

海杂波 FRFT 域的分形特征分析及小目标检测方法

行鸿彦 张强 徐伟

Fractal property of sea clutter FRFT spectrum for small target detection

Xing Hong-Yan Zhang Qiang Xu Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 110502 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.110502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种识别关联维数无标度区间的新方法

[A novel method to identify the scaling region of correlation dimension](#)

物理学报.2015, 64(13): 130504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130504>

基于多重分形去趋势波动分析法的交通流多重分形无标度区间自动识别方法

[Multi-fractal detrended fluctuation analysis algorithm based identification method of scale-less range for multi-fractal characteristics of traffic flow](#)

物理学报.2014, 63(20): 200504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.200504>

基于小波 leaders 的海杂波时变奇异谱分布分析

[Time-varying singularity spectrum distribution of sea clutter based on wavelet leaders](#)

物理学报.2014, 63(15): 150503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.150503>

空间交替 Julia 集的反馈控制与线性广义同步

[Feedback control and linear generalized synchronization of spatial-alternated Julia sets](#)

物理学报.2014, 63(6): 060503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.060503>

非光滑热曲线的分数阶次可微性研究

[Fractional differentiability of the non-smooth heat curve](#)

物理学报.2012, 61(19): 190502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.190502>

海杂波FRFT域的分形特征分析及小目标检测方法*

行鸿彦[†] 张强 徐伟

(南京信息工程大学, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

(南京信息工程大学, 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044)

(2014年11月26日收到; 2015年1月9日收到修改稿)

针对海杂波背景下海情对小目标检测的严重影响, 本文研究了实测海杂波在分数阶 Fourier 变换 (FRFT) 域的分形特征, 分别提出了单、高尺度下的分形检测方法. 由数学定义推得, FRFT 在不同阶数和尺度情况下, 不具有一致的自相似特性, 采用多重分形趋势波动分析法确定分形参数 $H(q)$, 分析了海杂波在不同海情、距离和极化条件下的分形特征. 在单尺度基础上结合 FRFT 的变阶优势, 提出了阶数自适应的小目标检测方法; 高尺度条件下, 比较了不同因素对海杂波 FRFT 域多重分形参数的影响. 结果表明: 海杂波 FRFT 域可用变换阶数的方法检测到湮没在复杂海情中的小信号, 检测门限多数提高 200% 以上, 比采用时域信号提高 26.3%. $H(q)$ 在负高尺度上具有明显的多重分形特征差异, $H(q)$ - q 曲线满足反正切分布, 纯海杂波与含目标数据的拟合幅值比分别大于 1.8(HH) 和 1.4(VV), 为海杂波背景小目标检测提供了判定依据.

关键词: 海杂波, 分数阶傅里叶变换, 分形特征, 小目标检测

PACS: 05.45.Df

DOI: 10.7498/aps.64.110502

1 引言

海杂波指的是雷达照射海面后散射的回波, 受到诸如风、浪等多种因素的影响, 海上小目标的雷达散射截面积 (radar cross section, RCS) 很小, 被淹没在海杂波和噪声中. 实测海杂波具有类似噪声的特性, 传统频谱分析方法并不适用, 如何从复杂海情中准确、可靠地发现小目标, 已成为当前雷达信号处理领域的研究重点.

传统方法大多依靠统计建模, 如对数正态分布^[1], Weibull^[2] 分布和相关 K 分布等^[3] 统计模型, 通过查验分布特性的变化来检测小目标. 传统检测模型大多建立在海面平稳的基础上, 实际海杂波受到潮汐、湿度等多种因素影响, 具有剧烈的非平

稳性, 当海情变化且信杂比 (signal-to-clutter ratio, SCR) 较低时, 基于统计的检测方法基本失效. 随着海浪内部机理研究的发展, 1990 年 Haykin 等^[4] 发现海杂波嵌入维数介于 5—9, 最大 Lyapunov 指数为正, 表明海杂波属于类似随机的混沌系统. 随后相关的研究者^[5-7] 采用相空间重构与学习机结合的方法检测小目标, 并对神经网络和支持向量机不断改进, 取得了一定的效果, 但学习机本身存在很多问题, 如训练需要大量的数据和时间, 训练样本无法反映复杂的海情, 导致模型的泛化能力差, 难以满足实际需求.

1982 年 Mandelbrot^[8] 提出了研究自相似和标度不变性的分形理论, 作为非线性科学的前沿和重要分支, 已广泛地应用于生物医学、气象和水文等领域. 1993 年 Lo 等^[9] 首次采用单尺度分形维

* 国家自然科学基金 (批准号: 61072133)、江苏普通高校研究生实践创新计划项目 (批准号: SJZZ_0112)、江苏省产学研联合创新资金计划 (批准号: BY2013007-02, BY2011112)、江苏省高校科研成果产业化推进项目 (批准号: JHB2011-15)、江苏省“信息与通信工程”优势学科和江苏省“六大人才高峰”计划资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xinghy@nuist.edu.cn

数分析海杂波, 利用小目标存在区域与周边分形维数的差异进行检测. 1995年 Savaidis 等^[10] 结合散射和分形理论, 发现散射信号能够反映海面的自相似结构, 给海面小目标检测提供了新的思路. 文献^[11—13] 利用分数布朗运动 (fractional Brownian motion, FBM) 对海杂波建模, 证明其在一定范围内满足分形特征, 结合 Hurst 指数实现了同海情条件下的小目标检测, 并讨论了海杂波的多重分形特性. 在国内, 石志广等^[14] 验证了海杂波的多重分形特性, 仿真并模拟了海杂波的统计和多重分形特性, 但未对实际数据进行研究. 姜斌等^[15] 通过计算海杂波的 Hurst 和 Lyapunov 指数, 验证了海杂波的混沌分形特性, 但并未深入研究二者的关系. 关键等^[16] 将多重分形理论与支持向量机结合, 实现了海面目标的分类, 但没有考虑到复杂的环境因素. 总的来说, 目前大部分研究局限于从有限的样本中确定阈值进行检测, 随着海情的变化, 海杂波分形特征并不稳定, 设定单一的分数维阈值不具有普适效果.

