

基于非相干光频域反射技术的高精度光纤网络健康在线监测系统

于淼^{1*}, 吉顺兵², 刘海², 杨光³, 黄圣军¹, 刘军¹, 何禹潼¹, 孙铭阳³

¹电子科技大学中山学院电子信息学院, 广东 中山 528402;

²中国人民解放军 31131 部队, 江苏 南京 211112;

³吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 随着我国高速、大容量、宽带网络的快速发展以及军用短距离战术通信系统的广泛应用,对于通信网络中光纤及无源器件故障的精准定位与实时在线监测日趋重要。本文基于非相干光频域反射(IFOFR)技术机理,以光纤中后向瑞利散射光作为信号光,并结合光波传导方程,提出了一种低成本、高精度、分布式光纤质量检测方法,并对其数值模型进行了详细推导,设计系统结构,研制系统样机。通过实验验证,采用非相干连续光源,可以以较低的光功率(<10 mW)初步实现 10 km 光纤的分布式检测,并可保证光纤沿线无差异的空间分辨率 0.1 m,动态范围优于 34.5 dB,事件盲区极小,可有效解决传统光时域反射技术(OTDR)的注入功率大、空间分辨率低、事件盲区大以及相干光频域反射技术(COFR)成本高、体积大、测量距离有限等问题,是一种极具发展潜力和推广价值的高精度光纤网络在线健康监测技术。

关键词 光纤光学; 非相干光频域反射技术; 光纤故障; 高精度定位; 在线监测

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0406003

1 引言

光纤以其传输频带宽、通信容量大,体积小、重量轻、易布放,材质无源、本征安全、抗电磁干扰,无辐射、保密性好、无串扰,以及可在高温、高湿、高腐蚀等恶劣环境下长期稳定工作等诸多优点,在现代高速、大容量、宽带网络和军用通信系统中发挥着不可替代的关键性作用。然而光纤光缆属于一次铺设、长时间使用的传输媒介,在使用过程中,会因违规施工、车辆碾压、自然灾害、鼠害虫害、射击爆破、操作错误、老化等人为或外部环境变化影响出现各种故障,影响光纤通信质量、数据传输速率,甚至导致网络瘫痪,如何实时获取线路故障信息并精准定位,提高故障检修效率,是光纤通信行业高质量、快

速发展所面临的重要问题^[1-2]。

光时域反射仪(OTDR)作为光纤通信链路故障检测与质量分析设备,通过检测光在光纤中传输时产生的瑞利背向弹射光和非涅耳反射光的功率,实现光纤链路的弯折、扭曲、断裂、损耗等故障事件的位置和衰减情况的离线检测,已成为通信运维部门的通用设备,绝大部分商用设备的事件空间分辨率为 1 m,为进一步提高空间分辨,解决其与动态范围的相互制约的问题^[3-4],国内外研究人员先后提出了脉冲编码调制法^[5-6]、累加移动平均法、小波变换法^[7]、短时分数阶傅里叶变换法^[8]、线性光学采样法、混沌光时域反射法^[9-10]等新方法,不同程度地提高了空间分辨率和动态范围指标,但是由于其技术原理限制仍存在以下不可避免的两个问题:1)用于

收稿日期: 2021-06-16; 修回日期: 2021-06-29; 录用日期: 2021-07-16

基金项目: 广东省普通高校青年创新人才项目(2018KQNCX332)、广东省引进领军人才计划(00201507)、广东省教育厅创团项目(2018KCXTD033)、广东省科技计划项目(2021A0101180005)、中山市社会公益科技研究项目(2018B1021, 2020B2018)

通信作者: *yumiao@zsc.edu.cn

事件定位的脉冲调制技术,使 OTDR 易受色散效应影响,脉宽展宽,测量距离越远空间分辨率越低; 2)对于 1 m 的空间分辨率,OTDR 采样频率至少要为 200 MHz,且需要发射脉冲宽度小于 10 ns、峰值功率为数瓦的脉冲激光,功率较高,长时间使用后光源自身发光效率会下降,且影响仪器内部光无源器件性能,甚至导致光电探测器光敏面受到不同程度的损伤,降低光电转换效率、器件使用寿命以及 OTDR 整体性能,同时较强的探测光功率会对正常通信及通信系统器件造成一定影响,因此,在测量时多为离线检测。相干光频域反射仪^[11-12](COFDR)是通过光外差探测方式实现的,可调谐光源在时间上线性扫描,然后分成两束,一束作为参考光,另一束作为探测光,反射回来的信号光与参考光在耦合器中发生干涉,分析其在频域产生的干涉光信号,再通过傅里叶变换,就可以获得光纤信息,由于相干检测和差频检测的本质,可允许更大的探测光幅度范围、更低的接收器带宽,有效降低噪声和提高动态范围。但其探测范围受到可调谐光源的相干长度、频率调制速率及线性度的限制,且我国目前超窄线宽、单频、相干激光器的研制能力较弱,对外购置价格非常高,一台商业化的 COFDR 价格近百万,工程应用性价比不高。

为解决上述问题,本文基于非相干光频域反射(IOFDR)技术机理^[13-16],以光纤中后向瑞利散射光作为信号光,并结合光波传导方程,提出了一种低成本、高精度、分布式光纤质量检测方法,并对其数值

