

小波变换的二抽取环节对行波测距精度的影响

梁 军¹, 贡志皓¹, 任姝霏², 杨延勇¹

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 东北电力学院 电力系, 吉林 吉林 132012)

摘要: 在利用小波变换模极大值表征行波波头到达时刻方法的基础上, 详细分析了带有二抽取环节的小波变换行波测距算法引起的测距误差, 由于二抽取环节在某些条件下会把代表行波波头到达时刻的小波变换模极大值抽取掉, 导致提取的行波波头到达时刻偏移, 从而引入测距误差。并进一步提出了通过平滑处理故障首尾数据的优化方法提高行波波头提取的可靠性。理论分析和 EMTP 结果表明, 无二抽取环节的小波变换行波测距算法能够有效提高测距精度。

关键词: 小波变换; 行波; 故障测距

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)10-0028-03

0 引言

准确的故障定位既能减轻巡线负担, 又能加快线路的恢复供电, 减少因停电造成的综合经济损失, 因此输电线路精确故障测距非常重要。根据测距原理的不同, 输电线路故障测距方法可分为阻抗法和行波法^[1]。阻抗法由于故障点过渡电阻、线路不对称以及电压、电流变换器等因素的影响, 测距误差较大。近年来, 随着微电子技术的飞速发展和对行波传播规律以及对获取方法的进一步掌握, 行波法测距得到了很快发展^[2-7]。

行波测距的关键是寻找行波波头到达时刻, 通常采用小波变换的奇异性检测理论寻找。当采用滤波器组实现小波变换时, 处理后由于 2 种输出的带宽均减半, 因此采样率可以减少而不引起信息的丢失(带通信号的采样率决定于其带宽, 而不是决定于其频率上限)。这就使小波变换中含有了二抽取环节。

文献[8-9]使用带有二抽取环节的小波变换方法进行测距, 而文献[10-11]使用无二抽取环节的小波变换测距。由于行波测距中二抽取环节是否必要尚无相关说明, 该环节对行波波头提取有何影响也未见相关论述。因此, 本论文深入分析了有无二抽取环节的小波变换对测距误差的影响, 并给出数据首尾的优化方法。EMTP 仿真数据表明, 无二抽取环节的小波变换可提高测距精度。

1 小波变换^[12]

设 $x(t)$ 是平方可积函数, $\psi(t)$ 是被称为母小波的函数, 则式(1)称为 $x(t)$ 的小波变换。

$$WTx(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt = \langle x(t), \psi_{a\tau}(t) \rangle \tag{1}$$

设在尺度 a 下, t_0 的某一邻域 δ 内, 对一切 t 有 $|WTx(t)| \leq |WTx(t_0)|$, 则称 t_0 为小波变换的模极大值点, $WTx(t_0)$ 为小波变换的模极大值。

小波分析理论说明利用小波变换可以准确地描述出信号奇异点的位置、极性等特征信息, 利用小波变换的模极大值可以表征故障信息。

B 样条小波光滑对称, 具有显式解析式, 推导简单, 在所有多项式样条函数中具有最小支撑, 有“近似最小”的时频窗。三次 B 样条小波在具有噪声情况下检测信号的奇异性是渐近最优的, 对电力系统故障分析也是合适的小波函数。

三次 B 样条小波

$$\Phi(\omega) = \left[\frac{\sin \omega/2}{\omega/2} \right]^4 \tag{2}$$

2 小波变换的滤波器组实现

用多采样滤波器形式表现小波变换, 这样便于采用数字信号处理技术进行分析。以下分析都以 $j=1$ 为例。小波变换的离散平滑和离散细节信号可表示为

离散平滑逼近

$$x_k^{(1)} = \sum_n h_{0(n-2k)} x_n^{(0)} \tag{3}$$

离散细节信号

$$d_k^{(1)} = \sum_n h_{1(n-2k)} x_n^{(0)} \tag{4}$$

$$h_{0k} = \langle \phi_{10}(t), \phi_{0k}(t) \rangle \tag{5}$$

$$h_{1k} = \langle \psi_{10}(t), \phi_{0k}(t) \rangle \tag{6}$$

离散细节信号 $d_k^{(1)}$ 即是 $j=1$ 时的小波变换。只要得到滤波器参数 h_0, h_1 , 就可以进行小波变换的计算, 目前大多数应用报道中 $x_n^{(0)}$ 常常直接用 $x(t)$ 的采样序列 $x(kT_s)$ 。

