

基于特征矢量和加权择多判决的信号调制模式快速识别*

廖小春,姚远程,何 叶

(西南科技大学 信息工程学院,四川 绵阳 621010)

摘要: 针对软件无线电中自动调制模式识别在信噪比大范围变化下的精度和速度问题,提出了一种带有参考训练的分类识别结构,通过构造有效的三维特征矢量和加权择多判决分类器,对BPSK、QPSK、FSK、PM、MSK 五类信号进行调制模式识别。仿真结果验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 自动调制模式识别;特征矢量;加权择多判决

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)17-0050-03

Fast signal modulation recognition based on feature vector and weighted majority decision

LIAO Xiao Chun, YAO Yuan Cheng, HE Ye

(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Aiming at reaching high precision and speed in automatic modulation recognition under largely fluctuated SNR software radio environment, a classification recognition structure with training reference was represented, by constructing an effective three-dimensional feature vector and the weighted majority decision classifier, to classify BPSK, QPSK, FSK, PM, MSK signals. Simulation results validated the feasibility and effectiveness of this method.

Key words: automatic modulation recognition; feature vector; weighted majority decision

软件无线电技术已经成为最近几年通信界研究和开发的热点。它的主要目的是建立一个通用平台,让不同制式和传输速率的通信信号互联互通,实现资源的最优利用。软件无线电的通信体制决定了通信的接收方无法根据某一特定的解调方式,在特定的频段上进行解调解码。对这种多速率、多模式的宽带信号进行解调,首先需要解决的问题就是如何自动识别接收信号的调制模式,然后再分析对应该调制模式的各种调制参数,如频点、带宽、波特率等。自动调制模式识别的实现对于软件无线电技术的发展起着重要作用。

对于自动调制模式识别,国内外已取得不少研究成果^[1-2]。总结起来,识别方式大致分为两类:基于判决理论的识别和基于统计理论的识别。基于判决理论的识别方式依赖于先验概率进行分类判决;而基于统计理论的识别方式主要依靠特征提取和构造合适的分类器进行识别。后者不需要假设条件,易于进行盲识别和算法的高效实现,因而应用范围更广。其中特征提取的研究初

期仅限于对时频特征的分析,随着研究的深入,逐渐引入了谱相关理论、小波理论、矩理论、循环累量和高阶累量^[3]进行调制特征的提取。

而分类器的设计主要是线性分类器、非线性分类投影、神经网络^[4]、支持向量机等理论的应用。统计识别效果的好坏往往取决于特征提取,并且正向着低预处理、低复杂度、盲识别、高识别精度的方向发展^[5]。

本文针对低算法复杂度、较高识别精度、较快识别速度的要求,结合应用需要,从常用的五类调制信号(BPSK、QPSK、FSK、PM、MSK)中有选择性地提取三类特征构成特征矢量,通过加权择多判决进行分类^[6]。在不同的信噪比下的仿真结果表明,本文提出的方法能够较好地分类识别这五类调制模式。

1 系统构成

系统的原理框图如图1所示,共包括三个模块:训练模块、接收提取模块和判决模块。训练模块主要负责扫描载频,以扫描得到的载频为参量,随机产生五类幅度归一化的调制信号,并对每类信号进行三维特征矢量

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(10876035)

网络与通信 Network and Communication

提取,构成 3×5 大小的信号特征矩阵,作为调制模式分类判决的依据。接收提取模块将接收到的信号进行幅度归一化的预处理,特征提取后得到接收信号的三维特征矢量。判决模块主要负责结合信号特征矩阵,对接收信号的特征矢量进行判决,判定识别接收到的信号的调制模式。训练模块和接收提取模块使用同步的系统时钟 CP,以保证两个模块的采样方式一致^[7-8]。

