

实测海杂波频域分形特性分析

刘宁波* 黄勇 关键 何友
(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

摘要: 该文主要研究海杂波在频域中的分形特性以及不同参数对频域分形特性的影响。首先, 该文以分数布朗运动(FBM)为例, 较为系统地阐述了在时域 FBM 具有分形特性的前提下, FBM 频谱也具有分形特性。然后, 采用 X 波段与 S 波段实测海杂波数据验证频域中海杂波的分形特性, 并分析了不同参数对频域海杂波分形特性的影响。结果表明, 实测海杂波频谱在统计意义下满足自相似条件, 具有分形特性, 且频域分形特征对海杂波与目标回波表现出一定的可分性, 具有在海杂波微弱目标检测中应用的潜力。

关键词: 目标检测; 分数布朗运动; 实测海杂波; 频谱; 分形

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0929-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00856

Fractal Analysis of Real Sea Clutter in Frequency Domain

Liu Ning-bo Huang Yong Guan Jian He You
(Department of Electronic and Information Engineering,
Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: This paper studies mainly the fractal property of the real sea clutter in frequency domain and the effects of different parameters to the fractal characteristics of the sea clutter spectrum. Firstly, this paper takes Fractional Brownian Motion (FBM) for example and interprets detailedly that the spectrum of the FBM is fractal on condition that the FBM time series is fractal. Then, X-band and S-band real sea clutter are used for the verification of the fractal property of the real sea clutter spectrum. At the same time, the effects of the different parameters are analyzed. The results show that the spectrum of the real sea clutter is self-similar in statistical meaning, namely it is fractal. Additionally, it is found that the fractal characteristics of the sea clutter and target echoes in frequency domain are different to some extent and this difference has the potential for weak target detection within sea clutter.

Key words: Target detection; Fractional Brownian motion (FBM); Real sea clutter; Spectrum; Fractal

1 引言

分形理论是 20 世纪 70 年代 Mandelbrot^[1]为了表征复杂图形和复杂过程引入的, 是非线性科学研究中一个十分活跃的分支。分形理论的研究对象是自然界中不光滑和不规则的物体, 它深刻揭示了实际系统与随机信号中广泛存在的自相似性和标度不变性。分形理论拓宽了人们的视野, 并且已在自然科学的多个领域获得广泛应用, 尤其是在雷达信号处理、图像处理、语音信号处理等领域具有重要的应用价值和广阔的发展前景^[2-6]。自 Lo 等人^[5]首次将单一分形维数应用于海杂波中目标检测以来, 分

形理论在此方向的应用取得了较好的发展, 并取得了一系列有意义的成果。Salmasi 等人^[6]利用同一组数据不同数据段的分形维数服从高斯分布的特点设计了一个检测器, 解决了利用分形维数进行目标检测难以实现恒虚警(CFAR)的问题。而 Savaidis 等人^[7]通过对散射理论的研究发现: 散射表面的分形特性将被携带到散射信号中去, 散射信号的分形特征可以反映海面的自相似结构, 这一结论说明通过回波信号研究物理海面的自相似结构是可行的。由于单一分形并不能很好地反映分形对象的局部奇异性, Kaplan 等人^[8,9]研究了分数布朗运动(FBM)的扩展自相似特性, 对单一分形特征进行推广, 并研究了其在分类与检测方面的应用。文献[10,11]分析了海杂波幅度分布、时空相关等特性, 验证了实测海杂波数据是多重分形的, 并提出一种基于多重分形结构函数的目标检测方法。随着分形理论研究的进

2011-08-21 收到, 2011-12-09 改回

国家自然科学基金(60802088, 61179017), “泰山学者”建设工程专项经费和航空科学基金(20095184004)资助课题

*通信作者: 刘宁波 lnb198300@yahoo.com.cn

展,周炜星等人^[12]提出了多重分形关联的分析方法,这一方法也被用于海杂波中的目标检测,并获得了较好的检测性能^[13]。另外,还有人研究了模糊分形、分形自仿射等理论^[14-17],并将其应用于目标检测中。

通过对分形理论在目标检测中应用的简单回顾可发现,分形理论在目标检测领域的应用经历了由浅入深、由简到繁的发展历程。雷达目标的分形检测方法主要关心时间序列结构的变化,而不是完全依赖于信号幅度的强弱,从而在一定程度上可以摆脱信杂比(SCR)的束缚,但在SCR很低时分形检测方法同样是无效的,而且随着分形理论应用的复杂化,所得到的检测算法越来越复杂,难以具有实时性。另外,由于分形参数估计对数据量的高要求,在时域中直接采用分形特征检测海面运动目标难以实现。考虑相参雷达动目标指示(MTI)的处理方法,若可以在频域中引入分形分析方法,则一方面时域回波变换到频域后动目标回波的能量可得到有效积累,提升SCR;另一方面可以降低分形参数估计对数据量的需求。目前可以找到的与此方向较为接近的文献是[18,19],其中提到如果一个信号是分形的,那么它的功率谱密度与频率呈幂律关系,这种过程称为 $1/f^\alpha$ 噪声,但并未作进一步研究。也有相关文献研究FBM的谱特性,但其主要目的是通过功率谱估计谱指数从而得到时域序列Hurst指数^[20,21],而不是将分形分析方法引入到频域中。

