doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.013

引用格式:胡鑫磊,张国毅,田润澜. 免疫克隆选择算法在雷达信号时频原子分解中的应用[J]. 电讯技术,2015,55(7):779-786. [HU Xinlei, ZHANG Guoyi,TIAN Runlan. Application of Immune Clonal Selection Algorithm in Time-Frequency Atom Decomposition for Radar Signals [J]. Telecommunication Engineering,2015,55(7):779-786.]

免疫克隆选择算法在雷达信号时频原子分解中的应用*

胡鑫磊**,张国毅,田润澜

(空军航空大学信息对抗系,长春130022)

摘 要:针对传统时频原子在雷达信号分解中计算复杂度比较高的问题,提出了一种基于免疫克隆 选择算法的时频原子快速分解方法。首先将 Chirplet 原子库分解为小原子库,然后并行地在每一个 小原子库中搜索最佳原子,搜索过程建模为多参数寻优问题,通过免疫克隆选择算法的克隆、变异、 记忆、替换等操作求解最优值,最后比较每一个小原子库中的最佳原子,将相似度最大的原子作为分 解的最佳原子。仿真实验表明,该方法能够用较少的时频原子表示信号,在大幅减少时频原子搜索 时间的同时,有效地抑制了噪声和交叉项的干扰。

关键词:雷达信号;时频原子分解;免疫克隆选择法

中图分类号:TN971.1 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2015)07-0779-08

Application of Immune Clonal Selection Algorithm in Time–Frequency Atom Decomposition for Radar Signals

HU Xinlei, ZHANG Guoyi, TIAN Runlan

(Department of Information Countermeasures, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: In view of high computational complexity in traditional time-frequency atom decomposition of radar signals, a fast decomposition method based on immune clonal selection algorithm is proposed. Firstly, Chirplet atom dictionary is divided into small atom dictionaries. Then, the best atom is concurrently searched in every small atom dictionary and the searching process is built as an optimization problem, which is solved through cloning, mutation, memory and substitution in immune clonal selection algorithm. Finally, the best atom in every small atom dictionary is compared and the most similar atom is selected as the best decomposition atom. Simulation indicates that this method can extract the feature of signals through few atoms and it decreases the computational time while effectively suppressing noise and time-frequency cross-terms.

Key words: radar signals; time-frequency atom decomposition; immune clonal selection algorithm

1 引 言

伴随着复杂雷达系统的不断发展,依靠传统参数描述这类雷达信号的特征已经不能满足分析需求,提取新的雷达信号特征是急需解决的问题。时频原子分解算法作为稀疏分解的一种形式,可以用

少量的原子表示信号的整体信息和细节信息。该算 法建立在过完备原子库基础上,基本思想是将信号 与原子库中的原子进行内积运算选出与信号最相似 的原子(最佳原子),然后将残差信号作为新信号继 续在原子库中选取新的最佳原子,直到满足终止条

^{*} 收稿日期:2014-12-17;修回日期:2015-04-07 Received date:2014-12-17;Revised date:2015-04-07

^{**} 通讯作者:huxinlei1990@ sina. com Corresponding author:huxinlei1990@ sina. com

件为止。由于具有能够灵活表示信号的整体和局部 特性及没有交叉项干扰等优势,时频原子分解算法 在雷达信号特征提取中得到了广泛应用^[1-2]。

电讯技术

但是原子库的原子数量非常庞大,而且每一次 选取最佳原子的过程都必须进行大量的内积运算, 所以算法的复杂度极高^[3-4]。现在对时频原子分解 方法的热点主要集中在降低计算复杂度方面,改进 的算法主要有两类:一类是使用灵活的原子库减少 单次内积的计算量,另一类是通过改变原子搜索策 略使其不必遍历所有的原子就能寻找到最佳原 子^[5]。

本文在以上两类改进方法的基础上提出一种免 疫克隆选择算法的时频原子快速分解方法。该方法 主要在两个方面进行了改进:一是通过降低原子库 的规模提高搜索的效率,对 Chirplet 原子库进行分 解形成小原子库,这些小原子库同时进行最佳原子 的搜索,最后只要比较每个小原子库的最佳原子即 可得到分解的最佳原子;二是将最佳原子搜索过程 建模为多参数的寻优问题,利用免疫克隆选择算法 寻优能力强、收敛速度快等特点寻找问题的最优解, 进而降低计算的复杂度。仿真结果表明,本文的改 进方法不仅可以大幅缩短搜索最佳原子的时间,而 且能够抑制噪声和交叉项,较好地表示原始信号的 时频特征。

