

海杂波 FRFT 域分形特征判别及动目标检测方法

陈小龙* 刘宁波 宋杰 关键 何友

(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

摘要: 该文研究了海杂波在分数阶 Fourier 变换(FRFT)域的分形特征, 提出了一种基于分形特征差异的联合动目标检测方法。首先, 分析了海杂波数据在 FRFT 域的统计特性, 通过对不同极化方式下分形曲线的仿真分析, 得到海杂波在 FRFT 域满足自相似性。其次, 给出了分形参数的提取方法和无标度区间, 并分析了变换阶数对分形参数估计的影响。最后, 利用临近距离单元或临近时刻的雷达回波信号在 FRFT 域的分形维数和斜距的差值作为检测统计量, 经不同极化方式下的海杂波数据验证, 表明算法不仅具有良好的微弱动目标检测能力, 而且能够准确估计目标的运动状态。

关键词: 动目标检测; 海杂波; 分数阶 Fourier 变换(FRFT); 分形维数; 斜距

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-0823-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00486

Fractal Feature Discriminant of Sea Clutter in FRFT Domain and Moving Target Detection Algorithm

Chen Xiao-long Liu Ning-bo Song Jie Guan Jian He You

(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: A new moving target detection algorithm is proposed based on the joint fractal properties discriminant of sea clutter in FRactional Fourier Transform (FRFT) domain. At first, statistical characteristic of sea clutter data in FRFT domain is analyzed and simulations of fractal curves in different polarizations are conducted, which indicates the self-similarity feature. Then, determination method of fractal parameters and scale-invariant interval is given and influence of transform order on the estimation of fractal parameters is also discussed. Finally, differences of fractal dimension and intercept in FRFT domain, which are calculated from adjacent range bin or time series of radar echo, can be used as test statistic. Real sea clutter in different polarizations is used for verification and the results present that the proposed algorithm has good performance for weak moving target detection and can also give high estimation accuracy of moving conditions.

Key words: Moving target detection; Sea clutter; FRactional Fourier Transform (FRFT); Fractal dimension; Intercept

1 引言

海杂波中的目标检测技术在军用和民用方面都具有很高的应用价值, 运动的小型舰船的雷达反射截面积(Radar Cross Section, RCS)很小, 其回波常常淹没在海杂波和噪声中, 因此, 稳健、可靠的海杂波中微弱动目标检测成为雷达信号处理领域的热点问题^[1]。

基于统计模型的检测方法研究时间较长, 理论相对成熟^[2], 但其通用性差, 检测过程复杂, 而海杂

波在高海情的情况下, 表现出的非高斯特性使得对海杂波的准确建模比较困难, 当海杂波的统计模型不定且信杂比(Signal-to-Clutter Ratio, SCR)低于某一水平时, 基于统计理论的经典检测方法几乎无能为力。近年来, 基于分形的目标检测技术受到广泛的重视^[3], 研究表明, 分形模型可以较好地与海表面以及海面回波的结构相吻合, 当海杂波中存在舰船等目标信号时, 分形特征将发生明显变化, 因此可以利用人造目标和自然背景之间的分形特征差异来检测目标。然而, 分形方法无法检测运动目标, 更不能获得目标的运动信息, 进而限制了分形理论在动目标检测中的应用。

若海面目标做匀速或匀加速运动, 其回波可以

2010-05-14 收到, 2010-12-16 改回

国家自然科学基金(60672140, 60802088), 航空科学基金(20095184004)和“泰山学者”建设工程专项经费资助课题

*通信作者: 陈小龙 cxlxl1209@163.com

近似为线性调频信号 (Linear Frequency Modulation, LFM)^[4], 因此研究LFM信号的检测和参数估计对于检测运动目标具有较大的意义。利用Wigner-Ville分布 (Wigner-Ville Distribution, WVD)和Hough变换能够很好地实现LFM信号的时频域能量聚集^[5], 但此方法运算量大且存在交叉项的干扰; 短时傅里叶变换 (Short Time Fourier Transform, STFT)和小波变换 (Wavelet Transform, WT)的算法不存在交叉项^[6], 但其时频域分辨力受谱窗限制导致检测性能降低。作为一种新的时频分析工具, 分数阶Fourier变换 (FRactional Fourier Transform, FRFT)对LFM信号具有良好的能量聚集性。因此, 采用FRFT检测杂波背景下的动目标具有很大的优越性^[7], 不仅不需要估计海杂波的模式参数, 而且能估计出目标的运动参数, 从而获得目标的运动状态。同时, FRFT可以借助FFT实现, 因此受到了广泛地关注。

当信杂比较低时, 时域海杂波和目标的分形特征差异变得很小, 很难有效检测出目标。由于动目标回波经过FRFT后, 在最佳变换域能够形成明显的峰值, 目标信号的能量得到最大程度的积累, 提高了信杂比, 而海杂波在FRFT域的能量分布较为分散, 幅值起伏剧烈, 因此可以研究海杂波和动目标在FRFT域的分形特征, 进而利用分形特征差异作为区分目标和杂波的判别标准。目前涉及这一问题的研究较少, 文献[8]中提出了基于FRFT的Hurst指数估计方法, 估计精度高, 但算法仅对分数阶高斯噪声作了研究, 没有采用实测海杂波数据进行分析验证。文献[9]认为海杂波在分数阶Fourier变换域也满足分形特性, 并利用回波信号的FRFT域的分数维差异最大值来检测目标, 但并未给出相应的理论解释和无标度区间选取方法。本文对其结论进行

