

基于 Q-MMSPF 的海杂波多重分形互相关分析和目标检测*

孙康¹, 金钢^{2,3}, 朱晓华¹, 孙理¹

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000;

3. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 611731)

摘要:提出一种研究长程互相关和多重分形的新方法——Q 阶混合矩结构分割函数法 (Q-MMSPF), 并利用 Q-MMSPF 分析了海杂波时间序列的多重分形互相关特征。通过对实测海杂波数据的计算分析发现, 海杂波互相关多重分形特征较弱, 目标信号之间的互相关多重分形特征明显, 而目标信号与海杂波之间的互相关多重分形程度介于二者之间。据此, 本文采用一种新的特征值进行海杂波背景下的目标检测。通过对不同条件下的实测海杂波数据验证, 表明使用本文提出的特征值测量方法可以十分有效地检测出海杂波背景下的微弱目标。

关键词:海杂波; 多重分形互相关分析; Q 阶混合矩结构分割函数法; 目标检测

中图分类号: TN959.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)03-0170-06

Multifractal cross-correlation analysis of sea clutter and target detection based on Q-MMSPF

SUN Kang¹, JIN Gang^{2,3}, ZHU Xiaohua¹, SUN Li¹

(1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

3. School of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A novel method, the Qth order Mixed Moment Structure Partition Function (Q-MMSPF) method, is proposed for the detection of long-range cross-correlations and multifractality. With this method, the multifractal cross-correlation characteristic of sea clutters was investigated. The analysis, based on the real sea clutter data, shows that the cross-correlation multifractality is quite weaker between the two sea clutter series, and the multifractality is significant between two time series of target plus sea clutter, whereas the multifractality is in the middle for the case, which is between target time series and sea clutter time ones. Consequently, an approach was suggested to detect the targets in sea clutter. The test results show that the target can be clearly distinguished from the sea clutter background with the proposed feature-based method.

Key words: sea clutter; multifractal cross-correlation analysis; Qth order mixed moment structure partition function; target detection

自从 T. Lo 等将 Mandelbrot 创立的分形理论用来分析真实海杂波数据, 提出利用分形特征检测海面目标, 研究如何采用分形理论准确探测强海杂波背景下的微弱目标逐渐成为雷达领域的研究热点之一。分形和尺度不变性有着密切的联系, 分形维是表示尺度不变性的最基本的分形参数。基于分形维的海面目标检测方法得到广泛研究, 并在应用中取得了成效^[1-4]。由于单一的分形维数无法充分描述所有复杂的事物和现象, 也不能揭示产生分形结构的动力学特征, 于是引入多重分形, 从局部出发研究海杂波的整体特性和非均匀结构成为一条重要的解决途径。研究表

明, 海杂波具有多重分形特性, 将海杂波的多重分形性质应用到海上目标探测中可取得较好的检测效果^[5-6]。多重分形分析方法的研究近年发展迅速, 较典型的有小波模板大值方法 (WTMM)、多重分形消除趋势波动分析方法 (MFDFA) 和 Q 阶矩结构分割函数方法 (Q-MMSPF) 等^[7-9]。

在自然界中, 一个复杂系统在时间或空间上同时记录下的两个变量数据通常是互相关的, 并且具有多重分形特征, 长程互相关能够提供更多关于观测对象的信息。Podobnik 和 Stanley 基于消除趋势波动分析方法 (DFA) 提出了消除趋势互相关分析方法 (DCCA), 用于研究两个非平稳

* 收稿日期: 2012-09-28

基金项目: 江苏省科技厅科技专项 (sb1201230101)

作者简介: 孙康 (1985—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, E-mail: sunkang_me@163.com;

金钢 (通信作者), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: gjin@ioe.ac.cn

时间序列之间的长程互相关特征^[10]。为了研究同时记录的两个非平稳时间序列在幂律互相关中的多重分形表现,周炜星与蒋志强将 DCCA 和 MFDFFA 结合,相继提出了多重分形消除趋势互相关分析方法(MF-MSPF)和将移动平均滤波与 MF-MSPF 相结合的 MF-X-DMA 方法^[11-12]。L. Kristoufek 基于上述研究,将高度-高度相关性分析方法二元泛化,提出了多重分形高度互相关分析方法(MF-HXA)^[13]。S. Shadkhoo 等利用 MF-DXA 研究探讨了不同事件的空时地震数据序列之间的互相关性质和多重分形表现^[14]。