2 原子分解原理

2.1 原子库的建立

时频原子分解算法是在过完备的冗余时频原子 库中选择与信号最相似的一系列原子表示信号的有 用信息,所以原子库既要存在一定的冗余度,又必须 能够自适应地代表信号特性^[6]。本文选取时频聚 集性能比较优越的 Chirplet 原子,由于该类原子增 加了调频率信息,重构信号要比传统 Gabor 原子的 重构信号效果更好。Chirplet 原子的表达式为^[7]

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

式中, g(t)为 Gauss 窗函数, 表达式为 $g(t) = 2^{\frac{1}{4}}e^{-\pi^2}$; a 表示原子的尺度变化, $u \ \pi \xi$ 表示原子的 时间中心和频率中心; c 表示信号在时频平面的调频率。 图 1 为 Chirplet 原子和 Gabor 原子的时域波形 及 WVD 分布时频图。由图可知该原子随时间呈现 线性变化的特性,比传统的 Gabor 原子增加了调频 率参数,更加符合雷达信号的局部特性,这样就可以 用更少的时频原子表示信号。



图 1 Chirplet 原子和 Gabor 原子的时域波形及时频图 Fig. 1 Time-domain graph and time-frequency graph of Chirplet atom and Gabor atom

2.2 时频原子分解原理

目前主要基于匹配追踪算法(MP)进行原子分 解^[8]。设信号为 s,信号长度为 N,时频原子库为 D= {g},g 表示组成时频原子库的各个原子且 ||g || =1。假如 n 为信号分解次数,第 k 次分解信号为 s_{k-1} 且匹配的最佳原子为 $g_k(k=1,2,\dots,n)$ 。首次分 解可表示为

$$|\langle s, g_1 \rangle| = \sup_{g \in D} |\langle s, g \rangle|_{\circ}$$
(2)

式中,〈・,・〉表示向量内积运算。

由此,信号 s 首次分解可以分解为原子 g_1 和残 差信号 s_1 ,即

$$s = \langle s, g_1 \rangle g_1 + s_1 \circ \tag{3}$$

对 s₁ 按照首次分解步骤继续分解,直到达到分 解次数 n,则信号 s 可以表示为

$$s = s_c + s_k = \sum_{k=1}^n \langle s_{k-1}, g_k \rangle g_k + s_k \circ$$
(4)

式中,s。为重构信号,s。为残差信号,g。满足

· 780 ·

 $|\langle s_{k-1},g_{k}\rangle| = \sup_{g \in D} |\langle s_{k-1},g\rangle|, k = 1, 2, \cdots, n_{\circ} (5)$

为了能使选择的原子最大程度地代表信号,传统 MP 算法采取贪心策略进行最佳原子搜索^[9],即每一次选择最佳原子的过程都必须将信号或残差信号与原子库中的每一个原子进行内积运算,而文献 [10]提到当信号采样点数为 N 时,原子个数为 L_p = $\frac{16}{3} \cdot (4N^2 - 3N - 1)$,所以利用贪心算法策略进行原子分解的计算复杂度极高。由于免疫克隆选择算法具有较强的多峰值寻优能力及收敛速度快等优点^[11],本文为了减小原子搜索的计算量,将免疫克隆选择法作为新的原子搜索策略。

3 基于免疫克隆选择算法的 Chirplet 原子 分解

3.1 免疫克隆算法

免疫克隆算法是对自然免疫系统模拟的一种算法,主要来源于淋巴细胞(T细胞和B细胞)的负选择过程和二次响应来实现本体与非本体的自适应判别,即只有识别为抗体的细胞才能被免疫系统保留,不能识别为抗体的细胞不会被选择,而是被其他细胞代替或死亡。该算法借鉴的免疫过程是当有抗原入侵时,借助克隆来增加T细胞从而产生抗体达到清除抗原的目的,而抗原数量又反作用地限制抗体的数量,同时该过程会产生B细胞进行记忆以备抗原再次入侵时可以迅速发起反应,这样每次免疫过程都可以确保最优秀的个体被保留下来,这就为寻优问题快速求解提供了一种思路^[12-14]。

