海杂波背景下小目标检测的分形方法*

行鸿彦[1)2)†] 龚平[1)2)] 徐伟[1)2)]

1) (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)

2) (南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

(2011 年 10 月 25 日收到; 2012 年 2 月 10 日收到修改稿)

针对海杂波背景下小目标检测对海情依赖性强的问题, 本文采用分数布朗运动模型对实测海杂波建模, 结合多重分形去势波动分析法确定分形参数, 分析了海杂波的单尺度、多重分形特性. 在单尺度分形的基础上, 利用表征海杂波分形特征的分数维和 Hurst 指数构建了分形差量, 提出了基于分形差量的小目标检测方法; 在多重分形基础上, 比较了两种海杂波的高尺度多重分形特性. 结果表明, 当尺度 $q > 10$ 时, 纯海杂波的多重分形参数 $H(q) < 0$, 而存在小目标的 $H(q) > 0$, 此差异性为高尺度分形参数的海杂波背景小目标检测提供了判定依据. 所研究的两种方法均能实现不同海情下的小目标检测.

关键词: 海杂波, 分形, 小目标检测, 多重分形

PACS: 05.45.Df

1 引 言

海杂波是局部海平面对雷达发射信号的后向散射回波, 受到风、浪等多重因素的影响. 利用海杂波的特性分析海平面状况, 实现海平面、低空小目标的探测具有重要的理论意义和实用价值. 海杂波背景下的小目标检测是目前的研究热点和难点, 检测依据是存在小目标的海杂波与纯海杂波在某种特性上的差异性, 主要存在两大类方法 [1].

基于统计的方法, 这类方法主要从统计的角度分析海杂波特性, 通常采用对数正态分布 [2]、Weibull 分布 [3] 以及复合 K 分布 [4] 等对海杂波建模, 复合 K 分布能较好地反映海杂波的统计特性. 这类方法的主要依据是存在小目标的海杂波不再满足某种统计分布特征. 但海杂波受风、浪等多重因素影响, 单一的统计分布并没有从海杂波的物理意义等方面来分析. 同时, 统计方法通常认为海杂波是平稳过程, 但实质上海杂波具有强烈的非平稳性, 在实际中运用统计的方法实现小目标的检测存在较大的局限性.

基于非线性的方法, 这类方法运用非线性方法从时间或者空间的角度分析海杂波的特性, 更直观地反映了海杂波的物理特性. 1990 年, Haykin 等 [5] 分析实测海杂波确定了海杂波的嵌入维在 5—9 之间, 最大 Lyapunov 指数为正数, 认为海杂波是确知的混沌系统而非随机过程, 并依据小目标的存在会破坏原海杂波的混沌特性, 提出了基于混沌相空间重构和反向传播 (BP) 神经网络相结合的小目标检测算法 [6,7]. 随后相关的研究者提出了混沌相空间重构与径向基函数 (RBF)[8,9]、支持向量机 (SVM)[10−12] 等神经网络结合的改进算法. 但近年来有研究表明, 嵌入维和最大 Lyapunov 指数是正数并不能说明海杂波具有混沌特性 [13,14], 并指出 $1/f$ (f 为频率) 噪声也具有类似海杂波的特性, 但海杂波的非线性特征得到了研究者的认可. 分形是重要的非线性处理方法, 被广泛运用于生物医学 [15−17]、水文 [18] 等领域的研究, 可采用分形方法分析海杂波的特性. 1993 年, Lo 等 [19] 采用分数维分析海杂波, 指出小目标的存在使局部区域的海杂波分维数发生变化, 根据差异性能够实现海杂波背景下的小目标检测. 文献 [20—23] 采用分数布朗

* 国家自然科学基金 (批准号: 61072133) 和江苏省 "传感网与现代气象装备" 优势学科建设项目资助的课题.

† E-mail: xinghy@nuist.edu.cn

© 2012 中国物理学会 Chinese Physical Society

运动对海杂波进行建模, 证明了海杂波在一定时间区间具有分形特性, 并运用三种不同的方法确定了表征海杂波分形特性的 Hurst 指数, 实现了同一海情下的小目标检测, 在此基础上讨论了海杂波的多重分形特性. 由于海杂波的分形特性会随着海情的变化而变化, 单一的分形参数不能实现不同海情下的小目标检测. 国内, 许小可等 [24,25] 提出了基于空间分形特性的海杂波背景下小目标检测方法, 但并没有深入讨论方法的普适性. Guan 等 [26] 将 SVM 神经网络和多重分形谱结合较好地实现了海杂波背景下的小目标检测, 但 SVM 训练需要大量的计算时间, 大大降低了算法性能. 姜斌等 [27] 采用分形说明海杂波具有混沌特性, 然后运用 SVM 实现了海杂波背景下微弱信号的检测, 但并没有具体证明分形和混沌的联系.

近年来, 我们对混沌背景下的目标检测和海杂波的特性进行了一定的研究 [11,12,28], 利用海杂波的混沌特性和最优化方法提出了 BP 神经网络和 SVM 的检测理论, 但这两种方法都是建立在海杂波的混沌特征上, 对海杂波的混沌参数依赖性较强. 本文基于海杂波的非线性特性, 采用分形理论, 研究分析海情和雷达极性对海杂波分形参数的影响, 在单一尺度分形和多重分形的基础上, 分别研究相应的小目标检测方法, 实现不同海情下小目标的检测.

2 分数布朗运动

如果连续随机信号 $\boldsymbol{X}=\{X(t),t\geqslant 0\}$, 满足条件

$$X(\lambda t)\overset{d}{=}\lambda^{H}X(t)\quad t\geqslant 0, \tag{1}$$

其中 $\lambda>0, 0<H<1$, λ 为比例系数, d 表示统计分布相同, 则称该信号为自相似信号, H 为 Hurst 指数.

分形表明了事物本身的自相似性以及事物之间的相似性. 分形中常用的数学模型是分数布朗运动模型, 由 Mandelbrot 和 Ness 于 1968 年提出. Mandelbrot[29,30] 对分数布朗运动 $B_{\mathrm{H}}(t)$ 进行了如下定义:

$$\begin{aligned}B_{\mathrm{H}}(t)=&B_{\mathrm{H}}(0)+\frac{1}{\Gamma(H+1/2)}\\&\times\int_{-\infty}^{\tau}K(t-s)\mathrm{d}B(s),\end{aligned} \tag{2}$$

其中 $B_{\mathrm{H}}(0)=0$, $\mathrm{d}B(s)$ 是高斯分布决定的位移, s 为时间延迟, $\Gamma(H+1/2)$ 为常数, 积分核 $K(t)$ 为

$$\begin{aligned}&K(t-s)\\&=\begin{cases}(t-s)^{H-1/2} & (0<s<t),\\(t-s)^{H-1/2}-(-s)^{H-1/2} & (s<0),\end{cases}\end{aligned} \tag{3}$$

Hurst 指数 H 表征了数据之间的相似性关系. 它与分数布朗运动的分数维 D 存在如下关系 [29−31]:

$$H=2-D, \tag{4}$$

可知 Hurst 指数 H 增加时, 相应的分数维 D 就会下降, 反之, 当 H 减小时, 相应的分数维 D 会增加. 这两个参数均能表征分形特征.

