

# 基于 WSN 的目标探测与分类算法\*

潘仲明, 张 恒

(国防科技大学 机电工程及自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**针对 WSN 监测系统的目标检测与分类问题, 提出一种基于直觉模糊推理 (IFR) 的多源数据融合方法。由模糊推理的思想, 设计各状态变量的属性函数。根据目标声强变化和引起的地磁场变化的模型, 设计模糊推理规则, 并检验了所建规则的合理性。理论分析与仿真结果的对比表明算法能准确地对目标进行分类, 且运算量小, 适用于计算能力较弱的 WSN 节点。

**关键词:**无线传感器网络; 数据融合; 目标分类; 直觉模糊推理

**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-2486(2013)05-0180-05

## Targets detection and classification based on WSN

PAN Zhongming, ZHANG Heng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Aimed at the issue about the targets detection and classification in target monitoring system based on WSN, the study proposed a multi-sensor data fusion method based on intuitionistic fuzzy reasoning (IFR). The property functions of two status variables were designed according to the method of fuzzy reasoning. The study constructed the inference rules of the system after acoustic energy attenuation model and the variety of magnetic field model were built, and the rationality of constructed rules was checked. The comparison between theoretical analysis and simulation result show that intuitionistic fuzzy reasoning can classify targets uncomplicatedly and effectively. Because of its less calculation, the method can apply to WSN node, in which the calculation capacity is weak.

**Key words:** wireless sensor network (WSN); data fusion; target classification; intuitionistic fuzzy reasoning (IFR)

基于 WSN 的目标监测系统是由若干个 WSN 节点 (见图 1) 和一个汇聚节点组成。WSN 节点配置了微弱磁场和噪声检测传感器, 用于探测不同机动目标引起的周围环境磁场强度和噪声级的微弱变化。由于弱磁检测传感器的能耗较大, 被动噪声传感器能耗小、作用距离远, 故在 WSN 监测系统中, 噪声传感器处于持续工作状态, 而弱磁检测传感器设置为休眠状态。当噪声传感器输出信号的功率变化量超过设定的阈值时, 通过某种机制“激活”弱磁检测传感器。如果弱磁检测传感器输出信号的功率变化量也超过设定的阈值, 就判定在 WSN 节点感知区域内存在入侵目标。

WSN 节点以无线方式将弱磁和噪声检测传感器的信号发送到汇聚节点。在汇聚节点上对多源数据进行融合, 从而实现目标的检测与分类。本文主要研究 WSN 节点检测到目标后, 汇聚节点如何根据 WSN 节点数据来区分入侵目标的类别。

在 WSN 监测系统中, 所谓的多源数据融合是指: 根据一定的准则对所有或部分观测数据进行自动分析和综合, 并做出正确决策。传统的特征

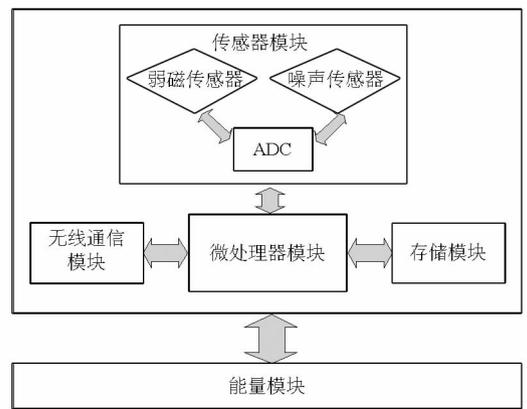


图 1 WSN 节点原理图

Fig. 1 The architecture of a sensor node for WSN  
级数据融合算法常用 Bayes 决策理论和 D-S 证据理论。文献[1]介绍一种基于 D-S 证据理论的层次式数据融合算法, 在节点上以最小二乘算法融合多传感器数据, 在监控终端上采用 D-S 证据理论建立识别框架, 通过证据的不断积累提高目标的分类准确度。文献[2]提出一种改进的模糊逻辑算法, 对多传感器数据进行融合。该算法对规则库中的规则进行有选择的删减, 有效地

\* 收稿日期: 2013-01-24

作者简介: 潘仲明 (1959—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, Email: chungmingpan@163.com

减少了基本规则数量和运算量。文献[3]提出一种基于支持向量机(SVM)的动态协作方法,即通过多传感器数据融合,在提高目标分类正确率的基础上尽可能减小WSN节点的能耗。与以上方法相比,本文提出的基于模糊推理的目标分类算法在确定了推理规则后,只是简单地进行加权求和、加权平均运算,不用进行复杂的函数运算,简单直观、运算量小,适用于计算能力较弱的WSN节点。同时,直觉模糊推理分类方法具有更强的实用性,当环境发生变化时,只需根据实测的数据调整算法参数,即可得到比较满意的分类结果。

