

# 雷达目标回波信号的混沌、多重分形分析与识别\*

鲜明 庄钊文 肖顺平 郭桂蓉

(国防科技大学ATR重点实验室 长沙 410073)

**摘要** 本文旨在将混沌、多重分形的理论和方法引入雷达信号处理,从混沌、分形动力学角度来揭示和刻画复杂目标散射机理,为进行有效信号处理和可靠目标识别寻找新的理论和技术实现方法。文中统计了五种飞机目标回波信号的Lyapunov指数分布情况,并计算了其多重分形维数,然后在此基础上,进行了目标识别的实验,获得了较高识别率。本文的研究表明,混沌、多重分形理论在目标特性及识别的研究中具有好的应用前景。

**关键词** 混沌, 多重分形, 电磁散射, 非线性, 目标识别

**分类号** TN959.17, TN957.52

## The Analyse and Recognition of Radar Targets Scattering Signal With Chaos Multifractal Theory

Xian Ming Zhuang Zhaowen Xiao Shunping Guo Guirong

(ATR Lab., National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

**Abstract** This paper introduces the recently developed chaos and multifractal theory into the fields of radar signal processing for radar target characteristic and recognition. The Lyapunov exponents of five kinds of planes are calculated. With the correlation integral method, the multifractal dimensions of these targets' scattering signal are further obtained. Then we carry on the experiment of radar target recognition and get satisfactory recognition-rate. The results of this paper show that the chaos and multifractal theory have great potentials in the fields of radar signal processing and target recognition.

**Key words** chaos, multifractal, nonlinear, electromagnetical radiation, target recognition

雷达目标识别的研究,依赖于对目标散射机理的深刻理解,因为这是进行有效目标识别的基础。当金属目标受到雷达电磁波激励时,会在其表面产生感应电流,这些感应电流的再次辐射就形成了目标的散射场。理论分析和实验测量均表明目标散射场产生的机理非常复杂,尤其是在高频区,目标的散射已不完全是一种累积过程,而变成一种“局部”现像,其散射成分主要包括:产生于目标阴影边界的爬行波、表面行波、表面镜面回波、表面不连续处(如边缘、拐角等)散射波、表面导数不连续处散射波、凹形区域散射波以及物体各部分相互作用的散射波等。由于这些散射成分的综合作用,使得雷达目标真实的散射过程变得相当复杂,表现出较强的非线性特点:对复杂金属目标的雷达测量表明,目标高分辨散射信号表现出极为复杂的不规则性,具有动态特征,即目标在不同方位角度下产生的回波表现出一种动态差异,性质变化很大,随机性强,其中无法找到准确的线性关系,而主要呈现出非线性特性。针对雷达目标这样的散射特点,本文利用非线性科学的理论,即混沌、分形理论,来研究雷达目标的回波信号,试图从混沌、分形动力学角度来揭示和刻画复杂目标散射机理,为进行有效雷达信号处理和可靠目标识别寻找新的理论方法和技术途径。

雷达目标的散射过程本身是一个复杂的动力学过程,这个过程体现了自然界复杂的电磁相互作用的规律。电磁相互作用过程能够产生混沌、分形是人们早已注意、并加以研究的现像<sup>[2-5]</sup>。许多学者的

\* 1997年8月15日收稿

第一作者:鲜明,男,1970年生,博士生

研究表明，混沌、分形现象不仅广泛存在于自然界，也存在于反映自然界变化的规律中，因此利用混沌、分形理论来研究雷达目标的复杂散射过程，可望在雷达目标复杂散射机理研究方面探索新的理论、方法，为有效的雷达目标识别提供新的技术实现途径。混沌、分形理论在雷达信号处理<sup>[6,7]</sup>方面的应用近一段时间里已正引起人们的重视。

## 1 雷达目标回波信号的 Lyapunov 指数与多重分形分析

相空间是指由系统中独立变量所构成的空间。非线性系统基本理论的一个重要方面就是要获得目标真实的相空间。在多数情形，有关物理系统的一些信息都包含在一个标量的时间序列中，为了提取出原真实动力系统的相关成分，就必须采取一定的办法来对原真实相空间进行重构。相空间重构可以采用延时坐标法。在重构相空间的基础上，还需进一步分析动力系统的时空演化特性。Lyapunov 指数  $\lambda$  是描述非线性系统动态特性的重要动力学参数，它表示两条无限小分开轨迹之间的相对距离在单位时间内平均指数增长因子。Lyapunov 指数在混沌系统研究中的意义是：正的 Lyapunov 指数意味着混沌，零指数表示沿着轨迹低于指数速度的运动，而负的 Lyapunov 指数表示相空间的轨迹是收缩的，不会产生混沌，故即使 Lyapunov 指数的大小是不知道的，Lyapunov 指数符号的类型也能提供动力系统的定性情况。

