

综合电子战新技术新方法

桑炜森 顾耀平 编著

图书在版编目(CIP)数据

综合电子战新技术新方法/桑炜森,顾耀平编著-
北京:国防工业出版社,1996.2
ISBN 7-118-01479-6

I. 综… II. ①桑…②顾… III. 电子战 IV. E869

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 11232 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 314 千字

1996 年 2 月第 1 版 1996 年 2 月北京第 1 次印刷

印数 1-3000 册 定价:27.50 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

电子战是一门多元性新兴交叉学科,综合一体化是其最新进展。新一代电子战系统,无论系统整体或系统各部分,都涉及多种高新技术问题,是现代高新技术成果的结晶。在目前国际上以高技术为核心的激烈军备竞赛环境中,靠技术引进很不现实,必然被动落后。为了加强电子国防,在未来战争中立于不败之地,必须励精图治、自力更生,善于及时引进和采纳当代最新科技成果,开创有中国特色的电子战技术道路。新技术革命对我们既是压力又是动力,大量丰富的新技术、新方法、新课题等待我们开发。根据多年来电子战新技术开发研究心得体会,深感作一总结介绍的必要性。1992年春国防科工委批准、原机械电子工业部下达“综合电子战新技术新方法研究”任务,促使我们抓紧时间进行了本课题的研究。

综合一体化电子战涉及的新技术论题虽然很多,但主要的、发挥主导作用的是以计算机技术应用为核心的现代信息处理技术。所以,作为尝试,结合我们“电子战新技术”开发研究工作,编写了本书。在本书中,我们充分注意了科学性、实用性和与现代数学、现代系统工程的结合,以便向读者介绍这批已渗入电子战领域但尚未被人们完全掌握的新技术、新方法。相信它能为我国的电子战技术的发展发挥作用。

本课题一直得到上级主管部门和电子部二十九所领导的关怀支持,得到二十九所情报研究室的全力协助。正当课题进行期间,不幸查知编辑人员桑炜森同志遭到癌魔袭击,幸得原四川医学院王朝俊教授、肖乾虎教授,锦江医院雷有成主任及其同事们的全力救治,使之得以重新站起来继续完成课题工作。1993年1月雷医生曾说:“我们不仅要为你治好病,还要让你能继续工作,为国防现代化做出贡献。你们的工作成果也是我们抗癌战线人员共同的光荣!”的确,本报告是所有各方面人员无私奉献的集体成果,特向他们表达衷心感谢!

在此我们也向书中引用其参考资料的各位作者表示诚挚谢意,他们的工作是本课题的基础。

由于时间紧迫,错漏及不妥之处难免,恳请同行专家和广大读者不吝指正。

编 者

1993年10月

国防科技电子战重点实验室
电子工业部第二十九研究所

目 录

第一章 绪 论	()
§ 1.1 新技术革命与现代战争	()
§ 1.2 综合电子战与高新技术	()
§ 1.3 研究目标	()
第二章 模式识别技术	()
§ 2.1 模式识别技术概况	()
§ 2.2 模式识别原理和方法	()
§ 2.3 雷达信号模式识别方案示例	(11)
§ 2.4 通信信号模式识别方案示例	(20)
§ 2.5 技术开发前景	(37)
第三章 辐射源信号特征提取	(38)
§ 3.1 模式特征提取基本概念	(38)
§ 3.2 现行系统的方法及其弱点	(39)
§ 3.3 新体制雷达及其特征	(41)
§ 3.4 模式依据正交归一化函数系展开	(48)
§ 3.5 辐射源信号频谱特征	(50)
§ 3.6 实时频谱分析方法	(54)
§ 3.7 时频特性分析	(60)
§ 3.8 雷达信号特征的统计分析方法	(67)
§ 3.9 辐射源信号瞬时波形分析	(69)
§ 3.10 对复杂雷达信号的综合分析	(75)
§ 3.11 通信信号特征及其模式特征提取	(77)
§ 3.12 技术开发前景	(81)
第四章 多谱传感器技术	(82)
§ 4.1 基本概念	(82)
§ 4.2 传感器选配	(82)
§ 4.3 多传感器数据融合	(86)
§ 4.4 现代数据融合技术类型	(87)
§ 4.5 多传感器数据融合算法示例(一)	(90)
§ 4.6 多传感器数据融合算法示例(二)	(100)
§ 4.7 技术开发前景	(106)
第五章 人工智能技术	(107)
§ 5.1 人工智能基本涵义	(107)
§ 5.2 人工智能与专家系统	(108)
§ 5.3 专家系统设计要领	(111)

§ 5.4 专家系统组成模式	(115)
§ 5.5 AI 技术的电子战应用	(118)
§ 5.6 专家系统应用示例	(121)
§ 5.7 人工神经网络应用价值	(125)
§ 5.8 技术开发前景	(131)
第六章 不确定性数学方法	(133)
§ 6.1 问题由来	(133)
§ 6.2 不确定性度量	(134)
§ 6.3 不精确推理模型	(139)
§ 6.4 似然推理	(145)
§ 6.5 非数值式不精确推理	(147)
§ 6.6 应用示例	(152)
§ 6.7 技术开发前景	(153)
第七章 无源定位技术方法	(155)
§ 7.1 基本概况	(155)
§ 7.2 无源测向定位	(155)
§ 7.3 无源测时差定位	(162)
§ 7.4 测向测时差定位	(166)
§ 7.5 无源精确定位技术	(168)
§ 7.6 有源/无源协同定位	(195)
§ 7.7 开发研究前景	(200)
第八章 电子战系统工程简介	(201)
§ 8.1 系统工程基本概念	(201)
§ 8.2 电子战系统工程的必要性	(203)
§ 8.3 电子战系统工程的目标和任务	(205)
§ 8.4 复杂大系统的特点及其研究方法	(207)
参考资料	(210)