本文将以FBM为例,系统地阐述在时域FBM具有分形特性前提下,FBM频谱也具有分形特性,然后将分形分析方法引入到对X波段与S波段雷达实测海杂波频谱的分析中,分析频谱的自相似结构以及不同参数对频谱分形特性的影响,同时还将研究目标回波对海杂波频谱分形特性的影响,为下一步海杂波中的目标检测算法研究奠定基础。

2 FBM在频域中的自相似性

分数布朗运动(FBM)是由经典的布朗运动推广而来的,因此本节首先给出布朗运动的定义^[22]。布朗运动是满足下列条件的随机过程 $B(t)$:

(1) $B(0)=0$ (即过程从原点开始),且 $B(t)$ 为 t 的连续函数;

(2)对任意的 $t \geq 0$ 和 $h > 0$,增量 $B(t+h)-B(t)$ 服从均值为0,方差为 h 的正态分布;

(3)若 $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$,则增量 $B(t_2)-B(t_1)$, $B(t_3)-B(t_2), \dots, B(t_n)-B(t_{n-1})$ 相互独立。

由(1)和(2)可得,对于每个 t , $B(t)$ 自身也服从均值为0,方差为 t 的正态分布,且 $B(t)$ 的增量是平稳

的,因此, $B(t)$ 的概率密度函数可表示为

$$P_{B(t)}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2t}\right\} \quad (1)$$

将式(1)作如下尺度变换:

$$t \rightarrow \kappa t, \quad x \rightarrow \kappa^{1/2}x \quad (2)$$

则有如下标度规律:

$$\begin{aligned} P_{B(\kappa t)}(\kappa^{1/2}x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\kappa t}} \exp\left\{-\frac{(\kappa^{1/2}x)^2}{2\kappa t}\right\} \\ &= \kappa^{-1/2}P_{B(t)}(x) \end{aligned} \quad (3)$$

且在式(2)所示的标度变换下,总分布概率保持不变,即

$$\int_{-\infty}^{\infty} P_{B(t)}(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} P_{B(\kappa t)}(\kappa^{1/2}x)d(\kappa^{1/2}x) = 1 \quad (4)$$

式(4)表明, $B(t)$ 与 $\kappa^{-1/2}B(\kappa t)$ 具有相同的概率分布,即在统计意义下二者是自相似的,可采用如下形式表达:

$$B(t) \stackrel{\text{s.t.a}}{=} \kappa^{-1/2}B(\kappa t) \quad (5)$$

其中 $\stackrel{\text{s.t.a}}{=}$ 表示在统计意义下相等。

分数布朗运动 $B_H(t)$ 首先由Mandelbrot从布朗运动推广而来^[1,23],所使用的公式如式(6)所示。

$$B_H(t) - B_H(0) = \frac{1}{\Gamma(H+1/2)} \int_{-\infty}^t \varphi(t-s)dB(s) \quad (6)$$

其中

$$\varphi(t-s) = \begin{cases} (t-s)^{H-1/2}, & 0 \leq s \leq t \\ (t-s)^{H-1/2} - (-s)^{H-1/2}, & -\infty \leq s < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数,由第2类欧拉积分确定,即 $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t}t^{z-1}dt$ ($z > 0$); $B(t)$ 为1维布朗运动曲线。

FBM的定义^[22]与布朗运动定义的前两个条件相似,即:(1) $B_H(0)=0$,且 $B_H(t)$ 为 t 的连续函数;(2)对任意的 $t \geq 0$ 和 $h > 0$,增量 $B_H(t+h)-B_H(t)$ 服从均值为0,方差为 h^{2H} 的正态分布。此定义也蕴含增量 $B_H(t+h)-B_H(t)$ 是平稳的,但与布朗运动不同的是,FBM($H \neq 1/2$ 时)不具有独立的增量。

对于FBM曲线,若时间尺度从 t 变到 κt ,则在布朗运动统计自相似的前提下,式(6)变为

$$\begin{aligned} &B_H(\kappa t) - B_H(0) \\ &= \frac{1}{\Gamma(H+1/2)} \int_{-\infty}^{\kappa t} \varphi(\kappa t - \kappa s)dB(\kappa s) \\ &\stackrel{\text{s.t.a}}{=} \frac{1}{\Gamma(H+1/2)} \int_{-\infty}^t \kappa^{H-1/2} \varphi(t-s) \kappa^{1/2}dB(s) \\ &= \kappa^H \cdot \frac{1}{\Gamma(H+1/2)} \int_{-\infty}^t \varphi(t-s)dB(s) \\ &= \kappa^H [B_H(t) - B_H(0)] \end{aligned} \quad (8)$$

