基于 Hilbert 谱脊线盒维数的微弱目标检测算法

张 建[1,2],关 键[1],黄 勇[1],何 友[1]
(1.海军航空工程学院电子信息工程系,山东烟台 264001;2.海军航空工程学院接改装训练大队,山东烟台 264001)

摘 要: 在目标检测领域,分形理论中的盒维数常被用来检测海杂波中的微弱目标,但直接采用盒维数检测目标却得不到的较好检测性能.为提高采用盒维数检测目标方法的检测性能,文章在 Hilbert-Huang 变换域分析了实测海杂波数据的 Hilbert 谱脊线盒维数特性以及目标的影响,提出了采用 Hilbert 谱脊线盒维数检测目标的方法.仿真结果表明,目标出现时海杂波的 Hilbert 谱脊线盒维数明显减小,采用 Hilbert 谱脊线盒维数检测海杂波中的微弱目标能够获得较好的检测性能,其性能要优于直接采用盒维数的目标检测方法和多脉冲单元平均恒虚警检测方法的检测性能.

关键词: 海杂波; Hilbert 谱脊线; 盒维数; 目标检测
中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)12-2404-06
电子学报 URL: http://www.ejournal.org.cn **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.12.008

Weak Target Detection Based on the Box Dimension of the Hilbert Spectrum Ridge

ZHANG Jian[1,2], GUAN Jian[1], HUANG Yong[1], HE You[1]
(1. *Department of Electronic and Information Engeering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong* 264001, *China*;
2. *Training Brigade of Received and Rectified Equipemnt, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong*264001, *China*)

Abstract: In the target detection domain, the box dimension of the fractal theoretics is usually used to detect the weak target in the sea clutter, but its detection performance is not good. In order to improve the detection performance of the method using box dimension, the Hilbert spectrum ridge box dimension characteristic of the real sea clutter and the influence of the target to the dimension is analyzed in the Hilbert-Huang transformation domain, and the Hilbert spectrum ridge box dimension is proposed to detect the weak target in the sea clutter on the base of the analysis. Shown as the results of the simulation, the Hilbert spectrum ridge box dimension of the sea clutter is much smaller when the target appears, and the performance to detect the weak target in the sea clutter is improved distinctly by the method based on the box dimension of the Hilbert spectrum ridge, compared with the detection performance of the target detection method using the box dimension directly and the multi pulses cell average constant false alarm rate detection method.

Key words: sea clutter; Hilbert spectrum ridge; box dimension; target detection

1 引言

为解决海杂波中微弱目标检测这一难题,人们从统计[1~5]、变换域[6,7]和非线性[8~12]等方面对海杂波中的微弱目标检测方法进行了许多有益探索,但至今也未能很好地解决该难题.采用非线性理论检测微弱目标的方法主要包括基于混沌理论的微弱目标检测方法与基于分形理论的微弱目标检测方法两大类,在基于分形理论的微弱目标检测方法中,常见诸于文献的是一种叫做基于盒维数的微弱目标检测方法,但直接采用盒维数检测目标却得不到的较好检测性能.

为提高采用盒维数检测目标方法的检测性能,本文将以 Hilbert-Huang 变换(Hilbert-Huang Transformation,简称 HHT)为工具,在 Hilbert-Huang 变换域分析实测海杂波数据的分形特性,研究目标与海杂波盒维数特性差异的增强方法,然后在此基础上研究基于 Hilbert-Huang 变换域分形特性的海杂波中微弱目标检测方法,提高对微弱目标的检测能力.

2 HHT

HHT 变换是一种优秀的时频分析方法,其时频分辨率高于短时 Fourier 变换和小波变换,理论上能够达

收稿日期:2010-12-02;修回日期:2012-06-23
基金项目:国家自然科学基金(No.61179017,No.61201445)

到分辨率的极值,非常适合分析非平稳、非高斯的高分辨率雷达数据[13].该变换由黄锷博士等于 1998 年提出[14],目前已经应用到许多领域[15~17].

