

用AUTES实现雷达辐射源识别专家系统*

陈锡明**

祝正威

(电子科技大学计算机系 成都 610054) (信息产业部电子第二十九研究所 成都 610036)

卢显良

(电子科技大学计算机系 成都 610054)

【摘要】 描述了一种用自行研制的专家系统开发工具AUTES进行雷达辐射源识别专家系统开发的方法,对其中专家知识及知识库、置信度融合方法、解释器等作了详细介绍。测试和实际运用表明,该专家系统能对雷达辐射源进行高效率识别,对参数不全或参数发生一定程度畸变的雷达辐射源的识别率可达到80%以上。

关键词 专家系统; 雷达辐射源; 知识库; 置信度; 融合

中图分类号 TP18; TP301.6

对雷达辐射源的识别是雷达侦察中的一项重要内容。目前采用的数据库或知识库比较查询方法的优点是实现简单、识别速度快,但其识别效率取决于数据库容量和质量,即对先验知识的依赖性强,缺少推理,灵活性差。特别对于参数不全、参数畸变的雷达及许多新体制和新用途雷达识别无能为力,故不能适应电磁信号日益复杂化的需要。专家系统技术可以充分利用人类专家的丰富经验进行逻辑推理和不确定性推理^[1-4],得出雷达辐射源识别结论,实现智能化雷达辐射源的识别。

AUTES是我们自行研制和开发的一个专家系统开发工具,它充分使用了面向对象技术和数据库技术,可以集成在大型应用程序中,并具有操作简单、方便、可视化强、推理方法和置信度融合方法可选择、可设置等优点。本文介绍了使用AUTES开发一种雷达辐射源识别专家系统的过程和方法。测试和实际运用结果表明,利用该专家系统可以高效率地进行雷达辐射源体制和用途的识别。利用AUTES来开发雷达辐射源识别专家系统,在开发过程中仅需将主要精力集中在雷达辐射源识别专家知识及其输入、推理方法、置信度融合算法以及结果输出上,而不需要从专家系统实现技术开始设计一个完整的专家系统,极大地缩短了专家系统的开发周期,提高了开发效率。

1 雷达辐射源识别专家系统的功能

雷达辐射源识别专家系统主要完成以下功能:

- 1) 根据雷达信号参数及参数变化特征判断雷达体制;
- 2) 根据雷达工作体制判断雷达用途;
- 3) 根据雷达信号的参数范围判断雷达用途;
- 4) 当推理条件不够时提示用户输入推理条件;
- 5) 综合判断雷达用途及计算各种用途的置信度;
- 6) 输出推理结果及解释信息。

雷达辐射源识别专家系统可作为一个独立的交互式专家系统,即用户在知识库管理器中直接输入事实,根据这些事实进行推理并输出推理结果和解释信息。同时,本专家系统也可以集成在

1999年11月16日收稿

* 国家“九五”重点科研项目

** 男 29岁 博士生

雷达侦察多传感器数据融合应用软件中,同其他应用程序一起完成雷达侦察多传感器数据融合功能。前端是雷达辐射源融合识别子系统,该子系统采用数据库比较查询方法进行雷达辐射源型号 的识别,当其对新到来的雷达辐射源不能识别或识别可信度低于某个阈值时即启动本雷达辐射源 识别专家系统进行雷达辐射源工作体制和用途的识别,并将识别结果返回到雷达辐射源融合识别 子系统中,由该子系统根据专家系统中推理所得的雷达体制和雷达用途以及原先得到的雷达信号 参数,再次进行雷达辐射源型号的识别。

2 雷达辐射源识别专家知识与知识库

雷达辐射源识别专家系统中的专家知识是从国内有关单位的雷达、雷达侦察、信号处理等领 域的专家中广泛收集和整理而来的,代表了雷达辐射源识别领域内的原理性知识和经验性知识以 及某些专家的特殊处理方法,是该领域各方面知识相对完整的汇集。

