

不完备信息系统的辐射源识别方法研究

关欣, 孙迎丰, 何友

(海军航空工程学院信息融合技术研究所 山东 烟台 264001)

【摘要】 该文将粗糙集理论引入不完备信息系统下的辐射源识别。基于粗糙集理论, 给出了一种新的不完备信息系统下辐射源识别模型。该方法以相似关系、相容关系作为基础, 通过知识约简和决策规则的提取, 较好地解决了不完备信息系统的辐射源识别问题。以雷达辐射源用途识别为例给出实例分析, 说明了该模型处理不完备信息识别问题的有效性。

关键词 决策规则; 辐射源识别; 不完备信息系统; 粗糙集
中图分类号 TP181 **文献标识码** A

Study on Emitter Recognition to Incomplete Information System

GUAN Xin, SUN Ying-feng, HE You

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University Yantai Shandong 264001)

Abstract In practical reconnaissance environment, reports with emitter parameter values take on uncertainty, illegibility and contradiction. In order to solve emitter recognition problems in incomplete information system, a new emitter recognition method based on rough set theory is presented in this paper. This recognition method does not change original information and can find decision rules directly from incomplete decision table. Examples of recognizing the radar emitter are given to demonstrate this new method. Experimental results show that this recognition method is effective.

Key words decision rules; emitter recognition; incomplete information system; rough set

由于现代电子对抗信号环境密集、复杂、交错、多变, 很难完全获得敌方的技战术参数, 侦察上报辐射源特征参数不全的情况大量存在, 因而如何从不完备的系统中准确识别辐射源所属类别是一个值得研究的问题^[1-3]。目前已有许多文献研究了不完备信息系统的处理方法, 最常用的是替代值法^[1], 即当信息系统的不完备属性为连续属性时, 用该属性的所有完整对象的平均值替代未赋值的值。当不完备属性为离散值时, 可以选择该属性的所有完整对象中出现频率最高的值代替未赋值的属性值。文献[2]利用模糊逻辑对未知值进行建模。文献[3]采用了删除法, 删除含有未知值的属性, 即降低了特征参数空间的维数。

以上方法都是将不完备系统经过各种处理后构成一个完备系统, 然后再以完备系统的处理方法来分析。在处理的过程中很可能人为地引入冲突信息。基于粗糙集理论^[4-10], 本文直接在不完备信息系统下研究辐射源识别问题, 将相似关系、相容关系引入

辐射源识别中, 给出了一种新的不完备信息系统下的辐射源识别模型。

1 不完备信息系统基本概念

在传统粗糙集理论中存在一个假设, 即所有可以获得的个体对象由这个属性集合给出完全的描述。这个假设虽然合理, 但与很多现实情况有差异。由于不可能得到一部分属性值, 或者不可能得到有些对象的某个属性知识, 导致关于对象集合 U 的描述是不完全的。

$S = (U, AT)$ 是信息系统。其中, U 为对象的非空有限集合; AT 为属性的非空有限集合。对于每个 $a \in AT$ 有 $a: U \rightarrow V_a$, V_a 为 a 的值域。

每个属性子集 $A \subseteq AT$ 决定了一个不可分辨关系 $\text{ind}(A)$ 。对于一个对象, 一些属性值可能是缺省的, 为了表明这种情况, 通常给定一个区分值(即空值)给这些属性。如果至少有一个属性 $a \in AT$, 使 V_a 含有空值(* 表示空值), 则将 S 称为一个不完备信息系统; 否则它是完备的。

收稿日期: 2006-03-29; 修回日期: 2006-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(60572161); 全国优秀博士论文作者专项资金(200036); 全国优秀博士论文作者专项资金(200443)

