基于多重分形特征的防空雷达目标分类方法*

李秋生1,2,谢维信2

(1. 赣南师范学院 物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000; 2. 深圳大学 ATR 国防科技重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘 要:在介绍常规雷达飞机目标回波数学模型的基础上,利用多重分形测度分析手段,分析了常规雷达飞机 目标回波的多重分形特性及其多重分形特征的提取方法,并从模式分类的角度,提出了利用多重分形特征对喷 气式飞机、螺旋桨飞机和直升机等三类飞机目标进行分类的方法。实验表明,上述三类飞机的目标回波数据具 有显著不同的多重分形特征,所定义的多重分形特征参数可以作为飞机目标分类和识别的有效特征,仿真实验 验证了所提方法的有效性。

关键词:低分辨雷达;目标分类;回波调制;多重分形;特征提取

中图分类号: TN957.51 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)02-0405-05 doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.024

Target classification by surveillance radar based on multifractal features

LI Qiu-sheng^{1,2}, XIE Wei-xin¹

(1. School of Physics & Electronic Information, Gannan Teachers' College, Ganzhou Jiangxi 341000, China; 2. ATR Key Laboratory of National Defense Technology, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong 518060, China)

Abstract: On basis of introducing the mathematical model of aircraft returns in the conventional radar, by means of the multifractal measure analysis, this paper analyzed the multifractal characteristic of the aircraft returns as well as the extraction method of their multifractal signatures, and proposed the classification method for three types of aircraft containing jets, propeller aircrafts and helicopters from the angle of pattern recognition. The experimental analysis shows, the conventional radar returns from three types of aircraft targets, containing jets, propeller aircrafts and helicopters, have significantly different multifractal characteristic curves, and the defined multifractal characteristic parameters can be used as effective features for aircraft target classification and recognition. The simulation validated the validity of the proposed method.

Key words: low-resolution radar; target classification; echo modulation; multifractal; feature extraction

现役防空雷达多为常规低分辨体制雷达,若其在探测、发 现和跟踪目标的同时,还能提供目标的类别、型号和架次等信 息,无疑将具有十分重要的现实意义。然而由于低分辨体制的 限制,如窄带单一极化发射信号难以完全激励目标的物理特 征、已有的特征信息可能被性能低下的雷达系统所限制等^[1], 使得常规雷达体制下实现目标的分类和识别始终成为雷达目 标识别领域研究的一个难点。

目前为止,针对低分辨雷达目标分类和识别所提取的特 征大体上可以分为以下三大类^[2],即 RCS 和其他极化散射矩 阵参数、旋转调制谱、两个或多个相近载频反射信号的频差 波动相关因子,其中又以旋转调制谱特征为最。旋转调制 谱,又称喷气引擎调制(jet engine modulation,JEM)谱,其谱线 间隔由旋转部件叶片数和转速决定,无遮挡时与目标姿态角 无关。目前已提出的旋转调制谱特征的提取方法主要有复 倒谱法、自相关法、周期图法、AR 模型功率谱法和 SVD 特征 值分解法等^[3],但这些方法大多计算较为复杂,且往往要求 较高的脉冲重频和较长的观测时间,在实际应用中受到极大 的限制。

基于上述分析,本文拟采用多重分形测度分析手段,对

常规低分辨雷达目标回波信号的多重分形特性进行分析,避 开低重频、短照射雷达体制与谱估计法要求高重频、长照射 的矛盾,从模式分类的角度,提出基于多重分形参数的特征 提取方法,在不作机身分量补偿的条件下,实现对喷气式飞 机、螺旋桨飞机和直升机等三类飞机目标进行分类辨识的目 的,并以文献[3]提出的基于特征谱散布特征的目标分类方 法为对照进行分类识别实验,对提出的算法的性能进行对比 分析。