模型进行了详细推导,设计系统结构,研制系统样机。采用微波信号源对非相干激光光源进行步进频率调制,反射光经过光电探测器光电转换后与本振信号在电域进行拍频,每个调制频率下的系统的幅频响应和相频响应组成了系统的频域信息,经傅里叶逆变换后,可获得光纤事件点分布的时域信息。对其理论机理和数值模型进行详细推导,并搭建系统,通过实验验证,该系统可以以极低的光功率(<10 mW)实现 10 km 光纤的分布式检测,并可保证光纤沿线无差异的空间分辨率为 0.1 m,动态范围≥34.5 dB,事件盲区极小,采用波分复用技术可保证在光纤通信网络正常工作的同时实现光纤故障信息的高精度定位,是一种极具发展潜力和推广价值的光纤网络在线健康监测系统。

2 IOFDR 基本原理

IOFDR 技术原理如图 1 所示,经过频率调制后的连续光波在光纤中传导时的功率可以表述为^[13-16]

$$P_p(z, \omega_m, t) = P_0 \exp(-\alpha_p z) \times [1 + m \cdot \cos(\omega_m t - \omega_m \beta_p z)], \quad (1)$$

式中, z 为传播距离, m 为调制深度,为了使激光器工作在线性区, m 一般小于 1, ω_m 为光源的调制角频率,调制范围为 $2\pi f_1 \sim 2\pi f_2$,角频率间隔为 $2\pi \Delta f$,步进频率调节次数为 N , $\beta_p = n_p/c$ 为光在光纤中的传播常数, n_p 为光在波长为 λ_p 时的折射率, c 为真空中的光速, α_p 为波长在 λ_p 时的损耗系数。

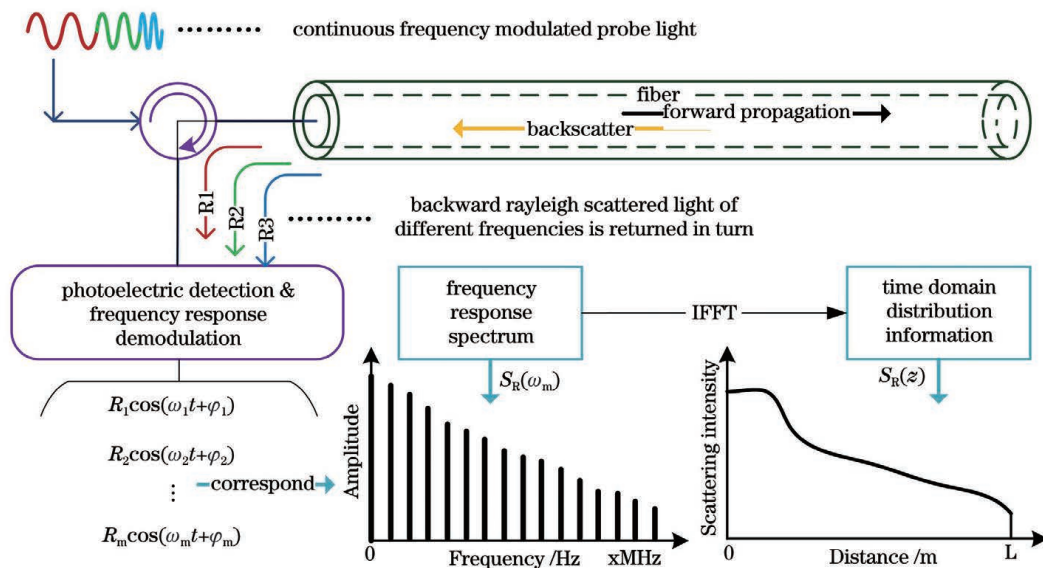


图 1 IOFDR 技术原理图

Fig. 1 Technical schematic diagram of IOFDR

很明显, $P_p(z, \omega_m, t)$ 是一个正实简谐函数, 为使其物理意义更加明显且方便计算, 将之改写为

$$P_p(z, \omega_m, t) = P_0 \exp(-\alpha_p z) \operatorname{Re}\{1 + m \cdot \exp[j(\omega_m t - \omega_m \beta_p z)]\}, \quad (2)$$

式中, 函数 $\operatorname{Re}\{\}$ 代表取复数的实部。带步进频率调制的光波沿传感光纤传输, 产生与光网络健康状态相关的瑞利散射光波, 从一段长度为 dz 的光纤获得的后向瑞利散射功率为

$$dP_{Rz}(z, \omega_m, t) = P_p(z, \omega_m, t) \chi_R[s(z, t)] dz, \quad (3)$$

式中, $s(z, t)$ 表示与光网络健康状态相关的被测信

息, 与光纤位置 z 和时间 t 有关, $\chi_R[s(z, t)]$ 表示瑞利散射的光纤健康状态依赖系数, R 代表瑞利散射。由于所测光纤沿线的健康状态变化相对缓慢, 小于单次测量时间, 可以认为光网络健康状态仅与空间分布有关, 因此传感光纤沿线的健康状态可以表示为 $s(z)$ 。

光电探测器接收的光信号是光纤中位置不同、频率相同、相位不同的后向瑞利散射光信号的叠加, 探测器上探测到的光纤位置为 z 处、长度为 dz 的光纤微元的瑞利散射光功率为

$$dP_{Rz}(0, \omega_m, t) = P_0 \exp[-(\alpha_p + \alpha_R)z] \cdot \chi_R[s(z)] \cdot \operatorname{Re}\{1 + m \cdot \exp[j\omega_m t - j\omega_m(\beta_p + \beta_R)z]\} dz, \quad (4)$$

