

[电力系统]

基于MP的电力系统数据压缩方法

文/北京京电电力工程设计有限公司 张楠 张娟
国网北京市电力公司 屈宪军
北京潞电电力设计有限公司 章春晓

匹配追踪算法能够自适应地从构造的完备原子库中建立信号的稀疏解析表示。提出一种基于MP(Matching Pursuit)算法的原子稀疏分解的电能质量扰动数据压缩方法,根据电能质量扰动信号的特点建立原子库,采用衰减正弦量原子对信号进行稀疏分解,提取扰动信号成分。仿真算例验证了所提出的数据压缩方法具有压缩比高的优点。

随着电网的不断发展,对电能质量的要求越来越高。为保证电力系统信号的稳定性,必须对电力系统信号进行实时监控和分析。随着大规模分布式电能质量监测系统的形成,由监测终端采集的大量监测数据需要传送到信息中心进行存储和分析处理。如何有效地压缩电能质量扰动数据,减少数据存储空间和传输量,是电能质量研究的一项重要内容。目前电能质量扰动数据的压缩方法主要采用小波变换技术,或小波变换与其它技术相结合的方法。

近年来Mallat和Zhang提出的基于MP算法的原子稀疏分解技术在信号处理领域成为关注的热点。该方法源于信号在过完备原子库上分解的思想。信号的原子稀疏分解极大提高了信息密度和使用的灵活性,降低了处理成本。该技术在信号建模、压缩和特征提取等方面具有重要作用。国内外相关领域学者正致力于从原子库的组织、优化匹配算法等方面进行改进。

提出一种基于原子稀疏分解的电能质量扰动数据压缩方法,针对电能质量扰动信号的特点构建一个反映扰动信号的原子库,将信号原子库中进行原子分解,把信号的成分用参量化的原子形

式表示,实现数据压缩。

原子稀疏分解算法

1. 信号的原子稀疏表示

原子通常是由某种窗函数 $g(t)$ 经伸缩、平移、调制生成的。由 $g(t)$ 生成的原子为

$$g_{\gamma}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \cos(\xi t + \phi) \quad (1)$$

γ 称为 $g_{\gamma}(t)$ 的索引(Index)。定义 $\gamma = (s, \tau, \xi, \phi)$, s 为尺度参数、 τ 为位移因子、 ξ 为频率因子、 ϕ 为相位因子。

原子稀疏分解的核心问题是如何构建一个合理的原子库和如何自适应地寻找信号的最佳匹配原子及其参数。

2. Gabor过完备原子库

目前原子分解最常用的原子库是Gabor原子库。Gabor原子的表达式如(2)式所示。

$$g_{\gamma}(t) = \frac{K_{\gamma}}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \cos(\xi t + \phi) \quad (2)$$

其中 $g(t) = 2^{\frac{1}{4}} e^{-\pi t^2}$ 为高斯窗函数。

Gabor库的时频参数 $\gamma = (s, \tau, \xi, \phi)$ 需要进行合理的离散化,以形成有限原子库,并保证库对任何信号是完备的。Gabor原子的参数离散

形式为 $\gamma = (2^j, p2^j, k\pi 2^{1-j}, \phi)$ ，其中 $j, p, k \in \mathbb{Z}$, $\phi \in \mathbb{R}$ 。因此索引可以唯一地表示成离散的形式 $\gamma_s = (j, p, k, \phi) \in \mathbb{Z}^3 \times \mathbb{R}$, j 决定原子的尺度, p 决定原子的时移, k 决定原子的调制频率。设 N 为数据长度, $L = \log_2(N)$, 则 $j \in [0, L]$, $p \in [0, 2^{-j}N]$, $k \in [0, 2^j]$ 。相位因子 ϕ 可利用 Gabor 原子的复数形式通过 s, τ, ξ 三参数求得。

3. 匹配追踪算法

匹配追踪 (Matching Pursuits, MP) 算法是当前原子稀疏分解的主要方法。

设 D 为过完备原子库, x 为待分析信号, g_v 为库 D 的原子。在第 m 分解迭代过程中, MP 寻求这样的原子 $g_{v(m)} \in D$, 使它与当前残余信号 r_x^{m-1} 具有最大的内积, 并从残余信号中抽取原子 $g_{v(m)}$, 形成新的残余信号。令最初的残余信号为 $r_x^0 = x$, 迭代关系式为

$$r_x^m = r_x^{m-1} - \left(r_x^{m-1}, g_{v(m)} \right) g_{v(m)} \quad (3)$$

进行 m 次迭代后, 当前残余值为 r_x^m , 则原信号 x 可表示为

$$x = \sum_{n=1}^m \left(r_x^{n-1}, g_{v(n)} \right) g_{v(n)} + r_x^m \quad (4)$$