1 散射机理与回波模型

1.1 散射机理

作为一类复杂目标,飞机的尺寸一般要远大于防空雷达工 作波长,其回波散射处于光学区。由于光学区各散射中心的相 互作用较小,总的目标散射回波可视为飞机上各个独立等效散 射中心散射回波的线性叠加^[1]。若飞机可分解为 N 个散射中 心,则其基频散射回波可表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^{N} a_i(t) \exp\left[j\varphi_i(t)\right] = \sum_{i=1}^{N} a_i(t) \exp\left[j\frac{4\pi r_i(t)}{\lambda}\right]$$
(1)

其中: $a_i(t)$ 、 $\varphi_i(t)$ 和 $r_i(t)$ 分别为第i个散射中心的幅度、相位

收稿日期: 2012-07-01; 修回日期: 2012-08-05 基金项目: 武器装备预研基金资助项目(53126020602)

作者简介: 李秋生(1976-),男,江西南康人,副教授,博士研究生,主要研究方向为智能信息处理、目标识别与跟踪等(bjliqiusheng@163.com); 谢维信(1941-),男,教授,博导,主要研究方向为雷达信号处理与雷达目标识别、模糊信息处理、智能人机交互、对地观测技术等.

及其与雷达之间的距离,λ 为雷达工作波长。从而总的回波幅 度和相位分别为

$$a(t) = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N} a_i(t) \cos\varphi_i(t)\right]^2 + \left[\sum_{i=1}^{N} a_i(t) \sin\varphi_i(t)\right]^2}$$
(2)

$$\varphi(t) = \arctan\left(\sum_{i=1}^{n} a_i(t) \sin\varphi_i(t) / \sum_{i=1}^{n} a_i(t) \cos\varphi_i(t)\right)$$
(3)

从式(1)~(3)可以看出,任一散射中心的相对微小运动, 都会引起其回波相位 φ_i(t)的波动,使总的目标回波的幅度和 相位产生起伏,形成复杂的非线性调制效应,此即常规雷达飞 机目标回波的散射机理。显然,回波起伏反映了飞机各部分的 复杂微动调制效应,蕴涵着目标本身精细的几何结构和材料构 成等信息。若能提取这种反映飞机物理特征的非线性调制特 征,则可直接用于飞机目标的辨识。

1.2 回波模型

若不考虑有源和地杂波等其他干扰的影响,则防空雷达飞 机目标回波信号应包含机身分量、JEM 分量和噪声分量,即^[1]

 $s(t) = a_{s}(t) [C_{a}s_{a}(t) + C_{jem}s_{jem}(t)] + C_{n}s_{n}(t)$ (4) 其中: $a_{s}(t)$ 为雷达系统对目标回波的综合影响; $s_{a}(t)$ 、 $s_{jem}(t)$ 和 $s_{n}(t)$ 分别为机身分量、JEM 分量和窄带白噪声分量; C_{a} 、 C_{jem} 和 C_{n} 分别为机身分量、JEM 分量和噪声分量的强度系数。

具体而言,设含 M 发旋转部件的飞机目标位于雷达远场 距离 R 处,其方位和俯仰分别为 α 和 β。由于防空雷达对目标 的单次扫描时间较短(通常 20 ~ 100 ms),在这短暂的扫描期 间,飞机目标可以视为匀速运动的一个点目标,故其基频机身 分量为

$$s_a(t) = \exp(j2\pi f_d t + j 4\pi R/\lambda)$$
(5)

其中: λ 为雷达工作波长; $f_d = 2u/\lambda$ 为机身多普勒频率,u为机 身速度在雷达一目标视线上的投影, 即 $u = u_f \cos \varphi$, u_f 为飞机 飞行速度, φ 为雷达一目标视线与 u_f 的夹角。

