

doi: 10.3788/gzxb20144305.0506007

# 多点扰动对光纤分布式扰动传感器定位准确度的影响

张春熹, 李勤, 李立京, 李传生, 钟翔

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 基于激光干涉原理, 建立了基于 Mach-Zehnder 干涉仪的光纤分布式扰动传感器多点同时扰动的信号模型. 在此基础上, 通过数值模拟研究了多点同时扰动对传感器定位准确度的影响, 明确了多个扰动信号同时作用时扰动的幅值比和位置差不同情况下传感器的定位准确度. 仿真结果表明: 当多点同时扰动的信号幅度差别大于等于 20 倍时, 可以给出较强扰动的定位信息; 当多点同时扰动的空间距离小于等于 100 m 时, 可以近似看成单点扰动. 在光路中增加偏振分束器来抑制偏振衰落的影响, 并采用信号发生器对实验光路中的两个压电换能器同时施加正弦信号来模拟扰动进行实验. 实验结果表明: 在 5 km 和 10 km 的位置同时施加扰动, 当两个扰动的幅值比大于等于 20 时, 距离较强扰动点的最大定位误差的最大值为 200 m; 在 5 km 和 5.05 km 位置同时施加幅值比为 1 的扰动, 距离 5 km 位置的最大定位误差为 200 m, 验证了仿真结果的正确性. 该研究为多点同时扰动条件下光纤分布式扰动传感器定位准确度的提高和误报率的降低提供了理论指导.

**关键词:** 传感器技术; 多点扰动; 相关方法; 光纤传感器; 马赫-泽德干涉仪; 定位; 入侵检测

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0506007-7

## Effects of Multiple Disturbances on the Location Precision of Fiber-Optic Distributed Disturbance Sensor

ZHANG Chun-xi, LI Qin, LI Li-jing, LI Chuan-sheng, ZHONG Xiang

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

**Abstract:** The mathematic models of the Mach-Zehnder interferometers based fiber-optic distributed disturbance sensor for the multiple disturbances applications were established in accordance with coherent lightwave theory. According to the models, the influences of the multiple disturbances on the location precision of the fiber-optic distributed disturbance sensor were simulated. The relationship concerning the location precision, the amplitude ratio and the distance of the disturbances were presented. The simulation results demonstrate that the stronger disturbance can be located when the amplitude ratio of the multiple disturbances is larger than or equals to 20. The multiple disturbances can be regarded as a disturbance when the distances of the disturbances are less than 100 m. The polarization beam splitters were utilized to eliminate the influence of the polarization induced fading. Then the signal generator produced sine wave, applied to the two piezoelectric transducers simultaneously to simulate the disturbances. The experimental results show that when the amplitude ratio of the two disturbances imposed on the sensing fiber at 5 km and 10 km is larger than or equals to 20, the maximum location error from the strongest disturbance is 200 m. The maximum location error from the 5 km position is 100 m when the amplitude ratio of the two disturbances applied at 5 km and 5.05 km is 1. The numerical simulation results were proved by the experiments and helpful to improve the location precision and

第一作者: 张春熹(1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学传感与测量技术. Email: zhangchuxi@buaa.edu.cn

通讯作者: 李勤(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: liqin\_buaa@163.com

收稿日期: 2013-08-06; 录用日期: 2013-12-05

<http://www.photon.ac.cn>

reduce the false alarm rate for multiple disturbances applications.

**Key words:** Sensors; Multiple disturbances; Correlation methods; Optical fiber sensor; Mach-Zehnder interferometers; Location; Intrusion detection

**OCIS Codes:** 060.2370; 280.4788; 030.1640; 260.3160

## 0 引言

光纤分布式扰动传感器(Fiber-optic Distributed Disturbance Sensor, FDDS)可以实现对传感光缆上任意一点扰动的传感和定位,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,已经成为安防领域的研究热点.本文研究了一种 Mach-Zehnder 干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)型的光纤分布式扰动传感器,它在周界安防<sup>[1-5]</sup>、油气管线预警<sup>[6-9]</sup>、大型结构监测<sup>[10-12]</sup>和通信线路监测等领域具有广泛的应用.

目前,对干涉仪型光纤分布式扰动传感器的研究主要集中于 Mach-Zehnder 干涉仪<sup>[13-17]</sup>和 Sagnac 干涉仪(Sagnac Interferometer, SI)<sup>[18-26]</sup>方案.其中,基于 MZI 的方案凭借光路结构简单、硬件成本低、定位算法易于实现等技术优势在实际应用中更为广泛.根据相关时延算法的检测原理,该传感器只能对传感光缆上某一时刻的单点扰动进行精确定位.在油气管道监测应用中,由于管道泄漏和破坏属于小概率事件,因此,同时(时间间隔在  $\mu\text{s}$  量级)发生多点扰动的情况通常被忽略,单点定位的功能可以被用户广泛接受.但是在周界安防应用中,多点同时扰动时常发生,因此,深入分析和研究多点同时扰动对传感器的定位准确度的影响在实际应用中具有重要意义.

