

# 基于二维小波变换的激光成像雷达目标识别算法

陈晓清 马君国 赵宏钟 付强

(国防科技大学自动目标识别实验室, 湖南长沙 410073)

**摘要** 提出了基于二维小波变换的激光成像雷达目标识别算法,首先对激光成像雷达目标的距离像进行二维小波变换;然后从近似分量和细节分量中提取奇异值特征,利用遗传算法对支持向量机参数进行智能优化;最后应用支持向量机对三种地面目标进行识别。仿真实验表明,该方法与直接应用距离像奇异值特征进行识别的方法相比,在高载噪比 20 dB 时的平均识别率提高了 3.2%,在低载噪比 10 dB 时的平均识别率提高了 6.5%,取得了比较好的识别效果。

**关键词** 图像处理;目标识别;二维小波变换;奇异值

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.041001

## Target Recognition Algorithm Based on Two-Dimensional Wavelet Transform for Laser Imaging Radar

Chen Xiaoping Ma Junguo Zhao Hongzhong Fu Qiang

(Automatic Target Recognition Laboratory, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Target recognition algorithm based on two-dimensional (2D) wavelet transform for laser imaging radar is put forward. Firstly 2D wavelet transform of range image of laser imaging radar targets is made; then singular value feature is extracted from approximate part and detail part, gene algorithm is used to optimize parameters of support vector machine (SVM) intelligently; at last, SVM is used to recognize three kinds of ground targets. Simulation experiment shows that, compared with the method which directly uses singular value feature of range image to recognize targets, the average recognition rate is raised by 3.2% at high carrier-noise ratio (CNR) of 20 dB and average recognition rate is raised by 6.5% at low CNR of 10 dB in this method, and good recognition is gained.

**Key words** image processing; target recognition; two-dimensional wavelet transform; singular value

**OCIS codes** 100.6890; 100.4994; 100.5010

## 1 引言

现代战争复杂战场环境对精确制导武器提出了越来越高的要求,激光成像雷达以其特有的优势逐渐成为一种很有发展潜力的新型制导雷达。激光成像雷达可以同时获得强度像和距离像,通过对目标进行四维成像大大提高了目标的信息量。强度像和距离像与目标表面的物理结构特性密切相关,反映了目标的本质特征,可以用来对目标进行分类识别。Youmans 等<sup>[1]</sup>对由距离像和强度像构成的三维矩阵图像进行了三维傅里叶变换,然后利用常规的两维模板相关技术进行目标识别。Koksal 等<sup>[2]</sup>提出了一种基于统计模型的激光成像雷达目标识别方法,应用边缘跟踪提取目标距离像的轮廓边缘作为特征,然后建立特征的统计模型,通过与目标模型库作匹配实现对军用车目标的识别。孙剑峰等<sup>[3]</sup>提出利用最大平均相关高度(MACH)

**收稿日期**: 2010-08-20; **收到修改稿日期**: 2010-11-13

**基金项目**: 复杂背景下地面目标探测与识别资助课题。

**作者简介**: 陈晓清(1980—),女,博士研究生,工程师,主要从事激光雷达图像处理与目标识别等方面的研究。

E-mail: chenxiaoping831@163.com

**导师简介**: 付强(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事雷达精确制导、目标识别与信号处理等方面的研究。

E-mail: fuqiang@sina.com

滤波器对激光成像雷达仿真距离像进行高斯噪声抑制,利用距离分类相关滤波器(DCCF)对未知目标进行分类识别。虽然国内外学者对激光成像雷达自动目标识别进行了一些研究,但当载噪比很低时,有效地对目标进行识别仍需重点研究。

## 2 二维小波变换

假设激光成像雷达目标的距离像为二维离散信号 $[C_{m,n}]_{L_1 \times L_2}$ ,则二维小波变换分解算法为<sup>[4]</sup>

$$C_{j+1}(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} h(k-2m)h(l-2n)C_j(k,l), \quad (1)$$

$$D_{j+1}^1(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} h(k-2m)g(l-2n)C_j(k,l), \quad (2)$$

$$D_{j+1}^2(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} g(k-2m)h(l-2n)C_j(k,l), \quad (3)$$

$$D_{j+1}^3(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} g(k-2m)g(l-2n)C_j(k,l), \quad (4)$$

式中 $h, g$ 为与小波函数相对应的滤波器系数。由于 $h$ 具有低通特性, $g$ 具有高通特性,二维小波分解变换把尺度 $j$ 上的近似(低频)部分 $C_j(m,n)$ 分解为4部分:尺度 $j+1$ 上的近似(低频)部分 $C_{j+1}(m,n)$ 、水平方向细节(高频)部分 $D_{j+1}^1(m,n)$ 、垂直方向细节(高频)部分 $D_{j+1}^2(m,n)$ 和对角方向细节(高频)部分 $D_{j+1}^3(m,n)$ 。经过一次二维小波分解变换,可以将距离像分解为 $\frac{L_1}{2} \times \frac{L_2}{2}$ 的4个部分,虽然总的的数据量没有改变,但是按照频率信息的不同对激光成像雷达目标的距离像进行了处理,更有利于提取目标特征。

