

提高 OTDR 动态范围和空间分辨率的研究进展

尚秋峰, 郑国强

(华北电力大学, 河北 保定 071003)

摘要: 动态范围和空间分辨率是光时域反射仪(OTDR)系统的关键指标。在阐述 OTDR 动态范围和空间分辨率相互关系的基础上, 综述了现阶段提高 OTDR 动态范围和空间分辨率的新方法, 包括脉冲编码调制法、OTDR 信号处理算法、线性光学采样法和混沌光时域反射法, 分别介绍了这些方法在国、内外的研究进展, 并对提高 OTDR 动态范围和空间分辨率的前景进行了展望。

关键词: 光时域反射仪; 动态范围; 空间分辨率

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)03-0013-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress in improving the dynamic range and spatial resolution of OTDR

SHANG Qiufeng, ZHENG Guoqiang

(North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: Dynamic range and spatial resolution are the key indexes of optical time domain reflectometry(OTDR) system. On the basis of expounding the relationship between OTDR dynamic range and spatial resolution, this paper summarizes the new methods of improving OTDR dynamic range and spatial resolution at present, including pulse code modulation, OTDR signal processing algorithm, linear optical sampling method and chaotic optical time domain reflection method, introduces the research progress of these methods at home and abroad, and the future of improving OTDR dynamic range and spatial resolution is also prospected.

Key words: optical time domain reflectometry; dynamic range; spatial resolution

0 引言

光时域反射仪(OTDR)是一种基于分布式光纤传感的设备,通过对光在光纤中传输时产生的瑞利背向散射光和菲涅尔反射光的功率进行检测,从而对光纤上发生的事件进行有效定位。动态范围是 OTDR 的关键技术指标之一,决定了反射仪进行有效测量的光纤的最大长度,动态范围越大,所能测量的光纤距离越

长^[1]。而空间分辨率是指 OTDR 能够识别的 2 个故障点之间的最短距离,提高空间分辨率指标有利于准确定位光纤故障。一般通过增加光脉冲的宽度来提高动态范围,但脉冲宽度的增加会导致空间分辨率下降,这就限制了传统 OTDR 性能的进一步提升。因此,如何平衡 2 个参数,实现大动态范围、高空间分辨率的 OTDR 成为研究的热点之一^[2]。

本文介绍提高 OTDR 动态范围和空间分辨率的新方法,并给出总结和展望。

1 研究现状

目前,提高 OTDR 动态范围主要通过增加累加次数、提高光脉冲的宽度和改善接收机的灵敏度等方法。提高脉冲的宽度会导致空间分辨率的降低,但由于超短脉冲具有高的脉冲光功率,也可以通过超短脉冲同时保障空间分辨率和动态范围,然而超短脉冲激

收稿日期: 2019-09-06。

基金项目: 河北省自然科学基金(E2019502179)资助; 国家自然科学基金(61775057)资助。

作者简介: 尚秋峰(1968-),女,博士,教授,就任于华北电力大学(保定)电子与通信工程系,主要研究方向是光电子与光传感。负责河北省自然科学基金项目 1 项、国家“863”计划 1 项、国家自然科学基金 2 项、高等学校博士学科点专项科研基金 1 项和电力公司科技促进项目 1 项,获国家专利授权 6 项。



光器的成本比较高,使其在实际使用中受到了限制^[4]。因此,针对动态范围和空间分辨率的矛盾问题,国内外研究者提出了一些新方法,如脉冲编码调制法、OTDR 信号处理算法、线性光学采样法和混沌光时域反射法。

1.1 脉冲编码调制法

脉冲编码调制是一种可以在不降低空间分辨率的情况下提升动态范围的方法,它的主要原理是不改变入射脉冲的宽度,而是通过提高入射光脉冲的个数来实现的。将多个光脉冲进行调制组合,形成一个光脉冲序列注入到光纤中,在接收端用相应的算法进行解调。从原来只有一个光脉冲变为多个光脉冲,光信号的功率增强,从而使动态范围得到提高。同时,由于本身光脉冲宽度没有变化,所以空间分辨率没有受到太大影响,可以很好地解决动态范围和空间分辨率之间的矛盾,其基本结构图如图 1 所示。

