

改进非分离二维离散小波的数据压缩算法

赵艳粉, 杨洪耕

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 利用非分离的二维离散小波可把输入信号直接进行分解且小波中的 4 个滤波器矩阵间存在相互转换关系, 提出了改进的二维离散小波算法。该算法用低频滤波器中的数据表示 3 个高频滤波器中的数据, 使得在卷积过程中原算法重复计算的卷积被省去。采用改进算法后, 计算每个小波系数时的乘法次数由原算法的 $l \times (l-1)$ 减少为 $l \times l/2$ 。再通过阈值法设置阈值进行数据压缩, 使得压缩后的能量保留在 99% 以上, 从而保证了重构信号的失真率很小且自适应地消除加在扰动信号上的噪声。仿真结果表明该方法在保证大的压缩率的情况下提高了运算速度, 并对信号中的噪声干扰有很好的消除能力。

关键词: 数据压缩; 非分离二维离散小波算法; 能量阈值; 电能质量; 消噪

中图分类号: TP 274

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)05-0053-05

0 引言

小波变换在解决电能质量检测信号数据压缩问题的有效性已经证实^[1-9]。用一维小波进行数据压缩时, 信号在有一定噪声的情况下, 信号的压缩率高, 则信噪比满足不了要求, 两者存在着矛盾。为了提高压缩率, 文献[10]中把小波变换与自适应编码结合起来。文献[11]使用第 2 代小波算法, 把压缩率提高到 35。文献[12]利用二维离散变换对电能质量检测数据进行处理, 使压缩率得到极大提高, 但是计算量太大, 计算时间太长。

现提出一种改进的非分离二维离散小波算法^[13]和能量阈值^[10, 14]相结合的数据压缩方法。传统分离算法分别在水平和垂直方向进行一维的离散小波分解, 但利用这种分离途径的传统金字塔算法会产生延迟, 且每个小波系数需要 $l \times (l-1)$ 次乘法, l 为滤波器长度。利用小波 4 个滤波器矩阵间存在相互转换关系, 提出了改进的二维离散小波算法。采用该算法后, 算法中计算每个小波系数乘法由 $l \times (l-1)$ 减少为 $l \times l/2$ 。再通过能量阈值法设置阈值, 进行数据压缩, 可保证能量保留在 99% 以上, 使信号在压缩后失真度小。该方法压缩效果好, 压缩率可达到 46。经过仿真分析, 原信号在添加 20 dB 噪声的情况下, 压缩后的信号有合适的信噪比。

1 小波变换基本原理

1.1 二维离散小波变换

二维离散小波变换和一维离散小波变换相似。

二维离散小波函数 $\Psi_{j,k}(t)$ 和尺度函数 $\varphi(t)$ 可以通过一维离散小波函数和尺度函数经过张量积(tensor product)变换得到。二维小波分解把尺度 j 的低频部分分解成 4 个部分: 尺度 $j+1$ 的低频部分和 3 个方向(水平、垂直、斜线)的高频部分。在这些方向的信号成分由下面函数得到:

尺度函数

$$\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (1)$$

小波函数

$$\begin{aligned} \Psi^H(x, y) &= \Psi(x)\varphi(y) \\ \Psi^V(x, y) &= \varphi(x)\Psi(y) \\ \Psi^D(x, y) &= \Psi(x)\Psi(y) \end{aligned} \quad (2)$$

在此采用非分离的二维离散小波算法, 优点有:

- a. 把输入信号直接分解, 不需要进行储存, 节省了硬件设施并避免了延时;
- b. 直接采用二维滤波器代替传统算法采用的 2 个分开的滤波器, 有利于硬件的控制和电路简化;
- c. 一些小波基函数是非分离的, 因此传统的分离算法不能使用, 而只能使用非分离算法, 因此非分离算法在滤波器中使用更自由。

