

文章编号: 1672-2892(2010)04-0436-05

基于小波变换的雷达辐射源信号特征提取

陈韬伟^{1,3}, 辛明²

(1.云南财经大学 信息学院, 云南 昆明 650221; 2.中国电子集团公司 第29所, 四川 成都 610036;
3.西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

摘要: 在小波多分辨率分析的基础上提出一种对雷达辐射源信号进行脉内特征提取方法, 该方法能够从信号中有效提取定量信息。将小波变换后低频逼近小波系数的能量分布熵, 与经过尺度相关去噪计算后反映信号边缘的高频细节小波系数能量分布熵一起构成雷达辐射源信号的二维特征向量。通过对10种雷达辐射源信号的特征提取和分类仿真实验, 结果表明: 提取的样本特征在低信噪比下具有很好的抗噪性和可聚类性, 证明了本文方法的有效性。

关键词: 雷达辐射源信号; 小波变换; 尺度间相关性去噪

中图分类号: TN97

文献标识码: A

Feature extraction based on wavelet transform for radar emitter signals

CHEN Tao-Wei^{1,3}, XIN Ming²

(1.Information College, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming Yunnan 650221, China;
2.Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu Sichuan 610036, China;
3.School of Information Science&Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: An approach for intra-pulse feature extraction of radar emitter signals was proposed based on the multi-resolution characteristics of wavelet transform. It was efficient to obtain quantitative information from signals. The energy entropy from approximation coefficients of wavelet transform and the other energy entropy from inter-scale correlations denoise of detail coefficients were adopted together as two-dimensional feature vectors. Experiment results demonstrated that the features of ten typical radar emitter signals extracted by wavelet transform showed good performance of noise-resistance and clustering when Signal-Noise Ratio(SNR) was low.

Key words: radar emitter signals; wavelet transform; inter-scale correlations denoise

雷达信号的分选是从截获的交错脉冲信号流中分拣出属于不同辐射源的脉冲信号, 只有从随机交迭的脉冲信号流中分选出各个雷达脉冲序列后才能进行信号参数的测量、分析、识别等处理。由于分选的信号环境密集和信号波形日益复杂, 采用传统的基于脉间5参数(载频、脉冲到达时间、脉冲幅度、脉冲宽度、脉冲到达方向)的分选算法难以获得令人满意的分选效果, 所以多年来雷达辐射源信号分选一直是电子对抗领域中重要而困难的研究课题^[1-5]。近年来, 随着硬件技术的成熟, 数字中频接收机能够保证获取全部的雷达特征信息, 人们开始研究雷达辐射源信号的脉内细微特征, 并提出了多种脉内调制信号的特征提取和分选识别算法^[5-7], 但这些算法只针对少数几种信号进行定性分析, 没有充分考虑信噪比变化对信号特征提取的影响, 因此不能满足当前密集环境下对复杂体制雷达信号的自动分选及识别要求。

由于雷达辐射源信号在频域内分布紧凑, 不同调制类型信号的频谱存在明显且易分辨^[8]的较大差异, 并且频谱中蕴含着脉冲信号的频率、相位和幅值的变化信息, 因此, 如果能够对雷达辐射源信号的频谱进行完善的分析, 脉内调制特征大都可以提取出来。此外, 由于雷达辐射源信号在传播过程中受到各种噪声的干扰, 信噪比变化范围较大, 这就要求提取的脉内特征要尽量选择能表征调制信号类别之间最大差别的模式信息, 同时, 信噪比的变化应该较少造成特征的模糊, 因此, 本文在脉内细微特征研究的基础上提出基于小波变换的雷达辐射源信号频谱特征提取方法, 并分析了在信噪比变化情况下小波变换特征的性能。

1 雷达辐射源信号频谱特征提取

1.1 雷达辐射源信号频谱小波变换

假设侦察机所截获的雷达辐射源信号是离散的时间序列： $\{s(i), i=1, 2, \dots, N\}$ 。 $s(i)$ 经傅里叶变换后，其频谱表示为 $\{f(x), x=1, 2, \dots, N\}$ 。根据多分辨分析理论和 Mallat 算法^[8]，先将雷达辐射源信号的频谱 $f(x)$ 分解成高频 CD_1 和低频 CA_1 两部分，然后只反复分解低频部分，不考虑高频部分，则可实现信号的多分辨分析，其中高频部分称为离散细节系数，低频部分称为离散逼近系数，分解的过程如图1所示。