不失一般性, 可假设 $B_H(0)=0$, 则 $B_H(t) \stackrel{\text{s.t.a}}{=} \kappa^{-H} B_H(\kappa t)$, 即 FBM 也是统计自相似的。在 $H=1/2$ 时, 有 $B_H(t) \stackrel{\text{s.t.a}}{=} \kappa^{-1/2} B_H(\kappa t)$, 与布朗运动相符。

为研究 FBM 在频域的自相似性, 首先需对 FBM 序列进行 Fourier 变换, 把原来在时域内以时间 t 为变量的函数 $B_H(t)$ 变换为频域内以频率 f 为变量的函数 $F_B(f)$, 即

$$F_B(f) = \int_0^T B_H(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (9)$$

其中 $B_H(t)$ 定义在区间 $(0, T)$ 内。由于频谱振幅平方正比于功率, 单位时间内功率谱密度 $S_B(f)$ 可定义如下^[24]

$$S_B(f) = \frac{|F_B(f)|^2}{T} \quad (10)$$

在此基础上可以研究尺度变换条件下频谱与功率谱的自相似特性, 采用尺度变换 $t' = \kappa t$, 则由式(8)可得 $B_H(t') \stackrel{\text{s.t.a}}{=} \kappa^H B_H(t)$, 代入式(9)中可得

$$F_B(f) \stackrel{\text{s.t.a}}{=} \int_0^{\kappa T} \frac{B_H(t')}{\kappa^H} e^{-j2\pi f t' / \kappa} d(t' / \kappa) = \frac{1}{\kappa^{H+1}} F_B\left(\frac{f}{\kappa}\right) \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)中, 整理可得

$$S_B(f) \stackrel{\text{s.t.a}}{=} \frac{1}{\kappa^{2H+1}} \frac{|F_B(f/\kappa)|^2}{\kappa T} = \frac{1}{\kappa^{2H+1}} S_B(f/\kappa) \quad (12)$$

由式(12)可知, 频率标度变为原来的 $1/\kappa$ 后, 功率谱密度扩大为原来的 κ^{2H+1} 倍^[24]。这说明 FBM 的频谱、功率谱密度都是频率的幂函数, 均具有自相似性。为区分于时域中的无标度区间, 在频域中自相似性成立的区间称为频率无标度区间。

综上所述, FBM 的频谱和功率谱密度函数是分形的, 这为在频域中应用分形理论奠定了基础, 本文后续的分析将立足于频域, 采用分形理论直接对 FBM 的频谱或功率谱密度函数进行分析与参数估计。

3 实测海杂波分析与验证

本节将采用 X 波段与 S 波段实测雷达数据进行

分析与验证, 其中 X 波段海杂波数据来自于“Osborn Head Database”, 是加拿大 McMaster 大学采用 IPIX 雷达对海探测采集得到的, 采集数据时天线工作在驻留模式, 对某一方位海面长时间照射, 观察目标为一漂浮于海面上包裹着金属网的塑料球体, 更详细的情况请见文献[25], 数据包含 HH, VV 极化两种情况, SCR 约为 0~6 dB。另外一组海杂波数据是某 S 波段雷达对海照射采集得到的, 数据采集时天线工作在驻留模式且处于 VV 极化模式下, 观察目标为一远离雷达缓慢运动的小渔船(渔船运动方向与雷达天线指向有约 30° 夹角, 由于雷达天线不动, 因此渔船在雷达视野内出现一段时间后消失), SCR 约为 0~3 dB。图 1 给出了 3 组海杂波数据的时域归一化幅度波形图。

3.1 海杂波频谱的分形特性

对于采用 FBM 建模时域海杂波已有不少文献进行了研究^[26,27], 本节在此基础上主要分析 X 波段与 S 波段海杂波频谱的分形特性。图 2 给出了图 3 组数据杂波单元与目标单元的频谱, 由图 2 可以看到, X 波段与 S 波段海杂波的多普勒谱均具有一定偏移, 大约在 -100~100 Hz 的范围内, 这主要是因为海面是一个永不停息运动着的散射体, 当海浪(Bragg 波)向雷达运动时, 海杂波多普勒谱的中心频率偏向正值方向; 当海浪(Bragg 波)远离雷达运动时, 海杂波多普勒谱的中心频率则偏向负值方向。此外, 由图 2 还可以看到海杂波的多普勒谱在中心频率附近具有一定的展宽, 这主要是由大尺度波浪的振动效应造成的。由图 2(a)与 2(b)所示的目标单元频谱可以发现, 目标能量得到了较好的积累, 且目标的多普勒频率靠近零频, 但不绝对为零, 这主要是因为目标随海面的运动而具有微弱的速度; 而由图 2(c)所示的目标单元频谱可以发现 S 波段雷达观测目标的多普勒频率为负值, 这与小渔船远离雷达的运动状态相符, 但能量积累效果不如 X 波段条件下明显, 原因如下: 频谱计算是针对由某一距离

