

基于环结构的新型分布式光纤振动传感系统^{*}

孙琪真^{1)†} 刘德明¹⁾ 王 健^{1,2)}

1) 华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

2) 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

(2007 年 1 月 24 日收到, 2007 年 2 月 8 日收到修改稿)

提出并验证了一种新颖的基于环形马赫-泽德干涉仪结构的全分布式光纤振动传感系统. 采用直流光实时动态定位技术, 通过在干涉仪光路中引入环结构, 将直线型干涉仪转化为环型回路, 使得一个马赫-泽德干涉仪中相向传输两路光波, 相当于构成双马赫-泽德干涉仪. 当振动信号作用于传感光纤时, 相向传输的两路直流光同时产生相同的相位信号并沿不同的路径传输至光接收单元, 采用数字信号处理技术分析接收信号即可实时获得振动的空间位置和频率、幅度等特性参数. 实验中成功实现了监测距离为 1.01 km 的分布式振动传感, 单点振动的空间分辨率小于 40 m. 另外, 从理论上分析并模拟了系统对多点同时振动进行检测和定位的可行性.

关键词: 分布式光纤振动传感, 环结构, 马赫-泽德干涉仪, 定位

PACC: 4281P, 0630M, 0760L

1. 引 言

光纤传感器可用于通讯、工程、物理参数测量等领域. 随着技术和需求的发展, 它由单点检测逐渐发展成为多点准分布式和全分布式检测^[1,2]. 全分布式光纤传感测量是利用光纤的一维空间连续特性进行测量的技术. 整个光纤长度上的任一点都是敏感点, 属于“海量”测量, 检测没有盲区, 并包容了光纤的不受电磁干扰, 灵敏度高, 可靠性高, 耐腐蚀, 体积小等诸多优点, 因此成为目前国内外研究的热点^[3]. 全分布式光纤振动传感(DOFSS)是分布式光纤传感的一个重要分支. 利用光纤的应力敏感特性, 连续实时地监测作用于光纤上的压力或光纤附近的振动. 干涉型光纤传感器具有极高的探测灵敏度, 但是在分布式传感中如何实现精确定位是一个难题. 目前国内还未见干涉型分布式光纤传感器的有关报道, 国外在这方面的研究取得了一定的进展, 大多是基于萨格纳克、马赫-泽德和迈克尔逊等干涉仪复用的方法, 而这些方案只能实现单点干扰的定位, 并且系统结构复杂、信号处理困难^[4-6].

本文报道了一种基于环形马赫-泽德干涉仪结构分布式光纤振动传感的新方法. 通过光纤耦合器

组成的分光单元在干涉仪光路中引入环结构, 将直线型干涉仪转化为环型回路, 使得一个马赫-泽德干涉仪中相向传输两路光波, 相当于构成双马赫-泽德干涉仪^[7]. 当振动作用于传感光纤时, 相向传输的两路直流光波同时产生相同的相位信号并沿不同的路径传输至光接收单元, 采用直流光动态定位技术分析接收信号即可实时获得振动信号的空间位置和频率、幅度等特性参数. 系统的优点是传感部分完全无源, 检测灵敏度和定位精度高, 结构简单, 成本低, 不受环境干扰和限制, 而且能够分辨光纤上同时出现的多点振动. 仅需在监控区域周围铺设一条普通光缆就能够保证在长距离范围内连续、实时地对干扰(挖掘、入侵、破坏等)进行分布式检测.

2. 实验装置和理论分析

2.1. 实验装置和工作原理

系统采用长程马赫-泽德干涉仪结构设计振动传感器. 当外界振动信号作用于传感光纤时, 传输的光信号受到相位调制, 表现为输出干涉信号的光强变化. 利用光相位调制型传感的高灵敏度特性, 使传感系统适用于微弱信号的探测. 为了克服传统干涉仪相干长度有限的不足, 采用单色性极好的 DFB 激

^{*} 科技部重大基础研究前期研究专项基金(批准号 2005CCA04200)资助的课题.

