

一种利用目标雷达高分辨距离像幅度起伏特性的特征提取新方法

杜兰,刘宏伟,保铮,张军英

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,陕西西安 710071)

摘要: 为了松弛高分辨距离像(HRRP)的方位敏感性,传统的雷达 HRRP 目标识别方法大都采用目标在一定方位角域内的平均像作为方位模板.实际上,距离像的幅度起伏特性也包含了一定的目标特征信息.本文基于散射点模型理论,提出了一种利用距离像幅度起伏特性的特征提取新方法.新方法提取的加权距离像特征反映了各个距离单元内目标散射点的分布情况,可以更好地描述目标散射特性.基于外场实测数据的识别实验结果表明,新的特征提取方法可以大幅度地提高识别性能.

关键词: 雷达自动目标识别; 高分辨距离像; 特征提取; 散射点模型; 平均像; 方差像

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)03-0411-05

A New Feature Extraction Method Using the Amplitude Fluctuation Property of Target HRRPs for Radar Automatic Target Recognition

DU Lan, LIU Hong-wei, BAO Zheng, ZHANG Jun-ying

(National Lab. of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Due to the aspect sensitivity of high-resolution range profile (HRRP), traditional radar HRRP target recognition methods usually use average profile within some aspect region as aspect template. Actually, the amplitude fluctuation property of HRRPs also represents some feature information of target. According to the scattering center model, a new feature extraction method using the amplitude fluctuation property of HRRPs is proposed in this paper. The weighted HRRP extracted by the new method can represent the scatterer distribution in every range cell, thereby it can describe the scattering property of target better. The experimental results based on the measured data show that the new feature extraction method can improve recognition performances greatly.

Key words: radar automatic target recognition (RATR); high-resolution range profile (HRRP); feature extraction; scattering center model; average profile; variance profile

1 引言

高分辨距离像(HRRP)是用宽带雷达信号获取的目标散射点回波在雷达射线上投影的向量和,它提供了目标散射点沿距离方向的分布情况,是目标重要的结构特征,因而成为雷达自动目标识别(RATR)领域的研究热点^[1-7].但是,HRRP对方位变化非常敏感.为了松弛HRRP的方位敏感性,传统的雷达HRRP目标识别方法,比如与欧氏距离分类器等价的极大相关系数模板匹配法(MCC-TMM)和各种核函数分类器,大都采用帧距离像的平均像作为方位模板^[2-6].实际上,帧内单次HRRP随方位起伏的特性在一定程度上也反映了目标特征,也应该是可以利用的有效信息.基于最大似然(ML)准则的自适应高斯分类器(ACC)是最典型的利用了方差像的分类器^[4,7].ACC是从样本数据服从多元正态概率分布出发,在Bayes框架下,使风险函数最小化的一种二次型分类器^[8,9].由

于多元正态概率密度函数里同时包含了均值向量和协方差矩阵,所以,ACC用于雷达HRRP目标识别时,同时利用了帧距离像的平均像和方差像.但ACC假设样本数据服从正态分布,如果该模型失配或参数估计有偏差,则会影响其识别性能.

本文的思路和ACC方法有所不同,不考虑HRRP样本的概率分布问题,而是基于散射点模型理论,提出了一种利用距离像幅度起伏特性的特征提取新方法.新方法提取的加权距离像特征有效地融合了帧距离像的平均像和方差像,反映了各个距离单元内目标散射点的分布情况,可以更好地描述目标散射特性.同时,为了解决幅度和平移敏感性,本文还给出了测试样本加权特征和方位模板加权特征的联合幅度归一化及平移匹配快速算法,使加权距离像特征可以方便地用于各种基于欧氏距离的分类器.基于外场实测数据的识别实验选用了MCC-TMM和径向基函数(RBF)分类器,结果表明加权距

收稿日期:2003-12-18;修回日期:2004-07-23

基金项目:国家自然科学基金(No. 60302009;No. 60402039);国防“十五”武器装备预先研究计划(No. 413070501)

离像特征的识别性能明显高于平均像特征及同样利用了方差像的 AGC 方法.

