



基于相似度的雷达目标识别灰关联分析算法

赵汝鹏¹, 田润澜¹, 张旭洲¹, 谢一彬²

(1. 空军航空大学对抗系, 吉林 长春 130022; 2. 中国人民解放军 94936 部队, 浙江 杭州 310021)

摘要: 针对参数重叠的雷达目标识别算法准确率较低、对复杂体制雷达目标识别效果较差的问题, 提出了基于相似度的灰关联分析算法, 实现对复杂体制雷达目标的融合识别。该算法首先提取各参数间的相似度矩阵, 然后运用灰关联分析得出相应的灰关联系数, 同时根据各参数匹配程度确定其权重值, 与灰关联系数组合获得待识别信号与库信号的灰关联度, 根据灰关联度完成目标识别。仿真实验结果表明, 该算法能很好地降低参数重叠给识别带来的影响, 提高识别正确率, 快速实现复杂体制雷达目标的识别。

关键词: 雷达目标; 融合识别; 灰关联; 相似度

中图分类号: TN971

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017102

Algorithm of grey correlation analysis for radar target recognition based on similarity

ZHAO Rupeng¹, TIAN Runlan¹, ZHANG Xuzhou¹, XIE Yibin²

1. Department of Information Countermeasures, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China

2. Unit 94936 of PLA, Hangzhou 310021, China

Abstract: According to the algorithm can't better identify complex radar targets and improve the accuracy while facing parameters overlapping, an algorithm of similarity-grey relational analysis based on similarity was proposed. Firstly, the similarity matrix between the parameters was extracted by the algorithm. And then the grey correlation analysis was used to get the corresponding grey correlation coefficient. At the same time, the weight value was determined according to the matching degree of each parameter, the grey correlation degree of the signal was identified and the library signal was obtained by combining with the grey correlation coefficient, and the target recognition was completed according to the grey correlation degree. Finally, having the grey correlation between the signal and the grey correlation coefficient, which can realize the identification of the complex radar target. The simulation results show that the impact of parameters overlapping with high recognition accuracy was reduced, the recognition accuracy was improved, and the identification of complex system radar targets were quickly realized by the proposed algorithm.

Key words: radar target, fusion and recognition, grey correlation, similarity

1 引言

雷达信号识别是电子对抗情报分析的重要步

骤。目前随着雷达技术的快速发展, 大量复杂体制雷达相继出现, 雷达信号分析迈入了大数据时代, 而能否从大规模数据中准确、快速地识别目

标信号将影响到战局的走向^[1,2]。由于不同雷达侦察设备性能指标的限制和侦察背景的影响,使得不同型号的雷达信号各参数出现部分重叠的现象,即使是由不同装备侦获的同一目标的信号参数也会有部分重叠甚至完全重叠的现象,这给基于单参数的雷达目标识别造成了困难,识别准确率较低。同时,由于现在复杂体制雷达目标的各参数变化类型多、范围大,给识别带来了难度^[3]。

目前基于数据库的模糊匹配算法可以很好地识别简单常规参数目标,但随着雷达目标参数复杂程度和信号数据密度的增加,其识别效果大大下降,且识别结果受数据质量影响大^[4,5]。基于贝叶斯推理的雷达目标识别算法,可以很好地联合各参数实现雷达目标信号的融合,以达到降低参数重叠带来的影响,实现对复杂目标的充分识别,但该算法复杂度高,计算量大大增加,识别较慢^[6,7]。灰关联算法发展早,算法成熟、简洁,可利用灰关联度很好地体现各待识别雷达与参考目标的整体相异程度^[8]。目前计算灰关联度的模型有多种,按原理不同可分为 3 类:基于距离的计算模型、基于斜率的计算模型和基于面积的计算模型。这 3 类模型从不同角度获得灰关联度,取得了一定的应用,但也存在缺陷,面对复杂类型的参数,基于距离的计算模型易受参数的极值和参数的质量影响;基于斜率的计算模型由于参数的变化性大、上下波动,难以运用;基于面积的计算模型主要运用于信号波形匹配,无法应用于具体参数匹配识别中^[9]。

