

基于 Gabor 幅值特征和相位特征相融合的 ISAR 像目标识别

王芳* 盛卫星 马晓峰 王昊
(南京理工大学电光学院 南京 210094)

摘要: 该文提出一种基于 Gabor 小波变换幅值特征和相位特征相融合的 ISAR 像目标识别算法。首先将 ISAR 像进行 Gabor 多尺度分析, 对不同尺度、不同方向的 Gabor 幅值图像划分为若干矩形不重叠的子块, 分别计算每个子块的直方图分布, 将其联合起来作为 Gabor 的幅值特征; 然后结合象限二进制编码和局部异或算子提取 Gabor 相位信息的局部相位模式, 对得到的局部相位模式同样提取分块直方图特征; 再把提取的幅值特征和相位特征相融合作为 ISAR 像最终的 Gabor 特征; 最后在 χ^2 统计量作为不相似度量计算的特征空间里, 采用最近邻分类器完成 5 类目标的分类识别。通过使用 Greco 电磁软件仿真的 5 类目标的 ISAR 数据对该方法进行目标识别的验证, 并与目前已有的几种 Gabor 特征提取方法进行了对比, 结果表明, 该方法是可行且有效的, 能够明显地提高识别率。

关键词: 逆合成孔径雷达; 目标识别; Gabor 滤波器; 特征融合

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-1813-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01500

ISAR Image Recognition with Fusion of Gabor Magnitude and Phase Feature

Wang Fang Sheng Wei-xing Ma Xiao-feng Wang Hao

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A new Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) target recognition method with the fusion of Gabor magnitude and phase feature is proposed. Firstly, the corresponding Gabor Magnitude Maps (GMMs) and Gabor phase information are obtained by convolving the ISAR image with multi-scale and multi-orientation Gabor filters. Secondly, each GMM is divided into several non-overlapping rectangular units, and the histogram of unit is computed and combined as the magnitude histogram feature. Thirdly, the local Gabor phase pattern is obtained by combining quadrant bit coding with local XOR pattern, and the block histogram feature is extracted from the local Gabor phase pattern. Then, the fusion of the Gabor magnitude and phase feature is used as the feature of ISAR image. Finally, five-type aircraft models are classified by using a nearest neighbor classifier with χ^2 as a dissimilarity measure in the computed feature space. The recognition method is tested on ISAR data simulated from Greco electromagnetic software. Compared with other recognition methods, the numerical results show that the proposed method is effective and has higher recognition performance.

Key words: ISAR; Target recognition; Gabor filter; Fusion of feature

1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)在国防事业中占有重要的地位, 它是一种全天时、全天候的远距离高分辨2维成像设备, 能够为目标识别提供丰富的目标结构信息。因此, 利用ISAR 2维像进行目标识别一直是国内外雷达目标识别领域的研究热点^[1,2]。ISAR像目标识别是在ISAR图像的范围提取出对目标识别有利的特征, 并据此进行目标的分类工作。其中的一个难点就是如何提取出完整、鲁棒而富有区分性的特征, 以提

高目标分类的准确程度。到目前为止, 针对ISAR像识别的特征提取提出了很多的算法^[3-5]。这些算法都是直接针对原图像在单一尺度上对目标特征的分析, 没有体现目标固有的多尺度特性。

在特征提取和识别的实验中, 人们发现从多尺度分析的角度进行特征提取可以更全面地刻画目标的本质特征。如果目标特征在原始尺度具有一定的可区分性, 对图像进行多尺度分析, 可以丰富目标特征, 有效提高目标的识别率。目前, 多尺度分析方法已经有了研究基础, 在图像的各种处理算法中取得了较好的效果^[6-8]。2维Gabor滤波器^[9]是一个由2维高斯函数衍生出的复数域正弦曲线函数, 相当于一组带通滤波器, 其中心频率、基频带宽和方向均

