

## 延迟自外差锁相控制的激光线性扫频技术及其应用

董毅\*, 谢玮霖, 冯宇祥, 孟银霞, 杨将, 任妍

北京理工大学信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 光频域反射技术(OFDR)是高空间分辨率和高精度光纤链路性能检测和分布式光纤传感的重要技术途径。其中,激光在宽范围扫频下的扫频非线性和相频噪声是有待解决的关键问题。报道了基于延迟自外差光锁相的激光扫频非线性和相频噪声控制方法,实现了扫频范围为 8 GHz、扫频速度为 160 GHz/s 的低相频噪声高线性激光扫频。基于该扫频激光进行了光纤链路损耗测量和分布式光纤应变传感实验,实现了动态范围为 27 dB、空间分辨率为 4.3 cm 的 240 km 光纤链路损耗测量以及空间分辨率为 5 cm 的分布式光纤应变传感。实验验证了锁相控制激光扫频误差的有效性和优越性。

**关键词** 光纤光学; 光频域反射; 光调频连续波; 光锁相; 光纤链路监控; 分布式光纤应变传感

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306003

## Laser Linear Sweep Frequency Technique Based on Delay Self-Heterodyne Optical Phase Locking and Its Application

Dong Yi\*, Xie Weilin, Feng Yuxiang, Meng Yinxia, Yang Jiang, Ren Yan

Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Optical frequency domain reflectometry (OFDR), featuring high spatial resolution and precision, has been regarded as an important technique in the monitoring and diagnosis of fiber-optic links and networks and distributed fiber-optic sensing. The sweep nonlinearity and phase noise of laser are the key issues to be dealt with for the broadband optical linear frequency sweep in OFDR systems. In this work, we report on laser sweep nonlinearity and phase noise control based on delay self-heterodyne optical phase locking, which allows highly linear laser frequency sweep with an 8 GHz sweep range and a 160 GHz/s sweep rate with low phase noise. Experiments on both fiber-optic link monitoring and distributed fiber strain sensing are carried out based on such laser source. In the former experiment, we achieve long-distance OFDR with a dynamic range of 27 dB and a high spatial resolution of 4.3 cm over a 240 km fiber-optic link. In the latter, distributed strain sensing with 5 cm spatial resolution is realized. The experiments verify the effectiveness and superiority of the proposed method in controlling laser frequency sweep errors by phase locking.

**Key words** fiber optics; optical frequency domain reflectometry; optical frequency-modulated continuous-wave; optical phase locking; fiber-optic link monitoring; distributed fiber-optic strain sensing

**OCIS codes** 060.2310; 120.1840; 120.3180; 140.3518

## 1 引言

调频连续波(FMCW)测量技术采用大时间带宽积的线性扫频信号作为探测信号,从原理上解决

了脉冲式探测的距离与定位精度互相制约的问题,成为兼具高精度定位、远距离探测能力的新一代测量技术。近年来,激光 FMCW 技术被用于实现高空间分辨率的光纤链路性能监测<sup>[1-5]</sup>和分布式光纤

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-05-25; 录用日期: 2021-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61827807,61805014)

通信作者: \*yidong@bit.edu.cn

传感<sup>[6-8]</sup>,也被称为光频域反射(OFDR)技术。

OFDR 技术的关键在于高相干线性扫频激光的生成,激光的扫频范围和速度以及扫频过程中的非线性和相频噪声是决定 OFDR 空间分辨能力和测量距离等性能的关键因素<sup>[9-11]</sup>。然而,绝大多数激光的扫频非线性和相频噪声互相制约,使得 OFDR 在空间分辨率、距离和精度上难以兼得。为此,研究人员在激光扫频技术上进行了大量的研究,其中,基于激光直接调制的扫频方式可产生宽范围扫频,实现高空间分辨率测量,但其具有高非线性,且相频噪声较大、扫频速度较慢,可支持的测量距离和精度受限。针对这一问题,文献[4, 12-15]报道了利用非平衡马赫-曾德尔干涉结构测得的光频误差对接收信号进行重采样或数字域补偿的方法,该方法有效补偿了激光扫频的非线性,但对激光相频噪声的补偿效果不够明显,而且要求马赫-曾德尔干涉臂延迟差数倍于最长测量距离,由此导致干涉结构本身的不稳定性;而基于光外调制谐波的扫频方式具有低相频噪声、高线性、快速扫频的优点,可实现高精度、远距离测量。然而,该方式的扫频范围受限于射频信号的生成能力和光调制器的带宽,空间分辨率有限。此外,文献[16-19]报道了啁啾脉冲方法,该方法避免了激光的长时间漂移问题,然而,啁啾脉冲需采用电域去斜解调,高分辨测量需要付出宽带光电接收的代价。基于光锁相控制的激光扫频方法<sup>[20-24]</sup>,采用了伺服反馈的光频误差控制,具有同时抑制扫频非线性、激光相频噪声的潜力,可望获得 OFDR 综合能力的提升,近年来得到学术界的广泛关注和深入研究。

本文首先分析了 OFDR 中激光扫频的非线性和相频噪声及其影响问题,采用光锁相技术生成了扫频范围为 8 GHz、扫频速度为 160 GHz/s 的低相频噪声高线性扫频激光,基于该光源实现了动态范围为 27 dB、损耗测量精度为 0.5 dB、在 240 km 处的空间分辨率为 4.3 cm 的长距离、高空间分辨率光纤链路损耗测量,进一步实现了空间分辨率为 5 cm 的光纤分布式应变传感。实验验证了这一激光扫频技术的有效性和优越性。

## 2 基本原理

### 2.1 OFDR 基本原理和光扫频误差问题

OFDR 测量的基本原理如图 1 所示,激光器发出频率线性扫描的光信号,将其输入待测光纤后,光纤内各点的后向瑞利散射信号和不连续点的反射信

号沿原路回传至发射端并与发射信号进行光域相干去斜解调,再进行数字信号处理。以线性扫频光为测量信号,来自光纤内不同位置的回波因经历了不同的延时,被映射为不同频率或相位的解调信号,实现回波位置信息的解析。通过频域分析解调信号的功率谱或相位谱特性,即可测得光纤内不同位置的损耗或形变。