基于上述问题,提出了基于相似度的灰关联识别算法,首先对雷达各参数进行相似度建模,建模所采用的参数有雷达信号载频(RF)、脉冲重复频率(PRI)和脉宽(PW),并分析了不同参数变化类型对建模的影响;然后根据雷达参数的匹配程度和专家辅助系统确立各参数权重值,降低参数重叠带来的影响;最后在相似度的基础上利用灰关联算法计算灰关联系数,与权重值组合得到相应的灰关联度。设置识别阈值与灰关联度进

行比较,完成识别。经仿真实验,得到的识别结果达到了预期要求。

2 算法原理

2.1 相似度的概念

对于参数多值的复杂雷达目标的融合识别,建立参数关于识别目标相应参数的相似度成为融合识别的关键。该算法定义了载频、脉冲重复频率和脉宽的相似度,即待识别雷达目标 i 的参数与识别框架中相应参数的相似程度,二者误差越小,相似度越大,且相似度取值处于 0 与 1 之间^[10]。

(1) 载频的相似度

雷达目标载频有固定、捷变和分集等类型。对于载频固定的类型,因其区分为简单,这里不做赘述。对于载频捷变来说,定义载频关于目标 j 的相似度为:

$$m_{\text{RF}}(ij) = \begin{cases} 1 & , \Delta f_{ij} \leq Af_j + f_\epsilon \\ \frac{|\Delta f_{ij} - Af_j - 2f_\epsilon|}{f_\epsilon} & , Af_j + f_\epsilon < \Delta f_{ij} \leq Af_j + 2f_\epsilon \\ 0 & , \Delta f_{ij} \geq Af_j + 2f_\epsilon \end{cases} \quad (1)$$

其中, Af_j 为目标频率捷变范围, Δf_{ij} 为载频观测值与雷达目标频率差值的绝对值, f_ϵ 为侦察系统的测频误差。

对于频率分集目标来说,以频率二分集为例,分集频率的频率中心为 f_1 和 f_2 , 则载频关于雷达的相似度为:

$$m_{\text{RF}}(ij) = \begin{cases} 1 & , \Delta f_{ij1} \leq f_\epsilon \text{ 或 } \Delta f_{ij2} \leq f_\epsilon \\ \frac{|\Delta f_{ij1} - 2f_\epsilon|}{f_\epsilon} & , f_\epsilon < \Delta f_{ij1} \leq 2f_\epsilon \\ \frac{|\Delta f_{ij2} - 2f_\epsilon|}{f_\epsilon} & , f_\epsilon < \Delta f_{ij2} \leq 2f_\epsilon \\ 0 & , \Delta f_{ij1} \geq 2f_\epsilon \text{ 或 } \Delta f_{ij2} \geq 2f_\epsilon \end{cases} \quad (2)$$

其中, Δf_{ij1} 和 Δf_{ij2} 分别为 f_1 和 f_2 与之对应的待识别目标载频值差值的绝对值。因此在中心频率个数为 n 的情况下,其对应的总相似度由各个



频率中心的相似度进行相加求均值:

$$m_{\text{RF}}(ij) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n m_{\text{RF}}(ijk) \quad (3)$$

由于该相似度是由频率中心与待识别目标载频值差值的绝对值决定的, 所以即使待识别目标载频值受到噪声或人为因素影响导致其上下波动时, 对相似度值的影响也不大。

(2) 脉冲重复频率的相似度

对于不同重复频率的雷达信号, 其对应的相似度计算也不一样。脉冲重复频率有固定、参差和抖动等类型, 对于 PRI 固定的这里不做过多阐述。如果第 i 个待处理雷达信号的 PRI 类型为重频参差, 已知参差数为 K , 参差重复间隔为 T_{rik} , 模板库中雷达目标 j 的 PRI 值为 T_{rjk}^m , 系统噪声与量测噪声所引起的测量误差为 T_{re} 。则观测值 PRI 与目标 j 的 PRI 差值为 $\Delta T_{ijk} = |T_{rjk}^m - T_{rik}|$ 。此时, 基于 PRI 的相似度定义如下:

$$m_{\text{PRI}}(ijk) = \begin{cases} 1, & \Delta T_{ijk} \leq T_{re} \\ \frac{|\Delta T_{ijk} - 2T_{re}|}{T_{re}}, & T_{re} < \Delta T_{ijk} \leq 2T_{re} \\ 0, & \Delta T_{ijk} > 2T_{re} \end{cases} \quad (4)$$

