

OFDR 光源非线性调谐引起的距离偏移校正研究

唐超,赵方,岳耀笠

(中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:在基于光频域反射仪(OFDR)的光纤距离测量中,光源非线性调谐效应直接影响测量距离的精度,使得 OFDR 的测量结果发生偏移。通过理论分析调频线性度与测量距离的关系,提出了一种距离校正的方法,利用辅助干涉仪测量光源调谐的非线性偏移量,根据偏移量直接在信号频域上进行插值校正,消除光源非线性调谐对测量距离的影响。实验表明:该方法能够有效提高 OFDR 测量距离的精度和空间分辨率,能在一个扫频周期内完成运算,具有很高的运算效率。

关键词:光频域反射;非线性调谐;距离校正

中图分类号:TN257 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)04-0030-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on correction of distance offset caused by nonlinear tuning of OFDR light source

TANG Chao, ZHAO Fang, YUE Yaoli

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In the optical fiber distance measurement based on optical frequency domain reflectometer (OFDR), the nonlinear tuning effect of the light source directly affects the accuracy of the measurement distance, which makes the OFDR measurement result shift. By theoretically analyzing the relationship between the linearity of laser tuning and measurement distance, a method of distance correction is proposed in this paper. An auxiliary interferometer is used to measure the nonlinearity offset of the light source tuning, and the interpolation is directly performed in the signal frequency domain according to the offset. Experiments show that this method can eliminate the influence of the nonlinear tuning of the light source on the measurement distance, improve the accuracy and spatial resolution of the OFDR measurement distance effectively. Since the calculation is completed in a frequency sweep period, it's very efficiency.

Key words: optical frequency domain reflectometer; nonlinear tuning; distance correct

0 引言

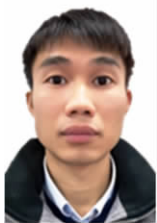
光频域反射仪(OFDR)由于具有高空间分辨率和大动态测量范围,可作为一种先进的光纤测量技术被广泛地应用到光缆的日常监测和维护中^[1,2]。OFDR 使用的扫频激光器通常是通过压电陶瓷(PZT)实现波长调制,由于 PZT 的非线性特性,以及温度、振动和调制

电压的波动,都会使得光源谐振腔的位置发生变化从而影响到输出光波谱线的变化,引起扫频的非线性,展宽 OFDR 测量系统中拍频信号的频谱范围,使得测量距离发生偏移,降低了 OFDR 的空间分辨率^[3,4]。因此,一种典型的去除非线性调频影响的做法是利用附加干涉仪的输出信号作为主干涉仪的采样时钟进行非等间隔采样。但是,根据奈奎斯特采样定理可知,附加干涉仪的采样频率要达到主干涉仪采样频率 2 倍以上,即附加干涉仪的光程差至少是主干涉仪光程差的 2 倍,因此,该方法只适用于短距离光纤的测量^[5]。Song 等人对拍频时域信号进行重采样,将非等光频采样方法获得的 OFDR 信号通过插值处理,使处理后的数据点间的光频差相同,实现等光频采样的目的,由于时域信号的高采样率使得该方法的运算效率降低,同样只适合短

收稿日期:2019-09-26。

基金项目:广西区重点研发计划项目(合同号:桂科 AB17129027)资助。

作者简介:唐超(1986—),男,广西永福人,工程师,2012 年 7 月至今工作于中国电子科技集团公司第三十四研究所,主要研究方向为光纤传感与信号处理、振动信号检测与模式识别以及光缆安全在线监测等,负责和完成所内基金项目 1 项,参与多项安防工程项目实施。



距离光纤的测量^[9]。杜阳等人利用雷达信号处理时优化去斜滤波的方法实现了长距离和高分辨率的测量^[7],但该方法需要准确估计激光器的相位噪声和大量的时频变换,对硬件的要求较高。

本文直接在频域通过对附加干涉仪拍频信号进行非线性度估计,利用辅助干涉仪的估计结果对主干涉仪的测量结果进行校正,只需要在频域进行偏移量估计和插值重采样处理,从而提高系统的运算效率。该方法能有效抑制扫频光源非线性效应对测量结果的影响,提高定位精度和空间分辨率。

1 非线性调频估计

在实际的 OFDR 系统中,扫频光源通常由 PZT 来调制波长,而 PZT 对电压的响应是非线性的,这就导致扫频光源输出的调频光的频率为非线性。这种非线性调频产生的结果表现为干涉信号的拍频随时间的改变而不断波动,光源扫频非线性效应示意图如图 1 所示, t_1 时刻的拍频 f_{b1} 与 t_2 时刻的拍频 f_{b2} 不相等。因此,OFDR 最终测量得到的距离将随时间变化而不断偏移,这种偏移直接导致 OFDR 测量精度和空间分辨率下降。

