



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102080954 A

(43) 申请公布日 2011.06.01

(21) 申请号 201010566550.1

(22) 申请日 2010.11.26

(71) 申请人 中国计量学院

地址 310018 浙江省杭州市江干区下沙高教
园区学源街

(72) 发明人 张在宣 王剑锋 金尚忠

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公
司 33200

代理人 韩介梅

(51) Int. Cl.

G01B 11/16(2006.01)

G01K 11/32(2006.01)

G02F 1/365(2006.01)

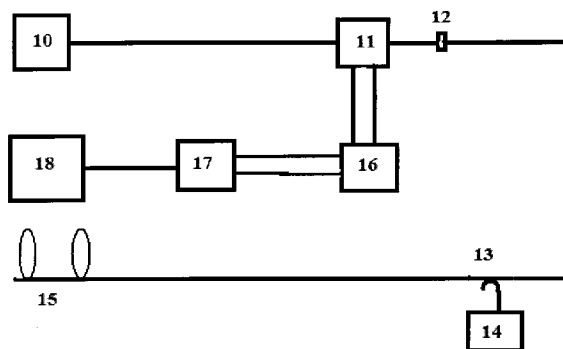
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 1 页

(54) 发明名称

超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射
传感器

(57) 摘要

本发明公开的超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器,包括光纤脉冲激光器,集成型光纤波分复用器,光纤窄带反射滤光片,光纤分路器,光纤拉曼激光器,100km 传感光纤,光电接收模块,数字信号处理器和工控机。该传感器采用分布式光纤拉曼放大器,将带有应变信息的探测激光在传感光纤中产生背向瑞利散射信号放大,并放大了带有温度信息的背向反斯托克斯散射信号,提高了传感器系统的信噪比,增加了传感器的测量长度,提高了传感器的可靠性和空间分辨率,在测量现场温度的同时能测量现场的形变、裂缝和温度并且互不交叉。具有成本低、寿命长、结构简单、信噪比好等特点,适用于超远程 100 公里范围内石化管道、隧道、大型土木工程监测和灾害预报监测。



1. 超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器,其特征是包括光纤脉冲激光器(10),集成型光纤波分复用器(11),光纤窄带反射滤光片(12),光纤分路器(13),光纤拉曼激光器(14),100km 传感光纤(15),光电接收模块(16),数字信号处理器(17)和工控机(18)。集成型光纤波分复用器(11)具有四个端口,其中 1550nm 输入端口与光纤脉冲激光器(10)相连,COM 输出端口通过光纤滤光片(12)与光纤分路器(13)的输入端相连,1450nm 输出端口和 1550nm 输出端口分别与光电接收模块(16)的两个输入端相连,光纤分路器(13)的一个输出端与光纤拉曼激光器(14)相连,光纤分路器(13)的另一个输出端接传感光纤(15),光电接收模块(16)的两个输出端分别与数字信号处理器(17)两个输入端口相连,数字信号处理器(17)将采集、累加的信号经过工控机(18)解调处理,获得 100km 传感光纤(15)所在现场的应变、温度信息并传送给远程监控网。

2. 根据权利要求 1 所述的超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器,其特征是脉冲激光器(11)的中心波长为 1550nm,光谱宽度为 0.1nm,激光脉冲宽度为 10ns,峰值功率为 1-100W 可调,重复频率为 500Hz-20KHz 可调。

3. 根据权利要求 1 所述的超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器,其特征是光纤拉曼激光器(14)为连续激光器,它的中心波长为 1465nm,光谱宽度为 0.1nm,功率 0-1.5W 可调。

4. 根据权利要求 1 所述的超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器,其特征是光纤窄带反射滤光片(12)的中心波长为 1465nm,光谱宽度为 0.3nm,对 1465nm 瑞利散射光的隔离度 > 45dB。

5. 根据权利要求 1 所述的超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器,其特征是传感光纤(15)为 100km G652 通信单模光纤。

