



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108020314 A

(43)申请公布日 2018.05.11

(21)申请号 201610967771.7

(22)申请日 2016.11.01

(71)申请人 北京大学

地址 100871 北京市海淀区颐和园路5号

(72)发明人 张敏 何向阁 邱晓康 刘飞

古利娟

(74)专利代理机构 北京万象新悦知识产权代理

事务所(普通合伙) 11360

代理人 王岩

(51)Int.Cl.

G01H 9/00(2006.01)

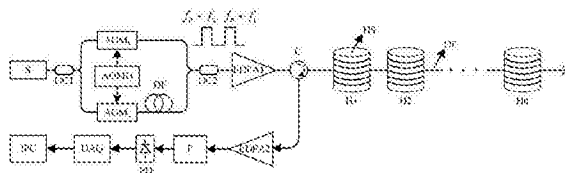
权利要求书3页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

光纤水听器阵列系统和加速度传感器阵列系统及测量方法

(57)摘要

本发明公开了一种光纤水听器阵列系统和加速度传感器阵列系统及测量方法。本发明的光纤水听器阵列系统包括：窄线宽激光器、水听器阵列、第一耦合器、第一声光调制器、第二声光调制器、延时光纤、第二耦合器、第一掺铒光纤放大器、环形器、第二掺铒光纤放大器、滤波器、光电探测器、数据采集卡和工控机；本发明产生外差脉冲对，通过干涉将外界声波信号调制到外差频率上，通过外差解调，得到水中的外界声波信号；本发明将系统大大简化，并且每个水听器基元取得了与现有系统相同的探测灵敏度；另外该方案同样可以用于光纤加速度传感器阵列，将一根光纤依次绕制在多个加速度传感器骨架上则形成加速度传感器阵列，从而探测空气中的外界振动信号。



1. 一种光纤水听器阵列系统,其特征在于,所述光纤水听器阵列系统包括:窄线宽激光器、水听器阵列、第一耦合器、第一声光调制器、第二声光调制器、延时光纤、第二耦合器、第一掺铒光纤放大器、环形器、第二掺铒光纤放大器、滤波器、光电探测器、数据采集卡和工控机;其中,光纤缠绕在水听器探头骨架上形成水听器探头,一根光纤依次缠绕在多个水听器探头骨架上形成水听器阵列;所述窄线宽激光器发出连续激光;经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 $f_1$ 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 $f_2$ 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 $L_d$ 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 $\Delta f$ ,外差脉冲对的间隔为 $L_d$ ;外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入水听器阵列;外差脉冲对在水听器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,水听器阵列接收到水中的外界声波信号后通过水听器探头骨架上的弹性筒将外界声波信号引起的振动信息调制到背向瑞利散射信号上,进而通过干涉调制到外差信号的外差频率上;外差信号通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡采集信号,最后在工控机上进行信号的外差解调,从而得到外界声波信号,其中, $f_1 \neq f_2, L_d > 0$ 。

2. 如权利要求1所述的光纤水听器阵列系统,其特征在于,外差信号的采样频率即脉冲重复频率为外差频率 $\Delta f$ 的4倍以上;外差脉冲对的间隔 $L_d$ 大于脉冲宽度 $w$ ,在这个基础上间隔要尽量小。

3. 如权利要求1所述的光纤水听器阵列系统,其特征在于,可探测的外界声波信号的频率的上限为外差频率的一半,可探测的外界声波信号的频率的下限由用于时域重构的背向散射曲线的条数决定,频率下限为 $f_s/M$ ,其中 $f_s$ 为脉冲重复频率, $M$ 为用于时域重构的背向散射曲线的条数。

4. 一种光纤加速度传感器阵列系统,其特征在于,所述光纤加速度传感器阵列系统包括:窄线宽激光器、加速度传感器阵列、第一耦合器、第一声光调制器、第二声光调制器、延时光纤、第二耦合器、第一掺铒光纤放大器、环形器、第二掺铒光纤放大器、滤波器、光电探测器、数据采集卡和工控机;其中,光纤缠绕在加速度传感器骨架上形成加速度传感器,一根光纤依次缠绕在多个加速度传感器骨架上形成加速度传感器阵列;窄线宽激光器发出连续激光;经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 $f_1$ 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 $f_2$ 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 $L_d$ 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 $\Delta f$ ,外差脉冲对的间隔为 $L_d$ ;外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入加速度传感器阵列;外差脉冲对在加速度传感器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,加速度传感器阵列接收到空气中的外界振动信号后通过加速度传感器骨架上的弹性筒将外界振动信号引起的振动信息调制到背向瑞利散射信号上,进而通过干涉调制到外差信号的外差频率上;外差信号通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤

放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡采集信号,最后在工控机上进行信号的外差解调,从而得到外界振动信号,其中, $f_1 \neq f_2$ ,  $L_d > 0$ 。

5. 如权利要求4所述的光纤加速度传感器阵列系统,其特征在于,外差信号的采样频率即脉冲重复频率为外差频率  $\Delta f$  的4倍以上;外差脉冲对的间隔  $L_d$  大于脉冲宽度  $w$ ,在这个基础上间隔要尽量小。

6. 一种光纤水听器阵列系统的测量方法,其特征在于,所述测量方法包括以下步骤:

1) 水听器阵列的光纤的长度为  $L$ , 脉冲重复频率为  $f_s$ , 则有  $f_s < c/2nL$ , 其中,  $c$  为真空中的光速,  $n$  为水听器阵列的光纤的折射率, 数据采集卡的采样频率为  $f_c$ , 采样深度为  $N$ , 则有  $N = f_c/f_s$ ;

2) 窄线宽激光器发出连续激光,经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频  $f_1$  并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频  $f_2$  并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差  $\Delta f = f_1 - f_2$  即为外差频率;第二脉冲光经过长度为  $L_d$  的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为  $\Delta f$ , 外差脉冲对的间隔为  $L_d$ ;

3) 外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入水听器阵列的光纤;外差脉冲对在水听器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,水听器阵列接收到水中的外界声波信号后通过水听器探头骨架上的弹性筒将外界声波信号引起的振动信息调制到背向瑞利散射信号上,进而通过干涉调制到外差信号的外差频率上,通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡来采集信号,传输至工控机;

4) 一个外差脉冲对得到一条背向散射曲线,连续采集  $M$  条背向散射曲线;

5) 选取所有背向散射曲线的同一位置处的信号进行时域重构,将会得到同一位置处随时间变化的信号,该信号的表达式为:  $I = A + B \cos [2\pi \Delta f t + \Phi(t)]$ , 其中  $\Delta f$  为外差频率,  $\Phi(t)$  为外界声波信号引起水听器阵列的光纤中光相位的变化量,  $\Phi(t)$  与外界声波信号的幅度成正比,  $\Phi(t)$  的频率与外界声波信号的频率一致;

6) 将上述信号滤除直流成分后将得到待解调信号  $y_s = B \cos [2\pi \Delta f t + \Phi(t)]$ , 然后对待解调信号进行外差解调算法,最后得到光相位的变化量  $\Phi(t)$ , 从而得到外界声波信号的幅度和频率。

7. 如权利要求6所述的测量方法,其特征在于,在步骤4)中,背向散射曲线的条数  $M \geq 50$ 。

8. 如权利要求6所述的测量方法,其特征在于,在步骤6)中,对待解调信号进行外差解调算法,具体过程为:将待解调信号  $y_s$  分别与正弦信号  $\sin(2\pi \Delta f t)$  和余弦信号  $\cos(2\pi \Delta f t)$  进行混频并分别经过低通滤波器,然后两者相除得到两者的比值,最后经过反正切  $\arctan$  运算得到光相位的变化量  $\Phi(t)$ 。

9. 一种光纤加速度传感器阵列系统的测量方法,其特征在于,所述测量方法包括以下步骤:

1) 加速度传感器阵列的光纤的长度为 $L$ ,脉冲重复频率为 $f_s$ ,则有 $f_s < c/2nL$ ,其中, $c$ 为真空中的光速, $n$ 为加速度传感器阵列的光纤的折射率,数据采集卡的采样频率为 $f_c$ ,采样深度为 $N$ ,则有 $N=f_c/f_s$ ;

2) 窄线宽激光器发出连续激光,经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 $f_1$ 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 $f_2$ 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 $L_d$ 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 $\Delta f$ ,外差脉冲对的间隔为 $L_d$ ;

