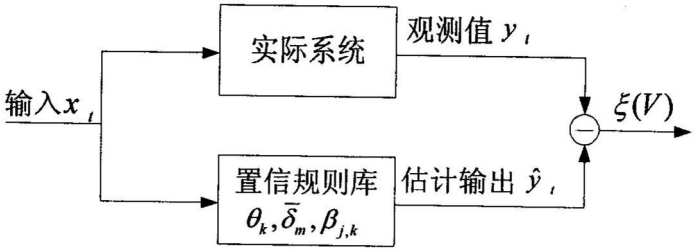
摘　要

[0001]　本发明提出了一种基于置信规则库推理的航母编队识别方法，以在远程预警系统中对航母编队的识别为应用背景，首先基于航母编队中子目标的约束关系构建了航母编队识别置信规则库；然后基于该置信规则库采用证据推理算法实现了多层置信规则库的推理，并且研究了利用历史数据对置信规则库参数进行学习的方法，最后识别推理系统输出不同评价结果的置信度，从而达到对多种不确定性信息下的航母编队进行准确识别和早期预警的目的。本发明方案可以利用天波超视距雷达的输出信息实现对航母编队的识别和预警，对于天波超视距雷达的工程实际应用乃至远程预警系统的功能完善和性能提升具有非常重要的意义。


实际系统
观测值 y_t
输入 x_t
$\xi(V)$
置信规则库
$\theta_k, \bar{\delta}_m, \beta_{j,k}$
估计输出 $\hat{y}_t$

1.一种基于置信规则库推理的航母编队识别方法,其特征在于包括以下步骤:

第一步,构建航母编队识别的置信规则库

A1)定义输入输出变量及模糊表示,先定义最终的输出变量X_1表示航母编队的置信度;再给出用于推理的五个输入变量X_3,X_6,X_7,X_8,X_9和三个中间变量X_2,X_4,X_5的定义如下:X_2表示依据OTHR探测信息确定航母编队的置信度、X_3表示依据作战条例数据库信息确定航母编队的置信度、X_4表示舰船编队目标的置信度、X_5表示舰载空中目标的置信度、X_6表示依据速度确定舰船编队目标的置信度、X_7表示依据多条航迹的平行性确定舰船编队目标置信度、X_8表示依据速度确定舰载空中目标的置信度、X_9表示依据航迹起始与终结位置确定舰载空中目标的置信度,X_i,i=1,2,...,9取值范围为0～1;最后定义表示每个变量参考值的模糊语义值高H、中M和低L;

B1)建立初始规则库:建立航母编队识别分层BRB结构的推理系统,包括三层,由下至上共有四个子规则库,子规则库1和2为底层规则库,规则库3为中间层规则库,规则库4为顶层规则库,确定变量间的推理规则,给出航母编队识别的置信规则库的36条初始规则,见表1,每个子规则库含9条规则,以此作为置信规则库推理的基础;

第二步,建立子规则库间的推理关系

基于单层BRB系统的推理方法由下至上逐层推理来进行多层BRB系统的推理,即子规则库1和子规则库2的推理输出分别作为子规则库3的输入,然后子规则库3的推理输出作为子规则库4的输入,最后子规则库4进行推理得到最终的输出结果;

第三步,进行规则库参数学习

A2)构造进行参数学习的目标函数$\xi(V)=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(y_t-\hat{y}_t)^2$,其中,ξ(V)表示目标函数,t表示样本次数,T表示总样本数,y_t表示实际系统输出,$\hat{y}_t$表示BRB系统产生的估计输出;

B2)构建进行参数学习的约束关系,约束形式为:

$$\begin{cases}0\le\theta_k^z\le 1, & k=1,2,\cdots L_z,\ z=1,2,\cdots Z\\ 0\le\bar{\delta}_i^z\le 1, & i=1,2,\cdots M_z,\ z=1,2,\cdots Z\\ 0\le\beta_{j,k}^z\le 1, & j=1,2,\cdots N_z,\ k=1,2,\cdots L_z,\ z=1,2,\cdots Z\\ \sum_{j=1}^{N_z}\beta_{j,k}^z=1, & k=1,2,\cdots L_z,\ z=1,2,\cdots Z\end{cases}$$

其中,θ_k^z表示第z个子规则库中第k条规则的权重,$\bar{\delta}_i^z$表示第z个子规则库中第i个前提属性的权重,$\beta_{j,k}$ j=1,2,…N;k=1,2…L为分配给输出结果D_j的置信度,Z表示子规则个数,L_z表示第z个子规则库的规则数目,M_z表示第z个子规则库前提属性的数目,N_z表示第z个子规则库输出参考值的数目,该问题实际上是一个包含$S_1=\sum_{z=1}^{Z}(L_z+M_z+N_z\times L_z)$个参数和$S_2=\sum_{z=1}^{Z}(2L_z+M_z+N_z\times L_z)$个约束的非线性优化问题;

C2)利用目标函数和约束关系建立优化模型,进行规则库参数学习,优化模型如下:min{ξ(V)},s.t.A(V)=0,B(V)≥0,其中,ξ(V)表示目标函数;A(V)表示等式约束函数;B(V)表示不等式约束函数,输入历史观测数据到多层BRB推理系统,产生航母编队置信输出,再根据优化模型学习得到参数,最后得出参数学习后的置信规则库;

第四步，利用参数学习得到的参数实现规则库的推理并输出结果

A4)对OTHR输出的航迹信息或作战条例数据库进行预处理，得到多层BRB系统的输入变量即确定性的概率值；再采用基于规则的信息转换技术建立等价规则，得出相对于模糊参考值H,M,L的置信度；

B4)结合学习得到的参数和置信度，利用表1中参数学习后的规则库和推理关系进行多层推理，输出结果$\hat{y}_t=\{(D_j,\hat{\beta}_j(t)),\ j=1,2,\cdots,N\}$，其中$D_j$表示可能的评价结果，$\hat{\beta}_j$表示对应的置信度；