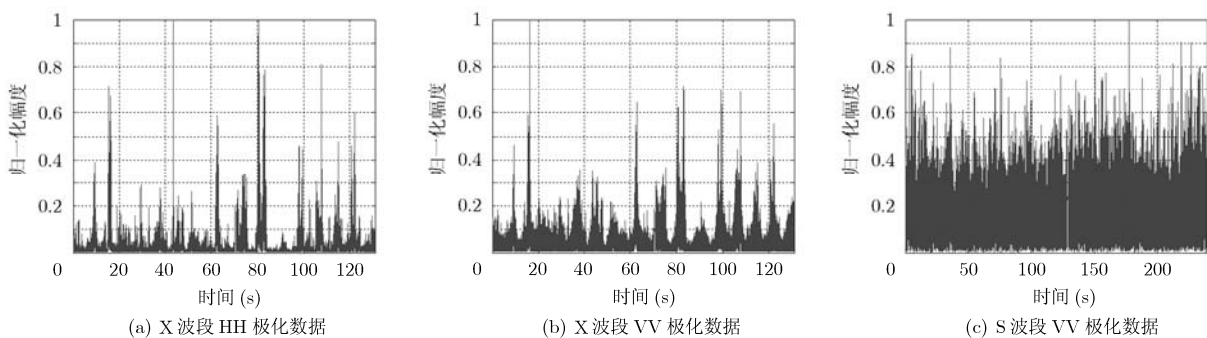


图 1 实测海杂波数据归一化时域波形图

单元所得到的回波时间序列进行的,图2中计算频谱时所采用的时间序列较长,若目标静止(如X波段数据),则在某一距离单元目标回波一直存在,时间序列越长积累效果越好;若目标运动(如S波段数据),则对某一距离单元而言,由其得到的长时间序列可能只在一段时间包含目标回波,在其它时刻目标已不在此距离单元从而回波只包含海杂波(此处不考虑热噪声等),此种条件下将回波序列变换到频域就可能引起目标能量积累效果不明显。另外,由于S波段雷达所观察的目标较小,SCR较低,这就进一步使目标的多普勒频率混叠于杂波频谱中,难以区分。

下文采用“随机游走”模型^[19]建模海杂波频谱,则在双对数坐标下由频谱得到的配分函数 $F(m)$ 与频率尺度 m 在某一区间内应呈现较好的线性关系。这里需指出的是,自然界中客观存在的物体并不是严格分形的,分形体所特有的自相似性只在一定的标度区间内成立。图3给出了3组实测数据杂波单元与目标单元频谱的自相似性分析结果(这里采用的时间序列长度为 2^{16} 点,FFT 点数为 2^{16}),可以发现海杂波单元的频谱在一定的尺度范围内近似线性均成立(即存在无标度区间,X波段雷达数据无标度区间范围大约为 $2^5 \sim 2^{10}$,S波段雷达数据无标度区间范围大约为 $2^7 \sim 2^{10}$),另外还可观察到海杂波单元与

目标单元曲线在无标度区间内具有一定的差异,下面对这一差异进行量化分析。表1列出了3组实测数据的海杂波单元与目标单元曲线的一元线性回归分析结果,其中回归显著性检验的显著水平 α 设定为 0.001, r 检验过程中拒绝域临界点分别为 $r_{n,\alpha} = r_{96,0.001} = 0.3270$ (X波段雷达数据), $r_{n,\alpha} = r_{84,0.001} = 0.3482$ (S波段雷达数据)。由表1可以看到,一元线性回归均具有极高的显著性水平,且相关系数 R 均非常接近于 1,这说明在无标度区间内采用直线对实测数据进行拟合具有很好的效果。另外,比较表1中所列出的几个参数,可以发现频谱 Hurst 指数与残差平方和 Q 在出现目标时均会增大,且这一变化在3组数据中都比较稳定(但有无目标时参数的变化量有所差异),这为后续在频域中进行目标分形检测算法研究奠定了基础。之所以会出现上述变化,是因为目标的出现使海杂波序列不规则程度有所降低,从而导致其在一定程度上偏离 FBM 模型,而 FBM 模型参数——Hurst 指数反映了所研究客体的不规则程度,Hurst 指数越小表明不规则程度越大,所以目标出现时 Hurst 指数变大,同时残差平方和 Q 也有所增大。