本文建立了 MZI 型 FDDS 两点同时扰动的信号模型,并针对传感器定位准确度与两个扰动信号幅值比和位置差的关系进行了研究.最后,给出了强扰动准确定位情况下的两个扰动的幅值比例关系并得出了多点扰动空间距离与定位误差之间的关系,为改善多点扰动定位的性能提供了理论指导.

## 1 工作原理

图 1 是 MZI 型光纤分布式扰动传感器的原理图.根据相关时延定位方法<sup>[15-17]</sup>,可用于对分布的单点扰

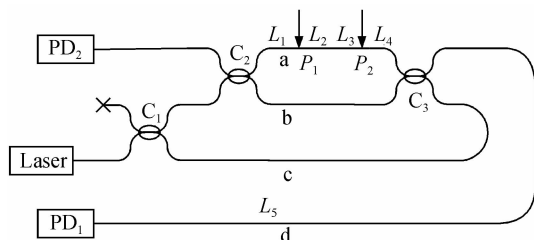


图 1 MZI 型光纤分布式扰动传感器光路  
Fig. 1 Schematic illustration of MZI based FDDS

动进行传感和定位.

激光光源发出的光经过耦合器  $C_1$  分成两束光,其中一部分光沿顺时针方向经过由耦合器  $C_2$ 、 $C_3$  和它们之间的两根传感光纤 a、b 构成的 MZI,在耦合器  $C_3$  处发生干涉再通过传导光纤 d 到达探测器  $PD_1$ ;另一部分光沿逆时针方向经过传导光纤 c 传输后再通过由耦合器  $C_2$ 、 $C_3$  和它们之间的两根传感光纤 a、b 构成的 MZI,在耦合器  $C_2$  处发生干涉并通过探测器  $PD_2$  接收.当扰动作用于传感光纤 a 上的  $P_1$  点时,应力会引起光纤长度和传播常量的变化,从而在传感光纤上产生一个相位差的变化.当光纤长度变化  $\Delta L$ ,传播常量变化  $\Delta\beta$  时,相位差  $\Delta\varphi$  可以表示为<sup>[17]</sup>

$$\Delta\varphi = \beta\Delta L + L\Delta\beta \quad (1)$$

由于单模光纤存在随环境温度和应力变化的双折射,可引起光波偏振态随机变化,所以在  $C_2$  和  $C_3$  处发生干涉的光波的偏振态是随机的.先考虑顺时针方向的干涉仪.假设传感光纤 a 和 b 中是两束方位角和椭圆率角分别为  $\theta_a$ 、 $\theta_b$  和  $\beta_a$ 、 $\beta_b$  的椭圆偏振光, $\theta_a$  和  $\theta_b \in [0, \pi]$ , $\beta_a$  和  $\beta_b \in [-\pi/4, \pi/4]$ ,用琼斯矩阵可以表示为<sup>[27-29]</sup>

$$E_1 = E_a e^{i\varphi_a} \begin{bmatrix} \cos \theta_a \cos \beta_a - j \sin \theta_a \sin \beta_a \\ \sin \theta_a \cos \beta_a + j \cos \theta_a \sin \beta_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E_2 = E_b e^{i\varphi_b} \begin{bmatrix} \cos \theta_b \cos \beta_b - j \sin \theta_b \sin \beta_b \\ \sin \theta_b \cos \beta_b + j \cos \theta_b \sin \beta_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $E_a$  和  $E_b$  分别为两束光波的振幅; $\varphi_a$  和  $\varphi_b$  分别为两束光波的初始相位.当耦合器  $C_2$  的分光比为 1:1 时, $E_a = E_b$ .

当传感光纤受到扰动作用时,顺时针方向传播的干涉光通过  $PD_1$  接收到的信号可以表示为<sup>[27-30]</sup>

$$I_c(t) = e^{-\alpha_0 L_0} \left\{ \frac{1}{2} (E_a^2 + E_b^2) + E_a E_b \alpha \cdot \cos [\varphi_a - \varphi_b + \delta + B f_1(t - \tau_1)] \right\} \quad (4)$$

式中

$$\alpha = [\cos^2(\theta_a - \theta_b) \cos^2(\beta_a - \beta_b) + \sin^2(\beta_a + \beta_b) \cdot \sin^2(\theta_a - \theta_b)]^{1/2} \quad (5)$$

$$\tan \delta = \tan(\theta_a - \theta_b) \frac{\sin(\beta_a + \beta_b)}{\cos(\beta_a - \beta_b)} \quad (6)$$

式中, $\alpha_0$  为光纤衰减系数, $L_0$  为传导光纤的长度, $\delta$  为顺时针方向传播的光波偏振态随机变化引入的附加相位, $B f_1(t - \tau_1)$  为  $P_1$  点扰动引入的相位调制, $B$  为对扰动相位调制灵敏度, $c$  为真空中的光速, $n$  为光纤纤芯折射率,时延  $\tau_1 = n(L_2 + L_5) / c$ , $L_1$ 、 $L_2$  分别是扰动

点  $P_1$  距离  $C_2$ 、 $C_3$  的长度,  $L_5$  为  $C_3$  至  $PD_1$  间传导光纤的长度. 忽略传感光纤和传导光纤的长度差,  $L_5$  可以近似为  $L_1$  和  $L_2$  的长度之和.

