

## 基于复杂度特征的未知雷达辐射源信号分选

韩俊<sup>①</sup> 何明浩<sup>②</sup> 朱振波<sup>①</sup> 王杰<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(空军雷达学院信息对抗系 武汉 430019)

<sup>②</sup>(空军雷达学院训练部 武汉 430019)

<sup>③</sup>(电子对抗国防科技重点实验室 成都 610036)

**摘要:** 当前的未知雷达辐射源信号分选方法存在准确率不高和对噪声敏感的问题。该本文应用复杂度特征实现了低信噪比下未知复杂雷达信号的高准确率分选。首先,对接收到的信号进行预处理,然后提取其复杂度特征中的盒维数和稀疏性,并将两者作为分选的特征参数,最后基于 KFCM 算法实现未知雷达辐射源信号的分选。由仿真结果分析可知,预处理后的信号序列的盒维数和稀疏性分离度高且受噪声的影响小,分选结果令人满意,在信噪比为 5 dB 时,不同调制类型信号间的分选准确率最低为 87%。

**关键词:** 雷达信号分选;复杂度;盒维数;信噪比

中图分类号: TN971

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)11-2552-05

## Sorting Unknown Radar Emitter Signal Based on the Complexity Characteristics

Han Jun<sup>①</sup> He Ming-hao<sup>②</sup> Zhu Zhen-bo<sup>①</sup> Wang Jie<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Department of Information Countermeasures, AFRA, Wuhan 430019, China)

<sup>②</sup>(Division of Training, AFRA, Wuhan 430019, China)

<sup>③</sup>(National Electronic Warfare Laboratory, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** Radar emitter sorting rate of current methods is not high and they are sensitive to the Signal Noise Ratio (SNR). In this paper, complexity characteristics are applied to sorting unknown complicated radar signal and a high sorting rate is got. The received signal is pretreatment firstly, then the box dimension and sparseness are extracted and they are used as sorting characteristics. Finally, the sorting is completed by KFCM algorithm. By simulation results, the box dimension and sparseness of pretreatment signal sequence are distinguishable and they are not sensitive to SNR, and the lowest sorting rate of different signal is 87% at SNR=5 dB.

**Key words:** Radar signal sorting; Complexity; Box dimension; SNR

### 1 引言

未知雷达辐射源信号分选是电子战系统的关键技术之一,是指从截获到的密集雷达脉冲流中分选出属于不同辐射源的脉冲。随着新型复杂体制雷达所占的比例越来越大,雷达辐射源信号分选在电子战中扮演的角色愈来愈重要,所需解决的问题也愈来愈多。当前的雷达辐射源信号分选算法主要是基于分析截获信号的各种常规参数,如到达时间、到达角、载频、脉宽等。其中,利用到达时间分选(即 PRI 分选)是较为常用的一种分选方法。PRI 分选算法有很多种,典型的如序列差直方图、PRI 变换以及改进的 PRI 变换算法<sup>[1,2]</sup>等。但这些算法都存在一定的缺陷,难以适用于当前复杂的电磁环境。文献[3]综合利用到达角、载频、脉宽、脉幅 4 个常规参

数能准确实现对常规雷达辐射源信号的分选,但当信号的载频、脉宽等参数多变、快变时,该方法的分选准确率将大大降低。

脉内特征是雷达辐射源信号最具特色的参数之一,虽然当前一些雷达辐射源信号的常规参数变化丰富,但其脉内特征参数却具有一定的稳定性。目前已有不少学者将熵值、相像系数、小波包变换等脉内特征参数应用到雷达辐射源信号的分选识别之中,取得了一定的成效<sup>[4-6]</sup>,但普遍存在的问题是此类脉内特征参数对噪声较为敏感,且可适用的信号类型有限,难以满足当前战场中的未知复杂雷达信号。复杂度特征也是信号的脉内特征之一,文献[7]将复杂度特征中的盒维数应用到通信信号的识别之中,取得了较高的准确率,但是直接从时域波形上提取信号的盒维数受噪声的影响较大,并且盒维数只能反应信号序列的几何尺度信息,若要全面地

