

# 基于逆云模型的雷达辐射源识别方法

关欣<sup>1,2</sup>, 郭强<sup>1</sup>, 张政超<sup>3</sup>, 翟鸿君<sup>4</sup>, 何友<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院信息融合技术研究所 山东 烟台 264001; 2. 国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073;  
3. 中国人民解放军63880部队 河南 洛阳 471003; 4. 海军航空工程学院基础部 山东 烟台 264001)

**【摘要】**针对由于噪声环境造成的雷达辐射源不能正确识别的问题,提出了一种新的基于逆云模型的雷达辐射源识别方法。该方法首先构建了更符合实际的含有噪声数据的雷达辐射源数据库,利用逆云模型求出数据库中雷达辐射源各属性的云数字特征,给出了基于属性相似度的识别权重确定方法,并构建了基于云模型和属性相似度的雷达辐射源分类器。仿真实验证明,该方法可以更好地处理由于噪声环境引起的随机性和模糊性,能在恶劣噪声环境下有效地进行雷达辐射源识别。

**关键词** 属性相似度; 逆云模型; 雷达辐射源; 信号识别

中图分类号 TN95

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.05.004

## Novel Method for Emitter Recognition Based on Backward Cloud Model

GUAN Xin<sup>1,2</sup>, GUO Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Zheng-chao<sup>3</sup>, ZHAI Hong-jun<sup>4</sup>, and HE You<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University Yantai Shandong 264001;  
2. The Institute of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology Changsha 410073;  
3. PLA Unit 63880 Luoyang Henan 471003;  
4. Department of Basic Sciences, Naval Aeronautical and Astronautical University Yantai Shandong 264001)

**Abstract** To deal with the problem of radar emitter recognition caused by noise environment, this paper presents a new method for emitter recognition based on backward cloud model and attribute similarity. In this method, a radar emitter database including noise data according with the reality is first constructed, the cloud numerical characteristic is then calculated based on backward cloud model. After that, the method for determining recognition weight of coefficients and a new classification implement based on backward cloud model and attribute similarity are proposed. Simulation results show that the proposed method can deal with the randomness and vagueness caused by noise environment much better and can conduct emitter recognition effectively in the adverse noise environment.

**Key words** attribute similarity; backward cloud model; radar emitter recognition; signal recognition

雷达辐射源信号的识别是雷达侦察中关键环节,正确地识别雷达辐射源信号对于现代战争的胜利有着举足轻重的影响<sup>[1]</sup>。传统的雷达辐射源识别方法主要有特征参数匹配法<sup>[2]</sup>、人工智能分析法<sup>[3-4]</sup>、脉内特征分析法<sup>[5]</sup>、数据融合法<sup>[6]</sup>等,但是随着现代战争中战场电磁环境的日益复杂,特别是新体制、新用途雷达的使用,现有的一些识别方法已不能有效地对雷达辐射源信号进行识别。雷达辐射源信号识别已成为雷达侦察信号处理的关键制约因素,是雷达侦察信号处理所亟需解决的关键问题<sup>[7]</sup>。探索有效的新的雷达辐射源信号识别方法不但具有理论

研究的意义,也能为工程应用提供重要参考价值。

文献[8]将云模型理论引入到雷达辐射源识别领域中,在识别中虽然考虑了一定的随机性和模糊性,有利于提高识别的正确率,但都需要人为地定义不确定性的度量,即超熵,且仿真的雷达辐射源数据库的各参数均服从理想的分布,没有考虑到实际情况下雷达辐射源数据库中均含有一定的噪声的情况,不利于验证方法的正确性。基于此,本文提出了一种新的基于逆云模型的雷达辐射源识别方法,该方法按照实际情况更合理地对雷达辐射源数据库进行仿真,并根据逆云模型求出数据库的云模型数

收稿日期: 2010-10-28; 修回日期: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(60572161); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0872)

作者简介: 关欣(1978-),女,博士,教授,主要从事多传感器信息融合、模式识别和人工智能等方面的研究。

字特征,通过云数字特征求得各属性的相似度以及识别的权重,最后利用基于云模型和属性相似度的雷达辐射源分类器对待测数据进行识别分类。仿真实验证明,该方法可以得到较高的正确识别率和较短的识别时间,有一定的理论指导意义和工程实用价值。