表1航母编队识别BRB

	编号	前提属性	初始给定的规则库		参数学习后的规则库	
			权重	评价结构	权重	评价结构
	1	(X_8 is H∧X_9 is H)	1	X_5 is {(H,1)}	1	X_5 is {(H,1)}
	2	(X_8 is H∧X_9 is M)	1	X_5 is {(H,0.5),(M,0.5)}	1	X_5 is {(H,0.2),(M,0.8)}
子	3	(X_8 is H∧X_9 is L)	1	X_5 is {(M,1)}	0.5	X_5 is {(M,0.3),(L,0.7)}
规	4	(X_8 is M∧X_9 is H)	1	X_5 is {(H,0.5),(M,0.5)}	0.8	X_5 is {(H,0.5),(M,0.5)}
则	5	(X_8 is M∧X_9 is M)	1	X_5 is {(M,1)}	1	X_5 is {(M,1)}
库	6	(X_8 is M∧X_9 is L)	1	X_5 is {(M,0.5),(L,0.5)}	0.8	X_5 is {(M,0.1),(L,0.9)}
1	7	(X_8 is L∧X_9 is H)	1	X_5 is {(M,1)}	0.5	X_5 is {(H,0.2),(M,0.2),(L,0.6)}
	8	(X_8 is L∧X_9 is M)	1	X_5 is {(M,0.5),(L,0.5)}	0.8	X_5 is {(M,0.4),(L,0.6)}
	9	(X_8 is L∧X_9 is L)	1	X_5 is {(L,1)}	1	X_5 is {(L,1)}
子	10	(X_6 is H∧X_7 is H)	1	X_4 is {(H,1)}	1	X_4 is {(H,1)}
规	11	(X_6 is H∧X_7 is M)	1	X_4 is {(H,0.5),(M,0.5)}	1	X_4 is {(H,0.3),(M,0.7)}
则	12	(X_6 is H∧X_7 is L)	1	X_4 is {(M,1)}	1	X_4 is {(H,0.3),(M,0.7)}
库	13	(X_6 is M∧X_7 is H)	1	X_4 is {(H,0.5),(M,0.5)}	1	X_4 is {(H,0.4),(M,0.6)}
2	14	(X_6 is M∧X_7 is M)	1	X_4 is {(M,1)}	0.4	X_4 is {(M,1)}

	15	(X_6 is M∧X_7 is L)	1	X_4 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_4 is {(M,0.1), (L,0.9)}
	16	(X_6 is L∧X_7 is H)	1	X_4 is { (M, 1) }	0.2	X_4 is {(H,0.1), (M,0.3), (L,0.6)}
	17	(X_6 is L∧X_7 is M)	1	X_4 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_4 is {(M,0.3), (L,0.7)}
	18	(X_6 is L∧X_7 is L)	1	X_4 is {(L,1)}	1	X_4 is {(L,1)}
	19	(X_4 is H∧X_5 is H)	1	X_2 is {(H,1)}	1	X_2 is {(H,1)}
	20	(X_4 is H∧X_5 is M)	1	X_2 is {(H,0.5), (M,0.5)}	0.6	X_2 is {(H,0.4), (M,0.6)}
子	21	(X_4 is H∧X_5 is L)	1	X_2 is {(M,1) }	1	X_2 is {(H,0.2), (M,0.3), (L,0.5)}
规	22	(X_4 is M∧X_5 is H)	1	X_2 is {(H,0.5), (M,0.5)}	0.6	X_2 is {(H,0.2), (M,0.8)}
则	23	(X_4 is M∧X_5 is M)	1	X_2 is {(M,1)}	0.6	X_2 is {(M,1)}
库	24	(X_4 is M∧X_5 is L)	1	X_2 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_2 is {(M,0.2), (L,0.8)}
3	25	(X_4 is L∧X_5 is H)	1	X_2 is { (M, 1) }	1	X_2 is {(H,0.1), (M,0.2), (L,0.7)}
	26	(X_4 is L∧X_5 is M)	1	X_2 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_2 is {(M,0.2), (L,0.8)}
	27	(X_4 is L∧X_5 is L)	1	X_2 is {(L,1)}	1	X_2 is {(L,1)}
	28	(X_2 is H∧X_3 is H)	1	X_1 is {(H,1)}	1	X_1 is {(H,1)}
	29	(X_2 is H∧X_3 is M)	1	X_1 is {(H,0.5), (M,0.5)}	0.2	X_1 is {(H,0.3), (M,0.7)}
子	30	(X_2 is H∧X_3 is L)	1	X_1 is {(M,1) }	0.8	X_1 is {(H,0.1), (M,0.3), (L,0.6)}
规	31	(X_2 is M∧X_3 is H)	1	X_1 is {(H,0.5), (M,0.5)}	1	X_1 is {(H,0.2), (M,0.8)}
则	32	(X_2 is M∧X_3 is M)	1	X_1 is {(M,1)}	0.4	X_1 is {(M,1)}
库	33	(X_2 is M∧X_3 is L)	1	X_1 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_1 is {(M,0.3), (L,0.7)}
4	34	(X_2 is L∧X_3 is H)	1	X_1 is { (M, 1) }	1	X_1 is {(H,0.1), (M,0.2), (L,0.7)}
	35	(X_2 is L∧X_3 is M)	1	X_1 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_1 is {(M,0.2), (L,0.8)}
	36	(X_2 is L∧X_3 is L)	1	X_1 is {(L,1)}	1	X_1 is {(L,1)}

C4)计算评价结果对应的总效用值，即$\hat{y}_t=\sum_{j=1}^{N}\mu(D_j)\hat{\beta}_j(t)$，$\mu(D_j)$表示在规则输出部分中评价结果$D_j$的效用，可取如下值：

$$\mu(D_j)=\begin{cases}1 & ,D_j=H\\ 0.5 & ,D_j=M\\ 0 & ,D_j=L\end{cases}。$$

基于置信规则库推理的航母编队识别方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种在远程预警系统中利用天波超视距雷达(Over-the-Horizon Radar,OTHR)的探测与跟踪信息,提出了一种基于置信规则库推理(Belief Rule Base,BRB)的航母编队识别技术,是一项应用于远程预警系统对航母编队识别和预警的有效研究方案。

