

基于多普勒谱非广延熵的海面目标检测方法

陈世超^① 罗丰^{*①} 胡冲^② 聂学雅^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(西南电子技术研究所 成都 610036)

摘 要: 根据海杂波和目标多普勒谱的聚集性差异, 可以用熵特征来检测海杂波背景下的小目标, 然而常用的香农熵仅仅是统计学角度的宏观量值, 并不能反映出海杂波的非线性特性。非广延熵是香农熵的推广, 可以描述海杂波已被证实的多重分形特性。该文首先给出了非广延熵与分形维数的关系, 然后结合有目标单元回波的多普勒谱较纯杂波单元回波的多普勒谱聚集性更强以及海杂波回波具有多重分形特性的特点, 提出了基于多普勒谱非广延熵的海杂波背景下的小目标检测方法, 最后通过实测数据进行实验比较, 验证了该文算法的有效性, 在观测时间较短的情况下, 与现有的多重分形频域Hurst指数方法和基于香农熵的方法相比, 该文算法具有更好的检测性能。

关键词: 海杂波; 目标检测; 多普勒谱; 非广延熵; 多重分形

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2019)03-0344-11

DOI: 10.12000/JR19012

引用格式: 陈世超, 罗丰, 胡冲, 等. 基于多普勒谱非广延熵的海面目标检测方法[J]. 雷达学报, 2019, 8(3): 344-354. doi: 10.12000/JR19012.

Reference format: CHEN Shichao, LUO Feng, HU Chong, *et al.* Small target detection in sea clutter background based on Tsallis entropy of Doppler spectrum[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(3): 344-354. doi: 10.12000/JR19012.

Small Target Detection in Sea Clutter Background Based on Tsallis Entropy of Doppler Spectrum

CHEN Shichao^① LUO Feng^{*①} HU Chong^② NIE Xueya^①

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: According to the different concentration levels of Doppler spectrum between sea clutter and target, small target in sea clutter background can be detected using Shannon entropy. However, Shannon entropy is merely a special case of Tsallis entropy and cannot reflect the multifractality of sea clutter. In this paper, the relation between Tsallis entropy and the generalized fractal dimension is first presented, and then the Doppler spectrum's concentrative level and multifractality of sea clutter are combined; finally an algorithm for detecting small target in sea clutter background based on Tsallis entropy of Doppler spectrum rather than of Shannon entropy is proposed. By comparison via IPIX dataset, the detection's performance of Tsallis entropy is better than that of Shannon entropy and Hurst exponent as per short observations.

Key words: Sea clutter; Target detection; Doppler spectrum; Tsallis entropy; Multifractality

收稿日期: 2019-01-24; 改回日期: 2019-02-09; 网络出版: 2019-03-22

*通信作者: 罗丰 luofeng@xidian.edu.cn

*Corresponding Author: LUO Feng, luofeng@xidian.edu.cn

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资金(2013YQ20060705)

Foundation Item: The National Key Scientific Instrument and Equipment Development (2013YQ20060705)

责任编辑: 陈小龙 Corresponding Editor: CHEN Xiaolong

1 引言

海杂波背景下的小目标检测是雷达信号处理中较为复杂的问题之一, 海杂波的存在严重限制了雷达对一些小目标如导航浮标、潜望镜的检测能力。对海上低速小目标而言, 在时域其反射回波被强海杂波回波淹没, 特别是在高分辨低擦地角高海况情

况下, 海杂波的非高斯、非平稳性以及长时相关性更加明显, 其统计分布出现较长的拖尾, 海尖峰效应突出使得虚警概率增加, 传统的基于统计模型的恒虚警(Constant False-Alarm Rate, CFAR)检测算法不能起到很好的检测效果^[1,2]。

对海雷达回波会携带所照射纯海杂波或含目标单元的多普勒信息, 利用回波多普勒谱的聚集性可判断海杂波背景下目标的存在与否。1948年, 香农借鉴热力学中的概念, 最早提出香农熵用以描述信号或者数据的混乱程度^[3]。对于海面小目标而言, 目标的存在降低了海表面的混乱程度, 因此可以用香农熵作为描述海杂波多普勒谱的集中程度的统计量。香农熵越小说明海杂波的多普勒谱越集中, 目标存在的可能性越大。多普勒谱香农熵被广泛引用于海面目标检测^[4-6]。其中, 文献^[4]直接利用海杂波与目标的多普勒谱香农熵的差异来检测目标, 文献^[5]将相对多普勒谱熵作为一个特征, 结合相对幅度与相对多普勒峰值, 利用快速凸包学习算法实现海面漂浮小目标特征检测。文献^[6]将多普勒谱香农熵和平稳小波变换相结合, 提高雷达回波的信噪比的同时提高了海面小目标的检测性能。

分形理论解释了随机信号中普遍存在的尺度不变性和自相似性, 在雷达信号处理领域有着重要的应用。对于海面小目标而言, 单一分形难以有效地区分海杂波与目标, 由此研究人员相继提出了一系列基于多重分形理论的海面目标检测方法^[7-17]。其中, 文献^[11-14]研究了海杂波频域和分数阶Fourier变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)域的多重分形特性, 提出基于频域分形Hurst指数以及基于FRFT域广义Hurst指数的检测算法。文献^[15-17]研究了海杂波时域的局部多重分形谱及多重分形(AutoRegressive, AR)谱, 并将其运用于海面小目标检测。但是描述分形特性时, 通常需要雷达的观测时间达到1 s甚至数秒, 海面搜索雷达在实际使用时常常难以做到对每个区域进行长时间观测, 当观测时间较短时, 基于分形理论的检测器的性能会有大幅度下降。

很多学者对非广延熵描述非线性动力学系统进行了深入研究, 证明非广延熵能够反映系统的非线性动力学特性^[18-20]。本文结合海杂波频谱的局部多重分形特性, 对含目标单元与纯杂波距离单元多普勒谱非广延熵进行分析, 论证了海杂波与目标的非广延熵与多重分形特性间的关系, 提出基于多普勒谱非广延熵的海杂波背景下小目标检测方法, 最后通过IPIX实测数据验证了目标和纯杂波的多普勒谱非广延熵较香农熵特征具有更强的对比度, 同时