改进和修正, 研究了海杂波FRFT域分形特征的判别方法, 并在此基础上提出了基于FRFT域分形特征差异的动目标检测算法, 仿真结果验证了算法的正确性。

2 海杂波 FRFT 域分形特征分析

2.1 海杂波 FRFT 域的统计特性

本文采用加拿大McMaster大学X波段IPIX雷达海杂波数据, 详细信息见文献[10], 数据说明见表1。本文主要研究HH极化与VV极化的情况。

分析实测海杂波数据在各个变换角度FRFT域的能量分布特性, 画出海杂波回波的FRFT域谱图和能量分布, 如图1, 图2所示, 其中#2表示第2个距离单元数据。可见, 海杂波在FRFT域幅值起伏变化剧烈, 频率较高, 但在变换阶数 $p=1$ (频域)周围的FRFT域能量分布相对集中, 说明海杂波具有微弱变化的加速度和速度, 但相对于固定的加速度, 其持续时间较短, 因此在进行FRFT时, 能量得不到很好的聚集。

表示分形表面特征的一个最重要的参数就是分形表面的维数, 它反映了信号的不规则程度。然而在目标特征不明显时, 尤其是海面上微弱的运动目标, 分形维数差异变得很小, 致使检测性能降低。动目标回波经过FRFT后, 在最佳变换域能够形成明显的峰值, 而海杂波在FRFT域的能量分布较为分散, 因此可以研究海杂波和动目标在FRFT域的分形特征, 进而检测动目标。

首先建立分形模型。分数布朗运动 (Fractional Brownian Motion, FBM)是常用的分形模型, 它连续不可导, 可通过对布朗运动的分数次积分产生, 是一个非平稳随机过程, 对尺度变化具有自相似性, 其增量为平稳、零均值的高斯分布随机过程^[11]

表1 IPIX 海杂波数据说明

编号	主目标距离单元	次目标距离单元	采样点数	极化方式	采样频率	观测时间
19931107_135603	9	8:11	131072	HH/VV/HV/VH	1000 Hz	1 s

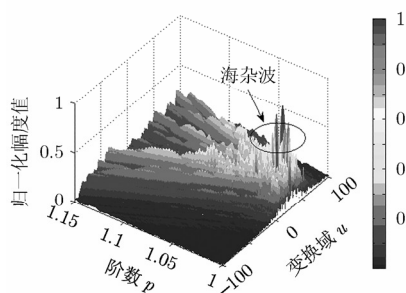


图1 海杂波回波的FRFT幅值图(#2)

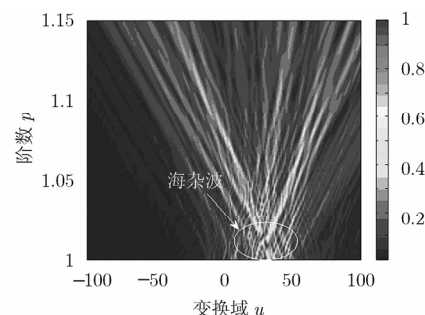


图2 海杂波回波的FRFT域能量分布图(#2)

$$B_H(t + \tau) - B_H(t) \sim N(0, \sigma_H^2 \tau^{2H}), \tau > 0 \quad (1)$$

$$E\left(|B_H(t + \tau) - B_H(t)|^2\right) \propto |\tau|^{2H} \quad (2)$$

其中 $B_H(t)$ 为分数布朗运动, τ 为延迟时间, $\sigma_H^2 = \text{var}[B_H(t+1) - B_H(t)]$ 为高斯分布的方差, $H \in [0, 1]$ 称为 $B_H(t)$ 的 Hurst 指数, 决定着 FBM 的“粗糙”程度, 与分形维数 D 的关系为 $D = D_T + 1 - H$ (D_T 表示拓扑维数, 1 维时间序列 $D_T = 1$), 当 $H = 1/2$ 时, $B_H(t)$ 即为标准布朗运动, 此时 $D = 2 - H$ 。

如果海杂波在 FRFT 域符合 FBM 模型, 那么其增量也应符合式(1)和式(2)的增量统计自相似性。对于实测的海杂波数据, 验证方法如下: 从给定的 N 个海杂波序列中减去均值得到序列 $x = \{x_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 选择一定的变换角度 p , 作 FRFT, 得到变换域的序列 $X_p = \{X_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 则 FRFT 域海杂波的增量 d_i 为

$$d_i = X_{i+1} - X_i \quad (3)$$

设增量 d_i 具有各态历经性, 则可以用时间平均来估计增量的统计平均值

$$\mu = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} d_i \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - \mu)^2 \quad (5)$$

式中 μ , σ^2 分别为增量均值和标准差。

图 3 给出了 HH 极化和 VV 极化的海杂波在 FRFT 域统计增量直方图, 比较两图可以发现其均值都接近于零, 信号增量的分布情况与高斯分布非常相似。进一步研究 FRFT 域海杂波增量的平稳性, 即统计特性不随时间的推移而变化, 如表 2 所示。