总的相似度 $m_{\text{PRI}}(ij) = \frac{1}{K} \sum_k m_{\text{PRI}}(ijk)$, 其中 $k=1, 2, \dots, K$ 。

如果雷达信号 PRI 为重频抖动, 令抖动值为 DT , 平均重复间隔为 T_{PRI} , 则重频抖动的相似度定义为:

$$m_{\text{PRI}}(ij) = \begin{cases} 1, & \Delta T_{rij} \leq T_{re} + DT \\ \frac{|\Delta T_{rij} - DT - 2T_{re}|}{T_{re}}, & T_{re} < \Delta T_{rij} - DT \leq 2T_{re} \\ 0, & \Delta T_{rij} > 2T_{re} + DT \end{cases} \quad (5)$$

其中, T_{re} 为设备的测频误差, ΔT_{rij} 为待处理信号 i 参数值与目标 j 参数值差值的绝对值。

(3) 脉宽的相似度

在现有的雷达信号中, 脉宽的变化样式主要

包括脉宽固定、脉宽捷变和脉宽跳变等。由于在实际的雷达信号中, 脉宽的变化形式相对简单, 再加上同一雷达的脉宽相对稳定, 有较好的聚集性, 因此, 脉宽对于雷达辐射源的识别有一定的参考意义。基于 PW 的相似度 $m_{\text{PW}}(i)$ 的定义原则同理于载频相似度的定义。这里不再赘述。

需要特别说明的是, 式 (1) ~ 式 (5) 只适用于待识别雷达目标的特征参数与目标框架参数类型完全相同的情况, 实际中由于各侦察设备之间的差异性等因素的影响, 当被测参数出现遗漏缺失造成参数个数不匹配时, 用以上式子计算容易出现计算错乱, 对相似度值影响较大。例如, 对于复杂的 PRI 参数来说, 当雷达情报源库里 PRI 为参差类型时, 即 $\text{PRI} = (\text{pri}1, \text{pri}2, \text{pri}3, \text{pri}4, \text{pri}5)$ 。而通过侦察设备获得的 PRI 观测值为 $\text{PRI}' = (\text{pri}1', \text{pri}2', \text{pri}3', \text{pri}5')$, 利用式 (4) 只能计算 4 个相应的相似度, 且第 4 个相似度值由 $\text{pri}4$ 与 $\text{pri}5'$ 得出, 当这两个值相差较大时, 该相似度值直接为 0, 对后面识别结果影响较大。

针对上述出现的问题, 本文对相似度做了进一步的改进处理, 使其适合不完整的参数类型。令库里面的参数 i 有 n 个参数值, 参数 i 被侦察设备所检测到的值个数有 m 个 ($n \neq m$)。首先对它们进行参数匹配, 设置匹配容差为 Δ' , 库里面的参数值与检测得到的参数值进行相减取绝对值为 Δ , 然后与匹配容差做比较。当 $\Delta \geq \Delta'$ 时, 则确认两数值匹配, 依次进行, 匹配完成的参数值进行相似度计算, 而未被匹配上的参数值进行标记。最后将求得的相似度值进行相加求均值, 将其赋给未匹配成功的数值, 防止因直接否定或肯定未匹配成功的数值对总相似度值造成影响。

2.2 灰关联分析法

灰关联分析是根据数据列因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量数据列的接近程度^[1]。进行数据列灰关联分析, 这里主要利用第 2.1 节定义的各项相似度来表示比较数列和参考数列的

