



# [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200610072879.6

[43] 公开日 2006年9月27日

[11] 公开号 CN 1837674A

[22] 申请日 2006.4.14

[21] 申请号 200610072879.6

[71] 申请人 北京工业大学

地址 100022 北京市朝阳区平乐园 100 号

[72] 发明人 何存富 杭利军 吴 斌

[74] 专利代理机构 北京思海天达知识产权代理有限公司  
代理人 张 慧

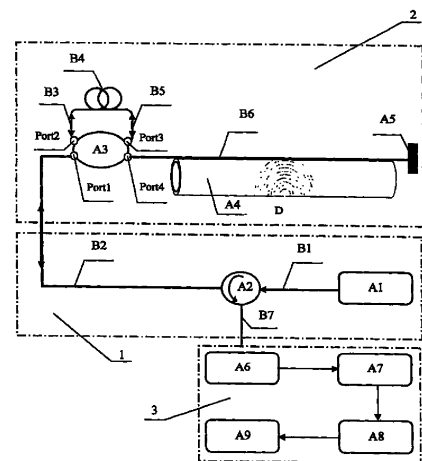
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 2 页

## [54] 发明名称

基于分布式光纤声学传感技术的管道泄漏监测装置及方法

## [57] 摘要

本发明是一种基于分布式光纤声学传感技术的管道泄漏监测装置及方法，属于管道泄漏监测领域。该装置包括有光路系统(1)、分布式光纤传感系统(2)、检测系统(3)。光路系统包括有宽带连续光源 A1，光环行器 A2；分布式光纤传感系统包括有第一耦合器 A3，延迟线圈 B4、反射镜 A5，检测系统包括有光电转换器 A6，解调系统 A7，A/D 转换器 A8、计算机 A9。宽带连续光源通过光环行器与第一耦合器 A3 的 Port1 端口连接，第一耦合器 A3 的 Port2 和 Port3 端口之间连接有延迟线圈，第一耦合器 A3 的 Port4 端口通过传感光纤连接反射镜，光环行器与检测系统的光电转换器连接。该检测系统可以检测任何时刻的的泄漏信号。



1、基于分布式光纤声学传感技术的管道泄漏监测装置，该装置主要包括有光路系统（1）、分布式光纤传感系统（2）、检测系统（3），其特征在于：该装置的光路系统（1）主要包括有宽带连续光源(A1)、光环行器(A2)，分布式光纤传感系统（2）主要包括有第一耦合器（A3）、延迟线圈(B4)，反射镜(A5)；其中，宽带连续光源（A1）通过第一单模光纤（B1）与光环行器（A2）连接，光环行器(A2)又通过第一引导光纤(B2)与第一耦合器(A3)的 Port1 端口连接，第一耦合器(A3)的 Port2 端口通过第二单模光纤（B3）与延迟线圈(B4)连接，延迟线圈(B4)通过第三单模光纤（B5）与第一耦合器（A3）的 Port3 端口连接，第一耦合器（A3）的 Port4 端口通过第一传感光纤(B6)与反射镜(A5)连接，光路系统的光环行器（A2）又通过第四单模光纤（B7）与检测系统（3）连接。

2、根据权利要求1所述的基于分布式光纤声学传感技术的管道泄漏监测装置，其特征在于：所述的检测系统（3）主要包括有光电转换器（A6）、解调系统（A7）、A/D转换器(A8)、计算机(A9)；第四单模光纤（B7）与光电转换器（A6）连接，光电转换器(A6)通过解调系统(A7)、A/D转换器(A8)与计算机(A9)连接。

3、按照权利要求1所述的基于分布式光纤声学传感技术的管道泄漏监测装置，提出一种对泄漏点定位的方法，其特征在于，该方法是按如下步骤进行泄漏点定位的：

1)当管道有泄漏点时，泄漏声发射信号由式①表示

$$\Delta\phi \sin \omega_s t \quad \text{①}$$

$\Delta\phi$  为泄漏信号的幅值， $\omega_s$  为泄漏信号的频率；

从宽带连续光源发出的光，经过光路系统和分布式光纤传感系统后，产生的两束互相干涉的第一束光和第二束光之间的相位差为：

$$\phi_s(t) = 4\Delta\phi \cos \omega_s \left( t - \frac{\tau_T}{2} \right) \sin \omega_s \left( \frac{\tau_d}{2} \right) \cos(\omega_s \tau_s) \quad \text{②}$$