2 基于散射点模型的雷达 HRRP 特性分析及特征提取

2.1 基于散射点模型的雷达 HRRP 特性分析

根据简单散射点模型理论^[10,11],在散射点不发生越距离单元走动 (MTRC) 的方位角范围内,

$$(\quad)_{\text{MTRC}} = \frac{R}{L} \quad (1)$$

目标的散射点模型基本不变,相应的 HRRP 序列可以构成一个帧距离像.式(1)中 R 是距离分辨单元的长度(即距离分辨率), L 是目标的横向长度.根据相关文献^[2~5],距离像由散射点自身项和交叉项两部分组成,如第 n 个距离单元的第 m 次回波的功率为

$$|x_n(m)|^2 = \sum_{i=1}^{L_n} |x_i|^2 + 2 \sum_{i=2}^{L_n} \sum_{k=1}^{i-1} |x_i x_k| \cos[\varphi_{nik}(m)] \quad (2)$$

式中右边第一项是散射点自身项,第二项是散射点交叉项, x_i 为第 i 个散射点回波的振幅, $\varphi_{nik}(m)$ 表示第 m 次回波、第 n 个距离单元的第 i 和第 k 个散射点回波的相位差,可以证明 $\varphi_{nik}(m)$ 在理论上是零均值对称分布的^[2,5].其中,自身项为距离单元内散射点的强度和,在所讨论的方位角范围内与转动无关,是比较稳定的;而交叉项为相异散射点回波复振幅的共轭相乘,随转角以零均值作随机变化,引起方位敏感性.因此,对某个特定的距离单元而言,其帧内平均值基本反映了这个距离单元的自身项,而其帧内方差值则反映了这个距离单元的交叉项起伏强弱.

根据简单散射点模型理论,散射点在距离单元的分布大致可以划分为三种典型情况^[11]:

情况 1 距离单元内只包含一个特显点和众多相对小得多的杂散散射点.这类单元的回波幅度基本由特显点确定,其他弱散射点的影响是使幅度有小的起伏,因此,这类距离单元的幅度起伏很小.

情况 2 距离单元内分布众多幅度相当的小散射点,没有明显的特显点.这类单元的回波幅度基本服从瑞利分布,起伏也比较小,因此,这类距离单元也比较稳定.

情况 3 距离单元内包含少数几个,特别是 2~3 个特显点,同时也伴随有许多弱散射点.当目标相对雷达转动时,特显点的差拍作用使得这类距离单元回波的幅度会有大的起伏.特显点的横距差越大,起伏也越快.因此,这类单元的回波幅度随目标姿态变化的起伏通常很大.

2.2 利用帧距离像起伏特性的特征提取新方法

在雷达 HRRP 目标识别中,为了松弛方位敏感性,通常模板直接使用帧内平均像,而测试样本使用单次 HRRP^[2~6].平均像模板只反映了帧内各距离单元的自身项,从平均意义上描述了各距离单元内回波的强度.根据 2.1 节,由于距离单元内散射点分布情况不同,测试样本的某些距离单元会比较稳定,而某些距离单元会因为交叉项的影响起伏较大.所以,在识别中应该考虑加大稳定距离单元的作用,而减小不稳定距离单元的影响.

设第 i 类目标的第 k 帧距离像 $\{x_{ikl} | l=1,2,\dots,L\}$ (L 表示帧内距离像总数)的平均像为 $\mu_{ik} = [\mu_{ik}(1), \mu_{ik}(2), \dots, \mu_{ik}(N)]^T$,方差像为 $c_{ik} = [c_{ik}^2(1), c_{ik}^2(2), \dots, c_{ik}^2(N)]^T$,区间 $[n_1, n_{S_{ik}}]$ 是 μ_{ik} 的信号支撑区 ($[n_1, n_{S_{ik}}]$ 以外分布的是噪声分量),在支撑区内,定义权值为相应标准差的倒数,标准差大时权值小,标准差小时权值大;在支撑区外,定义权值为零,以去除噪声分量的影响.那么,帧距离像 $\{x_{ikl} | l=1,2,\dots,L\}$ 的权向量为

$$w_{ik} \triangleq [0, 0, \dots, \frac{1}{c_{ik}(n_1)}, \frac{1}{c_{ik}(n_2)}, \dots, \frac{1}{c_{ik}(n_{S_{ik}})}, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (3)$$

