

基于改进形态 Haar 小波在输电线路故障测距中的应用研究

成乐祥¹, 李扬¹, 唐瑜²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 提出将改进形态 Haar 小波 (IMHW) 用于输电线路行波测距中。从信号的时域上提取奇异点, 能够较为快速和准确地定位奇异发生的时刻, 适合应用于输电线路故障测距。大量 ATP 仿真结果表明采用基于 IMHW 变换的行波测距能够准确地提取行波信号的波头位置, 具有较高的测距精度。IMHW 变换主要是加减和取极值运算, 与经典 Mallat 小波算法相比, 该算法具有结构简单, 算法量较小, 易于工程实现的特点。

关键词: 形态小波; Haar 小波; 数学形态学; 故障测距; 小波变换

Research and application of improved morphological Haar wavelet in transmission line fault location

CHENG Le-xiang¹, LI Yang¹, TANG Yu²

(1. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Improved morphological Haar wavelet (IMHW) is proposed to locate transmission line fault by traveling wave. It extracts singular points from the time domain, which can position singular moment more quickly and accurately, and is fit for transmission line fault location. A lot of ATP simulation results show that the proposed algorithm of fault location based on IMHW is exact to extract the arrival time of traveling wave. Compared with Mallat algorithm, IMHW transform is mainly composed of addition, subtraction and taking extreme computation with the characteristics of simple structure, a small amount of algorithm, and easy to implement.

Key words: morphological wavelet; Haar; mathematical morphology; fault location; wavelet transform

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0030-05

0 引言

在非平稳信号分析和处理中, 小波变换被认为是一个有力的工具。但是小波变换是一种线性变换, 对于不同类型的非平稳信号, 小波变换缺乏适应性^[1]。在输电线路行波测距中, 故障产生的暂态行波是一个突变的、具有奇异性的非平稳信号, 在基于小波变换的暂态行波故障定位中, 必须根据行波信号的性质选择合适的小波基, 但到目前为止还没有一个统一的小波基选择模型^[2-3]。

近年来, 一些学者提出了基于形态学算子的非线性多分辨信号分解方案, 传统的小波变换可以通过提升方案^[4-5]或者形态算子^[1,6]的形式实现非线性扩展。形态小波变换就是基于小波变换和数学形态学的非线性小波变换方法^[7-9], 这为行波信号的处理增添了新的手段。本文通过形态学算子构造非线性小波变换——改进形态 Haar 小波 (IMHW) 并将其应用于输电线路行波测距中, 提取线路故障时行波

的波头位置。ATP 仿真结果表明 IMHW 能准确地提取行波信号的波头位置, 满足故障定位精度的要求。

1 数学形态学

数学形态学的基本思想是用具有一定形态的结构元素去度量和提取信号中的对应形状。结构元素的形态决定了所提出的形态信息。数学形态学的基本运算有膨胀、腐蚀、开启和闭合四种。基于这些基本运算, 还可以组合成其它各种数学形态学实用算法。在此只介绍灰度膨胀和腐蚀运算。

若假设输入信号为 f , 结构元素为 b , 则用 b 对 f 进行灰度膨胀运算定义为

$$f \ominus b(n) = \min_{m=0,1,\dots,M-1} \{f(n+m) - b(m)\} \quad (1)$$
$$(n = 0, 1, \dots, N - M)$$

$$f \oplus b(n) = \max_{m=0,1,\dots,M-1} \{f(n-m) + b(m)\} \quad (2)$$
$$(n = 0, 1, \dots, N - M - 2)$$

2 形态小波

2.1 形态小波变换

形态小波是一种非线性多分辨信号分解方法。假设存在集合 V_j 和 W_j , V_j 为 j 级逼近信号空间, W_j 为 j 级细节信号空间。信号分析由信号分析算子 $\psi_j^\uparrow: V_j \rightarrow V_{j+1}$ 和细节分析算子 $\omega_j^\uparrow: V_j \rightarrow W_{j+1}$ 两部分构成。它将信号向 j 增加的方向分解。另一方面, 信号合成利用合成算子 $\Psi_j^\downarrow: V_{j+1} \times W_{j+1} \rightarrow V_j$ 向 j 减少的方向进行重构。分析与合成算子采用形态学滤波器即构成了形态小波^[7-9]。形态小波分解的金字塔条件如下:

$$\psi_j^\uparrow(\Psi_j^\downarrow(x, y)) = x, x \in V_{j+1}, y \in W_{j+1} \quad (3)$$

$$\omega_j^\uparrow(\Psi_j^\downarrow(x, y)) = y, x \in V_{j+1}, y \in W_{j+1} \quad (4)$$

