

自注入锁定DFB半导体激光器 用作 φ -OTDR光源研究

李秀丽, 朱旭阳, 张 荣, 赵振明, 孔 梅*

长春理工大学, 理学院, 吉林 长春
Email: *kongmei@cust.edu.cn

收稿日期: 2021年2月10日; 录用日期: 2021年4月9日; 发布日期: 2021年4月16日

摘 要

φ -OTDR分布式振动传感系统需使用窄线宽和频率漂移率小的相干光源, DFB半导体激光器的线宽通常在MHz量级且频率稳定性差, 无法直接用作 φ -OTDR系统的光源。本文使用光纤环形谐振器利用自注入锁定的方法来压窄DFB半导体激光器的线宽并稳定其频率, 并且将其作为 φ -OTDR分布式振动传感系统的光源。自注入锁定实现了约300倍的线宽压窄, 振动传感实验显示该系统有时能测到振动信号有时不能, 表明锁定过程中的跳模是自注入锁定激光器用于 φ -OTDR振动传感系统时需要克服的困难。

关键词

φ -OTDR, 振动传感, 线宽压窄, 自注入锁定

Study on Self-Injected Locked DFB Semiconductor Laser as φ -OTDR Light Source

Xiuli Li, Xuyang Zhu, Rong Zhang, Zhenming Zhao, Mei Kong*

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin
Email: *kongmei@cust.edu.cn

Received: Feb. 10th, 2021; accepted: Apr. 9th, 2021; published: Apr. 16th, 2021

Abstract

A coherent light source with narrow linewidth and small frequency drift rate is needed for an φ -OTDR distributed vibration sensing system. The linewidth of the DFB semiconductor laser is

*通讯作者。

文章引用: 李秀丽, 朱旭阳, 张荣, 赵振明, 孔梅. 自注入锁定 DFB 半导体激光器用作 φ -OTDR 光源研究[J]. 传感器技术与应用, 2021, 9(2): 74-79. DOI: 10.12677/jsta.2021.92010

usually in the order of MHz and its frequency stability is poor, so it cannot be used directly as a light source for an φ -OTDR system. In this paper, a fiber ring resonator is used to narrow the linewidth and stabilize the frequency of a DFB semiconductor laser by using the self-injection locking method, and the laser is used as the light source of an φ -OTDR distributed vibration sensing system. The self-injection locking can achieve about 300-time narrowing. The vibration sensing experiment shows that the system can sometimes distinguish vibration signals and sometimes cannot. We demonstrate that the mode hopping in the locking process is a difficulty to be overcome when the self-injection locking laser is used in the φ -OTDR vibration sensing system.

Keywords

φ -OTDR, Vibration Sensing, Linewidth Narrowing, Self-Injection Locking

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

分布式光纤传感是将光纤本身作为传感元件,具有成本低、抗电磁干扰、定位精度高、使用寿命长、灵敏度高、空间分辨率高、可长距离传感等优点[1] [2]。目前分布式光纤振动传感系统已经应用在安全和健康监测等很多领域中,有长距离的光缆、天然气和石油管道等的安全监测[3] [4] [5];也有民用桥梁、大型建筑等土木工程的健康监测[6] [7];还有敏感设施,如机场、核电站、工厂以及军事基地等的安全监测[8]。 φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统对于光源有一定的要求,需要窄线宽和频率漂移小的相干光源,而这样的激光器的价格普遍昂贵。自注入锁定的 DFB 半导体激光器具有成本低廉、结构简单的优势,因此使用它可以显著降低传感系统的成本。López-Mercado 团队将自注入锁定的 DFB 半导体激光器应用于 φ -OTDR 分布式声振动传感系统中,在 9270 m 的距离上,对光纤动态扰动的分布检测和定位进行了验证,证实了自注入锁定的 DFB 半导体激光器与 φ -OTDR 分布式声振动传感系统协同工作的能力[9] [10] [11] [12] [13]。本文采用环长为 4 m 的光纤环形谐振器对 DFB 半导体激光器进行线宽压窄,并将其用于 φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统中,分析了在 φ -OTDR 振动传感系统中使用该光源的效果和可行性。