分数阶 Fourier 变换^[17] (FRFT) 是经典 Fourier 变换的推广, 能够对运动目标的速度和加速度进行补偿, 对非匀速目标的回波进行能量

聚集, 从而有效地提升 SCR. FRFT 处理海杂波时不需要模型参数, 且能获知目标的运动状态. 文献^[18, 19] 均在 FRFT 域条件下, 利用单尺度分数维差异进行小目标检测, 但未考虑到不同海情对分数阶和尺度的影响. 近年来, 我们对海杂波背景下的小目标检测进行了一定的研究, 通过优化混沌参数等方式提高检测的精度, 并采用分形方法对海杂波的时域信号进行初步探索^[20—22]. 本文分析了实测海杂波在 FRFT 域的分形特征, 提出了基于不同尺度的小目标检测方法, 以期进一步提高海杂波背景下小目标的检测能力.

2 基本理论

2.1 自相似过程 FRFT 谱的自相似性

FRFT^[17] 作为 Fourier 变换的广义形式, 定义在时域函数 $x(t)$ 的 p 阶 FRFT 是一个线性积分运算, 即

$$X_p(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) K_p(t, u) dt, \quad (1)$$

式中 $X_p(u)$ 是定义在分数频率 u 域的 FRFT 谱, p 为变换阶数, $K_p(t, u)$ 为 FRFT 的核函数

$$K_p(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1 - j \cot \alpha}{2\pi}} \exp\left(j \frac{u^2 + t^2}{2} \cot \alpha - jut \csc \alpha\right), & \alpha \neq n\pi, \\ \delta(t - u), & \alpha = 2n\pi, \\ \delta(t + u), & \alpha = (2n + 1)\pi, \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\alpha = p\pi/2$ 为旋转角, n 为整数, 当 $p = 1$ 时, $X_1(u)$ 为 $x(t)$ 的 Fourier 变换, 因此 Fourier 变换是 FRFT 的特例. 限于篇幅, 本文仅对 FRFT 谱的自相似特性进行分析.

1968 年 Mandelbrot 等^[23] 提出的分数布朗运动 (fractional Brownian motion, FBM) 模型是典型的分形数学模型, 分数布朗运动 $B_H(t)$ 的自相似性可用 Hurst 指数表征, 在统计意义下成立, 即

$$B_H(\lambda t) \stackrel{d}{=} \lambda^H B_H(t), \quad (3)$$

式中尺度系数 $\lambda > 0$, Hurst 指数 $H \in (0, 1)$, d 表示统计分布相同. 令 $t' = \lambda t$, 设 $X_{B_H}^{(p_\alpha)}(u)$ 为 $B_H(t)$ 的 p_α 阶 FRFT 谱^[24], 代入 (1) 式, 得到

$$X_{B_H}^{(p_\alpha)}(u) \stackrel{d}{=} \frac{1}{\lambda^{H+1}} \cdot \sqrt{\frac{1 - j \cot \alpha}{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} B_H(t')$$

$$\times \exp\left(j \frac{u^2 \lambda^2 + t'^2 \cot \alpha}{2 \lambda^2} - j \frac{ut'}{\lambda} \csc \alpha\right) dt'. \quad (4)$$

令 $\cot \beta = \frac{\cot \alpha}{\lambda^2}$, 则 (4) 式变为

$$X_{B_H}^{(p_\alpha)}(u) \stackrel{d}{=} \frac{1}{\lambda^H} \cdot \sqrt{\frac{1 - j \cot \alpha}{\lambda^2 - j \cot \alpha}} \times \exp\left\{j \frac{u^2}{2} \cot \alpha \left(1 - \frac{\cos^2 \beta}{\cos^2 \alpha}\right)\right\} \times X_{B_H}^{(p_\beta)}\left(\frac{u \sin \beta}{\lambda \sin \alpha}\right). \quad (5)$$

由 (5) 式可知, 在相同变换阶数 p_α 下, 尺度变换后的分数布朗运动 $B_H(t')$ 的 FRFT 谱与 $B_H(t)$ 的尺度变换系数有关, 是 FRFT 谱 $X_{B_H}^{(p_\alpha)}(u)$ 的尺

度变换及 chirp 调制后的结果. (5) 式两边取模值得

$$\left| X_{BH}^{(p\alpha)}(u) \right| = \frac{1}{|\lambda|^H} \cdot \sqrt[4]{\frac{1 + \cot^2 \alpha}{\lambda^4 + \cot^2 \alpha}} \times \left| X_{BH}^{(p\beta)} \left(\frac{u \sin \beta}{\lambda \sin \alpha} \right) \right|. \quad (6)$$

由 (6) 式发现, $B_H(t')$ FRFT 谱的幅值要受到尺度系数和变换阶数共同影响. 结合实测海杂波信号, 得到两点启示: 一方面当尺度变化时, 需要采用不同变换阶数才能放大分形特征的差异; 另一方面, 尺度和变换阶数的相互影响给实际数据处理带来很大的不确定性, 单一分形参数描述 FRFT 谱可能带来误差, 使高尺度分析成为可能.

