



(12) 实用新型专利

(10) 授权公告号 CN 202582784 U

(45) 授权公告日 2012. 12. 05

(21) 申请号 201220246375. 2

(22) 申请日 2012. 05. 25

(73) 专利权人 中国计量学院

地址 310018 浙江省杭州市江干经济开发区
学源街 258 号

(72) 发明人 余向东 金尚忠 张在宣 李德和
王剑锋 张文生 刘红林

(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.

G01K 11/32(2006. 01)

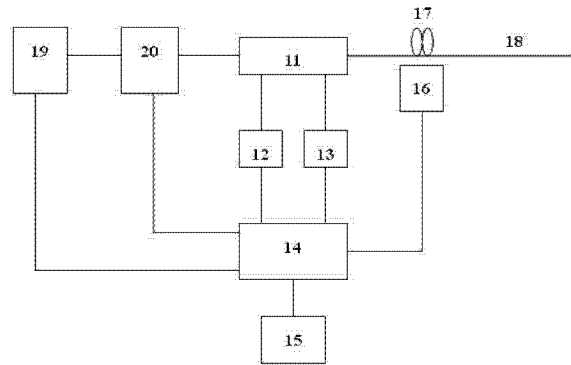
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 1 页

(54) 实用新型名称

一种采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器

(57) 摘要

本实用新型公开的采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器,包括脉冲光纤激光器,声光调制器,具有四个端口的集成型光纤波分复用器,两个光电接收放大模块,编码解码解调数字信号处理器,光纤温度取样环,本征型测温光纤,数字式温度探测器和 PC 机。该传感器基于循环 S 矩阵转换对信号进行编码和解码,利用光纤拉曼光强度受温度调制的效应和光时域反射原理进行光纤在线定位测温。使用循环激光脉冲编码解码和用瑞利通道作为温度解调参考通道,极大地改善了系统的信噪比,提高系统的测量精度和测量距离。



1. 一种采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器,其特征是包括脉冲光纤激光器(19),声光调制器(20),具有四个端口的集成型光纤波分复用器(11),两个光电接收放大模块(12、13),编码解码解调数字信号处理器(14),光纤温度取样环(17),本征型测温光纤(18),数字式温度探测器(16)和PC机(15),脉冲光纤激光器(19)的输出端与声光调制器(20)的一个输入端相连,声光调制器(20)的输出端与集成型光纤波分复用器(11)的输入端口相连,集成型光纤波分复用器(11)的第一输出端口与光纤温度取样环(17)的一端相连,光纤温度取样环(17)的另一端与本征型测温光纤(18)相连,集成型光纤波分复用器(11)的第二和第三输出端口分别与第一和第二光电接收放大模块(12、13)的输入端相连,第一和第二光电接收放大模块(12、13)的输出端分别与编码解码解调数字信号处理器(14)的两个输入端相连,编码解码解调数字信号处理器(14)的第三个输入端与数字式温度探测器(16)的输出端相连,编码解码解调数字信号处理器(14)的一个输出端与脉冲光纤激光器(19)的输入端连接,另一输出端与声光调制器(20)的另一个输入端相连,编码解码解调数字信号处理器(14)的数据传输端与PC机(15)相连。

2. 根据权利要求1所述的一种采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器,其特征是脉冲光纤激光器(19)的中心波长为1550nm,光谱宽度 $<5\text{nm}$,激光的单位脉冲宽度 $<15\text{ns}$,脉冲光纤激光器(19)由编码解码解调数字信号处理器(14)送出的固定频率的连续方波信号驱动,输出固定间隔、固定脉宽的脉冲光信号。

3. 根据权利要求1所述的一种采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器,其特征是光纤温度取样环(17)和数字式温度探测器(16)紧挨置于同一个隔热的容器内。

4. 根据权利要求1所述的一种采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器,其特征是本征型测温光纤(18)为G.652单模光纤、G.651多模光纤或62.5/125多模光纤。

一种采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器

技术领域

[0001] 本实用新型涉及分布式光纤拉曼温度传感器,特别是采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器,属于光纤传感技术领域。