分数布朗运动具有自相似性, 是一种典型的非平稳过程. 但分数布朗运动的增量为平稳高斯随机过程, 其分布满足 $N(0,\delta^2)$, 其中 δ 是非零值. 因此有

$$B_{\mathrm{H}}(t+1)-B_{\mathrm{H}}(t)\sim N(0,\delta^2), \tag{5}$$

$$\mathrm{Var}(B_{\mathrm{H}}(t+\tau)-B_{\mathrm{H}}(t))=\delta^2\tau^{2H}. \tag{6}$$

分数布朗运动只需要 H(或者 D) 一个参数就能表征数据的分形特征, 其中 τ 为时间延迟, Var 为取方差函数. 分数布朗运动的自相似性、长程相关性以及功率谱的分布特征与海杂波的特征非常相似, 因此采用分数布朗运动模型对海杂波的进行建模, 分析其基本特性. 但海杂波并不是完全的分数布朗运动, 只在一定的时间尺度范围内表现出分数布朗运动的特性. 研究也表明海杂波可以运用分形布朗运动来分析和处理.

3 多重分形去势波动分析法 (MF-DFA)

Hurst 指数 H 能够表征分形布朗运动的所有特性, 可以采用多种方法对 Hurst 指数进行估计, 常用的有波动分析法、去势波动分析法 (DFA) 和小波波动分析法等 [20]. DFA 是比较新颖的方法之一, 它在 1994 年由生物物理学家探索脱氧核糖核酸 (DNA) 的过程中提出. DFA 首先去除序列的基本趋势得到新序列, 然后对新序列进行记忆特征的研究. 2002 年, Kantelhardt 等 [32] 在 DFA 基础上提出了有限长非稳态时间序列的 MF-DFA, 指出了 MF-DFA 在分析非稳态时间序列多重分形特性的有效性和实用性, 是 DFA 的广义定义.

假设存在长度为 N 的时间序列 $\boldsymbol{X} = \{x(n), 0 < n \leqslant N\}$, MF-DFA 的实现过程主要分为如下的步骤 [32−34]:

1) 将序列减去平均值, 求局部和, 构成随机游走序列

$$y(n) = \sum_{i=1}^{n} [x(i) - \bar{x}] \quad 0 < n \leqslant N, \tag{7}$$

其中 $\bar{x}$ 为时间序列均值, 如果序列本身满足随机游走序列, 则该步骤略过;

2) 将新序列 $y(n)$ 分解成 $N_m = \mathrm{INT}(N/m)$ 个等长的不重叠子序列, 其中 $\mathrm{INT}(x)$ 是对变量 x 取整, 一般长度的时间序列, 如不能完全分解, 则从序列尾部向前反向分解获得 $\mathrm{INT}(N/m)$ 个子序列, 构成 $2N_m$ 个子序列, 长度较长的时间序列可不进行反向分解, 构成 N_m 个子序列, 减少计算量;

3) 每个子区间 $i(i = 1, 2, \cdots, 2N_m)$ 采用最小二乘法进行多项式数据拟合获得子序列的局部趋势项 $y_{i,\mathrm{fit}}(n)$, 其中多项式可以是一阶、二阶、p 阶等, 减去子序列的局部趋势项 $y_{i,\mathrm{fit}}(n)$, 获得子序列的局部振荡, 并对局部振荡按 (8) 式、(9) 式求方差. 如果只有 N_m 个子序列, 则只需要计算 (8) 式:

$$F^2(i,m) = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\{y[(i-1)*m+j] - y_{i,\mathrm{fit}}(j)\}^2 \quad (i = 1, 2, \cdots, N_m), \tag{8}$$

$$F^2(i,m) = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left\{y[N-(i-N_m)m+j] - y_{i,\mathrm{fit}}(j)\right\}^2 \quad (i = N_m+1, N_m+2, \cdots, 2N_m); \tag{9}$$

4) 计算 q 阶波动函数

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

其中 q 是非零实数, 对一系列的 m, 计算 $F_q(m)$ 的值;

5) 对不同的 q, 确定关系

$$F_q(m) \sim m^{H(q)}, \tag{11}$$

计算分形参数

$$H(q) = \frac{\mathrm{d}\ln(F_q(m))}{\mathrm{d}\ln(m)}. \tag{12}$$

实际计算过程中通常是对 $F_q(m) \sim m^{H(q)}$ 的双对数图的线性区间采用最小二乘法进行直线拟合估计线性区间的斜率大小, 即 $H(q)$. 如果 $H(q)$ 与 q 无关, 则说明时间序列的 $F_q(m)$ 与 q 无关, 时间序列的局部结构是一致的, 具有单分形特征. 如果 $H(q)$ 是关于 q 的函数, 则说明时间序列的 $F_q(m)$ 也是关于 q 的函数, 时间序列的局部结构是非均匀的、不一致的, 具有多重分形特征. 当 $q = 2$ 时, $H(q)$ 即为 DFA 的 Hurst 指数 H, 由此可见，MF-DFA 是 DFA 的广义定义.

4 基于分形的海杂波背景小目标检测

海杂波具有分形特性已经得到广泛的认可, 基于分形的海杂波背景小目标检测主要依据存在小目标的海杂波与纯海杂波分形参数的差异性. 小目标和海平面分形参数存在差异性, 这种差异性会传递给雷达回波, 这种差异性即可作为海杂波背景下小目标的检测依据. 但海平面的分形参数随着海面状况的变化而变化, 使得差异性也会随着海情等变化, 这也加大了不同海情下小目标检测的难度. 实测海杂波的特性也受到雷达采样频率、雷达数据极性等因素的影响. 分析这些因素的影响有利于提高小目标检测的方法改进.