背景技术

[0002] 天波超视距雷达(OTHR)作为远程预警系统的主要装备,其距离覆盖范围为800km～3500km,对低空飞行器、海面舰船目标具有远距离连续监视的能力,目前尚无其它系统可以取代。然而,OTHR的探测跟踪输出结果为一系列目标的航迹信息,无法给出目标的属性信息。目前,国内外有许多学者对目标识别问题进行了广泛研究,然而这些工作主要关注基于图像传感器、电子侦察设备或多个传感器融合对单个目标进行识别,无法给出航母编队这样的目标群的整体属性。而航母编队作为一个战斗群体,各个子目标之间存在一定的空间位置和从属关系约束,这些约束在OTHR输出的航迹信息上的表现可以用来进行对战斗群整体的识别。

[0003] 基于天波超视距雷达的航迹输出进行航母编队识别面临着非常复杂的问题,主要体现在:a)由于监视范围广,目标种类多,军民目标交叠在一起,具有较大的概率不确定性;b)由于探测精度有限,目标信息存在很大的模糊不确定性;c)由于雷达提供的数据有限,有时不可避免地要使用专家提供的不完整或不精确的主观信息。要想解决这些问题,就需要应用一种有效的技术对不确定性信息、主观信息进行合理的、系统的、灵活的表示和推理。近几年发展的基于证据推理的置信规则库推理方法(RIMER)(Yang J.B.,Liu,J.Wang J.,et al.A belief rule base inference methodology using the evidential reasoning approach-RIMER[J].IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics,Part A:Systems and Humans,2006,36(2):266-285.)为处理人类参与的决策中的不确定性混合信息提供了新的思路,能够描述含糊的、不完整的因果关系,可以对输出的结果给出良好的解释,但目前尚未在航母编队识别方面得到具体应用。

[0004] 发明目的

[0005] 本发明的目的针对远程预警系统中航母编队的识别和预警问题,采用基于置信规则库推理的航母编队识别技术,首先基于航母编队中子目标的约束关系构建了航母编队识别置信规则库;然后基于该置信规则库采用证据推理算法实现了多层置信规则库的推理,并且研究了利用历史数据对置信规则库参数进行学习的方法,最后识别推理系统输出不同评价结果的置信度,从而实现对多种不确定性信息下的航母编队进行准确识别和早期预警的目的,为开发基于置信规则库推理的航母编队识别推理原型系统提供参考价值。

发明内容

[0006] 为了实现上述发明目的,本发明以天波超视距雷达对海上目标探测航母编队为应

用背景，提出了一种基于置信规则库推理的航母编队识别技术。本发明的优点可以对多种不确定性信息下的航母编队进行准确识别和早期预警，对于天波超视距雷达以及远程预警系统的工程实际应用具有非常重要的意义。

[0007] 本发明中基于置信规则库推理的航母编队识别方法包括以下步骤：

[0008] 第一步，构建航母编队识别的置信规则库。

[0009] A1)定义输入输出变量及模糊表示。先定义最终的输出变量X_1表示航母编队的置信度；再给出用于推理的五个输入变量(X_3，X_6，X_7，X_8，X_9)和三个中间变量(X_2，X_4，X_5)的定义如下：X_2表示依据OTHR探测信息确定航母编队的置信度、X_3表示依据作战条例数据库信息确定航母编队的置信度、X_4表示舰船编队目标的置信度、X_5表示舰载空中目标的置信度、X_6表示依据速度确定舰船编队目标的置信度、X_7表示依据多条航迹的平行性确定舰船编队目标置信度、X_8表示依据速度确定舰载空中目标的置信度、X_9表示依据航迹起始与终结位置确定舰载空中目标的置信度，X_i(i＝1，2，...，9)取值范围为0～1；最后定义表示每个变量参考值的模糊语义值高(H)、中(M)和低(L)。

[0010] B1)建立初始规则库。建立航母编队识别分层BRB结构的推理系统，包括三层，由下至上共有四个子规则库，子规则库1和2为底层规则库，规则库3为中间层规则库，规则库4为顶层规则库。确定变量间的推理规则，给出航母编队识别的置信规则库的36条初始规则，见表1，每个子规则库含9条规则，以此作为置信规则库推理的基础。

[0011] 第二步，建立子规则库间的推理关系

[0012] 基于单层BRB系统的推理方法由下至上逐层推理来进行多层BRB系统的推理，即子规则库1和子规则库2的推理输出分别作为子规则库3的输入，然后子规则库3的推理输出作为子规则库4的输入，最后子规则库4进行推理得到最终的输出结果。

[0013] 第三步，进行规则库参数学习

[0014] A2)构造进行参数学习的目标函数$\xi(V)=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(y_t-\hat{y}_t)^2$。其中，ξ(V)表示目标函数，t表示样本次数，T表示总样本数，yt表示实际系统输出，$\hat{y}_t$表示BRB系统产生的估计输出。

[0015] B2)构建进行参数学习的约束关系。约束形式为：

[0016]
$$\begin{cases} 0\le\theta_k^z\le 1, & k=1,2,\cdots L_z,\ z=1,2,\cdots Z \\ 0\le\bar{\delta}_i^z\le 1, & i=1,2,\cdots M_z,\ z=1,2,\cdots Z \\ 0\le\beta_{j,k}^z\le 1, & j=1,2,\cdots N_z,\ k=1,2,\cdots L_z,\ z=1,2,\cdots Z \\ \sum_{j=1}^{N_z}\beta_{j,k}^z=1, & k=1,2,\cdots L_z,\ z=1,2,\cdots Z \end{cases}$$

