

雷达数据的多重分形模型¹

苏 菲 孙景鳌 蔡安妮

(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

摘 要 本文将多重分形的分析方法引入到雷达杂波的分析中, 直接从杂波数据本身出发, 研究其具有的共性; 并分别对杂散数据和带目标回波数据进行了分析, 提取了它们的多重分形特征。结果表明在一定的尺度范围内, 单纯的雷达杂波具有分形的特征, 而带目标回波数据则存在分形的“失配性”, 从而提供了一种对目标进行粗检测和判决的新方法。

关键词 多重分形, 弥散范围, 迭代函数系统, 自仿射性, 特征提取

中图分类号 TN951

1 引 言

雷达回波中通常包含有大量与目标特征有关的信息以及各种各样的杂散回波^[1], 充分研究这些杂散回波有助于对目标特征更深入的了解, 从而完成目标的检测和识别。

雷达接收的杂波信号为广义随机信号, 其杂波特性与许多参数有关, 它是雷达特性、雷达波束搭接地面的几何参数、环境状况以及地面特性等参数的复合函数。在传统上常用某一区域的雷达散射截面、时域中的幅度分布函数、功率谱密度函数(或相关函数)等方面来描绘杂波特性。有时这些具有一个合理的假设和依据, 而大多数时候仅是经验和数据的拟合。由于地形种类繁多, 地表构造极不均匀, 表面粗糙度、表面内的离散反射源, 地质含水量等等的不同, 直接造成了地杂波变化多端, 因此可靠的方法是直接从杂波数据本身出发, 研究它的某种共性。本文将多重分形的方法引入到雷达杂波和带目标回波数据的分形分析中, 提取它们的多重分形特征, 从而达到区分杂波和目标信号的目的。

2 多重分形描述

近年来对分形结构的深入研究表明, 尽管分形意义上的标度关系给出了一个定量的数值-分形维数, 但它除了标志着该结构的自相似性构造规律之外, 并不能完全揭示出产生相应结构的动力学特征^[2]。事实上, 在各个复杂形体的形成过程中, 其局域条件是十分重要的, 不同的局域条件引起的参数波动是造成这类形体形态各异的主要原因, 为了进一步了解分形体形成过程中局域条件的作用, 人们提出了多重分形^[3,4]。它是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。在多重分形中, 系统不是由参数空间的一点来表示, 而是系统的整个测度区域在标度下的转换。因而它是对测度集合的标度特性的描述。

多重分形描述的是分形几何体在演化过程中不同层次的特征。讨论的是参量的几率分布。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 。不同小区域生长几率不同, 可用不同标度指数 α_i 来表征

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

若线度的大小趋于零, 则(1)式化为

¹ 1999-02-11 收到, 1999-05-15 定稿

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

(2) 式表明, α 是表征分形体某区域的分维, 称为局域分维。对 (1) 式两边各自乘 q 次并取和, 得

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

定义 q 次信息维 D_q 为

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

由 (3) 和 (4) 式可以看到, 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 的改变得以区分开来。当 $q = 0$ 时, D_0 就是通常意义上的分形容量维^[4]; 当 $q = 1$ 时, 对 (4) 式稍加变换可得

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

它就是 Reny 信息维。当 $q = 2$ 时, 则 D_2 几乎与关联维数是等价的。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, 并且扩展了分形理论的内涵。

典型的分形函数的 $q \sim D_q$ 曲线的形状是反 Sigmoid 形, 随 q 的增大曲线单调下降, 另外当 q 分别趋于正负无穷时, $D(q)$ 也分别取得一个极限, 将它们定义为

$$\alpha_{\min} = \lim_{q \rightarrow +\infty} D(q), \quad (6)$$

$$\alpha_{\max} = \lim_{q \rightarrow -\infty} D(q). \quad (7)$$

α 的物理意义如前所述是指局域分维, 它的弥散范围 $\bar{\alpha} = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ 指出了集团的均匀性, 因此, 通过 α 的弥散范围、关联维数 D_2 、分形维数 D_0 、信息维数 D_1 等即可判断所研究的集团形成过程中表现出来的多层次、局域的特征。