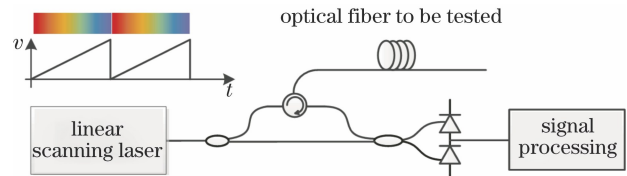


图 1 OFDR 基本工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of OFDR

实际中,由于激光器的扫频范围不可能无限大,因此 OFDR 通常采用往返式周期扫频。不失一般性,以锯齿波扫描为例,考虑到回扫时间一般很短,可忽略不计。扫频激光的瞬时光频可表示为

$$\nu(t) = \bar{\nu}_0 + \bar{\gamma}(t - mT_s) + \delta\nu_e(t), \quad m = \text{floor}(t/T_s), \quad (1)$$

式中: $\bar{\nu}_0$  为激光初始光频均值; $\bar{\gamma}$  为扫频斜率均值; $T_s$  为扫频周期; $m$  为整数; $\text{floor}(\cdot)$  为向下取整函数; $\delta\nu_e(t)$  为扫频信号的频率误差,其主要源于激光相频噪声和调频非线性响应,即  $\delta\nu_e(t) = \delta\nu_0(t) + \delta\gamma(t)t$ ,其中  $\delta\nu_0(t)$  为激光瞬时频率噪声, $\delta\gamma(t)$  为扫频非线性误差。

该激光的瞬时相位可表示为

$$\varphi(t) = 2\pi \int \nu(t) dt = 2\pi \left[ (\bar{\nu}_0 - mF_s)t + \frac{1}{2}\bar{\gamma}t^2 \right] + \delta\varphi(t) + \varphi_0, \quad (2)$$

式中: $F_s = \bar{\gamma}T_s$  为激光扫频范围; $\delta\varphi(t) = 2\pi \int \delta\nu_e(t) dt$  表征了扫频激光的相位误差; $\varphi_0$  为激光的初始相位。

以距离发射端  $L_x$  处的回波信号为研究对象,回波信号的瞬时相位可写为

$$\varphi(t - \tau) = 2\pi \int \nu(t - \tau) dt = 2\pi \left[ (\bar{\nu}_0 - mF_s)(t - \tau) + \frac{1}{2}\bar{\gamma}(t - \tau)^2 \right] + \delta\varphi(t - \tau) + \varphi_0, \quad (3)$$

式中: $\tau = 2nL_x/c$  为回波信号延迟( $c$  为真空中的光速, $n$  为光纤的有效折射率)。

回波信号与本地信号进行相干混频,经平衡光电探测器拍频后,输出光电流为

$$I(t) = R\sigma P_0 \sin[\varphi(t) - \varphi(t - \tau)] = \begin{cases} R\sigma P_0 \sin\{2\pi\bar{\gamma}t + [2\pi(\bar{\nu}_0 - mF_s)\tau - \pi\bar{\gamma}\tau^2] + \delta\varphi(t) - \delta\varphi(t - \tau)\}, & mT_s + \tau < t < (m + 1)T_s \\ R\sigma P_0 \sin\{2\pi(\bar{\gamma}t - F_s)t + [2\pi(\bar{\nu}_0 - mF_s)\tau - \pi\bar{\gamma}\tau^2] + \delta\varphi(t) - \delta\varphi(t - \tau)\}, & (m + 1)T_s < t < (m + 1)T_s + \tau \end{cases}, \quad (4)$$

式中： $P_0$  为平均光发射功率； $\sigma$  为回波功率损耗； $R$  为光电探测器的响应度。

可见，拍频信号为时间上断续的准单频信号。在  $mT_s + \tau < t < (m + 1)T_s$  时段内，拍频信号频率为  $f_x = \bar{\gamma}\tau = 2\bar{\gamma}nL_x/c$ ，信号频率及其相位表征了回波信号的位置。在  $(m + 1)T_s < t < (m + 1)T_s + \tau$  时段，拍频信号频率为  $f'_x = \bar{\gamma}\tau - F_s = 2\bar{\gamma}nL_x/c - F_s$ ，虽然也包含了目标位置信息，但其频率远高于  $f_x$ ，不利于高精度处理。实际中，一般通过低通滤波器滤除该信号。

如果采用三角波扫描，即正扫和回扫斜率相反、大小相同，则可在拍频信号中形成大小相同但随距离变化符号相反的两种频率，两者的均值和差值可分别用于测量目标的位置和速度。

在不考虑扫频误差的情况下，拍频信号的功率谱为以  $f_x$  为中心的主瓣宽度为  $\delta f = 1/(T_s - \tau)$  的

函数，相应的空间分辨率为

$$\delta x = \frac{c}{2n\bar{\gamma}(T_s - \tau)} = \frac{c}{2nF_s - 2n\bar{\gamma}\tau}. \quad (5)$$

(5) 式表明，OFDR 的空间分辨率与激光扫频范围成反比，宽范围扫频是实现高空间分辨率测量的必要条件。图 2 描述了有限扫频范围下，激光的时间与频率的关系折线、接收拍频信号的时间-光电流曲线和接收信号功率谱示意图。此外，回波延时将占据时宽，导致空间分辨率随着测量距离的增加而降低。在回波延时范围小的短距离测量中，该问题影响很小，一般不予考虑，但在长距离测量中必需予以重视，需要增大扫频周期，减小时宽损失对分辨率的影响。一般要求时宽的相对损失不超过 20%，即  $\tau_{\max} \leq 0.2T_s$ ；例如：对于 100 km 光纤的 OFDR 系统，通常要求扫频周期不小于 5 ms。

