

雷达脉内调制方式的自动识别

雍霄驹,张登福,王世强

(空军工程大学 工程学院,西安 710038)

(baroshi@126.com)

摘要:为解决雷达信号分选中雷达脉内调制方式的自动识别问题,用一种新的时频图像简化算法来提取特征向量,随后利用支持向量机对提取的特征向量进行分类识别。首先从图像中提取包含有效信息的像素点,然后求出每一列像素点的中心点,最后对所有中心点进行相同长度的采样直接将图像转化为曲线,大大减少了特征维数。仿真实验结果验证了该算法对雷达信号的脉内调制方式识别具有较高正确率,并有一定的抗噪性,且在较低信噪比条件下仍然保持较高的正确率。

关键词:脉内调制;支持向量机;特征提取;时频图像

中图分类号: TP39 **文献标志码:** A

Automatic recognition of radar pulse modulation

YONG Xiao-ju, ZHANG Deng-fu, WANG Shi-qiang

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China)

Abstract: In order to achieve the automatic recognition of the pulse modulation of radar, a new method to simplify the figure of the results of time-frequency analysis to extract features was proposed, and then Support Vector Machine (SVM) was used to sort them according to the features. Firstly, extracted the points with useful information; secondly, found the center of each column of useful points; lastly, sampled these centers at the same length, so the figures were transformed to curves with the same length, and the dimensions of the feature of SVMs had been sharply decreased. The simulation results show that the pulse modulation of radar can be recognized with a high accuracy by the algorithm of this paper. Additionally, this method can tolerate the noise, and the accuracy can be kept at a high level while the SNR (Signal-to-Noise Ratio) is low.

Key words: pulse modulation; Support Vector Machine (SVM); feature extraction; time-frequency figure

0 引言

信号分选是雷达对抗的重要组成部分^[1],掌握有效的雷达信号分选方法对打赢现代战争起着不可替代的作用。目前,电磁环境越来越复杂,传统的五参数分选方法已经无法满足现代战争的要求,进行新特征提取已经成为共识^[2]。而时频分析是提取新特征的重要方法。但是时频分析只是得到频率随时间变化的图像,无法自动识别雷达的调制类型。针对这个问题,前人已经进行了不少研究。但是大都是利用图像处理算法将时频图像当做灰度图像进行处理,并将处理后的图像作为特征向量,随后利用分类器进行分类识别。本文提出了更为简便的时频图像处理算法,在提取出特征向量的同时可以大大减少计算量。

1 时频分析图像的处理

1.1 高斯核函数时频分析

非固定核函数时频分布的核函数形状依赖于所分析的信号,根据信号自适应地变化。由模糊函数的性质可知,设计非固定核函数时,通常需要满足3个条件:

- 1)是低通的,以抑制时频分布中的交叉项和噪声;
- 2)是平滑函数,以减少时频分布中的振荡;
- 3)是一个易于优化的函数形式。

满足上述要求的函数可以用一个二维径向高斯核函数表

示^[3]。

$$\Phi(\theta, \tau) = e^{-(\theta^2 + \tau^2)/2\sigma^2(\Psi)} \quad (1)$$

通常情况下,用极坐标形式表达径向高斯核函数更为方便,令 $r = \sqrt{\theta^2 + \tau^2}$, 则:

$$\Phi(r, \Psi) = e^{-r^2/2\sigma^2(\Psi)} \quad (2)$$

既然二维径向高斯核函数完全被一维的扩展函数 $\sigma(\Psi)$ 参数化表达,那么就可以将二维函数的优化问题转化为一维函数的优化问题。因此对于一个给定的信号,求解最优径向高斯核函数就等同于求解最优扩展函数 $\sigma(\Psi)$,而求解最优扩展函数 $\sigma(\Psi)$ 的过程也就是求解下列优化问题。

目标函数:

$$\max_{\Psi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |A(r, \Psi) \Phi(r, \Psi)|^2 r dr d\Psi \quad (3)$$

约束:

$$1) \Phi(r, \Psi) = e^{-r^2/2\sigma^2(\Psi)} \quad (4)$$

$$2) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |\Phi(r, \Psi)|^2 r dr d\Psi \leq \alpha \quad (5)$$

其中: $\alpha > 0$, $A(r, \Psi)$ 为模糊函数在极坐标中的表示形式。式(4)限制了优化问题的范围为径向高斯核类,式(5)限制了最优核的体积。由于径向高斯核的特殊性,式(5)可以简化为:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma^2(\Psi) d\Psi \leq \alpha \quad (6)$$