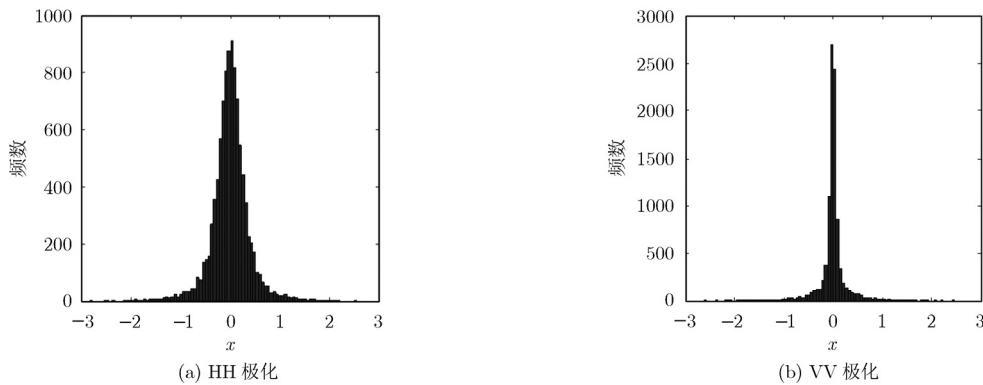


图3 FRFT域海杂波增量直方图

表 2 FRFT 域海杂波统计增量分布

极化方式	均值/ μ	方差/ σ^2	延迟 1 方差	延迟 2 方差	延迟 3 方差
HH 极化	2.1753×10^{-4}	0.0505	0.0696	0.0695	0.0721
VV 极化	-5.3205×10^{-6}	0.0022	0.0034	0.0033	0.0037

可知, 其方差基本不随时间的推移而变化。因此, 可以近似认为 FRFT 域海杂波数据的增量序列 $\{d_i\}$ 服从正态分布, 为平稳的高斯随机过程, 具有统计自相似性, 可以基于 FBM 模型对 FRFT 域的海面雷达回波数据进行分析处理。

2.2 分形参数的特征提取

将海杂波回波数据变换至 FRFT 域, 如图 1, 图 2 所示, 在信杂比较低的情况下, 海杂波在 FRFT 域的起伏比较剧烈, 变换域的信号具有较多的高频分量, 其变化较快。而当海面存在运动目标时, 能够在 FRFT 域形成峰值, 其信号能量明显增强。仿真产生一运动目标, 海杂波为 IPIX 数据, SCR=0 dB, 图 4, 图 5 给出了运动目标回波的 FRFT 幅值, 表现为海杂波在 FRFT 域峰值被目标峰值遮蔽, 变换域信号变化较为平缓, 起伏不明显, 低频成分较高频成分丰富, 此时运动目标回波信号和海杂波在 FRFT 域的分形维数将存在一定差异。

针对 IPIX 实测海杂波数据, 采用“随机游走”方法提取海杂波 FRFT 域的分形维数^[3], “随机游走”过程 $y(n)$ 定义为平稳随机过程序列 $a = \{a_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 的部分求和

$$y(n) = \sum_{i=1}^n a_i \quad (6)$$

实际上, a_i 为 $y(n)$ 的增量过程, 若存在如下幂率关系

$$F(m) = \left\langle |y(n+m) - y(n)|^2 \right\rangle^{1/2} \propto m^H \quad (7)$$

则认为 $y(n)$ 为一个分形过程, 其中 $F(\cdot)$ 为起伏函数, m 为抽取的时间间隔, 即尺度; H 为 Hurst 指数。进

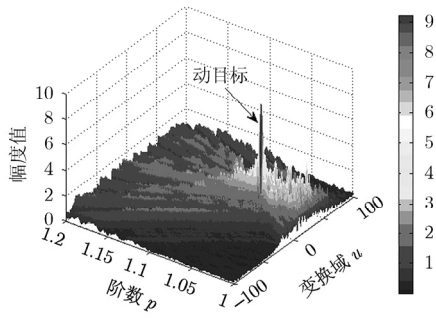


图4 动目标回波的FRFT幅值图

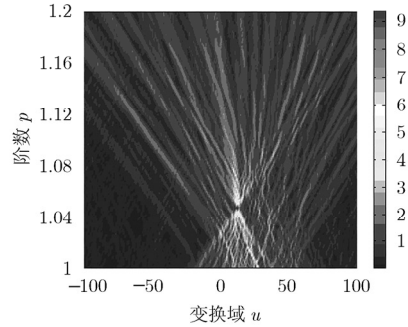


图5 动目标回波的FRFT域能量分布图

一步对式(7)两边取对数得^[3]

$$\begin{aligned} \log_2 F(m) &= \log_2 \left(\left\langle |y(n+m) - y(n)|^2 \right\rangle^{1/2} \right) \\ &= H \cdot \log_2(m) + \text{const} \end{aligned} \quad (8)$$

若FRFT域的海杂波序列 X_p 满足式(8), 则认为其是一个分形过程。曲线 $\log_2 m \sim \log_2 F(m)$ 是一条以 H 为斜率的直线, 通过对曲线进行最小二乘拟合即可得到海杂波FRFT域的Hurst指数 H , 因此分形维数 $D=2-H$ 。

综上, 实测海杂波数据在FRFT域是否具备分形特征的判据为: (1)是否存在式(8)的线性测度关系和标度不变区间, 即满足自相似性; (2)在此区间上计算出的分形维数是否大于其拓扑维数, 且其值具有一定的稳定性。

