

通信信号调制识别技术及其发展^①

何继爱^② 张文启^③

(兰州理工大学计算机与通信学院 兰州 730050)

摘 要 简要介绍了通信信号调制识别的概念、作用及基本方法框架,详细论述了两类调制识别方法——基于似然比判决理论的识别和基于统计模式的识别的原理、特点和发展。考虑到日趋复杂的电磁环境对调制识别的影响,深入分析了复杂通信环境下的调制识别技术的研究进展,包括非高斯噪声下的识别、多径衰落信道下的识别、单通道时频混叠多信号的识别和大动态信噪比下的识别,并指出了调制识别研究的未来发展方向:研究适合非理想信道、单通道时频混叠多信号的识别方法和具有良好大动态信噪比推广能力的识别方法。该研究对软件无线电、军用电子对抗以及民用频谱资源的监测与管理等领域的检测、解调与识别技术有重要研究意义。

关键词 调制识别, 判决理论, 模式识别, 复杂环境

0 引 言

自 1969 年 Weaver 等发表了第一篇研究自动调制识别的论文《采用模式识别的调制类型自动分类》^[1]以来,调制识别的研究在信号的分类特征提取、分类器构造、分类算法设计等方面,均取得大量研究成果。在分类特征提取方面,学者们采用信号的瞬时幅度、相位和频率分布直方图、高阶统计量、循环谱、时频分布、分形等作为分类特征来提取特征参数,例如,Azzouz 等^[2]利用瞬时幅度、频率和相位特征识别不同的低阶数字信号;Swami 等提出了信号的四阶累积量作为分类特征^[3],李彦栓等^[4]通过计算四阶累积量并提取 OFDM 信号与单载波信号的分类特征量,对 OFDM 调制信号进行识别;Sanderson 等^[5]提出一种全盲的基于高阶循环累积量和最大似然检测的调制分类算法;Like 等^[6]通过提取信号的循环谱特征进行调制识别,对信号进行了分类。在分类器构造方面,根据分类准则的不同,研究

出了基于距离的分类、统计分类、机器学习等分类学习方法。常用的分类器有判决树分类器、最小距离分类器、神经网络分类器、支持向量机(support vector machine,SVM)分类器等。针对加性高斯白噪声(additive white gaussian noise,AWGN)信道中复基带模拟调制类型、数字调制类型的联合分类问题,Dobre 等^[7]提出了一种二元判决树分类器。龚晓洁等^[8]利用支持向量机实现了多类调制信号的类型识别。分类特征的选取多种多样,分类器或分类准则也是种类众多。学者们在调制信号识别方面取得了丰硕的成果,为研究复杂通信环境下的调制识别方法提供了理论基础。由于非合作通信的复杂传输环境、新的调制方式不断涌现,以及调制识别本身内在特性、调制识别技术的发展远未成熟,对复杂通信环境^[9](如多径衰落、非高斯噪声、时频混叠等)下的调制识别技术有待更深入的研究。本文从通信信号调制识别基本方法、非理想信道识别、单通道时频混叠多信号识别、大动态信噪比下的识别四个方面进行了阐述。

① 国家自然科学基金(61561031)资助项目。
② 男,1969 年生,硕士,副教授;研究方向:通信信号处理;E-mail: hejiai8695910@163.com
③ 通讯作者,E-mail: vinkizhang89@163.com
(收稿日期:2015-09-10)

1 通信信号的调制识别技术

在一个典型的非合作通信系统中,调制识别是介于信号检测和信息解调之间的一个中间过程,其主要任务是:在完成信号检测及部分参数估计的基础上,对接收机接收到的感兴趣信号的观测数据作适当的处理,并根据某种规则判定该信号属于预先设定的若干种调制形式的某一种,为信息解调或威胁评估、实施干扰等后续非合作通信任务提供必要的信息^[10]。调制识别问题从本质上来说是一种典型的模式识别问题。其基本框架如图 1 所示。

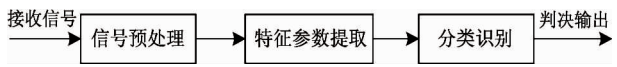


图 1 调制识别方法基本框架

调制识别方法主要由三部分组成:信号预处理、提取特征参数和分类识别。信号预处理部分包括载波同步、频率下变频、噪声抑制以及对信噪比、符号周期、载波频率等参数的估计。特征提取部分是从数据中提取事先定义好的表征信号调制类型的特征,即利用信号处理工具如小波、循环平稳、累积量等提取信号的时域或变换域特征参数。分类识别部分是在特征参数提取的基础上,选择和确定合适的判决规则和识别分类器。

