

## 基于自提取样本图的雷达辐射源识别新方法

刘凯<sup>1,2</sup>, 王杰贵<sup>2</sup>, 孟祥豪<sup>2</sup>

(1. 电子信息控制重点实验室, 成都 610036; 2. 电子工程学院, 合肥 230037)

**摘要:** 为了迅速对雷达辐射源进行识别, 减少处理环节, 提出一种基于自提取样本图的雷达辐射源识别新方法。算法直接从全脉冲数据中提取脉冲样本图, 而后利用自提取样本图进行匹配识别。这种方法无需传统方法的特征提取过程, 且不需对雷达信号进行分选, 简化了处理环节, 能够节约处理过程的时间。仿真分析表明, 该方法能够获得较高的识别率。

**关键词:** 雷达识别; 电子侦察; 分选; 自提取; 脉冲样本图

**中图分类号:** V243.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2013)12-0073-04

## A New Method for Identifying Radar Emitter Based on Self-Distilled Pulse Sequence Pattern

LIU Kai<sup>1,2</sup>, WANG Jiegui<sup>2</sup>, MENG Xianghao<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China;

2. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** In order to identify the radar emitter rapidly and reduce the processing steps, a new method based on self-distilled pulse sequence pattern was proposed. The Pulse Sequence Pattern (PSP) was directly distilled from the full of pulse data, and then was used for matching and identification. This method does not need a process of feature extraction and the deinterleaving of the radar signal as the conventional method, thus the processing is simplified and time for the processing is reduced. The simulation results show that the method has high recognition rate.

**Key words:** radar emitter recognition; electronic reconnaissance; deinterleaving; self-distilled; Pulse Sequence Pattern (PSP)

### 0 引言

雷达辐射源识别是电子侦察中的关键环节, 在现代战争中, 各种复杂体制雷达层出不穷, 这就要求电子侦察设备能够快速地对雷达型号、雷达工作模式进行识别, 进而判断出雷达的威胁等级。传统的雷达辐射源识别中, 如模板脉冲匹配法<sup>[1]</sup>、特征参数匹配法<sup>[2-3]</sup>、基于模糊模式识别的方法<sup>[4-5]</sup>、联合参数建模的识别方法<sup>[6]</sup>等, 一般需要对信号进行分选或者特征提取, 这使得实际中识别敌方雷达的时间增加, 影响战争中的决策, 因此, 如何在提供较高识别准确率的前提下缩短处理时间, 对于获取战争的胜利有着很大的影响。

本文针对全脉冲数据, 基于脉冲样本图<sup>[7-9]</sup>的描述

方式, 提出一种基于自提取样本图的雷达辐射源识别新算法, 利用同种雷达信号脉冲之间的匹配相关性, 通过脉冲的整体平移, 实现对脉冲样本图的自提取, 在得到自提取样本图<sup>[10]</sup>后, 利用已知样本图和自提取样本图, 可以将雷达辐射源识别出来。该方法不需要对全脉冲数据进行分选, 且无需传统方法的特征提取过程, 使得处理时间较快。通过仿真表明, 该方法有较高的识别准确率, 为实际中快速识别雷达辐射源提供了一种新方法。

### 1 基于自提取脉冲样本图的雷达辐射源匹配识别算法

#### 1.1 雷达数据中的脉冲样本图自提取技术

设雷达在某工作模式下发射一串  $M$  个脉冲信号  $S = [P_1, P_2, \dots, P_M]$ , 若从  $S$  中选取一个能准确表示整串雷达信号特征的子序列  $S' = [P_i, P_{i+1}, \dots, P_{i+L}]$ , 即利用该子序列  $S'$  来表示雷达在该工作模式下的信号特

征,该子序列称为雷达信号脉冲样本图<sup>[2,5]</sup>。其中, $P$ 表示利用载频、脉宽、到达时间、脉内调制等特征形成单个雷达脉冲的特征矢量。

根据全脉冲列提取脉冲样本图的思想是利用循环相关方法提取脉冲样本图,其原理是当脉冲列向右滑动一个骨架周期后再与原脉冲列进行自相关匹配,所得到的匹配脉冲数会出现一个峰值,这个骨架周期就是所要提取的脉冲样本图。该方法原理简单,运算量少且提取准确率高,极易于工程实现。