## 1 云模型

云模型是一种将定性定量不确定性转换模型<sup>[9]</sup>。经过十多年的发展,云模型理论已经在多个领域有着成功的应用<sup>[8, 10-11]</sup>。云模型着眼于将模糊集理论中的模糊性和概率理论中的随机性结合起来,用语言值表示某个定性概念与其定量表示之间的不确定性转换模型,用以反映自然语言中概念的不确定性,不但可以从经典的随机理论和模糊理论作出解释,而且反映了随机性和模糊性的关联性,构成定性和定量间的映射<sup>[12]</sup>。

### 1.1 云模型及其数字特征

云模型主要是用概念的方法把握量的不确定性,比数学表达更真实、更具备普遍性。模糊性、随机性、软推理能力都可以用云模型通过定性定量不确定转换的方法实现。

设 $U$ 是一个用精确数值表示的定量论域, $C$ 是 $U$ 上的定性概念,若定量值 $x \in U$ ,且 $x$ 是定性概念 $C$ 的一次随机实现, $x$ 对 $C$ 的确定度 $\mu(x) \in [0,1]$ 是具有稳定倾向的随机数, $\mu:U \rightarrow [0,1] \quad \forall x \in U$   
 $x \rightarrow \mu(x)$ ,则 $x$ 在论域 $U$ 上的分布成为云,每一个 $x$ 成为一个云滴。

云模型通过期望 $Ex$ (expected value)、熵 $En$ (entropy)、超熵 $He$ (hyper entropy)3个数字特征来表征一个概念。期望 $Ex$ 反映了云滴在论域空间分布的期望;熵 $En$ 是定性概念的不确定性的度量,由概念的随机性和模糊性共同确定。一方面 $En$ 是确定定性概念随机性的度量,反映了能够代表这个定性概念的云滴的离散程度,另一方面又是定性概念亦此亦彼性的度量,反映了论域空间中可被概念接受的云滴的取值范围。同一个数字特征反映随机性和模糊性,也必然反映了它们之间的关联性。超熵 $He$ 是熵的不确定性度量,即熵的熵,由熵的随机性和模糊性共同决定。

### 1.2 逆向正态云模型

正态云模型是在正态分布和钟形隶属函数的基

础上发展起来的全新模型。正态云发生器主要有正向云发生器和逆向云发生器。

逆向云发生器的产生算法如下:

输入:样本点 $x_i$ 及确定度 $\mu_i$ ,其中 $i=1,2,\dots,n$ 。

输出:反映定性概念的数字特征 $(Ex, En, He)$ 。

1) 计算 $x_i$ 的平均值,求得期望 $Ex = MEAN(x_i)$ ;

2) 计算 $x_i$ 的标准差,求得熵 $En = STD(x_i)$ ;

3) 对每一个数对 $(x_i, \mu_i)$ ,计算:

$$En'_i = \sqrt{\frac{-(x_i - Ex)^2}{2 \ln \mu_i}} \quad (1)$$

4) 计算 $En'_i$ 的标准差,求得超熵 $He = STD(En'_i)$ 。

其中, $MEAN$ 和 $STD$ 分别为求样本均值和样本标准差的函数。

## 2 基于逆云模型的雷达辐射源信号识别方法

### 2.1 基于逆云模型的雷达辐射源识别方法中有关概念的定义

本文提出的基于逆云模型的雷达辐射源识别方法,运用了云理论的相关知识,对雷达辐射源数据库中的雷达样本的确定度、雷达辐射源信号的属性相似度进行了定义,并构建了基于逆云模型和属性相似度的雷达辐射源分类器,这些概念具体定义表述如下。

**定义 1** 雷达辐射源信号样本的确定度。

样本 $x_i$ 的确定度 $\mu_i$ 按照下式计算:

$$\mu_i = 1 - \frac{|x_i - Ex|}{\max(x_i) - Ex} \quad (2)$$

即雷达辐射源数据库中的某属性值样本离该属性值样本期望值越近,样本集合中的最大值离期望值越远,该样本的确定度越小。

**定义 2** 雷达辐射源信号特征的属性相似度。

由正向正态云的“3En规则”可知,对于论域 $U$ 中的定性概念 $A$ 有贡献的云滴,主要落在区间 $[Ex - 3En, Ex + 3En]$ 。因此当不同雷达类的相同属性的云期望的差值越大、熵的和越小时,不同雷达类的该属性值的隶属度函数相交叠的部分就越少,该属性在不同雷达类中的相似度也就越小,该属性区分不同雷达类的能力也就越强。