若满足

$$\Psi_j^\downarrow(\psi_j^\uparrow(x), \omega_j^\uparrow(x)) = x, x \in V_j \quad (5)$$

则称为完全重构。两层形态小波分解框架的示意图如图 1 所示。

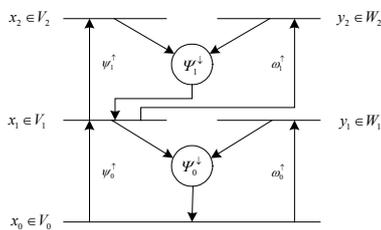


图1 两层形态小波分解方案

Fig.1 Two-level mathematical wavelet decomposition scheme

2.2 形态Haar小波

为了使形态小波方案具体化, 根据实际需要文献[10]构造了形态梯度小波用于电能质量检测, 文献[9]构造了一种典型的形态Haar小波:

$$\psi^\uparrow(x)(n) = \min(x(2n), x(2n+1)), x \in V_j \quad (6)$$

$$\omega^\uparrow(x)(n) = x(2n) - x(2n+1), x \in V_j \quad (7)$$

形态Haar小波重构条件为:

$$\psi^\downarrow(x)(2n) = x(n), x \in V_{j+1} \quad (8)$$

$$\psi^\downarrow(x)(2n+1) = x(n), x \in V_{j+1} \quad (9)$$

$$\omega^\downarrow(y)(2n) = \max(y(n), 0), y \in W_{j+1} \quad (10)$$

$$\omega^\downarrow(y)(2n+1) = -\min(y(n), 0), y \in W_{j+1} \quad (11)$$

形态Haar小波与Haar小波的主要区别在于形态Haar小波用腐蚀或膨胀算子代替了Haar小波中的线性信号分析滤波器。

2.3 基于提升方案的形态Haar小波

基于提升方案的形态Haar小波是在形态Haar小波的基础上, 通过提升方案构造。

$$\psi_p^\uparrow(x)(n) = \min(x(2n), x(2n+1)) \quad (12)$$

$$\omega_p^\uparrow(x)(n) = 2(x(2n) - x(2n+1)) - \min(x(2n), x(2n+1)) + \min(x(2n+2), x(2n+3)) \quad (13)$$

但采用基于提升方案的形态Haar小波提取的奇异点时, 不能准确反应奇异发生的时刻, 存在时间上的超前, 所以我们提出改进形态Haar小波。

2.4 改进形态 Haar 小波

改进形态 Haar 小波的分解形式如式 (14) 和 (15):

$$\psi_i^\uparrow(x)(n) = \min(x(2n), x(2n+1)) \quad (14)$$

$$\omega_i^\uparrow(x)(n) = 2(x(2n) - x(2n+1)) - \min(x(2n), x(2n+1)) + \min(x(2n-1), x(2n-2)) \quad (15)$$

信号的奇异特征一般存在于信号的高频部分, 改进形态 Haar 小波变换较线性小波变换能更好地保持信号的奇异特征。这是因为传统线性小波的分解过程是不断地对信号的低频部分进行多尺度分解, 它对信号奇异特征起平滑的作用; 而形态小波变换中分解滤波器是非线性的, 所以可以起到保存信号中的奇异的作用。

3 基于提升方案的形态小波故障测距原理

输电线路发生故障时, 将会产生丰富的暂态信号。这些信号从故障点向线路两端传播, 当碰到不连续点时, 信号就会发生反射和折射。本文采用单端行波测距原理, 单端行波测距的关键是如何区分故障点的发射波, 还是对端母线反射的行波, 还是相邻母线的反射波。为了消除相邻母线反射波的影响, 本文利用线路一端采集到的电压电流信号构造反向电压行波。假设 M 为检测端母线, F 为故障点, 选定由母线到线路的方向为正方向。母线 M 处检测到的电压和电流分别为: $u_m(t)$ 和 $i_m(t)$, 对其进行凯伦贝尔变换后, 得到 α 模电压和电流分量分别

为 $u_{ma}(t)$ 和 $i_{ma}(t)$ ，则 M 处的 α 模反向电压行波为

$$u_{2\alpha}(t) = \frac{1}{2}(u_{ma}(t) - Z_{\alpha}i_{ma}(t)) \quad (16)$$

式 (16) 中 Z_{α} 为正序模分量的波阻抗。然后采用本文提出的方法，提取反向电压行波信号发生奇异的时刻，从而确定故障距离。

线路测距公式为：

$$l_F = \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) \quad (17)$$

或

$$l_F = L - \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) \quad (18)$$

其中： l_F 为故障点到测量端母线的距离； t_1 为故障初始行波到达测量端母线时刻； t_2 为随后的相邻行波到达测量端母线时刻； v 为行波线模分量波速； L 为故障线路全长。根据初始行波与随后的相邻行波极性关系判断故障发生的区域，若故障发生在线路的前半段，采用式 (17) 计算故障发生的距离；若故障发生在线路的后半段，采用式 (18) 计算故障发生的距离。