2. DFB 半导体激光器的自注入锁定

我们利用光纤环形谐振器对 DFB 半导体激光器进行自注入锁定,如图 1 所示。光纤环形谐振器(FORR)由两个 3 dB 耦合器 C2 和 C3 组成,环长 4 m。由 DFB 半导体激光器输出的光通过环形器后进入环形谐振器,环形谐振器的谐振光再由环形器注入回激光器,实现对激光器的自注入锁定。耦合器 C1 分出 10% 的光作为激光器的输出, A、B 两个端口可以对锁定效果和锁定时的跳模情况等进行了监测。光隔离器 ISO 抑制光路中另一个方向光的产生。

本文中采用延时自外差法对激光器的线宽进行测量,延时自外差法的实验装置如图 2 所示。激光器的输出光经过一个 3 dB 耦合器后被分成两路,一路经过低损耗的延时光纤,以避免产生相干噪声。另一路经过声光移频器(AOM)移频 55 MHz,以避免低频噪声对检测信号的干扰。两路光在另一个 3 dB 耦合器处合成一束光,用光电探测器(PD)将合束后的光信号转换为电信号,再通过 Agilent E4403B 频谱分析仪(SA)读取差拍信号的线宽。选用的延时光纤的长度要大于激光器相干长度的 3 倍。用这种延时自外差法测得的信号线宽是光源实际线宽的 2 倍[14]。

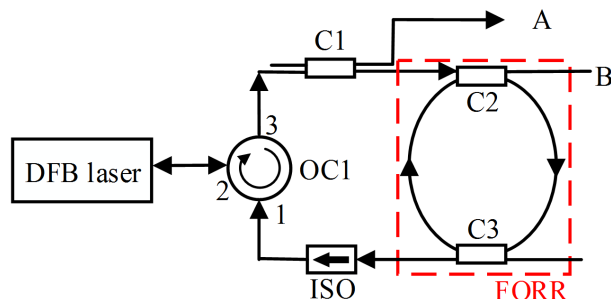


Figure 1. Self injection locking optical path diagram of DFB semiconductor laser

图 1. DFB 半导体激光器自注入锁定光路图

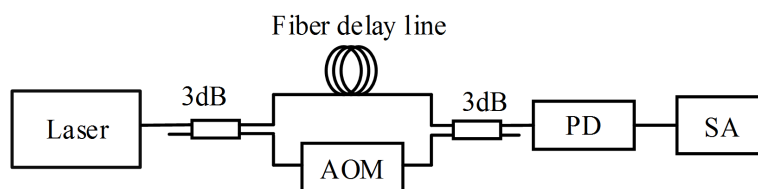


Figure 2. Laser line-width measurement by delayed self heterodyne method

图 2. 延时自外差法测量激光器线宽光路

使用该方案对 DFB 半导体激光器的线宽进行测量。测量时设置频谱分析仪的 ResBW 为 3 kHz, VBW 为 300 Hz, 对测量结果取 20 次平均。测量得到未锁定时差拍信号的线宽为 1.9 MHz。

把图 1 中 A 点输出的光接入图 2 中, 设定激光器驱动电流为 0.9 A, 用光纤环形谐振器对该 DFB 半导体激光器进行自注入锁定后, 在频谱仪上测得差拍信号频谱如图 3。测量时频谱仪的参数设置同测量未压窄激光器时相同。图中曲线半高全宽为 12.5 kHz, 所以锁定后激光器的线宽为 6.25 kHz, 相比于自由运行的 DFB 激光器, 线宽压窄了约 300 倍。

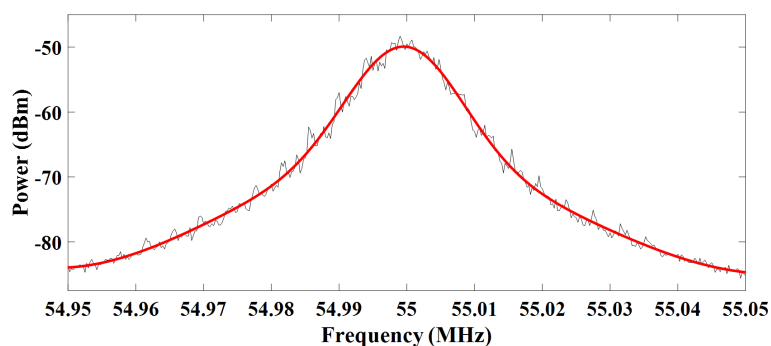


Figure 3. Line-width of narrowed DFB semiconductor laser

图 3. 压窄后的 DFB 半导体激光器的线宽

受外界温度漂移和激光器驱动电流波动等影响, 自注入锁定时, 激光器的频率可能从环形谐振器的一个谐振频率上失锁并跳跃到另一个谐振频率上, 即发生跳模。用示波器监视图 1 中的 B 端口的光强变化可以观测到跳模的发生[10] [15]。

