

基于多重分形的雷达目标的模糊检测¹⁾

杜 干 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

(E-mail: jyhuang@xidian.edu.cn)

摘 要 利用多重分形的概念对海杂波和舰船雷达目标回波进行了分析,并提取出其多重分形特征用于舰船目标检测.实验表明,广义维数谱具有良好的可分性和稳定性.在检测中,将待查信号分为两类:海杂波目标和舰船目标,将广义维数谱作为特征矢量,计算其相对于两类目标的隶属度并作出判断.多组检测实验证明了该方法的有效性和实用性.

关键词 多重分形,广义维数谱,模糊检测.

FUZZY DETECTION OF RADAR SHIP TARGETS BASED ON MULTIFRACTAL ANALYSIS

DU Gan ZHANG Shou-Hong

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071)

(E-mail: jyhuang@xidian.edu.cn)

Abstract In this paper, sea clutter and radar echoes from ship targets are analyzed with the concept of multifractal, and their multifractal dimensions are extracted for detection of ship targets. Experiments show that the multifractal dimensions have good distinctive ability and stability. During detection, the gathered signals fall into two types: sea clutter and ship targets. Taking the multifractal dimensions as a feature vector, the similarity relations are computed and the judgement is made. Results show that the method is reliable and practical.

Key words Multifractal, multifractal dimensions, fuzzy detection.

1 引言

从80年代末开始,分形逐渐被引入到雷达信号处理中,它在其中的应用一方面来源于分形学的普遍性,另一方面是由于雷达系统中许多环节包含着分形的过程和现象.近年来关于雷达信号的分形研究取得了一定的进展^[1~3],但多是单一地求取 D_0 (容量维), D_1 (信

1)国防预研基金资助项目.

息维), D_2 (关联维). 人们很快发现, 利用一个分维数描述复杂的事物是不够的, 因为它除了标志着该结构的自相似性构造规律外, 并不能揭示出产生相应结构的动力学特征. 尤其对于一些统计自相似分形、非均匀分形, 单一的分维值不足以描述其特征, 因此就产生了扩展分形参数的必要性. 本文引入多重分形的概念, 分别计算雷达目标和杂波的广义维数谱曲线, 并利用它进行雷达目标的检测.

多重分形也称“多标度分形”. 在多重分形中, 系统不是由参数空间的一点来表示的, 而是系统的整个标度区域在标度下的转换, 因而多重分形是对测度集合的标度特征的描述. 它用一个谱函数来描述分形体不同层次的行为特征, 从系统的局部出发来研究其最终的整体特征. 由于它更精确地描述了分形集的局部尺度行为, 已成功地应用于湍流的耗散域的空间分布、奇异吸引子的不变概率分布的研究中^[4], Carmichael^[5]等人通过对侧扫声呐图象的多重分形分析进行了海底分类研究. 本文将其用于雷达目标检测中, 对广义维数谱进行了定量的研究, 利用模糊数学的方法进行判定, 使多重分形的研究从理论分析向实际应用迈进了一步.

2 多重分形描述

对于许多分形集, 一个分形维数只能从整体上反映集合的不规则性, 缺乏对局部奇异性的刻化, 因此人们提出了多重分形的概念. 多重分形讨论的是参量的几率分布, 是分形几何形体在演化过程中不同层次的特征. 把所研究的对象分为 N 个小区域, 设第 i 个小区域线度大小为 L_i , 分形体生长界面在该小区域的生长几率为 P_i , 不同小区域的生长几率不同, 可用不同标度指数 α_i 来表征, 则,

$$P_i = L_i^{\alpha_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

若线度的大小趋于零, 上式可写成

$$\alpha = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\log P}{\log L}, \quad (2)$$

其中 α 是表征分形体某区域的分维, 称为局部分维. 对上式两边各自乘 q 次方并取和得

$$X(q) = \sum_{i=1}^N P_i^q = \sum_{i=1}^N (L_i)^{q\alpha_i}. \quad (3)$$

定义 q 次信息维 D_q 为

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\log X(q)}{\log L}. \quad (4)$$