基于循环相关的脉冲样本图提取原理如下:设全脉冲列的到达时间为 $t_n, n=1, 2, \dots, N, N$ 为脉冲个数。如果只考虑脉冲列的下一脉冲到达时间 NTOA 这个参数,则脉冲列就可以模型化为单位冲激函数的和,即

$$x(t) = \sum_{n=1}^N \delta(t - t_n) \quad (1)$$

设自相关函数为 $R_x(\tau)$ ,当脉冲列移位位数为 $k$ 时, $R_x(k)$ 可以定义为

$$R_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} \sum_{j=k+1}^N f(x_i, x_j), k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中, $f(x_i, x_j)$ 为分选标识字函数,其定义为

$$f(x_i, x_j) = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个脉冲和第 } j \text{ 个脉冲的特征} \\ & \text{参数在容差范围内匹配} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 个脉冲和第 } j \text{ 个脉冲的特征} \\ & \text{参数在容差范围内不匹配} \end{cases} \quad (3)$$

在脉冲样本图自提取中,本文所用的特征参数指的是载频、脉宽、重复频率和脉内特征。一般情况下将重复频率参数转化为相对时间间隔( $T_{\text{DTOA}}$ )参数,易于进行脉冲是否匹配的判定。

在本文中,采用加权欧式距离表示两个脉冲之间的相似测度。其定义为

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^4 w_i (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_4)'$ ,  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_4)'$ ,为两个具有多维特征值的向量; $w_i$ 为向量中第 $i$ 个特征的权重。

对于 MOP 而言,其为编码表示,无法进行数值计算,因此需要对其距离进行重新定义。假设脉内特征共有 $L_{\text{IPC}}$ 种调制方式, $C_{\text{IPC},n}^0$ 与 $C_{\text{IPC},m}^j$ 分别为脉冲 $P_n^{(0)}$ 与 $P_m^{(j)}$ 的脉内特征,其距离的定义为

$$d_{mn}^{(j0)} C_{\text{IPC}} = \begin{cases} 0, & C_{\text{IPC},m}^j = C_{\text{IPC},n}^0 \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

判断两个脉冲是否匹配,包含两个层次的意义,即时间匹配和多参数匹配,只有时间匹配的两个脉冲才可以判断多参数是否匹配,具体步骤如下所述。

1) 判断两个脉冲是否时间匹配。在全脉冲数据移位进行循环相关时,移位后的脉冲会形成时间窗,然后寻找原数据中落在移位脉冲数据中时间窗内的脉

冲。移位的脉冲数据形成的时间窗如图1所示。设全脉冲数据共有 $L_j$ 个脉冲,全脉冲移位位数为 $l$ ,其中,第 $m$ 个脉冲相对于第1个脉冲的到达时间为 $T_m^0$ ,其时间间隔容差取值为 $\Delta T_m^0$ ,则第 $m$ 个脉冲形成的时间窗为 $[T_m^0 - \Delta T_m^0, T_m^0 + \Delta T_m^0]$ 。

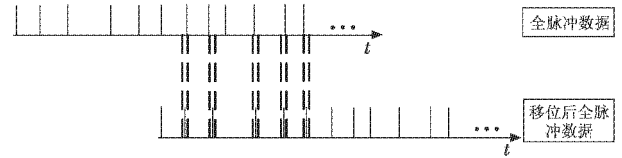


图1 时间窗形成示意图

Fig. 1 Sketch map of the formation of time window

此时,未移位全脉冲数据中第 $n$ 个脉冲相对于第 $l+1$ 个脉冲的到达时间为 $T_n^0$ ,若满足条件

$$T_m^0 - \Delta T_m^0 \leq T_n^0 \leq T_m^0 + \Delta T_m^0, m = 1, 2, \dots, L_j \quad (6)$$

则认为,未移位全脉冲数据中的第 $n$ 个脉冲落在移位后脉冲数据的第 $m$ 个脉冲时间窗内,即两个脉冲时间上匹配,这里简称为对准;若移位后全脉冲数据中的第 $m$ 个脉冲与未移位全脉冲数据中的第 $n$ 个脉冲时间上匹配,则进行步骤2)。若时间上不匹配,则将分选标识字函数置为0,继续判断后续脉冲是否时间匹配。

