

# 基于 AR 模型的调制盲识别方法

戴 威,王有政,王 京

(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室,北京 100084)

**摘 要:** 针对调制方式的盲识别,本文通过自回归模型提取特征参数,并采用 k 近邻法进行分类识别.仿真结果表明,这种方法可以在 -1dB 的极低信噪比条件下识别信号的调制方式,并且其性能受中心频率偏移和抽样频率变化的影响很小.

**关键词:** 调制识别;盲识别;自回归模型;软件无线电

**中图分类号:** TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1890-03

## A Blind Modulation Recognition Method Based on AR Model

DAI Wei, WANG You-zheng, WANG Jing

(State Key Laboratory on Microwave & Digital Communications,

Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** To classify modulations blindly, this paper employs autoregressive models to generate feature parameters and the k-nearest-neighbour method to classify modulation types. Simulation results indicate that this method can classify modulations in a very low SNR environment such as -1dB, and be robust to the frequency offset and the dynamic change of sample frequency.

**Key words:** modulation recognition; blind recognition; autoregressive model; software radio

### 1 引言

数字通信的快速发展形成了多种通信体制并存的局面,而这些通信体制的调制方式和接入技术各不相同,给多体制间的通信互联带来了很大的障碍.调制识别技术能够自动地识别通信信号的调制方式,在多体制通信互联和软件无线电方面有着重要的作用.

近年来国际上提出了多种调制识别方法.对于幅度相位调制信号, Wen Wei 等使用最大似然估计和模糊逻辑的方法识别具体的星座图分布<sup>[2,3]</sup>, Swami 等利用高阶累计量进行统计判决<sup>[1]</sup>;而当信号是数字调频信号时, Beidas 应用高阶相关函数识别调频进制<sup>[5]</sup>.以上各种方法均有很好的信噪比性能,但它们都要求已知基本调制方式、码元同步和信噪比等信号参数. Nandi 在文[4]中基于时域统计参数给出了一种适合于信号参数未知时的盲识别方法,但该方法性能上不如针对特定调制方式<sup>[1-3][5]</sup>.

上述任何一种调制识别方法单独使用都不能很好地识别所有的调制方式,因此采用多级的调制识别系统很有必要.在多级调制识别中,第一级识别只需要对调制信号进行粗略划分,然后根据识别结果提取下一级调制识别所必需的信号参数(如对于调相信号则利用相位信息提取码元同步),最后选择调制细分类的方法(如用高阶累计量判决调相信号的调相进制)完成整体的调制识别工作.本文提出的调制盲识别方法

就是基于这种多级识别的思想.该方法工作在基带前端,对码元速率未知、可能存在较大中心频偏的基带信号进行粗识别,即仅将信号判决为噪声、包络调制、频率调制和相位调制中的一种.由于利用 AR 模型对信号按最小均方误差准则进行拟合,该识别方法可以在 -1dB 的低信噪比下正确识别信号的调制方式,并对中心频率偏移和抽样频率变化有很强的鲁棒性,因而适合于信号参数未知时直接对基带抽样信号进行调制方式盲识别.文章的结构如下,第二部分介绍了基于 AR 模型的调制盲识别方法,第三部分给出了计算机数值仿真结果,第四部分对全文进行了总结.

### 2 调制盲识别方法

基于 AR 模型的调制盲识别方法的整体框图如图 1 所示,可分为特征提取和分类识别两个基本步骤.

#### 2.1 特征参数提取

特征参数提取包括了图 1 中预处理,计算瞬时包络瞬时频率和 AR 建模这三个模块.天线处接收的数字调制射频信号可以表示为:

$$s(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=-\infty}^k S_n(t-nT) e^{j(2f_c t + \phi)} \right\} \\ = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=-\infty}^k a_n(t-nT) e^{j(2f_n(t-nT) + \phi_n(t-nT))} e^{j(2f_c t + \phi)} \right\}, \\ kT < t \leq (k+1)T, k = 0, 1, 2, \dots$$

