



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115752696 A

(43) 申请公布日 2023. 03. 07

(21) 申请号 202211296222.3

(22) 申请日 2022.10.21

(71) 申请人 深圳大学

地址 518060 广东省深圳市南山区南海大道3688号

(72) 发明人 陈宇徽 刘宽 王义平

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事务所(普通合伙) 44268

专利代理师 陈专

(51) Int. Cl.

G01H 9/00 (2006.01)

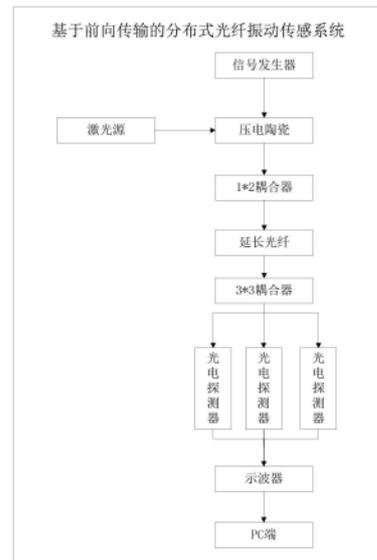
权利要求书3页 说明书11页 附图6页

(54) 发明名称

基于前向传输的分布式光纤振动传感系统及信号处理方法

(57) 摘要

本发明公开了基于前向传输的分布式光纤振动传感系统及信号处理方法,系统包括:激光光源、信号发生器、压电陶瓷、1\*2耦合器、延长光纤、3\*3耦合器、光电探测器、示波器和PC端;激光光源发射激光,经过压电陶瓷产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制,传输至1\*2耦合器将信号光分为两路,分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,产生干涉信号传输至3\*3耦合器将干涉信号进行相位解调,解调的光信号经过光电探测器转变为电信号被示波器所接收;PC端对电信号进行解调处理得到传感结果。本发明基于前向传输的分布式光纤振动传感系统具有更高的信噪比,实现了更高的传感精度,同时也降低了对激光光源相干长度的要求。



1. 一种基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其特征在于,所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统包括:激光源、信号发生器、压电陶瓷、1\*2耦合器、延长光纤、3\*3耦合器、光电探测器、示波器和PC端;所述压电陶瓷分别与所述激光源和所述信号发生器连接,所述压电陶瓷、所述1\*2耦合器、所述延长光纤、所述3\*3耦合器、所述光电探测器、所述示波器和所述PC端依次连接;

所述激光源用于发射激光,经过所述压电陶瓷产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制,所述压电陶瓷的振动幅度和振动频率由所述信号发生器控制;

所述压电陶瓷用于将包含有振动信息的信号光传输至所述1\*2耦合器,所述1\*2耦合器用于将所述信号光分为两路,分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,产生干涉信号传输至所述3\*3耦合器;

所述3\*3耦合器用于将所述干涉信号进行相位解调,解调的光信号经过所述光电探测器转变为电信号被所述示波器所接收;

所述PC端用于对所述示波器采集的所述电信号进行解调处理得到传感结果。

2. 根据权利要求1所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其特征在于,所述光电探测器为三个,三个所述光电探测器分别与所述3\*3耦合器和所述示波器连接;

所述3\*3耦合器将所述干涉信号分为三路相位相差 $120^\circ$ 的光信号,三路光信号再分别由三个所述光电探测器转换为电信号。

3. 根据权利要求1所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其特征在于,所述1\*2耦合器和所述3\*3耦合器通过不同长度的两个延长光纤连接形成一个马赫增德尔干涉仪。

4. 根据权利要求1或3所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其特征在于,所述延长光纤的长度用于确定所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统的最小空间分辨率。

5. 根据权利要求1所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其特征在于,所述PC端通过LabVIEW软件对接收到的数据进行一系列数字处理,对收集到的信号进行实时的采样、观测和处理。

6. 根据权利要求1所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其特征在于,所述激光源的波长为1550nm。

7. 根据权利要求1所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其特征在于,所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统支持至少100km的传感范围。

8. 一种基于权利要求1-7任一项所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统的信号处理方法,其特征在于,所述信号处理方法包括:

所述激光源发射激光至所述压电陶瓷,经过所述压电陶瓷产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制,所述压电陶瓷的振动幅度和振动频率由所述信号发生器控制;

所述压电陶瓷将包含有振动信息的信号光传输至所述1\*2耦合器,所述1\*2耦合器用于将所述信号光分为两路,分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,产生干涉信号传输至所述3\*3耦合器;

所述3\*3耦合器将所述干涉信号进行相位解调,解调的光信号经过所述光电探测器转变为电信号被所述示波器所接收;

所述PC端对所述示波器采集的所述电信号进行解调处理得到传感结果。

9. 根据权利要求8所述的信号处理方法,其特征在於,所述3\*3耦合器将所述干涉信号进行相位解调,具体包括:

所述3\*3耦合器对探测光在传感光纤两个位置的前向信号光的相位差进行解调,探测光纤两个位置之间的距离为马赫-曾德干涉仪的延迟光纤长度;

在传感光纤没有受到扰动时,探测光在传感光纤A和B位置产生的光场 $E_A$ 和光场 $E_B$ 如下式所示:

$$E_A = E_{A_0} \exp[j(\omega t + \varphi_A)];$$

$$E_B = E_{B_0} \exp[j(\omega t + \varphi_B)];$$

其中, $E_{A_0}$ 、 $E_{B_0}$ 分别为A、B两个位置的光场振幅, $j$ 为虚数, $\omega$ 为角频率, $t$ 表示时间, $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ 分别为A、B两个位置的相位;

光场 $E_A$ 和光场 $E_B$ 通过所述1\*2耦合器、所述延长光纤和所述3\*3耦合器发生干涉,通过所述3\*3耦合器分为三路相位相差 $120^\circ$ 的光信号,分别由三个所述光电探测器检测,检测到的电场信号 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 分别表示为:

$$E_1 = M + N \cos \varphi_1;$$

$$E_2 = M + N \cos(\varphi_1 + \frac{2}{3}\pi);$$

$$E_3 = M + N \cos(\varphi_1 - \frac{2}{3}\pi);$$

其中, $M$ 、 $N$ 和待测相位 $\varphi$ 如下式所示:

$$M = \frac{1}{3} R (E_{A_0}^2 + E_{B_0}^2);$$

$$N = R E_{A_0} E_{B_0};$$

$$\varphi_1 = (\varphi_B - \varphi_A);$$

其中, $R$ 为光电探测器响应系数;

根据三路电场信号计算传感光纤A和B两个位置信号光的相位差。

10. 根据权利要求9所述的信号处理方法,其特征在於,所述根据三路电场信号计算传感光纤A和B两个位置信号光的相位差,具体包括:

计算三路电场信号的均值 $K$ 为:

$$K = \frac{1}{3} (E_1 + E_2 + E_3);$$

对每一路电场信号去直流,得到:

$$I_1 = N \cos \varphi_1;$$

$$I_2 = N \cos(\varphi_1 + \frac{2}{3}\pi);$$

$$I_3 = N \cos(\varphi_1 - \frac{2}{3}\pi);$$

$I_1$ 、 $I_2$ 和 $I_3$ 的平方和 $J$ 为:

$$J = \frac{3}{2} N^2 ;$$

将去直流后的电场信号用同样的微分器进行微分,得到:

$$I_1 = N \dot{\varphi}_t \sin \varphi_t ;$$

$$I_2 = N \dot{\varphi}_t \sin(\varphi_t + \frac{2}{3}\pi) ;$$

$$I_3 = N \dot{\varphi}_t \sin(\varphi_t - \frac{2}{3}\pi) ;$$

再将每一路电场信号与另外两路微分的差相乘,再求和得到:

$$S = \frac{3\sqrt{3}}{2} N^2 \dot{\varphi}_t ;$$

最后用J除S再积分,得到微分交叉相乘算法计算得出的相位输出结果:

$$\varphi_{out} = \sqrt{3}\varphi_t ;$$

对最终的相位输出结果进行滤波,去除积分过程产生的直流量。

## 基于前向传输的分布式光纤振动传感系统及信号处理方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及光纤传感技术领域,尤其涉及一种基于前向传输的分布式光纤振动传感系统及信号处理方法。