其中， $\omega_s$  为泄漏声发射信号的频率， $\tau_d = \frac{\tau_3 - \tau_2 + \tau_4 - \tau_1}{2}$  为光经过延迟线圈

时间,  $\tau_s = \frac{\tau_4 - \tau_3 + \tau_2 - \tau_1}{4}$  为光从泄漏位置到反射镜所需时间,  $\tau_r = \tau_2 + \tau_3$  为光从第一耦合器 (A3) 的 port4 端口传输到反射镜并经反射镜反射, 沿原路径返回到 port4 端口, 又经 port2 端口、延迟线圈到 port3 端口的总时间,  $\tau_1$  为第一束光第一次经过泄漏点 D 的时间,  $\tau_2$  为第一束光经反射镜反射后第二次经过泄漏点 D 的时间,  $\tau_3$  为第二束光第一次经过泄漏点 D 的时间,  $\tau_4$  为第二束光经反射镜反射后第二次经过泄漏点 D 的时间;

2) 对式②作 FFT 变换, 将时域信号转换到频域, 确定延迟线圈长度, 保证在泄漏信号的宽频范围内  $\sin \omega_s \left( \frac{\tau_d}{2} \right)$  不等于零;

3) 在频域中出现的幅值为零的点对应的频率称为零点频率, 该零点频率满足  $\cos(\omega_s \tau_s) = 0$ ; 通过计算机 A9 上显示的频谱图确定该零点频率, 找到零点频率后根据  $\tau_s = \frac{\pi(1+n)}{2\omega_s}$  (n 为偶数), 计算出光从泄漏点传播到反射镜所需时间  $\tau_s$ ;

5) 再根据公式  $s = v\tau_s$  (v 为光在光纤中的传播速度) 计算出泄漏位置到反射镜的距离 s。

## 基于分布式光纤声学传感技术的管道泄漏监测装置及方法

### 技术领域

本发明是一种采用干涉型分布式光纤声学传感技术进行管道泄漏监测的装置及方法，属于管道泄漏监测领域。

### 背景技术

管道是现行的五大运输工具之一，在运送液体、气体、浆液等方面具有成本低，节省能源，安全性高及供给稳定的优势，在石油、化工、天然气及城市供水等行业中有着不可替代的作用。随着管道运输业的不断发展，为了维护管道的安全运行，管道运行监测技术也在不断发展。

近年来，随着光纤传感技术的发展，长距离分布式光纤传感技术也开始应用于管道泄漏检测。中国发明专利申请号 02145502.3 采用光时域反射技术进行油气管线泄漏检测，它是通过检测光纤中产生的瑞利散射和菲涅尔反射信号来判断光纤的故障点，主要应用于光缆的故障、光纤长度、光纤的损耗以及光纤接头损耗等检测。

中国发明专利申请 200410020046.6 采用干涉型分布式光纤微振动传感器进行管道泄漏检测，如图 1 所示。此传感器是由在管道附近沿管道并排铺设的一根三芯单模光缆及相应的光学元件构成，其中第二传感光纤 B10 和第三传感光纤 B11 组成干涉型光纤微振动传感器，传输光纤 B12 用来传输信号。其原理是光源发出的光经耦合器分光后，其中一束光经第二引导光纤 B8 传播到第二耦合器 A10，并在第二耦合器 A10 处按功率 1:1 分光后分别进入第二传感光纤 B10 和第三传感光纤 B11，另一束光经第三引导光纤 B9、传输光纤 B12 传播到第三耦合器 A11，并在第三耦合器 A11 处按功率 1:1 分光后分别进入第二传感光纤 B10 和第三传感光纤 B11，两束逆向传输的光分别在各自传输终端的第三耦合器 A11 和第二耦合器 A10 处汇合并发生干涉，因此实际上形成了两个干涉仪。当管道发生泄漏时，产生的泄漏噪声使光纤中传输的

