



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109323777 A

(43)申请公布日 2019.02.12

(21)申请号 201811357769.3

(22)申请日 2018.11.14

(71)申请人 四川鸿禾阳科技有限公司

地址 610051 四川省成都市成华区东三环
路二段宝耳路2号内第二号办公楼3楼
305号

(72)发明人 张舒曼 邱福平 龙伟

(51)Int.Cl.

G01K 11/32(2006.01)

G01B 11/02(2006.01)

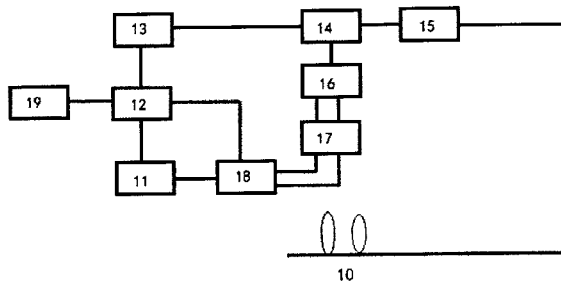
权利要求书1页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感方法及装置

(57)摘要

本发明公开的一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感方法及装置,任意阶编码矩阵,其主对角线元素全为“0”,其余元素全为“1”,依次把该矩阵的每行注入分布式光纤拉曼温度传感装置中,该装置包括半导体激光器及驱动模块,含SOA(半导体光放大器)的FPGA编码调制器,光纤放大器,光纤环形器,光纤波分复用器,恒温箱,传感光纤,探测器模块,A/D模块和工控机。结合脉冲编码原理和光纤瑞利散射辅助解调拉曼散射原理,在不改变空间分辨率的情况下提高了传感系统的动态范围,增加了测量长度和测量精度。可适用于较大范围内水、油、气管道,井,隧道和大型土木工程测量和灾害预警。



1. 一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感方法,包括以下步骤:

步骤一:工控机11执行程序初始化时产生N(比如N=100)阶矩阵 $S = (a_{ij})$,当 $i = j$ 时, $a_{ij} = 0$,当 $i \neq j$ 时, $a_{ij} = 1$,由矩阵求逆方法算出S的可逆矩阵 $S^{-1} = (b_{ij})$,当 $i = j$ 时, $b_{ij} = -\frac{N-2}{N-1}$,当 $i \neq j$ 时, $b_{ij} = \frac{1}{N-1}$,S矩阵中元素“1”代表注入传感光纤10($\leq 5\text{ns}$ 有能量, $\geq 5\text{ns}$ 无能量的10ns)的激光脉冲,元素“0”代表注入传感光纤10(10ns)无能量的激光脉冲,由包含SOA(半导体光放大器)的FPGA编码调制模块12调制;

步骤二:工控机11执行程序获取传感光纤信息时,依次发出矩阵S每行编码到FPGA编码调制模块12中,按编码调制SOA,将连续半导体激光及驱动模块19按要求产生光脉冲编码经光纤放大器13,光纤环形器14输入端后注入传感光纤10,传感光纤10上返回背散射光光纤环形器14输出端到返回端进入波分复用器16,分两路得背散射瑞利光和背散射反斯托克斯光,再到对应的APD探测器17,APD后接A/D模块18,A/D模块18以PCIeX接口与工控机11相连,经FPGA编码调制模块12送出同步电脉冲打开100Mhz16bitsA/D二路同步采集背散射瑞利光信息和背散射反斯托克斯光信息存储于A/D缓冲区中,可多次触发进行数字平均,触发周期 $\frac{C}{2nLN}$,C是光在真空中速度,n是传感光纤折射率,L是传感光纤10长度;

步骤三:工控机11执行程序获取数字平均的背散射瑞利光信息和背散射反斯托克斯光信息时,计算背向散射的瑞利光信息时利用 S^{-1} 解出传感光纤上每点的背散射瑞利光信息,并使用编码的相关性,数字平均传感光纤上每点的背散射瑞利光信息获得传感光纤的物理结构,与存储于工控机的传感光纤物理结构进行模式识别,判断传感光纤是否受到外界应力作用满足一定精度的温度测量,如否就要报警并派人检查线路,如是则进行步骤四;

