



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104034409 A

(43) 申请公布日 2014. 09. 10

(21) 申请号 201410301334. 2

(22) 申请日 2014. 06. 27

(71) 申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路 92 号

(72) 发明人 封皓 施羿 曾周末 张宇

靳世久

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代

理事务所 12201

代理人 温国林

(51) Int. Cl.

G01H 9/00 (2006. 01)

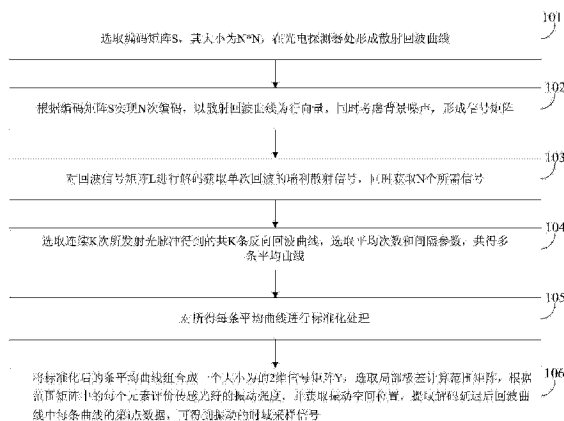
权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法及其系统

(57) 摘要

本发明公开了一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法及其系统,方法包括:选取连续 K 次所发射光脉冲得到的反向回波曲线,预设平均次数,间隔参数,获取多条平均曲线;将标准化后的平均曲线组合成一个 2 维信号矩阵 Y,选取范围矩阵计算局部极差,根据极差矩阵中每个元素评价传感光纤的振动强度,获取振动空间位置,提取解码延迟后回波曲线中每条曲线的第 i 点数据,得到振动的时域采样信号。系统包括:光电探测器形成电信号,信号采集调理装置进行放大和模数转换形成数字信号,送入计算机中完成解码、时延、定位和提取时域处理,获得分布式传感器沿线的振动情况。本发明满足了各种振动检测和监测应用,尤其是长距离的管道监测与周界安防。



1. 一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

选取编码矩阵 S ,其大小为 $N \times N$,在光电探测器处形成散射回波曲线 L_i ;以散射回波曲线 L_i 为行向量,同时考虑背景噪声,形成回波信号矩阵 L ;

对回波信号矩阵 L 进行解码获取单次回波的瑞利散射信号 ω' ,同时获取 N 个所需信号 $r_i(t)$;

选取连续 K 次所发射光脉冲得到的共 K 条反向回波曲线,预设平均次数 M ,间隔参数 n ,获取多条平均曲线;对所得每条平均曲线进行标准化处理;

将标准化后的平均曲线组合成一个 2 维信号矩阵 Y ,选取大小 $a \times b$ 局部极差计算范围矩阵,根据范围矩阵中的每个元素 y_{ij} 评价传感光纤的振动强度,并获取振动空间位置,提取解码延迟后回波曲线中每条曲线的第 i 点数据,得到振动的时域采样信号。

2. 根据权利要求 1 所述的一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法,其特征在于,所述回波信号矩阵 L 为:

$L = [L_1 L_2 \cdots L_N]^T = S \cdot [\omega_1 \omega_2 \cdots \omega_N]^T + [e_1 e_2 \cdots e_N]^T$,其中 ω_i 为脉冲 P_i 的理想散射回波曲线, e_i 为背景噪声, $i = 1, 2, \cdots, N$ 。

3. 根据权利要求 1 所述的一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法,其特征在于,所述单次回波的瑞利散射信号 ω' 为:

$$\omega' = [\omega'_1 \omega'_2 \cdots \omega'_N]^T = S^{-1} \cdot [L_1 L_2 \cdots L_N]^T;$$

所述 N 个所需信号 $r_i(t)$ 为:

$r_i(t) = \omega'_i(t + (i-1) \cdot \tau)$,其空间分辨率保持为 $R = \frac{\tau c}{2n_c}$, c 为真空中的光速, n_c 为光纤折射率, τ 为脉冲宽度。