### 背景技术

[0002] 海洋地震会对沿海城市、海洋生物、石油钻井平台和海底互联网电缆产生重大影响。天然气水合物作为一种具有上、下游减排双重功能的低碳能源,可以有效减排二氧化碳的同时又可以将其排放的二氧化碳进行转化,而且是一种对环境友好的减排技术,从长远看,具有很强的应用前景。天然气水合物在世界范围内广泛存在,初步估算它的碳资源总量是全球所有化石燃料中碳含量的两倍,其矿藏量估计为 $1.5 \times 10^{16}$ 至 $2.0 \times 10^{16}$ /立方米。据预测,我国天然气水合物资源量将超过2000亿吨油当量,被视为是重要的新能源。

[0003] 使用声波/振动传感器对海底进行大面积远程监测,可以实时反馈海洋地震或可燃气体水合物开采引起的海底局部环境变化,从而做出更明智的决策、更好的安全性和最佳的产量。超过120万km的光缆在海底纵横交错,这是实现互联网的隐藏基础设施。如果这些光缆内的光纤除了正常功能外,也可以变成分布式地震探测传感器,那将是一个重大突破。

[0004] 例如,光时域反射(Optical Time-Domain Reflectometer,OTDR)技术是目前应用最广泛的分布式光纤传感技术,利用光纤芯材料的限制引起本征折射率不均匀而导致光波产生瑞利散射,再结合脉冲时延定位,进而实现探测整个光纤沿线各个位置的损耗状态,实现分布式传感。典型的OTDR系统等效结构图如图1所示,利用传感光纤的后向瑞利散射光作为输入光信号进行强度解调,存在传感距离有限和检测精度不高的缺陷。相敏光时域反射计( $\phi$ -OTDR,也称为分布式声学传感或DAS)专为中等范围和中等空间分辨率而设计。具有长传感光纤的远程传感系统可以减少在电力、重量和稳定性方面支持检测系统所需的海上资源和维护,这种解决方案可降低成本并提高可靠性。前向传输型传感是一种相对较新的分布式传感方法,它与众所周知的光学反射测量方法有根本的不同,好处包括在更远距离传感和远程环境中更简单的安装和维护。然而,现有设计依赖于昂贵的高相干激光源和复杂的系统布局。

[0005] 因此,现有技术还有待于改进和发展。

### 发明内容

[0006] 本发明的主要目的在于提供一种基于前向传输的分布式光纤振动传感系统及信号处理方法,旨在解决传统分布式光纤振动传感系统存在检测信号弱、信噪比低、传感距离有限、空间分辨率低的问题。

[0007] 为实现上述目的,本发明提供一种基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统包括:

[0008] 激光源、信号发生器、压电陶瓷、1\*2耦合器、延长光纤、3\*3耦合器、光电探测器、示

波器和PC端;所述压电陶瓷分别与所述激光源和所述信号发生器连接,所述压电陶瓷、所述1\*2耦合器、所述延长光纤、所述3\*3耦合器、所述光电探测器、所述示波器和所述PC端依次连接;

[0009] 所述激光源用于发射激光,经过所述压电陶瓷产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制,所述压电陶瓷的振动幅度和振动频率由所述信号发生器控制;

[0010] 所述压电陶瓷用于将包含有振动信息的信号光传输至所述1\*2耦合器,所述1\*2耦合器用于将所述信号光分为两路,分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,产生干涉信号传输至所述3\*3耦合器;

[0011] 所述3\*3耦合器用于将所述干涉信号进行相位解调,解调的光信号经过所述光电探测器转变为电信号被所述示波器所接收;

[0012] 所述PC端用于对所述示波器采集的所述电信号进行解调处理得到传感结果。

[0013] 所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其中,所述光电探测器为三个,三个所述光电探测器分别与所述3\*3耦合器和所述示波器连接;

[0014] 所述3\*3耦合器将所述干涉信号分为三路相位相差 $120^\circ$ 的光信号,三路光信号再分别由三个所述光电探测器转换为电信号。

[0015] 所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其中,所述1\*2耦合器和所述3\*3耦合器通过不同长度的两个延长光纤连接形成一个马赫增德尔干涉仪。

[0016] 所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其中,所述延长光纤的长度用于确定所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统的最小空间分辨率。

[0017] 所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其中,所述PC端通过LabVIEW软件对接收到的数据进行一系列数字处理,对收集到的信号进行实时在线的采样、观测和处理。

[0018] 所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其中,所述激光源的波长为1550nm。

[0019] 所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统,其中,所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统支持至少100km的传感范围。

[0020] 此外,为实现上述目的,本发明还提供一种基于所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统的信号处理方法,其中,所述信号处理方法包括:

[0021] 所述激光源发射激光至所述压电陶瓷,经过所述压电陶瓷产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制,所述压电陶瓷的振动幅度和振动频率由所述信号发生器控制;

[0022] 所述压电陶瓷将包含有振动信息的信号光传输至所述1\*2耦合器,所述1\*2耦合器用于将所述信号光分为两路,分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,产生干涉信号传输至所述3\*3耦合器;

[0023] 所述3\*3耦合器将所述干涉信号进行相位解调,解调的光信号经过所述光电探测器转变为电信号被所述示波器所接收;

[0024] 所述PC端对所述示波器采集的所述电信号进行解调处理得到传感结果。

[0025] 所述的信号处理方法,其中,所述3\*3耦合器将所述干涉信号进行相位解调,具体包括:所述3\*3耦合器对探测光在传感光纤两个位置的前向信号光的相位差进行解调,探测光纤两个位置之间的距离为马赫-曾德干涉仪的延迟光纤长度;

[0026] 在传感光纤没有受到扰动时,探测光在传感光纤A和B位置产生的光场 $E_A$ 和光场 $E_B$ 如下式所示:

$$[0027] \quad E_A = E_{A_0} \exp[j(\omega t + \varphi_A)];$$

$$[0028] \quad E_B = E_{B_0} \exp[j(\omega t + \varphi_B)];$$

[0029] 其中, $E_{A_0}$ 、 $E_{B_0}$ 分别为A、B两个位置的光场振幅, $j$ 为虚数, $\omega$ 为角频率, $t$ 表示时间, $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ 分别为A、B两个位置的相位;

[0030] 光场 $E_A$ 和光场 $E_B$ 通过所述1\*2耦合器、所述延长光纤和所述3\*3耦合器发生干涉,通过所述3\*3耦合器分为三路相位相差 $120^\circ$ 的光信号,分别由三个所述光电探测器检测,检测到的电场信号 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 分别表示为:

$$[0031] \quad E_1 = M + N \cos \varphi_t;$$

$$[0032] \quad E_2 = M + N \cos(\varphi_t + \frac{2}{3}\pi);$$

$$[0033] \quad E_3 = M + N \cos(\varphi_t - \frac{2}{3}\pi);$$

[0034] 其中, $M$ 、 $N$ 和待测相位 $\varphi_t$ 如下式所示:

$$[0035] \quad M = \frac{1}{3}R(E_{A_0}^2 + E_{B_0}^2);$$

$$[0036] \quad N = RE_{A_0}E_{B_0};$$

$$[0037] \quad \varphi_t = (\varphi_B - \varphi_A);$$

[0038] 其中, $R$ 为光电探测器响应系数;