[†] E-mail: qzsun@mail.hust.edu.cn

光源作为光源,并采用双芯单模光缆做传感光缆,其中的两根等长度光纤分别作为马赫-泽德干涉仪的参考臂和信号臂^[8].这种设计能够提高干涉仪的相干长度,降低光相位噪声,使传感光纤长度可以达到几十甚至数百公里,突破了传统干涉仪的距离局限性.

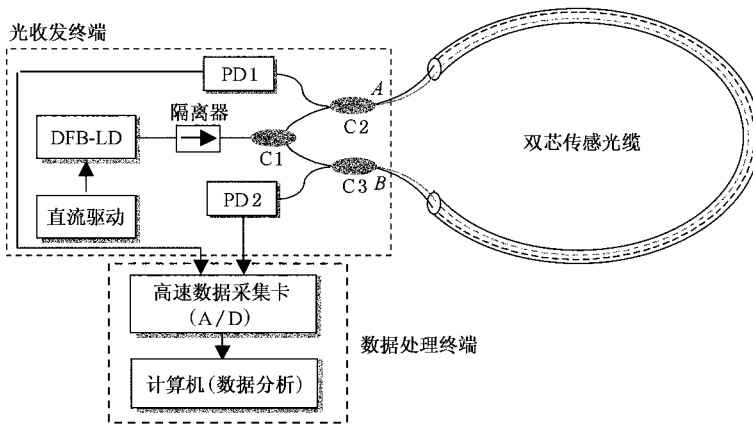


图1 分布式光纤振动传感系统的实验装置 DFB-LD为分布反馈半导体激光器;PD1,PD2为光电探测器;C1—C3为3dB光纤耦合器

整个系统的工作过程如下:直流电流驱动窄线宽的DFB-LD,发出功率恒定的直流高相干激光,经C1等功率分成两束:其中一束光波经C2等比例分光后分别输入传感光缆的两根光纤中,沿顺时针方向从光缆的始端A点传输至末端B点,再由C3汇合,两光纤中的光波在C3处发生干涉,干涉光强由PD2探测;同样的,另一束光波经C3输入传感光缆,但是沿逆时针方向从B点传输至A点,并在C2处发生干涉,干涉信号由PD1探测.因此C2、传感光缆和C3组成的马赫-泽德干涉仪在环结构下相当于光波相向传输的两个干涉仪,利用两个干涉仪的输出光强就可以获得传感光缆上任意位置处的振动频率、幅度和位置.

传统的马赫-泽德干涉仪为直线型结构,激光从干涉仪一端输入,在另一端发生干涉后输出.由于只有一端的输出信号,因此只能测量引起相位调制的振动大小,而无法分辨其作用位置.而这种双马赫-泽德干涉结构是一种环形干涉仪,通过引入环结构使一个马赫-泽德干涉仪相当于两个光波相向传输的干涉仪同步工作.虽然只有一个光源,但是有两路干涉信号输出,利用这两路信号,不仅能测量振动大小,还能够分辨作用的空间位置.解决了全分布光纤传感中的定位难题,实现真正的分布式检测.

基于环形马赫-泽德干涉仪的分布式光纤振动传感系统的实验装置如图1所示,主要由光收发终端、长程光缆和数据处理终端三部分构成.其中光收发终端和数据处理终端组成有源监测单元,为系统的工作核心,长程光缆组成无源传感单元,感知振动信号.