图 1 是分离算法, 图 2 是非分离算法。

s_{ss} 表示一个 $N \times M$ 的矩阵信号, 对该信号进行小波分解。下面为非分离算法的表达式:

$$\begin{aligned} s_{ss,j+1}(u_1, v_1) &= \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k w_{LL}(m, n) \cdot s_{ss,j}(u, v) \\ s_{sd,j+1}(u_1, v_1) &= \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k w_{LH}(m, n) \cdot s_{ss,j}(u, v) \\ s_{ds,j+1}(u_1, v_1) &= \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k w_{HL}(m, n) \cdot s_{ss,j}(u, v) \\ s_{dd,j+1}(u_1, v_1) &= \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^k w_{HH}(m, n) \cdot s_{ss,j}(u, v) \end{aligned} \quad (3)$$

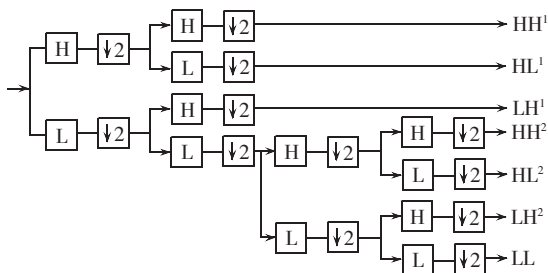


图 1 分离算法

Fig.1 Separable transform of 2-D DWT

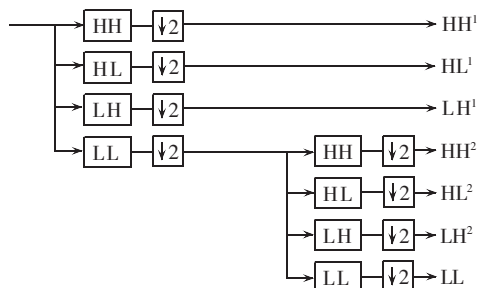


图 2 非分离算法

Fig.2 Non-separable transform of 2-D DWT

$u = (2u_1 + m)_N, v = (2v_1 + n)_M, m, n$ 与 $w_{LL}(m, n)$ 中的 m, n 一致, $(x)_N$ 表示 x 除以 N 的余数; $w_{LL}, w_{LH}, w_{HL}, w_{HH}$ 分别表示 4 个二维滤波器, L 表示低频滤波器, H 表示高频滤波器。 w_{LL} 矩阵是 2 个低频滤波器向量的卷积; w_{LH} 矩阵是一维低频滤波器向量和一维高频滤波器向量的卷积; w_{HL} 矩阵是一维高频滤波器向量和一维低频滤波器向量的卷积; w_{HH} 矩阵是 2 个高频滤波器向量的卷积。

其中, $w(m, n) = h_m \times h_n, w(m, n)$ 表示二维离散小波非分离算法的滤波器矩阵第 m 行第 n 列的元素。 h_m 表示一维离散小波滤波器向量第 m 个元素, h_n 表示一维离散小波滤波器向量第 n 个元素。

$$w_{LL} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & \cdots & w_{1,l} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{l,1} & \cdots & w_{l,l} \end{bmatrix}$$

$$w_{LH} = \begin{bmatrix} w_{1,l} & -w_{1,l-1} & \cdots & -w_{1,1} \\ w_{2,l} & -w_{2,l-1} & \cdots & -w_{2,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{l,l} & -w_{l,l-1} & \cdots & -w_{l,1} \end{bmatrix}$$

$$w_{HL} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,l} \\ -w_{l-1,1} & -w_{l-1,2} & \cdots & -w_{l-1,l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -w_{1,1} & -w_{1,2} & \cdots & -w_{1,l} \end{bmatrix}$$

$$w_{HH} = \begin{bmatrix} w_{1,l} & -w_{1,l-1} & \cdots & -w_{1,1} \\ -w_{l-1,l} & w_{l-1,l-1} & \cdots & w_{l-1,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -w_{1,l} & w_{1,l-1} & \cdots & w_{1,1} \end{bmatrix}$$

