

基于分维特性的舰船雷达目标的检测*

胡卫东 郁文贤 郭桂蓉

(国防科学技术大学电子技术系 长沙 410073)

摘要 在强杂波背景下设计有效的海上雷达目标检测器是相当困难的。本文提出了一种基于海面散射的分维特性的雷达目标检测方法。它利用海上目标雷达回波与海杂波在分维特性上的差异来对海上舰船目标进行检测。将该方法用于实地录取的舰船雷达弱目标的回波,取得了较好的检测效果。

关键词 分维理论, 雷达目标, 海杂波, 检测

分类号 TN959.17

Radar Ship Targets Detection Based on Fractal Characteristics

Hu Weidong Yu Wenxian Guo Guirong

(Department of Electronic Engineering, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract It is very difficult to design an effective detector to spot ship targets. In this paper, a new method of detection based on fractal characteristics of sea-surface scattering is proposed. By comparing the difference in the fractal dimension between the sea clutter and the echoes from a target, an effective detection of the radar ship targets can be realized. In order to test this method, we use the real radar returns of ship targets for detection and a better result has been achieved.

Key words fractal theory, radar target, sea clutter, detection

海面回波(海杂波)是影响雷达对海上目标检测性能的一个重要因素。分析海面回波的传统方法是把该过程当做随机过程^[1],常规的检测方法主要是建立在统计理论基础上的。但已有的统计方法难以准确和全面地描述复杂的海杂波特性。要突破这一局限性,以获得对复杂现象更有效的描述,就迫切要求使用新技术。因为雷达信号的几何结构有其自身的特点,它从另一个侧面反映了雷达信号的本质特征。到目前为止,这类信息在

* 国家自然科学基金、国防预研基金资助项目
1995年8月31日收稿

雷达领域还未受到重视与应用。与目标几何结构相关联的一个重要概念是由 Mandelbrot 引入的分维几何^[2]。它在描述自然界中的不规则几何结构方面具有很强的适用性。因此它已成功地应用于对医学图象、各种图形文本以及语音信号（时间序列）的分析和分类。

分维散射的研究说明了分维概念在波与分维结构或表面的作用方面的应用前景。这些研究结果表明^[3]，散射表面的分维特性将携带在散射信号当中。因此海面的分维结构导致了其散射信号的分维特性^[4]。完全有理由应用分维理论对海面雷达回波进行分析，从而对海面散射的机理有深入的认识。

1 海面回波特性分析

雷达海面回波是雷达波照射区内海面后向散射的矢量和。海面的后向散射能量是源于海浪和表面张力波的作用，所以这种散射同海浪高度有很大关系。波浪与波纹等这些散射体的运动使它们各自的回波分量的相对相位发生变化，从而使合成的总回波（回波分量的矢量和）发生杂乱的变化。图 1 给出了含有海杂波及弱目标的雷达回波的典型波形。该数据是在某海岸某低分辨率非相参海岸警戒雷达上录取的。雷达天线架设高度约为海拔 450m，脉冲宽度为 $1.6\mu\text{s}$ ，数据的采样频率为 25MHz。

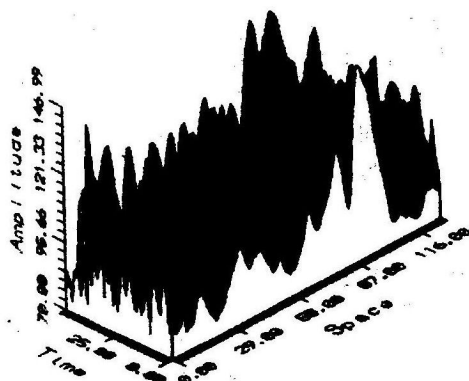


图 1 含有弱目标的海面雷达回波波形

国内外虽然对海面回波进行了多方面的研究^[1]，但由于这种杂波具有对环境较强的依赖性（如海面回波不仅依赖于雷达的工作频率、极化、分辨率、入射方向等因素，而且还依赖于气候等环境因素），故很难对它的统计特性做出精确描述，而只能在特定的情况下给出近似的结果。

