

一种基于云模型的辐射源识别方法

刘海军 柳征 姜文利 周一宇
(国防科大电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 该文针对测量参数的不确定所造成的辐射源不能正确识别问题,提出了一种基于云模型的识别方法。该方法首先利用云模型对雷达模板库中区间类型的参数变量进行正态云建模从而得到测量参数的隶属度,然后利用云模型的定性定量转换特性来描述离散型参数变量的调制匹配程度,同时给出了一种确定辐射源识别权值的新方法,能够动态调整各特征参数的权值。仿真结果表明,这种基于云模型的识别方法是适用有效的。

关键词: 雷达; 辐射源识别; 云模型; 正态云; 隶属度

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2079-05

A Method for Emitter Recognition Based on Cloud Model

Liu Hai-jun Liu Zheng Jiang Wen-li Zhou Yi-yu

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To deal with the parameter uncertainty in emitter recognition problem, this paper presents a viable recognition method based on cloud model. First, for getting the degree of membership of the measurement parameter, it applies this theory to model the interval type parameters in template database with normal cloud model. Then it uses the characteristic of the transformation between qualitative concepts and their quantitative expression to describe the matching degree of the discrete parameters. At the same time, a new method of determining weight coefficients is proposed, by which the coefficient can be adjusted dynamically. Simulation results show that the method is applicable and effective.

Key words: Radar; Emitter recognition; Cloud model; Normal cloud; Degree of membership

1 引言

在现代电子侦察中,战场环境复杂多变,敌对双方会采取各种对抗及反对抗措施,由于各种干扰的存在以及侦察设备本身的测量误差使得获得的雷达辐射源特征参数跟真值相比具有一定的随机性和模糊性。如何在复杂多变的电磁环境中对侦察到的辐射源进行识别,具有极其重要的军事意义。现有的比较成功的研究方法包括基于专家系统的方法^[1],基于模糊模式识别的方法^[2],基于人工神经网络的识别方法^[3]和基于粗糙集理论的识别方法^[4]等。

在这些识别方法中,一般都假设模板库中雷达参数的模型是已知的,没有考虑到模板库的参数建模问题。由于从各种渠道获得的模板库雷达特征参数存在着参数不完整、模糊的情况,往往用一个区间来表示特征参数分布,此时对区间型的参数变量进行建模就显得尤为重要;同时,在识别过程中计算离散型指标变量,如脉内调制 MOP(Modulation On the radar Pulse) 信息的隶属度时,一般只考虑调制方式是否匹配两种情况,并用 0 和 1 两个精确

值来表示^[2],这种方法忽略了调制方式的匹配程度,仅考虑两种极端的情况,是很不合理的,因此就需要寻找一种合适的方法来描述这种匹配程度的模糊性。而云模型为上述两种问题提供了解决途径。

云模型是李德毅院士提出的一种定性定量不确定性转换模型,它将模糊集理论中的模糊性和概率理论中的随机性有机地结合起来,通过期望 Ex(Expected value),熵 En(Entropy),超熵 He(Hyper entropy)3 个数字特征来整体表征一个概念^[5-7],在性能评估等领域取得了很好的应用^[8-10]。本文将引入并提出了一种新的基于云模型的辐射源识别方法,利用云模型实现雷达模板库中区间类型参数变量的正态云建模及对离散型参数变量调制匹配程度的描述。

2 云模型^[5,6]

2.1 云的数字特征

云模型通过期望 Ex,熵 En,超熵 He 3 个数字特征来整体表征一个概念。期望 Ex 反映了云滴群的重心位置;熵 En 反映了在论域空间中可被这个定性概念接受的范围,即模糊度,是定性概念亦此

亦彼性的度量，另一方面，还反映了在论域空间中的点能够代表这个定性概念的概率，表示定性概念的云滴出现的随机性；超熵 He 反映了在论域空间中代表该语言值的所有点的不确定度的凝聚性，即云滴的凝聚。