由上式可看到 α_i 的变化可以通过 q 的不同来反映, 因而具有不同标度指数的子集, 可以通过 q 的改变得以区分出来. 当 $q=0$ 时, D_0 就是通常意义上的分形维数(容量维); 当 $q=1$ 时, 对上式稍加变换可得

$$D_1 = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\sum P_i \log P_i}{\log L}, \quad (5)$$

它就是信息维. 而当 $q=2$ 时, 已定义的 D_2 几乎与相关维数是等价的. 因此广义维数 D_q 实际上包含了分形理论所涉及的全部维数. 式(4)对理解分形的意义和内涵是有帮助的, 但它的可操作性差, 下面以计盒法来更直观地加以描述.

在计盒法中,设盒子边长为 δ , $N(\delta)$ 为至少包含一个点的盒子数,分维值定义为

$$D = - \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N(\delta)}{\log(\delta)}. \quad (6)$$

这种方法的缺点是忽略了点集的空间分布,因为它不区分包含点的盒子中点的个数.根据多重分形的思想,可以重新考虑上述问题:设 N 是点的总数, N_i 是包含在第 i 个盒子内的点数,定义概率

$$u_i = \frac{N_i}{N}. \quad (7)$$

那么集合 $M = \{u_i, i=0, 1, \dots, N\}$ 就包含了点集分布的所有信息.定义测度

$$M(q, \delta) = \sum_{i=1}^{N(\delta)} u_i^q \delta^d = N(q, \delta) \delta^d. \quad (8)$$

由上式可见,当 $q=0$ 时, $N(q, \delta)$ 就等于 $N(\delta)$, 此时的维数就退化为计盒维.

定义 q 次信息维为

$$D(q) = \begin{cases} \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N(q, \delta)}{\log \delta}, & \text{若 } q \neq 1, \\ \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum u_i \log u_i}{\log \delta}, & \text{若 } q = 1. \end{cases} \quad (9)$$

多重分形一般用广义维数谱曲线 $D_q \sim q$ 来表示.容易理解,广义维数谱能提供比单一的分维值更多的信息.

3 实测雷达数据的多重分形分析

本文讨论的是高距离分辨雷达,所以主要考虑雷达波束擦地角较小的情况.雷达离目标距离为 20 000m,工作频段为 8mm.我们采集了 65 对舰船目标回波和海杂波数据,对其进行多重分形分析,作出其广义维数谱曲线,样本点数为 2 048, q 取 -9 到 10.图 1 和图 2 分别为其中一条海杂波和舰船目标回波(信杂比为 -1.2)的广义维数谱曲线.