可调节。不同参数的Gabor滤波器组能够捕捉图像中对应于不同的空间位置、空间频率以及方向选择性等局部结构信息,这些特点使得其在SAR和ISAR像目标识别领域也得到了初步的应用。文献[10]首次将Gabor小波变换用于SAR目标特征提取,对Gabor滤波后不同尺度和方向的幅值图像进行分块,提取每个分块的统计特征进行目标识别;文献[11]对Gabor多尺度分析后的幅值图像,用主成分分析方法降维后,再用独立分量分析技术从降维后的数据中提取更有鉴别力的特征向量;文献[12]则采用核Fisher鉴别分析的方法对Gabor多尺度分析后的幅值图像进行降维,提取SAR图像的有效特征;文献[13]用多尺度局部二值模式提取Gabor幅值图像的直方图作为ISAR图像的特征。上述的基于Gabor特征的SAR, ISAR识别算法和目前的大部分基于Gabor特征的其他领域的识别算^[6-8]都只应用了Gabor的幅值信息,而没有应用相位信息。然而Gabor的相位信息中也含有丰富的可以用于分类识别的特征信息。近几年,研究者才逐渐关注Gabor的相位特征信息,并在掌纹识别^[14]、步态识别^[15]、人脸识别^[16,17]等领域初步应用。在上述的Gabor特征提取的研究基础上,本文从融合的角度去研究ISAR像的Gabor特征,将Gabor的相位特征用于ISAR像识别,并与Gabor的幅值特征相融合,提出了一种基于Gabor幅值特征和相位特征相融合的ISAR像目标识别算法。该方法首先采用Gabor小波变换对ISAR像进行多尺度分析;然后对得到的Gabor幅值图像划分为若干矩形不重叠的子块,分别对每个子块计算其直方图分布,将所有分块的直方图分布联合起来作为Gabor的幅值特征;再采用局部Gabor相位模式和分块直方图的方法提取Gabor的相位特征;最后,将Gabor的幅值特征和相位特征采用串联的方式相融合,作为最终的ISAR像Gabor特征,通过最近邻分类器对目标完成分类识别。Gabor幅值特征和相位特征的融合,能系统完整地描述Gabor特征,提高识别结果;同时,Gabor小波变换能够提取图像的局部特征,而直方图能够有效描述图像的全局特征,二者结合能够实现互补,可以多层次、多分辨率地表征ISAR像局部特征以及局部邻域内的特征。

2 局部 Gabor 相位模式

2.1 2 维 Gabor 小波变换

2 维 Gabor 小波变换具有良好的时频局部化特

性和多分辨率特性,可以分析各个尺度和方向上图像的灰度变化。2 维 Gabor 小波的核函数定义为^[9]

$$\psi_{u,v}(z) = \frac{\|\mathbf{k}_{u,v}\|^2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{k}_{u,v}\|^2 \|\sigma^2\|}{2\sigma^2}\right) \cdot \left[\exp(i\mathbf{k}_{u,v}z) - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2}\right)\right] \quad (1)$$

其中 v 是频率等级参数(或尺度参数),定义滤波核的频率等级(或称为尺度); u 是方向参数,定义滤波核的方向; $z = (x, y)$ 代表图像中的一个像素点; $\|\cdot\|$ 表示欧式范数。在 2 维 Gabor 小波核的定义中,因子 $\|\mathbf{k}_{u,v}\|^2 / \sigma^2$ 的作用是将频率响应的最大值归一化; $\exp(-\|\mathbf{k}_{u,v}\|^2 \|\sigma^2\| / (2\sigma^2))$ 用来约束平面波的高斯包络函数; $\exp(i\mathbf{k}_{u,v}z)$ 为复数值平面波;为了消除图像直流成分对 2 维 Gabor 小波变换的影响,在复数值平面波的实部减去 $\exp(-\sigma^2 / 2)$ 。 $\mathbf{k}_{u,v}$ 为滤波器的中心频率,描述了 Gabor 滤波对不同尺度和不同方向

的响应,定义为: $\mathbf{k}_{u,v} = \begin{bmatrix} k_v \cos \phi_u \\ k_v \sin \phi_u \end{bmatrix}$, $k_v = \frac{k_{\max}}{f^v}$ 为滤波器的采样频率, k_{\max} 为最大采样频率,而 f 则为限制频域中核函数距离的间隔因子, ϕ_u 体现了滤波器的方向选择性。通过选取一系列的 $\mathbf{k}_{u,v}$, 就得到了一组 Gabor 滤波器。

图像 $I(x, y)$ 的 Gabor 滤波可以通过图像 I 与 Gabor 函数的卷积获得,给定图像中的一点 $z_0 = (x_0, y_0)$, Gabor 小波变换描述了点 z_0 附近区域的图像特征,其卷积过程如下:

$$\mathbf{G}_{u,v}(z_0) = I(z_0) * \psi_{u,v}(z_0) \quad (2)$$

式中 $*$ 表示卷积运算。参数 k_v , ϕ_u 和 σ 分别反映了滤波器纹理的波长、方向和高斯窗口的大小。选取一系列不同的 Gabor 尺度参数和方向参数,通过式(2)就可以得到不同尺度和方向的 ISAR 像 Gabor 表示。

2.2 局部 Gabor 相位模式

局部 Gabor 相位模式(Local Gabor Phase Pattern, LGPP)是根据 Gabor 滤波系数的实部和虚部信息,对每个像素点进行象限二进制编码后,将局部异或算子(Local XOR Pattern, LXP)用于 Gabor 相位信息,描述 Gabor 的局部相位模式。

