

高阶分形特征在雷达信号检测中的应用

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)

摘 要: 本文将高阶分形特征用于雷达信号的分析,提取出用于区分目标和杂波的新的分形特征——缝隙尺度变化率,推导了缝隙值在加性分形噪声中的关系式.实验表明:利用缝隙特征进行海上雷达目标的检测,可以取得较分维值检测更高的准确率.

关键词: 高阶分形特征;目标检测

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0090-03

Radar Signal Detection Based on High-order Fractal Feature

DU Gan, ZHANG Shou-hong

(Key Laboratory For Radar Signal Processing, Xi'dian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In this paper, the high-order fractal feature is employed to analyze radar signal. The new fractal feature-lacunarity is used to identify target and clutter. We derive formula of lacunarity in additive noise. The experiments show that higher detection accuracy of sea-surface targets can be obtained by using lacunarity feature than by fractal dimension.

Key words: high-order fractal feature; target detection

1 引言

由Mandelbrot提出的分维几何^[1]在描述自然界中的不规则性和自相似性方面有很大的适应性,它已成功地应用于图像处理、语音识别等领域.在用分形理论研究海面及其雷达回波方面,国内外取得一些初步成果.文[2]表明,海面的起伏是分数维的,数值介于2和3之间.而分维散射的研究表明^[3]:散射表面的分维特性将携带到散射信号中去.因此,海面的分维结构导致了其散射信号的分维特性.文[4]利用舰船目标回波的分维值低于海杂波的分维值这一特性进行检测.但实验表明,在强杂波背景下,仅分维值不足以很好地检测目标.

缝隙值作为高阶分形特征,近年来常用于图像分析中,尤其是纹理图像^[5]和医疗图像^[6]的分析中.本文将其引入雷达信号分析领域,在探讨缝隙值的特性的基础上,利用它进行了海上目标的检测,取得了良好的效果.

2 缝隙的概念及计算方法

在研究分形特征的时候,常常会发现几个表面或结构完全不同的分形集有着相同或相似的分形维数,这时仅用分形维数已无法对其进行区分. B. B. Mandelbrot注意到分维的非普适性或非唯一性,他建议研究缝隙作为分维的一个补充.分形维数指出了物体表面的不规则程度,而缝隙值描述了质量变化的快慢.其定义式为:

$$\Lambda = E[(M/E(M) - 1)^2] \quad (1)$$

式中 M 是分形集的质量, $E(M)$ 是其期望值.式(1)反映的是分形集质量 M 的理论值与实际值的偏差.缝隙参数是一个二阶统计量,因此称缝隙参数是高阶分形特征.由海岸线测量理论可知:分形集的密度与测量器的尺度 L 有关,且服从 $M(L) = \kappa L^D$.因此缝隙是 L 的函数. Voss^[7]提出用概率分布 $P(m, L)$ 来计算缝隙值. $P(m, L)$ 是有 m 个点在边长为 L 的盒子中的概率(盒子的中心可以是分形集的任意点). $P(m, L)$ 包含了分形集合的质量分布信息.定义:

$$M(L) = \sum_{m=1}^N m P(m, L) \quad (2)$$

$$M^2(L) = \sum_{m=1}^N m^2 P(m, L)$$

式(2)中 N 是盒子中可能有的最多数点,则缝隙量为:

$$\Lambda(L) = \frac{M^2(L) - [M(L)]^2}{[M(L)]^2} \quad (3)$$

从上式可看出,质量分布越均匀, $\Lambda(L)$ 越小,反之 $\Lambda(L)$ 值越大.由 $\Lambda(L)$ 随 L 的变化快慢可以看出物体纹理基元的大小.因为纹理基元较小时,盒子中的质量能较快地变得均匀.

3 加性分形噪声情况下的缝隙特征

传统的信号检测理论,大都是基于这样一个假定,即背景噪声是加性的平稳白噪声.对于电阻噪声,天线噪声等白噪

声干扰是符合该假定的. 但实际遇到的有些干扰, 如云雨、海浪、地物反射的杂乱回波, 属于色噪声干扰, 更有甚者是非平稳的随机噪声干扰, 而且具有长程相关性质. 在这些非平稳的随机干扰中, 表现出自相似性和长程相关性的一类重要的物理过程—— $1/f$ 类分形噪声, 是一种常见的非平稳随机过程. 电子器件噪声、分形背景上的电磁散射, 通信信道上的猝发误差等, 都是或近似是 $1/f$ 类分形噪声. 因此, 研究加性分形噪声情况下的缝隙特性, 不但对于海杂波背景下的目标检测, 而且对于更为广泛的分形噪声中信号的检测都有重要的意义. 针对这一问题, 推导出如下定理:

定理 1 设 X_1, X_2 为两个相互独立的分形信号, 在尺度 L 下, 其缝隙值分别为 $A_1(L)$ 和 $A_2(L)$, 若 $Y = X_1 + X_2$, 则有:

$$A_y(L) < \max\{A_2(L), A_1(L)\} \quad (4)$$

$$\text{证明: } A_1(L) = E\left[\left(\frac{M_1(L)}{E(M_1(L))} - 1\right)^2\right]$$

$$\text{令 } a = E(M_1(L))$$

$$A_1(L) = \frac{1}{a^2} E[M_1^2(L)] - 1$$

同理

$$\text{令 } b = E(M_2(L))$$

$$A_2(L) = \frac{1}{b^2} E[M_2^2(L)] - 1$$

而

$$\begin{aligned} A_y(L) &= E\left[\left(\frac{M_1(L) + M_2(L)}{E(M_1(L) + M_2(L))} - 1\right)^2\right] \\ &= \frac{E[M_1^2(L)] - a^2}{(a+b)^2} + \frac{E[M_2^2(L)] - b^2}{(a+b)^2} \end{aligned}$$

设 $A_1(L) > A_2(L)$, 则有:

$$\frac{E[M_1^2(L)] - a^2}{a^2} > \frac{E[M_2^2(L)] - b^2}{b^2}$$

$$\frac{b^2}{a^2} > \frac{E[M_2^2(L)] - b^2}{E[M_1^2(L)] - a^2}$$

$$\frac{A_y(L)}{A_1(L)} < \frac{a^2}{(a+b)^2} \left[1 + \frac{b^2}{a^2}\right] < 1$$

若 $A_1(L) < A_2(L)$, 同理, 有:

$$A_y(L) / A_2(L) < 1 \quad \text{证毕}$$

此定理表明, 目标信号在叠加噪声 (杂波) 的情况下的缝隙值小于噪声 (杂波) 和目标信号的缝隙值中的较大值. 虽然实际情况中, 目标信号的自相似性较弱, 但仍可看作是一种广义的分形信号.

4 海杂波与目标信号的缝隙特征

海杂波作为一种典型的分形杂波, 其分维值常被用来检测海上目标, 如船、冰山等. 但在杂波较强时, 两者的分维值相差很小, 难以准确地进行检测. 而缝隙作为一种高阶分形量, 能区分具有相近分维值的事物, 因此考虑用它进行海上目标的检测.

上节从理论上给出了目标信号叠加了分形杂波时的缝隙值的范围. 但在实际情况中, 难以得到无干扰情况下的目标信号. 用海杂波和船目标数据进行实验, 得到一些有价值的结

论. 由于本文讨论的是高距离分辨雷达, 主要考虑雷达波束擦地角较小的情况. 雷达参数为: 天线高度为 60m, 雷达离目标距离为 20000m, 工作频段为 8mm. 用 90 对海杂波和带有船目标回波数据 (信杂比为 -0.8dB) 作实验, 其分维直方图如下:

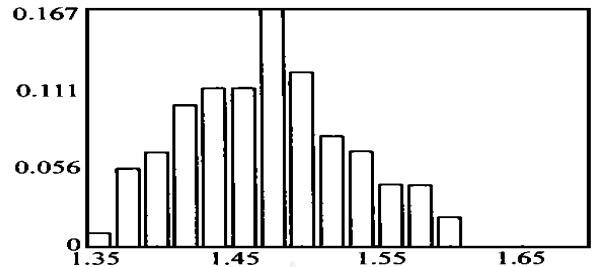


图 1 海杂波的分维直方图

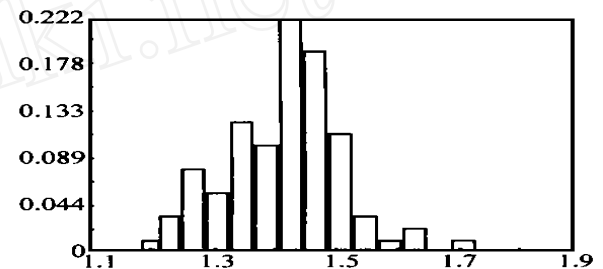


图 2 带有目标回波的分维直方图

从中可看出, 杂波和带有目标的信号回波的分维值交错在一起, 难以区分开, 此时, 以分维值进行检测是不可靠的.

再计算两者的缝隙特征, 下图为几条典型的缝隙特征曲线, 尺度 L 从 5 到 31.

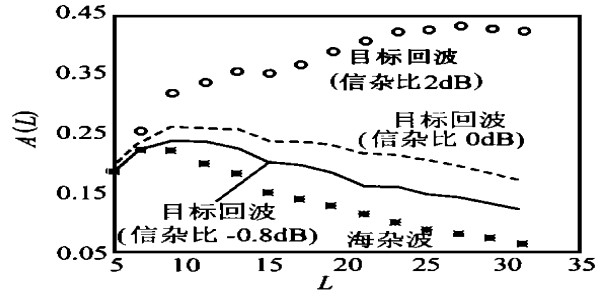


图 3 海杂波与带有目标回波的缝隙特征曲线

注意到, 海杂波的缝隙值在多个尺度下均小于含有目标信号的杂波的缝隙值, 且信杂比越大, 缝隙值越大, 其缝隙特征曲线与海杂波的偏离就越大. 从定理 1 可推断, 目标回波的缝隙值比海杂波的大. 考察两者的缝隙特征曲线, 海杂波的缝隙值随尺度的增大而迅速减小, 与标准的分形信号的变化趋势十分吻合, 而信杂比较大的目标回波的缝隙值正好相反. 被海杂波背景淹没的目标数据的缝隙值随尺度递增而减小, 变化趋势与海杂波相同, 但变化量比海杂波减小, 且与信杂比有关.

