

文章编号:1001-9014(2007)04-0302-05

基于 Chirplet 原子的雷达辐射源信号特征提取

朱明^{1,2,3}, 金炜东¹, 普运伟^{1,2}, 胡来招²

(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 610031;

2. 中国电子科技集团第29所 电子对抗国防科技重点实验室, 四川 成都 610036;

3. 成都信息工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:特征提取是新体制雷达辐射源信号分选识别的关键技术. 本文提出一种全新的雷达辐射源信号时频原子特征提取方法. 在过完备多尺度 Chirplet 原子库基础上, 采用匹配追踪(MP)方法对信号进行时频原子分解, 并通过改进量子遗传算法(IQGA)降低 MP 搜索过程的时间复杂性, 得到表示雷达辐射源信号特征信息的本征 Chirplet 原子. 实验结果表明使用更少量的 Chirplet 原子可以得到比 Gabor 原子分解更准确的特征信息, 证实了本文方法的可行性和有效性.

关键词:特征提取; 雷达辐射源; Chirplet 原子; 量子遗传算法

中图分类号:TN957; TN971.1 **文献标识码:**A

FEATURE EXTRACTION OF RADAR EMITTER SIGNALS BASED ON GAUSSIAN CHIRPLET ATOMS

ZHU Ming^{1,2,3}, JIN Wei-Dong¹, PU Yun-Wei^{1,2}, HU Lai-Zhao²

(1. School of Information Science and Tech., Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China;

2. National EW Lab., CETC No. 29 Research Institute, Chengdu 610036, China;

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

Abstract: Feature extraction is a crucial technology in advanced radar emitter signal deinterleaving and recognition. A time-frequency atom approach to extract the features of radar emitter signals was presented in this study. Based on the over-complete multiscale dictionary of Gaussian Chirplet atoms, the signals were decomposed into a linear expansion of atoms by the method of marching pursuit (MP). Then, the improved quantum genetic algorithm was applied to effectively reduce the time-complexity at each search step of MP, and thus some intrinsic Chirplet atoms describing features of signals were obtained. Experiment results show that the Chirplet atom is better than the Gabor atom in extracting the feature parameters, which confirms the validity and feasibility of the approach.

Key words: feature extraction; radar emitters; chirplet atoms; quantum genetic algorithm

引言

雷达辐射源信号分选识别是电子侦察信号处理中的关键过程. 传统特征提取方法主要建立在脉幅(PA)、脉宽(PW)、载频(RF)、到达时间(TOA)及到达方向(DOA)五个经典参数基础之上. 但随着当前新型复杂体制雷达不断投入使用并逐渐占据主导地位, 仅依靠上述五参数对辐射源信号进行分选识别已非常困难^[1]. 近年来, 国内外学者在探索新特征参数方面取得了一些进展^[2-4], 但这些方法都只能针对特定的雷达辐射源信号, 未从信号波形的本质

出发, 提取出能够表征信号时频域整体与局部化信息分量的新特征参数.

信号的时频原子分析方法因具有独特的优势在语音识别^[5]、语音编码^[6]、信号去噪^[7]等领域受到高度重视. 该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. 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时频原子库和如何从库中搜索最具特征的本征时频原子. 传统 Gabor 原子的频率不随时间变化, 导致对复杂信号

收稿日期: 2006-09-12, 修回日期: 2007-01-25

Received date: 2006-09-12, revised date: 2007-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(60572143)、电子对抗技术预研基金(NEWL51435QT220401)和成都信息工程学院科研基金(CRF200506)资助项目

作者简介: 朱明(1978-), 男, 安徽宣城人, 博士生, 主要研究方向为电子战信号处理、模式识别和进化计算等.

无法进行有效的匹配,本文采用时频局部性能更优越的 Chirplet 原子库,将雷达辐射源信号在库上进行分解,并通过改进量子遗传算法(Improved Quantum Genetic Algorithm, IQGA)解决匹配追踪(Matching Pursuit, MP)过程计算量过大的问题,得到表示雷达辐射源信号特征信息的本征 Chirplet 原子. 实验结果表明本文方法使用更少的 Chirplet 原子即可更准确的表示辐射源信号,因此这些原子可以认为已提取出原信号的主要特征,为后期的辐射源信号分选和识别提供必要的特征准备.