相对于常规雷达工作波长,飞机目标旋转部件每个桨叶的 散射仍处在光学区,每一桨叶可视为一个等效散射中心,所有 桨叶散射回波线性叠加即构成了 JEM 分量,可推得基频 JEM 分量为^[3-5]

$$s_{jem}(t) = \exp(j2\pi f_{d}t + j 4\pi R/\lambda) \sum_{k=0}^{M} v(\alpha, \beta', P) \cdot \sum_{i=0}^{N_{k}-1} \left[g_{1k} + g_{2k}\cos(\theta_{ki} + \omega_{rk}t - \alpha) \right] \cdot \left(L_{2k} - L_{1k} \right) \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi}{\lambda} (L_{2k} - L_{1k}) \cos\beta' \cdot \cos(\theta_{ki} + \omega_{rk}t - \alpha) \right] \exp\left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left[\frac{L_{1k} + L_{2k}}{2} \cos\beta' \cos(\theta_{ki} + \omega_{rk}t - \alpha) \right] \right\}$$
(6)

其中: $v(\alpha,\beta', P)$ 为旋转部件可见度函数, P 表示飞机机型, β' 为与旋转面和飞行方向关系有关的一个量, 两者平行时取 β , 垂直时取 $\pi/2 - \beta$; $N_k \, \omega_{nk} \, L_{1k}$ 和 L_{2k} 分别为第 k 发旋转部件的 叶片数、转动角速度、桨叶根与桨叶尖到桨中心的距离; $\theta_{ki} = \theta_0 + 2i\pi/N_k$, 其中 θ_0 为0 号桨叶的初始相角; $g_{1k} = \sin(|\beta'| + \theta_k) + \sin(|\beta'| - \theta_k)$, $g_{2k} = \operatorname{sign}(\beta') [\sin(|\beta'| + \theta_k) - \sin(|\beta'| - \theta_k)]$, 其中 θ_k 表示桨叶角。

对式(6)作傅里叶变换,可得^[4,5]

$$S_{\rm jem}(f) = \sum_{k=0}^{M} v(\alpha, \beta', P) \sum_{i=-N_{1k}}^{N_{1k}} c_{k,i} \delta(f - f_d - if_{Tk})$$
(7)

其中: $f_{Tk} = N_k \omega_{rk} / 2\pi$; $c_{k,i}$ 由 $N_k \setminus \lambda \setminus \beta' \setminus L_{1k} \setminus L_{2k} \setminus \theta_0$ 和 Bessel 函数 共同确定; N_{1k} 为单边谱线数。可见, 调制谱由一系列线谱构 成, 谱线间隔仅取决于桨数 N_k 和桨速 ω_{rk} , 与飞行姿态无关。

目前,国内外有关 JEM 特征提取方面的研究主要集中于 谱线间隔的估计。然而在常规低分辨雷达体制下,雷达对目 标的单次扫描时间较短,脉冲重复频率较低,其多普勒域的 分辨率较低,且不同类型飞机目标 JEM 调制回波在多普勒域 易发生混叠,因此对于低重频、短照射的低分辨防空雷达,要 对谱线间隔进行精确估计是不容易实现的。下面从多重分 形的角度出发,对低重频、短照射条件下喷气式飞机、螺旋桨 飞机和直升机等三类飞机的雷达回波多重分形特性进行分 析,探讨有利于对三类飞机目标进行辨识的多重分形特征的 提取方法。

2 多重分形特征提取方法

自 20 世纪 70 年代 Mandelbrot 提出分形的概念以来,分形 理论已被广泛应用于自然科学、社会科学和工程技术等领 域^[6-8]。然而,随着理论和应用研究的深入,人们越来越清醒 地认识到,对于客观存在的大量分形体而言,单用一个分形维 难以全面刻画其细微结构。为此,20 世纪 80 年代初,Grassberger 等人^[9-11]系统地提出了多重分形理论,引入广义维数和 多重分形谱来描述分形体,因其考虑了分形体在几何支集上的 空间奇异性分布,因而在几乎所有涉及分形的领域得到了迅速 应用。目前,多重分形理论已成为研究复杂非线性系统的重要 方法之一。

2.1 多重分形模型

多重分形所要描述的是分形几何体在生长过程中不同层 次的特征,为此可把所研究对象分成若干个小区域。若记小区 域总数为 N,各小区域尺度大小为 ε(ε < 1),分形体生长界面 在某小区域内的生长概率为 P_i(ε),则不同区域往往具有不同 的生长概率,可用不同指数 σ 来表征,即

$$P_i(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\sigma} \quad i = 1, 2, \cdots, N \tag{8}$$