同理,逆时针方向传播的干涉光通过  $PD_2$  接收到的信号可以表示为<sup>[27-30]</sup>

$$I_{cc}(t) = e^{-\alpha L_s} \left\{ \frac{1}{2}(E_a^2 + E_b^2) + E_a E_b \alpha' \cdot \cos [\varphi_a - \varphi_b + \delta' + Bf_1(t - \tau_2)] \right\} \quad (7)$$

式中

$$\alpha' = [\cos^2(\theta'_a - \theta'_b) \cos^2(\beta'_a - \beta'_b) + \sin^2(\beta'_a + \beta'_b) \cdot \sin^2(\theta'_a - \theta'_b)]^{1/2} \quad (8)$$

$$\tan \delta' = \tan(\theta'_a - \theta'_b) \frac{\sin(\beta'_a + \beta'_b)}{\cos(\beta'_a - \beta'_b)} \quad (9)$$

式中,  $\theta'_a$ 、 $\theta'_b$  和  $\beta'_a$ 、 $\beta'_b$  分别为逆时针方向传播光波在传感光纤中的方位角和椭率角,  $\delta'$  为逆时针方向传播的光波偏振态随机变化引入的附加相位,  $Bf_1(t - \tau_2)$  为  $P_1$  点扰动引入的相位调制, 时延  $\tau_2 = nL_1/c$ .

从式(4)和(7)可以看出, 传感光纤 a 和 b 中光波偏振态的变化对干涉项有很大的影响: 当  $E_1$  和  $E_2$  电矢量方向相同时, 可见度为 1, 而且没有附加的相位; 当  $E_1$  和  $E_2$  正交时, 可见度为 0, 两束光不发生干涉, 无法检测到扰动信号; 当两束光部分相干时, 可见度在 0 和 1 之间, 所要检测的信号幅值和附加的相位随两光束偏振态发生变化, 能检测到干涉现象, 但是不稳定, 同时附加相位给测量结果引入了误差. 这里所说的幅值波动和附加相位就是偏振诱导衰落 (Polarization Induced Fading, PIF), 它将对系统的定位准确度产生严重影响<sup>[28]</sup>.

特别地, 当可见度为 1 且附加相位为 0 时, 即忽略偏振态随机变化的影响时, 干涉信号可以表示为<sup>[12, 15-17, 30-32]</sup>

$$I_{c0}(t) = \frac{1}{4} I_s e^{-\alpha L_s} \{1 + \cos [\varphi_0 + Bf_1(t - \tau_1)]\} \quad (10)$$

$$I_{cc0}(t) = \frac{1}{4} I_s e^{-\alpha L_s} \{1 + \cos [\varphi_0 + Bf_1(t - \tau_2)]\} \quad (11)$$

式中,  $I_s = 4(E_a^2 + E_b^2)$  为光源输出光强,  $\varphi_0 = \varphi_a - \varphi_b$  是干涉仪的臂长差引起的初相差. 根据式(10)和(11)所示, 干涉信号  $I_{c0}$  和  $I_{cc0}$  为时域相关信号, 存在与扰动位置有关的时延  $\tau_1$  和  $\tau_2$ , 则  $I_c$  和  $I_{cc}$  之间的时延差  $\Delta\tau$  为

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 = \frac{L_2 + L_5 - L_1}{c} n = \frac{L - 2L_1}{c} n \quad (12)$$

式中,  $L = L_1 + L_2 + L_5 = 2L_{total}$ ,  $L_{total}$  为监测距离. 计算  $I_{c0}$  和  $I_{cc0}$  的互相关函数  $R(I_{c0}, I_{cc0})$ , 可得

$$R(I_{c0}, I_{cc0}) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T I_{c0}(t) I_{cc0}(t + \Delta\tau) dt \quad (13)$$

式中,  $2T$  为用于相关运算的信号的时间长度. 根据  $R(I_{c0}, I_{cc0})$  的极值对应的时延可以求得  $\Delta\tau$ , 从而得到