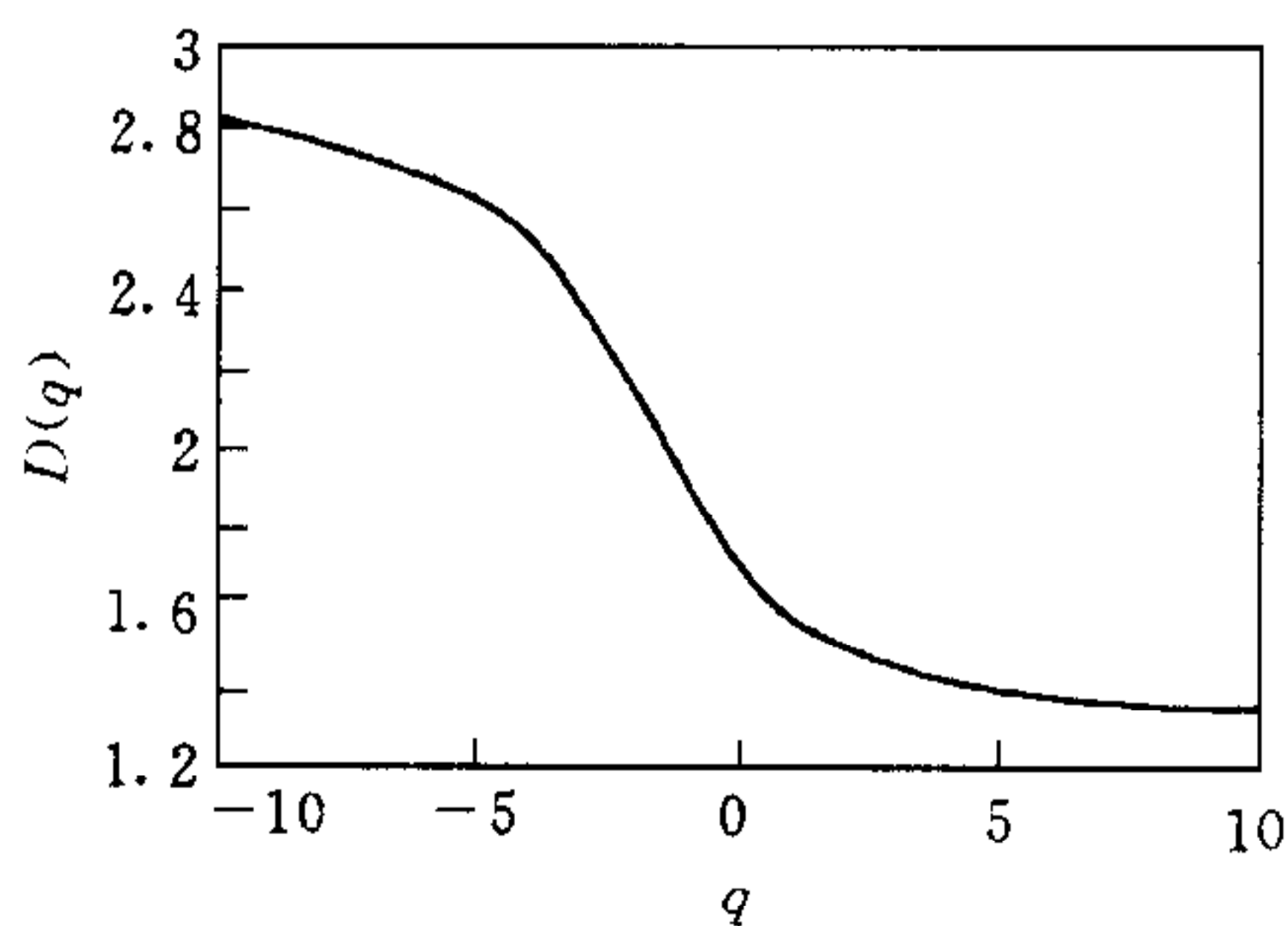


图1 海杂波的广义维数谱

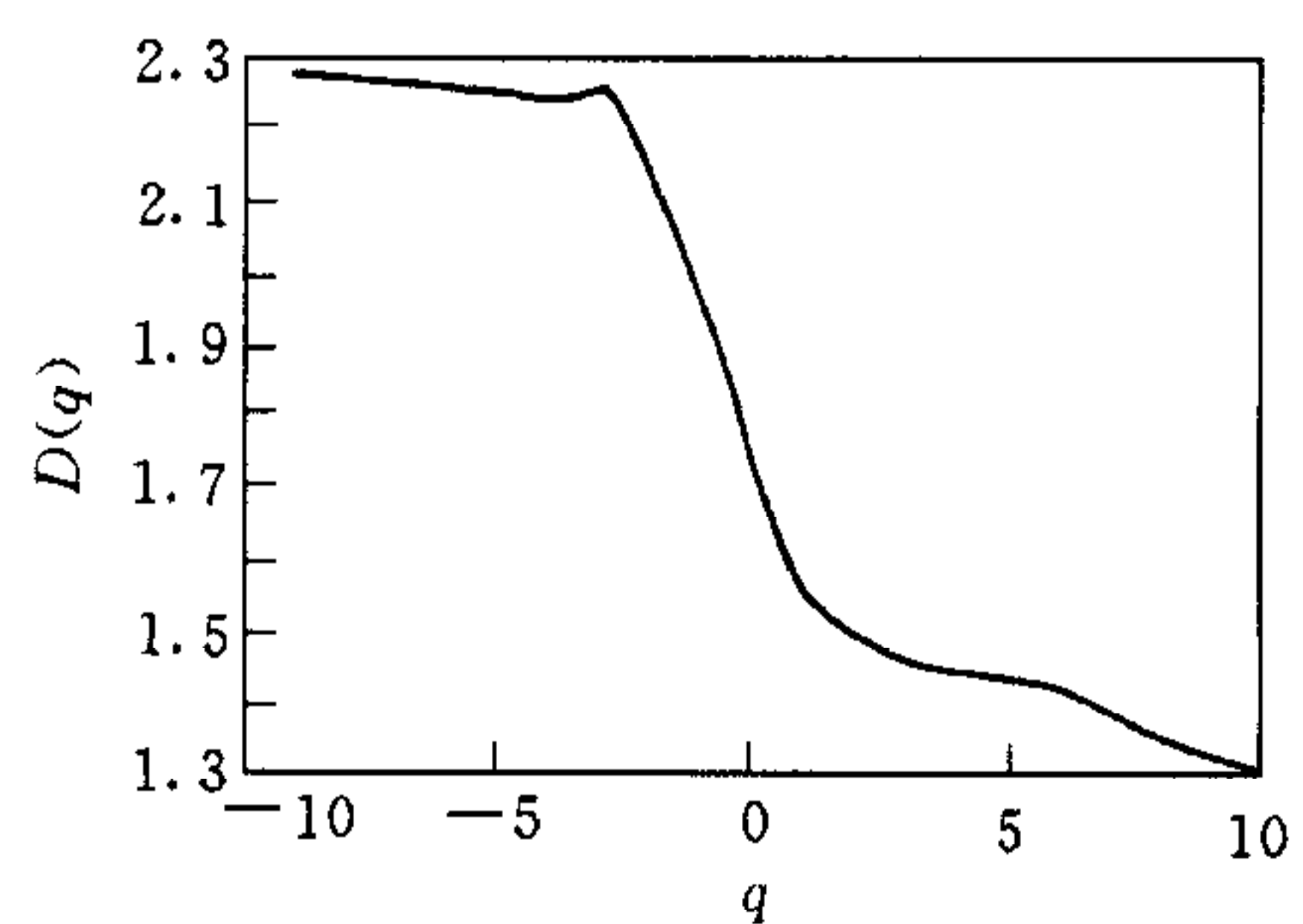


图2 舰船回波的广义维数谱(信杂比为 -1.2)

从中可以看出:海杂波的广义维数谱曲线与分形函数的极为相似, $D(q) \sim q$ 曲线呈反 Sigmoid 形,随 q 的增大,曲线单调地下降.而舰船目标回波的谱函数曲线在一定程度上偏离分形函数的特征曲线.这是由于杂波和目标雷达回波的动态过程分别受它们的物理规律和结构的控制,使其分形特征有一定的差异.同时也说明海杂波对分形模型的适应性和舰船目标对分形模型的失配性,这与理论分析是一致的^[3].