2.2.1 象限二进制编码 (Quadrant Bit Coding, QBC) 2 维 Gabor 滤波后,得到的滤波系数是复数,利用滤波系数的实部和虚部信息,对 Gabor 滤波后的每个像素点进行二进制编码^[16]:

$$P_{u,v}^{\text{Re}}(z) = \begin{cases} 0, & \text{Re}(\mathbf{G}_{u,v}(z)) > 0 \\ 1, & \text{Re}(\mathbf{G}_{u,v}(z)) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{u,v}^{Im}(z) = \begin{cases} 0, & \text{Im}(\mathbf{G}_{u,v}(z)) > 0 \\ 1, & \text{Im}(\mathbf{G}_{u,v}(z)) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\text{Re}(\mathbf{G}_{u,v}(z))$, $\text{Im}(\mathbf{G}_{u,v}(z))$ 分别为 Gabor 滤波系数的实部和虚部。

式(3)和式(4)又可以表示为

$$P_{u,v}^{Re}(z) = \begin{cases} 0, & \theta_{u,v}(z) \in \{\text{I, IV}\} \\ 1, & \theta_{u,v}(z) \in \{\text{II, III}\} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{u,v}^{Im}(z) = \begin{cases} 0, & \theta_{u,v}(z) \in \{\text{I, II}\} \\ 1, & \theta_{u,v}(z) \in \{\text{III, IV}\} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\theta_{u,v}(z)$ 为像素点 z 的相位角。从式(3), 式(4)或者式(5), 式(6)可以看出, QBC 实质上是根据 Gabor 相位角所在的象限对每一个像素点进行二进制编码。

上述的二进制编码仅对 Gabor 变换图像的实部和虚部进行了编码, 并未描述 Gabor 实部与虚部之间的关系以及变换图像像素点与近邻之间的关系。为此, 定义新的 QBC 为

$$P_{u,v}^{Atan}(z) = \begin{cases} 0, & \theta_{u,v}(z) \in \{\text{I, III}\} \\ 1, & \theta_{u,v}(z) \in \{\text{II, IV}\} \end{cases} \quad (7)$$

即

$$P_{u,v}^{Atan}(z) = P_{u,v}^{Re}(z) \text{XOR} P_{u,v}^{Im}(z) \quad (8)$$

2.2.2 LXP 算子 LXP 定义为 3×3 的窗口, 将窗口内其它位置的二进制编码与窗口中心点的二进制编码做异或算法, 即窗口内其它位置的二进制编码与窗口中心点的二进制编码值相同为 0, 反之则为 1。 3×3 窗口经过 LXP 运算, 按一定的次序排列后形成一个 8 位的二进制数, 然后根据像素不同位置进行加权求和, 得到该中心像素点位置的 LXP, 范围在 0~255 之间^[16]。某一像素点与其 8 邻域的 LXP 操作过程如图 1 所示。

2.2.3 局部 Gabor 相位模式 LGPP 用于描述像素点 z_0 与其邻域像素点局部相位的变化。对于每一个方向 u 和频率 v , 定义像素点 z_0 的局部 Gabor 相位模式为^[17]

$$\text{LGPP}_{u,v}^{Atan}(z_0) = \left[P_{u,v}^{Atan}(z_0) \text{XOR} P_{u,v}^{Atan}(z_1), P_{u,v}^{Atan}(z_0) \text{XOR} P_{u,v}^{Atan}(z_2), \dots, P_{u,v}^{Atan}(z_0) \text{XOR} P_{u,v}^{Atan}(z_8) \right] \quad (9)$$

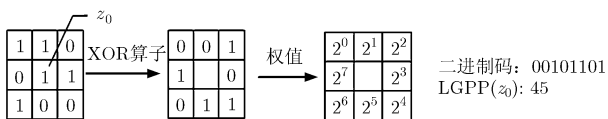


图1 LXP算子

其中 $z_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 为像素点 z_0 的 8 邻域。像素点的局部 Gabor 相位模式可以表示出该像素点与其邻域是否在同一象限。

2.2.4 LGPP 的分块直方图 直方图包含了局部微观结构的分布信息, 然而, 直接对图像计算直方图会丢失很多结构上的细节, 将图像划分为若干矩形不重叠且大小相等的子块, 分别对每个子块计算其直方图分布, 然后将其联合起来完成对 LGPP 的描述。与直接对整个图像计算直方图分布相比, 分块直方图包含了更多邻域内的信息, 能够兼顾局部的细微变化和整体的变化。

将 Gabor 每一个尺度 u 和方向 v 下的图像 $T_{u,v}(z)$ 划分为 $p \times q$ 个矩形子块, 每个矩形子块可以表示为: $R_{u,v,r}(z) (r \in (0, \dots, p \times q - 1))$, 其对应的直方图定义为

$$h_{u,v,r,i} = \sum_z \mathbf{I}(R_{u,v,r}(z) = i), \quad i = 0, 1, \dots, 255 \quad (10)$$