很多自然结构包含了分维特性。文^[5]表明，在一定的分辨率范围内（几米~上百米），海面的起伏是分数维的，且其分维度为 2.25。这一结论来源于海面的功率谱的逆幂指数行为，并且这种行为可以推广到更一般的情况。一般来说，自相似的（分维）时间序列的功率谱与频率成负幂指数关系，即 $P(f) \propto f^{-\alpha}$ ，幂指数 α 也可以用来描述所考虑的时间序列的不规则性。它与该时间序列的分维度 D_s 的关系为

$$D_s = (5 - \alpha) / 2 \quad 1 < D_s < 2 \quad (1)$$

换言之，时间序列的分维度可直接从它的功率谱求得。

由于海面分维结构的作用，使得海面散射的雷达回波成为体现海面这种分维结构的分维时间序列。舰船目标很少具备分维特性，目标的雷达回波的稳定结构导致了它与海杂波在分维度上的差异。因此利用分维度进行检测是可行的。

2 海面雷达回波的分维度估计

物体的分维度包含了有关物体几何结构的多种信息。它是度量一个集合的不规则性

(随机性)的截然不同的度量方法。分维度的定义有许多种,在本文使用了盒维数法。在 R^2 空间中定义的盒维数是:

$$\dim_B = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta} \quad (2)$$

式中 F 是 R^2 中的任意一个非空有边界子集, $N_\delta(F)$ 是需要覆盖 F 集合的最小数目。所有的 $N_\delta(F)$ 集合都满足集合直径 $\leq \delta$ 的约束条件。

由于所采集的数据为离散的时间序列,因此这里采用文献[4]中介绍的时间序列的盒维数估计方法进行估计。其方法的核心就是获得在取不同盒子尺寸 δ 时,横纵坐标分别为 $\log_{10}(N_\delta)$ 、 $-\log_{10}(\delta)$ 的曲线。如果时间序列是分数维的,该曲线是一条直线。分维度可由最小均方意义下逼近曲线的直线斜率估计得出。

图 2 给出了 δ 在 0.01 到 0.1 之间变化的 $\log_{10}(N_\delta) \sim \log_{10}(\delta)$ 的曲线。分析在不同环境下获取的许多海杂波数据文件(每个文件包含 400 个脉冲周期的波形),发现它们的分维度都接近于 1.68,且该维数对环境不太敏感。为了保证结果的正确性,又计算了海杂波的功率谱,通过功率谱的幂指数,根据(1)式确定其分维度。图 3 绘出了图 2 数据的海杂波功率谱曲线。利用幂指数函数去逼近该曲线,得到幂指数 α 为 1.66。由(1)式可知,该时间序列的分维度为 1.67。分维度的准确性得到了验证。

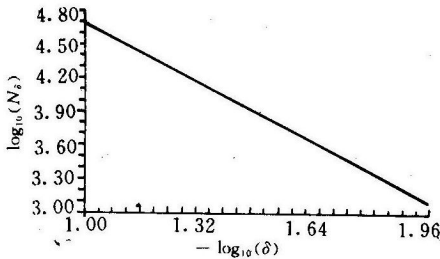


图 2 海杂波分维度计算曲线,由曲线斜率给出的分维度为 1.68

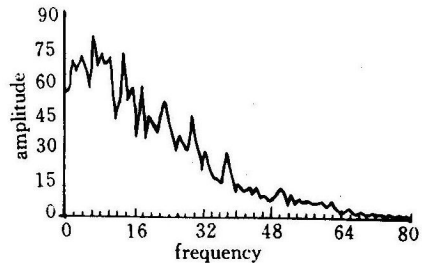


图 3 海杂波的功率谱曲线,近似满足一种幂指数函数关系

3 海面目标分维检测的实现

对于包含舰船雷达弱目标的数据集(信杂比约为 1.00dB),进行了分维度的计算。图 4 给出了含有目标雷达回波的时间序列的 $\log_{10}(N_\delta) \sim \log_{10}(\delta)$ 曲线,用直线在最小均方意义下去逼近曲线,得到分维度的估值为 1.54。由图中可见,图 4 的曲线可以划分为两个区域。它们可分别用两条直线来更好地逼近。第一个区域分维度的估值为 1.37,第二个区域的估值为 1.68。由此可知,它们分别对应着目标和海杂波的雷达回波。

上述结果来自于对含有一类弱目标回波的数据集的分析。当目标类别有所变化,大小形状发生改变时,分维度也会有所变化,只是变化范围很小。

为了使检测效果更加明显,这里采用滑窗式检测方法。窗宽取为目标回波在一个距离波门内的最大长度。然后,在该距离波门内进行滑动,计算当前窗口内雷达回波的分维度。根据该维数与标准海杂波分维度偏离的多少,设定一合适的门限。若低于该门限,