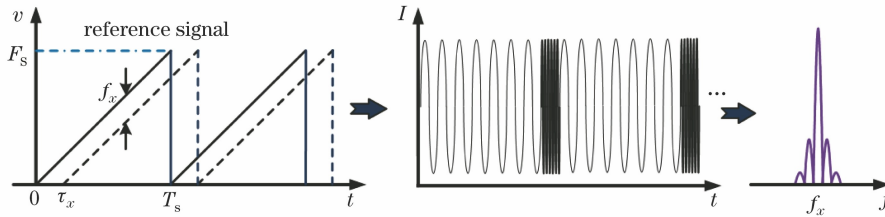


图 2 OFDR 的扫频范围和空间分辨率的关系

Fig. 2 Relationship between scan range and spatial resolution of OFDR

(4) 式同时表明，相位误差项  $\delta\varphi(t) - \delta\varphi(t - \tau)$  将导致接收信号的频率误差增大和信噪比降低，进而造成定位精度降低和测量距离受限。如果频率误差  $\delta\nu_e(t)$  很小，相位误差可近似为

$$\delta\varphi(t) - \delta\varphi(t - \tau) = 2\pi \int_{t-\tau}^t \delta\nu_e(t) dt \approx 2\pi\delta\nu_e(t)\tau. \quad (6)$$

可见，随着测量距离的增加，要求扫频信号的频率误差较小(图 3)。为研究方便，常用频率标准差  $\sigma$  表征扫频信号的频率误差，定义为

$$\sigma = \sqrt{(1/T_s) \int_0^{T_s} [\eta(t) - \bar{\eta}]^2 dt}, \quad (7)$$

式中： $\eta(t) = \delta\nu_e(t)/F_s$  为扫频范围归一化的频率误差。

研究表明：当  $\sigma \leq 0.163(\delta x/L_{\max})^{[1]}$  ( $L_{\max}$  为最

大距离)时，频率误差导致的空间分辨率恶化可忽略

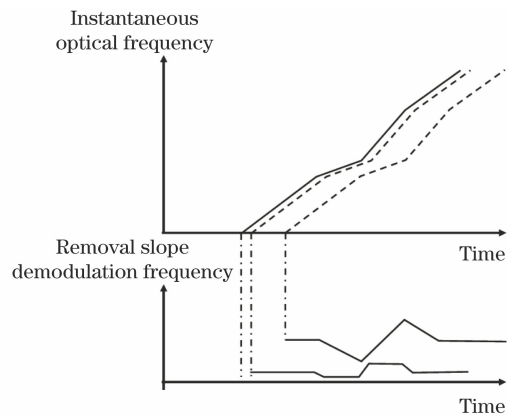


图 3 激光扫频误差对不同距离下的空间分辨率的影响

Fig. 3 Effect of laser frequency scanning error on spatial resolution for different distances

不计。例如：假定频率误差在扫频周期内近似为稳定值，则对于空间分辨率为 10 cm、最远测量距离为 1 km 的系统，要求扫频信号的频率标准差小于  $1.63 \times 10^{-5}$ ；而要实现空间分辨率无恶化的 100 km 测量，则要求频率标准差达到  $1.63 \times 10^{-7}$ 。

可见，长距离测量要求扫频激光在更长的扫频时间内具有更低的频率误差。众所周知，长期稳定性差是激光器面临的共性问题，实现长距离 OFDR

测量需要解决激光频率的长期稳定性难题。

瑞利散射是光纤固有的现象，遍布光纤内的所有位置。因此，OFDR 的回波信号延时是连续的，解调信号呈现为频谱上连续的信号，其傅里叶变换频谱表征了光纤中各个位置的回波信息，即  $F(\tau) = \mathcal{F}[f(t)]$ 。考虑到线性扫频的光频与时间对应 ( $\nu \leftrightarrow t$ )，空间位置与回波延时对应 ( $x \leftrightarrow \tau$ )，因此也可将傅里叶变换关系表示为  $F(x) = \mathcal{F}[f(\nu)]$ ，如图 4 所示。

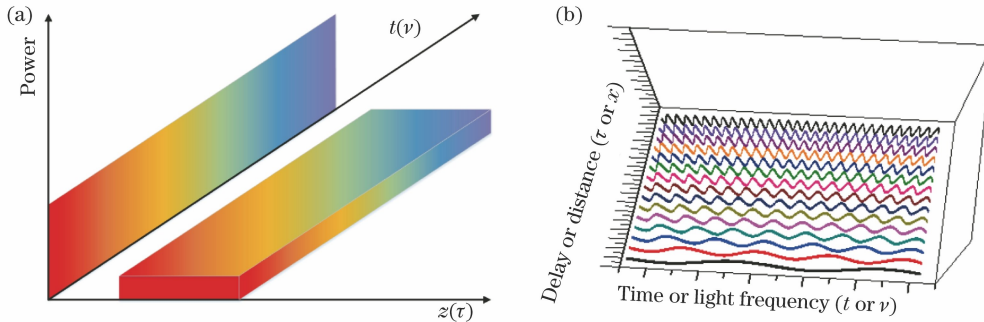


图 4 扫频信号和回波信号的关系，以及回波延迟与拍频信号频率的映射关系。(a) 扫频信号和回波信号的关系；(b) 回波延迟与拍频信号频率的映射关系

Fig. 4 Relationship between scanning laser frequency and echo signal, and mapping relationship between echo delay and beat frequency of OFDR. (a) Relationship between scanning laser frequency and echo signal; (b) mapping relationship between echo delay and beat frequency of OFDR

## 2.2 锁相控制的扫频激光生成

如上所述，激光扫频中的激光相频噪声和扫频非线性是造成扫频误差、制约测量精度和距离的关键因素。针对这一问题，本文提出延迟自外差锁相控制的激光扫频方法，其基本思路是：通过延迟自外差方法测得激光扫频误差，运用闭环反馈锁相控制方法抑制激光相频噪声、校正扫频非线性。图 5 为