本文采用 Haykin[35] 管理的 IPIX 海杂波数据作为研究对象. 该海杂波数据库由 14 种不同海情的数据构成, 每一组数据下包含 HH (发射端和接收端的极化方式均为水平方向) 和 VV (发射端和接收端的极化方向均为垂直方向) 两种雷达极性下 14 个距离门的不同数据, 每个距离门的数据长度为 131072 点, 大约 131 s. 为了方便研究分析, 网站指明了主要、次要目标所在距离门, 具体参看文献 [35].

4.1 分形差量的小目标检测

当 $q = 2$ 时, 即 $H(q) = H(2) = H$, 即采用 DFA 估计 Hurst 指数, Hurst 指数的大小表征了海杂波的分形特性, 分析海情、雷达极性对海杂波分形参数的影响, 研究存在小目标的海杂波与纯海杂波分形参数的差别.

4.1.1 DFA 分析海情、雷达极性对海杂波的影响

实测海杂波的研究主要是关于幅度的相关处理, 在运用分数布朗运动过程中, Hu 等 [21] 认为海杂波为随机游走过程比海杂波增量构成游走序列更能表现海杂波的性质, 由于 IPIX 数据量较大, 可

直接运用 (8) 式进行计算. 前期研究认为海杂波特性受到海情、风等因素的影响, 但均未用具体的参数说明海杂波是受到诸多因素影响的复杂系统.

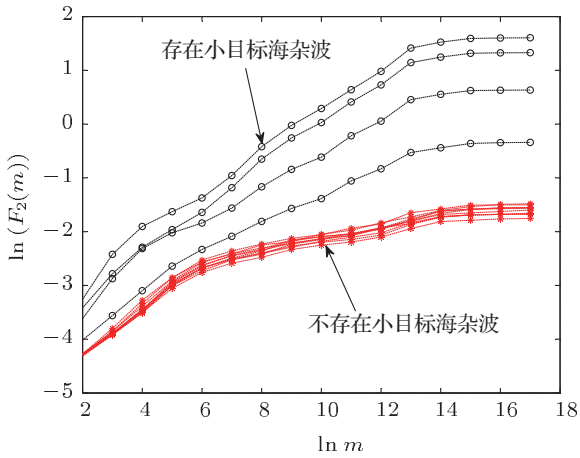

图 1 DFA 分析 IPIX#17 组不同距离门 HH 海杂波的 $F_2(m)$-m 双对数图

海杂波不是完全的分形布朗运动, 只在一定的时间范围内满足分形布朗运动. 首先, 确定海杂波具有分形特性的时间区间. 如图 1 所示, 首先分析 IPIX #17 组不同距离门下 HH 海杂波的 $F_2(m)$-m 双对数图. 图 1 中带有星号的曲线描述了纯海杂波 (没有受到小目标影响海域的海杂波) 的双对数图, 而带有小空心圆点的曲线描述了存在小目标的海杂波 (或者受到小目标影响海域的海杂波) 双对数图. 由图 1 可知, 当 m 处于 2^6 与 2^{14} 之间时, IPIX 海杂波#17 中不同距离门 HH 海杂波均表现出良好的线性关系, 将该时间区间作为海杂波的无标度区间, 即分形区间. 其次, 分析海杂波的 Hurst 指数. 带星号的曲线出现大量的重叠, 且斜率相似 (H 相近), 这说明纯海杂波的分形特性在同一海情下具有相似性; 带小空心圆点曲线的线性区间斜率大于带星号曲线的线性区间斜率, 即存在小目标的海杂波的 Hurst 指数大于纯海杂波的 Hurst 指数, 表明小目标的存在会改变海杂波的分形特性. 最后, 分析小目标对海杂波影响的范围. 带有小空心圆点的曲线未出现类似纯海杂波的重叠现象, 说明四条曲线所代表的海杂波分形特性并不相同, 小目标的存在只改变了四个距离门海杂波的 Hurst 指数. 结合小目标存在的位置 [35] 分析, 小目标的存在只影响相邻距离门的海杂波的 Hurst 指数, 即小目标的存在只改变小范围内海杂波的分形特性, 四条空心圆点曲线存在差异, 说明一定范围内小目标的影响效果存在差异. 依据 (4) 式可知, Hurst 指数的变化也会传递给分数维, 同一种海情下, 小目标的存在也会改变小范围内海杂波的分数维. 由此可知, 在同一种海情下, 纯海杂波的分形特性相似, 小目标的存在会改变小范围内海杂波的分形特性.

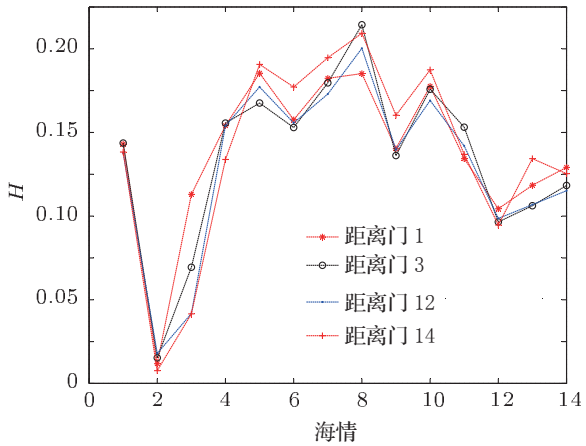

图 2 不同距离门纯海杂波随着海情变化的 Hurst 指数曲线

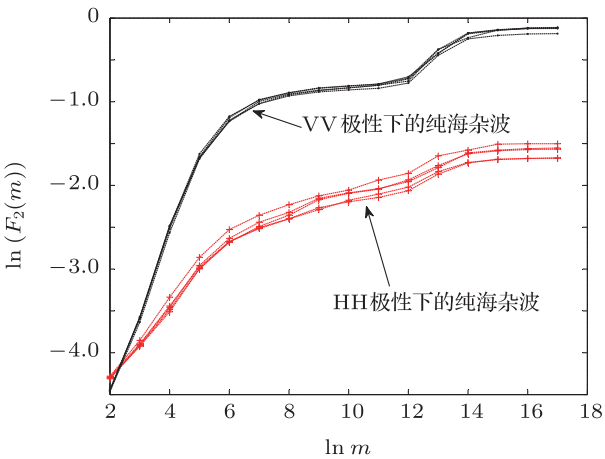

图 3 IPIX#17 纯海杂波在 HH 和 VV 两种雷达极性下的 $F_2(m)$-m 双对数图

图 2 为 14 种不同海情下, 四个不同距离门 HH 纯海杂波的 Hurst 指数 H 分布. x 轴表示已知的 14 种不同海情, y 轴表示海杂波的 Hurst 指数 H. 由图 2 可知, 在不同海情下, 同一距离门海杂波的 H 存在差异性; 在同一种海情下, 不同距离门海杂波的 H 非常接近. 说明在同一种海情下, 一定范围内的海平面的分形特性相同, 但海情的变化会导致海平面分形特性的变化, 通过改变 Hurst 指数得以体现. 图 3 分析了 IPIX#17 海杂波 (不受小目标影响) 在 HH 和 VV 两种雷达极性下的 $F_2(m)$-m 双对数图, 由图 3 可知, 两种极性下的海杂波在不同的区域出现大量重叠, 说明同一极性下纯海杂波