3 雷达数据的多重分形特征提取

分形至今并没有一个严格的定义, 要直接证明一个信号是分形信号并不容易, 只能从某些性质上加以判断。在本节中我们首先研究杂波的自仿射性, 旨在验证在一定的尺度范围内, 雷达杂波与分形模型相匹配。然后针对从外场采集的陆地杂波和目标回波数据分别进行多重分形特征提取, 利用雷达回波中目标和背景噪声多重分形特性的差异来区分和检测目标。

3.1 杂波的自仿射性

自仿射性是分形的一个重要表现, 并可以将它作为分形的一个判据^[5]。数学上的确定性分形具有严格的自相似性或自仿射性。统计自相似性是指在统计意义下具有自相似性或自仿射性, 也称无规分形。自然界存在的物理分形都是无规分形, 它们不具有严格的自相似

性,但它们存在自仿射性^[6].在实际应用中可以通过研究对象体的自仿射性来研究它们的分形性.即:若某个对象具有自仿射性,则认为它是分形的.利用分形的自相似性和自仿射性, Barnsley 于 1985 年提出了用迭代函数系统 (Iterated Function Systems, IFS) 来产生分形. IFS 由一组自仿射压缩变换组成,它是通过寻找集合自身递归的变换不变关系,构造自相似分形的方法.根据 Barnsley 提出的拼贴定理及其推论所提供的判断分形性的方法^[7],我们对实测的雷达杂波数据进行了自仿射性实验,实验结果如图 1 所示.其中 (a), (c) 为实测杂波信号, (b), (d) 为解出的其 IFS 吸引子,即由 IFS 重构出的原始波形.

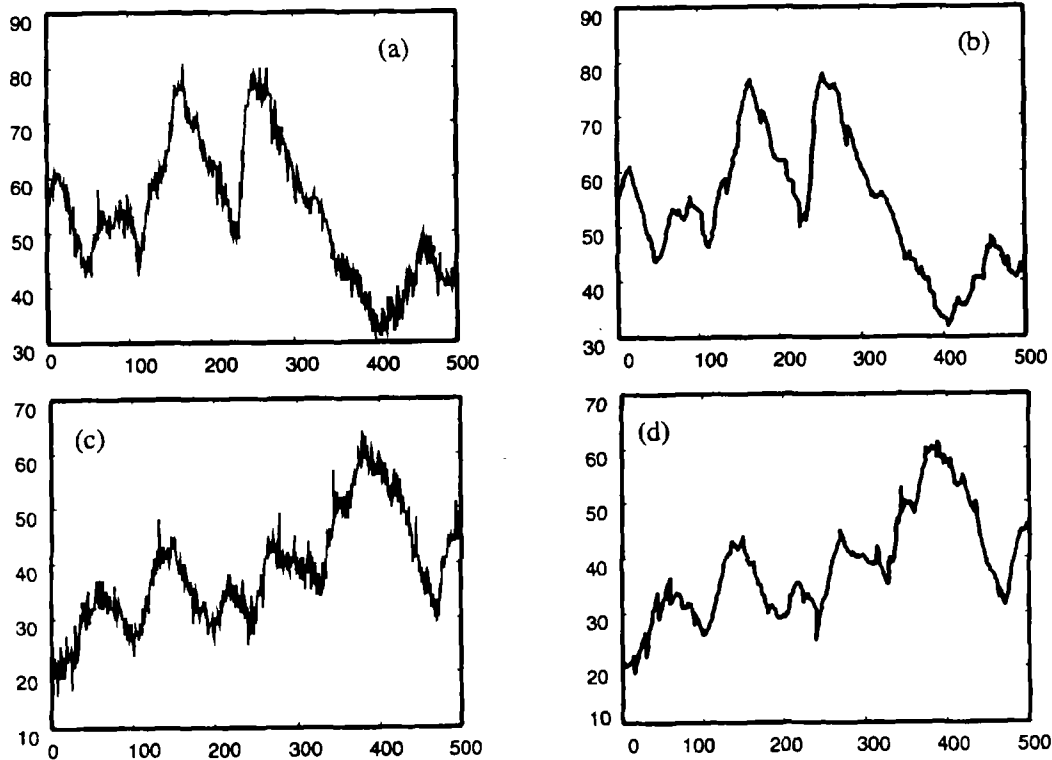


图 1 杂波的自仿射性实验

为了对集合 A 、其仿射像 $W(A)$ 和 IFS 吸引子 G 间的“相似度”给出一个定量描述,将 A 还原成信号 $y = f(x)$, 并设其仿射像 $W(A)$ 所对应的函数为 $y = f'(x)$, 那么误差信号为 $e(x) = f(x) - f'(x)$, $e(x)$ 的方差 $\text{Var}[e(x)]$ 反映了 $f(x)$ 与 $f'(x)$ 间的差别, 归一化后的误差信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{\text{Var}[f(x)]}{\text{Var}[e(x)]}.$$

SNR 越大, 误差越小, 自仿射性越好; 反之误差越大, 自仿射性越差. SNR 的倒数有时称为归一化误差.