第一章 绪 论

§ 1.1 新技术革命与现代战争

我们所处的时代是新技术革命洪流滚滚推进的新时代。本世纪以来,特别是第二次世界大战以来,在人类几千年文明史的基础上,科学技术发生了划时代意义的变化,一系列影响深远的科学、技术成果不断涌现。1942年,美国建成世界上第一个原子能反应堆;第二次世界大战期间,运筹学原理开始出现,以后产生了现代系统科学、系统工程理论;1946年,世界上第一台电子计算机问世;1948年,第一个半导体晶体管研制成功;1956年,人工智能概念首次出现;1957年,第一颗人造地球卫星上天;1958年,第一块半导体集成电路诞生;1960年,激光技术发明;1969年,阿波罗登月计划实现;1971年,世界上第一台微处理机投入使用……,在它们的带动和影响下,现代数学、现代计算机应用技术、电子技术、信息技术、航天技术……,日新月异;新技术、新科学、新知识、新方法层出不穷。它们互相促进,相映生辉,构成了当代新技术革命的主旋律。第二次世界大战以来的几十年,是人类历史上科学技术大飞跃、大丰收的几十年。这几十年科技成果之多,技术进步之快,新技术新成果推广应用周期之短,对国民经济、国防建设影响之深远,均属空前。据统计,迄今为止,人类科学知识长河中四分之三是本世纪50年代以后才创立的。19世纪,科学知识大约每50年增加一倍。本世纪初,大约每30年增加一倍。60年代,每10年增加一倍。进入80年代,则每3年就增加一倍。目前加速度自然更快,全世界每天约有7000篇新的科技论文问世,科技信息年上升百分之四十。这种几何级数式的增长令人眼花缭乱,比以往任何时代都惊心动魄。面对这雄伟的世界性技术革命浪潮,自然地提出这样一个问题:我们该怎么办?80年代以来,以高科技为核心的国际竞争已经全面铺开,高技术战略大旗环球飞舞、叱咤风云,这对我们既是压力,也是动力。军工部门尤其如此。自古以来,各种新科技成果几乎无例外地总是优先用于军事目的,用于改善武器装备,而且高科技也总是围绕军事运用的需要而研究、而发展的。历史事实无可辩驳地证明,谁拥有先进的科学技术基础,谁就拥有先进的武器装备,就可望在战争中争取主动、立于不败之地。美苏两霸曾经展开激烈的军备竞赛,前苏联在其中占数量优势,美国则对之以质量制胜,着力发展高新技术,改善武器装备战术技术性能。实践业已证明,美国这一决策是正确的。

在目前这次技术革命洪流中,最具影响力的是电子技术、信息技术、生物技术、材料技术、能源技术。其中发挥主导作用的是电子技术、信息技术,所以很多人又将当今技术革命称为“信息革命”。反映到军事上,即一切军事装备、军事行动电子化、信息化,彻底改变了现代战争作战面貌。在现代战场上,军事卫星已使人们可以“眼观六路,耳听八方”,随时洞察全球;精密制导武器已使人们可以千里之遥随心所欲“指点打点”;自动化作战系统(C³I)已使人们可以坐镇统帅部指挥控制“天涯海角”前沿部队有效行军作战;电子战装备则使人们可以有效地扼制或破坏敌方所有军事电子装备的实战效用。近20年历次战争经验已经确凿表

明,任何现代战争必然主要是电子战争,即以电子战装备为一方,以 C³I、精密制导武器及其它军事电子装备为另一方,相互之间所展开的“殊死”斗争。为了保卫国家领土主权,防止外来入侵,必须树立“电子国防”观念,首先确保电子技术、信息技术优势,增强电子战实力。其前提则在于雄厚的高、新技术实力。所以,作为电子战工作人员,不仅应当“埋头拉车”,同时也应“抬头看路”,密切注视当今世界新技术革命动向,顺应时代潮流,善于引进和应用现代最新科技成果,占领“制高点”,促进我国电子战技术更快发展。

§ 1.2 综合电子战与高新技术

现代战争是高技术战争,电子战是其中主导部分,电子战设备则是电子战的主要作战手段。自电子战问世至今,电子战设备已经经历过单机→系统→组合系统等几个发展阶段,现正向综合一体化电子战系统发展。早在 1905 年日俄战争期间,电子战手段就已开始使用,不过当时只是一种偶然事件,未形成固定作战观念。第二次世界大战期间,随着雷达系统陆续装备部队,电子战也正式提上战争日程。但那时的电子战设备比较简单,只具单一功能,只能“一对一”式地作战。第二次世界大战以后,人们对电子战重要性的认识几起几伏,电子战技术处于停顿状态,长期未得发展。60 年代中期越南战争之后,实战需求迫使人们重新认识电子战的重要性。为了适应紧迫需要,美国军方临时拼凑了一些电子战系统,后期更出现了多功能组合式电子战系统。这两类系统构成 70 年代电子战技术发展主流。其中组合式系统规模较大,主要是尝试以战术飞机平台为单位,将机上各种电子战设备联合在一起。有人也将它称为“综合”电子战系统。但这种“综合”是原始的,组合式系统中各子系统的功能、结构依然相互分离,“综合”在很大程度上只是统一解决装配、动力、致冷、天线分布、座舱布局之类外围问题,整个系统的体积、重量仍然笨重,耗资依然很多,系统效费比依然很低。真正的综合一体化是 80 年代以后在航空电子系统综合一体化的启示和影响下才开始出现的。这里,“综合”不再是简单的“堆积”,而是从系统论证开始,从系统设计入手,实现高度的功能和结构性综合,将作战任务范围内所有电子战设备有机地融成一个整体。这里,多个功能相同或不同的电子战设备综合的结果,将大大增强系统作战效能,提高效费比。其结果超过各自能力的总和,实现 $1+1>2$,而不是 $1+1=2$ 。综合在一起的子系统越多,效果就越好。

