引用本文：邓沌华，张谱，李蔚：一种超长跨距光纤传输链路监测方法[J]. 光通信技术，2019，43(11)：29-32.

一种超长跨距光纤传输链路监测方法

邓沌华[1]，张 谱[2]，李 蔚[2*]

（1. 湖北经济学院 信息与通信工程学院，武汉 430205；2. 华中科技大学 武汉光电国家实验室，武汉 430074）

摘要：为了解决超长跨距光纤传输的损耗测量的问题，提出一种新型基于数字线性调频－光时域反射(DLFM-OTDR)的测量方法，该方法能解决最大测量距离和空间分辨率之间的矛盾。DLFM-OTDR 在发射端和接收端分别采用直接调制和直接检测，结构简单，不需要额外的光学器件，并且引入短时分数阶傅里叶变换(STFrFT) 进行信号处理和噪声滤波。使用 DLFM-OTDR 开发板在实际光纤传输链路中进行了实验测试，以光纤链路长度为 2×150 km 的测量结果为例进行了分析，实验结果表明：DLFM-OTDR 特别适合在单跨段很长的情况下，实现超长光纤链路的监测。

关键词：超长跨距光链路；光时域反射仪；数字线性调频；短时分数阶傅里叶变换

中图分类号：TN256　**文献标识码**：A　**文章编号**：1002-5561(2019)11-0029-04

DOI：10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.008　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)**：

Monitoring method for ultra-long span optical fiber transmission link

DENG Zhuanhua[1], ZHANG Pu[2], LI Wei[2*]

(1. School of Information and Communication Engineering, Hubei University of economics, Wuhan 420205, China;
2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to solve the problem of loss measurement of ultra-long span fiber transmission, this paper proposes a new measurement method based on digital linear frequency modulation optical time domain reflection (DLFM-OTDR). This method can solve the contradiction between the maximum measurement distance and the spatial resolution. The DLFM-OTDR uses direct modulation and direct detection at the transmitter and receiver respectively. The structure is simple and requires no additional optics. The method introduces the short-term fractional Fourier transform (STFrFT) for signal processing and noise filtering. the paper uses the DLFM-OTDR development board to perform experimental tests on the actual fiber transmission links. The measurement results of the fiber link length of 2×150 km are taken as an example, the experimental results show that the DLFM-OTDR is especially suitable for monitoring the ultra-long fiber link under the condition of long single span.

Key words: ultra-long span fiber; optical time domain reflection; digital linear frequency modulation; short-time fractional Fourier transform

0 引言

在超长跨距电力线传输的光纤通信系统中，因为光纤链路长，很容易发生故障。所以迫切需要对光纤进行故障监测。同时，由于人烟稀少，单跨段传输距离很长，这对于光纤链路的故障监测提出了新的挑战。光时域反射仪(OTDR)是光纤性能检测和故障定位的常用仪器。它广泛应用于光纤通信系统中，用于测量光纤的长度、衰减、连接器损耗、拼接和断点[1,2]。

要实现长距离光纤链路的检测或监测，可以通过增加注入光纤的探测光脉冲的能量来提高 OTDR 的动态范围，但是增加注入光纤的光功率会产生受激布里渊和调制非线性等非线性效应[3,4]，影响背向散射光的检测。也有研究人员提出通过相干检测来提高接收机的灵敏度[5,6]。但检测距离受光源相干长度、相位噪声和背向散射光的偏振态等因素的限制[7]。最近有学者提出基于扩频技术对光脉冲进行编码，再将编码后的光脉冲作为探测信号注入光纤[8,9]。在传统的 OTDR 中，空间分辨率由脉冲宽度确定，并且与测量距离相互矛盾。而基于傅里叶变换的光频域反射计(OFDR)可以

收稿日期：2019-06-17。

基金项目：光迅科技有限公司科研开发基金资助；光纤通信与光网络国家重点实验室开放基金资助。

作者简介：邓沌华(1976-)，女，硕士，副教授，毕业于华中师范大学计算机学院。近年来研究方向为电子与通信工程、中文信息处理。曾参与光迅科技有限公司科研开发基金项目、光纤通信与光网络国家重点实验室开放基金项目以及国家社会科学基金项目各 1 项，主持湖北省教育厅人文社会科学研究项目 1 项。