免疫克隆算法主要经历初始化、选择、克隆、变 异和替换等过程^[15]。初始化主要产生抗体集合,对 应于寻优问题的起始解集合;选择是通过计算抗原 与抗体的亲和度选择最佳抗体集合,也就是通过亲 和度函数的计算选择一定数量的最优解,组成最优 解集合;克隆是对抗体进行复制产生临时抗体集合, 即将最优解进行复制;变异是将抗体进行概率变异 以便通过亲和度计算增加最佳抗体的多样性,避免 陷入局部最优加快收敛速度,即通过概率变异重新 计算新抗体的亲和度,将一定数量亲和度高的解作 为记忆细胞;替换是用记忆细胞替换最佳抗体集合 中亲和度低的抗体,也就是更新最佳抗体集合中 的解。

3.2 基于改进免疫克隆算法的 Chirplet 原子分解

Chirplet 原子分解过程是从 D 中寻找一个与残 差信号最相似的原子,而每一个原子都由 4 个参数 组成,所以 Chirplet 时频原子分解的过程可以看作 是多参数寻优问题,该过程可以描述为

 $\max \left\{ f(a, u, \xi, c) = \left\langle s_{k-1}, g_k \right\rangle \right\} \quad \text{s. t.} \quad g_k \in D_{\circ}$

(6)

但是过完备原子库 D 中的原子数量巨大,只能 通过人工智能方法进行搜索,所以本文提出了改进 免疫克隆算法的原子搜索方法。该算法先将原子库 D划分为 m 个小原子库 $\{D\} = \{\{D_1\}, \{D_2\}, ..., \{D_m\}\}$ 且每一小原子库 $D_i(i=1,2,...,m)$ 的原子不 重叠,然后在 $D_i(i=1,2,...,m)$ 中利用免疫克隆选 择法寻找出待优解,最后通过比较 m 个待优解寻找 目标的最优解。由于该方法将 D 进行了划分使得 原子库中原子的数量大大地减少,而且对所有 D_i 同 时进行免疫克隆算法寻优,这样能够并行搜索从而 提高效率。m 需要按照原子库中原子的个数进行选 取,本文通过综合考虑求取待优解的速度和最终待 优解比较的效率两方面因素,选取 m 的范围为 [100,1000]。由于每一个 D_i 的计算过程相同,所 以只给出其中一个 D_i 的具体计算步骤。

(1)初始化

设置迭代次数 gen, 在 D_i 中随机生成抗体集合 H, 且 H 中抗体的种群规模为 N_{\circ}

(2)选择

取残差信号与时频原子的相似度 *F* = $\langle s_k, g \rangle = \langle s_k, g \rangle / \| s_k \| \cdot \| g \| = \langle s_k, g \rangle / \| s_k \|$ 为抗体-抗原亲和度计算公式,将 *H* 中的每一抗体通过亲和度函数计算与抗原的亲和度,对亲和度进行降序排列选择出亲和度最大的 *n* 个抗体组成新集合 *H_n*(*n* < *N*),剩余亲和度较低的抗体组成集合 *H_L*。

(3)克隆

对抗体 H_n 进行克隆操作构成临时克隆集合 H_e,克隆数量的计算公式为^[16]

$$\beta_{i} = \operatorname{round}(\alpha_{c} \cdot \frac{F_{i}}{i \times \sum_{i=1}^{n} F_{i} / n} + b)_{\circ}$$
(7)

式中, α_e 为大于1的比例系数,round(•)表示四舍 五入取整,b为大于1的常量。由式可知克隆抗体 的数量与亲和度成正比,与排序的位置成反比,而且 通过常量b能够保证每一抗体都有一定数量的克 隆。这样能避免初期抗体亲和度太强而使最优解陷 入局部最优,也能防止克隆后期亲和度差距减少而 使算法计算速度停滞。

(4) 变异

以一定的概率对 H_e 进行高频变异,若变异后抗体的亲和度高于 H_e 抗体的亲和度,则用变异抗体取代 H_e 抗体,变异后形成一个抗体新集合 H_i。

(5) 替换

将 H_i 中每个抗体的亲和度进行排序,选取(N-n)个亲和度最高的抗体作为记忆细胞集合 R,用 R 代替 H 中的 H_L。判断是否满足终止条件,如果不满 足转入步骤(2)继续迭代;如果满足停止寻优过程。 算法通过设置最大的迭代数作为终止判断的条件。