2 通信信号的调制识别方法

调制识别在本质上是一个具有多个未知参量的多元模式分类问题。从信号检测和模式识别的意义上来说,调制识别的方法大致可以分为两类:基于似然比判决理论的识别方法和基于统计模式的识别方法。下面对这两种方法进行了详细介绍。

2.1 基于似然比判决理论的识别方法

基于似然比判决理论的识别方法把调制识别问题视为一个多元假设检验问题,采用概率论和假设检验理论来解决信号的调制识别问题。其特点是,先观察待识别的信号波形,为其赋予某一种候选调制类型;然后通过相似性原则,确定真正的调制方

式。具体来说,该方法的基本思想是:根据信号的统计特性,依据代价函数最小化原则,通过理论分析与推导得到检验统计量,再将它与一个合适的门限进行比较,形成判决准则。最后由判决准则确定输出结果,完成通信信号调制方式的分类识别。其统计量一般多为似然比或者平均似然比的最优解或者次优解。

令信号分类集的每种信号对应一个 $\lambda_k, i = 1, 2, \dots, K, K$ 为不同调制方式的信号种类数。然后将接收序列映射到观测空间 $\mathbf{R}$,并计算与统计观测样本对应的概率函数,然后根据结果判断信号类型。若用于构造似然函数的观测值 $r_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 之间独立同分布,则观测序列 $\mathbf{r} = \{r_n\}_{n=1}^N$ 的似然函数可表示为

$$\Gamma(\mathbf{r} | \lambda_k) = \prod_{n=1}^N p(r_n | \lambda_k)$$
 (1)

其对数形式为

$$L(\mathbf{r} | \lambda_k) = \ln \Gamma(\mathbf{r} | \lambda_k)$$
 (2)

最大似然分类器根据计算得到的似然函数值的大小判定信号类型,当满足条件

$$L(\mathbf{r} | \lambda_j) > L(\mathbf{r} | \lambda_i), j \neq i, i = 1, 2, \dots, K$$
 (3)

时,则判定信号为第 j 种调制信号。识别方法框图如图 2 所示。

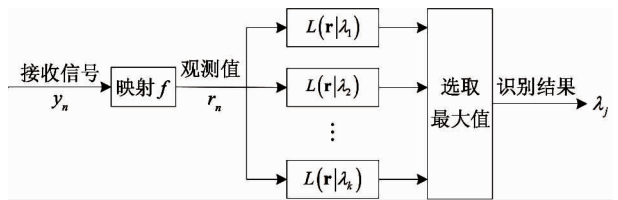


图 2 基于似然比的判决理论识别方法框图

在非协作通信环境下的截获接收机,对数字通信的信息内容全部未知,同时存在信道参数的估计误差,因此构造的似然比函数中通常都含有未知参数。似然比函数通常以信号的某些参数为变量,如统计量的均值、方差、概率密度函数,以及信道参数等。按照对似然函数中的未知参数处理方法的不同,基于似然比判决理论的识别方法可以分为三类。在非合作通信环境中,当接收方将这些未知参数看

作随机变量进行处理时,则是平均似然比检验(average likelihood ratio test,ALRT);若将这些未知参数看作未知的确定参数来处理时,则是广义似然比检验(generalized likelihood ratio test, GLRT);若将未知参数中的一部分参数看作随机变量,另一部分参数看作未知确定参数,则是混合似然比检验(hybrid likelihood ratio test,HLRT)。在实际处理中,学者们为了降低 ALRT、HLRT 算法的复杂度,并考虑到先

验信息依赖性大的问题,对未知参数进行了更精确的估计,这就衍生出了准平均似然比检验(quasi-average likelihood ratio test,qALRT)^[11]和准混合似然比检验(quasi-hybrid likelihood ratio test,qHLRT)^[7]两种方法。

