

喇曼复用 OTDR 模式识别算法研究

张佐星,施冬钢,胡龙舟,张 峰,郭莎莎

(国网湖北省电力有限公司检修公司,武汉 430050)

摘要:为了解决多跨段长传输系统中光纤故障定位不够准确的问题,针对融合光时域反射仪(OTDR)功能的喇曼放大器系统,提出一种定位 OTDR 曲线中非反射事件的方法。首先将 OTDR 曲线分割成事件区间和噪声区间,采用三阶差分算法定位事件区间中的突变点。然后利用霍夫变换方法确定差分变换后的检测阈值,该阈值可用于精确滤除突变点区间中的噪声,最后采用模板匹配法,将差分变换后的曲线中的事件识别归集为三角图像边缘检测问题。实验测试结果表明:该方法可进行阈值动态调整,能有效提升事件检测精度。

关键词:喇曼放大器;OTDR;模式识别

中图分类号:TN206 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)07-0021-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.07.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Pattern recognition algorithm research on Raman multiplexing OTDR

ZHANG Zuoxing, SHI Donggang, HU Longzhou, ZHANG Feng, GUO Shasha

(State grid electric power overhaul company of Hubei province, Wuhan 430050, China)

Abstract: In order to solve the problem of inaccurate optical fiber fault location in multi-span long transmission system, aimed at the Raman amplifier system which includes optical time domain reflectometer (OTDR) function. This paper proposed a non-reflective event locating algorithm. OTDR trace was divided into event region and noise region first, and a third order difference transformation was applied to locate the discontinuity in the trace. Using Hough transformation method to calculate the detection threshold after difference transformation, this threshold can be used to precisely filter noise points in the discontinuity region. Finally, the recognition of the event in the trace after difference transformation equals to the recognition of the edge of triangle. Actual test results show that the proposed algorithm can adjust thresholds dynamically and improve location resolution.

Key words: Raman amplifier; OTDR; pattern recognition

0 引言

光时域反射仪(OTDR)是一种常见的光纤故障定位设备。OTDR 利用瑞利散射原理检测光纤损耗点,瑞利散射光在光纤中经过掺铒光纤放大器(EDFA)后会受放大自发辐射(ASE)噪声影响产生畸变,导致 OTDR 无法形成指数变化的曲线^[1]。喇曼放大器的宽带放大特性能够让瑞利散射光穿透,但该放大器的高增益特

点又引入了新的应用问题:当光纤端面不够干净,即存在损耗时,高功率输出容易烧毁端面。因此,喇曼放大器在实际工程使用中需要和 OTDR 仪表一同使用,保证开通的安全性^[2]。

OTDR 曲线中的损耗点一般由熔点及光接头产生,当喇曼放大器接入业务信号中进行光放大时,OTDR 需要准确分析出所有的光损耗点及对应损耗值,以供系统分析是否满足开泵条件。因此,一方面需要在受业务信号干扰产生噪声的 OTDR 曲线中分析出损耗点区间;另一方面需要在损耗点区间中精确分析出损耗事件位置。试验表明:即使是大动态范围的 OTDR 测试仪表在这种情况下测试分析的准确率也只有 80%^[3]。因此,本文采用算法优化的思路进一步研究 OTDR 曲线中微小损耗点分析方法。

收稿日期:2019-04-10。

作者简介:张佐星(1983-),男,研究生,高级工程师。主要研究方向为电力通信网运维系统设计与实践,包括光传输设备信号优化、交换网设备调度算法设计、光纤线路保护系统和光缆监测系统信号分析设计。负责完成国网电力系统科研项目 3 项,获国网湖北电力公司优秀员工称号。



1 曲线分析

OTDR 向光纤中发射脉冲光,接收的瑞利散射光是呈指数衰减的,该信号经过高速芯片采样和 A/D 转换后,会得到 51200~128000 个采样点数据,在测量距离不变的情况下,采样点的多少随脉冲能量变化。采用对数化方法将指数衰减的信号转化为线性模型后,可以得到一条包含突变事件和随机噪声的线性衰减曲线,如图 1 所示。可以看出,一条典型的 OTDR 曲线中包含反射事件、非反射事件、衰减区间和随机噪声。其中,反射事件表示连接头,非反射事件表示衰耗点,每 2 个事件之间的区间为衰减区间,衰减区间对应传输光纤介质中无任何连接头或熔点的段落。