*** 通信作者**：李蔚(E-mail: Weilee@hust.edu.cn)。

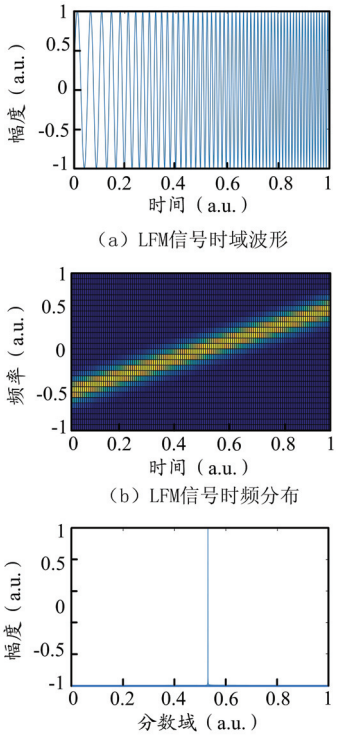


解决空间分辨率和测量距离之间的矛盾[10],但 OFDR 检测距离通常仅限于几百米。最近一种新型的 OTDR 被提出[11],被称之为数字线性调频 OTDR(DLFM-OTDR)。DLFM-OTDR 使用强度调制线性调频(LFM)信号为探测信号。DLFM-OTDR 的测量距离不受光源相干长度的限制,并且可以克服传统 OTDR 的空间分辨率与测量距离之间的矛盾。本文基于现场可编程门阵列(FPGA)和数字信号处理器(DSP)实现 DLFM-OTDR 的开发板,完成超长跨距光纤传输链路的监测。

1 分数阶傅里叶变换(FrFT)

DLFM-OTDR 旨在通过检测反向散射信号的强度变化来获得被测光纤(FUT)的衰减特性。使用的探测信号是强度调制的光脉冲,其调制信号是 DLFM 信号。因此,考虑如何有效地检测反向散射信号中的数字 LFM 信号非常重要。

图 1(a)和图 1(b)分别表示 LFM 信号的时域波形和时频分布。由于 LFM 信号具有随时间变化的频率,因此 LFM 信号既不能在时域也不能在频域中被处理和提取。FrFT 是一种广义傅里叶变换。与傅里叶变换一样,FrFT 也是一种基表示方法,其基函数是一组 LFM 信号。当所选分数傅里叶域分解的调频斜率等于 LFM 信号的调频斜率时,LFM 信号将在所选的基函数上具有能量聚集效应,如图 1(c)所示[11]。类似于频域中的窄带通滤波器,利用分数域中的尖峰执行滤波,并且通过适当选择的带宽,就可以保留信号能量,同时滤除大部分噪声能量。因此,FrFT 在提取 LFM 信号和滤除噪声方面非常有效。



(a) LFM信号时域波形

(b) LFM信号时频分布

(c) 分解基的调频斜率等于LFM信号的调频斜率时的FrFT

图 1 LFM 信号波形

2 DLFM-OTDR 的原理

图 2 为 DLFM-OTDR 原理框图[11]。为了阐明本文提出的方法,首先分析了一段 LFM 探测脉冲 $s(t)$:

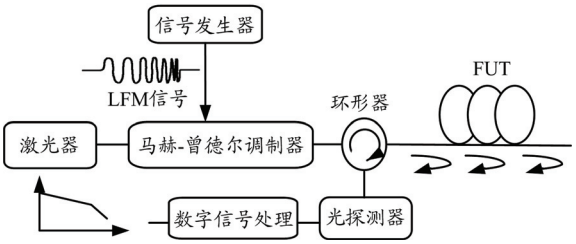


图 2 DLFM-OTDR 原理框图

$$s(t)=rect\left(\frac{t}{T}\right)A_0\exp\left[j\left(2\pi f_0 t+\pi Kt^2\right)\right] \tag{1}$$

其中,T 为脉冲宽度,A_0 为 LFM 探测脉冲的幅值,f_0 为 LFM 探测脉冲的起始频率,K 为 LFM 探测脉冲的调频斜率,$rect(\cdot)$为矩形窗函数。

在 DLFM-OTDR 中,不仅需要检测 LFM 探测脉冲的强度,还需要检测 LFM 探测脉冲随时间的变化。短时分数傅里叶变换(STFrFT)是一种加窗的傅里叶变换,用于检测信号中 LFM 信号随时间的变化[12]。因此,选择 STFrFT 作为 DLFM-OTDR 的信号处理方法。在实际应用中,STFrFT 的计算过程是将一个较长的时间信号分割成等长的较短的段,然后在每个较短的段上分别计算 FrFT。