3) 外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入加速度传感器阵列的光纤;外差脉冲对在加速度传感器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,加速度传感器阵列接收到空气中的外界振动信号后通过加速度传感器骨架上的弹性筒将外界振动信号引起的振动信息调制到背向瑞利散射信号上,进而通过干涉调制到外差信号的外差频率上,通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡来采集信号,传输至工控机;

4) 一个外差脉冲对得到一条背向散射曲线,连续采集 $M$ 条背向散射曲线;

5) 选取所有背向散射曲线的同一位置处的信号进行时域重构,将会得到同一位置处随时间变化的信号,该信号的表达式为: $I=A+B\cos[2\pi\Delta ft+\Phi(t)]$ ,其中 $\Delta f$ 为外差频率, $\Phi(t)$ 为外界振动信号引起加速度传感器阵列的光纤中光相位的变化量, $\Phi(t)$ 与外界振动信号的幅度成正比, $\Phi(t)$ 的频率与外界振动信号的频率一致;

6) 将上述信号滤除直流成分后将得到待解调信号 $y_s=B\cos[2\pi\Delta ft+\Phi(t)]$ ,然后对待解调信号进行外差解调算法,最后得到光相位的变化量 $\Phi(t)$ ,从而得到外界振动信号的幅度和频率。

10. 如权利要求9所述的测量方法,其特征在于,在步骤4)中,背向散射曲线的条数 $M \geq 50$ 。

## 光纤水听器阵列系统和加速度传感器阵列系统及测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及光纤传感技术,具体涉及一种光纤水听器阵列系统和加速度传感器阵列系统及测量方法。

### 背景技术

[0002] 随着国家海洋战略的实施以及国防安全的需要,光纤水听器作为一种能够对水下目标进行探测、定位和识别的传感器受到了越来越多的关注与研究。当声波作用到光纤水听器探头上时将会引起光纤中光波场的相位、强度等参量发生变化,通过一定的解调方法即可得到外界的声波场。目前常用的光纤水听器一般都是基于Mach-Zehnder或Michelson干涉仪结构来构建的。此外,由于水下声场的复杂性,单个的水听器探头很难获得目标的详细信息,因此需要多探头的复用,从而组成水听器阵列。目前研究较多的光纤水听器阵列复用技术有:空分复用、时分复用、波分复用、频分复用等。在各种复用技术中,时分复用是最简单有效的方案,并且由于其易与波分复用技术相结合而实现水听器的大规模阵列化,从而备受各国研究者的青睐。

[0003] 参考文献“张楠.大规模光纤水听器阵列光学外差及时分复用技术研究[D].国防科学技术大学,2007.”中给出了目前较常用的光纤水听器时分复用阵列系统结构图。该方案中复用的水听器探头采用了Michelson干涉仪结构,一个水听器探头包括一个一分二耦合器、一段L长光纤、一个法拉第旋镜和一个水听器探头骨架四部分,其中L长光纤绕在水听器探头骨架上来感测外界声波信号。利用不同探头反射回来脉冲的时延不同实现脉冲的错位干涉,通过对干涉信号的解调即可得到外界的声波信号。

[0004] 现有技术中,一个水听器探头至少包括一个一分二耦合器、一段L长光纤、一个法拉第旋镜和一个水听器探头骨架四部分。首先为了保持各基元反射回来信号光强的大小基本一致,耦合器的分光比需要进行合理的设计。其次为了各反射脉冲能够准确的对上进行干涉,需要较精确的控制光纤的长度。最后为了消除偏振态对干涉信号的影响,因此加入了法拉第旋镜,但在一些特殊应用环境中(比如高温环境),对法拉第旋镜的性能有较高的要求。这些都增加了系统设计的复杂度与困难。

### 发明内容

[0005] 针对以上现有技术中存在的问题,本发明提出了一种结构简单易实现的光纤水听器阵列系统及其测量方法,大大简化现有系统的复杂度。

[0006] 本发明的一个目的在于提出一种光纤水听器阵列系统和加速度传感器阵列系统。

[0007] 本发明的光纤水听器阵列系统包括:窄线宽激光器、水听器阵列、第一耦合器、第一声光调制器、第二声光调制器、延时光纤、第二耦合器、第一掺铒光纤放大器、环形器、第二掺铒光纤放大器、滤波器、光电探测器、数据采集卡和工控机;其中,光纤缠绕在水听器探头骨架上形成水听器探头,一根光纤依次缠绕在多个水听器探头骨架上形成水听器阵列;窄线宽激光器发出连续激光;经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被