2.1 固有模态函数

在 HHT 中,为了计算瞬时频率,定义了固有模态函数(Intrinsic Mode Function,简称 IMF),它是满足单分量信号解释的一类信号,在每一时刻只有单一频率成分,从而使得瞬时频率具有了物理意义.一个固有模态函数必须满足下面两个条件:

(1)在整个数据段内,极值点的个数和过零点的个数必须相等或相差最多不能超过一个;

(2)在任意时刻,由局部极大值点形成的上包络线和由局部极小值点形成的下包络线的平均值为零,即上、下包络线相对于时间轴局部对称.

2.2 经验模态分解

对于不满足 IMF 条件的复杂信号,应采用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,简称 EMD)方法将其分解.EMD 方法对信号 $x(t)$的分解步骤如下:

(1)确定信号 $x(t)$所有的局部极值点,然后用三次样条线将所有的局部极大值点连接起来形成上包络线,再用三次样条线将所有的局部极小值点连接起来形成下包络线,上下包络线应包络所有的数据点.

(2)上下包络线的平均值记为 $m_1(t)$,求出

$$x(t) - m_1(t) = h_1(t) \tag{1}$$

如果 $h_1(t)$是一个 IMF,那么 $h_1(t)$就是 $x(t)$的第 1 个 IMF 分量.

(3)如果 $h_1(t)$不满足 IMF 的条件,将 $h_1(t)$作为 $x(t)$,重复步骤(1)、(2),得到上下包络线的平均值 $m_{11}(t)$,再判断

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t) \tag{2}$$

是否满足 IMF 的条件,如不满足则重复循环 k 次,直到 $h_{1k}(t)$满足 IMF 条件

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \tag{3}$$

记 $c_1(t) = h_{1k}(t)$,则 $c_1(t)$为信号 $x(t)$的第 1 个满足 IMF 条件的分量.

(4)将 $c_1(t)$从 $x(t)$中分离出来,得到

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \tag{4}$$

将 $r_1(t)$作为原始数据重复步骤(1)~(3),得到 $x(t)$的第 2 个满足 IMF 条件的分量 $c_2(t)$,重复循环 n 次,得到 n 个满足 IMF 条件的分量,即

$$\left.\begin{aligned} r_1(t) - c_2(t) &= r_2(t) \\ &\vdots \\ r_{n-1}(t) - c_n(t) &= r_n(t) \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

当 $r_n(t)$为一单调函数不能再提取满足 IMF 条件的分量时,循环结束,$r_n(t)$称为余项.这样由式(4)和式(5)可得

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} c_i(t) + r_n(t) \tag{6}$$

2.3 Hilbert 谱与 Hilbert 边际谱

采用 Hilbert 变换,构造式(6)中每个固有模态函数 $c_i(t)$的解析信号,并计算解析信号的幅值函数 $a_i(t)$和相位函数 $\varphi_i(t)$,进一步可求出瞬时频率

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi}\omega_i(t) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\mathrm{d}\varphi_i(t)}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

然后可得 Hilbert 谱,记作

$$H(t,f) = \mathrm{Re}\left\{\sum_{i=1}^{n} a_i(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\int 2\pi f_i(t)\mathrm{d}t}\right\} \tag{8}$$

$\mathrm{Re}\{\cdot\}$为取实部.进而可以定义 Hilbert 边际谱

$$H(f) = \int_0^T H(t,f)\mathrm{d}t \tag{9}$$

式中 T 为信号的持续时间.

3 海杂波数据简介

本文采用的实测海杂波数据共两组,记为数据 1 和数据 2.

数据 1 是加拿大 McMaster 大学的 X 波段 IPIX 雷达的 311 # 数据,包括 VV 极化和 HH 极化两部分.在数据 1 中,一些距离单元存在目标,其中目标信号最强的距离单元,称为主目标距离单元(No.7),主目标距离单元周围距离单元也受目标的影响,称为次目标距离单元(No.6、No.8、No.9),其目标为低信杂比的固定弱目标.IPIX 雷达的其他参数和数据的采集参数可参见文献[9].

