

COTDR 系统中干涉衰落影响的研究

孟令刚, 李永倩, 张立欣

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 相干光时域反射仪(COTDR)测量曲线的振幅变化受相干瑞利噪声影响较大, 严重时导致系统发生误报并降低系统性能。主要探索了系统中相干瑞利噪声的产生机理及其影响因素, 给出了各个因素与瑞利散射系数之间的定量关系, 并仿真分析了光纤折射率、系统空间分辨率和光源频率的变化对干涉衰落波形的具体影响; 从改变光源频率的角度总结分析了近年来降低 COTDR 系统中干涉衰落的主要方法及其局限性, 并对 COTDR 系统在长距离光通信链路和地铁隧道监测等方面的应用进行了介绍。

关键词: 相干光时域反射系统; 相干瑞利噪声; 传感光纤

中图分类号: TN247 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)12-0045-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.12.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the influence of interference fading in COTDR system

MENG Linggang, LI Yongqian, ZHANG Lixin

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: The amplitude variation of the coherent optical time domain reflectometer (COTDR) measurement curve is greatly affected by coherent Rayleigh noise, which leads to system false alarms and system performance degradation. The paper describes the mechanism and influencing factors of coherent Rayleigh noise in COTDR system, the quantitative relationship between each factor and the Rayleigh scattering coefficient is given, and simulates the impact of the fiber refractive index, spatial resolution and the frequency variation of laser source on the interference fading waveform in detail. Finally it summarizes the main methods and limitations of reducing the interference fading in view of changing the laser frequency in COTDR system. Several important applications of COTDR are given, including the monitoring of ultra long communication optical fiber link and the subway tunnel.

Key words: coherent optical time domain reflectometer system; coherent Rayleigh noise; sensor fiber

0 引言

在分布式光纤传感系统中, 相干光时域反射(COTDR)技术主要用于检测光纤链路上的衰减、断裂和进行空间定位, 在桥梁、电力线缆和光通信线路, 特别是海底光缆的健康监测方面具有重要的应用^[1-3]。海

底光缆系统中, 通常需要多个掺铒光纤放大器(EDFA)对信号光功率进行放大, 而 EDFA 会产生很强的放大自发辐射(ASE)噪声, 在多个 EDFA 级联线路中, ASE 会逐渐积累和加强, 导致传统的光时域反射仪(OTDR)无法从严重的 ASE 背景噪声中提取出传感信息。COTDR 系统采用相干探测的方式, 经窄带滤波后可以滤除大部分 ASE 噪声, 极大地提高了系统的信噪比(SNR)^[4,5]。然而, 由于 COTDR 系统使用窄线宽激光器, 发出的探测光的相干长度可达几十千米, 光纤中不同位置的背向瑞利散射光相互干涉叠加, 导致产生相干瑞利噪声、偏振噪声和相位噪声等问题^[6], 这些因素使获得的 COTDR 探测曲线波动很大, 可能会掩盖所探测的事件, 严重时将导致系统发生误报。因此, 降噪方案的研究对 COTDR 系统具有重要意义。

收稿日期: 2019-05-21。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61775057、61377088)资助; 中央高校基本科研业务费专项资金(2019MS086)资助。

作者简介: 孟令刚(1991-), 男, 硕士研究生, 现就读于华北电力大学电子与通信工程系信息与通信工程专业, 主要从事光通信与光传感方面的研究。参与河北省自然科学基金青年基金 1 项(F2019502112), 获得华北电力大学研究生学业奖学金二等奖、三等奖各 1 次。



针对相位噪声和偏振噪声,可采用扰相、扰偏或偏振分集接收方案^[7,8];但对于相干瑞利噪声,由于光源频率稳定,探测曲线的重复性好,该噪声仅通过叠加平均的方式不能被快速地抑制,且由于噪声频率与携带传感信息的探测光频率完全一致,不能简单地通过增加带通滤波器的方式来滤除。因此,本文就 COTDR 系统中相干瑞利噪声的产生机理及其影响因素进行探讨,并对目前降低 COTDR 系统中干涉衰落影响的措施及系统的重要应用分别进行研究和介绍。

1 干涉衰落的理论分析

相干瑞利噪声可以解释为在脉冲宽度内由大量波长量级的瑞利散射点相互叠加,并通过相位强度转换展现为背向瑞利散射信号的幅度波动^[9]。为方便讨论,本文给出了脉冲内瑞利散射光干涉模型,如图 1 所示。图中箭头表示任意两个相互干涉的过程。