1 多尺度 Chirplet 原子

时频原子库的结构是信号分解性能好坏的关键. Mallat 等^[7]提出的“自适应匹配投影塔型分解法”和 Qian 等^[8]提出的“自适应 Gauss 基函数信号表示”,均采用了一个经伸缩、位移、频率调制的 Gauss 函数组成的原子集合(Gabor 原子库),一个 Gabor 原子可表示为

$$g_{\gamma}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}g\left(\frac{t-u}{s}\right)\cos(vt+w) \quad , \quad (1)$$

其中 $\gamma = (s, u, v, w)$ 是时频参数,分别表示原子伸缩、位移、频率和相位. 在此基础上,我们提出了基于 Gabor 原子库的雷达辐射源信号特征快速提取算法,结果表明约 30 个 Gabor 原子即可充分表示原信号的主要特征信息^[9]

进一步研究发现,所采用的 Gabor 原子频率不随时间变化,原子对时频平面的划分方式属于格型分割,导致对复杂体制雷达辐射源信号不能进行有效的匹配,分解过程存在许多截断和信号分量之间的混合畸变. 为了克服这一不足,考虑具有 Gauss 包络 Chirplet 原子在时、频域内聚集性好的特点,使用频率随时间变化的多尺度 Chirplet 原子库对雷达辐射源信号进行特征提取. Chirplet 原子库是具有四参数 Gauss 包络的波形集合,可表示为

$$g_{(s,u,\xi,c)}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}g\left(\frac{t-u}{s}\right)\exp\left[j\left(\xi(t-u) + \frac{c}{2}(t-u)^2\right)\right] \quad , \quad (2)$$

其中 $\gamma = (s, u, \xi, c)$ 是时频参数, s 表示原子的尺度变化, u 和 ξ 分别表示信号的时间中心和频率中心, c 表示信号在时频平面内的斜率. 原子波形及其 Wigner-Ville 分布(WVD)如图 1 所示.

具有 Gauss 包络 Chirplet 原子瞬时频率 $\omega(t) = \xi + c(t-u)$ 随时间呈线性变化,原子波形的时频特性更符合雷达辐射源信号本身固有的局部特性,基于该库的时频原子分析,有望在信号特征提取过程

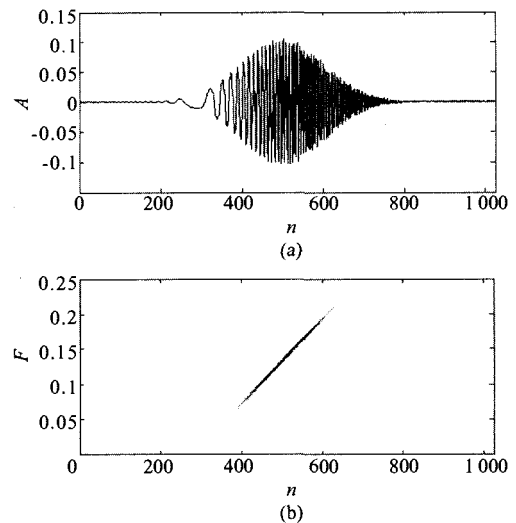


图 1 Chirplet 原子及其 Wigner-Ville 分布 (a) 原子波形 (b) 原子 WVD

Fig. 1 Gaussian Chirplet atom and its WVD (a) atom waveform (b) atom WVD

中,使用更少的原子更准确的表示雷达辐射源信号的主要特征信息.

2 基于 IQGA_MP 的最佳 Chirplet 原子搜索

2.1 MP 原理

设 H 表示 Hilbert 空间,定义 $D = \{g_{\gamma}\}_{\gamma \in \Gamma}$ 为 H 中用于进行辐射源信号分解的过完备 Chirplet 原子库,其中 Γ 为原子参数组 γ 的集合. 每个原子 g_{γ} 由 4 个参数 $\gamma = (s, u, \xi, c)$ 所决定,且进行归一化处理,即 $\|g_{\gamma}\| = 1$. 令 $f \in H$, 表示雷达辐射源信号,长度为 N . 匹配追踪首先从过完备库中选出与待分解辐射源信号最匹配的原子 $g_{\gamma_0}, g_{\gamma_1}$ 满足下列条件

$$|\langle f, g_{\gamma_0} \rangle| = \sup_{\gamma \in \Gamma} |\langle f, g_{\gamma} \rangle| \quad , \quad (3)$$

即该原子 g_{γ_0} 与信号 f 内积最大. 因此,辐射源信号 f 即被分解为如下形式

$$f = \langle f, g_{\gamma_0} \rangle g_{\gamma_0} + R^1 f \quad , \quad (4)$$

其中 $\langle f, g_{\gamma_0} \rangle g_{\gamma_0}$ 表示信号 f 在 g_{γ_0} 方向上的投影, $R^1 f$ 表示投影后信号残余量.