采用非广延熵特征描述海杂波多重分形特性, 与频域Hurst指数等特征相比, 在观测时间较短的情况下可以取得更好的检测效果。

2 多普勒谱非广延熵与多重分形

熵的概念由R. Clausius在1865年引入热力学, 一个多世纪以来得到了广泛而成功的应用, 成为统计物理学的基石^[21]。1948年, 香农借鉴热力学中的概念, 最早提出信息熵, 即香农熵(Shannon Entropy, SE)用以描述信号或者数据的混乱程度, 广泛运用于信号处理领域中。SE定义为

$$SE = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \quad (1)$$

其中, p_i 为系统处于第 i 个状态的概率, N 为系统可能的状态数。

然而, 香农熵是统计意义上描述系统整体性质的量值, 并不能反映系统的具体状态分布细节。因而香农熵无法体现分形、多重分形等反映海杂波非线性动力学本质的特性。由此, 学者们又相继引进了Kolmogorov熵, Renyi熵, 非广延熵等。

2.1 非广延熵引入

非广延熵是香农熵的推广, 具有非广延参数 q , 它能在一定程度上反映系统的非线性动力学特征。由香农熵可以推导出非广延熵, 具体过程如下:

香农熵具有对数函数 $y = \ln x$ 的形式, 为 $y = e^x$ 的反函数, 而 $y = e^x$ 为微分方程 $dy/dx = y$ 在初始条件为 $y(0) = 1$ 时的解。考虑更为一般的微分方程 $dy/dx = y^q$, 在初始条件为 $y(0) = 1$ 时, 其解由 q 指数函数给出, 为

$$y = [1 + (1 - q)x]^{1/(1-q)} \equiv e_q^x \equiv \exp_q(x) \quad (2)$$

其反函数为 q 对数函数

$$y = \frac{x^{1-q} - 1}{1 - q} \equiv \ln_q x \quad (3)$$

显然, 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n = e^x$ 可知: $e_1^x = e^x$, $\ln_1 x = \ln x$ 。改写香农熵公式如下

$$S = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i = \sum_{i=1}^n p_i \ln \frac{1}{p_i} = \left\langle \ln \frac{1}{p_i} \right\rangle \quad (4)$$

其中, $\langle \dots \rangle \equiv \sum_{i=1}^n (\dots) p_i$ 。下面定义非广延熵 S_q 为

$$S_q \equiv \left\langle \ln_q \frac{1}{p_i} \right\rangle = \sum_{i=1}^n p_i \ln_q \frac{1}{p_i} = \frac{1 - \sum_{i=1}^n p_i^q}{q - 1} \quad (5)$$

在 $q \rightarrow 1$ 极限下, 有 $p_i^q = p_i e^{(q-1) \ln p_i} \sim p_i [1 + (q-1) \ln p_i]$, 从而 S_q 与香农熵一致, 即 $S_1 = S$ 。

2.2 非广延熵与多重分形的关系

在分形领域中, 假设把一个 d 维空间分割成边长为 r 的 N 个 d 维超立方体, 假设 $\{p_i\}$ 为对象进入各超立方体内的概率分布, $i = 1, 2, \dots, N$ 。对任意的正数 $q (q \neq 1)$, 定义次数 q 的信息量 $I_q(r)$ 如下

$$I_q(r) = \frac{1}{1-q} \ln \sum_{i=1}^N p_i^q \quad (6)$$

令 $r \rightarrow 0$, 定义 q 次信息量维数 D_q , 即广义分形维数^[15]为

$$D_q = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{I_q(r)}{\ln r} \quad (7)$$

$I_q(r)$ 其实是一种Renyi熵^[22]的形式, 用非广延熵代替Renyi熵, 式(6)可改写为

$$S_q(r) = \frac{1 - \sum_{i=1}^N p_i^q}{q-1} \quad (8)$$

显然, $I_q(r)$ 和 $S_q(r)$ 之间存在如下关系

$$I_q(r) = \frac{\ln[1 + (1-q)S_q(r)]}{1-q} \quad (9)$$

将 $I_q(r)$ 代入 D_q 的表达式, 可得到

$$D_q(r) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln[1 + (1-q)S_q(r)]}{(1-q)\ln r} \quad (10)$$

由此, 将多重分形特性与多普勒谱联合在一起, 得到了用非广延熵 $S_q(r)$ 描述 $D_q(r)$ 的表达式, 因此 $S_q(r)$ 可以描述海杂波系统的多重分形特性。

海杂波的频域多重分形特性已被诸多学者加以证明, 多重分形去波动趋势分析法(MultiFractal Detrended Fluctuation Analysis, MF-DFA)是去波动分析法的一种推广, 它可对一组具有非平稳特性的序列在多个尺度下的多重分形特性进行更可靠的表示, 可采用MF-DFA法对海杂波频谱的多重分形特性进行分析和验证^[23]。参照MF-DFA计算步骤, 可以得到不同 q 值下的波动函数。波动函数与MF-DFA的阶数 q 有关, 不同阶数的MF-DFA在去除序列趋势方面的能力少有差异。对于求得的波动函数, 查看波动函数 $F_q(s)$ 与尺度 s 是否存在幂律关系, 即

$$F_q(s) \sim s^{H(q)} \quad (11)$$

对式(11)两边分别取对数可得

$$\log F_q(s) = H(q) \log s + k \quad (12)$$

其中, k 为常数。

因此, 可在双对数坐标系中对 $\log F_q(s) \sim \log s$ 进行最小二乘拟合, 若它们存在线性关系, 则该序列是分形的。同时, 拟合的斜率即广义Hurst指数

$H(q)$ 。如果 $H(q)$ 与 q 的变化无关, 则判定该序列是单一分形的; 如果 $H(q)$ 是 q 的函数, 则判定该序列是多重分形的。

在多重分形的分析中, 不同的 q 值强调不同的尺度序列在波动函数中的主导作用: 当 $q > 0$ 时, 多普勒谱中具有大波动特性的序列在波动函数中占据主导作用; 当 $q < 0$ 时, 多普勒谱中具有小波动特性的序列占主导作用。海面人造目标往往具有一定规则的结构, 本身不具有多重分形特性, 而海杂波具有多重分形特性, 目标的出现会影响波动函数中较大波动序列的分布情况, 导致 $q > 0$ 时目标距离单元与纯杂波单元的分形特征呈现出差异。