图 4 为测得的 B 端口处的输出光强变化。由 B 端口输出可以明显看到跳模的发生, 此时输出光强发生明显的跳变, 虽然跳模持续时间较短, 但在跳模之前和之后, 输出光功率也有波动, 表明激光器锁定的稳定性不好。

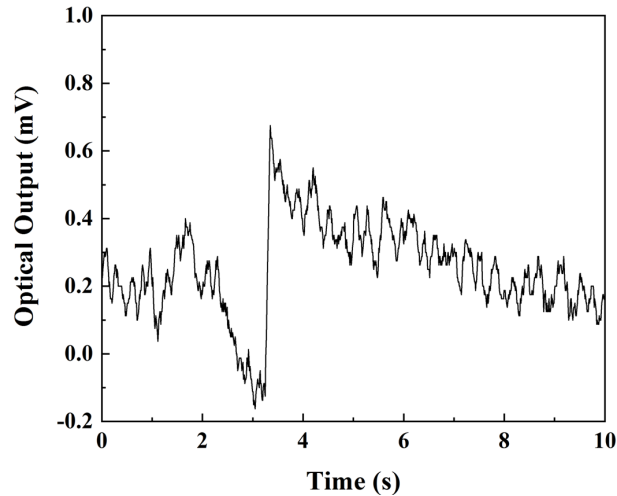


Figure 4. The occurrence of mode hopping during self-injection locking is observed from the light intensity of port B in Figure 1

图 4. 从图 1 中 B 端口的光强观察自注入锁定时跳模的发生

3. 使用自注入锁定 DFB 半导体激光器的振动传感实验

3.1. 实验装置

在 φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统中, 注入光纤的脉冲光是强相干的, 所以这个系统输出的就是脉冲宽度范围内不同散射点产生的后向瑞利散射光相互干涉的结果。有振动发生的位置, 不同时刻干涉信号不同, 且有一定规律性, 而无振动位置散射信号虽然也不是常数, 但呈现噪声的特点, 所以通过移动平均和差分等信号识别算法, 可以将有振动位置的散射信号从噪声中凸显出来。通过测量输入脉冲光与接收到的后向瑞利散射信号之间的时间延迟可以判断振动点的位置[16]。

将图 1 中的 A 端点连接到图 5 中, 使自注入锁定的 DFB 半导体激光器成为 φ -OTDR 振动传感系统的光源。声光调制器(AOM)把光源输出的连续光调制成脉冲光, 掺铒光纤放大器(EDFA)对脉冲光放大。放大后的信号经环行器进入一个 Bragg 光纤光栅, 该光栅作为窄线宽滤波器消除 EDFA 产生的自发辐射噪声。在传感光纤路径上某处, 将一定长度的光纤缠绕在一个压电陶瓷(PZT)上, 用信号发生器为 PZT 加上特定频率的振动信号模拟外界振动。传感光纤中产生的背向瑞利散射光经环行器被雪崩光电二极管 (APD)探测, 得到的电信号经过两级放大后在示波器上显示并采集和存储。

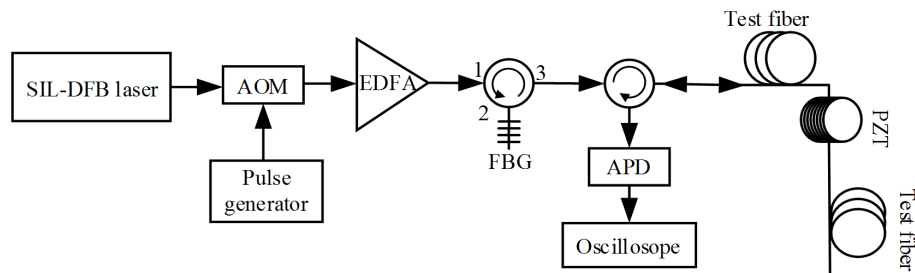


Figure 5. Optical circuit diagram of φ -OTDR distributed optical fiber vibration sensing system

图 5. φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统光路图

3.2. 实验结果与讨论

使用以上装置进行分布式振动传感实验。传感光纤全长 3.2 km, 在距离输入端约 1.4 km 的位置处放

置一个 PZT，上面缠绕 26 m 长的光纤。对其施加 500 Hz 频率的正弦信号。声光调制器上调制脉冲宽度为 200 ns，脉冲间隔为 50 μ s。通过示波器对背向散射信号进行采集，采样频率为 200 MHz，每次可存储 1000 个脉冲的背散信号，即采集到 1000 条背向散射曲线。