光相位被调制，故干涉信号会发生变化，实时检测干涉光信号的变化，可以检测出光纤微振动传感器沿途所发生事件产生的微振动信号，实现管道泄漏监测。其定位原理是在分布式传感光纤中传输的两束逆向光受同一事件影响后，由于两束逆向光从事件发生处分别传播到第二耦合器 A10 和第三耦合器 A11 所经过的光程不同，因此产生一定的时间差，根据传感器两端检测到同一事件所引起的干涉光信号变化的时间差，就可以确定泄漏位置。此技术的不足之处是：由于此技术的两条传感光纤距离较近，管道沿途的振动可能使两条传感光纤产生的相位延迟一致，这时不发生干涉，即产生互易效应，且泄漏口背离光缆方向时，很难检测到泄漏发生。定位方法也有不足，只有捕捉到管道泄漏事件的起始时间才能定位，当泄漏已经发生后，该类检测技术不再具有泄漏点定位能力。

### 发明内容

本发明的目的在于克服了以上所述缺陷，提出了一种基于分布式光纤声学传感技术的管道泄漏监测装置及方法，该装置及方法的优点是整个泄漏过程中都具有泄漏点定位能力，并且检测灵敏度高、漏报率低、能实现管道长距离小泄漏检测与定位。

本发明所采用的技术方案，具体结构参见图 2，该装置主要包括有光路系统 1、分布式光纤传感系统 2、检测系统 3，其特征在于：该装置的光路系统 1 主要包括有宽带连续光源 A1、光环行器 A2，分布式光纤传感系统 2 主要包括有第一耦合器 A3、延迟线圈 B4，反射镜 A5；其中，宽带连续光源 A1 通过第一单模光纤 B1 与光环行器 A2 连接，光环行器 A2 又通过第一引导光纤 B2 与第一耦合器 A3 的 Port1 端口连接，第一耦合器 A3 的 Port2 端口通过第二单模光纤 B3 与延迟线圈 B4 连接，延迟线圈 B4 通过第三单模光纤 B5 与第一耦合器 A3 的 Port3 端口连接，第一耦合器 A3 的 Port4 端口通过第一传感光纤 B6 与反射镜 A5 连接，光路系统的光环行器 A2 又通过第四单模光纤 B7 与检测系统 3 连接。

所述的检测系统 3 主要包括有光电转换器 A6、解调系统 A7、A/D 转换器 A8、计算机 A9；第四单模光纤 B7 与光电转换器 A6 连接，光电转换器 A6 通过解调系统 A7、A/D 转换器 A8 与计算机 A9 连接。

所述的分布式光纤传感系统 2 具有直线型结构。

由宽带连续光源 A1 发出的光在本装置的传播过程，具体参见图 2，由宽带连续光源 A1 发出的光经第一单模光纤 B1 进入光环行器 A2，光环形器 A2 输出的光经第一引导光纤 B2 进入第一耦合器 A3 的 Port1 端口并按功率 1:1 分为两束光，其中第一束光从第一耦合器 A3 的 Port1 端口直接耦合入 Port4 端口，并进入第一传感光纤 B6，到达第一传感光纤 B6 末端后又经反射镜 A5 反射回第一传感光纤 B6，再经第一传感光纤 B6 返回第一耦合器 A3 的 Port4 端口，在此端口处，同样按功率 1:1 将传输光分为两束，一束直接耦合入 Port1 端口并输出，这路光不与其它光路产生干涉，因此对监测系统无影响，不予考虑。另一束光从 Port4 端口跨接耦合入 Port2 端口，经第二单模光纤 B3、延迟线圈 B4、第三单模光纤 B5 进入第一耦合器 A3 的 Port3 端口，此端口的光同样按功率 1:1 分光，但只有跨接耦合进入第一耦合器 Port1 端口的光可与第二束光发生干涉，而另一束光没有干涉现象，因此这里不考虑。

第二束光从第一耦合器 A3 的 Port1 端口跨接耦合进入 Port3 端口，经第三单模光纤 B5、延迟线圈 B4、第二单模光纤 B3 后，进入第一耦合器 A3 的 Port2 端口，在此端口处按功率 1:1 分光后，其中一束光进入第一耦合器 A3 的 Port3 端口按原路径继续沿第三单模光纤 B5，延迟线圈 B4、第二单模光纤 B3 传输，但由于光源的相干长度较短，因此这束光不会产生干涉，因此不予考虑。而另一束光经第一耦合器 A3 的 Port2 端口跨接耦合进入 Port4 端口和第一传感光纤 B6，到达第一传感光纤 B6 末端又由反射镜 A5 将其反射回第一传感光纤 B6，按原路返回到第一耦合器 A3 的 Port4 端口。同样，该束光在此端口处按功率 1:1 分光，一束光直接耦合进入 Port1 端口，与第一束光汇合，由于第一束光和第二束光具有相同的光程，因此发生干涉。（而另一束光不与