假设雷达辐射源信号的频谱分解为 j 层，则其频谱可表示为：

$$f(x) = CA_j + \sum_{k=1}^j CD_k \quad (1)$$

式中： CA_j 表示频谱被分解为 j 层的低频逼近部分； CD_k 则表示第 k 层的高频细节部分。

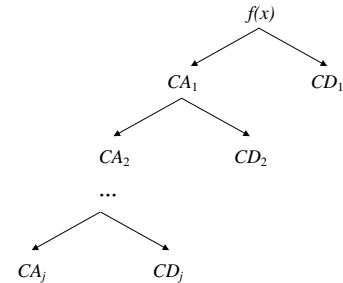


Fig.1 Wavelet decomposition of spectrum $f(x)$ at level j
图1 频谱 $f(x)$ 在 j 层的小波分解

1.2 尺度间相关性去噪过程与特征提取算法

雷达辐射源信号在传播和处理过程中易受到噪声干扰，信噪比变化很大，因此在信噪比未知的情况下，如果提取的特征对噪声敏感，那么信号分选的正确率就难以提高。随着对小波理论研究的不断深入，利用小波变换进行信号去噪算法为不同信噪比下提取稳健的雷达辐射源信号特征提供了保证。到目前为止，人们提出了很多去噪算法，这些算法在对小波系数进行重构时需要预先确定阈值，以除去残留的噪声系数^[9]。而 Xu 等提出的小波相关去噪(Spatially Selective Noise Filter, SSNF)算法是利用信号和噪声在变换域内的相关性的不同来区分系数的类别，从而进行取舍，达到分离噪声的目的^[10]。本文算法是在 Xu 的研究基础上，保留了尺度相关性计算，将计算的相关系数与小波系数进行比较，去除由噪声控制的小波系数，然后再进行特征提取。由于算法中不涉及对小波系数的阈值滤波，所以去噪过程的实现较为简单，符合工程应用。

尺度间相关性去噪是根据信号和噪声在不同尺度上小波变换的不同形态表现，构造出相应的规则，对信号和噪声的小波变换系数进行处理以减小以至剔除由噪声产生的系数，保留有效信号对应的小波系数。SSNF 算法认为：信号经小波变换后，各尺度间相应位置上的变换域系数具有较强的相关性，尤其在信号的边缘附近其相关性更加明显，而高斯白噪声经小波分解后能量则均匀分布于各子带上，仍为白噪声，噪声对应的小波系数在尺度间无明显的相关性。尺度间相关去噪算法的关键在于确定信号的边缘，通过尺度空间上的相关运算使噪声的幅值大为减小，增强信号的边缘信息，更好地刻画原来的信号。

尺度间相关性去噪过程与特征提取算法描述如下：

Step1 雷达辐射源信号预处理：将雷达辐射源信号从时域变换到频域，将信号能量标准化为一恒定值，能量标准化处理的作用是消除辐射源距离远近的影响。由于信号脉内调制方式决定了信号频谱的形状，在频域中进行特征提取可以消除载频变化的影响。预处理后的信号为 $\{f(n), n=1, 2, \dots, N\}$ ，其中 N 为预处理后的信号序列长度。

Step2 小波变换：确定小波变换的尺度 j 以及小波函数 $\psi_{j,k}(\bullet)$ ，将预处理后的信号进行小波变换，得到不同尺度下的细节小波系数： CD_1, CD_2, \dots, CD_j 以及信号低频逼近小波系数 CA_j 。

Step3 尺度间相关性去噪伪代码

for $k=1$ to $j-1$ do

{ $Corr_j(n) = CD_j(n) \cdot CD_{j+1}(n)$ // 计算相邻尺度间的相关系数

$pCorr_j = \sum_n Corr_j(n)^2$; $pCD_j = \sum_n CD_j(n)^2$ // 计算 $Corr_j(n)$ 和 $CD_j(n)$ 的能量

