

激光器频率漂移对相位敏感光时域反射计 扰动定位精度的影响

李 勤 张春熹 李立京 钟 翔 李传生

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 基于多波干涉原理,建立了基于相位敏感光时域反射计(OTDR)的光纤分布式扰动传感器(FDDS)光路系统数学模型,研究了激光器频率漂移对相位敏感 OTDR 定位精度的影响机理。仿真结果表明:激光器的频率漂移是导致传感器定位精度和信噪比降低的关键因素,当激光器的频率漂移分别高于 25 MHz/min 和 30 MHz/min 时,依据移动平均和有扰动减无扰动定位方法以及移动平均和移动差分算法得到的传感器信噪比低于 2 dB,定位算法失效。采用频率漂移速率分别为 3 MHz/min 和 190 MHz/min 的激光器进行实验,实验结果表明:频率漂移速率为 3 MHz/min 的激光器通过所述的两种定位方法得到的定位误差均为 100 m;频率漂移速率为 190 MHz/min 的激光器无法实现扰动的定位。研究结论为激光器的选型以及提高传感器的定位精度提供了理论指导。

关键词 光纤光学;传感器;频率漂移;相干瑞利散射;光纤分布式扰动传感器;入侵检测;相位敏感光时域反射计
中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0305003

Influences of the Frequency Drift of the Laser on Location Precision of the Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry

Li Qin Zhang Chunxi Li Lijing Zhong Xiang Li Chuansheng

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Mathematic models of the fiber-optic distributed disturbance sensor (FDDS) based on the phase-sensitive optical time-domain reflectometry (OTDR) are established and the influences of the frequency drift of the laser on the sensor are simulated and experimented based on multiple-wave theory. The simulation results demonstrate that the frequency drift of the laser is a critical factor that results in the reduction of the positional accuracy of sensor and the signal-to-noise ratio (SNR). The SNR is less than 2 dB by moving averaging and subtraction of the traces with disturbances from traces without disturbances and by moving averaging and moving differential method when the frequency drifts of the laser are larger than 25 MHz/min and 30 MHz/min, respectively. It means that the two location methods fail to locate the disturbance. Experiments are made with lasers with frequency drifts of 3 MHz/min and 19 MHz/min, respectively. The experimental results show that the location errors with the two location techniques are both 100 m when the laser with a frequency drift of 3 MHz/min is utilized. In contrast, it fails to locate the disturbance when the frequency drift of the laser is 190 MHz/min. The investigation results are helpful to select the laser source and improve the location precision of the sensor.

Key words fiber optics; sensors; frequency drift; coherent Rayleigh scattering; fiber-optic distributed disturbance sensor; intrusion detection; phase-sensitive optical time-domain reflectometry

OCIS codes 060.2370; 280.4788; 280.1350; 290.5870

收稿日期: 2013-08-05; 收到修改稿日期: 2013-10-23

作者简介: 李 勤(1983—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术、测控技术与方法、智能仪器与虚拟仪器技术等方面的研究。E-mail: liqin_buaa@163.com

导师简介: 张春熹(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤陀螺、惯性导航与组合导航、光学传感与测量技术、先进光学仪器等方面的研究。E-mail: zhangchunxi@buaa.edu.cn

1 引 言

光纤分布式扰动传感器(FDDS)能够对传感光纤上任意一点的扰动进行探测和定位,具有灵敏度高、本质安全、电绝缘性、抗电磁干扰、耐腐蚀以及传感光纤全范围监测等优势^[1-5],已成为光纤安防领域的研究热点。本文研究了一种基于相位敏感光时域反射计(OTDR)的光纤分布式扰动传感器,它在周界安防、油气管线预警、通信线路监测以及结构监测等领域具有广泛的应用。

基于相位敏感 OTDR 的光纤分布式扰动传感器^[6-8],采用窄线宽激光器来产生传感光纤中后向瑞利散射光波的干涉。在脉冲宽度范围内不同散射光波的相干作用导致探测到的后向瑞利散射波形具有类似散斑的形状^[9],通过检测扰动引起后向瑞利散射波形的变化可以实现扰动的定位。Lee 等^[10-13]在 1993 年首次提出了相位敏感 OTDR 系统,它采用有扰动与无扰动波形相减来定位出扰动的位置。将该系统应用相干检测技术,通过移动平均算法^[14-15]来降低随机噪声,并采用移动差分算法定位扰动。目前已有的研究主要集中在对相位敏感 OTDR 的定位机理^[12,16]以及光纤折射率、激光频

率、脉冲宽度和光纤损耗系数对瑞利散射波形的影响^[17],但关于激光器频率漂移对 FDDS 定位精度的影响机理的研究还少有报道。在实际应用中,低频漂移是很重要的,因为对激光器的频率调制会引起后向瑞利散射相干曲线发生波动^[10-14]并严重影响传感器的性能。