为了便于分析和比较,表 1 中以时间先后顺序为主,列出了一些主要的似然比识别方法的调制识别分类器及应用条件。

表 1 基于似然比判决理论识别方法的识别器及应用条件

作者	分类器	调制类型	未知参数	信道
Polydoros 和 Kim ^[12]	qLLR	BPSK、QPSK	载波相位	AWGN
Hwang 和 Polydoros ^[13]	ALRT	QAM、OQPSK	——	AWGN
Lay 和 Polydoros ^[14]	ALRT、GLRT	16PSK、16QAM、V. 29	信道脉冲响应	AWGN
Sapiano 和 Martin ^[15]	ALRT	MPSK	——	AWGN
Beidas 和 Weber ^[16]	ALRT	MFSK	载波频率	AWGN
Chugg、Long 等 ^[17]	ALRT	BPSK、QPSK、OQPSK	——	AWGN
Schreyogg 和 Reichert ^[18]	ALRT	BPSK、QPSK、8PSK、V29、V32	载波相位	AWGN
Boiteau 和 Martret ^[19]	ALRT	线性调制	——	AWGN
Sills ^[20]	ALRT	PSK、QAM	——	AWGN
Hong 和 Ho ^[21]	GLRT	BPSK、QPSK	信号电平	AWGN
Hong ^[22]	ALRT	BPSK、QPSK	信号电平	AWGN、Rayleigh
Panagiotou 等 ^[23]	GLRT、HLRT	QAM、PSK、V. 39	信道相位	AWGN
Wei 和 Mendel ^[24]	ALRT	PSK、QAM、V. 29	——	AWGN
Ho 和 Hong ^[21]	GLRT	BPSK、UQPSK	——	AWGN
Kang ^[25]	ALRT	QAM	——	AWGN
Tadaion 等 ^[26]	GLRT、HLRT	PSK	——	AWGN
Li、Dobre 等 ^[7]	qHLRT	线性调制	载波频率偏移	AWGN
Dobre 和 Abdi ^[7]	ALRT、qALRT、GLRT、HLRT	PSK、QAM、ASK、FSK	——	AWGN
Dobre 和 Hameed ^[7]	HLRT、qHLRT	MPSK	信道幅度、相位和噪声功率	平坦衰落
Wong 和 Nandi ^[27]	ALRT	数字相位-幅度调制	载波相位抖动	AWGN

2.2 基于统计模式的识别方法

基于统计模式的识别方法也称为基于特征提取的调制识别方法。这种方法把通信信号的调制识别视为一个统计模式识别问题,整个调制识别系统由两个子系统组成:特征提取子系统和模式分类子系统。特征提取子系统的作用是从原始观测数据中提取事先定义好的能表征信号调制类型的特征,可以

看作是从输入信号所在的观测空间到选定的特征空间的一个映射;模式分类子系统的作用是把代表某个信号的特征依据分类准则划分到事先定义好的某一种调制类型,可以看作是从特征空间到类型空间的一个映射,最终完成对接收信号调制方式的识别。基于统计模式识别方法的调制识别算法的基本流程如图 3 所示。

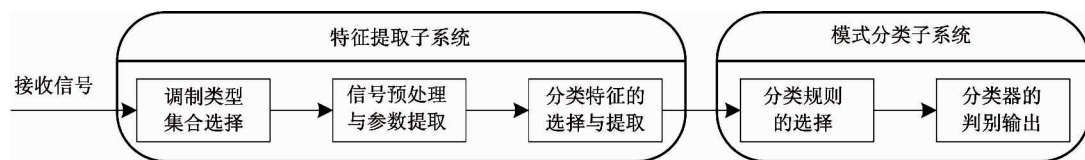


图 3 基于统计模式识别方法的调制识别算法基本框架

2.2.1 不同特征提取方法下的模式识别

统计模式识别分类方法的研究重点是特征提取方法和分类准则的选择与训练。根据特征提取方法的不同,主要调制识别方法如下:

(1) 基于瞬时幅度、频率和相位的调制识别方法

通信信号的瞬时幅度、瞬时频率和瞬时相位等时域特征包含了丰富的调制信息,合理选择和构造它们的各阶统计量是获得调制识别特征的有效途径。在这类研究中,最具代表性的是 Nandi 和 Azzouz 提出的算法^[2],他们利用瞬时幅度、频率和相位的特征识别不同的低阶数字信号。