为了准确估计 Lyapunov 指数  $\lambda$ ，我们采用 Wolf<sup>[1]</sup>的方法：给定时间序列  $x(t)$ ，利用延时坐标方法对相空间进行重构，给定初始点  $\{x(t_0), \dots, x(t_0 + [m-1]\tau)\}$ ，得到该点的最近邻域点，记其长度为  $L(t_0)$ ；随着时间演化到  $t_1$ ，初始长度演化到  $L'(t_1)$ ；在搜索时，所要求的数据点应满足下面两条准则：一是该点与基准点的分开距离应比较小，二是演化向量与被替换向量之间的角度分离也较小。如果符合上述条件的点不能找到，暂保留当前所使用的向量，整个过程不断重复，直到搜索点的轨迹遍历整个数据集。于是有

$$\lambda_1 = \frac{1}{t_M - t_0} \sum_{k=1}^M \log_2 \frac{L'(t_k)}{L(t_k - 1)} \quad (2)$$

其中  $M$  是使用替换向量的总数。

我们利用带宽 1GHz 左右的阶梯变频雷达，在多种入射角、全极化下对 5 种飞机的缩比模型进行了测量，录取了回波数据；根据回波数据统计了这些飞机目标在不同角度下回波信号的 Lyapunov 指数，计算得到的 Lyapunov 指数都表现出正的特性。为简单起见，下面表 1 只列出了 5 种飞机目标在间隔 5 度情况下回波信号的最大 Lyapunov 指数。

表 1 5 种飞机目标回波信号的最大 Lyapunov 指数

方位	目标				
	F	H	J	W	Y
0 度	0.073330	0.072107	0.075600	0.034348	0.120613
5 度	0.080742	0.124053	0.081987	0.136814	0.063518
10 度	0.067580	0.166525	0.103537	0.203766	0.050761
15 度	0.118340	0.090591	0.073352	0.287768	0.061293
20 度	0.072276	0.030396	0.030390	0.120911	0.106139
25 度	0.088762	0.190494	0.085574	0.225583	0.098898
30 度	0.072877	0.108619	0.043369	0.067762	0.035234

Lyapunov 指数的含义是指相空间轨迹演化的快慢程度，可以近似理解为复杂目标对照射电磁波所作响应的变化程度。从表 1 中得到的 5 种飞机目标信号的 Lyapunov 指数来看，飞机目标在不同角度的 Lyapunov 指数均为正，表明飞机目标的雷达回波具有一定的混沌特性，从而更进一步揭示了复杂金属目标散射的非线性特点，即飞机目标对雷达电磁波所作的响应受初始条件变化影响较大。因而在实际测量时目标在不同方位下的雷达回波体现出明显的动态变化差异。多重分形理论是非线性理论研究的一个重要工具，因此可以利用多重分形分析的方法来研究飞机目标的雷达回波。

多重分形分析是把雷达散射信号看作电磁波对目标复杂“散射结构体”的一种测量。设散射信号可以表示成  $F = \{ (t, f(t)) : t \in \Delta \}$ ，其中  $\Delta$  为散射信号的某一个接收时间段。我们把  $F$  分成  $N$  个部分（子集）。设第  $i$  个部分的标度为  $r$ ，点数为  $n_i(r)$ ，广义维数  $D_q$  的定义如下：

$$D_q = \begin{cases} \frac{1}{q-1} \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log \sum_i p_i^q(r)}{\log(r)} & q \neq 1 \\ \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_i p_i(r) \log p_i(r)}{\log(r)} & q = 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $p_i(r) = \frac{n_i(r)}{N}$ ， $q$  为实数。对较大的正数  $q$  来说， $D_q$  反应了波形上稠密点区域（对应于目标