超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器

技术领域

[0001] 本发明涉及光纤传感器领域,尤其是分布式光纤瑞利与拉曼散射应变、温度传感器。

背景技术

[0002] 长期以来,国内外在工程领域,大型土木建筑、桥梁、隧道、石化管道、储油罐和电力电缆主要使用电学应变片和热敏电阻作为应变和温度传感器,每个传感器均需连电线,组成大型检测网络,结构很复杂,这类传感器本身带电,本质上是不安全的,易受电磁干扰,不耐腐蚀,也不能定位,不适合于恶劣环境中使用,更不适合于应用地质灾害和火灾的现场。

[0003] 近年来发展起来的光纤传感器网能实现大型土木工程、电力工程、石化工业,交通桥梁,隧道,地铁站,大坝、大堤和矿业工程等安全健康监控和灾害的预报和监测。光纤传感器有两大类:一类是以光纤光栅 (FBG) 和光纤法白 (F-P) 等点式传感器“挂”(布设)在光纤上,采用光时域技术组成的准分布式光纤传感器网络,准分布式光纤传感器网的主要问题是点式传感器之间的光纤仅是传输介质,因而存在检测“盲区”;另一类利用光纤的本征特性,光纤瑞利、拉曼和布里渊散射效应,采用光时域 (OTDR) 技术组成的全分布光纤传感器网,测量应变和温度。全分布光纤传感器网中的光纤既是传输介质又是传感介质,不存在检测盲区。

[0004] 张在宣提出的《全分布式光纤瑞利与拉曼散射光子应变、温度传感器》(中国专利:ZL200910099463.7)提供了一种成本低、结构简单、信噪比好,可靠性好的分布式光纤瑞利与拉曼散射光子应变、温度传感器,适用于中、短程 0-15km 全分布式光纤传感网的检测范围。但已不能完全满足近年来石油管道、传输电力电缆的安全健康监测,对远程、超远程全分布式光纤瑞利、拉曼和布里渊散射应变、温度传感网的迫切需求。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种采用光纤拉曼放大技术的低成本、结构简单、信噪比好,可靠性好的超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器。

[0006] 本发明的超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器,包括光纤脉冲激光器,集成型光纤波分复用器,光纤窄带反射滤光片,光纤分路器,光纤拉曼激光器,100km 传感光纤,光电接收模块,数字信号处理器和工控机。集成型光纤波分复用器具有四个端口,其中 1550nm 输入端口与光纤脉冲激光器相连,COM 输出端口通过光纤滤光片与光纤分路器的输入端相连,1450nm 输出端口和 1550nm 输出端口分别与光电接收模块的两个输入端相连,光纤分路器的一个输出端与光纤拉曼激光器相连,光纤分路器的另一个输出端接传感光纤,光电接收模块的两个输出端分别与数字信号处理器两个输入端口相连,数字信号处理器将采集、累加的信号经过工控机解调处理,获得 100km 传感光纤所在现场的应变、温度信息并传送给远程监控网。

[0007] 上述的脉冲激光器的中心波长为 1550nm, 光谱宽度为 0.1nm, 激光脉冲宽度为 10ns, 峰值功率为 1-100W 可调, 重复频率为 500Hz-20KHz 可调。

[0008] 上述的光纤拉曼激光器为连续激光器, 它的中心波长为 1465nm, 光谱宽度为 0.1nm, 功率 0-1.5W 可调。光纤拉曼激光器与 100km 传感光纤构成一个前向泵浦的 C 波段光纤拉曼放大器。

[0009] 上述的光纤滤光片的中心波长为 1465nm, 光谱宽度为 0.3nm, 对 1465nm 瑞利散射光的隔离度 > 45dB。光纤窄带反射滤光片抑制 1465nm 光纤拉曼激光器在传感光纤中的背向瑞利散射, 避免瑞利散射光干扰传感光纤中 1450nm 波段的反斯托克斯拉曼散射的影响。