(2) 基于星座几何特征的调制识别方法

数字调制信号的星座图可以直观地展现各种不同类型调制信号的结构和状态关系,也是反映信号调制类型的重要特征。任何一种数字调制信号都可以用唯一的星座图表示,用这种一一对应关系进行识别非常有效。调制识别中利用星座图对数字信号的调制方式进行识别,实质上是将一般的模式识别问题转化为图形的形状匹配问题。星座图重构中的常用算法有模糊 C-均值(fuzzy C-means, FCM)聚类算法^[18]和减法聚类方法^[19]。

(3) 基于时频分析的调制识别方法

时频分布特征用以描述信号在不同时间和频率上的能量密度或强度,用二维的时间-频率联合分布对信号进行描述,是分析信号调制特征从而识别信号调制类型的一种有效工具。短时傅里叶变换(short-time fourier transform, STFT)、小波变换(wavelet transform, WT)、维格纳威利分布(Wigner-Ville distribution, WVD)等是常见的时频分析方法。其中具有多分辨率分析能力的小波变换,能够较精细地提取信号的时频域细微特征以及瞬时特征,能很好地辨识波形突变信息。Ho 等^[20]最早提出了基于小波变换的调制识别算法,利用离散小波对频带

MPSK 和 MFSK 信号进行单一尺度连续 WT 变换,提取相关识别特征。

(4) 基于码元序列的高阶统计量的调制识别方法

由于码元序列的高阶统计量(higher-order statistics, HOS)能够反映星座图的分布特征,适合于区分幅度相位调制方式,并具有抗噪声等优点,因此基于高阶统计量特征的调制识别算法也是一类有效的分类算法。基于 HOS 的调制识别算法中,最具代表性和影响力的是 Swami A 等提出的基于高阶累积量的数字调制识别算法^[3],该算法利用理想同步和功率归一化后信号的四阶累积量 $C_{S,4,0}$ 、 $C_{S,4,2}$ 作为分类特征,对 PAM、PSK 和 QAM 信号进行类内和类间的区分。

(5) 基于循环平稳特征的调制识别方法

传统的信号分析模型都是以平稳随机过程为基础的,而通信信号经过调制、周期性采样、编码等具有周期平稳性。循环统计量可以很好地刻画通信信号的这种周期性^[21]。Spooner 等^[22]最早利用高阶循环累积量作为分类特征,在共信道多信号环境下实现信号的识别,证明了联立六阶循环累积量组可以实现部分通信信号的识别。除了循环累积量特征,信号的谱相关和谱相干函数也被用于调制识别算法中。Gardner^[23]最早分析了各种调制信号的谱相关函数,利用信号的谱相关特征实现调制分类识别。

(6) 基于分形理论的调制识别方法

分形是一类复杂性颇高、没有特征长度,但具有一定意义下的自相似的图形和结构的总称。分形最基本的特征就是自相似性,即整体和局部之间的相似性。通信信号是一种时间函数,由于通信信号各种调制类型的特点体现在载波信号的幅度、频率和相位上,信号波形包含了它们在几何、分布疏密上的信息。利用分形提取信号分形集的维数作为识别特

征,根据信号波形就能大体上识别它的调制类型。

(7) 基于混沌特征的调制识别方法

混沌理论无法进行长期预测,但可以准确地实现短期预测。通信信号是一种非线性时间序列,调制类型的差异表现为时间序列的差异。混沌理论提出用不同的特征参数对混沌时间序列进行描述,应用这一混沌理论可识别通信信号的调制类型。

2.2.2 不同分类准则下的模式识别

统计模式识别类方法的另一个研究重点是分类准则的选择和训练。根据分类准则的不同,分类学习方法有基于距离的分类、统计分类、机器学习等。在星座匹配识别中,通常采用基于距离的分类器,常用的是欧氏距离测度,还有 K-近邻分类器和模糊逻辑分类器。常用的分类器结构是决策树(decision tree, DT)和神经网络(neural networks, NN)。近年来,基于支持向量机的调制识别也逐渐成为研究热点。决策树分类是一种典型的统计分类方法,采用概率论和假设检验理论解决信号分类问题,多为多级分类结构。神经网络分类是一种统计机器学习方法,它几乎不需要已知样本的统计特性和相关领域的先验知识,也无须确定决策顺序,只要样本具有基本的代表性,就能得出较为精确的规则。调制识别中应用最多的神经网络结构是 BP 网络。