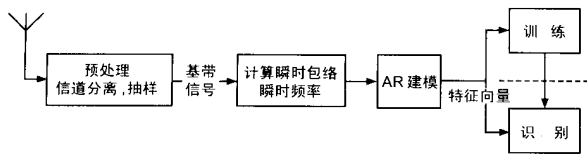


图 1 预识别算法框图

其中  $S_n(t)$  是基带复信号, 可以在幅度  $a_n(t)$ 、相位  $\phi_n(t)$  或者频率  $f_n(t)$  上存在调制,  $f_c$  和  $\phi_c$  分别为载波的频率和相位. 在预处理模块中, 天线接收的射频信号  $s(t)$  经过信道分离、下变频、低通滤波和 A/D 采样后就可以得到基带复信号  $S(n)$ , 它的等效双通路可以表示为  $I(n)$  和  $Q(n)$ . 定义瞬时包络、瞬时相位和瞬时频率如下:

$$\begin{aligned} \text{瞬时包络: } e(n) &= \sqrt{I^2(n) + Q^2(n)} \\ \text{瞬时相位: } \phi(n) &= \arctan(Q(n)/I(n)) \\ \text{瞬时频率: } f(n) &= d(\phi(n)) = \phi(n) - \phi(n-1) \end{aligned}$$

考虑到中心频率偏移可能带来的相位旋转, 该识别算法仅仅使用瞬时包络序列  $e(n)$  和瞬时频率序列  $f(n)$  提取特征.

特征参数是对瞬时包络序列  $e(n)$  和瞬时频率序列  $f(n)$  进行自回归 AR 建模得到, 即对瞬时包络序列  $e(n)$  和瞬时频率序列  $f(n)$  分别计算二阶 AR 模型系数, 形成特征参数矢量  $\underline{x} = (a_{1e}, a_{2e}, P_{2e}, a_{1f}, a_{2f}, P_{2f})$ , 其中  $a_{1e}, a_{2e}, P_{2e}$  和  $a_{1f}, a_{2f}, P_{2f}$  分别是包络序列和频率序列的 AR 模型参数和均方误差. 假设给定任意平稳随机序列  $x(n)$ , 根据最小均方误差准则, AR 模型的系数  $a_1, a_2, \dots, a_M$  满足 Yule-Walker 方程:

$$\begin{bmatrix} R_x(0) & R_x(1) & \dots & R_x(1-M) \\ R_x(1) & R_x(0) & \dots & R_x(2-M) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ R_x(M-1) & R_x(M-2) & \dots & R_x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_x(1) \\ R_x(2) \\ \dots \\ R_x(M) \end{bmatrix}$$

而均方误差  $P_M$  满足:

$$P_M = \sum_{k=0}^{M-1} a_k R_x(-k).$$

其中  $R_x(k) \quad k=1- M, 2- M, \dots, M-1$  是平稳序列  $x(n)$  的自相关函数. 对瞬时包络序列和瞬时频率序列分别求解它们的二阶 Yule-Walker 方程就可以得到它们的 AR 模型参数和均方误差从而形成特征向量.

### 2.2 训练和识别

接收到的信号可以分成以下四个基本类型:

- ① 噪声(NS): 瞬时包络和瞬时频率上都不存在调制.
- ② 包络调制信号(EMS): 瞬时包络上存在调制, 瞬时频率上不存在调制. 包括 MASK、升余弦滚降 MASK、16QAM、V29 等调制信号.
- ③ 频率调制信号(FMS): 瞬时包络上不存在调制, 瞬时频率上存在调制. 包括 MSK、GMSK 等调制信号.
- ④ 相位调制信号(PMS): 瞬时包络和瞬时频率上都不存在调制的非噪声信号. 包括 BPSK、QPSK 等调制信号.

按照以上分类方式, 将得到的特征向量用  $k$  近邻法进行训练和识别, 即从参考样本集中取未知样本的  $k$  个近邻(即距离最近的样本), 看这  $k$  个近邻中多数属于那一类, 就把该样本

归为哪一类. 文中取  $k=5$ .

