

一种基于 Spectrum 原子的雷达辐射源信号识别方法

朱明^{①②③} 金炜东^① 胡来招^②

^①(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031)

^②(电子对抗国防科技重点实验室 成都 610036)

^③(成都信息工程学院 成都 610225)

摘要: 为了提高雷达辐射源信号的正确识别率以满足现代电子对抗的需求, 该文提出了一种新的雷达辐射源信号识别方法。在过完备多尺度 Spectrum 原子库基础上, 采用匹配追踪(MP)方法对信号进行原子分解, 并通过 FFT 降低 MP 搜索过程的时间复杂性, 在此基础上, 对本征 Spectrum 原子参数进行有效降维, 提取具有分类意义的原子特征向量, 同步实现信号的自动分类和参数估计。实验结果表明, 该方法在低信噪比环境下不仅可以获得高的信号类别正确识别率, 同时具有准确的参数估计结果, 证实了所提出方法的有效性。

关键词: 信号识别; 雷达辐射源; Spectrum 原子; 匹配追踪

中图分类号: TN971

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0188-04

A Novel Method for Radar Emitter Signals Recognition Based on Spectrum Atoms

Zhu Ming^{①②③} Jin Wei-dong^① Hu Lai-zhao^②

^①(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China)

^②(National EW Laboratory, Chengdu 610036, China)

^③(Chengdu Univ. of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: To enhance accurate recognition rate of radar emitter signals to meet the requirements of modern electronic warfare, a novel method for radar emitter signals recognition is presented in this paper. Based on the over-complete multiscale dictionary of Spectrum atoms, the signal are decomposed into a linear expansion of atoms by the method of Matching Pursuit(MP), and FFT is applied to effectively reduce the time-complexity at each step of MP. Then the atoms characteristics vector can be achieved to identify radar emitter signals automatically and estimate the signal parameters synchronously. Experiment results show that the method can achieve high accurate recognition rate and valid parameters estimation in the circumstance of lower SNR, which confirms the properties of the proposed approach.

Key words: Signal recognition; Radar emitters; Spectrum atoms; Matching Pursuit(MP)

1 引言

雷达辐射源信号分选识别是电子侦查信号处理中的关键环节, 直接影响着电子侦查设备性能的发挥并关系到战争的后续作战决策^[1]。传统基于经典 5 参数(PA, PW, RF, TOA 和 DOA)的识别方法由于只利用了信号的外部特征参数, 随着现代电磁威胁环境变得日益复杂和各种新体制雷达的不断涌现已很难取得满意的识别结果^[2]。因此, 从信号的本质特征出发, 尤其是对脉内细微特征的分析和研究受到了越来越多的关注。

近年来, 针对复杂体制雷达辐射源信号脉内特征参数的

提取, 已提出相位差分法^[3], 分形维法^[4], 脉冲细微特征^[5], 时频分析^[6]等多种方法, 但这些方法均主要针对特定的信号形式, 且易受噪声扰动, 在低信噪比环境下很难提取识别性能好的有效特征参数。本文在已有工作的基础上, 构建了多尺度 Spectrum 原子库并提出了基于原子特征的雷达辐射源信号识别新方法, 不仅可以在较大的信噪比范围内获得较高的识别准确率, 而且可以同步获得准确的信号参数估计结果, 具有一定的工程应用价值。

2 雷达辐射源信号 Spectrum 原子特征提取

时频原子分析方法通过将信号展开于一种可灵活选取的超完备冗余时频原子库上实现对信号的时频联合分析, 有利于从具有局部化时频结构的复杂信号中提取出有用的关键信息^[7]。实际应用中方法的关键在于如何选取适宜信号局部结构特征的原子库和如何从库中搜索最具特征的本征原

2007-07-16 收到, 2008-02-04 改回

国家自然科学基金(60572143), 电子对抗预研基金(NEWL51435QT 220401), 四川省教育厅科研基金(07ZB013)和成都信息工程学院发展基金(CSRF 200704)资助课题

子。

传统的原子库构建方法都是基于时域空间,早期的研究中,我们分别实现了基于 Gabor 原子^[8]和 Chirplet 原子^[9]的雷达辐射源信号特征提取,结果表明数量很少的原子即可充分表示原信号的主要特征信息。进一步研究发现,时域范围内信号极易受噪声污染,在低信噪比环境下时频原子分析方法很难提取出有效的局部特征。为了克服这一不足,考虑典型雷达辐射源信号频域特征不易受信号载频变化影响的特点,设计可以反映出信号局部频谱结构的 Spectrum 原子,并实现基于该库的原子特征向量(Atoms Characteristics Vector, ACV)的快速提取。