接着对每次匹配后的信号残差进行分解, n 步后最终信号可表示为

$$f = \sum_{k=0}^{n-1} \langle R^k f, g_{\gamma_k} \rangle g_{\gamma_k} + R^n f \quad , \quad (5)$$

其中 g_{γ_k} 满足

$$|\langle R^k f, g_{\gamma_k} \rangle| = \sup_{\gamma \in \Gamma} |\langle R^k f, g_{\gamma} \rangle| \quad . \quad (6)$$

由式(5)可知, $R^n f$ 为分解的 n 个原子的线性组合与原信号的误差. 已经证明^[7], 在信号长度有限的情

况下, $\|R^k f\|$ 随 n 的增大而指数衰减为 0. 因此只需要少量的原子就可以表示出信号的主要特征, 即:

$$f = \sum_{k=0}^{n-1} \langle R^k f, g_{\gamma k} \rangle g_{\gamma k}, \quad (7)$$

其中 $n \ll N$.

由于 $\|g_\gamma\| = 1$, 对式 (7) 两端的信号进行 Wigner-Ville 分布, 可以得到

$$\text{WVD}_{g(s,u,\xi,c)}(t,\omega) = \sum_{k=0}^{n-1} |\langle R^k f, g_{\gamma k} \rangle|^2 \text{WVD}_{g_{\gamma k}}(t,\omega). \quad (8)$$

这样得到的时频分布无窗效应, 也不存在交叉项干扰, 具有较高的时频聚集性.

上述 MP 算法的核心思想在于不断从过完备库中搜索最能匹配原始信号及其残差信号的时频原子并追踪匹配后的残差. 每一次匹配追踪都要完成一个多参数优化问题. 由式 (6) 可知将信号或信号分解的残差与过完备库中每一个原子进行高维内积运算, 算法数次匹配的计算量十分巨大. 有研究人员用传统遗传算法来提高计算速度^[10]. 鉴于量子遗传算法用小规模种群进行并行寻优, 收敛速度快和全局寻优能力强的特点, 本文采用一种改进的量子遗传算法实现快速匹配最佳原子.

2.2 改进量子遗传最佳 Chirplet 原子搜索

量子遗传算法 (QGA) 是在量子态矢量表达基础上, 用量子比特的概率幅来代替传统 GA 中用确定性的值 (如二进制数、浮点数或符号等) 对染色体进行编码, 并通过量子旋转门更新个体的一种新发展的概率进化算法^[11]. 因为一个量子位可同时表示 0 或 1 两种状态及它们的叠加态, 因此仅用 n 个量子位就可以同时表示 2^n 个状态使其种群大小可以比传统的 GA 小很多.

结合匹配追踪的多参数优化问题, 我们提出适宜 Chirplet 最佳原子搜索的改进量子遗传算法. 首先对量子旋转角进行改进. 在 QGA 中, 量子门是实现进化操作的关键, 量子进化过程中将构造的量子门作用于量子叠加态或纠缠态的基态, 使其相互干涉, 相位发生改变, 从而改变各基态的概率幅. 可用下式表示

$$\begin{bmatrix} \alpha'_i \\ \beta'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式 (9) 中量子旋转角 θ 的确定将决定整个算法的收敛速度和稳定性. 考虑进化过程量子旋转门大小的变化规律, 用下式表示的自适应旋转角对原算法进行改进:

$$\theta = k * h(\alpha_i, \beta_i), \quad (10)$$

其中 k 为一个与进化代数有关的变量, 可以自适应

表 1 函数 $h(\alpha_i, \beta_i)$ 查询表

Table 1 Lookup table of function $h(\alpha_i, \beta_i)$

$d_1 > 0$	$d_2 > 0$	$h(\alpha_i, \beta_i)$	
		$ \xi_1 > \xi_2 $	$ \xi_1 < \xi_2 $
True	True	+1	-1
True	False	+1	+1
False	True	-1	-1
False	False	-1	+1

的调整搜索网格的大小, 保证算法收敛的快速性; 函数 $h(\alpha_i, \beta_i)$ 是确定算法搜索的方向, 可由表 1 确定

表 1 中, $\xi_i = \arctan(\beta_i/\alpha_i)$, $d_i = \alpha_i * \beta_i$ ($i = 1, 2$), α_1 和 β_1 是搜索到最优解的概率幅, α_2 和 β_2 是当前解的概率幅. d_1 和 d_2 同时为正, 表示最优解与当前解均处于第一或第三象限, 当 $|\xi_1| > |\xi_2|$ 时, 表明当前解应朝着逆时针方向旋转靠近最优解, 其值为 +1, 反之为 -1, 同理可得其他三种情况.