扰动点的位置为

$$L_1 = \frac{L - c\Delta\tau/n}{2} \quad (14)$$

## 2 数值仿真与讨论

当两个扰动同时作用于传感光纤 a 上的  $P_1$  和  $P_2$  点时, 探测器  $PD_1$  和  $PD_2$  接收的来自顺时针和逆时针方向 MZI 的干涉光强  $I'_c$  和  $I'_{cc}$  分别为

$$I'_c(t) = e^{-\alpha L_s} \left\{ \frac{1}{2}(E_a^2 + E_b^2) + E_a E_b \alpha \cos [\varphi_a - \varphi_b + \delta + Bf_1(t - \tau_1) + Bf_2(t - \tau_3)] \right\} \quad (15)$$

$$I'_{cc}(t) = e^{-\alpha L_s} \left\{ \frac{1}{2}(E_a^2 + E_b^2) + E_a E_b \alpha' \cos [\varphi_a - \varphi_b + \delta' + Bf_1(t - \tau_2) + Bf_2(t - \tau_4)] \right\} \quad (16)$$

式中,  $Bf_1(t - \tau_1)$ 、 $Bf_1(t - \tau_2)$  以及  $Bf_2(t - \tau_3)$ 、 $Bf_2(t - \tau_4)$  分别为  $P_1$  点和  $P_2$  点扰动引入的相位调制,  $L_3$ 、 $L_4$  分别是扰动点  $P_2$  距离  $C_2$ 、 $C_3$  的长度, 时延  $\tau_3 = n(L_4 + L_5)/c$  和  $\tau_4 = nL_3/c$ .

当两干涉光束为一般椭圆偏振态时, 以  $\beta_a$  和  $\beta_b$  为自变量, 假设  $\theta = \pi/4$ , 分别计算幅值变化系数  $\alpha$  和附加相位  $\delta$  的大小, 如图 2 和图 3.

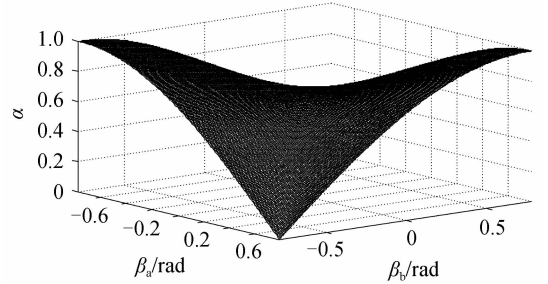


图 2 幅值变化系数与椭率角的关系

Fig. 2 Simulated relationship amplitude coefficient between and ellipticity angle

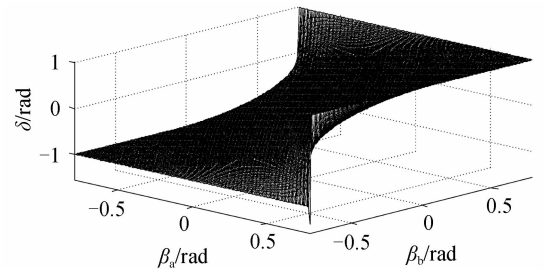


图 3 附加相位与椭率角的关系

Fig. 3 Simulated relationship between additional phase and ellipticity angle

由图 2 和图 3 可以看出, 当  $\beta_a = -\beta_b = \pm\pi/4$  时,  $\alpha$  取得最小值 0. 当  $\beta_a = \beta_b = \pm\pi/4$  时,  $\alpha$  取得最大值 1. 当  $\beta_a = \beta_b = 0$  时, 两光束均为线偏振光, 此时  $\alpha = |\cos(\theta_b - \theta_a)|$ , 并由两光束方位角之间的夹角决定;  $\delta$

随 $\beta_a, \beta_b$ 在 $-\pi/4 \sim \pi/4$ 之间连续变化,其中最大值和最小值的数值由两光束方位角之间的夹角 $\theta$ 决定.当 $\beta_b = -\pi/4$ 或者 $\theta_a = -\pi/4$ 时, $\delta$ 取得最小值 $-\pi/4$ .当 $\beta_b = \pi/4$ 或者 $\theta_a = \pi/4$ 时, $\delta$ 取得最大值 $\pi/4$ .

总之,干涉光束的偏振态变化除了引起干涉项幅值 $A$ 的变化,同时还引起附加相位 $\delta$ 的变化.干涉项幅值 $A$ 的变化表现为干涉输出的可见度变化,干涉项幅值的减小可导致干涉项输出的信噪比降低甚至导致干涉项为零;附加相位 $\delta$ 的变化表现为干涉输出的相位发生变化,导致从干涉输出中解调得到的相位差与干涉光束之间原始的相位差不再相等,即会引入 $\delta - \delta'$ 的误差从而导致定位准确度降低.

