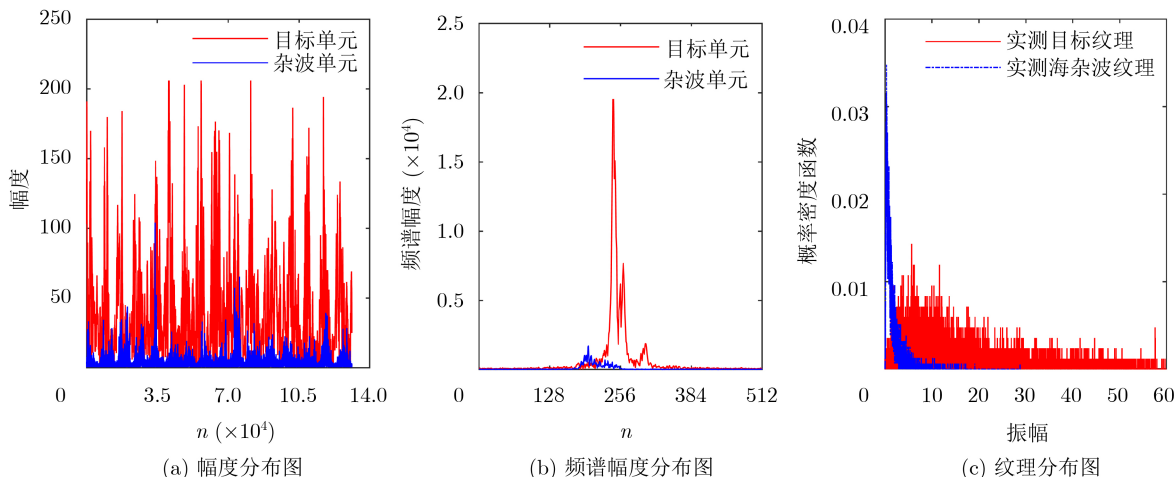
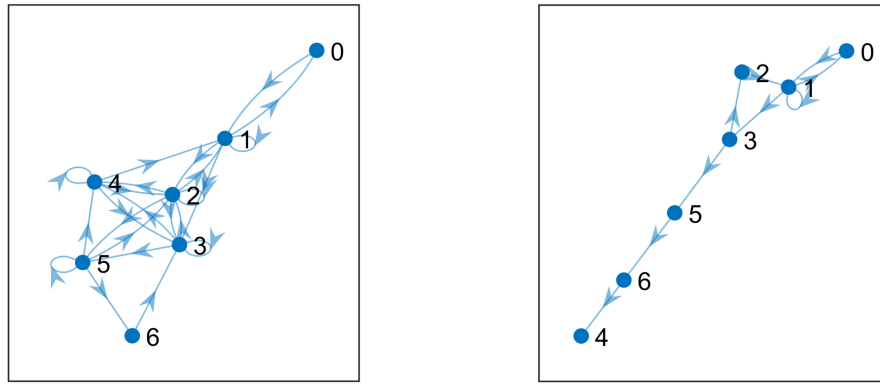
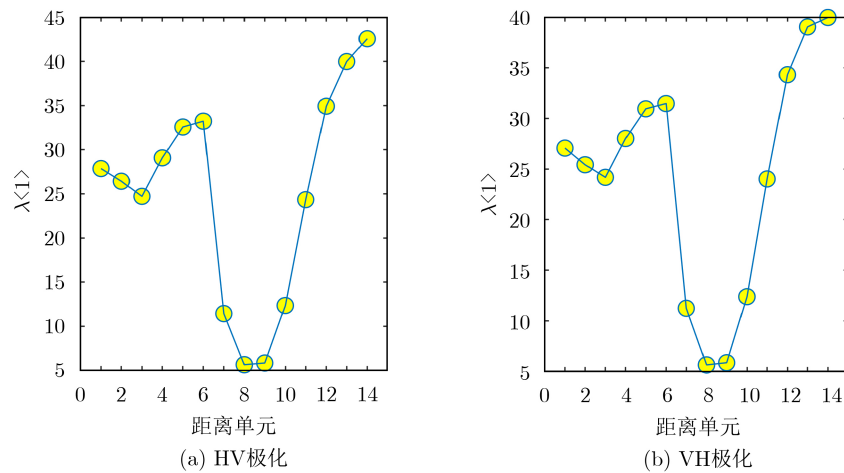