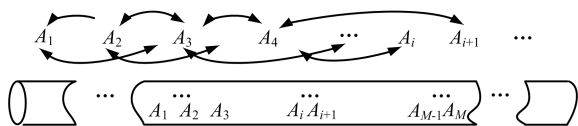


图 1 背向瑞利散射光干涉模型

假定在空间分辨率对应的光纤长度 L 范围内分布有 M 个瑞利散射单元 $A_1 \sim A_M$,则在时刻 t ,距离光纤始端 z 处 M 个散射单元相互干涉产生的背向瑞利散射光表示为^[10]:

$$E_R(t, z) = E_0 \sum_{i=1}^M r_i p_i \exp(j\varphi_i) \quad (1)$$

其中, E_0 为入射光场的振幅; r_i 代表第 i 个散射单元的散射幅度,服从瑞利分布; φ_i 表示第 i 个散射单元的随机相位,在 $[-\pi, \pi]$ 内服从均匀分布; p_i 为偏振因子。

虽然文献[10]中假定沿传感光纤的链路是均匀的,但实际上在光纤的制造和应用过程中,由于受到生产工艺限制和环境温度 $T(z)$ 及应变 $\varepsilon(z)$ 的影响,其有效折射率 n_{eff} 是关于光纤长度 z 的函数 $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}(T(z), \varepsilon(z))/\lambda$, 本文将相位传输因子表达为积分的形式,即 $\int_0^z \beta(z) dz$, 并忽略在脉冲宽度内的光纤损耗,那么在时刻 t ,由大量散射点叠加后的散射光波可表示为^[11]:

$$E_R(t, z) = E_0 \sum_{i=1}^M r_i p_i \exp \left(j2 \int_0^z \beta dy \right) \text{rect} \left(\frac{t - \tau_i}{W} \right) \approx \exp \left(j2\pi \int_0^z \beta dy \right) \times \int_z^{z+\Delta z} r(z, t) \times f(x/v) p_x \exp \left(j2 \int_x^x \beta dy \right) dx \quad (2)$$

其中, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数; τ_i 为第 i 个散射单元的时间延迟; W 为光脉冲宽度; $f(x/v)$ 表示脉冲函数,代表 W 内位置 x 处瑞利散射单元对应的脉冲宽度 v , x 的取值范围为 $[z, \Delta z]$; $r(z, t)$ 为在光纤 z 处的瑞利散射系数。

当光纤 z 处受到的温度或应变发生变化时,光纤中的有效折射率将发生变化,导致的相位变化量为^[12]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (z\Delta n_{\text{eff}} + n_{\text{eff}}\Delta z) \quad (3)$$

其中, Δz 表示系统空间分辨率大小。将式(3)代入式(2),可获得修正后的综合瑞利散射系数为:

$$\hat{r}(z) = \int_z^{z+\Delta z} r f(x/v) \times \exp \left[j2n_{\text{eff}}\Delta\omega/c + 2j(\omega/c) \int_z^x \Delta n_{\text{eff}}(y) dy \right] \quad (4)$$

其中, r 代表式(2)中 M 个瑞利散射点叠加的结果,即瑞利散射系数,根据中心极限确定, r 的大小服从高斯分布。从式(4)看出,修正后的背向瑞利散射系数是光纤长度 z 的函数,其散射信号的幅度大小与光纤链路中折射率的分布、光源频率及系统的空间分辨率等有关。在物理思想上,式(2)与文献[13]中的“一维脉冲响应模型”一致,但给出了便于计算和深入研究的形式。

2 仿真实验与分析

本文设置光纤长度为 200 m, 激光器中心波长为 1550 nm, 脉冲宽度为 10 ns(覆盖光纤长度为 1 m)。根据式(2)和式(4),通过改变光纤折射率的分布、激光器频率和系统的空间分辨率等参数,利用 Matlab 软件计算各参数下对应的干涉衰落波形,结果如图 2 所示。