模糊函数关于原点对称,所以有 $|A(r, \Psi)|^2 =$

收稿日期:2010-11-08;修回日期:2011-03-01。

作者简介:雍霄驹(1987-),男,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向:雷达信号分选;张登福(1968-),男,四川资阳人,教授,博士,主要研究方向:信号与信息处理;王世强(1982-),男,陕西渭南人,博士研究生,主要研究方向:雷达信号分选。

$|A(r, \Psi + \pi)|^2$, 并且 $\sigma(\Psi)$ 的积分范围为 $0 \leq \psi < \pi$ 。式(4)~(5)的作用是使自分量在模糊域中得以通过, 而互分量得到抑制^[4]。最优核为体积等于 α 的低通滤波器, 这是因为多分量信号的自分量分布在原点附近, 而互分量远离原点。由式(3)可以看出: 为了实现极大化优化准则, $A(r, \Psi)$ 大的地方, $\Phi(r, \Psi)$ 也要大。不管峰值对应的是自分量还是互分量, 式(5)相当于对那些向互分量延伸的核函数作一个惩罚, 因为这样会浪费宝贵的能量体积, 在这些地方, $2A(r, \Psi)\Phi(r, \Psi)$ 对极大化的贡献较少, 所以 $\Phi(r, \Psi)$ 尽可能作近的延伸, 保留模糊域中分布在原点的自分量, 抑制远离原点的互分量。通常情况下, 它的取值范围是 $1 \leq \alpha \leq 5$ 。如果 α 太小, 核函数会过度的模糊自分量, 影响它们的时频分辨率; 如果 α 太大, 互分量没有得到很好的抑制, 出现交叉项, 给特征提取带来干扰。

1.2 时频图像的简化

一般情况下时频分析的结果用时频图像去表示, 例如分析长度为 1024 的时间序列, 那么对这个序列进行时频分析得到的时频图就是一幅包含 1024×1024 个像素点的图像。如果直接对这幅图像进行分析, 十分复杂。所以本文提出了一种新的简化时频图像的方法。

时频分析的结果使用一个矩阵 P 表示:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \cdots & p_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

Matlab 绘制时频图像时一般是利用 Images 函数对时频分析的结果矩阵 P 进行绘制^[5]。它的原理是根据索引值将其转换成相对应的 RGB 值:

$$RGB(i, j) = f(p_{ij})$$

其中: i, j 为像素点的位置; p_{ij} 为 (i, j) 点处的索引值, 通过上式的函数将其转化为 RGB 值并根据每一像素点的 RGB 值绘制出最终的图像。

由于时频分析图像的有用像素点很少, 所以冗余量非常大, 可以根据矩阵 P 中每个像素点的数值 p_{ij} 判断无用点的位置, 并将无用的点忽略掉, 这样可以大大减少支持向量机的特征数量。基于这个思想, 本文提出的时频图像简化算法如下:

1) 计算矩阵 P 的所有元素的均值:

$$\mu = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij}$$

2) 提取数值与均值相差 80 倍的点, 即可以认为是包含频率信息的点;

3) 为提高频率分辨率, 并进一步减少特征维数, 计算每一时刻即每一列中有点数的行索引的均值, 将其作为该时刻的频率值, 这时得到一组行向量, 即为由时频图像简化的时频特征曲线;

4) 提取频率重复部分作为利用支持向量机分类的特征, 并对其进行相同长度的采样, 使每个样本的特征数目相等, 若没有重复部分, 如线性调频雷达, 则直接采样。

算法流程如图 1 所示。

2 支持向量机的分类算法

2.1 支持向量机简介^[6]

支持向量机是建立在统计学习理论基础之上的。统计学

理论指出学习机器的泛化能力不但与训练过程的经验风险有关, 而且与学习机器实际复杂性有关, 复杂性越高, 则经验风险越小但泛化能力变差, 并据此提出了综合考虑经验风险和学习机器复杂度的结构风险最小化 (Structural Risk Minimization, SRM) 归纳原则。与神经网络等传统学习机器所遵循的经验风险最小化原则 (Empirical Risk Minimization, ERM) 相比, SRM 原则具有更扎实的理论基础, 可以得到和训练样本相适应的具有良好泛化能力的学习机器。

