

中国科学技术大学学报

第 48 卷 第 9 期(总第 305 期) 2018 年 9 月

目 次

· 计算机科学与技术 ·

- 强噪声背景下微弱核脉冲信号提取方法 张江梅,王坤朋,季海波,等(691)
- 一种应用于 SRAM 中的高速电压模型灵敏放大器(英文)..... 刘康生,虞致国,王 恬,等(696)
- 基于 ROS 和 CANopen 协议的控制器实时通信系统构建 贾鹏飞,王容川,徐林森,等(703)
- 一种循环谱域 GPS 卫星导航信号抗干扰方法 胡 毅,蔚保国,邓志鑫,等(711)
- FCD 大数据并行处理的动态任务调度算法 陈 锋,张 智,李琴剑,等(718)
- 剪枝技术在占优查询中的应用 孙 志,孙雪姣(723)
- 多关系社交网络中基于兴趣匹配的网络舆情传播模型 孙更新,宾 晟(730)
- 应用于校园心理咨询的对话匹配度预测模型 谭嘉莉,何 钰,吴燕晶,等(739)
- 一种 Ceph 块设备跨集群迁移算法 邵曦煜,李 京,周志强(748)
- 一种基于 Skill-LFM 的知识点推荐方法 方建生,许言午,蔡瑞初,等(755)
- 基于封装式偏差回归的心脏生理和病理年龄估计算法 李勇明,肖 洁,王 品,等(762)

· 化学与材料科学 ·

- 从胎釉配方工艺探析繁昌窑青白瓷制瓷工艺来源..... 崔名芳,朱建华,徐 繁(770)

JOURNAL OF UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

Vol. 48 No.9(Serial No.305) Sep. 2018

CONTENTS

- Weak nuclear pulse signal extraction from intensive background noise
..... ZHANG Jiangmei, WANG Kunpeng, JI Haibo, et al(691)
- A high-speed voltage-mode sense amplifier for SRAM (*English*)
..... LIU Kangsheng, YU Zhiguo, WANG Tian, et al(696)
- Building software system of real-time controller communication by CANopen protocol based on ROS
..... JIA Pengfei, WANG Rongchuan, XYU Linsen, et al(703)
- A method of interference mitigation for GPS signal in cyclic spectral domain
..... HU Yi, YU Baoguo, DENG Zhixin, et al(711)
- Dynamic task scheduling algorithm of parallel computing for FCD big data
..... CHEN Feng, ZHANG Zhi, LI Qinjian, et al(718)
- Application of the pruning technique in dominant query SUN Zhi, SUN Xuejiao(723)
- Network public opinion propagation model based on interest matching in multiple relationship
social network SUN Gengxin, BIN Sheng(730)
- Dialogue matching prediction model applied in campus psychological counseling
..... TAN Jiali, HE Yu, WU Yanjing, et al(739)
- Migration algorithm for Ceph block device cross clusters
..... SHAO Xiyu, LI Jing, ZHOU Zhiqiang(748)
- A method of knowledge item recommendation based on Skill-LFM
..... FANG Jiansheng, XU Yanwu, CAI Ruichu, et al(755)
- Heart physiological and pathological age estimation based on wrapper deviation regression
..... LI Yongming, XIAO Jie, WANG Pin, et al(762)
- Origin of Qingbai porcelain technology of Fanchang kiln from the aspect of body and glaze crafts
..... CUI Mingfang, ZHU Jianhua, XU Fan(770)

强噪声背景下微弱核脉冲信号提取方法

张江梅¹, 王坤朋¹, 季海波², 冯兴华¹

(1. 西南科技大学信息工程学院, 四川绵阳 621010; 2. 中国科学技术大学自动化系, 安徽合肥 230027)

摘要: 针对强噪声背景下, 微弱核脉冲信号的幅度与发生时刻信息检测存在困难的问题, 提出一种基于 Gabor 变换及稀疏表示的核脉冲信号提取方法。首先利用 Gabor 变换根据样本信号构建单核脉冲信号表示字典; 其次采用 K-SVD 算法消除因不同探测器和噪声引起的 Gabor 基函数的差异, 构建完备字典, 将其用于表征淹没在噪声中的有用信号, 通过改进的 OMP 算法重构信号达到抑制噪声的目的, 实现微弱核脉冲信号的提取。为验证该方法的可行性和有效性, 利用 CsI(Tl) 探测器测量得到的实际核脉冲信号和仿真数据进行实验, 结果表明, 所提出算法恢复的核脉冲信号幅度和峰值发生时刻误差小于传统的 Salley-Key 最优平滑滤波和 Kalman 滤波算法。

关键词: 微弱信号; K-SVD; 稀疏表示; Gabor 变换

中图分类号: TL817 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.09.001

引用格式: 张江梅, 王坤朋, 季海波, 等. 强噪声背景下微弱核脉冲信号提取方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(9): 691-695.

