

通信信号调制的自动识别

E. E. Azzouz A. K. Nandi 著

俞仁涛 李武皋 译校



中国人民解放军 57394 部队

通信信号调制的自动识别

E.E.Azzouz A.K.Nandi 著

俞仁涛 李武皋 译校

中国人民解放军 57394 部队

一九九八年九月

译者的话

通信信号调制的自动识别是信号分析领域的重要组成部分,是近年来迅速发展起来的一门高新技术。以前,识别信号的调制是人借助相关仪器通过分析信号的波形、频谱来完成的;随着微电子技术的发展,人们开始探索利用以计算机为核心的电子设备自动识别信号的调制方式,并取得重大进展,有些成果已经付诸实用。

信号的自动调制识别技术有很高的实用价值。在民用方面,有关当局为了实施有效的无线电频谱管理,常常需要监视民用信号传输,以便对它们保持控制或者发现和监视未注册登记的发射机;此时,信号认证、干扰识别等都涉及调制的自动识别。在军事和国家安全方面,调制自动识别技术应用更为广泛。为了获取通信情报,首先要澄清信号的调制方式,之后才能实施正确解调以及随后的信息处理和分析;在电子战中,为实施电子对抗(ECM)、电子反对抗(ECCM)、威胁探测、报警、目标捕获和寻的等,都需要通过调制识别技术查清相关通信或电子信号的参数和性质。

《通信信号调制的自动识别》的两位作者 E. E. Azzouz 和 A. K. Nandi 分别供职于埃及开罗军事技术学院电子电气工程系和英国格拉斯哥市斯特拉斯克莱德大学(University of Strathclyde)电子电气工程系。本书的内容大部分为两位作者近几年来的研究成果,它详细地介绍了用于通信信号调制的自动识别的两类最新算法,其中一类算法利用判决理论方法,另一类算法利用人工神经网络方法。在每类算法中给出了三组调制识别器。第一组仅用于识别模拟调制信号,第二组仅用于识别数字调制信号,第三组用于在对信号的性质没有先验信息的条件下模拟调制信号与数字调制信号的识别。此外,本书还评述了近年来发表的许多自动调制识别方法。

本书是译者所见到的第一本系统介绍通信信号调制的自动识别的专著,内容比较全面,通俗易懂。这是一本较好的入门

性参考书，既可供实际工作者进修提高，也可作为研究生的教科书。但是，由于自动调制识别是一项涉及国家安全、保密性很强的技术，一些技术细节和最新成果显然不可能公开；所以，本书的技术深度难免有相当的局限性。

本书得以翻译、出版，首先要归功于西安电子科技大学王育民教授，在此，我们衷心感谢王老师的精心指导和无私帮助。另外，岑世梅同志在本书翻译过程中承担了大量的绘制图表工作；张开文、郑林水同志在繁忙工作之余抽出时间阅读了译文的初稿，并提出了许多宝贵修改意见；朱龙根、全建宁、汪宇等同志也给予了许多帮助，在此一并表示感谢。

本书的翻译、审校由俞仁涛、李武皋两人合作完成。由于水平有限，加之时间又紧，译文肯定有错误或不妥之处，恳请读者批评指正。

俞仁涛 李武皋

一九九八年九月于上海

序

自动调制识别是一个迅速发展的信号分析领域。近年来,许多大学和军事研究机构都十分关注自动调制识别算法的研究和开发。任何一个通信情报 (COMINT) 系统主要包括三块: 前端接收机、调制识别器和输出级。在前端接收机这一领域过去已做了大量的工作。输出级的工作涉及信息的提取、记录和利用。而它是以信号的解调开始的, 然而信号解调需要准确知道信号的调制方式。之所以要准确知道信号的调制方式有两个原因: 保留信号的信息内容和决定适当的对抗措施如干扰。

本书旨在覆盖调制识别整个领域, 让读者了解各种调制识别技术。本书的对象是研究人员、研究生以及从事实际工作的工程师。在本书中, 我们认为读者已具备通信论和通信系统等方面的预备知识以及概率论和随机过程方面的背景知识。

本书的大部分内容两位作者近年来的研究成果, 并且严谨地评述了最近发表的许多自动调制识别方法。它包括六章和三个附录。第 1 章为引言, 介绍调制识别的背景与动机, 以及通信信号的若干种分类方法, 这在调制识别过程中相当有用的: 讨论了调制识别过程所面临的问题; 此外还介绍了理解本书必需的数学预备知识以及各种数字和模拟调制的基本概念。