3.2 海杂波频谱分形特性的影响因素

由于在进行频域分形分析之前需对时域海杂波

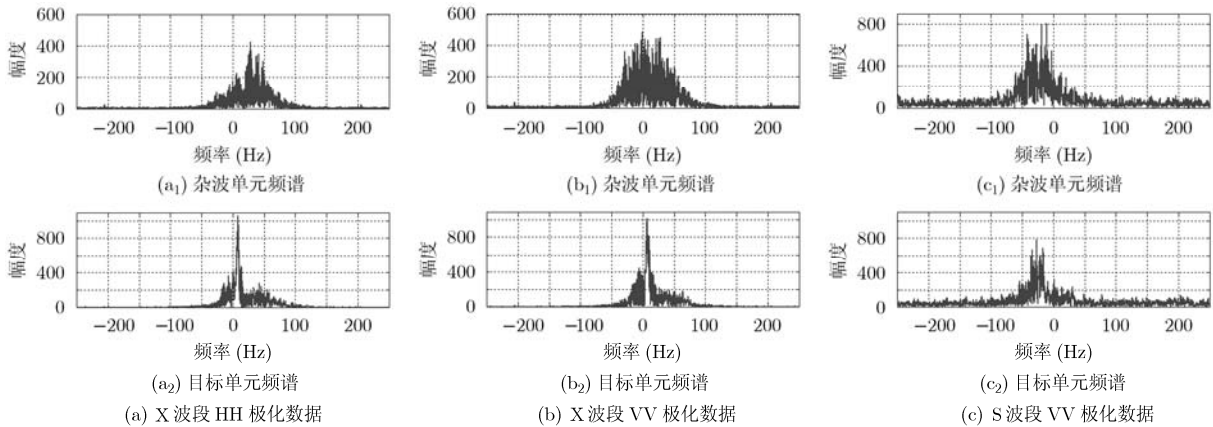


图2 实测雷达数据的频谱图

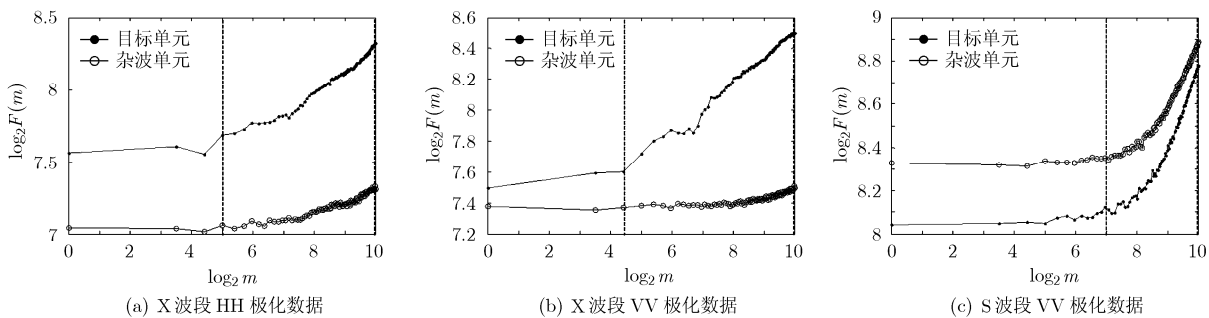


图3 实测雷达数据频谱的自相似性分析结果(m 为频率尺度, $F(m)$ 为配分函数)

表1 实测数据频谱一元线性回归分析

		频谱 Hurst 指数 (拟合直线斜率)	拟合直线截距 b	残差平方和 Q	相关系数 R	回归显著性 r 检验 ($\alpha = 0.001$)
X 波段(HH 极化)	杂波单元	0.0617	6.6679	0.0480	0.9541	极其显著
	目标单元	0.1423	6.8672	0.0486	0.9907	极其显著
X 波段(VV 极化)	杂波单元	0.0274	7.1928	0.0306	0.9836	极其显著
	目标单元	0.1449	7.0041	0.0503	0.9908	极其显著
S 波段(VV 极化)	杂波单元	0.2919	5.8021	0.0139	0.9982	极其显著
	目标单元	0.3155	5.5451	0.0323	0.9965	极其显著

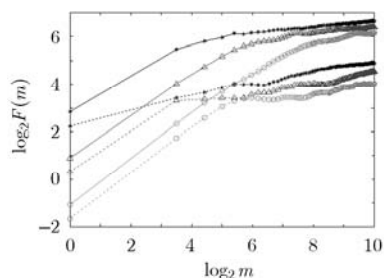
数据进行快速 Fourier 变换(FFT), 而 FFT 所采用的时间序列长度以及 FFT 点数都将直接影响到分形分析的结果, 因此, 本节将分析序列长度以及 FFT 点数对频域分形特性的影响。图 4~图 6 给出了 3 组海杂波数据在序列长度分别为 1024 点和 8192 点时采用不同的 FFT 点数进行分形分析的曲线, 由图可以看出, 无论是 X 波段还是 S 波段数据, 对于同一组数据取同一序列长度计算得到的结果, 均存在尺度区间使得近似线性成立同时目标单元的斜率大于杂波单元的斜率, 并且随着 FFT 点数的增加, 这一尺度区间逐步向大尺度移动, 基本在 2^{16} 点 FFT 时取得最佳效果。对比图 4 与图 5 可以发现, 图 5 所示的 X 波段 VV 极化下的杂波与目标的区分效果要优于 X 波段 HH 极化, 可见在频域中目标对 VV 极化海杂波频谱的影响要大于 HH 极化。这里需说明的是, 比较区分效果首先应比较无标度区间的范围, 若无标度区间范围较大, 则再比较直线拟合得到的斜率或线性程度等特征; 若无标度区间较小导致只有较少的点参与拟合运算, 这样得到的结果没有意义, 从而认为区分效果较差。

