

文章编号: 1001-3806(2019)02-0195-06

## 马赫-曾德尔干涉仪的定位技术研究

徐果<sup>1</sup>, 贺成成<sup>2</sup>, 张伦宁<sup>2</sup>, 何伟<sup>2</sup>, 许雪莹<sup>1</sup>, 孔勇<sup>1\*</sup>

(1. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620; 2. 上海华测导航技术股份有限公司, 上海 201702)

**摘要:** 为了研究不同线宽的激光光源对马赫-曾德尔光纤干涉仪定位精度的影响, 采用互相关定位算法原理搭建了一套扰动定位系统。采用 3kHz 和 1MHz 的半导体激光器作为系统输出光源, 并对其进行多次的定点扰动, 将得到的实验数据根据互相关原理做计算, 并与理论推导结果进行了对比分析。结果表明, 在时间域采样速率都为 100MHz 的情况下, 系统采用 3kHz 的激光器时, 平均定位误差为 34.4m, 远小于采用 1MHz 光源下 225.4m 的定位误差; 在干涉仪信号臂中接入 3m 单模光纤, 使信号臂长度和参考臂长度基本相同, 可以很大程度上抑制了系统的共模噪声; 窄线宽激光器可以提高系统的定位精度。该研究对于干涉仪激光器的选取、系统性能参数的评估是有积极意义的。

**关键词:** 光纤光学; 光纤干涉仪; 互相关定位; 窄线宽激光器; 共模噪声

**中图分类号:** TH744.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.02.009

## Research of positioning technology of Mach-Zehnder interferometer

XU Guo<sup>1</sup>, HE Chengcheng<sup>2</sup>, ZHANG Lunning<sup>2</sup>, HE Wei<sup>2</sup>, XU Xueying<sup>1</sup>, KONG Yong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai HuaCe Navigation Technology Ltd., Shanghai 201702, China)

**Abstract:** In order to study effect of laser sources with different linewidths on positioning accuracy of Mach-Zehnder fiber interferometers, a set of disturbance location system was built using the principle of mutual-correlation positioning algorithm. 3kHz and 1MHz semiconductor lasers were used as system output light sources respectively, and were subjected to multiple fixed-point disturbances. The experimental data were calculated according to the principle of mutual correlation, and the results were compared and analyzed. The results show that, in the case of time domain sampling rate of 100MHz, average positioning error of 3kHz laser is 34.4m, far less than positioning error of 225.4m for 1MHz light source. The method of using 3m single-mode fiber in the signal arm of the interferometer to make the signal arm and the reference arm basically the same length, largely suppresses the common-mode noise of the system. Narrow linewidth laser can improve the positioning accuracy of the system. The study has positive significance for the selection of interferometer lasers and the evaluation of system performance parameters.

**Key words:** fiber optics; fiber optic interferometer; cross-correlation positioning; narrow linewidth laser; common mode noise

### 引言

相比传统的电传感器, 分布式光纤传感系统应用场景较为灵活, 可在空间狭窄、易燃易爆易腐蚀等恶劣场景中工作, 不仅成本低, 而且整个光纤传感链路都能对外部信号进行感知<sup>[1]</sup>, 所以被国内外科研工作者视为研究的热点。其中, 马赫-曾德尔作为干涉型的分布

式光纤传感系统, 由于具有很高的灵敏度, 并能准确地实时定位外界扰动, 因而在周界防护系统中有着较大的优势。但是, 系统光源的噪声、光纤双折射引起的偏振噪声、外界环境引起的相位噪声等都会对马赫-曾德尔干涉仪的定位精度带来影响。此外, 干涉仪的测量范围也受到各种因素的影响。一方面, 当干涉仪的信号臂某处发生振动的同时, 干涉臂沿线各个位置也会发生十分微弱的振动, 这些微弱振动累计后会影响到系统输出的干涉信号, 且传感的距离越长, 累计的微弱振动对系统的影响越明显, 就会导致顺时针和逆时针方向的时间差  $\Delta t$  出现的误差越大, 进而影响定位结果; 另一方面, 当干涉仪的传感范围很长时(几十甚至上百公里), 干涉仪的信号臂与参考臂的长度很难精确控制, 不可避免地会形成臂长差, 而臂长差会导致系统

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61305014); 上海市自然科学基金资助项目(13ZR1455200); 上海市科委资助项目(17DZ1100900)

