



国防科技图书出版基金



Radar Emitter Signal Recognition  
Based on Rough Sets Theory

# 基于粗糙集理论的 雷达辐射源信号识别

关欣 潘丽娜 张政超 郭强 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 基于粗糙集理论的 雷达辐射源信号识别

Radar Emitter Signal Recognition  
Based on Rough Sets Theory

关欣 潘丽娜 张政超 郭强 著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

基于粗糙集理论的雷达辐射源信号识别/关欣等著.  
—北京:国防工业出版社,2015.3

ISBN 978-7-118-09822-8

I. ①基... II. ①关... III. ①模糊集-应用-  
雷达信号-辐射源-信号识别 IV. ①TN957.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 032217 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880×1230 1/32 印张 7 字数 188 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 96.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才、确保国防科技优秀图书的出版，原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是：**

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著；密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，原国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

**国防科技图书出版基金**

**评审委员会**

国防科技图书出版基金  
第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆 军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

# 前 言

雷达辐射源信号识别既是雷达侦察中的关键环节，又是多传感器信息融合中属性识别的重要内容。如何对雷达辐射源信号进行有效和快速的识别是决定现代战争胜负的重要因素之一。本书在深入研究和分析雷达辐射源信号识别特点、过程及雷达辐射源信号脉冲描述字的基础上，提出了基于粗糙集理论、粗糙集理论与其他理论相结合以及其他雷达辐射源信号智能识别方法。

针对雷达辐射源信号识别的重点和难点，本书以粗糙集理论为基础，提出了多种新的便于工程实现的识别模型和算法，主要内容如下。

(1) 研究新的雷达辐射源信号识别模型，与现有的识别模型比较，最大的优点是新模型能够通过自学习，进一步充实雷达辐射源信号数据库；并且给出了雷达辐射源信号识别系统的结构模型。

(2) 在对粗糙集理论的深入学习和研究的基础上，结合蚁群算法等智能算法提出了新的数据离散化方法和属性约简方法，以改进雷达辐射源信号识别算法的性能。

(3) 提出了基于粗糙集理论及粗糙集理论分别与支持向量机、径向基神经网络、灰关联理论相结合的四种单传感器雷达辐射源信号识别模型，并将其应用于雷达辐射源信号识别。另外提出了基于最近邻方法、云模型和逆云模型及属性相似度的雷达辐射源识别模型。仿真结果表明模型均有效可行。

(4) 提出了用粗糙集构建基本概率赋值和不确定度等属性函数，

分别用 D-S 证据理论和灰关联理论对多传感器雷达辐射源信号进行决策级融合, 仿真表明, 融合后的结果能够降低单传感器识别的不确定度, 取得良好的识别效果。

(5) 利用仿真数据, 分别在小样本数据集和大样本数据集的情况下, 从识别正确率和识别时间两个方面比较了粗糙集理论及粗糙集理论分别与支持向量机、径向基神经网络、灰关联理论相结合的四种单传感器雷达辐射源信号识别方法的识别性能; 分析比较了单传感器识别和多传感器融合识别的优缺点和识别性能。通过仿真数据, 得出本书提出的各种识别方法的优劣性能以及适用的应用环境。

本书由关欣教授、潘丽娜教授、张政超工程师、郭强博士生著。孙贵东、王虹、孙祥威等硕士生和张韞讲师参加了算法仿真和文字校对工作。我们知道, 雷达辐射源信号识别技术随着武器系统和设备、信号处理技术等的发展而不断发展, 由于篇幅的限制, 本书大部分的内容介绍作者们提出的基于粗糙集理论及粗糙集理论与其他理论相结合的雷达辐射源信号识别方法, 但同时也提出了一些其他的雷达辐射源信号智能识别方法, 并介绍了雷达辐射源识别领域的一些新发展以供读者进一步研究参考。同时, 鉴于作者水平所限, 对于书中存在的错误与不妥之处, 恳请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 7 月 16 日

# 目 录

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                        | 1  |
| 1.1 引言 .....                          | 1  |
| 1.2 雷达辐射源信号识别概述 .....                 | 1  |
| 1.2.1 雷达对抗与雷达侦察 .....                 | 1  |
| 1.2.2 雷达辐射源信号识别及其地位 .....             | 4  |
| 1.3 国内外研究现状 .....                     | 6  |
| 1.4 基于粗糙集理论的雷达辐射源信号识别 .....           | 16 |
| 第 2 章 雷达辐射源信号识别基础和模型 .....            | 19 |
| 2.1 引言 .....                          | 19 |
| 2.2 雷达侦察 .....                        | 20 |
| 2.2.1 雷达侦察的基本内容和分类 .....              | 20 |
| 2.2.2 雷达侦察的特点 .....                   | 22 |
| 2.2.3 雷达侦察的用途 .....                   | 23 |
| 2.3 雷达侦察中辐射源信号处理过程 .....              | 24 |
| 2.3.1 信号截获和参数测量 .....                 | 24 |
| 2.3.2 信号分选 .....                      | 27 |
| 2.3.3 参数估计与分析 .....                   | 27 |
| 2.3.4 雷达辐射源识别及信号描述方式 .....            | 28 |
| 2.4 常用的基于特征匹配的雷达辐射源信号识别<br>功能模型 ..... | 36 |
| 2.5 雷达辐射源信号特征提取与特征选择 .....            | 37 |
| 2.6 雷达辐射源信号识别分类器设计分析 .....            | 38 |