### 1 磁场强度变化和声能衰减模型

#### (1) 磁场强度变化模型

地球磁场强度的范围大约为  $25 \sim 65 \mu\text{T}$  [7], 在某一区域内(半径为几千米)地球磁场强度是恒定的。当在该区域出现铁磁体时,附近磁场就会变化。一定几何形状的磁性体,可用一个均匀磁化的旋转椭球体来近似,距WSN节点越远,这种近似程度越高,可简化为磁偶极子模型[6]。文献[9]给出了磁偶极子对磁场影响的模型:

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3(m \cdot r)r - m] \quad (1)$$

其中,  $\mu_0$  是真空中磁导率,  $m$  为磁矩,  $r$  为铁磁物体到弱磁传感器的距离,  $r$  为铁磁物体在  $r$  方向上的单位向量。

设铁磁物体相对于弱磁检测传感器的运动速度分量为  $v$ , 则磁场强度变化量  $\Delta B$  与  $v$  的关系为

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} [3(m \cdot r)r - m] \left[ \frac{1}{(r-v)^3} - \frac{1}{r^3} \right] \quad (2)$$

#### (2) 声音衰减模型

声音强度大小可由声压级反映出来,测点的声压级越大,则对应的声音强度越大。文献[10]给出测点到声源的距离  $d$  与声压级的关系式:

$$L_{pc} = L_{p1} - 20\lg d \quad (3)$$

其中  $L_{pc}$  为噪声传感器测点的声压级,  $L_{p1}$  为声源处声压级大小,  $d$  为测点到声源的距离。

将声音强度记为  $S$ , 则声音强度  $S$  与声源距传感器的距离  $d$  的关系如图2所示。

将当前时刻声音强度与前一时刻声音强度的差值定义为声音强度变化率,记为  $V$ 。设目标相对于噪声传感器的速度分量为  $v$ , 噪声检测传感器与声源之间的欧式距离记为  $d$ 。声音强度变化率  $V$  与声源距传感器的距离  $d$ 、速度  $v$  的关系为

$$V = \Delta S = 20\lg d - 20\lg(d-v) \quad (4)$$

同一测点,目标相对于噪声传感器的速度分

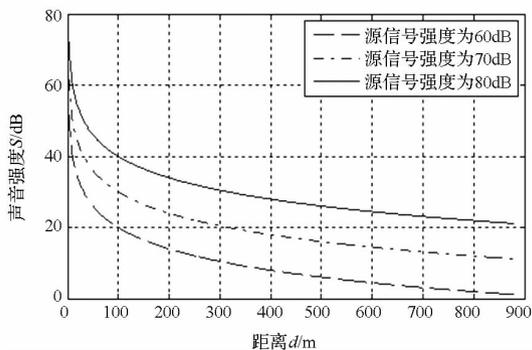


图2 噪声强度与传感器距声源距离的关系图

Fig.2 Simulation results of noise intensity changes over distance

量越大时,声音强度变化率  $V$  也越大,变化趋势如图3所示。

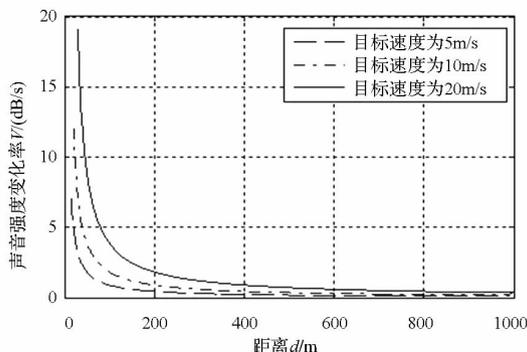


图3 噪声强度变化与距离及速度的关系

Fig.3 Simulation results of noise intensity changes over target speed

## 2 直觉模糊推理

直觉模糊推理属于特征级的数据融合,主要是对WSN中传感器获得的数据进行处理,提取目标的特征量,然后对目标特征信息进行推理融合,以达到对不同目标进行分类的目的。在运用直觉模糊推理进行数据融合对目标进行分类时,首先要建立系统状态变量的属性函数;然后建立推理规则,设计推理合成算法,并将推理结果解模糊;最后通过输出映射曲面检验规则的合理性[5]。