若所有小区域的 σ 指数值相同,则所研究对象是单分形 几何体;反之,若不同小区域具有不同的 σ 值,则所研究对象 存在多重分形特性。令具有相同 σ 值的小区域构成一个子 集,因 ε < 1,故最大指数 σ_{max} 对应最小概率子集,而最小指数 σ_{min} 对应最大概率子集。若记具有相同 σ 值的小区域数为 N_{σ} (ε),则有^[12]

$$N_{\sigma}(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-f(\sigma)} \left(\varepsilon \rightarrow 0\right) \tag{9}$$

其中: σ 称为局部分维,也称奇异指数,其值反映了分形体生长 界面在该小区域内的生长概率的大小; $f(\sigma)$ 表示具有相同 σ 值的子集的分形维,由于小区域数目较大,因此可用不同 σ 值 对应的无穷序列 $f(\sigma)$ 来表示整个分形体的分形维,故称 $f(\sigma)$ 为多重分形谱。 $\sigma - f(\sigma)$ 曲线反映了生长概率的分布特征。

2.2 多重分形谱的计算^[12]

多重分形可以分为规则多重分形和不规则多重分形两大 类,一般采用统计物理的方法来得到它们的多重分形谱。为 此,首先定义一个配分函数

$$\Gamma(q,\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N} P_i^q(\varepsilon) = \varepsilon^{\tau(q)}$$
(10)

其中: $q \in (-\infty, +\infty)$,其取值范围可视实际情况而定。如 果式(10)右边的等式成立,即配分函数和*ε*存在幂函数关系, 那么可以从 ln $\Gamma(q, \varepsilon)$ - ln ε 曲线的斜率得到 $\tau(q)$,一般把 它称为质量指数。q 和 $\tau(q)$ 也是描述多重分形的一组参量。 若 $\tau(q)$ 是q 的线性函数,则分形体具有单分形特性;若 $\tau(q)$ 是q 的凸函数,则分形体具有多重分形特性。

若q >> 1,则求和式中 $\Sigma P_{i}^{q}(\varepsilon)$ 大概率子集将起主导作用;若q << -1,则 $\Sigma P_{i}^{q}(\varepsilon)$ 求和式中小概率子集将起主导作用。因此,通过加权处理,可对分形体内部的结构进行精细的研究。

为从 $\tau(q)$ 和q的关系得出多重分形谱 $f(\sigma)$,先引入广义分形维 D_q :

$$D_{q} = \frac{\tau(q)}{q-1} = \frac{\ln \Gamma(q,\varepsilon)}{(q-1)\ln \varepsilon} \quad (\varepsilon \to 0)$$
(11)

显然,它随不同的 q 值有不同意义的分形维数。例如 q = 0 时, D_0 为简单分形维;q = 1 时, D_1 为信息维数。进一步将式(10) 改写为

$$\Gamma(q,\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N} P_{i}^{q}(\varepsilon) = \sum N(P)P^{q}$$
(12)

即按概率 P 的大小进行分档后求和,式中 N(P)是概率为某一 档 P 的小区域的数目。将式(7)(8)代入,则式(12)可进一步 表示为

$$\Gamma(q,\varepsilon) = \sum \varepsilon^{\sigma q - f(\sigma)} = \varepsilon^{\tau(q)}$$
(13)

将式(13)右边等式改写为

$$\sum \varepsilon^{\sigma q - f(\sigma) - \tau(q)} = 1 \tag{14}$$

显见,当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时,求和式中 $\sigma q - f(\sigma) - \tau(q) > 0$ 的项将趋于 0,而 $\sigma q - f(\sigma) - \tau(q) < 0$ 的项则不可能出现,因为此时将出 现无穷大。因此,只有 $\sigma q - f(\sigma) - \tau(q) = 0$ 的项被保留下来, 即有

$$f(\sigma) = \sigma q - \tau(q) \tag{15}$$

而 σ 可由 $\tau(q)$ 关于q的微分得到,即

$$\sigma = \mathrm{d}\tau(q)/\mathrm{d}q \tag{16}$$

也即 $\tau(q) \langle q \mid f(\sigma) \rangle \sigma$ 是 Legendre 变换的关系,对 $\tau(q) \langle q \rangle$ 作 Legendre 变换即可得到多重分形谱 $f(\sigma)$ 。