接近程度。设雷达对抗情报源有 M 个参数值, 侦察到的信号有 N 组。记 $m_k(ij)$ 为侦察得到的信号 i 的第 k 个参数关于目标库中目标 j 的相似度值, 令灰关联分析法输入为 $\Delta_k(ij) = 1 - m_k(ij)$, 各组信号与目标库的关联系数为:

$$r_k(ij) = \frac{\min_{1 \leq i \leq N} \min_{1 \leq k \leq M} \Delta_k(ij) + \rho \max_{1 \leq i \leq N} \max_{1 \leq j \leq M} \Delta_k(ij)}{\Delta_k(ij) + \rho \max_{1 \leq i \leq N} \max_{1 \leq j \leq M} \Delta_k(ij)},$$

$$(i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

其中, 分辨系数 ρ 在 $[0, 1]$ 中取值, 通常取 0.5。

各参数的重要性大小可利用专家辅助系统获取, 专家辅助系统是根据专家经验及领域知识建立相应的规则库形成的系统^[12,13], 可根据雷达信号的装备性能和目标库获取相应参数的权值 $a(k), k = 1, 2, \dots, M$, 且 $\sum_{k=1}^M a(k) = 1, a(k) \geq 0$ 。

对于参数不完整的数据, 本文在基于专家辅助系统赋予权值的基础上采用一种动态求权值的方法。记成功匹配的参数个数为 p , 总参数个数为 n , 则根据先验知识定义此时的匹配程度为:

$$\lambda = \begin{cases} 1 & , p/n \geq 0.6 \\ p/n & , p/n < 0.6 \end{cases} \quad (7)$$

动态求权值即参数的权重值随匹配成功个数的变化而变化, 则更新后的参数权重值为:

$$a'(k) = \lambda \times a(k) \quad (8)$$

其中, 匹配成功的个数越少, λ 越小, 则 $a'(k)$ 也变小, 此时该参数对于情报源的识别所起到的作用也减小, 从而降低整体的关联度。定义加权后的关联度为:

$$\gamma(ij) = \sum_{k=1}^M r_k(ij) a'(k), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

判决规则:

设置阈值 ϕ_i , 对于每个待处理雷达信号相对于目标的加权灰关联度, 若:

$$\gamma(ij) > \phi_i, j = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

则判为识别成功。若对于一个待处理雷达信号同时与多个目标的加权关联度符合式 (10), 则以加权灰关联度最大值为判决结果。

3 算法实现

复杂雷达目标的识别就是通过对识别的雷达各个特征参数进行分析, 然后采用一定的算法和雷达目标数据库中各已知的的雷达参数进行匹配, 从而确定雷达的型号^[14]。要想快速、准确地实现对雷达目标的识别, 在需要准确的参数值的同时还需要合适的建模和简洁算法的运用。基于相似度的复杂雷达目标灰关联分析算法步骤如下, 算法流程框架如图 1 所示。

(1) 对于多值的参数, 首先进行参数匹配, 根据相似度的定义获得各待识别目标与目标 j 的

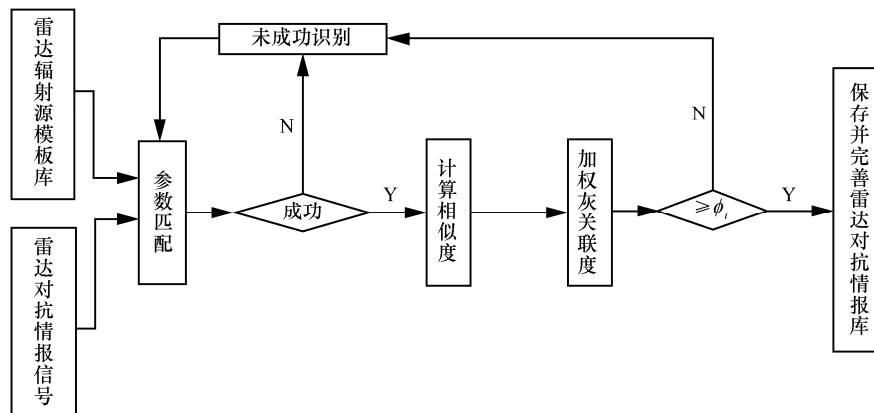


图1 算法流程框架



相似度矩阵为:

$$m_{N \times M} = \begin{bmatrix} m_{RF}(1j) & m_{PRI}(1j) & \cdots & m_{PW}(1j) \\ m_{RF}(2j) & m_{PRI}(2j) & \cdots & m_{PW}(2j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{RF}(Nj) & m_{PRI}(Nj) & \cdots & m_{PW}(Nj) \end{bmatrix} \quad (11)$$