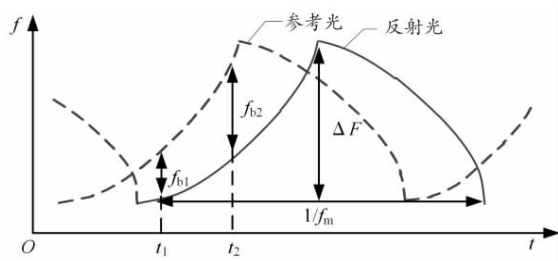


图 1 光源扫频非线性效应示意图

为了得到准确的测量结果,可以通过改善激光器的扫频非线性性,或者通过算法对测量结果进行校正。本文通过软件校正的方式来提高测量精度,因此需要对调频线性度进行估计,具体估计方法为通过一个附加干涉仪来测量信号拍频的偏移量,干涉仪的长度已知,所以可以由 $f_b = \frac{4nf_m\Delta F}{c}L$ 计算出测量拍频与理论拍频的偏移量。其中, n 为光纤折射率, f_m 为激光器扫频频率, ΔF 为激光器扫频范围, c 为真空中的光速, L 为光纤长度。

一个臂长、扫频和扫频范围分别为 277 m、50 Hz 和 150 MHz 的附加干涉仪的时频图和偏移量如图 2 所示。测量到的干涉仪信号瞬时频率在一个扫频上升周期内从 73.536 kHz 偏移至 86.587 kHz,与理论拍频

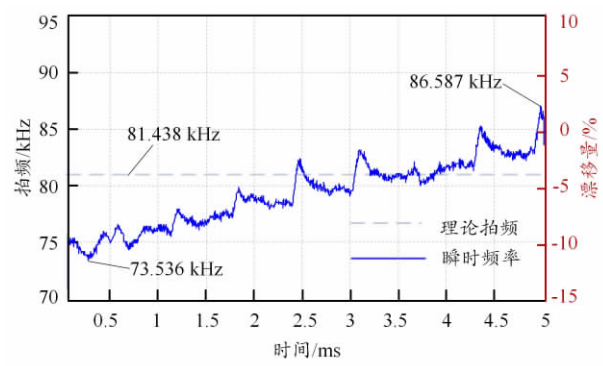


图 2 附加干涉仪拍频信号频率及偏移量

81.438 kHz 相差很大;从图 2 可以看出实际测量拍频与理论拍频大约在 $\pm 10\%$ 内偏移。根据测量距离与信号拍频成正比例关系,如果测量结果不进行校正,那么测量距离误差将达到 10%。

2 距离校正原理

由于激光器的调频是非线性的,这就导致不同时刻产生的拍频信号 f_{b1} 与理论拍频信号 f_b 存在偏移,而附加干涉仪测量光纤长度是已知的,通过 $f_b = \frac{4nf_m\Delta F}{c}L$ 可以得到附加干涉仪的理论拍频 f_b ,从而得到每一时刻拍频信号 f_{b1} 与理论拍频信号的偏移量 P 。因为 OFDR 的测量距离与信号拍频成比例关系,所以可以利用计算得到的偏移量校正主干涉仪对应时刻的信号拍频,即校正 OFDR 的测量距离。

拍频信号校正原理如图 3 所示。 f_{b1} 是附加干涉仪测量到的拍频, f_{b1} 是根据已知光纤长度计算出的理论拍频,则调频非线性效应导致的偏移量为:

$$P = (f_{b1} - f_b) / f_b \times 100\% \quad (1)$$

那么,主干涉仪的校正频率可由测量拍频 f_{b2} 和校正量 P 计算得到:

$$f_{b2} = f_{b2} / (1 + P) \quad (2)$$

在 OFDR 测量中,由于主干涉仪测量末端没有反射镜,因此拍频信号是由测试光纤上每点反射回来的瑞利散射光与参考光外差干涉产生,对应信号的频谱

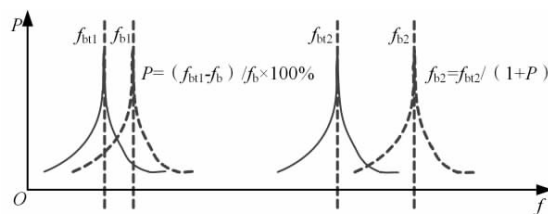


图 3 拍频信号校正原理

唐超,赵方,岳耀笠:OFDR 光源非线性调谐引起的距离偏移校正研究

为 0 到光纤末端菲涅尔反射产生的拍频范围内的一系列频率构成。要实现光纤上每一点的距离校正就需要对干涉仪拍频信号的每一频率进行校正,校正后的频率为非等间隔频率,所以校正后的频谱幅度需要做插值重采样运算处理。OFDR 频谱校正示意图如图 4 所示。