使用 STFrFT 处理 LFM 探测脉冲 $s(t)$后,输出信号可表示为[12,13]:

$$STFrFT_s^{\alpha}(t,u)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}f(-j,t)\int_{-\infty}^{+\infty}s(\tau)f(j,\tau)\times h^*(t-\tau)\exp\left[-j(t-\tau)u\csc\alpha\right]\mathrm{d}\tau \tag{2}$$

其中,$f(j,t)=\exp\left[\left(j/2\right)t^2\cot\alpha\right]$,$\alpha$ 表示 FrFT 的阶,τ 是一个在分数域的独立变量,$h(t)$是 STFrFT 的窗口,上标 * 表示共轭操作。本文选择的 STFrFT 窗口是最简单的矩形窗口,表示为:

$$h(t)=rect\left(\frac{t}{T}\right) \tag{3}$$

将式(1)和式(3)代入式(2)中,考虑 LFM 探测脉冲频率 f 与时间 t 的关系,即 $f=Kt+f_0$,式(2)可简化为:

$$STFrFT_s^{\alpha}(t)=\frac{TA_0}{\sqrt{2\pi}}rect\left(\frac{t}{2T}\right)\times\frac{\sin\pi K(T-|t|)t}{\pi Kt}\exp(2j\pi f_0 t) \tag{4}$$

式(4)的包络线近似为 sinc 函数,可以表示为:

$$E(t)\approx\frac{TA_0}{\sqrt{2\pi}}rect\left(\frac{t}{2T}\right)Sa(\pi Kt) \tag{5}$$

其中,$Sa(\cdot)$为 sinc 函数。

基于强度调制的 LFM 脉冲经过 STFrFT 后的数值

计算结果如图 3 所示。原始的 LFM 脉冲被 STFrFT 压缩成 sinc 形状的窄脉冲。理论上,DLFM-OTDR 的空间分辨率 R 是由 sinc 函数的半高全宽(FWHM)决定的,可以表示为:

$$R=\frac{c}{2nKT}=\frac{c}{2nB} \tag{6}$$

其中,c 为光在真空中的传播速度,n 为被测光纤的折射率,$B=KT$ 为 LFM 脉冲的扫频范围。由式(6)可以看出,R 是由扫描频率范围 B 决定的,而不是探测脉冲的脉宽。因此,DLFM-OTDR 打破了传统 OTDR 测量距离与空间分辨率的矛盾。

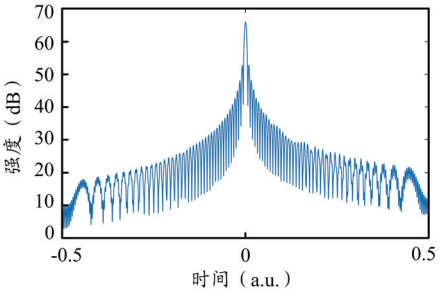


图 3 信号经过后 STFrFT 压缩成 sinc 形状的窄脉冲

3 DLFM-OTDR 的系统设计

DLFM-OTDR 的系统框图如图 4 所示。DLFM-OTDR 的系统与传统的 OTDR 系统在硬件结构上几乎一样,不同之处在于发射部分和最后的信号处理部分。

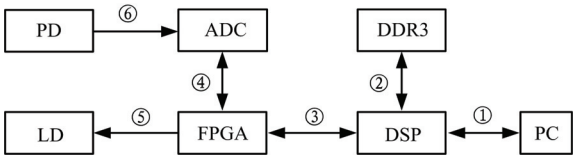


图 4 DLFM-OTDR 的系统框图

图 4 中,符号①表示 DSP 与 PC 通过网口通信,符号②表示 DSP 与外挂的 DDR3 通信,符号③表示 FPGA 与 DSP 通过 SRIO 进行高速通信,符号④表示 FPGA 驱动模数转换器(ADC)并接收采集数据。符号⑤表示 FPGA 控制激光器发射光脉冲,符号⑥表示光电二极管(PD)接收到的信号通过 ADC 进行采样。整个系统主要由 PD、LD、ADC、FPGA、DSP、DDR3 和 PC 构成。其中,ADC 用来采集反射回的信号;FPGA 接收采集数据并对数据进行平均运算,然后将数据送到 DSP 外挂的 DDR3;最后,DSP 进行信号处理并且通过网口将处理后的数据上传到 PC 上。