其它光发生干涉，对监测系统无影响，不予考虑。) 该干涉光经第一引导光纤 B2、光环行器 A2 和第四单模光纤 B7 进入光电转换器 A6，光电转换器 A6 将光信号转换为电信号，并由解调系统 A7 解调出干涉信号的相位，解调的信号经 A/D 转换器 A8 转换为数字信号并输入到计算机 A9，最后在计算机 A9 中对采集信号进行 FFT 变换，通过分析信号频谱，可实现泄漏报警和定位。

该系统的管道泄漏监测原理是：当管道某处有泄漏发生时，泄漏流体与泄漏孔壁产生摩擦，在管壁上激发出应力波（即泄漏声发射信号），此应力波作用到传感光纤上并对传感光纤中传输的第一束光、第二束光相位进行调制，由于存在延迟线圈，使第一束光和第二束光经过泄漏点 D 的时间不同，泄漏声发射信号对两束光的相位调制也不同，两束光间产生相位差，因此两束光发生干涉。（无泄漏发生时，两束光相位一致，不产生干涉）因此通过实时检测干涉光信号的变化，可实现管道泄漏监测。基于同样原理，当管道周围有施工、人为或自然因素等可能引起管道破坏的事件发生时，光纤受到扰动，光纤中传输的光相位被调制，因此该系统也可实现对管道周围可能引起管道发生损坏的事件进行监测。

本发明提供了一种管道泄漏位置的定位方法，其特征在于：从宽带连续光源发出的光，经过光路系统和分布式光纤传感系统后，产生两束经过相同路径的第一束光、第二束光，这两束光在第一耦合器 A3 处汇合并产生干涉。当管道有泄漏点时，泄漏声发射信号可由式①表示

$$\Delta\phi \sin \omega_s t \quad \text{①}$$

$\Delta\phi$  为泄漏信号的幅值， $\omega_s$  为泄漏信号的频率；

第一束光第一次经过泄漏点 D 的时间为  $\tau_1$ ，第一束光经反射镜反射后第二次经过泄漏点 D 的时间为  $\tau_2$ ，第二束光第一次经过泄漏点 D 的时间为  $\tau_3$ ，第二束光经反射镜反射后第二次经过泄漏点 D 的时间为  $\tau_4$ ，由于这两束光经过泄漏点 D 的时间不同，因此泄漏声发射信号对两路光的相位调制不同。两束光被调制后的相位变换为：

第一束光调制后的相位变化为

$$\Delta\phi[\sin\omega_s(t-\tau_1)+\sin\omega_s(t-\tau_2)]$$

第二束光调制后的相位变化为

$$\Delta\phi[\sin\omega_s(t-\tau_3)+\sin\omega_s(t-\tau_4)]$$

因此两束光之间产生相位差

$$\phi_s(t) = 4\Delta\phi \cos\omega_s\left(t - \frac{\tau_T}{2}\right) \sin\omega_s\left(\frac{\tau_d}{2}\right) \cos(\omega_s\tau_s) \quad (2)$$

此相位差包含了时间信息和泄漏声发射信号的频率信息，其中 $\omega_s$ 为泄漏声发射信号的频率， $\tau_d = \frac{\tau_3 - \tau_2 + \tau_4 - \tau_1}{2}$ 为光经过延迟线圈时间， $\tau_s = \frac{\tau_4 - \tau_3 + \tau_2 - \tau_1}{4}$ 为光从泄漏位置到反射镜所需时间， $\tau_T = \tau_2 + \tau_3$ 为光从第一耦合器(A3)的 port4 端口传输到反射镜并经反射镜反射，沿原路径返回到 port4 端口，又经 port2 端口、延迟线圈到 port3 端口的总时间；