本文针对激光器频率漂移对散射光波的干涉结果的作用,建立了基于相位敏感 OTDR 的 FDDS 的光路数学模型。深入研究了激光器频率漂移对传感器定位精度的影响,为激光器的选型和改善定位性能提供了理论指导。

2 传感机理

如图 1 所示,高相干激光器发出的连续光经过声光调制器(AOM)产生了光脉冲,再通过环形器注入到传感光纤中,并通过光电探测器(PD)监测光纤中的后向散射光信号。当扰动作用在传感光纤上时,由于弹光效应,光纤上相应位置的折射率将发生变化,并导致光波的相位被调制。由于干涉作用,相位的变化将导致后向散射相干光强的变化。光强变化的时刻与扰动的位置相对应。

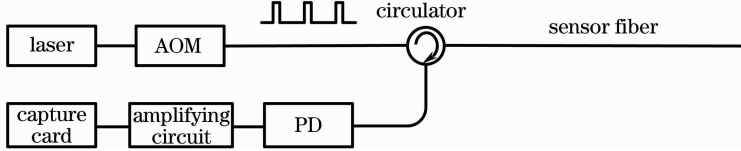


图 1 基于相位敏感 OTDR 的 FDDS 的原理图

Fig.1 Schematic illustration of the FDDS based on phase-sensitive OTDR

在单模光纤中,忽略二重以上的后向瑞利散射,将光纤中的后向瑞利散射看成一维脉冲响应模型。设频率为 ω_s ,脉宽为 W 的相干光波在 $t=0$ 时刻注入到传感光纤中,不考虑偏振态的影响,可得到无扰动条件下后向瑞利散射的波函数^[9]为

$$y(t) = \sum_{k=1}^N E_s(t - \tau_k) \cdot a(\tau_k) \cdot \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_k}{n}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \tau_k}{W}\right), \quad (1)$$

式中 t 表示时间, $E_s(t)$ 表示输入光信号的波函数,

W 表示调制脉冲宽度, α 是光纤衰减常数, c 是真空中光速, n 是光纤的折射率, N 是散射体的总数, τ_k 和 $a(\tau_k)$ 分别是第 k 个散射体的时间延迟和幅值因子。第 k 个散射体距离传感光纤输入端的距离为 $z_k = c\tau_k/(2n)$ 。 $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形函数,它可以描述为

$$\text{rect}\left(\frac{t}{W}\right) = \begin{cases} 1, & \text{while } 0 \leq \frac{t}{W} \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

则后向瑞利散射光波的功率为

$$p(t) = \langle |y(t)|^2 \rangle = p_1(t) + p_2(t) = \sum_{i=1}^N I a^2(\tau_i) \exp\left(-2\alpha \frac{c\tau_i}{n}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{W}\right) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N I a(\tau_i) a(\tau_j) \exp\left[-\alpha \frac{c(\tau_i + \tau_j)}{n}\right] \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j}{W}\right) \cos[(\omega_s + \omega_A + \alpha_f t)(\tau_j - \tau_i)], \quad (3)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均, $I = |E_s(t)|^2$ 是输入光波的功率, ω_A 是 AOM 引入的频移, α_f 为激光器的频率漂移, 认为其随时间线性变化。其中, $p_1(t)$ 表示光纤上每一个独立散射体的后向散射光功率之和, 提供常规的 OTDR 波形; $p_2(t)$ 表示同一脉冲中不同

散射体之间的后向瑞利散射光波的干涉结果, 具有锯齿状波形。

假设散射体沿传感光纤均匀分布, 令第 k 个散射体幅值因子为 $a(\tau_k) = (\alpha_s S)^{1/2}$, 可得

$$p(t) = \sum_{i=1}^N I \alpha_s S \exp\left(-2\alpha \frac{c\tau_i}{n}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{W}\right) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N I \alpha_s S \exp\left[-\alpha \frac{c(\tau_i+\tau_j)}{n}\right] \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_j}{W}\right) \cos[(\omega_s + \omega_A + \alpha_f t)(\tau_j - \tau_i)], \quad (4)$$

式中 α_s 是瑞利散射导致的损耗系数, $S = 1.5 \times 10^{-3}$ 是瑞利散射的捕捉因子。通常在单模光纤中, 可以近似认为衰减主要由散射导致, 故 $\alpha_s \approx \alpha = 0.25$ dB/km。

当扰动发生时, 从扰动位置到传感光纤末端的光波相位经历了一个往返的相位调制, 此时后向散射信号的波函数可以表示为

$$y'(t) = \sum_{k=1}^M E_s(t - \tau_k) a(\tau_k) \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_k}{n}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_k}{W}\right) + \sum_{k=M+1}^N E_s(t - \tau_k) a(\tau_k) \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_k}{n}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_k}{W}\right) \cdot \exp\left\{j\left[f\left(t - \tau_k + \frac{n z_d}{c}\right) + f\left(t - \frac{n z_d}{c}\right)\right]\right\}, \quad (5)$$