4. 一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感系统,包括:激光光源组、声光/电光调制器及其驱动器组、FPGA、多路光耦合器、光纤环形器、光电探测器、信号采集调理装置、计算机和传感光纤,其特征在于,

由所述激光光源组产生连续光,经由所述声光/电光调制器及其驱动器组形成脉冲光,其中所述声光/电光调制器及其驱动器组由所述计算机写入所述 FPGA 的程序控制通断时序,依次产生相应时延,并使产生的脉冲光符合设定好的编码矩阵 S ,多路脉冲光在所述多路光耦合器处形成编码脉冲光,编码脉冲光经由所述光纤环形器注入所述传感光纤,在传播过程中,产生的背向散射光与输入编码脉冲光传播方向相反,编码内部的光脉冲瑞利散射光产生干涉效应,最终反向通过所述光纤环形器进入所述光电探测器形成电信号,通过所述信号采集调理装置进行放大和模数转换形成数字信号,送入所述计算机中完成解码、时延、定位和提取时域处理,获得分布式传感器沿线的振动情况。

基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法及其系统

技术领域

[0001] 本发明涉及光纤传感领域,尤其涉及一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法及其系统。

背景技术

[0002] 分布式光纤传感系统由于其灵敏度高,不受电磁干扰,检测范围广,成本低等特点,广泛应用于长距离油气管道监测及周界安防,建筑结构健康监测等领域,是近数十年的研究热点。

[0003] Mach-Zehnder/Sagnac 干涉仪分布光纤传感系统,利用检测两传感光路中由外界扰动所造成的相位差变化,并通过相关时延估计的方法进行定位,能对振动进行良好的感知。但由于相关时延估计方法本身确定时延的难度性,使得该方法定位精度不高,对振动点的准确判断困难重重。

[0004] 基于光时域反射仪(OTDR)技术的分布式光纤传感系统利用光波在光纤中传输时发生的瑞利散射现象,在背向检测瑞利散射光的强度来得到光纤的损耗变化并精确定位光纤故障点。由于这种技术是对瑞利散射光的强度进行测量,因此其测量灵敏度比较低且仅能响应静态损耗的变化。

[0005] 基于相干瑞利散射的 Φ -OTDR(相敏 OTDR)技术,通过使用长相干光源,检测光脉冲返回光的相干结果,其干涉方法能有效实现动态响应,能同时实现高定位精度和高灵敏度检测,尤其是对于微弱扰动信号的检测。同时,由于空间分辨率和脉冲长度相关,为了空间分辨率,常使用非常窄的脉冲,常见为数十至数百纳秒,因此返回光强度微弱,在长距离传输后,信号分辨率较低,限制动态范围。

[0006] 综上所述,在现有的技术方案中,Mach-Zehnder/Sagnac 干涉仪分布光纤传感系统的传感精度较高但定位能力较弱,且易受干扰;OTDR 式分布式传感系统定位的精度高但系统敏感度较差;相位敏感 OTDR 系统在定位精度和系统灵敏度方面都有较好的表现,但其脉冲宽度窄,返回光信号弱,信号分辨率差,动态范围窄,传感距离有限。

发明内容

[0007] 本发明提供了一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法及其系统,本发明在保证定位精度的条件下,克服现有检测系统传感灵敏度不足的问题,详见下文描述:

[0008] 一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法,所述方法包括以下步骤:

[0009] 选取编码矩阵 S ,其大小为 $N \times N$,在光电探测器处形成散射回波曲线 L_1 ;以散射回波曲线 L_1 为行向量,同时考虑背景噪声,形成回波信号矩阵 L ;

[0010] 对回波信号矩阵 L 进行解码获取单次回波的瑞利散射信号 ω' ,同时获取 N 个所需信号 $r_i(t)$;

[0011] 选取连续 K 次所发射光脉冲得到的共 K 条反向回波曲线,预设平均次数 M ,间隔参

数 n , 获取多条平均曲线; 对所得每条平均曲线进行标准化处理;

[0012] 将标准化后的平均曲线组合成一个 2 维信号矩阵 Y , 选取大小 $a \times b$ 局部极差计算范围矩阵, 根据范围矩阵中的每个元素 y_{ij} 评价传感光纤的振动强度, 并获取振动空间位置, 提取解码延迟后回波曲线中每条曲线的第 i 点数据, 得到振动的时域采样信号。