2.2. 直流定位原理

该系统的直流定位原理如图2所示.A为传感光纤的起点,B为传感光纤的终点,P为振动发生位置.其中A到B之间的光纤总长为L,L和光波在光纤中的传播速度 $V = c/n$ 已知,这里,c为光速,n为光纤芯折射率.设A和P两点之间的光纤长度为Z,则P至B之间的光纤长度为 $L-Z$.当传感光纤在P点发生一振动事件,传感光纤中顺时针方向(CW)传播和逆时针方向(CCW)传播的两束直流光波同时受到相同的相位调制,并继续沿各自的方向向前传播^[9]:

CW光信号的传输路径为P—B—探测器,经过距离

$$L_{cw} = L - Z, \quad (1)$$

CCW光信号的传输路径为P—A—探测器,经过距离

$$L_{ccw} = Z, \quad (2)$$

由于传输路径不同,两束光波到达监测终端的时间不同,两路信号波形之间的时间差

$$\Delta T = (L - 2Z)V, \quad (3)$$

测量出 ΔT 即可利用公式

$$Z = \left(L - \Delta T \cdot \frac{c}{n} \right) / 2 \quad (4)$$

精确计算出振动发生的位置.

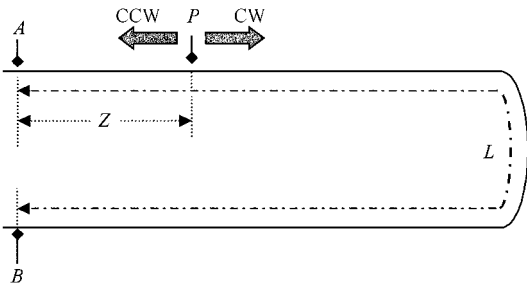


图2 系统直流定位原理

2.3. 时间差测量方法

由于相向传输的两束光由同一激光器分振幅得到,而且受到完全相同的振动作用,因此在传感光纤两端探测到的两路干涉信号具有非常强的自然相关性.时间差可以通过抑噪能力非常强的相关运算精确获得^[10].两探测器的输出信号可以描述如下:

$$\begin{cases} y_1(t) = \alpha_1 S(t) + n_1(t), \\ y_2(t) = \alpha_2 S(t - \Delta T) + n_2(t), \end{cases} \quad (5)$$

式中, $S(t)$ 是作用于传感光纤上的振动信号, α_1 和 α_2 是比例因子, $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 代表噪声, ΔT 为两路输出信号之间的时间差. $S(t)$ 、 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 是完全不相关的随机过程,因此 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 之间的互相关函数为

$$\begin{aligned} R_{y_1 y_2}(\tau) &= \int_t y_1(t) y_2(t + \tau) dt \\ &= \alpha_1 \alpha_2 \int_t S(t) S(t - \Delta T + \tau) dt \\ &\quad + \alpha_1 \int_t S(t) n_2(t + \tau) dt \\ &\quad + \alpha_2 \int_t n_1(t) S(t - \Delta T + \tau) dt \\ &\quad + \int_t n_1(t) n_2(t + \tau) dt \\ &= \alpha_1 \alpha_2 R_S(\tau - \Delta T), \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $R_S(\tau - \Delta T)$ 为 $S(t)$ 的自相关函数.

实际的传感系统中,光电探测器的输出信号要经过A/D转换由连续模拟信号转化为离散数字信号.假设A/D的采样周期为 T_s ,则传感器的两路测量信号经同步采样后可分别表述为 $y_1(nT_s)$ 和 $y_2(nT_s)$,其中 n 为整数.相应的互相关函数可以写为

$$R_{y_1 y_2}(mT_s) = \frac{1}{N} \sum_{N=0}^{N-1} y_1(nT_s) y_2(nT_s + mT_s) \quad (7)$$

式中, N 为采样长度, m 为整数.

根据自相关函数的性质,振动信号 $S(t)$ 的自相关函数 $R_S(\tau)$ 满足如下不等式,即

$$R_S(\tau) \leq R_S(0), \quad (8)$$

由(6)(7)(8)式可知,当满足

$$mT_s = \tau = \Delta T \quad (9)$$

时,互相关函数 $R_{y_1 y_2}$ 达到最大值.