作者简介: 关欣(1978-), 女, 博士, 讲师, 主要从事多传感器信息融合、多目标跟踪、雷达数据处理等方面的研究。

2 不完备信息系统的辐射源识别模型

2.1 建立关系数据模型

假设共有 r 个类别, 每个辐射源信号有若干个工作模式, 设 n 为已知样本库中辐射源工作模式的数目。将辐射源信号特征参数视为条件属性, 条件属性集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 。将辐射源的类别视为决策属性, 决策属性集合 $D = \{d\}$ 。对已知样本库中某样本 u_t 的一条信息, $u_t = (c_{1,t}, c_{2,t}, \dots, c_{m,t}; d_t)$, 将论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 称为样本集合。研究对象 u_t 的属性值为 $c_i(u_t) = c_{i,t}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $t = 1, 2, \dots, n$; $d(u_t) \in D$ 。由 $u_t (t = 1, 2, \dots, n)$ 构成的二维信息表就是关于辐射源识别模型的关系数据模型。

2.2 建立知识系统

为了从样本中可以分析知识间的依赖性和属性的重要性, 需要利用属性对论域进行分类, 建立论域上的知识系统。而分类的基础是属性值离散化, 即对每个属性的属性值按特征分割为若干离散值, 然后将属性值用离散值替代。结合辐射源识别的特点, 较为简单、适用的离散化算法有等距离划分算法、等频率划分算法、Naive Scaler算法以及Semi Naive Scaler算法等^[6]。离散化的结果影响分类的最终结果。

对于不完备信息系统的辐射源识别问题, 对象属性值可能是不确定的, 所以传统粗糙集理论所借助的不可分辨关系, 即等价关系不一定能形成论域的等价划分。可以采用更为一般的关系, 即相似关系、相容关系来构成知识的表达形式。

2.3 构造识别模型

令 $A \subseteq AT$, 相似关系定义如下^[7]:

$$\text{SIM}(A) = \{(x, y) \in U \times U \mid \forall a \in A, a(x) = a(y) \vee a(x) = * \vee a(y) = *\} \quad (1)$$

$\text{SIM}(A)$ 是一个相容关系。令 $S_A(x)$ 表示对象集 $\{y \in U \mid (x, y) \in \text{SIM}(A)\}$, $S_A(x)$ 称为相对于 A 的 x 的相容类, 则有:

$$U / \text{SIM}(A) = \{S_A(x) \mid x \in U\} \quad (2)$$

$U / \text{SIM}(A)$ 一般不构成 U 的划分, 而构成 U 的覆盖。

令 $X \subseteq U$ 和 $A \subseteq AT$, 那么 $\underline{A}X$ 是 X 的下近似, 当且仅当 $\underline{A}X = \{x \in U \mid S_A(x) \subseteq X\} = \{x \in X \mid S_A(x) \subseteq X\}$; $\overline{A}X$ 是 X 的上近似, 当且仅当 $\overline{A}X = \{x \in U \mid S_A(x) \cap X \neq \emptyset\} = \bigcup \{S_A(x) \mid x \in X\}$ 。

不完备决策表是一个不完备信息系统 $\text{DT} = (U, AT \cup \{d\})$, 决策属性为 $d (d \notin AT, \text{且} * \notin V_d)$, AT 中的元素为条件属性。定义函数

$\partial_A : U \rightarrow P(V_d)$, $A \subseteq AT$ 为 $\partial_A(x) = \{i \mid i = d(y), y \in S_A(x)\}$, 则 ∂_A 为 DT 中的广义决策函数。 $\text{ind}(\partial_A)$, $A \subseteq AT$ 构成了 U 的一个划分。

在不完备信息系统中, 决策规则 $\wedge(c, v) \rightarrow \vee(d, w)$ 为真, 当且仅当 $\overline{C}X \subseteq Y$ 。其中, $c \in AT, v \in V_c, w \in V_d$; X 为具有性质 $\wedge(c, v)$ 的对象集; Y 为具有性质 $\vee(d, w)$ 的对象集; C 为出现在规则的条件部分的所有属性构成的集合。