2.3 分形判定与无标度区间的选取

在实际中, 数据点 $(\log_2 m, \log_2 F(m))$ 并不严格落在一条直线上, 很好地满足线性关系的一段称为无标度区间。图6(a)和图6(b)给出了纯海杂波数据不同极化方式下FRFT域海杂波的分形曲线。从图中可以看出, FRFT域海杂波数据的分形曲线在尺度 $2^5 \sim 2^{10}$ 的范围内近似呈线性, 即在这一个时间段内的数据是有条件的标度不变, 也就是这一无标度区间内具有自相似特性, FRFT域的海杂波在该尺度上具有分形特性。根据上节中给出的判定方法以及统计

增量的特性, 可以认为本组海杂波数据在FRFT域是分形的。采用同样的方法对其它各组海杂波数据进行分析判定, 可以得到相同的结论。比较4种极化方式下的海杂波FRFT域分形曲线可以发现, HH极化方式的数据由于信杂比较高, 体现在FRFT域内幅值起伏较为平缓, 降低了分形维数, 提高了Hurst指数, 因此其斜率大于其它几种极化方式拟合直线的斜率。图6(c)为FRFT域主目标距离单元的分形曲线。可以看出, 海杂波和目标在FRFT域的分形特征显著不同, 两者具有一定的可分性。因此含有动目标的距离单元数据在FRFT域的不规则度要小, 影响了海杂波在FRFT域的粗糙程度, 对应的分形维数较小, 分形曲线斜率较大。

3 海杂波 FRFT 域分形特征提取与目标检测

3.1 变换阶数对分形参数估计的影响

在观测时长 T 内, 雷达回波模型表示为

$$\begin{aligned} x(t) &= s(t) + w(t) = A \exp[j2\pi f_0 t + j\pi \mu_0 t^2] \\ &\quad + w(t), \quad |t| \leq T \end{aligned} \quad (9)$$

式中 A 为信号幅度, 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, $w(t)$ 为海杂波。不考虑杂波的情况下, $s(t)$ 的FRFT为

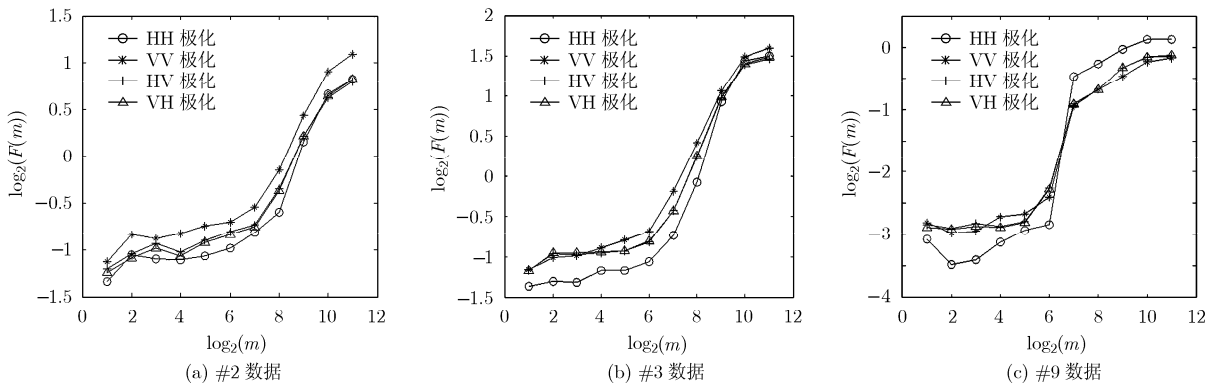


图6 FRFT域海杂波 $F(m)$ 函数与尺度 m 的分形曲线

$$\begin{aligned}
 F_{\alpha}[s(t)] &= \sqrt{\frac{1-j \cot \alpha}{2 \pi}} e^{\frac{j u^2 \cot \alpha}{2}} \int_{-T}^T s(t) e^{j\left(\frac{1}{2} t^2 \cot \alpha-u t \csc \alpha\right)} d t \\
 &= A \sqrt{\frac{1-j \cot \alpha}{2 \pi}} e^{\frac{j u^2 \cot \alpha}{2}} \\
 &\quad \cdot \int_{-T}^T e^{j\left(\frac{\cot \alpha+2 \pi \mu_0}{2} t^2+j\left(2 \pi f_0-u \csc \alpha\right) t\right)} d t \quad (10)
 \end{aligned}$$

其中 α 为旋转角度, $\alpha = p \pi / 2$ 。令 $A_{\alpha} = \sqrt{\frac{1-j \cot \alpha}{2 \pi}}$, 当 $\alpha = \arctan\left(-\frac{1}{2 \pi \mu_0}\right)$ 时, 有

$$\begin{aligned}
 |F_{\alpha}[s(t)]| &= \left| A A_{\alpha} \int_{-T}^T \exp [j(2 \pi f_0-u \csc \alpha) t] d t \right| \\
 &= 2 A A_{\alpha} T \left| \operatorname{sinc}[(2 \pi f_0-u \csc \alpha) T] \right| \quad (11)
 \end{aligned}$$