因此,只要测出传感器两路输出信号之间数字互相关峰值对应的序号 m_0 ,即可由公式

$$\Delta T = m_0 T_s \quad (10)$$

得到待测的时间差.

根据计算(10)式 ΔT 的测量误差由 T_s 决定.在实际测量系统中,A/D采样周期不可能无限小, $m_0 T_s$ 只能表达离散的值.如果实际的时间差不是 T_s 的整数倍,则测量误差为

$$R_{\Delta T} = \mp T_s. \quad (11)$$

由(4)和(11)式可知,系统定位误差为

$$\begin{aligned} R_z &= \frac{1}{2} \left(R_{\Delta T} \frac{c}{n} \right) \\ &= \mp \frac{T_s c}{2n}. \end{aligned} \quad (12)$$

在(4)–(10)式的描述中,对振动信号 $S(t)$ 并没有特别的限制,因此这种定位算法适用于任意类型的单点振动信号.不管是只有单个频率的正弦振动发生在某点,还是多个频率的正弦振动同时发生在某点,都可用上文所述的单点定位算法测算振动作用的空间位置.

2.4. 多点振动的定位原理

实际应用的分布式光纤振动传感系统中,监测距离可以达到几千米甚至几十、上百千米.在这么长的光纤沿线同时出现多点振动的情况是不可避免的.因此研究能够测量和定位多点振动的分布式传感系统是非常必要的.基于上述马赫-泽德干涉仪结构,结合频域分析和互相关算法同样可以实现多点定位.

按照级数展开原理,任何振动信号都可以表达成为正弦级数.即多个不同频率的正弦信号的组合,因此问题可以简化为简谐振动(即按照特定频率作正弦规律变化的振动)的检测.建立多点振动模型如下:长距离的传感光纤上共有 N (N 是整数)个点同时受到振动作用.每个振动信号的频率为 f_i ($1 \leq i \leq N$), $f_i \neq f_j$ ($1 \leq i, j \leq N; i \neq j$),作用位置为 Z_i ,相应的时间差为 ΔT_i .针对此模型的多点定位原理如图

3 所示,当传感光纤沿线多点同时受到非同频简谐振动作用时,两探测器的输出经解调后恢复的信号是多个振动信号的叠加,如下式描述

$$\begin{cases} y_1(t) = \sum_{i=0}^N S(f_i, t) + n_1(t), \\ y_2(t) = \sum_{i=0}^N S(f_i, t - \Delta T_i) + n_2(t), \end{cases} \quad (13)$$

首先,采用窄带快速傅里叶变换(FFT)对其中一路解调信号 $y_1(t)$ 进行频谱分析,得到 $y_1(t)$ 的功率谱.然后,设定功率谱的幅度门限,滤除功率幅度在门限以下的噪声项所包含的频率分量,从而得到所有振动分量的个数 N 和各分量的频率 f_i ($1 \leq i \leq N$).以某个频率为 f_i 的振动分量为例说明其定位方法.设计两个完全相同的窄带带通数字滤波器,响应带宽可根据频率分辨要求设定(典型值为 $1 \sim 20$ Hz),中心频率设置为 f_i .因为滤波器的中心频率动态地随分析所得的振动分量频率保持一致,因此称为自适应窄带带通滤波器. $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 分别通过这两个窄带带通滤波器,经过信号滤波分离出频率为 f_i 的振动分量,即 $S(f_i, t)$ 和 $S(f_i, t - \Delta T_i)$.最后按照(5)–(10)式计算 $S(f_i, t)$ 和 $S(f_i, t - \Delta T_i)$ 之间的时间差 ΔT_i ,并根据(4)式确定频率为 f_i 的振动发生位置 Z_i .对于发生在其他位置的振动分量,只需根据振动频率设置滤波器的中心频率,就可用同样的方法测算其空间位置.因此,根据多点振动的频率分析结果动态设计两组完全相同的数字滤波器阵列,每组滤波器阵列包含 N 个窄带带通数字滤波器,每个滤波器的中心频率分别等于其中一个振动分量的频率. $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 分别通过这两组相同的滤波器阵列,分离出各个频率的振动分量信号,再根据单点定位算法就能够确定每个振动的发生位置,实现多点振动定位.