2 改进的非分离算法

非分离的二维离散小波变换的 4 个滤波器矩阵

有以下特征:

a. $m, n \in \{1, 2, \dots, l\}, w_{LL}(m, n) = w_{LL}(n, m)$;

b. w_{LL} 是对称矩阵;

c. w_{LL} 和 w_{LH} 每列元素的绝对值相等, 而这 2 个矩阵对应列排列相反且偶数列的符号相反, w_{HL} 与 w_{HH} 也有以上特点;

d. w_{LL} 和 w_{HL} 每行元素的绝对值相等, 而这 2 个矩阵对应行排列相反且偶数行的符号相反, w_{LH} 与 w_{HH} 也有以上特点。

利用上面滤波器矩阵的特点, 引入一个特征函数:

$$a_{m,n}(t) = \begin{cases} s_{ss,j}(t) \times w(m, n) & m \leq n \\ a_{n,m}(t) & m > n \end{cases} \quad (5)$$

$m, n \in \{1, 2, \dots, l\}, t = uN_j + v$, 在这里用 t 确定信号 s_{ss} 矩阵里元素的位置, 即用 $s_{ss}(t)$ 代表矩阵 s_{ss} 里的具体元素。 u, v 分别为 $s_{ss,j}$ 矩阵的横、纵坐标。

改进算法与原算法相比: 改进算法利用了小波 4 个滤波器矩阵中元素之间的关系, 用低频滤波器中的元素表示 3 个高频滤波器中元素, 使得在卷积过程中原算法重复计算的卷积被省去。原算法中每个小波系数需要 $l \times (l-1)$ 次的乘法运算, 而改进算法中则只需 $l \times l/2$ 次的乘法运算。

下面描述改进算法的表达式。

当滤波器的长度为 8 时, 对一个 $N \times N$ 的矩阵信号, 由 j 层分解到 $j+1$ 层。利用改进的非分离二维小波算法分解如下:

$$s_{ss,j+1}(u_1, v_1) = \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 s_{ss,j}(u, v) w(m, n)$$

$$s_{sd,j+1}(u_1, v_1) = \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 s_{ss,j}(u, v) (-1)^{8-n+1} w(m, 8-n) \quad (6)$$

$$s_{ds,j+1}(u_1, v_1) = \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 s_{ss,j}(u, v) (-1)^{8-m+1} w(8-m, n)$$

$$s_{dd,j+1}(u_1, v_1) = \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 s_{ss,j}(u, v) (-1)^{m+n} w(8-m, 8-n)$$

在利用矩阵 $s_{ss,j}$ 计算矩阵 $s_{ss,j+1}$ 的小波系数时, 记 $p = 2(u_1 - 1)N_j + 2v_1 - 1$ 。其中 u_1, v_1 是 $s_{ss,j+1}$ 矩阵的横坐标和纵坐标。引入 2 个行累加序列 s_m, d_m 向量:

$$s_m = \begin{cases} \sum_{n=0}^l a_{m,n}(p+n) \\ \sum_{n=1}^{2k+2} a_{m,n}(p+n) + \sum_{n=2k+3}^l a_{m,n}(2u_1N_j+n) \end{cases} \quad (7)$$

$$d_m = \begin{cases} \sum_{n=1}^l (-1)^{n+1} a_{m,l-n}(p+n) \\ \sum_{n=1}^{2k+2} (-1)^{n+1} a_{m,l-n}(p+n) + \sum_{n=2k+3}^l (-1)^{n+1} a_{m,l-n}(2u_1N_j+n) \end{cases} \quad (8)$$

$s_m(p+l), d_m(p+l)$ 为式(7)(8)中 s_m 和 d_m 向量的第 $(p+l)$ 个元素。

式(7)(8)分段函数中, 第 1 个式子的取值范围为 $1 \leq v_1 \leq N_j/2 - l/2$; 第 2 个式子的取值范围为 $N_j/2 - l/2 + 1 \leq v_1 \leq N_j/2$ 。其中 $k \in \{l/2 - 1, \dots, -1\}$ 。