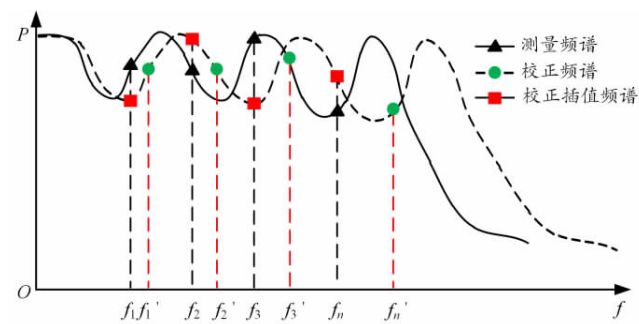


图 4 OFDR 频谱校正示意图

3 实验验证

为了验证方法的有效性,本文搭建了一个实验平台如图 5 所示。光源选择 NTK 公司型号为 BASIK X15 的超窄线宽扫频激光器,其线宽为 1 kHz,试验扫频范围为 150 MHz;采集卡为 Alazartech 公司的 ATS660 双通道 125 M/s 高速采集卡;辅助干涉仪的光纤长度为 277 m,测试光纤的长度为 100 km,其中 75 km 处有一个斜球面(APC)接头;实验中激光器的扫频频率为 50 Hz,采集卡的采样频率为 100 M/s,因此可计算出辅助干涉仪的理论拍频为 81.144 kHz,测试光纤末端的理论拍频为 29.4 MHz,75 km 处反射峰的理论拍频为 22.05 MHz。

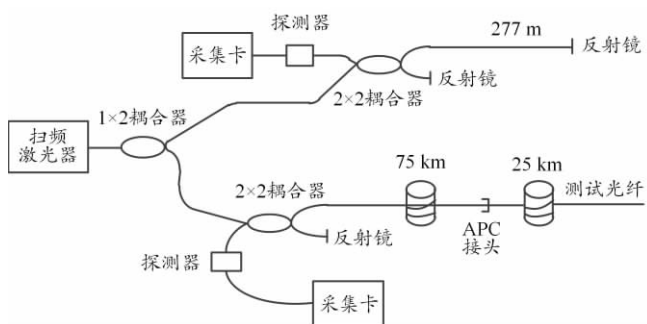


图 5 试验平台原理图

测量结果比较情况如图 6 所示。可以看出,校正前,75 km 处的反射峰对应的拍频为 23.24 MHz,100 km 结束处拍频被展宽到 31.43 Hz,2 处拍频与理论值 22.05 MHz、29.4 MHz 产生很大偏移,且光纤结束处的拖尾比较严重;校正后,75 km 和 100 km 处的拍频分别为 21.96 MHz 和 28.98 MHz,与理论值十分接

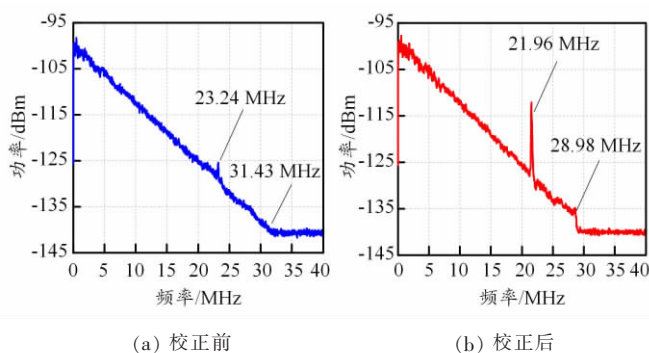


图 6 测量结果比较

近,而且 75 km 处的发射峰非常清晰,光纤结束位置频率下降迅速,校正曲线与 OTDR 测量曲线吻合。测量结果表明该校正算法能够有效改善 OFDR 的距离定位精度和空间分辨率。

4 结束语

本文通过附加干涉仪对光源扫频的非线性度进行估计,利用估计结果对 OFDR 测量结果进行校正,最后通过插值重采样的方式恢复出 OFDR 的频谱曲线。校正后曲线与 OTDR 测量曲线吻合,光纤测量长度和接头位置与实际距离十分接近。实验表明:该方法能够消除光源非线性调谐的影响,有效提高 OFDR 的定位精度和空间分辨率。与去斜滤波算法和时域插值校正算法相比,本文所提出的方法只需要在一个扫频周期内进行计算校正,不需要做平均处理,提高了运算效率。

参考文献:

- [1] 顾一弘. 高分辨率 OFDR 关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [2] 陈彪,张引发,刘涛. 基于光频域反射原理的 PON 监测方案研究[J]. 光通信技术,2012,36(6):36-39.
- [3] RIZZOLO S, MARIN E, CANNAS M, et al. Radiation effects on optical frequency domain reflectometry fiber-based sensor[J]. Optics Letters, 2015, 40(20): 4571-4574.
- [4] 徐升槐,叶险峰. 光频域反射在光通信网络检测中应用分析[J]. 光通信技术,2010,34(6):60-62.
- [5] FROGGATT M, SEELEY R J, GIFFORD D K. High resolution interferometric optical frequency domain reflectometry (OFDR) beyond the laser coherence length: 7515276[P]. 2009-04-07.
- [6] SONG J, LI W, LU P, et al. Long-Range High Spatial Resolution Distributed Temperature and Strain Sensing Based on Optical Frequency-Domain Reflectometry[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(3): 1-8.
- [7] 杜阳. 基于 OFDR 的分布式光纤多参量传感方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.