

# 基于 MP 算法的快速地震信号谱分析

刘继承<sup>1</sup>, 富爽<sup>1,2</sup>

(1. 大庆石油学院 电气工程学院, 黑龙江 大庆 163318;  
2. 黑龙江八一农垦大学 信息技术学院, 黑龙江 大庆 163319)

**摘要:** MP(Matching Pursuits)算法以其灵活的自适应性,取得了广泛的应用,但依然存在计算量大的应用瓶颈问题。为了解决传统 MP 算法运算量大的问题,首先对 MP 算法的原理进行了介绍,然后针对其计算量大的问题提出了一种基于遗传算法的快速算法,有效地降低了 MP 算法的运算量,较好地解决了运算量大的问题。最后利用 MP 算法对地震信号进行了谱分析,消除了 Wigner 算法中的交叉项,从而有效地揭示了地震信号的时频信息。结果表明,改进后的 MP 算法可以作为地震信号谱分析的有效算法,为烃类检测和储层描述等提供有效的手段。

**关键词:** 匹配追踪;遗传算法;谱分析

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)07-0231-04

## Fast Spectral Analysis of Seismic Signal Based on Matching Pursuits Algorithm

LIU Ji-cheng<sup>1</sup>, FU Shuang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China;

2. Department of Electronics and Communication Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** Because of the flexible self-adaptation, matching pursuits algorithm has been applied to many areas, but still has the problem of huge computational cost, so it is hard to be adopted in practice. To resolve the problem of huge computational cost, introduced the principle of matching pursuits algorithm firstly. A fast algorithm based on genetic algorithm was proposed secondly. This algorithm could decrease the amount of the computation effectively and solve the problem of huge computation. At the end, a segment of seismic signal was analyzed in time-frequency plane. In such a way the interference term in wigner distribution was eliminated, so the time-frequency information in the signal could be revealed. The result showed that the modified MP algorithm could be used as an efficient spectral analysis algorithm of seismic signal, and provided an effective means for hydrocarbon detection and reservoir description.

**Key words:** matching pursuits; genetic algorithm; spectral analysis

## 0 引言

MP(Matching Pursuits)算法,也称匹配追踪,由 Mallat 和 Zhang<sup>[1]</sup>于 1993 年提出,作为信号稀疏分解中应用较普遍的一种算法,它具有较高的时频分辨率、信号结构的参数表示、暂态结构的局部自适应性等优良的特性<sup>[2]</sup>,并可以根据对待处理信号的先验知识,来选择合适的字典,对字典进行改进。从广义上说,也可以根据待处理信号的特征来创造新的字典。因此,其对信号灵活的自适应的表达是传统的傅里叶变换或小

波变换无法比拟的,因此,它以灵活的自适应性,一经提出,便被迅速地应用于信号处理的多个领域<sup>[3]</sup>,如图像表示、分析和编码、视频编码和压缩、语音与音频信号处理、特征提取与目标识别、医学信号处理、地震信号处理以及谱分析<sup>[4]</sup>等。

## 1 MP 算法原理

MP 算法是一种贪婪算法,其基本思想是基于一组过完备的基(也称原子库或时频原子字典)的信号分解。它从一个过完备的原子库出发,采用某种策略每次选取与信号最匹配的基(也称为原子或时频原子),最终将信号表示为若干时频原子的线性组合。同正交扩展一样,虽然 MP 算法属于非线性迭代过程,但能量有限的特点可以保证它的收敛性。具体方法如下<sup>[5]</sup>:

收稿日期: 2009-11-11; 修回日期: 2010-02-20

基金项目: 第三届黑龙江省新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 刘继承(1970-),男,博士,教授,研究方向为信号处理技术。