由以上分析可知,雷达辐射源属性 $j$ 的相似度可用下式表示:

$$s(j) = \begin{cases} 0 & \min_{i=1,2,3,4} \left| \frac{\text{Ex}_{(i+1)j} - \text{Ex}_{ij}}{3(\text{En}_{(i+1)j} + \text{En}_{ij})} \right| \geq 1 \\ 1 - \min_{i=1,2,3,4} \left| \frac{\text{Ex}_{(i+1)j} - \text{Ex}_{ij}}{3(\text{En}_{(i+1)j} + \text{En}_{ij})} \right| & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知: 当  $\min_{i=1,2,3,4} \left| \frac{\text{Ex}_{(i+1)j} - \text{Ex}_{ij}}{3(\text{En}_{(i+1)j} + \text{En}_{ij})} \right| \geq 1$  时,

雷达辐射源属性  $j$  在各雷达类中的属性值的隶属度函数没有交叠部分, 属性的相似度为 0; 当

$\min_{i=1,2,3,4} \left| \frac{\text{Ex}_{(i+1)j} - \text{Ex}_{ij}}{3(\text{En}_{(i+1)j} + \text{En}_{ij})} \right| < 1$  时, 雷达辐射源  $j$  在各雷

达类中的属性值的隶属度函数其中有交叠, 且值越小, 交叠的部分就越大, 属性的相似度也就越大, 该属性区分不同雷达类的能力也就越小。

**定义 3** 分类器的属性识别权重。

根据雷达辐射源信号特征的属性相似度定义分类器的属性识别权重, 如下式所示:

$$w(j) = \frac{1 - s(j)}{\sum_{j=1}^n 1 - s(j)} \quad (4)$$

由式(4)可知: 若某个属性在各雷达类中越相似, 则它在分类器中的识别权重就越小, 对分类起的作用也就越小; 若某个属性区分各雷达类越明显, 则它在分类器中的权重就越大, 对分类起的作用也就越大。这样有助于减少不确定性对分类的影响和提高分类器的准确率。

**定义 4** 基于逆云模型和属性相似度的雷达辐射源隶属度函数为:

$$A(i) = \sum_{j=1}^n w(j) \exp \left[ -\frac{(x - \text{Ex}_{ij})^2 \text{He}_{ij}}{2(\text{En}_{ij})^2} \right] \quad (5)$$

式中,  $A(i)$  为待测样本属于雷达类  $i$  的隶属度。

由式(5)可知: 雷达类的熵越大, 该类概念的模糊度越大, 待测样本属于该雷达类的概率越大, 隶属度越大; 超熵越大, 云的厚度就越大, 不利于待测样本与该雷达类相似性概率的确定, 隶属度越小。基于逆云模型和属性相似度的雷达辐射源隶属度与雷达类成正比, 与熵成反比。相对于直接使用待测样本到各类别中心的距离、期望和熵作为计算隶属度的方法<sup>[8]</sup>, 基于逆云模型和属性相似度的雷达辐射源隶属度在考察每个雷达类不确定性程度(熵)的基

础上, 加入了对其熵的不确定性程度(超熵)的评估, 能更贴切地描绘出待测样本对各雷达类的隶属度。

## 2.2 基于逆云模型的雷达辐射源识别模型的具体过程

基于逆云模型的雷达辐射源识别方法的具体过程有以下5个步骤。

1) 构建雷达辐射源数据库。

对雷达辐射源信号分别进行参数测量、信号筛选, 然后分别提取其特征及相应的特征值, 形成雷达辐射源信号数据库。

2) 基于逆云模型求出各雷达类各属性的云数字特征。

按照逆向云发生器算法和定义1, 求出各雷达类  $A_i$  各属性  $j$  的云数字特征  $(\text{Ex}_{ij}, \text{En}_{ij}, \text{He}_{ij})$ 。

3) 基于云数字特征  $(\text{Ex}_{ij}, \text{En}_{ij}, \text{He}_{ij})$  计算各属性  $j$  的识别权重  $w(j)$ 。