数据 2 为纯海杂波数据,是某单位高分辨 ISAR 雷达的海杂波数据.

4 海杂波 Hilbert 谱脊线分形特性分析

4.1 Hilbert 谱脊线定义

将脊线的概念引入 HHT,我们提取信号 Hilbert 谱沿时间方向的脊线 $R(t)$.其计算公式为

$$R(t) = \arg_f \max\{H(t,f)\} \tag{10}$$

式中,$H(t,f)$为 Hilbert 谱,t 为时间;$\max\{\cdot\}$表示取最大值,$\arg_f$ 表示取 $H(t,f) = \max\{H(t,f)\}$时的频率值 f.Hilbert 谱脊线反映了 Hilbert 谱峰值出现的频率随时间的波动情况,在时间方向上,如果 Hilbert 谱峰值出现的频率点较为分散,则 Hilbert 谱脊线起伏较为剧烈,如果 Hilbert 谱峰值出现的频率点较为集中,则 Hilbert 谱脊线相对平滑.

4.2 Hilbert 谱脊线分形特性判定

由文献[18]可知,如需判断一信号是否是分形的,则仅需判定其是否存在无标度区间.在判定海杂波信

号是否存在无标度区间时,可采用如下方法.

假设存在一海杂波的时间序列 $x(n)$, $n=1,2,\cdots,N$.设测量尺子的长度为 r,用尺子沿 $x(n)$的起伏去度量曲线的长度,度量结果为 $N(r)$,且 $N(r)$满足下面的幂指关系

$$N(r)\sim r^{-D} \tag{11}$$

那么,可以认为时间序列 $x(n)$是分形的.为了求 $N(r)$,通常用一个网状栅格去覆盖曲线,r 为格子(子盒子)的大小,然后计算与时间序列相交的栅格数目,即为 $N(r)$.

为便于观察 $N(r)$与 r 的幂指关系,我们研究 $N(r)$与 r 的双对数曲线,如在 r 的某一区间中,$N(r)$与 r 的双对数曲线呈直线,则表明在该区间中海杂波信号呈现分形特征,该区间即为无标度区间,图 1 给出了数据 1 和数据 2 中 14 个距离单元的 $N(r)$与 r 的双对数曲线.

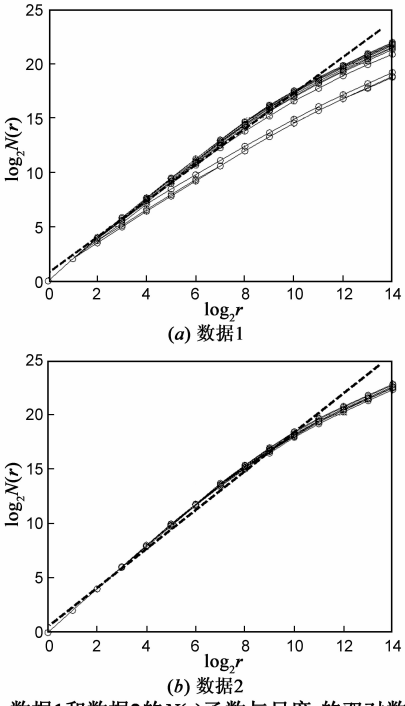


图1 数据1和数据2的$N(r)$函数与尺度r的双对数曲线

从图 1 中可以看出,对于该两组数据,在尺度 $2^2\sim 2^{10}$上,海杂波 Hilbert 谱脊线的 $N(r)$与 r 的双对数曲线近似为一直线,表明海杂波信号在该时间跨度内具备自相似性,因此,可以判定该两组海杂波数据的 Hilbert 谱脊线是分形的.图 1 中的(a)偏离标准线的三条双对数曲线为含目标距离单元(No.6、No.7 和 No.8)的双对数曲线,虽然这三条曲线在目标的影响下斜率减小,偏离标准线,但在尺度 22 ~ 210 范围内仍近似为一直线,仍具备自相似性.