雷达工作面临的目标环境,由于噪声的存在以及其它因素的影响,变得十分复杂,很难运用经典统计数学的方法对其进行确切的描述.因此就有一定的理由把复杂的目标环境作为一种模糊环境来看待.在各种不确定性的影响下,我们难以获取舰船目标回波和海杂波特性的完整和准确的描述,特别是在强杂波背景情况下,两类目标的回波特征的相似和重叠现象严重,也就是说,两者之间存在着含糊的边界.传统模式识别中具有良好定义的鉴别函数在这里难以取得较佳的分类效果.本文基于模糊集的理论对舰船目标检测过程中的不确定信息进行客观的定量分析和有效处理,以提高检测的可靠性和智能度.其检测方案框图如图3所示检测方案为:在检测中,作者将待查信号分为两类,即海杂波目标和舰船目标.将广义维数谱视为特征矢量,每个特征矢量由20个特征组成.首先用40对训练样本来建立模型库,分别以每类目标样本集的特征均值和方差来表达该类目标,即每类目标均对应一个确定的均值和方差矢量

$$m(i) = [m_{i,1}, m_{i,2}, \dots, m_{i,20}], \quad v(i) = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,20}] \quad , i = 1, 2. \quad (10)$$

在决策过程中,由于特征值的变化是随机噪声等因素引起的,可以把此特征值的波动视为高斯分布.根据高斯分布的性质,特征值离均值三倍方差以外的概率几乎为零,这样当识别一个信号时,如果该信号属于目标 A ,那么此信号的每个特征值均应落在特征库中目标 A 类特征均值的三倍方差以内,而对于非 A 类,它的有些特征值可能落在三倍方差以外或更远的地方.在计算隶属度时,先逐个按特征值计算信号归属于该类目标的隶属度.设待查信号的特征为矢量 $f_x = [f_1, f_2, \dots, f_{20}]$,则由它的第 j 个特征值算得属于目标 i 的隶属度为^[7]

$$d_{ij} = \begin{cases} \exp(-(f_j - m_{ij})^2 / 2v_{ij}^2), & (m_{ij} - 3v_{ij}) < f_j < (m_{ij} + 3v_{ij}), \\ 0, & \text{其它,} \end{cases} \quad (11)$$

上述隶属度 d_{ij} 在 0, 1 之间.对特征矢量中的第 j 个特征,用下式可计算其分类能力

$$w_j = \frac{|m_{1j} - m_{2j}|}{v_{1j} + v_{2j}}, \quad j = 1, 2, \dots, 20. \quad (12)$$

由此得各特征的权重为

$$a_j = \frac{w_j}{\sum_j w_j}, \quad j = 1, 2, \dots, 20. \quad (13)$$

定义该待查信号属于目标类 i 的隶属度为

$$D_i = \sum_{j=1}^{20} a_j d_{ij}, \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

求得该信号分别属于海杂波目标和舰船目标的隶属度,取隶属度较大的目标类为该信号归属.