利用式(7)和式(8), 进行 2 个列累加序列, 得到

$s_{ss,j+1}(u_1, v_1)$ 、 $s_{sd,j+1}(u_1, v_1)$ 、 $s_{ds,j+1}(u_1, v_1)$ 、 $s_{dd,j+1}(u_1, v_1)$ 的小波系数矩阵,如下:

$$s_{ss} = \begin{cases} \sum_{m=1}^l s_m(p+mN_j+l) \\ \sum_{m=1}^{2k+2} s_m(p+mN_j+l) + \\ \sum_{m=2k+3}^l s_m[2v_1+(m-2k-3)N_j+l] \end{cases} \quad (9)$$

$$s_{sd} = \begin{cases} \sum_{m=1}^l (-1)^{m+1} s_{l-m}(p+mN_j+l) \\ \sum_{m=1}^{2k+2} (-1)^{m+1} s_{l-m}(p+mN_j+l) + \\ \sum_{m=2k+3}^l (-1)^{m+1} s_{l-m}[2v_1+(m-2k-3)N_j+l] \end{cases} \quad (10)$$

$$s_{ds} = \begin{cases} \sum_{m=1}^l d_m(p+mN_j+l) \\ \sum_{m=1}^{2k+2} d_m(p+mN_j+l) + \\ \sum_{m=2k+3}^l d_m[2v_1+(m-2k-3)N_j+l] \end{cases} \quad (11)$$

$$s_{dd} = \begin{cases} \sum_{m=1}^l (-1)^{m+1} d_{l-m}(p+mN_j+l) \\ \sum_{m=1}^{2k+2} (-1)^{m+1} d_{l-m}(p+mN_j+l) + \\ \sum_{m=2k+3}^l (-1)^{m+1} d_{l-m}[2v_1+(m-2k-3)N_j+l] \end{cases} \quad (12)$$

式(9)~(12)分段函数中,第 1 个式子的取值范围为 $1 \leq u_1 \leq N_j/2-l/2$;第 2 个式子的取值范围为 $N_j/2-l/2+1 \leq u_1 \leq N_j/2$ 。其中 $k \in \{l/2-1, \dots, -1\}$ 。

3 仿真分析

3.1 压缩性能评价指标

a. 压缩比(CR)定义为

$$CR = s_c / (s_0 - s_c) \quad (13)$$

式中 s_c 为压缩后信号数据大小; s_0 为原始数据大小。

b. 均方误差百分值(MSE)定义为

$$MSE(\%) = \sqrt{\sum_0^{N-1} (d_j - f_j)^2} / \sqrt{\sum_0^{N-1} d_j^2} \times 100\% \quad (14)$$

式中 N 为原信号的长度; d_j 为原始信号; f_j 为由压缩数据重构的信号, $j \in (0, N-1)$;MSE 反映了误差估计的大小。

c. 信噪比(SNR)定义为

$$SNR(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{\sum_0^{N-1} d_j^2}{\sum_0^{N-1} (d_j - f_j)^2} \right] \quad (15)$$

d. 能量比 γ_{pow} 定义为

$$\gamma_{\text{pow}} = \sum_0^{N-1} f_j^2 / \sum_0^{N-1} d_j^2 \quad (16)$$

3.2 算例分析

3.2.1 电能质量检测信号选择

采用的信号有电压凹陷、电压凸起、电压谐波、电压缺口、电压暂态、电压中断。电能质量扰动信号

由一维转化为二维矩阵是利用二维离散小波变换的首要条件。扰动信号为周期信号,基频为 50 Hz,采样频率 20 kHz。40 s 内采样 8×10^5 点。以 2 倍的基频为一行排列,可得行为 1 000、列为 800 的矩阵。

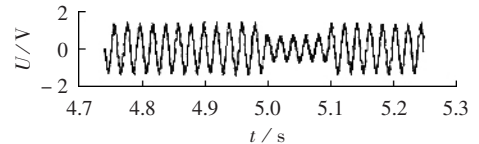
3.2.2 母小波的选择

为了保证信号重构的稳定和不失真,需要选择具有线性相位的小波,经过实验比较,选用 db 4 小波。在这些扰动信号加上 20 dB 的高斯噪声组成的信号。在二维离散小波分解时分解 3 层,分解后利用能量阈值法^[10]设置阈值,使得压缩后的能量被保留在 99% 以上,从而保证了原信号的失真率很小。