### 2.1 隶属度函数和变量属性函数

在WSN的监测系统中,WSN节点配置了两种传感器——弱磁检测传感器和噪声检测传感器,因此需要对磁场变化信号和声学信号的隶属度与非隶属度函数进行设计。隶属度函数表示变量对于模糊子集的隶属程度,函数的形状对模糊推理的性能有很大的影响[8]。为贴近实际情况,在此选用高斯型隶属度函数

$$\mu_A(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

和高斯型非隶属度函数

$$\gamma_A(x) = \delta_A(x) - \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

其中,  $\delta_A(x) = 1 - \pi_A(x)$ ;  $\sigma$  和  $c$  为隶属度函数的参数, 分别表示函数曲线的宽度和中心;  $\pi_A(x)$  为直觉指数, 其大小根据实验情况给出。为简单, 通常令  $\delta_A(x) = 0$ 。

下面研究如何根据传感器的动态范围来设计磁场强度和声音强度的状态变量属性函数。

### (1) 磁场变化论域 $V$

在 WSN 监测系统中, WSN 节点配置了三维 GMI(巨磁阻抗)弱磁检测传感器, 其分辨率为 1nT, 能检测到由目标引起的微小磁场强度变化量。

磁场变化信号  $B$  按变化率大小分为小、中和大三个区间:  $[0.15, 0.15]$ ,  $[0.15, 0.50]$ ,  $[0.15, 0.85]$ , 分别对应于直觉模糊子集  $B_1, B_2$  和  $B_3$ 。假设不同目标在 WSN 感知覆盖区域移动引起的磁场变化率范围为  $0 \sim 1000\text{nT/s}$ , 输入变量  $B$  为

$$B = \begin{cases} \frac{x}{600}, & x \leq 200\text{nT/s} \\ \frac{x-400}{1333} + 0.5, & 200\text{nT/s} < x \leq 600\text{nT/s} \\ 1 - \frac{1000-x}{1200}, & x > 600\text{nT/s} \end{cases} \quad (7)$$

### (2) 声音信号论域 $S$

在 WSN 监测系统中, WSN 节点配置了 GRAS40AN 噪声传感器, 检测的是测点的声压值, 其检测范围为  $14 \sim 146\text{dB}$ , 能检测到由目标引起的微小噪声级的变化量。

对噪声传感器接收到的信号进行变量属性划分之前, 需对原始信号作滤波降噪处理。GRAS40AN 噪声传感器配置前置放大器 26CA, 可对  $2\text{Hz} \sim 200\text{kHz}$  范围内信号分量进行滤波和放大。

噪声传感器接收到的噪声信号特征可由两个方面体现出来: 噪声强度  $S$  和噪声强度变化率  $V$ 。

将噪声传感器检测到的噪声强度  $S$  按小、中、大划分为三个区间:  $[0.15, 0.15]$ 、 $[0.15, 0.50]$ 、 $[0.15, 0.85]$ 。输入变量  $S$  为

$$S = \begin{cases} \frac{x-14}{48}, & 14\text{dB} < x \leq 30\text{dB} \\ \frac{x-45}{90} + 0.5, & 30\text{dB} < x \leq 60\text{dB} \\ 1 - \frac{146-x}{258}, & x > 60\text{dB} \end{cases} \quad (8)$$

由图 3 的仿真结果, 假设噪声强度变化率范围为  $0 \sim 20\text{dB/s}$ , 将噪声传感器检测到的噪声强度变化率  $V$  按小、中、大划分为三个区间:  $[0.15, 0.15]$ 、 $[0.15, 0.50]$ 、 $[0.15, 0.85]$ 。输入变量  $V$  为

$$V = \begin{cases} \frac{x}{6}, & x \leq 2\text{dB/s} \\ \frac{x-3.5}{9} + 0.5, & 2\text{dB/s} < x \leq 5\text{dB/s} \\ 1 - \frac{20-x}{45}, & x > 5\text{dB/s} \end{cases} \quad (9)$$

### (3) 输出论域 $U$

基于 WSN 的监测系统主要的监测目标有: 人员目标、小型空中目标、轻型车辆、低空目标、重型车辆和海上目标, 分别对应 6 个模糊子集:  $U_1 = [0.06, 0.09]$ ,  $U_2 = [0.06, 0.25]$ ,  $U_3 = [0.06, 0.42]$ ,  $U_4 = [0.06, 0.58]$ ,  $U_5 = [0.06, 0.76]$ ,  $U_6 = [0.06, 0.91]$ 。