3 基于多普勒谱非广延熵的目标检测方法

3.1 实测海杂波特性分析

本文采用的实验数据来自加拿大McMaster大学的IPIX雷达数据库网站, 雷达频率为9.39 GHz, 脉冲重复频率为1 kHz。各组数据包含同步收集的上述HH, VV, HV和VH 4种极化方式数据, 所选数据的信杂比在-2~18 dB范围内^[24,25], 如图1所示。每个数据文件含14个距离门的回波信号, 目标主要占据1个距离单元, 目标所在单元旁边有2~3个影响单元, 数据主要参数如表1所示。其表面包裹一层用来增强信号的铝箔。目标漂浮在海面上, 不断上浮和下落。

3.1.1 多重分形特性分析

采用MF-DFA方法分析实测海杂波Doppler谱的多重分形特性。

步骤1 判断海杂波的分形特性: 对实测海杂波数据 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 计算其离散频谱 $\tilde{\mathbf{X}} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_N\}$, 然后对 $\tilde{\mathbf{X}}$ 采用MF-DFA方法分析其多重分形特性。图2和图3分别为含目标单元和纯海杂波单元在不同 q 值时的 $\log_2(F^{(q)}(m)) \sim \log_2(m)$ 曲线。

步骤2 判断海杂波的多重分形特性: 对全部的14个距离单元估计 $\log_2(F^{(q)}(m)) \sim \log_2(m)$ 曲线的在不同 q 值时斜率, 并求其 $H(q)$ 谱。得到的14个距离单元的 $H(q) \sim q$ 曲线如图4所示。

由图2和图3可以得出, 在一定尺度范围内 $\log_2(F^{(q)}(m)) \sim \log_2(m)$ 曲线基本呈线性关系, 所以该海杂波为分形的; 由图4可以得出, $H(q) \sim q$ 曲线不是常数, 所以该海杂波是多重分形的。

3.1.2 多普勒谱特性分析

对海面目标而言, 散射点之间相对静止的成分较多, 其多普勒谱往往较为集中。而无目标的纯杂波单元, 由于其粗糙及各散射点之间的杂乱运动特

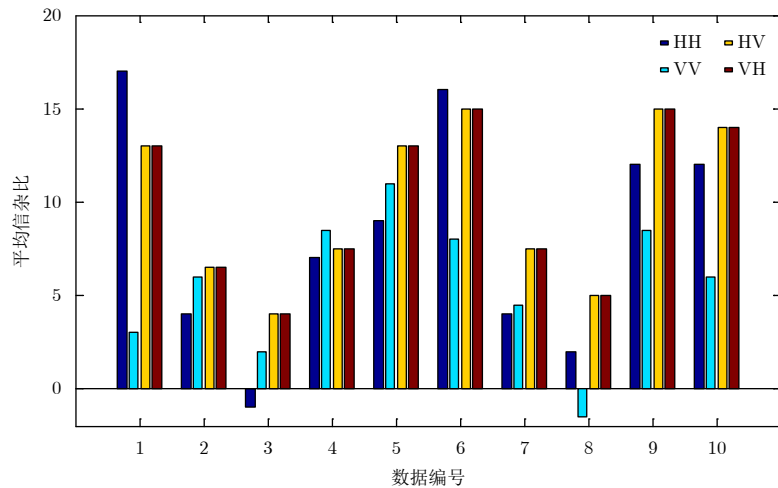


图 1 4种极化方式的平均信杂比

Fig. 1 The average SCR of four polarizations

点，其多普勒谱显得杂乱展宽。以数据文件#280为例，对目标所在单元(第8距离单元)与纯海杂波单元(以第1距离单元为例)进行256点快速傅里叶变

换(Fast Fourier Transform, FFT)，得到其多普勒谱如图5所示。可以明显看到含目标单元多普勒谱较纯海杂波单元多普勒谱聚集性高。因为目标属于锚定的，所以其频点位于零频附近。

表 1 1993年IPIX雷达数据主要参数说明

Tab. 1 Description of the data sets of IPIX radar database in 1993

数据编号	目标所在单元	受目标影响单元	风速(km/h)	浪高(m)
#17	9	8:11	9	2.2
#26	7	6:8	9	1.1
#30	7	6:8	19	0.9
#31	7	6:9	19	0.9
#40	7	5:8	9	1.0
#54	8	7:10	20	0.7
#280	8	7:10	10	1.6
#310	7	6:9	33	0.9
#311	7	6:9	33	0.9
#320	7	6:9	28	0.9