式中第一项和第二项分别为扰动位置前、后各后向瑞利散射波的波函数, 其中 M 表示在扰动位置之前散射体的个数, z_d 表示扰动发生的位置, $f(t)$ 表示扰动引入的相位变化。此时, 后向散射光的光功率可以表示为

$$p'(t) = \langle |y'(t)|^2 \rangle = \sum_{i=1}^N I \alpha_s S \exp\left(-2\alpha \frac{c\tau_i}{n}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{W}\right) + 2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M I \alpha_s S \exp\left[-\alpha \frac{c(\tau_i+\tau_j)}{n}\right] \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_j}{W}\right) \cos[(\omega_s + \omega_A + \alpha_f t)(\tau_j - \tau_i)] + 2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=M+1}^N I \alpha_s S \exp\left[-\alpha \frac{c(\tau_i+\tau_j)}{n}\right] \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_j}{W}\right) \cdot \cos\left[(\omega_s + \omega_A + \alpha_f t)(\tau_j - \tau_i) - f\left(t - \tau_j + \frac{n z_d}{c}\right) - f\left(t - \frac{n z_d}{c}\right)\right] + 2 \sum_{i=M+1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N I \alpha_s S \exp\left[-\alpha \frac{c(\tau_i+\tau_j)}{n}\right] \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_j}{W}\right) \cdot \cos\left[(\omega_s + \omega_A + \alpha_f t)(\tau_j - \tau_i) + f\left(t - \tau_i + \frac{n z_d}{c}\right) - f\left(t - \tau_j + \frac{n z_d}{c}\right)\right]. \quad (6)$$

(4)式和(6)式分别为一个光脉冲周期内传感器没有扰动发生和有扰动发生时的光路系统数学模型。下面分别对采用移动平均^[14-15]和有扰动减无扰动^[10-13]算法以及移动平均和移动差分^[14-15]算法时传感器的定位精度进行分析。其中, 移动平均方法的目的是采用更多的相似曲线做平均来降低原始数据中包含的随机噪声。

首先分析采用移动平均和有扰动减无扰动算法时传感器定位精度与激光器频率漂移的关系。设脉冲周期为 T , 采集到 Q 个周期扰动发生条件下的散射信号, 可以表示为

$$r_i = p'[t + (i-1)T], \quad i \in [1, Q], \quad (7)$$

式中 r_i 为有扰动时第 i 个周期的散射信号。设移动平均次数为 P , 平均后的数据为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_A\}$, 其中 $A = Q - P + 1$, 且有

$$R_j = \frac{1}{P} \sum_{i=j}^{i=j+P-1} r_i,$$

$$i \in [1, Q], \quad j \in [1, Q - P + 1]. \quad (8)$$

以无扰动时的散射信号 $p(t)$ 作为参考信号, 则采用移动平均和有扰动减无扰动算法时传感器的定位误差为

$$L_{el} = \text{abs}\{\text{find}\{\max[R_j - p(t)]\} - z_d\}, \quad (9)$$

式中 $\text{abs}(\cdot)$ 表示求取函数的绝对值, $\text{find}(\cdot)$ 表示求取函数对应的位置信息, $\max(\cdot)$ 表示求取函数的最

大值。通过所述有扰动与无扰动的散射曲线相减,在扰动发生的位置将出现明显的峰值。(9)式即为采用移动平均和有扰动减无扰动算法时,激光器频率漂移与传感器定位精度之间关系的数学模型。在实际应用中,通常选取多个定位误差的最大值,即最大定位误差 $\max(L_{e1})$ 作为评价系统定位精度的指标。

下面分析采用移动平均和移动差分算法时传感器定位精度与激光器频率漂移的关系。所选取的参考信号 $R_r = R_{\text{int}(j/2P) \times P+1}$, 则移动差分运算后可得

$$\Delta R = \{\Delta R_1, \Delta R_2, \dots, \Delta R_l, \dots, \Delta R_j\}, \quad (10)$$

式中 $\text{int}(\cdot)$ 表示向下取整函数, $\Delta R_l = R_l - R_r$, $J = Q - P$ 。画出移动差分曲线的叠加图可以看出扰动发生的位置。因此,采用移动平均和移动差分算法时传感器的定位误差为

$$L_{e2} = \text{abs}\{\text{find}[\max(\Delta R_l)] - z_d\}, \quad (11)$$

(11)式即为采用移动平均和移动差分算法时,激光器频率漂移与传感器定位精度之间关系的数学模型。同样,选取最大定位误差 $\max(L_{e2})$ 作为评价系统定位精度的指标。