式中, α_R 表示瑞利散射光波在光纤中传播的损耗系数, β_R 表示瑞利散射光波在光纤中的传播常数, 通过对上式进行积分, 得到长度为 L 的整个传感光纤的后向瑞利散射功率为

$$P_R(0, \omega_m, t) = P_0 \int_0^L \chi_R[s(z)] \exp[-(\alpha_p + \alpha_R)z] dz + P_0 \cdot m \cdot \operatorname{Re}\left\{\exp(j\omega_m t) \int_0^L \chi_R[s(z)] \exp[-(\alpha_p + \alpha_R)z - j\omega_m(\beta_p + \beta_R)z] dz\right\}, \quad (5)$$

式中, 第一项为直流项, 不随调制频率 ω_m 的变化而变化, 因此不携带瑞利散射的空间分布信息, 第二项为交流项, 与调制频率 ω_m 有关, 可将之简化为

$$P_R^{\sim}(0, \omega_m, t) = P_0 \cdot m \cdot \operatorname{Re}\left\{\exp(j\omega_m t) \int_0^L \chi_R[s(z)] \exp[-(\alpha_p + \alpha_R)z] \exp[-j\omega_m(\beta_p + \beta_R)z] dz\right\}, \quad (6)$$

式中, $s_R(z) = \chi_R[s(z)] \exp[-(\alpha_p + \alpha_R)z]$, $s_R(z)$ 表示与位置相关的沿光纤分布各点瑞利散射光强度和衰减信息。

对于每一个调制频率 ω_m , 都可以获得一个交流信号 $P_R^{\sim}(0, \omega_m, t)$, 包含了当前频率下的幅-频响应和相-频响应信息, 使用频率为 f_1 的本地振荡时钟进行混频, 得到频率范围为 $0 \sim f_2 - f_1$, 频率间隔为 Δf 的整条传感光纤光网络健康状态有关的频域信息 $S_R(\omega_m)$ 。进行傅里叶逆变换, 得到光网络健康状态沿传感光纤分布的空间域信息 $s_R(z)$, 完成光通信网络高可靠性的在线监测和线路故障的精准定位。

3 IOFDR 性能分析

将光时域检测系统中的光脉冲看成是一个单位冲激函数^[17]

$$\delta(t) = \begin{cases} +\infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}. \quad (7)$$

系统在单位冲激函数激励下引起的零状态响应被称为该系统的冲激响应, 用 $h(t)$ 来表征, 将单位冲激响应进行傅里叶变换即可得到频响函数 $H(j\omega)$, 其傅里叶逆变换即为 $h(t)$, 表示为

$$\begin{cases} H(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \exp(-j\omega t) dt \\ h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega \end{cases}. \quad (8)$$

实际 IOFDR 系统中测量的频率响应的频率范围是有限的, 并且频率是步进离散的, 光源调制频率范围 $-f_{\max} \leq \Delta f_m \leq +f_{\max}$, 调制的步进频率为 $\Delta f_m = \Delta\omega/2\pi$, $\Delta\omega$ 为角频率调制间隔。IOFDR 系统频率响应可表示为

$$H_d(j\omega) = \sum H(j \cdot k \cdot \Delta\omega) \cdot \delta[j(\omega - k \cdot \Delta\omega)], \quad (9)$$

式中, k 为频率调制次序, 当 $-f_{\max}/\Delta f_m \leq k \leq +f_{\max}/\Delta f_m$ 时, $H(j \cdot k \cdot \Delta\omega) = H(j \cdot k \cdot \Delta\omega)$, 否则, $H(j \cdot k \cdot \Delta\omega) = 0$ 。

对系统频响进行离散傅里叶变化(DFT), 得到周期函数 $h_p(t)$, 表示为

$$h_p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H_d(j\omega) \cdot \exp(j\omega t) d\omega = T_p \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(t - n \cdot T_p), \quad (10)$$

式中, $T_p = 1/\Delta f_m$ 是 $h_p(t)$ 的周期。 $h(t)$ 的有效信号持续时间取决于测量光纤的长度 z_{\max} , 且应该小

于 $h_p(t)$ 的周期 T_p , 以保证 $h_p(t)$ 各周期内信号不发生重叠, 可表示为

$$\frac{2z_{\max}}{c/n_{gr}} = T_p = \frac{1}{\Delta f_m}, \quad (11)$$

式中, n_{gr} 为光纤的群折射率, 则系统的最大测量长度为

$$z_{\max} = \frac{c}{2n_{gr}} \cdot \frac{1}{\Delta f_m}, \quad (12)$$

由上式可知, 频率调制步进越小, 系统测量距离越长。

利用频率响应函数的共轭对称性, 即 $H_d(-j\omega) = H_d^*(j\omega)$, 将频率范围扩展到 $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$, $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$, 经过傅里叶逆变换后, 得到时域离散信号, 时域的采样间隔 Δt 满足下式

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{\max}}, \quad (13)$$

根据时-空域的对应关系, 系统的空间分辨率可表示为

$$\Delta z = \frac{c}{2n_{gr}} \cdot \Delta t = \frac{c}{4n_{gr}f_{\max}}, \quad (14)$$

可知, ω_{\max} 越大, 系统的空间分辨率就越高, 且在整个光纤上保持一致。

4 实验结果

4.1 实验装置

实验装置如图 2 所示, 数字信号处理器(DSP)通过控制总线驱动直接数字频率合成器(DDS), 使 DDS 输出频率范围从 100 MHz 到 600 MHz、频率间隔 10 kHz、步进频率次数约为 5 万次的连续步进频扫频信号, DDS 输出两路信号, 一路输出连续步进频扫频信号 f_m , 连接激光器驱动器, 另一路为输