在训练过程中, 首先对每种基本类型的信号从  $-3\text{dB}$  到  $15\text{dB}$  产生训练样本, 然后对得到的训练样本进行  $k$  近邻剪辑和  $k$  近邻压缩, 以提高正确率和减小存储量.  $k$  近邻剪辑法可以去掉各类边界附近分类不正确的训练样本, 步骤如下:

step 1 以训练样本集自身为参考对训练样本进行  $k$  近邻分类;

step 2 检查有无错分样本, 若无错分样本则结束, 否则继续;

step 3 除去错分样本, 转 step1.

经过剪辑后的训练样本集可以保证自身的正确性, 然后用  $k$  近邻压缩法去掉各类中心处对分类判决不起作用的冗余样本, 步骤如下:

step 1 从每类的训练样本集中任取少量样本构成参考样本集;

step 2 以参考样本集为参考, 对训练样本进行  $k$  近邻分类;

step 3 检查有无错分样本, 若无错分样本则结束, 否则继续;

step 4 从错分样本中任取少量样本添加入参考样本集中, 转 step2.

这样就使得算法结束时的参考样本集能够完全代表训练样本集, 用以识别未知样本的调制方式, 而存储量却大大减少.

### 3 仿真结果

在仿真过程中, 所有调制的样本都是调制信号经过加性高斯白噪声信道后抽样得到, 每次调制识别的数据包含了 1024 个基带信号抽样. 同时我们对基于时域统计参数的调制盲识别算法也进行仿真, 并将两种方法的调制识别性能作了对比.

1) 识别算法的信噪比性能. 这里对每一种调制方式进行不同信噪比条件下的识别仿真, 结果见图 2. 其中实线和虚线分别表示本文提出的 AR 模型参数法和时域统计参数法的信噪比性能曲线. 结果表明 AR 模型参数法在  $\text{SNR} > -1\text{dB}$  时正确识别概率大于 80%, 性能优于时域统计参数法的性能.

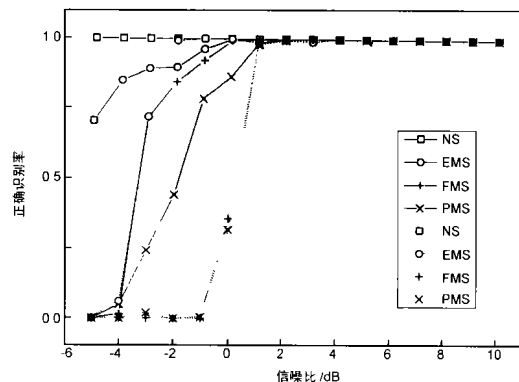


图 2 调制识别的信噪比性能曲线

2) 中心频率偏移对识别算法性能的影响. 在对接收信号进行混频变到基带信号的过程中, 中心频率偏移会带来基带

信号相位的旋转,导致识别性能下降.本文在  $\text{SNR} = 5\text{dB}$  条件下进行了仿真,识别性能曲线见图 3,其中横坐标是中心频率偏移对抽样频率的比值,实线和虚线分别表示 AR 模型参数法和时域统计参数法中中心频偏对识别性能的影响.结果表明,当中心频率偏移不超过 0.1 倍抽样频率时,AR 模型参数法的正确识别率仍然大于 80%.相比之下,时域统计参数法对中心频率变化则较为敏感.