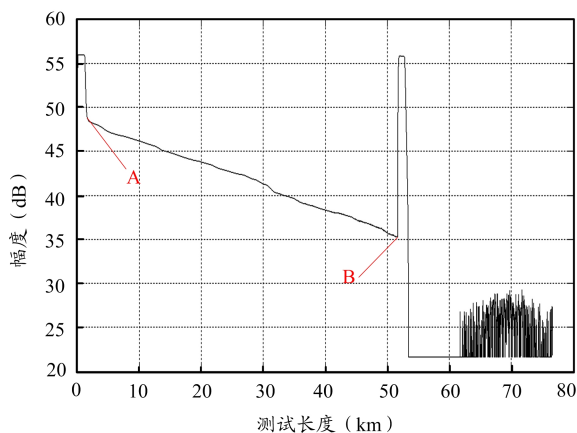


图 1 OTDR 测试曲线

最小二乘法和小波变化是分析 OTDR 曲线事件的经典方法,针对幅度较明显的反射型事件识别率较高。但这 2 种方法均依赖于固定阈值,检测噪声的精度无法自适应变化^[4],不能识别微小的非反射事件。针对非反射型事件,本文采用图像处理中常用的霍夫变换和图像的模式识别方法,实现一种具有自适应噪声容纳能力的检测方法。

2 曲线建模

2.1 三阶差分变换

对 OTDR 曲线进行建模,需要将采样点划分为最小检测区间。通常采用单个脉冲在光纤中传播的时间对应的采样点个数 M 作为最小检测区间^[5]。

本文使用图 1 中的测试曲线,纵轴值用 y 表示,测试曲线的横轴除以采样点间距得到采样点序号,用 x 表示。光纤头端反射结束位置为 A 点,末端反射开始位置为 B 点,A~B 区间内采样点总个数为 N ,对 A~B 区间内所有采样点进行三阶差分变换,变换时采用的差

分跨距(即最小检测区间)为 M 。 Y 表示对 y 进行变换后的曲线,变换方法如下:

$$Y(x) = \frac{y(x) + y(x+1) + y(x+2)}{3} - \frac{y(x+M) + y(x+M+1) + y(x+M+2)}{3} \quad (1)$$

针对图 1 中的曲线,所有采样点进行三阶差分变换后,采样点幅度值转换为曲线变化的梯度值 Y 。反射事件对应一对三角形,分别为正凸和负凸模式;非反射事件对应一个正凸三角形模式;噪声对应的形状无明显规律。

为了定位非反射事件,首先需要对所有的三角形图像进行标定。取 Y 的 y 轴水平割线 $y=a$,则可以得到若干个割线与 Y 曲线构成的近三角形图形。割线幅度值 a 越精确,就可以在初步筛选中尽量减少近三角形的数量范围,降低后续匹配算法的时间复杂度。

a 的判定取决于光纤单位衰减系数,即 OTDR 曲线中的衰减区间^[6]。采用最小二乘法拟合求得的衰减率准确率较低,本文引入霍夫变换方法进行分析。

2.2 霍夫变换

霍夫变换是图像识别中常用的直线检测方法之一^[7],利用笛卡尔坐标系到霍夫坐标系的变换可检测在同一直线段上的所有点。OTDR 曲线的衰减区间正好是一段略带噪声扰动的直线段,本文采用反霍夫变换原理,利用位于同一直线段上的所有点共线反推直线段的斜率,即可求出光纤的单位衰减率。

计算原理为:对 A~B 区间的 N 个采样点,设衰减区间为 $y=ax+b$, a 即待确定割线幅度值,在此区间内所有采样点均在 $y=ax+b$ 所表示的线段上。将霍夫坐标系进一步转换为极坐标系,衰减区间表示为 $\rho \sin \theta = -\rho \cos \theta a + b$,其中 ρ 为极坐标系中圆的半径。进行霍夫变换后的曲线如图 2 所示,图 1 中曲线每个点对应