的分形特性相似. 但是在不同的极性下, 海杂波的分形特性不同. 首先, HH 极性下的海杂波在 m 处于 2^6—2^{14} 之间时均表现出良好的线性关系, 而 VV 方向的海杂波只在 m 处于 2^6—2^{12} 之间时表现出良好的线性关系, 说明两种极性下海杂波的分形区间存在差异; 其次, 两种极性下海杂波在线性区间的斜率大小也表现出差异, 即海杂波在不同极性下的 Hurst 指数不同, 说明海杂波在不同的极性下分形特性不相同. 综合两个方面可知, 实测海杂波的分形特性与海情、雷达极性等有直接的关系.

利用分形参数 Hurst 指数 H 作为同一种海情下小目标的检测依据取得了较好的检测效果, 图 4(a) 是 IPIX #17 HH 海杂波在不同距离门下的 Hurst 指数 H 的分布, 可知存在小目标的海杂波的 Hurst 指数大于纯海杂波的 Hurst 指数, 同时, 纯海杂波的 Hurst 在不同距离门下基本相同, 但存在小目标的 Hurst 指数并不相同, 即小目标对局部海杂波的影响并不相同, 存在一定的差异. 依据 (4) 式可知, Hurst 指数 H 与分维数 D 存在一定的关联性, 同一种海情下 H 的差异性也会体现在 D 上, 也可以采用分数维作为同一种海情下小目标的检测依据, 图 4(b) 给出了 IPIX#17 HH 海杂波在不同距离门下分数维 D 的分布图, 可以看出, 存在小目标的海杂波的分数维小于纯海杂波的分数维. 该结论与 Lo 等 [19] 得到的结论一致. 因此同一种海情下可以采用单一的分形参数 (H 或者 D) 作为小目标检测的依据.

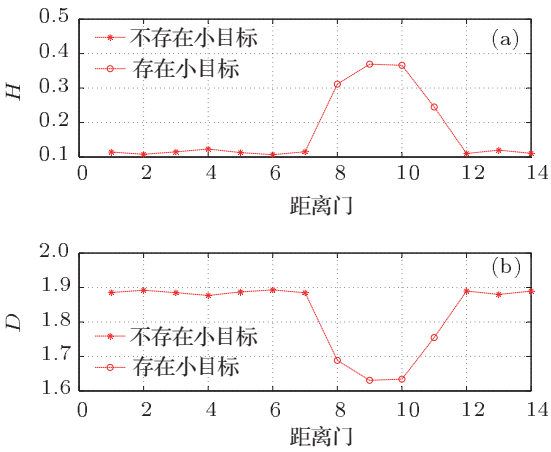

图 4 IPIX #17 HH 海杂波在不同距离门的 H 和 D 分布图 (a) H 分布图; (b) D 分布图

综合上述分析可知, 在同一种海情下, 同一极性下, 一定距离范围内纯海杂波的分形特性相似, 而存在小目标的海杂波分形特性变化较大. 这是小目标与海平面物理特性的差异所导致的, 小目标的存在会导致小范围内海平面分形特性的改变, 导致海杂波分形特性的改变. IPIX 中小目标会导致海杂波的 Hurst 指数 H 增大, 因此在同一种海情下, 海杂波背景的小目标检测可利用 Hurst 指数 H 的变化曲线来判断, 依据 (4) 式可以快速确定海杂波的分数维, Hurst 指数的差异性也会传递给分数维, 同一种海情下, 也可将分数维作为海杂波背景下小目标检测的依据.

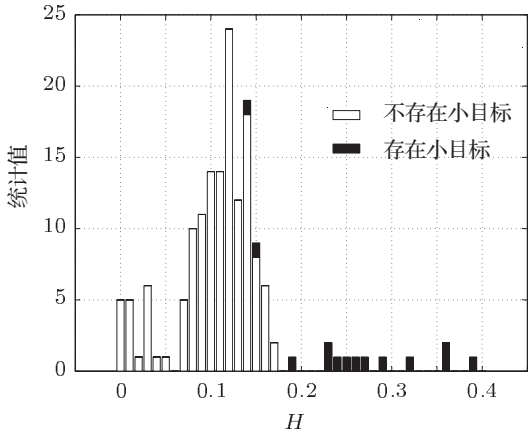

图 5 IPIX 的 HH 极性海杂波 Hurst 指数的统计分布图

依据上面的分析可知, 在不同海情下, 海杂波的分形特性表现出较大的差异性, 如果所有存在小目标的海杂波与纯海杂波的分形特性均有较大的差别, 则可以将单一的分形特性作为不同海情下海杂波背景小目标探测的依据, 即可采用恒虚警率实现不同海情下的小目标检测. 反之, 说明纯海杂波的分形特性与不同海情下存在小目标的海杂波其分形特性相似, 则采用单一的分形特性不能判断小目标的有无. 为了防止雷达数据极性和次要目标所在距离门海杂波的影响, 实验中选择同一极性下各种海情的海杂波, 并去除次要目标所在距离门的海杂波, 对两种海杂波的 Hurst 指数进行统计. 图 5 是 IPIX 中不同海情下 HH 海杂波的 Hurst 指数统计图, 图中黑色代表存在小目标的海杂波, 白色代表不存在小目标的海杂波. 可见海杂波的分形参数出现了一定程度的重叠, 说明在不同海情下存在目标的海杂波分形参数和不存在目标的海杂波分形特性有一定程度的相似性, 即单一的海杂波分形特性不能实现不同海情下海杂波背景的小目标检测. 其次, 虽然同一种海情下海杂波的分形特性可作为小目标检测的依据, 但是工程实践中, 海情复杂并

随时间改变, 很难准确获得各种海情的海杂波分形参数. 最后, 确定海杂波分形参数需要大量数据, 需要计算不同距离门下的分形参数大小才能判断具体范围是否存在小目标.