2.2 多重分形趋势波形分析法 (MF-DFA)

Hurst 指数 H 是数据自相似程度的重要指标, 可采小波波动分析 [25] 和去势波动分析等 [26] 方法估计. 去势波动分析法 (detrended fluctuation analysis, DFA) 于 1994 年由 Peng 等 [26] 提出, 主要用于计算时间序列的长相关性. 2002 年 Kantelhardt 等 [27] 在此基础上提出了多重分形去势波动分析法 (multifractal-DFA, MF-DFA), 作为 DFA 的广义定义, 旨在分析非稳态时间序列的多重分形特性, MF-DFA 的主要步骤如下:

1) 对不满足随机游走特性的时间序列 $\{x(i), 0 < i < N\}$ 构造去均值的和序列

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i [x_k - \bar{x}], \quad (7)$$

其中 \bar{x} 为时间序列均值, 若满足则略过此步骤, 即 $Y(i) = x(i)$.

2) 将新序列 $Y(i)$ 分解成 $N_m = \text{int}(N/m)$ 个等长不相交的子序列, 考虑到序列信息的完整性, 若不能完全分解, 则进行反向分解, 得到 $2N_m$ 个子序列.

3) 对各子序列采用最小二乘法进行 k 阶 ($k = 1, 2, \dots$) 多项式拟合, 求得子序列的局部趋势项 $y_{i,\text{fit}}$, 求取均方差

$$F^2(i, m) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left\{ y[(i-1) \cdot m + j] - y_{i,\text{fit}}(j) \right\}^2, \quad (i = 1, 2, \dots, N_m), \quad (8)$$

$$F^2(i, m) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left\{ y[N - (i-1) \cdot m + j] - y_{i,\text{fit}}(j) \right\}^2, \quad (i = N_m + 1, N_m + 2, \dots, 2N_m). \quad (9)$$

4) 计算 q 阶波动函数

$$F_q(m) = \left\{ \frac{1}{2N_m} \sum_{i=1}^{2N_m} [F^2(i, m)]^{q/2} \right\}^{1/q}. \quad (10)$$

5) $F_q(m)$ 是关于数据长度 m 和分形阶数 q 的函数, 存在关系 $F_q(m) \propto m^{H(q)}$, 计算分形参数

$$H(q) = \frac{d \ln [F_q(m)]}{d \ln(m)}. \quad (11)$$

$H(q)$ 取双对数线性区间的斜率值, 若 $F_q(m)$ 与 q 无关, 表明时间序列局部结构一致, 是单尺度分形结构. 若 $H(q)$ 为 q 的函数, 则表明具有多重分形特征. 当 $q = 2$ 时, $H(q)$ 即为 Hurst 指数, 可见 MF-DFA 是 DFA 的广义定义.

3 海杂波 FRFT 分形特征分析

本文采用加拿大 McMaster 大学的 IPIX 雷达实测海杂波数据, 其发射频率为 9.39 GHz, 脉冲重复频率达到 1000 Hz, 雷达采用 HH 与 VV 极化方式, 共包含 14 种海情和距离单元, 数据长度 131072, 并标明主、次目标与纯海杂波所在的距离门.

3.1 统计特性

由 (5) 式分析海杂波 FRFT 域在各个变换阶数下的能量分布, 得到海杂波的 FRFT 幅值 (无量纲数). 如图 1 所示, 不同的变换阶数的 FRFT 的幅值起伏很大, 仅凭幅值难以区分小目标与纯海杂波, 主要的原因在于海面和小目标均有一定的速度和加速度, FRFT 难以针对性的进行补偿和聚集.

采用 FBM 建模, 若海杂波在 FRFT 域符合 FBM 模型, 根据定义增量也满足自相似性, 设 FRFT 域的海杂波增量具有遍历性, 采用均值与方差作为标准对其处理, 如图 2 所示, 两种极化方式的均值接近零, 其增量分布大致符合高斯分布, HH 极化的分布情况要优于 VV 极化. 将增量延迟分成不相交的几个子段, 分析其长程相关性, 计算方差得到表 1, 发现方差基本不随时间变化, 因而可采用 FBM 对海杂波 FRFT 域建模.

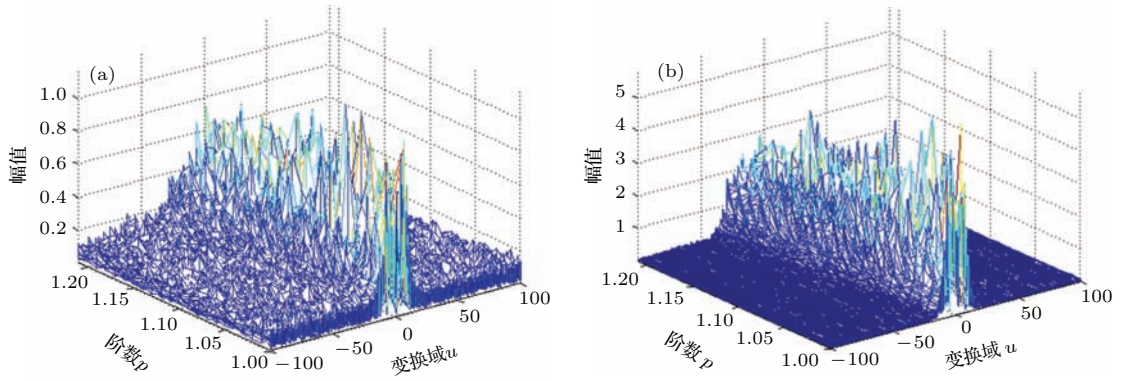


图1 雷达回波的FRFT幅值图 (a) HH极化; (b) VV极化

Fig. 1. FRFT amplitude of radar echo: (a) HH polarization; (b) VV polarization.