雷达辐射源识别专家系统的知识库包括全局变量表、全局事实表、雷达体制子知识库、雷达 用途子知识库、调度策略表以及包括雷达体制推理子任务、雷达用途推理子任务(这两个子任务均 可作为终极任务)的任务表等,并通过AUTES知识库管理器实现语法和部分语义检查及变量、规则 等的冲突性检测,其知识库结构和总体结构如图1所示。其中全局变量表用来存储该领域中涉及 到的概念,如射频特征、重频特征、射频参数等;全局事实表是雷达辐射源识别专家系统与用户和 其他应用程序的接口,是对全局变量的赋值。在交互式使用本专家系统的过程中,用户通过在知 识库管理器中逐条填写事实(即变量的取值及置信度)来记录当前所具备的推理条件,当集成到其他 应用程序中使用本专家系统时,应用程序通过ODBC直接填写全局事实表来记录当前所具备的推理 条件;雷达体制子知识库中存储通过各种雷达特征(如射频特征、重频特征)以及各种雷达参数等来 判断雷达体制的专家知识;雷达用途子知识库则存储通过各种雷达特征、雷达参数以及利用上述 雷达体制子知识库推导出的雷达体制等来判断雷达用途的专家知识;雷达体制推理子任务中的推 理目标变量是雷达体制,雷达用途推理子任务中的推理目标变量则是雷达用途,它要用到雷达体 制推理子任务中推导出的雷达体制进行雷达用途的推理;调度策略表规定了本专家系统的推理调