至今,关于电子战设备综合一体化的形式、范围、规模、要求等等,并无统一的严格规定。从实际需要出发,已经出现了电子情报侦察传感器综合一体化,以平台为单位的电子战设备综合一体化,以战区为单位的电子战设备综合一体化等。无论哪一级别、哪种规模的综合一体化电子战系统,“综合”的主要目标都在于:增强任务性能,提高效费比,改善系统可靠性、可使用性、可维护性,并在增强系统战术技术性能同时,大大减少系统体积、重量,提高电子战平台在任何恶劣战场环境条件下的生存能力。以传感器综合为例,按照美国正执行中的计划,仅在一架战术飞机平台范围内,实现传感器综合的结果,可望使信息采集传感器总费用降低 60%,可望仅用 11~13 副天线/孔径就执行目前 F-4G 野鼬鼠电子战飞机上需 44 副天线才能执行的任务,可望仅用 2~3 架多功能战术飞机就完成目前需 7~9 架各型作战飞机才能完成的战斗职责,可望仅用目前传感器造价和体积的四分之一将整个系统可靠性提高 10 倍,效益是十分可观的。

无论哪一级别、哪种规模的综合一体化电子战系统,都具备以下一系列独特特性:

1. 技术特性

多频段频域覆盖;全方位、宽正面、大纵深空域覆盖;瞬时展开;高灵敏、宽动态、大功率;超高数据流量;高速数字信息联通;战术信息综合一体化处理;高密度复杂电磁环境自适应能力;快速技术更新能力。

2. 战术特性

作战对象多样化、多频段化;响应时间快速实时;实战能力完备;战斗职能多功能化;对战斗结局影响极大。

3. 系统特性

多层次/体系结构;超大规模;模块化、通用化、易维护,可扩充、完善;高度的结构、功能综合一体;资源共享;整机综合控制、管理。

电子战技术本身是一门综合性学科。综合一体化电子战系统是在认真总结研究现代兵器发展规律的基础上构成的一种新型武器系统,是现代高新科技成果的结晶。无论系统整体或系统各个部分,都存在一系列高新技术课题,而且是战略性敏感课题,属军事保密之列,靠国外技术引进可能性既小,又必然被动、落后。为了促进我国电子战技术大飞跃、大发展,在激烈的国际竞争中“自立于世界民族之林”,我们必须大力加强现代高新技术研究,自力更生,开创有中国特色的电子战技术途径。

§ 1.3 研究目标

综合一体化电子战涉及的新技术新方法虽然很多,但其中最关键的、发挥主导作用的,是以计算机技术应用为基础的现代电子战信息处理技术。我们围绕这一主题,结合 10 年来电子战技术开发研究的实践体会,对若干可望在综合一体化电子战系统中推广应用的新技术、新科学问题作了初步总结,分章分节介绍。

由于篇幅所限,本报告各章只限一般概念、原理、算法介绍,未及深入模拟试验研究。为促使各项技术早日在电子战系统中发挥效用,深入的基础性试验研究工作是非常必要的。

第二章 模式识别技术

§ 2.1 模式识别技术概况

模式识别(pattern recognition)是人脑最基本的智能活动之一。在日常生活中,人们经常在执行“模式识别”,借此对客体目标进行辨识和分类。不过这类识别行动对于人类基本上是无意识的、本能式的,其识别机理还有很多是未知的。研究人脑模式识别的机理,是正在迅速发展的“认知科学”的一个重要组成部分。

工程技术领域正在开发和应用的模式识别技术,是人们对于人脑智能模式识别的学习和模仿。它是与现代电子技术,特别是现代数字计算机科学技术密切相关的一种高新技术。具体地说,就是借鉴人脑智能模式识别的原理和方法,在研究人脑基本识别模型的基础上设计建立机器识别模型,利用现代电子计算机在各种仪器、设备内对环境中的客体目标自动进行识别和分类。它是“信息科学技术”这一广泛领域一个重要的分支,致力于信息精选、压缩和分析处理。人脑对于客体目标的识别和分类主要是利用光学信息和声学信息,以“五官”做感知器官,从环境中收集这些信息,经过大脑复杂而敏捷的分析加工而实现的。工程技术中应用的模式识别技术则“青出于蓝而胜于蓝”,不仅可以利用光学信息、声学信息,也可利用客观存在的其它信息,采集信息的敏感手段也越来越多,然后在计算机中自动对这些信息进行加工处理。

关于“模式识别”,还没有统一的、人们公认的定义。我们觉得,1986年原华中工学院周冠雄老师在《计算机模式识别》一书中关于“模式识别”的定义是可取的:“模式识别是研究人类识别能力的数学模型,并借助电子计算机在技术上实现其模拟的科学”。