MF-DXA 是 MFDFFA 的一种推广。MFDFFA 对受趋势影响或无法归一化的非平稳时间序列可以给出较准确的结果,但却增加了计算复杂性。与之相比,Q-MSPF 在计算上降低了复杂性,并且扩大了分形的应用范围。因此,本文尝试对 Q-MSPF 方法进行改进,提出了一种研究长程互相关和多重分形的 Q 阶混合矩结构分割函数法(Q-MMSPF),利用该方法对实测海杂波数据进行了分析研究,以探寻不同空间上的海杂波之间的多重分形互相关特征。通过对实测海杂波数据的计算,得到其二元质量指数、奇异性指数和多重分形谱。通过对这些特征函数的分析发现,海杂波之间的多重分形特征较弱,目标信号之间的多重分形特征较强,而目标信号与海杂波之间的多重分形程度则介于二者之间。基于此,本文提出了一种新的特征测量值,并在其基础上提出了相应的目标检测方案。通过对不同环境、不同极化条件下的实测海杂波数据进行验证,表明采用该方案能够有效地检测出海杂波背景下的小弱目标。

1 Q 阶混合矩结构分割函数法

Q-MSPF 利用矩的概念计算单个时间序列的结构分割方程,通过其获得一种多重分形分析方法。基于 Q-MSPF,本文采用混合矩实现对两个时间序列之间的多重分形特性的分析。

设 $\{x_i\}$ 和 $\{y_i\}$ 是两个长度为 N 的时间序列, $i = 1, 2, \dots, N$, Q-MMSPF 方法主要包括以下几个步骤:

(1) 构造两个归一化新序列 $\{\tilde{x}_i\}$ 和 $\{\tilde{y}_i\}$, 满足 $\tilde{x}_k \geq 0, \tilde{y}_k \geq 0$, 且 $\sum_{k=1}^N \tilde{x}_k = 1, \sum_{k=1}^N \tilde{y}_k = 1$ 。

(2) 分别将序列 $\{\tilde{x}_i\}$ 和 $\{\tilde{y}_i\}$ 划分成长度为 s 的 v 个子区间序列, 计算每个子区间序列的盒概率

$$\begin{cases} p_{xv}(s) = \sum_{k=(v-1)s+1}^{vs} \tilde{x}_k, v = 1, 2, \dots, N_s \\ p_{yv}(s) = \sum_{k=(v-1)s+1}^{vs} \tilde{y}_k, v = 1, 2, \dots, N_s \end{cases} \quad (1)$$

其中 $N_s \equiv \lfloor \frac{N}{s} \rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整。

(3) 计算 Q 阶混合矩结构分割函数

$$Z_{xyq}(s) = \sum_{v=1}^{N_s} |p_{xv}(s)p_{yv}(s)|^q, q \in \mathbb{R} \quad (2)$$

对于多重分形, Q 阶混合矩结构分割函数在时间上服从如下的标度关系:

$$Z_{xyq}(s) \sim s^{\tau_{xy}(q)} \quad (3)$$

其中, $\tau_{xy}(q)$ 称为二元质量指数, 是分形行为的特征函数。对每一个 q 值, 其二元质量指数可以通过对数据 $(\log_2 s, \log_2 Z_{xyq}(s))$ 的最小二乘拟合得到。若 $\tau_{xy}(q)$ 关于 q 是一条直线, 则两个时间序列之间是单分形的; 否则, 两个时间序列之间具有多重分形特征。

$\tau_{xy}(q)$ 经过统计物理中的 Legendre 变换可以得到多重分形谱 $f(\alpha)$, 它们之间的具体关系如下:

$$\begin{cases} \alpha(q) = \frac{d\tau_{xy}(q)}{dq} \\ f(\alpha) = q\alpha(q) - \tau_{xy}(q) \end{cases} \quad (4)$$