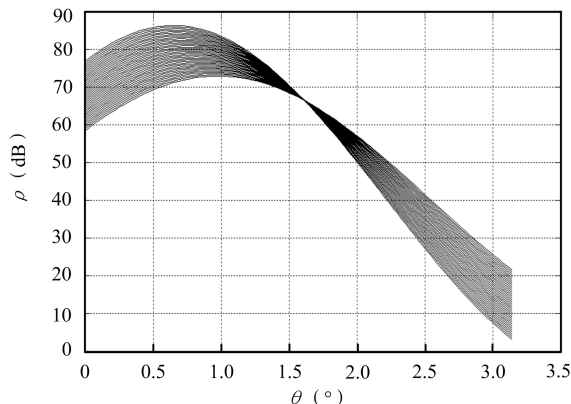


图 2 OTDR 各点在极坐标空间中对应的正弦曲线

图 2 中极坐标系空间中的一条正弦曲线,原曲线中共线的点即同一衰减区间内的点,对应的正弦曲线相交于一点,该点的 $\cot\theta$ 值等于 a 。

为了求得所有正弦曲线的交点,对每条正弦曲线设置一个参数累加数组 $Q(\theta, \rho)$,初始值为 0。实验表明:对每段衰减区间取 500 组 θ 数据进行累加时,能有效探测交点位置;当选取的采样点数超过该临界值时,累加数组计算量仍在增加,而交点检测概率降低。因此,设 θ 以 0.01π 为单位,在 $0 \leq \theta \leq 0.5\pi$ 区间内自增,即 $\theta = \{0, 0.01\pi, 0.02\pi, \dots, 0.49\pi, 0.5\pi\}$ 。对每个采样点 (x, y) ,遍历所有 θ 值,每次遍历数组 $Q(\theta, \rho)$ 自增 1。搜索 (θ, ρ) ,使其为局部最大值时,对应的 θ 即为交点^[8]。

图 1 中衰减区间范围的长度不超过 $10 \times M$, 因此采用 $10 \times M$ 个采样点为一组数据源进行多次霍夫变换和数组累加,得到最大累加量平均值 $\theta = 0.45\pi$, 换算出的 a 值为 0.2156, 与光纤实际衰减率 0.215 相差极小,证明该方法具有可行性。

3 事件模式识别

3.1 曲线去噪

采用三阶差分变换后得到的曲线如图 3 所示,由于原始曲线中有随机高斯噪声,经过差分变换后可以看到多个突变区间转换成三角图形,但每个三角图形均带有大量毛刺,增加了识别难度^[9]。由于差分处理后的曲线存在的毛刺幅度高度一致,适合采用非局部均值滤波进行去噪。非局部均值滤波原理如下:

$$NL[y](x) = \sum_{j \in I} w(i, j) v(j) \quad (2)$$

其中, $NL[y]$ 表示滤波后的值, $w(i, j)$ 表示点 i 与 j 之间

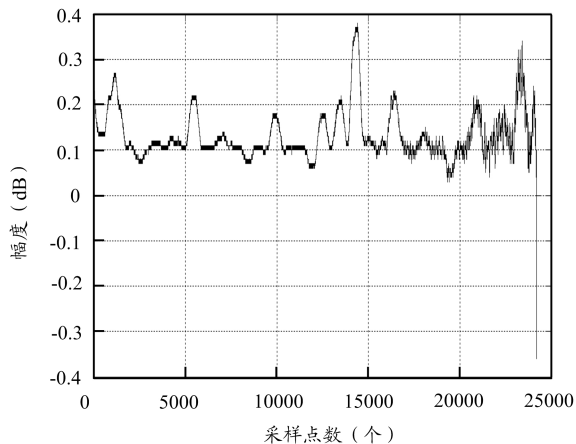


图 3 OTDR 差分变换后曲线

的相似权重, $v(j)$ 为归一化系数。相邻区间内相似度越高的点对应的权重值越大,相似性由两点之间的欧式距离衡量。我们仍旧选择以 M 个点为单位,计算权重,得到滤波后的效果如图 4 所示。