步骤四:利用 S^{-1} 解出传感光纤上每点的背散射反斯托克斯光信息,并使用编码的相关性,数字平均传感光纤上每点的背散射反斯托克斯光信息,利用工控机存储的定标曲线及初始端盘有10米传感光纤放入恒温箱15中,解调出传感光纤上每点的温度值。

2. 一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感装置,包括连续半导体激光器及驱动模块19,含SOA(半导体光放大器)的FPGA编码调制器12,光纤放大器13,光纤环形器14,光纤波分复用器16,恒温箱15,传感光纤10,APD探测器模块17,A/D模块18和工控机11。

3. 根据权利要求2所述的一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感装置,上述工控机11与编码调制器12用USB或网口相连。

4. 根据权利要求2所述的一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感装置,上述含SOA的FPGA编码调制器12中AOM(声光调制器)代替SOA。

5. 根据权利要求2所述的一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感装置,上述工控机11与A/D模块18的接口用USB,PCI,PCIeX或网口相连。

一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及分布式光纤拉曼温度传感装置,特别是采用一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感方法及装置,属于光纤传感技术领域。

背景技术

[0002] ROTDR(拉曼光时域反射仪)是利用拉曼后向散射制成的分布式光纤温度传感系统。将光脉冲注入光纤中作为探测信号,在光脉冲沿着光纤传播时,各处拉曼散射的后向散射部分将不断返回光纤入射端,拉曼散射包括斯托克斯和反斯托克斯光,其中反斯托克斯光对光纤温度敏感。通过合适的光耦合器 and 高速响应的光电检测器检测到输入端的后向散射光的大小和到达时间,就能定量的测量出光纤的温度分布特性、长度等。

[0003] 高动态范围和高空间分辨率的ROTDR在光纤系统的测量中具有十分重要的作用,可以提高光纤的温度测量精度和测量长度,为光纤系统中的温度预警精确定位提供了有力保障。

[0004] 动态范围受注入光脉冲的峰值功率、脉冲宽度、光在光纤中的传输损耗、光接收机的损耗、数字处理的信噪比的影响;高空间分辨率受光脉冲的脉冲宽度、光接收机的带宽、A/D采样率的影响。可以看出同时得到大的动态范围和高的空间分辨率是不可能的,二者不可兼得。

[0005] 运用现代数字信号处理技术(即脉冲编码的方式),将注入光脉冲信号调制成编码光脉冲信号作为ROTDR的探测信号时,它的入纤光功率得到了增加,而此种光功率的增加方式并不是利用传统的增加脉冲宽度来得到的,即脉冲宽度仍保持不变。入纤光功率的增加会使ROTDR的动态范围得到提高,而脉冲宽度保持不变即空间分辨率保持不变。

[0006] 在工程实际中使用的编码方式主要有辛普森编码(Simplex code)、格雷编码(Golay code)和互补相关标准正交序列编码(Complementary Correlated Prometheus Orthonormal Sequence,CCPONS)。辛普森编码增益(N为编码序列的长度) $\frac{N+1}{2\sqrt{N}}$,由一组单级性编码矩阵完成;格雷编码增益 $\frac{\sqrt{N}}{2}$,由四组单级性编码矩阵完成,相当于由一组单级性编码矩阵完成增益 $\frac{\sqrt{N}}{4}$;互补相关标准正交序列编码增益 $\sqrt{\frac{N}{2}}$,由八组单级性编码矩阵完成,相当于由一组单级性编码矩阵完成增益 $\frac{\sqrt{N}}{4}$;发明专利CN102706475B提到的编码增益也只有 $\frac{N+1}{2\sqrt{N}}$,将辛普森编码移植在ROTDR中。辛普森编码矩阵由Hadamard矩阵去除第一行和第一列转换而成,阶数 $N=2^m-1$ (m是自然数),格雷编码和互补相关标准正交序列编码矩阵按树型追加法转换而成,阶数 $N=2^m$ (m是自然数)。

发明内容

[0007] 本发明的目的是提供一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感方法及装置,由一组单级性编码矩阵(任意阶)完成极限增益 $\frac{N+1}{2\sqrt{N}}$,以提高系统的动态范围,获得更高的温度测