[0013] 所述回波信号矩阵 L 为:

[0014] $L = [L_1 L_2 \cdots L_N]^T = S \cdot [\omega_1 \omega_2 \cdots \omega_N]^T + [e_1 e_2 \cdots e_N]^T$, 其中 ω_i 为脉冲 P_i 的理想散射回波曲线, e_i 为背景噪声, $i = 1, 2, \cdots, N$ 。

[0015] 所述单次回波的瑞利散射信号 ω' 为:

[0016] $\omega' = [\omega'_1 \omega'_2 \cdots \omega'_N]^T = S^{-1} \cdot [L_1 L_2 \cdots L_N]^T$;

[0017] 所述 N 个所需信号 $r_i(t)$ 为:

[0018] $r_i(t) = \omega'_i(t + (i-1) \cdot \tau)$, 其空间分辨率保持为 $R = \frac{\tau c}{2n_c}$, c 为真空中的光速,

n_c 为光纤折射率, τ 为脉冲宽度。

[0019] 一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感系统, 包括: 激光光源组、声光/电光调制器及其驱动器组、FPGA、多路光耦合器、光纤环形器、光电探测器、信号采集调理装置、计算机和传感光纤,

[0020] 由所述激光光源组产生连续光, 经由所述声光/电光调制器及其驱动器组形成脉冲光, 其中所述声光/电光调制器及其驱动器组由所述计算机写入所述 FGPA 的程序控制通断时序, 依次产生相应时延, 并使产生的脉冲光符合设定好的编码矩阵 S , 多路脉冲光在所述多路光耦合器处形成编码脉冲光, 编码脉冲光经由所述光纤环形器注入所述传感光纤, 在传播过程中, 产生的背向散射光与输入编码脉冲光传播方向相反, 编码内部的光脉冲瑞利散射光产生干涉效应, 最终反向通过所述光纤环形器进入所述光电探测器形成电信号, 通过所述信号采集调理装置进行放大和模数转换形成数字信号, 送入所述计算机中完成解码、时延、定位和提取时域处理, 获得分布式传感器沿线的振动情况。

[0021] 本发明提供的技术方案的有益效果是: 本发明克服了现有系统信号分辨率和空间分辨率相互制约、灵敏度低、噪声水平制约动态范围的问题。且该系统具有分布式光纤监测检测系统所特有的分布式、受电磁等外界干扰小等特点, 且安装方便, 可以很好的满足各种振动检测和监测应用, 尤其是长距离的管道监测与周界安防等。

附图说明

[0022] 图 1 为一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感方法的流程图;

[0023] 图 2 为一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感系统的结构示意图。

[0024] 附图中, 各标号所代表的部件列表如下:

[0025] 1: 激光光源组; 2: 光/电光调制器及其驱动器组;

[0026] 3: FPGA; 4: 多路耦合器;

[0027] 5: 光纤环形器; 6: 光电探测器;

[0028] 7: 信号采集调理模块; 8: 计算机;

[0029] 9: 传感光纤。

具体实施方式

[0030] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面对本发明实施方式作进一步地详细描述。

[0031] 为了克服分布式光纤传感系统信号分辨率和空间分辨率的相互制约关系,在保持空间分辨率不变的情况下,本发明通过声光调制器(AOM)对分布式光纤传感系统的输入脉冲进行外编码调制,增加脉冲宽度,提高输入光能量,进而提高返回光的能量,同时通过译码过程降低系统的背景噪声,提高系统的信号分辨率。常用的脉冲编码方式有伪随机序列码、格雷码、Simplex 编码(S 编码)等。

[0032] 101:选取编码矩阵 S,其大小为 $N \times N$,在光电探测器处形成散射回波曲线 L_i ,

[0033] 即,根据需要选取 $N \times N$ (本发明推荐 $N > 3$) 的编码矩阵 $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix}$, 其

逆矩阵为 $S^{-1} = \begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} & \cdots & S'_{1N} \\ S'_{21} & S'_{22} & \cdots & S'_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S'_{N1} & S'_{N2} & \cdots & S'_{NN} \end{bmatrix}$, S 的每一行 S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为一个脉冲编码。单个