|            |                             |           |
|------------|-----------------------------|-----------|
| 2.6.1      | 专家系统分类器 .....               | 38        |
| 2.6.2      | 神经网络分类器 .....               | 39        |
| 2.6.3      | 模糊综合评判分类器 .....             | 40        |
| 2.6.4      | 脉内特征分析分类器 .....             | 41        |
| 2.7        | 一种新的雷达辐射源信号识别功能模型 .....     | 43        |
| 2.7.1      | 数据预处理 .....                 | 43        |
| 2.7.2      | 特征选择 .....                  | 44        |
| 2.7.3      | 基于粗糙集约简的分类器设计 .....         | 44        |
| 2.7.4      | 无监督学习 .....                 | 45        |
| <b>第3章</b> | <b>粗糙集理论基础及数据处理方法 .....</b> | <b>47</b> |
| 3.1        | 引言 .....                    | 47        |
| 3.2        | 粗糙集理论基础 .....               | 48        |
| 3.2.1      | 与知识有关的定义 .....              | 49        |
| 3.2.2      | 信息系统 .....                  | 50        |
| 3.2.3      | 上近似集、下近似集 .....             | 51        |
| 3.2.4      | 不确定性度量 .....                | 53        |
| 3.2.5      | 粒度计算 .....                  | 55        |
| 3.3        | 基于粗糙集的数据预处理 .....           | 57        |
| 3.3.1      | 不完备数据处理 .....               | 57        |
| 3.3.2      | 数据离散化 .....                 | 61        |
| 3.3.3      | 连续属性离散化新方法 .....            | 65        |
| 3.4        | 基于粗糙集的约简 .....              | 76        |
| 3.4.1      | 属性约简 .....                  | 76        |
| 3.4.2      | 非标准信息系统的约简 .....            | 79        |
| 3.4.3      | 属性约简新方法 .....               | 80        |
| 3.5        | 粗糙集理论与应用研究 .....            | 85        |
| 3.5.1      | 粗糙集理论研究 .....               | 85        |
| 3.5.2      | 粗糙集应用研究 .....               | 88        |
| 3.6        | 粗糙集理论发展现状及趋势 .....          | 90        |