4 实验结果与对比

在利用分形理论进行雷达目标检测的诸多文献中,人们提出的方法分为两类:1)基于表面结构的方法——人造目标具有光滑的表面,自然背景具有粗糙的表面,可根据雷达回

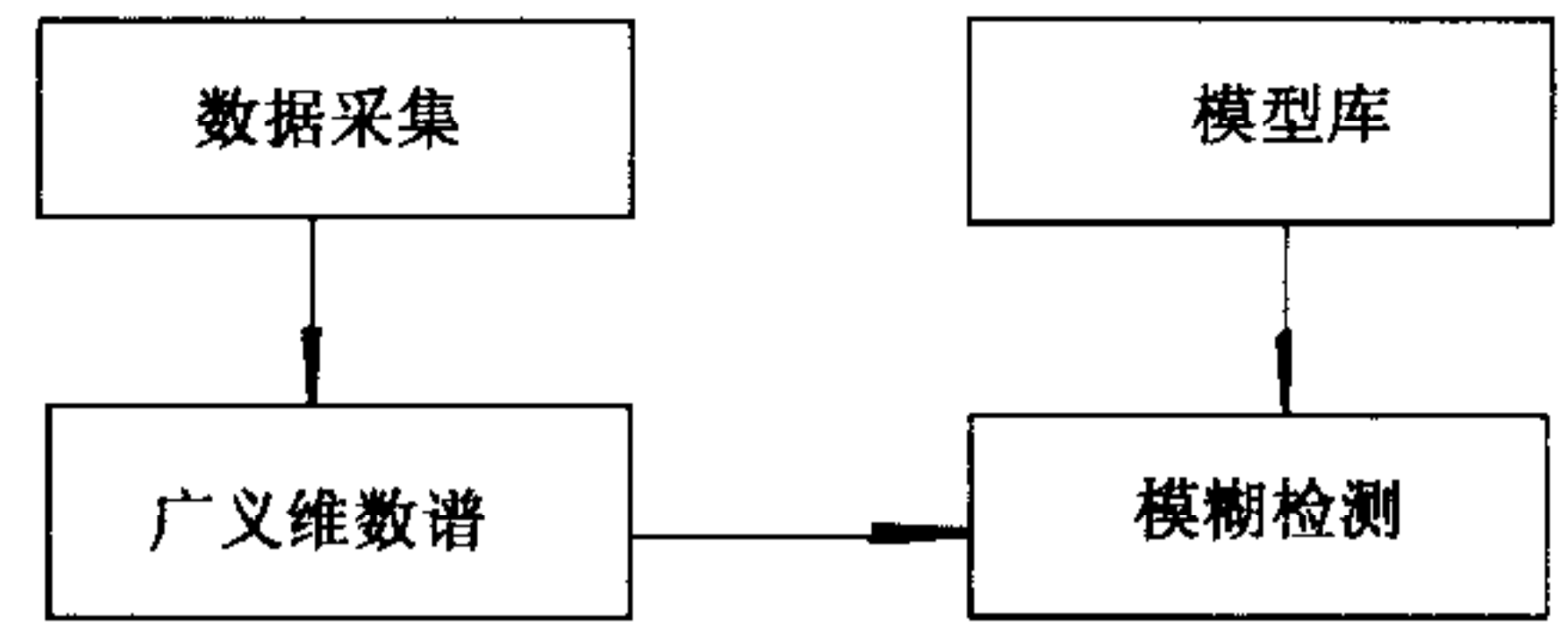


图3 检测方案框图

波的分维值大小区分目标与自然背景;2)基于空间结构的方法——自然背景在一定的尺度范围内具有空间结构的相似性,人造目标很少具有空间结构的相似性,因而,可以根据其分形模型拟合误差的大小区分两者.但研究人员发现:在信杂比较低时,目标与自然背景的这两种参数存在较严重的重叠区域,进行检测有一定困难.

本文把检测问题转换为一个分类问题,因此用模式识别中的可分性测度对分维值、分形模型拟合误差和广义维数谱进行度量.构造可分性测度为

$$J_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sigma_i + \sigma_j}, \quad (15)$$

$$d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^n (m_{ik} - m_{jk})^2, \quad (16)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{k_i - 1} \sum_{l=1}^{k_i} \left[\sum_{k=1}^n (x_{lk} - m_{ik})^2 \right]. \quad (17)$$

上式中 m_i, m_j 为两类模式样本集的各自 n 维均值向量; m_{ik}, m_{jk} 为其各自分量; σ_i, σ_j 为各自的标准差; k_i 为第 i 类模式样本数,本文中为40.可分性测度 J 综合反映了两类模式均值向量之间的距离与它们各自的标准差,很明显 J 越大,模式的可分性越好.我们分别计算雷达回波的分维值、分形模型拟合误差和广义维数谱的可分性测度,其结果如表1.

表1 用基于距离的可分性测度对各特征值或特征向量的度量结果

特征值或特征向量	分维值	分形模型拟合误差	广义维数谱
可分性测度	0.632	0.926	1.338

从表中的结果来看,广义维数谱因为能提供比单一的分维特征更多的信息,其可分性和稳定性也有相对较大的优势.

将本文方法与常用的分类方法^[6](最近邻域法、费歇法、亨明法)做了分类对比实验.用25对海杂波和舰船目标回波进行检测,表2为不同信杂比下的检测结果.