根据各雷达类  $A_i$  属性  $j$  的云数字特征  $(\text{Ex}_{ij}, \text{En}_{ij}, \text{He}_{ij})$ , 按照定义2求出属性  $j$  的识别权重  $w(j)$ 。

4) 构建基于逆云模型的雷达辐射源分类器。

根据各属性  $j$  的识别权重  $w(j)$ 、各雷达类  $A_i$  各属性  $j$  的云数字特征  $(\text{Ex}_{ij}, \text{En}_{ij}, \text{He}_{ij})$ , 按照定义3和定义4所构建的基于逆云模型和属性相似度的雷达辐射源分类器。

5) 利用基于逆云模型和属性相似度的雷达辐射源分类器对待测样本进行识别分类。

随机抽取雷达辐射源数据库中的一个样本作为待测样本, 每个属性值分别加入一定百分比的高斯白噪声, 将其代入分类器中, 求得  $A$ , 若  $A$  中的第  $i$  个值为最大值, 则判断待测样本属于第  $i$  个雷达类。并与待测样本的雷达类进行比对, 若相同, 则识别正确; 若不同, 则识别错误。

## 2.3 基于逆云模型的雷达辐射源识别算法的程序结构流程

按照基于逆云模型的雷达辐射源信号识别方法的具体过程, 算法的程序结构流程图如图1所示。

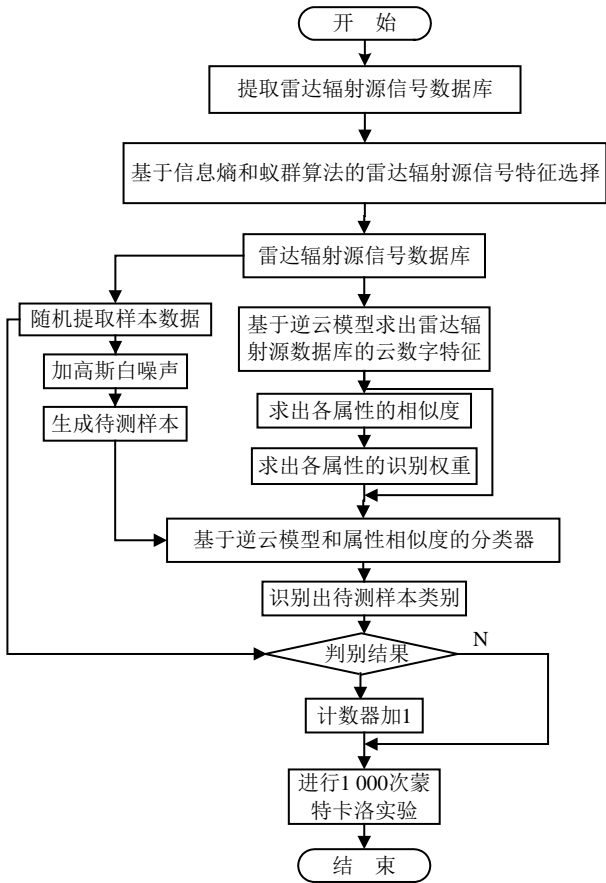


图1 基于逆云模型的雷达辐射源识别方法的程序结构流程图

### 3 仿真实验

#### 3.1 实验环境及仿真数据

本文提出的基于逆云模型的雷达辐射源识别算法采用MATLAB语言编程实现，测试计算机的基本

配置为：CPU为酷睿2处理器(主频为2 GHz)，内存为2 GB。在不同噪声背景下进行蒙特卡洛仿真实验，其中仿真结果中的识别时间为识别算法在当前实验环境下进行1000次蒙特卡洛仿真实验的时间。

假设模板雷达辐射源数据库如表1所示，设雷达辐射源有5个模板类型，雷达辐射源信号特征为射频频率、脉冲重复频率和脉冲宽度。射频频率服从均匀分布，脉冲重复频率和脉冲宽度服从正态分布。

表1 模板雷达辐射源数据库参数

雷达	射频频率/MHz	脉冲重复频率/KHz	脉冲宽度/ $\mu$ s
A <sub>1</sub>	[100,300]	$\mu=1\ 000, \sigma=30$	$\mu=100, \sigma=3$
A <sub>2</sub>	[250,500]	$\mu=1\ 300, \sigma=30$	$\mu=130, \sigma=3$
A <sub>3</sub>	[450,800]	$\mu=1\ 400, \sigma=30$	$\mu=140, \sigma=5$
A <sub>4</sub>	[800,900]	$\mu=1\ 500, \sigma=30$	$\mu=150, \sigma=5$
A <sub>5</sub>	[850,1\ 000]	$\mu=1\ 200, \sigma=15$	$\mu=170, \sigma=5$