2.1 二抽取环节对测距的影响

通过带有二抽取的滤波器组实现小波变换, 可看到, 经过小波变换后, $x_k^{(1)}$ 和 $d_k^{(1)}$ 比 $x_n^{(0)}$ 数据减少

一半,原理上认为,处理结果变稀是由于进行了二抽取。 $x_k^{(1)}$ 和 $d_k^{(1)}$ 数据之间的时间间隔比 $x_n^{(0)}$ 数据之间的时间间隔增加了 1 倍。若采样间隔为 Δt ,则经过小波变换后的数据间隔为 $2\Delta t$,这就增加了测距误差。下面进行具体分析。

a. 假设小波模极大值在第 N 个点(图 1 中标有 $\times$ 的点),如果模极大值点在被抽取掉的位置上,经过二抽取,就把第 N 个点抽取掉了,如图 1 所示。则模极大值点就会成为第 $N+1$ 或 $N-1$ 个点,这样就会增加 $c\Delta t$ 的误差。

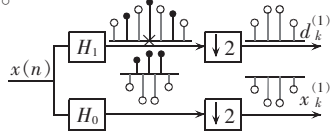


图 1 二抽取示例 1
Fig.1 Model one of down-sampling by two

b. 如果进行的是偶抽取,如图 2 所示,由于抽掉了第 1 个数据点,第 2 个数据点就成为第 1 个数据点。这样就导致所有数据点的左移位,即模极大值的时刻左移 1 个时间间隔。在行波测距中,波头到达时刻是很重要的,1 个时间间隔就会产生 $c\Delta t$ 的误差。

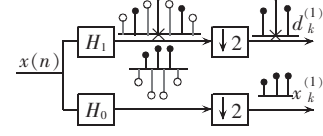


图 2 二抽取示例 2
Fig.2 Model two of down-sampling by two

通过以上分析可以看出,产生如上误差的原因是小波变换中进行的二抽取。行波的采样频率为 f 使用带有二抽取的小波变换测距和采样频率为 $2f$ 使用无二抽取的小波变换测距的精度是一样的。因此,应用时,要采用无二抽取环节的小波变换。

小波变换的滤波器组实现中,去掉二抽取环节后的小波变换公式为

离散平滑逼近

$$x_k^{(1)'} = \sum_n h_{0(n-k)} x_n^{(0)} \quad (7)$$

离散细节信号

$$d_k^{(1)'} = \sum_n h_{1(n-k)} x_n^{(0)} \quad (8)$$

2.2 故障数据首尾的处理

在实际应用时,只取有限的一段含有行波信号的数据序列进行小波变换,这里取 n 的数据长度。将细节信号的变换公式展开得:

$$\begin{aligned} d_1^{(1)'} &= h_{1(-3)}x_{-2}^{(0)} + h_{1(-2)}x_{-1}^{(0)} + h_{1(-1)}x_0^{(0)} + h_{1(0)}x_1^{(0)} + \\ &\quad h_{1(1)}x_2^{(0)} + h_{1(2)}x_3^{(0)} + h_{1(3)}x_4^{(0)} + h_{1(4)}x_5^{(0)} \\ d_2^{(1)'} &= h_{1(-3)}x_{-1}^{(0)} + h_{1(-2)}x_0^{(0)} + h_{1(-1)}x_1^{(0)} + h_{1(0)}x_2^{(0)} + \\ &\quad h_{1(1)}x_3^{(0)} + h_{1(2)}x_4^{(0)} + h_{1(3)}x_5^{(0)} + h_{1(4)}x_6^{(0)} \\ d_n^{(1)'} &= h_{1(-3)}x_{n-3}^{(0)} + h_{1(-2)}x_{n-2}^{(0)} + h_{1(-1)}x_{n-1}^{(0)} + h_{1(0)}x_n^{(0)} + \\ &\quad h_{1(1)}x_{n+1}^{(0)} + h_{1(2)}x_{n+2}^{(0)} + h_{1(3)}x_{n+3}^{(0)} + h_{1(4)}x_{n+4}^{(0)} \end{aligned}$$

可见,公式中还含有数据 $x_{-2}^{(0)}$ 、 $x_{-1}^{(0)}$ 、 $x_0^{(0)}$ 、 $x_{n+1}^{(0)}$ 、 $x_{n+2}^{(0)}$ 、 $x_{n+3}^{(0)}$ 、 $x_{n+4}^{(0)}$ 。对这些数据的处理常用的有零插值法和周期性扩展法。但这些方法有时可引起首尾数据的突变,从而误认为是行波波头。

本文处理这些数据采用

$$x_i^{(0)} = 2 \times x_{i+1}^{(0)} - x_{i+2}^{(0)} \quad i < 1 \quad (9)$$

$$x_i^{(0)} = 2 \times x_{i-1}^{(0)} - x_{i-2}^{(0)} \quad i > n \quad (10)$$

这样处理数据后,就可使数据的头尾平滑而不产生突变。

3 EMTP 仿真结果分析

使用 EMTP 仿真软件建模,同组故障数据分别使用带有二抽取的小波和无二抽取的小波变换测距,比较测距误差。仿真测距中采用三次 B 样条小波。

3.1 建模

仿真计算中,采用最简单的 500 kV 双端电源系统。系统模型如图 3 所示,线路采用分布参数模型,线路长度取 200 km,采样频率为 500 kHz,在线路上设置距 M 端 80 km 的 F 点发生单相接地短路故障。