定义传感器经过定位算法处理后的信噪比 (SNR, R_{SN}) 为波形图中扰动区域的幅值的绝对值与其他区域幅值的绝对值的平均值的比值^[18], 即

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \left(\frac{A_s}{A_n} \right), \quad (12)$$

式中 A_s 为扰动区域的幅值绝对值, A_n 为其他区域的幅值绝对值的平均值。把信噪比大于 2 dB 的信号定义为可探测的信号^[14-15]。将(8)式代入(12)式中,可得采用移动平均和有扰动减无扰动算法时的传感器的信噪比为

$$R_{\text{SN1}} = 10 \lg \left\{ \frac{\max[R_j - p(t)]}{\{\text{sum}[R_j - p(t)] - \max[R_j - p(t)]\} / (A - 1)} \right\}, \quad (13)$$

式中 $\text{sum}(\cdot)$ 表示求取函数各项的累加值。在实际应用中,通常选取多个曲线信噪比的平均值作为评价系统信噪比的指标。将(10)式代入(12)式中,可得采用移动平均和移动差分算法时的传感器的信噪比为

$$R_{\text{SN2}} = 10 \lg \left\{ \frac{\max(\Delta R_l)}{[\text{sum}(\Delta R_l) - \max(\Delta R_l)] / (J - 1)} \right\}. \quad (14)$$

忽略其他干扰源,当激光器频率漂移为零时, $p(t) = p[t + (i-1)T]$, 其中 $i \in [1, Q]$ 。此时,后向散射相干曲线很稳定,通过以上所述的两种定位方法可以很容易获得扰动的位置信息。当激光器频率漂移不为零时,它将在后向散射光波的干涉结果中引入额外的相位。此时, $p(t) \neq p[t + (i-1)T]$, 后向散射干涉曲线发生波动,经过定位算法处理后形成了“假扰动”。同理,在有扰动的后向散射干涉信号中,相对于参考信号,激光器频率漂移也会使后向散射干涉曲线发生波动,导致传感器信噪比恶化、定位精度降低。当激光器的频率漂移高于某一值时,依据以上所述的两种定位方法将无法定位出扰动的位置,此时定位算法失效。

3 仿真研究

分别假设激光器的频率漂移速率 α_f 为 3 MHz/min 和 30 MHz/min, 根据后向散射功率以及上述的两种定位算法仿真研究激光器频率漂移对系统定位精度的影响。仿真参数如下: 光源波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 脉冲宽度 $W = 1 \mu\text{s}$, AOM 的频移 $\omega_A = 200 \text{ MHz}$, 监测距离 $L = 9 \text{ km}$, 扰动位置 $z_d = 7 \text{ km}$,

扰动函数为 $f(t) = A \cos(2\pi f_d t + \varphi)$, 其中 $A = 2\pi \text{ rad}$, $f_d = 500 \text{ Hz}$, $\varphi = \pi/2 \text{ rad}$ 。

图 2 为 10 个曲线叠加的后向散射信号相干波形, 相邻曲线的间隔为 10 个周期。图 2(a) 为激光器频率漂移速率为 3 MHz/min 的散射相干波形; 图 2(b) 为激光器频率漂移速率为 30 MHz/min 的散射相干波形。图 2 中的插图是有扰动的波形与无扰动的波形相减的结果。从图中可以看出, 激光器的频率漂移会导致后向散射相干曲线发生波动, 从而掩盖扰动引起的曲线的局部变化并导致传感器的信噪比恶化。因此, 激光器的频率漂移是引起定位误差甚至无法定位的一个关键因素。当频率漂移速率达到 30 MHz/min 时, 将无法分辨出扰动的位置。由于频率漂移导致散射相干曲线在有扰动时的波形与参考波形(无扰动时的曲线)相比上下波动, 因此, 在图 2 的插图中, 有扰动减无扰动的光功率波形正负相异。图 3 和图 4 分别为采用移动平均和有扰动减无扰动算法以及移动平均和移动差分算法时, 系统信噪比与频率漂移的关系曲线, 其中, 移动平均次数为 100 次, 其目的是为了降低随机噪声, 提高信噪比^[14-15]。可以看出: 传感器的信噪比随着激

光器频率漂移速率的增加而减小。当激光器的频率漂移速率大于 25 MHz/min 时,采用移动平均和有扰动减无扰动算法时信噪比低于 2 dB,此时该算法失效;当激光器的频率漂移速率大于 30 MHz/min 时,采用移动平均和移动差分算法时信噪比低于 2 dB,此时该算法失效。图 5 和图 6 分别为采用移动平均和有扰动减无扰动算法以及移动平均和移动差分算法时,传感器最大定位误差与频率漂移的关系曲线,其中,移动平均次数为 100 次。可以看出:

当频率漂移引起信噪比过低时,不但会产生很大的定位误差,而且会导致定位算法失效。当激光器的频率漂移大于 25 MHz/min 时,采用移动平均和有扰动减无扰动算法时最大定位误差高于 500 m,此时传感器无法有效定位;当激光器的频率漂移大于 30 MHz/min 时,采用移动平均和移动差分算法时最大定位误差高于 600 m,此时传感器无法有效定位。这与传感器信噪比和频率漂移的仿真结果得到的结论基本一致。

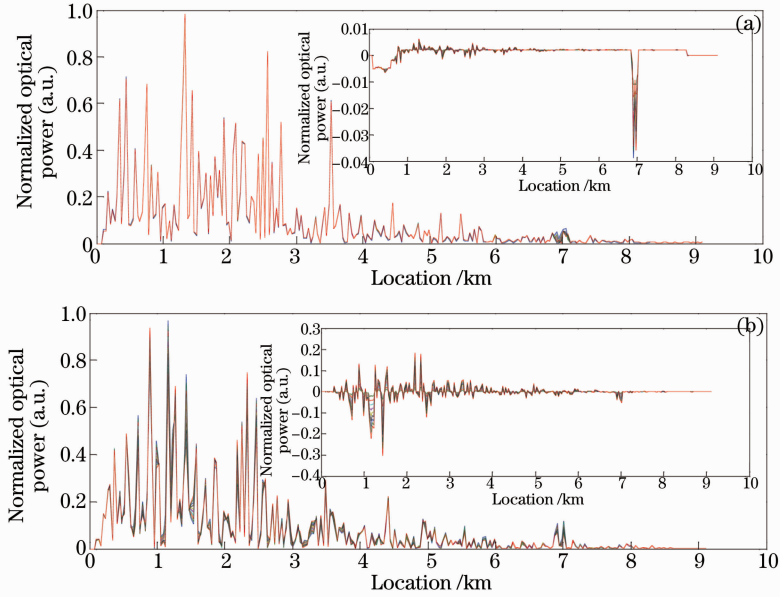


图 2 不同频率漂移下后向瑞利散射干涉光强。(a) $\alpha_f = 3$ MHz/min; (b) $\alpha_f = 30$ MHz/min

Fig. 2 Backscattered Rayleigh signal interference light intensity at different frequency drifts.

(a) $\alpha_f = 3$ MHz/min; (b) $\alpha_f = 30$ MHz/min

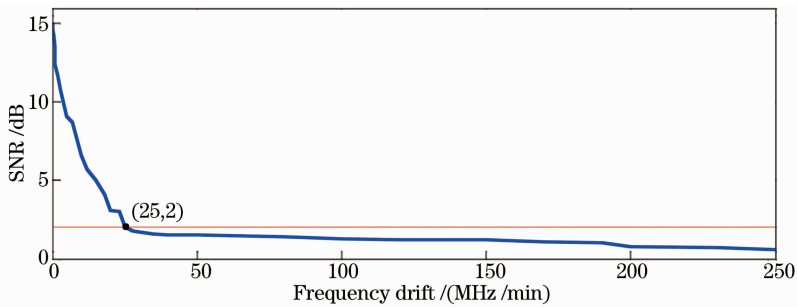


图 3 采用移动平均和有扰动减无扰动算法时信噪比与频率漂移的关系

Fig. 3 Simulated relationship between SNR and frequency drift using moving averaging and subtraction of the traces with disturbances from traces without disturbances

4 实验与讨论

为了验证理论分析和数值仿真结论的正确性,通过基于相位敏感 OTDR 的 FDDS 样机进行了验证实验。激光器频率漂移的测试装置是一个臂长差为 100 m 的马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪,如图 7 所

示, C_1, C_2 表示环形器;PD 表示光电探测器。M-Z 干涉仪做隔热隔振处理,认为 M-Z 干涉仪的干涉条纹是由激光器的频率漂移引起的^[11]。通过观察 M-Z 干涉仪的干涉条纹来估算激光器的频率漂移。当激光器的频率漂移为 $\Delta\nu$ 时,所引起的相移为 $\Delta\varphi =$

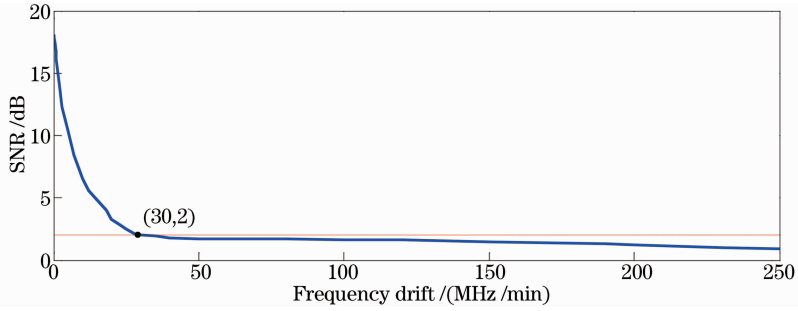


图 4 采用移动平均和移动差分算法时信噪比与频率漂移的关系

Fig. 4 Simulated relationship between SNR and frequency drift using moving averaging and moving differential method