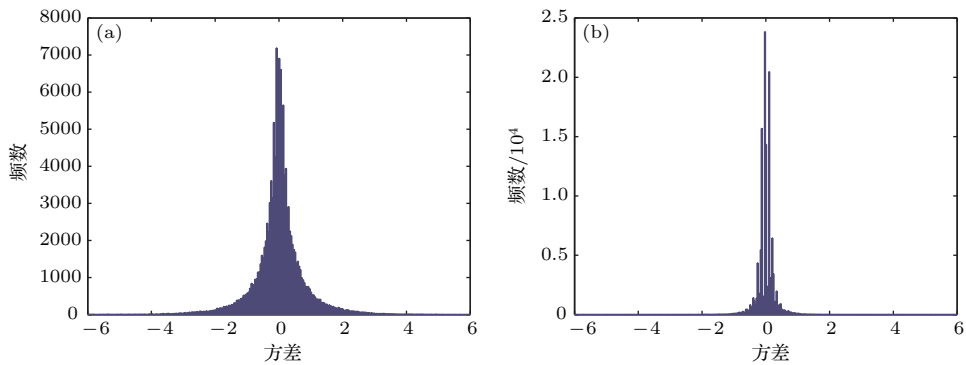


图2 海杂波FRFT域海杂波增量直方图 (a) HH极化; (b) VV极化

Fig. 2. Incremental straight side in FRFT domain of sea clutter: (a) HH polarization; (b) VV polarization.

表1 FRFT域海杂波统计增量分布情况

Table 1. Statistical increment distribution in FRFT domain of sea clutter.

极化方式	均值/ μ	方差/ σ^2	子段1方差	子段2方差	子段3方差
HH	-5.5256×10^{-7}	0.0279	0.0260	0.0274	0.0250
VV	2.7244×10^{-6}	0.0202	0.0183	0.0203	0.0194

3.2 分形参数

由图2可知,海杂波并不完全满足FBM.采用去势波动分析法(DFA)对实测海杂波FRFT域数

据处理,得到图3,查找满足分形特征的数据范围.为了便于处理,两种极化数据的无标度区间取 2^4-2^{15} , $F(m)-m$ 的双对数曲线是一条以 H 为斜率的曲线,可通过最小二乘拟合得到FRFT域的

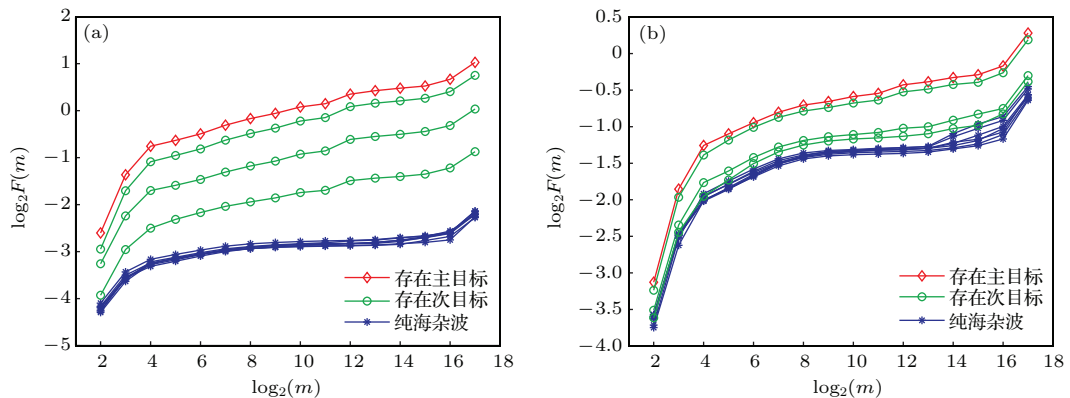


图3 17#不同距离门海杂波的 $F_2(m)-m$ 双对数分布 (a) HH极化; (b) VV极化

Fig. 3. $F_2(m)-m$ double logarithmic distribution of 17# in different distance: (a) HH polarization; (b) VV polarization.

Hurst 指数 H , 分形维数 $D = 2 - H$. 在分形区间内, 纯海杂波的曲线基本重叠, 表明其分形特征一致. 主、次目标的斜率 H 大致相同, 均大于纯海杂波. 主目标的截距最高, 次目标截距较分散, 表明含目标的海杂波分形特征存在差异. HH 极化的分形差异要好于 VV 极化, 与图 2 增量的分布情况一致.

3.3 海情与距离对分形参数的影响

海杂波受到的风、浪等因素的影响, 距离的差异也会造成回波“粗糙”程度不同. 实验所用的海杂波数据共有 14 种不同的海情和距离门, 其主、次目标分属不同的距离单元, 为便于比较, 采用主目标单元所在的距离门着重分析, 同时选取不同海情纯海杂波共有的距离门(1—4, 13, 14)对比. 如图 4 所示, 同一海情下, 纯海杂波各距离门的分形特性一致, 主目标 Hurst 指数整体大于纯海杂波, 这是小目标与海平面分形特性差异导致的. 不同海情下, 各距离门纯海杂波的分形特性变化一致, 主目标受到海情的影响很大, 如 HH 极化下的 10, 12 海情和 VV 极化下的 3, 10, 12 海情. 值得注意的