DLFM-OTDR 开发板是由武汉光迅科技股份有限公司设计并实现的。该开发板基于 FPGA 和 DSP,FPGA 和 DSP 的主要工作是控制激光器发送 DLFM 信号和对接收到的信号进行 STFrFT。研制 DLFM-OTDR 开发板对 DLFM-OTDR 技术的实际应用和商业化有重要的意义。

4 测试结果及分析

基于 DLFM-OTDR 开发板的超长跨距光纤传输链路监测方法的实验系统如图 5 所示。在 DLFM-OTDR 开发板上本文采用脉冲激光器作为光源。由于脉冲激光器只能发光和不发光,因此本文采用 DLFM 信号作为探测信号。DLFM 信号可以通过对模拟 LFM 信号进行取符号运算来得到。在接收端可直接检测背向散射信号,通过雪崩光电二极管(APD)将光信号转换为电流信号,再经过信号放大电路后,使用 ADC 对信号进行采样。采样信号经过 FPGA 传给 DSP,并在 DSP 上实现对采集信号的 STFrFT。

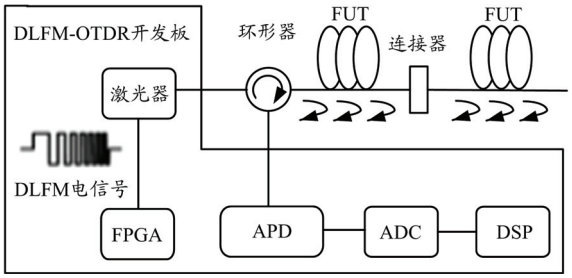


图 5 DLFM-OTDR 测试实验的系统框图

本文基于 DLFM-OTDR 开发板分别在武汉光迅公司 2×50 km 的实际链路上进行了超长跨距光纤传输链路监测的实验测试,结果如图 6 所示。实验的平均次数为 16384 次,测量时间为 90 s,脉冲宽度为 4 μs,扫频范围为 4 MHz。由于瑞利散射是一个随机过程,接收端的反向瑞利散射信号是瑞利反散射光在光纤中各点的叠加。因此,后向瑞利散射信号的功率是一个累加值,主要通过后向散射信号中的直流分量来反映。图 6 中的测试曲线表示同时考虑 LFM 信号和直流

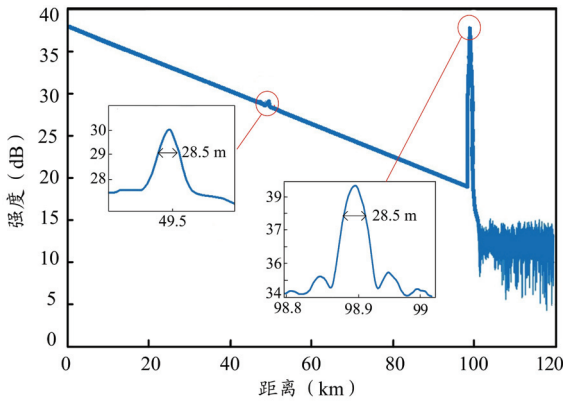


图 6 2×50 km 的光纤链路测试结果

分量的测量结果，测量结果表明本文实现的 DLFM-OTDR 开发板可以同时测量光纤的损耗和线路中的反射事件。从图 6 中的曲线可以观察到 3 个反射峰。第一个峰和第二个峰分别在 0 km 和 50 km 处，这 2 个反射峰是由连接器引起的；第三个峰在 100 km 处，是光纤末端的反射峰。由反射峰主瓣 FWHM 决定的空间分辨率为 28.5 m，与将 n=1.446、B=4 MHz 代入式(6)得到的理论结果相吻合。

图 7 是在长度为 2×150 km 的光纤链路上进行实验测试的结果图。实验的平均次数为 16384 次，测量时间为 180 s，脉冲宽度为 20 μs，扫频范围为 4 MHz。图 7 中的测试曲线表示同时考虑 LFM 信号和直流分量的测量结果。从图 7 中的曲线可以观察到 2 个反射峰。第一个峰在 150 km 处，这个反射峰是由连接器引起的；第二个峰在 300 km 处，是光纤末端的反射峰。由反射峰主瓣 FWHM 决定的空间分辨率为 30 m，与将 n=1.446、B=4 MHz 代入式(6)得到的理论结果相吻合。对比图 6 的测试结果可知在增加了脉冲宽度，而扫频范围不变的情况下，DLFM-OTDR 可以在增加探测距离的同时不影响反射事件的分辨率。