脉冲光 $P_1(t)$ 的脉冲宽度为 τ , 散射回波曲线为 $\omega_1(t)$, 则 N 个光源依次通过 N 个声光调制器 AOM 形成 N 个依次延时 τ 的脉冲 $P_2(t) = S_{i1} \cdot P_1(t-1 \cdot \tau)$, $P_3(t) = S_{i2} \cdot P_1(t-2 \cdot \tau)$, \dots , $P_N(t) = S_{iN} \cdot P_1(t-(N-1) \cdot \tau)$, 在 $N \times 1$ 耦合器处, N 个脉宽为 τ 的脉冲形成 1 个脉宽为 $N \cdot \tau$ 的脉冲, 其实际散射回波曲线为 L_i ($i = 1, 2, \dots, N$)。

[0034] 102:根据编码矩阵 S 实现 N 次编码,以散射回波曲线 L_i 为行向量,同时考虑背景噪声,形成信号矩阵 L;

[0035] 经过 N 次编码,编码脉冲回波曲线形成信号矩阵 L:

[0036] $L = [L_1 \ L_2 \ \cdots \ L_N]^T = S \cdot [\omega_1 \ \omega_2 \ \cdots \ \omega_N]^T + [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_N]^T$,

[0037] 其中 ω_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为脉冲 P_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 的理想散射回波曲线, e_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为背景噪声。

[0038] 103:对回波信号矩阵 L 进行解码获取单次回波的瑞利散射信号 ω' , 同时获取 N 个所需信号 $r_i(t)$;

[0039] 即 $\omega' = [\omega'_1 \ \omega'_2 \ \cdots \ \omega'_N]^T = S^{-1} \cdot [L_1 \ L_2 \ \cdots \ L_N]^T$, 其中, $\omega'_1 \ \omega'_2 \ \cdots \ \omega'_N$ 表示延时为 $0, \tau, 2\tau, \dots, (N-1)\tau$ 的瑞利散射回波曲线, 同时进行对应延迟处理得到 N 个所

需信号 $r_i(t) = \omega'_i(t+(i-1) \cdot \tau)$, 其空间分辨率保持为 $R = \frac{\tau c}{2n_c}$, c 为真空中的光速, n_c

为光纤折射率。

[0040] 在上述检测过程中,实现了在降低系统空间分辨率的情况下,提高了信号分辨率,降低了系统噪声。使用 N 个光源实现对光脉冲的编码,使光脉冲宽度提高 N 倍,从而使回光能量提高 N 倍,增加了信号分辨率;在接收端使用对应的解码矩阵进行解码,还原系统空间分辨率,同时降低系统背景噪声,总体提升系统信噪比,进而提升探测灵敏度和探测距离。

[0041] 104 :选取连续 K 次所发射光脉冲得到的共 K 条反向回波曲线,选取平均次数 M,间隔参数 n,共得 $T = \text{int}((K-M)/n)+1$ 条平均曲线;

[0042] 即选取连续 K 次(本发明推荐 $K > 100$,且为 N 的整数倍)所发射光脉冲得到的共 K 条反向回波曲线(每条曲线共包括 n 个采样点, $n = f_s/f$,其中 f_s 为采样频率,f 为光脉冲重复频率),即 $r = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_i, \dots, r_k]^T$,其中 r_i 对应解调延迟后得到的第 i 次光脉冲所得到的信号曲线。

[0043] 选取平均次数 M($M < K$,本发明推荐 $M > 20$),间隔参数 n(本发明推荐 $n = 5$),对 K 条曲线采用:第 1 条到第 M 条进行平均、第 n 条到第 $M-n+1$ 条进行平均……共得 $T = \text{int}((K-M)/n)+1$ 条平均曲线,即:

$$[0044] \quad R_i = \frac{1}{M} \sum_{j=(i-1)n+1}^{j=(i-1)n+M} r_j, j \in [1, T]$$

[0045] 其中 R_i 为第 i 条移动平均所得曲线, $\text{int}()$ 为向下取整运算。

[0046] 105 :对所得每条平均曲线进行标准化处理;