[0017] 其中，θ_k^z表示第z个子规则库中第k条规则的权重，$\bar{\delta}_i^z$表示第z个子规则库中第i个前提属性的权重，$\beta_{j,k}$(j＝1，2，…N；k＝1，2…L)为分配给输出结果D_j的置信度，Z表示子规则个数，L_z表示第z个子规则库的规则数目，M_z表示第z个子规则库前提属性的数目，N_z表示第z个子规则库输出参考值的数目。该问题实际上是一个包含$S_1=\sum_{z=1}^{Z}(L_z+M_z+N_z\times L_z)$个参数和$S_2=\sum_{z=1}^{Z}(2L_z+M_z+N_z\times L_z)$个约束的非线性优化问题。

[0018] C2)利用目标函数和约束关系建立优化模型,进行规则库参数学习。优化模型如下:min{ξ(V)},s.t.A(V)=0,B(V)≥0。其中,ξ(V)表示目标函数;A(V)表示等式约束函数;B(V)表示不等式约束函数。输入历史观测数据到多层BRB推理系统,产生航母编队置信输出,再根据优化模型学习得到参数,最后得出参数学习后的置信规则库。

[0019] 第四步,利用参数学习得到的参数实现规则库的推理并输出结果

[0020] A4)对OTHR输出的航迹信息或作战条例数据库进行预处理,得到多层BRB系统的输入变量(确定性的概率值);再采用基于规则的信息转换技术建立等价规则,得出相对于模糊参考值(H,M,L)的置信度。

[0021] B4)结合学习得到的参数和置信度,利用表1中参数学习后的规则库和推理关系进行多层推理,输出结果 $\hat{y}_t=\{(D_j,\hat{\beta}_j(t)),\ j=1,2,\cdots,N\}$,其中$D_j$表示可能的评价结果,$\hat{\beta}_j$表示对应的置信度。

[0022] C4)计算评价结果对应的总效用值,即 $\hat{y}_t=\sum_{j=1}^{N}\mu(D_j)\hat{\beta}_j(t)$, $\mu(D_j)$表示在规则输出部分中评价结果D_j的效用,可取如下值:

[0023] $$\mu(D_j)=\begin{cases}1 & ,D_j=H\\ 0.5 & ,D_j=M\\ 0 & ,D_j=L\end{cases}。$$

[0024] 本发明的有益效果是:

[0025] 基于航母编队中子目标的约束关系构建了航母编队识别置信规则库,在此基础上实现了参数学习的多层BRB的推理。该方法可以有效地解决存在多种不确定性下的航母编队识别问题。

附图说明

[0026] 图1BRB系统参数学习的基本思想

[0027] 图2航母编队识别分层BRB结构图

[0028] 图3航母编队置信度的评估输出

具体实施例

[0029] 以下对本发明方案作进一步具体的描述。

[0030] 总体思路

[0031] 天波超视距雷达对海面目标进行持续监视,可形成一系列目标航迹的输出。航母编队的识别的推理系统要通过对这些航迹输出的处理获取所需要的输入信息。

[0032] 众所周知,航母编队区别于其它目标群的最显著标识是舰船编队和舰载机在同一区域执行任务,若OTHR对某一区域探测过程中同时得到这两种目标的信息,是航母编队的可能性会很大;更进一步,舰船编队区别于其它群目标主要取决于两个因素:一是速度,二是航迹的平行性;另一方面,舰载机区别于其它目标主要取决于两个因素:一是速度,二是其航迹会在非陆地区域起始和终结。基于以上约束关系可形成基于OTHR探测信息对航母编队推理的逻辑。

[0033] 此外，其它一些外部信息源，如作战条例数据库，给出了航母编队的一些历史活动信息和规则，可以基于此构造独立于OTHR探测信息的关于航母编队识别的一个支撑依据。

[0034] 航母编队识别BRB构造

[0035] 根据上节分析，构造图2所示的航母编队识别分层BRB结构，在构造的推理系统中，共包括四个子规则库。使用五个输入变量(X_3,X_6,X_7,X_8,X_9)和三个中间变量(X_2,X_4,X_5)对输出变量X_1进行推理。为了便于推理，每个变量的参考值均用模糊语义值来表示，分别是高(high,H)、中(medium,M)和低(low,L)。图2中各参数的详细定义如下：

[0036] 1)X_1表示航母编队的置信度；

[0037] 2)X_2表示依据OTHR探测信息确定航母编队的置信度；

[0038] 3)X_3表示依据作战条例数据库信息确定航母编队的置信度；

[0039] 4)X_4表示舰船编队目标的置信度；

[0040] 5)X_5表示舰载空中目标的置信度；

[0041] 6)X_6表示依据速度确定舰船编队目标的置信度；

[0042] 7)X_7表示依据多条航迹的平行性确定舰船编队目标的置信度；

[0043] 8)X_8表示依据速度确定舰载空中目标的置信度；

[0044] 9)X_9表示依据航迹起始、终结位置确定舰载空中目标的置信度。

[0045] 表1给出了航母编队识别的置信规则库的36条规则，这些规则是后续推理的基础。

[0046] 表1航母编队识别BRB

[0047]