设待分解信号  $f$ ,  $D$  为过完备原子库,  $g_r$  为  $D$  中的原子,  $g_r \in D$ , 且  $\|g_r\| = 1$ 。MP 算法首先从过完备原子库  $D$  中选择一个与信号  $f$  最为匹配的原子, 即选取原子库中的一个原子  $g_{r_0}$ , 使得  $|\langle f, g_{r_0} \rangle| = \sup_{g_r \in D} |\langle f, g_r \rangle|$ 。这样信号  $f$  可以表示成:  $f = \langle f, g_{r_0} \rangle g_{r_0} + R^1 f$ , 其中  $R^1 f$  表示信号  $f$  经过一次分解后所剩的残差。然后对残差  $R^1 f$  进行同样的分解, 继续从过完备原子库  $D$  中选取与残差  $R^1 f$  最匹配的原子  $g_{r_1}$ , 满足  $|\langle R^1 f, g_{r_1} \rangle| = \sup_{g_r \in D} |\langle R^1 f, g_r \rangle|$ , 这样残差  $R^1 f$  可以表示成  $R^1 f = \langle R^1 f, g_{r_1} \rangle g_{r_1} + R^2 f$ 。接下来继续对残差  $R^2 f$  进行分解, 得到最匹配的原子  $g_{r_2}$  和残差  $R^3 f$ , 然后再对残差  $R^3 f$  进行分解, 以此类推。经过  $n$  次分解, 得到  $n$  个最匹配的原子, 因此信号  $f$  就可以表示为:  $f = \sum_{k=0}^{n-1} \langle R^k f, g_{r_k} \rangle g_{r_k} + R^n f$ , 这样就将信号  $f$  表示成  $n$  个原子的线性组合, 其中逼近误差为  $R^n f$ , 随着不断的分解迭代过程,  $R^n f$  能量呈逐渐衰减趋势, 因此, 如果在不限迭代次数的前提下, 且原子库是过完备的, 那么分解式中的  $n$  个原子的线性组合则能够以任意的精度逼近原始信号  $f$ 。

由于 Gaussian 函数具有良好的时频聚集性, 如图 1 所示, 因此文中采用的原子库为 Gabor 原子库<sup>[6]</sup>, 其中的每一个 Gabor 原子都是由 Gaussian 函数经过伸缩、平移和调制得到的。设  $g(t) = e^{-\pi^2 t^2}$ , 那么经过伸缩、平移和调制之后得到的 Gabor 原子为:

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

设  $\gamma = (s, u, v, w)$  是 Gabor 原子库中的原子索引参数, 其中  $s$  为尺度参数、 $u$  为位移参数、 $v$  为频率参数和  $w$  为相位参数。

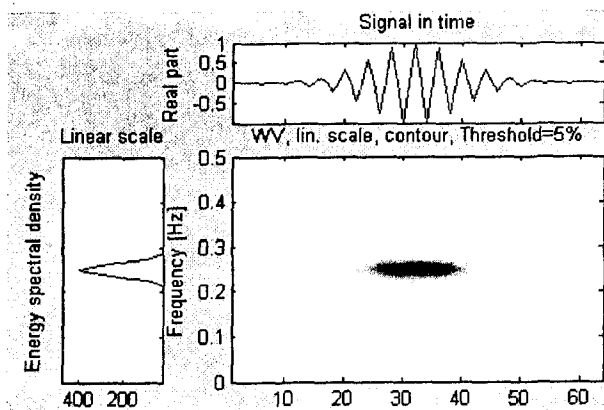


图 1 Gabor 原子及其时频分布

## 2 遗传算法原理

遗传算法是模仿自然界生物进化机制发展起来的

随机全局搜索和优化方法, 通过对生物遗传和进化过程中的竞争选择、交叉、变异等机理的模仿, 来完成对问题最优解的搜索过程, 并能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识, 自适应地控制搜索过程以求得最优解。遗传算法以其实用、高效和鲁棒性强等特点, 在函数优化、组合优化、自动控制、人工生命和机器学习等领域获得了广泛的应用。

遗传算法的主要运算过程如下<sup>[7]</sup>:

(1) 编码: 从解空间中的解数据到基因的映射成为编码。

(2) 初始群体产生: 随机产生  $N$  个个体作为初始群体。

(3) 适应度值评价检测: 适应函数表明个体或解的适应度。对于不同的具体问题, 适应函数的定义方法也不同。

(4) 选择: 根据个体的适应度, 按照一定的方法, 从群体中选择出优良的个体遗传到下一代群体中, 使它们有机会作为父代为下一代繁殖子孙。

(5) 交叉: 将群体内的各个个体随机搭配成对, 对于每个个体, 以某个概率 (称为交叉概率) 交换它们之间的部分染色体, 从而得到新一代个体。

(6) 变异: 群体中的某些个体以某个概率 (称为变异概率) 随机地改变某个或某些基因座上的基因, 产生新的个体。

(7) 终止条件判断: 如果满足终止条件, 则输出最优解, 终止运算。

## 3 基于遗传算法的快速 MP 算法

MP 算法以其对信号灵活的自适应分解方式等优点, 被广泛地应用于信号处理的多个领域, 但该算法在应用上仍存在瓶颈问题, 即过为巨大的计算量, 因此必须对其进行改进。在传统的 MP 算法中, 主要的运算量来自每次选取与信号或残差最匹配的原子, 即寻优问题, 因此可将遗传算法用于 MP 算法中的选取最佳原子的过程, 以减少运算量<sup>[8]</sup>。

在利用遗传算法对 MP 算法进行优化的过程中, 染色体为 Gabor 原子的四个索引参数, 即尺度参数  $s$ 、位移参数  $u$ 、频率参数  $v$  和相位参数  $w$ , 对四个参数进行联合编码, 采用直接值编码方式, 每个个体对应一组四个索引参数, 即对应着过完备原子库中的某一个 Gabor 原子, 采用 Mallat 索引算法<sup>[9]</sup>, 适应度函数为信号或残差与原子的内积  $|\langle R^k f, g_{r_k} \rangle|$ , 适应度值反映了信号或残差与原子的相似程度。算法首先随机产生一个个体数为  $N$  的种群, 然后通过个体的生存竞争、优者杂交、最适应个体变异, 并采用“父子混合选

择”策略,即最优个体直接进入下一代,不断进行进化,最终挑选出最适应个体。然而由于进化代数的限制,得到的往往不是全局最优解,而是全局最优解的近似<sup>[10]</sup>,因此为了进一步优化寻优过程,本算法在通过遗传算法寻优之后,又采用下山单纯形法对结果进行进一步优化,改善其局部搜索能力。下山单纯形法或称 Nelder - Mead 法,于 1965 年由 Nelder 和 Mead 提出,是用于优化多维无约束问题的一种数值方法。文中将多元函数的下山单纯形法嵌入遗传算法,加强了算法的局部搜索能力,进一步优化了寻找最佳原子的过程。