自本世纪50年代“人工智能”问世以后,“模式识别”方面的研究活动也逐渐活跃起来。70年代计算机技术飞快发展,更促进了模式识别技术的快速发展,走上了学科化发展的道路,形成了一个专门的新兴电子技术领域。到现在为止,利用计算机自动实现模式识别,吸引了各界人士的极大重视,已在许多工程技术部门获得广泛应用,包括医疗诊断、生物分类、自然语言理解、文字识别、地质勘探、自动检测、遥感图象辨识……。在军事电子领域,模式识别技术也成为“自动目标识别(ATR)”的基本工具,美、英等先进技术国家都在大力研究,雷达探测、水声探测、卫星侦察等都已运用它,电子战领域自然也不例外。早在10多年前,朱德君教授在“雷达对抗系统若干新课题的探讨”一文中,就将“模式识别”列为电子战新技术方法之一。80年代以来,国内不少电子战科技人员先后在雷达对抗模式识别、通信对抗模式识别方面做了不少研究工作,取得了一些可喜成果。但总的说,至今有关电子战模式识别技术研究工作开展得还不普遍,应用得还不够。

为促进模式识别技术在电子战领域及时开花结果,本章简要介绍所涉及的基本原理和已经获得的一些成果。

§ 2.2 模式识别原理和方法

一、原理框架

到目前为止,已经开发或正在开发的模式识别技术,大体可分为以下四大类:

- (1) 以“模式”的特征矢量表述为基础的统计模式识别技术;
- (2) 以“模式”的图形基元和链语言表述为基础的句法结构模式识别技术;
- (3) 以“模式”的客体目标间关系的框架或语义网络表述为基础的人工智能模式识别技术;
- (4) 以模糊数学为基础的模糊模式识别技术。

几种技术方法的识别对象、模式表述方式、应用范围各不相同,但总的说,大都遵循某种共同的理论框架。

英文模式识别的识别“recognition”一字起源于“cognition”,具有“感知”之意。“recognition”则意味着“再感知”。顾名思义,也就是说,人们所识别的“模式”,一般都与此前已具备的“感知”有关,或与人们的“经验”和“学习”有关。以初学字母“A”为例,人们第一次见到“A”字并不会立即认识它,但通过反复观察、学习、记忆,积累了经验,其后即使再见到一个写得不够正规的“A”字(即,存在模糊、不确定性),人们也能判断读出它是“A”,而不是别的字母。借助计算机实现的自动模式识别,是人脑模式识别方法的学习和移植,过程大体类似,其基本点是,在研究和建立已知论域各类目标的标准“模式”基础上,借助一定的准则和算法,辨识待分类客体目标属于其中哪一类。设计和研制一个完善的模式识别系统,大体需要完成以下几个环节的工作:

(1) 被识别客体目标的模式化描述。包括感兴趣的论域范围内客体目标全体的描述,和每个客体目标的描述。其基本点在于:每一种客体目标都应具备一个规格化的能确切地代表它的类属性特征。

(2) 模式预处理——特征提取。收集来自客体目标的信号样本,经过精炼压缩,从中提取能准确表征客体目标的本质信息,即“模式特征”。

(3) 模式记忆存储。其结果获得雷达侦察设备、通信侦察设备中的“识别数据库”,存储着论域中所有标准模式。

(4) 研究确定模式识别的效益函数(即,统计判决检验量)和判别准则。它们是系统执行分类识别的数学基础。

(5) 设计识别处理算法,编制计算机软件程序。

(6) 利用“训练模型集”开展“系统学习”活动,调试训练和完善系统。

(7) 利用“检验模型集”测试和检验系统性能。

借助这套方法设计和建造的系统,称为模式分类器或目标识别分类器。

在运用已建立的系统去识别未知客体目标时,大体需完成以下几个环节的工作:

- (1) 信息采集——使用侦察传感器采集来自未知目标的信号;
- (2) 特征提取——经过预处理从未知信号中抽取表征未知目标的“模式特征”;
- (3) 模式分析——执行识别分类处理,推断客体目标所属模式类别;
- (4) 性能估价——估计识别分类特性,如正确识别概率,识别置信度,等等;
- (5) 系统学习——将新发现的客体目标“模式”自动增添到识别数据库中。

9610112

执行这套处理过程的模式识别系统组成框图如图 2.1 所示。

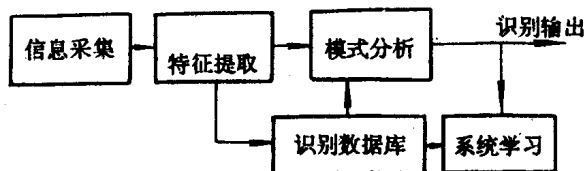


图 2.1 模式识别系统组成框图

实际应用时往往不一定把所有这些部分都完全容纳于一个系统之内。

在所有几种模式识别技术方法中,目前军事电子设备用得最多的是统计模式识别技术,其次是模糊模式识别技术。本章主要介绍这两种技术。

广义而言,所有模式识别技术都可以归于人工智能范畴。不过本章所提“人工智能模式识别技术”是更专门性的一种新技术方法,这里暂未介绍。

特征提取是模式识别技术中关键问题之一。它是众多现代电子技术分支的共同基础。由于问题本身比较复杂,电子战领域内还涉及信号“去交错”处理等一系列复杂问题,所以另用一章进行专门介绍。

二、统计模式识别技术

统计模式识别技术是以统计决策理论和线性空间理论为基础设计、研制的自动模式识别技术方法。每一类客体目标类别 A 都用一个特征矢量 U_A 来表述:

$$U_A = [u_{a1} \ u_{a2} \cdots u_{ai} \cdots u_{an}]' \quad (2.1)$$

U_A 中的每一个分量 u_{ai} 都是表征客体目标 A 的一个独立特征参数:

$$u_{ai} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

感兴趣的问题中客体目标的全体,则用客体目标模式类别的全集合:

$$U = (U_1, U_2, \cdots, U_J, \cdots, U_N) \quad (J = 1, 2, \cdots, N) \quad (2.2)$$