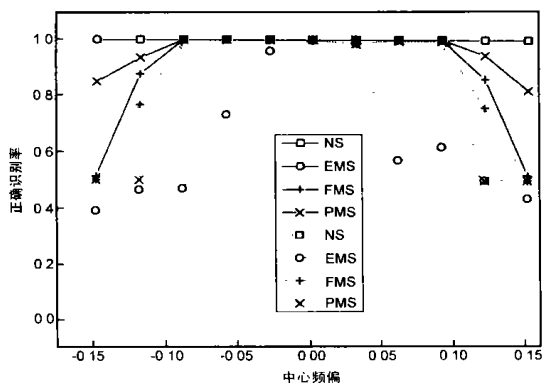


图 3 中心频率偏移对识别的影响

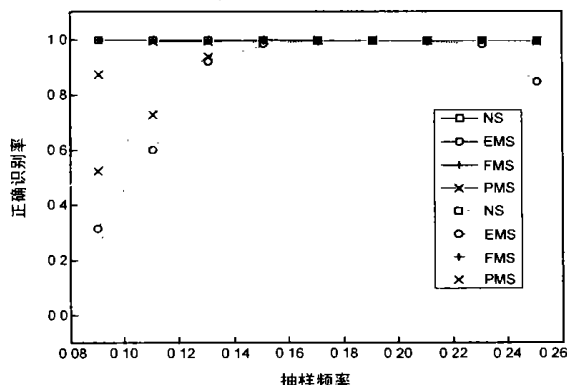


图 4 抽样频率变化对识别的影响

3) 抽样频率变化对识别算法性能的影响.为检测抽样频率变化对识别算法的影响,本文在信噪比  $5\text{dB}$  条件下进行了仿真,识别性能曲线见图 4,其中横坐标是码元速率对抽样速率的比值,实线和虚线分别表示 AR 模型参数法和时域统计参数法中抽样频率变化对识别性能的影响.仿真结果表明当抽样频率在码元速率的 4 倍到 10 倍之间时,AR 模型参数法的正确识别率大于 80%,性能同样优于时域统计参数法.

以上三个方面的仿真结果表明基于 AR 模型的识别算法不仅有很好的信噪比性能,而且对中心频率偏移和抽样频率变化不敏感,因此适合对信号参数未知的通信信号进行调制盲识别,其识别结果可以用于信号参数的提取和进一步调制识别方法选取的依据.

#### 4 结论

本文提出了一种基于 AR 模型的调制盲识别算法.该算法通过 AR 模型建模提取特征参数,用  $k$  近邻法进行分类识别,可以在信噪比大于等于  $-1\text{dB}$  条件下实现大于 80% 的正确识别概率.同时该算法还对中心频率偏移和抽样频率变化

有很强的鲁棒性, $\text{SNR} = 5\text{dB}$  时中心频率偏移不超过 0.1 倍抽样频率或者抽样频率在 4 到 10 倍码元速率之间的情况下正确识别率仍然大于 80%.

#### 参考文献:

- [1] Swami, A., Sadler, B. M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants [J]. IEEE Comm. transactions on, March 2000: 416 - 429.
- [2] Wen, W., Mendel, J. M. Maximum-likelihood classification for digital amplitude-phase modulations [J]. Communications, IEEE transactions on, February 2000: 189 - 193.
- [3] Wen, W., Mendel, J. M. A fuzzy logic method for modulation classification in nonideal environments [J]. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, June 1999: 333 - 344.
- [4] Nandi, A. K., Azzouz, E. E. Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals [J]. Communications, IEEE Transactions on, April 1998: 431 - 436.
- [5] Beidas, B. F., Weber, C. L. Higher-order correlation-based approach to modulation classification of digitally frequency-modulated signals [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, January 1995: 89 - 101.

#### 作者简介:



戴威男, 1976 年生于湖南湘潭, 在读硕士. 1999 年获得清华大学电子工程系电子信息工程专业本科学位, 1999 年至今在清华大学电子工程系信息与通信工程专业攻读硕士学位, 在微波与数字通信国家重点实验室开展研究工作. 研究兴趣包括软件无线电, 无线移动通信系统中的信号处理和微小卫星的星上信号处理技术.



王有政男, 1969 年生于湖南, 助研. 1992 年在清华大学电子工程系学士毕业, 1997 年在清华大学电子工程系硕士毕业, 1997 年至今在清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室工作. 研究兴趣包括信道编译码技术, 调制解调技术, 空时处理技术, 3G/4G 通信系统设计, 微小卫星星上通信系统, 卫星导航定位系统与技术, 通信系统仿真与 IC 设计等.



王京男, 1958 年生于北京, 教授, 博士生导师. 1983 年获清华大学电子学系无线电技术专业学士学位, 1986 年获硕士学位. 1987 ~ 1988 年在美国加州戴维斯分校进修数字移动通信与数字微波通信. 现任清华大学信息科学技术学院院长助理, 微波与数字通信国家重点实验室副主任等职务, 1999 年至今参加中国第三代移动通信研究开发项目技术总体组工作. 研究兴趣包括第三代移动通信系统, 软件无线电技术, 微小卫星的星上信号处理技术等.