## 2.2 推理规则

模糊推理输入参数  $V_f, V_r$  和  $S$  状态变量属性函数的个数分别为:  $N_B = 3$ ,  $N_S = 3$ ,  $N_V = 3$ , 目标分类输出量的属性函数个数  $N_U = 6$ 。监测系统的推理规则数量  $N = N_B \times N_S \times N_V = 27$ 。

推理规则是多重多维的, 其形式如下:

If  $b$  is  $B_i$  and  $s$  is  $S_j$  and  $v$  is  $V_n$ ,

Then  $z$  is  $C_k$ ;

$i = 1, 2, \dots, N_B; j = 1, 2, \dots, N_S; n = 1, 2, \dots,$

$N_V; k = 1, 2, \dots, N_U$ 。

其中:  $b, s, v$  是输入变量,  $z$  是输出变量,  $B_i, S_j, V_n$  是前提部分语言项,  $C_k$  是输出论域中的一个直觉模糊子集  $U_k$ 。

由式(2)可以看出, 磁场强度变化率越大, 说明目标质量较大或者移动速度较快。

由式(2)和图 2 可以看出, 声源声音强度越大, 距离噪声传感器越近, 则噪声传感器检测到的噪声强度越大; 由式(4)和图 3 可看出, 移动目标相对于噪声传感器的速度越大, 则传感器检测到的噪声强度变化率越大。距离比较远时, 这种变化较小, 当目标距噪声传感器距离很近时, 噪声强度的变化特别明显。

在 WSN 监测系统中, 人员目标对附近地磁场影响较小, 其行进速度慢, 声音强度变化率也小。重型车辆的速度快、质量大, 故对附近地磁场的影响较大, 而且其发动机发出的噪声很大, 噪声强度变化率较大。飞行器的速度最快, 且其引擎噪声和飞行噪声很大, 但受飞行高度的影响, 与 WSN 节点之间的距离较远, 故对 WSN 节点附近的磁场影响不大, 其噪声强度的变化率也不大。海上目标的质量较大, 其引起的磁场强度变化率很大, 噪声强度和噪声强度变化率一般。

根据以上直观分析结果, 可得出各类目标的

磁场强度变化和噪声强度变化特征,进而设计WSN监测系统的模糊推理规则。删除其中的一些无效规则之后,最终采用10条有效的推理规则,如表1所示。

表1 基于WSN的监测系统推理规则  
Tab.1 The inference rules of monitoring system

	<i>B</i>	<i>S</i>	<i>V</i>	<i>U</i>
1	小	小	小	<i>u</i> 1(人员目标)
2	小	小	中	<i>u</i> 2(小型空中目标)
3	中	中	中	<i>u</i> 3(轻型车辆)
4	中	大	中	<i>u</i> 4(低空目标)
5	中	大	大	<i>u</i> 5(重型车辆)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	大	中	中	<i>u</i> 6(海上目标)

用Matlab模糊逻辑工具箱进行仿真,得到如图4和图5所示的输入-输出映射曲面。如果映射曲面是平滑的,则表明上述推理规则的合理性<sup>[5]</sup>。

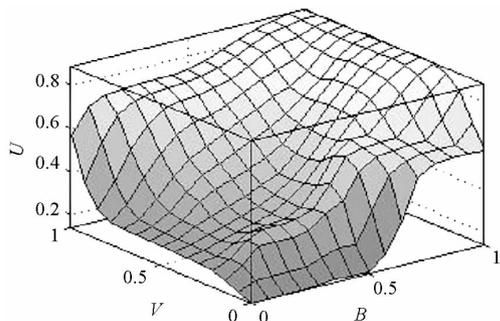


图4 *V*-*B*-*U*映射曲面  
Fig.4 *V*-*B*-*U* mapped plot

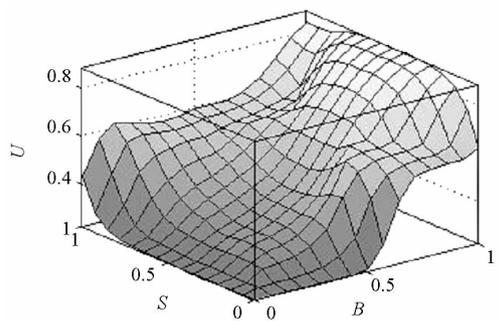


图5 *S*-*B*-*U*映射曲面  
Fig.5 *S*-*B*-*U* mapped plot

### 2.3 推理合成算法

由直觉模糊规则的合成运算可得系统总的直觉模糊关系 *R* 为

$$R = (\bigcup_{i=1}^3 \cdots \bigcup_{i=1}^3) R(B_i \cap S_j \cap V_n \cap CF_m) \rightarrow$$

$$C_k = (\bigcup \cdots \bigcup) R(B_i \cap S_j \cap V_n \cap C_k, CF_m)$$

(10)