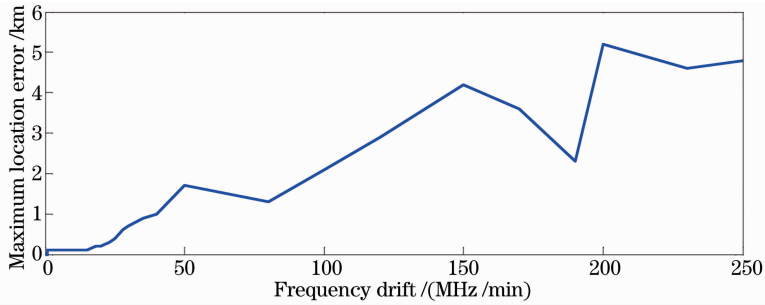


图 5 采用移动平均和有扰动减无扰动算法时最大定位误差与频率漂移的关系

Fig. 5 Simulated relationship between maximum location error and frequency drift using moving averaging and subtraction of the traces with disturbances from traces without disturbances

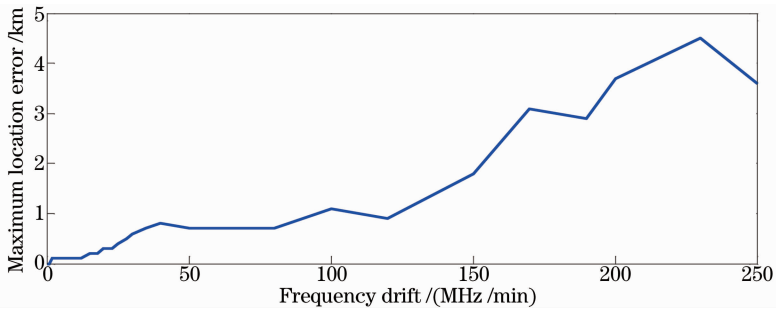


图 6 采用移动平均和移动差分算法时最大定位误差与频率漂移的关系

Fig. 6 Simulated relationship between maximum location error and frequency drift using moving averaging and moving differential method

$2\pi\Delta\nu\tau$ 。其中, $\tau = n\Delta L/c$ 是干涉仪臂长差 ΔL 所引起的时间差。当臂长差 ΔL 为 100 m 时, 时间差 τ 约为 $0.5 \mu\text{s}$ 。据此, 可以通过观察干涉结果的相移来反解出激光器的频率漂移。假设激光器的频率漂移线性变化, 则可以估算出激光器的频率漂移速率。

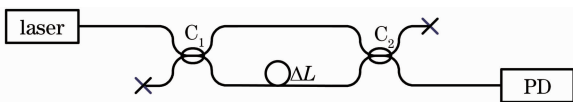


图 7 频率漂移测试装置

Fig. 7 Testing device of measuring the frequency drift of the laser

采用 NP Photonics 公司的 Rock 光纤激光模块

(RFLM) 和 Rock 光纤激光光源 (RFLS) 进行比对实验。其中, 光纤激光模块和光纤激光光源的中心波长均为 1550.0 nm , 最大输出功率分别为 25.50 mW , 线宽分别为 1.5 kHz , 频率漂移速率实测分别为 $190, 3 \text{ MHz/min}$ 。声光调制器引入的频移为 200 MHz , 脉冲频率为 10 kHz , 脉宽为 $1 \mu\text{s}$, 对应的空间分辨率为 100 m 。传感光纤全长 9 km , 在 7 km 位置熔接了一根长 2 m 的跳线。将跳线固定在光纤围栏上, 通过手动连续敲击围栏来施加扰动信号。设定采集卡采样率为 5 kHz , 采集 10 组数据, 每次采集的数据长度为 20 s , 再对得到的 10 个频率漂移速率求取平均值。两个激光器频率漂移的单次测试曲线分别如图 8(a) 和

(b)所示。将采集卡的采样率修改为 2 MHz,进行实验。图 9 和图 10 分别为通过所述两种定位方法得到的定位结果。由于激光器的频漂漂移导致散射相干波形相对于参考波形上下波动,因此,图 9 和图 10 中的光功率波形正负相异。图 9 所示两种方法定位结果中曲线信噪比的平均值分别为 0.72 dB 和 1.16 dB,

此时定位方法失效。图 10 所示两种方法定位结果中曲线信噪比的平均值分别为 9.28 dB 和 8.09 dB,最大定位误差均为 100 m。其中,实验过程中环境噪声会导致传感器信噪比降低。因此,实验与理论分析及数值仿真结果的趋势基本一致,但实验得到的信噪比要小于仿真的结果。