图2 #54 HH极化目标与杂波的幅度分布图、 $n = 512$ 的频谱幅度分布图与纹理分布图



(a) #54HH极化下杂波单元邻接矩阵构成的图 (b) #54HH极化下目标单元邻接矩阵构成的图
图 3 #54 HH极化杂波单元与目标单元邻接矩阵构成的图(系数设置: $M = 10000, N = 512, P = 502, \gamma = 6$)

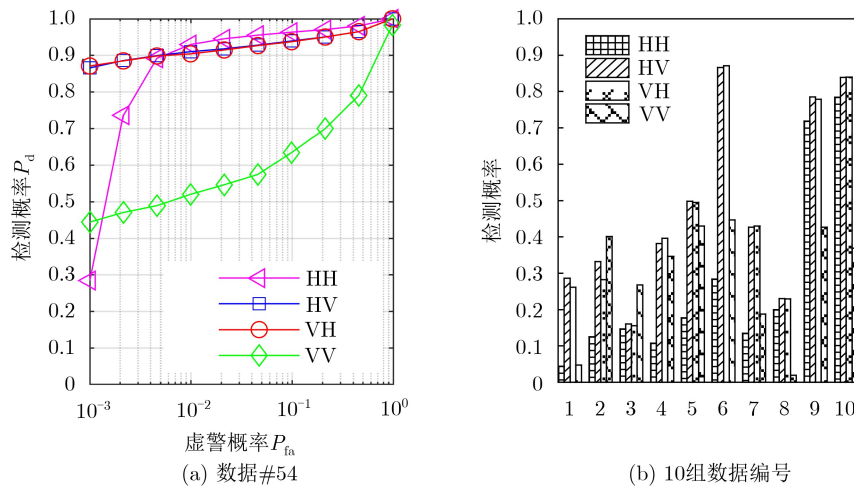


(a) HV极化 (b) VH极化
图 4 数据#54在HV极化和VH极化下拉普拉斯矩阵最大特征值的平均值
(构成邻接矩阵图的参数设置: $M = 10000, N = 512, P = 502, \gamma = 6$)

以观察出拉普拉斯矩阵最大特征值的差异性，目标的拉普拉斯矩阵最大特征值要明显小于杂波单元拉普拉斯矩阵的最大特征值，并且拉普拉斯矩阵的最大特征值可以表示图的代数连通度，更能体现出目标与杂波图的连通密度的不同。

4.2 检测性能分析

接下来利用表1实测的10组数据的4种极化方式进行蒙特卡罗模拟实验，图5实验的参数为： $M = 10000, N = 512, P = 502, \gamma = 6$ ，其中图5(a)是数据#54在4种极化方式下的检测性能细节图，



(a) 数据#54 (b) 10组数据编号
图 5 数据#54和10组4种极化方式下的图特征检测器的检测性能图(参数设置: $M = 10000, N = 512, P = 502, \gamma = 6$)

图5(b)为10组数据不同极化方式下的检测性能图,虚警概率 $P_f = 0.001$ 。从实验结果可以看出本文算法在不同极化方式下的检测概率不同,HH和VH这两种极化方式检测结果比HH极化和VV极化要好。造成这种现象的原因是平均信杂比不同,根据文献[22]对海杂波数据平均信杂比的分析,平均信杂比越高,特征得到的检测概率越高。如图6所示为10组数据在4种不同极化方式下的平均信杂比,平均信杂比的计算公式为

$$ASCR = 10 \lg \left(\frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |h(t)|^2 - \overline{P_c}}{\overline{P_c}} \right) \quad (19)$$