反映信号序列的复杂度, 还需要其分布稀疏特性。针对上述问题, 本文提出一种新的分选算法。对接收到的未知雷达辐射源信号首先转换到频域, 能量归一化后进行去噪预处理, 然后提取盒维数反映信号序列的几何尺度信息。为进一步表征该信号序列的分布稀疏特性, 将稀疏性<sup>[8,9]</sup>引用到雷达辐射源信号的处理之中, 并推导相关门限以求取稀疏性。获得信号序列的盒维数和稀疏性后, 将两者作为分选的特征参数, 最后基于 KFCM<sup>[10]</sup>算法实现分选。通过对 8 类未知的复杂雷达信号进行仿真试验, 验证了本文方法的优良性能。

## 2 信号的预处理

在当前的复杂电磁环境中, 直接从信号的时域波形提取其复杂度特征, 易受噪声的影响。把截获的辐射源信号变换到频域, 噪声能量在频域中均匀分布在整个频带上, 而雷达辐射源信号的能量主要集中在有效带宽范围内, 对于脉冲信号的能量谱而言, 在有效带宽内的噪声能量会远远小于噪声的总能量, 而有用信号集中在有效带宽内的能量占信号总能量的绝大部分。这样, 接收到的信号经过频域变换后信噪比将得到提高。

假设信噪比为  $SNR_0$  时, 为了分析方便, 设有效带宽内的噪声能量大约为噪声总能量的 10%, 有用信号集中在有效带内的能量大约为总能量的 90%, 这样, 信号经频域变换后的信噪比  $SNR = 10\lg(0.9/0.1) + SNR_0$ , 则提高的信噪比大小为  $10\lg(0.9/0.1)$  dB。显然, 信号频域的复杂度特征参数受噪声的影响要小于时域的复杂度特征参数。在 0 dB, 5 dB, 10 dB, 15 dB 和 20 dB 时, 分别提取单载频信号在时域和频域的盒维数和稀疏性, 单载频信号的载频为 30 MHz, 脉宽为 10  $\mu$ s。图 1 中 1 和 2 分别表示从频域和时域提取的盒维数, 3 和 4 分别表示从频域和时域提取的稀疏性, 由图可知, 在频域提取的复杂度特征参数的稳定性能优于时域提取的复杂度特征参数。因此, 本文首先将截获到的雷达辐射源信号进行 FFT 变换处理, 得到频域信号序列, 并对其进行能量的归一化及去噪预处理, 然后基于此频域信号序列进行复杂度特征的提取, 得到盒维数和稀疏性两个分选参数。

假设接收到的雷达辐射源信号经过频域转换以及能量归一化后为  $\{x(i), i = 1, 2, \dots, N\}$ , 由于有用信号的能量集中在较窄的频带范围内, 而噪声的能量则均匀分布在整个频带上(文中噪声均为高斯噪声), 所以可按式(1)对信号序列  $x(i)$  进行去噪处理<sup>[11]</sup>。假设去噪后的信号序列为  $f(i)$ , 则

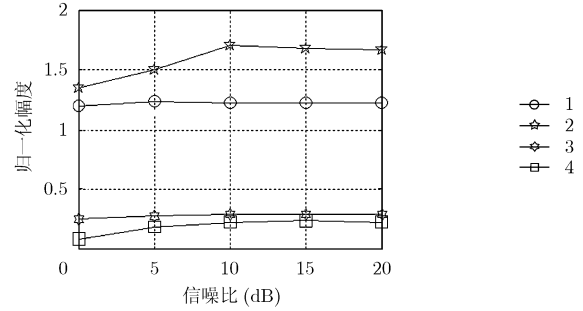


图 1 时域、频域的复杂度特征参数

$$f(i) = \begin{cases} x(i) - \eta, & x(i) > \eta \\ 0, & x(i) \leq \eta \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中  $\eta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)$ 。以一开始频率为 30 MHz, 带宽为 5 MHz 的线性调频信号为例, 信噪比为 10 dB 时, 去噪前后的频谱图分别如图 2(a), 图 2(b)所示, 由图 2 可知去噪效果明显, 分布在频带上的噪声基本被有效抑制, 这将有利于复杂度特征的提取。