从式②中求出时间 $\tau_s$ 就可根据光在光纤中传播的速度得到泄漏点距反射镜的距离。但从式②中无法直接求出 $\tau_s$ ，对式②作 FFT (付立叶)变换，将时域信号转换到频域。式②中， $4\Delta\phi \sin\omega_s\left(\frac{\tau_d}{2}\right) \cos(\omega_s\tau_s)$ 与信号的频域幅值成比例，泄漏发生后，在泄漏声发射信号的宽频范围内总有一频率使 $4\Delta\phi \sin\omega_s\left(\frac{\tau_d}{2}\right) \cos(\omega_s\tau_s) = 0$ ，而 $\sin\omega_s\left(\frac{\tau_d}{2}\right)$ 与泄漏位置无关，因此确定延迟线圈长度，保证在泄漏信号的宽频范围内 $\sin\omega_s\left(\frac{\tau_d}{2}\right)$ 不等于零，这样就有 $\cos(\omega_s\tau_s) = 0$ ，因此在频域中会出现幅值为零的点，此点对应的频率称为零点频率。为了确定此零点频率，将频域信号以频谱图的形式显示在计算机 A9 上，则频谱图上



幅值最低点对应的频率就是零点频率。在频谱图上找到零点频率后根据

$$\tau_s = \frac{\pi(1+n)}{2\omega_s} \quad (n \text{ 为偶数}),$$

计算出光从泄漏点传播到反射镜所需时间 $\tau_s$ 。求得 $\tau_s$

后, 根据公式  $s=v\tau_s$  ( $v$  为光在光纤中的传播速度) 计算出泄漏位置到反射镜的距离  $s$ 。

从公式②中也可以发现,  $\tau_r$ 、 $\tau_d$  均为定值,  $\tau_s$  是泄漏位置的函数, 整个信号与发生泄漏的初始时间无关, 只与泄漏信号的频率有关, 又因泄漏信号是一连续信号, 因此只要发生泄漏, 此传感装置可检测到任何时刻的泄漏信号, 通过对信号做频谱分析找到零点频率, 便可确定泄漏位置, 而无需专利申请 200410020046.6 那样要捕获泄漏发生的初始时间才可定位。

该系统的优点是: 本系统采用了直线型分布式光纤声学传感技术对管道进行实时监测, 整个传感部分由一根光纤构成, 因此可适应各种复杂管道的检测。由于传感器中有一延迟线圈, 使两束光到达泄漏位置的时间不同, 因此不会产生互易效应, 提高了检测灵敏度。监测系统可以检测任何时刻的泄漏信号, 因此不存在漏报警现象。同时由于光纤的低损耗以及对声信号的高敏感性, 因此可实现长距离管道的小泄漏检测。

#### 附图说明

图 1 专利申请 200410020046.6 的结构图

图 2 本发明系统结构图

图中: A1、宽带连续光源, A2、光环行器, A3、第一耦合器, A4、管道, A5、反射镜, A6、光电转换器, A7、解调系统, A8、A/D 转换器, A9、计算机, A10、第二耦合器, A11、第三耦合器, B1、第一单模光纤, B2、第一引导光纤, B3、第二单模光纤, B4、延迟线圈, B5、第三单模光纤, B6、第一传感光纤, B7、第四单模光纤, B8、第二引导光纤, B9、第三引导光纤,

B10、第二传感光纤，B11、第三传感光纤，B12、传输光纤，1、光路系统，2、分布式光纤传感系统，3、检测系统。

### 具体实施方式

本实施方式的具体结构，参见图 2，该装置主要由光路系统 1、分布式光纤传感系统 2、检测系统 3 组成。光路系统 1 又由 JW-3107 型 ASE 宽带连续光源 A1、光环行器 A2、第一引导光纤 B2 组成；分布式光纤传感系统 2 由第一耦合器 A3、延迟线圈 B4、反射镜 A5 组成；检测系统 3 由 1811 型光电转换器 A6、解调系统 A7、A/D 转换器 A8、计算机 A9 组成。其中，光路系统 1 的 ASE 宽带连续光源 A1 通过第一单模光纤 B1 与光环行器 A2 连接，光环行器 A2 又通过第一引导光纤 B2 与第一耦合器 A3 的 Port1 端口连接，第一耦合器 A3 的 Port2 端口通过第二单模光纤 B3 与延迟线圈 B4 连接，延迟线圈 B4 通过第三单模光纤 B5 与第一耦合器 A3 的 Port3 端口连接，第一耦合器 A3 的 Port4 端口与分布式光纤传感系统 2 的第一传感光纤 B6 连接，第一传感光纤 B6 的末端设置有反射镜 A5，光路系统 1 的光环行器 A2 又通过第四单模光纤与光电转换器 A6 连接，光电转换器 A6 通过解调系统 A7、A/D 转换器 A8 与计算机 A9 连接。