本书的工作可分为两部分。第 2—4 章介绍的第一部分工作是研究使用判决理论方法来解决调制识别问题。第 2 章介绍的内容包括: 用于模拟调制识别的五种调制识别器的回顾, 作者研究提出模拟调制识别的五种新算法, 用于调制识别的全局方法 (global procedure) 和在受带限高斯噪声干扰下各种模拟调制的计算机仿真结果。此外, 第 2 章还介绍了确定实现这些算法所必须的有关特征门限的全局方法, 其中一种识别器的性能评估以及所有识别器的总成功率。

第 3 章的内容包括: 用于数字调制识别的十种调制识别器的回顾, 作者研究提出的数字调制识别的三种新算法, 在受带限高斯噪声干扰下不同类型的带限数字调制信号 (最多为 4 电平) 的计算机仿真结果, 和实现这些识别器所必需的有关门限的确定。本章较详细地介绍了其中一种识别器的性能评估以及所有识别器的总成功率。

第 4 章的内容包括: 用于同时识别模拟与数字调制的六种调制识别器的回顾; 作者研究提出的在对信号的性质—是模拟信号还是数字信号—没有先验信息的条件下模拟与数字调制识别的三种新算法, 实现这些算法所需的有关门限的确定和其中一种识别器的性能评估。

第 5 章介绍本书的第二部分, 它研究利用人工神经网络作为解决调制识别问题的另一途径。为选择调制识别用的最佳人工神经网络结构, 本书进行了大量的工作。考虑了三种类型的网络结构—无隐含层、单隐含层和双隐含层。与判决理论方法相似, 介绍了基于人工神经网络方法的三组调制识别算法。第一组 (单隐含层和双隐含层) 用于识别模拟调制, 第二组 (也是单隐含层和双隐含层) 用于识别数字调制, 第三组用于识别模拟与数字调制。此外, 还介绍了一种减少这些算法训练时间的方法。本章还对比了判决理论算法与人工神经网络算法的性能评估。最后, 第 6 章对本书作一简要归纳, 并提出继续本书工作的若干研究方向。本书最后列出了参考文献。

本书包括近几年作者研究成果的若干材料, 而发表我们论文的出版商允许在本书中复制某些拥有版权的材料, 我们对此表示衷心的感谢。

E. E. Azzouz
A. K. Nandi
1996 年 9 月

英文缩写一览表

ADMRA	模拟与数字调制识别算法
AM	幅度调制
AMRA	模拟调制识别算法
ANN	人工神经网络
ASK 2	2 电平幅度键控
ASK 4	4 电平幅度键控
COM.	复合调制
CW	载波(未调制信号)
DMRA	数字调制识别算法
DSB	双边带
FM	频率调制
FSK 2	2 频移频键控
FSK 4	4 频移频键控
FT	付氏变换
FFT	快速付氏变换
IF	中频
IFT	逆付氏变换
IFFT	逆快速付氏变换
ISB	独立边带
LMS	最小均方
LSB	下边带
MASK	多电平幅度键控
MFSK	多频移频键控
MPSK	多相移相键控
PSK 2	2 相移相键控
PSK 4	4 相移相键控
PSK 8	8 相移相键控
RF	射频

SNR	信噪比
SSB	单边带
Thr.	门限值
USB	上边带

符号一览表

D	调频指数
M_s	每个信号帧中信号段数
N_s	每个信号段中样品数
P	频谱对称性测度
P_{av}	正确判决的平均概率
Q	调幅深度
R	Chan — Gadbois 参数
R_{sn}	某个系数, 用于确定在规定信噪比时加在信号上的噪声量
γ_{max}	归一化中心瞬时幅度的功率密度谱的最大值
μ_{42}^u	归一化中心瞬时幅度的峰值
μ_{42}^f	归一化中心瞬时频率的峰值
σ_a	信号段中非微弱区内瞬时幅度的标准偏差
$\sigma_{a a}$	归一化中心瞬时幅度的绝对值的标准偏差
$\sigma_{a f}$	归一化中心瞬时频率的绝对值的标准偏差
σ_{ap}	瞬时相位的中心非线性分量绝对值的标准偏差
σ_{dp}	瞬时相位的中心非线性分量直接值的标准偏差
O	ANN 的输出判决的个数 (输出层的结点数)
Qs	ANN 的训练对的个数
Ri	特征的个数 (输入层的结点数)
S	对于单隐含层 ANN, 隐含层中结点数
S1	对于双隐含层 ANN, 第一隐含层中结点数
S2	对于双隐含层 ANN, 第二隐含层中结点数
SSE	和平方差