2) 判断两个脉冲是否多参数匹配。对于时间上对准的两个脉冲,它们之间的多参数加权距离算式为

$$d_{mn}^{j0} = W_{\text{RF}} \cdot d_{mn}^{j0}(f) + W_{\text{PW}} \cdot d_{mn}^{j0}(\tau) + W_{\text{IPC}} \cdot d_{mn}^{j0}(C_{\text{IPC}}) + W_{\text{DTOA}} \cdot d_{mn}^{j0}(T_{\text{DTOA}}) \quad (7)$$

式中, $W_{\text{RF}}$ 、 $W_{\text{PW}}$ 、 $W_{\text{IPC}}$ 和 $W_{\text{DTOA}}$ 分别为脉冲频率、脉宽、脉内特征和相对时间间隔的权重系数,且满足 $W_{\text{RF}} + W_{\text{PW}} + W_{\text{IPC}} + W_{\text{DTOA}} = 1$ 。 $d_{mn}^{j0}(\cdot)$ 表示两特征参数的距离。

若这两个脉冲距离满足 $d_{mn}^{j0} \leq d_{\text{threshold}}$  ( $d_{\text{threshold}}$ 为设定的阈值),即认为全脉冲数据中这两个脉冲匹配,式(8)中分选标识字函数置为1。

采用上述定义时,当脉冲列向右滑动一个骨架周期后再与原脉冲列进行相关匹配,所得的匹配脉冲数会出现一个峰值,这个骨架周期就是所要提取的脉冲样本图。图2所示为重频三参差脉冲信号脉冲列进行循环自相关匹配的示意图。

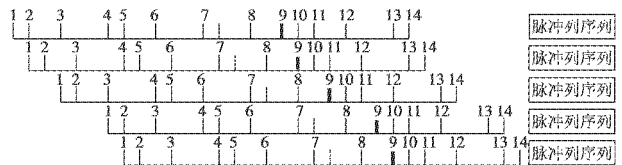


图2 脉冲列相关匹配示意图

Fig. 2 The pulse sequence correlation matching

图2中,虚线所示为在雷达截获过程中丢失的脉冲。9号脉冲位置的移动清晰地描述出脉冲列移位的过程。由图2可以看出,对于重频三参差信号,当脉冲

串向右移位 3 个脉冲以后,匹配脉冲数会达到一个峰值,此时即可提取骨架周期,即脉冲样本图。

综上所述,可以得到根据全脉冲数据提取样本图的方案,算法流程如图 3 所示。

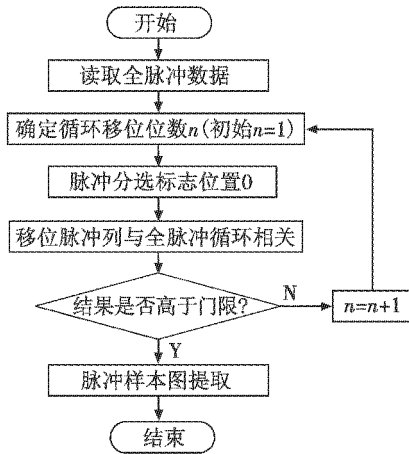


图 3 根据全脉冲数据提取脉冲样本图流程

Fig.3 The process of distilling the PSP based on the overall pulse data

根据全脉冲数据提取脉冲样本图的具体步骤如下:1) 读取全脉冲数据;2) 确定循环移位位数  $n$ ;3) 所有未匹配脉冲的分选标识字函数置为 0;4) 循环相关处理,将全脉冲与循环移位的脉冲列进行循环相关,匹配的脉冲分选标识字函数置为 1;5) 相关结果确认,若循环相关值大于门限,则移位的  $n$  个脉冲包含脉冲样本图;6) 样本图提取,根据移位的  $n$  个脉冲与全脉冲匹配的情况,提取脉冲样本图。

### 1.2 基于自提取脉冲样本图的匹配识别算法

由 1.1 节所提出的脉冲样本图自提取方法,可以将全脉冲数据中所含有的某辐射源的脉冲样本图提取出来,利用自提取样本图可以实现信号的匹配识别,其基本原理与脉冲样本图自提取技术原理一致,采用的也是循环相关原理。具体步骤如下。