其中, $h(t)$ 为目标单元所在的回波序列, T 为序列长度, $\overline{P_c}$ 为纯海杂波序列估计平均功率。从图6可以看出数据#54、数据#311和数据#320这3组数据的平均信杂比从整体上都比其他数据要高,并且HV极化和VH极化的平均信杂比大都比HH极化和VV极化的平均信杂比要高。

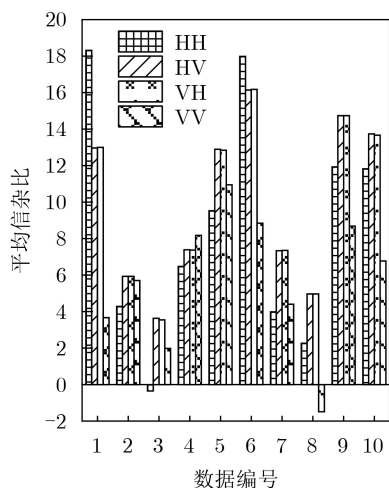
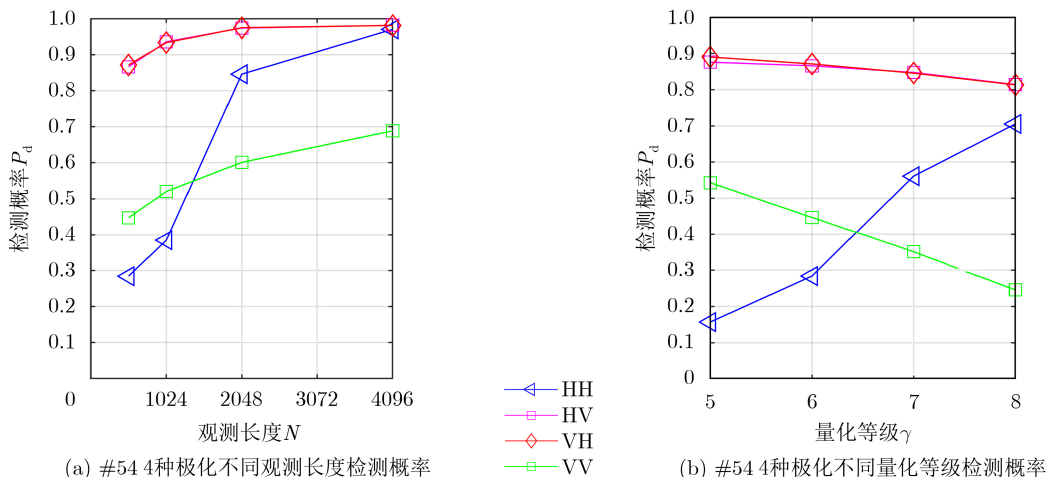


图6 16组数据在4种不同极化方式下的平均信杂比



(a) #54 4种极化不同观测长度检测概率

(b) #54 4种极化不同量化等级检测概率

图7 数据#54在4种极化方式下不同观测长度和不同量化等级的检测概率($p_f=0.001$)

从整体数据观看,平均信杂比越高,检测概率越高,虽然有少数数据结果会略有偏差,这是由于数据受到风速、浪高、雷达方向角度等多种不确定因素的影响。除了数据#17和数据#280是在高海况下采集的,其他8组数据都是在低海况下采集的,数据#17中的HH极化的平均信杂比最高,其检测概率却没有非常高,这是在高海况下掠射角度以及浪高的影响,目标被掩盖而导致的。