相应的方位模板加权特征为

$$v_{ik} = \mu_{ik} \cdot w_{ik} = [0, 0, \dots, \frac{\mu_{ik}(n_1)}{c_{ik}(n_1)}, \frac{\mu_{ik}(n_2)}{c_{ik}(n_2)}, \dots, \frac{\mu_{ik}(n_{S_{ik}})}{c_{ik}(n_{S_{ik}})}, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (4)$$

在测试 HRRP 样本 $x = [x(1), x(2), \dots, x(N)]^T$ 与 $\{x_{ikl} | l=1, 2, \dots, L\}$ 匹配时,认为 x 与 $\{x_{ikl} | l=1, 2, \dots, L\}$ 的散射点分布相同,同样采用 $\{x_{ikl} | l=1, 2, \dots, L\}$ 的权向量加权,得到的测试样本加权特征为

$$i_k = x \cdot w_{ik} = [0, 0, \dots, 0, \frac{x(n_1)}{c_{ik}(n_1)}, \frac{x(n_2)}{c_{ik}(n_2)}, \dots, \frac{x(n_{S_{ik}})}{c_{ik}(n_{S_{ik}})}, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (5)$$

式(4)、(5)得到的方位模板加权特征和测试样本加权特征既反映了平均像和测试样本的绝对幅度,又反映了各距离单元散射点的分布情况,因而,可以更好地描述目标散射特性.

3 基于加权距离像特征的雷达自动目标识别 (RA-TR)

3.1 加权距离像特征的幅度归一化和平移匹配问题

雷达 HRRP 还具有幅度敏感性和平移敏感性^[2~6].在雷达 HRRP 目标识别中,首先,需要对测试样本和方位模板进行幅度归一化,通常采用 2-范数归一化^[2,3,5];其次,幅度归一化的测试样本和方位模板还需要进行平移匹配搜索^[2,3,5].对于

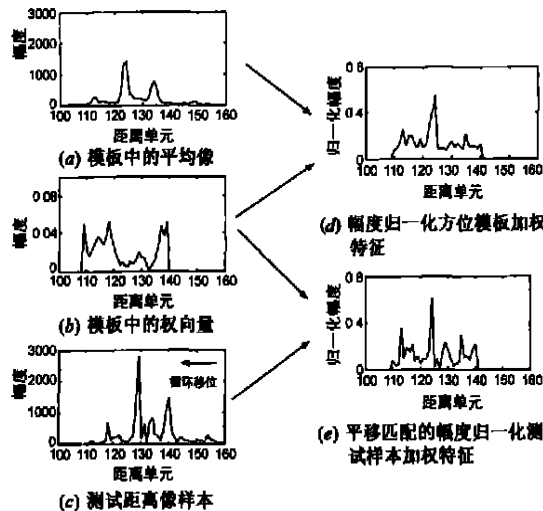


图 1 某测试样本加权特征和某方位模板加权特征的匹配过程

加权距离像特征,测试样本和方位模板的匹配过程如图 1 所示(图 1 的数据取自奖状飞机实测数据,具体说明见 4.1 节).加权窗如式(3)计算,它和模板中的平均像是匹配的,但和测试样本并不匹配.对于不同的平移,测试样本加权特征向量是不同,幅度归一化必须同时进行.如果如图 1 所示,对测试距离像样本逐个距离单元平移,得到加权特征并幅度归一化,运算量是很大的.因此,幅度归一化和平移匹配问题给加权距离像特征在 RAIR 中的应用带来了一定的困难.为了解决这一问题,下面提出一种加权距离像特征的联合幅度归一化及平移匹配的快速算法.