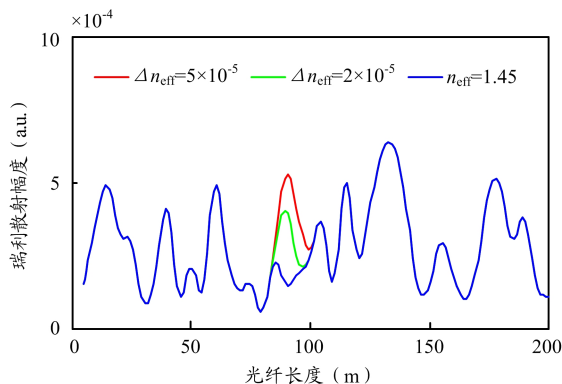


图 2 局部折射率变化对干涉衰落波形的影响

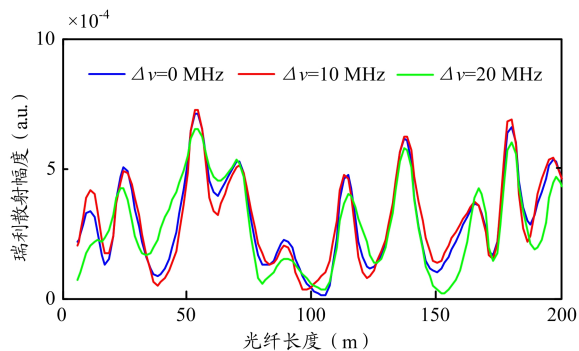
2.1 光纤折射率的分布对干涉衰落波形的影响

导致 COTDR 系统产生干涉衰落噪声的一个重要因素是光纤链路上折射率的分布,若保持光纤所受物理状态不变,并假定光纤链路上的折射率分布是恒定的(假设 $n_{\text{eff}}=1.45$),此时干涉衰落表现的是稳定的随

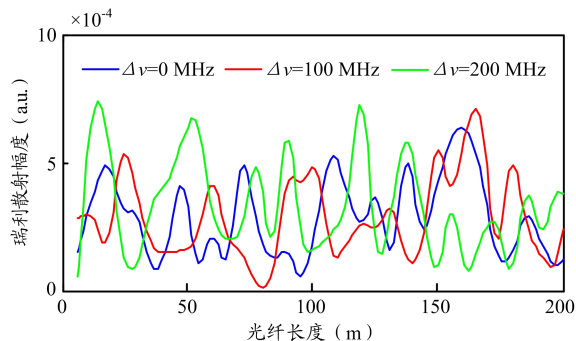
机起伏,如图 2 中的蓝色曲线所示;当光纤链路上某处发生扰动时,在该处的折射率将发生变化,对应的干涉衰落波形也随之发生改变。图 2 中的绿色曲线和红色曲线为在原有折射率的基础上,在光纤 80~100 m 之间改变折射率,其变化量分别为 2×10^{-5} 和 5×10^{-5} ,近似温度改变 2 °C 和 5 °C 或应变改变 $10 \mu\epsilon$ 和 $25 \mu\epsilon$ 。从图 2 可以看出,干涉衰落波形在 80~100 m 范围内相应地发生变化。在实际的传感光纤链路中,由于外界温度/应变的变化,不可避免地导致光纤折射率的非均匀分布,这是导致 COTDR 系统出现干涉衰落的一个重要原因。

2.2 光源的频移量对干涉衰落波形的影响

在光源波长为 1550 nm 的基础上,本文改变光源频移量 $\Delta\nu$ 来观察干涉衰落波形的变化,得到的曲线如图 3 所示。可以看出,在 $\Delta\nu$ 为 10 MHz 和 20 MHz 下的衰落波形与未经移频($\lambda=1550$ nm, $\Delta\nu=0$ MHz)时的衰落波形之间具有很好的相似性,且平均散射幅度差异不大,而从图 3(b)可以发现,对光源频率移频 100 MHz 和 200 MHz 后,各频率对应下的干涉衰落波形之间差异较大,同一位置处的瑞利散射幅度明显不同。这表明改变光源的频率能有效降低 COTDR 探测



(a) 10 MHz 和 20 MHz 频移量对干涉衰落波形的影响



(b) 100 MHz 和 200 MHz 频移量对干涉衰落波形的影响

图 3 不同激光频移量对干涉衰落波形的影响

曲线的重复性,且随着激光器频移量的增大,其探测曲线之间的差异也越明显。

2.3 空间分辨率的大小对干涉衰落波形的影响

为了研究不同系统空间分辨率 Δz 的大小对干涉衰落波形的影响,分别设置脉冲宽度为 10 ns、12 ns 和 15 ns (即 Δz 依次为 1 m、1.2 m 和 1.5 m),得到的干涉衰落波形如图 4 所示。可以看出,不同系统空间分辨率下的干涉衰落波形之间具有较好的相似性,并且其平均幅度随系统空间分辨率的增大而增大。由文献 [14] 中系统空间分辨率与干涉衰落噪声方差的关系 $\sigma = v_g / (4\Delta z \Delta f)$ (v_g 为光纤中的群速度, Δf 为激光器线宽) 可知,干涉衰落波形的幅度波动将随系统空间分辨率的增大而减小。