其中 α 称为 Hölder 指数, 也称为奇异性指数。多重分形谱 $f(\alpha)$ 描述了 Hölder 指数 α 的概率分布, 表示有相同 α 值的子集分形维数。一个复杂的分形体, 它的内部可以分为一系列不同 α 值所表示的子集, $f(\alpha)$ 给出了此系列子集的分形特征。如果研究对象是单分形的, 则 $f(\alpha)$ 为一个定值; 反之, 如果研究对象是多重分形的, $f(\alpha)$ 一般会呈现出单峰图像^[8, 14-15]。多重分形谱宽度 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ 及相应的最大、最小概率子集分形维数差别 $\Delta f = f(\alpha_{\min}) - f(\alpha_{\max})$ 的大小反映了整个分形结构上概率测度分布的不均匀程度, $f(\alpha)$ 是对序列分形结构上的不规则程度以及不均匀程度的一种度量。

2 海杂波的多重分形互相关特性

本文采用加拿大 McMaster 大学于 1993 年利用 IPIX 高分辨率雷达实地测量获得的海杂波数据^[16], 有 14 组不同时间不同海情的测量数据。每组数据包含有 HH 和 VV 极化下的 14 个不同距离单元, 每个距离单元数据有 2^{17} 个样本点。在 14 个距离单元中包含 1 个主要目标单元, 以及毗邻主要目标单元的 2~3 个包含部分目标信息的

次要目标单元,其余为无目标的海杂波单元。目标为直径 1m 的泡沫塑料球形器,外表面覆盖一层铝箔以增强信号,平均目标信杂比约为 0 ~ 6dB。在 14 组测量数据中,有 4 组严重受到限幅干扰的影响,因此本文不考虑这 4 组数据,仅将其余的 10 组数据作为研究对象^[17-18]。

2.1 海杂波与其他雷达回波的多重分形互相关特征

利用 Q-MMSPF 计算某一距离单元纯海杂波与其他距离单元回波信号的 Q 阶混合矩结构分割函数 $Z_{xyq}(s)$, s 的取值范围为 $[1, T/2]$, T 是海杂波时间序列的长度,在本文仿真计算中 T 取 2^{17} , q 在区间 $[-20, 20]$ 上以单位间距取值, $\log_2 Z_{xyq}(s)$ 与 $\log_2 s$ 的关系曲线如图 1 所示。

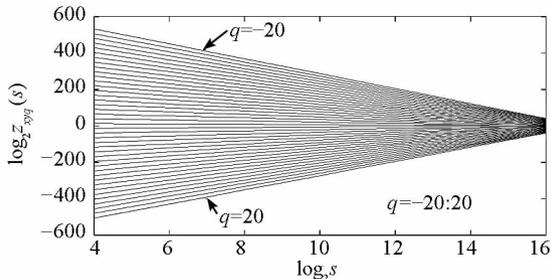


图 1 $\log_2 Z_{xyq}(s)$ 与 $\log_2 s$ 的关系曲线

Fig. 1 The $\log_2 Z_{xyq}(s)$ versus $\log_2 s$ curves

图 2(a)、(b)和(c)分别给出了 HH 和 VV 两种极化情况下的二元质量指数 $\tau_{xy}(q)$ 、奇异性指数曲线 $\alpha(q)$ 和多重分形谱 $f(\alpha)$ 。从图中可以得到:(1)对于海杂波与海杂波的情况, $\tau_{xy}(q)$ 相对 q 近似于一条直线,多重分形谱宽度 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ 分别约为 0.001 (HH 极化) 和 0.09 (VV 极化)。不同 α 处的多重分形谱 $f(\alpha)$ 值差别较小,谱曲线起伏平缓,无明显凸峰现象。(2)对于海杂波与主要目标单元的情况,当 $q < 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为 2.26 (HH 极化) 和 2.17 (VV 极化); 当 $q > 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为 1.99 (HH 极化) 和 1.99 (VV 极化)。即 $\tau_{xy}(q)$ 不是 q 的线性函数。HH 和 VV 下的多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 分别为 0.29 和 0.21,不同 α 处的多重分形谱 $f(\alpha)$ 值差别较大,谱曲线出现明显单峰。而对于海杂波与次要目标单元,当 $q < 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为 2.19 (HH 极化) 和 2.11 (VV 极化); 当 $q > 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为 2.00 (HH 极化) 和 2.00 (VV 极化)。HH 和 VV 下的多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 分别为 0.23 和 0.19。由此,可得到如下结论:(1)不同海杂波之间的多重分形互相关特征很弱。(2)海杂波与目标单元信号的多重分形互相关特征比海杂波之间的多重分