背景技术

[0002] 分布光纤温度传感器系统是一种用于实时测量空间温度场分布的传感器系统,在系统中光纤既是传输媒体也是传感媒体。分布式光纤拉曼温度传感器利用光纤的喇曼光谱效应,光纤所处空间各点温度场调制了光纤中传输的光载波,经解调后,将空间温度场的信息实时显示出来。它是一个特殊的光纤通信系统;利用光纤的光时域的反射(Optical time domain reflection 简称 OTDR)技术,由光纤中光的传播速度和背向光回波的时间,对所测温度点定位,它又是一个典型的光纤激光温度雷达系统。分布式光纤拉曼温度传感器可以在线实时预报现场的温度和温度变化的取向,光纤传输光信号并不通电,因此具有很强的抗电磁干扰性能,是一种本质安全型的线型感温探测器,已在电力工业、石化企业、大型土木工程和在线灾害监测等领域成功地应用。

[0003] 典型的分布式光纤拉曼温度传感器一般采用激光单脉冲作为泵浦信号,用反斯托克斯拉曼散射光作为测量温度信号通道,斯托克斯拉曼散射光作为测量温度参考通道。由于喇曼散射光强度很弱,经光电转换后的信号往往淹没在各种噪声中,信噪比很差,而信噪比的大小是决定系统测温精度或测量距离的最重要因素,为了提高信噪比,一种办法是尽量提高泵浦脉冲激光的峰值功率,但泵浦脉冲激光的峰值功率超过光纤的非线性阈值时拉曼散射光会产生非线性效应而无法进行有效温度解调。另一种办法是对数据进行多次取样平均,但对于长距离系统需要花费大量的时间,从而降低了测温的实时反应能力。序列脉冲编码解码技术(如:Simplex codes, Golay codes 等)虽然在相同泵浦脉冲激光峰值功率下,能比单脉冲技术获得更好的信噪比(信噪比改善为 $(N+1)/2\sqrt{N}$, N 为码长),但由于序列编码脉冲单元的连续性,使得光纤非线性阈值较单脉冲大大降低,例如,对于单模光纤而言,序列编码脉冲的非线性阈值功率小于 1W,而 10ns 单脉冲系统光纤非线性阈值功率约为 5W,因此,如果泵浦脉冲激光峰值功率都处于光纤非线性阈值,采用序列编码解码技术的系统比采用单脉冲技术的系统在信噪比上实际并没有获得多大的改善。

[0004] 单模光纤因传输损耗低,更适用于长距离的分布光纤温度传感系统,但单模光纤因弯曲损耗较大,在实际工程应用中会对温度检测造成影响。对于弯曲损耗的影响,一般的方法是采用斯托克斯参考通道对反斯托克斯信号通道进行温度解调来抵消,但由于斯托克斯通道光波长较长,在单模光纤中弯曲损耗比反斯托克斯信号强得多(对于 1550nm 系统约为 5 倍),因此采用斯托克斯参考通道无法有效抵消光纤弯曲损耗的影响。此外,由于斯托克斯通道的光纤非线性阈值功率比反斯托克斯通道低很多,因此采用斯托克斯参考通道的系统的输入激光泵浦峰值功率主要受限于斯托克斯参考通道的非线性阈值功率,而输入的激光泵浦峰值功率越低,就意味着系统的信噪比越低。

发明内容

[0005] 本实用新型的目的是提供一种采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器,以提高系统的信噪比,获得更高的测量精度和更远的测量距离。

[0006] 本实用新型的采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器,包括脉冲光纤激光器,声光调制器,具有四个端口的集成型光纤波分复用器,两个光电接收放大模块,编码解码解调数字信号处理器,光纤温度取样环,本征型测温光纤,数字式温度探测器和 PC 机,脉冲光纤激光器的输出端与声光调制器的一个输入端相连,声光调制器的输出端与集成型光纤波分复用器的输入端口相连,集成型光纤波分复用器的第一输出端口与光纤温度取样环的一端相连,光纤温度取样环的另一端与本征型测温光纤相连,集成型光纤波分复用器的第二和第三输出端口分别与第一和第二光电接收放大模块的输入端相连,第一和第二光电接收放大模块的输出端分别与编码解码解调数字信号处理器的两个输入端相连,编码解码解调数字信号处理器的第三个输入端与数字式温度探测器的输出端相连,编码解码解调数字信号处理器的一个输出端与脉冲光纤激光器的输入端连接,另一输出端与声光调制器的另一个输入端相连,编码解码解调数字信号处理器的数据传输端与 PC 机相连。

[0007] 为了保证光纤温度取样环温度定标的准确性,可将光纤温度取样环和数字式温度探测器紧挨置于同一个隔热的容器内。

[0008] 本实用新型中,所述的脉冲光纤激光器的中心波长为 1550nm,光谱宽度 <5nm,激光的单位脉冲宽度 <15ns,脉冲峰值功率大于 10W。脉冲光纤激光器由编码解码解调数字信号处理器送出的固定频率的连续方波信号驱动,输出固定间隔、固定脉宽(例如 10ns)的脉冲光信号。