[0039] 根据三路电场信号计算传感光纤A和B两个位置信号光的相位差。

[0040] 所述的信号处理方法,其中,所述根据三路电场信号计算传感光纤A和B两个位置信号光的相位差,具体包括:

[0041] 计算三路电场信号的均值 $K$ 为:

$$[0042] \quad K = \frac{1}{3}(E_1 + E_2 + E_3);$$

[0043] 对每一路电场信号去直流,得到:

$$[0044] \quad I_1 = N \cos \varphi_t;$$

$$[0045] \quad I_2 = N \cos(\varphi_t + \frac{2}{3}\pi);$$

$$[0046] \quad I_3 = N \cos(\varphi_t - \frac{2}{3}\pi);$$

[0047]  $I_1$ 、 $I_2$ 和 $I_3$ 的平方和 $J$ 为:

$$[0048] \quad J = \frac{3}{2}N^2;$$

[0049] 将去直流后的电场信号用同样的微分器进行微分,得到:

$$[0050] \quad \dot{I}_1 = N \dot{\varphi}_t \sin \varphi_t;$$

$$[0051] \quad I_2 = N \dot{\varphi}_t \sin(\varphi_t + \frac{2}{3}\pi);$$

$$[0052] \quad I_3 = N \dot{\varphi}_t \sin(\varphi_t - \frac{2}{3}\pi);$$

[0053] 再将每一路电场信号与另外两路微分的差相乘,再求和得到:

$$[0054] \quad S = \frac{3\sqrt{3}}{2} N^2 \dot{\varphi}_t;$$

[0055] 最后用J除S再积分,得到微分交叉相乘算法计算得出的相位输出结果:

$$[0056] \quad \varphi_{out} = \sqrt{3}\varphi_t;$$

[0057] 对最终的相位输出结果进行滤波,去除积分过程产生的直流量。

[0058] 本发明中,所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统包括:激光源、信号发生器、压电陶瓷、1\*2耦合器、延长光纤、3\*3耦合器、光电探测器、示波器和PC端;所述压电陶瓷分别与所述激光源和所述信号发生器连接,所述压电陶瓷、所述1\*2耦合器、所述延长光纤、所述3\*3耦合器、所述光电探测器、所述示波器和所述PC端依次连接;所述激光源用于发射激光,经过所述压电陶瓷产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制,所述压电陶瓷的振动幅度和振动频率由所述信号发生器控制;所述压电陶瓷用于将包含有振动信息的信号光传输至所述1\*2耦合器,所述1\*2耦合器用于将所述信号光分为两路,分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,产生干涉信号传输至所述3\*3耦合器;所述3\*3耦合器用于将所述干涉信号进行相位解调,解调的光信号经过所述光电探测器转变为电信号被所述示波器所接收;所述PC端用于对所述示波器采集的所述电信号进行解调处理得到传感结果。本发明的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统具有更高的信噪比,实现比传统方式更高的传感精度,同时也降低了对激光光源相干长度的要求。

## 附图说明

[0059] 图1典型的OTDR系统等效结构图;

[0060] 图2是本发明基于前向传输的分布式光纤振动传感系统的较佳实施例的原理示意图;

[0061] 图3是本发明基于前向传输的分布式光纤振动传感系统的较佳实施例的基于前向传输的分布式光纤振动传感单端解调原理图;

[0062] 图4是本发明基于基于前向传输的分布式光纤振动传感系统的信号处理方法的较佳实施例的流程图;

[0063] 图5是本发明基于基于前向传输的分布式光纤振动传感系统的信号处理方法的较佳实施例中3\*3耦合器解调法信号处理流程的示意图;

[0064] 图6是本发明基于时延估计定位双端解调原理图;

[0065] 图7是本发明微分交叉相乘相位解调labview仿真图;

[0066] 图8是本发明LMS自适应滤波算法仿真图;

[0067] 图9是本发明FFT频谱图;

[0068] 图10是基于互相关时延估计算法定位图。

### 具体实施方式

[0069] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚、明确，以下参照附图并举实施例对本发明进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0070] 本发明先介绍扰动信号引起光在光纤中的相移，当预埋传感光纤受扰动源压力、热传递或者弯折时，由于光纤的弹光效应与热应变效应，该段光纤的折射率、长度、直径等物理参数将随之改变，进而导致纤芯中的传输光产生包含扰动信息的相位偏移，即实现外界扰动对传输光相位的调制。若传感光纤总长为L，折射率为n，光波长为 $\lambda$ ，某固定频率光波通过传感光纤的相移 $\varphi$ 表示为：

$$[0071] \quad \varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} = \beta L;$$

[0072] 其中， $\beta$ 为传播常数，受光纤有效折射率与直接影响；

[0073] 当存在外界扰动时，相移量 $\Delta\varphi$ 表示为：

$$[0074] \quad \Delta\varphi = \beta\Delta L + L\Delta\beta = \beta L \frac{\Delta L}{L} + L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n + L \frac{\partial\beta}{\partial D} \Delta D;$$

[0075] 其中， $\beta L \frac{\Delta L}{L}$ 、 $L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n$ 、 $L \frac{\partial\beta}{\partial D} \Delta D$ 分别表示为弹性形变致传感光纤长度改变而引起的相移、弹光效应致光纤折射率改变而引起的相移、泊松效应致光纤纤芯直径改变引起的相移， $\Delta L$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta n$ 、 $\Delta D$ 分别表示为光纤长度变化量、传播常数变化量、折射率变化量、光纤纤芯直径变化量。

[0076] 由于 $L \frac{\partial\beta}{\partial D} \Delta D$ 比 $\beta L \frac{\Delta L}{L}$ 和 $L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n$ 小两个数量级以上，故略去，即相移量 $\Delta\varphi$ 近似表示为：

$$[0077] \quad \Delta\varphi \approx \beta L \frac{\Delta L}{L} + L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n = \Delta\varphi_e + \Delta\varphi_s;$$

[0078] 其中， $\Delta\varphi_e$ 和 $\Delta\varphi_s$ 分别表示弹性形变致传感光纤长度改变而引起的相移和弹光效应致光纤折射率改变而引起的相移。

[0079] 对于弹性形变致传感光纤长度改变而引起的相移 $\Delta\varphi_e$ ，根据应变理论以传感光纤各方向应变变量 $\varepsilon_i$ 描述，设 $\varepsilon$ 为传感光纤所受正应变矢量，当传感光纤受纵向压强P的外界扰动时有：

$$[0080] \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P(1-2\mu)/E \\ -P(1-2\mu)/E \\ -P(1-2\mu)/E \end{bmatrix};$$

[0081] 其中， $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ 分别为传感光纤在X、Y、Z三个方向的应变变量，E为传感光纤的杨氏弹性模量， $\mu$ 为光纤泊松比，Z方向的长度变化所引起相位变化为：

$$[0082] \quad \Delta\varphi_e = -\beta LP(1-2\mu)/E = \beta\varepsilon_z L。$$

[0083] 对于弹光效应致光纤折射率改变而引起的相移 $\Delta\varphi_s$ ，根据弹性力学原理，由石英光

纤的弹光张量和主应变张量得到折射率变化与所受各向应变 $\varepsilon_i$ 的关系为:

$$[0084] \quad \begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_m \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

[0085] 其中,  $P_m = (P_{11} - P_{12})/2$ ,  $\Delta B_i = -2 \Delta n_i / n_i^3$ , 四阶弹光张量  $P_{ij}$  为常数。