第 4 章 基于粗糙集理论的单传感器雷达辐射源信号识别 ..... 93

4.1 引言 ..... 93

4.2 基于粗糙集的雷达辐射源信号识别 ..... 93

4.3 基于粗糙集与支持向量机的雷达辐射源信号识别 ..... 100

4.3.1 建立雷达辐射源信号的信息表和决策表 ..... 101

4.3.2 对雷达辐射源决策表的属性约简和规则提取 ..... 102

4.3.3 基于支持向量机的训练与测试 ..... 104

4.3.4 基于支持向量机的识别方法 ..... 106

4.3.5 具体实施方式 ..... 108

4.4 基于粗糙集与 RBF 的雷达辐射源信号识别 ..... 109

4.4.1 RBF 神经网络学习算法 ..... 109

4.4.2 基于粗糙集与 RBF 神经网络的识别模型 ..... 113

4.4.3 仿真分析 ..... 114

4.5 基于粗糙集和灰关联的雷达辐射源信号识别 ..... 117

4.5.1 属性约简和属性权重的确定 ..... 117

4.5.2 基于灰关联的信号识别 ..... 118

4.5.3 基于粗糙集和灰关联的识别模型 ..... 119

4.6 基于最近邻方法的雷达辐射源信号识别 ..... 120

4.6.1 最近邻方法及决策规则 ..... 120

4.6.2 距离函数的选择 ..... 122

4.6.3 基于最近邻方法的雷达辐射源信号识别 ..... 123

4.6.4 仿真分析 ..... 124

4.7 基于云模型理论的雷达辐射源信号识别 ..... 128

4.7.1 云模型 ..... 129

4.7.2 基于云模型的雷达辐射源信号识别方法 ..... 131

4.7.3 基于逆云模型及属性相似度的雷达辐射源信号识别方法 ..... 132

4.7.4 仿真分析 ..... 136

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>第 5 章 基于粗糙集理论的多传感器融合雷达辐射源</b> |     |
| <b>信号识别</b>                      | 139 |
| 5.1 引言                           | 139 |
| 5.2 基于粗糙集与 D-S 证据理论的多传感器雷达辐射源    |     |
| <b>信号识别</b>                      | 140 |
| 5.2.1 基于粗糙集理论的雷达辐射源信号识别          | 140 |
| 5.2.2 基于粗糙集和 D-S 证据理论的多传感器       |     |
| <b>识别</b>                        | 143 |
| 5.2.3 仿真分析                       | 145 |
| 5.3 基于粗糙集与灰关联理论的多传感器雷达辐射源        |     |
| <b>信号识别</b>                      | 146 |
| 5.3.1 上、下近似集合和距离度量               | 147 |
| 5.3.2 基于粗糙集和灰关联理论多传感器融合          |     |
| <b>识别</b>                        | 148 |
| 5.3.3 仿真分析                       | 151 |
| <b>第 6 章 多种雷达辐射源信号识别方法性能比较分析</b> | 155 |
| 6.1 引言                           | 155 |
| 6.2 基于粗糙集和灰关联理论相结合的识别方法性能        | 155 |
| 6.2.1 基于粗糙集理论的识别方法性能分析           | 155 |
| 6.2.2 基于灰关联理论的识别方法性能分析           | 158 |
| 6.2.3 基于粗糙集和灰关联理论相结合的识别          |     |
| <b>性能</b>                        | 161 |
| 6.2.4 识别性能比较                     | 162 |
| 6.2.5 粗糙集理论在雷达辐射源信号识别中应用         |     |
| <b>的启示</b>                       | 166 |
| 6.3 支持向量机、神经网络等方法的识别性能比较         | 167 |

|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| 6.4        | 多传感器融合的识别方法性能比较 ..... | 174        |
| <b>第7章</b> | <b>结论与展望 .....</b>    | <b>176</b> |
| 7.1        | 引言 .....              | 176        |
| 7.2        | 研究内容及结论 .....         | 177        |
| 7.2.1      | 本书研究内容 .....          | 177        |
| 7.2.2      | 识别方法性能分析结论 .....      | 177        |
| 7.3        | 问题与建议 .....           | 179        |
| 7.4        | 研究方向展望 .....          | 180        |
| 7.4.1      | 雷达辐射源信号识别系统 .....     | 180        |
| 7.4.2      | 雷达辐射源平台识别 .....       | 180        |
| 7.4.3      | 雷达辐射源信号数据库 .....      | 181        |
| 7.4.4      | 连续波雷达辐射源信号识别 .....    | 181        |
| 7.4.5      | 识别方法和分类方法的推广 .....    | 181        |
|            | 缩略语英汉对照表 .....        | 182        |
|            | 参考文献 .....            | 184        |

# Contents

|                  |                                                                |    |
|------------------|----------------------------------------------------------------|----|
| <b>CHAPTER 1</b> | <b>Exordium</b>                                                | 1  |
| 1.1              | Introduction                                                   | 1  |
| 1.2              | Summarization of Radar Emitter Signal Recognition              | 1  |
| 1.2.1            | Radar Rivalry and Radar Reconnaissance                         | 1  |
| 1.2.2            | Station and Means of Radar<br>Emitter Recognition              | 4  |
| 1.3              | Research Status in China and Abroad                            | 6  |
| 1.4              | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Rough Sets        | 16 |
| <b>CHAPTER 2</b> | <b>Basis and Model of Radar Emitter Signal<br/>Recognition</b> | 19 |
| 2.1              | Introduction                                                   | 19 |
| 2.2              | Radar Reconnaissance                                           | 20 |
| 2.2.1            | Basic and Classification of Radar<br>Reconnaissance            | 20 |
| 2.2.2            | Characters of Radar Reconnaissance                             | 22 |
| 2.2.3            | Purpose of Radar Reconnaissance                                | 23 |
| 2.3              | Emitter Signal Processing in Radar Reconnaissance              | 24 |
| 2.3.1            | Signal Capture and Parameter Measure                           | 24 |
| 2.3.2            | Dispartment and Chosen of Signal                               | 27 |

|       |                                                                         |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.3 | Parameter Estimation and Analysis .....                                 | 27 |
| 2.3.4 | Signal Recognition and Signal Description .....                         | 28 |
| 2.4   | Characteristic Match Model of Radar Emitter<br>Signal Recognition ..... | 36 |
| 2.5   | Radar Emitter Signal Characteristic Chosen .....                        | 37 |
| 2.6   | Radar Emitter Signal Classifier Designing .....                         | 38 |
| 2.6.1 | Expert System Classifier .....                                          | 38 |
| 2.6.2 | Neural Network Classifier .....                                         | 39 |
| 2.6.3 | Fussy Judge Classifier .....                                            | 40 |
| 2.6.4 | Analisis of Inner Pulse Classifier .....                                | 41 |
| 2.7   | A New Radar Emitter Signal Recognition Model .....                      | 43 |
| 2.7.1 | Data Pretreatment .....                                                 | 43 |
| 2.7.2 | Characteristic Chosen .....                                             | 44 |
| 2.7.3 | Classifier Based on Rough Sets .....                                    | 44 |
| 2.7.4 | Unsupervised Learning .....                                             | 45 |