光路系统 1 主要用于向分布式光纤传感系统 2 中发射光波，并将分布式光纤传感系统 2 中检测到的信号传输到检测系统 3。而检测系统 3 通过光电转换器 A6 完成光信号到电信号的转换，再通过解调系统 A7 进行信号处理，然后通过 A/D 转换器 A8 将模拟信号转换为数字信号并送入计算机 A9 中进行数字信号处理和数据分析。由于光路系统 1 和检测系统 3 都安装在监控室内，而分布式光纤传感系统 2 则安装在管道现场，因此连接光路系统 1 和分布式光纤传感系统 2 的第一引导光纤 B2 在安装时必须做好隔离保护，以免损坏。

分布式光纤传感系统 2 的第一传感光纤 B6 为康宁单模光纤（SMF-28），将其随管道埋入地下或管道沟中，并用环氧树脂胶将其粘贴在管壁上，第一

传感光纤 B6 末端的反射镜 A5 置于一保护盒中。耦合器按 1:1 分光, 保证两束光强度相近, 可增加干涉信号的强度, 容易检测。分布式光纤传感系统 2 中延迟线圈 B4 的长度为 2Km, 由于泄漏声发射信号的频率小于 50KHz, 则  $\sin \omega_s \left( \frac{\tau_d}{2} \right)$  在 0-50KHz 频率范围内的值大于零, 因此不会影响零点频率。

泄漏点的定位是先通过检测系统 3 中的解调系统解调出干涉光的相位差, 然后通过 A/D 转换器将相位差的模拟信号转换为数字信号并输入计算机进行数字信号处理, 对解调信号做 FFT 变换, 频谱图上幅值最低点对应的频率为零点频率  $\omega_s$ , 将光标移到此处可直接读出零点频率值。根据  $\tau_s = \frac{\pi(1+n)}{2\omega_s}$  (n 为偶数, 有时在泄漏信号的宽频范围内出现多个零点频率, 这里仅取频率最小的零点频率, 此时 n 值为零) 计算出光从泄漏点传播到反射镜所需时间  $\tau_s$ , 再根据公式  $s = v\tau_s$  (v 为光在光纤中的传播速度) 计算出泄漏位置距反射镜的距离。