上局部散射行为比较复杂的部分）的性质，而对负数  $q$ ， $D_q$  反应了其稀疏区域（对应于目标上局部散射行为比较简单的部分）的性质，但由于  $q$  为负数时， $D_q$  取值远大于空间的拓扑维数  $d$ ， $D_q$  的几何意义无法解释，故一般不考虑。当  $q=0$  时， $D_0$  就是已知的一般分形维数，又叫做容量维数；当  $q=1$  时， $D_1$  即为信息维数；当  $q=2$  时， $D_2$  是关联维数。实际上，广义维数  $D_q$  包含了分形理论所涉及的全部分形维数，并且扩展了分形理论的内涵。根据对雷达回波多重分形维数的计算，从分形动力学角度来看，雷达目标回波的形成主要取决于波形上的“活跃区域”；对雷达波形来说，“活跃区域”指其主要生长（散射）点所占据的区域。这些“活跃区域”所对应产生的局域条件是不尽相同的（受目标上各区域电磁特性性质影响），从而反映在雷达回波波形上，不同部分（子集）的奇异性强度是不同的。设区域中的点数按  $r^{D_\alpha}$  来标度，则指数  $D_\alpha$  描述了在有限的一段时间内波形生长（对应于目标散射）点的数目。如果出现屏蔽区域，则会使生长点数目减少，从而  $D_\alpha$  下降，因此，波形的“活跃区域”清楚地揭示了复杂目标对雷达回波所作的贡献。通过对雷达目标信息的多重分形分析，可以揭示雷达目标经历非线性过程产生复杂结构的演化经历，有助于我们理解目标回波复杂结构形成的动力学根源，以达到对雷达目标“散射结构体”本质特征的认识和刻划。不同目标具有不同散射特性，其上各局部散射区域在受电磁波激励时将产生不同响应，从而形成散射回波上各不相同的“活跃区域”，不同目标散射信号的多重分形维数  $D_q$  存在明显差别；在目标姿态变化时，同一目标由于其上各局部散射区域固有的散射性质所决定，在形成散射回波时将产生波形上相似的“活跃区域”，得到相近的多重分形维数  $D_q$ 。

实验中针对测量得到的 5 种飞机目标的数据，采用多重分形的相关积分算法对雷达回波的多重分形维数进行了计算。首先在点  $x_j$  定义一个局部密度为

$$n_j(r) = \frac{\theta(r - |x_k - x_j|)}{N - 1} \quad (4)$$

这里  $\theta(x)$  的值定义为： $\theta(x)$  为 1，当  $x \geq 0$ ；而  $\theta(x)$  为 0，当  $x < 0$ 。于是  $D_q$  值满足如下形式：

$$C_q(r) = \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (n_j(r))^{q-1} \right)^{1/(q-1)} \sim r^{D_q} \quad (5)$$

这样可在  $C_q(r)$  与  $r$  的双对数坐标图上对样点用最小二乘法进行拟合，其斜率即为  $D_q$  值。针对实验中的数据，我们计算了  $q$  从 0 到 8 取整数情形的  $D_q$  值，得到如图 1 中所示的  $q \sim D_q$  分布，进而得到了 5 种飞机目标从 0 到 30 度角范围内的多重分形维数。为节省篇幅，图 2 只给出了 5 种飞机目标从 0 到 30 度角范围角的信息维数分布。

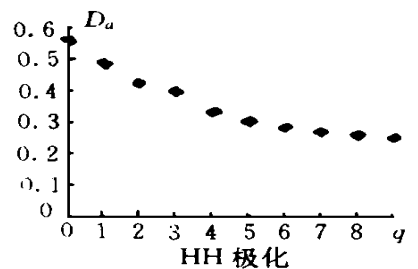


图 1 F-7 飞机在某角度的  $q \sim D_q$  分布图

利用上面算法对雷达信号多重分形维数的计算结果比较稳定，回波信号从 0 到 30 度角范围内方差统计平均在  $10^{-3}$  数量级左右。根据对雷达信号进行多重分形计算所得的多重分形  $x$  维数，我们可以得出如下结论：

- (1) 利用相关积分法可以对信号进行多重分形分析，即便在数据点不是很多的情况下，该方法

仍然有效，而且计算结果比较稳定。

(2) 在目标给定角度下， $D_q$  值随  $q$  值的增加而单调减少，与理论分析相符。

(3) 由分形动力学的角度来看，复杂金属目标对雷达电磁波的响应过程是复杂的。目标回波信号多重分形维数  $D_q$  值随  $q$  值变化显著，从测量意义上表明，复杂雷达目标“散射体”具有多重分形结构。