[0010] 上述的传感光纤为 100km G652 通信单模光纤。

[0011] 光脉冲激光器发出激光脉冲进入传感光纤, 在传感光纤中产生的背向瑞利散射、斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射光子波, 背向瑞利散射、斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射光子波, 经由光纤拉曼激光器与 100km 传感光纤构成前向泵浦的 C 波段光纤拉曼放大器放大后, 由集成型光纤波分复用器分束, 带有应变信息的背向瑞利散射光和带有温度信息的反斯托克斯拉曼散射光波分别经光电接收模块, 将光信号转换成模拟电信号并放大, 由瑞利散射光的强度比得到应变的信息, 给出传感光纤上各应变探测点的应变, 应变变化速度和方向; 由反斯托克斯拉曼散射光与瑞利散射光的强度比, 扣除应变的影响得到光纤各段的温度信息, 各感温探测点的温度, 温度变化速度和方向, 应变与温度的检测不存在交叉效应, 利用光时域反射对传感光纤上的检测点定位 (光纤雷达定位)。通过数字信号处理器与应变、温度解调软件解调并对应变与温度测进行定标, 在 60 秒内得到 100km 传感光纤上各点应变与温度变化量, 测温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$, 由计算机通讯接口、通讯协议进行远程网络传输, 当传感光纤上检测点达到设定的应变或温度报警设定值时, 向报警控制器发出报警信号。

[0012] 光纤拉曼频移器的工作原理:

[0013] 光纤拉曼频移器有单模光纤和宽带 1660nm 滤光器组成。当激光入射到单模光纤, 激光与光纤分子的非线性相互作用, 入射光子被一个光纤分子散射成另一个斯托克斯光子或反斯托克斯光子, 相应的分子完成两个振动态之间的跃迁, 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。当入射的 1550nm 激光功率达到一定阈值后, 产生放大的斯托克斯拉曼散射光, 光频移了 13.2THz, 获得了宽光谱带 1660nm 光, 经 1660nm 滤光器后作为拉曼相关光源的主光源。

[0014] 分布式光纤拉曼放大器原理

[0015] 当入射激光 ν_0 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 $\Delta \nu$, 光纤分子的声子频率为 13.2THz。

$$[0016] \quad \nu = \nu_0 \pm \Delta \nu \quad (1)$$

[0017] 放大器的开关增益为

$$[0018] \quad G_A = \exp(g_R P_0 L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}}) \quad (2)$$

[0019] 其中 $P_0 = I_0 A_{\text{eff}}$ 是放大器的泵浦光输入功率, g_R 是拉曼增益系数 A_{eff} 是光纤的有效截面, L_{eff} 为光纤的有效作用长度 (考虑了光纤对泵浦的吸收损耗), 其表达式如下:

$$[0020] \quad L_{eff} = \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)] \quad (3)$$

[0021] 对于光纤拉曼放大器, 泵浦功率只有超过某一阈值时, 才有可能对信号产生受激拉曼放大, 在光纤里的斯托克斯波 $\nu = \nu_0 - \Delta \nu$ 在光纤介质内快速增加, 大部分泵浦光的功率都可以转换成斯托克斯光, 并有拉曼放大作用, 增益可以抑制光纤的传输损耗, 提高全分布式光纤应变、温度传感器的工作距离, 这种受激拉曼散射现象用来增加全分布式光纤传感器的工作距离。

[0022] 分布式光纤瑞利散射光子传感器测量形变的原理:

[0023] 光纤脉冲激光器发出激光脉冲通过集成型光纤波分复用器射入传感光纤, 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损耗, 随光纤长度而指数式衰减, 背向瑞利散射光强用下式表示:

$$[0024] \quad I_{Ray} = I_0 \cdot \nu_0^4 \exp(-2\alpha_0 L) \quad (4)$$

[0025] 上式中 I_0 为入射到光纤处的光强, L 为光纤长度, I 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。