其次, 我们用最优保留机制保留的最优个体取代 QGA 中依赖当前代最优个体确定旋转角. 同时, 当算法在代数最优个体都无任何变化时, 表明算法可能陷入了局部极值. 这时对群体进行灾变操作, 只保留最优值, 重新生成其余个体, 使其尽快摆脱进化迟钝状态, 开始新搜索.

基于 IQGA 的最佳 Chirplet 原子搜索算法如下:

Step1: 随机产生包含 n 个个体的种群 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, p_j ($1, 2, \dots, n$) 为第 j 个个体, 描述方式如下

$$p_j = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_m \\ \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_m \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 m 为量子位个数, 初始状态可令所有的

$$\alpha_i = \beta_i = 1/\sqrt{2} \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

Step2: 根据 P 中概率幅的取值情况构造量子叠加态的观测态 R , $R = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 其中 a_j ($j = 1, 2, \dots, n$) 是每个个体的观测态, 即长度为 m 的二进制串, 解码后对应于一个原子的各参数值;

Step3: 计算各原子与信号或信号残差的内积, 并用内积值对种群中各原子进行适应度评价;

Step4: 最优保留机制保留最佳原子, 若满足终止条件, 则算法终止. 否则, 转 Step5;

Step5: 若满足灾变条件, 算法发生灾变, 转 Step7; 否则, 转 Step6;

Step6: 根据进化代数确定旋转角, 利用量子旋转门, 用式 (9) 对种群中个体的概率幅进行调整, 使其向最优解趋进;

Step7: 进化代数增 1, 转 Step2.

表 2 雷达辐射源信号重构时频原子特征参数

Table 2 Time-frequency atom feature parameters of radar emitter signals

原子数	Gabor 原子特征参数				原子数	Chirplet 原子特征参数			
	s	u	v	w		s	u	ξ	c
1	32	162	10.60	1.57	1	256	0	5.01	0.0058
2	64	316	23.51	1.57	2	128	960	6.23	0.0059
3	64	760	24.89	0.52	3	128	384	0.05	0.0056
...

3 实验与结果分析

为了验证本文方法的有效性,针对一类相位编码脉内线性调频混合调制雷达辐射源信号,用上述算法对该信号进行时频原子分析.原信号可表示为线性调频与二相编码脉冲函数的卷积形式

$$\begin{aligned}
 u(t) &= u_L(t) \otimes u_B(t) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{PT}} \sum_{m=0}^{P-1} \exp[j\pi k(t-mT)^2] \\
 &\quad c_m [\varepsilon(t-mT) - \varepsilon(t-(m+1)T)] \quad , \quad (12)
 \end{aligned}$$

其中, T 是子脉冲宽度, P 是码长, k 是线性调频斜率, c_m 为一随机序列,取 $\{c_m = \pm 1\}$.

用基于改进量子遗传的 MP 算法对(12)式的新体制雷达辐射源信号进行时频原子分析.实验所用计算机为 Dell G × 280 (P4 3.0G, 512MB), 仿真环境为 MATLAB7.0. 原信号采用 7 位 Barker 编码, 码元宽度 $10\mu\text{s}$, 线性调频起始频率为 500kHz , 调频带宽 2MHz . 在信噪比为 20dB 情况下, 我们分别基于 Gabor 原子库和 Chirplet 原子库用 IQGA-MP 算法对信号进行分解和重构, 所得结果如图 2 所示. 其中 IQGA 种群大小为 10, 量子位个数为 40, 每 10 位表示原子的一个参数, 终止代数数为 100. 在对信号分解与重构的过程中, 所得到的雷达辐射源信号时频原子特征参数如表 2 所列.