(4) 雷达回波信号是电磁波作为对目标复杂“散射结构体”的一种测量，反应出复杂金属目标“散射体”的几何形状：根据多重分形维数  $D_q$  的变化可知，复杂金属目标“散射体”在几何上是各向异性的，各部分散射特性差异较为明显，这与常识相符。

(5) 对金属目标回波信号进行多重分形维数计算的意义还在于，回波信号的多重分形维数比较全面和完整地反映了目标对雷达电磁波进行响应的过程，为进行可靠目标识别提供了依据。

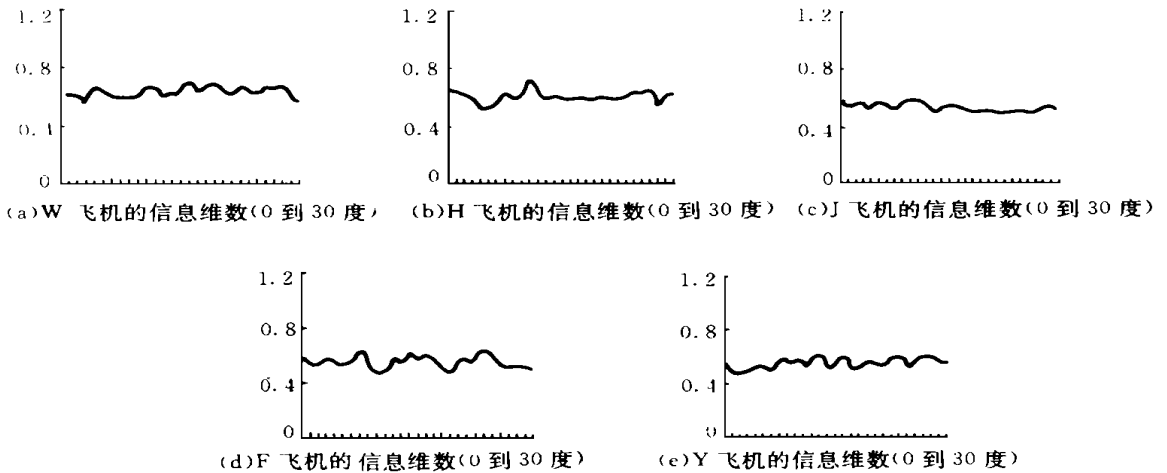


图 2 5 种飞机模型在 HH 极化下从 0 到 30 度角范围内的信息维数分布图

## 2. 目标分类识别实验研究

在对上述飞机目标的高分辨散射信号混沌、多重分形分析的基础上，进一步利用自适应谐振理论 (Adaptive Resonance Theory, 简称 ART) 神经网络模型进行了目标识别的实验研究。ART 神经网络模型是由 S. Grossberg 和 G. A. Carpenter 等在 1987 年提出来的，是进行模式识别的一种有效工具。目前，ART 神经网络模型已有多种结构形式，其中 ART2 可以接收连续输入，是本文采用的结构形式。其结构如下图 3 所示：

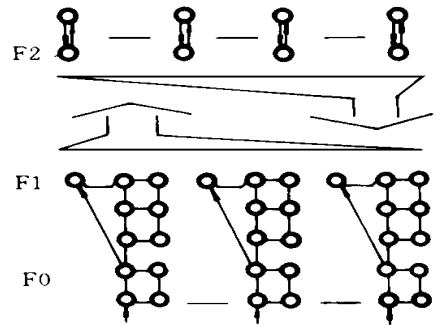


图 3 ART2 神经网络结构示意图

ART2 网络作为一种特征识别器，通过自组织的方式，

对时变的模式输入信息提取有序信息完成识别，解决了灵活性和稳定性。利用这种网络能实现对输入模式的自适应聚类，被类聚的模式类别数可以根据给定的警戒门限参数自适应地变化。飞机目标的回波信号具有动态特征，即不同角度的回波信号表现出来的差异是目标的一种动态特征，这种动态特征随目标方位的变化而体现出漂移的特性，因此不容易直接利用回波信号进行目标识别；但是通过对回波信号的多重分形分析，发现飞机目标的重分形特征具有一定的稳定特性，并且飞机目标的重分形特征较为完整地反映了飞机目标受雷达电磁波照射的经历，故可以用来作为目标的有效识别特征。实验中选取飞机目标  $q$  从 0 到 8 的多重分形维数作为 ART2 网络的输入，进行了目标识别研究。