(2) 对相似度矩阵进行逆向处理。由于灰关联的输入是比较数列和参考数列的相异程度, 而相似度描述的是测量参数和目标模板的相似程度, 则需对相似度进行逆向处理, 进而使 Δ 表示测量参数和目标模板的相异程度, 即:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \cdots & \Delta_{1M} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{N1} & \Delta_{N2} & \cdots & \Delta_{NM} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 1-m_{RF}(1j) & 1-m_{PRI}(1j) & \cdots & 1-m_{PW}(1j) \\ 1-m_{RF}(2j) & 1-m_{PRI}(2j) & \cdots & 1-m_{PW}(2j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1-m_{RF}(Nj) & 1-m_{PRI}(Nj) & \cdots & 1-m_{PW}(Nj) \end{bmatrix} \quad (12)$$

(3) 利用专家辅助系统对雷达目标各参数的权值进行赋值, 根据步骤(1)匹配的情况, 对利用专家辅助系统所得的权值进行修改, 分别得到 $a'(j)$ 。对于多个参数出现匹配程度小于匹配容差的信号组, 则直接否定该组数据。

(4) 根据相似度矩阵, 利用灰关联分析方法计算雷达目标信号样本中各个参数的灰关联系数, 然后与步骤(2)修改后的权值进行组合, 可得观测样本与已知雷达模板库中样本的灰关联度矩阵为:

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma(11) & \gamma(12) & \cdots & \gamma(1j) \\ \gamma(21) & \gamma(22) & \cdots & \gamma(2j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(N1) & \gamma(N2) & \cdots & \gamma(Nj) \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $\gamma(Nj)$ 为第 N 个观测样本对于第 j 个目标的灰关联度。

(5) 设置一个阈值 ϕ , 对步骤(4)所得的灰

关联度根据阈值进行判决, 若满足:

$$\begin{cases} \gamma(an) = \max_{j=1,2,\dots} (\gamma(aj)) \\ \gamma(an) > \phi \end{cases} \quad (14)$$

则将待处理信号 a 成功判为目标 n , 并将识别成功的信号进行保存处理。而未识别成功的信号则与雷达模板库中的下一个样本进行识别处理。

(6) 当雷达模板库的样本数全部识别完毕, 观测信号样本还有未成功识别的信号时, 则以剩余信号组中第一组信号数据为模板, 其他信号组为观测比较信号, 重复识别步骤, 并标记为准新雷达信号, 使其去冗余, 便于下一步的人工识别。

4 仿真实验

对电子对抗侦察设备侦收到的复杂参数的雷达目标信号快速识别进行仿真。目标框架为提取自雷达信号库中的样本值, 其中目标信号为复杂体制雷达, 且其参数有一个或多个相互交叉或重叠, 参数值相差不大, 个别甚至相同, 待识别信号为侦察设备侦察该目标框架区域内所侦收到的信号, 由于受到噪声和技术的影响, 其具有不确定性。从数据库中提取 3 个相近或相互交叉的复杂体制雷达目标数据作为识别框架, 且信号特征矢量由 RF (MHz)、PRI (Hz)、PW (μ s) 3 个参数构成。目标为: $Y_1 = \{3\ 000, [185, 215, 250, 270], [10, 11, 14, 17]\}$; $Y_2 = \{[3\ 500, 3\ 600, 3\ 700], [185, 215, 245], [13.2, 15.8, 18]\}$; $Y_3 = \{[3\ 400, 3\ 450], [160, 170, 180, 210], [13.5, 14.5, 15.8, 16.5]\}$ 。侦察设备各参数的测量误差分别为 15 MHz、3 Hz、0.3 μ s, 由各侦察设备侦收到的信号数据见表 1。

由于侦察到的信号带有不确定性或受设备等因素的影响, 所侦察到的信号中有些参数出现漏值、多值, 或数值上出现波动偏离真实值的情况, 同时由于所侦察区域目标信号本身带有交叉重叠, 这加剧了侦收到信号的交叉重叠性, 给识别处理带来了难度, 单单依靠某一参数识别已不能实现。