4.3 海杂波 Hilbert 谱脊线盒维数分析

在判定海杂波 Hilbert 谱脊线分形特性的基础上,该部分将采用分形理论中的盒维数[9]研究海杂波 Hilbert 谱脊线的形状复杂程度,并采用数据 1 的 VV 极化数据分析目标对海杂波 Hilbert 谱脊线盒维数的影响等.图 2 给出了 400 段(每段包含 3072 个数据点)海杂波数据的 Hilbert 谱脊线盒维数及其均值.

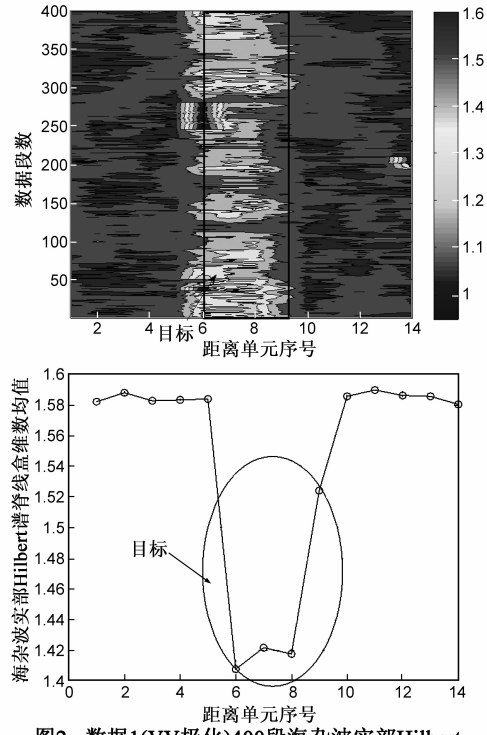


图2 数据1(VV极化)400段海杂波实部Hilbert谱脊线盒维数及其均值

从图 2 中可以看出:

(1)无目标时,纯海杂波 Hilbert 谱脊线的盒维数较大,均值约为 1.58,且各距离单元间的盒维数差异较小,反映出海杂波在相邻的距离单元上几何形状复杂特性较为一致.

(2)当目标出现时,不管是主目标距离单元还是次目标距离单元,海杂波 Hilbert 谱脊线的盒维数都将减小,即目标的出现将减小海杂波 Hilbert 谱脊线几何形状的复杂程度.

产生这种现象的主要原因是:受风、浪和涌等的影响,海面复杂多变,致使雷达海面回波的幅度和多普勒频率呈现出多变状态;相对而言,目标形状较为单一,特别是慢起伏目标,其回波信号的幅度和多普勒频率较为稳定,这些特性反映在时频谱上,就是海面回波峰值出现的频率较为分散,而目标回波出现的频率较为集中.结合 4.1 节中给出的 Hilbert 谱脊线性质可知,海杂波的 Hilbert 谱脊线起伏剧烈;而目标出现时,海杂波的 Hilbert 谱脊线起伏趋于缓和,从图形角度讲就是无目标时,纯海杂波的 Hilbert 谱脊线形状复杂,几何复杂

度较高;当目标出现时,海杂波的 Hilbert 谱脊线形状相对简单,几何复杂度较低.在分形理论中,盒维数是刻画图形几何形状复杂程度的物理量,图形几何形状越复杂,其盒维数越小,几何形状越简单,盒维数越大.因此目标的出现会导致海杂波 Hilbert 谱脊线起伏趋于和缓,减小其几何形状的复杂程度,进而导致海杂波 Hilbert 谱脊线盒维数减小.

5　微弱目标检测新算法

5.1　算法原理

通过以上分析可知,有无目标时,海杂波的 Hilbert 谱脊线的几何复杂度差异明显,而 Hilbert 谱脊线盒维数可描述这一差异,因此,我们可以提取海杂波的 Hilbert 谱脊线盒维数来检测目标,即基于 Hilbert 谱脊线盒维数的微弱目标检测算法.该算法的原理框图如图 3 所示.