量精度和测量长度。

[0008] 本发明采用瑞利散射光辅助解调反斯托克斯光的分布式光纤拉曼温度,具体方案如下:

[0009] 一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感方法及装置,如图1所示,包括以下步骤:

[0010] 步骤一:工控机11执行程序初始化时产生N(比如N=100)阶矩阵 $S = (a_{ij})$,当 $i = j$ 时, $a_{ij} = 0$,当 $i \neq j$ 时, $a_{ij} = 1$,由矩阵求逆方法算出S的可逆矩阵 $S^{-1} = (b_{ij})$,当 $i = j$ 时, $b_{ij} = -\frac{N-2}{N-1}$,当 $i \neq j$ 时, $b_{ij} = \frac{1}{N-1}$ 。S矩阵中元素“1”代表注入传感光纤10($\leq 5\text{ns}$ 有能量, $\geq 5\text{ns}$ 无能量的10ns)的激光脉冲,元素“0”代表注入传感光纤10(10ns)无能量的激光脉冲,由包含SOA(半导体光放大器)的FPGA编码调制模块12调制,这样,连续相邻的“1”光脉冲不会降低光纤拉曼受激辐射阈值。

[0011] 步骤二:工控机11执行程序获取传感光纤信息时,依次发出矩阵S每行编码到FPGA编码调制模块12中,按编码调制SOA,将连续半导体激光及驱动模块19按要求产生光脉冲编码经光纤放大器13,光纤环形器14输入端后注入传感光纤10,传感光纤10上返回背散射光经光纤环形器14输出端到返回端进入波分复用器16,分两路得背散射瑞利光和背散射反斯托克斯光,再到对应的APD探测器17,APD后接A/D模块18,A/D模块18以PCIeX接口与工控机11相连。经FPGA编码调制模块12送出同步电脉冲打开100MHz 16bits A/D二路同步采集背散射瑞利光信息和背散射反斯托克斯光信息存储于A/D缓冲区中,可多次触发进行数字平均,触发周期 $\frac{c}{2nLN}$,c是光在真空中速度,n是传感光纤折射率,L是传感光纤长度。这里100MHz A/D采样频率与10ns光脉冲对齐,当探测器APD带宽大于100MHz时,可获得传感光纤空间分辨率1m。

[0012] 步骤三:工控机11执行程序获取数字平均的背散射瑞利光信息和背散射反斯托克斯光信息时,计算背向散射的瑞利光信息时利用 S^{-1} 解出传感光纤上每点的背散射瑞利光信息,并使用编码的相关性,数字平均传感光纤上每点的背散射瑞利光信息获得传感光纤的物理结构,与存储于工控机的传感光纤物理结构进行模式识别,判断传感光纤是否受到外界应力作用满足一定精度的温度测量,如否就要报警并派人检查线路,如是则进行步骤四。

[0013] 步骤四:利用 S^{-1} 解出传感光纤上每点的背散射反斯托克斯光信息,并使用编码的相关性,数字平均传感光纤上每点的背散射反斯托克斯光信息,利用工控机存储的定标曲线及初始端盘有10米传感光纤放入恒温箱15中,解调出传感光纤上每点的温度值。

[0014] 本发明工作原理如下:

[0015] 采用序列脉冲编码解码的分布式光纤拉曼温度传感的编码解码原理:

[0016] 设注入单脉冲光 $P_1(t)$ 及经时延后注入的光脉冲为 $P_2(t), P_3(t), \dots, P_N(t)$ (比如第一组,0,1,1,……,1;第二组,1,0,1,……,1),经过ROTDR系统后得到的不包含噪声的理想信号曲线为 $\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_N(t)$ (背散射瑞利曲线或背散射反斯托克斯曲线),而得到的实际测量光信号曲线为 $\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_N(t)$, (背散射瑞利曲线或背散射反斯托克斯曲线)。此时信号中各自包含的系统噪声为 $e_1(t), e_2(t), \dots, e_N(t)$,则有下面的表达式:

$$[0017] \quad \begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \\ \vdots \\ \eta_N(t) \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \psi_1(t) \\ \psi_2(t) \\ \vdots \\ \psi_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \vdots \\ e_N(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0018] S表示N阶本发明矩阵,利用下面的公式来实现恢复注入传统单脉冲 $\psi_1(t)$ 后得到的ROTDR的理想信号曲线 $\psi_1(t)$,其中 $\hat{\psi}_i(t)$ 也表示 $\psi_1(t)$ 的估计值:

$$[0019] \quad \begin{bmatrix} \hat{\psi}_1(t) \\ \hat{\psi}_2(t) \\ \vdots \\ \hat{\psi}_N(t) \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \\ \vdots \\ \eta_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1(t) \\ \psi_2(t) \\ \vdots \\ \psi_N(t) \end{bmatrix} + S^{-1} \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \vdots \\ e_N(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0020] 利用相关公式:

$$[0021] \quad \psi_1(t+(i-1)\tau) = \psi_1(t) \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (3)$$

[0022] 有:

$$[0023] \quad \begin{bmatrix} \hat{\psi}_1(t) \\ \hat{\psi}_2(t+\tau) \\ \vdots \\ \hat{\psi}_N(t+(N-1)\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1(t) \\ \psi_2(t+\tau) \\ \vdots \\ \psi_N(t+(N-1)\tau) \end{bmatrix} + \frac{1}{N-1} T_N \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t+\tau) \\ \vdots \\ e_L(t+(N-1)\tau) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[0024] \quad \text{其中 } T_N = (N-1)S^{-1} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} & \cdots & T_{1,N} \\ T_{2,1} & T_{2,2} & \cdots & T_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ T_{N,1} & T_{N,2} & \cdots & T_{N,N} \end{bmatrix} \quad j=k, T_{jk} = -(N-2), j \neq k, T_{jk} = 1$$

[0025] 对 $\hat{\psi}_1(t)$, $\hat{\psi}_2(t)$, \dots , $\hat{\psi}_N(t)$ 进行时间平移反变换并取它们的平均值,有以下的表达式:

$$[0026] \quad \begin{aligned} \overline{\hat{\psi}} &= \frac{\hat{\psi}_1(t) + \hat{\psi}_2(t+\tau) + \cdots + \hat{\psi}_N(t+(N-1)\tau)}{N} \\ &= \psi_1(t) + \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N T_{j,k} e_k(t+(N-1)\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

[0027] 假设噪声间是不相关的,可以得到最终恢复的传统单脉冲ROTDR测量曲线的均方误差为:

$$[0028] \quad E\left\{\left(\overline{\hat{\psi}}(t) - \psi_1(t)\right)^2\right\} = \frac{1}{N^2(N-1)^2} E\left\{\left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N T_{j,k} e_k(t+(N-1)\tau)\right)^2\right\} = \frac{\sigma^2}{(N-1)^2} \quad (6)$$

[0029] 传统单脉冲ROTDR累加平均测量N次后得到的曲线的均方误差为 σ^2/N ,而用N阶S矩阵编码作为探测信号的ROTDR测量曲线的均方误差为公式(6),由此可以得使用阶数为N的S矩阵编码作为探测信号后,ROTDR系统检测信噪比与传统单脉冲ROTDR经过N次普通累加平均处理后得到的信噪比改善,即编码增益为:

$$[0030] \quad CG_s = \sqrt{\frac{\frac{\sigma^2}{N^2}}{\frac{\sigma^2}{(N-1)^2}}} = \frac{N-1}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

[0031] 本发明据公式(7)与Simplex code, Golay code, CCPONS增益公式比较, 每组编码有N-1个“1”, 应该是极限增益。且本发明的编码矩阵很容易产生。

[0032] 分布式光纤瑞利背散射光监测形变的原理:

[0033] 激光脉冲通过三端口光纤环形器射入传感光纤, 激光与光纤分子的相互作用, 产生与入射光子同频率的瑞利散射光, 瑞利散射光在光纤中传输存在损耗, 随着光纤长度而指数式衰减, 经光纤环形器和波分复用器返回光纤的背向瑞利散射光光强用下式表示:

$$[0034] \quad I_{ray} = I_0 \xi V_0^4 \exp(-2\alpha_0 L) \quad (8)$$

[0035] 上式中 I_0 为入射到光纤处的光强, L 为传感光纤长度, I_{ray} 为背向瑞利散射光在光纤长度 L 处的光强, α_0 为入射光波长处的光纤传输损耗, ξ 为光纤散射因子。工控机存储有初期布设现场的背散射瑞利曲线:

$$[0036] \quad \bar{I}_{ray} = I_0 \xi V_0^4 \exp(-2\bar{\alpha}_0 L) \quad (9)$$

[0037] 由式(8)和(9)得:

$$[0038] \quad \bar{I}_{ray} / I_{ray} = \exp[-2(\bar{\alpha}_0 - \alpha_0)L] \quad (10)$$

[0039] 由式(10)得曲线局部有明显的起伏, 说明传感光纤受外界应力影响严重, 工控机发出报警提示, 管理人员到工控机提示位置去处理; 如曲线局部没有明显的起伏, 可进行温度测量。

[0040] 分布式光纤拉曼散射温度传感器原理:

[0041] 当入射激光与光纤分子产生非线性相互作用散射, 放出一个声子称为斯托克斯拉曼散射光子, 吸收一个声子称为反斯托克斯拉曼散射光子, 光纤分子的声子频率为13.2THz。光纤分子能级上的粒子数热分布服从波尔兹曼(Boltzmann)定律, 在光纤里反斯托克斯背向拉曼散射光强为

$$[0042] \quad I_\alpha = I_0 \zeta V_\alpha^4 R_\alpha(T) \exp[-(\alpha + \alpha_0)L] \quad (11)$$

[0043] 它受到光纤温度的调制, 温度调制函数 $R_\alpha(T)$:

$$[0044] \quad R_\alpha(T) = \left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (12)$$

[0045] h 是波朗克(Planck)常数, $\Delta\nu$ 是一光纤分子的声子频率, 为13.2THz, k 是波尔兹曼常数, T 是凯尔文(Kelvin)绝对温度。

[0046] 本发明采用初始端盘有10米传感光纤放入恒温箱中的解调结构, 工控机存储有该恒温箱温度 T_0 的定标曲线:

$$[0047] \quad \bar{I}_\alpha = I_0 \zeta V_\alpha^4 R_\alpha(T_0) \exp[-(\alpha + \alpha_0)L] \quad (13)$$

[0048] 当传感光纤受外界应力变化小时(这是大概率事件), 传感光纤上温度:

$$[0049] \quad R_\alpha(T) = I_\alpha R_\alpha(T_0) / \bar{I}_\alpha \quad (14)$$

[0050] 本发明的有益效果在于:

[0051] (a) 与传统的三种Simplex,Golay code,CCPONS编码比较,编码矩阵容易产生,阶数不受限制;而且比这三种编码增益高,达到编码增益极限。

[0052] (b) 采用瑞利散射辅助解调反斯托克斯光的分布式光纤拉曼温度,单光脉冲峰值功率到达光纤受激反斯托克斯阈值,比传统斯托克斯光解调反斯托克斯光时注入单脉冲峰值功率高,也比传统瑞利光解调反斯托克斯光,同温平坦度好。

[0053] (c) 传感光纤选用多模光纤,可实现25km传感距离,选用单模光纤可实现50km传感距离,空间分辨率达1m。可用于超远程范围内水、油、气管道,井,隧道,大型土木工程监测和灾害预报监测。

附图说明

[0054] 图1是脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感装置示意图

具体实施方式

[0055] 以下将结合附图对本发明各实施例的技术方案进行清楚、完整的描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明的一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所得到的所有其它实施例,都属于本发明所保护的范围。