算法流程图如图 2 所示。

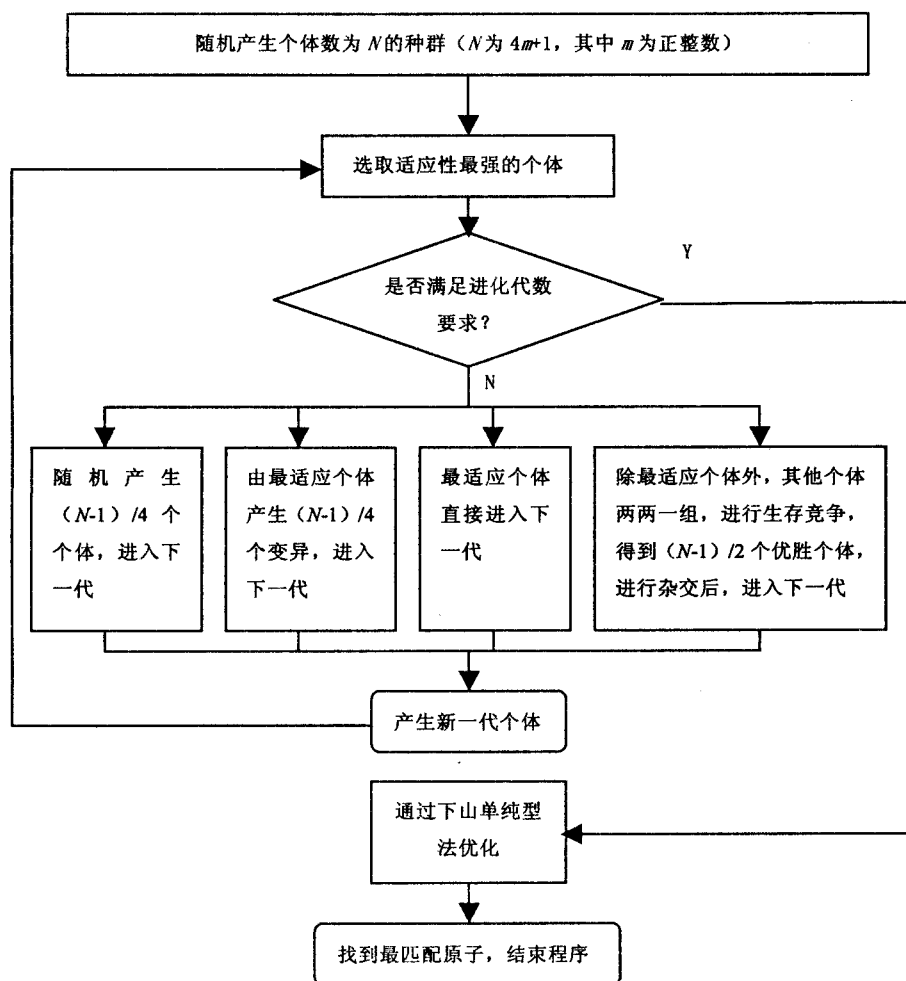


图 2 基于遗传算法的快速 MP 算法流程图

试验中对一段 512 长的地震信号进行 MP 分解。当使用 30 个原子进行迭代时,所需时间为 7.8750s,而传统的 MP 算法需时间为 1742.0s,该算法速度比传统算法提高 221 倍;当使用 50 个原子进行迭代时,所需时间为 12.9060s,而传统的 MP 算法需时间为 2906.5s,该算法速度比传统算法提高 225 倍。可以看出,改进后的 MP 算法比传统的 MP 算法速度提高了

200 多倍。图 3 为进行 MP 分解的原始信号及由 MP 分解后的原子构成的重建信号,图 4 为进行 50 次分解后的残差,可以看出,经过匹配追踪重建的信号能够很好地表述原信号的大部分信息。

#### 4 地震信号谱分析

谱分析是地震数据处理中一种非常重要的信号处理方法,把地震数据变换到频率域是一系列重要地震资料处理算法和解释技术的基础<sup>[11]</sup>。文中算法实现利用 MP 算法对地震信号进行谱分析,通过计算每个分解后所得原子的 WVD,然后将所有原子的时频分布叠加到一起构成整个信号的时频分布,来分析信号的时频分布和频谱能量分布。

由 WVD 的定义可知,一个连续时间信号  $f(t)$  的 WVD 为:

$$W[f, f](t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f\left(t + \frac{\tau}{2}\right) f^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

由 MP 算法原理可知,信号  $f(t)$  可以分解成原子的线性集合,当原子数足够大时,可以完全逼近原信号,表示如下:

$$f = \sum_{n=0}^{+\infty} \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n}$$