1) 判断自提取样本图和知识库中的已知脉冲样本图的骨架周期是否相同。只有两个样本图的骨架周期匹配时,两个雷达才有可能为同一雷达辐射源,继而再进行多参数匹配。方法是将已知样本图扩展为其长度的两倍,当自提取样本图的骨架周期等于已知样本图骨架周期容差范围或者其两倍骨架周期容差范围时,认为骨架周期匹配成功,转入步骤 2); 否则,用自提取样本图与下一个已知样本图进行匹配。

2) 寻找自提取样本图和已知样本图的首个匹配脉冲。即以自提取样本图  $S_0$  (含有  $L_0$  个脉冲) 第 1 个脉冲为基准脉冲,对已知样本图步进为一个脉冲进行搜索,直到  $\frac{L_j}{2}$  个脉冲处,将满足式(8)即脉冲间距离小于

门限值( $d_{\text{threshold}}$ )的第 1 个脉冲作为首个匹配脉冲,记录位置  $q_1$ ,并计算单个脉冲匹配度  $p_1$ ,根据实际中接收机的参数测量精度情况,可以假设载频匹配度为  $p_{\text{RF}} = 0.4$ ,重频匹配度为  $p_{\text{PRI}} = 0.4$ ,脉宽匹配度为  $p_{\text{PW}} = 0.2$ ,而脉内特征参数的匹配度一般不予考虑。则单个脉冲匹配度的计算公式为  $p_i = p_{\text{RF}} + p_{\text{PRI}} + p_{\text{PW}}, i = 1, 2, \dots, L_0$ 。转入步骤 3)。定义脉冲间的距离

$$d_{11}^0 = W_{\text{RF}} \cdot d_{11}^0(f) + W_{\text{PW}} \cdot d_{11}^0(\tau) + W_{\text{IPC}} \cdot d_{11}^0(C_{\text{IPC}}) \quad (8)$$

式中,  $d_{11}^0(\cdot)$  表示两者特征参数的距离。

3) 计算自提取样本图和已知样本图的总体匹配度。首先判断已知样本图和自提取样本图的脉冲是否时间对准:若时间对准,则给定该脉冲重频参数的匹配度为 0.4。假定自提取样本图中要匹配的脉冲次序为  $i(i = 2, 3, \dots, L_0)$ ,用已知样本图第  $q_{i-1} + 1$  个脉冲与其进行匹配,判断时间是否对准:若对准,再进行载频参数和脉宽参数匹配,并计算两个参数的匹配度;否则已知样本图脉冲后移一位,继续匹配,以此类推直到搜索到与自提取样本图第  $i$  个脉冲匹配的脉冲,计算匹配脉冲的匹配度  $p_i$ ,并假设已知样本图匹配脉冲位置为  $q_i$ 。若搜索到已知样本图的第  $L_j - i$  个脉冲处,仍未与自提取样本图第  $i$  个脉冲匹配上,令  $p_i = 0, q_i = q_{i-1}, i = i + 1$ ,转向 3) 继续匹配,直至  $i = L_0$  结束,将各脉冲的匹配度  $p_i$  相加求和,得到自提取样本图和已知样本图的总体匹配度。

4) 决策。设自提取样本图和已知样本图的总匹配度为  $P_{\text{Di}}, i = 1, 2, \dots$ ,则自提取样本图和已知样本图的匹配度为  $P_{\text{PDi}} = P_{\text{Di}}/L_0, i = 1, 2, \dots$ ,若匹配度  $P_{\text{PDi}}$  大于设定的门限值,则待识别的雷达辐射源为第  $i$  个已知样本图对应的雷达辐射源。其算法流程如图 4 所示。