3.2 加权距离像特征的联合幅度归一化及平移匹配的快速算法

设由第 i 类目标的第 k 帧距离像得到的归一化方位模板加权特征向量为 $\bar{v}_{ik} = v_{ik} / \sqrt{v_{ik}^T v_{ik}}$, 测试样本 x 与帧距离像 $\{x_{kl} | l=1, 2, \dots, L\}$ 平移匹配时, x 在某一平移下的归一化加权特征向量为 \bar{x}_{ik} , 其中

$$\begin{aligned} \bar{x}_{ik} &= x \cdot w_{ik} \\ &= [x((1+n))_N \cdot w_{ik}(1), x((2+n))_N \cdot w_{ik}(2), \dots, \\ &\quad x((N+n))_N \cdot w_{ik}(N)]^T \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $x((n+))_N$ 表示 x 循环移位后的第 n 个分量, x 是 x 的循环移位向量. \bar{x}_{ik} 与 \bar{v}_{ik} 的平方欧氏距离为

$$\begin{aligned} d_{E,ik}^2 &= (\bar{x}_{ik} - \bar{v}_{ik})^T (\bar{x}_{ik} - \bar{v}_{ik}) \\ &= 2 - 2 \bar{x}_{ik}^T \bar{v}_{ik} = 2 - 2 (r_{ik}, v_{ik}) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, (r_{ik}, v_{ik}) 是 \bar{x}_{ik} 与 \bar{v}_{ik} 的互相关系数,

$$\begin{aligned} (r_{ik}, v_{ik}) &= \frac{\bar{x}_{ik}^T \bar{v}_{ik}}{\sqrt{\bar{x}_{ik}^T \bar{x}_{ik}} \sqrt{\bar{v}_{ik}^T \bar{v}_{ik}}} \\ &= \frac{[x((n+))_N \cdot w_{ik}(n)]^T [v_{ik}(n) \cdot w_{ik}(n)]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [x^2((n+))_N \cdot w_{ik}^2(n)]} \sqrt{\sum_{n=1}^N [v_{ik}^2(n) \cdot w_{ik}^2(n)]}} \\ &= \frac{x^T v_{ik}}{\sqrt{x^T x} \sqrt{v_{ik}^T v_{ik}}} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, x 和 w_{ik} 分别定义为测试样本 x 和权向量 w_{ik} 的平方向量,

$$x \triangleq x \cdot x = [x^2(1), x^2(2), \dots, x^2(N)]^T \quad (9)$$

$$w \triangleq w_{ik} \cdot w_{ik} = [w_{ik}^2(1), w_{ik}^2(2), \dots, w_{ik}^2(N)]^T \quad (10)$$

\bar{x}_{ik} 是 x 的循环移位. \bar{v}_{ik} 定义为归一化方位模板二次加权向量

$$\bar{v}_{ik} \triangleq \bar{v}_{ik} \cdot w_{ik}$$

$$= \left[\frac{v_{ik}(1) \cdot w_{ik}(1)}{v_{ik}^T v_{ik}}, \frac{v_{ik}(2) \cdot w_{ik}(2)}{v_{ik}^T v_{ik}}, \dots, \frac{v_{ik}(N) \cdot w_{ik}(N)}{v_{ik}^T v_{ik}} \right]^T \quad (11)$$

联合幅度归一化及平移匹配搜索的结果是

$$d_{E,ik} = \min\{d_{E,ik}\} = \sqrt{2 - 2 \max\{r_{ik}, v_{ik}\}} \quad (12)$$

注意到式(8)的分子、分母分别表示平移时的向量相关,因此,可以考虑用 FFT 直接计算其相关函数,从而降低运算量.式(8)分子、分母相应的相关函数分别为

$$r_{x, \bar{v}_{ik}} = x \cdot \bar{v}_{ik} = \text{IFFT}[\text{FFT}(x) \cdot \text{FFT}(\bar{v}_{ik})] = \text{IFFT}[X \cdot \bar{V}_{ik}] \quad (13)$$

$$r_{x, \bar{v}_{ik}} = x \cdot \bar{v}_{ik} = \text{IFFT}[\text{FFT}(x) \cdot \text{FFT}(w_{ik})] = \text{IFFT}[X \cdot W_{ik}] \quad (14)$$

式中 IFFT 和 FFT 分别表示快速逆傅立叶变换和快速傅立叶变换.则

$$\begin{aligned} \max_m (r_{ik}, v_{ik}) &= \max_m \left\{ \frac{r_{x, \bar{v}_{ik}}(m)}{\sqrt{r_{x, w_{ik}}(m)}} \right\} \\ &= \max_m \left\{ \frac{\text{IFFT}[\text{FFT}(x) \cdot \text{FFT}(\bar{v}_{ik})]}{\sqrt{\text{IFFT}[\text{FFT}(x) \cdot \text{FFT}(w_{ik})]}} \right\}, \end{aligned} \quad (15)$$