4.1.2 基于分形差量的小目标检测

分数维 D 和 Hurst 指数 H 均能表征海杂波的分形特性, 依据两者的同等重要性, 定义基于 Hurst 指数差值 ΔH 和分数维差值 ΔD 的分形差量 ΔT:

$$\begin{aligned}\Delta T =&|\Delta H| + |\Delta D|\\ =&|H - H_{\rm sea}| + |D - D_{\rm sea}|,\end{aligned} \tag{13}$$

由 (4) 式可知

$$\begin{aligned}\Delta T =&|H - H_{\rm sea}| + |(2 - H) - (2 - H_{\rm sea})|\\ =&2|\Delta H|,\end{aligned} \tag{14}$$

其中 $H_{\rm sea}$ 为同一种海情下纯海杂波的平均 Hurst 指数, $D_{\rm sea}$ 为同一种海情下纯海杂波的平均分数维.

同一种海情下, 一定范围内不同距离门下纯海杂波的 Hurst 指数或者分数维非常接近, 可用平均 Hurst 指数 $H_{\rm sea}$ 或者平均分数维 $D_{\rm sea}$ 表征该范围内纯海杂波的分形特性. 同一种海情下, 不同距离门纯海杂波的分形差量 ΔT 小; 而存在小目标的海杂波 Hurst 指数大于纯海杂波的 Hurst 指数, 分数维小于纯海杂波的分数维, 则分形差量 ΔT 较大. 在各种不同海情下, 存在小目标的海杂波均有较大的分形差量, 纯海杂波只有很小的分形差量, 因此可用单一的分形差量作为海杂波背景小目标的检测依据.

同一种海情下海杂波的 Hurst 指数非常接近, 平均 Hurst 指数用某一个具体纯海杂波的 Hurst 指数代替. 小目标的存在只对小范围内海杂波的分形特性有影响, 在工程实践中, 只需采集同一极性下两个相距较远距离门的海杂波, 确定两种海杂波的 Hurst 指数, 并计算两个 Hurst 指数的差值 (较小的 Hurst 指数为平均 Hurst 指数) ΔH, 根据 (14) 式确定分形差量 ΔT. 假定存在一个阈值 T, 当 $\Delta T > T$ 时, 说明两种海杂波分形特性差别较大, 可认为 Hurst 指数大的海杂波中存在小目标; 当 $\Delta T < T$ 时, 说明两种海杂波分形特性相似, 可认为海杂波中不存在小目标.

图 6 是 IPIX 的各种海情下 HH 海杂波分形差量的统计分布图. 由图 6 可知, 存在小目标的海杂波分形差量与纯海杂波的分形差量不存在重叠, 实现了有目标与无目标对象的分离, 在图 6 中, 不存在小目标的分形差量主要分布在 0.1 以下, 且在 0 附近的量较多, 说明纯海杂波的分形差量非常小, 接近 0; 存在小目标的海杂波分形差量分布在 0.1 以上, 说明了存在小目标的海杂波的分形差量相比纯海杂波的分形差量要大. 上述实验说明了采用分形差量实现海杂波背景下小目标检测的合理性. 因此, 在允许一定虚警概率的基础上, 基于单一分形差量的分析方法能实现不同海情下海杂波背景小目标的检测. 根据图 6, 在不同海情下, 可以认为当 $\Delta T < 0.13$ 时, 海杂波中不存在小目标, 而当 $\Delta T \geqslant 0.13$ 时, 存在小目标.

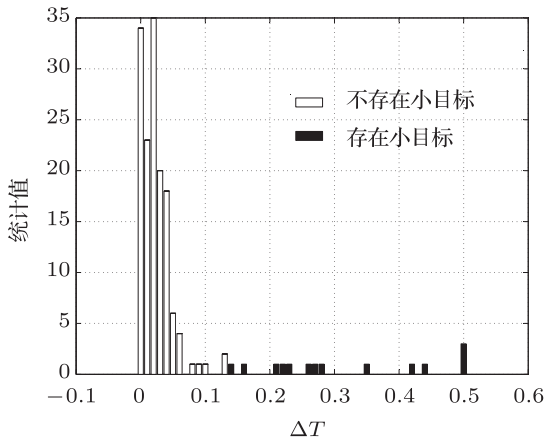

图 6 IPIX 的 HH 极性海杂波差量分形的统计分布图

4.2 高尺度多重分形参数的小目标检测

当 (11) 式中 $q \neq 2$ 时, 如果 $H(q)$ 不是常数, 而是关于 q 的函数, 则说明数据满足多重分形关系. 文献 [21, 22] 对海杂波采用分数布朗运动建模, 采用小波波动分析法估计 $H(q)$, 论证了海杂波具有多重分形特性. 当前运用海杂波的多重分形特性实现海杂波背景下小目标检测的主要方法是将多重分形谱和 SVM 相结合 [26], 通过 SVM 分类实现小目标的检测, 该方法能够较好地实现小目标的检测, 但是需要大量数据, 同时 SVM 训练需要大量的时间.

确定多重分形参数 $H(q)$ 的过程与单尺度分形参数的过程相似. 讨论海情对海杂波的多重分形参数存在影响, 对 IPIX #17, #54 两种海情下纯海杂波 (#17 的第 1 距离门、#54 的第 1 距离门) 和存在小目标影响的海杂波 (#17 的第 9 距离门、#54 的第 8 距离门) 进行 MF-DFA 分析, q 是非零的实数, 假设 $q = \pm1, \pm2, \cdots, \pm30$, 确定关于 q 的 $H(q)$. 如

图 7 所示, $H(q)$ 随着 q 的改变而改变, 说明海杂波具有多重分形特性. 图 7 中四条曲线彼此之间分开, 说明不同海情下海杂波的多重分形特性不同, 即海情影响海杂波的多重分形特性. 从图 7 中可知, 当 $q<0$ 时, 四条曲线的 $H(q)>0$, 曲线趋向平稳; 当 $q>0$ 时, 四条曲线出现较大的区别, 纯海杂波的多重分形参数在 $q>5$ 时, $H(q)<0$, 而存在小目标的海杂波的多重分形参数在 $q>5$ 时, $H(q)>0$, 同时随着 q 的增加, $H(q)$ 趋向平稳, 说明 q 在一定范围内 $H(q)$ 近似相等. 由此可知, 海情对海杂波的分形特性存在影响, 这与单一尺度下的结论相同, 同样小目标的存在会改变海杂波的多重分形参数, 且在 $q>5$ 的情况下表现出较大的差异性.