特别地,当可见度为1且附加相位为0时,即忽略偏振衰落的影响时,干涉信号可以表示为

$$I'_{c_0}(t) = \frac{1}{4} I_s e^{-\alpha L_0} \{1 + \cos[\varphi_0 + Bf_1(t - \tau_1) + Bf_2(t - \tau_3)]\} \quad (17)$$

$$I'_{cc_0}(t) = \frac{1}{4} I_s e^{-\alpha L_0} \{1 + \cos[\varphi_0 + Bf_1(t - \tau_2) + Bf_2(t - \tau_4)]\} \quad (18)$$

对干涉信号 $I'_{c_0}$ 和 $I'_{cc_0}$ 的时域波形进行数值仿真,主要仿真参量如下:激光器输出光强 $I_s = 10$  mW,初相差 $\varphi_0 = \pi/4, \alpha_0 = 0.25$  dB/km,  $L_1 = 5$  km,  $L_3 = 10$  km,  $L_0 = L_5 = 20$  km,  $B = 10$ , 扰动信号 $f_1(t) = \cos(1000\pi t), f_2(t) = \cos(2000\pi t)$ ,采样时间 $T_s = 0.5$   $\mu$ s. 两点同时扰动引起的干涉信号的时域图如图4.

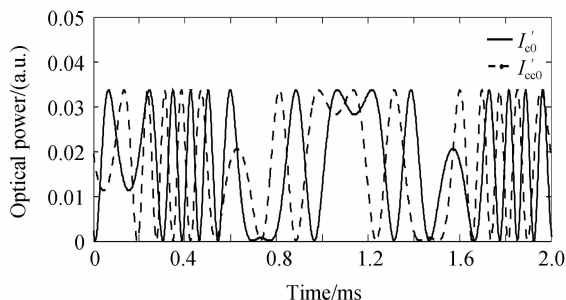


图4 两点同时扰动信号仿真时域图

Fig. 4 Simulated interference signal with two disturbances

根据相关时延算法对仿真信号 $I'_{c_0}$ 和 $I'_{cc_0}$ 进行定位,可得到扰动位置距离 $C_2$ 为4.4 km.此时,无法定位出两个扰动的位置.针对两个同时扰动信号的幅值比和位置差与定位准确度的关系进行仿真分析.其中,两个扰动信号的幅值比决定何种强度条件下弱扰动可以被忽略,两个扰动信号的位置差可以决定多大空间间隔内的两个扰动可以视为单点扰动情况.

忽略偏振衰落的影响,分析传感器定位准确度与扰动信号幅值比的关系.设 $P_1$ 点和 $P_2$ 点距离耦合器 $C_2$ 的位置分别为 $L_1 = 5$  km和 $L_3 = 10$  km,光缆长度分别为 $L_5 = 15$  km, 20 km, 30 km.仿真结果如图5,图中

的定位误差是定位结果相对于 $P_1$ 点的距离.

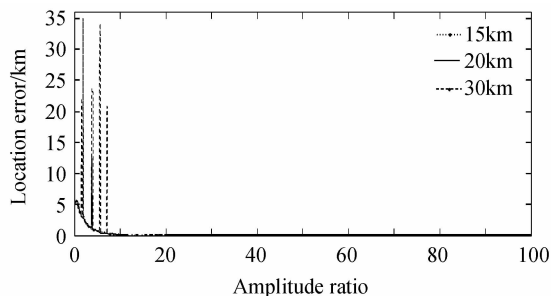


图5 传感器定位准确度与扰动信号幅值比的关系

Fig. 5 Simulated relationship between location precision and amplitude ratio

从图5中可以看出,当 $P_1$ 点和 $P_2$ 点扰动幅值比大于或等于20时,定位误差小于等于100 m.即当同时发生的两点扰动幅值比大于某一数值 $r$ 时,较强扰动点的定位几乎不受较弱扰动点的影响.基于实验数据的分析, $r$ 的值取为20.所采用的定位方法是互相关时延算法,当 $P_1$ 点与 $P_2$ 点的扰动的幅值比等于某些值(1.9、3.8、5.6和7.2)时,两点同时扰动时 $I'_{c_0}$ 和 $I'_{cc_0}$ 在扰动点 $P_1$ 的位置对应的时延差 $\Delta\tau$ 的波形相似性很差,互相关函数的极值点的位置偏离扰动点 $P_1$ 很远.因此,在图5中可以看到定位误差出现了四个大的涨落.

忽略偏振衰落的影响,分析传感器定位准确度与扰动信号位置差的关系.设 $P_1$ 点距离耦合器 $C_2$ 的位置为 $L_1 = 5$  km, $P_1$ 点和 $P_2$ 点扰动幅值比为1,光缆长度分别为 $L_5 = 15$  km, 20 km, 30 km.仿真结果如图6所示.图中的定位误差是定位结果相对于 $P_1$ 点的距离.