	编号	前提属性	初始给定的规则库		参数学习后的规则库	
			权重	评价结构	权重	评价结构
子规则库1	1	(X_8 is H∧X_9 is H)	1	X_5 is {(H,1)}	1	X_5 is {(H,1)}
	2	(X_8 is H∧X_9 is M)	1	X_5 is {(H,0.5),(M,0.5)}	1	X_5 is {(H,0.2),(M,0.8)}
	3	(X_8 is H∧X_9 is L)	1	X_5 is {(M,1)}	0.5	X_5 is {(M,0.3),(L,0.7)}
	4	(X_8 is M∧X_9 is H)	1	X_5 is {(H,0.5),(M,0.5)}	0.8	X_5 is {(H,0.5),(M,0.5)}
	5	(X_8 is M∧X_9 is M)	1	X_5 is {(M,1)}	1	X_5 is {(M,1)}
	6	(X_8 is M∧X_9 is L)	1	X_5 is {(M,0.5),(L,0.5)}	0.8	X_5 is {(M,0.1),(L,0.9)}
	7	(X_8 is L∧X_9 is H)	1	X_5 is {(M,1)}	0.5	X_5 is {(H,0.2),(M,0.2),(L,0.6)}
	8	(X_8 is L∧X_9 is M)	1	X_5 is {(M,0.5),(L,0.5)}	0.8	X_5 is {(M,0.4),(L,0.6)}
	9	(X_8 is L∧X_9 is L)	1	X_5 is {(L,1)}	1	X_5 is {(L,1)}
子规则库2	10	(X_6 is H∧X_7 is H)	1	X_4 is {(H,1)}	1	X_4 is {(H,1)}
	11	(X_6 is H∧X_7 is M)	1	X_4 is {(H,0.5),(M,0.5)}	1	X_4 is {(H,0.3),(M,0.7)}
	12	(X_6 is H∧X_7 is L)	1	X_4 is {(M,1)}	1	X_4 is {(H,0.3),(M,0.7)}
	13	(X_6 is M∧X_7 is H)	1	X_4 is {(H,0.5),(M,0.5)}	1	X_4 is {(H,0.4),(M,0.6)}
	14	(X_6 is M∧X_7 is M)	1	X_4 is {(M,1)}	0.4	X_4 is {(M,1)}
	15	(X_6 is M∧X_7 is L)	1	X_4 is {(M,0.5),(L,0.5)}	1	X_4 is {(M,0.1),(L,0.9)}
	16	(X_6 is L∧X_7 is H)	1	X_4 is {(M,1)}	0.2	X_4 is {(H,0.1),(M,0.3),(L,0.6)}
	17	(X_6 is L∧X_7 is M)	1	X_4 is {(M,0.5),(L,0.5)}	1	X_4 is {(M,0.3),(L,0.7)}
	18	(X_6 is L∧X_7 is L)	1	X_4 is {(L,1)}	1	X_4 is {(L,1)}
子规则库	19	(X_4 is H∧X_5 is H)	1	X_2 is {(H,1)}	1	X_2 is {(H,1)}
	20	(X_4 is H∧X_5 is M)	1	X_2 is {(H,0.5),(M,0.5)}	0.6	X_2 is {(H,0.4),(M,0.6)}
	21	(X_4 is H∧X_5 is L)	1	X_2 is {(M,1)}	1	X_2 is {(H,0.2),(M,0.3),(L,0.5)}
	22	(X_4 is M∧X_5 is H)	1	X_2 is {(H,0.5),(M,0.5)}	0.6	X_2 is {(H,0.2),(M,0.8)}
	23	(X_4 is M∧X_5 is M)	1	X_2 is {(M,1)}	0.6	X_2 is {(M,1)}

[0048]

3	24	(X_4 is M∧X_5 is L)	1	X_2 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_2 is {(M,0.2), (L,0.8)}
	25	(X_4 is L∧X_5 is H)	1	X_2 is { (M, 1) }	1	X_2 is {(H,0.1), (M,0.2), (L,0.7)}
	26	(X_4 is L∧X_5 is M)	1	X_2 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_2 is {(M,0.2), (L,0.8)}
	27	(X_4 is L∧X_5 is L)	1	X_2 is {(L,1)}	1	X_2 is {(L,1)}
子规则库4	28	(X_2 is H∧X_3 is H)	1	X_1 is {(H,1)}	1	X_1 is {(H,1)}
	29	(X_2 is H∧X_3 is M)	1	X_1 is {(H,0.5), (M,0.5)}	0.2	X_1 is {(H,0.3), (M,0.7)}
	30	(X_2 is H∧X_3 is L)	1	X_1 is {(M,1) }	0.8	X_1 is {(H,0.1), (M,0.3), (L,0.6)}
	31	(X_2 is M∧X_3 is H)	1	X_1 is {(H,0.5), (M,0.5)}	1	X_1 is {(H,0.2), (M,0.8)}
	32	(X_2 is M∧X_3 is M)	1	X_1 is {(M,1)}	0.4	X_1 is {(M,1)}
	33	(X_2 is M∧X_3 is L)	1	X_1 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_1 is {(M,0.3), (L,0.7)}
	34	(X_2 is L∧X_3 is H)	1	X_1 is { (M, 1) }	1	X_1 is {(H,0.1), (M,0.2), (L,0.7)}
	35	(X_2 is L∧X_3 is M)	1	X_1 is {(M,0.5), (L,0.5)}	1	X_1 is {(M,0.2), (L,0.8)}
	36	(X_2 is L∧X_3 is L)	1	X_1 is {(L,1)}	1	X_1 is {(L,1)}

[0049] 基于多层BRB的推理

[0050] 当输入信息x到来后,利用证据推理(Evidential Reasoning,ER)算法对BRB中置信规则进行组合,从而得到BRB系统的最终输出,这就是基于证据推理的置信规则库推理方法(RIMER)的基本思想。RIMER主要通过以下两步来实现BRB系统的推理。

[0051] (1)置信规则激活权重的计算

[0052] 输入信息x对第k条规则的激活权重通过下式来计算,即

[0053] $$\omega_k=\frac{\theta_k\prod_{m=1}^{M}(\alpha_{m,q}^{k})^{\bar{\delta}_i}}{\sum_{l=1}^{L}\theta_l\prod_{m=1}^{M}(\alpha_{m,q}^{l})^{\bar{\delta}_i}}$$

[0054] 其中,$\alpha_{m,q}^{k}$为实际输入x_m与其参考值$A_{m,q}^{k}$的匹配度,表示在第k条规则中分配给$A_{m,q}^{k}$的置信度。$\alpha_{m,q}^{k}$的获取主要依赖于前提属性的特点以及输入数据的特性。基于信息等价变换技术的处理策略,对各种输入信息进行变换,以便应用ER算法进行推理。