[0086] 对于石英光纤有  $\varepsilon_x = \varepsilon_y$ ,  $n_i = n$ , 故得到传感光纤在 X、Y、Z 三个方向折射率变化量为:

$$[0087] \quad \begin{cases} \Delta n_x = -\frac{1}{2} n^3 (P_{11} \varepsilon_x + P_{12} \varepsilon_x + P_{12} \varepsilon_z) \\ \Delta n_y = -\frac{1}{2} n^3 (P_{11} \varepsilon_x + P_{12} \varepsilon_x + P_{12} \varepsilon_z) \\ \Delta n_z = -\frac{1}{2} n^3 (2P_{12} \varepsilon_x + P_{11} \varepsilon_z) \end{cases};$$

[0088] 由此, 弹光效应致光纤折射率改变而引起的相移  $\Delta\varphi_s$  为:

$$[0089] \quad \Delta\varphi_s = L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n = -\frac{n^3}{2} \frac{2\pi}{\lambda} (P_{11} + P_{12}) \varepsilon_x L - \frac{n^3}{2} P_{12} \varepsilon_z L;$$

[0090] 因此, 外界扰动所引起的相移量  $\Delta\varphi$  表示为:

$$[0091] \quad \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} nL \left[ \varepsilon_z - \frac{1}{2} n^2 (P_{11} + P_{12}) \varepsilon_x - \frac{1}{2} n^2 P_{12} \varepsilon_z \right].$$

[0092] 由上式可以看出传输光相移与扰动致使的光纤各向应变成正比, 实际中动态外界扰动可以看作是时间  $t$  的函数, 后期处理时若能结合解调手段得到相位变化函数  $\Delta\varphi(t)$ , 就能很容易分辨外界扰动的种类, 实现以光纤自身为敏感元件的传感系统。

[0093] 本发明较佳实施例所述的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统, 如图2和图3所示, 所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统包括: 激光源、信号发生器、压电陶瓷 (PZT)、1\*2耦合器、延长光纤、3\*3耦合器、光电探测器、示波器和PC端; 所述压电陶瓷分别与所述激光源和所述信号发生器连接, 所述压电陶瓷、所述1\*2耦合器、所述延长光纤、所述3\*3耦合器、所述光电探测器、所述示波器和所述PC端依次连接。

[0094] 所述激光源用于发射激光, 经过所述压电陶瓷产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制, 所述压电陶瓷的振动幅度和振动频率由所述信号发生器控制; 所述压电陶瓷用于将包含有振动信息的信号光传输至所述1\*2耦合器, 所述1\*2耦合器用于将所述信号光分为两路, 分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉, 产生干涉信号传输至所述3\*3耦合器; 所述3\*3耦合器用于将所述干涉信号进行相位解调, 解调的光信号经过所述光电探测器转变为电信号被所述示波器所接收; 所述PC端用于对所述示波器采集的所述电信号进行解调处理得到传感结果。

[0095] 其中,所述光电探测器为三个,三个所述光电探测器分别与所述3\*3耦合器和所述示波器连接;波长为1550nm的激光源发射出的激光经过待测光纤(FUT)部分输出到解调端口,过程中压电陶瓷(PZT)产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制,PZT的振动幅度和振动频率由信号发生器控制;信号解调部分由一个1\*2耦合器、一个3\*3耦合器和三个光电探测器组成,1\*2耦合器和3\*3耦合器通过不同长度的两个光纤臂(延长光纤)连接形成一个马赫增德尔干涉仪,信号光经过1\*2耦合器进入马赫-曾德干涉仪并发生干涉,然后干涉结果通过3\*3耦合器分为三路相位相差120°的光信号,三路光信号再分别由三个光电探测器转换为电信号后被示波器采集,最后电脑(PC端)对采集到的电信号进行解调处理即可获得传感结果。

[0096] 即包含有振动信息的信号光经过1\*2耦合器分为两路,分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,干涉信号在经过3\*3耦合器进行相位解调。解调的光信号经过光电探测器(PD)转变为电信号被示波器所接收,示波器连接电脑可以用LabVIEW软件对接收到的数据进行一系列数字处理。此外由于LabVIEW的交互性优势,可以对收集到的信号进行实时在线的采样、观测和处理。

[0097] 如图4所示,本发明基于所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统的信号处理方法包括:

[0098] S10、所述激光源发射激光至所述压电陶瓷,经过所述压电陶瓷产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制,所述压电陶瓷的振动幅度和振动频率由所述信号发生器控制;

[0099] S20、所述压电陶瓷将包含有振动信息的信号光传输至所述1\*2耦合器,所述1\*2耦合器用于将所述信号光分为两路,分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,产生干涉信号传输至所述3\*3耦合器;

[0100] S30、所述3\*3耦合器将所述干涉信号进行相位解调,解调的光信号经过所述光电探测器转变为电信号被所述示波器所接收;

[0101] S40、所述PC端对所述示波器采集的所述电信号进行解调处理得到传感结果。

[0102] 所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统中的所述3\*3耦合器解调法实际上是对探测光在传感光纤两个位置的前向信号光的相位差进行解调,探测光纤两个位置之间的距离为马赫-曾德干涉仪的延迟光纤长度。

[0103] 在传感光纤没有受到扰动时,探测光在传感光纤A和B位置产生的光场 $E_A$ 和光场 $E_B$ 如下式所示:

$$[0104] \quad E_A = E_{A_0} \exp[j(\omega t + \varphi_A)];$$

$$[0105] \quad E_B = E_{B_0} \exp[j(\omega t + \varphi_B)];$$

[0106] 其中, $E_{A_0}$ 、 $E_{B_0}$ 分别为A、B两个位置的光场振幅,j为虚数,w为角频率,t表示时间, $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ 分别为A、B两个位置的相位。

[0107] 光场 $E_A$ 和光场 $E_B$ 通过所述1\*2耦合器、所述延长光纤和所述3\*3耦合器发生干涉,通过所述3\*3耦合器分为三路相位相差120°的光信号,分别由三个所述光电探测器检测,检测到的电场信号 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 分别表示为:

$$[0108] \quad E_1 = M + N \cos \varphi_1;$$

[0109]  $E_2 = M + N \cos(\varphi_t + \frac{2}{3}\pi);$

[0110]  $E_3 = M + N \cos(\varphi_t - \frac{2}{3}\pi);$

[0111] 其中, M、N和待测相位 $\varphi_t$ 如下式所示:

[0112]  $M = \frac{1}{3}R(E_{A_0}^2 + E_{B_0}^2);$

[0113]  $N = RE_{A_0}E_{B_0};$

[0114]  $\varphi_t = (\varphi_B - \varphi_A);$

[0115] 其中, R为光电探测器响应系数;

[0116] 再将这三路电场信号按照图5所示的3\*3耦合器解调法信号处理流程进行处理, 即可得到传感光纤A和B两个位置信号光的相位差(即根据三路电场信号计算传感光纤A和B两个位置信号光的相位差)。

[0117] 具体的计算过程为:

[0118] 计算三路电场信号的均值K为:

[0119]  $K = \frac{1}{3}(E_1 + E_2 + E_3);$

[0120] 对每一路电场信号去直流, 得到:

[0121]  $I_1 = N \cos \varphi_t;$

[0122]  $I_2 = N \cos(\varphi_t + \frac{2}{3}\pi);$

[0123]  $I_3 = N \cos(\varphi_t - \frac{2}{3}\pi);$

[0124]  $I_1$ 、 $I_2$ 和 $I_3$ 的平方和J为:

[0125]  $J = \frac{3}{2}N^2;$

[0126] 将去直流后的电场信号用同样的微分器进行微分, 得到:

[0127]  $\dot{I}_1 = N \dot{\varphi}_t \sin \varphi_t;$

[0128]  $\dot{I}_2 = N \dot{\varphi}_t \sin(\varphi_t + \frac{2}{3}\pi);$

[0129]  $\dot{I}_3 = N \dot{\varphi}_t \sin(\varphi_t - \frac{2}{3}\pi);$

[0130] 再将每一路电场信号与另外两路微分的差相乘, 再求和得到:

[0131]  $S = \frac{3\sqrt{3}}{2}N^2 \dot{\varphi}_t;$

[0132] 最后用J除S再积分, 得到微分交叉相乘算法计算得出的相位输出结果:

[0133]  $\varphi_{out} = \sqrt{3}\varphi_t;$

[0134] 另外, 对最终的相位输出结果进行滤波, 去除积分过程产生的直流量, 避免其对解

调结果产生影响。

[0135] 进一步地,双端解调的原理结构图如图6所示,是将输出信号光经过一个1\*2耦合器分为两路,这两路光接收到外界振动信号后再通过环形器回到各自的单端解调部分中。通过互相关算法可以计算出两束振动信号的时延,进而计算出振动位置。设长度为L的传感区域中存在一扰动点到系统前端耦合器C2的距离为未知量x,已知光纤折射率为n,光速为c,探测器A采集到逆时针方向的扰动干涉信号的时间点为 $t_A$ ,探测器B采集到顺时针方向的扰动干涉信号的时间点为 $t_B$ ,则有:

$$[0136] \quad \begin{cases} x = \frac{ct_A}{n} \\ 2L - x = \frac{ct_B}{n} \end{cases};$$

[0137] 系统前端上位机探测到两束干涉光的时间差为:

$$[0138] \quad \Delta t = t_B - t_A = \frac{n(2L-x)}{c} - \frac{nx}{c} = \frac{2n}{c}(L-x);$$

[0139] 上式中仅存在唯一未知量x,解得:

$$[0140] \quad x = L - \frac{c\Delta t}{2n};$$

[0141] 由上式可以看出,对于搭建完毕的系统,定位误差d仅与时延测量误差 $\Delta t_d$ 有关,即:

$$[0142] \quad d = \frac{c}{2n}(\Delta t - \Delta t_d);$$

[0143]  $\Delta t$ 可以通过互相关算法求出,S为目标信号源,设A,B接收到的信号分别为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ :

$$[0144] \quad x_1(t) = s(t) + n_1(t)$$

$$[0145] \quad x_2(t) = as(t - \Delta t) + n_2(t);$$

[0146] 其中,s(t)为目标信号, $\Delta t$ 为时延值,a为两信道接收信号的差异因子(如无差异,a=1), $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 分别为接收到的背景噪声。通常假设s(t)、 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 均为实的正态平稳随机过程,且三者互不相关。

[0147] 通过相关分析来比较两个信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的时域相似程度,从而实现了对信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的时间延时估计。其中, $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互相关函数 $R_{x_1x_2}$ 为:

$$[0148] \quad R_{x_1x_2} = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t)x_2(t + \Delta t)dt;$$

[0149] 互相关函数 $R_{x_1x_2}$ 在 $\Delta t$ 处有明显极大值,因此,由 $R_{x_1x_2} - \Delta t$ 关系曲线的峰值位置就可以确定时延值 $\Delta t$ 。

[0150] 进一步地,数字处理部分主要包含微分交叉相乘解调模块、信号的降噪、信号的频谱以及振动的位置解调。

[0151] 3\*3耦合器解调使用的是微分交叉相乘的算法如图5所示,处理过程在LabVIEW平台上完成,可以进行实时运算并显示输入3\*3耦合器的两路光信号的相位差,进而可以检测到振动的发生。用LabVIEW对微分交叉相乘算法进行仿真结果如图7所示,说明该算法可以

实现输入相位的解调。

[0152] 随着系统应用环境愈加复杂、人们对传感精度的要求越来越高,对干涉信号的降噪技术分布式光纤传感逐渐成为系统的重点研究对象,随之出现模拟滤波器去噪、数字滤波器去噪和小波去噪等多种降噪技术的应用。区别于通常的滤波场合,自然环境可视为参数时变的噪声信号,若使用固定指标的频域滤波器或空域滤波器对本系统信道进行均衡,由于偶发信号噪声混频现象与低信噪比,滤波结果无法满足工程需求,同时因难以估计长程传感中复杂环境噪声的先验知识而限制了维纳滤波与卡尔曼滤波的应用。为解决上述问题,本发明采用基于LMS (Least Mean Square, 最小均方算法) 算法的自适应噪声抵消器作为预处理单元。自适应噪声抵消技术是建立在目前已广泛应用于数字信号增强、未知系统辨识与系统状态预测等领域的自适应滤波技术的基础上,通过多引入一路参考噪声作为辅助输入从而获取其统计特征,据此实时调整滤波器各抽头权参数以跟随这种变化,继而系统可完全抵消输入信号中的噪声成分,完成最优降噪过程。LMS算法的降噪仿真结果如图8所示。

[0153] 信号的频谱分析由平台内置的快速傅里叶变换(FFT, Fast Fourier transform, 快速傅里叶变换)算法进行完成,可以计算出信号的频率谱图,相关的仿真实验结果如图9所示。

[0154] 基于互相关的时延估计定位方法可以由平台内置的互相关(xcorr)算法进行完成,互相关结果图像的峰值对应的横坐标即为两束信号的时延,进而可以求出振动的位置,基于互相关的时延估计算法要求进行对比的两个信号的时延不能超过一个周期,由于地震一般为5-20Hz,系统的最大时延为 $2*L_{\max}/c*n$ ,其中 $L_{\max}$ 为最大传感距离,c为真空中光速,n为光纤折射率,即最大时延小于一个振动周期:

$$[0155] \quad \frac{2L_{\max}}{c*n} < \frac{1}{20};$$

[0156] 即传感距离最大为500公里,若检测更高频率的振动则会缩短检测距离。互相关的仿真实验结果如图10所示。

[0157] 本发明提出了一种新型的基于前向传输M-Z干涉型分布式光纤振动传感器系统,与传统的分布式光纤振动传感器相比最明显的创新点就是用前向传输光代替瑞利后向散射光,具有更高的信噪比并且不需要使用光放大器。相比于传统的马赫-曾德干涉仪,本发明提出了一种在3\*3耦合器干涉前的两路输入信号其中一路添加延长光纤,即实现了传感部分两处位置的光发生干涉,使得激光源的相干长度非常短,不需要昂贵的单频激光源。

[0158] 本发明提出的新型基于前向传输、马赫-曾德尔干涉型的分布式光纤振动传感器系统,前向传输的信号光取代了后向瑞利散射的信号光具有更大的光功率,更高的信噪比,因此也会有更长的传感距离;通过将一束光经过1\*2耦合器分离成两束等功率的信号光,其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,延长光纤的长度确定了系统的最小空间分辨率,在搭配相应的硬件配置下可以实现比传统方式更高的传感精度,同时也降低了对激光光源相干长度的要求。

[0159] 本发明应用先进的信号处理方法对光相位信号进行处理来恢复距离分辨的振动信号以及振动幅度和振动频率,带来了如下有益效果:

[0160] (a)、更高信噪比(光功率比反向散射高几个数量级)的信号光,不受瑞利反向散射

噪声的影响；

[0161] (b)、较少的非线性效应(连续光而非脉冲光)；

[0162] (c)、检测逐渐分布的折射率扰动的能力(更多应用)；

[0163] (d)、没有光放大器的情况下感应距离更长(安装和维护更简单)；

[0164] (e)、空间分辨率与传感范围没有直接关系(不是脉冲光),允许单独优化而无需权衡；

[0165] (f)、信噪比可以与感应范围成正比,而不是成反比,这允许相互优化而无需权衡取舍。图像处理和机器学习可用于降低噪声和增强信号识别。

[0166] 另外,本发明的延长光纤长度可以改变;解调相位的方式可以改变,比如可以用相位生成载波(PGC)的方式解调相位。

[0167] 综上所述,本发明提供一种基于前向传输的分布式光纤振动传感系统及信号处理方法,所述基于前向传输的分布式光纤振动传感系统包括:激光源、信号发生器、压电陶瓷、1\*2耦合器、延长光纤、3\*3耦合器、光电探测器、示波器和PC端;所述压电陶瓷分别与所述激光源和所述信号发生器连接,所述压电陶瓷、所述1\*2耦合器、所述延长光纤、所述3\*3耦合器、所述光电探测器、所述示波器和所述PC端依次连接;所述激光源用于发射激光,经过所述压电陶瓷产生振动信号对前向光信号的相位信息进行调制,所述压电陶瓷的振动幅度和振动频率由所述信号发生器控制;所述压电陶瓷用于将包含有振动信息的信号光传输至所述1\*2耦合器,所述1\*2耦合器用于将所述信号光分为两路,分路后的其中一束光路上加入一段延长光纤后与另一束光耦合实现马赫-曾德干涉,产生干涉信号传输至所述3\*3耦合器;所述3\*3耦合器用于将所述干涉信号进行相位解调,解调的光信号经过所述光电探测器转变为电信号被所述示波器所接收;所述PC端用于对所述示波器采集的所述电信号进行解调处理得到传感结果。本发明的基于前向传输的分布式光纤振动传感系统具有更高的信噪比,实现比传统方式更高的传感精度,同时也降低了对激光光源相干长度的要求。

[0168] 当然,本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程,是可以通过计算机程序来指令相关硬件(如处理器,控制器等)来完成,所述的程序可存储于一计算机可读的计算机可读存储介质中,所述程序在执行时可包括如上述各方法实施例的流程。其中所述的计算机可读存储介质可为存储器、磁碟、光盘等。

[0169] 应当理解的是,本发明的应用不限于上述的举例,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