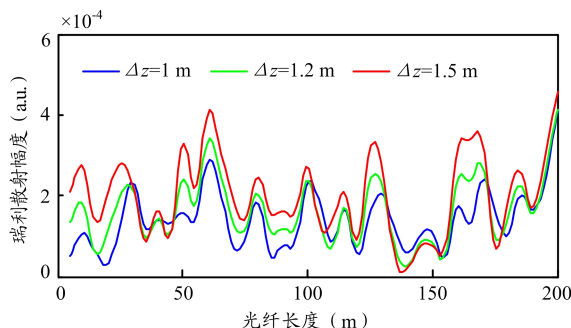


图 4 不同空间分辨率对干涉衰落波形的影响

3 COTDR 系统中降低干涉衰落的方案

由以上分析可知,若要减小干涉衰落对 COTDR 系统的影响,主要从改变光源的频率和增加光脉冲的宽度 2 个方面考虑,但提高光脉冲的宽度是以降低系统空间分辨率为代价的,因此在实际的 COTDR 系统中,主要是通过增加光源频率样本来降低探测曲线的重复性,从而降低干涉衰落噪声。其中,激光跳频和频分复用技术是该思想的典型应用。

3.1 激光跳频 COTDR 光纤传感技术

激光跳频方案采用外腔式半导体激光器(ECLD),由于 ECLD 输出的光波波长由激光二极管的驱动电流和工作温度决定,而温度的大小受激光器内热敏电阻的阻值控制^[15,16]。因此,本文通过软件预设参数,在特定区间内控制激光二极管的驱动电流或热敏电阻的大小来改变激光的波长,进而改变光波的频率,达到激光跳频的目的^[17]。激光跳频 COTDR 系统原理如图 5 所示。

受驱动电流大小控制的 ECLD 发出的光经 90:10 耦合器 1 分为 2 路进行传输:上支路 90% 探测光经掺

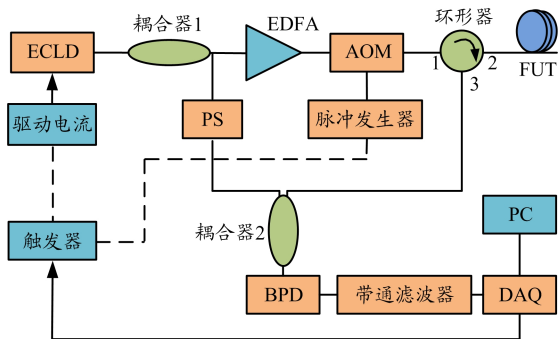


图5 激光跳频 COTDR 系统原理框图

铒光纤放大器(EDFA)放大后被声光调制器(AOM)调制为探测脉冲光,脉冲光经环行器的第1个端口,并通过第2个端口注入被测光纤(FUT)。光纤中返回的散射瑞利光与下支路经扰偏器(PS)扰偏后的10%本地光通过耦合器2进行耦合并送入平衡光电探测器(BPD),BPD 输出的外差信号经过带通滤波、信号采集和处理(DAQ)得到 COTDR 探测曲线,通过分析探测曲线的功率变化可对光纤链路上的异常状况进行快速定位,从而达到对光缆健康监测的目的。

本方案通过改变激光二极管驱动电流的大小来获得频率样本,进而降低探测曲线的重复性,有效降低了探测曲线上干涉衰落噪声的影响。本方案在 110 km 的普通单模光纤上,将干涉衰落噪声降低为原噪声水平的 1/5^[18],有效地提升了系统对探测事件的识别精度。

3.2 频分复用 COTDR 光纤传感技术

频分复用 COTDR 系统多频光的产生方式有很多种,通常可使用多个激光器或光学频率梳,其中,利用相位调制器来实现光频分复用是较为常见的用法^[19,20]。频分复用 COTDR 传感方案利用一个或多个相位调制器,通过调节相位调制器的调制深度和调制频率可将单频光转变为多频光^[21],最终,系统将在不同频率下获得的探测曲线仅通过叠加平均处理就可以大大降低干涉衰落噪声对系统的影响。频分复用 COTDR 系统原理如图6所示。