经过大量的实验发现, 杂波序列与其仿射像吸引子间的差别很小, 误差 SNR 达 16dB 以上, 归一化误差小于 0.03, 说明杂波具有近似自仿射性, 即说明杂波具有分形性.

3.2 实测雷达杂波数据的多重分形特征提取

雷达杂波中含有较强的、各种分布的随机噪声. 3.1 节中已对杂波的自仿射性进行了验证, 下面对其进行多重分形建模, 提取其多重分形特征. 我们经过大量的实验, 得到了 $q \sim D_q$

广义维数谱曲线。部分实验结果如图 2 所示, 其中 (a) 为原始单纯杂波数据列, (b) 为对应的多重分形广义维数谱曲线。

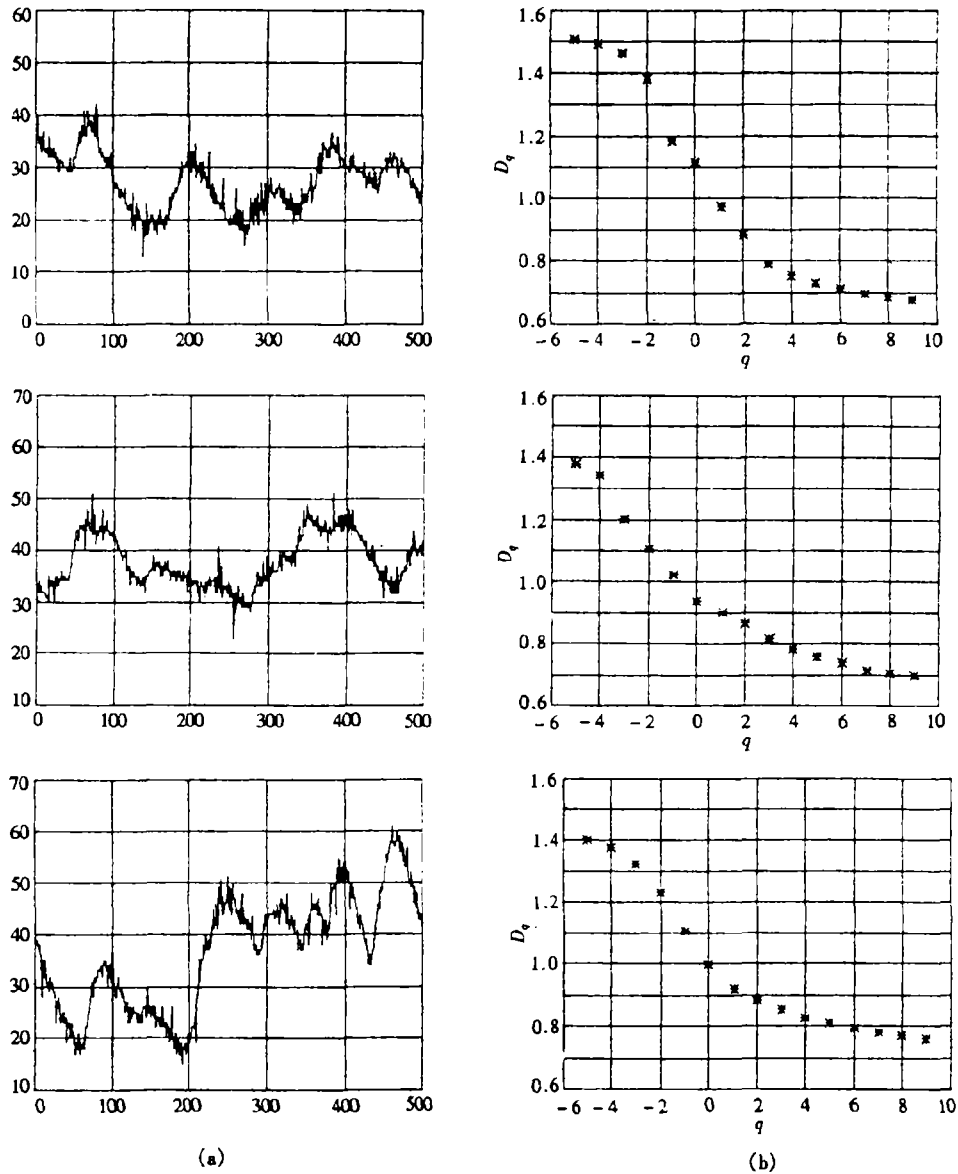


图 2 单纯杂波数据的多重分形特征分析

在经过大量实验之后, 对杂波的多重分形特征参数进行了统计, 结果示于表 1 中。表中给出了单纯杂波数据列的 α 的弥散范围, 分形容量维 D_0 、信息维 D_1 和关联维数 D_2 的平均值。可以看出, 它们与分形函数的多重分形特征参数极其相似, 而且杂波样本之间的特征曲线和参数也保持着较好的一致性和稳定性。

表 1

D_0	D_1	D_2	$\bar{\alpha}$
1.03	0.94	0.87	0.73

3.3 实测雷达带目标回波数据的多重分形特征提取

分形对于人造物体等光滑和有规则对象描述的“失配性”，就可能导致带目标回波数据与单纯杂波数据的多重分形特征参数的不同。部分实验结果如图 3 所示，其中 (a) 为实测带目标雷达回波数据，(b) 为其对应的多重分形广义维数谱曲线。在最后一幅图中给出了单纯杂波信号和带目标回波信号多重分形特征曲线的对比。