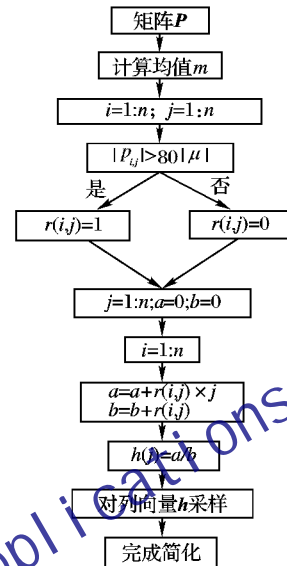


图1 时频图像简化算法流程

2.2 支持向量机 K 类分类算法^[7]

多值分类问题是目前支持向量机研究领域一个重要研究方向。其中 K 类支持向量机方法对分析类别较多的分类问题时具有一定优越性。

训练集 $T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$, 其中 $x_i \in \mathbf{R}^m$, $y_i \in \{1, 2, \dots, K\}$, $i = 1, \dots, n$, K 类支持向量机算法与一对多方法类似, 它也是构造 K 个支持向量机决策函数, 不同的是所有支持向量机的参数是通过求解下面所述的二次规划问题完成:

$$\begin{aligned} \min_{\omega, b, \varepsilon} & \sum_{m=1}^K \frac{1}{2} \omega_m^T \omega_m + C \sum_{i=1}^n \sum_{m \neq y_i} \varepsilon_i^m \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \omega_{y_i}^T \varphi(x_i) + b_{y_i} \geq \omega_m^T \varphi(x_i) + b_m + 2 - \varepsilon_i^m \\ \varepsilon_i^m \geq 0 \\ i = 1, \dots, n, m \in \{1, 2, \dots, K\} \setminus y_i \end{cases} \end{aligned}$$

与一对多的判别函数类似, K 类支持向量机算法的判别函数为:

$$y_{\text{test}} = \arg \max_{m=1, \dots, K} (\omega_m^T \varphi(x) + b_m)$$

这种方法对所有的训练样本使用同一个二次规划, 只需要一次就可以决定分类。这种方法的局限性在于由于要一次处理所有数据, 约束条件剧增, 使二次规划规模比较庞大, 即便是将其转化为线性规划, 数据的规模还是受到限制。但此模型对解决多分类问题还是优势明显。

3 算法仿真

为了验证本文方法对复杂体制辐射源信号特征分析的有效性, 选择 4 种典型的雷达辐射源信号^[8], 其调制参数分别为: 采样频率 100 MHz, CW 载频 30 MHz; LFM 载频 25 MHz, 调

频宽度 17 MHz; NLFM 采用正弦调频信号, 载频 15 MHz, 调频宽度 13 MHz; BPSK 采用 7 位巴克码; 脉冲宽度均为 10 μ s。

3.1 时频图像简化效果仿真

采用本文算法对以上四种典型调制类型的雷达信号的时频图像进行简化, 得到的简化后的频率随时间变化的曲线如图 2 所示。

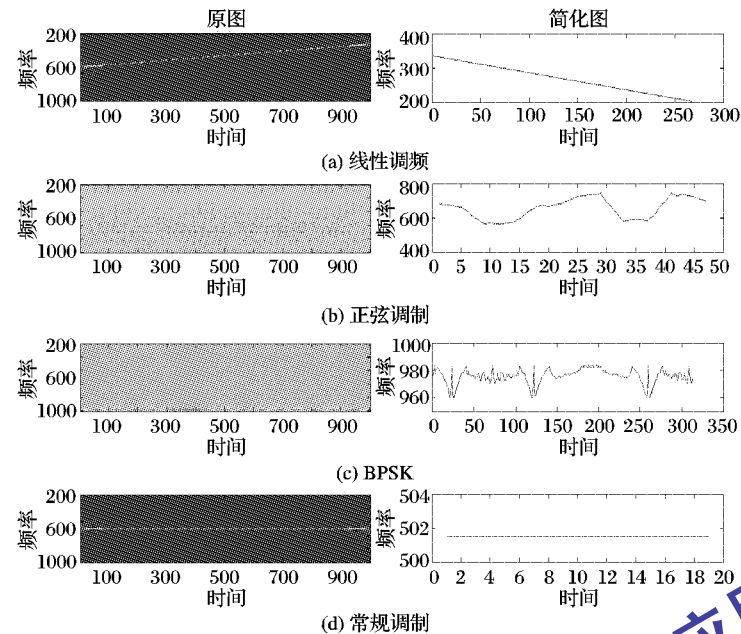


图2 四种信号时频分析图像简化效果

3.2 调制方式识别仿真

将简化后的曲线进行相同点数的采样后输入到支持向量机进行分类。分类是首先需要对支持向量机进行训练。由于支持向量机对小样本分类同样有效, 所以本文只产生了 60 组不同调制类型的信号, 其中随机抽取 20 组作为训练样本, 另外 40 组作为测试样本。具体参数如表 1 所示。