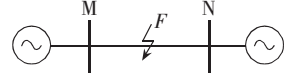


图 3 系统模型
Fig.3 System model

图中 $R_0 = 0.1948 \Omega/\text{km}$, $X_0 = 0.6494 \Omega/\text{km}$, $C_0 = 0.009 \mu\text{F}/\text{km}$, $R_1 = 0.027 \Omega/\text{km}$, $X_1 = 0.2783 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.0127 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

3.2 利用仿真结果测距

图 4 为 M 端电流行波图(n 为数据点,图 5 同)。

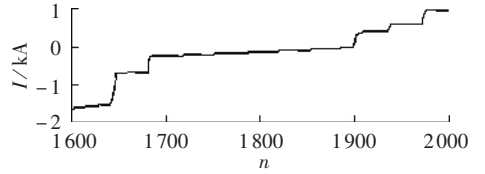


图 4 M 端电流行波

Fig.4 Current traveling wave of end M

由仿真结果,根据小波变换图中的模极大值位置,找到两端第 1 个行波到达的具体时刻,进行电流行波双端测距。

测距公式为

$$x = (t_1 - t_2)v / 2 + l / 2 \quad (11)$$

其中 l 为线路总长,故障初始行波波头到达两侧母线的时刻分别为 t_1 和 t_2 ; x 为故障点距离 M 端母线的距离。这里采用无二抽取的小波变换。

图 5 中可见,纵坐标小波变换模极大值最大处为 M 端初始行波到达时刻,横坐标对应第 1 635 个采样点,同理找出 N 端出现初始行波时刻,为第 1 702 个采样点。采样间隔为 $2 \mu\text{s}$ 。波速 $v = 1 / \sqrt{l_1 c_1}$,计算出波速 $v = 2.980618 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。测出故障距离为 80.02986 km,误差 0.02986 km。

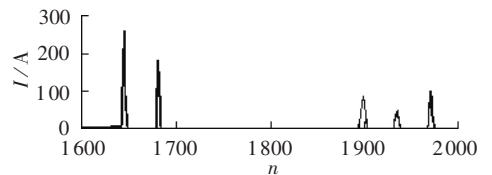


图 5 M 端电流行波的小波变换
Fig.5 Wavelet transform of current traveling wave of end M

3.3 有无二抽取测距比较

采用图 3 的模型,每隔 10 % 设 1 个故障点,双端测距结果如表 1 所示。

表 1 故障测距结果

Tab.1 Results of fault locating km				
d	无二抽取小波变换测距		有二抽取小波变换测距	
	d_1	Δd_1	d_2	Δd_2
20	20.1194	0.1194	20.1194	0.1194
40	40.0896	0.0896	39.7915	-0.2085
60	60.0597	0.0597	60.0597	0.0597
80	80.0299	0.0299	80.3279	0.3279
100	100	0.1	0	0
120	119.9701	-0.0299	119.6721	-0.3279
140	139.9403	-0.05972	139.9403	-0.0597
160	159.9104	-0.0896	160.2085	0.2085
180	179.8806	-0.1194	179.8806	-0.1194

注: d 为故障点距 M 端距离; d_1 、 d_2 为测距结果; Δd_1 、 Δd_2 为绝对误差。

对比表 1 数据可以看出,测距结果分 2 种情况:一种是有无二抽取环节,测距结果都是一样的,出现这种情况的原因是模极大值点没有被二抽取掉;另一种情况为故障点距 M 侧 40 km 和 160 km 时,无二抽取测距误差明显比有二抽取测距误差小,误差和约为 0.298 1 km。分析原因,由于采样频率为 500 kHz,采样间隔为 2 μ s,根据双端测距公式,差 1 个采样点测距误差会增加 $x=\Delta t\times v/2=0.298\ 02$ (km),因此这个差别恰好是由于模极大值点移动了 1 个采样点而产生的距离。由此可见,去掉二抽取环节,可有效提高测距精度。

4 结论

本文深入分析了二抽取环节对行波测距精度的影响。理论分析表明,小波变换中的二抽取环节会把代表行波到达时刻的小波变换模极大值抽取掉,从而使行波到达时刻偏移 1 个采样间隔,引起测距误差。EMTP 仿真测距结果证实,使用无二抽取环节的小波变换进行测距,可有效提高行波测距的精度。本文同时解决了故障数据首尾的优化问题。

参考文献:

[1] 孟凡建,王颖,潘明九. 输电线路故障测距实用方法研究[J]. 河北电力技术,2003,22(4):29-30.
MENG Fan-jian,WANG Ying,PAN Ming-jiu. A study on application for locating faults on transmission lines[J]. Hebei Power Technology,2003,22(4):29-30.