在离线状态下使用 100 条背向散射曲线对测得的数据进行移动平均差分处理。数据处理结果显示，在不同时刻测得的数据有的能识别出振动信号，有的不能，如图 6 所示。在图 6(a)中的振动信号尖峰位于 1405 m 处，而图 6(b)中并没有检测到振动信号。而在同样条件下，使用线宽小于 60 kHz 的窄线宽光纤激光器，则能稳定地得到振动信号。

分析使用自注入锁定 DFB 半导体激光器有时无法测到信号的原因，我们认为这是由于跳模现象的存在。DFB 半导体激光器未压窄之前的线宽是 1.9 MHz，虽然利用自注入锁定可以将 DFB 半导体激光器的线宽压窄到 6.25 kHz，但是这样窄的线宽只在稳定锁定时才能获得。在稳定锁定时对 φ -OTDR 系统进行振动测量，光源线宽窄，可以测量到振动信号。而在图 4 所示的跳模和非稳定锁定状态下，激光器的线宽变大，预计至少超过了窄线宽光纤激光器的线宽值，所以相干性变弱，无法达到 φ -OTDR 系统的测量要求，就不能测到振动信号。由此可见，使用自注入锁定 DFB 半导体激光器作为 φ -OTDR 系统的光源，需要在稳定的锁定状态下才能测到振动信号。

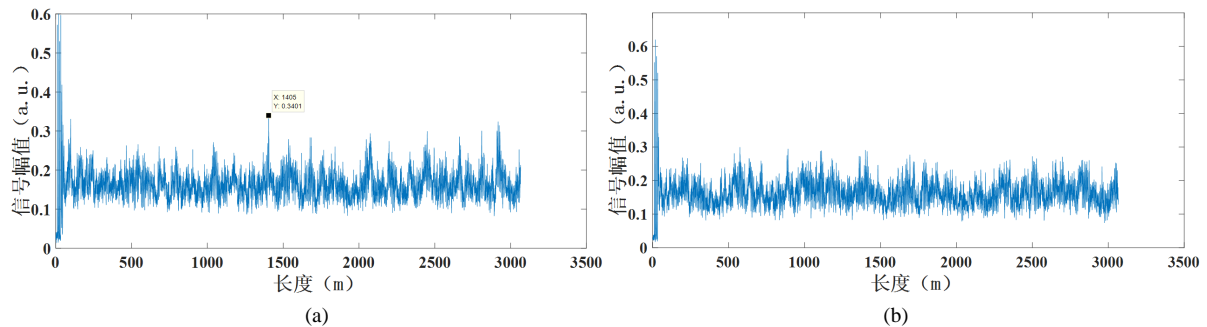


Figure 6. Vibration signal measurement results: (a) Measured vibration signal; (b) No vibration signal is detected

图 6. 振动信号测量结果: (a) 测得振动信号; (b) 未测到振动信号

4. 结论

本文使用环长为 4 m 的光纤环形谐振器对 DFB 半导体激光器进行自注入锁定，将其用作 φ -OTDR 分布式光纤振动系统的光源并对该系统进行了振动测量。实验结果表明，跳模稳定时间内自注入锁定的 DFB 半导体激光器的线宽窄，该系统可以测到光纤附近的振动信号，这样既兼顾了 φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统的优势，又降低了窄线宽激光器的成本，有很强的实际意义。但是这样的光源因为有跳模现象的存在，有时不能测到振动信号。为避免跳模现象的影响，后续应进一步稳定自注入锁定 DFB 半导体激光器，尽量减少或避免跳模现象的发生。如用周长更短的光纤环或波导环，这样的环形谐振器自由光谱范围更大，则不易发生跳模现象。但周长短的环往往谐振峰也更宽，会导致锁定后激光器的线宽比用长光纤环时更大。因此，后续还需开展相干研究，探索能同时实现窄线宽和不易跳模的自注入锁定 DFB 半导体激光器。

参考文献

- [1] Lu, Y., Zhu, T., Chen, L. and Bao, X. (2010) Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR. *Journal of Lightwave Technology*, **28**, 3243-3249.
- [2] Zinsou, R., Liu, X., Wang, Y., Zhang, J., Wang, Y. and Jin, B. (2019) Recent Progress in the Performance Enhancement of Phase-Sensitive OTDR Vibration Sensing Systems. *Sensors*, **19**, Article No. 1709.