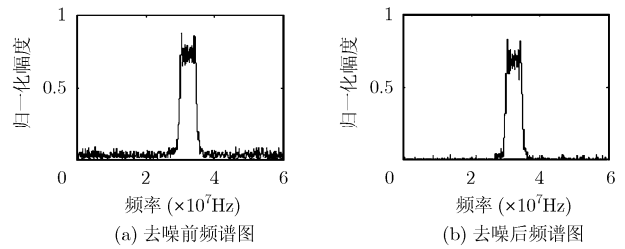


图 2 去噪前后的频谱图

## 3 复杂度特征的提取

### 3.1 盒维数的提取

不同类型的雷达辐射源信号预处理后的信号序列  $f(i)$  具有不同的复杂度特征, 分形特性便是其中之一, 对  $f(i)$  进行分形能定量描述其复杂性和不规则性。盒维数是分形理论中的一种重要参数, 通过盒维数可以准确刻画该信号序列的几何尺度情况<sup>[7]</sup>, 由于其计算简单、便于工程实现, 所以本文选择其表征信号序列的几何尺度信息。

设  $(F, d)$  是一个度量空间,  $\varepsilon$  是一个非负实数, 令  $B(f, \varepsilon)$  表示一个中心在  $f$ , 半径是  $\varepsilon$  的闭球。设  $A$  是  $F$  中的一个非空子集, 对于每个正数  $\varepsilon$ , 令  $M(A, \varepsilon)$  表示覆盖  $A$  的最小闭球的数目, 闭球的半径为  $\varepsilon$ , 即

$$M(A, \varepsilon) = \left\{ N : A \subset \bigcup_{i=1}^N B(f_i, \varepsilon) \right\} \quad (2)$$

式中  $f_1, f_2, \dots, f_N$  是  $F$  的不同的点。

再设  $A$  是一个紧集, 并且是非负的实数, 若存

在

$$D_f = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln M(A, \varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (3)$$

则称  $D_f$  是集合  $A$  的分形维数, 即为  $D_f = D_f(A)$ , 并称  $A$  具有分形维数  $D_f$ , 这种维数称为盒维数。

对于预处理后的信号序列  $f(i)$  的盒维数  $D_f$  按如下公式计算

$$d(\Delta) = \sum_{i=1}^N |f(i) - f(i+1)| \quad (4)$$

$$d(2\Delta) = \sum_{i=1}^{N/2} (\max\{f(2i-1), f(2i), f(2i+1)\} - \min\{f(2i-1), f(2i), f(2i+1)\}) \quad (5)$$

$$D_f = 1 + \log_2^{d(\Delta)/d(2\Delta)} \quad (6)$$

### 3.2 稀疏性的提取

盒维数仅反映了预处理后的信号序列  $f(i)$  的几何尺度信息, 若要全面的反映  $f(i)$  的复杂度特性, 还需要该序列的分布稀疏特性。稀疏性在图像、电力、声学/语音等领域有着广泛的应用<sup>[8,9]</sup>, 本文将其引用到未知复杂雷达信号的分类之中。

设  $G_N = \{g_1, g_2, \dots, g_N\}$  为一维(0,1)空间中的一个序列, 该序列中包含  $M$  个“1”元素。为了能够描述在序列  $G_N$  中不同位置处的疏密特性, 构造一长度为  $N_0$  的窗函数, 使其在序列  $G_N$  上由左至右滑动, 第  $i$  个窗口内包含的“1”元素为  $M_i$  个, 则该窗口内的稀疏性可定义为  $D_i$

$$D_i = \left| \frac{M_i}{M} - \frac{i}{[N/N_0]} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, [N/N_0] \quad (7)$$

定义  $\mu$  为序列  $G_N$  的平均稀疏性

$$\mu = \frac{1}{[N/N_0]} \sum_{i=1}^{[N/N_0]} D_i, \quad i = 1, 2, \dots, [N/N_0] \quad (8)$$