为了探索该特征在不同参数下的最佳检测性能,图7比较了数据#54中4种不同极化方式情况下,观测长度和量化等级不同时的检测性能,图7(a)中分段参数分别为 $N = 512$, $N = 1024$, $N = 2048$ 和 $N = 4096$,从图7可以看出,分段参数越大该特征的检测性能越好,但观测长度过大时,性能提升不是特别明显,因此综合考虑检测性能和计算复杂度,观测长度最大取到 $N = 2048$ 即可。图7(b)量化等级分别为 $\gamma = 5$, $\gamma = 6$, $\gamma = 7$ 和 $\gamma = 8$,其他参数为 $M = 10000$, $N = 512$, $P = 502$,量化等级不同时,在HV极化和VH极化下检测性能变化较小,而HH极化与VV极化检测性能呈相反的变化,因此综合4种极化方式在量化等级不同时的检测性能,选择量化等级 $\gamma = 6$ 为实验的参数。

另外,进一步验证本文所提特征检测器的性能,图8在VH极化下将基于图连通密度特性检测器与FFT, Hurst指数[20]以及平均恒虚警率检测器[5]进行对比实验,其中参数均为 $M = 10000$, $N = 512$, $P = 502$, $\gamma = 6$,但由于Hurst指数在较大的观测长度下才能具有检测效果,故取Hurst指数的观测长度为 $N = 1025$ 。图8(a)为数据#54在VH极化下4种算法的对比图,图8(b)是虚警概率为 $P_f = 0.001$ 时10组数据在VH极化下4种算法的性能对比图。从图8(a)可以看出,在虚警概率为 10^{-4} 时,本文所提取得特征检测器的检测概率可以达到

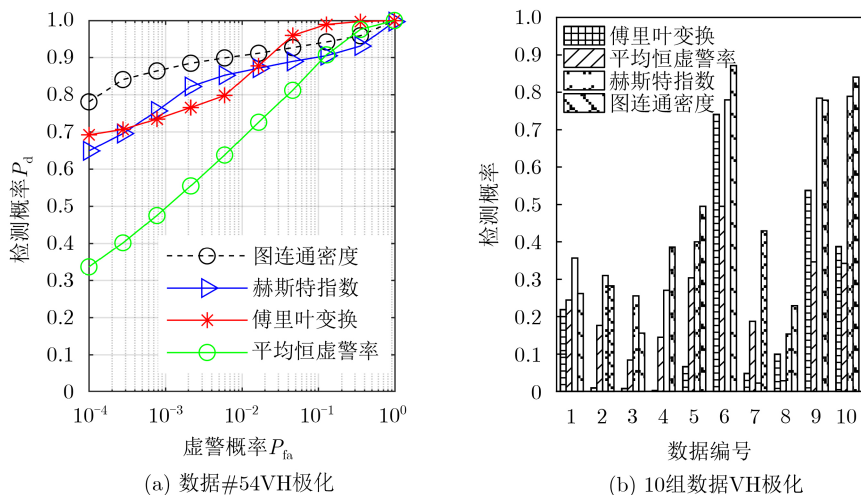


图8 数据#54在VH极化下4种方法的检测对比(参数设置: $M = 10000, N = 512, P = 502, \gamma = 6$)

78.1%，而FFT, Hurst指数以及平均恒虚警率检测器的检测概率分别为64.9%，69.2%和33.6%，在虚警概率为 10^{-3} 时，本文所提的特征检测概率达到87.1%，而其他3种算法的检测概率分别为74.1%，77.9%，49.4%，提升并没有十分明显，从而可以看出本文所提的特征在低虚警概率下仍旧有很好的性能。从图8(b)的实验结果可以看出，本文所提基于图连通密度的检测器在10组数据中的检测性能整体上都优于对比算法。利用MATLAB仿真实验时长如下：图连通密度特征的时间是0.0258 s，FFT的时间为0.0072 s，Hurst指数的时间为2.93 s，平均恒虚警率检测器的时间为0.0231 s，本文算法是经过FFT预处理后所提出的特征，所以运行时间比FFT算法稍慢一点，但在性能上相较于FFT都有所提升；较为经典的Hurst指数在运行时间上比本文算法要慢很多；平均恒虚警率检测器虽然运行时间与本文算法时间较为相近，但是本文基于图连通密度的特征检测性能要比其提升很多。因此，综合算法的运行时间和检测性能，本文所提取的特征相较于其他算法有一定的优势。