2.1 多尺度 Spectrum 原子

定义多尺度 Spectrum 原子库是具有 3 参数的 bell 型函数集合

$$g_\gamma(\omega) = rg \left(\frac{\omega - u}{s} \right) \quad (1)$$

其中 $g(t)$ 表示 bell 型函数, $\gamma = (r, s, u)$ 表示原子特征参数, r 表示原子归一化幅值, s 和 u 分别表示原子的尺度因子和位移因子。引用文献[7]中原子参数离散化方法,对式(1)中原子参数进行如下离散化处理: $\gamma = (i\Delta r, j\Delta s, k\Delta u)$, 其中 $\Delta r = 1/10$, $\Delta s = 2$, $\Delta u = 1$, $0 < i \leq 10$, $0 < j \leq N2^{-3}$, $0 \leq k \leq N2^{-1}$ (N 表示信号长度)。若用 L_D 表示过完备库 D 中原子的个数, 则

$$L_D = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{N2^{-3}} \sum_{k=1}^{N2^{-1}} 1 \quad (2)$$

对一般雷达辐射源信号而言,式(2)表示的过完备原子库中原子个数是一个很大的数。例如,若信号长度 N 为 512, 则 $L_D = 163840$ 。巨大的原子库将导致最佳原子匹配计算量十分巨大而难以实现。必须对原子库结构进行简化并研究特征提取的快速算法。

2.2 基于 FFT_MP 的原子特征提取算法

匹配追踪(Matching Pursuit, MP)是实现信号时频原子分析的一种贪婪迭代算法,其核心思想在于从过完备的原子库中搜索出最能匹配原始信号或其残差信号的时频原子并追踪匹配后的残差。在文献[10]的基础上,考虑原子库中部分原子波形具有相似性,我们首先对原子库结构进行简化,然后利用基于 FFT 的 MP 算法提取最佳 Spectrum 原子并构造适宜分类和参数估计的原子特征向量 ACV。下面给出原子特征提取和构造 ACV 的具体算法:

(1)信号预处理 用 Fourier 变换将接收机截获的辐射源信号 $\{f(i), i = 1, 2, \dots, M\}$ 从时域变换到频域,使提取的特征不受信号载频变化的影响。由于信号的幅变谱具有对称性,因而仅考虑半边谱 $\{F(i), i = 1, 2, \dots, M/2\}$ 。为了有效抑制带外噪声对频谱特征提取的干扰,首先对半边谱 $F(i)$ 作滑动平均处理,以平均幅值

$$\bar{F}(i) = \frac{1}{2m+1} \sum_{j=i-m}^{i+m} F(j) \quad (3)$$

作为第 i 点的频率幅值;其次,为了消除信号长度等对提取原子特征的影响,需要对辐射源信号的半边谱进行重采样,重采样后得到的信号为 $\{\tilde{F}(i), i = 1, 2, \dots, N/2\}$;最后,为了便于后期计算和减少原子匹配的计算量,对频率幅值进行归一化,得到经过预处理后的信号 $\{\bar{F}(i), i = 1, 2, \dots, N/2\}$ 。

(2)构建简化多尺度原子库 原子库结构是信号特征提取性能好坏的关键。通过对式(1)构建的原子库结构进行分析发现,当库中某些原子具有相同的参数 r , s 和不同的 u 时,原子具有相同的波形,其区别仅仅在于中心位置的不同,参数 u 的改变实际上是原子在横轴的位移,因此,可令 $u = N/4$, 构建简化的待分析 Spectrum 原子库 $D = \{g_\gamma\}_{\gamma \in \Gamma}$, 其中 Γ 表示原子参数组 γ 的集合,每个原子进行能量归一化处理,即 $\|g_\gamma\| = 1$ 。

(3)提取最佳匹配 Spectrum 原子 设 H 表示 Hilbert 空间。MP 算法首先从过完备原子库 D 中选出与待分析信号 $\bar{F}(i)$ 最匹配的原子 g_{γ_0} , g_{γ_0} 满足下列条件:

$$|\langle \bar{F}, g_{\gamma_0} \rangle| = \sup_{\gamma \in \Gamma} |\langle \bar{F}, g_\gamma \rangle| \quad (4)$$