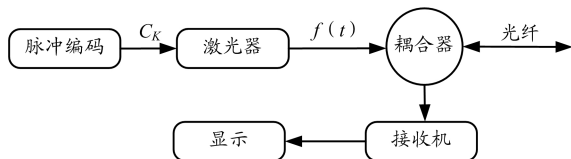


图 1 脉冲编码调制法基本结构示意图

图 1 中, C_k 为编码后产生的一段数字序列, 该序列只有 0,1 这 2 个电平的值。首先,用 C_k 去调制激光器从而产生编码脉冲 $f(t)$,再将 $f(t)$ 经过耦合器注入到光纤中,组成 $f(t)$ 的各个光脉冲在光纤传输过程中会发生瑞利散射和非涅尔反射,在接收端被接收机接收,用相应的算法解调得到 OTDR 信号。

目前,利用脉冲编码调制法提高 OTDR 动态范围的研究广泛。1989 年, M. Nazarathy 等人首次提出使用格雷码对光脉冲进行编码的方法,利用互补相关技术可以提高 OTDR 动态范围,并且使用 255 位格雷码进行光脉冲调制明显地提高了动态范围和减少了测量的时间^[4]。1993 年, M.D.Jones 提出把简单编码(S 编码)应用在 OTDR 中,在理论上比较了 S 编码和格雷码的应用效果,并证明了 S 编码的有效性^[5]。2013 年, Christopher 等人把格雷码和 S 编码的混合编码脉冲作为激光调制脉冲,与 16 位的格雷码进行了 OTDR 信噪比增强的对比实验,得到了 33.5 dB 的动态范围和 3 m 的空间分辨率^[6]。2016 年,电子科技大学的王鹏飞对探测信号进行了 32 阶格雷编码,其脉冲宽度为 20 μs ,在通过 150 kHz 的低通滤波器后,经过格雷编码的 OTDR 动态范围相比传统 OTDR 提高了 6 dB^[7]。

2019 年,华中科技大学的武汉国家光电实验室唐明等人提出一种基于格雷编码 OTDR 的过采样技术,提高了 OTDR 的信噪比,从而提高了 OTDR 动态范围,而且成本低^[8]。

除了格雷码和 S 编码外,互补相关正交序列(CCPONS)编码也可以用于 OTDR。2008 年, P. K. Sahu 等人提出利用 CCPONS 编码来设计 OTDR,他们使用了 64 位 CCPONS 编码,发现该方法与传统的 OTDR 相比,不仅测量时间减少,还实现了 3.7 dB 信噪比的改进,动态范围得到了提升^[9]。2015 年,燕山大学的刘劲军等人提出把 CCPONS 编码与 S 编码结合在一起的混合编码方法(简称为 C-S 复合码),发现基于 C-S 复合码编码脉冲的 OTDR 系统信噪比是 CCPONS 编码和 S 编码 OTDR 各自的信噪比之积,并且只要任意提高其中的一种编码的编码长度,系统的信噪比都会提高,从而动态范围也得以提高^[10]。2016 年,电子科技大学的田雕在脉冲宽度为 20 ns 的情况下,使用 4 阶 CCPONS 编码,得到了 5 m 的空间分辨率;脉冲宽度在 30 ns 的情况下,使用 16 阶 CCPONS 编码,得到了比传统 OTDR 高 7.8 dB 的动态范围^[11]。