## 3 提取奇异值特征

若矩阵 $\mathbf{A} \in R^{m \times n}$ ,则存在正交矩阵 $\mathbf{U} \in R^{m \times m}, \mathbf{V} \in R^{n \times n}$ ,使得

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T. \quad (5)$$

(5)式称为 $\mathbf{A}$ 的奇异值分解(SVD),其中 $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}[\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p]$ , $p = \min(m, n)$ , $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p \geq 0, \sigma_i (i=1, 2, \dots, p)$ 称为矩阵 $\mathbf{A}$ 的奇异值。

奇异值具有稳定性,假设 $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in R^{m \times n}$ , $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ 的奇异值分别为 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p, \tau_1 \geq \tau_2 \geq \dots \geq \tau_p$ ,则 $|\sigma_i - \tau_i| \leq \|\mathbf{A} - \mathbf{B}\|_2$ 。这意味着当矩阵 $\mathbf{A}$ 有微小扰动时,奇异值的变化不大于扰动矩阵的2-范数。因此,通过对激光成像雷达目标距离像进行二维小波分解获得近似部分和细节部分,分别提取其奇异值特征,该特征具有稳定性,可以有效地抑制噪声。

## 4 应用支持向量机进行分类识别

Vapnik<sup>[5]</sup>在统计学习理论的基础上提出了支持向量机(SVM)理论,非常适合于小样本、高维、非线性分类问题。SVM分类方法基于Mercer核展开定理,通过非线性映射,把特征由原空间映射到一个高维空间,使得可以在高维特征空间中应用线性学习机的方法解决原特征空间中的高度非线性分类问题。支持向量机分类方法通过原样本空间或者映射后的高维样本空间中构造最优分类超平面,使得两类目标与超平面之间的距离最大。当样本线性可分时,样本集中所有向量 $\mathbf{x}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 满足 $y_i [(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b] \geq 1, y_i = \{-1, +1\}$ ,表示两个目标类别。最优分类超平面示意图如图1所示,两类目标与超平面之间的距离为 $2/\|\mathbf{w}\|$ ,样本 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4$ 为支持向量。

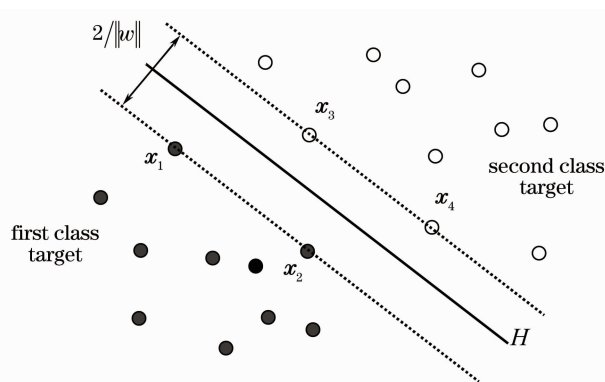


图1 最优分类超平面示意图

Fig. 1 Diagram of optimal separating hyperplane

当样本非线性可分时,由于向高维样本空间映射后部分样本会错分,引入一个松弛项  $\xi_i \geq 0$ ,构造最优超平面的约束优化问题为

$$\min_{w,b} \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \right\}, \quad (6)$$

$$s. t. y_i (\omega \cdot \Phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中  $C$  为惩罚因子,用于控制错分样本惩罚程度。利用拉格朗日乘子法把上面两式转化为对偶形式:

$$\max_a \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j [\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)] \right\}, \quad (8)$$

$$s. t. \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0, \quad 0 \leq \alpha_i \leq C, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

根据泛函的有关理论,只要一个核函数满足 Mercer 条件,映射后的点积运算可以用核函数  $K(x_i, x_j)$  来代替。则最优分类判别函数为

$$f(x) = \text{sign} \left\{ \sum_{i=1}^m y_i \alpha_i^* K(x \cdot x_i) + b^* \right\}, \quad (10)$$

式中  $b^* = y_i - \omega \cdot x_i$ ,  $\omega = \sum_{j=1}^m y_j \alpha_j^* x_j$ ,  $x_i$  为支持向量,  $m$  为支持向量数目。

不同的核函数形成不同的算法,本文采用径向基核函数  $K(x, x_i) = \exp(-\gamma |x - x_i|^2)$ ,支持向量机参数包括核函数参数  $\gamma$  和惩罚因子  $C$ 。由于不同的支持向量机参数对识别结果会有很大的影响,可以利用遗传算法对支持向量机参数进行智能优化<sup>[6]</sup>。