其中 $\mathbf{I}(A) = \begin{cases} 1, & A \text{为真} \\ 0, & A \text{为假} \end{cases}$ 。每个直方图条柱代表相应

编码在子块中出现的次数, 每个子块对应的直方图有 256 个条柱。

3 基于 Gabor 幅值特征和相位特征相融合的 ISAR 像目标识别

基于 Gabor 幅值特征和相位特征相融合的 ISAR 像目标识别分为 3 个步骤: 图像预处理、特征提取、分类识别。针对 ISAR 像数据的特点, 具体的实现过程包括: (1) 对 ISAR 像进行预处理, 获得清晰且稳定的 ISAR 像; (2) 对预处理的 ISAR 像进行 Gabor 小波变换, 进行多尺度分析; (3) 提取 Gabor 的幅值特征; (4) 提取 Gabor 的相位特征; (5) 将 Gabor 的幅值特征和相位特征相融合; (6) 采用不相似度测量法对融合特征进行度量, 完成分类识别。其流程如图 2 所示。

3.1 图像预处理

ISAR 像通常表现为随视角变化的稀疏散射中心分布, 这影响了 ISAR 像特征提取和目标识别的性能。本文采用文献[18]的 ISAR 像预处理方法: (1)

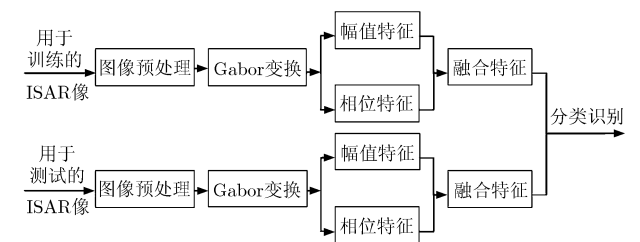


图2 ISAR 像目标识别流程图

图像分割; (2)能量归一化; (3)以图像中目标为中心切割出新的目标区域, 尺寸大小为 128×128 像素, 获得清晰且稳定的 ISAR 像。

3.2 基于 Gabor 幅值特征与相位特征相融合的特征提取

基于 Gabor 幅值特征和相位特征相融合的特征提取方法采用了 Gabor 小波变换, LXP 算子, 分块直方图等不同的特征提取过程, 充分利用了不同尺度和方向下 Gabor 幅值多区域直方图序列和 Gabor 相位的 LXP 算子的多区域直方图序列来描述 ISAR 像, 具体算法实现如下:

(1)对 ISAR 像进行 Gabor 小波变换, 设 Gabor 的尺度参数为 S , 方向参数为 K , 从而得到 $S \times K$ 个 Gabor 小波, 分别与 ISAR 像做卷积, 得到 $S \times K$ 个 Gabor 变换的系数;

(2)将每个尺度和方向下的 Gabor 幅值图像划分为若干矩形不重叠的子块, 子块数记为 $p_1 \times q_1$, 分别对每个子块计算其直方图分布, 将其联合起来作为该尺度和方向下幅值图像的特征;

(3)对每个尺度和方向下的 Gabor 滤波系数的实部和虚部图像的每个像素点进行象限二进制编码, 获得 QBC;

(4)采用 LXP 算子描述 QBC 的特征, 获得 LGPP;

(5)对 LGPP 进行图像分块划分, 子块数记为 $p_2 \times q_2$, 分别对每个子块计算其直方图分布, 将其联合起来作为该尺度和方向下 LGPP 图像的特征;

(6)将相同尺度和方向下的 Gabor 幅值分块直方图特征和相位分块直方图特征串联, 进行融合作为该尺度和方向下的 Gabor 特征;

(7)将 S 个尺度和 K 方向下的 Gabor 特征串接作为最终的 ISAR 像特征。

图3给出了目标 F14 在参数 $S = K = 2$, $p_1 = q_1 = p_2 = q_2 = 2$ 时的特征提取过程。

3.3 分类识别

提取 ISAR 像的融合特征后, 本文选用最近邻分类器对特征进行分类, 采用不相似度测量法对直方图进行度量。对于具有 c 个类别, 每个类别有 N_i 个样本的模式识别问题, $i = 1, 2, \dots, c$, 最近邻法就是对未知样本 x , 比较样本 x 与 $N = \sum_{i=1}^c N_i$ 个已知类别的样本之间的距离, 并决策 x 与离它最近的样本同类。则识别率 = 正确归类的测试样本个数 / 总的测试样本个数 $\times 100\%$ 。