移频 $f_1$ 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 $f_2$ 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 $L_d$ 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 $\Delta f$ ,外差脉冲对的间隔为 $L_d$ ;外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入水听器阵列;外差脉冲对在水听器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,水听器阵列接收到水中的外界声波信号后通过水听器探头骨架上的弹性筒将外界声波信号引起的振动信息调制到背向瑞利散射信号上,进而通过干涉调制到外差信号的外差频率上;外差信号通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡采集信号,最后在工控机上进行信号的外差解调,从而得到外界声波信号,其中, $f_1 \neq f_2, L_d > 0$ 。

[0008] 外差信号的采样频率即脉冲重复频率应该是外差频率 $\Delta f$ 的4倍以上,外差频率要尽量大,因此一般选4倍关系;外差脉冲对的间隔 $L_d$ 要大于脉冲宽度 $w$ ,以保障两个脉冲没有重叠,在这个基础上间隔要尽量小。可探测的外界声波信号的频率的上限为外差频率的一半,可探测的外界声波信号的频率的下限由用于时域重构的背向散射曲线的条数决定,频率下限为 $f_s/M$ ,其中 $f_s$ 为脉冲重复频率, $M$ 为用于时域重构的背向散射曲线的条数。

[0009] 本发明采用一根光纤直接缠绕在多个水听器探头骨架上形成水听器阵列,外差脉冲对在水听器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,外界声波信号使得水听器探头骨架上的弹性筒发生形变,进而引起光纤的形变,使得光纤中背向瑞利散射信号的相位发生变化;进而通过干涉将外界声波信号调制到外差信号的外差频率上,通过外差解调,得到外界声波信号。本发明只采用一根光纤,完全不用添加耦合器、法拉第旋镜等器件,相比于现有的技术有了大大的简化。

[0010] 本发明的光纤加速度传感器阵列系统包括:窄线宽激光器、加速度传感器阵列、第一耦合器、第一声光调制器、第二声光调制器、延时光纤、第二耦合器、第一掺铒光纤放大器、环形器、第二掺铒光纤放大器、滤波器、光电探测器、数据采集卡和工控机;其中,光纤缠绕在加速度传感器骨架上形成加速度传感器,一根光纤依次缠绕在多个加速度传感器骨架上形成加速度传感器阵列;窄线宽激光器发出连续激光;经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 $f_1$ 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 $f_2$ 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 $L_d$ 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 $\Delta f$ ,外差脉冲对的间隔为 $L_d$ ;外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入加速度传感器阵列;外差脉冲对在加速度传感器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,加速度传感器阵列接收到空气中的外界振动信号后通过加速度传感器骨架上的弹性筒将外界振动信号引起的振动信息调制到背向瑞利散射信号上,进而通过干涉调制到外差信号的外差频率上;外差信号通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡采集信号,最后在工

控机上进行信号的外差解调,从而得到外界振动信号,其中, $f_1 \neq f_2, L_d > 0$ 。

[0011] 下面明确几个基本概念:

[0012] 脉冲宽度:连续光经过声光调制器后被调制成脉冲光的宽度,时域上表示的脉冲宽度为 $\tau$ ,空间域上表示的脉冲宽度为 $w$ ,外差脉冲对中两个脉冲的脉冲宽度是一样的。

[0013] 脉冲重复频率:每次生成脉冲都会同时生成一个外差脉冲对,脉冲重复频率即为生成外差脉冲对的频率。

[0014] 外差信号的采样频率:水听器阵列的光纤上一个位置的背向瑞利散射信号在时域上重构后的采样频率,外差信号的采样频率与脉冲重复频率相等。

[0015] 数据采集卡的采样频率:数据采集卡采集数据的速率,该采样频率与空间分辨率有关。

[0016] 采样深度:数据采集卡一次触发后采集数据的长度,该值与水听器阵列的光纤的长度和数据采集卡的采样频率有关。

[0017] 本发明的另一个目的在于提供一种光纤水听器阵列系统和加速度传感器阵列系统的测量方法。

[0018] 本发明的光纤水听器阵列系统的测量方法,包括以下步骤:

[0019] 1) 水听器阵列的光纤的长度为 $L$ ,脉冲重复频率为 $f_s$ ,则有 $f_s < c/2nL$ ,其中, $c$ 为真空中的光速, $n$ 为水听器阵列的光纤的折射率,数据采集卡的采样频率为 $f_c$ ,采样深度为 $N$ ,则有 $N = f_c/f_s$ ;

[0020] 2) 窄线宽激光器发出连续激光,经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 $f_1$ 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 $f_2$ 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f = f_1 - f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 $L_d$ 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 $\Delta f$ ,外差脉冲对的间隔为 $L_d$ ;

[0021] 3) 外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入水听器阵列的光纤;外差脉冲对在水听器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,水听器阵列接收到水中的外界声波信号后通过水听器探头骨架上的弹性筒将外界声波信号引起的振动信息调制到背向瑞利散射信号上,进而通过干涉调制到外差信号的外差频率上,通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡来采集信号,传输至工控机;

[0022] 4) 一个外差脉冲对得到一条背向散射曲线,连续采集 $M$ 条背向散射曲线, $M \geq 50$ ;

[0023] 5) 选取所有背向散射曲线的同一位置处的信号进行时域重构,将会得到同一位置处随时间变化的信号,该信号的表达式为: $I = A + B \cos [2\pi \Delta f t + \Phi(t)]$ ,其中 $\Delta f$ 为外差频率, $\Phi(t)$ 为外界声波信号引起水听器阵列的光纤中光相位的变化量, $\Phi(t)$ 与外界声波信号的幅度成正比,该比值即为水听器探头的灵敏度, $\Phi(t)$ 的频率与外界声波信号的频率一致;

[0024] 6) 将上述信号滤除直流成分后将得到待解调信号 $y_s = B \cos [2\pi \Delta f t + \Phi(t)]$ ,然后对待解调信号进行外差解调算法,最后得到光相位的变化量 $\Phi(t)$ ,从而得到外界声波信号

的幅度和频率。

[0025] 一种光纤加速度传感器阵列系统的测量方法,包括以下步骤:

[0026] 1) 加速度传感器阵列的光纤的长度为 $L$ ,脉冲重复频率为 $f_s$ ,则有 $f_s < c/2nL$ ,其中, $c$ 为真空中的光速, $n$ 为加速度传感器阵列的光纤的折射率,数据采集卡的采样频率为 $f_c$ ,采样深度为 $N$ ,则有 $N=f_c/f_s$ ;

[0027] 2) 窄线宽激光器发出连续激光,经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 $f_1$ 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 $f_2$ 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 $L_d$ 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 $\Delta f$ ,外差脉冲对的间隔为 $L_d$ ;

[0028] 3) 外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入加速度传感器阵列的光纤;外差脉冲对在加速度传感器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,加速度传感器阵列接收到空气中的外界振动信号后通过加速度传感器骨架上的弹性筒将外界振动信号引起的振动信息调制到背向瑞利散射信号上,进而通过干涉调制到外差信号的外差频率上,通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡来采集信号,传输至工控机;

[0029] 4) 一个外差脉冲对得到一条背向散射曲线,连续采集 $M$ 条背向散射曲线, $M \geq 50$ ;

[0030] 5) 选取所有背向散射曲线的同一位置处的信号进行时域重构,将会得到同一位置处随时间变化的信号,该信号的表达式为: $I=A+B \cos [2\pi \Delta f t+\Phi(t)]$ ,其中 $\Delta f$ 为外差频率, $\Phi(t)$ 为外界振动信号引起加速度传感器阵列的光纤中光相位的变化量, $\Phi(t)$ 与外界振动信号的幅度成正比,该比值即为加速度传感器的灵敏度, $\Phi(t)$ 的频率与外界振动信号的频率一致;

[0031] 6) 将上述信号滤除直流成分后将得到待解调信号 $y_s=B \cos [2\pi \Delta f t+\Phi(t)]$ ,然后对待解调信号进行外差解调算法,最后得到光相位的变化量 $\Phi(t)$ ,从而得到外界振动信号的幅度和频率。

[0032] 本发明的优点:

[0033] 本发明产生外差脉冲对,通过干涉将外界声波信号调制到外差频率上,通过外差解调,得到水中的外界声波信号;在传统的 $\Phi$ -OTDR系统中引入了外差脉冲对,实现了相位信息的解调;本发明只采用一根光纤,完全不用添加耦合器、法拉第旋镜等器件,相比于现有的技术有了大大的简化,并且每个水听器基元取得了与现有系统相同的探测灵敏度。另外该方案同样可以使用于光纤加速度传感器阵列,将一根光纤依次绕制在多个加速度传感器骨架上则形成加速度传感器阵列,从而探测空气中的外界振动信号。

## 附图说明

[0034] 图1为本发明的光纤水听器阵列系统的一个实施例的示意图;

[0035] 图2为根据本发明的光纤水听器阵列系统的测量方法的一个实施例得到的背向散射曲线的三维视图;



[0036] 图3为根据本发明的光纤水听器阵列系统的测量方法的一个实施例的外差解调算法的示意图。

### 具体实施方式

[0037] 下面结合附图,通过具体实施例,进一步阐述本发明。

[0038] 如图1所示,本实施例的光纤水听器阵列系统包括:窄线宽激光器S、第一耦合器OC1、第一声光调制器AOM1、第二声光调制器AOM2、延时光纤DF、第二耦合器OC2、第一掺铒光纤放大器EDFA1、环形器C、第二掺铒光纤放大器EDFA2、滤波器F、光电探测器PD、数据采集卡DAQ和工控机IPC;其中,光纤OF缠绕在水听器探头骨架HS上形成水听器探头,一根光纤依次缠绕在多个水听器探头骨架上形成水听器阵列H1~Hn;窄线宽激光器S发出连续激光;经第一耦合器OC1后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器AOM1被移频 $f_1$ 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器AOM2被移频 $f_2$ 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 $L_d$ 的延时光纤DF,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器OC2合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 $\Delta f$ ,外差脉冲对的间隔为 $L_d$ ;外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器EDFA1放大后,通过第一口进入环形器C,通过环形器C的第二口注入水听器阵列的光纤;外差脉冲对在水听器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,水听器阵列接收到的外界声波信号通过干涉调制到外差信号的外差频率上;外差信号通过环形器C的第三口进入第二掺铒光纤放大器EDFA2,经过第二掺铒光纤放大器EDFA2放大后,经过滤波器F滤除噪声;然后到达光电探测器PD,由高速的数据采集卡DAQ来采集信号,最后在工控机IPC上进行信号的外差解调,从而得到外界声波信号。第一声光调制器AOM1和第二声光调制器AOM2分别连接至声光调制器的驱动器AOMD。

[0039] 本实施例中,一根长度为1km的光纤来绕制水听器阵列,每个水听器探头上绕19m光纤,两个水听器探头间隔4m,即可绕制43个水听器探头。

[0040] 本实施的光纤水听器阵列系统的测量方法,包括以下步骤:

[0041] 1) 窄线宽激光器发出连续激光,中心频率为 $f_0$ ,经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 $f_1$ 并被调制成第一脉冲光,频率为 $f_0+f_1$ ,另外一路经过第二声光调制器被移频 $f_2$ 并被调制成第二脉冲光,频率为 $f_0+f_2$ ,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 $L_d$ 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率 $\Delta f$ 为50kHz,外差脉冲对的间隔为 $L_d$ ;

[0042] 2) 外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入水听器阵列的光纤;外差脉冲对在水听器阵列的光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,水听器阵列接收到的水中的外界声波信号通过干涉调制到外差信号的外差频率上,通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡来采集信号,传输至工控机;

[0043] 3) 一个外差脉冲对得到一条背向散射曲线,连续采集M条背向散射曲线, $M=100$ ,

如图2所示;

[0044] 4) 选取所有背向散射曲线的同一位置处的信号进行时域重构,将会得到同一位置处随时间变化的信号,该信号的表达式为: $I=A+B \cos [2\pi \Delta f t+\Phi (t)]$ ,其中 $\Delta f$ 为外差频率, $\Phi (t)$ 为外界声波信号引起水听器阵列的光纤中光相位的变化量, $\Phi (t)$ 与外界声波信号幅度成正比, $\Phi (t)$ 的频率与外界声波信号的频率一致;