在上面的讨论中,为了简化模型,我们假设每点受到的振动均为单个频率的正弦振动,而实际的振动往往是多个正弦振动的合成,因此需要考虑某点受到多个正弦振动的情况.图3描述的多点振动检测思路是通过频率分离实现各点振动的分别探测和定位,算法只对各点的振动频率提出要求,而对作用位置并无要求.因此,如果在某点受到多个正弦振动,仍然可以采用该算法进行处理.此时将测算出有多个正弦振动发生在同一个位置,也就说明在这点受到了多个正弦振动的作用.

值得注意的是,为了能够分别确定每个振动的

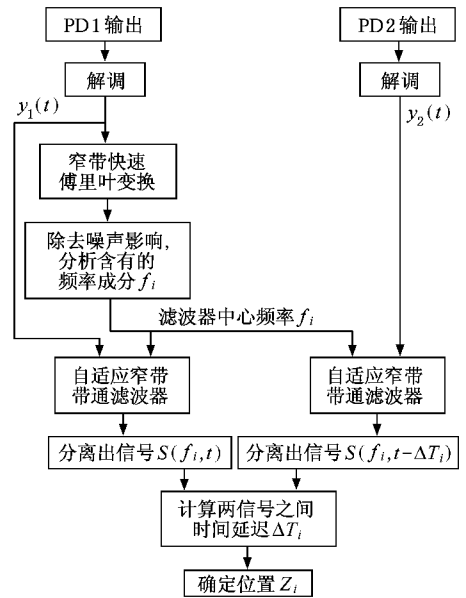


图3 多点振动定位算法的原理框图

位置.在多点振动定位中要求每点振动的频率不同,频率接近(频率差 $\Delta f <$ 窄带带通数字滤波器的响应带宽)的多点振动不能正确地确定振动发生的位置.

3. 实验结果和讨论

基于图1所示的系统原理结构构建实验装置:DFB激光器作光源,输出光功率为 1 mW,工作波长为 1550 nm, 20 dB 线宽为 0.25 nm,使用标准 3 dB 光耦合器,工作波长为 1550 nm;采用双芯单模通信光缆作传感光缆,用光时域反射仪(OTDR)测得光纤长度为 1.01 km,纤芯折射率为 1.44 ;其他的传输光纤使用普通单模光纤,长度忽略不计;两终端的输出光均由高灵敏度光接收前置放大器组件(PIN-FET)探测并放大,响应度为 0.96 A/W, 3 dB 带宽为 10 MHz;选择 4 通道高速同步数据采集卡, A/D 分辨率为 12 bit,采样速率为 5 Mbit/s,采样长度 64 kByte;正弦振荡电路驱动压电陶瓷换能器(PZT)模拟简谐振动源;用 LabView 软件编写信号采集、定位算法及数字滤波器.

在上述实验条件下,我们进行了单点简谐振动的传感测量.传感光缆上共有 8 个测试点,分布在 0 — 1010 m 范围内的不同位置,分别在每个位置处施加频率为 215 Hz 的振动信号,每个测试点共测量 6 个样本值.