在直方图相交, Log 统计量, χ^2 统计量 3 种常见的直方图不相似度测量法中, 本文选用 χ^2 统计量法, 其定义如下:

$$\chi^2(W, M) = \sum_i \frac{(W_i - M_i)^2}{W_i + M_i} \quad (11)$$

其中 W 和 M 分别为两个比较的 ISAR 像的直方图特征。

4 实验结果与分析

4.1 GRECO 成像结果验证

图形电磁算法 (GRephic Electromagnetic COmputing, GRECO) 是一种计算电大尺寸复杂目标高频雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS) 的有效方法。它基于物理光学和物理绕射理论, 将电磁计算和计算机图形技术相结合, 实现了目标 RCS 的快速计算, 为雷达成像、雷达目标识别的研究提

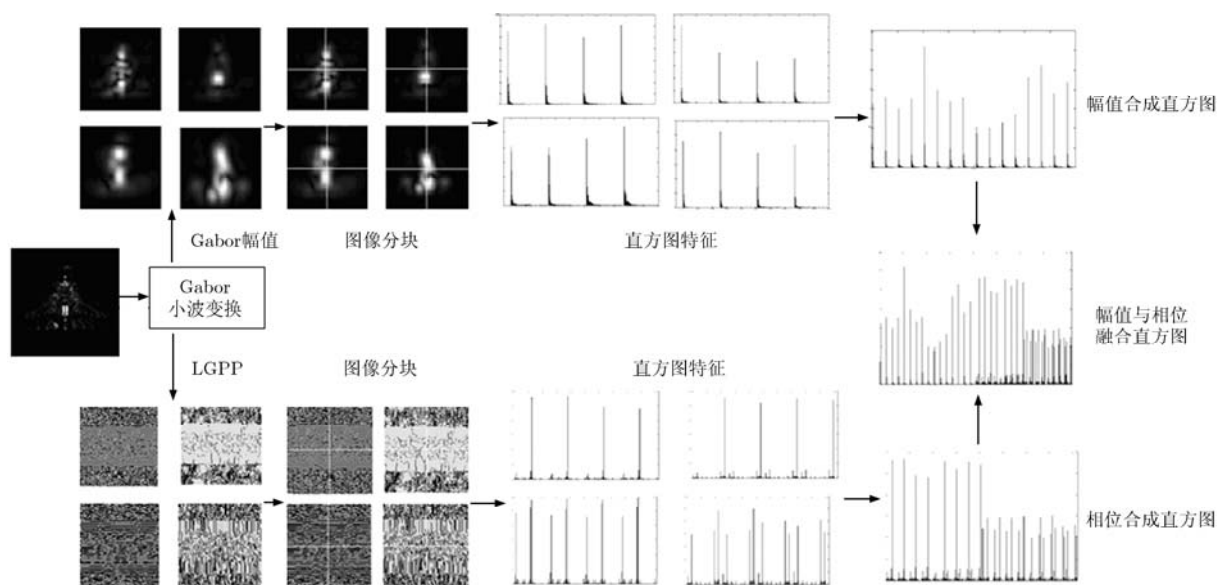


图3 特征提取流程图

供了有效的仿真数据。

实验采用 3 个球对 GRECO 方法得到的数据进行成像验证。在该实验中 3 个球的直径均为 10 cm, 位置分别为 $(x_1, z_1) = (-15, -10)$, $(x_2, z_2) = (0, -10)$, $(x_3, z_3) = (15, 10)$ 。3 个球的俯视图如图 4(a)所示。仿真实验中, 雷达中心频率为 10 GHz, 带宽为 2 GHz, 采用了水平发射-水平接收的线极化方式, 距离分辨率为 7.5 cm, 方位分辨率为 5 cm。通过 GRECO 电磁仿真软件计算 3 个球在不同频点不同姿态下的 RCS 值, 采用基于 2 维 FFT 的 ISAR 成像算法, 其等高线图如图 4(b)所示。成像结果验证了 GRECO 方法作为数据源是可行的。

4.2 实验数据

通过 GRECO 电磁仿真软件计算 F14, F16, F117, HY2000, Jh7 五类飞机目标模型在不同频点不同姿态下的 RCS 值, 采用基于 2 维 FFT 的 ISAR 成像算法得到 5 类目标模型的 ISAR 像。仿真实验中, 雷达中心频率为 10 GHz, 带宽为 500 MHz, 采用了水平发射-水平接收的线极化方式。目标像的距离分辨率为 30 cm, 方位分辨率为 30 cm。所用的 5 类目标模型中, F14 机长 19 m, 机高 4.5 m, 翼展 17.9 m; F16 机长 14.6 m, 机高 4.3 m, 翼展 9 m; F117 机长 20 m, 机高 3.2 m, 翼展 14.8 m; Jh7 机长 28.4 m, 机高 6 m, 翼展 21 m; HY2000 机长 40 m, 机高 8.9 m, 翼展 29.6 m。目标仰角固定在 10° , 方位角度范为 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 。每种目标模型共有 318 幅 ISAR 像。原