1.2 OTDR 信号处理算法

运用 OTDR 在光纤通信网络中进行故障检测时,由于各种硬件设备、有源无源器件的存在,会引入大量噪声。其中,硬件设备中产生的电路噪声是噪声的一个主要来源,改善电路噪声的方法主要包括改进电路设计、降低电源纹波和合理进行模/数(A/D)电路的布局、走线等方法。此外,本节重点介绍一种常见的抑制噪声的方法,即使用 OTDR 信号处理算法提高 OTDR 的动态范围。该算法包括累加平均法、小波变化法和短时分数阶傅里叶变换法。

◆累加平均法。它提高 OTDR 动态范围的原理是存储多次接收数据并对其进行累加平均,以此来降低噪声水平^[12]。实际使用中,累加平均法一般与脉冲编码结合使用。2010 年,上海交通大学的沈东辉等人对 OTDR 信号进行了 512 次的累加平均,结合 64 位的双正交编解码技术,使 OTDR 的动态范围提高了 14.7 dB^[13]。2013 年,电子科技大学的毛燕婷在脉冲宽度为 20 ns 的情况下,进行了 1000 次的累加平均,结合使用 7 阶 S 编码得到了比单脉冲 OTDR 系统高 3.5 dB 的动态范围^[12]。

◆小波变换法。它是一种具有良好时频分析功能的方法,可以很好地抑制噪声,并从中提取有用信息,对事件点进行检测。因此,采用小波变换的方法对

OTDR 信号进行处理提高系统的信噪比,从而使 OTDR 系统动态范围得以提升。1994 年,xiaodonggu 等人首次提出了小波分析在 OTDR 中的应用,发现基于小波变换的相位可以完成光纤事件点的评估与检测,通过实验验证了小波变换法可以对 OTDR 性能有显著的提高^[14]。2006 年,华北电力大学的唐良瑞等人使用小波变换法对其中的高频分量进行阈值滤波和信号增强,不仅抑制了噪声,还增强了 OTDR 的突变点信息,使其对故障点更好识别^[15]。2019 年,彭怀敏等人提出了一种新的小波变换阈值处理降噪方法,该方法不仅保留了硬阈值法不改变大信号的特点,还兼顾了软阈值法的连续性特点,降噪效果良好,提升了 OTDR 的动态范围^[16]。

◆短时分数阶傅里叶变换法。2019 年,武汉光子国家实验室和华中科技大学联合提出了一种基于数字线性调频(DLFM)脉冲和短时分数阶傅里叶变换来提高 OTDR 动态范围和空间分辨率的新方法,称为 DLFM-OTDR,其原理如图 2 所示。使用直接调制激光器作为发射端的光源,信号发生器可以发射 2 个周期性互补 DLFM 信号; $DSA(t)$ 和 $DSB(t)$ 分别控制激光器开关,调制好的光脉冲注入到被测光纤中,而背向散射光经过雪崩光电二极管(APD)直接检测和光电转换后成为电信号。

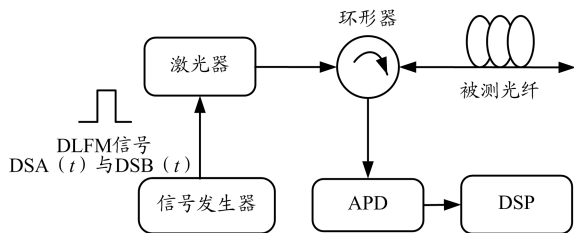


图 2 DLFM-OTDR 原理图

引入短时分数阶傅里叶变换用于数字信号处理(DSP)和噪声滤波,该新方法将动态范围提高了 7 dB,空间分辨率提高了近 10 倍。空间分辨率由 DLFM 信号的扫描频率范围而不是脉冲宽度决定,通过提高 DLFM 的扫频范围,可以进一步提高空间分辨率^[17]。

1.3 线性光学采样法

2017 年,上海交通大学何祖源团队提出了一种以锁模激光器为脉冲源结合线性光学采样技术的超高分辨率 OTDR 系统,其原理如图 3 所示。超短脉冲由脉冲发生器产生。超短脉冲通过环形器发射到被测光纤,并反向散射到循环器的第三个端口;同时,使用采样激光器发出与脉冲发生器重频基本一致的短脉冲