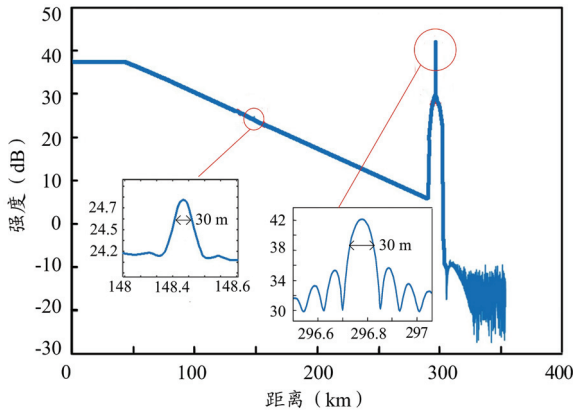


图 7 2×150 km 的光纤链路测试结果

图 7 中，理论上在 0 km 处应该有一个反射峰，但是我们可以观测到曲线的前端是一段平滑的直线。这是因为在 2×150 km 的光纤链路长度上的探测脉冲的脉冲宽度为 20 μs，入纤能量比较大，在遇到前端连接器时会产生一个很大的反射信号，从而使光探测器后续的放大电路达到了饱和。这是本文实现的 DLFM-OTDR 开发板有待改进的地方。

5 结束语

本文提出了一种新的 DLFM-OTDR 技术，该技术能够克服传统 OTDR 的测量距离和空间分辨率之间的矛盾。并且本文基于 FPGA 和 DSP 实现了 DLFM-OTDR 开发板，同时利用该 DLFM-OTDR 开发板在光迅公司的实际链路上进行了模拟实验测试。实验结果表明：本文的设计能够在长度为 2×150 km 的光纤链路上实现 30 m 的空间分辨率，实验结果与理论分析相吻合。但是，由于光探测器及后续放大电路的饱和效应，使测量曲线前端有一段平滑的直线，这是下一步系统有待改进的地方。综上所述，本文实现的 DLFM-OTDR 开发板可以同时测量光纤的损耗和线路中的反射事件，特别适合用于超长跨距光纤传输链路中故障的监测，具有很好的应用价值。

参考文献：

[1] 张士文，殳国华. 基于 OTDR 的光纤参数测量系统[J]. 光通信技术，2005，29(2)：56-57.
[2] LAFERRIERE J, SAGET M. Original method for analyzing multipaths networks by OTDR measurement [C]//Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, Feb. 16 -21, 1997, Dallas, USA. Dallas: IEEE, 1997.
[3] IZUMITA H, KOYAMADA Y, FURUKAWA S, et al. The performance limit of coherent OTDR enhanced with optical fiber amplifiers due to optical nonlinear phenomena[J]. Journal of lightwave technology, 1994, 12 (7): 1230-1238.
[4] MARTINS H F, MARTIN-LOPEZ S, CORREDERA P, et al. Modulation instability-induced fading in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. Optics letters, 2013, 38(6): 872-874.
[5] HEALEY P, MALYON D J. OTDR in single-mode fibre at 1.5 μ m using heterodyne detection[J]. Electronics Letters, 1982, 18(20): 862-863.
[6] WEGMULLER M, VON Der Weid J P, OBERSON P, et al. High resolution fiber distributed measurements with coherent OFDR [C]//Proc. ECOC'00, Sep. 3-7, 2000, Munich, Germany. Minich: IEEE, 2000.
[7] KING J, SMITH D, RICHARDS K, et al. Development of a coherent OTDR instrument [J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5 (4): 616-624.
[8] JONES M D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7): 822-824.
[9] LEE D, YOON H, KIM P, et al. SNR enhancement of OTDR using biorthogonal codes and generalized inverses[J]. IEEE Photonics technology letters, 2004, 17(1): 163-165.
[10] EICKHOFF W, ULRICH R. Optical frequency domain reflectometry in single - mode fiber[J]. Applied Physics Letters, 1981, 39(9): 693-695.
[11] ZHANG P, FENG Q, LI W, et al. Simultaneous OTDR Dynamic Range and Spatial Resolution Enhancement by Digital LFM Pulse and Short-Time FrFT[J]. Applied Sciences, 2019, 9(4): 668-675.
[12] CATHERALL A T, WILLIAMS D P. High resolution spectrograms using a component optimized short-term fractional Fourier transform [J]. Signal Processing, 2010, 90(5): 1591-1596.
[13] 张传彬，易水寒. 一种基于线性调频信号的光纤光时域反射仪检测系统及方法：中国，108344558. A[P]. 2018-07-31.