将每个距离单元的 2^{17} 个数据分割成512个数据长度256的数据序列，然后对每个序列进行FFT得

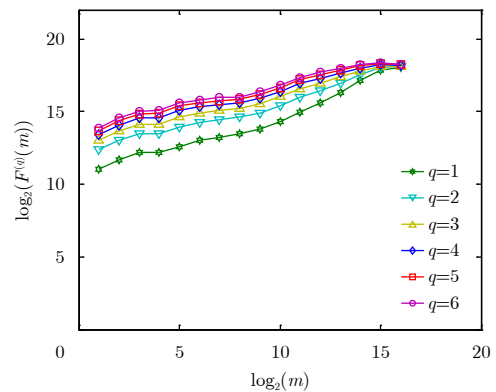


图 3 纯杂波单元 $\log_2(F^{(q)}(m)) \sim \log_2(m)$ 曲线

Fig. 3 $\log_2(F^{(q)}(m)) \sim \log_2(m)$ Curve of clutter cell

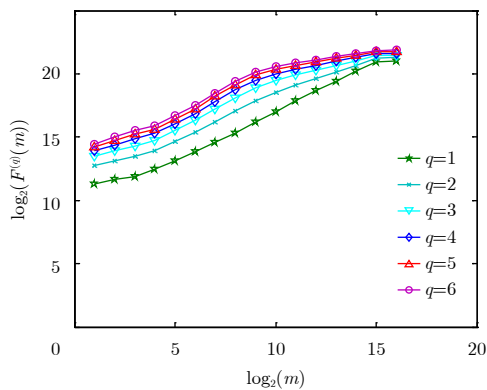


图 2 目标单元 $\log_2(F^{(q)}(m)) \sim \log_2(m)$ 曲线

Fig. 2 $\log_2(F^{(q)}(m)) \sim \log_2(m)$ Curve of target cell

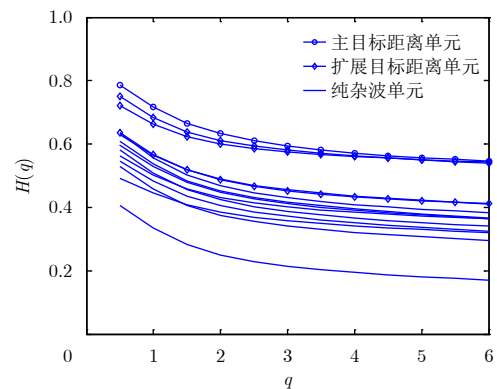


图 4 $H(q) \sim q$ 曲线

Fig. 4 $H(q) \sim q$ Curve

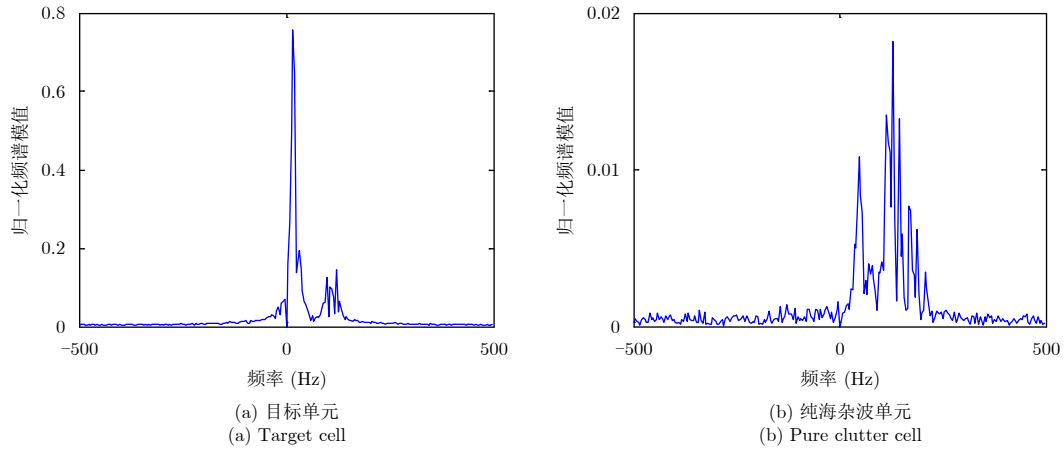


图 5 纯海杂波Doppler谱与含目标Doppler谱比较

Fig. 5 Comparison of Doppler spectrums of target and pure clutter cell

到多普勒谱向量 $\tilde{\mathbf{X}}$ ，按照式(5)分别计算其多普勒谱在不同 q 值时的非广延熵的平均值如表2所示，非广延熵越小，多普勒谱越聚集，目标存在的可能性越大；非广延熵越大，多普勒谱越分散，目标存在的可能性越小。由表2可以看出，含目标单元回波多普勒谱非广延熵值在同一 q 值下较纯杂波单元低。由此可以采用多普勒谱非广延熵进行目标检测。

为了加强聚集程度的对比，对上述结果进行立方操作以及和值归一化，即 $x_i = \tilde{x}_i^3 / \sum_{k=1}^N \tilde{x}_k^3$, $i = 1, 2, \dots, N$ ，再进行非相参积累。图6为相邻16个脉冲积累后的归一化非广延熵值2维图。可以明显看出随着 q 值的增加，纯杂波单元和目标所在单元的熵值对比度呈现上升趋势。

为说明非广延熵用于区分目标与杂波单元具有普适性，对1993年的10组IPIX数据的目标和杂波单元分别计算 $q=2$ 时的非广延熵，取平均值得到统计直方图如图7所示。可以看出，不同极化方式下，对于不同信杂比的数据，目标单元和杂波单元的非广延熵皆具有较好的可分性，且目标的非广延熵值明显小于杂波的非广延熵值，可用于海面目标检测。

但是 q 值的增加也同时意味着计算量的加大，因此 q 值的选取至关重要，需要兼顾检测性能与运算量。不同的参数 q 反映出不同程度的非线性动力学特性，在多重分形特性分析中，非广延参数 q 表示的是回波多普勒非广延熵阶数， q 值的增加意味着非广延熵阶数的增加，能够反映的多普勒信息和

表 2 全部单元多普勒谱非广延熵值

Tab. 2 Tsallis entropy of Doppler spectrum of all the cells

距离单元号	$q = 0.5$	$q = 1.0$	$q = 2.0$	$q = 3.0$	$q = 4.0$	$q = 5.0$
1	0.7992	0.8919	0.9387	0.9564	0.9674	0.9748
2	0.7966	0.8851	0.9355	0.9553	0.9672	0.9751
3	0.7994	0.8768	0.9311	0.9533	0.9662	0.9744
4	0.8147	0.8757	0.9228	0.9449	0.9591	0.9687
5	0.8216	0.8727	0.9167	0.9392	0.9542	0.9647
6	0.8177	0.8707	0.9180	0.9418	0.9571	0.9674
7	0.6705	0.6834	0.7165	0.7511	0.7805	0.8045
8	0.6025	0.6017	0.6330	0.6725	0.7064	0.7343
9	0.6429	0.6522	0.6827	0.7191	0.7505	0.7760
10	0.7458	0.7839	0.8224	0.8526	0.8760	0.8939
11	0.8080	0.8668	0.9123	0.9368	0.9530	0.9642
12	0.8152	0.8717	0.9153	0.9372	0.9519	0.9623
13	0.8081	0.8635	0.9131	0.9382	0.9541	0.9647
14	0.8043	0.8671	0.9177	0.9419	0.9570	0.9672