当最佳旋转角与目标运动状态相匹配时, 目标回波信号达到最佳能量聚集, 峰值最大, 其FRFT模函数为sinc函数, 此时目标回波与海杂波在FRFT域的分形特征差异最大。因此, 在进行分形特征分析之前需要确定最佳变化角度, 即最佳变换阶数。图7给出了不同变换阶数下, HH极化和VV极化海杂波在FRFT域的分形曲线, 其中变换阶数 $p=[1,1.2]$ 等间隔选取。由图可知, 当无标度区间取 $m \in [2^5, 2^{10}]$ 时, 分形曲线呈现较好的线性特征, HH极化的曲线斜率略高于VV极化, 变换阶数不同对FRFT域海杂波数据的分形曲线影响较小, 直线拟合得到的分形维数值差别不大。原因是海杂波信号与单频信号的

相似程度较大, 在一定程度上海杂波回波可以看作多个单频信号的叠加, 在FRFT域中能量得不到很好的聚集, 因此其FRFT域的粗糙程度基本不随旋转角度变化。不同变换阶数下目标距离单元FRFT域的分形曲线如图8所示, 可以看出目标的分形曲线受变换阶数影响较大, 体现在变化阶数与目标回波相匹配时, 幅值最大, 对海杂波幅值的遮蔽作用也最强, 降低了FRFT域数据的粗糙程度, 从而分形维数减小, 分形曲线斜率增大。

为确定目标回波信号的最佳变换阶数, 分别对海杂波距离单元(#2)和目标距离单元(#9)在不同变换阶数下的FRFT域数据进行分形特征分析, 如图9所示。由图可以看出, 不同的变换阶数对两组数据的FRFT域分形维数均有一定影响, 海杂波的分形维数在1.7~1.9之间, 而目标的分形维数范围则为1.35~1.8, 目标单元的分形维数值在某个FRFT域会明显下降, 而它与海杂波单元分形维数之差在某个FRFT域将会出现最大值, 此时的变换域即为最佳变换域。由图9(b)得到目标距离单元的最佳变换阶数为 $p_{opt}=1.056$ 。

3.2 基于分形特征差异的联合动目标检测方法

利用3.1节中FRFT域分形曲线的特性, 给出海面运动目标的联合检测方法: 基于FRFT域的分形维数 D 和斜距 L 的动目标检测方法。在最佳变换域,

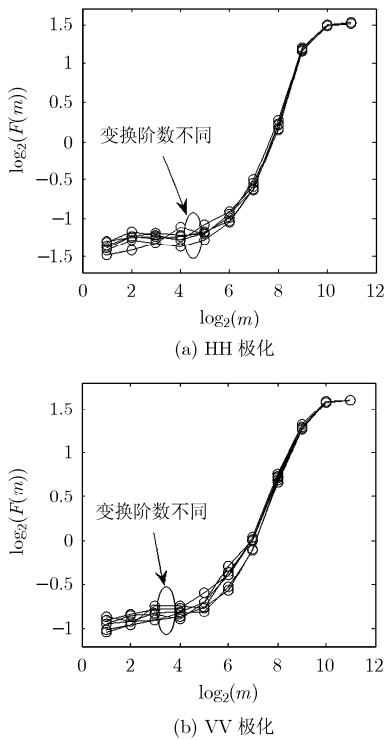


图 7 不同变换阶数下海杂波 FRFT 域分形曲线(#2)

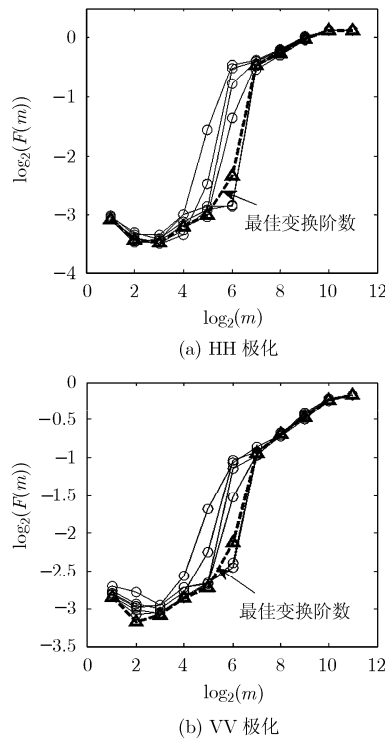


图 8 不同变换阶数下目标距离单元 FRFT 域分形曲线(#9)

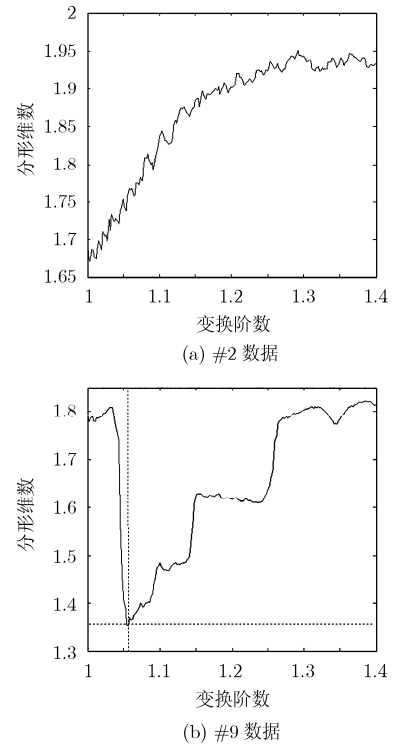


图 9 变换阶数对分形维数估计的影响

无标度区间 $m \in [2^5, 2^{10}]$ 上的海杂波起伏函数 $\log_2 F_c(m)$ 和目标起伏函数 $\log_2 F_s(m)$ 分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \log_2 F_c(m) &= (2 - D_c) \log_2(m) + I_c \\ \log_2 F_s(m) &= (2 - D_s) \log_2(m) + I_s \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中 D_c 和 D_s 分别为海杂波和目标的分形维数, I_c 和 I_s 是分形曲线的直线拟合斜距。图10为检测系统框图。