图6中,ECLD产生1550 nm光信号,通过90:10耦合器1分为2路,90%的一路接相位调制器(PM)用作系统的探测光,10%的一路用做本振光。上支路光被PM调制成多频光并经EDFA放大,然后被AOM1调制为探测脉冲光,用PS将脉冲光的偏振态扰偏后,经环形器注入FUT。探测光脉冲在光纤中向前传播时发生瑞利散射,其背向瑞利散射光经环形器的第3端口后,与本振光经耦合器2耦合,产生的多个中频信号

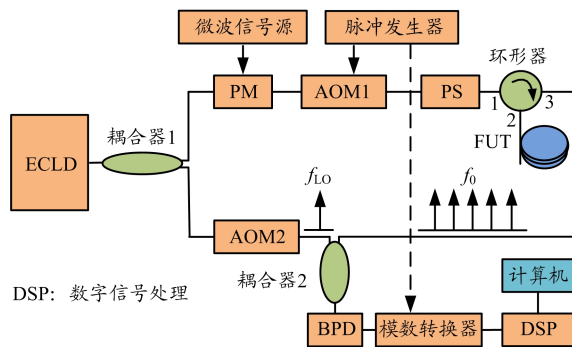


图6 频分复用 COTDR 系统原理框图

经过光电转换、数据采集和处理后,获得最终的探测曲线。文献[22]中的频分复用 COTDR 系统仅采用4个不同探测频率,在 24 km 的光纤长度上实现了将系统中的干涉衰落噪声降低为原噪声水平的 1/2,有效提升了系统的动态范围和对事件的测量精度。但频分复用 COTDR 系统需要使用相位调制器,且需对射频信号源进行扫频,系统结构较为复杂。

4 COTDR 的应用

在对长距离光通信线路的健康监测中,COTDR 设备可实时监测沿光缆链路上的损耗分布和应变信息,分析监测的结果用于指导该通信系统的调试与运行维护,以最大限度地减小由通信失败造成的经济损失。南京大学设计的 NTUC-1500 型 COTDR 系统^[23]输出信号的衰落噪声水平低于 0.07 dB,最大探测距离超过 15000 km,其系统空间分辨率小于 0.1 km。该系统除用于华为科技 12000 km 的海底光缆通信系统的在线监测外,还可用于对长距离光通信线路上的微损耗、中继器增益波动等小信号的检测。

为实现对地铁隧道施工安全的监测,刘敏杰等人^[24]将探测光缆每隔一段距离(如 10 m)盘成直径一定(如 25 cm)的线圈,如图7所示。通过固定件和支撑杆将盘成的线圈安装于隧道顶部。当隧道受到外界压力破坏或自身发生形变时,光缆线圈的物理状态将发生改变,对应位置的背向瑞利散射光功率随之发生变化,

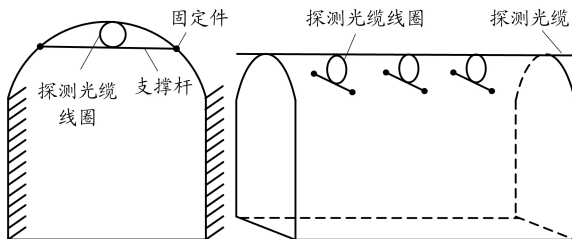


图7 地铁隧道内探测光缆安装示意图

COTDR 系统通过检测光强的变化而做出预警。在该系统中,起重要作用的是由探测光缆组成的线圈,他们通过实验进行了 20 次的测试,在每次测试中,系统对挤压光缆线圈的行为均做出了有效的报警,证明了该系统在地铁隧道施工安全监测中应用的准确性和有效性,且系统成本较低、易于安装,具有较好的应用前景。

以上介绍了 COTDR 系统在长距离光纤通信线路和地铁隧道中的应用情况,除此之外,在海底光缆、油气管道和军事防御等领域也有重要的应用。但随着检测对象的复杂性和检测精度的不断提高,COTDR 系统仍然面临诸多关键技术难题,如背向瑞利散射对温度和应变的敏感特性引起的频移难以分辨;远泵放大及混合喇曼/EDFA 放大技术的使用,使 COTDR 系统结构复杂度逐步提高,难以保持对称性;由于喇曼放大是非线性的,将导致光纤链路上事件识别更加困难等。