由图4可以看出系统具有良好的可重复性和高

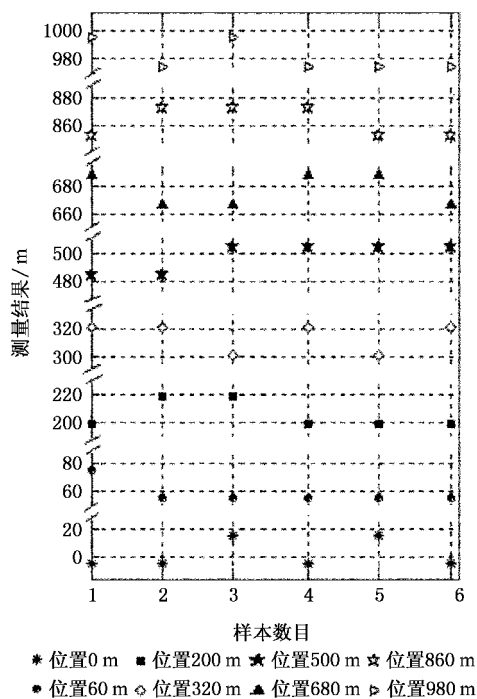


图 4 8 个不同测试点在单点振动(频率 215 Hz)条件下的测量结果

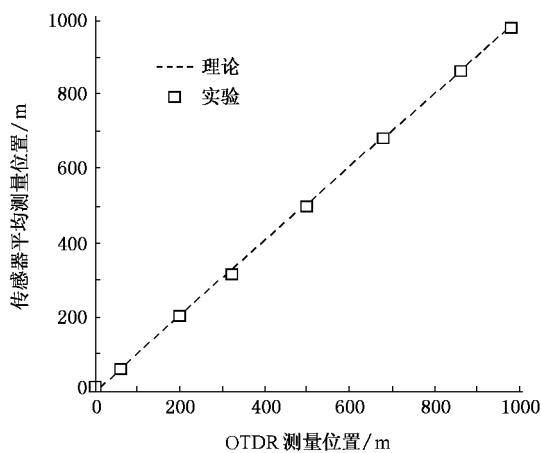


图 5 传感器平均测量值与振动位置真实值的关系曲线

空间分辨率,定位误差小于 ± 20 m,即空间分辨率小于 40 m,这与按照(12)式计算得到的理论误差 ± 20.8 m 一致.图 5 进一步给出了每个振动测试点的真实位置和 6 次实验测量结果的平均值,实验结果和理论能够很好地吻合.

根据实验室的现有条件(仅能提供一个 PZT 振动源)目前还无法进行多点同时振动的实验研究,因此这里给出多点振动检测的仿真结果.利用图形化编程语言 LabView 模拟多点振动信号和图 3 所示的

多点定位算法,其中自适应滤波器采用带宽为 40 Hz 的 8 阶巴特沃斯数字带通滤波器,设定传感光纤总长度为 1.01 km.仿真中以光纤上两点同时出现非同频振动的情况作为代表,分别设定不同的振动频率和作用位置,仿真模拟的定位结果如图 6 所示.图中 A、B、C、D 对应四次仿真结果,每次仿真设定的两振动点的位置和频率不相同.由图 6 可见,仿真结果与理论吻合得很好,这说明文中所述的多点振动的定位方法是可行的.