其中 *CF<sub>m</sub>* 为推理规则的可信度因子。

某一时刻的输入为 *b, s, v*, 由推理合成规则可

以得到输出 *z* 为

$$z = (b \times s \times v) \circ R \quad (11)$$

“ $\circ$ ”表示合成运算符。构造模糊关系的关键是如何选择合成运算“ $\circ$ ”的模糊蕴含算子,文献[11]总结了32种模糊蕴含算子,由不同的算子可得到不同的隶属度和非隶属度,这里我们选用Mamdani算子。

### 2.4 解模糊算法

直觉模糊集解模糊算法通常有最大真值法、重心法、加权平均法等,本文采用重心法。隶属度函数和非隶属度函数合成真值函数曲线,重心法是取真值函数曲线与横坐标围成面积的重心为直觉模糊推理的最终输出值<sup>[4]</sup>。

对于有 *N<sub>u</sub>* 个离散的量化级数输出,需要将各级量化输出结果进行合成,合成方法为

$$\mu_0 = \frac{\sum_{k=1}^{N_u} u \cdot (\mu U_k(u) + \frac{1}{2} \pi U_k(u))}{\sum_{k=1}^{N_u} (\mu U_k(u) + \frac{1}{2} \pi U_k(u))}$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^{N_u} u \cdot (1 + \mu U_k(u) + \gamma U_k(u))}{\sum_{k=1}^{N_u} (1 + \mu U_k(u) + \gamma U_k(u))} \quad (12)$$

### 2.5 仿真验证

对目标类型的识别过程主要有3步:

- (1) 对目标属性测量值进行直觉模糊度量;
- (2) 根据属性函数求取输入变量值;
- (3) 提供输入向量,运用直觉模糊推理机进行求解。

选取典型目标属性参数值(如表2所列)进行目标分类,以验证本算法的有效性。

表2 目标属性值  
Tab.2 Values of targets' attribute

	磁强变化 (nT/s)	声强 (dB)	声强变化 (dB/s)	分析结果
<i>x</i> <sub>1</sub>	50	18	1	人员目标
<i>x</i> <sub>2</sub>	400	80	13	重型车辆
<i>x</i> <sub>3</sub>	300	70	4	低空目标
<i>x</i> <sub>4</sub>	80	25	3	小型空中目标
<i>x</i> <sub>5</sub>	30	20	1	人员目标
<i>x</i> <sub>6</sub>	800	50	4	海上目标
<i>x</i> <sub>7</sub>	500	70	10	重型车辆
<i>x</i> <sub>8</sub>	300	40	3	轻型车辆

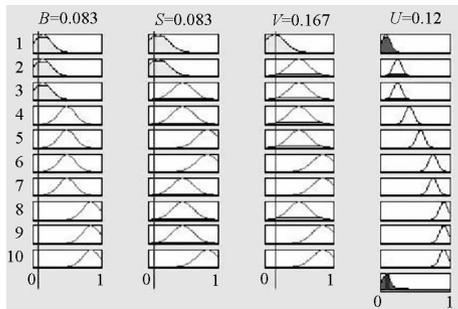
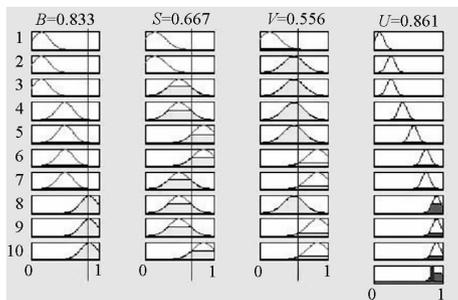
对表2中的8个目标进行分类,得到的运用模糊推理结果如表3所示。

表 3 模糊推理判定结果

Tab. 3 Verdicts of intuitionistic fuzzy reasoning

	$B$	$S$	$V$	$U$	判定结果
$x_1$	0.083	0.083	0.167	0.12	$u_1$ (人员目标)
$x_2$	0.5	0.744	0.844	0.703	$u_5$ (重型车辆)
$x_3$	0.424	0.705	0.556	0.53	$u_4$ (低空目标)
$x_4$	0.133	0.229	0.444	0.244	$u_2$ (小型空中目标)
$x_5$	0.05	0.125	0.167	0.122	$u_1$ (人员目标)
$x_6$	0.833	0.667	0.556	0.861	$u_6$ (海上目标)
$x_7$	0.575	0.705	0.778	0.667	$u_5$ (重型车辆)
$x_8$	0.424	0.445	0.444	0.405	$u_3$ (轻型车辆)