## 5 实验结果

由于受客观条件限制,目前还不能获得目标的激光成像雷达距离像。通过计算机仿真得到三种地面目标(坦克 T80, C97, M3)的激光成像雷达距离像,俯仰角为  $30^\circ$ ,方位角为  $1^\circ \sim 180^\circ$ ,分辨率为  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ ,每个距离像的方位角间隔为  $1^\circ$ ,每种目标的距离像为 180 个,将奇数序号的距离像作为训练样本,偶数序号的距离像作为测试样本。图 2~4 分别给出了方位角为  $135^\circ$  时三种地面目标的激光成像雷达距离像,目标的载噪比(CNR)为 20 dB,地面 CNR 为 3 dB。虽然在训练过程目标的样本数目较少,但是采用支持向量机作为分类器,支持向量机非常适合于小样本、高维、非线性分类问题。



图 2 坦克 T80 的激光成像雷达距离像  
Fig. 2 Laser imaging radar range image of tank T80



图 3 坦克 C97 的激光成像雷达距离像  
Fig. 3 Laser imaging radar range image of tank C97

图 5 给出了不同载噪比下平均识别率与特征数目的关系,可见在各个载噪比下随着特征数目的增加,三种地面坦克目标的平均识别率总的趋势是逐渐提高的;当特征数目大于 88 时,三种地面坦克目标的平均识别率基本保持不变。因此选取特征数目为 88,即通过对激光成像雷达目标距离像进行二维小波分解,分别从 1 个近似部分和 3 个细节部分中提取 22 个奇异值特征。

将本文方法与直接提取激光成像雷达目标距离像的奇异值特征及应用支持向量机进行分类识别的方法进行比较,特征数目都取 88 个。表 1 给出了不同 CNR 下地面目标的平均识别率,从表 1 可以看出,基于二



图4 坦克 M3 的激光成像雷达距离像

Fig. 4 Laser imaging radar range image of tank M3

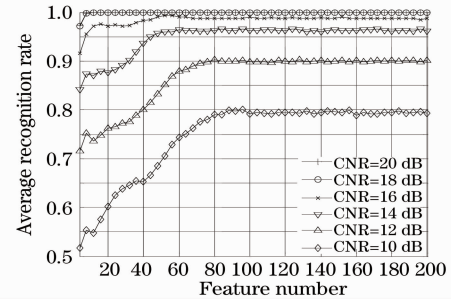


图5 平均识别率与特征数目的关系

Fig. 5 Relation between average recognition rate and feature number

维小波变换的激光成像雷达目标识别算法取得了比较好的识别效果。

表1 不同载噪比下地面目标的平均识别率

Table 1 Average recognition rate of ground targets at different CNR

CNR /dB	20	18	16	14	12	10
Method in this paper /%	100	100	98.7	96.2	90.0	79.9
Method of directly using singular value feature of range image to recognize targets /%	96.8	94.7	94.1	91.7	87.8	73.4

## 6 结 论

提出了基于二维小波变换的激光成像雷达目标识别算法,首先对激光成像雷达目标的距离像进行二维小波变换,然后从近似分量和细节分量中提取奇异值特征,最后应用支持向量机对三种地面坦克目标进行识别,仿真实验证明了该算法的有效性。虽然算法训练阶段需要很大的计算量,但是这项工作可以预先在高速计算机上完成。该算法取得了比较高的识别率,而且特征维数较少,识别时间很短,能够满足弹载实现的需求,具有一定的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Douglas G. Youmans, George A. Hart. Three-dimensional template correlations for direct-detection laser-radar target recognition [C]. <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA390244>, 1999
- 2 Asuman E. Koksul, Jeffrey H. Shapiro, William M. Wells. Model-based object recognition using laser radar range imagery [C]. *SPIE*, 1999, **3718**: 256~266
- 3 Jianfeng Sun, Wei Lu, Qi Li *et al.*. Correlation target recognition for laser radar [C]. *SPIE*, 2006, **6027**: 1~7
- 4 Zhang Xianda. Modern Signal Process [M]. Beijing: Tsinghua University Express, 1995  
张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1995
- 5 V. N. Vapnik. Essence of Statistic Learning Theory [M]. Zhang Xuegong Transl.. Beijing: Tsinghua University Express, 2000  
瓦普尼克. 统计学习理论的本质[M]. 张学工译. 北京:清华大学出版社,2000
- 6 Ma Junguo, Zhao Hongzhong, Wang Wei. Target recognition algorithm based on support vector machine of optimization parameters [C]. Pattern Recognition Conference of China, 2009, 40~44  
马君国, 赵宏钟, 王 微. 基于最优参数支持向量机的目标识别算法[C]. 全国模式识别学术会议,2009,40~44