2.3 多重分形特征的提取

根据式(4),飞机目标雷达回波应包含机身分量、JEM 分 量和噪声分量。按照式(4)~(6)仿真典型场景下三类飞机目 标的回波数据,飞机参数和场景参数分别如表1、2所示。对于 直升机相对于主旋翼来说,尾翼叶片直径较小,转速较高,散射 回波在回波总能量中所占比例较小,因而其 JEM 分量主要受 主旋翼影响,仿真中简单地设尾翼半径为主旋翼半径的1/3, 其转速为主旋翼的3倍,主旋翼和尾翼间有随机的转角差拍。 喷气式飞机和螺旋桨飞机均为双发动机,其风扇结构和转速相 同,风扇间有一定距离,并有一随机转角差拍,桨叶角为一定范 围内的随机数。飞机目标 RCS 符合 Swerling 慢起伏模型,其中 喷气式飞机符合Ⅰ型分布,螺旋桨飞机和直升机符合Ⅲ型分 布,一次扫描中各脉冲之间是相关的^[13]。假设雷达工作在L 波段,波长 $\lambda = 0.3 \text{ m}$,脉冲重复频率 $f_r = 600 \text{ Hz}$,则观测时间 T 分别为25 ms 和100 ms 时三类飞机(飞机相对于雷达的飞行 姿态随机设定)的典型质量指数曲线和多重分形谱曲线如图 1、2 所示。

表 1 三类 25 种飞机的旋转部件的结构参数和转速[3]						
飞机编号	叶片数	L_1/m	L_2/m	转速/rpm		
J-A	38	0.38	1.1	3 520		
J-B	27	0.18	0.51	8 615		
J-C	30	0.3	1	3 000		
J-D	33	0.2	0.6	5 000		
J-E	42	0.24	0.8	4 000		
J-F	50	0.3	0.9	3 500		
P-A	4	0.68	1.7	1 200		
P-B	4	0.79	1.95	1 245		
P-C	3	0.27	0.76	3 400		
P-D	3	0.23	0.66	3 400		
P-E	3	0.23	0.66	2 340		
P-F	2	0.12	0.33	6 060		
P-G	2	0.12	0.33	7 010		
P-H	2	0.12	0.33	7 400		
P-I	2	0.12	0.33	7 800		
H-A	5	0	10.645	192		
H-B	5	0	8.6	242		
H-C	8	0	16	132		
H-D	4	0	7.8	217		
H-E	4	0	5.5	384		
H-F	4	0	5.335	395		
H-G	3	0	5	406		
H-H	3	0	5.345	394		
H-I	2	0	7.31	324		
H-J	2	0	5.64	394		

注:J为喷气式飞机,P为螺旋桨飞机,H为直升机。

表2 三种飞机的典型场景参数分布假定和飞行速度设定[3]

飞机类型	距离/km	高度/km	速度/m/s	
喷气式飞机	U(30, 40)	U(15,23)	U(600, 700)	
螺旋桨飞机	U(30, 40)	U(3.95,12)	U(150, 200)	
直升机	U(30, 40)	U(0.5, 10)	U(56, 98)	