由专家辅助系统分别得出各参数的权值为

表 1 各侦察设备侦收到的信号数据

信号	RF/MHz	PRI/Hz	PW/ μ s
X_1	2 965	180,215,245,270	10.5,14,17
X_2	3 010	185,215,250	10,11,14,16.5
X_3	3 600,3 700	185,215,250	13.4,14.9,18
X_4	3 490,3 500,3 600	180,215,245,255	13.4,15.7,17.9,18.2
X_5	3 410	162,170,183,210	13.5,14.5,15.8
X_6	3 460	160,172,183	13.5,14.5,15.5,16
X_7	3 410	193,235	12,12.8
X_8	3 420,3 455	162,181,208	13.5,14,15.5,16.5
X_9	3 030	180,210,245	10,11,14.5,17
X_{10}	3 390,3 460	190,225	11,14
X_{11}	3 600	185,215,250,265	13.2,15.8,18
X_{12}	3 420,3 455,3 475	165,170,182,207	13.2,14.2,14.8,15.5
X_{13}	3 400,3 450	190,230	12,13
X_{14}	3 520,3 580,3 710	185,225,245,250	13.8,15.5,15.8
X_{15}	3 050	185,215,245,265,275	10.5,11,14,18

0.4、0.3、0.3。在算法识别中，其权重由于各参数的匹配情况不一样而相应变化，这里就不把每组信号的相应权重值一一列出。经过仿真实验获得的观测数据对目标的识别结果见表 2。

表 2 仿真结果

信号	Y_1	Y_2	Y_3	X_7
X_1	0.640	0.418	0.355	
X_2	0.778	0.455	0.355	
X_3	0.466	0.733	0.355	
X_4	0.385	0.833	0.411	
X_5	0.398	0.588	0.722	
X_6	0.392	0.665	0.722	
X_7	0.375	0.508	0.388	1
X_8	0.394	0.555	0.611	
X_9	0.646	0.400	0.411	
X_{10}	0.396	0.490	0.555	0.611
X_{11}	0.469	0.833	0.388	
X_{12}	0.415	0.590	0.698	
X_{13}	0.374	0.521	0.555	0.833
X_{14}	0.436	0.701	0.444	
X_{15}	0.608	0.467	0.333	

对于各目标，设置阈值为 0.6，经过判决规则进行识别，得出信号 X_1 、 X_2 、 X_9 、 X_{15} 判为目标一， X_3 、 X_4 、 X_{11} 、 X_{14} 判为目标二， X_5 、 X_6 、 X_8 、 X_{12} 判为目标三，判决结果与对这些复杂信号进行人

工分析的结果完全一致。这表明该算法对于不完整的参数也可以进行很好的处理，如对于目标一，相对于侦察到的信号 X_2 、 X_{15} ，其信号参数可能由于各种因素的影响出现漏值或多值情况，但通过算法还是可以很好地将它们自动判为目标 1。对于部分参数重叠甚至完全相同时，该算法也可以很好地把它们区分开来。

通过第一轮的筛选识别后，还有信号 X_7 、 X_{10} 、 X_{13} 在数据库中没有得到相应的匹配识别。因此根据算法将 X_7 作为新目标信号的模板进行识别计算，得出剩下的信号属于同一信号目标，符合实际。可以看出，该算法对于新出现的信号也有整理的能力。

为进一步验证其对参数重叠目标的能力验证，利用识别目标库选出 20 个目标信号，参数重叠区间为 0、15%~20%、35%~40%、50%~55% 的各 5 组。每组中的目标辐射源各产生 100 个信号，共 2 000 个。运用该算法对 2 000 个信号进行识别处理并统计它们的正确率，同时运用参考文献[10]的区间灰关联改进算法进行仿真对比。对于参数重叠区间不同的识别目标，基于相似度的灰关联识别算法和参考文献[10]算法的识别正确率变化情况见表 3。



表3 算法性能与参数重叠区间的关系

算法	参数重叠区间			
	0	15%~20%	35%~40%	50%~55%
本文算法识别正确率	98.55%	95.72%	84.81%	76.87%
区间灰关联识别正确率	81.32%	72.07%	76.63%	69.91%