形互相关特征强;(3)海杂波与主要目标单元信号的多重分形互相关特征比海杂波与次要目标单元信号的多重分形互相关特征明显;(4)在一定情况下(如 VV 极化),相邻单元海杂波之间的多重分形互相关特征强于不相邻单元海杂波之间的多重分形互相关特征。

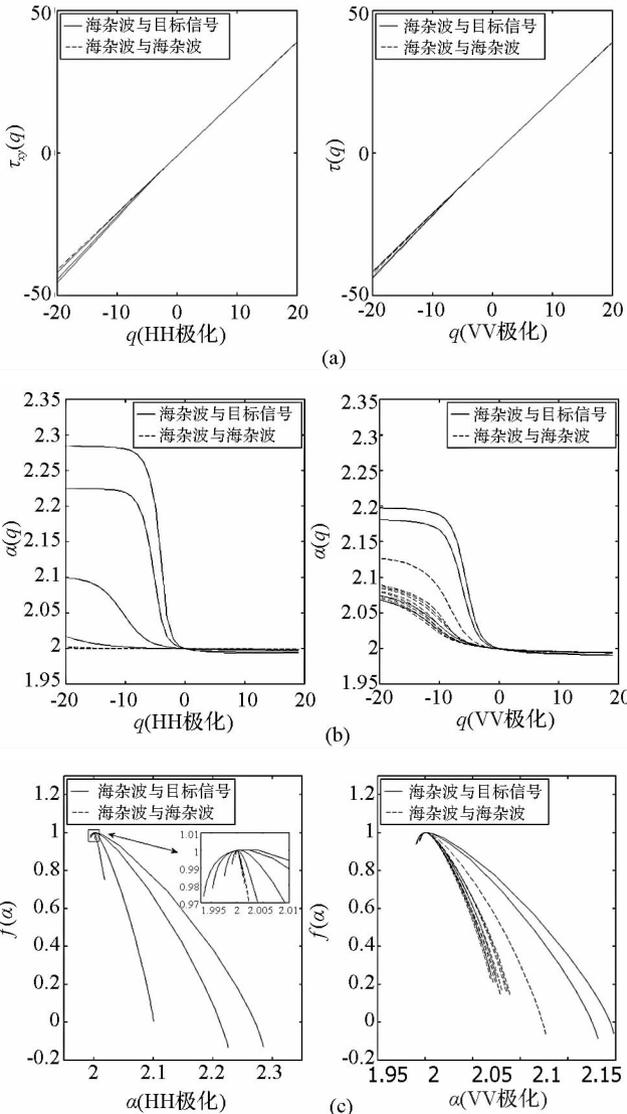


图 2 不同极化下纯海杂波与其他不同距离单元雷达回波间的二元质量指数曲线 $\tau(q)$ 、奇异性指数曲线 $\alpha(q)$ 和多重分形谱 $f(\alpha)$

Fig. 2 The generalized mass exponent function $\tau(q)$, the Hölder exponent $\alpha(q)$ and the singularity spectrum $f(\alpha)$ for sea clutter data and other radar echo data with different polarizations

2.2 目标信号与其他雷达回波的多重分形互相关特征

图 3(a)、(b)和(c)分别是 HH 和 VV 两种极化情况下某次要目标单元信号与其他距离单元雷达回波的二元质量指数函数曲线 $\tau_{xy}(q)$ 、奇异性指数曲线 $\alpha(q)$ 和多重分形谱 $f(\alpha)$ 。从图中可以