$New\ Corr_j(n) = Corr_j(n) \cdot \sqrt{\frac{pCD_j}{pCorr_j}}$ // 为了使相关系数与小波系数具有可比性，归一化相关系数

for $m=1$ to n

{if $|New\ Corr_j(n)| > |CD_j(n)|$ then $nCD_j(n) = CD_j(n)$

else $nCD_j(n) = 0$

} end if

} end for n

} end for $j-1$

最终,得到一组新的高频小波系数,记为: $CD_1^*, CD_2^*, \dots, CD_{j-1}^*, CD_j^*$, 将相关性计算后的小波系数进行相加,记为:

$$CD_{new} = \sum_{l=1}^{j-1} CD_l^* + CD_j^* \quad (2)$$

Step4 计算能量分布熵:熵作为统计学中衡量随机变量不确定性的一个概念,在本文中用于衡量一个信号能量沿其参数轴发散程度,称为能量分布熵。设离散化信号序列为 $\{W(i), i=1, 2, \dots, M\}$, 令 $\|W\| = \sum_{i=1}^M W(i)^2$, $p_i = W(i)^2 / \|W\|$, 则 W 的归一化能量分布熵定义为:

$$En(W) = -\sum_{i=1}^M p_i \ln p_i / \ln \|W\| \quad (3)$$

按照式(3)分别计算小波变换后的低频小波系数 CA_j 与相关性去噪后的高频小波系数 CD_{new} 的能量分布熵,构成雷达辐射源信号的二维特征向量,记为: $V = [En_1, En_2]$ 。

2 仿真实验

对于一个信号,若能量沿其参数轴均匀分布(即概率相等),则归一化熵值为 1;相反若能量集中在少数采样点处,即只有少数采样点处幅度较大而其余采样点处幅度较小,则能量分布熵较小;因此熵值范围在 0~1 之间,其实质反映了信号的波形特征。

为了更好地说明能量分布熵能够反映信号的调制特征及其抗噪性,选取 BPSK, QPSK 进行特征比较:图 2 显示了雷达辐射源信号 BPSK, QPSK 在 0 dB 下的频谱及小波系数的波形比较。图 3 显示了雷达辐射源信号 BPSK, QPSK 在信噪比为 -20 dB~40 dB 范围的能量分布熵,从图中的分布曲线可以看出,当 $R_{SN} > 15$ dB 时,熵值趋于稳定,虽然在 0 dB~10 dB 范围的熵值比较接近,尤其是 CA_j 序列确定的熵 En_1 ,但图中曲线没有交叉点,说明提取的熵值特征在低信噪比下仍具有良好的可分性。所以,经小波变换尺度相关性去噪而得到的小波系数 CD_{new} 能够反映信号边缘轮廓的细节信息,也可以反映出信号的不同编码方式。