作者简介: 徐果(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: kky7757@aliyun.com

收稿日期: 2018-05-03; 收到修改稿日期: 2018-05-30

共模噪声以及其它噪声的影响,此时干涉信号的信噪比和可见度会大大降低,影响定位结果。另外,当干涉仪的传感范围很大时,光纤沿线形成的总的散射噪声也很大,这也会对定位精度产生不利影响<sup>[2]</sup>。

目前,系统的传感距离和定位精度在一定程度上得到了很大的提升<sup>[3-5]</sup>,但是定位误差还有较大的提升空间。为了提高定位精度,CHEN和YANG等人分别先后将两路输出的相干信号,做二次相关运算提高系统的信噪比<sup>[6-7]</sup>。一些研究人员通过将改进信号解调方法,补偿传感光纤的时延去提高系统信噪比,改善初始相位误差带来的定位误差<sup>[8]</sup>。一些研究人员从系统的光路结构<sup>[9]</sup>和激光源的频率噪声<sup>[10]</sup>入手去分析系统的定位性能。此外,系统的偏振态分析也是影响定位性能的重要因素<sup>[11-12]</sup>。

虽然系统的定位精度和传感距离都有了很大的提高,但是影响系统性能的其他因素还有待分析。为了研究激光器线宽和系统共模噪声对系统定位精度和稳定性的影响,作者分别把线宽为3kHz和1MHz半导体激光光源应用到马赫-曾德尔系统中,使用互相关算法进行定位,证明了窄线宽激光器可以提高系统的定位精度;同时,在信号臂中接入3m单模光纤,成功地抑制了系统的共模噪声,提高系统的稳定性。

## 1 理论分析

### 1.1 系统结构及定位原理

马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)的系统结构图如图1所示。其包括两种不同线宽的激光光源(3kHz/1MHz)、两个可调光衰减器、耦合器 $C_1, C_2, C_3, C_4$ 、光电探测器 $PD_1$ 和 $PD_2$ 、5.027km的单模光纤和手动偏振控制器。可调光衰减器的作用是调节光源的输出功率使其和传感模块输入的光功率匹配。光隔离器的作用是防止后向散射光对光路产生不利影响。激光光源发出的连续光被调制后变成脉冲光,首先经过光衰减器,被耦合器 $C_1$ 分成两束相同

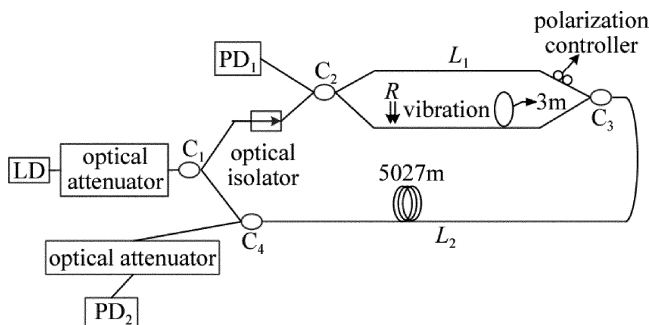


Fig. 1 Structure of double Mach-Zehnder interferometer system

的光源,分别沿着顺、逆时针方向传播。顺时针方向的光经过 MZI 结构在  $C_3$  处发生干涉,经过传感光纤和耦合器  $C_4$  被光电探测器  $PD_2$  接收;同理,逆时针方向的光束先经过传感光纤进入 MZI 系统后在  $C_2$  处发生干涉并被  $PD_1$  接收。当外界没有振动时,光电探测器显示的干涉信号较为稳定。

当 MZI 系统上的某一点距耦合器  $C_2$  的  $R$  处产生扰动时,MZI 中的顺时针和逆时针方向传播的光相位同时变化,若顺时针方向的信号到达  $PD_2$  时间为  $t_1$ ,逆时针方向的信号到达  $PD_1$  时间为  $t_2$ <sup>[13]</sup>,则  $t_1 = (L_1 + L_2 - R)/v, t_2 = R/v$ ,则:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = (L_1 + L_2 - 2R)/v \quad (1)$$