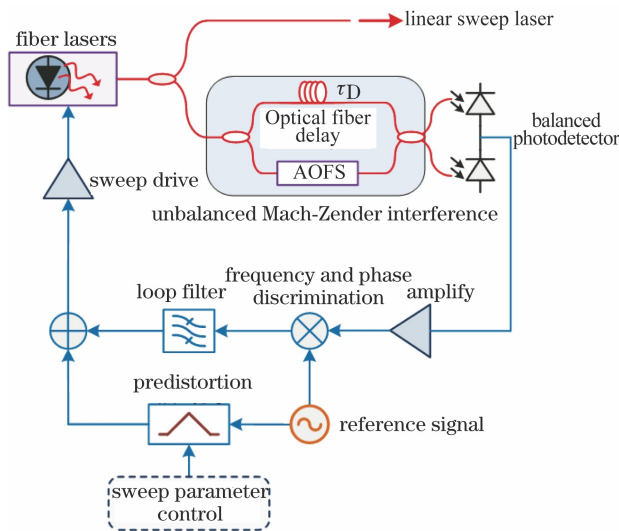


图 5 光锁相控制的扫频激光生成原理图

Fig. 5 Schematic diagram of sweep laser generation using optical phase locked control

波长可调谐光纤激光器在预畸变锯齿波扫频信号驱动下，输出频率扫描激光。部分光经由光纤延迟线和声光频移器 (AOFS) 组成的非平衡马赫-曾德尔干涉结构和平衡光电探测器进行延迟自外差拍频，将激光扫频误差转换为拍频信号的相频误差，经环路滤波后，反馈控制扫频驱动信号，校正扫频误差。

与 (4) 式的推导过程类似，经马赫-曾德尔干涉拍频得到的输出信号 (滤除高频部分后) 的频率为  $f_D = \bar{\nu}\tau_D + f_{AOFS}$  (其中  $f_{AOFS}$  为 AOFS 的驱动频率)，相位为  $\varphi_D(t) = [2\pi(\bar{\nu}_0 - mF_S)\tau - \pi\bar{\gamma}\tau^2] + \delta\varphi(t) - \delta\varphi(t - \tau_D)$ ，其中  $\tau_D$  为马赫-曾德尔干涉结构的两臂延迟差。将拍频信号的频率和相位分别为  $f_{ref} = f_{AOFS} + \gamma\tau_D$  和  $\varphi_{ref}$  的频率稳定的低相噪参考信号进行混频鉴相，得到相位误差为

$$e_\varphi(t) = \varphi_D - \varphi_{ref} = [2\pi(\bar{\nu}_0 - mF_S)\tau - \pi\bar{\gamma}\tau^2] + \delta\varphi(t) - \delta\varphi(t - \tau_D) - \varphi_{ref} \quad (8)$$

环路锁定时，相位差近似为恒定值，并将 (6) 式代入，有

$$e_\varphi(t) = [2\pi(\bar{\nu}_0 - mF_S)\tau - \pi\bar{\gamma}\tau^2] + 2\pi \int_{t-\tau}^t \delta\nu_e(t) dt - \varphi_{ref} = A, \quad (9)$$

式中：A 为常数。(9) 式要求相位误差中的时间变量项为零，即频率误差项  $\delta\nu_e(t)$  为零，意味着扫频非

线性、激光相频噪声等扫频误差得到抑制或校正。

实际中,因锁相带宽有限、锁相环路噪声以及参考信号相噪等因素,锁相后仍存在残余相噪,这限制了扫频误差的抑制效果,需要尽可能采用诸如增大锁相带宽、减小环路噪声、选用低相噪参考信号等措

施,以提高频率误差抑制的效果。

本文采用两臂延迟差为  $10\ \mu\text{s}$  (2 km 光纤环) 的马赫-曾德尔干涉结构,锁相控制光纤激光器的扫频过程,生成了扫频范围为 8 GHz、扫描时间为 50 ms 的扫频激光,典型结果如图 6 所示。