4 仿真试验

本文使用电磁暂态仿真程序 ATP 针对不同的故障类型和母线类型进行数字仿真，线路采用分布参数模型，完全换位，并考虑母线分布电容的影响。所采用的模型如图 2 所示，线路为三相 50 Hz 输电线路，电压等级 500 kV，线路结构参数为： $R_1=0.01273 \Omega/\text{km}$ ， $L_1=0.9337 \text{ mH}/\text{km}$ ， $C_1=0.01274 \mu\text{F}/\text{km}$ ； $R_0=0.3864 \Omega/\text{km}$ ， $L_0=4.1264 \text{ mH}/\text{km}$ ， $C_0=0.007751 \mu\text{F}/\text{km}$ ，PM、NQ 间线路的长度分别为 60 km 和 80 km，MN 间线路的长度为 200 km，母线分布电容 $C=0.01 \mu\text{F}$ ，采样频率为 1 MHz。为简化分析， α 模分量波速取为

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = 2.923 \times 10^5 \text{ km/s.}$$

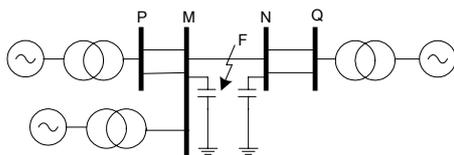


图 2 仿真系统模型

Fig.2 Power system for simulation

当母线 M 为第三类母线类型时，图 3 为线路 MN 在距 M 侧 90 km 处发生 A 相单相接地故障时 α 模反向电压行波波形。数据窗采用 10 ms，故障发

生时刻为 5 ms。图 4 为 α 模反向电压行波经 IMHW 变换后的结果。为了便于观察，放大后的细节分量如图 4 (b) 所示。因为采用了反向电压行波屏蔽了母线 P 反射波的干扰，所以第二个电压反向行波为故障点反射波或者对端母线反射波。从图 4 (a) 可以看出，由于故障发生在线路的前半段，所以故障点发射波先于对端母线反射波到达，其极性与初始行波相同。初始行波、故障点发射波、对端母线反射波分别如图 4 (b) 中 A、B、C 所示。计算出其对应的时间，利用式 (17) 即可求得故障距离。

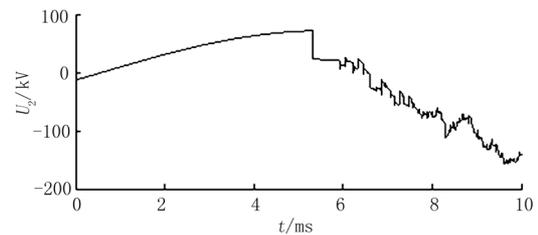
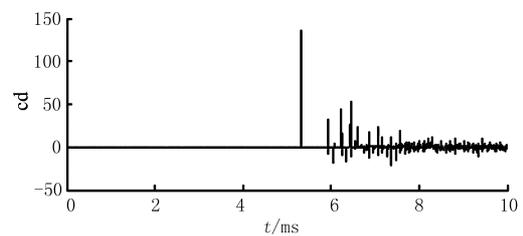
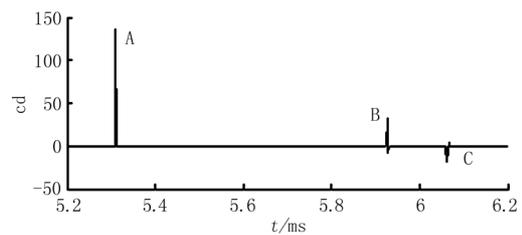


图 3 M 为第三类母线时 A 相单相接地 α 模反向电压行波波形
Fig.3 α mode reverse traveling wave of grounding fault of phase A when bus M belongs to the third type



(a) IMHW 变换后的细节分量



(b) 局部放大之后的细节分量

图 4 图 3 波形经过 IMHW 分解后的结果

Fig.4 Results of Fig.3 after IMHW transform

在同样的线路接线方式下，设置故障点距离母线 M120 km 处发生 BC 两相接地短路，则 α 模反向电压行波波形及其经 IMHW 变换后的结果分别如图 5 和图 6 所示。从图 6 可以清楚地辨别出故障初始电压反向行波波头位置和随后相邻的电压反向行波波头位置。