假设数据库中的每个参数含有1/100的误差(误差服从正态分布)，并按照表1的数字特征对模板雷达库中的5部雷达进行仿真，生成1 000个雷达辐射源数据，每部雷达200个样本，构成雷达辐射源数据库。

#### 3.2 实验结果及仿真分析

表2~表4分别给出了在1%噪声环境、5%噪声环境和10%噪声环境下，各通过1 000次蒙特卡洛仿真实验得到的基于逆云模型的识别方法、基于逆云模型和平均权值的识别方法、基于云模型的识别方法和基于距离度量的识别方法的仿真结果对比。在距离度量方法中，距离采用欧氏距离。

表2 1%噪声环境下仿真结果对比

	基于逆云模型的雷达辐射源信号识别方法	基于逆云模型和平均权值的雷达辐射源信号识别方法	基于云模型的雷达辐射源识别方法	基于距离度量的雷达辐射源信号识别方法
正确识别率/(%)	99.8	96.4	97.6	87.1
识别时间/s	0.215 4	0.214 3	1.508	0.240 1

表3 5%噪声环境下仿真结果对比

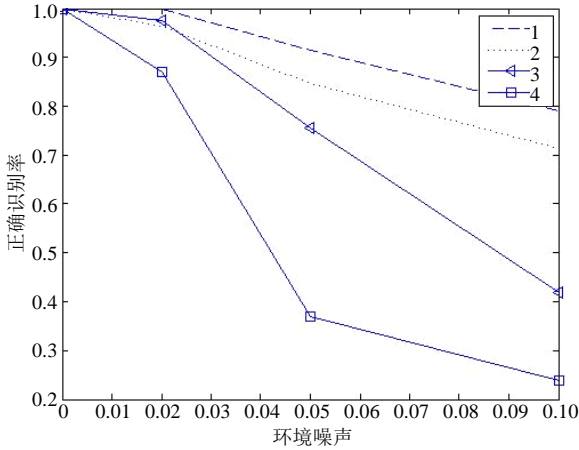
	基于逆云模型的雷达辐射源信号识别方法	基于逆云模型和平均权值的雷达辐射源信号识别方法	基于云模型的雷达辐射源识别方法	基于距离度量的雷达辐射源信号识别方法
正确识别率/(%)	91.4	84.7	75.5	36.9
识别时间/s	0.214 3	0.213 2	1.479 9	0.243 1

表4 10%噪声环境下仿真结果对比

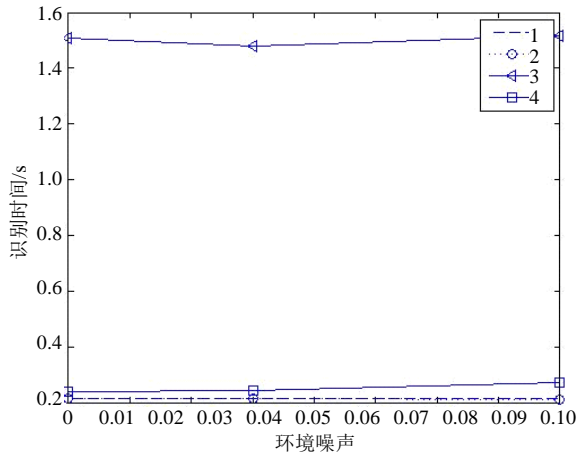
	基于逆云模型的雷达辐射源信号识别方法	基于逆云模型和平均权值的雷达辐射源信号识别方法	基于云模型的雷达辐射源识别方法	基于距离度量的雷达辐射源信号识别方法
正确识别率/(%)	79.1	71.3	41.9	23.9
识别时间/s	0.214 1	0.211 2	1.517 0	0.271 4