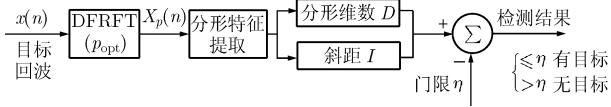


图10 检测系统框图

首先确定最佳变换阶数, 然后根据FRFT域分形曲线, 在一定的无标度区间内, 计算临近距离单元或临近时刻的雷达回波信号在FRFT域的分形维数和斜距, 如果在某时刻或某距离分辨单元的分形特征发生较大变化并小于设定的门限, 则认为存在目标, 最后在目标单元的最佳变换域中估计运动参数。检测方法为

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= |D_s - D_c| \begin{cases} > \eta_1 \\ < \eta_1 \end{cases} \\ T_2 &= |I_s - I_c| \begin{cases} > \eta_2 \\ < \eta_2 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中 η_1 和 η_2 为相应的门限。

图11和图12分别给出了两种极化方式下, 在最佳变换域的各距离单元的分形指数、分形维数和斜距。从图中可以看出, 在最佳变换域中: (1)在同一极化条件下杂波单元的分形指数明显低于目标单元的分形指数, Hurst指数对杂波与目标具有一定的区分能力; (2)从图11(b)和图12(b)可以看出, 海杂波在FRFT域的分形维数大于其拓扑维数1, 目标单元的分形维数稳定在1.3~1.4附近。结合图6所示, 海杂波在相应的无标度区间内具有一定的自相似性, 因此, 判断海杂波在FRFT域是分形的, 其无标度区间为 $m \in [2^5, 2^{10}]$; (3)可以通过设定相应的门限, 检测目标, 其中主目标单元与海杂波单元的差异最大, 在次目标单元, 由于目标能量有所泄露, 两者的分形特征参数相差较小; (4)采用斜距作为检测统计量, 目标单元和海杂波单元的斜距差值动态范围最大(约为2.5), 但目标单元的斜距与杂波单元有部分混叠, 会降低检测概率。

4 检测性能分析

海杂波和运动目标在FRFT域的分形特征上存在本质差别, 将传统的相干积累检测方法、基于时域的Hurst指数检测方法和本文提出的基于FRFT域分形特征差异的目标检测方法在不同极化方式下进行对比分析。图13和图14分别给出了HH极化和

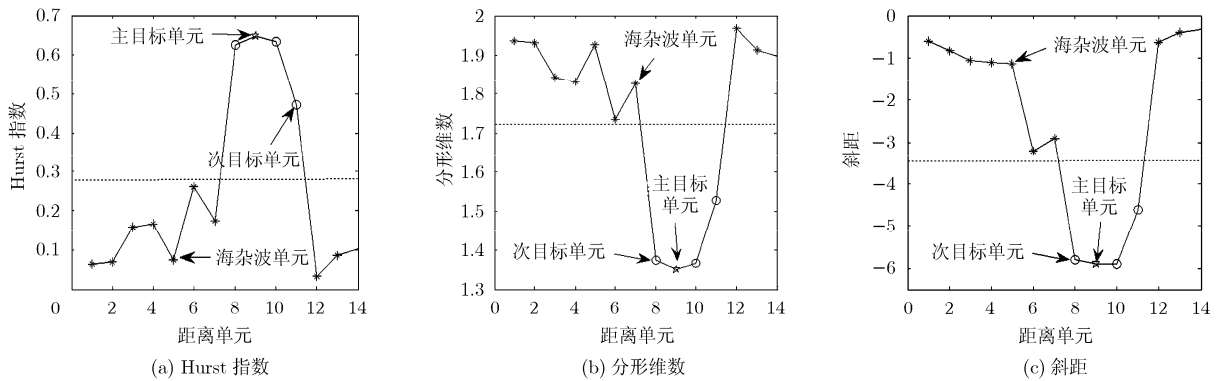


图11 HH极化方式下各距离单元FRFT域的分形参数(最佳变换域)