[0047] 上述操作过程实现了振动事件的定位和时域信号提取。使用改进型移动平均算法用于进一步稳定信号,降低噪声水平,使用标准化处理去除本底光强随传播衰减对信号波动幅值的影响,使用移动局部二维极差快速准确定位振动发生位置。

[0048] 即设 x_{ij} 为第 i 条平均曲线的第 j 个采样点的值,所使用标准化方法可以表示为:

$$[0049] \quad z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_i) / \sigma_i, i \in (1, T), j \in (1, n)$$

[0050] 其中, z_{ij} 为经过标准化处理后的各平均曲线中各采样点的值, \bar{x}_i 为第 i 条平均曲线的平均值, σ_i 为第 i 条平均曲线的标准差。

[0051] 106 :将标准化后的 T 条平均曲线组合成一个大小为 $T \times n$ 的 2 维信号矩阵 Y,选取大小 $a \times b$ 局部极差计算范围矩阵,根据范围矩阵中的每个元素 y_{ij} 评价传感光纤的振动强度,并获取振动空间位置,提取解码延迟后回波曲线中每条曲线的第 i 点数据,可得到振动的时域采样信号。

[0052] 其中,将标准化后的 T 条平均曲线组合成一个大小为 $T \times n$ 的 2 维信号矩阵 Y。选取大小 $a \times b$ 局部极差计算范围矩阵(本发明推荐使用 3×9)。依次以信号矩阵的每一个元素为中心,以 $a \times b$ 为大小分别计算各个局部极差值,极差计算为 $y_{ij} = \max(Y_{ij}) - \min(Y_{ij})$, $i \in (1, T)$, $j \in (1, n)$ 。

[0053] 其中 y_{ij} 为一矩阵 Y 以其第 i 行、第 j 列的元素为中心,大小为 $a \times b$ 的矩阵内的元素。将 y_{ij} 作为对传感光纤沿线在空间第 i 点和时间第 j 点上的评价,该值越大,表明振动越强烈。根据公式 $A = (n_c \cdot c \cdot i) / (2 \cdot f)$ 可确定振动空间位置。提取解码延迟后回波曲线 $r = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_i, \dots, r_k]^T$ 中每条曲线的第 i 点数据,即矩阵 r 的第 i 列数据,可得到振动的时域采样信号。

[0054] 一种基于脉冲编码外调制的分布式光纤振动传感系统,参见图 2,包括:激光光源组 1、声光/电光调制器及其驱动器组 2、FPGA3、多路光耦合器 4、光纤环形器 5、光电探测器 6、信号采集调理装置 7、计算机 8 和传感光纤 9,

[0055] 由激光光源组 1 产生连续光,经由声光/电光调制器及其驱动器组 2 形成脉冲光,

其中声光/电光调制器及其驱动器组 2 由计算机 8 写入 FPGA3 的程序控制通断时序,依次产生相应时延,并使产生的脉冲光符合设定好的编码矩阵 S,多路脉冲光在多路光耦合器 4 处形成编码脉冲光,编码脉冲光经由光纤环形器 5 注入传感光纤 9,在传播过程中,产生的背向散射光与输入编码脉冲光传播方向相反,编码内部的光脉冲瑞利散射光产生干涉效应,编码之间的瑞利脉冲光仅光强叠加,最终反向通过光纤环形器 5 进入光电探测器 6 形成电信号,通过信号采集调理装置 7 进行放大和模数转换形成数字信号,送入计算机 8 中完成解码、时延、定位和提取时域处理,获得分布式传感器沿线的振动情况。