T	ANN 的实际响应
E	误差矩阵
E(i,j)	E 矩阵中第 i 行第 j 列的元素

目 录

第1章 引言	1
1.1 背景与动机	1
1.2 数学预备知识	7
1.3 关于调制技术的一般概念	10
1.3.1 模拟调制信号	10
1.3.2 数字调制信号	16
1.4 小结	19
第2章 模拟调制的识别	37
2.1 引言	37
2.2 先前完成的有关工作	38
2.3 模拟调制信号识别算法 (AMRA)	39
2.3.1 信号段的分类	40
2.3.2 信号帧的分类	43
2.4 计算机仿真	44
2.4.1 模拟调制信号的仿真	44
2.4.2 仿真信号的频带限制	46
2.4.3 噪声仿真与 SNR 调整	47
2.5 门限确定和性能评估	47
2.5.1 有关门限的确定	47
2.5.2 性能评估	53
2.5.3 处理时间和计算复杂度	54
2.6 小结	54
第3章 数字调制的识别	70
3.1 引言	70
3.2 先前完成的有关工作	71
3.3 数字调制信号的识别算法 (DMRA)	75
3.3.1 信号段的分类	75
3.3.2 信号帧的分类	78
3.4 计算机仿真	78

3.4.1 数字调制信号的仿真	79
3.4.2 仿真信号的频带限制	79
3.5 门限确定和性能评估	80
3.5.1 有关门限的确定	80
3.5.2 性能评估	83
3.5.3 处理时间和计算复杂度	84
3.6 小结	84
第4章 模拟与数字调制的识别	98
4.1 引言	98
4.2 先前完成的有关工作	99
4.3 模拟与数字调制识别算法 (ADMRA)	101
4.3.1 信号段的分类	101
4.3.2 信号帧的分类	103
4.4 门限确定和性能评估	104
4.4.1 有关门限的确定	104
4.4.2 性能评估	106
4.4.3 处理时间和计算复杂度	107
4.5 小结	107
第5章 应用人工神经网络的调制识别	118
5.1 引言	118
5.2 ANN 调制识别器的结构	119
5.2.1 预处理	119
5.2.2 ANN 的训练和学习阶段	120
5.2.3 ANN 的试验阶段	124
5.3 模拟调制识别算法 (AMRA)	125
5.3.1 ANN 结构的选择	125
5.3.2 性能评估	127
5.3.3 加快训练过程	127
5.4 数字调制识别算法 (DMRA)	129
5.4.1 ANN 结构的选择	129
5.4.2 性能评估	130
5.4.3 加快训练过程	131
5.5 模拟与数字调制识别算法 (ADMRA)	132

5.5.1 ANN 结构的选择	132
5.5.2 性能评估	133
5.5.3 加快训练过程	134
5.6 两种方法的性能比较	134
5.7 小结	135
第 6 章 总结与建议	159
6.1 逐章总结	159
6.1.1 模拟调制识别算法 (第 2 章)	159
6.1.2 数字调制识别算法 (第 3 章)	160
6.1.3 模拟与数字调制识别算法 (第 4 章)	160
6.1.4 采用 ANN 的调制识别 (第 5 章)	161
6.2 关于今后研究方向的建议	161
参考文献	163
附录 A 与计算瞬时幅度、瞬时相位和瞬时频率有关的数值问题	168
A.1 取样频率的选择	168
A.2 计算速度	169
A.3 信号段中微弱区	169
A.4 相位卷叠	170
A.5 线性相位分量	171
A.6 数值微分	171
附录 B 载波频率估计	172
B.1 频域估计	172
B.2 时域估计	173
B.3 仿真结果	173
附录 C 调制识别的其它算法	176
C.1 模拟调制识别算法	176
C.2 数字调制识别算法	177
C.3 模拟与数字调制识别算法	177