式中,光在光纤中的传播速率  $v = c/n, c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  为真空光速, $n$  为光纤的纤芯折射率, $L_1$  表示耦合器  $C_2$  与耦合器  $C_3$  的距离, $L_2$  表示耦合器  $C_3$  与耦合器  $C_4$  的距离, $\Delta t$  表示光电探测器的时间差。将  $v$  带入,并对上式进行变换,得到:

$$R = \frac{1}{2} \left( L_1 + L_2 - \Delta t \frac{c}{n} \right) \quad (2)$$

因此,知道时间差  $\Delta t$ ,就可计算出  $R$  的大小,扰动的位置则可以精确定位。使用互相关算法求  $\Delta t$ 。两光电探测器的输出可分别表示为: $y_1(t) = s(t) + n_1(t), y_2(t) = s(t - \Delta t) + n_2(t)$ 。其中, $s(t)$  和  $s(t - \Delta t)$  为振动产生的扰动信号, $n_1(t)$  和  $n_2(t)$  为白噪声,白噪声相互独立,且与扰动信号互不相关,则两个信号的互相关函数为:

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y_1(t) y_2(t + \tau) dt = R_s(\tau - \Delta t) \quad (3)$$

式中, $T$  为两路信号做互相关时的周期; $\tau$  表示两路信号做相关之后,互相关函数  $R(\tau)$  的自变量; $R_s(\tau - \Delta t)$  为  $y_1(t)$  与  $y_2(\tau - \Delta t)$  之间的互相关函数。

由分析可知,当  $\tau = \Delta t$  时取最大值。将其离散化,则两信号的互相关函数为<sup>[14]</sup>:

$$R_{12}(mT_s) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_1(lT_s) y_2(lT_s + mT_s) \quad (4)$$

式中, $L$  为采样长度, $l$  和  $m$  为整数, $T_s$  为采样周期。所以,只要测得有限长的互相关序列  $R_{12}(mT_s)$  中的最大值对应的序列号  $m$ ,即可求出扰动位置,完成定位。

### 1.2 不同线宽激光光源对系统定位精度的影响

光源的线宽是影响系统定位精度的重要参量,激光器通常具有一定的带宽<sup>[15]</sup>,因为激光器光谱中包含多个谱分量,且谱线宽度与光谱纯度、相干性密切相

关<sup>[16]</sup>,因而,光源线宽的特性决定了光源的相干长度。为了使 MZI 的光波能干涉,干涉仪信号臂和参考臂的臂长差要小于激光光源的相干长度,即满足  $\lambda^2/\Delta\lambda > \Delta L$ ,其中, $\lambda$  为光源的中心波长, $\Delta\lambda$  是臂长差, $\Delta L$  为两臂长差,并且激光器输出的光源具有一定的谱宽。假设功率谱为  $I_0(k)$  的窄线宽光源入射到 MZI 后,输出可表示为:

$$I(\Delta\xi) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} I_0(k) [1 + \cos(k\Delta\xi)] dk \quad (5)$$

式中, $k$  为波数, $\Delta\xi$  为两臂光程差。若光源的中心波长为  $k_0$ ,并令  $x = k - k_0, j(x) = I(k_0 + x)$ ,则上式化为:

$$I(\Delta\xi) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} j(x) \{1 + \cos[(k_0 + x)\Delta\xi]\} dx \quad (6)$$

展开后为:

$$I(\Delta\xi) = P + C(\Delta\xi) \cos(k_0\Delta\xi) - S(\Delta\xi) \sin(k_0\Delta\xi) \quad (7)$$

式中, $P = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} j(x) dx, C(\Delta\xi) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} j(x) \times \cos(x\Delta\xi) dx, S(\Delta\xi) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} j(x) \sin(x\Delta\xi) dx。$

分析(7)式可知,当臂长差为定值时,激光光源线宽越窄,干涉仪输出信号的可见度就越大,信号质量就越好。所以干涉应尽可能使用窄线宽的激光光源<sup>[17]</sup>。另外,当激光源的线宽变窄时,相应的,频率漂移也越小,相位噪声变小,强度噪声也随之减小,故而信号信噪比变大,定位误差更小。需要注意的是,光源线宽不可能无限减小,一方面是由于制作工艺和制作成本的限制,另一方面是随着线宽的减小,线宽对信号可见度的影响也越来越小,所以实际应用时应综合考虑。

## 2 数值仿真

在 LabView 中通过仿真两路相关信号,并对其做互相关运算模拟定位仿真的具体过程。仿真的程序框图如图 2 所示。为了仿真实现实中的扰动信号,引入高频余弦信号和矩形脉冲信号控件,将两信号做乘法运算得到高频余弦脉冲信号。考虑到现实环境中噪声不可避免,再将得到的信号加上均匀的白噪声,得到传输信号与噪声信号的混合。将两路仿真混合信号用互相关控件进行互相关的运算,输出结果的波形由一个波形显示控件进行显示。再将数组最大值和最小值控件与之相连,以此获得对应的时间点,计算两路相干信号的时间差<sup>[18]</sup>。