[0009] 本实用新型中,所述的声光调制器的中心波长为 1550nm,光谱光谱宽度 <5nm,1550nm 损耗小于 3dB,响应时间小于 50ns。该声光调制器由编码解码解调数字信号处理器送出的编码信号控制,对输入的光脉冲进行编码,当编码解码解调数字信号处理器送出的编码信号为高电平时,声光调制器让输入的光脉冲信号通过,反之,当编码解码解调数字信号处理器送出的编码信号为低电平时,不放过光脉冲,从而起到编码的作用。

[0010] 本实用新型中,所述的集成型光纤波分复用器由光纤双向耦合器、光纤平行光路、反斯托克斯拉曼散射光宽带滤光片和瑞利散射光宽带滤光片集成,具有 4 个端口,1550nm 声光调制器通过光纤双向耦合器,由第一输出端口经光纤温度取样环和本征型测温光纤相连,测温光纤的背向反斯托克斯拉曼散射和背向瑞利散射回波经过光纤平行光路分别通过 1450nm 和 1550nm 宽带滤光片由第二和第三输出端口输出。测温光纤的背向反斯托克斯拉曼散射光通过中心波长为 1450nm 宽带滤光片由第二输出端口输出,测温光纤的背向瑞利散射光通过中心波长为 1550nm 宽带滤光片由第三输出端口输出。

[0011] 本实用新型中的编码解码解调数字信号处理器由高速模数转换采集器和高速数据处理器组成。

[0012] 本实用新型中的本征型测温光纤为标准光通信用 G. 652 单模光纤、G. 651 多模光纤或 62.5/125 多模光纤,测温光纤长度为 100m ~ 50km。

[0013] 本征型测温光纤铺设在测温现场,测温光纤不带电,抗电磁干扰,耐辐射,耐腐蚀,

光纤既是传输介质又是传感介质。1550nm 脉冲光纤激光器发出的激光脉冲经声光调制器编码通过集成型光纤波分复用器射入本征型测温光纤,在本征型测温光纤上产生的背向激光反斯托克斯拉曼、瑞利光子波经集成型光纤波分复用器分束,分别与第一、第二光电接收放大模块连接,转换成模拟电信号并放大,编码解码解调数字信号处理器中的高速模数转换采集器将接收到的两路模拟电信号分别逐点采集并转换成数字信号送给高速数据处理器,高速数据处理器将接收到的数字信号进行解码,恢复出反应背向反斯托克斯拉曼光和瑞利光强度的值,该两值之比反应出光纤各段的温度信息,通过高速数据处理器解调并结合数字温度探测器测出的取样环温度值进行温度定标,给出本征型测温光纤上各点(小段)的温度,并利用光时域反射对感温光纤上拉曼光子感温火灾探测点定位(光纤雷达定位),在一定时间内得到本征型测温光纤上各段的温度和温度变化量,在 0℃ -300℃ 范围内进行在线温度监测。编码解码解调数字信号处理器将数据结果通过通讯接口、通讯协议传输给 PC 机,进行图形显示、温度报警控制。

[0014] 本实用新型的有益效果在于:

[0015] 本实用新型的采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器采用一定频率的脉冲光纤激光器作为发射源,利用声光调制器对脉冲进行编码。由于相邻激光脉冲单元间不连续,具有足够的时间间隔,使得该系统的光纤非线性阈值功率和单脉冲系统非常接近,从而可大大提高编码激光脉冲的峰值功率。循环编码解码技术的采用,又使该系统在不降低空间分辨下获得了相对于单脉冲系统 $(N+1)/2\sqrt{N}$ 倍(N 为码长)的信噪比改善。循环编码解码技术由于采用循环 S 矩阵进行解码,使系统的编码解码过程更为简单,系统只需连续循环发射一行相同的编码脉冲信号,而解码计算的复杂度也大大降低。单模光纤因传输损耗低,更适用于长距离的分布光纤温度传感系统,但单模光纤因弯曲损耗较大,在实际工程应用中会对温度检测造成影响。对于弯曲损耗的影响,一般的方法是采用斯托克斯参考通道对反斯托克斯信号通道进行温度解调来抵消,但由于斯托克斯通道光波长较长,在单模光纤中弯曲损耗比反斯托克斯信号强得多(对于 1550nm 系统约为 5 倍),因此采用斯托克斯参考通道无法有效抵消光纤弯曲损耗的影响。而瑞利散射信号的波长和反斯托克斯信号的波长更接近,光纤弯曲损耗值也较接近,本实用新型采用瑞利通道作为温度解调参考通道能更好地抵消光纤弯曲损耗的影响。采用瑞利通道的另一个好处是,系统的光纤非线性阈值功率由反斯托克斯通道决定,而反斯托克斯通道的非线性阈值功率要比斯托克斯通道高很多,这样有助于提高系统允许输入的最大泵浦峰值功率,有利于进一步提高信噪比,从而使系统能获得更高的测量精度和更远的测量距离。