利用 ART2 网络进行目标识别的过程如图 4 所示。ART2 进行目标识别的特点是：

(1) ART2 网络是无导师学习网络, 然而学习过程中需要人为地选择警戒门限, 其中警戒门限参数的选择不仅影响模式的聚类中心 (典型样本矢量), 而且, 也影响模式聚类的类别数和分类精度; 影响系统分类精度的另一个因素是 F2 层神经元的数目;

(2) ART2 网络进行目标识别利用的是其联想功能; ART2 网络学习算法几乎是实时的, 收敛速度快;

(3) ART2 网络能对动态的输入模式样本进行自适应聚类, 而不会造成新记忆影响旧记忆的灾难性后果。

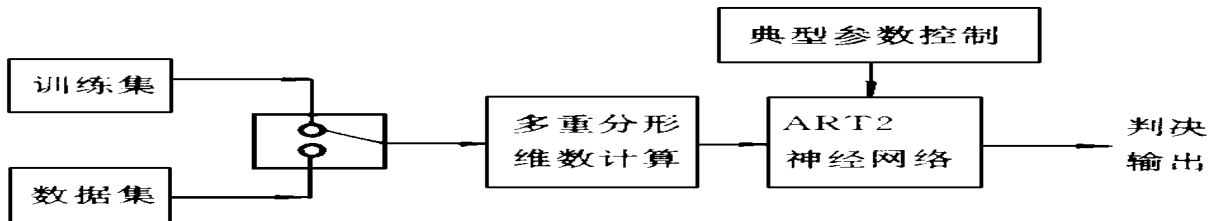


图4 利用 ART2 神经网络识别器的构造

下面表 2 给出了识别结果。由表可见, 利用多重分形维数结合 ART2 网络进行目标识别是一个卓有成效的新方法。本文提供的这种方法之所以识别率较好是以下原因: 通过多重分形分析, 目标的散射特性得到了全面的刻画, 目标的散射特性信息清楚地表现出来, 多重分形维数比较全面和完整地反映了目标对雷达电磁波进行响应的过程, 作为目标的识别特征量, 为目标的可靠识别提供了有效特征, 而利用 ART2 网络较容易实现对目标快速稳定分类。

表 2 识别结果

目标姿态	俯仰角: 0 度; 横滚角: 0 度; 方位角: 0 ~ 30 度				
目标类型	F	H	J	W	Y
识别率	85.7%	87.4%	79.1%	88.3%	86.8%

由此可见, 利用多重分形维数结合 ART2 网络进行目标识别, 比较容易地实现了对目标分类, 具有较强的可靠性。这里提供的方法算法清楚, 易于实现, 在工程应用上便于操作, 具有较大的实用价值。

### 3. 结论

本文探讨了将混沌、重分形理论应用于雷达信号处理, 进而进行雷达目标识别的问题。文中统计飞机目标回波信号的混沌及多重分形特性, 并计算了其多重分形维数。在此基础上, 进行了飞机目标识别的研究, 获得了较好的识别率。本文的结果表明, 混沌、分形理论和方法在雷达目标特性以及目标识别的研究领域中有着良好的应用前景。

### 参考文献

- 1 Wolf A. Swift J. B. Swinney H. L. and Vastano J. A. Determining Lyapunov Exponents From a Time Series. Physica 16D. 1985: 285 ~ 317
- 2 Kennedy M. P. Three steps to chaos, IEEE Trans. Circuits. Syst., 1993, 40 (10): 640 ~ 674
- 3 Chua L. O., etc. Linear and Nonlinear Circuits. McGraw-Hill, 1985
- 4 Mehaute A. Le. etc. Overview of Electrical Process in Fractal Geometry: From Electrodynamical Relaxation to Superconductivity. Proceeding of the IEEE, 1993, 81 (10): 1500 ~ 1510
- 5 Chua L. O., Brown K. and Hamilton N. Fractal in the Twist-and Flip Circuit. Proceeding of the IEEE, 1993, 81 (10): 1466 ~ 1491
- 6 Wornell G. W. Oppenheim A. V. Estimation of Fractal of Signal from Noisy Measurement Using Wavelets. IEEE T-SP. 1992, 40 (3)
- 7 Lo T., et al. Fractal Character of Sea-Scattered Signal and Detection of Sea-Surface Targets. IEEE Proceeding, 1993, 40 (4)