出频率始终是 100 MHz 的单频信号 f_1 。激光器驱动器在 DDS 输出信号的作用下, 输出符合后级半导体激光器(DFB)驱动标准的连续步进频扫频电流信号, 驱动半导体激光器(功率为 10 mW, 频率调制后功率约为 2.978 mW)产生带步进频率调制的连续光波, 相比于采用脉冲光(峰峰值功率几十至几百 mW)的光时域反射系统, IOFDR 系统对光纤网络及其器件影响更小。使用的半导体激光器为非相干光源, 相比于 COFDR 所使用的单频、窄线宽相干光源, 成本更低。带步进频率调制的连续光波进入光纤环形器的 1 端口, 然后从环形器 2 端口出射进入传感光纤, 由于连续探测光和瑞利后向散射信号光的波长相同, 为避免环形器各端口的同频串扰, 光纤环形器的隔离度大于 60 dB。光波沿传感光纤传播过程中, 产生携带光网络健康状态有关的瑞利散射光波, 返回环形器的 2 端口, 然后从环形器 3 端口出射进入光电探测器(PD)。PD 将瑞利散射光波转换为弱电流信号, 跨阻放大器将光电探测器输出的弱电流信号转换为电压信号, 输出给混频器的射频(RF)输入端。混频器有两个输入端口, RF 输入端和本地振荡(LO)输入端, RF 输入端输入的是与瑞利散射相关的电压信号, LO 输入端输入的是 DDS 输出的频率始终为 100 MHz 的单频信号。混频后, 电压信号的频率范围下变频为 0~500 MHz, 作为中频(IF)信号输出给高精度模拟放大器。高精度模拟放大器对电压信号进行放大, 从而符合后级 18 位模数转换器(ADC)对输入信号的电压范围需求, ADC 将电压信号转换为数字信号, 传输给 DSP, DSP 根据步进频率所有频点的瑞利散射信号, 可以得到光网络健康状态有关的频域信息, 利用傅里叶逆变换, 可以得到光网络健康状态有关的沿空间分

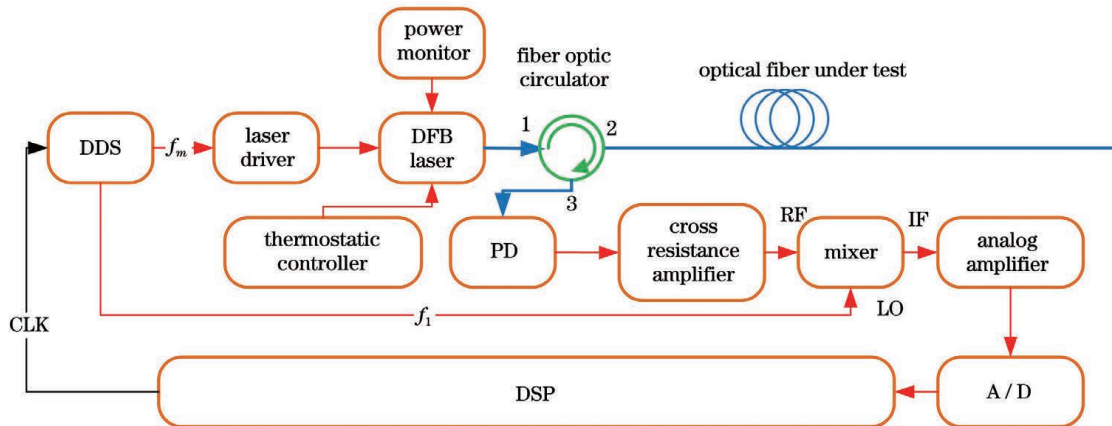


图 2 IOFDR 系统结构图

Fig. 2 System structure diagram of IOFDR

布信息,完成光通信系统高可靠性的在线监测和线路故障的精准定位,根据设定参数和数值模型计算,系统的最大检测距离为 10 km,空间分辨率 10 cm。系统中探测光的频率调制信号时钟、本振参考信号时钟以及数字信号处理时钟基准均来自 DSP,可抑制解调信号由于时钟不同步所引入的相位噪声,提高系统的检测精度;通过对半导体激光器的恒温控

制、功率实时监测与反馈调节,可很好地解决由于光源频率调制所引入的伴生调幅问题,保证光功率的稳定,从而更好地实现系统最佳检测性能。

4.2 实验结果及分析

如图 3 所示,将 4 个长度约为 2.5 km 的光纤盘(光纤类型为单模 G652D)采用 LC 接头适配器串联,接入 IOFDR 进行实时测量。

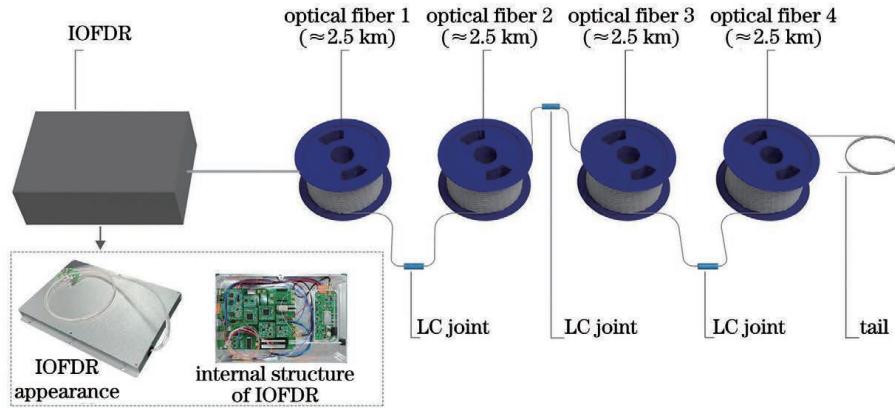


图 3 IOFDR 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup diagram of IOFDR