为了更直观地比较本文提出的基于逆云模型的雷达辐射源识别方法和已有识别方法的性能，根据

表2~表4将各识别方法的正确识别率和识别时间随环境噪声的变化曲线分别放在一个坐标图中进行比较, 如图2所示。其中, 曲线1代表基于逆云模型的识别方法, 曲线2代表基于逆云模型和平均权值的识别方法, 曲线3代表基于云模型的识别方法, 曲线4代表基于距离度量的识别方法。



a. 各雷达辐射源识别方法的正确识别率对比图



b. 各雷达辐射源识别方法的识别时间对比图

图2 各雷达辐射源识别方法的性能对比图

通过上述仿真结果, 可以得到以下结论:

1) 在不同的噪声环境下, 基于逆云模型的雷达辐射源信号识别方法的正确识别率最高, 识别时间最短, 其他方法次之, 其中基于距离度量的雷达辐射源信号识别方法正确识别率最低。

2) 基于逆云模型的雷达辐射源信号识别方法的正确识别率均比基于逆云模型和平均权值的雷达辐射源信号识别方法的正确识别率高, 证明了本文提出的权值分配算法的正确性。

3) 基于云模型的雷达辐射源信号识别方法的识别时间最长, 主要是由于事先需要计算各属性的权重, 而基于逆云模型的雷达辐射源信号识别方法属性权重不需要事先计算, 而是包含在算法中, 节

约了识别时间。

4) 基于云模型的雷达辐射源信号的识别方法和基于距离度量的雷达辐射源信号识别方法随着噪声环境的恶化, 正确识别率急剧下降; 在5%的噪声环境下, 基于距离度量的识别方法的正确识别率已降至50%以下; 在10%的噪声环境下, 基于云模型的雷达辐射源信号的识别方法也已降至50%以下。而基于逆云模型的雷达辐射源信号识别方法和基于逆云模型和平均权值的雷达辐射源信号识别方法在5%和10%的噪声环境下均可保持较高的正确识别率, 说明基于逆云模型的雷达辐射源识别方法可以更好地处理由于噪声环境引起的随机性和模糊性, 有效地在恶劣噪声环境下进行雷达辐射源识别。

### 4 结束语

本文提出了一种新的基于逆云模型的雷达辐射源识别方法。该方法首先利用逆云模型算法求出数据库中雷达辐射源各属性的云数字特征, 通过云数字特征求出各属性相似度, 给出了基于属性相似度的识别权重确定方法, 并构建了基于逆云模型和属性相似度的雷达辐射源分类器。通过仿真实验, 将本文方法与基于云模型的雷达辐射源信号的识别方法和基于距离度量的雷达辐射源识别方法进行了性能比较, 验证了本文算法的有效性和优越性。特别指出的是, 本文提出的识别方法在恶劣噪声环境下仍具有较短的识别时间和较高的正确识别率, 有很好的研究和应用前景。

### 参 考 文 献

[1] 张葛祥. 雷达辐射源信号智能识别方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.  
ZHANG Ge-xiang. Intelligent recognition methods for radar emitter signals[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.

[2] 张多林, 潘泉, 张洪才. 基于理想点贴近度的辐射源威胁综合评价建模与仿真验证[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14): 3896-3898.  
ZHANG Duo-lin, PAN Quan, ZHANG Hong-cai. Modeling and simulation on radiator threatening evaluation based on degrees keeping close to ideal point[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(14): 3896-3898.

[3] 孟晓琳, 刁鸣, 茅玉龙, 等. 基于模糊理论的雷达信号类型识别方法[J]. 电子信息对抗技术, 2006, 21(5): 19-21.  
MENG Xiao-lin, DIAO Ming, MAO Yu-long, et al. Research on the radar recognition based on fuzzy theory[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2006, 21(5): 19-21.

(下转第677页)