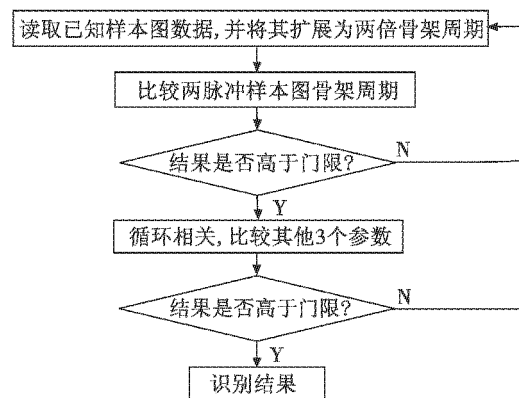


图 4 基于自提取样本图匹配识别流程图

Fig.4 The process of the matching recognition based on self-distilled PSP

根据自提取样本图识别雷达辐射源的具体步骤如下:1) 读取已知样本图数据,并将其骨架周期扩展为两倍周期;2) 比较自提取样本图和扩展后的已知样本图

的骨架周期,判断是否在容差范围之内;3) 根据循环相关原理,比较自提取样本图和已知样本图的载频、脉宽、脉内特征3个参数是否在容差范围以内,算出样本图的总体匹配度;4) 决策,若匹配度大于门限,则识别结果。

## 2 仿真实验与结果分析

为了验证上述方法的有效性和具体的识别效果,本文从相关数据库中选取了5部雷达进行仿真验证,具体参数如表1所示。

表1 雷达信号参数表

Table 1 Table of radar signal parameters

雷达编号	重频特征	重复间隔/ $\mu\text{s}$	频率特征	频率/MHz	脉宽特征	脉宽/ $\mu\text{s}$
I	参差	1200/1800	固定	1295	可选择	12~17
II	固定	1182	捷变	1010~1050	可选择	50~55
III	参差	1600/1497	固定	1340	固定	3.9
IV	抖动	1067~1100	固定	1150	固定	27
V	固定	725	捷变	1100~1160	可选择	55~60

利用上述雷达信号参数对雷达信号进行仿真,仿真产生的雷达信号在时域上相互叠加。假设这些雷达辐射源已处于侦察天线的测向分辨率内,产生的方位信息极为接近或相同,无法利用DOA参数对脉冲流进行预分选,同时由于设置的频率参数较为接近,无法继续进行频率稀释。利用自提取脉冲样本图技术对全脉冲数据进行样本图提取,并基于提取的样本图对信号进行样本图匹配识别。噪声引起的参数测量误差标准差为已知参数数值的10%,进行50次蒙特卡罗实验,截获时间为 $T_{\text{int}}=0.1\text{ s}$ 。

实验首先对噪声环境下脉冲样本图自提取的成功率进行了仿真分析。在仿真中,设定当匹配脉冲数目大于该截获脉冲流中该雷达信号脉冲数量的70%时,判定为脉冲样本图提取成功。每种信噪比的情况进行100次蒙特卡罗实验,将成功次数与实验次数的比值定义为提取的成功率。脉冲样本图提取的成功率与信噪比的关系如图5所示。此处将信噪比转化为每个参数数值的测量误差来进行计算。

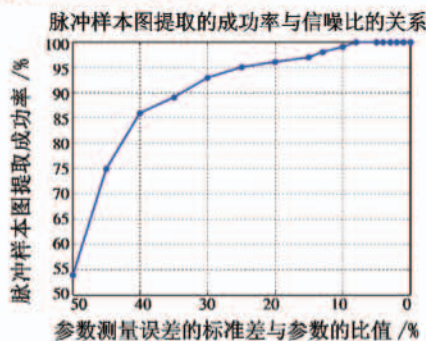


图5 测量误差与脉冲样本图提取成功率之间的关系曲线  
Fig.5 The success rate of PSP distilling vs the measurement error

由图5可以看出,当噪声引起的参数测量误差标准差为已知参数数值的10%时,脉冲样本图的提取成功率为99%,可以认为脉冲样本图必定可以从全脉冲数据中提取出来。利用本文方法对雷达辐射源识别结果如表2所示。

表2 基于自提取脉冲样本图的雷达辐射源结果  
Table 2 The result of the method based on self-distilled PSP for radar emitter recognition

平均识别率/%	雷达编号				
	I	II	III	IV	V
	97.2	92	98.1	90.3	93

实验结果表明,在噪声引起的参数测量误差标准差为已知参数数值的10%时,算法仍然有较高的自提取样本图成功率。通过识别结果可以看出,利用自提取样本图进行辐射源识别时,有着较高的识别率,说明本文的方法是有效的。