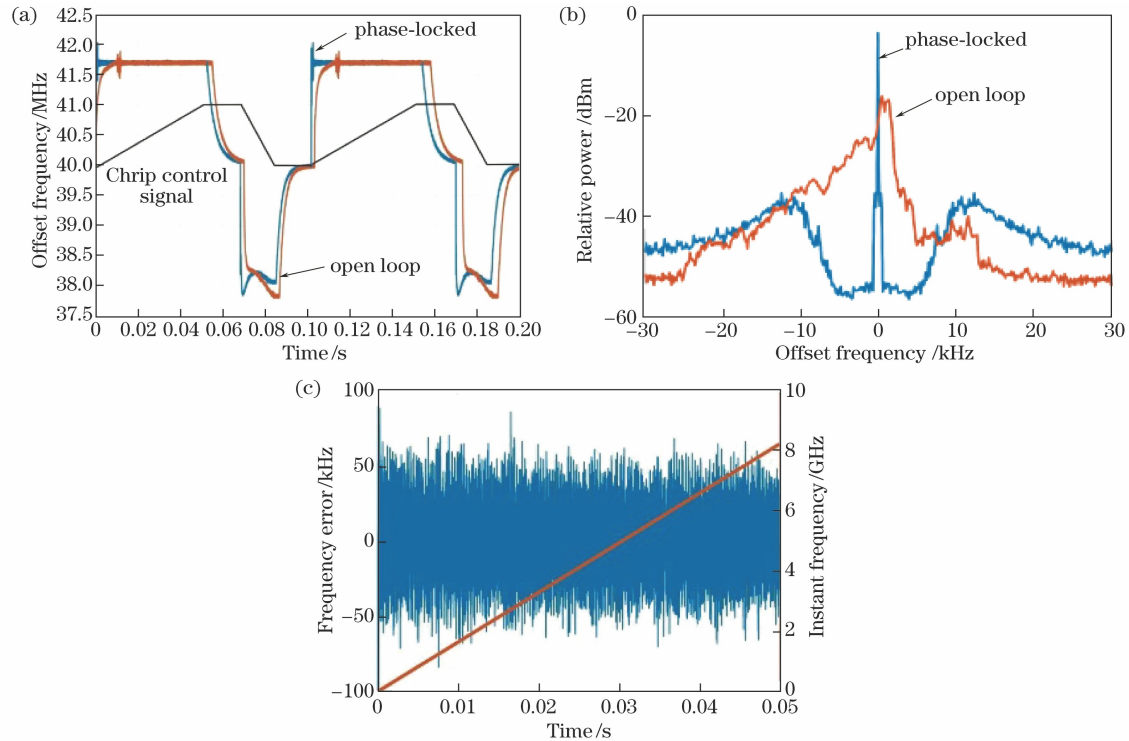


图 6 锁相控制激光扫频的典型结果。(a)延迟自外差拍频信号的瞬时频率;(b)锁相前后拍频信号的频谱;(c)激光瞬时频率及其频率误差

Fig. 6 Typical results of phase locked control laser scanning. (a) Instantaneous frequency of delay heterodyne beat frequency signal; (b) spectrum of beat frequency signal before and after phase locking; (c) laser instantaneous frequency and frequency error

图 6(a)为测得的扫频过程中的延迟自外差拍频信号的瞬时频率,扫频时间为 50 ms,周期为 100 ms,之所以留出 50 ms 的回扫时间,是因为光纤激光器采用 PZT 调谐光谱谐振腔的调频方式,需要较长的回程时间才能使各次扫频周期的初始频率稳定在近似相同的值。此外,由于 PZT 的扫频非线性严重,因此需要通过预畸变驱动信号预先减小扫频非线性,以缩短锁相环路的捕获时间并缩小跟踪范围。预畸变信号是通过延迟干涉结构提取扫频非线性并经过多次迭代后生成。可以看出,在未进行锁相的情况下,尽管采用了预畸变驱动,扫频期间的拍频信号频率变化范围仍然很大,尤其是在扫频转折的开始阶段。而采用锁相控制后,拍频信号迅速稳定在 41.6 MHz (即 40 MHz 的 AOFS 驱动频率发生 +1.6 MHz 的频率偏移)。黑色曲线为扫频控制信号。

图 6(b)为锁相前后的延时自外差拍频信号的功率谱。可以看出:未锁相情况下,信号频谱严重发

散,意味着频率误差较大。锁相后,带内的拍频信号频谱被大幅度压缩为近似  $\delta$  函数,带内噪声抑制超过 20 dB,意味着扫频误差得到有效抑制。本实验实现的锁相环路带宽约为 10 kHz,环路延时和 PZT 的响应速度是限制锁相带宽的主要因素。

图 6(c)为根据拍频信号的瞬时频率折算的激光扫频信号及其频率误差。可以看出,扫频范围约为 8 GHz,频率标准差约为 16.67 kHz (归一化的频率标准差约为  $2.03 \times 10^{-6}$ )。下节的 OFDR 测试表明,实际的扫频误差比该值要小约一个数量级,该误差主要源于瞬时频率测量系统本身的误差。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 长距离光纤链路损耗测量

利用生成的扫频激光进行 OFDR 光纤链路损耗测量。图 7 为测量系统图。

线性扫频激光经耦合比为 10:90 的  $1 \times 2$  保偏

光纤耦合器分为两部分,10%端口输出信号被用作参考光,另一端输出信号经光环行器送入待测光纤,入纤功率约为 5 dBm。被测光纤链路由总长为 242 km 的光纤盘组成,光纤链路内含三个光纤连接器和两个 1 dB(或 0.5 dB)的固定衰减器,用以测试系统的空间分辨率和损耗测量精度。需要说明的是,测量过程中光纤盘被放置于隔震箱中,以避免环境扰动造成的光纤延迟变化,进而

影响对系统实际定位精度的评估。回传的后向瑞利散射及反射信号经环形器分离后,通过 2×2 保偏光纤耦合器和平衡光电探测器完成与参考光的相干拍频,偏振控制器用于调整回波信号的偏振态,以实现高效率的光混频。平衡光电探测器输出的拍频光电流,经放大、滤波等预处理后,被送入实时频谱分析仪(Tektronix RSA5106A),分析信号的功率谱。

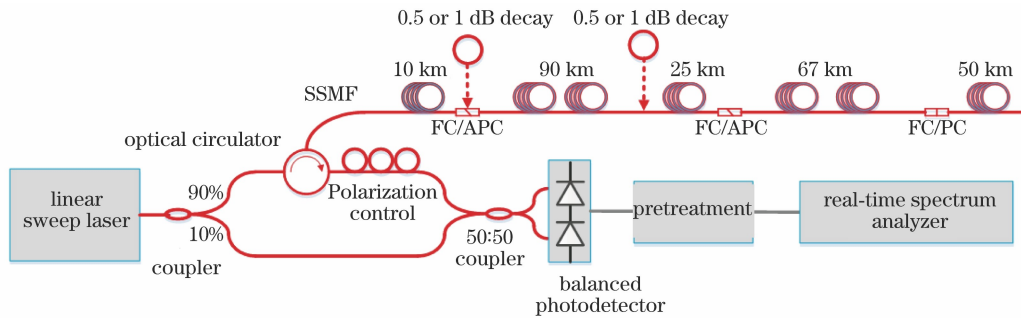


图 7 光锁相控制 OFDR 系统框图

Fig. 7 System diagram of OFDR controlled by optical phase locking

图 8 为测得的光纤链路损耗曲线,插图标出了 10,125,192 km 处的连接点和 242 km 处的尾端反射信号谱宽,定位精度分别为 2.8, 3.2, 3.5, 4.3 cm,光纤尾端反射信号的信噪比优于 10 dB。系统的单程损耗动态范围可达 27 dB(注:回波信号经历了往返损耗,其动态范围为 54 dB),系统的最大距离/分辨率比为  $5.6 \times 10^6$ 。系统的最高分辨率由激光扫频范围对应的分辨率 1.25 cm 与频谱分析仪的窗函系数 2.25 的乘积所决定,即 2.8 cm。由图 8 可知,分辨率没有明显恶化的距离超过 10 km。按照(7)式估算,扫频信号的归一化的标准差  $\sigma$  应达到  $2 \times 10^{-7}$ 。因此,光锁相对激光的动态相干性具有明显的提升,本系统的测量距离主要由锁相后残余的相频噪声和扫频非线性决定。