综上所述,基于特征提取的调制识别算法的核心在于提取合适的用于分类的特征量。没有固定的规则指明哪种特征具有最优的分类效果,因为实际中面对的信号很复杂,如接收信号的信噪比很低,信道存在多径衰落,各种噪声的干扰、时频重叠等的影响都可能存在,很难找到一个系统的解决方案。下面针对复杂通信环境中各种不同条件下的调制识别技术做进一步探讨。

3 复杂通信环境下的调制识别技术

随着无线移动通信技术的迅速发展和广泛应用,现代无线通信系统面临的电磁环境日益复杂,频谱资源越来越紧张,干扰的种类越来越多,形式越来越复杂,分布越来越密集和广泛,这些因素导致人们对无线通信系统的性能要求越来越高。如何在多网

并存的复杂无线通信环境中消除多径衰落、时频混叠的影响以及信道干扰、加性噪声、脉冲噪声等,保证各种信号的正确接收和识别,是一个迫切需要解决并具有重要理论价值与现实意义的研究课题。

3.1 非理想信道下的识别方法

非理想信道包括无线通信的信道传输过程中因受到反射、散射、多径等的影响引起的多径衰落或者由干扰带来的色噪声、脉冲噪声等非高斯噪声^[7]。在这些非理想信道中,一些常用的调制识别方法的识别性能会大大下降甚至无法进行准确识别。

3.1.1 非高斯噪声下的识别方法

传统的数字调制识别是假设背景噪声服从高斯分布,以便于对信号进行分析计算,但在实际的无线通信系统中往往存在一些非高斯分布的噪声,这些噪声具有显著尖峰脉冲状波形和概率密度函数较厚拖尾,以美国南加州大学 Nikias 教授为代表的研究者在充分研究各种随机过程模型后,发现 Alpha 稳定分布模型是描述这类随机信号的一种更有效的噪声模型。近年来,已有学者对 Alpha 稳定分布噪声模型下的数字调制识别进行了一定的研究,但是研究还很少。Alpha 稳定分布噪声模型下的调制识别方法主要有两种:(1)将色噪声白化,将其转化为高斯白噪声后再进行下一步处理;(2)利用 Alpha 稳定分布噪声的特性寻找新的特征进行模式识别。文献[24]针对传统的二阶循环统计量在 Alpha 稳定分布噪声中显著退化的问题,提取信号广义二阶循环谱中特定频率和循环频率处的幅值作为特征参量,采用最小误差准则作为分类器算法,实现了信号调制方式识别。文献[25]提出了一种基于广义累积量和广义瞬时相位的数字调制信号识别的新方法。

3.1.2 多径衰落信道下的识别方法

由于非合作通信复杂的通信环境,特别是多径效应的影响,此时高斯信道下使用的数字调制识别方法将失效。因此,多径信道下的数字调制识别是需要解决的一个关键问题。多径衰落信道下的调制识别可以分为三类:(1)对观测数据直接提取对衰落信道鲁棒性较强的特征参数,当前普遍使用循环高阶累积量。文献[26]以信号的六阶和四阶累积量作为识别特征,研究了一种基于高阶累积量的调

制识别算法,在平坦衰落信道下的仿真表明,该算法具有较强的稳健性和实用性。(2)通过盲均衡来补偿信道衰落,对恢复后的数据提取特征。文献[27]针对多径衰落环境下的 MASK、MPSK 和 MQAM 等信号识别问题,提出了一种基于信道盲辨识和盲均衡的算法。(3)利用多天线的空间分集能力来克服多径干扰。文献[28]利用盲均衡技术克服信道的多径效应与系统同步误差,并对信号减法聚类,提取聚类中心与理想星座图模型进行匹配,实现了 MASK、MPSK、MQAM 等调制方式的识别。

3.2 单通道时频混叠多信号的识别方法

目前通信信号调制识别的研究集中于针对单个信号,只是多信号分类的一个特例。而针对单通道时频重叠的两个或多个信号的调制识别需在信号检

测的基础上识别其中每一个信号的调制形式,由于各分量的频域和时域都发生了重叠,且为单天线接收方式,常用的时域、频域、空域滤波和联合时频分析方法针对单通道时频混叠信号的调制类型识别大多失效。近年来许多新的信号处理方法被引入以期解决多信号的调制识别问题,主要有以下两种方法:

(1) 基于信号分离的识别方法,主要应用盲源分离的思想,通过盲分离将问题转化为单信号调制识别。

(2) 直接从多信号混合波形变换域中提取分类特征,其关键在于寻找信号明显可分的特征域。表 2 对常用的单通道混合信号调制识别方法进行了比较。

表 2 常用的单通道时频混叠信号调制识别方法比较

提取特征	特点与局限	作者(文献)
幅度谱提取频谱特征	适用于信号在频域完全可分的情况	Nagy ^[39]
循环累积量	循环频率已知,需同步,对频偏敏感	Spooner ^[32] 、Dobre ^[7] 、陈卫东等 ^[40] 、付琴琴 ^[41] 、吴量等 ^[42]
循环谱的 α 域包络	建立单通道多信号调制识别数学模型,利用特定点处循环谱	高玉龙等 ^[43]
相关谱截面统计量	利用不同信号循环平稳特征	付海涛等 ^[44]
短时平均中心频率和短时平均带宽	基于广义自回归(GAR)建模	陆明泉,肖先赐 ^[10]
四阶累积量	已知信号参数估计干扰信号频偏、相位并进行识别	程汉文,朱雷,吴乐南 ^[45]
循环累积量	对频谱重叠度具有较好的鲁棒性	张丽辉等 ^[46]

3.3 大动态信噪比下的识别方法

在软件无线电和认知无线电领域的应用中,高斯白噪声是影响调制识别算法性能的一个重要因素。实际应用中信号接收机往往工作在大动态环境下(一般 0 ~ 20dB),使得接收机工作时的信噪比难以保持稳定,呈现出实时大范围快速变化的特点,因此调制识别算法必须具有适应这种大动态噪声环境并保持良好识别效果的能力才能有效识别(以下简称噪声鲁棒性)。

一般大动态信噪比下的主要识别方法就是寻找噪声鲁棒性强的分类特征,再按照统计模式识别的基本方法来完成识别。针对基于特征提取和机器学习的识别算法的特点,分类器的抗噪声能力主要体现在特征的选取上面,当所选取的特征在整个大动态噪声环境下都能保持相对稳定而变化不大时,利用这些相对稳定的特征训练出来的识别器也将具有良好的噪声鲁棒性。

4 未来发展方向

从目前的研究现状可以看出,理想环境下的调制识别研究已比较成熟,能够基本满足不同应用条件下信号调制识别的需求。但当前这些方法还只能工作于 5dB 以上的信噪比环境且工程实现上有较大困难,而对于非理想信道、单通道时频混叠多信号以及大动态信噪比三种复杂环境下,可采用的方法又比较单一,因而今后要深入研究适合于非理想信道、单通道时频混叠多信号的识别算法和具有良好大动态信噪比推广能力的识别算法。

当前用于非理想信道、单通道多信号的识别算法大多是基于信号的循环平稳特性,方法较为单一,且无论是利用循环谱还是循环高阶统计量,都存在计算量大、特征难提取的难题,且针对此类算法的 DSP 器件运行效率也无法满足大量数据实时识别的要求,因而此类算法在工程实现上有较大困难。

在多体制通信信号调制识别领域,无线通信接收机通常工作在信噪比大动态时变的复杂环境下。当前传统调制识别方法往往未考虑大动态噪声对接收信号的影响,无法付诸实际应用。特征提取和分类器设计是基于统计模式识别方法的两大步骤,而调制特征的噪声鲁棒性很大程度上决定了调制识别方法在大动态信噪比下的推广能力。经多年发展,调制识别技术的特征提取方法日趋多样化,已能提取数百种调制特征,要获得具有大动态信噪比推广能力的调制特征,就需要研究这数百种调制特征的噪声鲁棒性规律,从中获得具有良好噪声鲁棒性的调制特征集。

另外还要提升算法性能,推进调制识别工程应用产品的研发。现有分类识别算法识别过程有时过于复杂,计算量大,实时处理性能差,造成算法整体效果下降,难以真正应用到工程实践。因此需要进一步提升算法性能,完成算法的工程实现,开发调制识别方面的产品。

参考文献

[1] Weaver C S, Cole C A, Krumland R B, et al. The automatic classification of modulation types by pattern recog-