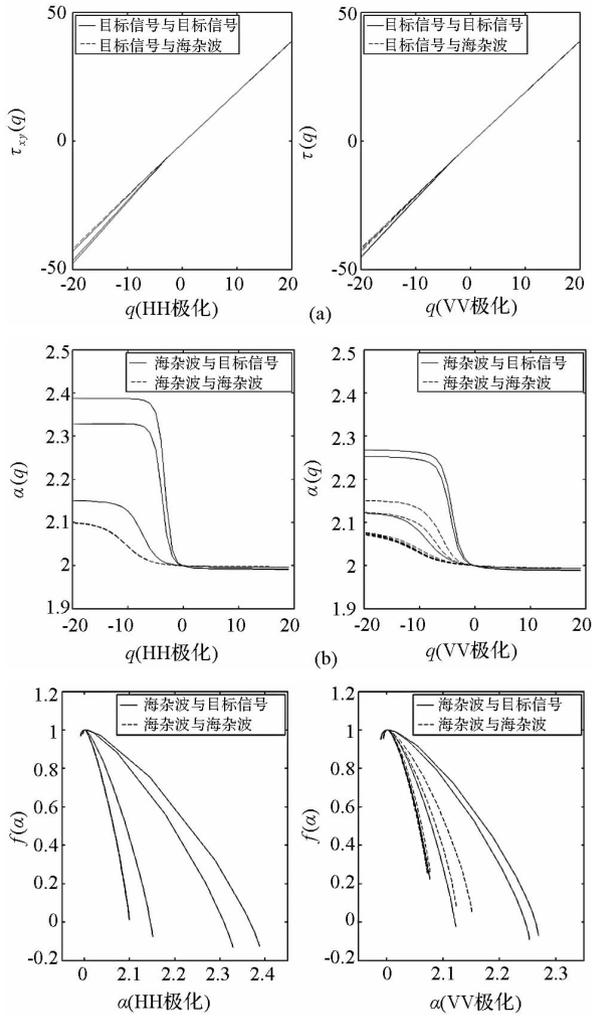


图3 不同极化下次要目标信号与其他不同距离雷达回波间的二元质量指数曲线 $\tau(q)$ 、奇异性指数曲线 $\alpha(q)$ 和多重分形谱 $f(\alpha)$

Fig. 3 The generalized mass exponent function $\tau(q)$, the Hölder exponent $\alpha(q)$ and the singularity spectrum $f(\alpha)$ for secondary target data and other radar echo data with different polarizations

得到:(1)对于次要目标单元信号与海杂波,当 $q < 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为 2.05 (HH 极化) 和 2.09 (VV 极化);当 $q > 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为

2.00 (HH 极化和 VV 极化)。两种极化的多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 均为 0.1 左右。(2)对于次要目标单元信号与主要目标单元信号,当 $q < 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为 2.37 (HH 极化) 和 2.24 (VV 极化);当 $q > 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为 1.99 (HH 极化和 VV 极化)。HH 和 VV 下的多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 分别为 0.39 和 0.34。而对于两个次要目标单元信号,当 $q < 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为 2.31 (HH 极化) 和 2.22 (VV 极化);当 $q > 0$ 时, $\tau_{xy}(q)$ 的斜率约为 1.99 (HH 极化和 VV 极化)。HH 和 VV 下的多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 分别为 0.28 和 0.26。由此可知, (1)目标单元信号之间的多重分形互相关特征比目标单元信号与海杂波的多重分形互相关特征更强。(2)主要目标单元信号与次要目标单元信号的多重分形互相关特征比次要目标单元信号之间的多重分形互相关特征更明显。