[0056] 参照图1,本发明采用的一种脉冲编码的分布式光纤拉曼温度传感方法及装置,该装置包括半导体激光器及驱动模块19,含SOA的FPGA编码调制器12,光纤放大器13,光纤环形器14,恒温箱15,光纤波分复用器16,传感光纤10,APD探测器模块17,A/D模块18和工控机11。工控机11与编码调制器12和A/D模块18连接,半导体激光器及驱动模块19与编码调制器12连接,编码调制器12与光纤放大器13连接,光纤放大器13与光纤环形器14输入端连接,光纤环形器14输出端与传感光纤10连接,传感光纤10初始端盘有10米放入恒温箱15中,光纤环形器14返回端与光纤波分复用器16连接,光纤波分复用器16与APD探测器模块17相连,APD探测器模块17与A/D模块18相连。工控机11执行程序初始化时产生100阶编码矩阵,其主对角线元素全为“0”,其余元素全为“1”,依次发出编码矩阵每行到FPGA编码调制模块12中,按编码调制SOA,将DBF半导体激光及驱动模块19按“0”产生10ns无能量光脉冲,“1”产生5ns有能量和5ns无能量的10ns光脉冲经光纤放大器13,光纤环形器14输入端后注入50km传感光纤10,传感光纤10上返回背散射光光纤环形器14输出端到返回端进入波分复用器16,分两路得背散射瑞利光和背散射反斯托克斯光,再到对应的APD探测器17,APD后接A/D模块18,A/D模块18以PCIeX接口与工控机11相连。经FPGA编码调制模块12送出同步电脉冲打开100Mhz16bitsA/D二路同步采集背散射瑞利光信息和背散射反斯托克斯光信息存储于A/D缓冲区中,可多次触发进行数字平均,触发周期 $\frac{C}{2mN} = 20$ 次/秒,在一分钟内完成采集,最多数字平均次数是1200次,相当于单光脉冲完成120000X99次数字平均,如不编码在一分钟内单光脉冲最多120000次采集,所以编码能提高信噪比,相应提高动态范围。这里100MHzA/D采样频率与10ns光脉冲对齐,当探测器APD带宽大于100MHz时,可获得传感光纤空间分辨率1m。

[0057] 上述工控机11与编码调制器12用USB或网口相连。

[0058] 上述含SOA的FPGA编码调制器12中AOM(声光调制器)代替SOA。

[0059] 上述工控机11与A/D模块18的接口用USB,PCI或网口相连。

[0060] 本领域的普通技术人员将会意识到,这里所述的实施例是为了帮助读者理解本发明的原理,应被理解为本发明的保护范围并不局限于这样的特别陈述和实施例。本领域的普通技术人员可以根据本发明公开的这些技术启示做出各种不脱离本发明实质的其它各种具体变形和组合,这些变形和组合仍然在本发明的保护范围内。

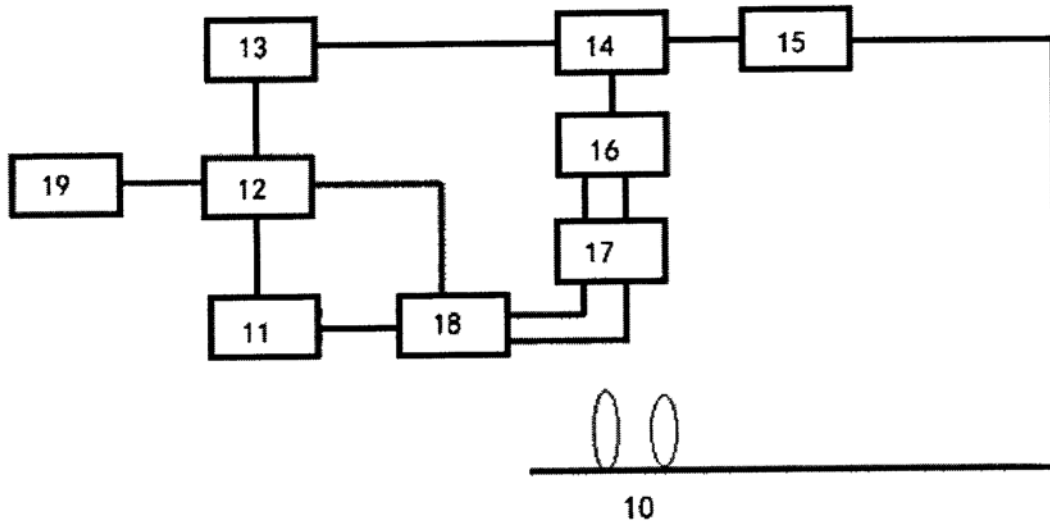


图1