由于 WVD 是二次的,因此对上式进行 WVD,结果为:

$$Wf[t, \omega] = \sum_{n=0}^{+\infty} |\langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle|^2 Wg_{\gamma_n}(t, \omega) + \sum_{n=0, m=0, m \neq n}^{+\infty} \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle \cdot \langle R^m f, g_{\gamma_m} \rangle^* W[g_{\gamma_n}, g_{\gamma_m}](t, \omega)$$

可以看出,其 WVD 产生了交叉项。为了除掉交叉项,获得更清晰的时频平面的能量分布,把交叉项去掉,直接用第一项来表示信号的时频平面的能量分布,并定义:

$$Ef(t, \omega) = \sum_{n=0}^{+\infty} |\langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle|^2 Wg_{\gamma_n}(t, \omega)$$

这样,就可以首先将信号通过 MP 算法展开成一组最匹配时频原子的线性组合,然后通过 WVD 计算每一个原子的时频分布,最后将所有原子的时频分布

线性叠加得到整个信号的时频分布。这种基于匹配追踪的谱分解方法既保持了 WVD 分辨率高的特点,又避免了直接通过 Wigner 和 Cohen 类分布求原信号的时频分布时的交叉项,从而得到高质量的时频平面的能量分布,进行谱分解。

图 5 为对一段实际采集的 512 长地震信号进行谱分析。从结果可以看出,基于 MP 算法的地震信号谱分析具有良好的时频聚集性,并且算法有效地消除了 Wigner 算法中扰人的交叉项,为地震信号处理和地震资料解释提供了有效的手段。