[0055] (2)利用ER算法进行推理

[0056] ER算法主要由以下两步组成:首先,把输出部分的置信度$\beta_{j,k}$(j=1,2,…N;k=1,2…L)转化为如下基本概率质量,即

[0057] $$\begin{cases} m_{j,k}=\omega_k\beta_{j,k} \\ m_{D,k}=1-\omega_k\sum_{j=1}^{N}\beta_{j,k} \\ \bar{m}_{D,k}=1-\omega_k \\ \tilde{m}_{D,k}=\omega_k(1-\sum_{j=1}^{N}\beta_{j,k}) \end{cases}$$

[0058] 其中,$m_{j,k}$表示相对于评价结果D_j的基本概率设置;$m_{D,k}$表示未设置给任意评价结果的基本概率,$m_{D,k}=\bar{m}_{D,k}+\tilde{m}_{D,k}$; $\bar{m}_{D,k}$是由第k条规则的重要度(激活权重)引起的,如果第k条规则是绝对重要的,即$\omega_k=1$,此时$\bar{m}_{D,k}=0$; $\tilde{m}_{D,k}$是由第k条规则评价结果的不完整性引起的,如果第k条规则评价结果是完整的,即$1-\sum_{j=1}^{N}\beta_{j,k}=0$,此时$\tilde{m}_{D,k}=0$。

[0059] 然后,对L条规则进行组合,即可得到对应于评价结果D_j(j=1,2,…N)的置信度。

具体过程如下：假设$m_{j,I(k)}$表示使用Dempster准则对前k条规则组合后得到对应于D_j的基本概率设置，且满足$m_{D,I(k)}=1-\sum_{j=1}^{N}m_{j,I(k)}$；令$m_{j,I(1)}=m_{j,1}$和$m_{D,I(1)}=m_{D,1}$。迭代使用Dempster准则对前k条规则进行组合，有

[0060] $m_{j,I(k+1)}=K_{I(k+1)}[m_{j,I(k)}m_{j,k+1}+m_{j,I(k)}m_{D,k+1}+m_{D,I(k)}m_{j,k+1}]$

[0061] $$m_{D,I(k)}=\bar{m}_{D,I(k)}+\tilde{m}_{D,I(k)}$$

[0062] $$\tilde{m}_{D,I(k+1)}=K_{I(k+1)}[\tilde{m}_{D,I(k)}\tilde{m}_{D,k+1}+\tilde{m}_{D,I(k)}\bar{m}_{D,k+1}+\bar{m}_{D,I(k)}\tilde{m}_{D,k+1}]$$

[0063] $$\bar{m}_{D,I(k+1)}=K_{I(k+1)}[\bar{m}_{D,I(k)}\bar{m}_{D,k+1}]$$

[0064] $$K_{I(k+1)}=[1-\sum_{j=1}^{N}\sum_{\substack{p=1\\p\neq j}}^{N}m_{j,I(k)}m_{p,k+1}]^{-1},k=1,2,\cdots,L-1$$

[0065] $$\begin{cases}\hat{\beta}_j=\dfrac{m_{j,I(L)}}{1-\bar{m}_{D,I(L)}},\ j=1,2,\cdots,N\\ \hat{\beta}_D=\dfrac{\tilde{m}_{D,I(L)}}{1-\bar{m}_{D,I(L)}}\end{cases}$$

[0066] 其中，$\hat{\beta}_j$表示对应于评价结果D_j的置信度；$\hat{\beta}_D$表示未设置给任意评价结果的置信度。

[0067] 从上节可以看出，航母编队识别的BRB具有多层结构。多层BRB系统的推理可以根据前面描述的单层BRB系统的推理方法由下至上逐层推理。即子规则库1和子规则库2的推理输出分别作为子规则库3的输入，然后子规则库3的推理输出作为子规则库4的输入，最后子规则库4进行推理得到最终的输出结果。

[0068] 多层BRB系统的输入是基于OTHR输出的航迹信息或作战条例数据库计算得到。然而这些输入是一些确定性的概率值，在推理之前要把这些确定值转换为相对于模糊参考值(H,M,L)的置信度。这里，采用基于规则的信息转换技术[14]。首先给出如下等价规则，即

[0069] 1等价转换为{(H,1)}

[0070] 0.5等价转换为{(M,1)}

[0071] 0等价转换为{(L,1)}

[0072] 进而可以得出

[0073] 0.95等价转换为{(H,0.9),(M,0.1)}

[0074] 0.6等价转换为{(H,0.2),(M,0.8)}

[0075] 0.4等价转换为{(M,0.8),(L,0.2)}

[0076] 0.1等价转换为{(M,0.2),(L,0.8)}

[0077] 此外，由于BRB系统是基于ER算法的进行推理的，由Dempster组合规则知各输入量之间必须保证相互独立。

[0078] BRB参数学习

[0079] 对于上述航母编队识别BRB，用于参数学习的输入观测值为$x_t=[X_3^t,X_6^t,X_7^t,X_9^t]^T$，输出观测值为$y_t=[X_1^t]$，且t＝1，2，…，T，其中$y_t$为数值形式的观测值，表征是否为航母编队，当

是航母编队时$y_t=1$，否则$y_t=0$。

[0080] 对于给定的输入x_t，经过多层BRB推理可以产生如下航母编队置信输出，即

[0081] $$\hat{y}_t=\{(D_j,\hat{\beta}_j(t)),\ \ j=1,2,\cdots,N\}$$

[0082] 为了便于比较，需要将上式的置信输出转化为平均效应，即

[0083] $$\hat{y}_t=\sum_{j=1}^{N}\mu(D_j)\hat{\beta}_j(t)$$

[0084] 其中，$\mu(D_j)$表示在规则输出部分中D_j的效用，可取如下值：

[0085] $$\mu(D_j)=\begin{cases}1 & \text{if } D_j=H\\ 0.5 & \text{if } D_j=M\\ 0 & \text{if } D_j=L\end{cases}$$

[0086] 最终，图1中目标函数可以表示为

[0087] $$\xi(V)=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(y_t-\hat{y}_t)^2$$

