

文章编号: 1000-582X(2011)12-078-04

## 支持向量机多类分类的数字调制方式识别

张慧敏<sup>1,2</sup>, 柴毅<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044; 2. 重庆电子工程职业学院 通信系, 重庆 401331)

**摘要:** 针对神经网络存在的过学习、欠学习、局部极小值等问题, 提出了一种基于支持向量机 (SVM) 的数字调制方式的识别方法。从信号的瞬时幅度, 瞬时相位, 瞬时频率, 频谱, 包络变化等特性中提取了 7 个特征参数, 用于训练支持向量机。运用二叉树理论设计多类分类器, 与已有算法相比, 具有简单、高速、高精度的特点。仿真结果证明, 在高斯白噪声 (AWGN) 下, 当信噪比大于 15 dB 时, 对 2ASK、4ASK、8ASK、2FSK、4FSK、8FSK、BPSK、QPSK、8PSK 调制方式的识别率可以达到 97% 以上。

**关键词:** 支持向量机; 多类分类; 二叉树; 调制识别

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

## Digital modulation mode recognition based on multi-class classification of support vector machine

ZHANG Hui-min<sup>1,2</sup>, CHAI Yi<sup>1</sup>

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Department of Communication, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, P. R. China)

**Abstract:** To solve the overfitting, underfitting and local minimum existing in neural networks, a digital modulation mode recognition method based on support vector machine (SVM) is proposed. Seven characteristic parameters are extracted from instantaneous amplitude, instantaneous phase, instantaneous frequency, frequency spectrum, and changes in characteristics of the envelope to train support vector machine. Compared with the existing algorithms, using binary tree theory to design multi-class classifier has the features of simple, high-speed, high-precision. The simulation results indicate that the scheme can achieve 97% recognition accuracy when the signal to noise ratio (SNR) is above 15 dB with the AWGN channel.

**Key words:** support vector machines; multi-class classification; binary tree; modulation

随着通信技术的发展, 无线通信环境日益复杂多变, 无论是军事方面的电子对抗、通信信号侦查, 还是民用方面的信号监视、频谱管理以及软件无线电系统的应用等等都需要用到调制方式的识别。如何有效地识别通信调制信号, 成为现代通信系统中的难点重点问题之一。目前已有的调制方式识别方

法一般有 2 种: 一是基于假设检验的判决理论方法<sup>[1]</sup>, 二是基于特征提取的统计模式识别方法<sup>[2]</sup>。其中基于统计模式识别的调制识别方法常采用人工神经网络算法, 这种方法在实际中也解决了很多问题, 但由于人工神经网络容易存在过学习、欠学习、局部极小值等一系列问题<sup>[3]</sup>, 使其推广受到了很大

收稿日期: 2011-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60974090); 教育部博士点基金资助项目 (200806110016)

作者简介: 张慧敏 (1981-), 女, 重庆大学博士研究生, 主要从事信息处理、融合与控制方向研究, (Tel) 13206006614; (E-mail) zhuomi99@126.com。

限制。提出一种基于支持向量机(SVM)的数字调制方式识别方法,结合二叉树理论,克服了神经网络存在的过学习、欠学习、局部极小值等问题,具有良好的推广能力。

## 1 支持向量机原理

SVM从线性可分情况下的最优分类面发展而来<sup>[4]</sup>,基于统计学习理论的VC维理论和结构风险最小化原则,其在小样本应用上更具有优势。设有训练数据 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ ,  $x \in R_n$ ,  $y \in \{+1, -1\}$ 可以被一个超平面 $(\omega \cdot x_n) - b = 0$ 分开。如果这个向量集合被超平面没有错误地分类,并且2类向量之间的边界距离是最大的,则这个向量集合被这个最优超平面分开。它的分类分为2种:线性情况和非线性情况。

### 1.1 线性情况

在线性情况下,又分为线性可分与线性不可分情况。

1)线性可分情况下,为了找到最优超平面,需要求解下面的二次问题:最小化泛函

$$\min_{\omega, b} \Phi(\omega) = \frac{1}{2}(\omega \cdot \omega), \quad (1)$$

$$\text{s. t. } y_i[(x_i \cdot \omega) - b] \geq 1, i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

这是不等式约束条件下的二次函数寻优问题,存在唯一解,解中通常只有少部分 $\alpha_i$ 不为零,这些 $\alpha_i$ 不为零所对应的样本就是支持向量。

通过求解,可以得到最优分类决策函数

$$f(x) = \text{sgn} \left[ \sum_{\text{支持向量}} y_i \alpha_i (x_i \cdot x) - b \right]. \quad (2)$$