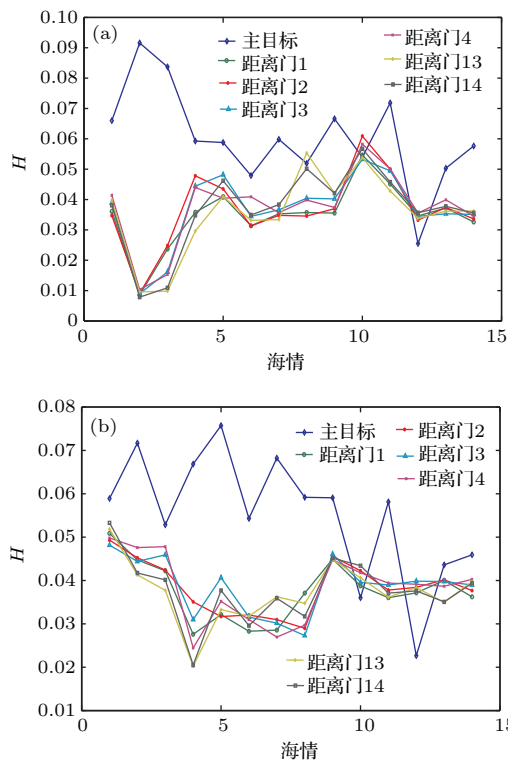


图 4 (网刊彩色) 不同距离门海杂波随海情变化的 Hurst 指数曲线 (a) HH 极化; (b) VV 极化

Fig. 4. (color online) Hurst index curve with the change of sea condition in different distance (a) HH polarization; (b) VV polarization.

是, 不同海情下的主目标与纯海杂波 Hurst 指数差值并不一致. 可见简单设定阈值并不可靠, 克服小目标对海情的依赖性才是研究的重点.

4 基于 FRFT 域分形特征的小目标检测

4.1 基于阶数自适应的小目标检测

本文所用数据的观测小目标为一漂浮在海面上包裹着金属网的塑料球体, 受风浪影响而具有一定速度和加速度. 在观测时间范围 T 内, 雷达回波模型 [28] 为

$$x(t) = s(t) + d(t) = A e^{j\pi(2f_0 t + \mu_0 t^2)} + d(t), \quad (12)$$

其中 $s(t)$ 为目标信号, $d(t)$ 为纯海杂波, A 为信号幅值, 中心频率 $f_0 = 2v_0/\lambda$, v_0 为目标初速度, 调频率 $\mu_0 = 2a/\lambda$, a 为目标加速度, 将 (12) 式代入 (1) 式得到 $s(t)$ 的 FRFT 变换

$$\begin{aligned} X_{s(t)}^{p_\alpha}(u) &= \sqrt{\frac{1 - j \cot \alpha}{2\pi}} e^{j\frac{u^2 \cot \alpha}{2}} \\ &\times \int_{-T}^T s(t) e^{j(\frac{1}{2}t^2 \cot \alpha - ut \csc \alpha)} dt \\ &= A \sqrt{\frac{1 - j \cot \alpha}{2\pi}} e^{j\frac{u^2 \cot \alpha}{2}} \\ &\times \int_{-T}^T e^{j(\frac{\cot \alpha + 2\pi\mu_0}{2}t^2 + j(2\pi f_0 - u \csc \alpha)t)} dt, \quad (13) \end{aligned}$$

式中旋转角 $\alpha = p\pi/2$, 为了简化公式, 令 $A_\alpha = \sqrt{\frac{1 - j \cot \alpha}{2\pi}}$, 且当 $\alpha = \arctan\left(-\frac{1}{2\pi\mu_0}\right)$ 时, 计算 $s(t)$ FRFT 变换的幅值

$$\begin{aligned} &\left| X_{s(t)}^{p_\alpha}(u) \right| \\ &= \left| AA_\alpha \int_{-T}^T e^{j(2\pi f_0 - u \csc \alpha)t} dt \right| \\ &\stackrel{\text{Euler}}{=} 2AA_\alpha T |\text{Sa}[(2\pi f_0 - u \csc \alpha)T]|. \quad (14) \end{aligned}$$

由 (14) 式可知, 理论上辛格函数 $\text{Sa}(\alpha)$ 取最大值时, 目标回波信号的能量最大 $2AA_\alpha T$, 此时

$$\frac{2\nu_0\pi}{a} = \frac{|u|}{\sin \alpha_{\text{opt}}}. \quad (15)$$

由上述推导可知, 当变换域一定时, 存在最佳旋转角 α_{opt} 对速度 ν_0 、加速度 a 进行补偿, 即调整变换阶数 p 可放大目标与纯海杂波分形特征的差异, 使单尺度下的小目标检测成为可能.

结合上述研究结果, 本文提出了单尺度下基于阶数自适应地小目标检测方法, 通过寻找最佳变换阶数 ($p \in [1, 2]$) 来放大含目标数据与纯海杂波的分形特征 (Hurst 指数) 差异, 并得到图 5. 对比图 4, 该方法可将 14 种海情的主目标区分出来.

表 2 阶数自适应法的提升效果

Table 2. Promotion effect of adaptive order method.