[0088] 参数的约束关系主要由系统的需求决定，当系统没有特定需求时，一般可以给定如下最基本的约束形式

[0089] $$\begin{cases}0\le\theta_k^z\le 1, & k=1,2,\cdots L_z,\ z=1,2,\cdots Z\\ 0\le\bar{\delta}_i^z\le 1, & i=1,2,\cdots M_z,\ z=1,2,\cdots Z\\ 0\le\beta_{j,k}^z\le 1, & j=1,2,\cdots N_z,\ k=1,2,\cdots L_z,\ z=1,2,\cdots Z\\ \sum_{j=1}^{N_z}\beta_{j,k}^z=1, & k=1,2,\cdots L_z,\ z=1,2,\cdots Z\end{cases}$$

[0090] 其中，Z表示子规则个数，L_z表示第z个子规则库的规则数目，M_z表示第z个子规则库前提属性的数目，N_z表示第z个子规则库输出参考值的数目。该问题实际上是一个包含$S_1=\sum_{z=1}^{Z}(L_z+M_z+N_z\times L_z)$个参数和$S_2=\sum_{z=1}^{Z}(2L_z+M_z+N_z\times L_z)$个约束的非线性优化问题，可以利用Matlab软件中的优化工具箱来求解。

[0091] 为了验证本发明方案，下面给出一具体实例的仿真结果。

[0092] 仿真场景：根据OTHR的探测和跟踪特性，模拟生成不同时间段的50组独立的场景，其中，部分场景中含有航母编队目标，而其它场景则只包含虚假目标(如民船，航班等)。

[0093] 基于初始给定BRB的推理实现

[0094] 本节主要根据表1初始给定的规则库，基于一组仿真数据实现整个推理过程(假设每个子规则库的前提属性的权重均为1，即$\forall i,z,\bar{\delta}_i^z=1$)。

[0095] (1)子规则库1的推理

[0096] 在子规则库1中，输入X8为0.6，X9为0.8，可以等价转化为如下形式，即

[0097] X8:{(H,0.2),(M,0.8),(M,0)}

[0098] 根据结果显示，参数学习后的规则库推理结果的正确率(100％)比学习前的正确率(60％)有了明显提升。该技术可以有效地解决存在多种不确定性下的航母编队识别问

题。

[0099] X_9:{(H,0.6),(M,0.4),(M,0)}.

[0100] 根据上述输入,基于表1中的子规则库1进行推理可以得到X5的评价结果为

[0101] X_5:{(H,0.3710),(M,0.6290),(M,0)}.

[0102] (2)子规则库2的推理

[0103] 在子规则库2中,输入X_6为0.3,X_7为0.7,可以等价转化为如下形式,即

[0104] X_6:{(H,0),(M,0.6),(M,0.4)}

[0105] X_7:{(H,0.4),(M,0.6),(M,0)}

[0106] 根据上述输入,基于表1中的子规则库2进行推理可以得到X_4的评价结果为

[0107] X_4:{(H,0.0872),(M,0.8256),(M,0.0872)}.

[0108] (3)子规则库3的推理

[0109] 在子规则库3中,将子规则库1和子规则库2的输出作为其输入,基于表1中的子规则库3进行推理可以得到X_2的评价结果为

[0110] X_2:{(H,0.1511),(M,0.8252),(M,0.0237)}.

[0111] (4)子规则库4的推理

[0112] 在子规则库4中,输入X_3为0.7可以等价转化为如下形式,即

[0113] X_3:{(H,0.4),(M,0.6),(M,0)}.

[0114] 根据上述输入,再将子规则库3的输出作为其输入,基于表1中的子规则库4进行推理可以得到X_1的评价结果为

[0115] X_1:{(H,0.3511),(M,0.6434),(L,0.0055)}.

[0116] 最终推理得到的航母编队评估结果如图3所示,从中可以看出,评价等级“M”和“H”的置信比较高。为了给出一个量化指标,依据式错误!未找到引用源。,可以得到与该分布式评估对应的效用为0.6728,即,根据BRB推理结果判断为航母编队的置信度为0.6728。

[0117] 基于参数学习BRB的推理实现

[0118] 将仿真生成的50组数据随机分成两部分,第一部分包含45组数据作为学习样本,第二部分的5组数据用来对参数学习的结果进行测试。

[0119] 首先,利用第一部分数据对BRB的参数进行学习,参数的初始值按表1中初始给定的规则库设置。根据经验知识,航母编队识别BRB中不同前提属性的权重差别不大,因此为了简化运算,假定$\bar{\delta}_i=1\ \ (i=1,2)$,并且不对其进行优化。基于优化模型对参数进行优化,可得表1所示参数学习后的航母编队识别规则库。

[0120] 然后,为了验证参数学习的有效性,基于第二部分数据分别利用表1初始给定的规则库和参数学习后的规则库进行推理,结果如表2所示。表中第2～6列为BRB系统的输入值;第7列代表利用初始给定的规则库的推理结果(置信度/0-1决策值);第8列代表利用参数学习后的规则库的推理结果(置信度/0-1决策);第9列代表仿真设置的真实结果(0-1决策)。

[0121] 表2学习前后的评价结果与真实值的比较

[0122]

测试次数	X_3	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{1A}	X_{1B}	X_{1R}
1	0.6	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9022/**1**	0.8098/**1**	**1**
2	0.8	0.3	0.2	0.3	0.2	0.5061/**1**	0.1501/**0**	**0**
3	0.3	0.5	0.3	0.5	0.2	0.0638/**0**	0.2852/**0**	**0**
4	0.5	0.8	0.8	0.2	0.2	0.4867/**0**	0.1438/**0**	**0**
5	0.5	0.9	0.3	0.9	0.3	0.5015/**1**	0.2767/**0**	**0**

[0123] 对于表2给出如下解释：

[0124] 1)从总的结果可以看出，参数学习后的规则库推理结果的正确率(100％)比学习前的正确率(60％)有了明显提升。

[0125] 2)对于第二组测试，因素X_3并不可靠，但从初始给定的BRB子规则库4的评价结构可以看出，其对于X_2与X_3是同等对待的；而在学习后的BRB子规则库4的评价结果中，显然将X_2看得比X_3更重要(例如，对比规则29和规则31可以看出，评价更倾向于X_2提供的结果)。因此，当不太可靠的X_3的置信度较高，而其它影响X_2的因素的置信度较低时，根据初始设定的BRB系统进行推理会发生误判。