决策规则为最优的当且仅当该规则为真, 且由出现在规则中的合取与析取的真子集构成的任何规则均为假。从广义决策函数、规则为真和最优决策规则的定义可知, 对于 $x (x \in U)$, 最优规则的决策部分为 $(d, w_1) \vee (d, w_2) \vee \dots \vee (d, w_n)$, 则有 $\{w_1, w_2, \dots, w_n\} = \partial_{AT}(x)$ 。由此寻找最优规则的问题就限制为条件属性的约简问题, 可以利用辨识矩阵计算不完备决策表的约简。

由于 $S_A(x)$ 中的元素均与 x 相容, 但不能保证其中的除 x 之外的任意两个元素都相容, 文献[8]给出如下定义:

$$\text{COM}(A) = \{(x, y) \in U \times U \mid \forall a \in A, a(x) = a(y) \vee a(x) = * \vee a(y) = *\} \quad (3)$$

式(3)与 $\text{SIM}(A)$ 的定义是一致的。与 $U / \text{SIM}(A)$ 不同, $U / \text{COM}(A)$ 的定义为:

$$U / \text{COM}(A) = \{B \subseteq U : B^2 \subseteq \text{COM}(A), (\forall a) \mid a \in U \wedge a \notin B \rightarrow (B \cup \{a\})^2 \not\subseteq \text{COM}(A)\} \quad (4)$$

$U / \text{COM}(A)$ 是 U 的一个覆盖, 且能保证 $U / \text{COM}(A)$ 中任意一个元素, 所包含的任意两个元素都是相容的, 记为:

$$\text{SU}_A(x) = \bigcup \{B : B \in U / \text{COM}(A), x \in B\} \quad (5)$$

$$\text{SL}_A(x) = \bigcap \{B : B \in U / \text{COM}(A), x \in B\} \quad (6)$$

同样定义函数 $\gamma_A(x) = \{i \mid i = d(y), y \in \text{SL}_A(x)\}$, γ_A 为 DT 中的广义决策函数。

2.4 识别规则

样本在离散化, 且经过不完备决策表约简后具有如下识别规则。计算某个分类决策的满足程度, 取最大的作为识别结果。满足度为:

$$\eta(X_i) = \frac{\text{card}(X_i \cap F_x)}{\text{card}(X_i)} \quad (7)$$

式中 F_x 为未知信号的特征参数集合; X_i 为决策表中某类条件属性的集合, $X_i \cap F_x$ 为 F_x 中符合 X_i 中特征条件的特征集合。

3 仿真分析

本文通过仿真实验来说明所给出的识别模型的

有效性, 仿真实验以雷达辐射源用途识别为例。

设雷达特征矢量由射频频率(RF)、脉冲重复频率(PRF)、脉冲宽度(PW)三个特征参数构成。从已知雷达知识库中提取三类不同用途的雷达, 不完备的辐射源信号数据如表1所示。

表1 不完备的辐射源信号数据

序号	类别	RF/MHz	PRF/Hz	PW/ μ s
1	1	2 774.3	428	3.00
2	1	*	601	1.70
3	1	9 214	*	0.80
4	1	3 109	*	2.10
5	2	160	190	*
6	2	*	330	0.80
7	3	9 000	1 750	*
8	3	3 700	*	0.37

由于雷达信号在发射、传输和侦收过程中受到各种随机因素影响, 雷达特征矢量是个随机矢量, 呈现统计特性。现将已知样本叠加随机测量误差, 然后对该信号进行侦收测量, 三次观测样本如表2所示。

表2 观测雷达信号特征参数

观测样本	RF/MHz	PRF/Hz	PW/ μ s
1	1 285.5	617.6	1.740 2
2	2 673.4	326.8	0.829 1
3	3 821.4	2 216.6	0.373 2