测试结果如图 4(a)所示,图中共出现 4 个反射峰,由于接头质量不同,四个反射峰的反射强度不同,其中,第一个接头质量最差,反射峰值最大,第三

个质量最佳,反射峰值最小,第四个反射峰对应光纤尾端位置,光纤总长度为 9932.80 m。图 4(b)为尾端反射峰细节放大图。

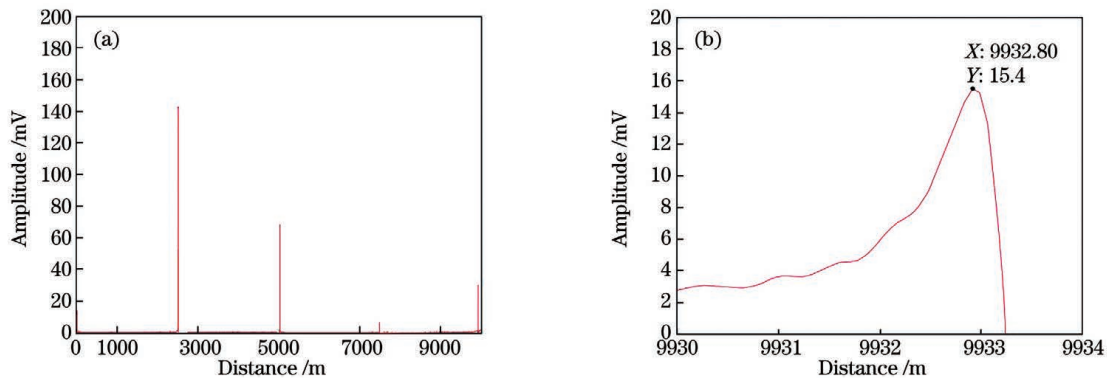


图 4 IOFDR 测试结果图和尾端细节放大图。(a)整体测试图;(b)尾端细节放大图

Fig. 4 Diagrams of IOFDR test results and enlargement of tail details. (a) Overall test drawing; (b) enlargement of tail details

基于上述测试条件,采用截断法,用千分尺度量尾纤长度,依次在尾端减去长度为 30 cm、20 cm、20 cm 的尾纤,观测尾端反射峰值位置变化情况。如图 5(a)所示,剪掉 30 cm 光纤后的尾部峰值位置为 9932.45 m,缩短了 35 cm,与实际剪断的长度偏差 5 cm,证明 IOFDR 系统的空间分辨率优于 10 cm。如图 5(b)所示,在上一步骤基础上,剪掉 20 cm 光纤后的尾部峰值位置为 9932.20 m,缩短了 15 cm,与实际长度偏差 5 cm,证明 IOFDR 系统

的空间分辨率优于 10 cm。如图 5(c)所示,为在上一步骤基础上,再次剪掉 20 cm 光纤后的尾部峰值位置为 9932.08 m,缩短了 12 cm,与实际长度偏差 8 cm,证明 IOFDR 系统的空间分辨率优于 10 cm。

随后,采用相对测量法,采用米尺度量光纤跳线长度,依次在图 3 所示的第一盘光纤和第二盘光纤中间接入长度为 7 m 和 3 m 的光纤跳线,接入跳线时采用了两个 LC 适配器,观察两个接头位置反射峰的相对位置差值,将其与光纤跳线实际长度对比。