根据以上分析,图 2 给出了 Chirplet 原子分解 中原子搜索算法的总体流程。



图 2 最佳原子搜索流程图 Fig. 2 Flow chart of searching best atom

4 仿真实验

为了验证算法的有效性,本文对正弦调频 ·782·

(SNLFM)、二相频率编码(BFSK)和双线性调频 (DLFM) 三类信号进行仿真实验,实验所用计算机 为 AMD A8-4500M 1.9 GHz/4 GHz, 仿真环境为 MATLAB 2013b。仿真信号参数设置:采样点数 N为512; 信噪比为0 dB; 信号幅度均为1; SNLFM 信 号的归一化最小频率为0.1,归一化最大频率为 0.3, 归一化起始频率为 0.2; BFSK 信号的两个归一 化频率随机选取,以64 点为一个编码周期;DLFM 信号的归一化起始频率为0.1,归一化中点频率为 0.3. 归一化终点频率为 0.1。使用 Chirplet 原子库 对信号进行分解和重构,原子分解的个数为5~30, 步进为5,以残差信号的衰减值 D. 重构信号与原信 号的相似度 C_N 和均方误差(MSE),消耗时间 T 为 指标评价原子分解的性能指标;免疫克隆选择过程 的终止迭代次数 gen 为 100,由于采样点数为 512 时 原子库中原子个数约为5 584 208,所以每个小原子 库的原子个数设为10 000,起始抗体个数为 100,H。 中的n为50, α_a =200,b=20,变异概率为0.01。

当信号 *s* 分解 *k* 次后,残差信号 *s*_k 的衰减值计 算公式为^[17]

$$D_r = \lg \frac{\parallel s_k \parallel}{\parallel s \parallel} \quad (8)$$

重构信号 s。与原信号 s 的相似度定义为^[17]

$$C_{N} = \frac{\langle s, s_{c} \rangle}{\parallel s \parallel \cdot \parallel s_{c} \parallel}$$
(9)

重构信号 s, 与原信号 s 的 MSE 定义为^[18]

$$MSE = \sum_{i=0}^{N-1} [s(t) - s_c(t)]^2 / N_o \qquad (10)$$

图 3 为信噪比在0 dB时信号的 WVD 时频图及 利用 15 个 Chirplet 原子对信号进行分解后的 WVD 叠加时频图,表1 给出了利用 15 个和 30 个 Chirplet 原子分解重构信号的 *D*_r,*C*_N 及 *T*。由图可知,仅仅 利用 15 个 Chirplet 原子就可以将原信号进行重构, 同时由于只对原子的时频 WVD 进行叠加,可使重 构后的信号能有效抑制交叉项和噪声的影响。由表 1 可知,利用 15 个原子重构的三种信号与原信号的 相似度都能大于 0.85,残差信号衰减值都小于 -0.55;利用 30 个原子重构信号时,衰减值都小于 -1,相似度都大于 0.95,计算时间约为 15 个原子分 解时的 3~5 倍,由此可知分解原子的个数越多越能 增加与原信号的相似度,但是相似度的增加是以计 算时间成倍增加为代价的,所以原子分解个数的选 取必须考虑计算时间成本。



(c)SNLFM 信号

图 3 三种信号的 WVD 时频图及原子重构时频图(15 个原子) Fig. 3 WVD of three kinds of signals and time-frequency graph of atom's reconstructed signal(15 atoms)

表 1 Chirplet 原子分解的各参数											
Table 1 Parameters of Chirplet atom decomposition											
信号	原子 分解数	D_r	C_{N}	T/s							
SNLFM	15	-0.580	0.8794	9.81							
	30	-1.124	0.980 0	31.45							
BFSK	15	-0.590	0.857 2	8.20							
	30	-1.018	0.960 0	34.70							
DLFM	15	-0.590	0.884 8	6.71							
	30	-1.016	0.9900	35.60							

图 4 和图 5 给出了三种信号原子分解重构中衰 减值和相似度随原子分解个数的变化情况,由图可 知随着分解原子个数的增加重构信号的相似度会增 加,残差信号的衰减值会减小。相似度达到 0.9 以 上时,利用 20 个原子就可以表示信号的信息,此时 的衰减值为-0.7~-0.6,残差信号的能量仅为信号 总能量的 0.2~0.25,这也就从能量方面证明了原 子分解方法的有效性。







图 5 三种信号的相似度与原子分解个数的关系 Fig. 5 Relationship between C_N and atom decomposition amount