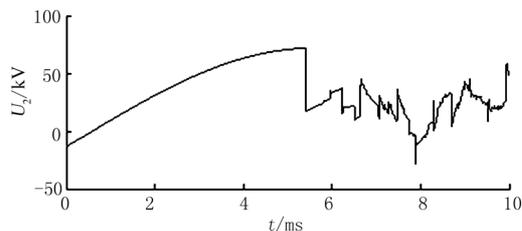


图 5 M 为第三类母线时 BC 两相接地 α 模反向电压行波波形
Fig.5 α mode reverse traveling wave of grounding fault of phase B and C when bus M belongs to the third type

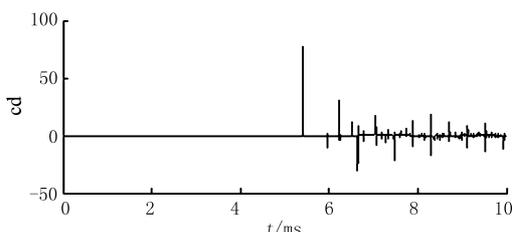


图 6 图 5 波形经过 IMHW 分解后的结果
Fig.6 Results of Fig.5 after IMHW transform

当母线 M 为第一类母线类型时, 图 7 为线路 MN 在距 M 侧 150 km 处发生 B 相单相接地故障时 α 模反向电压行波波形。从图 8 可以看出, 当两端母线类型不相同, IMHW 同样可以有效检测出行波的波头位置。

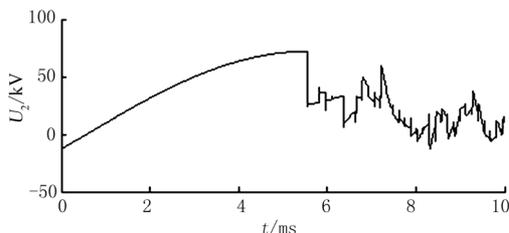


图 7 M 为第一类母线时 B 相单相接地 α 模反向电压行波波形
Fig.7 α mode reverse traveling wave of grounding fault of phase B when bus M belongs to the first type

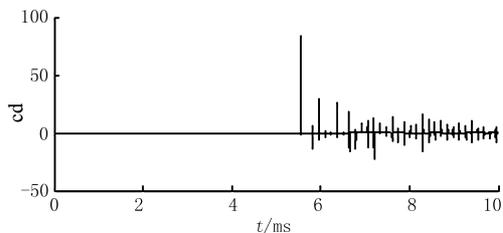


图 8 图 7 波形经过 IMHW 分解后的结果
Fig.8 Results of Fig.7 after IMHW transform

表 1 为传统故障类型和不同故障距离的测距结果及误差。表 2 给出了不同的过渡电阻和故障初始

角测距结果和误差。可以看出采用基于 IMHW 变换的行波测距能在各种故障条件下有效检测出行波的波头位置, 并且具有比较高的测距精度。

表 1 采用 IMHW 变换的测距结果

Tab.1 Fault location results by using IMHW

故障类型	仿真结果/km	理论值/km	误差/km
AG	9.938	10	-0.062
	90.028	90	0.028
BC	20.169	20	0.169
	159.888	160	-0.112
BCG	40.045	40	0.045
	120.135	120	0.135
ABC	59.922	60	-0.078
	180.057	180	0.057

表 2 不同过渡电阻和初相角的影响

Tab.2 Simulation results with different fault resistances and inception angles

故障条件	仿真结果/km	理论值/km	误差
过渡电阻为 0 Ω 、50 Ω 、100 Ω 、200 Ω	90.028	90	0.028
故障初始角为 10 $^\circ$ 、30 $^\circ$ 、90 $^\circ$	59.922	60	-0.078

经典 Mallat 小波变换建立在傅立叶基础上, 对信号先求积再求和 (积分运算), 而 IMHW 变换建立在第二代小波变换基础上, 通过加减和取极值运算获得细节分量, 不涉及时频转换, 具有算法结构简单、速度快、占用内存少等优点。在算法耗时方面, 在 Matlab 软件中, 对一个数据窗的数据进行经典小波一层分解和求取模极大值需 7.8 ms; 采用文献[6]的方法进行一次分解需 2.1 ms; 而采用 IMHW 进行一次分解需 0.4 ms。此外, 本文算法不涉及浮点运算和乘法运算, 对于目前硬件平台可以轻松实现。可见在实际工程中, 用 IMHW 变换进行行波测距有更大的优势。