始图像大小为 256×256 像素。目标 F14, F16, F117, HY2000, Jh7 在 -3° 方位的 ISAR 像如图 5 所示。对于每类目标, 选取 159 个训练样本, 其余作为测试样本。所有实验均在 CPU 为 Intel Xeon E3120, 主频 3.2 GHz, 内存为 20 GB 的 PC 机上用 Matlab 语言实现的。

4.3 结果分析

实验 1 图像分块对识别结果的影响。在提取 Gabor 幅值和相位的直方图特征时, 图像分块大小对识别率会有一定的影响。 $p_1 \times q_1$ ($p_2 \times q_2$) 越小, 区域子块尺寸越大; $p_1 \times q_1$ ($p_2 \times q_2$) 越大, 区域子块尺寸越小。图 6 是当 Gabor 参数 $S = 2$, $K = 3$ 时, 采用不同分块得到的实验结果。在此实验中, $p_1 = p_2 = p, q_1 = q_2 = q$ 。从结果可以看出, 不同的图像分块对识别结果的影响是不同的。从识别结果可以看出, 图像分块为 $p_1 = p_2 = 8, q_1 = q_2 = 2$ 的时候可以得到较高的识别率。由于较大的分块无法提取到合理而准确的局部特征; 而较小的分块对图像间的配准很敏感, 局部特征和整体特征的提取都会不准确。因此, 选取合适的图像分块能够提取到更合理、更有利于分类的鉴别特征。

实验 2 几种 Gabor 特征提取方法识别性能的比较。该实验给出了在不同的 Gabor 尺度参数和方向参数设置下, 本文算法与文献 [7], 文献 [10], 文献 [13] 和文献 [15] 4 种 Gabor 特征提取方法的识别结果