在进行辐射源识别之前, 需要对识别库以及待识别信号进行离散化处理。本文采用等间隔法对表1进行离散化预处理, 如表3所示。为了方便处理, 做以下标识: 序号为 U ; 类别为 d ; RF为 a ; PRF为 b ; PW为 c 。

表3 离散后的不完备信号数据和待识别样本

U	d	a	b	c
1	1	1	1	3
2	1	*	2	2
3	1	4	*	1
4	1	2	*	3
5	2	1	1	*
6	2	*	1	1
7	3	4	3	*
8	3	2	*	1
9	3	*	3	1
观测样本1		1	2	2
观测样本2		1	1	1
观测样本3		2	3	1

从表3可得广义的决策值, 构造广义决策值表。

$U/\text{ind}(\partial_{AT}) = \{X_1, X_{1,2}, X_{1,3}, X_{2,3}, X_{1,2,3}\}$ 。其中, $X_1 = \{2, 4\}$; $X_{1,2} = \{1, 5, \}$; $X_{2,3} = \{8\}$; $X_{1,3} = \{7, 9\}$; $X_{1,2,3} = \{3, 6\}$ 。计算不完备信息表的区分函数, 辨识矩阵如表4所示。

表4 辨识矩阵

x/y	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1						c	ab	ac	bc
2					b	bc	b	c	bc
3						a		a	
4				a	c		a	c	c
5		b	a	a			ab	a	b
6	c	bc		c			b		b
7	ab	b		a	ab	b			
8	ac	c	a	c	a				
9	bc	bc		c	b	b			

采用本文给出的识别规则进行识别, 观测信号 x_1 满足规则 r_2 ; x_2 满足规则 r_5 与 r_6 ; x_3 满足规则 r_8 。

由式(4)计算表3的 U 可得: $U/\text{COM}(AT) = \{\{1, 5\}, \{2\}, \{3, 6\}, \{3, 7, 9\}, \{4\}, \{5, 6\}, \{6, 8\}, \{8, 9\}\}$, 易知 $SU_A(x) = S_A(x)$ 。 $SL_{AT}(1) = \{1, 5\}$, $SL_{AT}(2) = \{2\}$, $SL_{AT}(3) = \{3\}$, $SL_{AT}(4) = \{4\}$, $SL_{AT}(5) = \{5\}$, $SL_{AT}(6) = \{6\}$, $SL_{AT}(7) = \{3, 7, 9\}$, $SL_{AT}(8) = \{8\}$, $SL_{AT}(9) = \{9\}$ 。引入 $\gamma_A(x)$ 以后可以得到规则集: $r_1: (a, 1) \wedge (c, 3) \rightarrow (d, 1) \vee (d, 2)$; $r_2: (b, 2) \wedge (c, 2) \rightarrow (d, 1)$; $r_3: (a, 3) \wedge (c, 1) \rightarrow (d, 1)$; $r_4: (a, 2) \wedge (c, 3) \rightarrow (d, 1)$; $r_5: (a, 1) \wedge (b, 1) \rightarrow (d, 2)$; $r_6: (b, 1) \wedge (c, 1) \rightarrow (d, 2)$; $r_7: (a, 3) \wedge (b, 3) \rightarrow (d, 1) \vee (d, 3)$; $r_8: (a, 2) \wedge (c, 1) \rightarrow (d, 3)$; $r_9: (b, 3) \wedge (c, 1) \rightarrow (d, 3)$ 。

同样采用本文的识别规则, 观测信号 x_1 满足规则 r_2 , 为第一类; x_2 满足规则 r_5 与 r_6 , 为第二类; x_3 满足规则 r_8 , 为第三类。与依照式(2)进行分类的结论相比, 由于在式(4)中引入了 γ_A , 可以使得到的识别结果更加精细。

4 结论

本文研究了不完备信息系统的辐射源识别方法, 直接在不完备信息系统下利用粗糙集扩展的相似相容关系进行识别, 而不是沿用原有的将不完备系统完备化的思路; 并设计了一种具体的不完备信息系统的辐射源识别模型。以雷达辐射源用途识别为例, 给出了识别实例, 为研究不完备信息系统的辐射源识别问题提供了一种全新的方法。