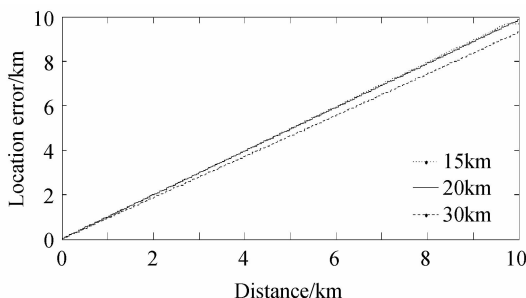


图6 传感器定位准确度与扰动位置差的关系

Fig. 6 Simulated relationship between location precision and distance of the perturbations

从图6中可以看出,定位误差随着 $P_1$ 点和 $P_2$ 点位置差的增大而呈现上升趋势.当 $P_1$ 点和 $P_2$ 点扰动的距离小于等于100 m时,定位误差小于等于100 m.因此,当多点扰动的空间间隔小于100 m时,可以近似视为单点扰动来处理.两点同时扰动的仿真结果可以扩展到多点同时扰动的情况.由于幅度相近、相距较远的另一扰动会严重影响传感器的定位准确性甚至导致

定位失效,因此,当多点扰动幅值相近时,传感器只适用于单一扰动源或多个扰动源的间距在 100 m 内的准确定位。

### 3 实验与讨论

为了验证数值仿真结论的正确性,搭建基于 MZI 的 FDDS 样机进行实验验证,采用分集检测的方法抑制偏振衰落对传感器定位性能的影响. 顺时针和逆时针方向接收到的干涉信号通过两个偏振分束器 (Polarization Beam Splitter, PBS) 分别进行分束,并对两个探测器分束后的信号分别求取平方和,再进行相关时延定位. 分别对两个同时扰动信号的幅值比和位置差对传感器定位准确度的影响进行了测试. 两点同时扰动的实验装置如图 1 所示. 激光光源的中心波长约 1 550.0 nm,输出功率约 10 mW,线宽约 30 kHz. 传感光纤长度为 20 km,采集卡的采样率为 2 MHz.

首先验证多点扰动信号幅值比对传感器定位准确度的影响. 在 MZ 干涉仪一个传感臂的 5 km 和 10 km 位置各连接一个压电换能器 (Piezoelectric Transducer, PZT). 在 PZT 上缠绕有约 5 m 长的光纤,并通过多通道信号发生器给 PZT 同时施加正弦电压信号来模拟两点同时扰动. 给两个 PZT 上施加的信号频率分别为 0.5 kHz 和 1 kHz,改变两个信号峰值的比例进行实验. 由于噪声作用的统计特性,在一定条件下,系统定位误差发生随机波动,通常取同一条件下多个定位误差的最大值,即最大定位误差作为评价系统定位准确度的技术指标. 图 7 为针对每个幅值比进行 20 次实验得到的距离 5 km 扰动位置最大定位误差的实验结果. 从图中可以看出,当 5 km 和 10 km 位置扰动信号的幅值等于 1 时,与 5 km 位置的最大定位误差为 5.6 km; 当 5 km 和 10 km 位置扰动信号的幅值比大于等于 20 倍时,最大定位误差的最大值为 200 m. 再验证多点扰动信号位置差对传感器定位准确度的影响. 在 5 km 和 5.05 km 位置同时施加正弦扰动信号,幅值比为 1,频率分别为 0.5 kHz 和 1 kHz. 进行 20 次实验,得到的最

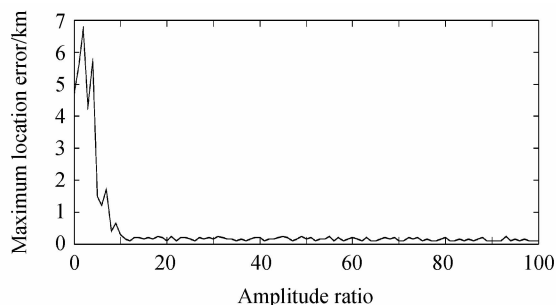


图 7 扰动幅值比与定位准确度关系的实验结果

Fig. 7 Experimental result concerning location precision and amplitude ratio

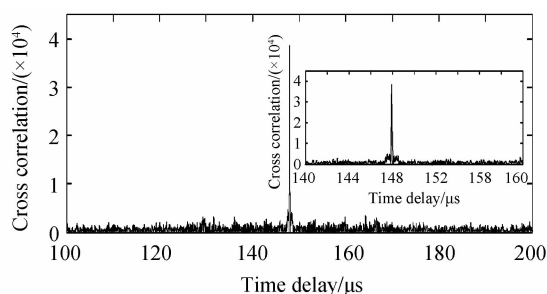


图 8 扰动位置差为 50 m 的定位结果

Fig. 8 Location result of the multiple disturbances with the distance of 50 m

大定位误差为 200 m,如图 8 所示. 其中,5 km 位置单点扰动的定位结果为 5.1 km,即最大定位误差为 100 m. 由于环境噪音和激光器导致的系统噪音使得传感器的信噪比降低,因此实验得到的定位误差要大于仿真的结果. 综上,当 5 km 和 10 km 位置扰动信号的幅值比大于等于 20 倍时,可以近似看成是强扰动位置 (5 km) 的单点扰动作用;当 5 km 和 5.05 km 位置同时施加扰动时,可以近似看成是 5 km 扰动位置的单点扰动作用。