5 结论

本文通过形态算子将传统的线性小波变换推广至非线性形态小波变换, 提出改进形态 Haar 小波, 并将其应用于输电线路故障测距中。大量 ATP 仿真验证表明, 该算法能够有效检测出行波信号的波头位置, 具有较高的测距精度。该算法与经典 Mallat 小波算法相比, 具有结构简单、算法量小, 易于实现等优点, 有较高的工程应用价值。本文算法采用单行波测距原理, 依然存在行波测距的固有缺陷。

参考文献

- [1] Lu Z, Smith J S, Wu Q H. Morphological Lifting Scheme for Current Transformer Saturation Detection and Compensation[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2008,55(10): 3349-3357.
- [2] 黄子俊, 陈允平. 行波故障定位中小波基的选择[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 61-64, 104.
HUANG Zi-jun, CHEN Yun-ping. Selection of Wavelet Bases for Traveling Wave Fault Location [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 61-64, 104.
- [3] 覃剑, 彭莉萍, 王和春. 基于小波变换技术的输电线路单端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 62-65, 86.
QIN Jian, PENG Li-ping, WANG He-chun. Single Terminal Methods of Traveling Wave Fault Location in Transmission Line Using Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 62-65,86.
- [4] Sweldens W. The Lifting Scheme: a Construction of Second Generation Wavelets[J]. SIAM Journal of Mathematical Analysis, 1998(29): 511-546.
- [5] 周瑞, 鲍文, 左国华, 等. 基于改进冗余提升方案的汽轮机组振动故障特征提取[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 88-93.
ZHOU Rui, BAO Wen, ZUO Guo-hua, et al. Turbine Vibration Fault Feature Extraction Based on Improved Redundant Lifting Scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 88-93.
- [6] Zhang J F, Smith J S, Wu Q H. Morphological Undecimated Wavelet Decomposition for Fault Location on Power Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2006, 53(6): 1395-1402.
- [7] Heijmans H J A M, Goutsias J. Constructing Morphological Wavelets with the Lifting Scheme [A]. in: Proceedings of the Fifth International Conference on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'99)[C]. Minsk(Belarus): 1999. 65-72.
- [8] Goutsias J, Heijmans H J A M. Nonlinear Multiresolution Signal Decomposition Schemes-Part I: Morphological Pyramids[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(11): 1862-1876.
- [9] Heijmans H J A M, Goutsias J. Nonlinear Multiresolution Signal Decomposition Schemes-Part II: Morphological Wavelets[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(11): 1897-1913.
- [10] Ji T Y, Lu Z, Wu Q H. Detection of Power Disturbances using Morphological Gradient Wavelet[J]. Signal Processing, 2008, 88(2): 255-267.
- (上接第 29 页 continued from page 29)
- [2] 肖冰, 梁军, 等. Hilbert变换在电压闪变检测中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(15): 62-65.
XIAO Bing, LIANG Jun, et al. Application of Hilbert Transform in Voltage Flicker Detection[J]. Relay, 2005, 33(15): 62-65.
- [3] 丁屹峰, 程浩忠, 等. 基于 Prony 算法的谐波和间谐波频谱估计[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 94-97.
DING Yi-feng, CHENG Hao-zhong, et al. Spectrum Estimation of Harmonics and Inter-Harmonics Based on Prony Algorithm[J]. Journal of Electro-technical, 2005, 20(10): 94-97.
- [4] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
HU Guang-shu. Digital Signal Processing——Theory, Algorithm and Implement[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [5] Petre Stoica. On Spatial Power Spectrum and Signal Estimation Using the Pisarenko Framework[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(10): 5109-5119.
- [6] 王志群, 朱守真, 等. Hilbert 变换求取电压闪变有关参数[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 34-37.
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, et al. Parameter Estimation of Voltage Flicker Through Hilbert Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 34-37.
- [7] 王志群, 朱守真, 等. 基于Pisarenko谐波分解的间谐波估算方法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 72-77.
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, et al. Estimation Method of Harmonics and Interharmonics Based on Pisarenko Harmonic Decomposition[J]. Power System Technology, 2004,28(15): 72-77.

收稿日期: 2009-04-27; 修回日期: 2009-05-16

作者简介:

成乐祥(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力运行与控制; E-mail: clxxt@yahoo.com.cn

李扬(1961-), 男, 教授, 从事电力系统及其自动化方面的教学与研究工作。

收稿日期: 2009-04-20; 修回日期: 2009-05-07

作者简介:

魏晓璞(1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制; Email: xiaopuwei0201@163.com

徐永海(1966-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统谐波分析、电能质量控制技术;

郭春林(1975-), 男, 讲师, 主要研究方向为电力系统、电力电子技术在电能质量控制中的应用。