[0026] 由于光纤将传感光纤铺设在检测现场, 当现场环境产生形变或裂纹时, 造成铺设在现场的光纤发生弯曲, 光纤产生局部损耗, 形成光纤的附加损耗 $\Delta \alpha$, 则总损耗 $\alpha = \alpha_0 + \Delta \alpha$, 局域处的光强有一个跌落, 光强由 $I(1)$ 减少为 $I'(1)$, 形变造成的附加损耗通过光强的改变进行测量。

$$[0027] \quad \Delta \alpha = \frac{1}{2l} \log \frac{I(l)}{I'(l)} \quad (5)$$

[0028] 形变或裂纹大小与光纤损耗的关系采用仿真模型计算并在实验室进行模拟试验测量获得。

[0029] 分布式光纤拉曼散射光子传感器测量温度的原理:

[0030] 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

$$[0031] \quad I_a = I_0 \cdot \nu_a^4 R_a(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a) \cdot L] \quad (6)$$

[0032] 它受到光纤温度的调制, 温度调制函数 R_a

$$[0033] \quad R_a(T) = [\exp(h \Delta \nu / kT) - 1]^{-1} \quad (7)$$

[0034] 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。

[0035] 在本发明中采用光纤瑞利通道做参考信号, 用反斯托克斯拉曼散射光和瑞散射光利光强度的比值来检测温度

$$[0036] \quad \frac{I_a(T)}{I_R(T)} = \left(\frac{\nu_a}{\nu_0}\right)^4 \cdot \exp[(h \Delta \nu / kT) - 1]^{-1} \cdot \exp[-(\alpha_a - \alpha_0) \cdot L] \quad (8)$$

[0037] 由光纤拉曼光时域反射 (OTDR) 曲线在光纤检测点的反斯托克斯拉曼散射光和瑞散射光利光强度比, 扣除应变的影响得到光纤各段的温度信息。

[0038] 本发明的有益效果在于:

[0039] 本发明的超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器,采用分布式光纤拉曼放大器,将带有应变信息的探测激光在传感光纤中产生背向瑞利散射信号放大,并放大了带有温度信息的背向反斯托克斯散射信号,提高了传感器系统的信噪比,增加了传感器的测量长度,提高了传感器的可靠性和空间分辨率,在测量现场温度的同时能测量现场的形变、裂缝和温度并且互不交叉。在性价比上优于分布式光纤布里渊温度、应变传感器。铺设在防灾现场的传感光纤是绝缘的,不带电的,抗电磁干扰,耐辐射,耐腐蚀的,是本质安全型的,光纤既是传输介质又是传感介质,是本征型的传感光纤,且寿命长,本发明适用于超远程 100km 全分布式光纤应变、温度传感网。可用于超远程 100 公里范围内石化管道、隧道、大型土木工程监测和灾害预报监测。

附图说明

[0040] 图 1 是超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器的示意图。

具体实施方式

[0041] 参照图 1,超远程 100km 全分布式光纤瑞利与拉曼散射传感器,包括光纤脉冲激光器 10,集成型光纤波分复用器 11,光纤窄带反射滤光片 12,光纤分路器 13,光纤拉曼激光器 14,100km 传感光纤 15,光电接收模块 16,数字信号处理器 17 和工控机 18。集成型光纤波分复用器 11 具有四个端口,其中 1550nm 输入端口与光纤脉冲激光器 10 相连,COM 输出端口通过光纤滤光片 12 与光纤分路器 13 的输入端相连,1450nm 输出端口和 1550nm 输出端口分别与光电接收模块 16 的两个输入端相连,光纤分路器 13 的一个输出端与光纤拉曼激光器 14 相连,光纤分路器 13 的另一个输出端接传感光纤 15,光电接收模块 16 的两个输出端分别与数字信号处理器 17 两个输入端口相连,数字信号处理器 17 将采集、累加的信号经过工控机 18 解调处理,获得 100km 传感光纤 15 所在现场的应变、温度信息并传送给远程监控网。