输入向量通过此最优分类函数即可实现最优超平面的分类。

### 2)线性不可分

对于线性不可分的情形,通过引入松弛变量 $\zeta_i \geq 0$ ,使式(1)条件变为

$$y_i[(x_i \cdot \omega) - b] \geq 1 - \zeta_i. \quad (3)$$

最优化问题就有了一定的变动。同时引入惩罚系数 $C$ ,控制对错分样本的惩罚度来实现在错分样本比例和算法的复杂度之间的折衷。在约束条件式(3)下将最优化问题转化为求解下式最小值

$$\min_{\omega, b} \Phi(\omega) = \frac{1}{2}(\omega \cdot \omega) + C \left( \sum_{i=1}^n \xi_i \right), \quad (4)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0.$$

通过求解,可以得到最优分类决策函数

$$f(x) = \text{sgn} \left[ \sum_{\text{支持向量}} y_i \alpha_i (x_i \cdot x) - b \right]. \quad (5)$$

### 1.2 非线性情况

对于非线性情况,需要特征映射将数据映射到

特征空间,再在特征空间中使用线性分类器。这种映射,一般采用核函数来实现。核函数将高维空间的内积运算转化为低维输入空间的核函数计算,从而巧妙地解决了在高维特征空间中计算的“维数灾难”等问题。理论上,满足Mercer条件的函数都可以称为核函数。常用的核函数有

$$1) \text{ 高斯核函数 } K(x, x_i) = \exp \frac{-\|x_i - x\|^2}{2\sigma^2};$$

$$2) \text{ 多项式核函数 } K(x_i, x_j) = [(x_i \cdot x_j) + 1]^d;$$

$$3) \text{ 双曲正切核函数 } K(x, x_i) = \tanh[a(x_i \cdot x) + b].$$

笔者在设计中采用的是高斯核函数。

## 2 特征提取

要识别的数字调制方式是:2ASK、4ASK、8ASK、2FSK、4FSK、8FSK、BPSK、QPSK、8PSK。特征提取是分类器设计的关键部分,根据这些信号的瞬时幅度,瞬时相位,瞬时频率,频谱,包络变化等特性,提取以下7个特征值<sup>[5-9]</sup>

1)零中心归一化瞬时幅度之谱密度的最大值 $\gamma_{\max}$ ,

$$\gamma_{\max} = \frac{\max | \text{FFT}[a_{cn}(i)] |^2}{N_s}, a_{cn}(i) = a_n(i) - 1, \quad (6)$$

式中: $N_s$ 为采样点数; $a_n(i) = \frac{a(i)}{m_a}$ ;  $m_a = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} a(i)$ 为瞬时幅度 $a(i)$ 的平均值。

$\gamma_{\max}$ 在数字调制中主要用来区分FSK信号和ASK,PSK信号的。FSK瞬时幅度为常数,所以它的零中心归一化瞬时幅度为0;而ASK和PSK的瞬时幅度不恒为常数,其零中心归一化瞬时幅度不为0,所以谱密度也不为0。

2)零中心非弱信号段瞬时相位非线性分量绝对值的标准偏差 $\sigma_{ap}$ ,

$$\sigma_{ap} = \sqrt{\frac{1}{c} \left[ \sum_{a_n(i) > a_t} \Phi_{NL}^2(i) - \left[ \frac{1}{c} \sum_{a_n(i) > a_t} |\Phi_{NL}(i)| \right]^2 \right]}, \quad (7)$$

式中: $a_t$ 一般取 $a_n(i)$ 的平均值; $c$ 是采样数据 $N_s$ 中非弱信号的个数; $\Phi_{NL}$ 是经零中心化处理后瞬时相位的非线性分量; $\sigma_{ap}$ 在数字调制中主要用来区分4PSK信号和(BPSK,2ASK,4ASK,8ASK)信号。

3)零中心非弱信号段瞬时相位非线性分量的标准偏差 $\sigma_{dp}$

$$\sigma_{dp} = \sqrt{\frac{1}{c} \left[ \sum_{a_n(i) > a_t} \Phi_{NL}^2(i) - \left[ \frac{1}{c} \sum_{a_n(i) > a_t} \Phi_{NL}(i) \right]^2 \right]}, \quad (8)$$

$\sigma_{dp}$ 主要用来区分BPSK信号和2ASK,4ASK,

8ASK 信号的。因为 ASK 信号无直接相位信息,即  $\sigma_{dp}=0$ , 而 BPSK 信号含有直接相位信息,则  $\sigma_{dp} \neq 0$ 。