前面板设计图如图 3 所示。噪声幅值设置为 0.01,第 1 路信号和第 2 路信号的时间延迟分别为

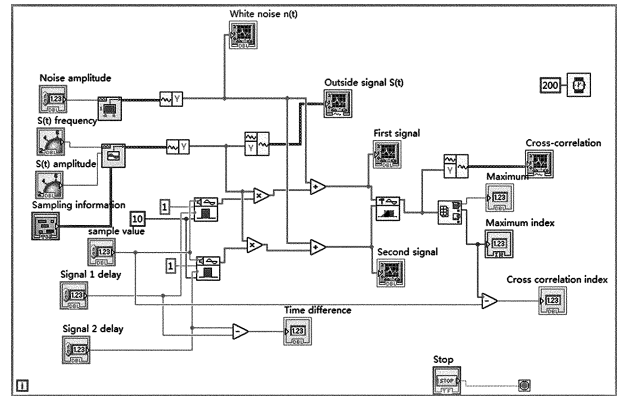


Fig. 2 Block diagram of cross-correlation positioning simulation

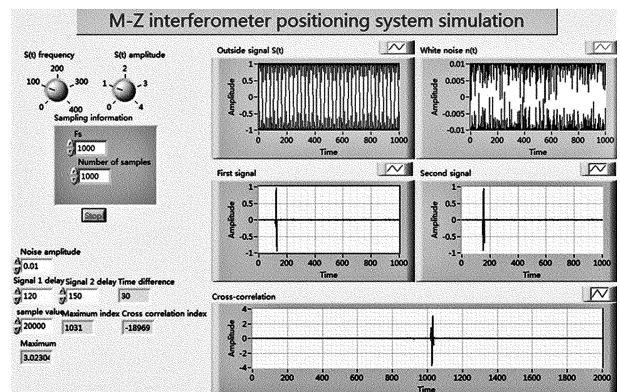


Fig. 3 Front panel of cross-correlation positioning simulation

120ms 和 150ms,采样值设置为 20000,外界信号的频率和幅值可根据需要转动旋转按钮,外界信号的采样信息也设定好,定位的结果如图 3 所示。

互相关波形的最大值索引在 1031 处,仿真结果表明,基于 MZI 的互相关算法理论上能对抗动的位置进行精确的定位。

下面通过实际系统光路的搭建对抗动位置进行探测,并通过数学计算定位扰动的位置。

## 3 实验设计与结果分析

### 3.1 定位结果分析

实验结构按图 1 所示进行搭建。为了区分出两光电探测器的信号,采用 4.980km 的传感光纤,各光学器件之间的连接光纤较短,总长度为几十厘米,对定位误差影响很小,传输的时间也可忽略不计。干涉仪中偏振控制器的长度为 3m,实验中所采用的  $1 \times 2, 2 \times 2$  耦合器的功率损耗分别为 2dB 和 3dB,单模光纤的中心波长为 1550nm,纤芯折射率为 1.5,在 MZI 信号臂进行扰动,采集卡的采样频率为 100MHz 的调节偏振控制器,使得两路信号的偏振特性较为一致。当激光光源采用 3kHz 的窄线宽激光器时,定位结果如图 4 所示。

图 4 的第 1 行两个波形从左到右分别是做互相关

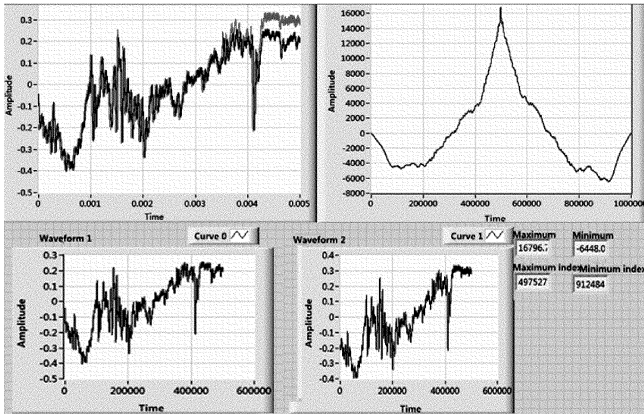


Fig. 4 System positioning using 3kHz laser source

运算截取的两路信号,互相关运算后的信号,第2行的两个波形分别是分开后两路相干信号。当两路信号偏振态较为一致时,干涉仪互相关  $R_{12}$  定位的最大值点位