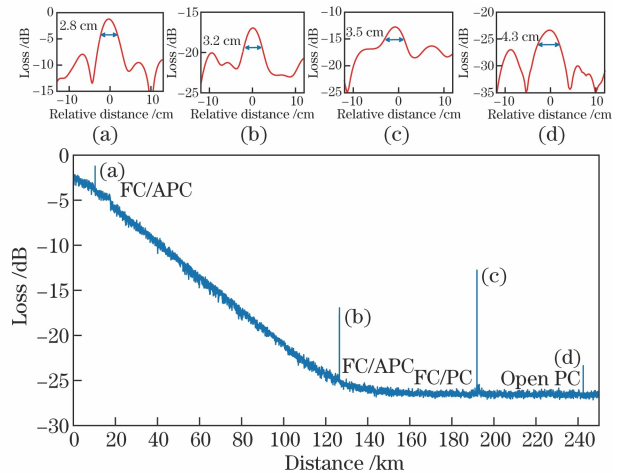


图 8 光锁相控制的 OFDR 所测得的光纤链路损耗

Fig. 8 Fiber link loss of OFDR controlled by optical phase locking

图 9 表征了 10 km 和 100 km 处的光纤损耗测

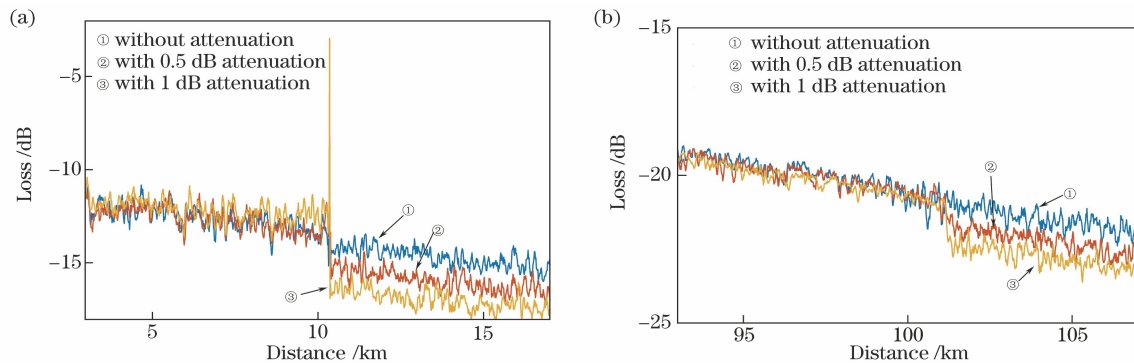


图 9 不同距离下的光纤损耗测量精度。(a) 10 km;(b) 100 km

Fig. 9 Measurement accuracy of optical fiber loss at different distances. (a) 10 km; (b) 100 km

量精度,可以看出,虽然 100 km 处的损耗测量精度有所恶化,但仍可以辨识 0.5 dB 的损耗。此外,图 9 结果中相干衰落噪声也清晰可见。相干衰落噪声是 OFDR 测量中面临的重要噪声源,是限制测量精度的主要因素,有关该问题的讨论超出本文范畴,故不予赘述。

### 3.2 分布式光纤应变传感

近年来,基于 OFDR 的高空间分辨分布式光纤应变传感成为本领域广泛开展的研究课题。代表性的方法是通过测量瑞利散射谱图的变化来获得光纤应变<sup>[5-8]</sup>。这一方法采用了数太赫兹(数十纳米)范围的光频扫描,以提高对瑞利散射谱图的识别精度,同时大幅度抑制了相干衰落噪声,实现了高精度、高稳定的应变测量,可用于分析待测物长时间跨度下的应变变化。而如此大范围的扫频带来的长扫频时间、较大的频率误差,限制了其可支持的测量距离。另一类方法是通过分析后向瑞利散射信号的相位获取光纤应变信息。接收信号的相位是光频和延时的乘积,由于光频的频率极高,因此通过测量相位可以超灵敏感知应变导致的微小延时变化。然而,利用相位测量应变将面临相位周期缠绕以及易受光相频噪声影响的难题。文献[16-19]采用外调制的快速光扫频或者啁啾光脉冲方式,以及电域去斜解调方

法,有效减小了激光扫频和解调误差,成功实现了分布式应变测量。然而,扫频范围有限导致空间分辨率低、相干衰落噪声大,相位测量精度和长期稳定性因此受限。

本文利用生成的线性扫频激光进行了基于后向瑞利散射信号相位信息的分布式光纤应变传感,实现了空间分辨率为 5 cm 的分布式光纤应变传感。图 10 为实验系统图。应变传感系统的工作原理与前述的 OFDR 基本相同,不同点仅在于信号接收处理方法。本实验采用了正交光混频的相干解调,获得 I、Q 分量信号,并采用高精度的数字化处理,以提高傅里叶相位谱的解算精度。待测光纤由粘贴在光学平台上的约 5 m 的静止光纤和一只光移相器(缠绕在 PZT 上的约 0.1 m 的光纤段)构成。采用 2 Hz 周期方波驱动光移相器,给移相器内的光纤段施加周期性应变。单个扫频周期的信号相位谱对应一个时刻的光纤沿线应变,依次分析各个周期的相位谱,以获得光纤沿线各点应变的时变情况。本实验的扫频周期为 100 ms,对应的相位采样率为 10 Hz。相位提取中,将每次扫频时间分割为四段进行加权平均处理,以提高相位提取的精度<sup>[25-27]</sup>。因此,测量系统的空间分辨率也降低为 5 cm。