再分别对比图 4~图 6 中的(a)与(b)可以发现, 在 X 波段数据下后者杂波与目标的区分效果要优于前者, 而在 S 波段数据下前者的区分效果却优于后者, 这是因为 X 波段雷达探测目标为一固定目标, FFT 采用的时间序列越长, 目标能量越能有效积累, 在频谱中则表现为对原海杂波频谱的影响程度越大, 因此时间序列长度越长区分效果越好; 而 S 波段雷达探测目标为一运动目标, 若在截取的时间序列内目标没有移出当前距离单元, 则序列越长目标能量积累效果越好, 反之, 若目标移出了当前距离单元, 则截取的时间序列越长, 目标能量无法持续积累, 而杂波能量却相对上升, 此时截取的时间序列越长, 区分效果反而越差。因此, 对运动目标而言, 需要考虑积累时间选取问题, 单纯地增加时间序列长度, 效果可能适得其反。另外, 比较 X 波段数据(图 4、图 5)与 S 波段数据(图 6)可以发现, 在

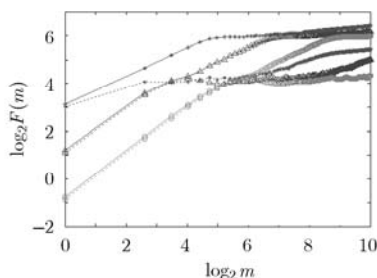
相同参数设置条件下 X 波段数据杂波与目标的区分程度比 S 波段数据更明显, 这主要是由 SCR 不同引起的, X 波段数据 SCR 相对较高, 经过 FFT 积累后 SCR 进一步升高, 从而 X 波段数据目标与杂波频谱分形特征差异较大, 因此 X 波段数据目标与杂波区分更明显。对于图 4~图 6 还需要指出的一点是, 在尺度 m 较小时, 杂波与目标单元的频谱均表现出较好的线性且斜率基本相同, 这与 Fourier 变换本身所具有的尺度不变特性以及“随机游走”模型的计算方式有关。“随机游走”模型是每次间隔 m 个采样点对频谱序列进行重采样, 然后平方并取均值, 这样在尺度较小时, 抽取得到的杂波与噪声能量相对较高, 目标能量相对较低, 从而在此段区间杂波与目标单元的 Hurst 指数主要由杂波与噪声决定, 而且采用的 FFT 点数越大, 此类标度区间范围越大。

图 7 给出了在同样的 FFT 点数下采取的时域序列长度不同时自相似性分析结果, 参考上述分析中得到的结论, 这里均采用 2^{16} 点的 FFT, 而时间序列长度分别取为 2^{10} , 2^{13} 和 2^{16} 点。由图 7 可以看到, X 波段雷达采用的时域序列长度越长, 杂波单元频谱的配分函数整体上越接近于线性(即分形特性越明显), 同时杂波单元与目标单元的区分效果越好; S 波段雷达采用的时间序列越长, 杂波单元与目标单元的区分效果反而越差, 这仍然是因为 X 波段雷达探测的目标是静止的, 而 S 波段雷达探测的目标是运动的, 当截取的时间序列较长时运动目标已经移出了所处理的距离单元。

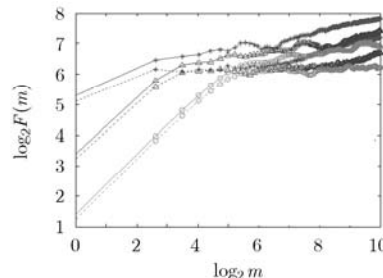
综合图 6 与图 7 的仿真结果可得到如下结论: 对于静止目标, 截取的时间序列长度越长, 杂波与目标区分效果越好, 但考虑到运算量以及实时性, 一般取 $2^{10} \sim 2^{13}$ 点即可; 对于运动目标, 截取时间序列时需考虑目标不能运动出一个距离单元, 并非越长越好。另外, 在选取 FFT 点数时以 $2^{14} \sim 2^{16}$ 点为宜。