从图 2 中可以看出, 同样使用 30 个原子, 基于 Gabor 原子库的信号重构基本可以表示出原信号的主要特征, 但与原信号仍然存在一定的差异, 使用 Chirplet 原子库的重构信号与原信号逼近效果明显. 为了进一步说明这一点, 表 3 给出了基于 2 种不同时频原子库结构的信号重构均方误差值, 信号匹配残差能量 $D = \log_{10}(\|R^*f\| / \|f\|)$ 随原子个数 m 增加而衰减的变化曲线如图 3 所示, 可以看出基于 Chirplet 原子库的信号分解与重构相比 Gabor 原子库具有更优越的性能, 仅使用更少量的原子就可以更准确的恢复原信号. 并且, IQGA-MP 算法在普通计算机上可以快速的匹配出最佳的 Chirplet 原子, 较好的解决了传统 MP 算法中计算量过大难以实现的问题. 同时, 从表 2 中分别给出的重构时频原子特

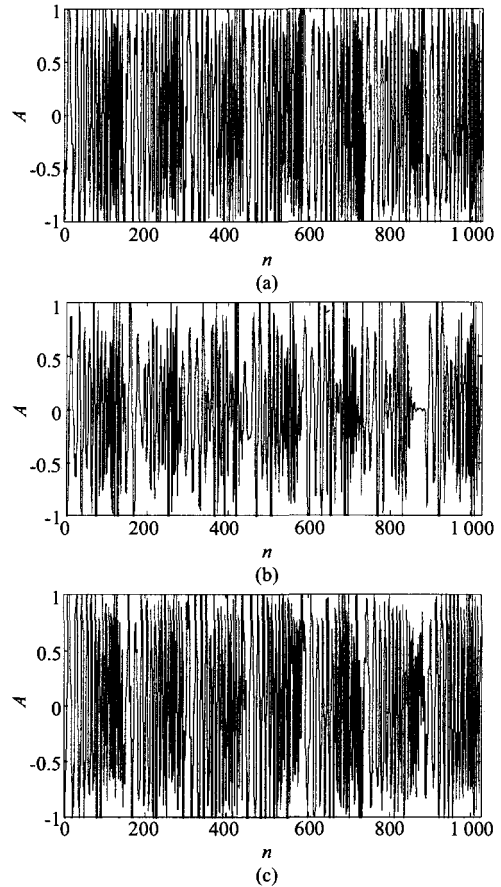


图 2 30 个原子信号重构结果 (a) 原始信号 (b) Gabor 原子重构信号 (c) Chirplet 原子重构信号

Fig. 2 Reconstructed signal of 30 atoms (a) original signal (b) reconstructed signal by Gabor atoms (c) reconstructed signal by Chirplet atoms

表 3 原子重构均方误差比较

Table 3 Mean-square error comparison

原子类型	原子数	
	15 个	30 个
Gabor	0.6037	0.4841
Chirplet	0.3410	0.2562

征参数可以看出, 首次搜索出的最佳时频原子反映了信号的主要特征, 依次匹配出的原子将逐渐反映出信号的细节特征, 特征参数可以为后期的辐射源信号筛选与识别提供必要的准备.