ZHANG Jiangmei, WANG Kunpeng, JI Haibo, et al. Weak nuclear pulse signal extraction from intensive background noise[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(9): 691-695.

Weak nuclear pulse signal extraction from intensive background noise

ZHANG Jiangmei¹, WANG Kunpeng¹, JI Haibo², FENG Xinghua¹

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: It is a very challenging problem to extract the amplitude and occurring time of weak nuclear pulse signals in the existence of intensive background noise. To solve this problem, this paper proposes a pulse signal estimation method based on Gabor transform and sparse representation. Firstly, it builds a pulse signal representation dictionary through the Gabor decomposition of mononuclear pulse signal samples. Then it eliminates the fluctuation of the Gabor bases, which is caused by the detector variation and the measurement noise, by using K-SVD algorithm, and learns a self-consistent over-complete dictionary which is used to represent the useful signal being overwhelmed in the background noise. Finally, it reconstructs the desired signal by an improved OMP algorithm, greatly attenuates the noise and achieves the goal of extracting the weak nuclear pulse signal. The effectiveness and efficiency of the proposed method are verified through simulations and experiments on a CsI(Tl) detector. Results confirm that the proposed method outperforms the traditional Salley-Keys smoothing and Kalman filtering methods with smaller estimation errors of the amplitude and peak occurring time of the concerned nuclear pulse signal.

Key words: weak signal; K-SVD; sparse representation; Gabor transform

收稿日期: 2018-03-12; 修回日期: 2018-09-27

基金项目: 国家“十三五”核能开发科研项目(18zg6103), 国家自然科学基金(61501385), 西南科技大学博士研究基金(18zx7103)资助。

作者简介: 张江梅(通讯作者), 女, 1975年生, 博士/副教授。研究方向: 信息处理。E-mail: zjm@swust.edu.cn.

0 引言

随着核能开发与利用的逐步发展,微弱核辐射信号的探测、识别已成为核科学领域的重要研究方向之一^[1-3].受到环境本底辐射、测量噪声等影响,核信号在检测过程中极易被淹没,这是造成微弱核脉冲信号难以检测最为重要的原因.在微弱核信号检测过程中,一般先采用滤波、平滑等预处理方法对信号进行去噪,然后再对微弱核信号进行分析的方法,但是在信噪比较低的情况下,这种预处理方法的效果也会受到极大的限制^[4-5].

常见的微弱信号检测方法有相关检测法、取样积分方法、时频分析法、自适应滤波法、盲源分离法和随机共振法等,这些方法在微弱信号检测领域均取得了较好的效果.由于核脉冲信号在时间和幅度方面都具有一定的随机性^[6],噪声对信号有很大的干扰,上述方法在进行微弱核信号检测时效果较差,其中一些方法的时间复杂度较高,不能实现信号的快速检测.虽然核脉冲信号在时间和幅度方面都具有随机性,但从特定的整个检测时间段上来看,仍呈现一定的稀疏性.本文利用信号的稀疏表示方法,提出了一种微弱核脉冲信号检测、分析方法.信号的稀疏表示理论在 1993 年被 Mallat 和 Zhang 提出,该理论不仅具有明确的物理意义,而且具有坚实的理论基础,在数据挖掘、图像处理以及信号处理等方面得到了广泛应用^[7-8].

在信号的稀疏表示方法中,通过 Gabor 基函数构建的稀疏字典在描述信号的频域和时域信息时具有良好的尺度和方向选择的时频聚集特性^[9],所以本文使用 Gabor 基函数表示微弱核脉冲信号(构建稀疏字典).此外,由于时频原子频率的时域不变性,典型 Gabor 字典不能直接用来处理不同的时频信号,对于此问题本文首先构建出一个用于表示单核脉冲信号的 Gabor 冗余字典,并基于 K-SVD^[10]算法对该字典更新以适应探测器的差异,得到用于表征隐藏在含噪信号下本真信号的过完备字典,并利用改进的正交匹配追踪(OMP)^[11]优化算法实现微弱核脉冲信号的提取.

1 核脉冲信号模型与问题描述

由于核衰变事件发生的随机性,探测器检测得到的信号在时域表现为一系列随机间隔的脉冲,这些脉冲信号包含了核衰变的时间、能量信息.在某一时间段内对核衰变事件进行统计可知,该事件服从

泊松分布,相邻两个随机事件之间时间间隔服从指数分布,时间间隔的期望为剂量率的倒数^[6].因此,在计数率较低时或噪声较大时,可通过所观测脉冲的时间间隔识别是否存在放射性核素,并将不同射线能量作为区分核素种类的重要依据.