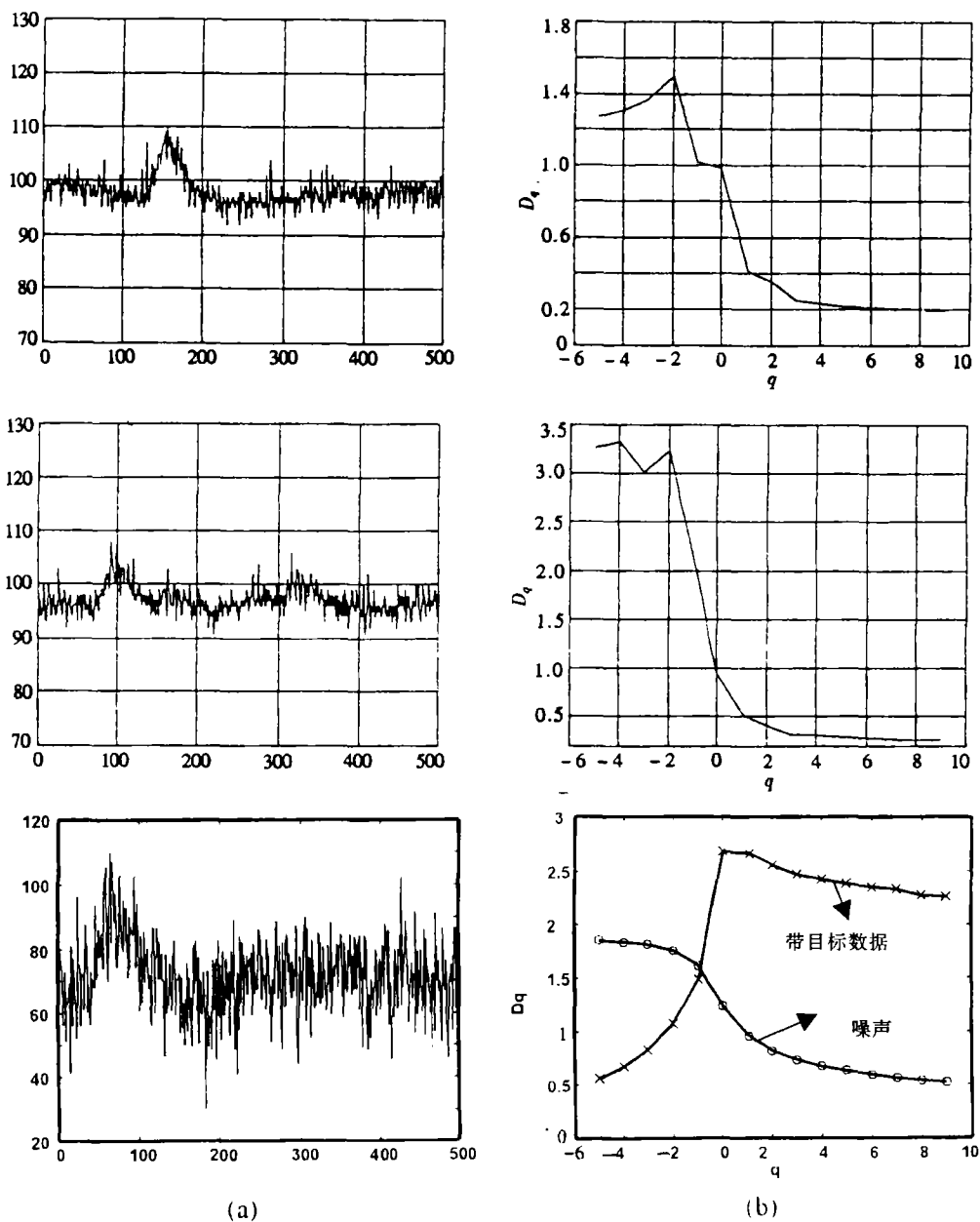


图 3 带目标回波数据的多重分形特征分析

4 讨 论

通过我们的实验可以看出, 单纯的雷达杂波数据的广义维数谱曲线与分形函数极其相似, 而且杂波样本间的特征曲线与参数也保持着较好的一致性和稳定性。在一定的范围内可以很好的与分形模型相吻合。而对于带目标的雷达回波数据, 它们的多重分形特征曲线则严重偏离分形函数的特征曲线, 表现出不规则的变动; 同时目标回波的多重分形广义维数谱曲线在形状和参数值上差异较大, 不能形成统一的规律, 这与杂波的多重分形特征明显不同。

实验结果证明在一定的尺度范围内, 单纯的雷达杂波序列是一种广义的分形信号。而人造目标由于其本身可以用一些规则的几何基元来描述, 其表面和空间结构与分形模型所表达的规律性之间存在固有的差异, 从而分形模型不适于描述人造目标。因此杂波的分形拟合性和目标的分形“失配性”之间的差异提示我们可以以此构成判断器, 本文提供了对目标进行检测和判断的实验方法。

多重分形的方法对于雷达研究领域不仅提供了一种新的技术, 而且提供了一种处理问题的新思维。它由局域标度特征导出整体行为的思想为描述雷达回波提供了新的方法。

参 考 文 献

- [1] 丁鹭飞, 张平. 雷达系统. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1984, 第三章.
- [2] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. San Francisco, CA: Freeman, 1982, 1-20.
- [3] Higuchi T. Approach to irregular time series on the basis of the fractal theory, Physica(D), 1988, 31: 227-283.
- [4] 庄国策. 分形与分形物理. 自然杂志, 1990, 15(11): 831-837
- [5] 王东生, 曹磊. 混沌、分形及其应用. 合肥: 中国科技大学出版社, 1995, 103-125.
- [6] 张济忠. 分形. 北京: 清华大学出版社, 1995, 7-14.
- [7] M. F. Barnsely, S. G. Demko. Iterated function systems and the global construction of fractals. Proc. Roy. Soc. London: 1985, (1399): 243-275.

RADAR DATA ANALYSIS WITH MULTI-FRACTAL METHODS

Su Fei Sun Jing'ao Cai Anni

(School of Telecommunications, BUPT, Beijing 100876)

Abstract Multi-fractal methods are introduced to radar clutters analysis in this paper to find general characteristics of clutters. Clutters and echoes from targets are analyzed respectively. The results show that the radar clutters are a kind of generalized fractal signals in some degree, and echoes from targets do not match with the fractal model. This fact leads to a new way to detect targets.

Key words Multi-fractal, Spread scope, Iterated function systems, Self-affinity, Feature extraction

苏 菲: 女, 1973 年生, 博士生, 研究方向: 图像处理与识别, 雷达信号处理.

孙景鳌: 男, 教授、博士生导师. 研究领域包括多媒体通信、图像处理与识别, 现代成像技术等.

蔡安妮: 女, 教授、博士生导师. 研究领域包括多媒体通信、图像处理与识别, 现代成像技术等.