- <https://doi.org/10.3390/s19071709>
- [3] Peng, F., Wu, H., Jia, X.H., Rao, Y.-J., Wang, Z.-N. and Peng, Z.-P. (2014) Ultra-Long High-Sensitivity ϕ -OTDR for High Spatial Resolution Intrusion Detection of Pipelines. *Optics Express*, **22**, 13804-13810. <https://doi.org/10.1364/OE.22.013804>
- [4] 黄伟, 潘俊宇. 分布式光纤预警系统在成品油管道安防中的应用[J]. 激光技术, 2016, 40(6): 897-901.
- [5] Spirin, V.V., Escobedo, J.L.B., Korobko, D.A., Zolotovskiy, I.O., López-Mercado, C.A., Mégret, P., *et al.* (2018) Fiber Laser for Application in Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometry. *SPIE LASE 2018*, San Francisco, 26 February 2018, Article ID: 105122F. <https://doi.org/10.1117/12.2288632>
- [6] 刘建霞. ϕ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展[C]//中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国激光杂志社. 第八届全国激光技术与光电子学学术会议: 2013 年卷, 2013: 1-6.
- [7] Xu, S., Qin, Z., Zhang, W. and Xiong, X. (2020) Monitoring Vehicles on Highway by Dual-Channel ϕ -OTDR. *Applied Sciences*, **10**, Article No. 1839. <https://doi.org/10.3390/app10051839>
- [8] 陈继宣, 龚华平, 金尚忠. 基于 ϕ -OTDR 的光纤入侵传感器系统的原理及研究进展[J]. 激光杂志, 2009, 30(6): 4-6.
- [9] Escobedo, J.L.B., Spirin, V.V., López-Mercado, C.A., Márquez Lucero, A., Mégret, P., Zolotovskii, I.O., *et al.* (2017) Self-Injection Locking of the DFB Laser through an External Ring Fiber Cavity: Application for Phase Sensitive OTDR Acoustic Sensor. *Results in Physics*, **7**, 641-643. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.01.013>
- [10] Escobedo, J.L.B., Spirin, V.V., López-Mercado, C.A., Marquez Lucero, A., Mégret, P., Zolotovskii, I.O., *et al.* (2017) New Fiber Laser Design for Application in Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometry. *SPIE Optics+Optoelectronics*, Prague, 24-27 April 2017, Article ID: 1023129.
- [11] Escobedo, J.L.B., Jason, J., López-Mercado, C.A., Spirin, V.V., Wuilpart, M., Mégret, P., *et al.* (2019) Distributed Measurements of Vibration Frequency Using Phase-OTDR with a DFB Laser Self-Stabilized through PM Fiber Ring Cavity. *Results in Physics*, **12**, 1840-1842. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.02.023>
- [12] Spirin, V.V., López-Mercado, C.A., Jason, J., Bueno-Escobedo, J.L., Mégret, P., Wuilpart, M., *et al.* (2019) Cost-Effective Solution for Phase-OTDR Distributed Acoustic/Vibration Sensing. *SPIE LASE 2019*, San Francisco, 2-7 February 2019, Article ID: 109030Q. <https://doi.org/10.1117/12.2509767>
- [13] Spirin, V.V., López-Mercado, C.A., Mégret, P. and Fotiadi, A.A. (2018) Fiber Laser for Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry. In: Xu, F. and Mou, C., Eds., *Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications*, IntechOpen, London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72553>
- [14] Zhao, Y., Peng, Y., Yang, T., Li, Y., Wang, Q., Meng, F., *et al.* (2011) External Cavity Diode Laser with Kilohertz Linewidth by a Monolithic Folded Fabry-Perot Cavity Optical Feedback. *Optics Letters*, **36**, 34-36. <https://doi.org/10.1364/OL.36.000034>
- [15] Wang, C., Zhang, R., Zhao, Z., Chen, C. and Kong, M. (2019) Comparison of Self-Injection Locking of DFB-LD by Optical Fiber and Optical Waveguide Ring Resonators. *Fiber and Integrated Optics*, **38**, 323-332. <https://doi.org/10.1080/01468030.2019.1704098>
- [16] 张智娟, 郭文翰, 徐志钮, 赵丽娟. 基于 ϕ -OTDR 的光纤传感技术原理及其应用现状[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 9-16.