极化方式	海情编号	传统方法	变阶方法	最佳阶数	门限提高	提高幅度/%
HH	17	0.0299	0.1642	1.63	0.1343	449.57
	18	0.0830	0.2378	1.72	0.1548	186.75
	19	0.0211	0.0519	1.85	0.0308	146.18
	25	0.0235	0.0877	1.72	0.0642	273.51
	26	0.0178	0.0911	1.71	0.0733	411.22
	30	0.0165	0.0645	1.84	0.0477	288.86
	31	0.0245	0.0884	1.70	0.0638	260.05
	40	0.0162	0.0822	1.78	0.0660	407.38
	54	0.0311	0.1201	1.84	0.0891	286.70
	280	0.0007	0.0585	1.82	0.0577	7826.6
	283	0.0267	0.1406	1.76	0.1138	425.72
	310	0.0091	0.0468	1.92	0.0377	414.24
	311	0.0131	0.0921	1.90	0.0790	602.47
	320	0.0250	0.1151	1.87	0.0901	359.74
VV	17	0.0080	0.0610	1.72	0.053	659.75
	18	0.0270	0.1172	1.69	0.0902	334.61
	19	0.0038	0.0130	1.93	0.0091	239.82
	25	0.0393	0.1128	1.67	0.0735	187.22
	26	0.0436	0.1215	1.71	0.0733	411.22
	30	0.0260	0.0717	1.81	0.0457	175.78
	31	0.0397	0.1255	1.76	0.0858	216.17
	40	0.0221	0.1240	1.79	0.1019	461.38
	54	0.0141	0.0850	1.89	0.0709	501.90
	280	0.0027	0.0585	1.90	0.0557	2031.1
	283	0.0221	0.1277	1.89	0.1055	477.30
	310	0.0207	0.0269	1.94	0.0062	42.950
	311	0.0036	0.0903	1.94	0.0867	2415.3
	320	0.0097	0.0860	1.88	0.0763	788.12

为量化本文所提方法的检测性能, 将优化前后的 Hurst 指数的差值进行统计, 由于纯海杂波距离单元随海情变化差别不大, 这里对距离门 1 与主目

标单元的 Hurst 指数求差, 得到表 2. 可见阶数自适应的效果明显, 门限大部分提高 200% 以上, 有效区分了淹没在图 4 中的小目标, 比采用同数据分析时域信号的文献 [22] 提高 26.3%, 表明该方法充分发挥了单尺度 FRFT 的优势, 同时发现最佳阶数有向高阶靠近的趋势.

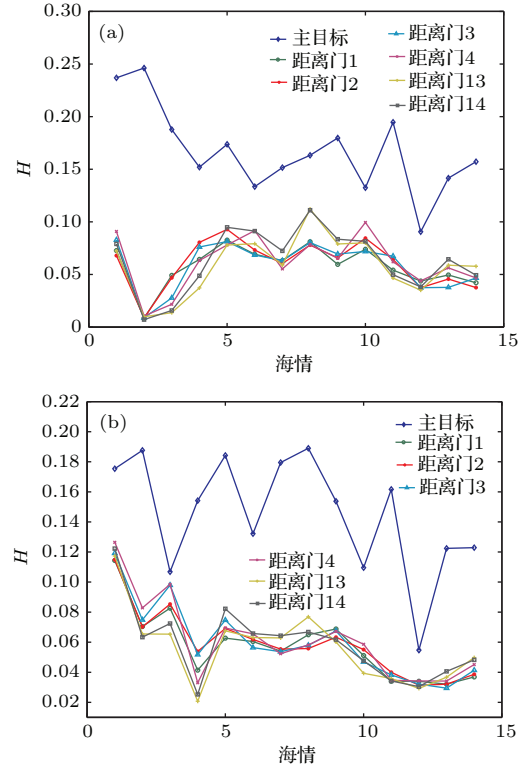


图 5 变阶后不同距离门海杂波随海情变化的 Hurst 指数曲线 (a) HH 极化; (b) VV 极化

Fig. 5. Hurst index curve with the change of sea condition in different distance after changing order (a) HH polarization; (b) VV polarization.

4.2 基于高尺度多重分形理论的小目标检测

现实中影响海杂波的因素很多, 表 2 的 Hurst 差值并不统一, 考虑到实际的工程应用, 还需更为普适的检测方法. 本文从海杂波多重分形特性入手, 采用 MF-DFA 对海杂波 FRFT 域的不同海情数据进行分析. 图 6 表明海杂波在高尺度下有着明显的多重分形特点, 含目标与纯海杂波的 $H(q)$ 在大多在零点附近相交, $H(q)$ 在负高尺度上的分形特征差异更为明显, 且 HH 极化的分形差异效果略好于 VV 极化, 原因为小目标的存在使得海杂波中的局部振荡变大, 且这种差异在高尺度下得到了增强.