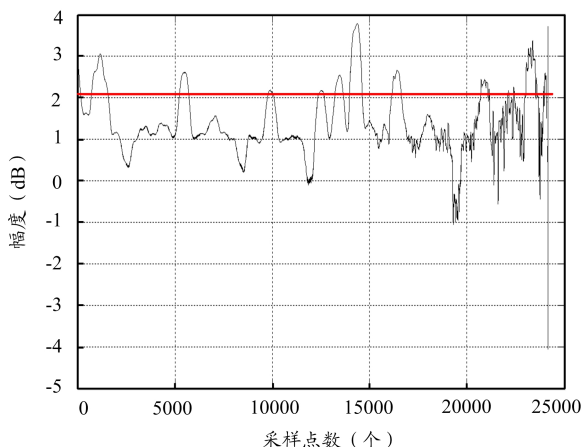


图 4 OTDR 差分变换后曲线去噪

3.2 边缘检测

从图 4 可以清晰地看到,多个边缘平滑的正凸近三角形图像。在 2.2 节中求得检测阈值 $a = 0.2156$, 经过去噪后差分变换幅度增大,与滤波权重成正比, a 对应等幅增加。首先将去噪后的曲线平移到 $y = 0$ 轴,然后计算检测阈值为 2.15,即取 $y = 2.15$ 的直线(如图 4 中红色线段所示)与曲线相切,可得到 18 个交点,记 18 个交点坐标为 $[x_1, x_2], [x_3, x_4], \dots, [x_{17}, x_{18}]$ 。每个交点对应一组 x 轴坐标区间,在该区间所有点构成一个形状,记为 $\Delta_j, j = \{1, 2, \dots, 9\}$ 。

对每个 Δ_j ,可以简单识别图形区间的顶点。顶点的定位采用局部极大值法^[10],即每对交点区间内 $\forall x$,若 x 是该区间内的最大值点,则为该图形区间的顶点。

3.3 质心匹配

针对已得到的 9 个形状,需要识别其中真正的非反射型事件。非反射事件在 OTDR 曲线中对应 3 段具有一定斜率的线段,变换后的图形应该是三角形形状。本文采用质心计算法判断 9 个图形是否是三角形形状:

① 计算 $[x_1, x_2], [x_3, x_4], \dots, [x_{17}, x_{18}]$ 共 9 个区间内所有点的 x 轴和 y 轴坐标平均值,得到质心的位置 $[x_{j1}, y_{j1}], [x_{j2}, y_{j2}], \dots, [x_{j9}, y_{j9}]$ 。

② 针对每个区间,分别计算 $[x_1, x_2], [x_3, x_4], \dots, [x_{17}, x_{18}]$ 到质心 $[x_{j1}, y_{j1}], [x_{j2}, y_{j2}], \dots, [x_{j9}, y_{j9}]$ 的距离。

③ 根据每个点对的距离值,进行曲线拟合。对拟

合后的曲线,计算每个点与质心的距离,统计极值点个数,如果图形为三角形,极点个数为 $2^{[1]}$ 。

④根据设定的计算规则,对 9 个三角图形依次进行计算后,符合极点个数为 2 的三角形即对应非反射事件。

经过计算,得到图 4 曲线对应的三角形数量,如表 1 所示,本次计算中采样点总数为 24400, $M=244$,点距为 2.044 m。将点序号值乘以点距得到 x 轴为距离(单位为 km)、 y 轴为信号幅度值(单位为 dB)的 OTDR 曲线图。

表 1 非反射事件检测表

事件	采样区间	实际事件	极点个数	判断事件
1	[599,1547]	非反射	2	非反射
2	[5701,5218]	非反射	2	非反射
3	[9771,10045]	非反射	2	非反射
4	[12377,12668]	非反射	2	非反射
5	[13243,13678]	非反射	2	非反射
6	[13942,14647]	非反射	2	非反射
7	[16108,16674]	非反射	2	非反射
8	[20735,21148]	噪声	6	噪声
9	[23857,23570]	噪声	8	噪声