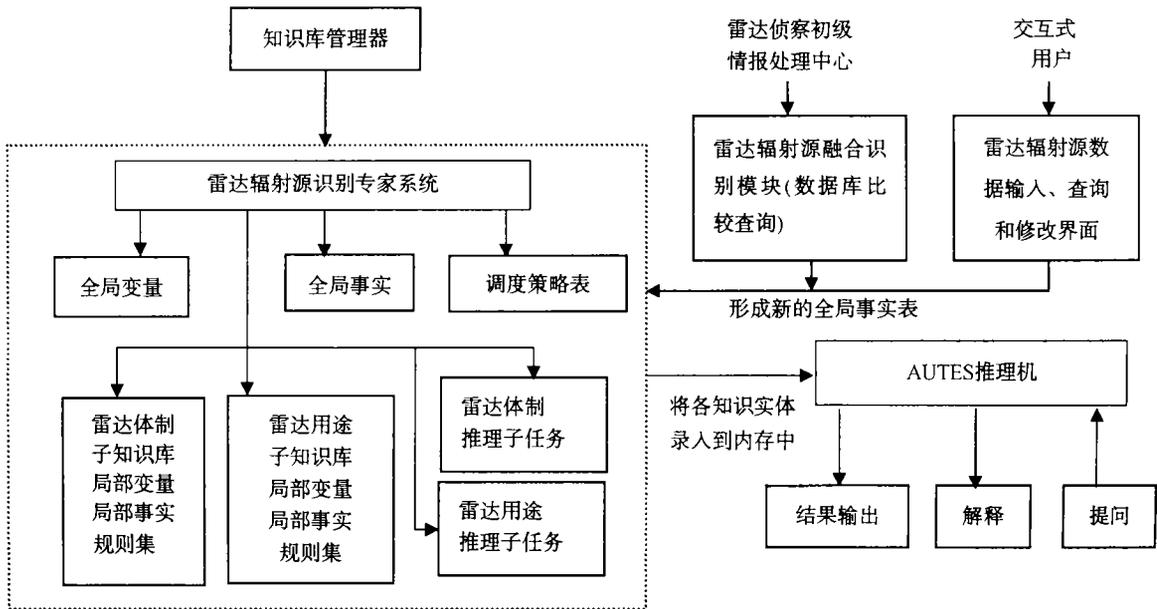


图1 雷达辐射源识别专家系统总体结构框图

度过程,即如果只进行雷达体制的推理则只调用雷达体制推理子任务;否则首先调用雷达体制推理子任务进行雷达体制的推理,再调度雷达用途推理子任务进行雷达用途的推理。

3 雷达辐射源识别专家系统中的推理方法与置信度计算方法

3.1 雷达辐射源识别专家系统中的推理方法

雷达辐射源识别专家系统采用基于深度优先的正向(数据驱动)推理机制,并为用户提供了一次性推理、单步连续推理、连续推理等多种选择,因此适用于交互式使用专家系统以及在应用程序中使用专家系统等不同应用。当用户选择交互式使用专家系统时,可直接从AUTES的知识库管理器中输入事实、选择推理方法和置信度融合算法,直接进行一次性推理;当用户选择在其他应用程序中使用本专家系统时,本专家系统实际上是作为一个服务器Server而存在,需要使用本专家系统来进行推理的应用程序则是作为客户方Client而存在。Client首先将需要推理的雷达辐射源的各种特征和参数写入一个输入数据库表中,并将其选择的推理算法和置信度融合算法通过网络传送给Server。然后,Client不断向Server发出调用AUTES的推理机进行推理的请求,直至输入数据库中的记录被取完为止。这种方式又可分为单步连续推理和连续推理,前者每对输入数据库中的一个记录进行推理后就向用户输出推理结果,用户可以据此判断推理的正确与否并采取相应的措施,如停止推理、继续推理、重新推理等;后者只有当完成了所有输入数据库中雷达辐射源的推理后才向用户集中输出所有的推理结果。

3.2 雷达辐射源识别专家系统的前提中置信度计算方法

雷达辐射源识别专家系统是一个多任务多知识库专家系统,一个任务中推导出来的带置信度的结论可能被下一个任务使用,或者给定的雷达辐射源参数本身就带有不确定性(反映为置信度),因此置信度的计算和传播在推理过程中起着至关重要的作用。本专家系统中采用以下前提置信度的计算方法:用大写字母表示前提中的一个条件,用 $cf(A)$ 表示条件 A 成立的确定性度量,即置信度,则

对条件子句 A , $cf(A)$ 即为 A 对应的事实置信度 cf ;

对条件或子句 $\text{if}(A \parallel B \parallel \dots \parallel C)$, $cf(A \parallel B \parallel \dots \parallel C) = \max(cf(A), cf(B), \dots, cf(C))$;

对条件与子句 $\text{if}(A \&\&B \&\&\dots C)$, $cf(A \&\&B \&\&\dots C) = cf(A) \times cf(B) \times cf(C)$ 。

3.3 雷达辐射源识别专家系统的结论中置信度计算方法

雷达辐射源识别专家系统中每个变量可以取多个值,每个值又可能有多个推理来源。如推理过程中从多条规则中得出了 n 个“雷达体制:=频率分集”的结论,置信度分别为 cf_1, cf_2, \dots, cf_n ,最终得出结论“雷达体制:=频率分集”时,这 n 个置信度有一个融合处理过程^[5]。本专家系统采用以下方法对结论置信度进行融合计算:

1) 若整个前提的置信度为 $cf(P)$,结论或否定结论部分中第 i 个结论的置信度为 cf_i ,则第 i 个结论成立的置信度为

$$cf_i = cf(P) \times cf_i \text{ (其中“=”表示赋值,下同)}$$

2) 在进行雷达体制的推理过程中,采用式(1)对多个相同结论(置信度不同)的置信度进行融合计算,其中 $cf_{\text{肯定}}$ 为 cf_1, cf_2, \dots, cf_n 中 $\in [0, 1]$ 的置信度 cf_1, cf_2, \dots, cf_m 采用式(2)进行融合的结果, $cf_{\text{否定}}$ 为 cf_1, cf_2, \dots, cf_n 中 $\in [-1, 0)$ 的置信度 $cf'_1, cf'_2, \dots, cf'_k$ 采用式(3)进行融合的结果($n = m + k$)

$$cf = cf_{\text{肯定}} + cf_{\text{否定}} + \text{sgn}(cf_{\text{肯定}} + cf_{\text{否定}}) \times |cf_{\text{肯定}}| \times |cf_{\text{否定}}| \quad (1)$$