附图说明

[0016] 图 1 是采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器的示意图。

[0017] 图 2 是循环脉冲编码的原理示意图。

具体实施方式

[0018] 以下结合附图进一步说明本实用新型。

[0019] 参照图 1,采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器脉冲

光纤激光器 19, 声光调制器 20, 具有四个端口的集成型光纤波分复用器 11, 两个光电接收放大模块 12、13, 编码解码解调数字信号处理器 14, 光纤温度取样环 17, 本征型测温光纤 18, 数字式温度探测器 16 和 PC 机 15, 脉冲光纤激光器 19 的输出端与声光调制器 20 的一个输入端相连, 声光调制器 20 的输出端与集成型光纤波分复用器 11 的输入端口相连, 集成型光纤波分复用器 11 的第一输出端口与光纤温度取样环 17 的一端相连, 光纤温度取样环 17 的另一端与本征型测温光纤 18 相连, 集成型光纤波分复用器 11 的第二和第三输出端口分别与第一和第二光电接收放大模块 12、13 的输入端相连, 第一和第二光电接收放大模块 12、13 的输出端分别与编码解码解调数字信号处理器 14 的两个输入端相连, 编码解码解调数字信号处理器 14 的第三个输入端与数字式温度探测器 16 的输出端相连, 编码解码解调数字信号处理器 14 的一个输出端与脉冲光纤激光器 19 的输入端连接, 另一输出端与声光调制器 20 的另一个输入端相连, 编码解码解调数字信号处理器 14 的数据传输端与 PC 机 15 相连。

[0020] 上述的脉冲光纤激光器的中心波长为 1550nm, 光谱宽度 <5nm, 激光的单位脉冲宽度 <15ns, 脉冲峰值功率大于 10W。脉冲光纤激光器由编码解码解调数字信号处理器送出的固定频率的连续方波信号驱动, 输出固定频率、固定间隔、固定脉宽 (例如 10ns) 的脉冲光信号。驱动频率的大小取决于系统测温光纤的长度和编码长度, 例如, 对于 30 公里的测温光纤和 83 位编码的系统, 驱动频率为 250kHz。光脉冲的宽度取决于所需的分辨率, 对应 1m 的空间分辨率, 所需的光脉冲半宽度大约为 10ns。

[0021] 上述的声光调制器中心波长为 1550nm, 光谱光谱宽度 <5nm, 1550nm 处损耗小于 3dB, 响应速度小于 50ns。该声光调制器由编码解码解调数字信号处理器送出的编码信号控制, 对输入的光脉冲进行编码。当编码解码解调数字信号处理器送出的编码信号为高电平时, 声光调制器让输入的光脉冲信号通过, 反之, 当编码解码解调数字信号处理器送出的编码信号为低电平时, 不放过光脉冲, 从而起到编码的作用。系统的信噪比改善程度由公式 $(N+1)/2\sqrt{N}$ 决定, N 为编码位数, 编码位数越高, 信噪比改善程度越好。

[0022] 集成型光纤波分复用器由光纤双向耦合器、光纤平行光路、1450nm 反斯托克斯拉曼散射光宽带滤光片和 1550nm 瑞利散射光滤光片集成, 具有四个端口, 其中一个 1550nm 输入端口, 三个输出端口: 1550nm (第一输出端口), 1450nm (第二输出端口) 和 1550nm (第三输出端口)。声光调制器输出的编码光脉冲通过光纤双向耦合器, 由第一输出端口经光纤温度取样环与长程测温光纤相连, 测温光纤的反斯托克斯拉曼散射回波和瑞利散射回波经过光纤平行光路分别通过 1450nm 和 1550nm 宽带滤光片由第二和第三输出端口输出。1450nm 反斯托克斯拉曼散射光宽带滤光片的中心波长为 1450nm, 光谱带宽为 36nm, 通带波纹 <0.3dB, 插入损耗 <0.3dB, 对 1550nm 光的隔离度 >35dB。1550nm 瑞利散射光宽带滤光片的中心波长为 1550nm, 光谱带宽为 5nm, 通带波纹 <0.3dB, 插入损耗 <0.3dB。