### 4 结论

本文针对多点同时扰动对 FDDS 定位准确度的影响进行了理论和实验研究. 仿真研究表明,当多点扰动的幅度差别达到或超过 20 倍时,距离较强扰动点的定位误差小于等于 100 m;当多点扰动的空间距离小于等于 100 m 时,定位误差小于等于 100 m. 实验得到的定位误差要略高于仿真结果,验证了数值仿真结论的正确性. 本文的研究结论可为多点同时扰动时提高传感器的定位准确度和降低误报率提供理论指导。

#### 参考文献

- [1] WU Yuan, BIAN Pang, XIAO Qian. Fiber-optic security system based on phase carrier multiplexing and its realization methods[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 967-971. 吴媛, 卞庞, 肖倩. 基于相位载波复用的光纤周界安防系统及其实现方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 967-971.
- [2] LUO Guang-ming, ZHANG Chun-xi, MA Zong-feng, et al. Study on the distributed fiber optic sensing and locating technology for security system [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, **31**(3): 327-329, 333. 罗光明, 张春熹, 马宗峰, 等. 分布式光纤周界安防系统传感和定位技术研究[J]. *压电与声光*, 2009, **31**(3): 327-329, 333.
- [3] JUAREZ J C, TAYLOR H F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(11): 1968-1971.
- [4] WU Xiu-wei, WU Hui-juan, RAO Yun-jiang, et al. Low misstatement rate distributed optical fiber fence intrusion detection system by variety of wavelet decomposition method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1692-1696. 吴麻伟, 吴慧娟, 饶云江, 等. 基于多种小波分解方法综合判决的低误报率分布式光纤围栏入侵监测系统[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1692-1696.