式中 $\text{sgn}(x)$ 为符号函数,当 $x > 0$ 时 $\text{sgn}(x) = 1$;当 $x = 0$ 时, $\text{sgn}(x) = 0$;当 $x < 0$ 时, $\text{sgn}(x) = -1$ 。

$$cf_{\text{肯定}} = cf_1 + cf_2 + \dots + cf_m + (-1)^{-1} \sum_{1 \leq i < j \leq m} cf_i cf_j + \dots + (-1)^{m-1} cf_1 cf_2 \dots cf_m \quad (2)$$

$$cf_{\text{用途}} = cf'_1 + cf'_2 + \cdots + cf'_k + \sum_{1 \leq i < j \leq k} cf'_i cf'_j + \cdots + cf'_1 cf'_2 \cdots cf'_k \quad (3)$$

3) 对雷达用途推理的置信度来自两个方面(以下置信度均为同种雷达用途结论的置信度):

(1) 将根据已经推出的雷达体制推导雷达用途, 所得同种雷达用途结论的置信度按照式(1)进行融合, 记融合所的雷达用途置信度记为 $cf_{\text{体制} \rightarrow \text{用途}}$;

(2) 分别由射频参数、重频参数和脉冲宽度参数来推导雷达用途, 并分别采用下式进行置信度融合

$$cf = \max(cf_1, cf_2, \cdots, cf_m) \quad (4)$$

将所得结果分别记为: $cf_{\text{射频参数} \rightarrow \text{用途}}$, $cf_{\text{重频参数} \rightarrow \text{用途}}$, $cf_{\text{脉宽参数} \rightarrow \text{用途}}$ 。将这三个置信度与(1)中计算出的 $cf_{\text{体制} \rightarrow \text{用途}}$ 按式(1)进行融合, 便得到该种雷达用途结论的最终置信度。

4 雷达辐射源识别专家系统中的解释

利用AUTES中的解释功能, 雷达辐射源识别专家系统中构造了完整的推理过程解释信息, 包括成功推理的每个步骤和失败推理的失败原因等。这些解释信息的构造和输出, 是检验该专家系统推理是否合理的重要标志, 也向用户完整地展示了专家推理的过程, 有利于增长用户在这方面的知识, 尤其有助于对有关人员的训练和培养。以下给出雷达辐射源识别专家系统某次推理过程中雷达体制推理解释信息的示例:

当前已存在的全局或局部事实有:

rrres_var.脉冲宽度 = 12.5

置信度为: 1.000 000

rrres_var.脉内特征类型 = 脉内线性调频

置信度为: 1.000 000

rrres_var.脉冲宽度特征 = 宽窄脉冲组合

置信度为: 1.000 000

变量 'rrres_var.雷达体制' 的推理过程如下:

取值: 脉冲压缩 置信度为: 0.920 000

该取值来自以上全局或局部事实和以下推理规则:

在规则 'rule_tizhi_012' 中:

前提: rrres_var.脉内特征类型 == 脉内线性调频: 1.00

结论: rrres_var.雷达体制: = 脉冲压缩: 0.80

规则 'rule_tizhi_43' 中:

前提: rrres_var.脉冲宽度 >= 10: 1.00

结论: rrres_var.雷达体制:= 脉冲压缩: 0.50

规则 'rule_tizhi_035' 中:

前提: rrres_var.脉冲宽度特征 == 宽窄脉冲组合: 1.00

结论: rrres_var.雷达体制:= 脉冲压缩: 0.20

5 雷达辐射源识别专家系统性能测试

5.1 测试数据

测试数据的步骤如下:

1) 将120部已知雷达的射频、重频、脉宽、脉内特征和射频、重频、脉宽参数等作为雷达辐射源识别专家系统的输入数据,调用雷达辐射源识别专家系统对这些雷达辐射源的体制和用途进行推理。

2) 从上述120部已知雷达中选出15部雷达,分别对其中的射频、重频、脉宽、脉内特征和射频、重频、脉宽参数等做修改甚至将其删除等操作,使其参数不全或发生一定程度的畸变,调用雷达辐射源识别专家系统进行推理。