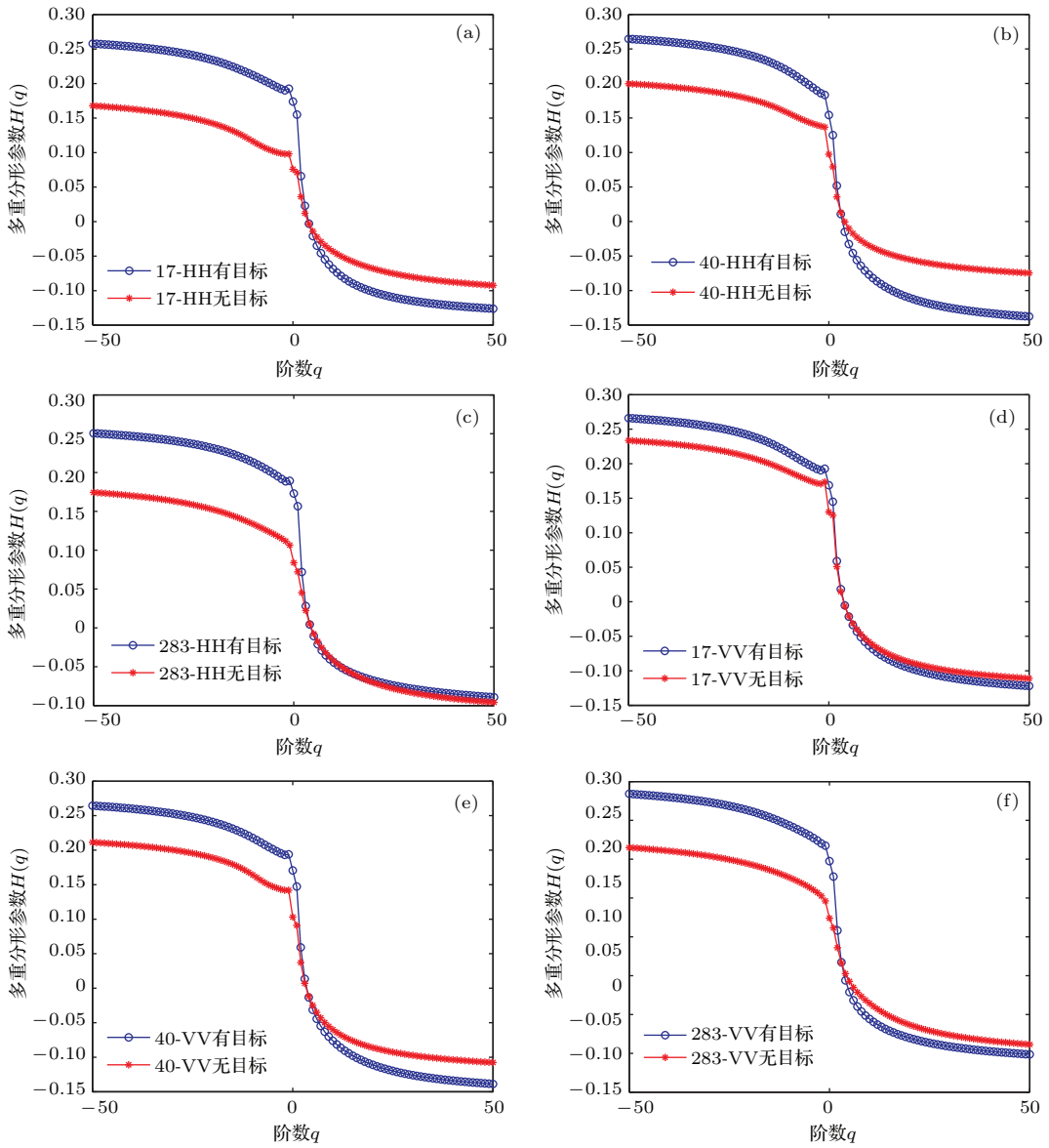


图6 高尺度多重分形参数 $H(q)$ 变化情况

Fig. 6. Changes of high dimension multifractal parameters $H(q)$.

对图6中 $H(q)$ 曲线的交点进行统计, 如表3所示. 大部分交点在3附近, 但也存在一些偏离点. 在工程实践中, 仅需取同一极性下两个相距较远的海杂波, 随意取 q 在 $[-50, -20]$ 的值, 并计算 $H(q)$ 差值, 若出现明显的偏离, 则可作为判定小目标的

依据.

由图6可知, $H(q)-q$ 曲线近似满足反正切分布, 且主目标与纯海杂波在高尺度上变化趋势一致, 因而仅需对其进行非线性拟合, 得到关系式

$$H(q) = \frac{1}{\omega} \left[\arctan \left(\frac{q-b}{A} \right) - \varphi \right], \quad (16)$$

表3 高尺度多重分形参数 $H(q)$ 交叉点位置

Table 3. Intersection location of high dimension multifractal parameters $H(q)$.

海情编号	17	18	19	25	26	30	31	40	54	280	283	310	311	320
HH 极化	4	6	4	3	3	3	3	3	3	-12	14	3	3	3
VV 极化	5	15	2	3	5	4	4	4	3	2	3	18	2	3

式中 A 为振幅, b 为截距, φ 为初相位, ω 为角频率. 拟合结果发现, 在 HH 极化条件下, 纯海杂波的 A_s 为主目标 A_t 的 1.8 倍以上, 而 VV 极化大于 1.4 倍, 可作为海平面小目标的检测依据.

5 结 论

本文对 IPIX 实测海杂波 FRFT 域的单尺度、多重分形特性进行了分析, 提出了两种小目标检测方法. 分析表明, FRFT 受到阶数和尺度的双重影响, 不具备统一的自相似特性, 这表明在尺度确定的条件下, 阶数的变化会对其分形特性影响特性, 同时 IPIX 实测海杂波 FRFT 域具备多重分形特性. IPIX 实测海杂波 FRFT 域在一定区间 $[2^4-2^{15}]$ 内具有分形特征, 随海情的变化十分明显, 雷达极性和目标距离也会产生一定程度的影响. 小目标的存在会影响周围海平面的分形特性, 可用分形参数 $H(q)$ 量化差异程度. 同一海情下, 不同距离的纯海杂波分形特性较为一致. 在单尺度下, 可利用基于阶数自适应的小目标检测方法提高海杂波的检测门限, 克服海情对小目标检测的影响; 在高尺度下, 可采用 $H(q)$ 在负高尺度上分形特征进行区分, $H(q)-q$ 曲线满足反正切分布, 纯海杂波与含目标数据的拟合幅值比值可作为检测小目标的依据, 两种方法均较好地解决了小目标检测对海情依赖性强的问题. 实验采用了 14 种海清下 IPIX 雷达的 HH, VV 极化数据, 所提方法为海杂波背景下的小目标检测提供了判定依据, 比传统时域分形检测方法具有更好的检测性能.