- [5] WU Hui-juan, LI Shan-shan, LU Xiang-lin, *et al.* A novel method for simultaneous intrusion detection and fire alarm in a single FBG-based fiber fence monitoring system configuration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1671-1676.  
吴慧娟, 李珊珊, 卢祥林, 等. 一种新型光纤光栅围栏防火防入侵同步预警系统[J]. 光子学报, 2011, **40**(11): 1671-1676.
- [6] CHEN Wei-min, ZHU Yong, *et al.* The monitoring system and the analysis of locating theory for pipeline leakage detection based on single distributed optical fiber sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 228-231.  
谭靖, 陈伟明, 朱永, 等. 单轴分布式光纤传感器管线泄漏探测方法及定位理论分析[J]. 光子学报, 2006, **35**(2): 228-231.
- [7] QU Zhi-gang, FENG Hao, JIN Shi-jiu, *et al.* An SVM-based recognition method for safety monitoring signals of oil and gas pipeline[J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, **42**(5): 465-470.  
曲志刚, 封皓, 靳世久, 等. 基于支持向量机的油气管道安全监测信号识别方法[J]. 天津大学学报, 2009, **42**(5): 465-470.
- [8] ZHANG Jing-chuan, ZENG Zhou-mo, CAO Qin-song, *et al.* A locating method for petroleum pipeline abnormal vibration events based on independent component analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, **30**(4): 81-85.  
张景川, 曾周末, 曹庆松, 等. 基于独立分量分析的管道异常振动事件定位方法[J]. 振动与冲击, 2011, **30**(4): 81-85.
- [9] FENG Hao, JIN Shi-jiu, ZENG Zhou-mo, *et al.* Locating error analysis in pipeline leakage detection and prewarning system based on modeling using Jones Matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 723-727.  
封皓, 靳世久, 曾周末, 等. 基于琼斯矩阵建模的管道泄漏检测及预警系统的定位误差分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 723-727.
- [10] LIANG Sheng, ZHANG Chunxi, LIN Wentai, *et al.* Fiber-optic intrinsic distributed acoustic emission sensor for large structure health monitoring [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(12): 1858-1860.
- [11] LU Yue-lan, TAO Zhu, LIANG Chen, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(22): 3243-3249.
- [12] ZENG Guang-qin, TAO Zhu, LIANG Chen, *et al.* High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR [J]. *Photonics Technology Letters*, 2009, **23**(15): 1091-1093.
- [13] BO Lin-hou, LIAO Yan-biao, ZHANG Min, *et al.* The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1324-1327.  
柏林厚, 廖延彪, 张敏, 等. 干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究 [J]. 光子学报, 2005, **34**(9): 1324-1327.
- [14] SUN Qin-zhen, LIU De-ming, LIU Hai-rong. Distributed disturbance sensor based on a novel Mach-Zehnder interferometer with a fiber-loop [C]. SPIE, 2006, **6344**: 63440K-1-63440K-7.
- [15] LUO Guang-ming, ZHANG Chun-xi, LI Li-jing *et al.* Distributed fiber optic perturbation locating sensor based on Dual-Mach-Zehnder interferometer[C]. SPIE, 2007, **6622**: 66220Z-1-66220Z-7.
- [16] LUO Guang-ming, ZHANG Chun-xi, MA Zong-feng, *et al.* Adaptive time delay estimation of distributed fiber optic perturbation sensor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, **34**(10): 1155-1158.  
罗光明, 张春熹, 马宗峰, 等. 光纤振动传感器的自适应时间延迟估计[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, **34**(10): 1155-1158.
- [17] ZHANG Chun-xi, LI Qin, LIANG Sheng, *et al.* Location algorithm for multi-disturbances in fiber-optic distributed disturbance sensor using a Mach-Zehnder interferometer[C]. International Conference on Optical Communications and Networks, 2010, **2010**(574): 103-107.
- [18] SUN Wen-tao, HANG Li-jun, HU Shu-yang, *et al.* Influence of polarization controller on precision position of the leakage in optical fiber sensor system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 709-712.  
孙文韬, 杭利军, 胡曙光, 等. 偏振态对光纤传感系统检测泄漏点灵敏度的影响[J]. 光子学报, 2008, **37**(4): 709-712.
- [19] TAN Jing, CHEN Wei-min, FU Yu-mei. A research on polarization effects in the single distributed optical fiber sensor based on Sagnac interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 492-497.  
谭靖, 陈伟民, 符玉梅. 基于 Sagnac 原理的单轴分布式光纤传感系统偏振态分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(3): 492-497.
- [20] LIN Lei, CHEN Wei-min, ZHANG Peng, *et al.* Distributed optic fiber sensor with a sub-ring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1118-1121.  
林蕾, 陈伟民, 章鹏, 等. 基于附加环结构的分布式光纤传感系统研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1118-1121.
- [21] WU Dong-fang, ZHANG Tian-zhao, JIA Bo. Modified Sagnac interferometer for distributed disturbance detection [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, **50**(6): 1608-1610.
- [22] FANG Xiao-jun, A variable-loop Sagnac interferometer for distributed impact sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, **14**(10): 2250-2254.
- [23] RUSSEL S J, BRADY K R C, DAKIN J P. Real-time location of multiple time-varying strain disturbances, acting over a 40-km fiber section, using a novel Dual-Sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(2): 205-213.
- [24] RUSSELL S J, BRADY K R C, DAKIN J P. Real-time location of multiple time-varying strain disturbances, acting over a 40-km fiber section, using a novel dual-Sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(2): 205-213.
- [25] FANG Xiao-jun. Fiber-optic distributed sensing by a two-loop Sagnac interferometer[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(6): 444-446.
- [26] ZHANG Yi, JIA Bo, XU Hai-yan, *et al.* Synchronous carrier extracting method based demodulation scheme for fiber optic sensor using phase generated carrier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1531-1535.  
张毅, 贾波, 许海燕, 等. 基于同步载波提取的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. 光子学报, 2011, **40**(10): 1531-1535.
- [27] LAN Tian, ZHANG Chun-xi, LI Li-jing, *et al.* Random polarization effects on the dual M-Z fiber optic micro vibration sensor[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, **30**(5): 541-543.  
蓝天, 张春熹, 李立京, 等. 双 M-Z 型光纤微振动传感器光波随机偏振分析[J]. 压电与声光, 2008, **30**(5): 541-543.
- [28] LI Chen, ZHANG Chun-xi, LIANG Sheng, *et al.* Distributed optic fiber sensor with a sub-ring[J]. *Journal of*

- Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, **36**(9): 1099-1102.
- 李琛,张春熹,梁生,等.干涉项光纤安防系统偏振误差机理分析[J].北京航空航天大学学报,2010,**36**(9):1099-1102.
- [29] LI Chen, ZHANG Chun-xi, LIANG Sheng, *et al.* Research on cable technology of fiber optic sensors for perimeter[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2010, **24**(3): 277-281.
- 李琛,张春熹,梁生,等.用于周界报警干涉型光纤传感器的光缆技术[J].测试技术学报,2010,**24**(3):277-281.
- [30] CHEN Wei-min, WU Jun, TAN Jing, *et al.* Analysis on the influence of polarization state degradation to the performance of Mach-Zehnder optical-fiber sensing system [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(6): 33-35.
- 陈伟民,吴俊,谭靖,等.偏振态退化对双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位性能的影响分析[J].激光杂志,2008,**29**(6):33-35.
- [31] WU Jun, CHEN Wei-min, TAN Jing, *et al.* Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2128-2132.
- 吴俊,陈伟民,谭靖,等.双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位技术[J].光学学报,2007,**27**(12):2128-2132.
- [32] ZHOU Yan, Jing Shi-jiu, ZENG Zhou-mo, *et al.* Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline safety detection and location[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(7): 922-924.
- 周琰,靳世久,曾周末,等.分布式光纤管道安全检测定位技术研究[J].光电子·激光,2008,**19**(7):922-924.