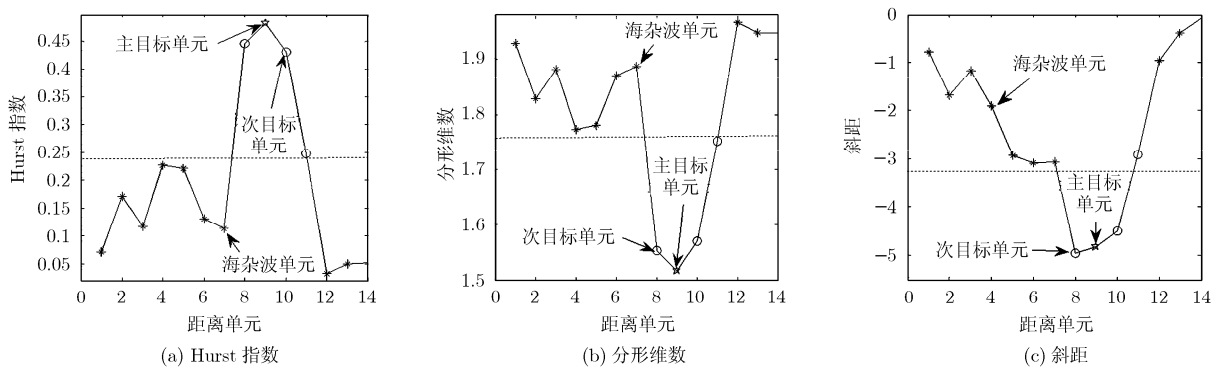


图12 VV极化方式下各距离单元FRFT域的分形参数(最佳变换域)

VV极化条件下，相干积累和时域Hurst指数检测方法的计算结果。对各种检测方法进行定量分析，其结果如表3所示。可知，传统的检测方法得到的检测统计量差异不大，且在VV极化方式下的差异显著降低，说明当信杂比进一步降低时，传统的检测方法

很难检测出目标。同时明显看出基于FRFT域分形特征差异检测方法的优越性，采用差值的绝对值作为检测统计量，在最佳变换域，不仅差值的变化动态范围大，且在低信杂比条件下(VV极化)仍能较好地地区分海杂波和目标。

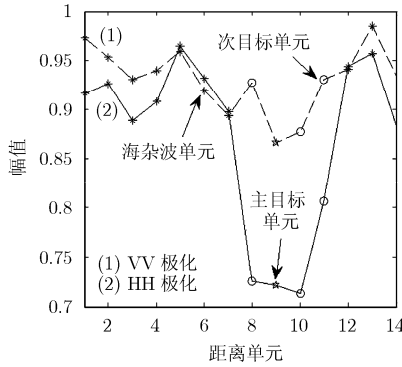


图13 不同极化条件下相干积累后各距离单元的幅值

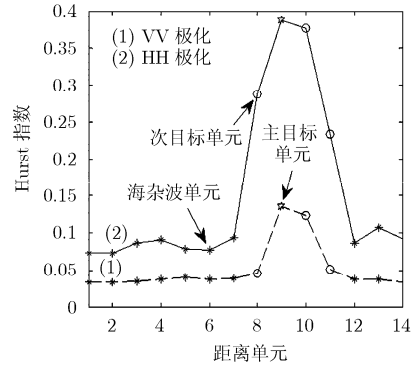
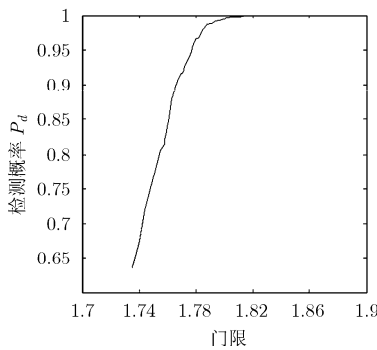


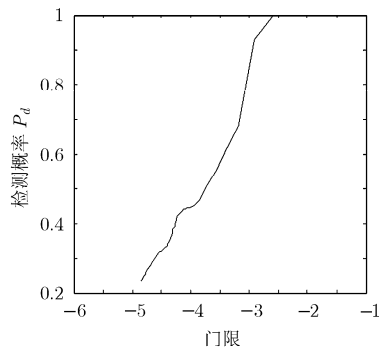
图14 不同极化条件下各距离单元的时域Hurst指数

表 3 不同检测方法的检测结果比较

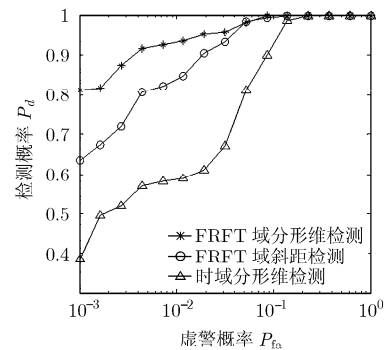
	海杂波距离单元		目标距离单元		差值绝对值	
	HH极化	VV极化	HH极化	VV极化	HH极化	VV极化
相干积累最小值	0.8821	0.8937	0.7215	0.8655	0.1606	0.0282
时域最大Hurst指数	0.1073	0.0407	0.3886	0.1356	0.2814	0.0948
FRFT域最小分形维数	1.7369	1.7730	1.3517	1.5154	0.3852	0.2576
FRFT域最小斜距	3.2092	3.1009	5.8976	4.9549	2.6884	1.8540