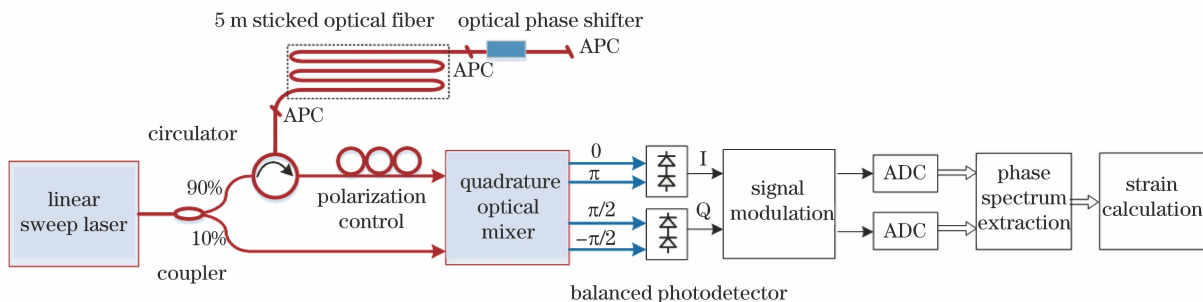


图 10 光纤分布式应变传感系统图

Fig. 10 Optical fiber distributed strain sensing system

图 11 为加权平均后的 20 个扫频周期的信号功率谱和相位谱,可以看出,在 2 s 的测量时间内,静止光纤段的功率谱基本稳定,变化很小,满足测量应变变化的前提条件,这得益于锁相控制光扫频的频率误差小且稳定性高的优点。在 5 m 附近的光移相器位置上,扫频周期内的功率谱和相位谱存在明显的相对变化,这体现了光纤应变的变化。

图 12(a)为应变随时间和距离变化的色温图,进一步表示了光纤应变段的周期性变化特性。图 12(b)为选取的 5.05 m 和 5.1 m 位置的应变随时间的变化曲线。

上述结果表明,采用本文的锁相控制激光扫频方法,利用后向瑞利散射信号的相位信息,初步实现了空间分辨率为 5 cm 的分布式光纤应变传感。研究中也发现,有限的扫频范围和残余的频率误差使信号中尚有明显的相干衰落噪声,导致空间位置间的相位关系不够稳定。此外,扫频周期内(如 1 m 位置附近)还存在相位误差,该问题可能源于激光扫频周期内的相对稳定性以及光纤链路的稳定性不足。这些问题均对系统的测量精度造成影响,该问题的解决有待于进一步提升激光扫频的范围和速度,并进一步抑制扫频中的相频噪声和非线性误差。

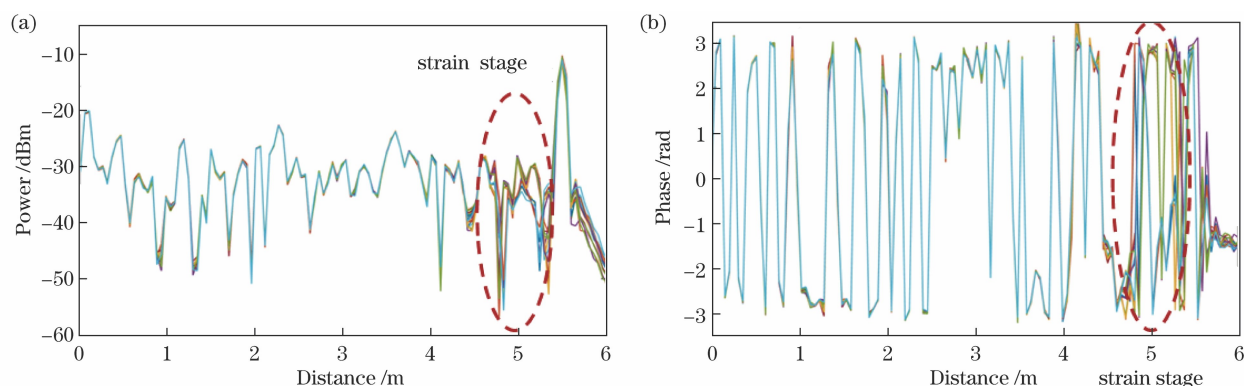


图 11 加权平均后的信号。(a)功率谱;(b)相位谱

Fig. 11 Weighted average signal. (a) Power spectrum; (b) phase spectrum

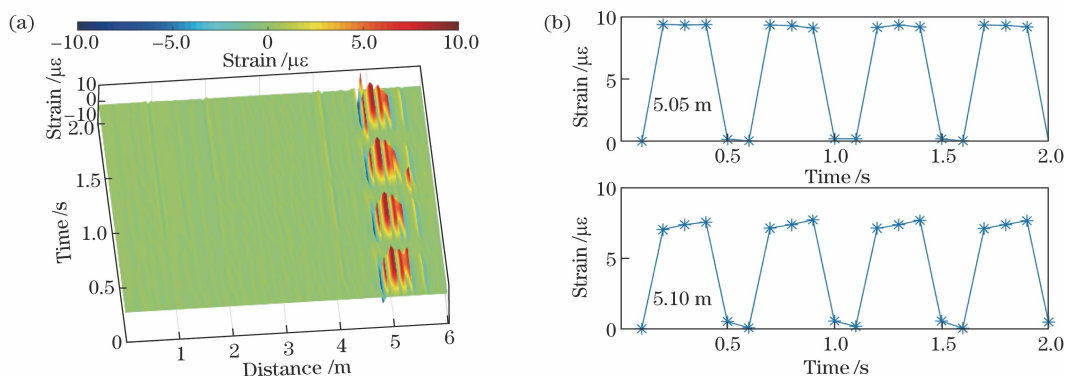


图 12 应变随时间和距离变化的色温图和应变在特定位置随时间的变化曲线。(a)应变随时间和距离变化的色温图;(b)应变在特定位置随时间的变化曲线

Fig. 12 Color temperature diagram of strain varying with time and distance, and curve of strain varying with time at specific position. (a) Color temperature diagram of strain varying with time and distance; (b) curve of strain varying with time at specific position