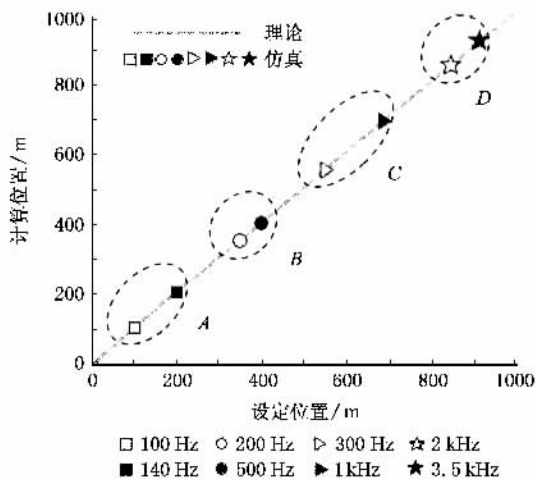


图 6 两点同时振动情况下的模拟定位结果

4. 结 论

采用环结构马赫-泽德干涉仪和直流光动态定位技术,提出并验证了一种新颖的全分布式光纤振动传感系统,其特点是仅需一条单模光缆就能够不间断地感测整个光纤长度上任意点的振动信号,获得实时动态的振动信息.理论上系统的传感长度和定位精度均不受限制,可实现长距离全分布式传感检测.但在实际应用中,传感长度取决于光源功率和探测器灵敏度,定位精度取决于数据采集卡的采样速率和探测信号的信噪比.实验中成功实现了监测距离为 1.01 km 的分布式振动传感,单点振动的空间分辨率小于 40 m.另外,从理论上分析和模拟仿真了传感光纤沿线同时出现多点振动时对各振动点进行检测和定位的可行性.当然,要实现真正的全分布检测,还需要通过提高采样速率及抑制光相位噪声来进一步提高定位精度,并进行多点振动的实验研究.

- [1] Zhou X J , Du D , Gong J J 2005 *Acta Pyhs. Sin.* **54** 2106(in Chinese) [周晓军、杜 东、龚俊杰 2005 物理学报 **54** 2106]
- [2] Guo W G , Lv F Y 2007 *Acta Pyhs. Sin.* **56** 308(in Chinese) [郭文刚、吕福云 2007 物理学报 **56** 308]
- [3] Luo S J , Guo W G , Yang X F , Lü F Y , Lü C 2006 *Acta Pyhs. Sin.* **55** 1889(in Chinese) [罗绍均、郭文刚、杨秀峰、吕福云、吕 超 2006 物理学报 **55** 1889]
- [4] Chtcherbakov A A , Swart P L , Spammer S J 1997 *Proc. Optical Fiber Sensor-12* **16** 516
- [5] Spammer S J , Swart P L , Chtcherbakov A A 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 972
- [6] Russell S J , Brady K R C , Darkin J P 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 205
- [7] Juan C J , Eric W M , Kyoo N C , Henry F T 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 2081
- [8] Sun Q Z , Liu D M , Liu H R , He Y , Yuan J G 2005 *Proc. Advan. Laser Techn.* **6344** 63440K
- [9] Bogdan K 2002 *IEEE Trans. Modern Problems of Radio Engineering , Telecommunications and Computer Science February* **18-23** 128
- [10] Zhang L , Wu X L 2005 *IEEE Trans. Acoustics , Speech , and Signal Processing* **4** 981

A novel ring structure-based distributed optical fiber vibration sensing system^{*}

Sun Qi-Zhen^{1)†} Liu De-Ming¹⁾ Wang Jian¹⁾²⁾

1) *School of Optoelectronic Science and Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China)*

2) *Wuhan National Laboratory for Optoelectronics , Wuhan 430074 , China)*

(Received 24 January 2007 ; revised manuscript received 8 February 2007)

Abstract

A novel distributed optical fiber vibration sensing system is proposed and demonstrated , using a ring structure-based Mach-Zehnder interferometer (MZI). The direct current light-based real-time and dynamic locating technique is exploited. By introducing the ring structure into the interferometer , the linear interferometer is changed into ring type , resulting in two counter-propagating light waves , thus one MZI equally operates as two. When a vibration acts on the sensing fiber , the counter-propagating signals produce identical phase-changes simultaneously , which propagate along different paths to optical receivers. With the help of digital processing technologies to analyze the received signals , the characteristic parameters of vibration , including the spatial position , frequency and amplitude can be achieved in real time. A spatial resolution better than 40 m is successfully verified in a 1.01 km prototype system of single vibration. Furthermore , the feasibility of detecting and locating multiple vibrations is theoretically analyzed and simulated.

Keywords : distributed optical fiber sensing of vibration , ring structure , Mach-Zehnder interferometer , locating

PACC : 4281P , 0630M , 0760L

^{*} Project supported by the Special Program for Key Basic Research of the Ministry of Science and Technology , China (Grant No. 2005CCA04200).

[†] E-mail : qzsun@mail.hust.edu.cn