[0042] 上述的脉冲激光器的中心波长为 1550nm,光谱宽度为 0.1nm,激光脉冲宽度为 10ns,峰值功率为 1-100W 可调,重复频率为 500Hz-20KHz 可调。

[0043] 上述的光纤拉曼激光器为连续激光器,它的中心波长为 1465nm,光谱宽度为 0.1nm,功率 0-1.5W 可调。

[0044] 上述的光纤滤窄带反射滤光片的中心波长为 1465nm,光谱宽度为 0.3nm,对 1465nm 拉曼激光器在光纤中产生瑞利散射光的隔离度 > 45dB。光纤窄带反射滤光片抑制 1465nm 光纤拉曼激光器在传感光纤中的背向瑞利散射,避免瑞利散射光干扰传感光纤中 1450nm 波段的反斯托克斯拉曼散射的影响。

[0045] 上述的光电接收模块采用 HZOE-GDJM-2 型光电接收模块。上述的传感光纤采用 100km G652 通信单模光纤。信号处理器采用杭州欧忆光电科技有限公司的 100MHz 带宽,250MS/s 采集率的 HZOE-SP01 型信号处理卡。

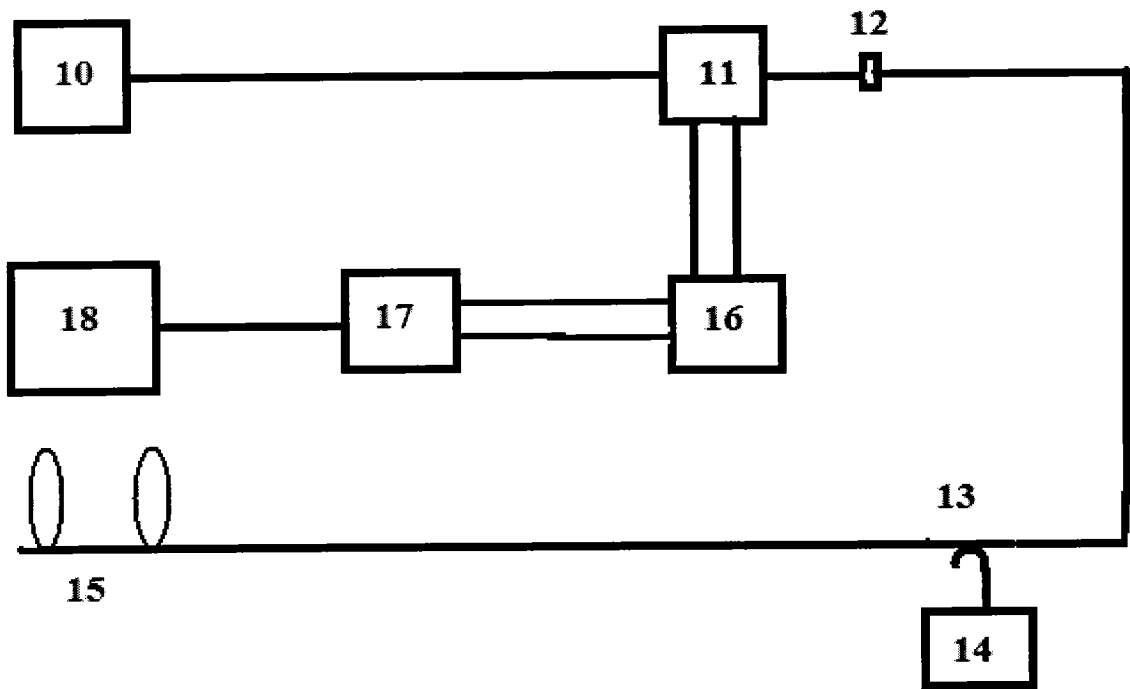


图 1