参考文献

- [1] Trunk G V, George S F 1970 *IEEE Tran. Aero. Elec. Sys.* **6** 620
- [2] Sayama S, Sekine M 2000 *IEICE Tran. Comm.* **83** 1979
- [3] Ritchie M A, Woodbridge K, Stove A G 2010 *IEEE Gros. Remo. Sens.* **48** 497
- [4] Haykin S, Heung H 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 593
- [5] Birs D L, Pipenberg S J 1992 *IEEE International Joint Confence on Networks* Baltimore, MD, Jun 7-11, 1992 p886
- [6] Haykin S, Li X B 1995 *Proc. IEEE* **83** 195
- [7] Cui W Z, Zhu C C, Bao W X, Liu J H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3303 (in Chinese) [崔万照, 朱长纯, 保文星, 刘君华 2004 物理学报 **53** 3303]
- [8] Mandelbrot B B 1982 *The Fractal Geometry on Nature* (New York: Freeman)
- [9] Lo T, Leung H 1993 *IEE Proc. F* **140** 243
- [10] Savaidis S, Jaggard D L, Hizanidis K, Frangos P 1995 *Optics letters* **20** 2358
- [11] Hu J, Gao J, Posner F L, Zheng Y, Tung W 2006 *Fractals* **14** 189
- [12] Gao J B, Hu J, Tung W W, Cao Y H 2006 *Physical Review E* **74** 066204
- [13] Guan J, Liu N B, Huang Y, He Y 2012 *IET Radar, Sonar & Navigation* **6** 300
- [14] Shi Z G, Zhou J X, Fu Q 2006 *J. Syst. Simu.* **18** 2289 (in Chinese) [石志广, 周剑雄, 付强 2006 系统仿真学报 **18** 2289]
- [15] Jiang B, Wang H Q, Li X, Guo G R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3985 (in Chinese) [姜斌, 王宏强, 黎湘, 郭桂荣 2006 物理学报 **55** 3985]
- [16] Guan J, Liu N B, Zhang J, Song J 2010 *J. E. I. T.* **32** 57 (in Chinese) [关键, 刘宁波, 张建, 宋杰 2010 电子与信息学报 **32** 57]
- [17] Guan-Lei X, Xiao-Tong W, Xiao-Gang X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014203
- [18] Wen B Y, Wang S. 2006 *J. H. U. S. T (N. S. E)* **34** 70 (in Chinese) [文必洋, 王颂 2006 华中科技大学学报(自然科学版) **34** 70]
- [19] Jiang B, Wang H Q, Li X, Guo G R 2007 *J. Elec. Info. Tech.* **29** 1811 (in Chinese) [姜斌, 王宏强, 黎湘, 郭桂荣 2007 电子与信息学报 **29** 1811]
- [20] Xing H Y, Gong P, Xu W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 160504 (in Chinese) [行鸿彦, 龚平, 徐伟 2012 物理学报 **61** 160504]
- [21] Xing H Y, Cheng Y Y, Xu W, Gong P 2013 *IET International Conference on Information and Communications Technologies* Beijing, China, April 27-29, 2013 p333
- [22] Xing H Y, Gong P, Xu W 2013 *J. Syst. Simu.* **25** 1223 (in Chinese) [行鸿彦, 龚平, 徐伟 2013 系统仿真学报 **25** 1223]
- [23] Mandelbrot B B, Van Ness J W 1968 *SIAM Rev.* **10** 425
- [24] Lu X, Li H 1999 *Chemical Engineer Journal* **75** 117
- [25] Chen X L, Liu N B, Song J, Guan J, He Y 2011 *J. E. I. T.* **33** 827 (in Chinese) [陈小龙, 刘宁波, 宋杰, 关键, 何友 2011 电子与信息学报 **33** 827]
- [26] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, Simons M, Stanley H E, Goldberger A L 1994 *Physical Review E* **49** 1685
- [27] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny B E 2002 *Physica A* **316** 87
- [28] Chen X L, Guan J, Liu N B, He Y 2010 *J. N. A. A. U.* **25** 614 (in Chinese) [陈小龙, 关键, 刘宁波, 何友 2010 海军航空工程学院学报 **25** 614]

Fractal property of sea clutter FRFT spectrum for small target detection*

Xing Hong-Yan[†] Zhang Qiang Xu Wei

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation, China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(Received 26 November 2014; revised manuscript received 9 January 2015)

Abstract

Because the detection of small target in the background of sea clutter is strongly influenced by the sea condition, this paper studies the fractal property of sea clutter in fractional Fourier transform (FRFT) domain and proposes the fractal detection method in single and high dimensions. The FRFT deduced from mathematical definition is not consistent with the self-similar properties in orders and scales. Multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA) method is used to determine the fractal parameter $H(q)$ and analyze the fractal property of the sea clutter in different situations, distances, and polarizations. In single dimension, the small target detection method is proposed based on an adaptive order. By comparing different factors of the multifractal parameters, the results show that the transform order method in sea clutter FRFT domain can detect small signals under complicated sea conditions. The detection threshold mostly increases above 200%, which is 26.3% higher than the method of time domain signal. $H(q)$ has an obvious multifractal difference on high negative scale, the $H(q)$ - q curve satisfies the arctangent distribution. The fitting amplitude ratios of pure sea clutter and target data are greater than 1.8 (HH) and 1.4 (VV), which provide the basis for the small target detection in sea clutter background.

Keywords: sea clutter, fractional Fourier transform, fractal characteristic, small target detection

PACS: 05.45.Df

DOI: 10.7498/aps.64.110502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61072133), the Practice Innovation Program of Colleges and Universities Postgraduates of Jiangsu Province, China (Grant No. SJZZ_0112), the Production, Learning and Research Joint Innovation Program of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BY2013007-02, SBY201120033), the Industrialization of Research Findings Promotion Program of Institution of Higher Education of Jiangsu Province, China (Grant No. JHB2011-15), the Advantage Discipline Platform "Information and Communication Engineering" of Jiangsu Province, China, and the "Summit of the Six Top Talents" Program of Jiangsu Province, China.

[†] Corresponding author. E-mail: xinghy@nuist.edu.cn