因此经过 m 次迭代后, 信号 x 可用 m 个原子的线性组合来表示, 其误差为第 m 次迭代计算后的残差。

4. 衰减正弦量原子

衰减正弦量原子表示的信号模型为

$$f(t) = \sum_{q=0}^{Q-1} A_q \cos(2\pi f_q t + \phi_q) e^{-\rho_q(t-t_{sq})} \times [u(t-t_{sq}) - u(t-t_{eq})] \quad (5)$$

式中, 每个衰减正弦量原子包含 6 个参数 ($A_q, f_q, \rho_q, \phi_q, t_{sq}, t_{eq}$), A_q 为衰减正弦量的幅值, f_q 为频率, ρ_q 为衰减因子, ϕ_q 为相位, t_{sq} 和 t_{eq} 分别为衰减正弦量的起始时间和结束时间, $u(t)$ 为单位阶跃函数。衰减正弦量原子分解方法是先用 Gabor 原子按 MP 算法进行分解, 再用每次分解出的 Gabor 原子计算对应的衰减正弦量原子。

扰动数据压缩方法

1. 基本思路

对于电力系统扰动信号, 其主导类型包括电压凹陷、电压突升、短时电压中断、谐波、振荡等形式。本文仅将扰动信号的主导成分采用原子稀疏分解来提取和压缩, 充分利用了原子分解高压缩比的优势, 整体压缩效果会明显提高。

2. 扰动信号相关原子库构建

设计的扰动信号相关原子库包含的原子成分有非周期原子、工频正弦量原子、整数次谐波原子。原子的最高频率由信号的采样率决定, 一般不超过 3 200 Hz。这些成分对应的 Gabor 原子表达式为

$$g_v(t) = \frac{K_v}{\sqrt{s}} g \frac{t-\tau}{s} \cos(2\pi f_0 t + \phi) \quad (6)$$

式中, $k=0, 1, 2, \dots$, $f_0=50$ Hz。

对式 (6) 表达的原子参数离散化方法同前介绍的一般离散化方法, 但仅保留基频及整数次频率的原子, 使原子库规模极大地缩小。

3. 数据压缩方法

扰动数据压缩方法主要分为以下几个步骤。

- 1) 设置阈值系数 $\mu_1 \in (0, 1)$ 用来设定原子分解是否终止。
- 2) 计算原始信号的能量 E_0 。
- 3) 对信号进行 Gabor 原子分解。
- 4) 将分解出的 Gabor 原子分量转化为衰减正弦量, 存储衰减正弦量参数; 求残余信号及其能量。
- 5) 判断终止条件。当残余信号的能量 时原子分解过程结束; 否则返回 3) 步继续对残余信号进行原子分解。

算例

信号采样率为 3 200 Hz, 采样数据长度为 1 024 点, 基波频率 $f=50$ Hz, 取 $\mu_1=0.10$ 。

算例: 电压凹陷信号波形如图 2a 所示。对信号进行原子分解, 经过 4 次分解后残余信号的能量低于 1%, 已满足的条件。分解得到的 4 个原子参数如表 1 所示。重构信号、残余信号以及原子分量的波形如图 1b~1g 所示。

表1 算例中信号分解的各原子参量

原子序号	幅值/V	频率/Hz	衰减系数	相位/rad	起始时间/s	终止时间/s
1	0.813	50	0	0.000	0.000	0.320
2	0.315	50	0	3.142	0.125	0.244
3	0.186	50	0	0.020	0.000	0.125
4	0.186	50	0	0.000	0.245	0.320