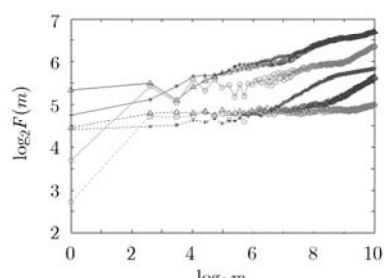
(a) 时域序列长度为 1024 点



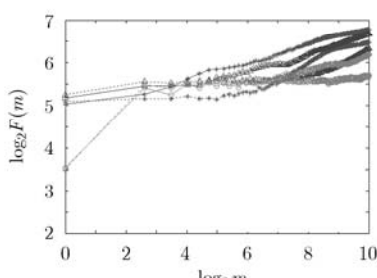
(a) 时域序列长度为 1024 点



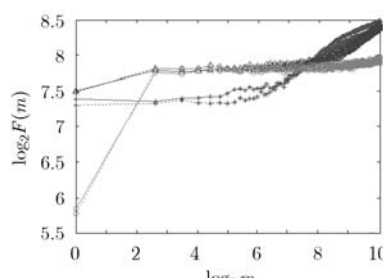
(a) 时域序列长度为 1024 点



(b) 时域序列长度为 8192 点



(b) 时域序列长度为 8192 点



(b) 时域序列长度为 8192 点

- 目标单元 (2¹² 点 FFT)
- 杂波单元 (2¹² 点 FFT)
- 目标单元 (2¹⁴ 点 FFT)
- 杂波单元 (2¹⁴ 点 FFT)
- 目标单元 (2¹⁶ 点 FFT)
- 杂波单元 (2¹⁶ 点 FFT)

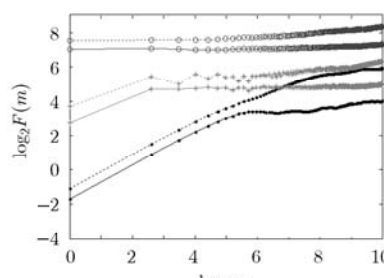
- 目标单元 (2¹² 点 FFT)
- 杂波单元 (2¹² 点 FFT)
- 目标单元 (2¹⁴ 点 FFT)
- 杂波单元 (2¹⁴ 点 FFT)
- 目标单元 (2¹⁶ 点 FFT)
- 杂波单元 (2¹⁶ 点 FFT)

- 目标单元 (2¹² 点 FFT)
- 杂波单元 (2¹² 点 FFT)
- 目标单元 (2¹⁴ 点 FFT)
- 杂波单元 (2¹⁴ 点 FFT)
- 目标单元 (2¹⁶ 点 FFT)
- 杂波单元 (2¹⁶ 点 FFT)

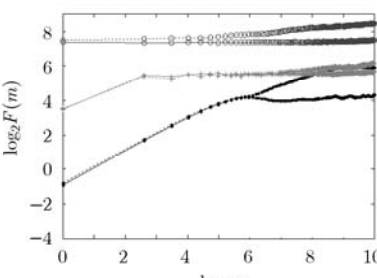
图 4 不同 FFT 点数对频谱分形特性的影响(X 波段 HH 极化数据)

图 5 不同 FFT 点数对频谱分形特性的影响(X 波段 VV 极化数据)

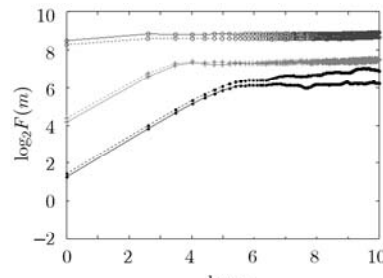
图 6 不同 FFT 点数对频谱分形特性的影响(S 波段 VV 极化数据)



(a) X 波段 HH 极化数据



(b) X 波段 VV 极化数据



(c) S 波段 VV 极化数据

图 7 不同时域序列长度对频谱分形特性的影响(采用 2¹⁶ 点 FFT)

4 结束语

本文主要研究了海杂波频谱的分形特性, 首先从理论上较为系统地阐述了在 FBM 时间序列是分形的前提下, 它的频谱也具有分形特性; 然后, 本文采用 X 波段与 S 波段实测海杂波数据进行分析与验证, 研究了实测海杂波数据的统计特性, 说明了采用 FBM 建模海杂波幅度是合理的, 在此基础上进一步分析了海杂波频谱的分形特性, 并且杂波单元与目标单元呈现出一定的可分性, 这为后续的目标

检测方案设计奠定了基础; 最后本文分析了不同的时间序列长度和 FFT 点数对海杂波频谱分形特性的影响, 得到了一些有意义的结论。另外, 对相参雷达而言, 回波信号变换到频域后可以提升 SCR, 因此, 在频域采用分形的处理方法具有检测微弱运动目标回波潜力, 但仍需研究如何选择合适的参数以及设计合理的目标检测方案。