为了更好地描述这种规律, 定义缝隙尺度变化率来表征这一特性:

$$E = \frac{1}{N-4} \sum_{n=5}^N [A(4) - A(n)] \quad (5)$$

其中 N 为盒子的最大尺寸,在式(5)中 E 代表了一种新的高阶分形特征量,它能更深入地反映目标回波与海杂波的散射机理.海杂波与目标回波具有不同的散射机理与时空状态,导致散射回波具有不同的特征.通常海面纹理较丰富,其回波有较强的自相似性与复杂性.因此其缝隙特征随尺度 L 变化的趋势与典型的分形集相似:随着 L 的增大(即盒子加大),分形集逐渐均匀地分布在各个盒子中,因此 $A(L)$ 会减小并趋于零.而当海面出现舰船目标时,其雷达回波的自相似性会受到一定程度的影响,缝隙特征曲线随着信杂比的高低不同程度地偏离标准分形集的变化趋势.舰船等人造目标表面光滑,可看作是由众多几何形体组成的.当尺度小时,分形特征由相距较近的散射点间的关系来体现,此时小区域的平滑性起主要作用,散射点回波的变化相对缓慢,回波强度分布较均匀,故缝隙值较小.当尺度增大时,分形特征由相距较远的散射点间的关系决定,区域间的不规则性占主导地位,回波强度分布较不均匀,故缝隙值增大.

下面,进一步考虑分维值和缝隙尺度变化率这两个指标对海杂波和目标回波的描述能力,用同样的 90 对海杂波和含舰船目标回波(信杂比为 -0.8dB)数据进行实验,其结果如表 1.

表 1 两个指标对海杂波和目标回波的描述能力

	分维值		缝隙尺度变化率	
	平均值	85%置信区间	平均值	85%置信区间
海杂波	1.486	± 0.073	0.069	± 0.009
舰船目标	1.423	± 0.121	0.026	± 0.015

从中可看出缝隙尺度变化率由于体现了各尺度上的高阶分形特征,比分维值具有更好描述能力.

5 基于高阶分形特征的海上目标检测

从上面的实验了解到:缝隙尺度变化率可以作为一种有效的特征进行海上目标的检测.在检测中,采用滑窗式检测方法,窗口的宽度不能太大,否则检测效果不明显,同时也不能太小,因为分形特征的提取需要足够多的数据,取窗宽为 400,计算其缝隙特征,根据该窗口内缝隙尺度变化率与标准的海杂波的偏离的多少,设定一个合适的门限,若低于该门限,则认为该窗口内有目标存在.下面是不同信杂比条件下,本文方法与文[4]中方法的检测准确率对比如表 2:

表 2 两种方法的检测准确率

信杂比/dB	0.8	0	-0.4	-0.8	-1
文[4]中方法	85%	60%	失效	失效	失效
本文方法(门限取为 0.055)	97%	95%	92%	89%	78%

从中可看出,本文方法在信杂比较大时检测准确率高于文[4]中的方法,在强背景下文[4]中的方法失效时,它仍能进行检测.因此,本文提出的方法是一种实用可靠的检测方法.同时,缝隙特征与分维值一样,具有幅度不变性,且不受目标姿态、类别的影响.

将缝隙特征这一高阶分形特征引入雷达信号分析中,提取出缝隙尺度变化率这一新的特征对海上目标进行检测,取得了良好的效果.这一方法也可以推广到其它分形噪声的分析中.

参考文献

- [1] Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. Freeman, New York 1982
- [2] Elgar, S and Mayer-kress, G. Observation of the fractal dimension of deep- and shallow-water ocean surface gravity waves, physica D 1989: 104~108
- [3] Jaggard D and Sun, X. Fractal surface scattering: a generalized Rayleigh solution. J Appl. phys 1990, 68(11): 5356~5462
- [4] T. lo and H. Leung, Fractal characterisation of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets. IEE Proc- F Radio and Signal Processing 1993, 140(4): 243~249
- [5] C. Allain and M. Cloitre. Charaterzing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. Phy. Rev. A, 1991, 44(6)
- [6] Andrew J. E, Self-Affinity and Lacunarity of Chromation Texture in Benign and Malignant Breast Epithelial Cell Nuclei. Phys. Rev. Let 1998, 80(2)
- [7] R. F. Voss. Fundamental algorithms for computer graphics. Springer-Verlag Berlin, 1985



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,数字图像处理等.