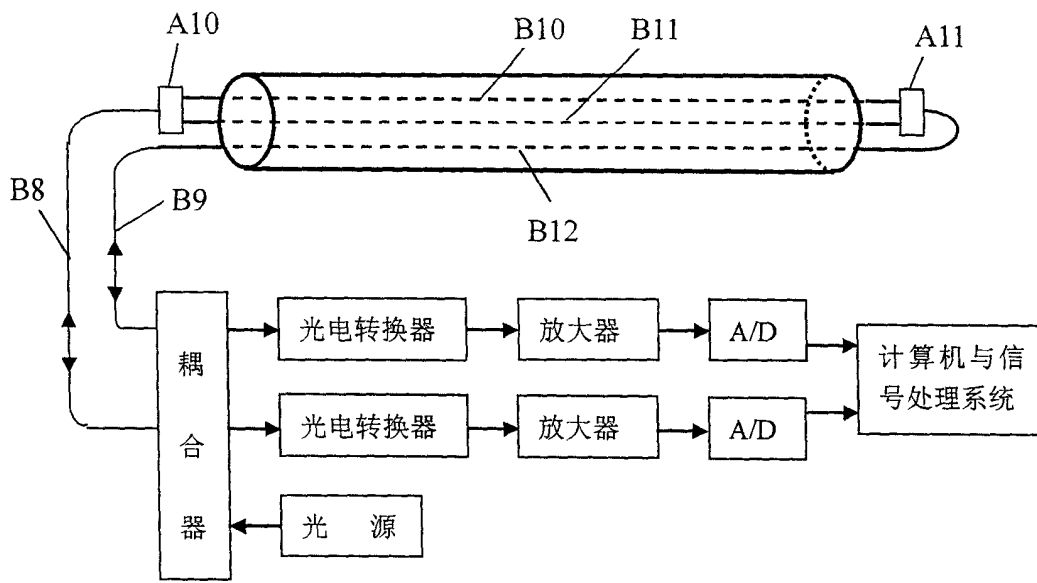


图 1

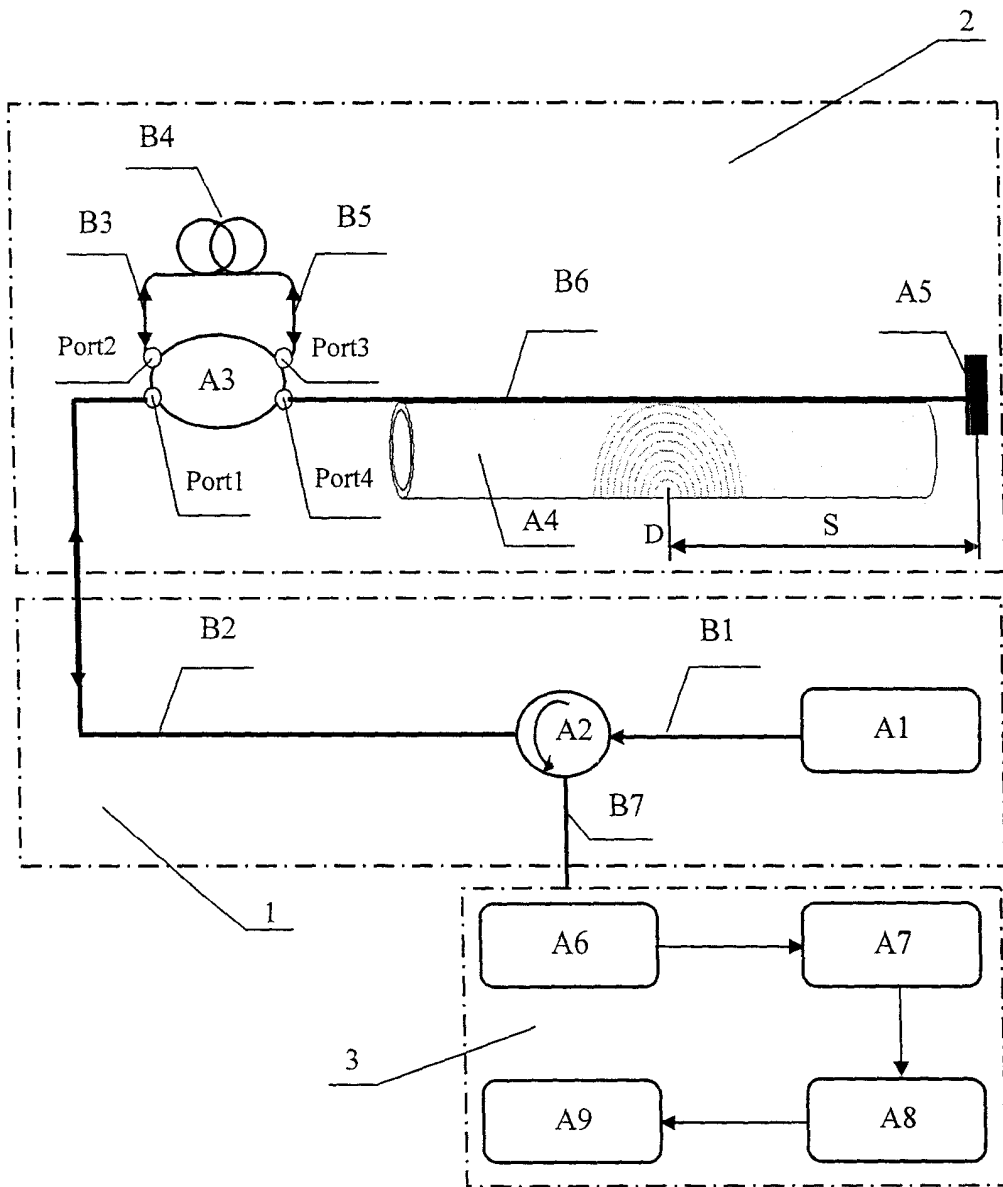


图 2