(下转第30页)

生成符合需要的MIMO信道。适用于各种MIMO技术的研究,并且也有利于研究各种MIMO技术的融合。

参 考 文 献

- [1] ERTEL R B, ARDIERI P C, SOWERBY K W, et al. Overview of spatial channel models for antenna array communication systems[J]. *Personal Communications*, 1998, 5(1): 10-22.
- [2] THOMPSON J S, GRANT P M. Smart antenna arrays for CDMA systems[J]. *IEEE Personal Communications*, 1996, 3(5): 16-25.
- [3] OZCELIK H, HERDIN M, WEICHSELBERGER W. Deficiencies of 'Kronecker' MIMO radio channel model[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(16): 1209-1210.
- [4] GEOFFREY J B, FAMBIRAI T. Spatially and temporally correlated MIMO channels: Modeling and capacity analysis[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 53(3): 634-643.
- [5] LEONG S Y, ZHENG Y R, XIAO C S. Space-time fading correlation functions of a 3-D MIMO channel model[C]// WNCN: IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Atlanta: IEEE Press, 2004: 1127-1132.
- [6] PEDERSEN K I, ANDERSEN J B, KERMOAL J P, et al. A stochastic multiple-input-multiple-output radio channel model for evaluation of space-time coding algorithms[C]// VTC: IEEE Vehicular Technology Conference. Tokyo: IEEE Press, 2000: 893-897.
- [7] SHIU D S, FOSCHINI G J, GANS M J, et al. Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems[J]. *IEEE Trans Comm*, 2000, 48(3): 502-513.
- [8] GEOFFREY J B, FAMBIRAI T. The influence of spatial and temporal correlation on the capacity of MIMO channels[C]// WCNC: IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Louisiana: IEEE Press, 2003: 359-364.
- [9] RAPPAPORT T S. *Wireless communications principles and practice*[M]. New York: Prentice Hall Inc, 1996: 139-189.
- [10] 李 忻, 聂在平. MIMO信道中衰落信号的空域相关性评估[J]. *电子学报*, 2004, 32(12): 1949-1953.

编辑 张俊

(上接第10页)

参 考 文 献

- [1] DUNTSCH L, GEDIGA G. Uncertainty measures of rough set prediction[J]. *Artificial Intelligence*, 1998, 106: 109-137.
- [2] SLOWINSKI R, STEFANOWSKI J. Rough set reasoning about uncertain data[J]. *Fund Information*, 1996, (2-3): 227-244.
- [3] 关欣, 何友, 衣晓. 基于灰关联分析的雷达辐射源识别方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(11): 2601-2603.
- [4] PAWLAK Z. Rough sets[J]. *International Journal of Information and Computer Science*, 1982, (11): 341-356.
- [5] PAWLAK Z. Rough set theory and its application to data analysis[J]. *International Journal of Cybernetics and Systems*, 1998, 29: 661-688.
- [6] 王国胤. *Rough集理论与知识获取*[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [7] KRYSZKIEWICZ M. Rough set approach to incomplete information systems[J]. *Information Sciences*, 1998, 112: 39-49.
- [8] 黄素梅, 吴 陈. 粗糙集在不完备信息系统中进行知识约简和决策推理的方法研究[J]. *华东船舶工业学院学报(自然科学版)*, 2004, 18(6): 51-54.
- [9] 关成斌, 王国宏, 李 宇, 等. 基于多级模糊综合评判的雷达目标识别技术[J]. *海军航空工程学院学报*, 2006, 21(2): 241-244.
- [10] 关欣, 何友. 智能化雷达对抗情报处理技术研究[J]. *海军航空工程学院学报*, 2005, 20(1): 101-106.

编辑 黄莘