为了检验当 $q>5$ 时纯海杂波与存在小目标海杂波多重分形特性差异的普遍性, 对 14 种海情分别确定多重分形参数 $H(q)$. 实验选择 $20\leqslant q\leqslant 30$, 由于雷达极性对海杂波的分形参数有影响, 对不同的极性分开考虑, 同时为了减少数据量, 只对不同海情下的两组海杂波 (一组为纯海杂波, 另一组为存在小目标的海杂波) 确定 $H(q)$, 如表 1 和表 2 所示.

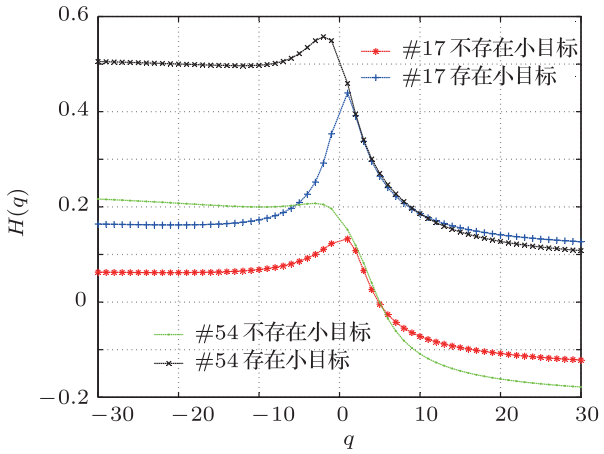

图 7 IPIX HH 极性海杂波在不同海情下的多重分形特性

表 1 IPIX 在 HH 极性下海杂波的高尺度多重分形参数 $H(q)$

q	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
#17 1[1]	−0.091	−0.093	−0.095	−0.096	−0.098	−0.099	−0.101	−0.102	−0.103	−0.104	−0.105
#17 9[2]	0.156	0.155	0.153	0.152	0.150	0.149	0.148	0.147	0.146	0.145	0.144
#18 1	−0.070	−0.072	−0.075	−0.077	−0.078	−0.080	−0.082	−0.083	−0.084	−0.086	−0.087
#18 9	0.348	0.346	0.344	0.343	0.341	0.340	0.338	0.337	0.336	0.335	0.334
#19 1	−0.169	−0.172	−0.174	−0.176	−0.178	−0.179	−0.181	−0.182	−0.183	−0.185	−0.186
#19 8	0.075	0.073	0.072	0.070	0.069	0.067	0.066	0.065	0.064	0.063	0.062
#25 1	−0.051	−0.053	−0.055	−0.056	−0.058	−0.059	−0.061	−0.062	−0.063	−0.064	−0.065
#25 7	0.033	0.031	0.029	0.027	0.025	0.024	0.022	0.021	0.019	0.018	0.017
#26 1	−0.082	−0.084	−0.086	−0.088	−0.090	−0.091	−0.093	−0.094	−0.095	−0.097	−0.098
#26 7	0.055	0.053	0.051	0.049	0.047	0.046	0.044	0.043	0.041	0.040	0.039
#30 1	−0.062	−0.064	−0.066	−0.068	−0.070	−0.072	−0.074	−0.075	−0.076	−0.078	−0.079
#30 7	0.035	0.033	0.031	0.029	0.027	0.026	0.024	0.023	0.021	0.020	0.019
#31 1	−0.053	−0.055	−0.058	−0.060	−0.062	−0.063	−0.065	−0.066	−0.068	−0.069	−0.070
#31 7	0.067	0.065	0.064	0.062	0.061	0.059	0.058	0.057	0.056	0.055	0.054
#40 1	−0.072	−0.074	−0.076	−0.078	−0.080	−0.082	−0.083	−0.084	−0.086	−0.087	−0.088
#40 7	0.067	0.065	0.063	0.061	0.059	0.058	0.057	0.055	0.054	0.053	0.052
#54 1	−0.189	−0.192	−0.194	−0.196	−0.198	−0.200	−0.202	−0.203	−0.205	−0.206	−0.207
#54 8	0.126	0.123	0.121	0.119	0.117	0.115	0.114	0.112	0.111	0.109	0.108
#280 1	−0.028	−0.030	−0.032	−0.033	−0.035	−0.036	−0.038	−0.039	−0.040	−0.041	−0.042
#280 8	0.063	0.061	0.059	0.057	0.056	0.054	0.053	0.052	0.051	0.049	0.048
#283 1	−0.084	−0.087	−0.089	−0.091	−0.092	−0.094	−0.096	−0.097	−0.098	−0.099	−0.101
#283 10	0.184	0.181	0.179	0.177	0.176	0.174	0.172	0.171	0.170	0.168	0.167

表 1 续

q	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
#310 1	−0.075	−0.077	−0.079	−0.081	−0.083	−0.084	−0.085	−0.087	−0.088	−0.089	−0.090
#310 7	0.022	0.020	0.019	0.017	0.015	0.014	0.013	0.011	0.010	0.009	0.008
#311 1	−0.069	−0.071	−0.073	−0.075	−0.076	−0.078	−0.079	−0.080	−0.081	−0.083	−0.084
#311 7	0.081	0.078	0.076	0.074	0.073	0.071	0.070	0.068	0.067	0.066	0.065
#320 1	−0.096	−0.099	−0.101	−0.103	−0.105	−0.107	−0.109	−0.110	−0.112	−0.113	−0.115
#320 7	0.110	0.107	0.105	0.103	0.101	0.099	0.097	0.096	0.094	0.093	0.091

[1] #17 1“#17” 表示海情为 17, “1” 表示海杂波所在的距离门, 其他海情的 “1” 均表示纯海杂波.

[2] #17 9“#17” 表示海情为 17, “9” 表示海杂波所在的距离门, 其他海情的非 “1” 均表示有小目标的海杂波

表 2 IPIX 在 VV 极性下海杂波的高尺度多重分形参数 $H(q)$.