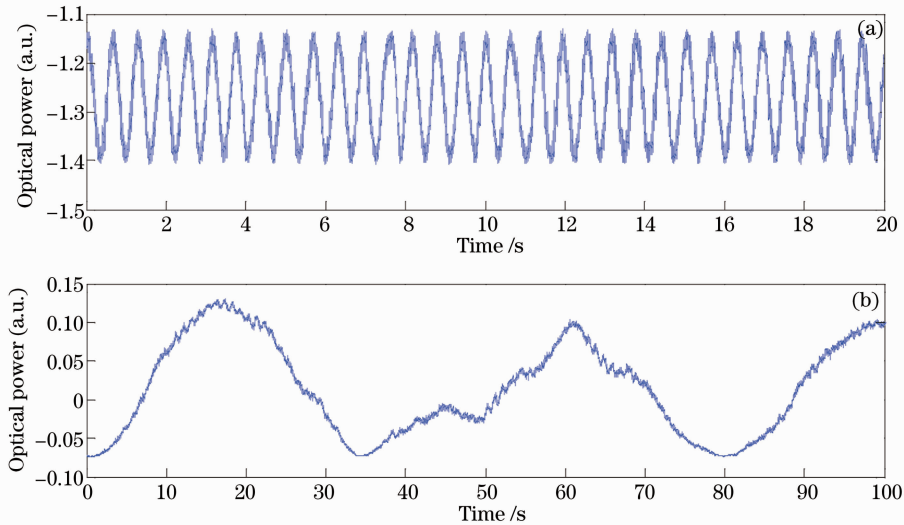


图 8 激光器的频率漂移测试曲线。(a) 光纤激光模块; (b) 光纤激光光源

Fig. 8 Test curves of frequency drift of the lasers. (a) Fiber laser module; (b) fiber laser source

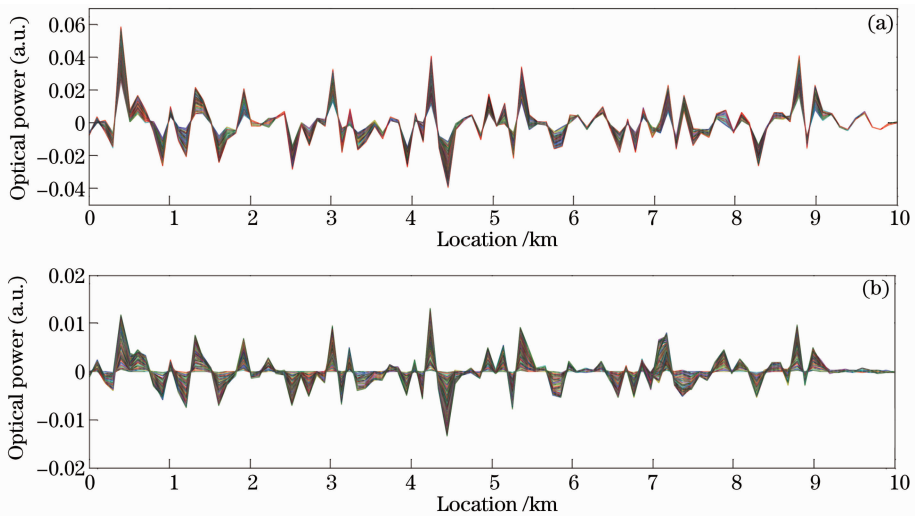


图 9 采用光纤激光模块的 FDDS 的定位结果。(a) 采用移动平均和有扰动减无扰动算法; (b) 采用移动平均和移动差分算法

Fig. 9 Location results of the FDDS using fiber laser module. (a) By moving averaging and subtraction of the traces with disturbances from traces without disturbances; (b) by moving averaging and moving differential method

5 结 论

对基于相位敏感 OTDR 的 FDDS 中激光器频率漂移对系统定位性能的影响进行了理论和实验研究。仿真研究表明激光器的频率漂移是导致定位精度降低甚至定位方法失效的关键因素。当激光器的频率漂移速率约大于 25 MHz/min 时,移动平均和

有扰动减无扰动算法失效;当频率漂移速率约大于 30 MHz/min 时,移动平均和移动差分算法失效。通过实验验证了理论分析和数值仿真结论的正确性。该研究结论可以为激光器的选型以及提高传感器的定位精度提供理论指导。