## 3 结束语

从以上仿真实验可以看出,基于自提取样本图的识别算法具有较高的自提取样本图正确率和较高的识别率,这证明了本文方法的合理性和可行性。另一方面,本文的算法在工程上应用较为方便,实时性较强,不用对全脉冲数据进行分选和特征提取,识别处理过程时间较短。因此,在脉冲数据量较大,实时性要求较高时,本文的算法是有效的。

## 参考文献

- [1] 龚亮亮,罗景青,吴世龙.一种基于模板脉冲序列的雷达辐射源识别方法[J].现代防御技术,2008,36(5):131-134.
- [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.
- [3] 丁均,刘志成.基于特征参数匹配的雷达辐射源识别方法研究[J].现代雷达,2011,33(9):29-33.
- [4] REN M, DUAN J, YANG S. Decision models evaluation using fuzzy pattern recognition [C]//Proceedings IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services (GSIS 2007), Nanjing, China, November, 2007:1035-1039.
- [5] 关欣,何友,衣晓.一种新的雷达辐射源识别算法[J].宇航学报,2005,26(5):612-615.
- [6] 刘海军,王博,柳征,等.基于联合参数建模的辐射源识别方法[J].宇航学报,2011,32(1):142-149.
- [7] 罗景青,王杰贵.探讨一种新的雷达信号描述方式和

(下转第87页)

- (12):3265-3269.
- [4] 陈明,龙连春,刘世炳,等. 激光辐照与拉伸预应力作用下复合材料试件的破坏研究[J]. 应用力学学报, 2010,27(2):412-417.
- [5] SHIMOKAWA T, KAKUTA Y, SAEKI D. Carbon plain-weave fabric low-temperature vacuum cure epoxy composite; Static and fatigue strength at room and high temperatures and practicality evaluation[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41(18):245-265.
- [6] CHEN Yanbei, LU Jian, NI Xiaowu, et al. Plastic penetration during laser heating of a metal plate[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205:9-15.
- [7] 冯云松,李晓霞. 基于 ANSYS 的脉冲激光辐照石英玻璃的温度场数值模拟[J]. 物理实验, 2012, 32(2):35-38.
- [8] 贺鹏飞,钱江佐. 激光作用下复合材料损伤的数值模拟[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012, 40(7):1046-1050.
- [9] 李大为. 强激光对低慢小目标的热损伤效应研究[D]. 西安:空军工程大学, 2012.
- (上接第 45 页)
- object tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5):564-575.
- [2] 左军毅,梁彦,赵春晖,等. Mean Shift 跟踪算法中尺度自适应策略的研究[J]. 中国图象图形学报, 2008, 9(13):1750-1757.
- [3] COLLINS R T. Mean Shift blob tracking through scale space [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Madison, Wisconsin, USA, 2003:234-240.
- [4] 彭宁嵩,杨杰,刘志,等. Mean-Shift 跟踪算法中核函数窗宽的自动选取[J]. 软件学报, 2005, 16(9):1542-1550.
- [5] 林庆,陈远祥,王士同,等. 目标窗口尺寸自适应变化的 Mean-Shift 跟踪算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(12):3329-3332.
- [6] 蒋蔚. 粒子滤波改进算法研究与应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [7] 田刚. 基于多特征融合的 Mean Shift 目标跟踪技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2011.
- [8] 赵高鹏,薄煜明. 基于自适应选择的金字塔均值漂移跟踪方法[J]. 光子学报, 2011, 40(1):154-160.
- [9] YANG Changjiang, RAMANI D, LARRY D. Efficient Mean-Shift tracking via a new similarity measure [C]//Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC, USA, 2005:176-183.
- [10] 林卉,梁亮,杜培军,等. 利用 Fourier-Mellin 变换的遥感图像自动配准[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2012, 37(6):649-652.
- [11] 韩日升. 基于核的变尺度视频目标跟踪算法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- (上接第 76 页)
- 识别技术[J]. 电子对抗, 2009(6):9-12.
- [8] 龚亮亮,罗景青. 一种基于脉冲样本图的雷达信号特征表述方式[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(2):83-85.
- [9] 邝平昌. 某系统雷达对抗侦察信号处理新技术研究[D]. 合肥:电子工程学院, 2010.
- [10] 孟祥豪. 基于脉冲样本图的雷达信号分选技术研究[D]. 合肥:电子工程学院, 2011.

欢迎投稿 <http://www.dgykz.com>