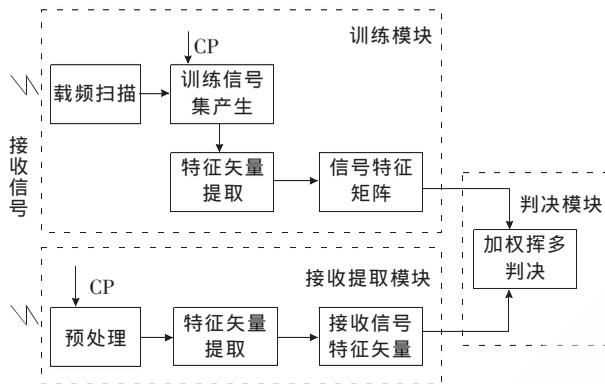


图1 系统原理框图

2 特征矢量与加权择多判决

2.1 三维特征矢量

基于统计理论的识别方式分为特征提取和分类判决两个步骤,提高其识别速度和精度的关键在于如何选择合适的分类特征。一个合适的分类特征不但可以使分类器的设计变得简单,还可以使分类识别的精度和速度大大提高。

本设计在确定所选用的特征量之前,先从时频特征、矩特征和高阶累量中选取了14种,在不同信噪比下进行测试,结合系统对识别速度的要求,最终选取了以下三类特征量作为分类特征。其中 N_s 为采样点数。

第一类特征量:

$$Fmd = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s-1} \left[fr(n) - \sum_{i=1}^{N_s-1} fr(i) \right]^2 \quad (1)$$

式中, $fr(n) = \arctan[f(n)/h(n)] - \arctan[f(n-1)/h(n-1)]$, $n = 1, 2, \dots, N_s-1$ 。 $h(n)$ 为 $f(n)$ 的希尔伯特变换, $fr(n)$ 表征的是信号 $f(n)$ 的瞬时频率, Fmd 表征的是信号 $f(n)$ 频域的起伏程度,以判断是否存在频率调制。

第二类特征量:

$$Gamamax = \max(\text{FFT}(a_{cn}(i))^2 / N_s) \quad (2)$$

式中, $a_{cn}(i)$ 为预处理幅度归一化后的信号, $Gamamax$ 表征的是信号功率谱密度的最大值。

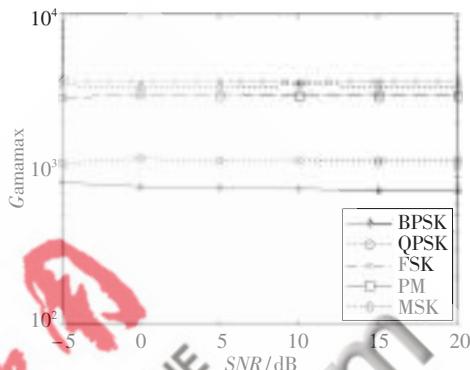
第三类特征量:

$$Aad = \sqrt{\frac{1}{N_s} \left[\sum_{i=1}^{N_s} a_{cn}^2(i) \right] - \left[\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} |a_{cn}(i)| \right]^2} \quad (3)$$

式中, $a_{cn}(i)$ 为预处理幅度归一化后的信号, Aad 为信号绝对值的标准方差,反映幅度调制的信息。

优选的特征量能够在信噪比一定的情况下,将不同

的调制模式区别开来。也就是说,在一定的信噪比下,不同调制模式的信号的该项特征量的数值之间差异很大,可以用来区别不同的调制模式。比如第二类特征量 $Gamamax$ 的性能如图2所示,在每种信噪比下,不同调制模式信号的 $Gamamax$ 特征值都具有一定的区分度,因而可以作为特征量被用来进行调制模式的分类识别。

图2 第二类特征量 $Gamamax$ 性能示意图

三类特征量进行组合,便可得到三维特征矢量 $[Fmd, Gamamax, Aad]$ 。训练模块在不同信噪比的情况下实时训练,产生相应的 3×5 信号特征矩阵。而接收提取模块直接从预处理后的信号中提取出三维特征矢量,直接送到判决模块中进行分类。

2.2 加权择多判决

由上述分析可知,通过单维特征就可以对接收信号进行调制模式分类,但信源信号经过信道衰落和叠加上信道噪声以后,会在幅频特性和相频特性上产生很大的起伏和抖动。所以为了在较大信噪比范围内获得更高的分类精度,有必要采用多维特征矢量。同时,为了提高系统分类的速度,仅筛选出以上三类特征量组成三维特征矢量。

常用的矢量分类器有线性分类器、神经网络和支持向量机等。本系统基于提高分类实时性的考虑,采用了一种加权择多判决的方法,其原理如下。

设信号特征矩阵为 F , 其元素排列为

$$\begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} & f_{25} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} & f_{35} \end{pmatrix}$$