q	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
#17 1	−0.074	−0.076	−0.078	−0.081	−0.083	−0.084	−0.086	−0.088	−0.089	−0.090	−0.092
#17 9	0.059	0.058	0.056	0.054	0.053	0.052	0.050	0.049	0.048	0.047	0.046
#18 1	−0.029	−0.032	−0.034	−0.036	−0.038	−0.040	−0.042	−0.043	−0.044	−0.046	−0.047
#18 9	0.259	0.258	0.257	0.255	0.254	0.253	0.252	0.251	0.250	0.249	0.249
#19 1	−0.091	−0.093	−0.095	−0.097	−0.098	−0.100	−0.101	−0.102	−0.103	−0.104	−0.105
#19 8	−0.052	−0.054	−0.056	−0.058	−0.059	−0.061	−0.062	−0.063	−0.064	−0.065	−0.066
#25 1	−0.063	−0.066	−0.067	−0.069	−0.071	−0.073	−0.074	−0.075	−0.077	−0.078	−0.079
#25 7	0.257	0.254	0.252	0.250	0.248	0.247	0.245	0.244	0.242	0.241	0.240
#26 1	−0.035	−0.037	−0.038	−0.040	−0.041	−0.042	−0.044	−0.045	−0.046	−0.047	−0.047
#26 7	0.055	0.052	0.050	0.048	0.046	0.044	0.043	0.041	0.040	0.038	0.037
#30 1	−0.067	−0.069	−0.071	−0.073	−0.074	−0.075	−0.077	−0.078	−0.079	−0.080	−0.081
#30 7	0.075	0.073	0.071	0.069	0.067	0.066	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060
#31 1	−0.035	−0.038	−0.040	−0.042	−0.044	−0.046	−0.047	−0.049	−0.050	−0.052	−0.053
#31 7	0.115	0.113	0.111	0.109	0.108	0.106	0.105	0.104	0.103	0.102	0.101
#40 1	−0.070	−0.072	−0.074	−0.076	−0.078	−0.079	−0.081	−0.082	−0.084	−0.085	−0.086
#40 7	0.136	0.134	0.132	0.130	0.128	0.126	0.125	0.123	0.122	0.121	0.120
#54 1	−0.108	−0.111	−0.113	−0.116	−0.118	−0.119	−0.121	−0.123	−0.124	−0.125	−0.127
#54 8	0.071	0.069	0.067	0.066	0.064	0.063	0.061	0.060	0.059	0.058	0.057
#280 1	−0.097	−0.099	−0.101	−0.103	−0.105	−0.107	−0.109	−0.110	−0.111	−0.113	−0.114
#280 8	0.117	0.116	0.114	0.112	0.111	0.110	0.108	0.107	0.106	0.105	0.104
#283 1	−0.019	−0.020	−0.022	−0.023	−0.024	−0.025	−0.026	−0.027	−0.027	−0.028	−0.029
#283 10	0.200	0.198	0.196	0.194	0.193	0.191	0.190	0.189	0.188	0.187	0.186
#310 1	−0.057	−0.059	−0.061	−0.062	−0.064	−0.065	−0.067	−0.068	−0.069	−0.070	−0.071
#310 7	0.069	0.068	0.067	0.065	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060	0.059	0.058
#311 1	−0.069	−0.072	−0.074	−0.075	−0.077	−0.079	−0.080	−0.082	−0.083	−0.084	−0.085
#311 7	0.120	0.118	0.116	0.114	0.112	0.110	0.109	0.107	0.106	0.105	0.104
#320 1	−0.040	−0.041	−0.043	−0.045	−0.046	−0.047	−0.049	−0.050	−0.051	−0.052	−0.053
#320 7	0.122	0.120	0.118	0.117	0.115	0.114	0.113	0.111	0.110	0.109	0.108

分析表 1, 表 2 可知, 当 $20 \leqslant q \leqslant 30$ 时, 两种极性下存在小目标海杂波的多重分形参数 $H(q) > 0$, 而纯海杂波的 $H(q) < 0$, 只在 VV 极性下#19 8 (存在小目标海杂波) 的 $H(q) < 0$. 因此可以认为在高尺度 ($q > 20$) 下, 纯海杂波的 $H(q) < 0$, 而存在小目标时 $H(q) > 0$. 因此, 依据海杂波高尺度多重分形参数的差异可实现小目标的检测. 小目标的存在使海杂波中局部振荡成分变大, 局部振荡的方差也会增加, 因此存在小目标的海杂波分形特性总是大于纯海杂波的分形特性, 在高尺度下这种差异性更加明显.

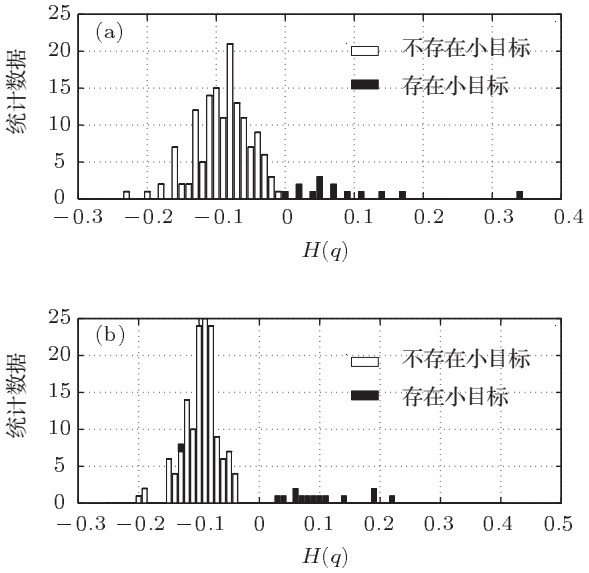

图 8 采用高尺度分形参数实现 IPIX HH 和 VV 极性海杂波背景下小目标的检测图 (a) HH 极性; (b) VV 极性

由图 7 可知, 在高尺度下, $H(q)$ 趋向稳定, 为了提高抗干扰性, 对海杂波一系列的高尺度分形参数 $H(q)$ 取均值 $\bar{H}$, 将均值 $\bar{H}$ 与 0 比较, 若 $\bar{H} > 0$, 海杂波中存在小目标; 若 $\bar{H} < 0$, 不存在小目标. 采用高尺度多重分形参数对 IPIX 两种极性下的海杂波进行小目标检测, 如图 8 所示. 从图 8 可知, 在两种极性下采用高尺度分形参数进行检测基本实现了存在小目标海杂波与纯海杂波的分离, 但是在两种极性下的检测效果并不相同. 在 HH 极性下, 两种海杂波分离不明显, 但依据高尺度分形参数能准确实现小目标的检测; 在 VV 极性下, 两种海杂波分离明显, 但存在一定的误判. 出现误判的原因可能是在处理过程中满足分形特性的区间选择有一定的误差, 在不同的海情下, 满足分形特性的区间也会存在一定的差异性, 而本文在处理过程中都是依据相同的分形区间.