因此,信号 $\bar{F}(i)$ 即被分解为如下形式:

$$\bar{F} = \langle \bar{F}, g_{\gamma_0} \rangle g_{\gamma_0} + R_1 \quad (5)$$

其中 $\langle \bar{F}, g_{\gamma_0} \rangle$ 表示信号 $\bar{F}(i)$ 在 g_{γ_0} 方向上的投影, R_1 表示投影后信号的残差。

接着对每次匹配后的信号残差进行分解, n 步后信号可表示为

$$\bar{F} = \sum_{l=0}^{n-1} \langle R_l, g_{\gamma_l} \rangle g_{\gamma_l} + R_n \quad (6)$$

其中 $R_0 = \bar{F}$, g_{γ_l} 满足

$$|\langle R_l, g_{\gamma_l} \rangle| = \sup_{\gamma \in \Gamma} |\langle R_l, g_\gamma \rangle| \quad (7)$$

由式(6)可知, R_n 为分解的 n 个原子的线性组合与原信号的误差。已经证明,在信号长度有限的情况下, $\|R_n\|$ 随 n 的增大而指数衰减。因此只需要少量的原子就可以表示出信号的主要特征,即

$$\bar{F} = \sum_{l=0}^{n-1} \langle R_l, g_{\gamma_l} \rangle g_{\gamma_l} \quad (8)$$

其中 $n \ll N$ 。从上述分析可知,在用 MP 实现最佳匹配 Spectrum 原子提取时,将 $u = N/4$ 的原子在横轴上平移,由于 u 连续取值,且从 0 到 $N/2-1$,所以 N 次内积 $\langle R_l, g_{\gamma_l} \rangle$ 即为一次互相关运算 $r_{R_l, g_{\gamma_l}}$, 采用 FFT 快速实现上述互相关运算。下面给出基于 FFT_MP 的最佳 Spectrum 原子提取算法:

步骤 1 初始化,令 $R_0 = \bar{F}$, $n=1$ 。

步骤 2 用 FFT 实现 R_0 与 D 中原子的互相关运算,并记录最匹配原子。

步骤 3 用下式对残差进行更新

$$R_n = R_{n-1} - \langle R_{n-1}, g_{\gamma_{n-1}} \rangle g_{\gamma_{n-1}} \quad (9)$$

步骤 4 判断是否达到最大迭代次数预设值,或者是否

满足残差信号能量与原始信号能量比值低于某一门限,保存匹配结果,退出;否则 $n=n+1$,转步骤2。

(4)构造原子特征向量 **ACV** 由所提取的 Spectrum 原子特征参数可知, s 和 u 分别表示了原子的尺度和中心位置,在频谱中反映了信号的频率范围和中心频率的大小,且 $E_s = 2 \times s$ 体现了信号的调频带宽;原子个数 n 反映了信号包含了几个主要的频率成分。构造原子特征向量 $\mathbf{ACV} = [n, s, u, E_s]$ 。

3 基于层次决策的信号自动分类

层次决策分类,或称多级分类器,是模式识别中进行分类的一种有效方法。虽然目前基于人工智能的智能分类器性能优越且应用日益广泛,但考虑电子战信号处理中对快速性和稳健性的要求,本文选取结构简单、计算速度快的层次决策分类方法实现雷达辐射源信号的自动识别。该分类方法通过设定多个门限阈值将一个复杂的多类别分类问题转化为若干个简单的分类问题完成从特征向量空间到决策空间的变换。层次决策分类性能好坏的关键在于门限阈值的选择。因此,必须结合特征取值的分布情况根据最小化错分概率原则进行门限阈值的选择。

针对常规脉冲(Conventionality Pulse, CP),线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM),四相编码(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK),二频率编码(Binary Frequency Shift Keying, BFSK)和混合调制(Hybrid Modulation, HM)几类典型脉内调制雷达辐射源信号,通过上述算法提取 Spectrum 原子特征向量 **ACV**。表1给出了各特征在信噪比 SNR 为 4~10dB 范围内 1000 次仿真实验所得的平均结果。

表1 各类信号特征取值的分布情况(4~10dB)

信号类型	n	s	u	E_s
CP1	1	2~4	102~103	4~8
CP2	1	2~4	153~154	4~8
LFM1	1	50~52	150~156	100~104
LFM2	1	100~104	202~208	200~208
QPSK	1	8~10	102~103	16~20
HM	1	184~212	289~306	578~612
BFSK	2	8~10	153~154	16~20
		8~10	50~52	16~20