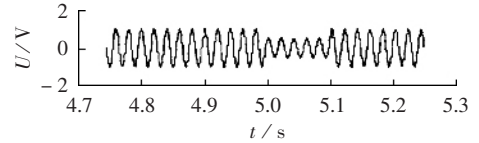
3.2.3 仿真及信号压缩效果

图 3、4 所示为凹陷和缺口的原信号、原算法和改进算法的重构信号。

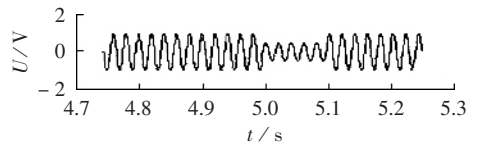
由图可知,改进的二维离散变换对原信号进行很好的重构,所重构的波形与原波形相差无几,而且原信号的噪声在重构信号中已经很好地除去了。



(a) 原始凹陷信号



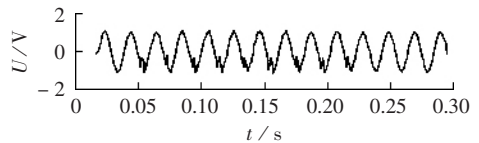
(b) 改进算法重构信号



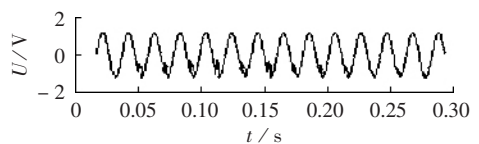
(c) 二维小波重构信号

图 3 扰动信号凹陷的原信号和重构信号

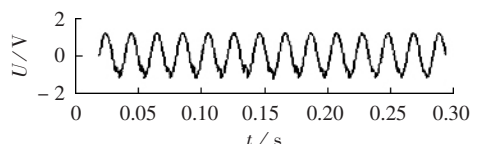
Fig.3 Original and reconstructed signals of sag



(a) 原始缺口信号



(b) 改进算法重构信号



(c) 二维重构信号

图 4 扰动信号缺口的原信号和重构

Fig.4 Original and reconstructed signals of notching

为了更好地验证所提出的方法,利用仿真得到的数据,由式(13)~(16)得到 6 种扰动信号的一系列压缩性能评价指标的数值,如表 1 所示。

表 1 扰动信号压缩评价指标比较
Tab.1 Evaluation index of disturbance signal compression

信号	算法	CR	MSE / %	SNR	γ_{pow}
凹陷	原算法	51.318	10.07	45.9162	99.003
	改进算法	51.019	9.73	46.5915	99.040
缺口	原算法	51.020	9.89	46.2714	99.022
	改进算法	50.086	9.69	46.6747	99.050
谐波	原算法	51.282	10.05	45.9469	99.005
	改进算法	50.951	9.74	46.5730	99.040
暂态	原算法	48.780	9.97	46.1179	99.022
	改进算法	46.773	9.66	46.7377	99.060
凸起	原算法	52.083	10.05	45.9586	99.006
	改进算法	50.770	9.73	46.5944	99.040
中断	原算法	51.302	10.38	45.3097	99.030
	改进算法	50.945	9.78	46.4985	99.050

从表中数据可得,改进的二维离散小波同原二维离散小波相比 CR 相差仅为 0.299,压缩率都大于 50。可知这是一种极有效的数据压缩方法。SNR 和 γ_{pow} 2 个评价指标与原算法相比稍大,相差仅为 0.5, MSE 仅比原算法稍大 0.0024。

由上面分析可知,改进的二维离散小波算法与原算法相比压缩结果几乎没有改变,计算每个小波系数乘法次数由 $l \times (l-1)$ 减少为 $l \times l / 2$ 。这就使得计算时间减少一半。改进算法使得扰动信号压缩率都大于 46,非零信息不到原信息的 2%,且较好地保留了与暂态特征相关的小波系数。并且在如此大的压缩率下和信号被加 20 dB 的噪声下,压缩后信号的信噪比可达到 45% 以上。因此,改进的二维离散小波算法对电能质量扰动信号是一种很好的压缩和消噪方法。