行分别的是 Fmd 特征量、

$Gamamax$ 特征量和 Aad 特征量,列分别代表 BPSK、QPSK、FSK、PM 和 MSK 这五类调制方式。那么, f_{23} 的物理含义就是在当前的信噪比下、调制方式为 FSK 时, $Gamamax$ 特征量的参考值为 f_{23} 。

接收信号特征矢量相对应为 $R = (r_{11}, r_{21}, r_{31})^T$, 表示当前接收到的信号的 Fmd 特征量、 $Gamamax$ 特征量和 Aad 特征量分别为 r_{11} 、 r_{21} 、 r_{31} 。

判决过程具体如下:

(1) 执行 $x = \text{find}(f_{1j} \rightarrow r_{11})$ 、 $y = \text{find}(f_{2j} \rightarrow r_{21})$ 、 $z = \text{find}$

网络与通信 Network and Communication

($f_{3j} > r_{31}$), 即在 F 矩阵的第 1 行寻找最接近 r_{11} 的值的列标, 然后赋给 x ; 在 F 矩阵的第 2 行寻找最接近 r_{21} 的值的列标, 然后赋给 y ; 在 F 矩阵的第 3 行寻找最接近 r_{31} 的值的列标, 然后赋给 z 。

(2) 执行 $x_1 = (\text{varmax} - \text{var}(f_{1x}))$, $y_1 = (\text{varmax} - \text{var}(f_{2y}))$, $z_1 = (\text{varmax} - \text{var}(f_{3z}))$, 完成权重的计算过程。其中 varmax 是 F 中所有元素方差的最大值, $\text{var}(f_{1x})$ 是元素 f_{1x} 的方差。则 x_1 越大, 说明 f_{1x} 的方差越小, 误判的概率也就越小。

(3) 择多判决。如果 $x(y, z)$ 等于 i , 则将 $x_1(y_1, z_1)$ 累加到 $\text{Sum}(i)$ 中, $i=1, 2, 3$ 。 Sum 中最大值的下标即为分类判决的最后输出结果; 数值 1~5, 分别代表 BPSK、QPSK、FSK、PM 和 MSK 这五类调制模式。

这种加权择多判决分类方法只涉及到复杂度较低的加减运算和查找运算, 求方差的运算也可以采用递推的方式进行, 而没有拟合函数、核函数参数的求解过程。所以在运行速度上具有一定的优势。

3 仿真结果与性能分析

本系统的实验仿真平台采用了 Lyrtech 公司提供的 LSP 研发工具。LSP 快速原型开发平台集成了 MATLAB/Simulink 软件仿真环境和 DSP+FPGA 的快速原型开发板, 硬件资源丰富、结构灵活, 有较强的通用性, 适用于模块化设计, 从而能够提高算法效率。同时, 其开发周期较短, 系统易于维护和扩展, 为用户提供了从软件仿真到硬件测试的系统级开发流程。仿真过程中, 调制模式识别主要针对 BPSK、QPSK、FSK、PM 和 MSK 这五类。

信号产生部分的参数设定为: 采样频率统一为 $f_s = 1\ 000\ \text{Hz}$, 采样点数统一为 $N_s = 50\ 000$, 载频 $f_c = 100\ \text{Hz}$ (BPSK、QPSK、PM) 或为 $400\ \text{Hz}$ (MSK), FSK 的两个载频分别设为 $100\ \text{Hz}$ 和 $50\ \text{Hz}$ 。噪声设定为高斯白噪声。信噪比分为 $-5\ \text{dB}$ 、 $0\ \text{dB}$ 、 $5\ \text{dB}$ 、 $10\ \text{dB}$ 、 $15\ \text{dB}$ 、 $20\ \text{dB}$ 六种情况, 进行特征提取和分类识别算法的仿真。为避免单次分类的个体误差, 整个仿真过程采用蒙特卡罗仿真, 每类调制模式在每种信噪比下的特征提取和加权择多分类判决都进行了 5 000 次仿真实验, 测试结果如表 1 和图 3 所示。

表 1 加权择多判决正确识别率表 (%)

调制模式	信噪比/dB					
	-5 dB	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
BPSK	100	100	100	100	100	100
QPSK	99.86	100	100	100	100	100
FSK	81.66	95.94	99.94	100	100	100
PM	99.38	100	100	100	100	100
MSK	81.98	94.74	99.86	100	100	100