在信号中加入一定的白噪声, 对含噪信号进行原子分解, 其中信噪比为 30 dB 时原信号、重构

信号及残余信号波形如图2所示。

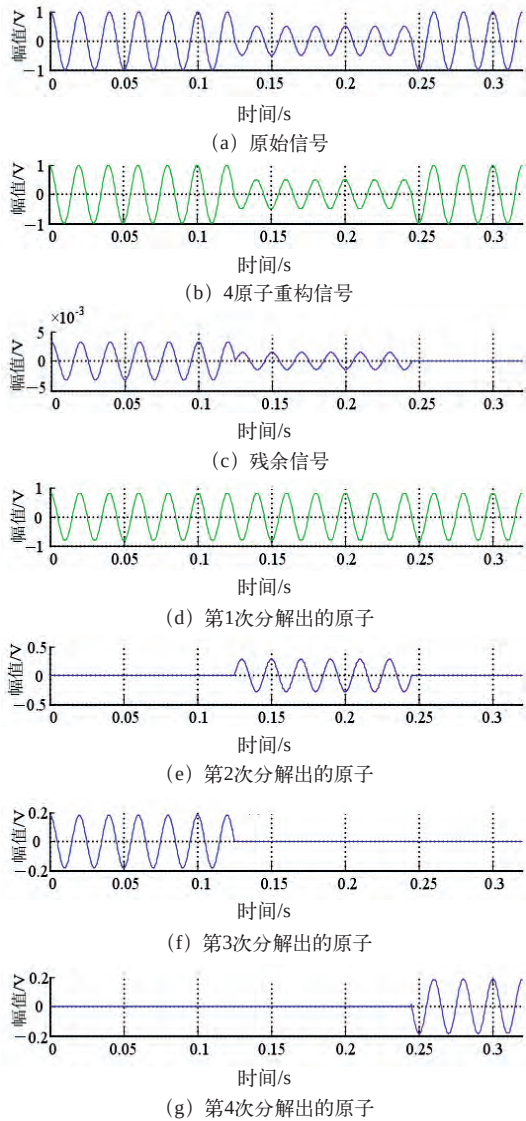


图1 原始信号及其原子和重构信号波形

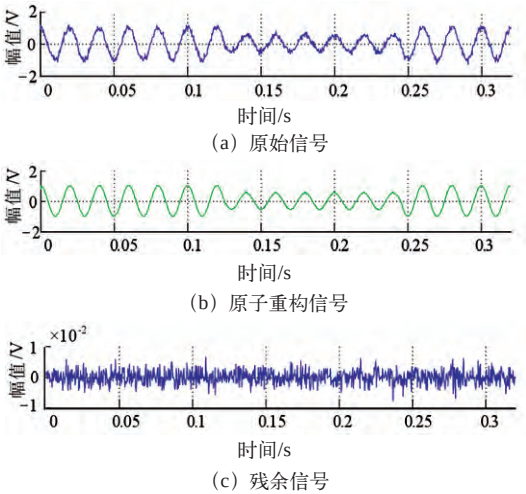


图2 信噪比为30 dB的原信号及重构信号波形

电能质量数据压缩性能指标主要有压缩率、均方误差和能量比。压缩率定义为

$$R_c = \frac{S_0}{S_c} \quad (7)$$

式中， S_0 为原始数据的大小 S_c 为压缩后的数据大小。标准化均方误差定义为

$$N_{MSE} = \frac{\|f(n) - \tilde{f}(n)\|^2}{\|f(n)\|^2} \quad (8)$$

式中， $f(n)$ 为原始信号； $\tilde{f}(n)$ 为重构信号。能量比定义为

$$N_{ENRG} = \frac{\|\tilde{f}(n)\|^2}{\|f(n)\|^2} \quad (9)$$

对算例的数据及加入噪声后的数据按原子算法计算其压缩性能指标，结果如表2所示。

表2 算例压缩性能指标

	原始信号信噪比 /dB	压缩比	均方误差	能量比
原子 算法	无噪声	42.7:1	0.000 7	0.997
	40	42.7:1	0.000 7	0.999
	30	42.7:1	0.005 2	0.993

以上分析可见，提出的电能质量数据压缩方法在压缩比方面优势明显。由于原子算法采用解析的参量形式表示信号，与数据长度无关，因此随着被压缩数据长度的增加，压缩比会更高。另外，无论Gabor原子还是衰减正弦量原子，对一般的物理信号均可以线性表示，因此原子算法可适应各种扰动类型。

结束语

MP算法可自适应地建立信号的稀疏表示，非常有利于信号压缩。采用原子分解的电能质量扰动数据压缩方法，针对电能质量信号的特点建立了原子库，利用原子分解高压缩比的优势对电能质量扰动信号进行压缩。压缩方法明显具有优越性。算例结果证明了所用方法的良好压缩效果。EA

(收稿日期：2015.06.01)

(编辑：白文亭)