第1章 引言

本书旨在介绍用于通信信号调制自动识别的最新算法，其中一些算法利用判决理论方法，另一些算法利用人工神经网络方法。在每种方法中给出了三组调制识别器。第一组仅用于识别模拟调制，第二组仅用于识别数字调制，第三组用于在对信号的性质没有先验信息的条件下模拟与数字调制的识别。人们发现，若所研究的调制仅仅是模拟调制或者仅仅是数字调制，当信噪比（SNR）为 10dB 时，作者所提出的算法能够区分所考虑的不同调制方式，总成功率大于 97.0%；而倘若对信号的性质没有任何先验信息，即不知道它是模拟调制信号还是数字调制信号，当 SNR 为 15dB 时，总成功率大于 93.0%。

在本章的下面几节中，将介绍有关调制人工识别的问题的定义并作简要说明，从调制识别的角度给出了通信信号的某些特性，还研究了掌握输入射频信号的确切调制在通信情报应用中的重要性。此外，还简要说明无线信道和截听接收机或者截获信号本身的性质给调制识别过程带来的问题。附录 A 较详细地介绍了与本书所提算法相关的数值问题。数值问题关系到实际信号的瞬时幅度、瞬时相位和瞬时频率的计算。

1.1 背景与动机

在空间传播的采用不同调制方式和不同频率的通信信号散布在一个很宽的频带上。在许多应用中，通常需要识别和监视这些信号，例如民用的信号认证、干扰识别和频谱管理。民用当局可能要监视民用信号传输，以便对它们保持控制或者发现和监视未注册登记的发射机。另一些应用则是军事目的，例如电子战、监视和威胁分析。在电子战应用中，电子支援（ESM）系统作为实施电子对抗（ECM）、电子反对抗（ECCM）、威胁

探测、报警、目标捕获和寻的等所需的一个信息源发挥重要作用。

过去, 通信情报系统依靠操作人员解译所测量的参数(调制人工识别), 以对不同的发射体分类。在调制人工识别中, 图 1.1 所示的搜索设备为搜索操作员提供如下四类信息: 1) 中频时间波形, 2) 信号的频谱(瞬时谱和平均谱), 3) 瞬时幅度(鉴幅器输出)和瞬时频率(鉴频器输出), 4) 信号的音响。这些信息的作用如下:

1. 中频时间波形用于研究信号的时间特性, 它也有助于判定是否在发射信号。中频波形可显示在示波器上。

2. 谱分析用于研究中频频率上信号频谱。搜索信号时, 应使接收机中频带宽尽可能的宽, 以便在频谱分析仪的显示器上能够观察到所关注的频段上的全部活动。之后只选择一个信号进行调制识别和进一步分析。谱分析有助于判定信号活动和分析多通路信号, 以及判定信号是否有载波分量。此外, 谱分析还可用作识别致性发射机的模板。

3. 调幅(AM)和调频(FM)解调器的输出显示, 可用于显示信号中调幅成份和调频成份。调幅解调器的输出显示表示载波的幅度变化, 因而可用来分析调幅和多电平幅度键控(MASK)。调频解调器的输出显示表示信号的频率变化, 因而可用来分析调频、多频移频键控(MFSK)和多相移相键控(MPSK)。调幅和调频解调器的输出可显示在双线示波器上。

4. 将耳机接到解调器进行听辨可进行音频分析。音频分析十分有效, 因为操作员能够很快发现所研究的信号的周期性速率, 如基音的变化。此外, 耳机输出的声音还有助于调整示波器的时基。

近来已研制了若干种能够自动识别输入射频信号调制方式的调制识别器或调制分类器。在最老的调制识别器中, 有一种〔5〕使用一组解调器, 为每种调制设计一个解调器。操作员通过察看或者听辨解调器的输出可以判定接收信号的调制方式。但是, 这种识别器要求信号持续时间长和操作员技术高超。如果在解调器输出端引入一组智能化判决算法, 如图 1.2 所示, 这种识别器可实现自动化。但是, 这种识别器的实现太复杂,