[0056] 该分布式光纤振动传感系统的工作原理为:选取编码矩阵 S,其大小为 $N \times N$,依次选择编码矩阵 S 的每一行(长度为 N)为编码,则计算机 8 通过 FPGA3 控制 N 个声光/电光调制器(AOM)及其驱动器组 2,利用 N 个相同波长的长相干光源,形成 N 个互有时延的各自脉宽为 τ 的短脉冲光,在一个 $N \times 1$ 路耦合器 4 处,使 N 个互有时延的短脉冲光形成编码长度为 N,脉冲宽度为 $N \cdot \tau$ 的编码脉冲光 $P_i (i = 1, 2, \dots, N)$,并经由光纤环形器 5 注入传感光纤 9。编码脉冲光在传感光纤 9 中传播时,会形成背向瑞利散射,各个短脉冲的瑞利散射光在各自脉宽 τ 内相互干涉,再经由光纤环形器 5 并最终在光电探测器 6 上转化为可被计算机 8 采集处理的电学信号,随着编码脉冲沿传感光纤 9 的传播,在光电探测器 6 处形成散射光回波序列 $L_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。根据编码矩阵 S 实现 N 次编码,以 L_i 为行向量,形成信号矩阵 $L = [L_1 L_2 \dots L_N]^T$ 。当传感光纤 9 受到振动影响时,会造成输出的干涉光信号的变化,计算机 8 通过解码程序得到低噪声的单次回波的瑞利散射信号 ω' 。

[0057] 其中,传感光纤 9 要对振动信号敏感,可以是单模光纤,也可以是多模光纤;传感光纤 9 既可以做传感器使用,也可以作为数据通信的链路。

[0058] 编码方式可以是伪随机序列码、格雷码或 Simplex 编码(S 编码),也可以是其他具有解码降噪功能的编码方式。

[0059] 激光光源 1 为多个窄线宽激光光源,以实现编码脉冲内各个编码内部相干而各个编码之间不相干仅光强叠加,有利于获得瑞利散射的信号。

[0060] 声光/电光调制器及其驱动器组 2 要求有高调制速率和高的消光比,光脉冲越窄,系统的空间分辨率就越高;越高的消光比,系统得到的光信号就越少的包含光噪声,即系统的性能越好。