- 57(2): 338-350.
- [6] SHPARLINSKI I E. On the Naor-Reingold pseudo-random number function from elliptic curves[J]. Appl Algebra Engng Comm Comput, 2000, 11(1): 27-34.
- [7] SHPARLINSKI I E, SILVERMAN J H. On the linear complexity of the Naor-Reingold pseudo-random function from elliptic curves[J]. Designs, Codes and Cryptography, 2001, 24(3): 279-289.
- [8] SHPARLINSKI I E. Pseudorandom number generators from elliptic curves[J]. Recent Trends in Cryptography, Contemporary Mathematics, American Mathematical Society, 2009, 477: 121-141.
- [9] MAUDUIT C, SARKOZY A. On finite pseudorandom binary sequences I: measures of pseudorandomness, the Legendre symbol[J]. Acta Arithmetica, 1997, 82: 365-377.
- [10] CASSAIGNE J, MAUDUIT C, SARKOZY A. On finite pseudorandom binary sequences, VII: the measures of pseudorandomness[J]. Acta Arithmetica, 2002, 103: 97-118.
- [11] NIEDERREITER H. Linear complexity and related complexity measures for sequences[C]//Proceeding of the Cryptology-INDOCRYPT 2003, Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [12] LIDL R, NIEDERREITER H. Finite fields[M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1997.
- [13] SHPARLINSKI I E. Cryptographic applications of analytic number theory: Complexity lower bounds and pseudorandomness[C]// Progress in Computer Science and Applied Logic. Basel: Birkhauser Verlag, 2003.
- [14] ENGE A. Elliptic curves and their applications to cryptography: an Introduction[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [15] KOHEL D, SHPARLINSKI I E. Exponential sums and group generators for elliptic curves over finite fields[C]// Proceeding of the Algorithmic Number Theory Symposium. Leiden, Berlin: Springer-Verlag, 2000, LNCS 1838: 395-404.
- [16] DRMOTA M, TICHY R. Sequences, discrepancies and applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- [17] NIEDERREITER H. Random number generation and quasi-monte carlo methods[M]. Philadelphia: SIAM, 1992.
- [18] BOMBIERI E. On exponential sums in finite fields[J]. Amer J Math, 1966, 88: 71-105.
- [19] MAUDUIT C, NIEDERREITER H, SARKOZY A. On pseudorandom [0; 1] and binary sequences[J]. Publicationes Mathematicae Debrecen, 2007, 71: 305-324.
- [20] BRANDSTATTER N, WINTERHOF A. Linear complexity profile of binary sequences with small correlation measure[J]. Periodica Mathematica Hungarica, 2006, 52(2): 1-8.

编辑 张俊

(上接第667页)

- [4] 寇华, 王宝树. 基于遗传算法的RBF-PLS方法在辐射源识别中的应用[J]. 电子信息学报, 2007, 25(9): 1031-1034.  
KOU Hua, WANG Bao-shu. The RBF-PLS approach based on genetic algorithm and its application in radar model recognition[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 25(9): 1031-1034.
- [5] 刘庆云, 王根弟, 朱伟强. 雷达辐射源信号特征参量分析[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(4): 21-24.  
LIU Qing-yun, WANG Gen-di, ZHU Wei-qiang. Analysis of characteristic parameters of radar pulses[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008, 24(4): 21-24.
- [6] 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): 33-37.  
DING Feng, JIANG Qiu-xi. Emitter recognition of multi-sensor data fusion based on fuzzy D-S evidence theory[J]. Electronics Oprics & Control, 2008, 15(4): 33-37.
- [7] 朱华邦, 洪庆根, 杜娟. 火控雷达在有源干扰环境中的作用距离评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(2): 171-173.  
ZHU Hua-bang, HONG Qing-gen, DU Juan. Action distance evaluation of fire control radar in source interference environment[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2008, 23(2): 171-173.
- [8] 刘海军, 柳征, 姜文利, 等. 一种基于云模型的辐射源识别方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2079-2083.  
LIU Hai-jun, LIU Zheng, JIANG Wen-li, et al. A method for emitter recognition based on cloud model[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(9): 2079-2083.
- [9] 李德毅, 史雪梅, 孟海军. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究和发展, 1995, 32(6): 15-20.  
LI De-yi, SHI Xue-mei, MENG Hai-jun. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20.
- [10] 尹国定, 卫红. 云计算实现概念计算的方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(4): 502-506.  
YIN Guo-ding, WEI Hong. Cloud computing: a method to realize conceptual computing[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(4): 502-506.
- [11] 郭浩波, 王颖龙. 云理论在防空C3I系统效能评估中的应用[J]. 战术导弹技术, 2006, (3): 25-28.  
GUO Hao-bo, WANG Ying-long. Study of the application of cloud theory to effectiveness evaluation for air defense C3I system[J]. Tactical Missile Technology, 2006, (3): 25-28.
- [12] 李德毅. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.  
LI De-yi. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.

编辑 税红