为了验证本文原子搜索方法的计算速度和重构

信号的性能,利用传统的 MP 算法、遗传算法、蚁群 算法与本文的免疫克隆法进行计算时间和 MSE 对 比,结果如表 2 和图 6 所示。

由表2可知本文的免疫克隆法可以大幅度地提 高原子搜索时间,比 MP 算法策略的计算时间提高 30~50倍: 而蚁群算法仅仅比贪心算法提高 2~4 倍,遗传算法比 MP 算法提高 10~20 倍。主要有两 个方面原因:一是本文将原子库分解为小原子库,可 以使搜索过程并行地在各个小原子库中进行:另一 方面是本文采用了免疫克隆选择算法搜索策略,通 过免疫克隆算法的克隆、变异、记忆细胞选择等过程 可以改善原有算法的搜索过程必须遍历每一个原子 的缺点。蚁群算法尽管也可以找到最优解,但是其 个体运动是随机的,本文群体规模(原子个数)较 大,使得蚁群算法找到最优解比较困难;遗传算法尽 管可以提高搜索时间,但是该算法也是随机地进行 搜索,没有进行亲和度计算和记忆,所以比免疫克隆 选择方法的搜索速度慢。而且由表2可知,用相同 数量的原子进行分解时,本文算法对 BFSK 和 DLFM 信号的计算时间要略小于 SNLFM,主要因为本文采 用 Chirplet 原子库,对线性调频类信号能表现出更 好的搜索特性。

信号	算法 -						
		5个原子	10 个原子	15 个原子	20 个原子	25 个原子	30个原子
SNLFM	MP 算法	54.30	179.80	346.20	463.60	538.30	640.20
	蚁群算法	25.30	85.20	153.40	231.10	230.50	322.80
	遗传算法	5.20	19.20	30.80	42.40	55.60	61.50
	免疫克隆法	1.28	4.18	9.81	14.52	27.62	31.45
BFSK	MP 算法	50.70	160.20	330.50	450.30	524.40	618.20
	蚁群算法	23.40	63.80	130.20	210.30	245.50	300.10
	遗传算法	4.10	15.60	21.40	32.60	55.40	62.70
	免疫克隆法	1.13	3.23	8.20	13.60	25.21	34.70
DLFM	MP 算法	40.20	130.40	318.60	480.10	553.70	633.50
	蚁群算法	19.80	51.40	112.10	223.80	254.50	312.70
	遗传算法	5.50	12.30	19.70	31.10	47.10	52.80
	免疫克隆法	0.81	2.96	6.71	13.74	19.95	35.60

表 2 不同原子搜索策略的计算时间对比 Table 2 Comparison of computing time among different search methods







由图 6 可知,免疫克隆算法重构信号 s_e 的 MSE 与其他三种算法的 MSE 变化趋势一致,且这些算法 的 MSE 都比较小,所以这些算法均可以搜索到最优 解(最佳原子),利用最佳原子重构的信号也可以准 确表示原信号。综合以上分析,免疫克隆算法可以 在提高原子搜索时间的同时不会引起重构信号性能 的下降。

5 结束语

本文在 MP 算法策略原子分解方法的基础上提 出了一种基于免疫克隆选择算法的 Chirplet 原子分 解方法,主要从两个方面减少计算的复杂度:首先将 原子库进行分解以便能够在每一个小原子库中寻 优;其次,利用了免疫克隆选择法,由于该算法在优 化问题中具有良好的全局搜索能力和快速的局部搜 索能力,可以大幅度提高最佳原子搜索的时间。仿 真证实,本文方法可以使最佳原子搜索时间大幅缩 短,与 MP 算法、蚁群算法和遗传算法比较处理速度 明显提高,而且仿真实验验证了时频原子分析结果 不存在交叉项干扰,能够在雷达信号的细微分析中 提取出比传统 Cohen 类时频分布更精确的特征信 息,可以作为雷达信号后期分选及识别的依据。

参考文献:

 Zhu M, Wu S, Fu K, et al. Radar signals clustering based on spectrum atom decomposition and kernel method [C]// Proceedings of 2013 International Conference on Measurement, Information and Control. Harbin: IEEE, 2013,2: 843-846.