由表 1 和图 3 可以看出, 采用 F_{md} 特征量、 G_{amax} 特征量和 A_{ad} 特征量组成的三维特征矢量及加权

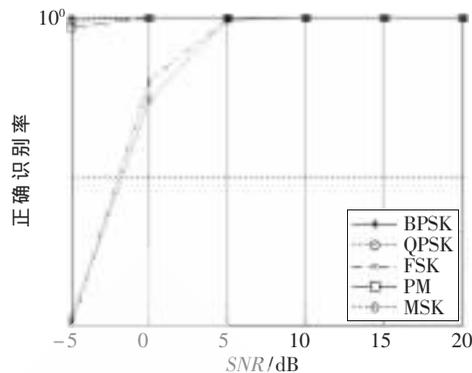


图 3 加权择多判决正确识别示意图

择多判决分类方法, 对 BPSK、QPSK、FSK、PM、MSK 五类调制模式进行识别, 在 $-5\ \text{dB}$ 低信噪比的情况下, 有一定的误判率; 当信噪比超过 $0\ \text{dB}$ 以后, 正确识别率在 94% 以上, 基本能满足对识别精度的要求。

整个系统的计算过程主要由特征提取和加权择多判决两部分构成。如果计算长度为 N , 则特征提取部分 F_{md} 特征量计算的复杂度为 $O(N \times \log N)$, G_{amax} 特征量计算的复杂度也为 $O(N \times \log N)$, A_{ad} 特征量计算的复杂度为 $O(N)$; 所以训练模块和特征提取模块的总计算复杂度为 $O(N \times \log N)$ 。加权择多判决部分的计算复杂度为 $O(3 \times 5)$, 也就是为 $O(1)$ 。因此系统总的计算复杂度为 $O(N \times \log N)$ 。为了提高运算速度可以考虑降低 N , 但 N 过小则会影响特征矢量计算的准确性, 所以在 N 保持一个适当的值时, 系统的实时性可以得到保证。

本文针对软件无线电中的自动调制模式识别中的精度和速度问题, 提出了一种带有参考训练的分类识别结构, 有选择性地设计了一种三维特征矢量和加权择多判决分类识别方法, 以提高调制模式识别的准确性和实时性。对 BPSK、QPSK、FSK、PM、MSK 五类信号在大动态信噪比范围内的仿真, 结果验证了该系统的有效性。对系统计算复杂度的分析说明了提高计算速度的方法和原则。但仍需在低预处理、低复杂度和盲识别方面进一步研究、改进。

参考文献

- [1] DOBRE O A, ABDI A, BAR-NESS Y, et al. Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends[J]. Communications, IET, 2007(2): 137-156.
- [2] 肖为民, 许希武. 软件无线电综述. 电子学报[J]. 1998, 26(2): 65-70.
- [3] CHEN Ji Li, CHEN He Jie. Automatic digital modulation identification basing on decision method and cumulants[C]. Proceedings of 2005 IEEE International Workshop on VLSI Design and Video Technology, 2005. 2005: 264-267.
- [4] PARK Cheol-Sun, KIM Dae Young. A novel robust feature

of modulation classification for reconfigurable software radio [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2006,52 (4):1193-1200.

[5] HOSOYA H, KAMISAWA T, KURODA M, et al. Automatic modulation identification for linear digital modulation[C]. 14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003. 2003:1810-1814.

[6] CHEN Qi Xing, ZHOU Guo Zhong. Demodulation-oriented automatic modulation identification algorithm [C]. 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM'08. 2008:1-5.

[7] 韩国栋, 鄂江兴. 调制参数提取的谱相关方法[J]. 航天电子对抗, 2001(3):34-36.

[8] 李琳, 张尔扬. 软件无线电中的关键技术[J]. 通信电声, 1999(3): 52-54.

(收稿日期: 2010-03-13)

作者简介:

廖小春, 男, 1983 年生, 硕士, 主要研究方向: 软件无线电、自动调制模式识别。

姚远程, 男, 1962 年生, 本科, 教授, 主要研究方向: 软件无线电、无线通信、军事通信。

何叶, 女, 1987 年生, 本科, 主要研究方向: 无线通信。