5 结 论

本文采用分形的方法分析了 IPIX 实测海杂波的单尺度、多重分形特性, 提出了两种海杂波背景下小目标检测的方法, 较好地解决了小目标检测对海情敏感的问题. 结果表明 IPIX 实测海杂波在一定时间区间具有分形特性, 但分形特性随着海情的变化而变化, 雷达极性也会影响海杂波的分形特征; 小目标的存在会改变小范围海平面分形特性的改变, 进而影响小范围内海杂波分形特性的改变, 在同一种海情下, 可以运用分形特性的差异实现海杂波背景下小目标的检测, 在不同海情下, 可以采用分形差量实现海杂波背景的小目标检测; IPIX 实测海杂波具有多重分形特性, 不同的海情下, 在高尺度下 ($q > 20$), 纯海杂波的多重分形参数 $H(q) < 0$, 而存在小目标时 $H(q) > 0$. 这为目标检测提供了判定依据, 解决了不同海情下的小目标检测问题.

[1] Duan G, Qian Y Y, Wang Z 2009 *Sci. Technol. Inform.* **35** 863 (in Chinese) [段刚, 钱玉莹, 王哲 2009 科技信息 **35** 863]
[2] Trunk G V, George S F 1970 *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.* **6** 620
[3] Fay F A, Clarke J, Peters R S 1977 *Proceedings of the International Conference,* London, England, October 25–28, 1977 p101
[4] Nohara T J, Haykin S 1991 *Proc. Inst. Elect. Eng.* **138** 80
[5] Haykin S, Heung H 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 593
[6] Haykin S, Li X B 1995 *Proc. IEEE* **83** 195
[7] Haykin S, Puthusserypady S 1997 *Chaos* **7** 777
[8] Chen Y, Luo P F 2005 *Rader Sci. Technol.* **5** 271 (in Chinese) [陈瑛, 罗鹏飞 2005 雷达科学与技术 **5** 271]
[9] Hennessey G, Leung H, Drosopoulos A, Yip P C 2001 *IEEE J Ocean Eng.* **26** 358
[10] Jiang B, Wang H Q, Fu Y W 2007 *Prog. Nat. Sci.* **17** 415 (in Chinese) [姜斌, 王宏强, 付耀文 2007 自然科学进展 **17** 415]
[11] Xing H Y, Xu W 2007 *Atca Phys. Sin.* **56** 3771 (in Chinese) [行鸿彦, 徐伟 2007 物理学报 **56** 3771]
[12] Xing H Y, Jin T L 2010 *Atca Phys. Sin.* **59** 140 (in Chinese) [行鸿彦, 金天力 2010 物理学报 **59** 140]
[13] Unsworth C P, Cowper M R, McLaughlin S, Mulgrew B 2002 *IEE Pro.: Radar Son. Nav.* **149** 105
[14] Haykin S, Bakker R, Currie B W 2002 *Proc. IEEE* **90** 860
[15] Yu Z G, Vo A, Gong Z M, Long S C 2002 *Chin. Phys.* **11** 1313
[16] Han J J, Fu W J 2010 *Chin. Phys.* B **19** 010205
[17] Yang X D, Ning X B, He A J, Dou S D 2008 *Atca Phys. Sin.* **57** 1514 (in Chinese) [杨小冬, 宁新宝, 何爱军, 都思丹 2008 物理

学报 **57** 1514]
[18] Zang B J, Shang P J 2007 *Chin. Phys.* **16** 565
[19] Lo T, Leung H, Litva J, Haykin S 1993 *IEEE Proc.* F **140** 243
[20] Hu J, Gao J B, Posner F L, Zheng Y, Tung W W 2006 *Fractals* **14** 187
[21] Hu J, Tung W W, Gao J B 2006 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **54** 136
[22] Gao J B, Yao K 2002 *Proceedings of the 2002 IEEE Radar Conference* Long Beach, USA, April 25–25, 2002 p500
[23] Shi Z G, Zhou J X, Fu Q 2006 *J. Sys. Simu.* **18** 2289 (in Chinese) [石志广, 周剑雄, 付强 2006 系统仿真学报 **18** 2289]
[24] Xu X K, Liu X M, Chen X N 2007 *J. D. M. U.* **33** 45 (in Chinese) [许小可, 柳晓鸣, 陈晓楠 2007 大连海事大学学报 **33** 45]
[25] Xu X K 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1425
[26] Guan J, Liu N B, Zhang J, Song J 2010 *Signal Proc.* **90** 523
[27] 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]
[28] Xu W, Tang S T, Zhou X C 2007 *Radar Ecm.* **2** 27 (in Chinese) [徐伟, 唐霜天, 周希辰 2007 雷达与对抗 **2** 27]
[29] Mandelbrot B B, Ness J W V 1968 *SIAM Rev.* **10** 422
[30] Gao J B, Cao Y H, Tung W W, Hu J 2007 *Multiscale Analysis of Complex Time Series*: *Integration of Chaos and Random Fractal Theory, and Beyond* (New York: John Wiley and Sons, Inc.) p79
[31] Flandrin P 1992 *IEEE Trans. Inform. Theory* **38** 910
[32] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny B E 2002 *Physica* A **316** 87
[33] Zhou Y, Leung Y, Yu Z G 2011 *Chin. Phys.* B **20** 090507
[34] Yang P, Hou W, Feng G L 2008 *Atca Phys. Sin.* **57** 5333 (in Chinese) [杨萍, 侯威, 封国林 2008 物理学报 **57** 5333]
[35] http://soma.crl.mcmaster.Ca/ipix/Dartmouth/[2011-02-15]

Small target detection in the background of sea clutter using fractal method*

Xing Hong-Yan[1)2)†] Gong Ping[1)2)] Xu Wei[1)2)]

1) (*Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044*, China*)

2) (*College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044*, China*)

(Received 25 October 2011; revised manuscript received 20 February 2012)

Abstract

Because the detecting of the small target in the background of sea clutter is strongly dependent on sea condition, in this article we use fractional Brownian motion to model IPIX sea clutter and combine multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA) to determine the fractal parameters for analyzing fractal and multifractal property of IPIX sea clutter. Based on the fact that Hurst parameter and fractal dimension can reflect the fractal property of data, a new parameter named fractal differential which has difference when the sea clutter with or without target is defined, thereby solving the problem of small target in sea clutter background. By comparing the multifractal parameters of two sea clutter, the experimental results show that $H(q)$ is a special value which is bigger than zero when the sea clutter has a small target but smaller than zero when the sea clutter has no target if q is bigger than ten. Another method is proposed by using the difference of $H(q)$. Two methods in this article can solve the problem of strong dependence of detecting the small target in different sea conditions on sea condition.

Keywords: sea clutter, fractal, small target detection, multifractal

PACS: 05.45.Df

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61072133) and the Jiangsu Sensor Network and Modern Meteorological Equipment Preponderant Discipline Platform, China.

† E-mail: xinghy@nuist.edu.cn