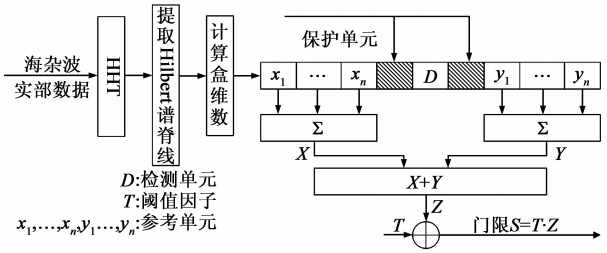


图3　基于Hilbert谱脊线盒维数的检测算法原理框图

该算法首先采用 HHT 变换处理海杂波数据得到 Hilbert 谱,然后提取 Hilbert 谱脊线并计算其盒维数,得到检验统计量—Hilbert 谱脊线盒维数.将该统计量与一门限比较,就可以得到判决结果.由于目标的存在会使海杂波实部 Hilbert 谱脊线盒维数减小,因此,如盒维数小于门限判为有目标,大于门限则判为无目标.参照单元平均恒虚警处理(Cell Average Constant False Alarm Rate,简称 CA-CFAR)方法[19],参考单元数目 n 一般可取 8 个~32 个,门限可由参考单元的脊线盒维数均值乘一阈值因子获得,阈值因子 T 与虚警概率有关,可通过 Monte Carlo 仿真方法经验获得.某虚警概率 P_{fa0}下的阈值因子 T 的计算方法如下:首先给出阈值因子 $T(1>T>0)$的可能取值 $T=\{T_i, i=1,2,\cdots,N, 1>T_i>0\}$,然后统计在各 T_i 值下的虚警概率 $P_{fa}=\{P_{fai}, i=1,2,\cdots, N; 1>P_{fai}>0\}$,如果某 $P_{fai}=P_{fa0}$,则该 P_{fai}对应的 T_i,就是在虚警概率 P_{fa0}下的阈值因子 T.

5.2　性能分析

5.2.1　实测目标数据

首先采用数据 1 的 VV 极化实测目标数据对检测算法性能进行分析.由于数据 1 的具体信杂比(Signal Clutter Rate,SCR)未知,所以无法给出在确定 SCR 下的检测概率 P_d.因此,为检验该检测算法的有效性,本文比较了该方法与直接采用盒维数检测目标的方法[9]和多脉冲(100 个脉冲)CA-CFAR 方法的检测性能,检测性能曲线($P_d \sim P_{fa}$)如图 4 所示.

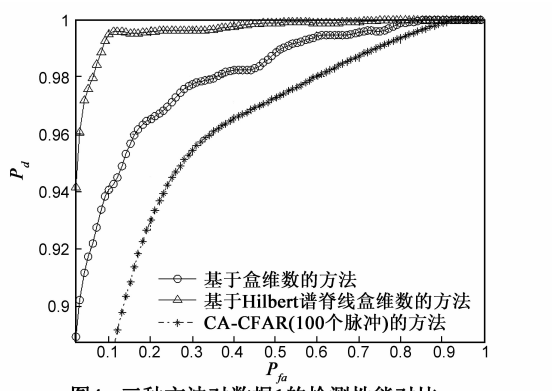


图4　三种方法对数据1的检测性能对比

从图 4 可以看出:在对实测目标数据进行处理时,本文所提算法的检测性能优于直接采用盒维数检测目标的方法和多脉冲 CA-CFAR 方法的检测性能.

5.2.2　仿真目标数据

为验证该算法在各 SCR 情况下的检测性能,本文采用实测海杂波数据 + 仿真目标的 Monte Carlo 仿真方法.在仿真中,实测海杂波数据为数据 2,目标通过控制 SCR 仿真产生,其类型为 Swerling I,幅值 A 服从瑞利分布,且在 100 个脉冲内保持不变.受实测海杂波数据量的限制,仅进行了 10000 次仿真.$P_{fa}=1\%$ 时,基于 Hilbert 谱脊线盒维数算法、直接采用盒维数检测目标的方法和多脉冲 CA-CFAR(100 个脉冲)方法的检测概率如表 1 所示.