3 基于 Q-MMSPF 多重分形互相关特征分析的目标检测

本文的多重分形谱 $f(\alpha)$ 是对相关度在分形结构上的不规则程度以及不均匀程度的一种度量。海杂波单元之间的 Δf 小于目标单元与海杂波单元的 Δf , 反映出海杂波单元之间, 较小相关度值占主要地位; 目标单元与海杂波单元之间, 较大相关度值占主要地位。不同海杂波单元之间, $\Delta\alpha$ 较小, 说明相关性的概率测度分布较均匀, 相关性的起伏波动较平缓。而目标单元与海杂波单元, $\Delta\alpha$ 较大, 说明相关性的概率测度分布较不均匀, 相关性的起伏波动大。基于这种差别, 定义一个新的特征值 Λ , 使其与多重分形谱 $f(\alpha)$ 之间满足如下的关系

$$\Lambda = \sum_q f(\alpha) \quad (5)$$

基于特征值 Λ , 可构建一个如图 4 所示的探测海杂波背景下小弱目标的方案。

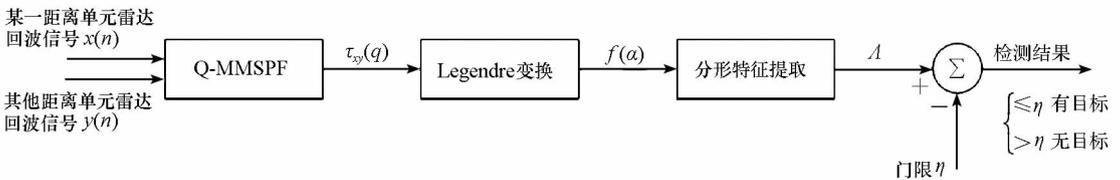


图4 检测方案框图

Fig. 4 The block diagram of the detection scheme

首先利用 Q-MMSPF 计算某一距离单元雷达回波信号与其他距离单元雷达回波信号的二元质量指数, 经 Legendre 变换得到多重分形谱, 然后计算特征值 Λ , 如果多重分形特征发生较大变化,

则认为待测距离单元存在目标; 否则, 待测单元不存在目标。即

$$\begin{cases} H_1, & \text{如果 } \Lambda \leq \eta \\ H_0, & \text{如果 } \Lambda > \eta \end{cases} \quad (6)$$

其中, H_1 表示待测距离单元存在目标, H_0 表示待测距离单元不存在目标, η 是设置的门限阈值, 可通过聚类分析和最大类间方差法得到。

图 5(a) 和 5(b) 分别给出某一个作为基准的海杂波单元信号与其他距离单元信号在 HH 和 VV 极化形式下的 Λ 曲线, 图 6(a) 和 6(b) 则分别是 HH 和 VV 极化形式下相邻距离单元信号的 Λ 曲线。对比两幅图可以看出: (1) 相同极化条件下, 海杂波之间的 Λ 值明显高于目标信号与海杂波的 Λ 值, 相邻单元海杂波的 Λ 值也明显高于相邻单元目标信号的 Λ 值, 其中与主要目标信号相关的特征差异最大; (2) 特征值 Λ 曲线在目标单元处会出现一个明显的谷值。利用 Q-MMSPF 法对其他测量数据进行验证, 除一组受到其他雷达干扰的数据外, 其余各组均呈现出相似的测量结果。

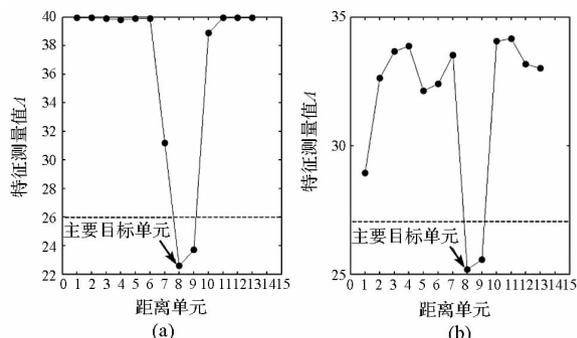


图 5 基于基准的海杂波单元信号与其他距离单元信号的特征测量结果

Fig. 5 The detection results for one prior sea clutter and the other range bin echoes