如图 1 所示语言值为“青年人”的一维正态云模型。其中中间实线为该云模型的期望曲线。

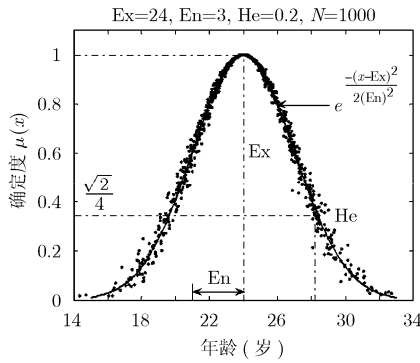


图 1 语言值为“青年人”的一维正态云模型

2.2 云发生器

云发生器主要有正向云发生器和逆向云发生器，本文主要应用 X 条件正向云发生器进行研究。 X 条件正向云生成算法为

(1)生成以 En 为期望值， He^2 为方差的一个正态随机数 $En'_i = NORM(En, He^2)$ ；

(2)代入 $x_i = x_0$ ，计算确定度，生成云滴：

$$\mu_i = e^{\frac{-(x_0 - Ex)^2}{2(En'_i)^2}} \tag{1}$$

则 (x_0, μ_i) 即为生成的云滴。

3 基于云模型的辐射源识别方法

所谓辐射源识别，就是将侦察到的辐射源参数跟模板雷达库中的雷达参数进行匹配，从而得到该辐射源型号的过程。用到的特征参数主要有：载频 RF，脉宽PW，脉冲重复间隔PRI，脉内调制信息 MOP，辐射源到达方位角AOA等等^[1-4]。由于从各种渠道获得的雷达特征参数存在着参数不完整、模糊的情况，往往用一个区间来表示其参数分布，因此对区间型的参数变量进行建模就显得尤为重要。而云模型为上述问题提供了良好的解决途径。

3.1 指标集构建及云模型建模

设雷达模板库中雷达有 n 类： R_1, R_2, \dots, R_n ，对于每一类 $R_i(i=1, 2, \dots, n)$ 都有 m 个特征参数，即 $R_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ ， x_{ij} 表示第 i 类模板雷达的第 j 个特征参数。因此我们可以建立相应含有 m 个元素的指标集合 U ，即

$$U = \{U_{x1}, U_{x2}, U_{xi}, \dots, U_{xm}\} \tag{2}$$

其中 $U_{xj}(j=1, 2, \dots, m)$ 为指标集中的第 j 个指标，如关于载频 RF 的指标等等。

对于每个指标，都能够用云模型来表示。考虑到这些指标中既有区间型变量，又有离散型变量，因此可以采用不同的建模方式。

对于区间型的指标变量如载频 RF，脉宽 PW，脉冲重复间隔 PRI 等，存在双边约束 $[C_{min}, C_{max}]$ 时，可用期望值为约束条件的中值，主要作用区域为双边约束区域的云来近似建模（这里采用的是正态云建模，复杂情况可以采用组合云建模），云参数计算公式如下所示：

$$\left. \begin{aligned} Ex &= (C_{max} + C_{min})/2 \\ En &= (C_{max} - C_{min})/6 \\ He &= k \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中 k 为常数，可根据具体指标的模糊性和随机性具体调整。

对于离散型的指标变量如脉内调制信息 MOP 等，在很多文献中计算其隶属度时只考虑调制方式是否匹配两种情况^[2]，并用 0 和 1 两个精确值来描述，这种情况忽略了调制方式的匹配程度，只考虑了两种极端的情况，是很不合理的。因此我们采用评语来描述这种模糊性，将评语置于连续的语言值标尺上，并且每个评语值都用云模型来实现，构成一个定性评测的云发生器，示意图如图 2 所示。

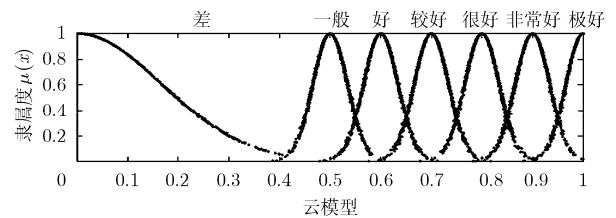


图 2 定性评测的云发生器示意图

从图中可以看出，该评价模型由 7 个一维云模型组成，因此相应的评语集由 7 个评语组成： $V=(v_1, v_2, \dots, v_7) = (\text{差}, \text{一般}, \text{好}, \text{较好}, \text{很好}, \text{非常好}, \text{极好})$ ，相应的云参数如表 1 所示。