[0061] 具体实现时,光电探测器 6 为基于半导体雪崩光电二极管光电探测器,可以检测极其微弱的光信号,并且拥有高的响应速率。

[0062] 信号采集调理装置 7 包括放大、采集和数字信号处理等单元,为现有技术中公知的电路结构,本发明实施例对此不做赘述。

[0063] 本发明实施例对各器件的型号除做特殊说明的以外,其他器件的型号不做限制,只要能完成上述功能的器件均可。

[0064] 本领域技术人员可以理解附图只是一个优选实施例的示意图,上述本发明实施例序号仅仅为了描述,不代表实施例的优劣。

[0065] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

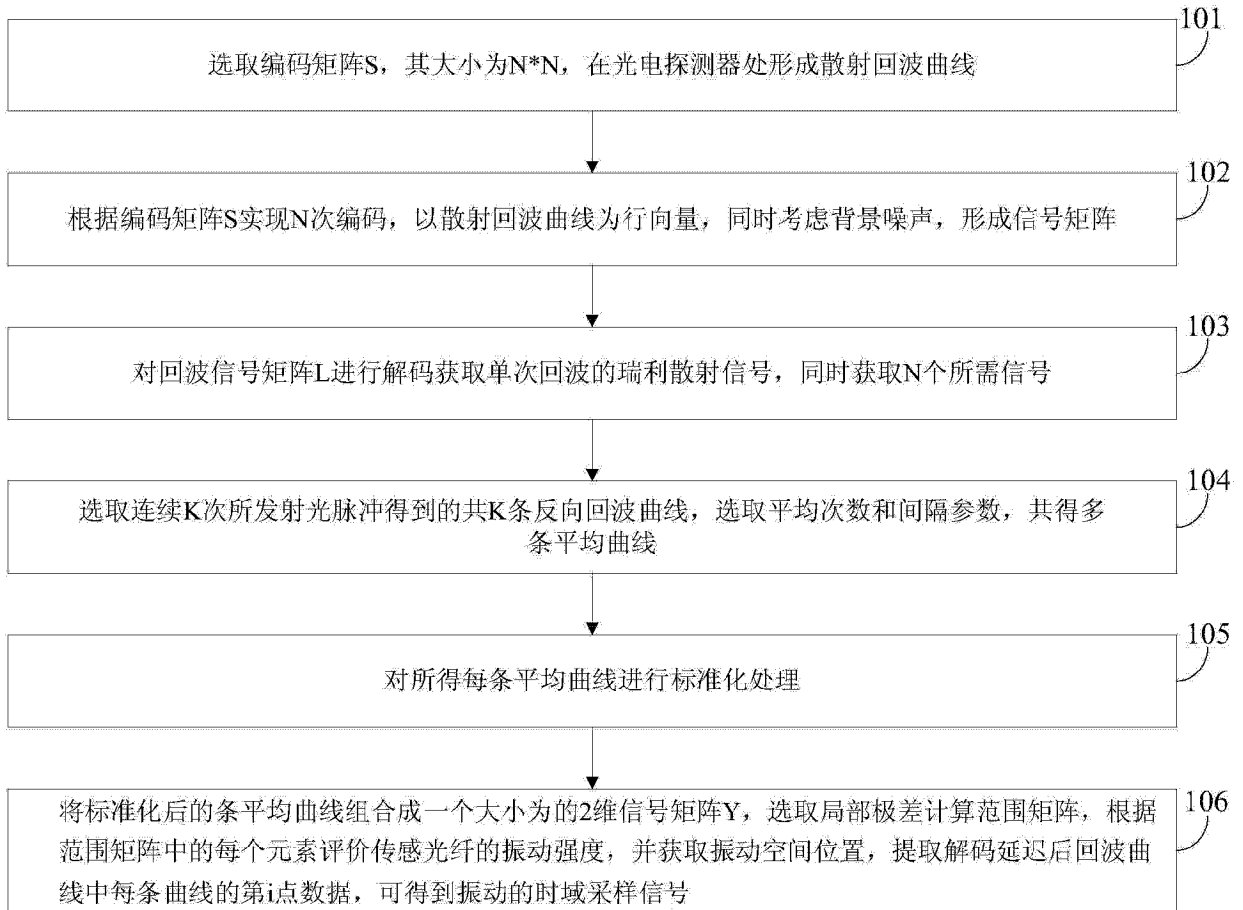


图 1

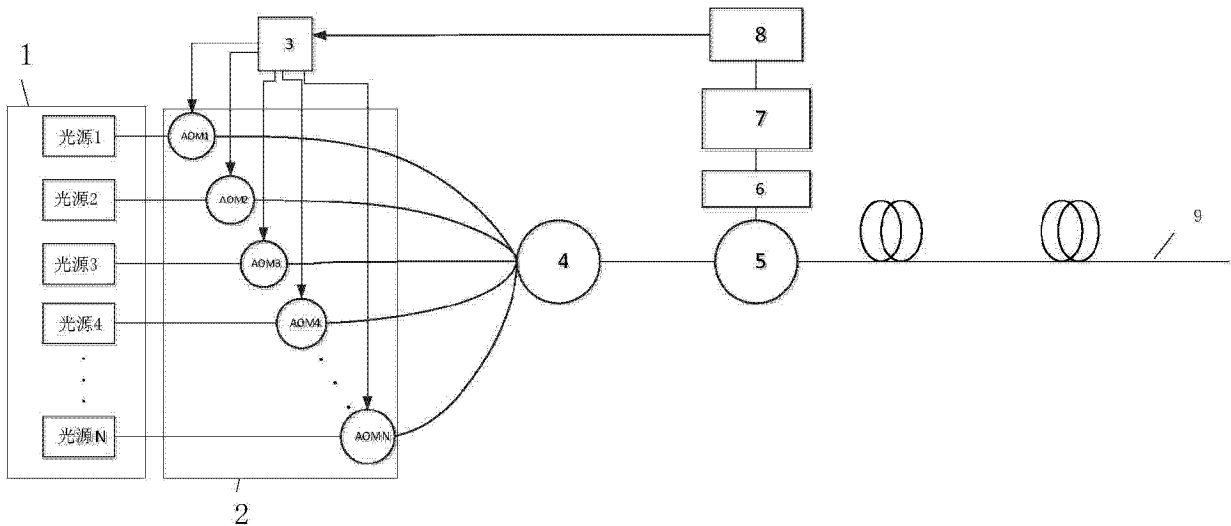


图 2