Table 1 3kHz laser source positioning

maximum point	497527	497527	497530	497532	497522	497527	497533	497525	497518	497516
time error $\Delta t/\mu\text{s}$	0.185	0.185	0.215	0.235	0.135	0.185	0.245	0.165	0.095	0.075
positioning error/m	37	37	43	47	27	37	49	33	19	15

将10次测量的定位误差取绝对值后平均,得到3kHz时系统的定位误差为34.400m。相同的实验条件,唯一变化的是MZI光源采用1MHz,调节两路信号的偏振态,则定位结果如图5所示。

干涉仪互相关  $R_{12}$  定位的最大值点位于497623处,此时最大值点距中点的距离为  $500000 - 497623 = 2377$  点,则两路信号的定位时间差为:  $\frac{0.005}{500000} \times (500000 - 497623) = 23.770\mu\text{s}$ , 定位的时间误差  $\Delta t = 24.915 - 23.770 = 1.145\mu\text{s}$ , 定位误差  $\Delta x = v \times \Delta t = \frac{c}{n} \times \Delta t = \frac{3 \times 10^8}{1.5} \times 1.145\mu\text{s} = 229\text{m}$ 。同理,再重复试验9次,得到的最大值点、时间误差和定位误差如表2所示。

Table 2 1MHz laser source positioning

maximum point	497623	497622	497623	497623	497619	497632	497615	497611	497627	497617
time error $\Delta t/\mu\text{s}$	1.145	1.135	1.145	1.145	1.105	1.235	1.065	1.025	1.185	1.085
positioning error/m	229	227	229	229	221	247	213	205	237	217

将10次定位误差结果取平均值,得到1MHz时系统的定位误差为225.400m。综合两种不同情况下的实验数据,很明显,采用3kHz窄线宽的激光光源,MZI的定位精度较高,定位误差较小。需要特别说明的是,由于条件限制,实验中采集两路相干信号的时间段较短,为0.005s,这会降低互相关定位时的定位精度,若扩大采集信号的时间范围,则两路相干信号整体上呈正弦波形,定位误差也会在一定程度上得到减小。

于在497527处,此时互相关后信号的最大值点距中点的距离为  $500000 - 497527 = 2473$  点,由于截取两路信号的时间为0.005s,对应的两路波形图的刻度为500000,根据显示波形计算两路信号定位的时间差为:

$$\frac{0.005}{500000} \times (500000 - 497527) = 24.730\mu\text{s} \quad (8)$$

而实际的定位时间差为:

$$\frac{(4980 + 3) \times 1.5}{3 \times 10^8} = 24.915\mu\text{s} \quad (9)$$

则定位的时间误差  $\Delta t = 24.915 - 24.730 = 0.185\mu\text{s}$ , 则定位误差  $\Delta x = v \times \Delta t = \frac{c}{n} \times \Delta t = \frac{3 \times 10^8}{1.5} \times 0.185\mu\text{s} = 37\text{m}$ 。为了验证MZI的可靠性,再重复试验9次,共计10次实验,得到的最大点、时间误差和定位误差如表1所示。