参考文献

[1] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. New

- York, WH Freeman, 1982: 1-63.
- [2] 郭睿, 臧博, 张双喜, 等. 高分辨SAR复杂场景中的人造目标检测[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 3018-3021.
Guo Rui, Zang Bo, Zhang Shuang-xi, *et al.*. Man-made target detection in the complicated scene of high-resolution SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 3018-3021.
- [3] 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 Xiao-long, Liu Ning-bo, 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.
- [4] 包永强, 赵力, 邹采荣. 噪声环境下语音分形特征的提取和分析[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 585-588.
Bao Yong-qiang, Zhao Li, and Zou Cai-rong. The abstraction and analysis of fractal characteristic of noisy speech[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 585-588.
- [5] Lo T, Leung H, and Haykin S. Fractal characterisation of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets [J]. *IEE Proceedings-F*, 1993, 140(4): 243-250.
- [6] Salmasi M and Modarres-Hashemi M. Design and analysis of fractal detector for high resolution radars [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2009, 40(5): 2133-2145.
- [7] Savaidis S and Frangos Y. Scattering from fractally corrugated surface: an exact approach[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(23): 2357-2359.
- [8] Kaplan L M and Jay Kuo C C. Extending self-similarity for fractional brownian motion [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(12): 3526-3530.
- [9] Kaplan L M. Improved SAR target detection via extended fractal features [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 436-451.
- [10] Hu J, Tung W W, Gao J B, *et al.*. Multiscale modeling of sea clutter to facilitate detection of low observable targets within sea clutter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7317(73170L): 1-8.
- [11] Hu Jing, Tung Wen-wen, and Gao Jian-bo. A new way to model nonstationary sea clutter [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(2): 129-132.
- [12] 周炜星, 王延杰, 于遵宏. 随机二项测度的多重分形分析和多重分形关联分析[J]. 非线性动力学学报, 2001, 8(3): 199-207.
Zhou Wei-xing, Wang Yan-jie, and Yu Zun-hong. On the multifractal and multifractal correlation of random binomial measures[J]. *Journal of Nonlinear Dynamics in Science and Technology*, 2001, 8(3): 199-207.
- [13] Guan Jian, Liu Ning-bo, Zhang Jian, *et al.*. Multifractal correlation characteristic for radar detecting low-observable target in sea clutter [J]. *Signal Processing*, 2010, 90(2): 523-535.
- [14] Kenichi Kamijo and Akiko Yamanouchi. Signal processing using fuzzy fractal dimension and grade of fractality-application to fluctuations in seawater temperature[C]. IEEE Symposium on Computational Intelligence in Image and Signal Processing (CIISP), Honolulu, HI, April 2007: 133-138.
- [15] 关键, 刘宁波, 张建, 等. 基于LGF的海杂波中微弱目标检测方法[J]. 信号处理, 2010, 26(1): 69-73.
Guan Jian, Liu Ning-bo, Zhang Jian, *et al.*. Low-observable target detection within sea clutter based on LGF[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(1): 69-73.
- [16] 贺涛, 周正欧. 基于分形自仿射的混沌时间序列预测[J]. 物理学报, 2007, 56(2): 693-700.
He Tao and Zhou Zheng-ou. Prediction of chaotic time series based on fractal self-affinity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(2): 693-700.
- [17] 刘宁波, 李晓俊, 李秀友, 等. 基于分形自仿射预测的海杂波中目标检测[J]. 现代雷达, 2009, 31(4): 43-50.
Liu Ning-bo, Li Xiao-jun, Li Xiu-you, *et al.*. Targets detection in sea clutter based on self-affine prediction [J]. *Modern Radar*, 2009, 31(4): 43-50.
- [18] Gao J B, Cao Y, and Lee J M. Principal component analysis of $1/f^\alpha$ noise [J]. *Physics Letters A*, 2003, 314(5/6): 392-400.
- [19] Hu Jing, Tung Wen-wen, and Gao Jian-bo. Detection of low observable targets within sea clutter by structure function based multifractal analysis [J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 2006, 54(1): 136-143.
- [20] Chang Yen-ching and Chang Shyang. A fast estimation algorithm on the Hurst parameter of discrete-time fractional Brownian motion [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(3): 554-559.
- [21] Kim T S and Kim S. Singularity spectra of fractional Brownian motions as a multi-fractal [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004, 19(3): 613-619.
- [22] Kenneth Falconer. 分形几何: 数学基础及其应用[M]. 第2版, 北京: 人民邮电出版社, 2007: 231-239.
Kenneth Falconer. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*[M] 2nd Edition, Beijing: Posts & Telecom Press, 2007: 231-239.
- [23] Decreusefond L and Üstünel A S. Stochastic analysis of the fractional Brownian motion [R]. American Mathematical Society 1991 Subject Classifications, Primary 60H07; Secondary 60G18, 2007: 1-39.
- [24] 孙霞, 吴自勤, 黄昀. 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 89-109.
Sun Xia, Wu Zi-qin, and Huang Yun. *The Fractal Theory and Its Applications* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003: 89-109.
- [25] Drosopoulos A. Description of the OHGR database[R]. Tech. Note No. 94-14, Defence Research Establishment Ottawa, 1994: 1-30.
- [26] Franceschetti G and Iodice A. Scattering from natural rough surfaces modeled by fractional Brownian motion two-dimensional processes[J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1999, 47(9): 1405-1415.
- [27] Du G. Detection of sea-surface radar targets based on fractal mode [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(14): 906-907.
- 刘宁波: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、海杂波中的微弱目标检测。
黄勇: 男, 1979年生, 讲师, 博士, 研究方向为雷达信号处理、杂波特性分析与目标检测。
关键: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达目标检测与跟踪、侦察图像处理和信息融合。