将本文方法与 DFA 算法的检测性能进行一个比对。图 7 给出了本文方法与 DFA 算法在两种极化形式下的工作特性曲线 (ROC 曲线)。由此可见, 对于 HH 极化, 本文方法的工作特性曲线与 DFA 的工作特性曲线基本相似。对于 VV 极化, 相对 DFA 的 ROC 曲线, 本文方法检测概率增

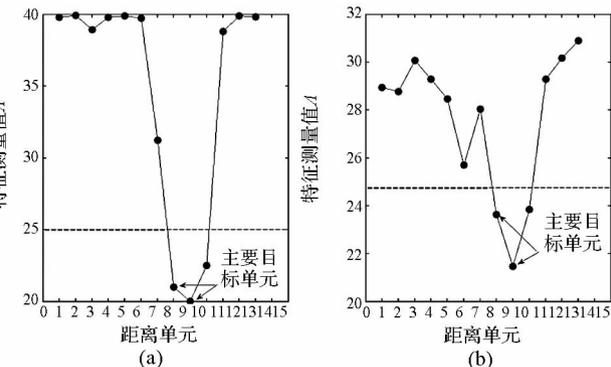


图 6 基于相邻距离单元信号的特征测量结果
Fig. 6 The detection results for the adjacent range bin echoes

长速度更快。ROC 曲线下的面积 AUC (Area Under the ROC Curve) 能够较好地刻画分类算法的整体性能, 常被用来作为评估不同算法性能的一个主要指标^[19-20]。AUC 值越高, 相应算法的分类性能越好。表 1 给出了两种方法的 AUC 值。对于 HH 极化, 两种方法的 AUC 值基本相当。对于 VV 极化, 本文方法 AUC 值略高。

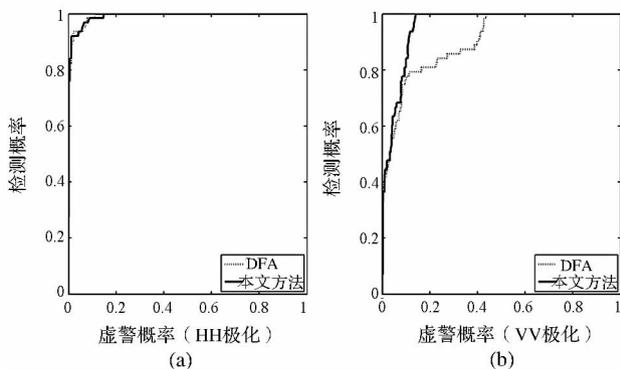


图 7 两种方法的工作特性 (ROC) 曲线

Fig. 7 The receiver operating characteristics (ROC) curves of two methods

表 1 ROC 曲线下的面积 (AUC) 结果

Tab. 1 The area under the ROC curve (AUC) results

	DFA	本文方法
HH 极化	0.993	0.992
VV 极化	0.905	0.956

4 结论

本文提出了一种研究长程互相关和多重分形的方法——Q 阶混合矩结构分割函数法 (Q-MMSPF), 并利用 Q-MMSPF 研究了海杂波时间序列之间的多重分形互相关特征。通过对实测数据的分析可知: 海杂波互相关多重分形特征较弱, 两个目标信号之间的互相关多重分形特征较强, 而目标信号与海杂波之间的互相关多重分形强度介于前二者之间。由此, 本文提出了一种基于 Q-MMSPF 多重分形互相关特征分析的目标检测方法。对已有的多种海情、不同极化条件下 IPIX 雷达实测海杂波数据的试验结果表明, 该方法可以从海杂波背景中有效地检测出较弱的目标信号。

参考文献 (References)

[1] Pournajatian N M, Nayebi M M. Fractal-multiresolution based detection of targets within sea clutter[J]. Electronics Letters, 2012, 48(6): 345-347.
 [2] 陈小龙, 刘宁波, 宋杰, 等. 海杂波 FRFT 域分形特征判别及动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 823-830.
 CHEN Xiaolong, LIU Ningbo, SONG Jie, et al. Fractal