5 结束语

本文通过探索 COTDR 系统中干涉衰落噪声的产生机理,仿真分析了局部折射率分布、系统空间分辨率和光源频率等因素的变化对干涉衰落波形的影响。结果表明:通过改变激光的频率来降低干涉衰落波形的相似性,进而降低 COTDR 系统探测曲线的重复性是降低干涉衰落噪声的有效方式。激光跳频和频分复用技术是 2 种在降低干涉衰落噪声方面常用的方法,但频分复用技术需要使用相位调制器和对射频信号源进行扫频,增加了系统测量时间和结构的复杂度。经过十多年的发展,COTDR 光纤传感技术已趋于成熟且得到推广使用,但仍有许多问题亟待解决,需要进一步的改进和研发。

参考文献:

- [1] 李荣伟,李永倩. COTDR 技术在电力系统光缆监测中的应用[J]. 电力系统通信,2010,31(11):61-64.
- [2] 阳华,张湘英,李苏. 光缆线路的安全监测[J]. 光通信技术,2008,32(12):40-42.
- [3] 隗小斐,吴学智. COTDR 技术在海光缆监测中的应用[J]. 信息通信,2017(8):4-6.
- [4] KOYAMADA Y, NAKAMOTO H, OHTA N. High performance coherent OTDR enhanced with erbium doped fiber amplifiers[J]. Journal of Optical Communications, 1992, 13(4): 127-133.
- [5] KOYAMADA Y, NAKAMOTO H. High performance single mode OT-

- DR using coherent detection and fibre amplifiers [J]. Electronics Letters, 1990, 26(9): 573-575.
- [6] 张旭苹. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京:科学出版社,2013:77-88.
- [7] IZUMITA H, KOYAMADA Y, FURUKAWA S I, et al. Stochastic amplitude fluctuation in coherent optimal time domain reflectometry and its reduction technique [J]. Electronics & Communications in Japan, 2010, 77(8): 34-47.
- [8] 倪明,曹春燕,胡正良,等. 偏振分集技术及其在光纤传感器中的应用[J]. 光学学报,2011,31(7):82-87.
- [9] WOOD T H, LINKE R A, KASPER B L, et al. Observation of coherent Rayleigh noise in single-source bidirectional optical fiber systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(2): 346-352.
- [10] MA L, LI Y. Noise analysis of ϕ -OTDR vibration sensing system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 17(10): 459-462.
- [11] 周俊,潘政清,叶青,等. 基于多频率综合鉴别 ϕ -OTDR 系统中干涉衰落假信号的相位解调技术[J]. 中国激光,2013,40(9):114-119.
- [12] 刘德明,向清,黄德修. 光纤光学[M]. 北京:国防工业出版社,1995:187-190.
- [13] KOYAMADA Y, IMAHAMA M, KUBOTA K, et al. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(9): 1142-1146.
- [14] DESOUZA K. Significance of coherent Rayleigh noise in fibre-optic distributed temperature sensing based on spontaneous Brillouin scattering [J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17(5): 1065-1069.
- [15] 胡杨,张亚军,于锦泉. 用于半导体激光器的温控电路设计[J]. 红外与激光工程,2010,39(5):839-842.
- [16] 王选泽,曾志祥,钟毓宁,等. 基于相差识别的半导体激光器温度精密测量与控制[J]. 光电子·激光,2013(2):239-245.
- [17] 刘佳,苏毅,吕立冬,等. COTDR 中的激光定时跳频降噪方案研究[J]. 光电子·激光,2016(5):498-504.
- [18] LU L, SUN X, BU X, et al. Coherent optical time domain reflectometry by logarithmic detection and timed random frequency hopping[J]. Optical Engineering, 2017, 56(2): 024106-91-024106-96.
- [19] YU J, JIA Z, XU L, et al. DWDM optical millimeter-wave generation for radio-over-fiber using an optical phase modulator and an optical interleaver[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(13): 1418-1420.
- [20] HU L, HUANG C, CHEN L, et al. A novel scheme for DWDM optical millimeter-wave generation and wavelength reuse for uplink connection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(3): 140-142.
- [21] 张萌. 光学频率梳的生成及应用技术研究[D]. 陕西:西安电子科技大学,2015.
- [22] LU L, SONG Y, ZHANG X, et al. Frequency division multiplexing OTDR with fast signal processing [J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(7): 2206-2209.
- [23] 张旭苹,张益昕,王峰,等. 基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术[J]. 中国激光,2016,43(7):14-27.
- [24] 刘敏杰. COTDR 技术在地铁隧道施工安全监测中的应用 [J]. 交通科技,2016(6):55-57.