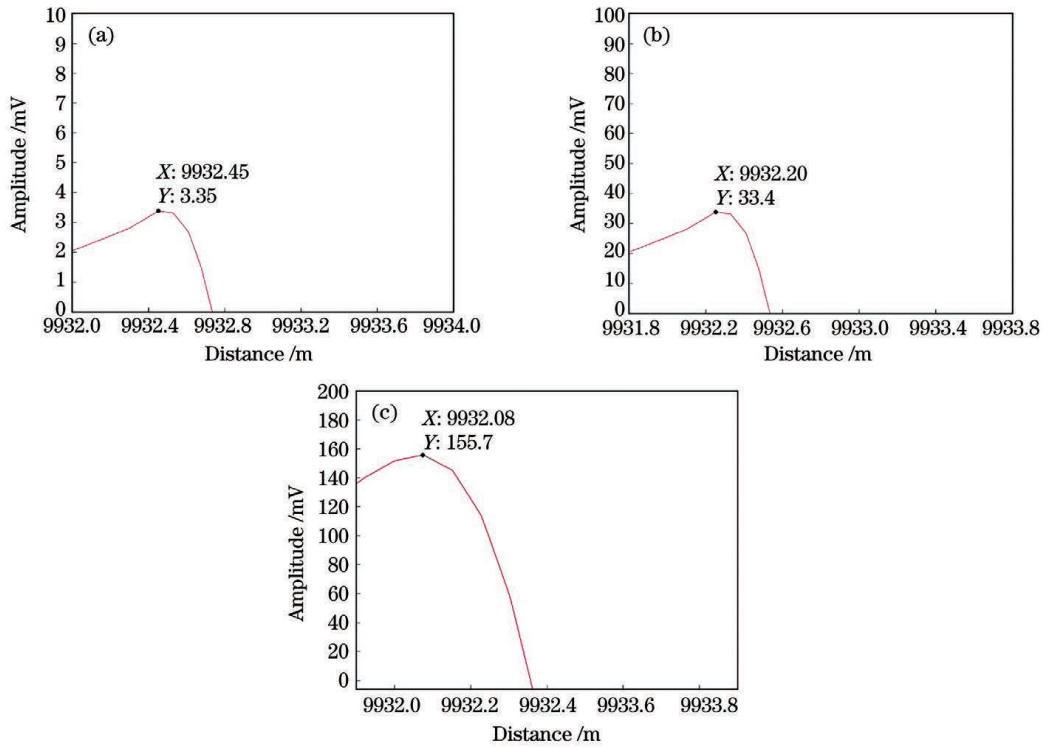


图 5 尾端反射峰细节图。(a)第一次,尾纤减去 30 cm;(b)第二次,尾纤减去 20 cm;(c)第三次,尾纤减去 20 cm
 Fig. 5 Detail diagrams of tail reflection peak. (a) The first time, the 30 cm long tail is subtracted; (b) the second time, the 20 cm long tail is subtracted; (c) the third time, the 20 cm long tail is subtracted

如图 6(a)所示,接入 7 m 长光纤跳线后,第一个接头位置的反射峰位置为 2504.21 m,第二个接头位置的反射峰位置为 2511.26 m,两个位置距离 7.05 m,与光纤跳线实际长度偏差 5 cm,证明 IOFDR 系统空间分辨率优于 10 cm。如图 6(b)所

示,接入 3 m 长光纤跳线后,第一个接头位置的反射峰位置仍为 2504.21 m,与上一次测量起始位置相同,第二个接头位置的反射峰位置为 2507.26 m,两个位置距离 3.05 m,与光纤跳线实际长度偏差 5 cm,证明 IOFDR 系统空间分辨率优于 10 cm。

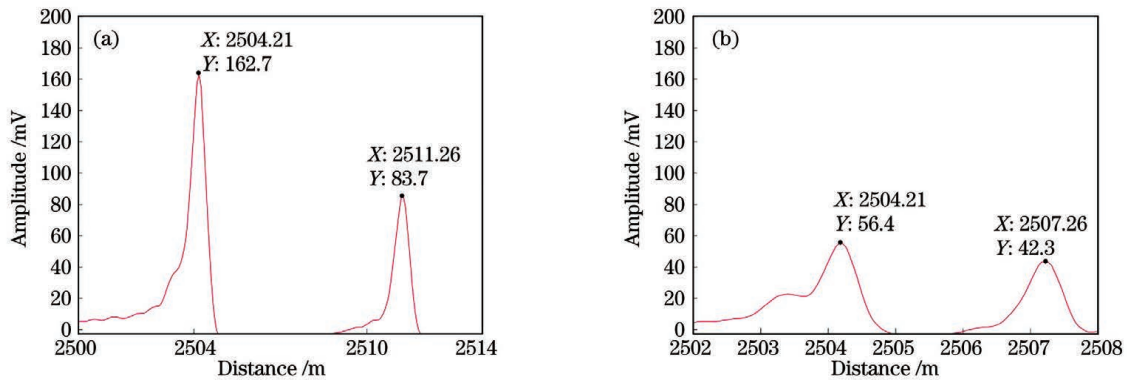


图 6 第一盘和第二盘光纤连接处反射峰测试情况。(a)接入 7 m 光纤跳线;(b)接入 3 m 光纤跳线
 Fig. 6 Reflection peak tests at the first and second optical fibre connections. (a) 7 m long optical fibre jumper is accessed; (b) 3 m long optical fibre jumper is accessed

如图 7(a)所示,当 IOFDR 未接入光纤时,设备起始端接口虽然处于强反射状态,仍可测试出设备起始光纤连接线对应的反射峰位置为 0.25 m;如图 7(b)所示,当 IOFDR 设备接入 3 m 长光纤跳线时,曲线尾端反射峰值位置约为 3.25 m,起始端盲

区几乎不存在,证明 IOFDR 设备盲区远远小于 1 m。

多次测量,由软件测试曲线结果计算动态范围为 $10\log(\text{幅值最大值}/\text{幅值平均值})$,由上述结果可以验证 IOFDR 由于在频域测量其本底噪声水平极低,归一化后的幅值平均值约为 0.06 mV,而上述

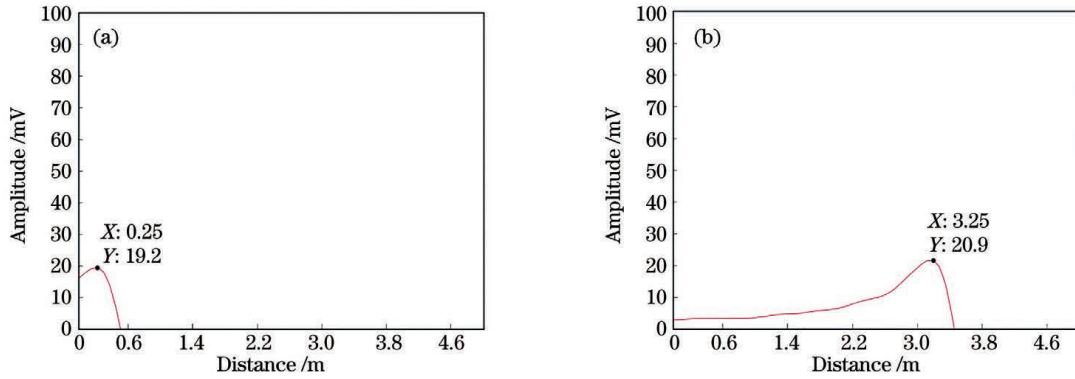


图 7 不同情况下的反射峰细节图。(a)起始端未接入光纤跳线;(b)起始端接入 3 m 长光纤跳线

Fig. 7 Detail diagrams of reflection peaks under different conditions. (a) Starting end is not connected to optical fibre jumper cable; (b) starting end is connected to 3 m long optical fibre jumper cable