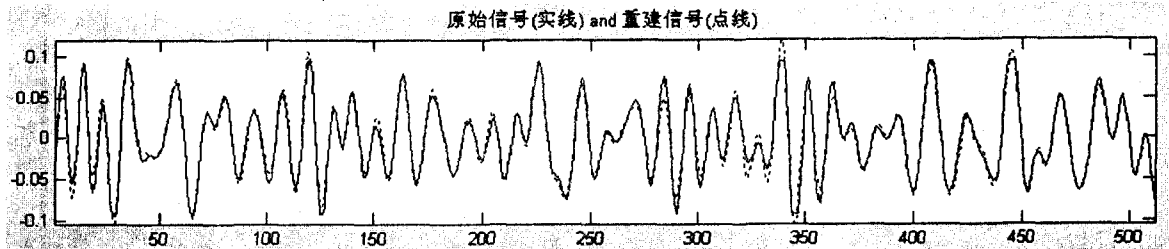


图 3 原始信号及由 MP 分解后的原子构成的重建信号

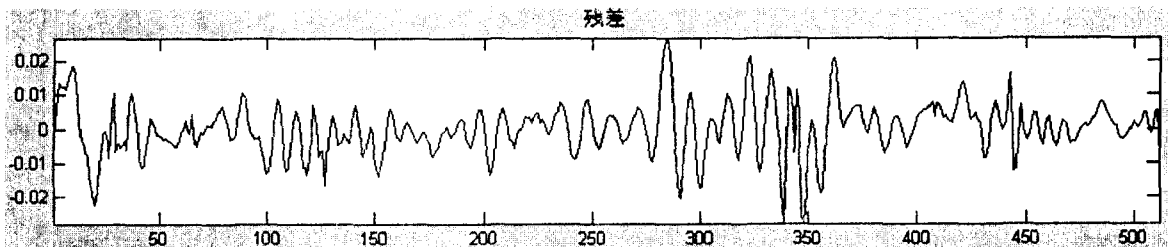


图 4 进行 50 次分解后的残差

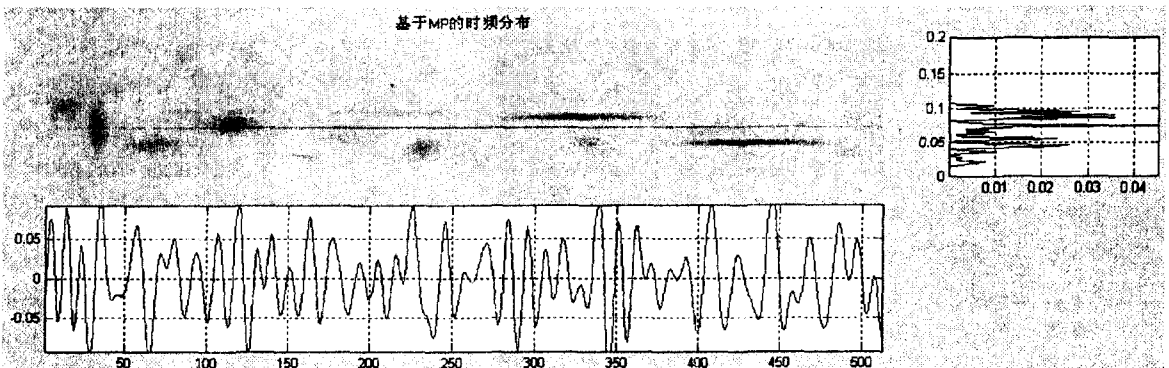


图 5 基于 MP 的地震信号谱分析

## 5 结束语

文中算法有效地降低了传统 MP 算法的运算量,通过引入遗传算法使得运算量得到了几百倍的降低。文中还通过在遗传算法中嵌入下山单纯型算法使寻找最佳原子的过程得到进一步优化,并基于 MP 算法对地震信号进行谱分析,结果可以看出其时频分布具有良好的时频聚集性,并且有效地消除了 Wigner 算法中的交叉项。因此,该算法可以对地震信号进行快速谱分析,以刻画不同频率下的岩石响应,为烃类检测和储层描述等提供有效的手段<sup>[12]</sup>。相信随着科学技术的不断发展以及广大学者的不断深入研究,一定会促进 MP 算法的进一步发展,使其在各个领域得到更为广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] Mallat S, Zhang Z. Matching pursuit with time - frequency dictionaries[J]. IEEE Trans. Signal Process, 1993, 41(12): 3397 - 3421.
- [2] 周颖,王涛,冯焕清. 匹配追踪算法及其在 MI-EEG 的应用[J]. 电路与系统学报, 2005, 10(4): 37 - 41.
- [3] 张文耀. 基于匹配跟踪的低速率语音编码研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(软件研究所), 2002.
- [4] Castagna J P, Sun Shengjie. Comparison of spectral decomposition methods[J]. Eage, 2006, 24: 75 - 79.
- [5] 邵君. 基于 MP 的信号稀疏分解算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [6] 陈发宇, 尚永生, 杨长春. Matching Pursuit 方法综述[J]. 地

(下转第 239 页)