与环形器输出的信号进行干涉,干涉得到的信号被平衡光电探测器接收,最后对接收到的电信号进行 A/D 转换处理。光学采样技术的思路主要是通过花费较长的积分时间来实现的,用较长的时间代替较宽的带宽,因此通过这个方法可以获取比较高的信号功率;同时采用较高灵敏度的光电探测器,可以实现较大的动态范围。

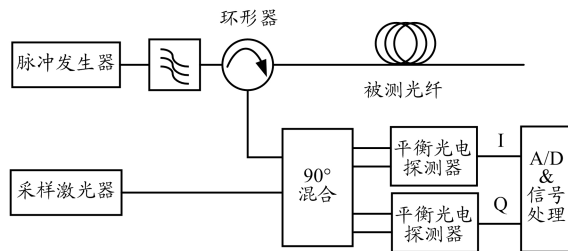


图 3 基于线性光学采样法的 OTDR 原理示意图

该实验还加入了 DSP 色散补偿,在脉冲宽度为 3.4 ps 的情况下,实现了 340 μm 的空间分辨率、54 dB 的动态范围^[18]。

1.4 混沌光时域反射法

2008 年,太原理工大学的王云才教授发现在 OTDR 系统中使用混沌光源代替传统 OTDR 中使用的脉冲光,可以使 OTDR 系统的空间分辨率和动态范围有较大的提高,得到了在 140 m 探测距离的情况下 6 cm 的空间分辨率^[19],其原理如图 4 所示。混沌激光器作为光源在发射端产生混沌激光注入系统,混沌光经过光耦合器被分成 2 个支路:一路光经耦合器被光电探测器变为电信号;另一路光通过光环形器进入待测光纤。在光纤中产生后向瑞利散射光,散射光中携带着光纤的损耗信息,这散射光通过环形器被另一个光电探测器转换成电信号,2 个电信号经过相关器生成相关曲线,从曲线的延迟时间和幅度来推断光纤故障情况^[3]。

2015 年,电子科技大学饶云江课题组提出了一种基于全光纤的长距离高精度 OTDR,使用全光纤混

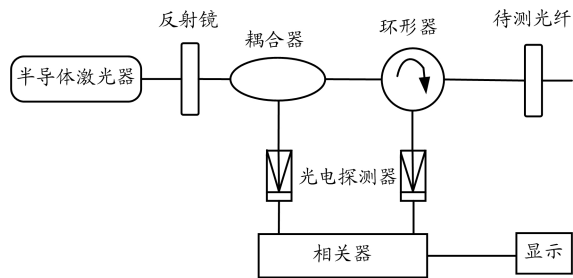


图 4 基于混沌光时域反射法的 OTDR 原理示意图

沌光源实现了 8.2 cm 的空间分辨率和 100 km 距离的光纤故障定位,比传统 OTDR 有了明显提升^[20]。2017 年,中国科学院半导体研究所赵玲娟课题组提出了一种使用宽带混沌激光器的长距离高分辨率的光时域反射测量方法,实现了与距离无关的 2.6 mm 的空间分辨率和 47 km 的探测范围^[21]。2019 年,太原理工大学王云才课题组又有了新的突破,他们提出一种结构简单、成本低廉的光纤环来对混沌 OTDR 的动态范围进行改进,对有、无光纤环的混沌 OTDR 动态范围和故障测量结果进行对比,发现利用光纤环,混沌 OTDR 动态范围提高了 5 dB,并实现了 49.4 km 的光纤故障定位^[22]。

2 结束语

本文综述了多种提高 OTDR 动态范围和空间分辨率的方法,包括脉冲编码调制法、OTDR 信号处理算法、线性光学采样法和混沌光时域反射法。这些方法从改进激光器技术、提高探测器灵敏度和信号处理算法去除噪声等多个方面来提高 OTDR 动态范围和空间分辨率,从而使其可以在更远的传输距离、更复杂的光通信网络中使用。然而,由于 OTDR 动态范围和空间分辨率这一矛盾关系的相互制约,光器件的性能还存在缺陷等因素的存在,实现大动态范围、高空间分辨率的 OTDR 技术还有待更多的研究和提升。