3.2 隶属度计算

设测得的辐射源也有 m 个特征参数，即 $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ， $x_j(j=1, 2, \dots, m)$ 为测得辐射源的第 j 个特征参数。由上述确定的云模型，可以通过计算每个特征参数的云滴，得到每一部测得辐射源每个特征参数相对于模板雷达的确定度(即隶属度)。

对于数值连续型的指标变量：

表1 评语集云模型参数

评语	期望(Ex)	熵(En)	超熵(He)
极好	1	0.034	0.001
非常好	0.9	0.034	0.001
很好	0.8	0.034	0.001
较好	0.7	0.034	0.001
好	0.6	0.034	0.001
一般	0.5	0.034	0.001
差	0	0.167	0.001

$$\mu R_{ij} = e^{-\frac{(x_j - Ex_{ij})^2}{2(En_{ij})^2}} \quad (4)$$

其中 μR_{ij} 为测得辐射源的第 j 个特征参数相对于模板雷达库第 i 类雷达第 j 个特征参数的隶属度, Ex_{ij} 为模板雷达库中第 i 类雷达第 j 个特征参数的期望, En_{ij} 为根据模板雷达库中第 i 类雷达第 j 个特征参数的熵 En_{ij} , 超熵 He_{ij} 求得的方差。

对于数值离散型的指标变量: 设测得辐射源的第 j 个特征参数 x_j 为数值离散型指标变量, 则

$$\mu R_{ij} = Ex_p^v, \quad v_j^e == v_p \quad (5)$$

其中 Ex_p^v 为评语集 V 中第 $p(p=1,2,\dots,7)$ 个评语云模型参数的期望值, v_j^e 为测得辐射源第 j 个特征参数的评语(若该离散型指标变量为脉内调制信息MOP, 则 v_j^e 为调制方式匹配程度的评语), v_p 为评语集 V 中第 p 个评语, 符号 “==” 表示评语 v_j^e 和 v_p 一致。

因此可以构造一个关于特征参数的隶属度矩阵 $R_{n \times m}$, $R_{n \times m}$ 为 n 行 m 列矩阵:

$$R_{n \times m} = \begin{bmatrix} \mu R_{11} & \mu R_{12} & \dots & \mu R_{1m} \\ \mu R_{21} & \dots & \dots & \mu R_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu R_{n1} & \mu R_{n2} & \dots & \mu R_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.3 权值确定

权值的确定在辐射源识别中占有很重要的位置, 一般在没有任何先验信息的情况下, 权系数可以用等概率来代替, 即

$$\omega_{ij} = 1/m, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

其中 m 为测得的辐射源特征参数个数, n 为模板雷达库中雷达类型个数, ω_{ij} 为待测辐射源第 j 个特征参数相对于模板雷达库第 i 类雷达第 j 个特征参数在总的隶属度中所占的权值。

本文提出了一种可以充分利用载频RF, 脉宽PW, 脉冲重复间隔PRI, 脉内调制信息MOP等单个特征参数的识别结果来动态地调整权值的方法。具体方法如下:

首先计算每个特征参数识别结果的熵, 即

$$C_{ij} = -\mu R_{ij} \ln(\mu R_{ij}) \quad (8)$$

其中 C_{ij} 为测得辐射源第 j 个特征参数相对于模板雷达库第 i 类雷达第 j 个特征参数隶属度的熵。则权值可以确定为

$$\omega_{ij} = \frac{\frac{1}{C_{ij}}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{C_{ij}}} = \frac{\frac{1}{\mu R_{ij} \ln(\mu R_{ij})}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\mu R_{ij} \ln(\mu R_{ij})}} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 待测辐射源相对于模板库每部雷达各特征参数的权值是不同的, 随着各特征参数的变化而变化。

将权值代入式(10), 可以得到总的隶属度矩阵

B

$$b_i = \sum_{j=1}^m \mu R_{ij} \times \omega_{ij} \quad (10)$$

$$B = [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_n]^T \quad (11)$$

3.4 判决准则

依据式(11)求得的隶属度矩阵, 采用以下判决准则进行判决:

设 $\exists \forall R_1, R_2 \subset R$, 满足

$$\left. \begin{aligned} m(R_1) &= \max\{m(R_i), R_i \subset R\} \\ m(R_2) &= \max\{m(R_i), R_i \subset R \text{ 并且 } R_i \neq R_1\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