4 结论

a. 应用非分离的二维离散小波把输入的信号直接进行分解不需要储存,从而节省了硬件设施并避免了延时,且利用小波变换后的频域的量化比特数有规律性,提高了高频小波系数的能量集中性。

b. 利用小波的 4 个滤波器矩阵间存在相互转换关系提出了该算法。采用该算法后,原算法中相同的乘法计算被省去,使得计算每个小波系数乘法次数由 $l \times (l-1)$ 减少为 $l \times l / 2$ 。小波分解后高频信号能量高度集中,利用阈值后仅有极少高频系数被保留,使得噪声信号被极大滤除,提高了信噪比。

c. 在小波变换后采用能量阈值法,使得原信号的能量 99% 被保留,保证了重构信号的失真率很小,要进一步减小重构信号的失真率,可以结合 Huffman 编码、数据编码算法得到。

参考文献:

[1] 费铭薇,乐全明,张沛超,等. 电力系统故障录波数据压缩与重构

小波基选择[J]. 电力系统自动化,2005,29(17):64-67.

- FEI Ming-wei, YUE Quan-ming, ZHANG Pei-chao, et al. Wavelets selection of compression and reconstruction algorithm based on digital recorded data from a faulted power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 64-67.
- [2] 黄险峰,钱路江,付立军. 电力系统故障录波信号压缩[J]. 电力自动化设备,2001,21(11):18-21.
- HUANG Xian-feng, QIAN Lu-jiang, FU Li-jun. Compression of fault recording signals of power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 18-21.
- [3] 张兆宁,郁惟镛,张毅刚. 基于小波包和矢量量化的电力系统故障数据压缩[J]. 电力系统自动化,2003,27(1):45-48.
- ZHANG Zhao-ning, YU Wei-yong, ZHANG Yi-gang. Power system fault data compression using the wavelet packet transform and vector quantification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1): 45-48.
- [4] 曾怡达,刘志刚,钱清泉. CL 多小波预处理方法在故障数据压缩中的应用[J]. 电网技术,2004,28(7):10-14.
- ZENG Yi-da, LIU Zhi-gang, QIAN Qing-quan. Pre-processing methods of multiwavelet and their applications in power system fault data compression [J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 10-14.
- [5] 刘志刚,何正友,钱清泉. 基于最优处理方法的多小波故障数据压缩方案[J]. 电网技术,2005,29(11):40-43.
- LIU Zhi-gang, HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. A fault signal data compression plan based on optimal pre-processing method of multiwavelet [J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 40-43.
- [6] 潘文霞,李春林,史林军. 基于最佳小波包的电能质量暂态数据压缩[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(3):50-54.
- PAN Wen-xia, LI Chun-lin, SHI Lin-jun. Power quality transient disturbance compression based on optimum wavelet packet [J]. Proceedings of the EPSA, 2005, 17(3): 50-54.
- [7] SANTOSO S, POWERS E J, GRADY W M. Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1250-1256.
- [8] LITTLER T B, MORROW D J. Wavelets for the analysis and compression of power system disturbances [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 14(3): 358-364.
- [9] LEWIS A S, KNOWLES G. Image compression using the 2D wavelet transform [J]. IEEE Trans Image Processing, 1992, 1(2): 244-250.
- [10] 王成山,王继东. 基于能量阈值和自适应算术编码的数据压缩方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(24):56-60.
- WANG Cheng-shan, WANG Ji-dong. Data compression method based on energy threshold and adaptive arithmetic encoding [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 56-60.
- [11] 乐全明,郁惟镛,柏传军,等. 基于提升算法的电力系统故障录波数据压缩新方案[J]. 电力系统自动化,2005,29(5):74-78.
- YUE Quan-ming, YU Wei-yong, BAI Chuan-jun, et al. Noval compression scheme of fault recording data in power systems based on lifting algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 74-78.
- [12] GERCK O N, EC D G. 2-D analysis and compression of power-quality event data [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 791-798.
- [13] UZUN I S, AMIRA A. Real-time 2-D wavelet transform implementation for HDTV compression [J]. Real-Time Imaging, 2005(11): 151-165.
- [14] 赵艳粉,杨洪耕. 二维离散小波变换在电能质量检测数据压缩中的应用[J]. 电力系统自动化,2006,30(15):51-55.

ZHAO Yan - fen, YANG Hong - geng. Data compression method using 2 - dimensional discrete wavelet transform for power quality detection data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 51 - 55.