或用论域 Ω 来表述:

$$\begin{aligned} U_J &\subset \Omega \\ U &\subset \Omega \end{aligned} \quad (2.3)$$

这里客体目标类别同特征矢量两者是单值地一一对应的。

在统计模式识别技术方法中,凡是可用一组独立特征参数 $\{u_i\}$ 或一模式特征矢量 $U_j = [u_i] (i=1, 2, \cdots, n)$ 描述的客体目标或事件,都称为一种“模式”。在不同场合,从不同目标出发,即使对于同一客体目标类别,模式特征矢量形式和信息内涵也可以各不相同。例如,同样为了辨识“人”,如果为着辨识“人”与其它“动物”,你可选择是否能“直立行走”,是否具有“高级智能”,是否善于“制造和使用工具”,“生食或熟食”……,作为独立特征来构造模式特征矢量;如果为着辨识“男人”与“女人”,你可选择“体形”、“神态”、“生理”、“发型”、“性格”……,作为独立特征来构造模式特征矢量;如果为着辨识“老年人”、“中年人”、“青年人”,则可选择“年龄”、“精力”、“动作姿态”、“行动特点”、“音律音调”……,作为独立特征来构造模式特征矢量……等。所有这些不同场合,即使对一个确定的客体“人”,使用的“模式”描述也明显地不同。

统计模式识别技术方法的另一基本问题,在于以统计决策理论为基础,选择确定用于模式识别的效益函数,设计模式分类判决准则。

广义而言,一个统计模式识别系统实质上仍然是一个统计决策分类器。当客体目标类别总共限于两种时,运用的统计决策理论是经典数理统计中的双择一假设检验理论。当客体目标类别总数多于两种时,扩展为多目标识别分类问题,运用的统计决策理论是其中多择一假设检验理论。设计统计决策分类器的前提,在于对客体目标“模式”的统计特性事先有基本的了解,包括 $P(K_j)$, $P(U_{j0}/K_j)$ 和 r_{jk} 等等在内,其中 K_j 代表第 j 类客体目标, U_{j0} 代表第 j 类客体目标模式的先验已知的模式特征矢量,而 $P(K_j)$, 第 j 类客体目标在实战环境中出现的先验概率; $P(U_{j0}/K_j)$, 第 j 类客体目标 K_j 在战场环境中出现的条件下,模式特征矢量为 U_{j0} 的条件概率; r_{jk} ($j, k=1, 2, \dots, N, j \neq k$) 为模式识别技术的损失或风险。

上述这些统计特征量,有的可借助大量现场观测样本执行统计估计来确定,有的则需凭借专家经验知识作近似假设或推断。

设计人员的基本着眼点,在于设计最优化统计分类器。如果各客体目标模式的统计特征量 $P(K_j)$, $P(U_{j0}/K_j)$, r_{jk} 等均事先已知,则设计最优化统计分类器的问题就变成为从某种角度出发寻找一种分类判决规则,使得系统可以“尽可能理想”地对现场观测到的模式特征矢量 U_i 实现分类判决的问题。这种“尽可能理想”,用数学语言描述,也就是使模式识别效益函数达到极值。常用的有好多些种统计分类器,它们的效益函数,判决准则各不相同。例如:

最大后验概率分类器(Bayes 分类器):

效益函数:后验概率;

判决准则:最大后验概率判决准则。

最小风险分类器:

效益函数:模式识别平均风险;

判决准则:最小平均风险判决准则。

最大似然分类器:

效益函数:似然函数(似然比,对数似然比);

判决准则:最大似然判决准则。

.....

选择确定了分类器的效益函数和判决准则后,就可用以设计模式识别分类算法,编制模式识别程序软件,开展模式识别分析试验,通过试验考核所设计系统的性能优劣,等等。

以统计决策理论为基础设计统计分类器的弱点,在于它要求事先已知客体目标模式的统计特性: $P(K_j)$, $P(U_{j0}/K_j)$, r_{jk} 等等。实战环境中,这很难做到。它至少需作大量观测,获得大量观测样本,借以进行统计估计。当特征矢量维度较大时,计算高维度概率密度函数相当费事。为了克服这一弱点,人们改变设计视线,从线性空间理论出发,用最优化线性分类器取代最优化统计分类器,使问题得以大大简化。

从线性空间理论看问题,描述客体目标模式的特征矢量 U_j 对应于线性空间的一个点。特征矢量 U_j 中的每个元素,代表一个独立的特征参数,或者说隐示出线性空间中的一个坐标轴。特征矢量 U_j 中特征参数 u_i 的数量 n ,代表线性空间的维度数。由此可见,统计分类器同线性分类器的数学基础虽有不同,但实质是完全一致的。

三、模糊模式识别技术方法

统计模式识别技术以数理逻辑为基础,其推理方法与人脑进行模式识别的思维方法差别较大,因而会损失很多有用信息。为了弥补统计模式识别技术之不足,人们在 Zadeh 模糊集论的基础上开创了模糊模式识别技术方法。后者实为前者的进一步扩展,前者则可被看成后者的一种特例。

设 $\tilde{U}$ 代表待识别论域客体目标样式类别的全体,是一个模糊集合:

$$\tilde{U} = (\tilde{U}_1, \tilde{U}_2, \dots, \tilde{U}_j, \dots, \tilde{U}_N) \quad (2.4)$$