- inition. California:Stanford University, 1969
- [2] Nandi A K, Azzouz E E. Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals. *IEEE Transactions on Communications*, 1998, 46(4): 431-436
- [3] Swami A, Sadler B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(3): 416-429
- [4] 李彦栓, 罗明, 李霞. 基于高阶累积量的 OFDM 信号调制识别技术. 电子信息对抗技术, 2012, 27(4): 1-4
- [5] Sanderson J, Li X, Liu Z, et al. Hierarchical blind modulation classification for underwater acoustic communication signal via cyclostationary and maximal likelihood analysis. In: Proceedings of the Military Communications Conference, San Diego, USA, 2013. 29-34
- [6] Like E, Chakravarthy V D, Ratazzi P, et al. Signal classification in fading channels using cyclic spectral analysis. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009: 14
- [7] Dobre O A, Abdi A, Bar-Ness Y, et al. Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends. *Communications, IET*, 2007, 1(2): 137-156
- [8] 龚晓洁, 朱琦. 衰落信道下基于支持向量机的调制识别方法. 信号处理, 2010, 26(8): 1234-1239
- [9] 李兵兵, 马洪帅, 刘明骞. Alpha 稳定分布噪声下时频重叠信号的载波频率估计方法. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 868
- [10] 陆明泉, 肖先赐. 基于 GAR 的同信道多信号的调制识别. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, (10): 1676-1680
- [11] Shi Q, Gong Y, Guan Y L. Modulation classification for asynchronous high-order QAM signals. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2011, 11(10): 1415-1422
- [12] Polydoros A, Kim K. On the detection and classification of quadrature digital modulations in broad-band noise. *IEEE Transactions on Communications*, 1990, 38(8): 1199-1211
- [13] Hwang C Y, Polydoros A. Advanced methods for digital quadrature and offset modulation classification. In: Proceedings of the Military Communications Conference, Virginia, USA, 1991. 841-845

- [14] Lay N E, Polydoros A. Modulation classification of signals in unknown ISI environments. In: Proceedings of the Military Communications Conference, California, USA, 1995. 170-174
- [15] Sapiano P C, Martin J D. Maximum likelihood PSK classifier. In: Proceedings of the Military Communications Conference, Virginia, USA, 1996. 1010-1014
- [16] Beidas B F, Weber C L. Modulation classification of MF-SK signals using the higher-order correlation domain. In: Proceedings of the Military Communications Conference, California, USA, 1995. 186-191
- [17] Chugg K M, Long C, Polydoros A. Combined likelihood power estimation and multiple hypothesis modulation classification. In: Proceedings of the 29th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, California, USA, 1995. 1137-1141
- [18] Schreyogg C, Reichert J. Modulation classification of QAM schemes using the DFT of phase histogram combined with modulus information. In: Proceedings of the 21st Century Military Communications Conference, California, USA, 1997. 1372-1376
- [19] Boiteau D, Martret C L. A general maximum likelihood framework for modulation classification. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Washington State, USA, 1998. 2165-2168
- [20] Sills J A. Maximum-likelihood modulation classification for PSK/QAM. In: Proceedings of the Military Communications Conference, New Jersey, USA, 1999. 217-220
- [21] Ho K C, Hong L. Likelihood method for BPSK and unbalanced QPSK modulation classification. Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls. International Society for Optics and Photonics, 2001. 155-162
- [22] Hong L. Classification of bpsk and qpsk signals in fading environment using the ICA technique. In: Proceedings of the IEEE 37th Southeastern Symposium on System Theory, Tuskegee, USA, 2005. 491-494
- [23] Panagiotou P, Anastasopoulos A, Polydoros A. Likelihood ratio tests for modulation classification. In: Proceedings of the 21st Century Military Communications Conference, Los Angeles, USA, 2000. 670-674
- [24] Wei W, Mendel J M. Maximum-likelihood classification for digital amplitude-phase modulations. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(2): 189-193
- [25] Kang S G. Performance of ML modulation classifier for multilevel QAM signals. In: Proceedings of the 2004 IEEE Region 10 Conference, Chiang Mai, Thailand, 2004. 692-695
- [26] Tadaion A A, Derakhtian M, Gazor S, et al. Likelihood ratio tests for PSK modulation classification in unknown noise environment. In: Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005, Saskatoon, Canada, 2005. 151-154
- [27] Wong M L D, Nandi A K. Blind phase-amplitude modulation classification with unknown phase offset. In: Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition, Hong Kong, China, 2006. 177-180
- [28] Mobasseri B G. Constellation shape as a robust signature for digital modulation recognition. In: Proceedings of the Military Communications Conference Proceedings, Atlantic City, USA, 1999. 442-446
- [29] 詹亚锋, 曹志刚, 马正新. M-QAM 信号的调制制式识别. 通信学报, 2004, 25(2): 68-74
- [30] Ho K M. Automatic Recognition and Demodulation of Digitally Modulated Communications Signals Using Wavelet-domain Signature: [Ph. D dissertation]. New Jersey: State University of New Jersey, 2010. 57-68
- [31] Jin Y, Ji H. Robust symbol rate estimation of PSK signals under the cyclostationary framework. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2014, 33(2): 599-612
- [32] Spooner C M. On the utility of sixth-order cyclic cumulants for RF signal classification. In: Proceedings of the Conference Record of the 35th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, USA, 2001. 890-897
- [33] Gardner W A, Brown III W A, Chen C K. Spectral correlation of modulated signals: Part II—digital modulation. *IEEE Transactions on Communications*, 1987, 35(6): 595-601
- [34] 赵春晖, 杨伟超, 马爽. 基于广义二阶循环统计量的通信信号调制识别研究. 通信学报, 2011, 32(1): 144-150
- [35] 刘明骞, 李兵兵, 石亚云. Alpha 稳定分布噪声下数字调制识别新方法. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(6): 1-6
- [36] 冯祥, 李建东. 调制识别算法及性能分析. 电波科学