- [15] 黄天戌,汪阳,吴迪,等. 基于第二代小波变换的电力系统故障录波数据压缩方法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 59 - 62.
- HUANG Tian - shu, WANG Yang, WU Di, et al. Second generation wavelet - based data compression algorithm for power system fault recorder [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,

24(3): 59 - 62.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

赵艳粉(1982 -),女,河南温县人,硕士研究生,研究方向为电能质量检测与信号处理系统(E-mail:light-322@163.com);
 杨洪耕(1949 -),男,四川成都人,教授,长期从事谐波模型与分析方法、电能质量分析与控制技术等方面的研究(E-mail: yangsi@mail.sc.cninfo.net)。

Advanced non-separable 2-dimensional discrete wavelet transform for data compression

ZHAO Yan - fen, YANG Hong - geng
 (School of Electrical and Information,
 Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The input signals can be decomposed directly by the non-separable 2-DWT (Discrete Wavelet Transform) and the mutual conversion is realizable among the four filter matrixes in the wavelet, based on which, an advanced non-separable 2-DWT is presented. It passes over the repeated convolution calculations in the traditional algorithm by using the data in low frequency filter instead of those in the three high frequency filters. Thus the multiplication times in wavelet coefficient calculation are reduced from $l \times (l - 1)$ to $l \times l / 2$. By threshold processing, the remainder energy after data compression is over 99 %, which makes the distortion ratio of reconstructed signals smaller and the noise of the disturbance signals eliminated adaptively. Simulation results show that the method improves operation speeds with higher compression ratio and better noise elimination capability.

Key words: data compression; non-separable 2-DWT; energy threshold; power quality; noise eliminating

广告索引

- 国电南京自动化股份有限公司 (封面)
- 北京四方继保自动化股份有限公司 (封二, 前插 1)
- 魏德米勒电联接国际贸易(上海)有限公司 (前插 2)
- 南京南瑞集团公司 (前插 3)
- 台湾四零四科技股份有限公司 (前插 4)
- 南京南瑞集团公司城乡电网自动化分公司 (前插 5)
- 南京南自机电自动化有限公司 (前插 6)
- 上海安科瑞电气有限公司 (前插 7)
- 国电南京自动化股份有限公司 (前插 8, 9)
- 武汉高德红外技术有限公司 (前插 10)
- 上海申瑞电力科技(集团)有限公司 (前插 11)
- 国电南京自动化股份有限公司主设备保护部 (前插 12、13)
- 南京南自电网控制技术有限责任公司 ... (前插 14)
- 福州凯(嘉)特电气有限公司 (前插 15)
- 西安交大科技园博源电气有限责任公司 (前插 16)
- 上海伊莱克斯实业有限公司 (前插 17)
- 上海置恒电气有限公司 (前插 18)

- 南京南自电气系统集成工程有限公司 ... (前插 19)
- 河南省日立信电子有限公司 (前插 20)
- 上海蓝鸟机电有限公司 (前插 21)
- 万可电子(天津)有限公司 (前插 22)
- 施瓦哲工程实验(上海)有限公司 (前插 23)
- 硕方科技(北京)有限公司 (前插 24)
- 合肥阳光电源有限公司 (后插 1)
- 珠海派诺电子有限公司 (后插 2)
- 杭州中恒电气股份有限公司 (后插 3)
- 南京南自电力控制系统工程有限公司 ... (后插 4)
- 西门子电力自动化有限公司 (封三)
- 北京博电新力电力系统仪器有限公司 (封底)
- 深圳市三旺通信技术有限公司 (文前页)
- 湖北天瑞电子有限公司 (文后 1)
- 南京冠亚电源设备有限公司 (文后 2)
- 第七届中国哈尔滨国际发供电及电工技术设备展览会 (文后 3)
- 深圳市英微特电子技术有限公司 (文后 4)
- 深圳市信道科技有限公司 (文后 4)
- 深圳市科奥信电源技术有限公司 (文后 5)
- 常州山泰克电子有限公司 (文后 6)
- 山西永明自动化设备有限公司 (目次页)