- [2] Liu J, Meng H, Liu Y, et al. A mutual information-based time-frequency atom extraction algorithm for radar emitter recognition [C]// Proceedings of 2011 Radar Conference. Kansas City, MO; IEEE, 2011; 602-605.
- [3] Meng Q, Sun N. A comparison study on Gabor, Chirplet, FMm let atom databases for ECG signal processing[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Beijing: IEEE, 2009:1-3.
- [4] Tao L. Study on casting ultrasonic signal extraction algorithm based on improved MP[C]// Proceedings of 2010
 2nd International Conference on Future Computer and Communication. Wuhan: IEEE, 2010:115-118.
- [5] 方纯,张葛祥,高祥. 快速时频原子方法在辐射源信号
 中的应用[J]. 微计算机信息,2010,26(7):216-218.
 FANG Chun, ZHANG Gexiang, GAO Xiang. A fast time frequency atom method for emitter signals[J]. Microcomputer Information,2010,26(7):216-218. (in Chinese)
- [6] Nagaraj S B, Stevenson N J, Marnane W P, et al. Neonatal seizure detection using atomic decomposition with a novel dictionary[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2014, 61 (11): 2724-2732.
- [7] Guo J. Adaptive time-frequency parameterization of frequency-hopping signals based on evolutionary algorithm
 [C]// Proceedings of 2010 Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization.
 Huangshan: IEEE, 2010: 279-282.
- [8] Wang J, Wang L, Wang Y. Seismic signal fast decomposition by multichannel matching pursuit with Genetic Algorithm[C]// Proceedings of 2012 IEEE 11th International Conference on Signal Processing. Beijing: IEEE, 2012: 1393-1396.
- [9] 程吉祥,张葛祥,唐承志.复杂体制雷达辐射源信号时频原子特征提取方法[J].西安交通大学学报,2010,44(4):108-113.
 CHENG Jixiang, ZHANG Gexiang, TANG Chengzhi. A novel approach of feature extraction for advanced radar emitter signals using time-frequency atom decomposition [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2010,44(4):108-113.(in Chinese)
- [10] 朱明. 复杂体制雷达辐射源信号时频原子特征研究
 [D]. 成都:西南交通大学,2008:55-56.
 ZHU Ming. Study on time-frequency atoms features for advanced radar emitter signals [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2008:55-56. (in Chinese)
- [11] Dai H, Yang Y, Li C. Hybrid quantum crossover based immune clonal algorithm and its application [C]//Proceedings of 2014 10th International Conference on Natural Computation. Xiamen: IEEE, 2014: 390-395.

- [13] Al-Otaibi S T, Ykhlef M. An artificial immune system for job recommendation [C]// Proceedings of 2014 International Work Conference on Bio – inspired Intelligence(IWOBI). Liberia Costa: IEEE,2014: 37-43.
- [14] Costin H, Bejinariu S I. Medical signal processing by means of immune algorithms [C]// Proceedings of 2013
 E-Health and Bioengineering Conference (EHB). Iasi, Romania: IEEE, 2013:1-4.
- [15] 牛永洁,马亚玲.一种改进的免疫克隆选择算法[J].
 电子设计工程,2014,22(4):23-25.
 NIU Yongjie, MA Yaling. An improved immune clonal selection algorithm[J]. Electronic Design Engineering,
- 2014,22(4):23-25.(in Chinese)
 [16] 吴建辉. 混合免疫优化理论与算法及其应用研究
 [D]. 长沙: 湖南大学,2013:34-35.
 WU Jianhui. Research on theories and algorithms of hybrid immune optimization and its applications [D]. Changsha: Hunan University,2013:34-35.(in Chinese)
- [17] 潘杰,张葛祥,刘章军,等. 雷达辐射源信号时频原子 库研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2011,23(4):437-442.

PAN Jie, ZHANG Gexiang, LIU Zhangjun, et al. Timefrequency atom research on radar emitter signal [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2011, 23 (4): 437-442. (in Chinese) [18] 王成梅. 地震信号稀疏分解快速算法及原子库选择 研究[D]. 成都:西南交通大学,2007WANG Chengmei. The research on fast algorithm of

seismic signal sparse decomposition and atomic dictionary selection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2007. (in Chinese)

作者简介:



胡鑫磊(1990一),男,内蒙古呼和浩特 人,2013年于空军航空大学获学士学位,现为 硕士研究生,主要研究方向为复杂调制雷达 信号处理;

HU Xinlei was born in Hohhot, Neimenggu

Autonomous Region, in 1990. He received the B. S. degree from Aviation University of Air Force in 2013. He is currently working toward the M. S. degree. His research concerns complex modulation radar signal processing.

Email:huxinlei1990@sina.com

张国毅(1965—),男,吉林长春人,教授、博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理;

ZHANG Guoyi was born in Changchun, Jilin Province, in 1965. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns radar signal sprocessing.

田润澜(1973—),女,吉林长春人,副教授,主要研究方 向为雷达信号处理。

TIAN Runlan was born in Changchun, Jilin Province, in 1973. She is now an associate professor. Her research concerns radar signal processing.