$m = 1, 2, \dots, N$

4 识别实验结果

4.1 外场实测实验数据介绍

识别实验选用 ISAR 实验雷达实测飞机数据.雷达和飞机的参数如表 1 所示,三类飞机的飞行轨迹在地平面上的投影如图 2 所示.训练数据和测试数据在不同的数据段内选取,其中,雅克-42 的第 2、5 段,安-26 的第 5、6 段,奖状的第 6、7 段数据作为训练数据,其他各段数据作为测试数据.训练数据段基本上包含了测试数据段内各种方位角的情况,但俯仰角有所不同.

表 1 ISAR 实验飞机和测试参数

雷达参数	中心频率		5520MHz
	脉冲重复频率		400Hz
	Dechip 后采样频率		10MHz
	信号带宽		400MHz
飞机类型	机长(m)	机宽(m)	机高(m)
雅克-42	36.38	34.88	9.83
安-26	23.80	29.20	9.83
奖状	14.40	15.90	

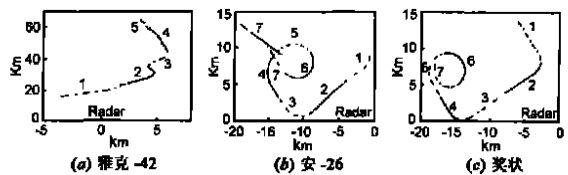


图 2 飞行轨迹在地平面的投影

4.2 识别性能比较

为了比较加权距离像特征和平均像特征的识别性能,这里选用了 MCC-TMM^[1-3]和 RBF 网络^[6]两种识别方法.表 2 具体给出了两种特征在两种识别方法下的混淆矩阵和识别率.从识别实验的结果来看,加权距离像特征分类器的识别率较平均像特征分类器有大幅度提高.其中,对安-26 飞机识别率的提高特别明显,这主要是因为加权距离像特征有效地抑制了不稳定的螺旋桨强子回波的影响.而且,径向基函数网络的识别率较 MCC-TMM 均有所提高,可见高级分类器对提高识别率是很有效的.

5 新的特征提取方法与 AGC 方法的比较

5.1 AGC 方法存在的问题

AGC 算法的主要步骤为^[7]:

表 2 平均像特征和加权距离像特征的认识率比较

分类器	MCC-TMM						RBF 分类器					
	平均像特征			加权距离像特征			平均像特征			加权距离像特征		
特征	雅克	奖状	安-26	雅克	奖状	安-26	雅克	奖状	安-26	雅克	奖状	安-26
真实目标												
识别结果												
雅克-42	325	4	59	361	0	6	305	2	41	390	0	11
奖状	11	311	172	1	354	15	0	295	87	0	381	19
安-26	64	85	169	38	46	379	95	103	272	10	19	370
识别率(%)	81.25	77.75	42.25	90.25	88.50	94.75	76.25	73.75	68.00	97.50	95.25	92.50
平均识别率(%)	67.08			91.17			72.67			95.08		

(1) 预处理:通过幂次变换将非高斯距离像数据变换为高斯数据;

(2) 生成模板:按帧距离像的目标类别、方位顺序存放相应的归一化平均像和归一化方差像, $\{\bar{\mu}_{ik}, \bar{c}_{ik} | i=1, 2, \dots, C, k=1, 2, \dots, K\}$ 其中 $\bar{\mu}_{ik} = \mu_{ik} / \mu_{ik}^2, \bar{c}_{ik} = c_{ik} / \mu_{ik}^2$;

(3) 识别阶段:设在幂次变换、幅度归一化和平移匹配后的测试距离像样本为 \bar{x} , 计算距离

$$d_{ik} = \ln |\bar{c}_{ik}| + (\bar{x} - \bar{\mu}_{ik})^T \bar{c}_{ik}^{-1} (\bar{x} - \bar{\mu}_{ik}), \quad i=1, 2, \dots, C, k=1, 2, \dots, K \quad (16)$$

式中 $\bar{c}_{ik} = \text{diag}(\bar{c}_{ik})$. 最后是联合方位匹配和类别判决, 若 $j = \arg \min_i (\min_k d_{ik}), i=1, 2, \dots, C; k=1, 2, \dots, K \quad (17)$

则测试距离像样本 x 属于目标 T_j .