由表3可知,随着参数重叠区间的不断增加,其识别正确率不断下降,但是对于高重叠区间的目标,本文算法识别正确率达到了76.87%,这说明本文算法对于高重叠复杂参数的目标也有较强的识别能力。对比于两种算法,由于改进的区间灰关联算法改进的是对区间参数的相似度模型,只是利用区间的偏离值计算相似度,而没有对测量误差进行利用,算法简洁,但相似度在测量误差较大时易受到影响,因此在重叠区间为0时,本文算法识别正确率比参考文献[11]算法高17%,且参考文献[11]算法正确率波动较大。同时对于区间类型外的其他参数类型,都需将其转换为区间型,才能进行识别,基于此,后文对比实验没有加入区间灰关联算法。

不断更新目标信号,并且逐渐增加待识别目标数据量为500、1000、2000、5000个,进行多次实验验算并记录其识别结果,计算出识别运算所使用的时间。同时与使用模糊匹配算法和基于贝叶斯推理的目标识别算法所得出的结果进行比较。各算法正确识别率与数据量变化情况如图2所示。

由图2可知,本文算法的准确率略高于贝叶斯推理,且远高于模糊匹配算法,在雷达信号数量达到5000个时,其准确率为75%,达到了实验要求。这是因为基于相似度的灰关联分析算法可充分地利用信号参数类型和各参数值对信号各参数相似度进行建模,然后利用灰关联算法和各参数权重值求得灰关联度值,降低了参数交叠和

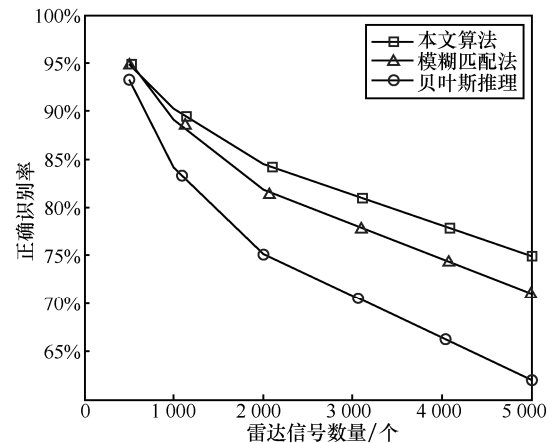


图2 各算法正确识别率与数据量变化情况

不确定性带来的影响,准确率得以保证。仿真实验数据量与消耗的时间见表4。

由表4可知,对于复杂体制的目标识别,随着实验数据量的增加,计算量也随之增多,但本文算法所消耗的时间与模糊匹配算法所消耗的时间相差不大,约为20%,远比贝叶斯推理的少。但当数量达到5000个时,本文算法所消耗的时间与贝叶斯推理所消耗的时间相差达到50%,这是因为随着输入的增多,贝叶斯推理的复杂度和计算量也增加^[15]。本文算法简洁,且对于相似度的建模在处理复杂目标中大大减少了计算量,从而达到了快速识别的目的。

5 结束语

利用基于相似度的灰关联算法对复杂体制雷

表4 仿真实验数据量与消耗的时间

算法	数据量/个			
	500	1000	2000	5000
本文算法	0.075	0.147	0.306	0.772
模糊匹配算法	0.098	0.192	0.453	0.944
贝叶斯推理	0.097	0.317	0.731	1.510

达目标进行快速融合识别, 扩展了识别目标的参数类型, 如捷变、参差、组变等, 同时利用复杂体制雷达目标与模板库相似度和各参数的动态权重确定方法, 大大降低了参数重叠带来的影响。由于灰关联算法具有简洁性, 大大减少了识别中算法的复杂度, 提高了识别速度, 实现了复杂体制雷达目标的快速融合识别。经仿真实验验证, 该算法有较好的优越性, 有利于工程实践。

参考文献:

- [1] 罗朝义, 张强, 周一鹏, 等. 机载雷达电子对抗情报分析中雷达信号快速识别方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(5): 469-473.
LUO Z Y, ZHANG Q, ZHOU Y P, et al. The method for radar signal fast recognition of airborne EW information analysis[J]. Journal of CAEIT, 2016, 11(5): 469-473.
- [2] 于鹃. 数据仓库与大数据融合的探讨[J]. 电信科学, 2015, 31(3): 166-170.
YU J. Discussion on integration of data warehouse and big data[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(3): 166-170.
- [3] 邓捷坤, 谢井, 时统业. 基于雷达对抗的多源情报融合[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(6): 44-47.
DENG J K, XIE J, SHI T Y. Multi-source information fusion based on radar countermeasures[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2013, 29(6): 44-47.
- [4] 赵会敏, 雒江涛, 杨军超, 等. 集成 BP 神经网络预测模型的研究与应用[J]. 电信科学, 2016, 32(2): 60-67.
ZHAO H M, LUO J T, YANG J C, et al. Research and application of prediction model based on ensemble BP neural network[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(2): 60-67.
- [5] 章碧, 张志伟, 陈远志. 一种基于数据库模板的雷达辐射源势识别技术[J]. 雷达与对抗, 2016, 36(1): 14-17.
ZHANG B, ZHANG Z W, CHEN Y Z. A recognition technology of radar radiation sources based on data templates in database[J]. RADAR & ECM, 2016, 36(1): 14-17.
- [6] 朱晓亮, 蔡群, 周明亮. 基于 BP 神经网络和贝叶斯推理的雷达辐射源识别[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(4): 15-18.
ZHU X L, CAI Q, ZHOU M L. Radar radiation source identification based on BP neural net and bayes reasoning[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(4): 15-18.
- [7] 王慧娟, 徐欣, 李霄. 雷达信号 PRI 抖动模式识别改进方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(1): 69-72.
WANG H J, XU X, LI X. Advanced identification method for radar signal PRI jitter pattern[J]. Command Information System and Technology, 2016, 7(1): 69-72.
- [8] 张政超, 关欣, 何友, 等. 基于粗糙集和灰关联理论多传感器融合的雷达辐射源信号识别研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(5): 1262-1266.
ZHANG Z C, GUANG X, HE Y, et al. Radar emitter signal recognition based on rough sets and grey correlation theory[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(5): 1262-1266.
- [9] 吴惟诚, 潘继飞, 刘鑫. 一种基于灰关联算法的雷达辐射源分选识别方法[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(5): 5-9.
WU W C, PAN J F, LIU X. Classification method of radar emitter based on grey correlation algorithm[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2016, 31(5): 5-9.
- [10] 沈阳, 陈永光, 李修和. 雷达辐射源识别的多元信息融合算法研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2229-2332.
SHEN Y, CHEN Y G, LI X H. Multi-data fusion algorithm for radar emitter identification[J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2007, 29(10): 2229-2332.
- [11] 刘传波. 基于区间改进灰关联的辐射源识别方法[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(8): 60-63.
LIU C B. Emitter recognition based on interval improved grey relation[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(8): 60-63.
- [12] 张小飞, 徐大专. 基于知识库的雷达辐射源识别专家系统[J]. 现代雷达, 2003, 10(23): 1-4.
ZHANG X F, XU D Z. Expert system of radar radiating-source recognizing based on knowledge library[J]. Modern Radar, 2003, 10(23): 1-4.
- [13] 李东海. 基于专家系统的雷达识别方法[J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(5): 10-13.
LI D H. Radar identification method based on expert system[J]. Ship Electronic Countermeasure, 2014, 37(5): 10-13.
- [14] ZHAO S S, ZHANG L R. Signal fusion-based algorithms to discriminate between radar targets and deception jamming in distributed multiple-radar architectures[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6697-6706.
- [15] 钟波, 罗会友. 不完备信息的粗糙集——贝叶斯识别算法[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(1): 74-76.
ZHONG B, LUO H L. Merged bayesian theory of rough sets recognition method research in incomplete information[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(1): 74-76.

作者简介



赵汝鹏 (1993-), 男, 空军航空大学硕士生, 主要研究方向为电子侦察情报分析。

田润澜 (1973-), 女, 博士, 空军航空大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为航空电子侦察情报分析、雷达侦察极化信息处理。

张旭洲 (1982-), 男, 空军航空大学讲师, 主要研究方向为航空电子侦察情报分析。

谢一彬 (1994-), 男, 中国人民解放军 94936 部队助理工程师, 主要研究方向为电子对抗作战支援和雷达信号分析处理。