表1 分类仿真采用参数

调制方式	调制参数
CW	载频: 25 MHz ~ 30 MHz
LFM	载频 25 MHz ~ 30 MHz, 调频宽度 15 MHz ~ 20 MHz
NLFM	正弦调制, 载频 15 MHz ~ 20 MHz, 调频宽度 10 MHz ~ 15 MHz
BPSK	8 位伪随机码

取信噪比分别为 0 dB、2 dB、4 dB、6 dB、8 dB、10 dB 进行仿真, 计算各种类别的识别正确率, 结果如表 2 所示。

由表2可以看出, 采用本文算法, 对雷达信号的调制方式

实现自动识别正确率较高, 若信噪比达到 10 dB, 正确率达到 99.38%, 即使在 0 dB 的信噪比条件下, 自动识别的正确率仍然达到 97.5%。总体来说, 对 BPSK 调制的雷达识别正确率一直维持在 100%, 但是对常规调制的雷达识别正确率相对而言较低。可考虑采用其他办法与本文方法相结合的方式, 从而提高常规雷达的识别正确率。

表2 本文算法识别正确率比较 %

信噪比/ dB	调制方式				
	LFM	NLFM	BPSK	CW	平均
0	100	95	100	95	97.50
2	95	100	100	95	97.50
4	97.5	100	100	95	98.13
6	97.5	100	100	95	98.13
8	100	100	100	95	98.75
10	100	100	100	97.5	99.38

4 结语

本文提出了一种新的时频图像简化算法, 根据本文提出的算法将时频分析的结果经过简化后利用支持向量机进行分类识别, 仿真结果说明采用本文算法进行雷达信号调制方式的自动识别正确率较高, 且具有一定抗噪性。但是本文算法实现的前提是脉内只含有一种分量的信号, 如果脉内信号复杂, 则本文算法的有效性将大大降低, 但可采用基于经验模态分解算法的信号分解方法将信号分解为各个分量后再采用本文算法对其进行分类。

参考文献:

- [1] 王培昆, 孙大喜. 第四维战争——电子对抗的应用与发展 [M]. 北京: 国防大学出版社, 1991.
- [2] 赵长虹. 重频分选与跟踪算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.
- [3] COHEN L. Time-frequency analysis [M]. New York: Prentice Hall, 1995.
- [4] 李亚安, 王军, 李钢虎. 基于自适应高斯核函数时频分布的水声信号处理研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 11(18): 3230-3233.
- [5] 胡昌华, 周涛. 基于 Matlab 的系统分析与设计——时频分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [6] 王成栋, 朱永生, 张优云, 等. 时频分析与支持向量机在柴油机气阀故障诊断中的应用 [J]. 内燃机学报, 2006, 22(3): 245-249.
- [7] 李应红, 尉询楷. 支持向量机的工程应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2004.
- [8] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [4] 吴森堂. 结构随机跳变系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] STENGEL R F, RAY I R. Stochastic robustness of linear time-invariant control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1991, 36(1): 82-87.
- [6] CLARK A, WU C, MIRMIRANI M, et al. Development of an airframe-propulsion integrated generic airbreathing hypersonic vehicle model [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago: AIAA, 2006.
- [7] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

(上接第 1726 页)

要, 而这一选择恰恰具有较大的人为因素, 需要一定的设计经验。因此这一控制方案虽然能比传统控制结构更适合工程应用, 但也需要设计人员对于传统控制结构的特点有相当的了解, 才能合理有效地进行设计工作。

参考文献:

- [1] 王增会, 陈增强, 孙青林, 等. 定量反馈理论发展综述 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 403-410.
- [2] 杨刚, 姚华. 航空发动机零点配置/回路传递恢复方法的改进 [J]. 推进技术, 2006, 27(1): 20-24.
- [3] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.