- feature discriminant of sea clutter in FRFT domain and moving target detection algorithm [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(4): 823 - 830. (in Chinese)
- [3] Guan J, Liu N B, Huang Y, et al. Fractal characteristic in frequency domain for target detection within sea clutter [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2012, 6(5): 293 - 306.
- [4] 胡卫东, 郁文贤, 郭桂蓉. 基于分维特性的舰船雷达目标的检测[J]. *国防科技大学学报*, 1996, 18(2): 65 - 68. HU Weidong, YU Wenxian, GUO Guirong. Radar ship targets detection based on fractal characteristics [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1996, 18(2): 65 - 68. (in Chinese)
- [5] 刘宁波, 关键. 海杂波的多重分形判定及广义维数谱自动提取[J]. *海军航空工程学院学报*, 2008, 23(2): 126 - 131. LIU Ningbo, GUAN Jian. Judgement of multifractal and auto-computing of generalized dimension spectrum based on sea clutter [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2008, 23(2): 126 - 131. (in Chinese)
- [6] Hu J, Tung W W, Gao J B. Detection of low observable targets within sea clutter by structure function based multifractal analysis [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(1): 136 - 143.
- [7] Robert A M, et al. *Encyclopedia of complexity and systems science* [M]. New York: Springer Science + Business Media, LLC., 2009.
- [8] Ren J, Sheng W. Analysis of multifractality for sea clutter [C]//*Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar*, Chengdu, China, Oct. 24 - 27, 2011: 1276 - 1279.
- [9] Zhang D T, Luo F. A new detecting method for weak targets in sea clutter based on multifractal properties [C]//*Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar*, Chengdu, China, Oct. 24 - 27, 2011: 446 - 449.
- [10] Podobnik B, Stanley H E. Detrended cross-correlation analysis; a new method for analyzing two nonstationary time series [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(8): 084102 - 1 - 4.
- [11] Zhou W X. Multifractal detrended cross-correlation analysis for two nonstationary signals [J]. *Physical Review E*, 2008, 77(6): 066211 - 1 - 4.
- [12] Jiang Z Q, Zhou W X. Multifractal detrending moving-average cross-correlation analysis [J]. *Physical Review E*, 2011, 84(1): 016106 - 1 - 11.
- [13] Kristoufek L. Multifractal height cross-correlation analysis: A new method for analyzing long-range cross-correlations [J]. *Europhysics Letters*, 2011, 95: 68001 - p1 - p6.
- [14] Shadkoo S, Jafari G R. Multifractal detrended cross-correlation analysis of temporal and spatial seismic data [J]. *The European Physical Journal B*, 2009, 72: 679 - 683.
- [15] 刘小刚, 赵慧洁, 李娜. 基于多重分形谱的高光谱数据特征提取 [J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 844 - 848. LIU Xiaogang, ZHAO Huijie, LI Na. Feature extraction based on multifractal spectrum for hyperspectral data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 844 - 848. (in Chinese)
- [16] Haykin S. The McMaster IPIX radar sea clutter database [DB/OL]. (2001) [2011 - 03]. <http://soma.crl.mcmaster.ca/ipix/>.
- [17] Hu J, Tang W W, Gao J B. A new way to model nonstationary sea clutter [J]. *IEEE Signal Process. Lett.*, 2009, 16(2): 129 - 132.
- [18] Xu X K. Low observable targets detection by joint fractal properties of sea clutter; an experimental study of IPIX OHGR datasets [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2010, 58(4): 1425 - 1429.
- [19] 陈志杰, 冯德军, 王雪松. 基于 ROC 曲线的弹道目标识别评估及优化 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(17): 4028 - 4032. CHEN Zhijie, FENG Dejun, WANG Xuesong. Assessment & optimization of ballistic target recognition based on ROC curves [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(17): 4028 - 4032. (in Chinese)
- [20] 汪云云, 陈松灿. 基于 AUC 的分类器评价和设计综述 [J]. *模式识别与人工智能*, 2011, 24(1): 64 - 71. WANG Yunyun, CHEN Songcan. A survey of evaluation and design for AUC based classifier [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2011, 24(1): 64 - 71. (in Chinese)