- 学报, 2005, 20(6): 737-740
- [37] 王彬, 葛临东, 徐立清等. 一种基于信道盲辨识和盲均衡的多径信道调制方式识别算法. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1810-1814
- [38] 王建新, 宋辉. 基于星座图的数字调制方式识别. 通信学报, 2004, 25(6): 166-173
- [39] Nagy P A J. A modulation classifier for multi channel systems and multi transmitter situations. In: Proceedings of the Military Communications Conference, 1994, Conference Record, New Jersey, USA, 1994. 816-820
- [40] 陈卫东, 杨绍全. 基于循环累量不变量的 MPSK 信号调制识别算法. 电子与信息学报, 2003, 25(3): 320-325
- [41] 付琴琴. 一种新的 MPSK 信号调制分类算法. 电子科技, 2012, 25(4): 1-5
- [42] 吴量, 江桦, 崔伟亮. 利用循环平稳性检测和支持向量机的调制信号分类. 应用科学学报, 2013, 31(6): 593-600
- [43] 高玉龙, 张中兆. 基于循环谱的同信道多信号调制方式识别. 高技术通讯, 2007, 17(8): 793-797
- [44] 付海涛, 石荣, 万群. 基于 HOCCS 和 SVM 的单通道时频重叠信号调制识别. 电子信息对抗技术, 2009, 24(6): 14-18
- [45] 程汉文, 朱雷, 吴乐南. 基于累计量的干扰信号调制识别算法. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1741-1745
- [46] 张丽辉, 邱天爽, 李景春等. 一种基于四阶循环累积量的盲源分离方法. 信号处理, 2011, 27(9): 1412

The technology for modulation recognition of communication signals and its development

He Ji' ai, Zhang Wenqi

(School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract

The concept, application and basic framework of the modulation recognition of communication signals are briefly interpreted, and the principles, characteristics and development of the two kinds of modulation recognition techniques, the recognition based on likelihood ratio decision and the recognition based on statistical pattern, are reviewed in detail. In consideration of the influence of the electromagnetic environment being increasingly complex on modulation recognition, the research advancement of the techniques for modulation recognition under complex communication environments is thoroughly analyzed, including the recognition under non-Gaussian noise, the recognition under multipath fading channels, the modulation recognition of single-channel time-frequency overlapped signals, and the recognition under large dynamic SNR, and the recognition for non-ideal channels and single-channel time-frequency overlapped signals, as well as the recognition under large dynamic SNR are considered as the future development directions in the field. The study is of academic significance in detection, demodulation and recognition in the areas of software radio, military electronic countermeasure and civilian spectrum monitoring and management.

Key words: modulation recognition, decision theory, pattern recognition, complexity environment