注:U(a, b)表示在(a, b)区间上服从均匀分布。



从图 1(a)可以看出,在观测时间 T = 25 ms 的情况下,喷 气式飞机的质量指数 $\tau(q) = q$ 近似服从线性关系,其多重分 形特性不甚明显,而螺旋桨飞机和直升机的质量指数 $\tau(q)$ 则 明显是 q 的凸函数,其多重分形特性较为显著;而图 1(b)显 示,在观测时间增加(T = 100 ms)的情况下,喷气式飞机目标 回波的多重分形特性仍不甚明显,直升机目标回波的多重分形 特性则显著增强,但与螺旋桨飞机回波的质量指数曲线呈现不 同的对称特性。从图 2(a)可以看出,在三类飞机目标雷达回 波的多重分形谱曲线中,喷气式飞机回波的 σ 值分布范围最 小,直升机次之,螺旋桨飞机最大,即它们的回波依次呈现越来 越明显的多重分形变化特性。由图 2(b)可知,在观测时间增 加的情况下,喷气式飞机回波的σ值分布范围变化不明显;直 升机回波的σ值分布范围则显著增加,但其多重分形谱曲线 呈现与螺旋桨飞机不同的对称特性,其中直升机回波的多重分 形谱为右对称的钟状曲线;螺旋桨飞机回波的多重分形谱则为 左对称的钩状曲线。因此,图1、2 呈现出相对应的变化特性。

综上所述,质量指数曲线和多重分形谱曲线有可能较好地 区分三类不同的飞机目标。为此,定义如下四个多重分形特征 参数:

a)质量指数对称度 R_{τ} :

$$R_{\tau} = \left| \frac{\max \tau(q)}{\min \tau(q)} \right|$$
(17)

b)多重分形谱宽度 $\Delta \sigma$:

$$\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \tag{18}$$

c)最大、最小概率子集分形维数差 Δ_f :

$$\Delta f = |f(\sigma_{\min}) - f(\sigma_{\max})|$$
(19)

d)多重分形谱非对称指数 R_{σ} :

$$R_{\sigma} = \frac{\Delta \sigma_L - \Delta \sigma_R}{\Delta \sigma_L + \Delta \sigma_R} \tag{20}$$

其中: $\Delta \sigma_L = \sigma_0 - \sigma_{\min}, \Delta \sigma_R = \sigma_{\max} - \sigma_0, \sigma_0$ 为奇异谱最大值 max $f(\sigma)$ 所对应的奇异指数。

图 3 给出了在前述雷达工作条件下,观测时间为 25 ms 且 不作机身回波分量补偿的情况下三类飞机四种多重分形特征 参数的概率分布密度曲线。从图中可以看出,四种多重分形特 征均具有一定的分辨力:在 3 图(a)和(b)中, R_r 和 $\Delta\sigma$ 易将喷 气式飞机从其他两类飞机中区分开来,但对螺旋桨飞机和直升 机的分辨能力较差;在(c)和(d)中, Δf 和 R_σ 易把直升机从其 他两类飞机中区分开来,却对螺旋桨飞机和喷气式飞机的分辨 无能为力。因此,融合四种特征可以有效提高对三类飞机目标 的分类性能。



3 基于数据的算法性能评价

根据表1、2 所示的飞机参数和场景参数,按照式(4)~ (6)仿真典型场景下三类飞机目标的雷达回波数据作为目标 识别仿真实验数据。文献[3]对相关文献中比较典型的一些 低分辨雷达目标分类特征的分类性能进行了对比分析,指出基 于特征谱散布特征的低分辨雷达目标分类方法要明显优于其 他方法。为此,后面以基于特征谱散布特征的分类方法(简称 特征谱法)为对照,对本文提出的基于多重分形特征的分类方 法(简称多重分形法)的性能进行仿真分析。

实验1 以支持向量机(support vector machine, SVM)为分 类器,对特征谱法和多重分形法的分类性能进行对比分析。 SVM 分类器采用高斯核 $K(x_i, x_j) = \exp(- ||x_i - x_j||^2 / \sigma^2)$, 在计算负担允许的情况下,对核函数参数进行合理选取,文中 给出的分类识别率是在较好核函数参数下的识别结果。