[0126] 3)对于第五组测试，因素X6，X8的置信较高，因素X7，X9的置信较低，对应的真实场景是单个货船和单个客机。在学习后的BRB子规则库1和子规则库2中因素X6，X8远没有反映整体信息的因素X7，X9重要，因此，利用学习后的BRB系统推理不会发生误判。

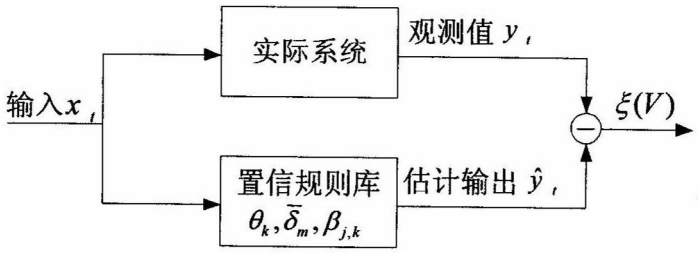

实际系统
观测值 y_t
输入x_t
$\xi(V)$
置信规则库
$\theta_k, \tilde{\delta}_m, \beta_{j,k}$
估计输出 $\hat{y}_t$

图1

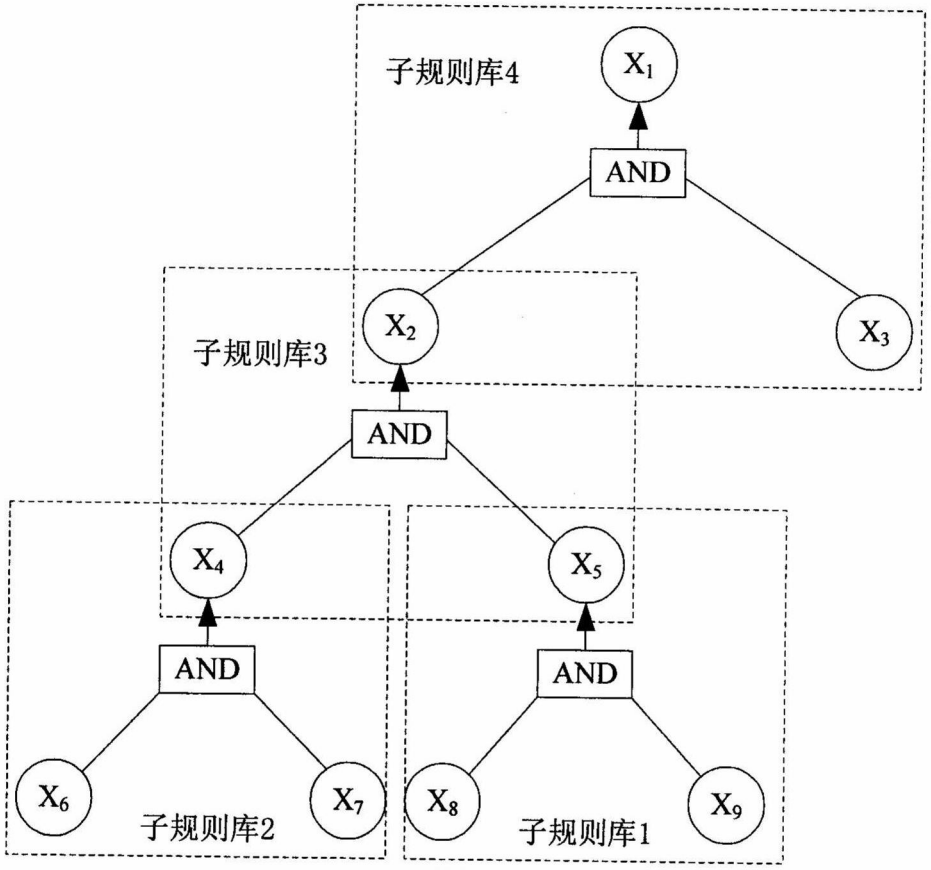

子规则库4
X1
AND
X2
X3
子规则库3
AND
X4
X5
AND
AND
X6
X7
X8
X9
子规则库2
子规则库1

图2

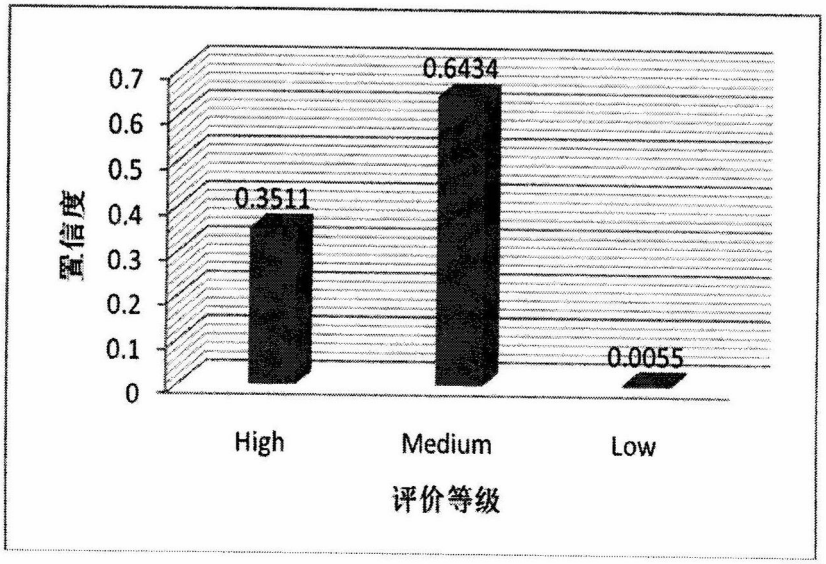

0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
置信度
0.3511
0.6434
0.0055
High
Medium
Low
评价等级

图3