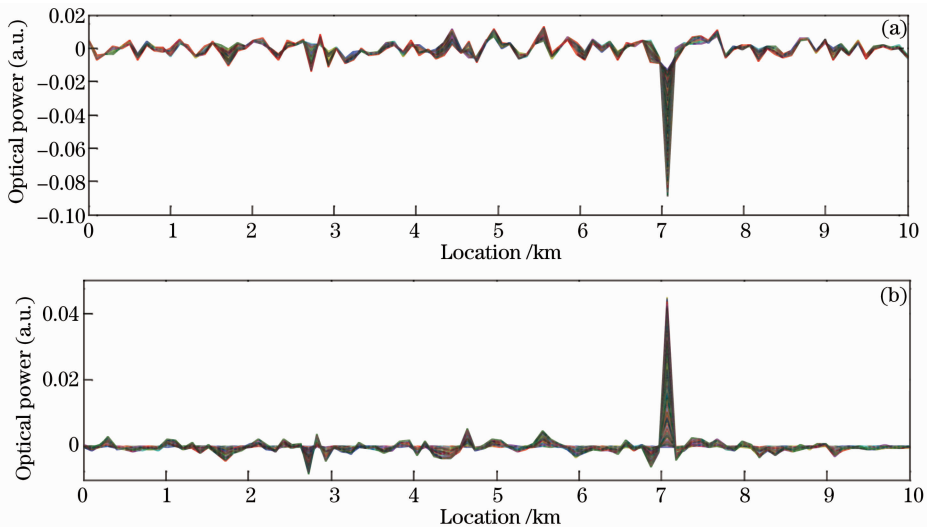


图 10 采用光纤激光光源的 FDDS 的定位结果。(a) 采用移动平均和有扰动减无扰动算法；
(b) 采用移动平均和移动差分算法

Fig. 10 Location results of the FDDS using fiber laser source. (a) By moving averaging and subtraction of the traces with disturbances from traces without disturbances; (b) by moving averaging and moving differential method

参 考 文 献

- 1 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin. A new pipeline leakage detection system based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its location technology[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(6): 820-824.
杭利军, 何存富, 吴斌. 一种新的直线型 Sagnac 光纤干涉仪管道泄漏检测系统及其定位技术[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 820-824.
- 2 Zhang Ying, Chen Jiamei, Li Gang, *et al.*. Location method of distributed fiber-optic perimeter security system based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605005.
张颖, 陈佳妹, 李刚, 等. 马赫-曾德尔分布式光纤周界防范系统定位算法研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605005.
- 3 Peng Jiaobo, Bian Zhenglan, Hao Yunqi, *et al.*. Frequency locking of two DFB lasers for distributed optical fiber sensing applications[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0705001.
彭交波, 卞正兰, 郝蕴琦, 等. 用于布里渊分布式光纤传感的光学锁频系统[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0705001.
- 4 Wang He, Sun Qizhen, Li Xiaolei, *et al.*. Progress in optical fiber interferometer based distributed vibration sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020004.
王贺, 孙琪真, 李晓磊, 等. 干涉型分布式光纤振动传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020004.
- 5 Hu Zhengsong, Yang Qihua, Qiao Bo. Design of interference distributed fiber-optic underwater long gas pipeline leakage detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070602.
胡正松, 杨其华, 乔波. 干涉分布式光纤水下长输气管道泄漏检测系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070602.
- 6 Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based on Rayleigh scattering light ϕ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 569-572.
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 ϕ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 569-572.
- 7 Luo Jun, Rao Yunjiang, Yue Jianfeng, *et al.*. Highly sensitive distributed optical fiber intrusion monitoring system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6): 1123-1128.
罗俊, 饶云江, 岳剑锋, 等. 新型高灵敏分布式光纤入侵监测

- 系统[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1123-1128.
- 8 An Yang, Feng Hao, Zhang Jingchuan, *et al.*. Phase sensitive optical time domain reflectometer based on two-beam interference[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706005.
安阳, 封皓, 张景川, 等. 基于双光束干涉的相位敏感光时域反射计[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706005.
- 9 P Healey. Fading in heterodyne OTDR[J]. Electron Lett, 1984, 20(1): 30-32.
- 10 C E Lee, H F Taylor. Apparatus and Method for Fiber Optic Intrusion Sensing[P]. US Patent, 5, 194, 847, 1993.
- 11 J C Juarez, E W Maier, K N Choi, *et al.*. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(6): 2081-2087.
- 12 K N Choi, J C Juarez, H F Taylor. Distributed fiber-optic pressure/seismic sensor for low-cost monitoring of long perimeters[C]. SPIE, 2003, 5090: 134-141.
- 13 J C Juarez, H F Taylor. Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system[J]. Opt Lett, 2005, 30(24): 3284-3286.
- 14 Y L Lu, T Zhu, L A Chen, *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(22): 3243-3249.
- 15 G Z Qin, T Zhu, A Chen, *et al.*. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR [J]. Photon Technol Lett, 2011, 23(15): 1091-1093.
- 16 J Park, W Lee, H F Taylor. A fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering [C]. SPIE, 1998, 3555: 49-56.
- 17 Lü Yuelan, Xing Yongwei. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0809001.
吕月兰, 邢永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0809001.
- 18 J Park, H F Taylor. Fiber optic intrusion sensor using coherent optical time domain reflectometer[J]. Jpn J App Phys, 2003, 42(6A): 3481-3482.

栏目编辑: 王晓瑛