[0045] 5) 将上述信号滤除直流成分后将得到待解调信号 $y_s=B \cos [2\pi \Delta f t+\Phi (t)]$ ,然后对待解调信号进行外差解调算法,如图3所示,具体算法过程为:将待解调信号 $y_s$ 分别与正弦信号 $\sin (2\pi \Delta f t)$ 和余弦信号 $\cos (2\pi \Delta f t)$ 进行混频并分别经过低通滤波器LPF(滤波器的截止频率 $\leq \Delta f$ ),然后两者相除得到两者的比值,最后经过反正切 $\arctan$ 运算即可得到光相位的变化量 $\Phi (t)$ 。

[0046] 最后需要注意的是,公布实施例的目的在于帮助进一步理解本发明,但是本领域的技术人员可以理解:在不脱离本发明及所附的权利要求的精神和范围内,各种替换和修改都是可能的。因此,本发明不应局限于实施例所公开的内容,本发明要求保护的范围以权利要求书界定的范围为准。

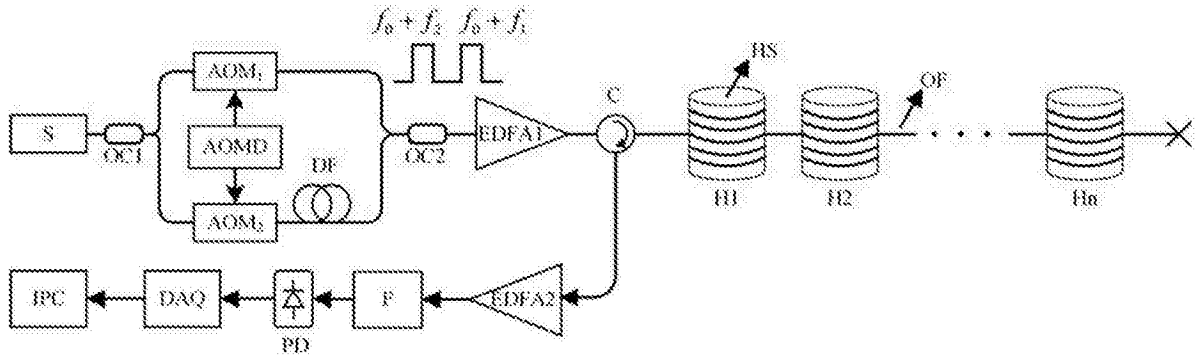


图1

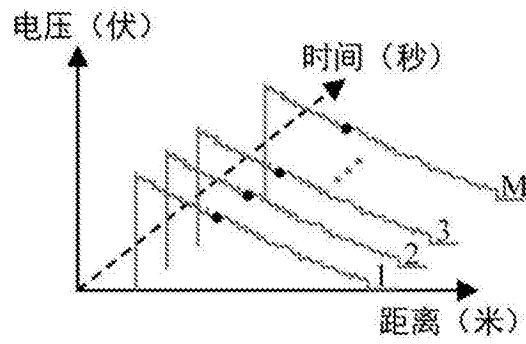


图2

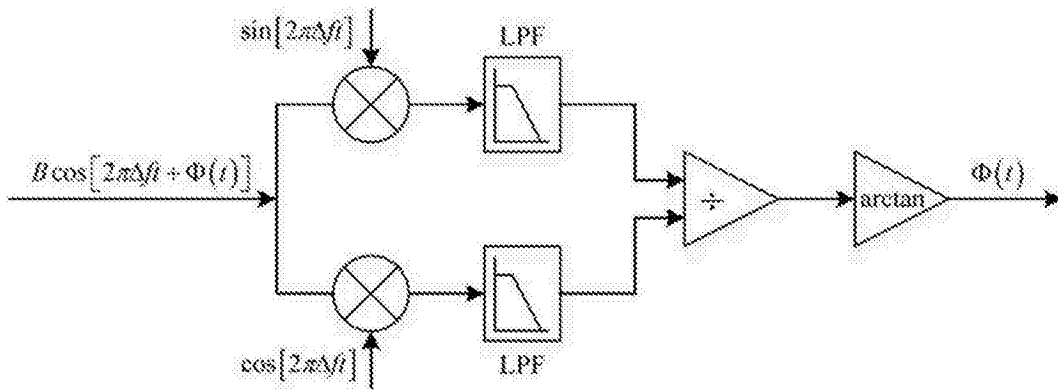


图3