## 4 结 论

激光扫频的相频噪声和非线性误差是 OFDR 测量技术的关键问题,采用延迟自外差光锁相技术,有效控制了激光扫频中的频率误差,生成了扫频范围为 8 GHz、扫频速度为 160 GHz/s、频率标准偏差约为  $2 \times 10^{-7}$  的扫频激光。基于该扫频光源,进行了长距离光纤链路损耗测量以及分布式光纤应变传感实验。实验结果表明,光纤损耗测量的动态范围为 27 dB、损耗测量精度为 0.5 dB,在 10 km 范围内 2.8 cm 的最高空间分辨率测量,在 240 km 处的空间分辨率达到 4.3 cm。分布式应变传感的空间分辨率达到 5 cm。实验验证了这一激光扫频技术在光纤链路损耗测量以及分布式光纤应变传感方面的有效性和优越性。在面向分布式光纤应变传感应用时,激光扫频的范围和速度有待进一步提升,扫频中的相频噪声和非线性误差有待进一步抑制。

## 参 考 文 献

- [1] Zheng J. Optical frequency-modulated continuous-wave interferometers[J]. Applied Optics, 2005, 45 (12): 2723-2730.
- [2] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency-domain reflectometry in single-mode fibers[J]. Optical Fiber Communication Conference 1981, April 27-29, 1981, San Francisco, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 1981: WF3.
- [3] von der Weid J P, Passy R, Mussi G, et al. On the characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometry [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15 (7): 1131-1141.
- [4] Soller B J, Gifford D K, Wolfe M S, et al. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies [J]. Optics Express, 2005, 13(2): 666-674.
- [5] Jing L Q, Zheng G, Zhang X X, et al. Nonlinear correction of frequency-modulated continuous wave interferometric laser sources[J]. Acta Optica Sinica,



- 2019, 39(11): 1114001.
- 井李强, 郑刚, 张雄星, 等. 一种调频连续波干涉激光光源非线性校正方法[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1114001.
- [6] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [7] Zhao S Y, Cui J W, Suo L J, et al. Performance investigation of OFDR sensing system with a wide strain measurement range[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(15): 3721-3727.
- [8] Gifford D K, Froggatt M E, Sang A K, et al. Multiple fiber loop strain rosettes in a single fiber using high resolution distributed sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 55-63.
- [9] Iiyama K, Wang L T, Hayashi K I. Linearizing optical frequency-sweep of a laser diode for FMCW reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(2): 173-178.
- [10] Xie W L, Dong Y, Zhou Q, et al. Phase noise analysis of optical frequency domain reflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706003.  
谢玮霖, 董毅, 周潜, 等. 光频域反射技术中激光相位噪声影响分析[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0706003.
- [11] Venkatesh S, Sorin W V. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(10): 1694-1700.
- [12] Zhou D P, Qin Z G, Li W H, et al. Distributed vibration sensing with time-resolved optical frequency-domain reflectometry[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13138-13145.
- [13] Ahn T J, Lee J Y, Kim D Y. Suppression of nonlinear frequency sweep in an optical frequency-domain reflectometer by use of Hilbert transformation[J]. Applied Optics, 2005, 44(35): 7630-7634.
- [14] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G, et al. Compensation of laser frequency tuning nonlinearity of a long range OFDR using des skew filter[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3826-3834.
- [15] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G, et al. Long measurement range OFDR beyond laser coherence length[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(2): 202-205.
- [16] Jiang J L, Wang Z N, Wang Z T, et al. Continuous chirped-wave phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. Optics Letters, 2021, 46(3): 685-688.
- [17] Steinberg I, Shiloh L, Gabai H, et al. Over 100 km long ultra-sensitive dynamic sensing via Gated-OFDR[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9634: 96341B.
- [18] Liu Q W, Fan X Y, He Z Y. Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25988-25995.
- [19] Li H, Liu Q W, Chen D, et al. High-spatial-resolution fiber-optic distributed acoustic sensor based on  $\Phi$ -OFDR with enhanced crosstalk suppression[J]. Optics Letters, 2020, 45(2): 563-566.
- [20] Crozatier V, Gorju G, Bretenaker F, et al. Phase locking of a frequency agile laser[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(26): 261115.
- [21] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback[J]. Optics Express, 2009, 17(18): 15991-15999.
- [22] Xie W L, Zhou Q, Bretenaker F, et al. Fourier transform-limited optical frequency-modulated continuous-wave interferometry over several tens of laser coherence lengths[J]. Optics Letters, 2016, 41(13): 2962-2965.
- [23] Qin J, Zhang L, Xie W L, et al. Ultra-long range optical frequency domain reflectometry using a coherence-enhanced highly linear frequency-swept fiber laser source[J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19359-19368.
- [24] Feng Y X, Xie W L, Meng Y X, et al. High-performance optical frequency-domain reflectometry based on high-order optical phase-locking-assisted chirp optimization[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(22): 6227-6236.
- [25] Eyal A, Gabai H, Shpatz I. Distributed acoustic sensing: how to make the best out of the Rayleigh-backscattered energy? [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103230I.
- [26] Gabai H, Eyal A. On the sensitivity of distributed acoustic sensing[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5648-5651.
- [27] Dong Y K, Chen X, Liu E H, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7810-7815.