它们分别表示了 N 个模式,其中每一元素 $\tilde{U}_j$ 通常都是一个模糊子集。同统计模式识别技术方法一样,对于 $\tilde{U}$ 中的对象 $\tilde{U}_j$,常用有限个特征参数值 $u_1, u_2, \dots, u_N$ 来描述。每个参数所描述的是模式 $\tilde{U}_j$ 的某方面特性。于是对应于每一模式 $\tilde{U}_j$,伴随一个特征矢量:

$$\tilde{U}_j = [u_1 \ u_2 \cdots u_i \cdots u_n]' \quad (2.5)$$

所不同的在于, $\tilde{U}_j$ 现在是个模糊矢量,而不是确定性矢量,其中 u_i 是模式 $\tilde{U}_j$ 的第 i 个特征赋值,而每一模式 $\tilde{U}_j$ 则都描述论域中一类客体目标 K_j 。

现在的问题是,我们在实战环境中获得了来自某类目标的观测样本:

$$X = [x_1 \ x_2 \cdots x_i \cdots x_n]' \quad (2.6)$$

需要判别它属于 $\tilde{U}$ 中哪一个模式 $\tilde{U}_k$,或者,判断它与 $\tilde{U}$ 中哪一类型最接近。

模糊集论借助模糊隶属度

$$\mu_{U_j}(X) \quad (j = 1, 2, \dots, N)$$

来描述任一观测样本 X 可能来自某一模式类别 K_j 的程度,或样本 X 从属于模式类型 $\tilde{U}_j$ 的程度。

模糊模式识别工作过程原则上归纳为三步:

(1) 特征提取。从客体目标 K_j 提供的信息中提取与模式识别有关的诸特性参数,测出 $\tilde{U}_j$ 在各个特征方面的具体数值,将来自 K_j 的信号转换成模式样本 X 。这是一步基础工作,至今尚无统一的,万能的方法。

(2) 建立隶属函数。根据这种隶属函数,形成一种明确的识别处理算法。当这种算法作用于一个对象目标或来自它的信息后,就产生隶属度 $\mu_{U_j}(X)$,用以描述来自观测对象的观测样本 X 隶属于模式 $\tilde{U}_j$ 或由 $\tilde{U}_j$ 所代表的客体目标类别 K_j 的程度。

(3) 识别判决。为此需选定一种判别准则。常用的判别准则有两种:

1) 最优隶属原则 若有 $k \in (1, 2, \dots, N)$,使得:

$$\mu_{U_k}(X) = \max \{\mu_{U_1}(X), \mu_{U_2}(X), \dots, \mu_{U_N}(X)\}$$

则:

$$X \in \tilde{U}_k \quad (2.7)$$

即:判定观测样本 X 属于模式 $\tilde{U}_k$ 所代表的客体目标类型 K_k 。

2) 阈值原则 适当规定一个模糊隶属度门限值 $\lambda \in [0, 1]$,在已获得观测样本 X 、已经算得 $\mu_{U_1}(X), \mu_{U_2}(X), \dots, \mu_{U_N}(X)$ 的情况下,如果

$$\mu_{U_k}(X) \geq \lambda$$

则:

$$X \in \tilde{U}_k \quad (2.8)$$

这时称 $\tilde{U}_k$ 为模糊集合 $\tilde{U}$ 的 λ 截集, λ 为分类置信水准,也就是门限值。

又,如果 $k_1, k_2, \dots \in (1, 2, \dots, N)$,

且 $k_1 \neq k_2 \neq \dots$, 都有:

$$\mu_{U_k}(X) \geq \lambda \quad (k = k_1, k_2, \dots, k_1 \neq k_2 \neq \dots)$$

则:

$$X \in \tilde{U}_{k_1} \cup \tilde{U}_{k_2} \dots \quad (2.9)$$

此时 $\tilde{U}_{k_1}, \tilde{U}_{k_2}, \dots$ 等均为全域 $\tilde{U}$ 中一个模糊子集。

再,如果

$$\alpha = \max\{\mu_{U_1}(X), \mu_{U_2}(X), \dots, \mu_{U_N}(X)\}$$

且:

$$\alpha < \lambda \quad (2.10)$$

则:判决为“拒分类”,即,无法对观测样本 X 进行分类。

为了确切起见,实际应用时常常同时联合运用上述两种分类判决准则,即:首先,模糊隶属度必须优于一定的分类阈值才允许分类;然后,选择其中模糊隶属度最大者来判定观测样本的类别归属。

这里介绍的模糊模式识别技术方法本身并不复杂,关键是要确定恰当的模糊隶属函数,为此既需要一定的数学技巧,也需要对所研究的对象目标有透彻的了解。

四、聚类分析

应用统计模式识别或模糊模式识别技术方法的前提是:事先已知论域内客体目标的标准模式,建立了识别数据库。这些标准模式是通过调查研究人为存入或机器学习获取的。当技术资料缺乏、对观测样本可能归属的客体目标标准模式特征一无所知时,可以借助聚类分析方法,特别是模糊聚类分析方法,对观测样本进行分类处理。不过应该清楚,这时分析结果只是对观测样本做了“分类”(classification),而未达成“识别”(recognition),但仍然是很重要的。

这里所谓“分类”,就是将观测样本集合 $X = (X_1, X_2, \dots, X_M)$ 区分为若干个子集,或若干类别,使观测样本集中每一样本 X_m 属于、且仅属于某一类。

聚类分析是依据一定的准则和算法对观测样本进行分类的一种数学方法。具体地说,设有 M 个观测样本组成一个集合:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_m, \dots, X_M) \quad (2.11)$$