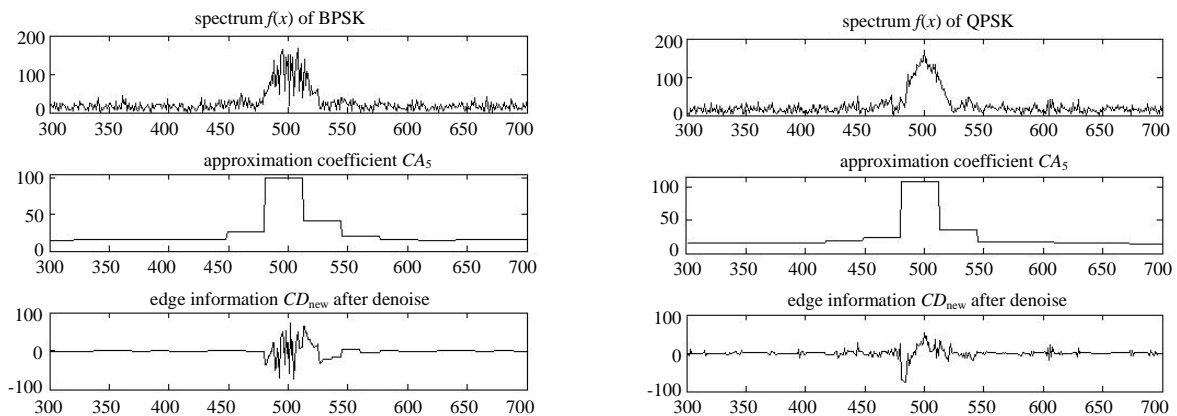


Fig.2 Wavelet coefficients and spectrum of QPSK and BPSK
图 2 雷达辐射源信号 BPSK, QPSK 的频谱及小波系数波形比较

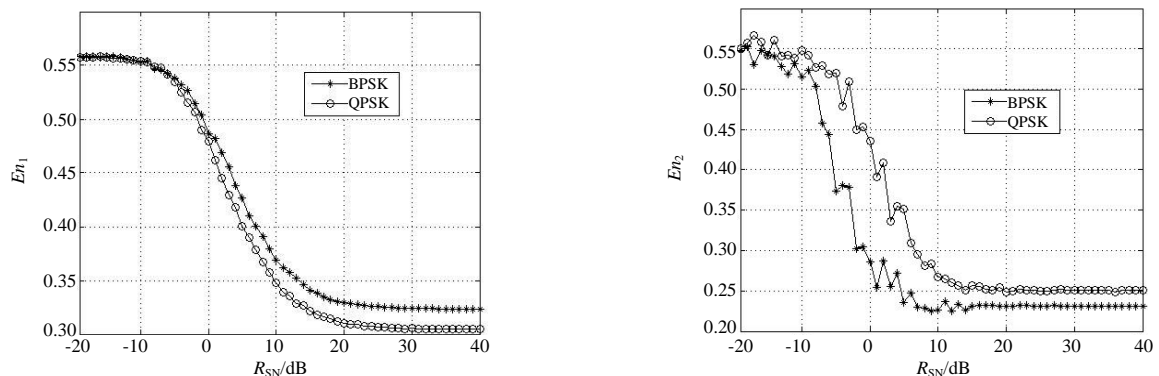


Fig.3 Energy entropy of QPSK and BPSK under different SNR
图 3 雷达辐射源信号 BPSK, QPSK 在不同信噪比下的能量分布熵

本文选择 10 种典型雷达辐射源信号进行仿真实验: 常规雷达辐射源信号、线性调频信号(Linear Frequency Modulated, LFM)(包括 3 种不同频偏参数的 LFM 信号: 30 MHz, 0 MHz 和 10 MHz)、非线性调频信号(Non-Linear Frequency Modulated, NLFM)、二相编码(Binary Phase Shift Keying, BPSK)(包括 2 种不同编码的 BPSK 信号: 13 位 Baker 码和 31 位伪随机码)、四相编码(Quaternary Phase Shift Keying, QPSK)、多相编码(Multiple Phase Shift Keying, MPSK)(QPSK 和 MPSK 选用 Frank 编码方式)和频率编码信号(Frequency Shift Keying, FSK)。信号载频为 50 MHz, 采样频率为 200 MHz, 脉宽为 10 μ s。

对每一种雷达信号在 -5 dB、0 dB 和 5 dB 下分别产生 2 000 个样本, 于是每一种雷达辐射源信号在某一信噪比下共有 200 个样本。在对雷达辐射源信号进行多个小波函数和分解层数反复实验后, 选择了最适合于雷达辐射源信号的 db1 小波函数和分解层数(为 5)。根据 1.2 节中的算法提取辐射源信号的特征向量, 得如图 4 所示由 CA_5 和 CD_{new} 确定的能量分布熵组成的二维联合特征分布图。从图 4(a)可以看出, 10 种雷达辐射源信号的能量分布熵特征在 -5 dB 受噪声的影响较大, 这与图 3 的实验结果相一致。但当 R_{SN} 为 0 dB 时, 除 2 种不同编码的 BPSK 和 QPSK 信号特征有少量交叠(由图 4(b)的局部放大图所示)以及频偏为 30 MHz 和 20 MHz 的 LFM 信号距离较近外, 其余调制信号均有很好的可分性。这说明提取的能量分布熵能够区分具有相同调制而参数不同的雷达辐射源信号。当信噪比提高为 5 dB 时, 分布图中的特征值范围明显集中, 分布的界限更为明显易分, 从图上看似有交叠的特征经局部放大处理后仍可以很好地区分, 并随着信噪比的增大, 信号特征交叠越少。