核脉冲信号在其传输过程中必然会受到环境本底或探测器内部等各种噪声影响.噪声的存在也使得核信号探测效率低下,且探测信号与真实核脉冲信号之间存在较大的差异.在强噪声环境下,单个核脉冲信号的表示模型为

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中,观测信号 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$, 真实信号 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$, N 代表采样点数, \mathbf{n} 为高斯白噪声.单脉冲测试信号可用下式估计:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{D}\boldsymbol{\alpha} \quad (2)$$

$\mathbf{D} \in R^{N \times M}$ 表示稀疏 Gabor 字典, $\boldsymbol{\alpha}$ 为信号的表示向量,由 $\boldsymbol{\alpha}$ 可以得到核脉冲信号的幅度.

核脉冲时间序列信号在字典 \mathbf{D} 下的模型可表征为下式:

$$\hat{\mathbf{y}} = \sum_{i=1}^K \omega_i \mathbf{D}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n} \quad (3)$$

由于真实测量时的脉冲总量和发生时刻都具有随机性,检测真实脉冲信号存在一定难度.考虑到核脉冲信号发生时刻在时域上的稀疏特性,设置采样长度为 N ,通过吸收方式将 ω_i 吸收到向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 之中,则可以得到第 i 个信号的表示向量,即 $\boldsymbol{\alpha}^i = \omega_i \boldsymbol{\alpha}$.核脉冲时间序列可重构为如下形式:

$$\mathbf{x} \approx \sum_{i=1}^N \mathbf{D}\boldsymbol{\alpha}^i \quad (4)$$

由此,核脉冲信号的提取问题转化为求解过完备字典 \mathbf{D} 下的稀疏表示向量 $\boldsymbol{\alpha}^i$ 的问题,目标函数可表述为

$$\operatorname{argmin}_{\boldsymbol{\alpha}} \sum_{i=1}^N \|\boldsymbol{\alpha}^i\|_0 \quad \text{s.t. } \mathbf{y} \approx \sum_{i=1}^N \mathbf{D}\boldsymbol{\alpha}^i \quad (5)$$

$\|\boldsymbol{\alpha}\|_0$ 表示向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 的 l_0 范数,能够度量向量中非 0 元素的个数,表征其稀疏度.公式(5)的最优化目标为范数最小化问题,而 l_0 范数是非凸的、不连续的,Amaldi 等^[12]表明了其为 NP 难问题,故对其直接求解存在一定的难度,只能对其进行近似求解.

2 基于 K-SVD 的字典学习与信号重构

稀疏表示主要研究过完备字典的设计和稀疏分解的优化算法.其中,过完备字典可由构造算法和学习算法两大类方法实现.本节首先采用 Gabor 变换

构建用于核脉冲信号表示的 Gabor 字典,其次采用 K-SVD 算法优化得到的稀疏字典,最后通过改进的正交追踪匹配算法提取微弱核脉冲信号.

2.1 稀疏表示过完备字典学习

Gabor 变换由 D. Gabor 在 1946 年提出的,其主要思想是引入时间局部化的高斯窗函数^[13].信号经过 Gabor 变换后其时频聚集性较好,所以在需要保留信号的时频特性时通常采用 Gabor 变换构建稀疏字典.Gabor 原子一般通过格型分割法划分时频平面产生,所以常称其为时频原子.

设 $f(t)$ 为待处理信号,且 $f(t) \in L^2(R)$, 则 Gabor 变换为^[14]

$$G_f(a, b, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g_a(t-b) e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

式中, $g_a(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a}} \exp(-\frac{t^2}{4a})$ 为高斯窗函数,满足 $a > 0, b > 0$. $g_a(t-b)$ 为时间局部化“窗函数”, b 为平行移动窗口的参数.高斯函数 $g(t)$ 的函数类型在傅里叶变换前后具有不变性,能同时得到时频域的局部化信息.

可通过对核脉冲样本信号进行采样并进一步训练得到 Gabor 原子,Gabor 字典由 Gabor 原子的集合构成.通过对核脉冲信号特性进行分析,可用少量 Gabor 原子表示核脉冲信号,表征核脉冲信号的 Gabor 原子可用下式表示:

$$g_j(t) = \frac{1}{\sqrt{s_j}} e^{-\pi \cdot (\frac{t-u_j}{s_j})^2} \cdot \cos \left[v_j \left(\frac{t-u_j}{s_j} \right) + \omega_j \right] \quad (7)$$

式中, s_j, u_j, v_j, ω_j 分别代表第 j 个原子的尺度、位移、频率和相位因子.