从表1可以看出,原子个数 n 是一个较理想的分类特征,因为在所考虑的雷达信号类中,仅有 BFSK 因信号本身存在两个主要的频率分量, n 值大于 1,而其它类信号频率成分单一或连续,因此,可选择 2 作为第 1 门限 Th1 的值首先将 BFSK 从信号类中分离出来。同时,表1中的数据表明,CP 信号只在一个频点上具有明显的幅值,特征值 s 很小,参考表1的特征取值情况,根据最小化错分概率原则选择 CP 和其它类信号的边界中值 $(4+8)/2=6$ 作为第 2 门限 Th2 的值分拆出 CP 信号,并可进一步通过对 u 特征进行聚类,从而区

分出不同载频的 CP 信号。另外,表1的结果表明了 QPSK 信号原子尺度相对 LFM 和 HY 等信号而言, s 值相对较小,LFM 信号具有较稳定的带宽,可通过一个小的 s 门限识别出 QPSK 信号,再通过较大的 s 门限将 LFM 从余下的信号类中分离。参考表1的特征取值情况,分别取 12 和 180 作为第 3 门限 Th3 和第 4 门限 Th4 的值。对分离出的 LFM 信号,可通过 E_s 特征聚类出不同调频带宽的 LFM 信号。图1给出了本文用于信号分类的整体流程框图。

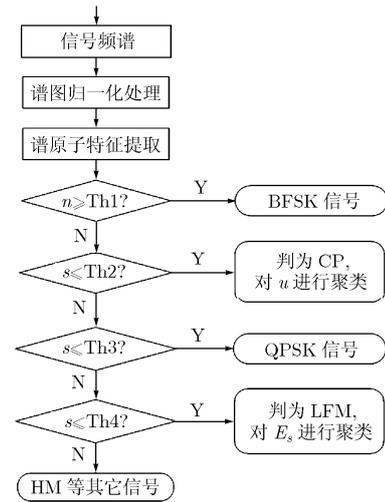


图1 信号分类流程

值得说明的是,所提取的原子特征向量 **ACV** 不仅可以用来对雷达辐射源信号进行分类,并且因为原子特征参数在频域具有一定的物理意义,因此,本文方法在进行有效分类的同时,可根据 **ACV** 的值估计出信号的载频,调频带宽,起始频率等参数。

4 实验与结果分析

为了验证本文方法的有效性,分别对 6 类典型雷达辐射源信号(CP1, CP2, LFM1, LFM2, QPSK 和 BFSK)进行基于 Spectrum 原子特征的自动分类和参数估计实验。信号脉冲宽度 $10\mu\text{s}$, 采样频率 100MHz, CP1 和 CP2 的 f_0 分别为 10MHz 和 15MHz, LFM1 和 LFM2 调频带宽 B 分别为 10MHz 和 20MHz, BFSK 采用 13 位 Barker 码,对应频率为 5 MHz 和 15MHz, QPSK 采用 16 位 Frank 码。

实验中,每种雷达信号在 -4~8dB 的信噪比范围内每隔 2dB 随机产生 100 个不同初始相位的样本,组成总数为 600 的测试信号样本集进行 Spectrum 原子的特征提取和分类实验。同时,每种信噪比各进行 100 次 Monte Carlo 实验。图2(a)给出了统计意义上每类信号错误识别率随信噪比变化的结果,总错分类率与信噪比的关系如图2(b)所示。

从图2的分类性能可以看出,当信噪比大于 4dB 时,所考察的 6 类信号完全正确分类。当信噪比降为 2dB 时,除了 BFSK 仍然存在低于 8% 的分类错误率外,其余信号类均能

表 2 辐射源信号参数真实值与估计值的比较(4dB)

信号类型	LFM1		LFM2		CP2	QPSK	BFSK	
	f_0	B	f_0	B	f_0	f_0	f_1	f_2
真实值	10.00	10.00	10.00	20.00	15.00	10.00	5.00	15.00
估计值	09.96	10.01	10.01	20.02	14.97	09.96	4.98	14.94