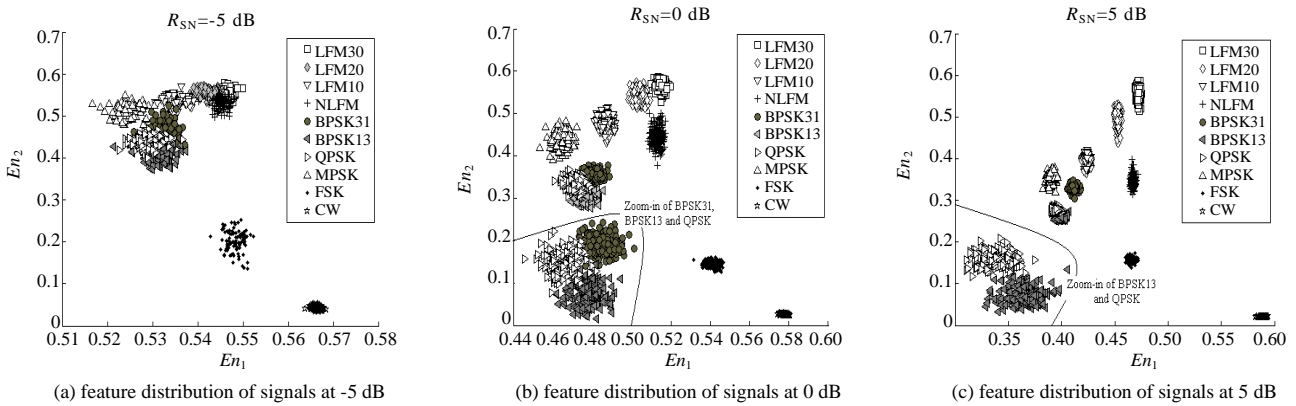


Fig.4 Feature distribution of radar signal under different SNR

图 4 不同信噪比下的特征分布图与局部放大图

从雷达辐射源信号分选识别的观点来看, 本文感兴趣的是能够在不同信噪比范围内挖掘信号的复杂体制特性和它所包含的确定性成分, 而小波分解中的低频逼近小波系数能够很好地反映不同调制信号的特征。同时, 经小波变换尺度相关性去噪后获得的小波系数又能反映出信号中的边缘细节信息(图 3 所示), 如 PSK 信号的不同编码方式, 所以这一特性作为区分相同调制下不同参数辐射源信号的特征是可行的。

为了进一步证实雷达辐射源信号小波变换特征对噪声的不敏感性, 本文采用 FCM 技术对不同信噪比下的特征数据集重复 100 次聚类, 计算得出信噪比为 0 dB, 5 dB 和 10 dB 时总的平均聚类正确率分别为 85.4%, 95% 和 99.6%, 各信号的平均聚类正确率如表 1 所示。从聚类的结果可以看出: 提取的小波变换特征能够在低信噪比下获得较好的聚类准确率。

表 1 重复 100 次的平均聚类正确率

Table1 Average correct rate of 100 repeated experiments

R_{SN}/dB	LFM30	LFM20	LFM10	NLFM	BPSK31	BPSK13	QPSK	MPSK	FSK	CW
0	82%	82%	74%	86%	83%	86%	70%	86%	100%	100%
5	98%	98%	92%	98%	92%	95%	78%	92%	100%	100%
10	100%	100%	100%	100%	98%	98%	98%	100%	100%	100%