## **CHAPTER 3 Rough Sets and its Data Processing Method .....** 47

|       |                                             |    |
|-------|---------------------------------------------|----|
| 3.1   | Introduction .....                          | 47 |
| 3.2   | Rough Sets Basis .....                      | 48 |
| 3.2.1 | Some Definitions .....                      | 49 |
| 3.2.2 | Information System .....                    | 50 |
| 3.2.3 | Upper and Lower Approximation Set .....     | 51 |
| 3.2.4 | Degree Measurement of Uncertainty .....     | 53 |
| 3.2.5 | Particle Size Calculation .....             | 55 |
| 3.3   | Data Pretreatment based on Rough Sets ..... | 57 |
| 3.3.1 | Incomplete Data Processing .....            | 57 |
| 3.3.2 | Data Discretization .....                   | 61 |
| 3.3.3 | Novel Data Discretization Method .....      | 65 |

|         |                                                      |    |
|---------|------------------------------------------------------|----|
| 3. 4    | Attributes Reduction based on Rough Sets .....       | 76 |
| 3. 4. 1 | Attributes Reduction .....                           | 76 |
| 3. 4. 2 | Reduction of nonstandard Information<br>System ..... | 79 |
| 3. 4. 3 | Novel Attributes Reduction Method .....              | 80 |
| 3. 5    | Theory and Application Research of Rough Sets .....  | 85 |
| 3. 5. 1 | Theory Research of Rough sets .....                  | 85 |
| 3. 5. 2 | Application Research of Rough sets .....             | 88 |
| 3. 6    | Research Status of Rough sets .....                  | 90 |

## **CHAPTER 4 Single Sensor Radar Emitter Signal**

|         |                                                                          |           |
|---------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
|         | <b>Recognition Based on Rough Sets .....</b>                             | <b>93</b> |
| 4. 1    | Introduction .....                                                       | 93        |
| 4. 2    | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Rough Sets .....            | 93        |
| 4. 3    | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Rough Sets and SVM .....    | 100       |
| 4. 3. 1 | Building Information and Decision Table<br>of Radra emitter Signal ..... | 101       |
| 4. 3. 2 | Attribution Reduction and Rule Extractions<br>Based on Rough Sets .....  | 102       |
| 4. 3. 3 | Train and Test by SVM to Gain Right<br>Recognition Rate .....            | 104       |
| 4. 3. 4 | Recognition by SVM to Unknown Radar<br>Emitter Signal .....              | 106       |
| 4. 3. 5 | Practising Ways .....                                                    | 108       |
| 4. 4    | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Rough Sets and RBFNN .....  | 109       |

|         |                                                                                    |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. 4. 1 | RBF Neural Network Learning Algorithm .....                                        | 109 |
| 4. 4. 2 | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Rough Sets and RBFNN .....            | 113 |
| 4. 4. 3 | Simulation Examples .....                                                          | 114 |
| 4. 5    | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Rough Sets and Grey Association ..... | 117 |
| 4. 5. 1 | Attribution Reduction and Weight<br>Coefficient Determinatin .....                 | 117 |
| 4. 5. 2 | Unknown Radar Emitter Signal Recognition<br>Based on Grey Association .....        | 118 |
| 4. 5. 3 | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Rough Sets and Grey Association ..... | 119 |
| 4. 6    | Radar Emitter Signal Recognition Based on the<br>Nearest Method .....              | 120 |
| 4. 6. 1 | the Nearest Method and Decision Rule .....                                         | 120 |
| 4. 6. 2 | Chooosen of Distance Fuction .....                                                 | 122 |
| 4. 6. 3 | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>the Nearest Method .....              | 123 |
| 4. 6. 4 | Simulation Analysis .....                                                          | 124 |
| 4. 7    | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Cloud Model .....                     | 128 |
| 4. 7. 1 | Cloud Model .....                                                                  | 129 |
| 4. 7. 2 | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Cloud Model .....                     | 131 |
| 4. 7. 3 | Radar Emitter Signal Recognition Based on<br>Back Cloud Model .....                | 132 |
| 4. 7. 4 | Simulation Analysis .....                                                          | 136 |