参考文献:

- [1] 张丽. 基于红光半导体激光器的光纤故障可视化检测研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [2] 邱大钧. 传输网实时在线监测系统方案设计[J]. 微型机与应用, 1998 (6): 25-28.
- [3] 王龙清. 光纤色度色散对混沌光时域反射仪性能的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [4] NAZARATHY M, NEWTON S A, GIFFARD R P, et al. Real-time long range complementary correlation optical time domain reflectometer [J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(1): 24-38.
- [5] JONES M D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7): 822-824.
- [6] BENTZ C M, BAUDZUS L, KRUMMRICH P M. Measurements of a Novel FTTH/PON Monitoring Technique based on Unique Wavelength-Selective Mirror Combinations using Composite Coding Scheme OTDR for

SNR Enhancement [C]//Photonic Networks, May 6-7, 2013, Leipzig, Germany. Berlin: VDE, 2013: 1-7.

- [7] 王鹏飞. 利用互补相关提升 OTDR 动态范围的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [8] LIAO RUOLIN, TANG MING, ZHAO CAN, et al. Harnessing oversampling in correlation-coded OTDR [J]. Optics express, 2019, 27 (2): 1693-1705.
- [9] SAHU P K, GOWRE S C, MAHAPATRA S. Optical time-domain reflectometer performance improvement using complementary correlated Prometheus orthonormal sequence [J]. Iet Optoelectronics, 2008, 2 (3): 128-133.
- [10] 刘劲军,程永昕,刘国庆,等. 基于 C-S 复合码的 OTDR 系统信噪比提高方法[J]. 光通信技术, 2015, 39(7): 35-37.
- [11] 田雕. CCPONS 编码嵌入式 OTDR 及接入网在线监测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [12] 毛燕婷. 简单编码光时域反射探测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [13] 沈东辉,谢玮霖,董毅,等. 基于双正交编码的波长可调谐 OTDR 研究[J]. 光通信技术, 2010, 34(4): 39-41.
- [14] GU X, SABLATASH M. Estimation and detection in OTDR using analyzing wavelets [C]//Proceedings of IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, October 25-28, 1994, Philadelphia, USA. Piscataway: IEEE, 1994: 353-356.
- [15] 唐良瑞,祁兵,陈常洪,等. 一种基于小波变换的光纤故障分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 101-105.
- [16] 彭怀敏,张超,倪演海,等. 基于小波变换的 OTDR 降噪算法研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(7): 17-20.
- [17] ZHANG PU, FENG QI GUANG, LI WEI, et al. Simultaneous Otdr Dynamic Range and Spatial Resolution Enhancement By Digital Lfm Pulse and Short-time Frft[J]. Science Letter, 2019, 9(4): 668-680.
- [18] WANG S, FAN X, HE Z. Ultra-high resolution Optical Reflectometry based on Linear Optical Sampling Technique with Digital Dispersion Compensation[J]. IEEE Photonics Journal, 2017(99): 1-1.
- [19] WANG Y C, WANG B J, WANG A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [20] WANG Z N, FAN M Q, ZHANG L, et al. Long-range and high-precision correlation optical time-domain reflectometry utilizing an all-fiber chaotic source[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15514-15520.
- [21] ZHANG L M, PAN B W, CHEN G C, et al. Long-range and high-resolution correlation optical time-domain reflectometry using a monolithic integrated broadband chaotic laser[J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 1253-1256.
- [22] 胡志宏,贺培鑫,王冰洁,等. 利用光纤环提高混沌 OTDR 动态范围[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1-11.

欢迎投稿, 欢迎订阅, 欢迎刊登广告!