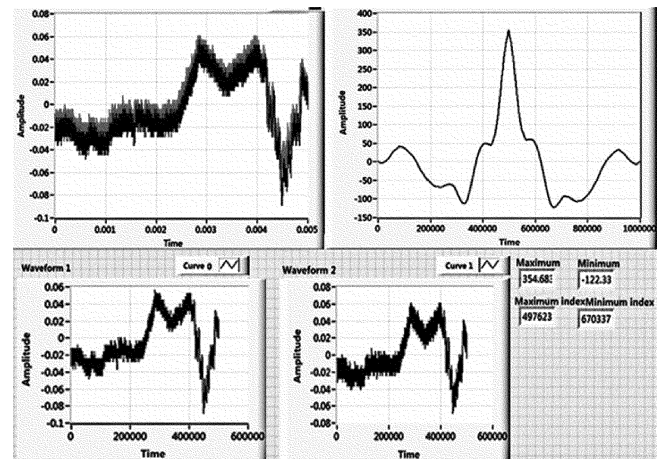


Fig. 5 System positioning using 1MHz laser source

### 3.2 共模噪声分析

在MZI中,共模噪声很大程度上降低了干涉仪的信噪比。当MZI两臂长度不等时,共模噪声对系统有较大的影响。如图1所示,若信号臂和参考臂的长度相差较大时,激光器顺时针方向的光通过耦合器  $C_2$  被引导到MZI系统中,被分成两个臂的脉冲,分别具有  $f_1$  和  $f_2$  的频移值。由于光纤长度差,两个脉冲在时间上分开,并通过耦合器  $C_3$  组合,产生一对差分延迟脉冲,

此时 MZI 即为补偿干涉仪,也是引入共模噪声的关键部位<sup>[19]</sup>。共模噪声主要分布在在几十赫兹到几千赫兹的频率范围内。在搭建光路系统的过程中,为了控制系统的偏振态,在干涉仪的参考臂中加入了 3m 长的偏振控制器<sup>[20-21]</sup>,此时信号臂和参考臂的长度不一致,为了抑制共模噪声减小光源波长波动及环境干扰对系统的影响,要求干涉仪两路完全对称<sup>[22]</sup>。所以相应的,作者在信号臂中接入 3m 长的单模光纤。考虑到实验两臂长存在误差,不可能完全相等,故又在参考臂中加入光纤延时器,通过光纤延时器的微调,使得两臂长无限接近,通过对干涉仪两臂的适当调节,使得系统偏振态在较为理想的情况下,通过示波器对比共模噪声抑制前后的波形变化,如图 6a 和图 6b 所示。

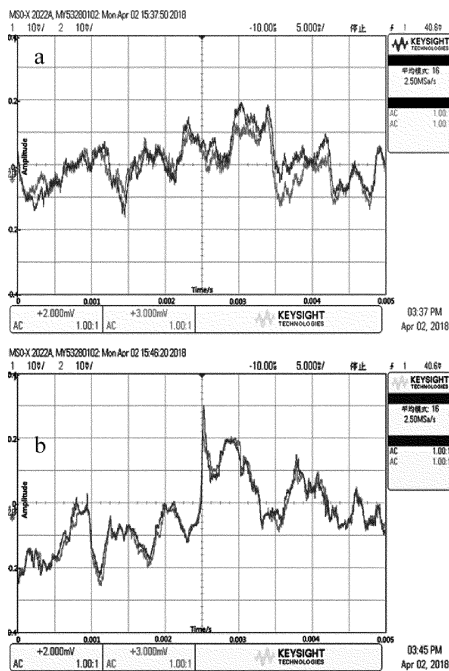


Fig. 6 a—before common mode noise suppression b—after common mode noise suppression

从图中可以看出,共模抑制前,MZI 输出的两路信号波宽“较大”,此时信号的信噪比和可见度较差,对后续的信号处理有很大的影响。而在共模抑制后,系统输出的两路信号十分“锐利”,此时信号具有很高的信噪比,很大程度上改善了振动定位测量。类似的,在线宽为 3kHz 激光光源的条件下,在干涉仪信号臂相

Table 3 Positioning errors before and after common mode rejection

number of disturbances	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
before common mode suppression/m	74	63	91	61	73	68	61	81	73	69
after common mode suppression/m	37	37	43	47	27	37	49	33	19	15

同的位置进行 10 次扰动,共模抑制前和共模抑制后的定位误差绝对值经计算分别如表 3 所示。

将以上数据用折线图表示,如图 7 所示。

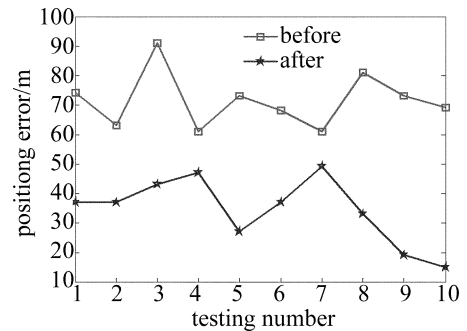


Fig. 7 Systematic positioning error before and after common mode noise suppression

图 7 清楚地显示了共模噪声抑制前后的定位误差,共模抑制后的定位误差明显要小于共模抑制前的定位误差。这进一步证明了共模噪声降低系统的信噪比,使得系统的定位性能下降,所以应该尽量保证 MZI 信号臂和参考臂长度的一致,抑制共模噪声对系统的不良影响。