测试结果中反射峰最大值为 162.7 mV,非系统响应最大值,则系统的动态范围优于 34.5 dB。

采用波分复用技术,将中心波长为 1650 nm 的 IOFDR 系统接入双通信波长分别为 1310 nm 和 1550 nm 的某网络保障中心用于关键光纤网络链路质量的实时在线监测近两个月,系统运行稳定且对当前通信业务无影响,在光纤网络状态无异常情况下,各事件点反射强度值几乎没有变化;在实验室中,多次改变图 3 中所示的 LC 接头的连接状态和连接质量,各反射点仅强度值发生改变,而发射位置几乎没有发生改变,证明了 IOFDR 系统具备无差异的空间分辨能力,检测的重复性较高,如图 8 所示,为改变每个 LC 接头连接质量后的 IOFDR 系统测量结果,为了更清晰地展示,仅绘制三次测试曲线。

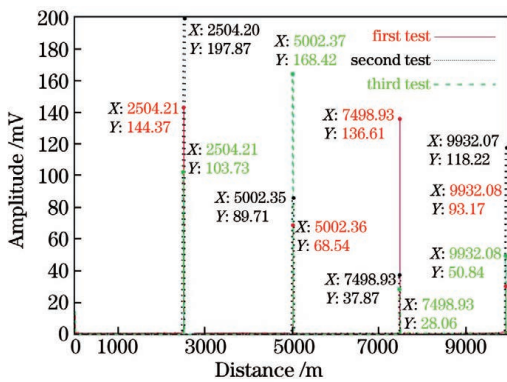


图 8 改变 LC 接头连接质量三次得到 IOFDR 系统的测量结果

Fig. 8 Measurement results of IOFDR system by changing connection quality of LC connector three times

5 结 论

基于非相干光频域反射 (IOFDR) 技术机理,以

光纤中后向瑞利散射光作为信号光,并结合其光波传导方程,提出了一种低成本、高精度、分布式光纤质量检测方法,并对其数值模型进行了详细推导。设计系统结构,研制了一种高精度光纤网络健康在线监测系统,利用频域-空域变换实现光纤网络的质量健康检测。通过实验验证,该系统可使用成本较低的非相干光源,以极低的光功率 (<10 mW) 实现 10 km 光纤的分布式检测,并保证光纤沿线无差异的空间分辨率 0.1 m,动态范围优于 34.5 dB,事件盲区极低,能够精准反映光纤故障点或接头位置及质量情况,是一种极具发展潜力和推广价值的低成本、高精度光纤传感与检测技术。在后续的研究工作中,可进一步提高频率调制范围和频率调制速率,重点关注频率调制非线性问题的抑制与解决,以提高 IOFDR 空间分辨率和测量距离指标。

参 考 文 献

- [1] Huang Q B. Application analysis of optical cable monitoring system in communication transmission [J]. Telecom World, 2019, 26(5): 75-76.
黄启邦. 通信传输中光缆监测系统的应用分析[J]. 通讯世界, 2019, 26(5): 75-76.
- [2] Ji Y T. Discussion on fault location and effective detection technology in communication optical cable line [J]. Technology and Information, 2020, 000(9): 19, 21.
纪禹韬. 通信光缆线路中的故障点定位和有效检测技术探讨[J]. 科学与信息化, 2020, 000(9): 19, 21.
- [3] Shang Q F, Zheng G Q. Research progress in improving the dynamic range and spatial resolution of OTDR [J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(3): 13-16.
尚秋峰, 郑国强. 提高 OTDR 动态范围和空间分辨

- 率的研究进展[J]. 光通信技术, 2020, 44(3): 13-16.
- [4] Wang P F. The research on enhancing the dynamic range of OTDR using complementary correlation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
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.
- [5] Liao R L, Tang M, Zhao C, et al. Harnessing oversampling in correlation-coded OTDR[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1693-1705.
- [6] Liu J J, Cheng Y X, Liu G Q, et al. SNR improving method of OTDR system based on compound C-S code[J]. Optical Communication Technology, 2015, 39(7): 35-37.
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.
- [7] Peng H M, Zhang C, Ni Y H, et al. Research on OTDR denoise algorithm based on wavelet transform[J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(7): 17-20.
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.
- [8] Zhang P, Feng Q G, 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.
- [9] 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.
- [10] Hu Z H, Zhao T, He P X, et al. Improving dynamic range of chaos optical time domain reflectometry using fiber ring[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004006.
胡志宏, 赵彤, 贺培鑫, 等. 基于光纤环的混沌光时域反射仪动态范围增大[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004006.
- [11] Tkachenko A Y, Smolyaninov N N, Skvortsov M I, et al. A coherent optical frequency-domain reflectometer based on a self-sweeping fiber laser for sensing applications[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2020, 63(4): 532-537.
- [12] Wu Y. Long-distance high-resolution distributed fiber optic temperature sensing technology based on coherent optical time domain reflectometer with optical frequency-shift scanning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
吴婊. 基于光频移扫描相干光时域反射计的长距离高分辨率分布式光纤温度传感技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [13] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]//Christiansen P L, Sørensen M P, Scott A C. Nonlinear science at the dawn of the 21st century. Lecture notes in physics. Heidelberg: Springer, 2000, 542: 195-211.
- [14] Chen K. Research on the IOFDR-based fiber-optic distributed temperature sensing and the hybrid technique for multiple sensors [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
陈珂. 光纤 IOFDR 分布温度传感及多传感器融合技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [15] Yang Q. Research on fiber Bragg grating demodulation system with high-spatial resolution based on incoherent optical frequency domain reflectometry [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
杨茜. 基于非相干光频域反射的高空间分辨率光栅解调系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [16] Li X, Jin L. Based on the IOFDR principle, the non-winding plug-in loss tester[J]. Electronic Test, 2020(21): 98-99.
李旭, 金磊. 基于 IOFDR 原理的免缠绕插回损测试仪[J]. 电子测试, 2020(21): 98-99.
- [17] Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab S H. Signals and systems[M]. 2nd ed. Liu S T, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 2-42.
艾伦·V·奥本海姆, 艾伦·S·威尔斯基, S·哈米得·纳瓦卜. 信号与系统[M]. 2版. 刘树棠, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013: 2-42.