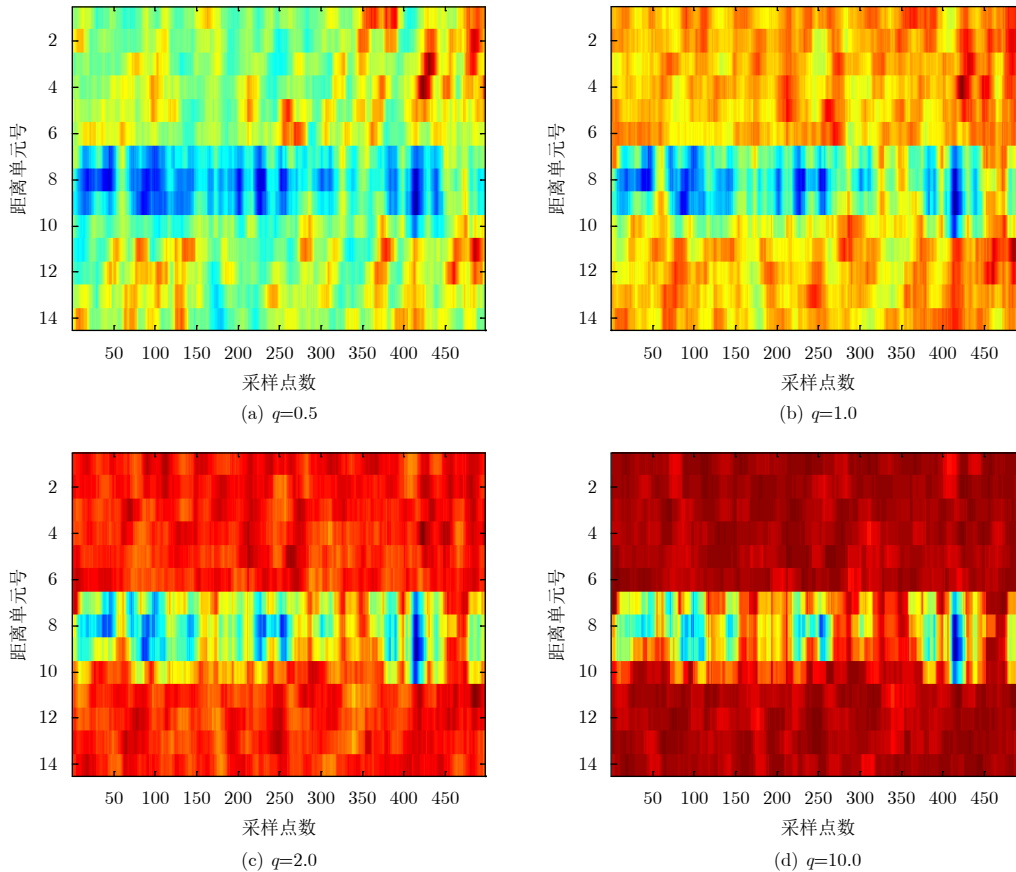


图 6 不同 q 时的归一化2维图

Fig. 6 Normalized two-dimensional graphs of different q values

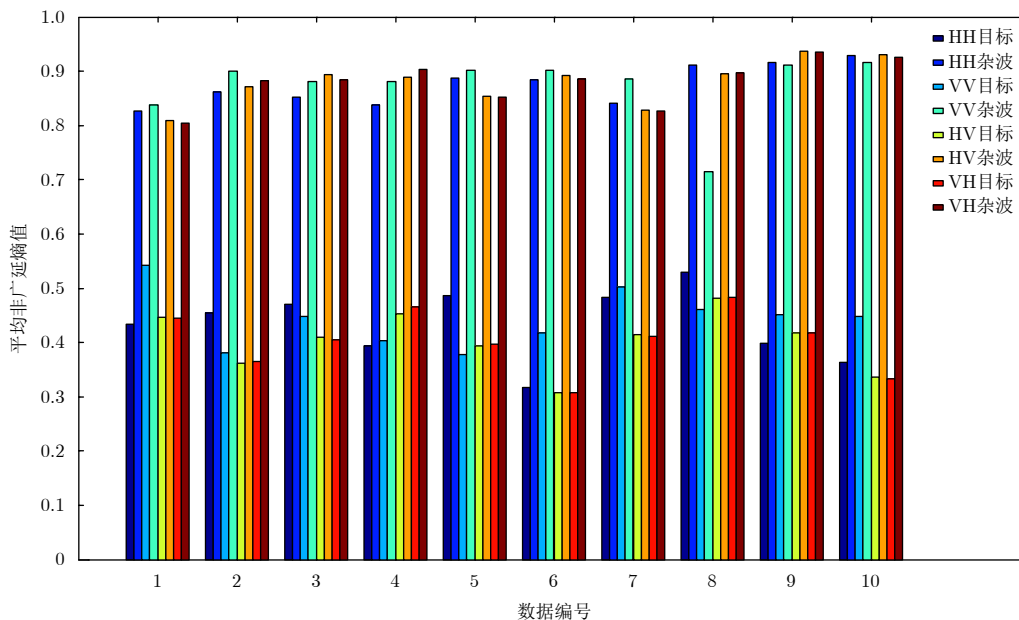


图 7 目标与杂波单元非广延熵统计直方图

Fig. 7 Histogram of Tsallis entropy of target cell and clutter cells

多重分形信息也随之增加。 q 的取值一方面与回波信号的信杂比有一定的关系，信杂比越低，需设置 q 值越大，以凸显目标与海杂波之间的差别^[9]。另一方面也与算法中计算多普勒谱时所使用的FFT点数

有关，FFT点数越大，需设置的 q 值越小。这是因为当信杂比较高时，杂波对目标的影响较小，目标所在单元与纯杂波单元本身的差异性较大，选取较低的 q 值便可以得到很好的检测效果。随着信杂比

的增加, 杂波对目标的影响变大, 目标和纯杂波单元的差异性变小, 此时为得到更多详细的回波信息, 需要选取较大的 q 值。同理, 随着FFT点数的增加, 得到的回波频谱包含的信息更为详细, 选取的最佳 q 值也可适当降低。

在这里, 定义不同 q 值下, 杂波和目标的对比度函数如下

$$C_{ra}(q) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} S_{q_{c(i)}}(q) - \frac{1}{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} S_{q_{t(j)}}(q) \quad (13)$$

其中, N_c 表示纯杂波单元的个数, N_t 表示含目标单元的个数, $S_{q_{c(i)}}(q), i = 1, 2, \dots, N_c$ 表示一定 q 值下纯杂波单元的非广延熵, $S_{q_{t(j)}}(q), j = 1, 2, \dots, N_t$ 表示一定 q 值下含目标单元的非广延熵。对对比度函数取最大值时的 q 值进行取整运算, 表3为选取不同的FFT点数时不同信杂比数据选取的最佳 q 值。

3.2 基于多普勒谱非广延熵的目标检测算法

虽然香农熵能很好地描述海杂波频谱的聚集性, 但其毕竟是一个统计意义上的检测统计量, 不能反映海杂波的非线性动力学特征。为了弥补这个

缺点, 采用能在一定程度上反映海杂波非线性动力学特性的非广延熵描述频谱的聚集性比采用仅能描述海杂波频谱聚集性的香农熵更有优势。本文提出基于多普勒谱非广延熵的海面小目标检测算法, 主要流程如下:

步骤 1 取雷达回波数据进行多重分形特性分析, 若满足多重分形特性, 选择最佳 q 值;