3 结论

雷达辐射源信号脉内特征提取是电子对抗中雷达信号分选识别的首要任务, 在信号传播环境受到噪声干扰的情况下, 如何保证提取出的信号特征具有良好的抗噪性能是研究的重点。本文首先对雷达辐射源信号的频谱进行小波变换, 然后利用尺度间相关性滤波算法保留由信号控制的高频小波系数, 最后用能量分布熵刻画不同调制的雷达辐射源信号。通过仿真实验和数据分析, 特征样本集在低信噪比下仍具有良好的可聚类性能。同时, 熵特征很好地反映了信号的细节信息, 能够区分出不同参数相同调制的雷达辐射源信号。

参考文献:

- [1] Wiley R G. Electronic Intelligence[M]. 2nd. Norwood,MA:Artech House, 1993.
- [2] 李合生,韩宇,蔡英武,等. 雷达信号分选关键技术研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2005,27(12):2035-2040.
- [3] Mardia H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. Proc. Inst. Elect. Eng. F, 1989,136(4):149-154.
- [4] 申冰,周群. 基于聚类和 PRI 分选法结合的雷达信号分选方法[J]. 信息与电子工程, 2007,5(4):316-321.
- [5] Kawalec A,Owczarek R. Radar emitter recognition using intra-pulse data[C]// Proceedings of 15th International Conference on Microwaves,Radar and Wireless Communications. Warszawa,Ploard:[s.n.], 2004:435-438.
- [6] 黄知涛,周一宇,姜文利. 基于相对无模糊相位重构的自动内调制特性分析[J]. 通信学报, 2003,24(4):153-160.
- [7] 刘爱霞,赵国庆. 一种新的雷达信号识别方法[J]. 航天电子对抗, 2003,26(1):14-16.
- [8] Mallat S,Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1992,38(2):617-643.
- [9] Donoho D L. De-noise by soft-thresholding[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1995,41(3):613-627.
- [10] Xu Y,Weaver B,Healy D,et al. Wavelet Transform Domain Filters:a Spatially Selective Noise Filtration Technique[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1994,3(6):747-758.

作者简介:



陈韬伟(1972-),男,昆明市人,博士,讲师,主要研究方向为智能信息处理、信号处理、雷达信号分选识别,email:cctw33@sina.com.

辛明(1972-),男,成都市人,高级工程师,主要研究方向为信号分选、信号处理.

(上接第 400 页)

3.7.5 天线隔离技术

根据先进多功能电磁辐射系统的概念,天线发射和接收信号是在各种不同的频率上同时进行的,许多器件在天线上都需要隔离。

4 结论

雷达、通信与电子战一体化研究所涉及的领域很广,除雷达、通信与电子战外,还要考虑与同一平台上其他电子设备的一体化问题。要实现雷达、通信与电子战的一体化,还需要解决许多先进的技术问题,如共用硬件、信号数据处理、体系结构、通用软件等等。电子装备(尤其雷达、通信与电子战)的一体化是未来电子技术发展的趋势,适应未来战争环境的需要。

参考文献:

- [1] Wise Carl,Armitage Jim. Electronic Combat and Weapon System Integration[J]. Journal of Electronic Defense, 1991(7):37-39.
- [2] 李明亮,姜秋喜,郑继明. 电子对抗装备发展的几点思考[J]. 电子对抗, 2006(5):39-42.
- [3] 徐崔春,陈天麒. 干扰和雷达定位一体化概念与信号设计[C]// 电子对抗重点实验室第九届学术年会论文集. 成都:电子对抗重点实验室, 2001:31-36.
- [4] 梁百川. 综合电子战系统共用技术[J]. 舰船电子对抗, 2007,30(3):5-8.
- [5] 孙绍国,盛景泰. 舰载雷达电子战一体化和宽带共孔径天线技术[J]. 电讯技术, 2005,45(6):1-5.
- [6] 车颖秋. 航空电子传感器的综合化[J]. 电讯技术, 2002,42(3):145-151.
- [7] 金铃. 射频微机电系统技术现状[J]. 微波学报, 2005,21(6):58-64.
- [8] 林志远. 多功能综合射频系统的发展与关键技术[J]. 电讯技术, 2006,46(5):1-5.

作者简介:



梁百川(1935-),男,山西省平遥县人,教授,主要从事电子战的教学与科研工作,email:bchliang@xidian.edu.cn.