平均稀疏性反映了序列  $G_N$  中“1”元素的整体稀疏性。

由于预处理后的信号序列  $f(i)$  并非一维(0,1)空间中的序列。所以需对其按式(9)进行 0-1 处理

$$g_i = \begin{cases} 1, & f(i) \geq \eta \\ 0, & f(i) < \eta \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$f(i)$  进行 0-1 处理后得到  $g_i$ ,  $g_i$  便为一维(0,1)空间中的一个序列。观察式(9)可知门限  $\eta$  的取值至关重要, 本文从信息论的角度出发, 推导了  $\eta$  的取值准则。

令  $H(f)$  为  $f(i)$  的信息熵,  $H(g)$  为  $g_i$  的信息熵, 由信息论可知由于 0-1 处理后信息会有部分损失, 所以  $H(f) \geq H(g)$ , 损失的信息  $\Delta H(f, \eta) = H(f) - H(g)$ 。若要最大限度地保留  $f(i)$  的信息, 则要求  $\Delta H(f, \eta)$  最小。由于  $\Delta H(f, \eta)$  是关于  $\eta$  的凹曲线, 则

$\eta$  有最优解时需满足式(10)

$$\frac{\partial \Delta H(f, \eta)}{\partial \eta} = \frac{\partial [H(f) - H(g)]}{\partial \eta} = 0 \quad (10)$$

又  $H(g)$  是关于  $\eta$  的凸曲线, 由式(10)可得到式(11)

$$\frac{\partial H(g)}{\partial \eta} = 0 \quad (11)$$

式(11)是使  $H(g)$  最大的条件, 若直接用  $\eta$  对式(11)求解不易。可令  $P_\eta(0)$  为  $g_i$  中“0”元素的比例,  $P_\eta(1)$  为“1”元素的比例, 则  $H(g)$  可由信息熵的定义得到

$$H(g) = - \sum_{i=0,1} p_\eta(i) \cdot \log p_\eta(i) \quad (12)$$

$$P_\eta(0) + P_\eta(1) = 1 \quad (13)$$

门限  $\eta$  的变化将导致  $P_\eta(0)$  与  $P_\eta(1)$  的变化, 故可采用变量  $P_\eta(0)$  或  $P_\eta(1)$  对式(11)求解

$$\frac{\partial H(g)}{\partial p_\eta(0)} = \frac{\partial \left[ - \sum_{i=0,1} p_\eta(i) \cdot \lg p_\eta(i) \right]}{\partial p_\eta(0)} = 0 \quad (14)$$

联合式(13), 式(14)可解得

$$P_\eta(0) = P_\eta(1) = 1/2 \quad (15)$$

由式(15)可知, 当  $g_i$  中的“0”, “1”元素所占比例相等时, 损失的信息  $\Delta H(f, \eta)$  最小。将信号序列  $g_i$  按大小重新排列, 得到  $g'_i = \{g'_1, g'_2, \dots, g'_N\}$ , 则易知门限  $\eta$  为

$$\eta = \begin{cases} g'_{(N+1)/2}, & N \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{2}(g'_{N/2} + g'_{(N+1)/2}), & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (16)$$

确定门限  $\eta$  后, 对于信号序列  $f(i)$ , 首先按式(9)将其转化为  $g_i$ , 然后依据式(7), 式(8)求取平均稀疏偏差  $\mu$ 。

## 4 分选流程

综合上文的分析, 对于接收到的未知雷达辐射源信号按如下步骤进行处理, 以达到分选目的。

步骤 1 对雷达辐射源信号序列进行频域的转化以及能量的归一化, 并按式(1)进行去噪预处理;

步骤 2 分别按式(6)和式(8)求取预处理后信号序列的盒维数  $D_f$  和稀疏性  $\mu$ ;