表 1　三种算法的检测概率($P_{fa}=1\%$)

检测算法	SCR(dB)			
	−15	−10	−5	0
基于 Hilbert 谱脊线盒维数的方法	27%	96%	100%	100%
直接采用盒维数检测目标的方法	2%	4%	19%	72%
CA-CFAR(100 个脉冲)方法	–	19%	57%	82%

从表 1 中可以看出:

(1)当 SCR≥ −10dB 时,基于 Hilbert 谱脊线盒维数算法的检测概率明显高于其他两种算法的检测概率,当 SCR≥ −5dB 时,基于 Hilbert 谱脊线盒维数算法的检测概率能够达到 100%;

(2)当 SCR 从 −5dB 下降至 −10dB 时,基于 Hilbert 谱脊线盒维数算法的检测概率下降较慢,而其他两种方法检测概率下降较快.

从对实测目标数据和仿真目标数据的分析结果可以看出,本文所提算法对实测目标数据和仿真目标数据的检测概率都高于直接采用盒维数检测目标方法和多脉冲 CA-CFAR 方法的检测概率,且其检测概率随 SCR 的下降速度也慢于其他两种方法,故其检测性能优

于其他两种方法的检测性能.虽同为微弱目标检测算法,但本文所提算法检测性能优于直接采用盒维数检测目标方法检测性能的原因是:与直接采用盒维数检测目标的方法相比,本文所提算法在信号处理过程中两次提升信杂比,导致其检测性能的提高.一是通过求取 Hilbert 谱,实现目标能量积累,提升一次信杂比;二是通过提取 Hilbert 谱脊线,对目标与海杂波幅值最大值出现的频点进行筛选,抑制其他频率点的海杂波成份,再一次提升信杂比.

6 小结

通过对实测海杂波数据的分析发现,海杂波 Hilbert 谱脊线具有自相似特性;无目标时,海杂波的 Hilbert 谱脊线盒维数较大,当目标出现时,其盒维数减小.在此基础上,本文提出了采用 Hilbert 谱脊线盒维数检测目标的方法,对实测目标数据和仿真目标数据的分析结果表明,本文所提方法的检测性能较好,其性能优于直接采用盒维数的目标检测方法和多脉冲 CA-CFAR 检测方法的检测性能.

参考文献

[1] TRUNK G V, GEORGE S F. Detection of targets in non-Gaussian sea clutter[J]. IEEE Transactions on AES, 1970, 6(5): 620 – 628.

[2] TOPORKOV J V, SLETTEN M A. Statistical properties of low-grazing range-resolved sea surface backscatter generated through two-dimensional direct numerical simulations[J]. IEEE Transactions on GRS, 2007, 45(5): 1181 – 1197.

[3] 李涛,冯大政,夏宇垠.基于 EM 算法和 GOF 的宽带分布式目标检测算法[J].电子学报,2010,38(10):2246 – 2250.
LI Tao, FENG Da-zheng, XIA Yu-yin. A detection method based on EM and GOF for wideband spatially distributed target [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2246 – 2250. (in Chinese)

[4] 陈远征,陈建军,付强.复合高斯杂波下基于 GLRT 的扩展目标检测[J].电子与信息学报,2010,32(6):1327 – 1331.
CHEN Yuan-zheng, CHEN Jian-jun, FU Qiang. Detection of range spread target based on GLRT in compound-Gaussian clutter[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(6): 1327 – 1331. (in Chinese)

[5] 简涛,何友,苏峰.非高斯杂波下修正的 SDD-GLRT 距离扩展目标检测器[J].电子学报,2009,37(12):2662 – 2667.
JIAN Tao, HE You, SU Feng. Modified SDD-GLRT detector for range-spread targets in non-Gaussian clutter[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2662 – 2667. (in Chinese)