每个样本利用 n 个特征参数来描述:

$$X_m = [x_{m1} \ x_{m2} \ \dots \ x_{mn}]' \quad (2.12)$$

式中 x_{mi} 是第 m 个样本的第 i 种特征的观测值。聚类分析就是根据实际情况按某种标准去鉴别事物之间的接近程度,并把其中依据某种标准相接近的样本归为一类。

聚类分析本身是数理统计中多元分析的一个分支,本质上属于确定性数学之列。然而客观事物往往伴随着模糊性,在很多场合一组事物是否形成一个类群、一个事物是否属于某一子类,往往不一定泾渭分明,因而以模糊集论为基础而开发的模糊聚类分析引起人们普遍重视,传统的聚类分析方法只是它的一种特例。

利用模糊关系进行分类是一种比较成熟的模糊聚类分析方法,工作步骤如下:

(1) 确定模糊相似系数。依据某种准则或算法给观测样本集合 X 中两两元素 X_i, X_m 之

间赋以区间 $[0,1]$ 内的一个数值,称为“相似系数”,其大小直接表征样本 X_e 、 X_m 间接近或相似程度。

用 r_{em} 代表样本 X_e 与 X_m 间的相似系数,其中

$$\begin{aligned} X_e &= [x_{e1} \ x_{e2} \cdots x_{ei} \cdots x_{en}]' \\ X_m &= [x_{m1} \ x_{m2} \cdots x_{mi} \cdots x_{mn}]' \\ 0 &\leq r_{em} \leq 1 \quad (e, m = 1, 2, \cdots, M) \end{aligned} \quad (2.13)$$

其中有两种特例:

$r_{em}=0$,表示 X_e 与 X_m 截然不同,毫不相似;

$r_{em}=1$,表示 X_e 与 X_m 完全相似,或等同为一。

模糊集论已经提出了多种模糊相似系数定义方式,主要的如相关系数定义,夹角余弦定义,空间距离定义,专家经验评议……。现举一例,用样本 X_e 、 X_m 间空间距离 d_{em} 来定义相似系数:

$$r_{em} = 1 - c(d_{em}) \quad (2.14)$$

c 为权系数,目的在于保证使 r_{em} 落入 $[0,1]$ 区间。而

$$d_{em} = \left[\sum_{k=1}^n |x_{ek} - x_{mk}|^q \right]^{1/q} \quad (2.15)$$

其中有几种特殊情况:

1) 当 $q=1$, d_{em} 称为海明距离,此时

$$r_{em} = 1 - c \sum_{k=1}^n |x_{ek} - x_{mk}| \quad (2.16)$$

这种定义式亦即绝对值定义式;

2) $q=2$, d_{em} 称为欧氏空间距离

$$r_{em} = 1 - c \left[\sum_{k=1}^n (x_{ek} - x_{mk})^2 \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

3) 当 $q \rightarrow \infty$, d_{em} 称为切比雪夫距离

$$r_{em} = 1 - c \max_{1 \leq k \leq n} |x_{ek} - x_{mk}| \quad (2.18)$$

(2) 建立模糊关系。对于样本集合 $X=(X_1, X_2, \cdots, X_m, \cdots, X_M)$,利用已选定的模糊相似系数的定义可以求出 $M \times M$ 个表征样本间两两相似程度的相似系数,把它们集中在一起,构成一个矩阵,就是模糊关系矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \cdots r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \cdots r_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mm} \cdots r_{mM} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{M1} & r_{M2} & \cdots & r_{M2} \cdots r_{MM} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

这一模糊关系矩阵具有一系列特殊性质:

1) 矩阵中左上角至右下角所有对角线元素

$$r_{ee} = 1 \quad \forall e: e \in (1, 2, \cdots, M) \quad (2.20)$$

说明这一模糊关系具有自返性;

2) 矩阵中元素对于左上至右下对角线对称,即, $\forall e, \forall m$

$$r_{em} = r_{me} \quad e, m \in (1, 2, \dots, M) \quad (2.21)$$

说明这一模糊关系具有对称性;

3) R 既具有自返性,又具有对称性,故 R 为模糊相容关系。

(3) 通过若干次模糊合成运算,求出对应的模糊等价关系 R^* 。

只有模糊等价关系 R^* 才能直接用于模糊聚类分析,因为它不仅表明了两两元素之间的直接关系,也考虑到了它们之间的间接关系;不仅保留了 R 的自返性和对称性,而且具有传递性:

$$R^* = R_{t1}^* = R_{t2}^* = \dots \quad (2.22)$$

(4) 根据不同的实际问题需要,“选取”适当模糊相似系数门限值,对观测样本集合进行分类。这也就是取截集合实现分类。

§ 2.3 雷达信号模式识别方案示例

雷达信号模式识别是模式识别技术方法在雷达对抗系统中的具体应用。它是雷达电子战威胁态势评估和制定有效雷达对抗行动方案的基础。由于问题的重要性,国内外电子战人员已经做了大量研究工作,不过可见到的具备实用价值的国外资料甚少。这里介绍国内同行专家已提出的几种典型方法,供作参考。