AGC 方法不仅考虑了测试距离像与平均像模板的差异, 而且考虑了生成平均像模板数据的二阶统计量——方差, 从信息论的角度, AGC 比只使用平均像模板的识别方法利用了更多的统计信息, 因而识别性能会有所提高. 但 AGC 假设样本数据服从多元正态概率分布, 如果该模型失配或参数估计

有偏差, 就会影响其识别性能. 首先, 在雷达 HRRP 目标识别中, 由于帧内距离像样本数并不是很多, 平均像、方差像的估计都是小样本估计, 必然存在参数估计有偏差的问题. 其次, 如前所述, 由于 HRRP 具有幅度敏感性, 当测试样本和方位模板来自不同的测量时, 匹配前通常需要进行 2-范数幅度归一化. 在 AGC 方法中同样采用了 2-范数幅度归一化方法. AGC 方法隐含的条件是测试样本和模板服从相同的概率分布, 而 2-范数幅度归一化实际上是一种能量归一化方法. 考虑到前文所述的距离单元不同的起伏特性, 这种能量归一化方法可能会使测试样本偏离模板的概率分布模型, 导致失配. 图 3 (a) 是两个取自同一帧实测数据的 HRRP 样本, 其中除了一个距离单元回波起伏较大, 其他距离单元的回波强度基本相同. 图 3 (b) 是图 3 (a) 的 2-范数幅度归一化样本, 可以看到归一化前后距离像的幅度起伏是完全不同的. 正是这种幅度起伏的不同造成了方差分布的不同, 图 3 (c) 给出了用该帧所有距离像样本得到的 AGC 方法中使用的归一化方差像 (如 AGC 方法 (2) 定义) 及其 2-范数归一化样本的归一化方差像, 显然 2-范数幅度归一化会改变样本的方差分布. 因此, 2-范数幅度归一化后样本的概率分布模型和原先估计的概率分布模型是失配的. 图 3 (d) 是图 3 (a) 相应的归一化加权距离像特征, 由于加大了稳定距离单元的作用, 而减小了不稳定距离单元的影响, 图 3 (d) 较图 3 (a)、(b) 稳定. 和图 3 类似的例子是普遍存在的, 这说明在雷达 HRRP 目标识别中 AGC 方法存在模型失配问题.

与 AGC 相比, 本文提出的特征提取方法并没有考虑样本数据的概率分布模型, 而是根据散射点模型理论, 用方差像作为加权因子, 减小不稳定距离单元的影响. 因此, 本文提出的加权距离像特征和 AGC 的区别就在于对距离像幅度起伏特性的利用方式不同.

5.2 AGC 方法的识别实验结果

表 3 给出了 AGC 的识别结果, 和表 2 比较, 加权距离像特征的识别性能要明显优于 AGC. 比较基于加权距离像特征的 MCC-TMM 和 AGC 的识别结果, 前者有效地减小了 AGC 中对奖状和安-26 的误判. 而根据对实验数据的分析, 由于雅克-42 飞行航线变化不大, 其距离像是比较稳定的, 而安-26 和奖状距离像的幅度起伏都是比较剧烈的. 因此, 对奖状和安-26 误判的减小说明了加权距离像特征更好地利用了距离像的幅度

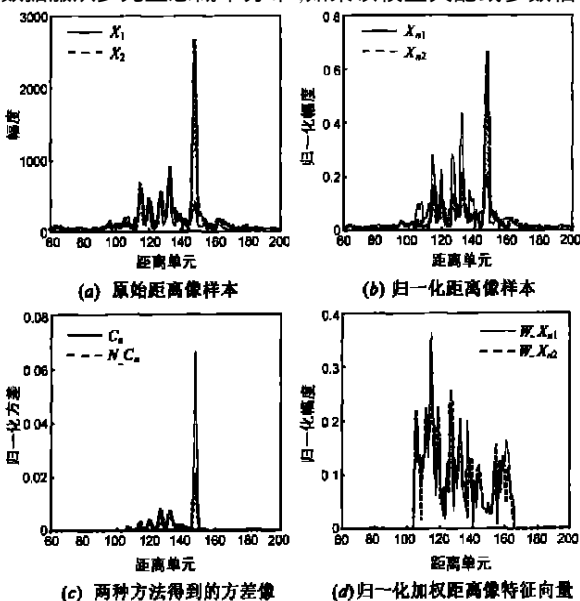


图 3 “雅克-42”飞机的某帧距离像举例

起伏特性.