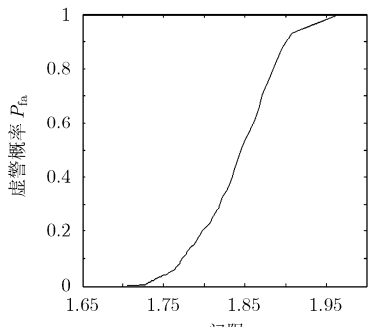
(a) 发现概率曲线



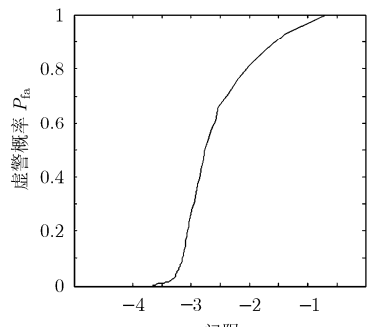
(a) 发现概率曲线



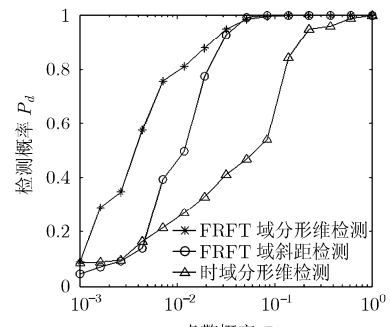
(a) HH极化



(b) 虚警概率曲线



(b) 虚警概率曲线



(b) VV极化

图15 HH极化，主目标单元 FRFT域分形维数检测性能分析

图16 HH极化，主目标单元 FRFT域斜距检测性能分析

图17 三种检测算法对不同极化数据的检测性能曲线

为进一步研究算法的检测性能,分析更多的数据。纯海杂波单元和主目标单元分别取1000段数据,每段数据长度为10000,相邻数据段之间重叠1%,然后根据无标度区间分别计算每一段数据的FRFT域分形特征,门限值通过对实测数据进行仿真计算得到。图15和图16分别给出了两种检测方法的检测性能曲线。从图中可以看到,在低信杂比条件下两种检测方法具有较好的发现目标能力,当分形维数检测方法的门限值设为1.75,发现概率可以达到90%左右,虚警概率小于0.1;而基于斜距的检测方法的门限值取为-3.2,虚警概率可以控制在0.1以内,同时发现概率达到80%左右。图17给出了检测概率随虚警概率的变化情况。由图可知,与传统的时域分形维检测相比,利用FRFT域分形特征差异的检测方法的检测概率有较大幅度的提高,后者在低虚警概率条件下的检测概率远高于前者,具有优良的检测性能。这得益于FRFT对动目标回波的积累。

5 结论

本文主要研究了海杂波在FRFT域的分形特性,提出了基于分形特征差异的联合动目标检测算法。对不同极化方式下的实测海杂波数据进行仿真分析,结果表明:(1)海杂波在FRFT域的一定标度区间 $m \in [2^5, 2^{10}]$ 内满足自相似性,其分形维数大于拓扑维数;(2)在最佳变换域,回波与海杂波在FRFT域的分形特征差异最大;(3)采用FRFT域分形维数和分形曲线拟合直线的斜距作为检测统计量,在低信杂比下(VV极化)仍能很好地检测出目标。如何更快地提取FRFT域的分形特征,提高算法的时效性,有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Carretero-Moya J, Gismero-Menoyo J, and Asensio-López A, *et al.* Application of the Radon transform to detect small-targets in sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2009, 3(2): 155-166.
- [2] Younsi A, Greco M, Gini F, and Zoubir A M. Performance of the adaptive generalized matched subspace constant false alarm rate detector in non-Gaussian noise: an experimental analysis[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2009, 3(3): 195-202.
- [3] Hu J, Tung W W, and 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.
- [4] Sun Hong-bo, Liu Guo-sui, and Gu Hong. Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(4): 1416-1424.
- [5] Lv Xiaolei, Xing Meng-dao, and Zhang Shou-hong, *et al.* Keystone transformation of the Wigner-Ville distribution for analysis of multicomponent LFM signals[J]. *Signal Processing (Elsevier)*, 2009, 89(5): 791-806.
- [6] Lütftiye Durak and Orhan Ar-kan. Short-time Fourier transform two fundamental properties and an optimal implementation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(5): 1231-1242.
- [7] 张南, 陶然, 王越. 基于变标处理和分数阶傅里叶变换的运动目标检测算法[J]. *电子学报*, 2010, 38(3): 683-688.
Zhang Nan, Tao Ran, and Wang Yue. A target detection algorithm based on scaling processing and fractional Fourier transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(3): 683-688.
- [8] Chen Yang-quan, Sun Rong-tao, and Zhou An-hong. An improved Hurst parameter estimator based on fractional Fourier transform[C]. *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Las Vegas, Nevada, USA, 2007: 1-11.
- [9] 李宝, 关键, 刘宁波. 海杂波FRFT域的分形特性及目标检测[J]. *雷达科学与技术*, 2009, 7(3): 210-213.
Li Bao, Guan Jian, and Liu Ning-bo. Target detection based on fractal dimension of sea clutter in fractional Fourier transform domain[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(3): 210-213.
- [10] Drosopoulos A. Description of the OHGR Database[R]. *Technology Note No. 94-14*, Ottawa: Defence Research Establishment, 1994: 1-30.
- [11] 姜斌, 王宏强, 黎湘等. S波段雷达实测海杂波混沌分形特性分析[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(8): 1809-1812.
Jiang Bin, Wang Hong-qiang, and Li Xiang, *et al.* The analysis of chaos and fractal characteristic based on the observed sea clutter of S-Band radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(8): 1809-1812.

陈小龙: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、海杂波中微弱目标检测。

刘宁波: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、海杂波中目标检测。

宋 杰: 男, 1981年生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、无源相干信号检测。

关 键: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达目标自动检测、跟踪与识别、侦察图像处理和信息融合。