稀疏字典的构建方法通常有最优方向法(Method of Optimal Directions, MOD)^[13], K-SVD 字典学习算法^[10]以及联合正交基方法^[15].在根据核脉冲样本信号学习 Gabor 基的过程中,由于核探测器性能与效率的差异,以及电子学噪声的存在,在进行核脉冲信号的表征过程中,不同的核脉冲信号表示基函数必然存在较大差异.从迭代重构误差最小化以及优化基函数集合的角度考虑,本文提出一种基于 K-SVD 算法的字典学习算法.

首先由实测核脉冲信号构建训练样本集合,然后利用 K-SVD 算法学习稀疏字典并对其进行优化.设 $Y = \{y^1, y^2, \dots, y^K\}$ 表示单脉冲样本集, $Y \in R^{N \times K}$, 样本量 K , 样本长度 N , 待学习字典为 $D \in R^{N \times M}$, M 为基的数量, 向量 x_i 为 $X \in R^{M \times K}$ 的

第 i 个行向量, T_0 为设定的稀疏度,在 K-SVD 算法中,目标函数为

$$\min_{D, X} \|Y - DX\|_F^2, \text{ s.t. } \forall i, \|x_i\|_0 \leq T_0 \quad (8)$$

使用第一个样本所得 Gabor 字典作为初始字典,而初始字典的总体误差一般比较大.定义 $DX = \sum_{i=1}^M d_i x_i$, 即 DX 为字典 D 中每一列与矩阵 X 对应行乘积之和,在优化字典的过程中,对 DX 进行分块,逐次进行优化.随着字典更新的不断进行,逐行逐列剥离字典中第 m 项的在表示中的作用,减少总体误差,从而使字典向最优字典逐步逼近.误差矩阵 E 和误差值 En 分别定义为

$$E = Y - \sum_{i \neq m} d_i x_i, \quad En = \|E\|_F^2 \quad (9)$$

如上所述,在将第 m 个基分量剥除后,需要寻找新的基分量来将其替换,该过程可理解为在每一步迭代过程中均固定其他原子,同时对某一个基向量进行优化.可用 SVD 方法得到最小化公式 8 所述的目标函数.具体算法步骤如表 1 所示.

算法 2.1 基于 K-SVD 的稀疏字典学习算法

输入:单脉冲样本集 Y ;

输出:稀疏字典矩阵 D ;

初始化:字典 $D_{(0)} \in R^{N \times M}$, 并归一化字典的各列向量,通过训练得到初始字典 $D_{(0)}$, $D_{(0)}$ 由 M 个原子构成,设置 $J = 1$ 为当前迭代次数、设置迭代次数的最大值 T_{max} 、设置误差限 ϵ ;

(1)循环执行以下步骤,直到满足停止条件:迭代次数达到 T_{max} 或 $\|Y - DX\|_F^2 < \epsilon$

a):求解式 8,即采用基追踪方法近似求解式 8,样本 y_i 在字典 D 下的表示向量 x_i 通过优化下式得到

$$\min_{x_i} \{ \|y_i - d_i x_i\|_2^2 \} \quad \text{s.t. } \|x_i\|_0 \leq T_0, i=1, 2, \dots, K;$$

b):对于每个 $D^{(j-1)}$ 中的基向量 d_m , ($m = 1, 2, \dots, M$), 定义索引的集合 $\Omega_m = \{i | 1 \leq i \leq K, x_i^m(i) \neq 0\}$ 为使用第 m 个原子的样本信号的索引集;总体误差 $E_m = Y - \sum_{j \neq m} d_j x_j^T$;选择 Ω_m 对应的列并计算误差 E_m^R ;利用 SVD 方法分解 $E_m^R = USV^T$, 第 m 个基向量可利用 U 的第一列进行更新,即令 $\tilde{d}_m = u_1$, 利用首个特征值 $S(1, 1)$ 与 V 的第一列的乘积更新向量 x_m^R ;

c):令 $J \leftarrow J + 1$.

(2)利用所有样本,可以得到稀疏字典 $D_{(0)}$, 重复上述优化过程,最终选取 $D^* = \min_D \|Y - DX\|_F^2 \quad \text{s.t. } \forall i, \|x_i\|_0 \leq T_0$.

2.2 核脉冲信号提取

为了从受噪声干扰的信号获取真正的核脉冲信号,需要求解式 5 所示的目标函数.目前应用比较多的方法有匹配追踪法(MP)^[9]、正交匹配追踪法(OMP)以及基追踪法(BP)^[16]等.本文主要基于