一、雷达信号统计模式识别

(1) 模式特征选择。为了识别雷达辐射源信号,可供选用的信号特征参数很多,在具体应用场合宜根据具体背景条件适当选择确定。

1) 频域特性

雷达载波频率;射频捷变类型;射频变化范围;射频调制方式。

2) 时域特性

脉冲宽度;脉冲调制类型;脉冲重复周期;脉冲重频捷变类型;脉冲重频捷变范围。

3) 功率特性

脉冲幅度;隐蔽发射控制规律。

4) 雷达天线扫描特性

天线扫描类型;水平波束宽度;垂直波束宽度;天线扫描周期;天线扫描范围。

5) 雷达电波极化特性

电波极化型式;电波极化捷变方式。

6) 雷达信号频谱特性

中心频率;频谱宽度;频谱结构类型;频谱峰值规律;频谱峰值间隔;频谱系数集合。

(2) 识别规则。雷达辐射源模式用 n 维空间的矢量

$$U_j = [u_{j1} \quad u_{j2} \cdots u_{jn}]' \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (2.23)$$

描述。每个矢量元素(即每个分量) u_{ji} 代表第 j 部雷达辐射源的第 i 个特征参数。若实战环境中存在着 N 种不同形式的雷达辐射源,它们的模式特征矢量构成一个集合:

$$U = (U_1, U_2, \dots, U_j, \dots, U_N) \quad (2.24)$$

就是论域中的模式样本全集合。

雷达侦察设备获取的观测样本 $\mathbf{X}$ 也是 n 维超级空间一个矢量:

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \cdots x_i \cdots x_n]' \quad (2.25)$$

由于雷达信号在发射、传输和侦收过程中受到种种随机因素影响, $\mathbf{X}$ 是个随机矢量, 呈现统计特性, 可以用多元概率分布函数描述。

统计模式识别技术也就是一种统计假设检验或统计判决技术, 战场环境中存在 N 类雷达辐射源存在的模式识别问题, 也就是多择一 N 元假设检验问题, 已经提出了多种判决准则, 其中最基本的是最大后验概率准则:

$$\begin{aligned} P(U_k/\mathbf{X}) &> P(U_j/\mathbf{X}) \\ \Rightarrow \mathbf{X} \in K_k \quad (j = 1, 2, \dots, N, j \neq k) \end{aligned} \quad (2.26)$$

其中 $P(U_k/\mathbf{X})$ 是观测矢量 $\mathbf{X}$ 来源于模式 U_k 所表征的雷达辐射源类别 K_k 的后验概率, 或者说观测矢量 $\mathbf{X}$ 为真时模式 U_k 所表征的雷达辐射源出现的概率。

应用最广泛的是 Bayes 判决准则, 即使平均风险达到最小的判决准则。在二元假设检验时, 平均风险为:

$$\begin{aligned} \bar{C} = & C_{00}P(\mathbf{X} \in K_0/K_0)P(K_0) + C_{10}P(\mathbf{X} \in K_1/K_0)P(K_0) \\ & + C_{01}P(\mathbf{X} \in K_0/K_1)P(K_1) + C_{11}P(\mathbf{X} \in K_1/K_1)P(K_1) \end{aligned} \quad (2.27)$$

式中 C_{00} 代表 $\mathbf{X}$ 来自 K_0 而被判决为属于 K_0 的风险; C_{10} 代表 $\mathbf{X}$ 来自 K_0 而被判决为属于 K_1 的风险; C_{01} 代表 $\mathbf{X}$ 来自 K_1 而被判决为属于 K_0 的风险; C_{11} 代表 $\mathbf{X}$ 来自 K_1 而被判决为属于 K_1 的风险。在多元假设检验时, 平均风险为:

$$\bar{C} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N C_{kj}P(\mathbf{X} \in K_k/K_j)P(K_j) \quad (2.28)$$

式中 C_{kj} 代表 $\mathbf{X}$ 来自 K_j 而被判决属于 K_k 的风险; $P(\mathbf{X} \in K_k/K_j)$ 代表 $\mathbf{X}$ 来自 K_j 而被判决为属于 K_k 的概率; $P(K_j)$ 为模式 U_j 所描述的雷达辐射源 K_j 在战场环境中出现的先验概率。

从几何意义理解, N 元假设检验模式识别问题的实质在于用某种方式把 n 维超级空间 Z 分割成 $Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_N$ 等 N 个互不相交的子空间, 进而判断观测样本矢量 $\mathbf{X}$ 落入其中哪一子区间:

$$Z = Z_1 \cup Z_2 \cup \dots \cup Z_N$$

或

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_N \quad (2.29)$$

模式识别过程也就是确定观测样本矢量 $\mathbf{X}$ 的终点落在其中哪一子空间的过程。确定了观测样本矢量 $\mathbf{X}$ 落在哪一子空间 Z_k , 也就确定了观测样本矢量 $\mathbf{X}$ 所属雷达辐射源类别 K_k 。

由于 $\mathbf{X}$ 是个随机矢量, $\mathbf{X}$ 来自于 K_j 而被判决为属于 K_k 的概率, 亦即观测矢量 $\mathbf{X}$ 的终点可能落入子区间 Z_k 的概率:

$$P(\mathbf{X} \in K_k/K_j) = \int_{Z_k} P(\mathbf{X}/K_j)d\mathbf{X} \quad (2.30)$$

将式(2.30)代入式(2.28), 整理得:

$$\bar{C} = \sum_{k=1}^N C_{kk}P(K_k) + \sum_{k=1}^N \int_{Z_k} \sum_{j=1}^N P(K_j)(C_{kj} - C_{jj})P(\mathbf{X}/K_j)d\mathbf{X} \quad (2.31)$$

式中 前一项是固定不变的; 后一项中各积分项则包含着可变化的风险, 其数量随判决区间的划分方法而改变。因此, 显然我们应当将观测矢量 $\mathbf{X}$ 判断为属于能使此积分值达到最小