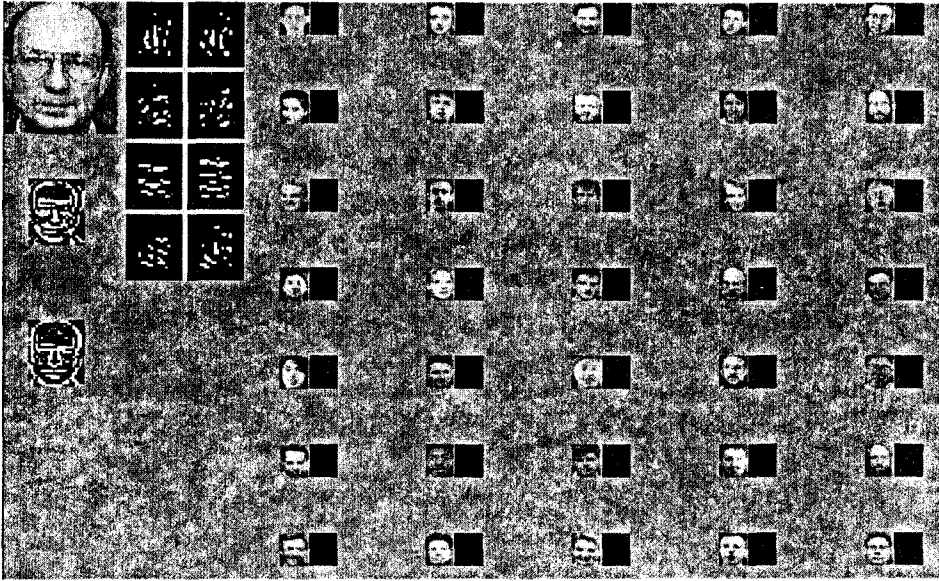


图5 人脸识别结果

在 Linux 下 KDevelop 平台之上,对 400 张人脸图(公开人脸数据库)做了识别测试,首先将这 400 张图像放入网络训练,然后将生成的权值矩阵替换原始的权值,将这 400 张图像放入网络识别。实验表明,对于训练后的图像,网络均能按照要求对应识别,此 400 张人脸图识别中,识别结果的成功率为 100%。

#### 4 结束语

随着研究的深入,传统神经计算的局限性已经变得明显起来。分析原因,全并行计算和固定的连接结构是根源所在。SpikeNet 作为目前最新的神经网络成果,克服了传统神经网络模式带来的不便性。总的来说,从传统网络到 SpikeNet 是一项创新的科研成果。但是,目前的 SpikeNet 还不能很好地模拟快速视觉的信号处理,还有很多的问题有待解决。

#### 参考文献:

[1] 李 伟.人脸识别算法在智能手机上的实现[J].计算机技

术与发展,2008,18(1):161-163.

[2] 沈 虹.基于 Spike 神经元的神经网络及其股市预测模型[J].商场现代化,2008(12):248-249.

[3] 衣文文,杨彬彬,胡彦磊,等.一种基于外形区域的图像配准方法与实现[J].计算机技术与发展,2008,18(4):1-4.

[4] 石争浩.神经网络图像匹配技术研究[D].西安:西安微电子技术研究所,2004.

[5] 吴健康.神经网络图像识别[R].合肥:中国科学技术大学,1990.

[6] 李启娟,李金屏.基于轮廓信息的人脸检测[J].计算机技术与发展,2008,18(9):108-111.

[7] 孙晓玲,侯德文,储凡静.人脸识别中的眼睛定位方法[J].计算机技术与发展,2008,18(10):46-48.

[8] Thorpe S, Delorme A, VanRullen R. Spike-Based Strategies for Rapid Processing[J]. Neural Networks, 2001, 14(6-7):715-725.

[9] VanRullen R, Gautrais J, Delorme A, et al. Face processing using one spike per neurone[J]. Biosystems, 1998, 48(1-3):229-239.

[10] Delorme A, Thorpe S. SpikeNET: an event-driven simulation package for modelling large networks of spiking neurons[J]. Network, 2003, 14:613-627.

[11] Oram M W, Perrett D I. Time course of neural responses discriminating different views of the face and head[J]. Neurophysiol, 1992, 68:70-84.

[12] Thorpe S J, Gautrais J. Rank Order Coding[C]//Computational Neuroscience: Trends in Research 1998, New York: Plenum Press, 1998:113-118.

(上接第 234 页)

球物理学进展,2007,22(5):1466-1473.

[7] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2005:11-13.

[8] 张跃飞.基于稀疏分解的图像压缩[D].成都:西南交通大学,2006.

[9] 陈发宇,杨长春.基于 MP 方法的地震信号快速分解算法[J].地球物理学进展,2007,22(6):1692-1697.

[10] 马国田,梁昌洪.基于混合遗传算法的宽带阶梯阻抗变换

器的优化设计[J].西安电子科技大学学报,1999,26(1):8-12.

[11] 陈学华.时频分布与地震信号谱分析研究[D].成都:成都理工大学,2006.

[12] Castagna J P, Sun S, Siegfried R W. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons[J]. The Leading Edge, 2003, 22:120-127.