为了进一步说明本文方法的有效性, 图 4 给出

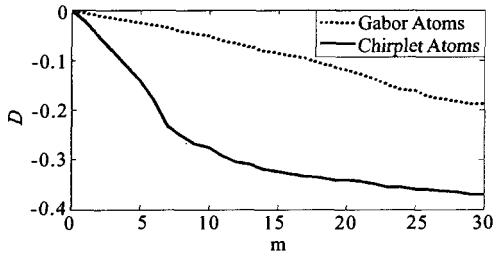


图3 原子匹配残差衰减比较图

Fig. 3 Comparison of residual decay for atom matching

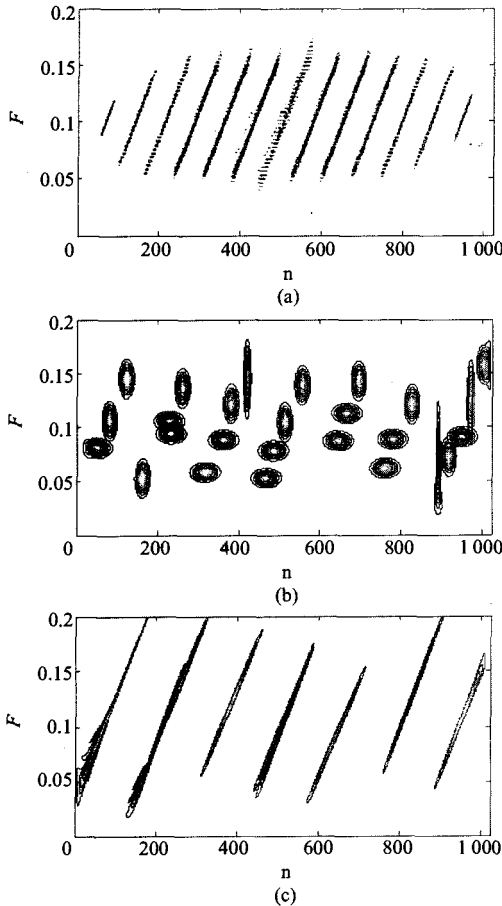


图4 原子 Wigner-Ville 分布 (a) 原始信号 (b) Gabor 原子 WVD 叠加 (c) Chirplet 原子 WVD 叠加

Fig. 4 Wigner-Ville distributions of signal and atoms (a) WVD (original signal WVD) (b) Gabor atoms WVD (c) Chirplet atoms WVD

了基于 2 种库结构所得最佳时频原子 Wigner-Ville 分布。图 4(a) 是原始信号的 WVD, 图 4(b) 和图 4(c) 分别表示 Gabor 原子和 Chirplet 原子的 WVD 叠加。由图可见, 时频原子的方法用于信号分析可以较好的抑制交叉项的干扰, 且本文提出的基于 Chirplet 原子库的方法可以得到更清晰、更准确的时频分布。

4 结语

本文提出了一种基于 Chirplet 时频原子库的雷

达辐射源信号特征提取新方法。该方法基于一个过完备的多尺度 Chirplet 时频原子库, 通过信号的时频原子分解和重构提取雷达辐射源信号的主要特征信息, 并用改进量子遗传算法克服传统 MP 方法计算量过大难以实现的问题。由于时频原子分析方法的结果不存在交叉项, 可望在信号的细微特征分析中得到比目前时频分析中常用的 Wigner-Viller 分布以及小波分解等方法更清晰的特征信息。混合调制雷达辐射源信号的实验表明, 本文提出的方法较原方法仅用更少的原子即可表示出原信号主要的特征信息, 这些原子对应的特征参数可作为后期的辐射源信号分选和识别的依据。

REFERENCES

- [1] LI He-Sheng, HAN Yu, CAI Ying-Wu, *et al.* Overview of the crucial technology research for radar signal sorting[J]. *Systems Engineering and Electronics* (李合生, 韩宇, 蔡英武, 等. 雷达信号分选关键技术研究综述. 系统工程与电子技术), 2005, 27(12): 2035—2040.
- [2] ZHANG Ge-Xiang, HU Lai-Zhao, JIN Wei-Dong. Intra-pulse feature analysis of radar emitter signals[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张葛祥, 胡来招, 金炜东. 雷达辐射源信号脉内特征分析. 红外与毫米波学报), 2004, 23(6): 476—480.
- [3] Kawalec A, Owczarek R. Radar emitter recognition using intrapulse data[C]. Proceedings of 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2004, 2: 435—438.
- [4] WU Jing-Biao, WANG Fang, YU Chun-Lai. Intra-pulse feature extraction of PSK via wavelet transform[J]. *Spaceflight Electronic Warfare* (吴江标, 万方, 郁春来. 基于小波变换法的相位编码信号脉内特征提取. 航天电子对抗), 2005, 21(3): 38—40.
- [5] Lobo A P, Loizou P C. Voiced/unvoiced speech discrimination in noise using Gabor atomic decomposition[C]. In: Proc. of IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003, 820—828.
- [6] ZHANG Wen-Yao. Study on matching pursuit based low-bit rate speech coding[D]. Dissertation. Beijing: Institute of Software Chinese Academy of Sciences (张文耀. 基于匹配跟踪的低位率语音编码研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院软件研究所), 2002.
- [7] Mallat S, Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Trans. On Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397—3415.
- [8] Qian S, Chen D. Signal representation using adaptive normalized Gaussian function[J]. *Signal Processing*, 1994, 36(1): 1—11.
- [9] Zhu M, Pu Y W, Jin W D, *et al.* A Time-frequency atom approach to radar emitter signal feature extraction[C]. Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems, 2006, 615—619.
- [10] Rosa M, Figueras i Ventura, Pierre V. Matching pursuit through genetic algorithms[R]. Signal Processing Laboratories Technical Report 01.02, 2001.
- [11] Tony H. Quantum computing: an introduction[J]. *Computing & Control Engineering Journal*, 1999, 10(3): 105—112.