[2] 覃剑,黄震,杨华,等. 同杆并架双回线路行波传播特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):30-34.
QIN Jian,HUANG Zhen,YANG Hua,et al. Study on travelling wave propagation in double-circuit parallel transmission line[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(5):30-34.

[3] 范春菊,张兆宁,郁惟镛. 小波方法在超高压输电线路行波故障测距中的应用[J]. 电网技术,2003,27(8):50-53.
FAN Chun-ju,ZHANG Zhao-ning,YU Wei-yong. Application of wavelet method in travelling wave fault location for EHV

transmission line[J]. Power System Technology,2003,27(8):50-53.

[4] 黄子俊,陈允平. 基于小波变换的行波故障定位法在串补输电线路中的应用[J]. 电网技术,2004,28(18):5-9.
HUANG Zi-jun,CHEN Yun-ping. Application of wavelet transform based travelling wave fault location to series compensated lines[J]. Power System Technology,2004,28(18):5-9.

[5] 艾斌,吕艳萍. 基于小波模极大值极性的行波信号识别[J]. 电网技术,2003,27(5):55-57,71.
AI Bin,LÜ Yan-ping. Travelling wave signal identification based on wavelet polarity of modulus maxima[J]. Power System Technology,2003,27(5):55-57,71.

[6] 黄雄,王志华,尹项根,等. 高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J]. 电网技术,2004,28(19):34-37.
HUANG Xiong,WANG Zhi-hua,YIN Xiang-gen,et al. Travelling wave velocity measurement in fault location based on traveling wave for high voltage transmission line[J]. Power System Technology,2004,28(19):34-37.

[7] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究[J]. 电网技术,2005,29(15):65-70.
QIN Jian. Study on single terminal traveling wave fault location of transmission line[J]. Power System Technology,2005,29(15):65-70.

[8] 吕艳萍,陈允平,刘珠明,等. 基于小波分析的超高压输电线路故障定位的研究[J]. 中国电力,2003,36(2):32-36.
LÜ Yan-ping,CHEN Yun-ping,LIU Zhu-ming,et al. Research on fault location for EHV transmission line based on wavelet transform[J]. Electric Power,2003,36(2):32-36.

[9] 刘珠明,吕艳萍,刘兵,等. 一种新原理在超高压输电线路故障定位装置中的应用[J]. 继电器,2002,30(4):26-28.
LIU Zhu-ming,LÜ Yan-ping,LIU Bing,et al. Study of a new principle applied in EHV transmission line fault locator[J]. Relay,2002,30(4):26-28.

[10] 邓军波,施围. 输电线路接地故障行波测距新方法[J]. 继电器,2000,28(8):16-18.
DENG Jun-bo,SHI Wei. A new technique of earth fault location[J]. Relay,2000,28(8):16-18.

[11] 卢大海,朱亚东,董新洲,等. 基于小波分析的母线暂态行波保护新原理的探讨[J]. 电力自动化设备,2002,22(8):63-66.
LU Da-hai,ZHU Ya-dong,DONG Xin-zhou,et al. New principle of transient traveling wave bus protection based on wavelet analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(8):63-66.

[12] 熊小伏,林金洪. 基于小波重构的电力电缆故障测距方法[J]. 电网技术,2003,27(6):36-38,70.
XIONG Xiao-fu,LIN Jin-hong. A wavelet reconstruction based fault location method for power cables[J]. Power System Technology,2003,27(6):36-38,70.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

梁 军(1956-),男,山东龙口人,教授,主要从事电力系统运行与控制领域的研究(E-mail:liangjun@sdu.edu.cn);
贡志皓(1973-),男,山东聊城人,讲师,主要从事电力系统运行控制与继电保护领域的研究;
任姝霏(1979-),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事继电保护领域的研究(E-mail:renshufei@163.com);
杨延勇(1980-),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事电力系统运行与控制领域的研究。

Influence of down-sampling by two in wavelet transform on precision of traveling wave fault locating

LIANG Jun¹, YUN Zhi-hao¹, REN Shu-fei², YANG Yan-yong¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

Abstract: Based on the method that indicates the arriving time of the traveling wave head using the maximum module of the wavelet transform, the fault locating error caused by the wavelet transform with down-sampling by two is analyzed in detail. Under some conditions, the maximum module of wavelet transform may be missed because of down-sampling by two. An optimization method is proposed to improve the reliability of getting the traveling wave head, smoothing both beginning and ending data. The theoretical analysis and EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) simulations show that, the precision of the traveling wave fault locating can be improved without down-sampling by two.

Key words: wavelet transform; traveling wave; fault locating