表 3 ACC 的识别率

分类器 真实目标 识别结果	ACC		
	雅克-42	奖状	安-26
雅克-42	374	5	14
奖状	0	276	11
安-26	26	119	375
识别率(%)	93.50	69.00	93.75
平均识别率(%)	85.42		

6 结论

平均像反映了各距离单元内散射点的强度信息,方差像反映了各距离单元内散射点的分布情况.本文提出的加权距离像特征有效地融合了帧距离像的平均像和方差像信息,可以更好地描述目标散射特性.同时,本文给出的测试样本加权特征和方位模板加权特征的联合幅度归一化及平移匹配快速算法,使加权距离像特征可以方便地用于各种基于欧氏距离的识别器.基于外场实测数据的识别实验结果表明,新的特征提取方法可以大幅度地提高识别性能.

参考文献:

- [1] Li HJ, Yang S-H. Using range profiles as features vectors to identify aerospace objects[J]. IEEE Trans A P, 1993, 41(3): 261 - 268.
- [2] 廖学军. 基于高分辨距离像的雷达目标识别[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1999.
- [3] Xing M-D, Bao Z, Pei B. The properties of high-resolution range profiles[J]. Optical Engineering, 2002, 41(2): 493 - 504.
- [4] 裴炳南. 高分辨雷达自动目标识别方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2002.
- [5] 杜兰, 保铮, 邢孟道. 飞机目标的雷达一维距离像特性研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(增刊): 14 - 19.
- [6] 赵群. 基于高分辨一维距离像的雷达目标识别与检测[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1995.
- [7] Jacobs S P. Automatic target recognition using high resolution radar range profiles[D]. Washington: Washington University, 1999.
- [8] Marques de Sa J P. Pattern Recognition Concepts, Methods and Applications[M]. New York: Springer, 2001.

- [9] 边肇祺, 张学工. 模式识别(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [10] Steinberg B D. Microwave imaging with large antenna arrays: radio camera principle and technique[M]. New York: John Wiley and Sons, 1983.
- [11] 叶炜. 逆合成孔径雷达运动补偿与成像研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1996.

作者简介:



杜 兰 女, 1980 年 3 月出生于陕西省宝鸡市, 分别于 2001 年和 2004 年获西安电子科技大学电子工程专业和信号与信息处理专业学士和硕士学位. 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室在读博士研究生, 主要研究兴趣: 雷达目标识别、雷达成像(SAR/ISAR)和雷达信号处理理论. E-mail: dulan@mail.xidian.edu.cn.



刘宏伟 男, 1971 年 3 月出生于河南省孟津县, 副教授, 1992 年毕业于大连理工大学, 获学士学位, 分别于 1995 年和 1999 年获西安电子科技大学硕士和博士学位, 现就职于西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 研究方向: 雷达信号处理与检测、阵列信号处理、雷达目标识别.



保 铮 男, 1927 年 12 月出生于江苏省南通市, 教授, 博士生导师, 1953 年毕业于中国人民解放军通讯工程学院, 现为中国科学院院士、IEEE 高级会员、中国电子学会会士, 研究方向为雷达信号处理与检测.

张军英 女, 1961 年 11 月生于西安, 教授, 博士生导师, 1982 年毕业于西安理工大学自动控制专业, 获学士学位, 分别于 1985 年和 1998 年获西安电子科技大学计算机应用专业和信号与信息处理专业硕士和博士学位, 现为 IEEE 会员、中国电子学会高级会员, 研究方向: 雷达目标识别、智能信息处理、图像处理、计算生物信息学和分子成像、模式识别等.