4) 零中心归一化瞬时幅度绝对值的标准偏差  $\sigma_{aa}$ ,

$$\sigma_{aa} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \left[ \sum_{i=1}^{N_s} a_{cn}^2(i) - \left[ \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} |a_{cn}(i)| \right]^2 \right)}, \quad (9)$$

$\sigma_{aa}$  主要用于区分 2ASK 和 4ASK 信号的。2ASK 幅度绝对值是一常数,而 4ASK 幅度绝对值不是常数,含有幅度信息。

5) 零中心归一化非弱信号段瞬时频率绝对值的标准偏差  $\sigma_{af}$ ,

$$\sigma_{af} = \sqrt{\frac{1}{c} \left[ \sum_{a_n(i) > a_t} f_N^2(i) - \left[ \frac{1}{c} \sum_{a_n(i) > a_t} |f_N(i)| \right]^2 \right)}, \quad (10)$$

式中:  $f_N(i) = \frac{f_m(i)}{R_s}$ ;  $f_m(i) = f(i) \cdot m_f$ ;  $m_f = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} f(i)$ ;  $R_s$  为数字信号符号速率,  $f(i)$  为信号的瞬时频率。 $\sigma_{af}$  在数字调制中主要用来区分 2FSK 和 4FSK 信号的。

6) 零中心归一化瞬时频率的紧致性(四阶矩)  $\mu_{42}^f$ ,

$$\mu_{42}^f = \frac{E\{f_N^4(i)\}}{\{E[f_N^2(i)]\}^2} \quad (11)$$

7) 信号包络变化程度  $R$

$$R = \frac{\sigma^2}{\mu^2}, \quad (12)$$

式中  $\mu, \sigma^2$  分别为信号的均值和方差。

### 3 分类器设计及仿真

#### 3.1 分类器设计

支持向量机最初是为了两类分类而提出来的,但在实际应用中常使用多类分类。对于多类分类问题,目前有以下几种方法:一对多(OAA)<sup>[10]</sup>,一对一(OAO)<sup>[11]</sup>,有向无环图(DAG)<sup>[12]</sup>,一次性求解方法等。当支持向量数目过多时,OAA 和 OAO 由于要进行大量二次规划计算而导致性能急剧降低;DAG 在分类时没有考虑错误分类对后续的影响;而一次性求解方法一般由于求解过程计算过于复杂而不实用。

采用二叉树的多类分类方法<sup>[13-16]</sup>,将一个复杂的分类过程分解成多个两类分类问题。其结构如图 1 所示。二叉树算法解决了不可分盲点、训练用的支持向量机数目过多等问题,缩短了训练时间,提高了算法的性能。

#### 3.2 仿真结果

为了验证该算法,在 Matlab 环境中进行仿真测

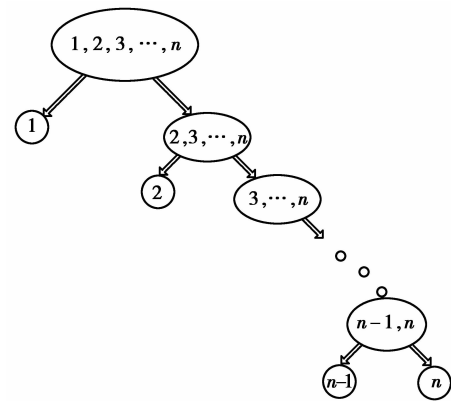


图 1 基于二叉树的多类分类结构图

试。高斯白噪声信道中,码元速率为 1.2 Kbaud/s, SNR=15 dB 的情况下,对 2ASK、4ASK、8ASK、2FSK、4FSK、8FSK、BPSK、QPSK、8PSK 调制方式进行识别。其过程如下

1) 对各种调制信号分别进行采样,提取其特征值,提供训练数据;

2) 归一化数据,且将其分成 2 份,一份用于训练,一份用于测试;

3) 采用交叉验证的方法确定径向基核函数的参数,得到分类器模型;

4) 利用测试集测试模型的分类准确性,分析其分类精度。

实验结果如表 1 所示。根据表 1 所给出的结果证明了,该算法在 SNR 不小于 15 dB 时对以上几种数字调制方式的识别率均达到了 97% 以上,说明了该算法的有效性。

表 1 SNR=15 dB 时各种调制方式的识别率 %

	2ASK	4ASK	8ASK	2FSK	4FSK	8FSK	BPSK	QPSK	8PSK
2ASK	100								
4ASK	1.8	98.2							
8ASK		2.4	97.6						
2FSK				100					
4FSK				0.6	97	2.4			
8FSK				1.2	1.8	97			
BPSK							100		
QPSK							1.4	98.6	
8PSK							0.5	1	98.5