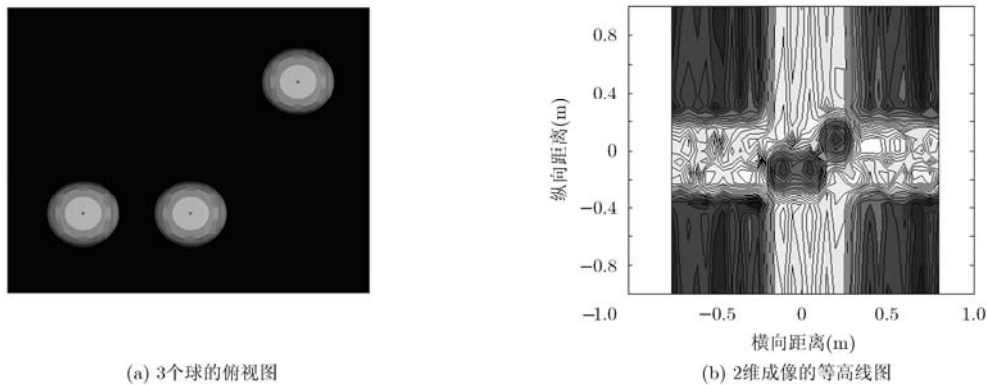


图4 3个球ISAR成像

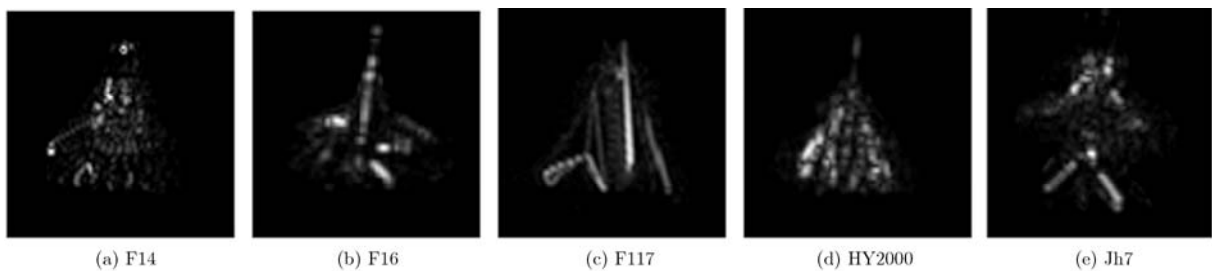


图5 5个目标的ISAR像

比较。实验中,本文算法图像分块参数 $p_1 = 2, q_1 = 1, p_2 = 2, q_2 = 2$; 文献[7]图像分块 $g_1 = 2, h_1 = 2$; 文献[10]图像分块参数 $g_2 = 8, h_2 = 4$; 文献[13]图像分块参数 $g_3 = 2, h_3 = 2$; 文献[15]图像分块参数 $g_4 = 8, h_4 = 4$ 。文献[7]是将Gabor的幅值特征融合,采用融合规则把相同尺度不同方向的特征融合;文献[10]对Gabor的幅值特征分块提取统计特征;文献[13]采用多尺度局部二值模式提取Gabor的幅值特征;文献[15]是利用Gabor的相位信息进行识别的方法。从识别结果可以看出,(1)将Gabor相位特征用于ISAR像识别是可行的,利用局部Gabor相位模式能够提取出ISAR像的有效特征。Gabor小波变换的幅值和相位对ISAR像识别都具有贡献;(2)将Gabor小波变换的幅值特征和相位特征相融合,与文献[7],文献[10]和文献[13]只提取Gabor的幅值特征,文献[15]只提取Gabor的相位特征相比,能提供更加完整的ISAR像Gabor特征描述,可以获得更好的识别结果;(3)将Gabor小波变换的幅值特征和相位特征相融合,将Gabor小波变换的局部特性和直方图的全局特性相结合,将Gabor实部的QBC与Gabor虚部的QBC相异或得到的新的QBC,都体现了融合的思想,比文献[7]只对Gabor的幅值特征进行融合,可以获得更好的识别结果,如图7所示。

实验 3 信噪比对识别结果的影响。在实验中,Gabor 参数选取 $S = 5, K = 8, p_1 = 2, q_1 = 4, p_2 = 2, q_2 = 2$ 在不同信噪比下平均 30 次的识别结果如表 1 所示。由实验结果可知,在信噪比大于 5 dB,5 种目标的平均正确识别率都在 70%以上,达到了较好的识别效果。

表 1 信噪比对识别结果的影响

信噪比(dB)	0	5	10	15	20
正确识别率(%)	69.82	73.18	75.50	78.17	80.23

5 结论

针对传统的 Gabor 特征只应用了 Gabor 的幅值信息,而忽略 Gabor 相位信息的问题,本文提出了一种基于 Gabor 幅值和相位特征相融合的 ISAR 像识别算法,采用分块直方图进行 Gabor 特征表征,运用最近邻进行目标分类,主要成果总结如下:(1)将 Gabor 相位信息用于 ISAR 像识别,并与 Gabor 幅值信息相融合共同表征 ISAR 像的 Gabor 特征,不论从 Gabor 特征表示的物理意义还是从 Gabor 特征表示的完整性上都得到了充分的展示;(2)将 Gabor 特征与分块直方图相结合。Gabor 特征局部纹理表征能力强,全局特征表征能力弱,而分块直方图既能有效地描述图像的全局特征,又能保留图像结构上的细节信息,将 Gabor 特征与分块直方图相结合,可以多层次、多分辨率地表征 ISAR 局部特征以及局部邻域内的特征;(3)由于采用了 Gabor 小波变换, LXP 算子,分块直方图等不同的特征提取过程,该方法在具有较高的鲁棒性的同时能获得较好的识别性能。

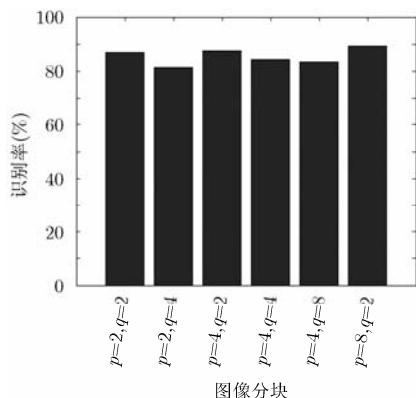


图 6 不同图像分块识别性能的比较

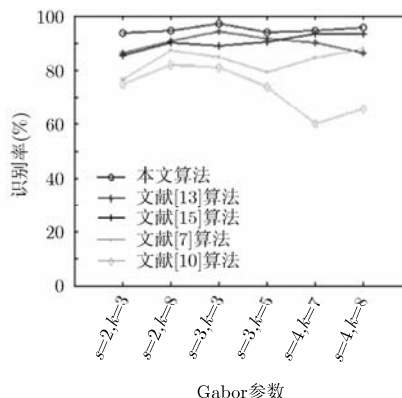


图 7 不同 Gabor 特征提取方法在不同 Gabor 参数下识别性能比较

参考文献

- [1] 杜琳琳, 安成锦, 陈曾平. 一种舰船 ISAR 图像中心线特征提取新方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1023-1028.
Du Lin-lin, An Cheng-jin, and Chen Zeng-ping. A new algorithm for ship center line extraction in ISAR image[J].

Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1023-1028.

- [2] 唐宁, 高勋章, 黎湘. 基于几何散列法的 ISAR 像自动目标识别[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(4): 692-697.