[6] 张建,王连生,于鹏.基于 Hilbert 谱脊线粗糙度的微弱目标检测算法[J].海军航空工程学院学报,2011,26(6):677 – 681.
ZHANG Jian, WANG Lian-Sheng, YU Peng. Weak target detection based on the roughness of the Hilbert spectrum ridge [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2011, 26(6): 677 – 681. (in Chinese)

[7] 黄小红,贺夏,辛玉林.基于时频特征的低分辨雷达微动多目标分辨方法[J].电子与信息学报,2010,32(10):2342 – 2347.
HUANG Xiao-hong, HE XIA, XIN Yu-lin. Resolving multiple targets with micro-motions based on time-frequency feature with low-resolution radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(10): 2342 – 2347. (in Chinese)

[8] 王谷,方宁,苗俊刚.复杂目标角闪烁序列的混沌特性[J].电子学报,2009,37(7):1505 – 1508.
WANG Gu, FANG Ning, MIAO Jun-gang. The chaos feature of glint series for complex targets[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1505 – 1508. (in Chinese)

[9] HAYKIN S. Adaptive Radar Signal Pocessing[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007. 119 – 159.

[10] DU Peng-fei, WANG Yong-liang, TANG Zi-yue. Radar target novel characteristic detection method[J]. IEEE Transactions on AES, 2006, 42(6): 29 – 32.

[11] HU Jing, TUNG Wen-Wen, GAO Jian-bo. Detection of low observable targets within sea clutter by structure function based multifractal analysis[J]. IEEE Transactions on AP, 2006, 54(1): 136 – 143.

[12] GUAN Jian, LIU Ning-bo, SONG Jie. Multifractal correlation characteristic for radar detecting low-observable target in sea clutter[J]. Signal Processing (Elsevier), 2010, 90(2): 523 – 535.

[13] GRECO. M, BORDONI F, GINI F. X-band sea-clutter nonstationarity influence of long wave[J]. IEEE Jour OE, 2004, 29 (2): 269 – 283.

[14] HUANG E, SHEN Zheng, LONG R. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[M]. London: Rocal Society, 1998. 903 – 995.

[15] 于德介,程军圣,杨宇.机械故障诊断的 Hilbert-Huang 变换方法[M].北京:科学出版社,2006. 75 – 76.
YU De-jie, CHENG Jun-sheng, YANG Yu. The Manchine Fault Diagnosis Approach Based on the Hilbert-Huang Transform[M]. Beijing: Science Press, 2006. 75 – 76. (in Chinese)

[16] 陈文武.基于 HHT 的多分量 LFM 信号检测与参数估计[J].现代雷达,2007,29(12):59 – 61.
CHEN Wen-wu. Multi component LFM signal detection and parmeter estimation based on Hibert-Huang transform[J]. Modern Radar, 2007, 29(12): 59 – 61. (in Chinese)

[17] 王逸林,梅继丹,蔡平.水声矢量信号的希尔伯特黄变换

仿真研究[J].系统仿真学报,2008,20(15):4173 – 4175.
WANG Yi-lin, MEI Ji-dan, CAI Ping. Research on Hilbert-Huang transform of underwater acoustic vector signal[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(15): 4173 – 4175. (in Chinese)

[18] MANDELBROT B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. Washington: Freeman, 1982. 177 – 179.

[19] 何友,关键,彭应宁.雷达自动检测与恒虚警处理[M].北京:清华大学出版社,1999.25 – 37.
HE You, GUAN Jian, PENG Ying-ning, Automatic Radar Detection and CFAR[M]. Beijing: Tsinghuan University Press, 1999.25 – 37. (in Chinese)

作者简介



张　建　男,1982 年 6 月出生于山东省青州市,博士.现为海军航空工程学院新装备培训中心讲师.研究方向:海杂波特性分析、微弱目标检测.
E-mail: zhangjian_study@163.com



关　键　男,1968 年出生于辽宁省锦州市,教授、博士生导师.主要研究方向:雷达目标检测的跟踪、侦查图像处理和信息融合.获全国优秀博士学位论文奖,新世纪百千万人才工程国家级人选.
E-mail: guanjian96@tsinghua.org.cn