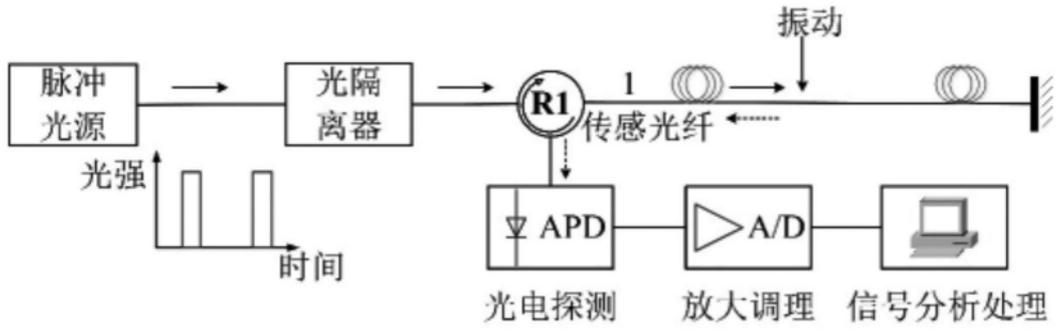


图1

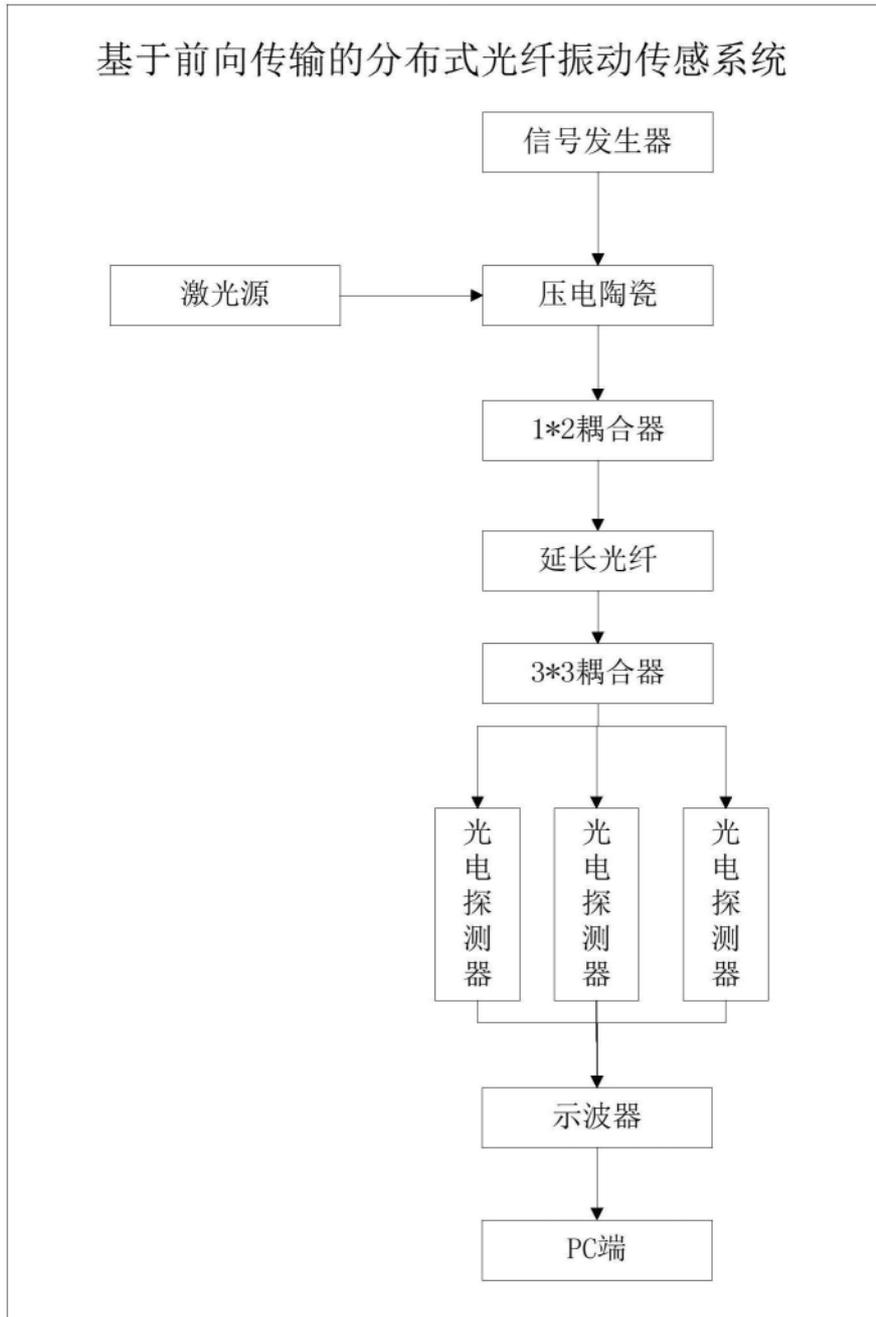


图2

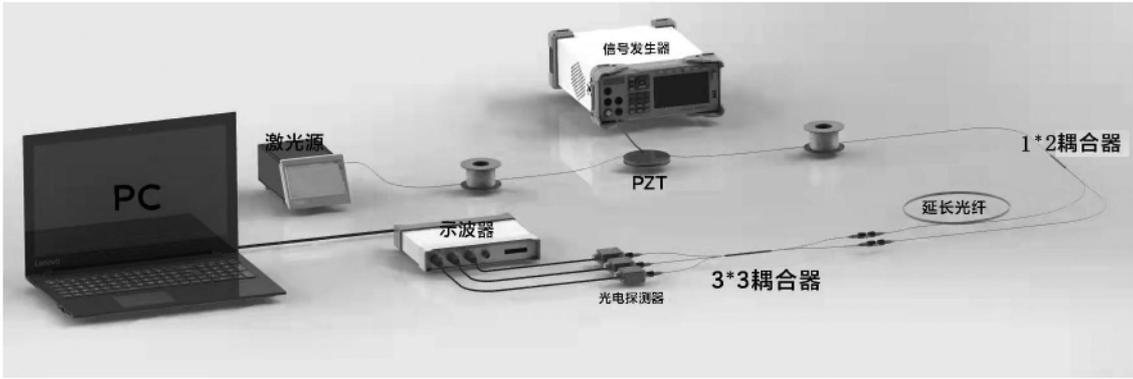


图3

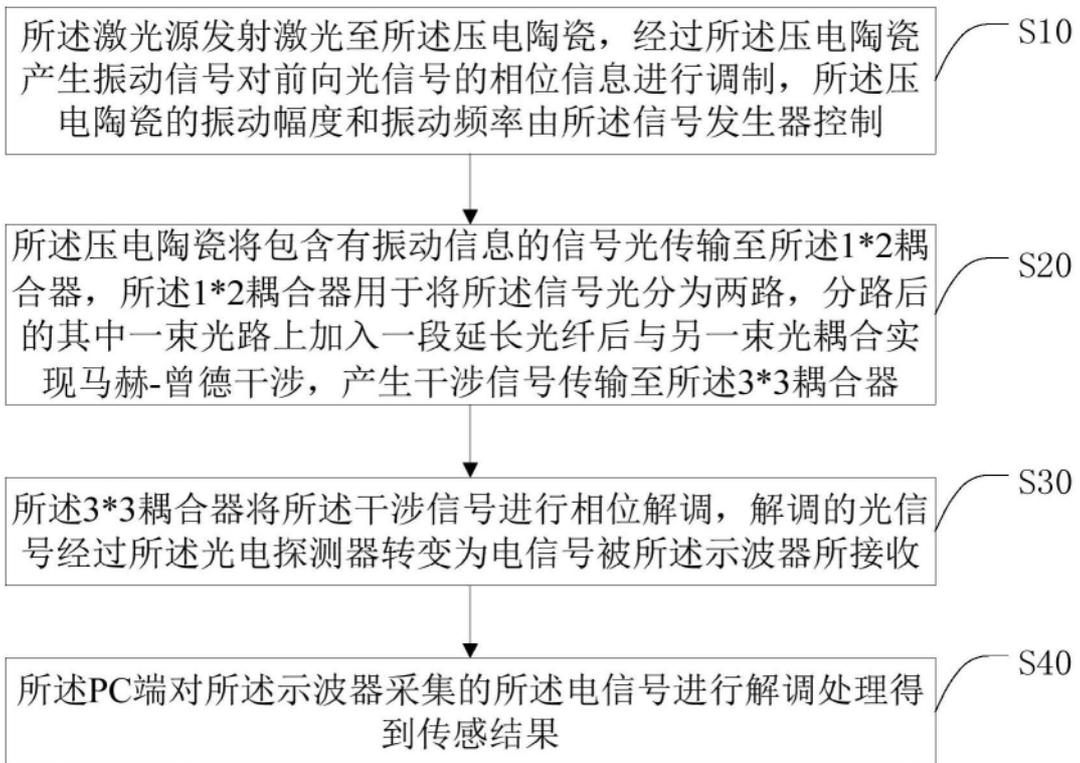


图4

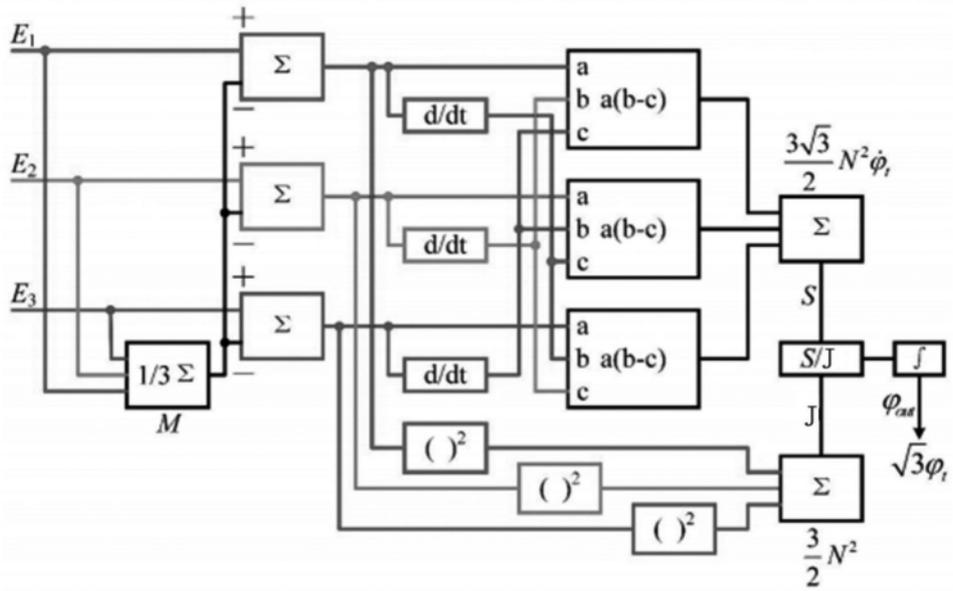


图5