步骤 3 将  $D_f$  和  $\mu$  作为分选的特征参数, 基于 KFCM 算法完成最终的分选。

## 5 仿真试验

### 5.1 仿真条件

仿真 8 类雷达辐射源信号, 分别为 CW, LFM, FSK, BPSK, QPSK, LFM-BPSK, FSK-BPSK



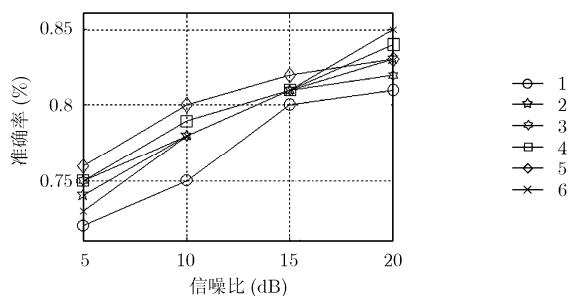


图4 不同信噪比下的分选准确率

射源信号分选方法有效可行。当信噪比为 5 dB 时, 对不同调制类型信号间的分选准确率最高可达到 100%; 对同种调制类型、不同调制参数的雷达辐射源信号的分选准确率虽然整体有所降低, 但仍然令人满意。在实际战场环境中, 对接收信号进行分选预处理后, 雷达辐射源的个数会大大降低, 运用本文方法也将会获得更高的分选准确率。

## 6 结束语

针对当前雷达辐射源信号分选中存在的一些问题, 本文提出一种新的分选方法。对接收到的雷达辐射源信号预处理后提取其复杂度特征, 即盒维数和稀疏性, 该特征参数具有良好的抗噪性能和可分性, 克服了当前分选算法的缺点。通过仿真试验, 证明新方法有效可行, 具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] Nelson D J. Special purpose correlation functions for Improved signal detection and parameter estimation[C]. ICASSP, Minneapolis, USA, 1993, 4: 73-76.
- [2] Nishiguchi K and Kobayashi M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 407-421.
- [3] 郭杰, 陈军文. 一种处理未知雷达信号的聚类分选方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(6): 853-856.  
Guo Jie and Chen Jun-wen. Clustering approach for deinterleaving unknown radar signals[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(6): 853-856.
- [4] Zhang Ge-xiang, Rong Hai-na, Hu Lai-zhao, and Jin Wei-dong. Entropy feature extraction approach of radar emitter signals [C]. Proceedings of International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation, Chengdu, China, 2004: 621-625.
- [5] 普运伟, 金炜东, 朱明, 胡来招. 雷达辐射源信号模糊函数主脊切面特征提取方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(2): 133-137.  
Pu Yun-wei, Jin Wei-dong, Zhu Ming, and Hu Lai-zhao. Extracting the main ridge slice characteristics of ambiguity function for radar emitter signals[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(2): 133-137.
- [6] Han Jun, He Ming-hao, Mao Yan, and Ren Ming-qiu. A new method for recognizing radar radiating-source [C]. ICWAPR, Beijing, China, 2007, 4: 1665-1668.
- [7] 吕铁军, 郭双冰, 肖先赐. 基于复杂度特征的通信信号识别[J]. *通信学报*, 2002, 23(1): 111-115.  
Lu tie-jun, Guo Shuang-bing, and Xiao Xian-ci. Modulation signals recognition based on the complexity measure[J]. *Journal on Communications*, 2002, 23(1): 111-115.
- [8] Yang Jian-chao, Wright J, Huang T, and Ma Yi. Image super-resolution as sparse representation of raw image patches[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, AK, USA, 2008: 1-8.
- [9] 何昭水, 谢胜利, 傅予力. 信号的稀疏性分析[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(9): 1167-1173.  
He Zhao-shui, Xie Sheng-li, and Fu Yu-li. The analyse of signal sparseness[J]. *Progress in Science*, 2006, 16(9): 1167-1173.
- [10] Wang Li-wei, Zhu Yuan-qing, and Pan Ying-feng. FCM algorithm and index CS for the signal sorting of radiant points[C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Hong Kong, 2007: 4415-4419.
- [11] 张葛祥. 雷达辐射源信号智能识别方法研究[D]. [博士论文], 成都: 西南交通大学, 2005.  
韩俊: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为电子对抗信息处理.  
何明浩: 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理、电磁场与微波技术等.  
朱振波: 男, 1978年生, 博士, 研究方向为信号与信息处理.  
王杰: 男, 1976年生, 高级工程师, 博士, 研究方向为电子侦察信号处理.