单位: MHz

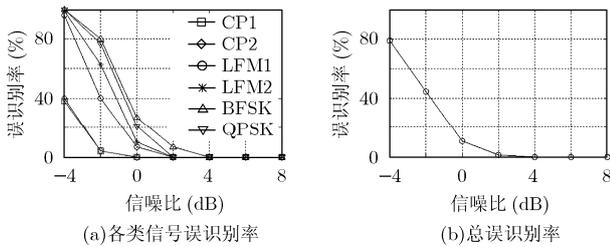


图 2 不同信噪比 SNR 情况下的分类性能

被正确分类, 整体分类正确率达到 98.6%。随着 SNR 的进一步下降, 0dB 时, 除了 BFSK 和 QPSK 的错分率分别达到 26.4%和 21.6%, 其它类信号错分率均不超过 10%, 整体分类正确率接近 90%。仔细分析不难发现, 因 BFSK 和 QPSK 信号频谱对噪声敏感, 在低信噪比环境下, 所提取的 Spectrum 原子特征已很难反映出信号原有的频谱规律, 尤其是 BFSK 信号, 信噪比的降低将直接导致提取的两个 Spectrum 原子误判为单个原子而识别为 LFM 信号。总的来说, 本文提出的整体信号分类方案在信噪比不低于 0dB 时, 可获得 90%以上的分类准确率。同时, 提出的基于 Spectrum 原子的快速 MP 算法某一信噪比下提取一次 600 个信号样本集的原子特征向量所需平均时间约为 52.9s(P4, 3.0G, 512MB), 较原算法有了大大的提高。

为了进一步说明本文方法在自动分类识别的同时可以对信号进行有效的参数估计, 表 2 列出了基于 ACV 的各类信号主要参数的真实值与相应的估计值, 图 3 进一步给出了 CP2 信号载频的估计值与真实值随信噪比 SNR 的变化曲线。从仿真结果可以看出, 本文方法可以在低信噪比环境下得到有效的参数估计, 具有较高的估计精度。

5 结束语

基于时频原子分析思想, 本文构建了一种全新的 Spectrum 原子库, 并提出基于该库的辐射源信号快速识别

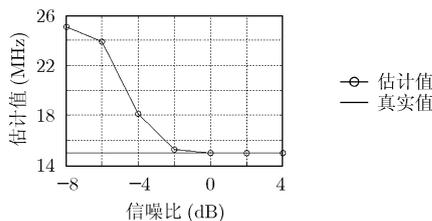


图 3 参数估计结果随 SNR 的变化曲线

算法。在完备多尺度 Spectrum 原子库基础上, 采用匹配追踪方法得到表示 6 类典型雷达辐射源信号特征信息的最佳原子, 并通过原子库的结构优化和 FFT 算法降低原 MP 搜索过程的时间复杂性。通过进一步构建类内聚集性强, 类间分离度大的原子特征向量, 在实现信号自动分类的同时对信号参数进行有效的估计。实验结果证明在低信噪比(0dB)环境下, 所提方法不仅可以获得高的信号类别正确识别率, 同时具有准确的参数估计结果, 具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 胡来招. 雷达侦查接收机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 1-10.
- [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] 黄知涛, 周一宇, 姜文利. 基于相对无模糊相位重构的自动脉内调制特性分析[J]. 通信学报, 2003, 24(4): 153-160.
- [4] 张葛祥, 胡来招, 金炜东. 雷达辐射源信号脉内特征分析[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(6): 476-480.
- [5] Kawalec A and Owczarek R. Radar emitter recognition using intrapulse data [C]. Proceedings of 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Warsaw, 2004, 2: 435-438.
- [6] Gustavo L R, Jesus G, and Alvora S O. Digital channelized receiver based on time-frequency analysis for signal interception [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3): 879-898.
- [7] Mallat S and Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [8] 朱明, 金炜东, 胡来招. 基于时频原子方法的雷达辐射源信号特征提取[J]. 电波科学学报, 2007, 22(3): 458-462.
- [9] Zhu M, Jin W D, Pu Y W, and Hu L Z. A novel feature extraction approach for radar emitter signals [C]. The 2nd IEEE conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, May 23-25 2007, 1: 1785-1789.
- [10] 尹忠科, 邵君, Pierre V. 利用 FFT 实现基于 MP 的信号稀疏分解[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 614-618.

朱 明: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为电子战信号处理、模式识别和进化计算等。
 金炜东: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为智能信息处理、系统仿真、优化理论与方法。
 胡来招: 男, 1945 年生, 研究员, 博士生导师, 中电 29 所科技委主任、电子对抗国防科技重点实验室学术委员会主任, 主要从事信号处理、侦察接收机、无源定位等研究。