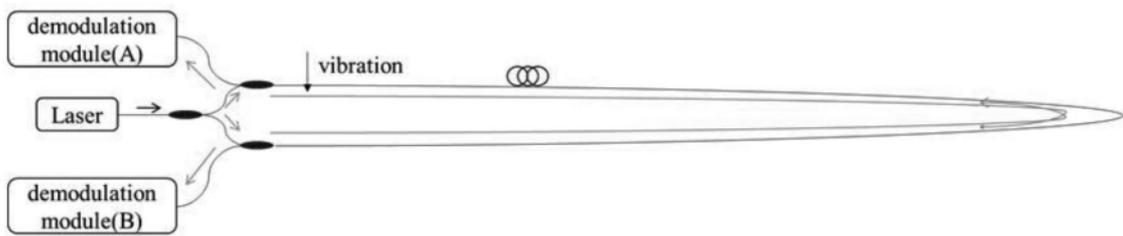


图6

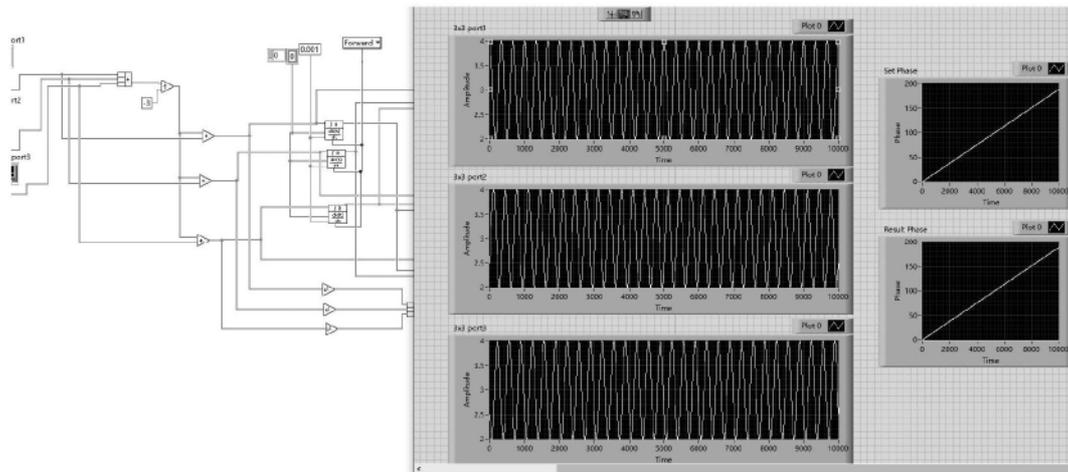


图7

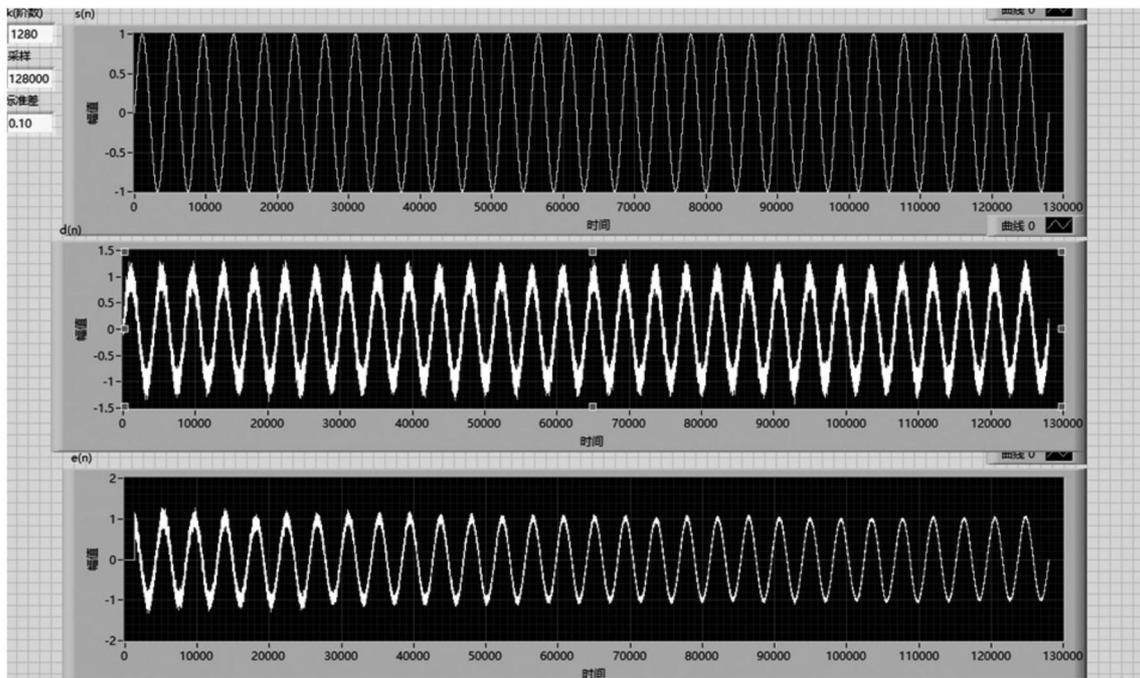


图8

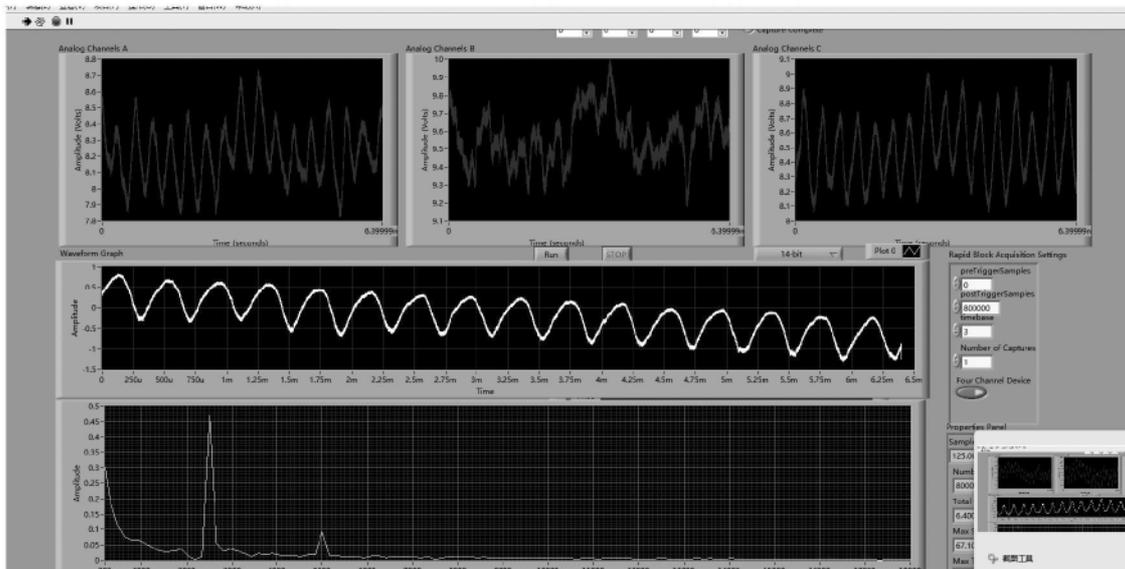


图9

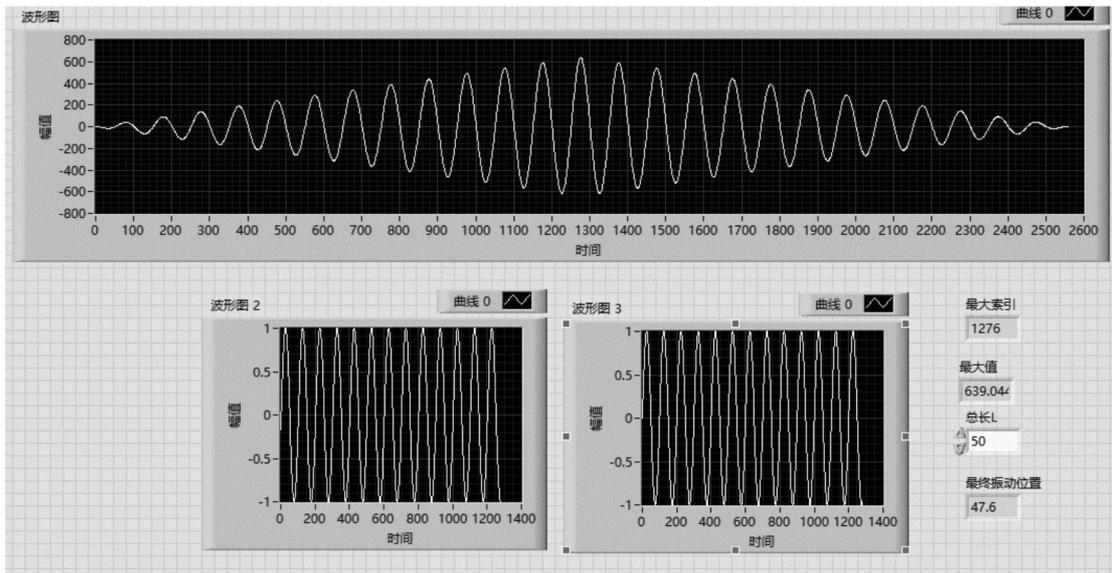


图10