表 3 给出了雷达工作在 L 波段,脉冲重复频率为 600 Hz、观测时间为 25 ms、信噪比 SNR = 20 dB 时,特征谱法和 多重分形法的正确分类识别率。从表中可以看出,无论是 对于训练数据还是测试数据,多重分形法的平均正确分类 识别率要远高于特征谱法,其对各类飞机目标的正确分类 识别率均在近 85% 以上;特征谱法除对喷气式飞机的目标 分类性能略优于本文方法外,对于螺旋桨飞机和直升机的 正确分类识别率均不超过多重分形法,尤其是对于直升机 的正确分类识别率较低,因而多重分形法的总体性能要明 显优于特征谱法。

表3 特征谱散布特征和多重分形特征的分类识别率 /%

比较项	特征谱散布特征		多重分形特征	
	训练数据	测试数据	训练数据	测试数据
喷气式飞机	99.33	99.67	98.67	98.33
螺旋桨飞机	87.11	86.22	88.67	86.22
直升机	60.40	59.20	89.40	84.60
平均识别率	79.36	78.64	91.36	88.48

实验2 仍以采用高斯核函数的支持向量机为分类器,选 取最优核函数参数,对特征谱法和多重分形法两种分类方法在 不同观测时间、脉冲重复频率和信噪比情况下的分类性能进行 对比分析。

图4所示为三类目标的平均正确分类识别率随观测时间、 脉冲重复频率和信噪比的变化曲线。从图4可以看出,与实验 1结论一致,同等条件下多重分形法的总体性能要优于特征谱 法。在图 4(a) 中,随着观测时间的增加,所计算的质量指数和 多重分形谱等曲线越能充分反映不同飞机目标的雷达回波在 分形特性上的差异,因而正确分类识别率随观测时间的增加而 稳步提高,而在相同信噪比条件下,多重分形法的正确分类识 别率要比特征谱法高5个百分点以上。图4(b)在L波段、25 ms 观测时间、20 dB 信噪比条件下,多重分形法的正确分类识 别率均在 90% 以上,当 PRF 达到 2 kHz 以上时,随着 PRF 的进 一步增加,正确分类识别率变化缓慢,在相同的重频条件下,多 重分形法的正确分类识别率要比特征谱法高6个百分点以上。 从图4(c)可知,两种分类方法的正确分类识别率均受到信噪 比的较大影响,且随信噪比的提升而稳步提高,当信噪比在5 dB以下时,两者正确分类识别率差别较小;而当信噪比在10 dB以上时,多重分形法的正确分类识别率要比特征谱法高4 个百分点以上,且随着信噪比的增加,两者的差距进一步拉大。 此外,需要指出的是,本文实验中所使用的数据均为目标的单 次脉冲回波数据,如果联合目标的多次脉冲回波数据,那么正 确分类识别率仍可能有较大幅度的提升。

4 结束语

常规雷达飞机目标回波的多重分形特征揭示了产生目标 回波结构的动力学特征,为低分辨防空雷达目标分类和识别 提供了新的途径。本文在介绍常规雷达飞机目标回波的数 学模型以及多重分形的研究方法的基础上,从飞机目标 JEM 调制回波出发,提取基于多重分形特征的 JEM 特征,在此基础上,提出了基于多重分形特征的低分辨雷达目标分类方法。实验研究表明,在低重频、短照射的常规低分辨雷达体制下,多重分形特征参数对于喷气式飞机、螺旋桨飞机和直升机三类飞机目标具有良好的区分能力,基于多重分形特征的模式分类器能够有效地对三类飞机目标进行分类,并具有优越的分类性能。

当然,需要指出的是,常规低分辨防空雷达由于发射的是 窄带信号,其分辨率较低,仅适用于对目标进行粗分类。若能 对其进行宽带改造,增加宽带信号发射和处理设备,进一步获 取包含目标精细几何结构的高分辨一维距离像,则有可能进一 步对非合作目标的型号进行识别。



参考文献:

- 丁建江.防空雷达目标识别技术[M].北京:国防工业出版社, 2008:40,44-66.
- (上接第398页)