Tang Ning, Gao Xun-zhang, and Li Xiang. Automatic target

- recognition of ISAR images based on gemetric hash[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(4): 692-697.
- [3] Lin Bo, Yan Feng-xia, and Zhu Ju-bo. Feature extraction of 2D radar profile via double-sides 2DPCA for target recognition[C]. 2nd International Congress on Image and Signal Processing, Tianjin, 2009: 1-5.
- [4] 季战领, 冯晓毅, 阎昆. 一种 ISAR 图像中飞机目标识别的新特征[J]. 计算机工程, 2010, 36(23): 192-193,196.
Ji Zhan-ling, Feng Xiao-yi, and Yan Kun. New feature of plane target recognition in ISAR image[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(23): 192-193,196.
- [5] 何强, 蔡洪, 韩壮志, 等. 基于非线性流行学习的 ISAR 目标识别研究[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 585-590.
He Qiang, Cai Hong, Han Zhuang-zhi, et al. ISAR target recognition based on non-linear manifold learning[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(3): 585-590.
- [6] 李见为, 樊超, 王玮. 监督局部线性嵌入在人脸识别中的应用[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(2): 92-97.
Li Jian-wei, Fan Chao, and Wang Wei. Application of Gabor wavelet and SLLE in face recognition[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(2): 92-97.
- [7] 刘帅师, 田彦涛, 万川. 基于 Gabor 多方向特征融合与分块直方图的人脸表情识别方法[J]. 自动化学报, 2011, 37(12): 1455-1463.
Liu Shuai-shi, Tian Yan-tao, and Wan Chuan. Facial expression recognition method based on Gabor multi-orientation feature fusion and block histogram[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(12): 1455-1463.
- [8] 苏滨, 姜威. 一种基于 Gabor 小波和 2DPCA 的掌纹识别改进算法[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(1): 242-245.
Su Bin and Jiang Wei. An improved palmprint recognition method using Gabor wavelets and 2DPCA[J]. *Computer Applications and Software*, 2011, 28(1): 242-245.
- [9] Lee T S. Image representation using 2D Gabor wavelets[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(10): 959-971.
- [10] 胡风明, 杨汝良, 范学花. 利用 Gabor 滤波分块特征对 SAR 目标识别[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(23): 122-125.
Hu Feng-ming, Yang Ru-liang, and Fan Xue-hua. SAR target recognition using filter and sub-block feature[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(23): 122-125.
- [11] 胡风明, 王满玉, 范学花. 基于 Gabor 滤波器和 ICA 技术的 SAR 目标识别算法[J]. 现代雷达, 2011, 33(6): 32-36.
Hu Feng-ming, Wang Man-yu, and Fan Xue-hua. A method of SAR target recognition based on Gabor filter and ICA[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(6): 32-36.
- [12] 刘爱平, 付琨, 张利利, 等. 基于多尺度特征的高分辨率 SAR 图像机动目标识别[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(6): 1161-1166.
Liu Ai-ping, Fu Kun, Zhang Li-li, et al. Maneuvering target recognition of high resolution SAR images based on multi-scale feature[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(6): 1161-1166.
- [13] 王芳, 盛卫星, 马晓峰, 等. 基于直方图统计量的逆合成孔径雷达目标识别[J]. 电波科学学报, 2012, 27(4): 726-732.
Wang Fang, Sheng Wei-xing, Ma Xiao-feng, et al. Target classification for ISAR image based on histogram statistics[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(4): 726-732.
- [14] Zhang D, Kong W K, You J, et al. Online palmprint identification[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(9): 1041-1050.
- [15] 杨晓超, 周越, 署光, 等. 基于 Gabor 相位谱和流形学习的步态识别方法[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 753-757.
Yang Xiao-chao, Zhou Yue, Shu Guang, et al. Manifold learning based gait recognition using Gabor phase spectrum[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(4): 753-757.
- [16] Zhang Bao-chang, Shan Shi-guang, Chen Xi-lin, et al. Histogram of Gabor Phase Patterns (HGPP): a novel object representation approach for face recognition[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 57-68.
- [17] 江艳霞, 任波. 基于局部 Gabor 相位特征融合的人脸识别[J]. 光电工程, 2010, 37(7): 139-144.
Jiang Yan-xia and Ren Bo. Face recognition based on local Gabor phase characteristic fusion[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7): 139-144.
- [18] Kim Kyung-tae, Seo Dong-kyu, and Kim Hyo-tae. Efficient classification of ISAR images[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(5): 1611-1621.
- 王芳: 女, 1978年生, 博士生, 研究方向为雷达目标识别。
盛卫星: 男, 1961年生, 教授, 研究方向为雷达目标电磁散射特性建模及应用、阵列天线、微波成像等。
马晓峰: 男, 1981年生, 讲师, 研究方向为阵列信号处理、MIMO 以及软件无线电等。
王昊: 男, 1980年生, 副研究员, 研究方向为微带天线、电路及相应的电磁场数值方法。