若有

$$\left. \begin{aligned} m(R_1) &> \varepsilon_1 \\ m(R_1) - m(R_2) &> \varepsilon_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

则 R_1 为判决结果, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为预先设定的门限, 其中 R 为模板库雷达集合, $m(R_i)$ 为待测辐射源相对于模板雷达 R_i 的隶属度(即根据式(11)得到的 b_i), 有 $m(R_i) = b_i$ 。

4 仿真结果

为了验证本文算法的性能, 对辐射源识别进行了仿真。设模板雷达库中有 R_1, R_2, \dots, R_{10} , 10 部模板雷达, 雷达参数主要有载频 RF, 脉冲重复间隔 PRI, 脉宽 PW, 脉内调制信息 MOP。具体参数如表 2 所示。

表2 模板雷达库雷达参数

雷达	载频RF (MHz)	重频间隔PRI (μ s)	脉宽PW (μ s)	脉内 MOP
R_1	[4940 5060]	[3822 3870]	[0.9 1.5]	二相 编码
R_2	[5000 5120]	[3790 3850]	[0.3 0.9]	四相 编码
...
R_{10}	[5240 5360]	[6870 7030]	[2.7 3.3]	线形 调频

根据模板雷达库中的雷达参数,我们可以建立相应的指标集合 U ,即 $U=\{U_{RF}, U_{PW}, U_{PRF}, U_{MOP}\}$,利用3.1节的云模型建模方法,可以得到这10部模板雷达的云模型参数。

仿真过程中对模板雷达库中的10部雷达进行仿真,生成1000个待识别辐射源样本数据,对应每部雷达100个样本。待识别辐射源样本中连续属性值的构造是通过随机抽取一个模板雷达已知特征参数并加上测量误差(误差标准差为相应已知特征参数的百分之二)构成,测量误差服从零均值高斯分布。待识别辐射源样本中离散属性值由模板雷达真实调制方式加高斯噪声组成。

表3给出了上述条件下通过100次Monte Carlo实验得到的基于云模型识别方法的仿真结果,其中脉内隶属度的计算采用式(5)。实验中将该方法与模糊模式识别和传统的统计模式识别方法进行了比较。模糊模式识别中,对于连续型的特征参数,采用正态型隶属度函数;对于离散型的特征参数,当调制方式匹配时,隶属度取值为1,否则为0。从表3中可以看出基于改进权值的云模型识别方法正确识别率最高,达到99.46%,优于其它几种识别方法。

表3 辐射源正确识别率对比(%)

	基于改进 权值的云 模型识别	基于平均 权值的云 模型识别	基于平均权 值的模糊 模式识别	传统统 计模式 识别
正确识别率	99.46	94.44	80.02	70.2

图3给出了单次仿真1000部辐射源的识别效果对比图。图3(a)为基于改进权值和平均权值的云模型识别隶属度分布图,从图中可以看出,基于改进权值的隶属度分布比基于平均权值的隶属度分布高。图3(b)为基于平均权值的云模型识别和基于平均权值的模糊模式识别隶属度对比图,从图中可以看出,基于云模型的识别方法得到的隶属度分布相对比较集中,而基于模糊模式识别方法得到的隶属度分布则比较散,主要原因在于基于云模型的识别方法考虑了脉内调制识别的匹配程度,从而在一定程度上提高了识别的准确性。

通过仿真试验,可以得到以下几点结论:

(1)基于云模型的方法可以有效地进行辐射源识别,并能够更好地处理由于设备测量误差所引起的随机性和模糊性。

(2)利用云模型能够对区间类型的参数变量(如

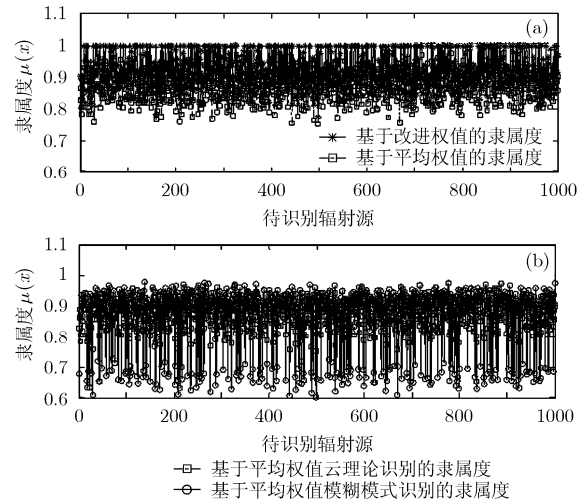


图3 单次仿真1000部辐射源识别效果对比图

载频信息 RF)进行建模,从而得到测量参数的隶属度。

(3)利用云模型的定性定量转换模型,能够较好地体现脉内调制方式的匹配程度,提高识别结果的准确性。

(4)基于改进权值的云模型识别算法的隶属度分布比基于平均权值的云模型识别算法的隶属度分布要好,这也验证了本文提出的权值分配算法的有效性。

5 结论

本文将云模型引入到辐射源识别中,提出了一种基于云模型的识别方法。该方法利用云模型对雷达模板库中区间类型的参数变量进行正态云建模,并且利用云模型的定性定量转换特性来描述离散型参数变量的调制匹配程度,同时给出了一种能够动态调整各特征参数权值的权值确定方法。最后通过仿真实验,将本文方法与模糊模式识别、统计模式识别方法进行比较,验证了这一新的识别方法是有效可行的。需要说明的是本文方法不但能够对单个区间值的特征参数进行正态云建模,而且对同一特征参数有多个区间值的情况(如载频分集等)也是适用的,在下一步要作为重点加以研究。

参考文献

- [1] 陈锡明, 祝正威, 卢显良. 新型雷达辐射源识别专家系统的研究与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(8): 58-62.
Chen Xi-ming, Zhu Zheng-wei, and Lu Xian-liang. Research and implementation on a new radar radiating source recognizing expert system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(8): 58-62.
- [2] 丁锋, 姜秋喜. 多传感器模糊D-S理论辐射源识别[J]. 电光与

- 控制, 2008, 15(4): 34-38.
- Ding Feng and Jiang Qiu-xi. Emitter recognition of multi-sensor data fusion based on fuzzy D-S evidence theory[J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(4): 34-38.
- [3] Shieh Ching-sung and Lin Chin-teng. A vector neural network for emitter identification[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, 50(8): 1120-1127.
- [4] 关欣, 何友, 衣晓. 一种新的基于粗集的辐射源信号识别模型[J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 685-688.
- Guan Xin, He You, and Yi Xiao. A novel rough set emitter signal recognition model[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(3): 685-688.
- [5] 李德毅. 知识表示中的不确定性[J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 73-79.
- Li D Y. Uncertainty in knowledge representation[J]. *Engineering Science*, 2000, 2(10): 73-79.
- [6] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
- Li D Y and Liu C Y. Study on the universality of the normal cloud model[J]. *Engineering Science*, 2004, 6(8): 28-34.
- [7] Li D Y. Knowledge representation and discovery based on linguistic atoms. Proceedings of the 1st Pacific-Asia Conference, Singapore, 1997: 23-24.
- [8] 宋远骏, 李德毅等. 电子产品可靠性的云模型评价方法[J]. 电子学报, 2000, 12(28): 74-76.
- Song Yuan-jun and Li D Y, et al. Reliability evaluation of electronic products based on cloud models[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 12(28): 74-76.
- [9] 黄海生, 王汝传. 基于隶属云模型的主观信任评估模型研究[J]. 通信学报, 2008, 29(4): 14-19.
- Huang Hai-sheng and Wang Ru-chuan. Subjective trust evaluation model based on membership cloud theory[J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(4): 14-19.
- [10] Wang Fang, Li Yan-peng, and Li Xiang. Performance evaluation for automatic target recognition based on cloud theory. The 2008 International Conference on Radar, Adelaide, SA, 2008: 498-502.
- 刘海军: 男, 1982年生, 博士生, 研究领域为辐射源识别、信号处理和综合电子战.
- 柳征: 男, 1978年生, 博士, 讲师, 研究方向为辐射源识别技术.
- 姜文利: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为综合电子战技术、空间信息处理等.
- 周一宇: 男, 1948年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为综合电子战技术、无源定位和空间信息处理等.