5 结论

本文提出了一种基于图连通密度特性的海面小目标检测方法。首先对雷达回波数据的幅度FFT预处理后进行图的构建，根据图的连通密度生成邻接矩阵，接着将由邻接矩阵进一步构造的拉普拉斯矩阵做合理分析，对比杂波序列和目标序列的拉普拉斯矩阵特征值的差异，提取其最大特征值作为区分杂波和目标的特征，最后将该特征与FFT, Hurst指数以及平均恒虚警率检测器进行对比，实验结果显示本文所提特征检测性能更好，且计算量非常小，从而幅度之间的联系可以作为特征提取较好的研究方向之一。

参考文献

- [1] 丁昊, 刘宁波, 董云龙, 等. 雷达海杂波测量试验回顾与展望[J]. 雷达学报, 2019, 8(3): 281–302. doi: 10.12000/JR19006. DING Hao, LIU Ningbo, DONG Yunlong, et al. Overview and prospects of radar sea clutter measurement experiments[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(3): 281–302. doi: 10.12000/JR19006.
- [2] 张坤, 水鹏朗, 王光辉. 相参雷达K分布海杂波背景下非相干积累恒虚警检测方法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(7): 1627–1635. doi: 10.11999/JEIT190441. ZHANG Kun, SHUI Penglang, and WANG Guanghui. Non-coherent integration constant false alarm rate detectors against K-distributed sea clutter for coherent radar systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(7): 1627–1635. doi: 10.11999/JEIT190441.
- [3] ZHOU Wei, XIE Junhao, LI Gaopeng, et al. Robust CFAR detector with weighted amplitude iteration in nonhomogeneous sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1520–1535. doi: 10.1109/TAES.2017.2671798.
- [4] SHI Yanling. Three GLRT detectors for range distributed target in grouped partially homogeneous radar environment[J]. *Signal Processing*, 2017, 135: 121–131. doi: 10.1016/j.sigpro.2016.12.030.
- [5] ROBEY F C, FUHRMANN D R, KELLY E J, et al. A CFAR adaptive matched filter detector[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(1): 208–216. doi: 10.1109/7.135446.
- [6] LI Dongchen and SHUI Penglang. Floating small target detection in sea clutter via normalised Hurst exponent[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(17): 1240–1242. doi: 10.1049/el.2014.1569.
- [7] SHI Yanling, ZHANG Xueliang, and LIU Zipeng. Floating small target detection in sea clutter based on jointed