### 4 结 论

基于互相关定位的 MZI 在理论推导和光路分析的基础上,证明了采用 3kHz 窄线宽的激光光源的定位误差远远小于 1MHz 的情况,最小定位误差达 15m,通过实验证明了窄线宽激光光源可以提高 MZI 的定位精度。为了抑制系统的共模噪声、提高系统的信噪比,通过在信号臂增加 3m 长的单模光纤使得长度和参考臂的长度接近,很好地改善了系统的定位误差。所搭建的 MZI 具有良好的定位功能。

### 参 考 文 献

- [1] ZOU D B, LIU H, ZHAO L, *et al.* Research of signal recognition of distributed optical fiber vibration sensors [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(1):86-89 (in Chinese).
- [2] XIE Sh R, ZOU Q L, TU Y J, *et al.* A study on real-time location method for long distance dual M-Z interferometric vibration sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(8):1020-1024 (in Chinese).
- [3] LIU B, YANG Y F, ZHANG J, *et al.* A fiber fence system based on M-Z interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(6):1013-1017 (in Chinese).
- [4] CHEN W M, WU J, TAN J, *et al.* Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12):2128-2132 (in Chinese).
- [5] ZHANG Y, CHEN J M, LI G, *et al.* Locatin method of distributed fiber-optic perimeter security system based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6):605005 (in Chinese).

- Chinese).
- [6] YANG Sh Zh, ZHANG Zh Y, SHAO L Y, *et al.* A quadratic correlation method for vibration localization based on dual M-Z fiber sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7):706004(in Chinese).
- [7] CHEN Q N, LIU T G, LIU K, *et al.* A positioning algorithm based on super-resolution time delay estimation in dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensor [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2014, 9274:92740U.
- [8] LIN W T, LOU Sh Q, LIANG Sh. A modified phase generation carrier technique for fiber-optic distributed disturbance sensor [J]. *Optik—International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(3):942-945.
- [9] SUN Q Zh, LIU D M, WANG J, *et al.* Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(6):1538-1544.
- [10] CHEN Q N, LIU T G, LIU K, *et al.* An Improved positioning algorithm with high precision for dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10):1954-1960.
- [11] AN Y, FENG H, ZHOU Y, *et al.* A control method to eliminate polarization-induced Phase distortion in dual Mach-Zehnder fiber interferometer [C]// *Ukacc International Conference on Control*. New York, USA: IEEE, 2012:988-991.
- [12] CHEN Q N, LIU T G, LIU K, *et al.* An elimination method of polarization-induced phase shift and fading in dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(19):3135-3141.
- [13] JIANG J Sh, JIANG Y, LIU D, *et al.* Fiber-optic perimeter security system based on dual Mach-Zehnder interferometer structure [J]. *Optical Technique*, 2015, 41(3):193-196(in Chinese).
- [14] JIN J, LIANG D K, ZENG J, *et al.* Study on distributed fiber-optic detecting system based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optoelectronic Technology*, 2013, 33(3): 160-163(in Chinese).
- [15] WANG M Y, SHENG L, TAO Y, *et al.* Effect of laser linewidth on characteristics of  $\phi$ -OTDR system [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(4):615-618(in Chinese).
- [16] SHI Y L, ZHANG Y, SUN L J. Influence of lasers on phase noise of optoelectronic oscillators [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(6):761-764(in Chinese).
- [17] CHEN Q N. Research on key technologies of dual Mach-Zehnder distributed vibration sensing system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015:23-26(in Chinese).
- [18] JIN J. Research of distributed fiber optic cable detection system based on the structure of Mach-Zehnder [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013:29-32(in Chinese).
- [19] LIU F, XIE SH R, QIU X K, *et al.* Efficient common-mode noise suppression for fiber-optic interferometric sensor using heterodyne demodulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5453-5461.
- [20] LI R, LIANG Sh, XIAO W. A low cost design to eliminate polarization induced phase shift for dual Mach-Zehnder fiber interferometer [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, 9656:965609.
- [21] HUANG W W. Research on polarization control technology in distributed optical fiber fence protection system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Master Degree Thesis, 2016:16-17(in Chinese).
- [22] CHEN X G. A new type of fiber-optic interferometer with high sensitivity and common mode compensation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1992, 12(2):188-192(in Chinese).