需要的计算机存储量太大。此外,能识别的调制类型的数量取决于所用解调器的数量。

调制自动识别比调制人工识别更有效,因为将调制自动识别器与电子支援接收机(包括能量检测器和测向机)结合一体,从而提高了操作员监视所关注频段上各种信号活动的能力和效率。所以在先进的电子支援系统中,操作员被复杂的电子设备所取代。这些电子设备的功能是利用对方的电磁发射来自动地收集情报信息。任何一个监视系统的主要目的都是识别威胁,其方法是将所截获的发射体的参数与一系列参考特性或信号分类参数进行比较。信号调制方式是其中一个重要参数。

在通信情报应用中,任何监视系统一般包括三大块:前端接收机(信号活动检测和下变频)、调制识别器(特征提取和分类)和输出级(常规解调和信息提取)。前端接收机有若干种型式,如信道化式、声光频谱分析仪式、瞬时频率测量式、扫描超外差式和微扫描超外差式,详情可见文献[1]—[3]以及它们所援引的参考文献。输出级要完成多项功能,这些功能主要与信息提取、记录和利用有关。但在完成这些功能之前要进行信号解调。一旦准确判定所截获信号的调制方式,随后输出级所完成的功能都是非常传统的功能,但不一定是不重要的(如密码破译)。所以,调制识别器是最关键的功能块。任何调制识别器所需的先验信息是信号带宽,带宽可由前端接收机中的能量检测器确定。能量检测器、调制识别器和参数估测器所获得的信息,如载波频率、信号带宽、比特速率、调制方式……都汇总一块,以实施信号解调和信息提取。

在通信情报应用中,调制识别极端重要。首先,如果将信号加到不合适的解调器中,会部分或全部损坏信号的信息内容。其次,掌握确切的调制方式有助于识别敌方的威胁和决定适当的干扰波形。

在下面三章中我们将回顾在1984年到1995年期间发表的关于调制识别的论文[4]—[24],其中第一批论文于1984年发表的。由于该题目的保密性,许多细节在现有的参考文献里并没有提及。按照调制方式,现有的参考文献可分成三类。第一类包括[7],[10],[15],[19]和[23],仅仅研究模拟调

制的识别。第二类包括〔4〕,〔9〕,〔13〕,〔14〕,〔17〕,〔18〕,〔20〕,〔21〕,〔22〕和〔24〕,仅仅研究数字调制的识别。第三类包括〔5〕,〔6〕,〔8〕,〔11〕,〔12〕和〔16〕,研究在没有先验信息的情况下模拟与数字两类调制的识别。值得注意的是,在有关模拟调制识别的第一类参考文献里,没有一份文献研究了残余边带(VSB)以及复合调制。在有关模拟与数字调制的识别的第三类参考文献里,也没有涉及本书所研究的所有的有名的调制方式,而仅涉及其中一部分。此外,利用实际信号对文献中给出的若干调制识别器进行了测试,如〔6〕,〔11〕和〔12〕。

在现有的文献里,处理调制识别问题一般采取两种方法:

1) 判决理论方法, 2) 统计模式识别方法。在判决理论方法中,采用概率和假设检验理论来系统地表述调制识别问题。在统计模式识别方法中,分类系统分成两个子系统。第一个是特征提取子系统,其功能是从接收数据中提取预先定义的特征,也就是减少模式表示的维数。第二个是模式识别子系统,其功能是指示信号的调制方式。模式识别工作包括两个阶段: 1) 调整分类器结构的训练阶段, 2) 给出分类判决的试验阶段。现有文献中的调制识别器都是按照上述某一种方法研制的。也有一些识别器综合运用了以上两种方法。

本书提出了调制识别的另一种方法,即利用人工神经网络(ANN)。这种方法主要包括三步: 1) 预处理和特征提取; 2) 调整分类器结构的训练阶段, (确定所选网络的权值和偏值); 3) 确定所选网络的性能评估的试验阶段。判决理论方法和人工神经网络方法都具有特征提取简单和计算速度快等特点。此外,这两种方法所需要的计算机存储量比模式识别方法少。所以,在实时分析中要采用判决理论方法和人工神经网络方法。

另外,有五种技术方法可用于解决调制识别问题,具体是 1) 谱处理; 2) 瞬时幅度、相位和频率参数; 3) 瞬时幅度、相位和频率直方图; 4) 以上三种方法的综合; 5) 通用解调器。本书的工作主要用第二种技术方法,其原因是这种方法简单,而且与其它方法相比需要存储器较少和速度更快。所以,本书所提出的识别器可付诸实际应用并适合在线分析。