步骤 2 将回波的多普勒谱向量 $\tilde{\mathbf{X}} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_N\}$ 进行和值归一化, 即 $x_i = \tilde{x}_i / \sum_{k=1}^N \tilde{x}_k, i = 1, 2, \dots, N$, 可看作是概率密度函数, 计算多普勒谱非广延熵 S_q 。为提高检测性能, 可以选择对回波 S_q 值进行非相参积累;

步骤 3 针对有目标海杂波与无目标海杂波频谱聚集性的不同, 采用CA-CFAR方法设置检测门限 T , 熵值超过门限认为无目标 H_0 , 熵值小于门限认为有目标 H_1 , 即

$$\begin{cases} H_0, & S_q > T \\ H_1, & S_q \leq T \end{cases} \quad (14)$$

具体实现流程图如图8所示。

4 检测性能分析

IPIX数据为低信杂比数据, 大致范围在 $-2 \sim 18$ dB之间。为检验该方法的有效性, 本文通过蒙特卡罗法计算不同 q 值时的检测概率, 检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 由下式计算。

$$P_d = \frac{N_{Ts}}{N_{Ta}} \quad (15)$$

$$P_f = \frac{N_{Cs}}{N_{Ca}} \quad (16)$$

式中, N_{Ts} 为采用含目标单元数据(第8距离单元)计算非广延熵小于门限的次数, N_{Ta} 为采用含目标单

表 3 不同FFT点数下最佳 q 值

Tab. 3 The best q values of different FFT points

数据编号	64	128	256	512
#280HH	6	3	3	2
#280VV	5	3	2	1
#280HV	4	3	2	2
#310HH	3	2	1	2
#310VV	8	3	3	3
#310HV	3	2	2	1
#311HH	3	2	1	1
#311VV	5	3	2	1
#311HV	3	2	1	1

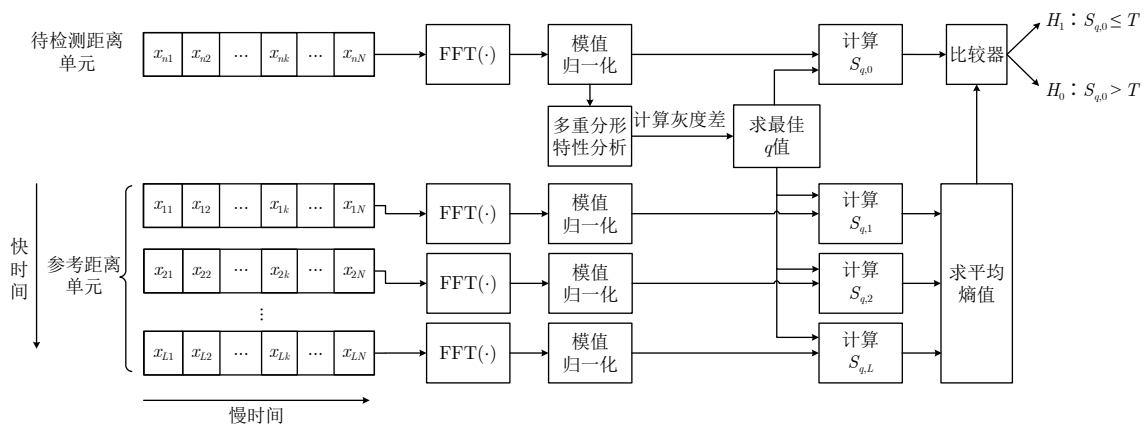


图 8 所提算法实现流程图

Fig. 8 Flow chart of proposed algorithm

元数据(第8距离单元)计算非广延熵的总次数; N_{Cs} 为采用所有纯海杂波数据计算非广延熵小于门限的次数, N_{Ca} 为采用所有纯海杂波数据计算非广延熵的总次数。门限是可变的, 所以可以计算出某虚警概率下的检测概率。

4.1 不同 q 值下的算法的检测性能

本文采用的IPIX雷达回波序列的长度为 2^{17} , 由于雷达采样率是1000 Hz, 选取#280数据文件(不同极化方式下信杂比分布于3~8 dB)、数据文件#310(不同极化方式下信杂比分布于-2~5 dB)、数据文件#311(不同极化方式下信杂比分布于8~15 dB), 对其HH, VV和HV 3个通道的数据进行验证。每一个数据文件长度为131072个采样点, 将其分为512个样本, 每个样本观测时间为0.256 s, 按照所提算法流程计算不同虚警概率下算法的检测概率, 结果如表4所示。可以得出, 当 q 小于最佳值时, 所提算法的检测概率随着 q 值的增加而增加; 当 q 值大于最佳值时, 随着 q 值的增加, 检测概率有所下降; 当 q 值较大时, 如 $q = 10$ 时, 检测概率下降且此时运算量巨大。由此可以得出, 在 q 值选择适当的情况下所提算法具有最佳检测性能。对于不同信杂比数据, 所提方法具有较好的检测性能, 信杂比越高, 检测效果越好。当选取观测时间为0.256 s, FFT点数为256时, 对于信杂比大于0 dB的数据, 采用所提方法检测概率可大于50%。

4.2 不同观测时间下算法的检测性能

频域Hurst指数方法是海杂波背景下常用的基于多重分形特性的小目标检测方法, 在观测时间较

长, 如序列长度为 2^{13} 的情况下检测概率通常可以高于80%, 然而, 随着观测时间的减少, 该方法的检测性能下降。选择数据文件#280为本次实验数据, 取每个样本的采样点序列长度分别为 2^7 , 2^8 , 2^9 和 2^{10} , 则样本数依次为1024, 512, 256和128。分别采用频域Hurst指数法、基于香农熵的检测方法和所提方法(取 $q = 3$)计算不同虚警概率下算法的检测概率, 结果如表5所示。可以得出, 在虚警概率一定的情况下, 随着序列长度的增加, 频域Hurst指数法、基于香农熵的检测方法和所提算法的检测性能基本都呈现增长趋势; 在序列长度较短, 即短时间观测的情况下, 频域Hurst指数方法检测性能下降严重, 而所提算法具有最高的检测性能。