表2 各方法在不同信杂比下的检测准确率

信杂比(dB)	0	-0.5	-0.8
最近邻域法	78%	66%	52%
费歇法	82%	72%	64%
亨明法	98%	90%	80%
本文方法	96%	90%	82%

可以看出,本文方法的分类性能优于传统的最近邻域法和费歇法,与亨明法相当.但它的计算更为简便,能很好地满足实际需要.

5 结语

利用多重分形进行雷达信号的分析是一种趋势.本文在这方面作了一些尝试,将模糊检测与多重分形分析结合起来,提出一种在海杂波背景下检测舰船目标的方法,具有一定的实用价值.下一步我们的工作将集中于多重分形与小波的结合以及有效抑制噪声等方面.

参 考 文 献

- 1 Lo T, Leung H. Fractal characterisation of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets. *IEE Proc-F Radio and Signal Processing*, 1993, 140(4):243~249

- 2 Savaidis S, Frangos P *et al.* Scattering from fractally corrugated surface; An exact approach. *Optics Letters*, 1995, **20**(3):2357~2359
- 3 谢文录. 雷达信号处理中的分形模型与方法研究[学位论文]. 西安:西安电子科技大学,1997
- 4 Mandelbrot B B. Self-affine fractals and fractal dimension. *Phys. Scr.*, 1974, **32**(1):257~260
- 5 Carmichael D R. Seabed classification through multifractal analysis of sidescan sonar imagery. *IEE Proc-Rader. Sonar. Navig*, 1996, **143**(3):140~148
- 6 王碧泉,陈祖荫. 模式识别. 北京:地震出版社,1989. 113~157
- 7 文贡坚. 基于模糊决策的快速识别多类目标的方法. 模式识别与人工智能, 1997, **10**(2): 107~111

杜 干 1997年获西安电子科技大学工学硕士,同年在该校继续攻读博士学位.研究方向为雷达信号处理、数字图象处理等.

张守宏 西安电子科技大学教授、博士生导师,电子工程研究所副所长.多年从事雷达信号处理方面的研究与开发工作.

20届中国控制会议征文通知(第二轮)

2001年8月 大连

中国控制会议由中国自动化学会控制理论专业委员会每年举办一次.其宗旨是为系统控制领域的专家、学者、研究生及控制系统设计人员提供一个学术交流的机会,以便推动我国控制科学的发展.20届中国控制会议将在中国美丽的海滨城市大连举行.借此机会,我们欢迎世界各地的同仁参加这次大会.

征文范围 非线性系统;最优控制;鲁棒控制; H_∞ 控制;预测控制;随机控制;自适应控制;模型降阶;优化方法;系统建模与辨识;稳定性分析;变结构控制;分布参数系统;DEDS与HDS;大规模、复杂系统;过程控制;模糊系统与控制;神经网络;专家智能控制;CIMS;机器人控制;故障检测与诊断;电力系统;交通系统;社会经济系统;生态环境系统;上述各方面的实际应用。

稿件投寄 每篇论文长度不超过五页(A4),一式三份寄到秘书处,中英文均可.论文用双栏打印,字体为10磅,单倍行距.除论文外,请另附纸写明:论文题目、作者姓名、作者单位、通讯地址、电子邮件地址、摘要、关键词3至5个。

拟组织特邀组的作者请提供1000字的摘要并于2001年4月1日前寄到秘书处,同一特邀组的论文的主题应鲜明、集中。

拟正式出版会议论文集.部分论文拟由《自动化学报》或《控制理论及其应用》出版增刊.会议用语为中文(英文可接受)。

重要日期 论文投稿截止:2001年4月1日
论文录取通知:2001年5月15日
激光稿寄到时间:2001年6月15日

秘书处

刘智敏 教授

北京中关村中科院系统科学所,100080

电话:86-10-62532161;传真:86-10-62587343

E-mail:lzm@iss03.iss.ac.cn;www:http://iss03.iss.ac.cn/ccc2001

(下转第271页)