3) 将已知雷达体制、雷达用途与推理所得的体制和用途相比较,比较两者是否一致以及如果不一致时的接近程度,是否有与已知相矛盾的体制和用途推出。如果有,则证明本专家系统的专家知识或推理过程有误。雷达辐射源识别专家系统的输出分为结论和参考值两部分,结论是对推理结果的肯定性判断,其置信度较高;参考值是经过推理认为可能出现的取值,其置信度比结论低,但仍然超过了预先设定的阈值。其中,结论和参考值均可不唯一,即对同一个雷达辐射源可能得出体制或用途互不相同的几个判断。

5.2 测试结果统计

对120部已知雷达的测试结果:

1) 已知雷达的体制和用途都在雷达辐射源识别专家系统输出的结论中,认为识别正确,共有114部,占95%,其中已知雷达的体制排在专家系统输出结论中的共有120部,占100%;已知雷达的用途排在专家系统输出结论中的共有114部,占95%。

2) 已知雷达的用途排在专家系统输出的参考值的共有4部,占3.33%。

3) 已知雷达的用途不在专家系统输出的结论和参考值中,认为识别不正确,共有2部,占1.67%。

对15部参数不全或发生一定程度畸变的雷达的测试结果为:对雷达体制的正确识别率为87.8%,对雷达用途的正确识别率为81.8%,虚报率为30.8%。

6 结束语

用AUTES专家系统开发工具开发的雷达辐射源识别专家系统,在实际运用中具有操作简单、方便等优点。测试结果表明,该专家系统推理效果良好,对雷达辐射源有着较高的识别率。尤其可用于对参数不全、参数畸变以及新体制、新用途的雷达辐射源进行识别。

致谢 对为本雷达辐射源识别专家系统提供专家知识和在专家系统开发过程中给予帮助和指导的各位专家表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 王厚军,陈相富,陈光福.基于总线观测的微机故障诊断专家系统研究.电子科技大学学报,1998,27(2):161~165
- 2 吴信东,邹燕.专家系统技术.北京:电子工业出版社,1988
- 3 蔡自兴,徐光佑.人工智能及其应用.北京:清华大学出版社,1995
- 4 史济建,俞瑞钊.专家系统实现技术.杭州:浙江大学出版社,1994
- 5 陈锡明,卢显良,宋杰.多个假设作用于同一结论时综合置信度的一种计算方法.电子科技大学学报,1999,28(5):546~549

A Radar Radiating-source Recognizing Expert System Realizing with AUTES

Chen Ximing

(Department of Computer, UFST of China Chengdu 610054)

Zhu Zhengwei

(National Key Laboratory of Electronic Counter Measurement Chengdu 610036)

Lu Xianliang

(Department of Computer, UFST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper introduces a radar radiating-source recognizing expert system realizing with AUTES(An Universal Developing Tool of Expert System). Especially, it describes the expert system's knowledge-base, certain-factor fusion computing method and interpreter in detail. The application and testing indicate that the expert system can recognize radar radiating-source effectively. In particular, to the radar radiating-source whose parameters are not complete or are aberrant, the recognizing precision reaches to 80%.

Key words expert system; radar radiating-source; knowledge-base; certain-factor; fusion

· 科研成果介绍 ·

低噪声混频技术——同轴毫米波微带双平衡混频技术的研究

主研人员：廖品霖 谢同芳 陈玲

毫米波混频器是毫米波外差式电子设备中不可缺少的关键部件。该课题研究的毫米波同轴接口混频器使用的波段范围比波导接口的混频器更宽，对扩展无线电设备的工作频段具有十分重要的意义。

同轴毫米波微带双平衡混频技术采用K型同轴接头及双面悬置微带巴伦和混频器管堆，引用Polph-Tchebysheff渐进线综合法，通过CAD获得在变换长度一定时具有最宽的工作频段。同时采用MMIC工艺技术实现小体积的设计，达到宽频段、低噪声、低变频损耗和高隔离度的高性能指标。其主要技术性能指标为：

工作频段：18~40 GHz

变频损耗：< 7 dB

噪声参数：< 7 dB

L_{in} -RF端口隔离度：>20 dB

L_{in} -IF端口隔离度：>20 dB

三端口接头型式：K型同轴接头

该成果主要应用于8 mm同轴电子对抗、雷达、导航及宽带毫米波测试系统。

· 科 下 ·