$x_1$  引起的磁强变化率为 50nT/s, 噪声强度为 18dB, 噪声强度变化率为 1dB/s, 磁场强度变化率小说明铁磁目标较小或者移动速度很慢, 噪声强度较小说明目标发出的声音小, 噪声强度变化率小说明目标距离噪声传感器很远或者移动速度较慢。理论分析得知目标极可能是人, 模糊推理结果如图 6 所示, 为人员目标, 与理论分析结果相符。

图 6  $x_1$  的推理结果Fig. 6 Verdict of target  $x_1$ 图 7  $x_6$  的推理结果Fig. 7 Verdict of target  $x_6$ 

$x_6$  引起的磁场强度变化率为 800nT/s, 噪声强度为 50dB, 噪声强度变化率为 4dB/s。磁场强度变化率大说明铁磁目标非常大或者距离传感器很近, 噪声信号强度一般说明目标发出的声音不大或者距离传感器远, 声音信号强度变化率不大说明物体移动速度不快。理论分析来看, 极可能是正在靠近的海上目标, 模糊推理结果如图 7 所示, 为海上目标, 与理论分析的结果相符。

### 3 结论

本文主要目的是对基于 WSN 的目标监测系统检测到的目标进行分类。理论分析与仿真验证分析表明, 基于直觉模糊推理的分类方法不仅能较准确地对机动目标进行类型识别, 简单直观, 适用于计算能力较弱的 WSN 节点, 而且有较强的实用性, 当应用环境发生变化时, 只需根据实测的数据修改算法参数, 即可得到比较满意的分类结果。

仿真数据及目标引起的磁场变化和声音变化范围都是根据相关文献理论合理假设的, 在实际应用时应根据实测数据, 对磁场和声音信号变化论域中的数值范围和区间进行调整。

### 参考文献 (References)

- [1] Qiang P. Improved DS acoustic-seismic modality fusion for ground-moving target classification in wireless sensor networks [J]. Pattern Recognition Letters, 2007.
- [2] Kapitanova K, Son S H, Kong K D. Using fuzzy logic for robust event detection in wireless sensor networks [J]. AD HOC Networks, 2012, 10(4): 709-722.
- [3] Wang X, Bi D W, Ding L. Dynamic collaborative support vector machine for target classification in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Electronics, 2008.
- [4] 雷英杰, 王宝树. 基于直觉模糊推理的态势与威胁评估研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [5] 雷英杰, 王宝树. 基于直觉模糊推理的态势与威胁评估方法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [6] 雷英杰, 王宝树, 冯有前, 等. 直觉模糊推理的目标识别方法 [J]. 控制与决策, 2011.
- [7] 雷英杰, 王宝树, 冯有前, 等. 直觉模糊推理的目标识别方法 [J]. 控制与决策, 2011. (in Chinese)
- [8] 林春生, 向前, 龚沈光. 水中磁性运动目标信号的模型化检测 [J]. 兵工学报, 2005.
- [9] 林春生, 向前, 龚沈光. 水中磁性运动目标信号的模型化检测 [J]. Acta Armamentarii, 2005. (in Chinese)
- [10] 杨悦平. 无线传感器网络入侵目标检测方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.
- [11] 杨悦平. 无线传感器网络入侵目标检测方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.
- [12] 杨悦平. 无线传感器网络入侵目标检测方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008. (in Chinese)
- [13] Duch W. Uncertainty of data, fuzzy membership functions, and multi-layer perceptions [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 2004.
- [14] Lan J H, Shi Y Q. Vehicle detection and recognition based on a MEMS magnetic sensor [C]//Proceedings of the 2009 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems January 5-8, 2009.
- [15] 杨峰, 魏雅川, 等. 基于声能衰减模型的 WSNs 目标定位算法 [J]. 计算机测量与控制, 2010.
- [16] 杨峰, 魏雅川, 等. 基于声能衰减模型的 WSNs 目标定位算法 [J]. Computer Measurement & Control, 2010. (in Chinese)
- [17] 林琳. 直觉模糊集在近似推理与决策中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [18] 林琳. 直觉模糊集在近似推理与决策中的应用 [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)