当信噪比 SNR=0~12 dB 时,该算法的识别率达到 95% 以上,具体如表 2 所示。

表 2 不同 SNR 时的识别率 %

SNR 信号	0	3	6	9	12
2ASK	97	98	99	100	100
4ASK	96	96.5	97	98	98
8ASK	96	96	97	97.5	97.5
2FSK	96	97	98	99	100
4FSK	95.5	96	95.5	97	97
8FSK	95.5	96	96	97	97
BPSK	97	98	99	100	100
QPSK	96.5	97	98	98	98.5
8PSK	97	98	98	98.5	98.5

## 4 结 论

针对 2ASK、4ASK、8ASK、2FSK、4FSK、8FSK、BPSK、QPSK、8PSK 这 9 种常见数字调制方式进行了识别,仿真结果表明此方法具有简单、快速、精度高的特点。将支持向量机用于调制方式识别,能有效利用支持向量机在小样本情况下的高速高效分类的特点,大大改善原有调制识别方式的不足。

### 参考文献:

- [1] 李小捷,许录平,陈佳.基于联合参数估计的最大似然调制识别算法[J].仪器仪表学报,2008,29(12):2509-2514.  
LI XIAO-JIE, XU LU-PING, CHEN JIA. ML-based modulation identification algorithm based on joint parameter estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12): 2509-2514.
- [2] 赖惠成,褚辉.一种混合模式的神经网络自动调制识别器[J].电子与信息学报,2008,30(5):1203-1205.  
LAI HUI-CHENG, CHU HUI. An automatic modulation recognizer using neural networks based on the hybrid mode [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(5): 1203-1205.
- [3] NANDI A K, AZZOUZ E E. Modulation recognition using artificial neural networks[J]. Signal Processing, 1997, 56(2): 165-175.
- [4] CRISTIANINI N, TAYLOR J S. 支持向量机导论[M]. 李国正,王猛,曾华军,译.北京:机械工业出版社,2005.
- [5] 高永强.基于高阶统计量的数字调制方式识别[J].无线通信技术,2006,15(1):26-29.  
GAO YONG-QIANG. Digital modulation recognition using higher statistics [J]. Wireless Communication Technology, 2006, 15(1): 26-29.
- [6] 李侃,孙进平,邸杰.一种 PSK/QAM 调制方式识别的似然比方法[J].电子测量技术,2007,30(2):6-7.

- LI KAN, SUN JIN-PING, DI JIE. Likelihood methods for PSK/QAM modulation classification[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(2): 6-7.
- [7] 孙建成,张太镒,刘枫.基于支持向量机的多类数字调制方式自动识别算法[J].西安交通大学学报,2004,38(6):619-622.  
SUN JIAN-CHENG, ZHANG TAI-YI, LIU FENG. Automatic multi-class digital modulation recognition algorithms based on support vector machines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(6): 619-622.
- [8] NANDI A K, AZZOUZ E E. Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(4): 431-436.
- [9] WONG M L D, NANDI A K. Automatic digital modulation recognition using artificial neural network and genetic algorithm[J]. Signal Processing, 2004, 84(2): 351-365.
- [10] FRIEDMAN J. Another approach to polychotomous classification [R]. Palo Alto: Stanford University, 1996.
- [11] KIM D H, FINKEL L H. Hyperspectral image processing using locally linear embedding [C] // Proceedings of the First International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, March 20-22, 2003. Capri, Italy: IEEE, 2003: 316-319.
- [12] HUANG H P, LIU Y H. Fuzzy support vector machines for pattern recognition data mining [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2002, 4(3): 826-835.
- [13] 吴丹,顾学迈.一种新的基于支持向量机的自动调制识别方案[J].南京理工大学学报:自然科学版,2006,30(5):569-572.  
WU DAN, GU XUE-MAI. Novel scheme of automatic modulation recognition based on SVM [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 30(5): 569-572.
- [14] 方勇,戚飞虎.一种新的多类模式识别方法[J].红外与毫米波学报,2004,23(6):418-422.  
FANG YONG, QI FEI-HU. Novel approach to multi-classification [J]. Journal of Infrared Millimeter and Waves, 2004, 23(6): 418-422.
- [15] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [16] YOON J, BESTAVAVS A. Ibrahim adaptive Reliable multicast [J]. Proceedings of ICC, 2000, 3(6): 1542-1546.