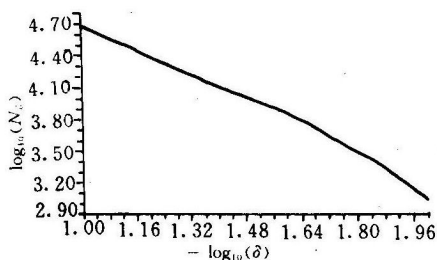


图 4 包含目标的雷达回波分维度计算曲线(δ 从 0.01 变化到 0.1)

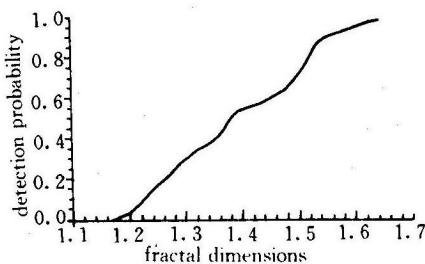


图 5 取不同分维度检测门限情况下的检测概率曲线(信杂比约为 1.00dB)

则认定在该窗口内有目标存在。图 5 给出了在取不同分维度检测门限条件下,对信杂比为 1.00dB 的同一数据集进行测试的检测概率曲线。从图中可见,当门限取为 1.6 时,检测概率可达 95%。

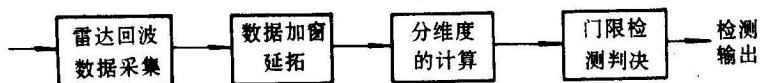


图 6 分维检测流程框图

为了能够适应实际检测的需要,即在获得少量几个脉冲重复周期数据的情况下进行检测,必须采用一定的办法对数据进行补偿。根据分维时间序列整体与局部的自相似特性,采用将窗口内的时间序列进行周期延拓的办法对数据进行补偿,然后再利用盒维数法计算分维度,通过与给定门限进行比较得出判决结果。这种补偿措施虽然有可能对分

维度的计算带来误差,但它有利于检测。因为目标回波的稳定性导致了分维度更大的下降。图 6 给出了利用分维度检测的框图流程。表 1 给出了在不同信杂比下对所采集的三个数据集(每个数据集包含 400 个脉冲周期的雷达回波)的检测结果。

表 1 不同信杂比下的检测结果
(虚警率小于 1%)

信杂比(dB)	检测门限	检测正确率
0.70	1.62	83%
1.00	1.60	95%
1.40	1.60	99%

4 结论

从上述分析可见,分维理论在描述象海杂波这样的复杂过程具有独到之处。首先,利用分维思想来描述海杂波的几何分布具有直观、稳定不变的特点,因此适用于检测隐藏在象海杂波中的其它目标的存在。这种思想可以推广到寻找藏匿在自然背景中的其它客体(例如人造物体)。其次,分维度也为深刻认识象海杂波这样的复杂事物或现象,提供了一条新的途径。

(下转第 64 页)

别方法作了进一步的研究。从现有的测试数据来看,这是一种识别率高、稳健性好的方法。但在实际情况下,涉及到的方方面面还很多,需要作更深入的研究。

参 考 文 献

- 1 徐 晖. 空间点目标红外和可见光特性及其应用研究. [学位论文]. 长沙: 国防科技大学. 1995
- 2 边肇祺. 模式识别. 北京: 清华大学出版社. 1988
- 3 张金槐. 若干非线性滤波的逼近. 国防科技大学报, 1989, (2)
- 4 Edward Waltz, James Llines. Multisensor Data Fusion. Atrech House, Boston, London

(责任编辑 潘 生)

(上接 68 页)

参 考 文 献

- 1 杰里. L. 伊伏斯, 爱德华. K. 里迪. 现代雷达原理, 卓荣邦等译. 北京: 电子工业出版社, 1991
- 2 Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. New York: Freeman, 1982
- 3 Jaggard D L, SUN X. Scattering from Fractally Corrugated Surfaces. J Opt Soc Amer A 1990, 7, (6): 1131~1139
- 4 Lo T, Leung H, Litva J, Haykin S. Fractal Characterisation of Sea-Scattered Signals and Detection of Sea-Surface Targets. IEE Proceed-Ings-F, 1993, 140(4): 243~250
- 5 Stiassne M. The Fractal Dimension of the Ocean Surface. Department of Applied Mathematics, California Institute of Technology. Pasadena 91125, preprint, 1986

(责任编辑 潘 生)