4 结束语

本文提出一种新的信号稀疏分解方法——原子簇快速匹 配追踪算法。与传统的匹配追踪算法不同,每次迭代中,本算 法充分利用了相邻迭代过程中原子的非相关性以及神经网络 的快速学习能力来构造信号的稀疏逼近,大大降低了运算复杂 度。实验结果表明,新的算法获得与匹配追踪算法相当的逼近 性能,同时稀疏分解的速度至少提高了7倍,有利于下一步实 际应用研究的开展。

参考文献:

- [1] YANG Jian-chao, YU Kai, GONG Yi-hong, et al. Linear spatial pyramid matching using sparse coding for image classification [C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2009:1794-1801.
- [2] CHOU Yao-tang, HWANG Wen-liang, HUANG Chung-lin. Gain-

- [2] SHIRMAN Y D. Computer simulation of aerial target radar scattering, recognition, detection, and tracking [M]. Boston: Artech House, 2002: 111-124.
- [3] CHEN Feng, LIU Hong-wei, DU Lan, et al. Target classification with low-resolution radar based on dispersion situations of eigenvalue spectra[J]. Science China: Information Sciences, 2010, 53(7): 1446-1460.
- [4] MARTIN J, MULGREW B. Analysis of the theoretical return signal from aircraft blades [C]//Proc of IEEE International Conference on Radar. 1990: 569-572
- [5] PIAZZA E. Radar signals analysis and modellization in the presence of JEM application to the civilian ATC radars[J]. IEEE AES Systems Magazine,1999,14(1): 35-40.
- [6] 高隽.智能信息处理方法导论[M].北京:机械工业出版社,2004: 235-247.
- [7] 都国雄, 宁宣熙. 上海证券市场的多重分形特性分析[J]. 系统工 程理论与实践, 2006, 27(10): 40-47.
- [8] 赵健,雷蕾,蒲小勤. 分形理论及其在信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008:57-160.
- [9] GRASSBERGER P. Generalized dimensions of strange attractors[J].
 Physics Letters A,1983,97(6): 227-230.
- [10] HENTSCHEL H G E, PROCACCIA I. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors [J]. Physica D, 1983,8(3):435-444.
- [11] HALSEY T C, JENSEN M H, KADANOFF L P, et al. Fractal measures and their singularities: the characterization of strange sets [J].
 Physical Review A, 1986, 33(2):1141-1151.
- [12] 孙震,吴自勤,黄哟. 分形原理及其应用[M]. 合肥:中国科学技 术大学出版社,2003:53-73.
- [13] 黄培康,殷红成,许小剑.雷达目标特性[M].北京:电子工业出版 社,2005:114-115.

shape optimized dictionary for matching pursuit video coding [J]. Signal Processing,2003,83(9): 1937-1943.

- [3] NEFF R, ZAKHOR A. Matching pursuit video-part 1: dictioaty approximation[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology,2002,12(1): 13-26.
- [4] GRIBONVAL R. Fast matching pursuit with a multi-scale dictionary of Gaussian chirps [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(5): 994-1001.
- [5] KRUTZ-DELGADO K, MURRAY J F, RAO B D, et al. Dictionary learning algorithms for sparse representation [J]. Neural Computation, 2003, 15(2):349-396.
- [6] MALLAT S, ZHANG Zhi-feng. Matching pursuit with time-frequency dictionaries [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41 (12): 3396-3415.
- [7] 范虹,郭鹏,王芳梅.非平稳信号稀疏表示的研究发展[J]. 计算机 应用,2012,32(1):272-278.
- [8] 侯书东,孙权森.稀疏保持典型相关分析及在特征融合中的应用
 [J].自动化学报,2012,38(4):659-665.
- [9] 程文波,王华军.信号稀疏表示的研究及应用[J].西南石油大学 学报,2008,30(5):148-151.
- [10] DAVIS G, MALLAT S, AVELLANEDA M. Adaptive greedy approximations [J]. Journal of Constructive Approximation, 1997, 13 (1): 57-98.
- [11] FRIEDMAN J H, STUETZLE W. Projection pursuit regression [J]. Journal of the American Statistical Association, 1981, 76(376): 817-823.