对本文所提方法观测时间的下边界进行探索。选择具有不同信杂比的数据#280, #310和#311, 选取不同观测时间采用所提方法进行实验论证, 结果如表6-表8所示。首先选取观测时间为0.064 s, 结果如表6所示。由表6可以看出, 当观测时间为0.064 s时, 具有较低信杂比的#280和#310数据(低于10 dB)的检测概率已有部分低于50%, 而具有较高信杂比的#311数据(高于10 dB)的检测概率全部高于50%; 其次对低信杂比数据#280和#310, 进一步提高观测时间为0.128 s, 结果如表7所示。由表7可以看出, 当观测时间为0.128 s时, 检测概率大多已大于50%; 最后对高信杂比数据#311, 进一步降低观测时间为0.032 s, 结果如表8所示。由表8可以看出, 当观测时间为0.032 s时, 检测概率多数已低于50%。

表 4 不同 q 值下算法的检测概率(%)

Tab. 4 Detection probability of the proposed algorithm of different q values (%)

数据编号	q 取值	P_f								
		10^{-3}			10^{-2}			10^{-1}		
		HH	VV	HV	HH	VV	HV	HH	VV	HV
#280	$q = 1$	82.09	90.14	96.78	85.92	92.56	98.19	92.76	95.37	100
	$q = 2$	90.54	91.95	97.18	93.56	95.77	98.79	95.98	98.79	100
	$q = 3$	92.15	93.56	96.38	94.16	98.19	98.39	96.58	99.40	100
	$q = 10$	82.49	89.94	89.54	89.74	95.77	92.35	96.58	99.40	98.99
#310	$q = 1$	94.16	13.26	92.15	96.58	30.38	95.37	98.19	62.17	97.79
	$q = 2$	95.98	24.35	94.16	97.99	50.91	97.38	98.79	75.86	98.39
	$q = 3$	92.56	40.44	92.76	97.59	54.53	97.18	98.59	77.06	99.40
	$q = 10$	68.61	42.45	78.27	92.15	55.33	85.51	98.39	72.03	99.20
#311	$q = 1$	100	98.59	100	100	100	100	100	100	100
	$q = 2$	100	99.20	100	100	100	100	100	100	100
	$q = 3$	100	98.59	100	100	100	100	100	100	100
	$q = 10$	96.78	80.48	97.59	98.79	80.93	100	100	99.60	100

表 5 3种算法的检测概率(%)

Tab. 5 Detection probability of the three algorithms (%)

序列长度	方法	P_t		
		10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
2^7	频域Hurst指数法	1.00	16.30	46.20
	$q = 1$ (香农熵)	58.97	69.57	79.48
	$q = 3$ (非广延熵)	72.94	78.49	88.21
2^8	频域Hurst指数法	8.50	21.30	35.80
	$q = 1$ (香农熵)	82.09	85.92	92.76
	$q = 3$ (非广延熵)	92.15	94.16	96.58
2^9	频域Hurst指数法	15.50	32.80	43.10
	$q = 1$ (香农熵)	82.16	84.23	90.04
	$q = 3$ (非广延熵)	88.38	95.44	97.51
2^{10}	频域Hurst指数法	52.90	63.80	78.90
	$q = 1$ (香农熵)	61.95	80.53	93.81
	$q = 3$ (非广延熵)	89.38	98.23	100

表 6 观测时间为0.064 s所提方法检测概率(%)

Tab. 6 Detection probability when observation time is 0.064 s (%)

数据编号	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
#280HH	35.51	46.83	61.53
#280VV	38.07	47.47	59.42
#280HV	54.60	62.12	74.13
#310HH	45.01	52.23	66.99
#310VV	9.64	15.69	30.99
#310HV	45.15	54.06	67.34
#311HH	82.29	89.52	95.52
#311VV	64.24	74.03	86.08
#311HV	85.98	93.31	97.15

表 7 观测时间为0.128 s所提方法检测概率(%)

Tab. 7 Detection probability when observation time is 0.128 s (%)

数据编号	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
#280HH	73.64	78.49	88.31
#280VV	72.15	78.10	85.73
#280HV	88.21	92.37	95.24
#310HH	80.57	88.80	95.24
#310VV	31.62	38.75	58.97
#310HV	83.25	91.97	97.42

综上所述,当观测时间为0.064 s时,具有较低信杂比的数据(低于10 dB)检测概率大多数低于50%,而较高信杂比数据(高于10 dB)大于50%。当观测时间降低至0.032 s时,较高信杂比数据(高于10 dB)也降至50%以下。

表 8 观测时间为0.032 s所提方法检测概率(%)

Tab. 8 Detection probability when observation time is 0.032 s (%)

数据编号	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
#311HH	32.08	40.55	53.25
#311VV	15.54	23.45	34.94
#311HV	40.36	48.35	59.76

5 结束语

本文通过对目标和纯海杂波多普勒谱的聚集性和多重分形特性进行分析,提出了基于多普勒谱非广延熵的海面小目标检测方法。该算法综合利用了海杂波的统计特性及非线性特性,解决了基于多重分形特性的检测算法中需要长时间观测的问题。最后利用实测数据将所提方法与现有的频域Hurst指数法及基于香农熵的检测方法进行对比,结果表明,本文方法具有较好的检测性能。

参 考 文 献

- [1] FARINA A and STUDER F A. A review of CFAR detection techniques in radar systems[J]. *Microwave Journal*, 1986, 29(5): 115, 116, 118.
- [2] 丁昊,董云龙,刘宁波,等.海杂波特性认知研究进展与展望[J]. *雷达学报*, 2016, 5(5): 499-516. doi: [10.12000/JR16069](https://doi.org/10.12000/JR16069).
DING Hao, DONG Yunlong, LIU Ningbo, et al. Overview and prospects of research on sea clutter property cognition[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(5): 499-516. doi: [10.12000/JR16069](https://doi.org/10.12000/JR16069).
- [3] HAYKIN S, CURRIE B W, and KESLER S B. Maximum-entropy spectral analysis of radar clutter[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1982, 70(9): 953-962. doi: [10.1109/PROC.1982.12426](https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12426).
- [4] 刘劲,王雪,刘宏伟.基于多普勒谱特征的海杂波背景下小目标检测[J]. *现代雷达*, 2008, 30(11): 63-66. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2008.11.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2008.11.016).
LIU Jin, WANG Xue, and LIU Hongwei. Small target detection in sea clutter background based on Doppler spectrum characteristics[J]. *Modern Radar*, 2008, 30(11): 63-66. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2008.11.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2008.11.016).
- [5] 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).
- [6] DUK V, ROSENBERG L, and NG B W H. Target detection in sea-clutter using stationary wavelet transforms[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1136-1146. doi: [10.1109/TAES.2017.2667558](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2667558).
- [7] HAYKIN S, BAKKER R, and CURRIE B W. Uncovering nonlinear dynamics-the case study of sea clutter[J].