High-Precision Optical Fibre Network Health Online Monitoring System Based on Incoherent Optical Frequency Domain Reflection Technology

Yu Miao^{1*}, Ji Shunbing², Liu Hai², Yang Guang³, Huang Shengjun¹, Liu Jun¹,
He Yutong¹, Sun Mingyang³

¹ School of Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan Institute, Zhongshan, Guangdong 528402, China;

² NO. 31131 Unit, PLA, Nanjing, Jiangsu 211112, China;

³ College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract

Objective Fibre optic fault affects fibre optic communication quality, data transmission rate and leads to network breakdown. Obtaining line fault information in real-time, accurately locating it, and improving fault maintenance efficiency is an important problem faced by the high-quality and rapid development of the fibre optic communication industry. Optical time-domain reflectometer (OTDR) is a common equipment for fault detection and quality analysis of optical fibre communication links. There are two unavoidable problems due to the limitation of its technical principle. First, the pulse modulation technology used for event location makes OTDR susceptible to the influence of the dispersion effect and widens the pulse width. The longer the measurement distance, the lower the spatial resolution. Second, for a spatial resolution of 1 m, the sampling frequency of OTDR should be at least 200 MHz, and the pulse laser with a pulse width of less than 10 ns and peak power of several watts should be emitted. The luminance efficiency of the light source decreases with high power after a long time of application. The performance of the passive optical devices inside the instrument is affected, leading to different degrees of photosensitive surface damage. Further, it reduces the photoelectric conversion efficiency, device life and overall performance of OTDR. Because of coherence and difference frequency detection, the coherent optical frequency domain reflector (COFDR) can allow light detection to have a larger amplitude range. Additionally, the receiver bandwidth can be very low, effectively reducing the noise and improving the dynamic range. However, its detection range is limited by the coherent length, frequency modulation rate and linearity of the tunable light source. Moreover, the development capacity of the ultra-narrow linewidth, single-frequency, coherent laser in China is weak, and the external purchase price is very high. Commercial COFDR costs nearly one million yuan, and the cost performance of engineering applications is not high. Therefore, this study conducts relevant research to solve these problems and realise the precise positioning and real-time online monitoring of optical fibre faults.

Methods Based on the mechanism of incoherent optical frequency domain reflectometry (IOFDR) technique, this study proposes a cost effective, high-precision and distributed fibre quality detection method by employing Rayleigh backscattered light in the fibre as the signal light combined with its light wave conduction equation. The system structure is designed, and the system prototype is developed. The microwave signal source is used to perform step frequency modulation of the incoherent laser source. After the photoelectric conversion of the reflected light through the photoelectric detector, it beats with the local oscillator signal in the electrical domain. The amplitude-frequency and phase-frequency responses of the system at each modulation frequency constitute the frequency domain information of the system. Then, after Fourier inverse transformation, the time domain information of the event point distribution of the optical fibre is obtained. The theoretical mechanism and numerical model are derived in detail. The system is developed, and the key indexes of the system are verified through experiments.

Results and Discussions The system can preliminarily realise distributed detection of 10 km (Fig. 4) optical fibre with very low optical power (<10 mW). It can also guarantee the spatial resolution of 0.1 m with no difference along the optical fibre (Figs. 5 and 6). The dynamic range is more than 34.5 dB [Fig. 6(a)], and the event blind area is very small (Fig. 7). Wavelength division multiplexing technology can also ensure the normal operation of the existing optical fibre communication network. It is an online health monitoring system for optical fibre networks with great development potential and popularisation value to realise a high-precision location of optical fibre fault information.

Conclusions Based on the mechanism of the IOFDR technique, this study proposed a low-cost, high-precision and distributed fibre quality detection method by taking Rayleigh backscattering light in the fibre as the signal light combined with its light wave conduction equation. Additionally, its numerical model is derived in detail. The system structure is designed. A high-precision online health monitoring system for optical fibre networks is developed, which realises the quality and health monitoring of optical fibre networks by frequent-spatial transformation. The experimental verification shows that the system can realise distributed detection of 10 km optical fibre with very low optical power (<10 mW). It can also guarantee the spatial resolution of 0.1 m with no difference along the optical fibre. The dynamic range is better than 34.5 dB, and the event blind area is very low; thus it accurately reflects the position and quality of fibre failure points or joints. In future studies, we will improve the range of frequency modulation and frequency modulation rate, focussing on the suppression and solution of nonlinear problems in frequency modulation. The spatial resolution and measurement distance index of IOFDR will be further improved, which is a low-cost and high-precision optical fibre sensing and detection technology with great development potential and promotion value.

Key words fibre optics; incoherent optical frequency domain reflection technology; fibre optic fault; high positioning accuracy; on-line monitoring