表 1 中的非反射事件在图 1 曲线上的对应位置标记如图 5 所示。得到非反射事件位置后,可以采用海伦公式计算每个事件的衰耗值。

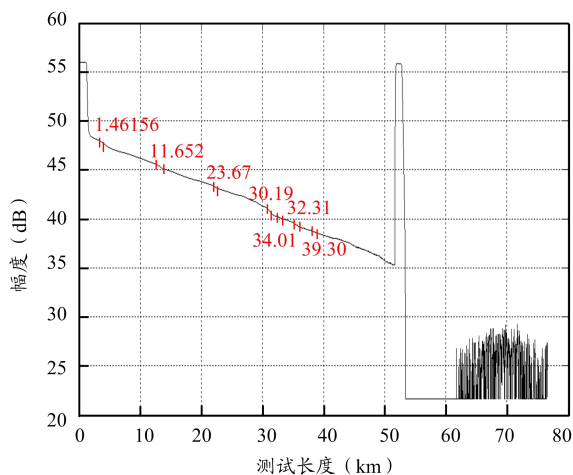


图 5 检测结果图

从表 1 可以看出,霍夫变换方法结合模板匹配法能检测定位出图 1 曲线中微小的非反射事件,且针对尾部噪声中的伪事件进行了滤波,没有产生误判。

4 结束语

本文针对喇曼放大器使用中端面衰耗点难以识别的问题,提出了喇曼复用 OTDR 的系统概念,并将图像处理中二维像素点形状识别采用的多种算法,如霍夫变换、质心识别等运用到 OTDR 的二维点序-信号幅度曲线中,精确定位 OTDR 曲线中微小的非反射事件。本方法将测试分析的准确率由 80%提升至 95%以上,有效解决了微小衰耗点事件的误判问题,为喇曼复用 OTDR 系统的工程开通提供了准确的分析手段。

参考文献:

- [1] SATO T, HORIGUCHI T, KOYAMADA Y, et al. A 1.6μm band OTDR using a synchronous Raman fibre amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(8): 923-924.
- [2] LAFERRIERE J, SAGET M, CHAMPAVERE A. Original method for analyzing multipath networks by OTDR measurement[C]//Conf. on Optical Fiber Communication, Feb. 16-21, 1997, Texas, USA. Texas: OSA, 1997: 99-101.
- [3] NISSOV M, ROTTWITT K, KIDORF H D, et al. Rayleigh crosstalk in long cascades of distributed unsaturated Raman amplifiers [J]. Electronics Letters, 1999, 35(12): 997-998.
- [4] DUWAYNE R A, LARRY M J, FLORIAN G B. Troubleshooting Optical Fiber Networks: Understanding and using optical time-domain reflectometers[M]. Waltham: Academic Press, 2004.
- [5] BLANCHARD P, CLIN R, DUCOS L. Improvement on nonreflective event locating accuracy with OTDR [J]. Electronics Letters, 1990, 31(23): 2034-2035.
- [6] PHILEN D L, WHITE L A, KUHL J F, et al. Single-Mode Fiber OTDR: Experiment and Theory[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 10(18): 1499-1508.
- [7] BALLARD D H. Generalizing the Hough Transform to detect arbitrary shapes[J]. Pattern Recognition, 1978, 18(10): 129-143.
- [8] BERGEN J R, SHYAYSTER H. A probabilistic algorithm for computing Hough Transform[J]. Journal of Algorithms, 1991, 12(4): 639-656.
- [9] ZHOU W C, JIANG W H, LI M, et al. Real-time area correlation tracker implementation based on absolute difference algorithm [J]. Optical Engineering(S0091-3286), 2003, 42(9): 2755-2760.
- [10] 边肇祺. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.
- [11] SCHALKOFF R J. Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches[M]. New York: John Wiley & Sons, 1992.