- Proceedings of the IEEE*, 2002, 90(5): 860–881. doi: [10.1109/JPROC.2002.1015011](https://doi.org/10.1109/JPROC.2002.1015011).
- [8] LO T, LEUNG H, LITVA J, *et al.* Fractal characterisation of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets[J]. *IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing*, 1993, 140(4): 243–250. doi: [10.1049/ip-f-2.1993.0034](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1993.0034).
- [9] 孙康, 金钢, 朱晓华. 基于波动分析的海上小目标检测[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(4): 882–887. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00927](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00927).
SUN Kang, JIN Gang, and ZHU Xiaohua. Small target detection within sea clutter based on the fluctuation analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 882–887. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00927](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00927).
- [10] GAN D and SHOUHONG Z. Detection of sea-surface radar targets based on multifractal analysis[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(13): 1144–1145. doi: [10.1049/el:20000800](https://doi.org/10.1049/el:20000800).
- [11] 刘宁波, 关键, 黄勇, 等. 基于频域多尺度Hurst指数的海杂波中目标检测方法[J]. *电子学报*, 2013, 41(3): 424–431. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.002).
LIU Ningbo, GUAN Jian, HUANG Yong, *et al.* Target detection within sea clutter based on multi-scale Hurst exponent in frequency domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(3): 424–431. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.002).
- [12] 刘宁波, 黄勇, 关键, 等. 实测海杂波频域分形特性分析[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(4): 929–935. doi: [10.3724/SP.J.11.1146.2011.00856](https://doi.org/10.3724/SP.J.11.1146.2011.00856).
LIU Ningbo, HUANG Yong, GUAN Jian, *et al.* Fractal analysis of real sea clutter in frequency domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 929–935. doi: [10.3724/SP.J.11.1146.2011.00856](https://doi.org/10.3724/SP.J.11.1146.2011.00856).
- [13] 刘宁波, 关键, 王国庆, 等. 基于海杂波FRFT谱多尺度Hurst指数的目标检测方法[J]. *电子学报*, 2013, 41(9): 1847–1853. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.029).
LIU Ningbo, GUAN Jian, WANG Guoqing, *et al.* Target detection within sea clutter based on multi-scale Hurst exponent in FRFT domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(9): 1847–1853. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.029).
- [14] 陈小龙, 刘宁波, 宋杰, 等. 海杂波FRFT域分形特征判别及活动目标检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(4): 823–830. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00486](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00486).
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. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00486](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00486).
- [15] LUO Feng, ZHANG Danting, and ZHANG Bo. The fractal properties of sea clutter and their applications in maritime target detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1295–1299. doi: [10.1109/LGRS.2013.2237750](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2237750).
- [16] FAN Yifei, LUO Feng, LI Ming, *et al.* Weak target detection in sea clutter background using local-multifractal spectrum with adaptive window length[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(7): 835–842. doi: [10.1049/iet-rsn.2014.0286](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0286).
- [17] FAN Yifei, LUO Feng, LI Ming, *et al.* Fractal properties of autoregressive spectrum and its application on weak target detection in sea clutter background[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(8): 1070–1077. doi: [10.1049/iet-rsn.2014.0473](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0473).
- [18] TSALLIS C, PLASTINO A R, and ZHENG W M. Power-law sensitivity to initial conditions—New entropic representation[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 1997, 8(6): 885–891. doi: [10.1016/S0960-0779\(96\)00167-1](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(96)00167-1).
- [19] TSALLIS C and BRIGATTI E. Nonextensive statistical mechanics: A brief introduction[J]. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2004, 16(3): 223–235. doi: [10.1007/s00161-004-0174-4](https://doi.org/10.1007/s00161-004-0174-4).
- [20] FURUICHI S. On uniqueness theorems for Tsallis entropy and Tsallis relative entropy[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(10): 3638–3645. doi: [10.1109/TIT.2005.855606](https://doi.org/10.1109/TIT.2005.855606).
- [21] 曹克非, 王参军. Tsallis熵与非广延统计力学[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2005, 27(6): 514–520. doi: [10.3321/j.issn:0258-7971.2005.06.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-7971.2005.06.011).
CAO Kefei and WANG Canjun. Tsallis entropy and nonextensive statistical mechanics[J]. *Journal of Yunnan University*, 2005, 27(6): 514–520. doi: [10.3321/j.issn:0258-7971.2005.06.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-7971.2005.06.011).
- [22] BUNTE C and LAPIDOTH A. Maximum Rényi entropy rate[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(3): 1193–1205. doi: [10.1109/TIT.2016.2521364](https://doi.org/10.1109/TIT.2016.2521364).
- [23] 范一飞, 罗丰, 李明, 等. 海杂波AR谱多重分形特性及微弱目标检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(2): 455–463. doi: [10.11999/JEIT150581](https://doi.org/10.11999/JEIT150581).
FAN Yifei, LUO Feng, LI Ming, *et al.* The multifractal properties of AR spectrum and weak target detection in sea clutter background[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 455–463. doi: [10.11999/JEIT150581](https://doi.org/10.11999/JEIT150581).
- [24] STEIN D W J. Detection of random signals in Gaussian mixture noise[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(6): 1788–1801. doi: [10.1109/18.476307](https://doi.org/10.1109/18.476307).
- [25] SHI Sainan and SHUI Penglang. Sea-surface floating small target detection by one-class classifier in time-frequency feature space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(11): 6395–6411. doi: [10.1109/TGRS.2018.2838260](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2838260).

作 者 简 介



陈世超(1992-), 女, 西安电子科技大学
雷达信号处理国家重点实验室博士生,
研究方向为海杂波建模与仿真、海杂波
背景下的目标检测。

E-mail: scchen0115@163.com



胡 冲(1987-), 男, 西安电子科技大学
雷达信号处理国家重点实验室博士生,
现就职于西南电子技术研究所, 研究方
向为海杂波特性分析与建模。

E-mail: hake_hc@163.com



罗 丰(1971-), 男, 西安电子科技大学
雷达信号处理国家重点实验室博士生导
师, 教授, 研究方向为雷达系统设计、
雷达信号与信息处理、高速实时信号处理。

E-mail: luofeng@xidian.edu.cn



聂学雅(1995-), 女, 西安电子科技大学
雷达信号处理国家重点实验室硕士生,
研究方向为雷达目标检测。

E-mail: cute_nie0019@163.com