- features in FRFT domain[C]. The 3rd EAI International Conference on Advanced Hybrid Information Processing, Nanjing, China, 2019: 128–139. doi: [10.1007/978-3-030-36405-2_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36405-2_14).
- [8] 陈小龙, 关键, 于晓涵, 等. 基于短时稀疏时频分布的雷达目标微动特征提取及检测方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1017–1023. doi: [10.11999/JEIT161040](https://doi.org/10.11999/JEIT161040).
- CHEN Xiaolong, GUAN Jian, YU Xiaohan, *et al.* Radar Micro-Doppler signature extraction and detection via short-time sparse time-frequency distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1017–1023. doi: [10.11999/JEIT161040](https://doi.org/10.11999/JEIT161040).
- [9] SHI Yanling, XIE Xiaoyan, and LI Dongchen. Range distributed floating target detection in sea clutter via feature-based detector[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(12): 1847–1850. doi: [10.1109/LGRS.2016.2614750](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2614750).
- [10] 时艳玲, 杜宇翔, 蒋锐, 等. 部分均匀海杂波中基于分组加权的协方差矩阵估计算法[J]. 信号处理, 2019, 35(7): 1170–1179. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2019.07.006](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2019.07.006).
- SHI Yanling, DU Yuxiang, JIANG Rui, *et al.* A grouped weighted covariance matrix estimator in partially homogeneous sea clutter[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(7): 1170–1179. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2019.07.006](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2019.07.006).
- [11] XU Shuwen, ZHENG Jibin, PU Jia, *et al.* Sea-surface floating small target detection based on polarization features[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(10): 1505–1509. doi: [10.1109/LGRS.2018.2852560](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2852560).
- [12] 陈世超, 高鹤婷, 罗丰. 基于极化联合特征的海面目标检测方法[J]. 雷达学报, 2020, 9(4): 664–673. doi: [10.12000/JR20072](https://doi.org/10.12000/JR20072).
- CHEN Shichao, GAO Heting, and LUO Feng. Target detection in sea clutter based on combined characteristics of polarization[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(4): 664–673. doi: [10.12000/JR20072](https://doi.org/10.12000/JR20072).
- [13] CHEN Shichao, LUO Feng, and LUO Xianxian. Multiview feature-based sea surface small target detection in short observation time[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020(99): 1–5. doi: [10.1109/LGRS.2020.2994341](https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2994341).
- [14] SANDRYHAILA A and MOURA J M F. Discrete signal processing on graphs: Frequency analysis[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(12): 3042–3054. doi: [10.1109/tsp.2014.2321121](https://doi.org/10.1109/tsp.2014.2321121).
- [15] 姜琦, 王锐, 周超, 等. 基于代数图论的修正贝叶斯群目标航迹起始算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 531–538. doi: [10.11999/JEIT200449](https://doi.org/10.11999/JEIT200449).
- JIANG Qi, WANG Rui, ZHOU Chao, *et al.* Modified Bayesian group target track initiation algorithm based on algebraic graph theory[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(3): 531–538. doi: [10.11999/JEIT200449](https://doi.org/10.11999/JEIT200449).
- [16] YAN Kun, WU H C, XIAO Hailin, *et al.* Novel robust band-limited signal detection approach using graphs[J]. *IEEE Communications Letter*, 2017, 21(1): 20–23. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2618871](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2618871).
- [17] YAN Kun, BAI Yu, WU H C, *et al.* Robust target detection within sea clutter based on graphs[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 7093–7103. doi: [10.1109/TGRS.2019.2911451](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2911451).
- [18] 李炯生, 张晓东, 潘永亮. 图的Laplace特征值[J]. 数学进展, 2003, 32(2): 157–165. doi: [10.3969/j.issn.1000-0917.2003.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0917.2003.02.003).
- LI Jiongsheng, ZHANG Xiaodong, and PAN Yongliang. Laplacian eigenvalues of graphs[J]. *Advances in Mathematics*, 2003, 32(2): 157–165. doi: [10.3969/j.issn.1000-0917.2003.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0917.2003.02.003).
- [19] DE ABREU N M M. Old and new results on algebraic connectivity of graphs[J]. *Linear Algebra and its Applications*, 2007, 423(1): 53–73. doi: [10.1016/j.laa.2006.08.017](https://doi.org/10.1016/j.laa.2006.08.017).
- [20] LI Ying, YANG Yonghu, and ZHU Xueyuan. Target detection in sea clutter based on multifractal characteristics after empirical mode decomposition[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(9): 1547–1551. doi: [10.1109/LGRS.2017.2721463](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2721463).
- [21] HAYKIN S. The mcmastrer IPIX radar sea clutter database in 1993[EB/OL]. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix/dartmouth>, 2016.
- [22] SHUI Penglang, LI Dongchen, and XU Shuwen. Tri-feature-based detection of floating small targets in sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 1416–1430. doi: [10.1109/TAES.2014.120657](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120657).
- 时艳玲: 女, 1983年生, 副教授, 研究方向为海杂波的散射特性分析、复杂电磁环境下的目标检测和雷达信号处理。
姚婷婷: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为图的连通性、海面目标检测。
郭亚星: 男, 1997年生, 硕士生, 研究方向为海面目标的分类算法。

责任编辑: 余蓉