[0023] 本实用新型中的第一、第二光纤光电接收放大模块 12, 13, 分别由光纤连接的低噪声 InGaAs 光电雪崩二极管、低噪声 AD8015 前置放大器以及由 AD8129 和 AD8361 构成的可调增益主放大器构成。

[0024] 本实用新型中的编码解码解调数字信号处理器采用嵌入式设计, 可采用以德州仪器公司 (TI) 生产的 ADS62P49 采集芯片为核心的高速采集器和以美国模拟器件公司 (AD) 生产的 ADSP-BF561 芯片为核心的高速数字处理器组成的编码解码解调数字信号处理器。

[0025] 本实用新型中的数字式温度探测器可用 18B20 数字式温度探测器。

[0026] 本实用新型中的本征型测温光纤可用标准光通信用 G. 652 单模光纤、G. 651 多模光纤或 62.5/125 多模光纤,测温光纤长度为 100m ~ 50km。

[0027] 本实用新型中的光纤温度取样环采用 50 米标准光通信用 G. 652 单模光纤、G. 651 多模光纤或 62.5/125 多模光纤绕成多圈小环形成。

[0028] 采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器的编码解码原理:

[0029] 循环编码的基本原理是循环向测温光纤发送一行 N 位的二进制编码光脉冲信号, N 位编码光脉冲信号的循环周期应等于或大于(会增加测量时间)光信号在测温光纤来回所需的时间,这样整个测温光纤充满了光脉冲信号,系统测到的散射信号时域曲线呈交替重叠现象,由于 N 位编码光脉冲信号均匀分布在循环周期内,相邻码位的光脉冲有足够大的间隔时间,有效提高了测温光纤的非线性阈值功率,使系统可采用大峰值功率脉冲激光器,获得更好的信噪比。图 2 为 7 位的循环编码工作原理图,其发送的二进制码为 $P = \{0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\}$ 。

[0030] 假设一个 N 位的二进制编码模式 $P = \{P_0 \dots P_{N-1}\}$, $P_j = 0, 1, j = 0, \dots, N-1$, 将采集到的背向散射曲线分割成 N 个区间,以对应 N 位的编码模式,每个区间的起始时刻位置和对应码位的光脉冲发射时刻相一至,并且 N 位编码光脉冲循环发射。设背向散射信号的采样点数为 L, H 为每个区间对应的采样点数,则 $L = H \times N$ 。设 $i = 0, \dots, H-1$, Y_i, X_i 为两个 N 行 1 列的矩阵,并且:

$$[0031] \quad Y_i = \begin{bmatrix} y[i+0H] \\ \dots \\ y[i+jH] \\ \dots \\ y[i+(N-1)H] \end{bmatrix}, X_i = \begin{bmatrix} x[i+0H] \\ \dots \\ x[i+jH] \\ \dots \\ x[i+(N-1)H] \end{bmatrix}$$

[0032] 其中 $y[i+jH]$ 表示背向散射信号第 jH 区间第 i 个采样值,其中 $x[i+jH]$ 表示需恢复的单脉冲对应背向散射信号第 jH 区间第 i 个采样值,结合图 2 可以得出如下规律:

$$[0033] \quad Y_i = \begin{bmatrix} P_0 & P_{N-1} & \dots & P_2 & P_1 \\ P_1 & P_0 & \dots & P_3 & P_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{N-1} & P_{N-1} & \dots & P_1 & P_0 \end{bmatrix} X_i \quad (1)$$

[0034] 设上式的 N 行 N 列二进制矩阵为 S,该矩阵为以 $P_0\ P_{N-1} \dots P_2\ P_1$ 为首行的循环右移矩阵,从上式可见,循环编码背向散射信号第 jH 区间第 i 个采样值为单脉冲对应背向散射信号 N 个区间第 i 个采样值不同程度的叠加结果。

[0035] 设 S 矩阵可逆且逆矩阵为 S^{-1} ,则对循环编码背向散射信号的解码过程为:

$$[0036] \quad X_i = S^{-1} Y_i \quad (2)$$

[0037] 循环编码的过程相对序列脉冲编码解(如:Simplex codes, Golay codes 等)在实现上更简单,只需循环地向测温光纤发送 $P_0\ P_1 \dots P_{N-2}\ P_{N-1}$ 码即可。

[0038] 在相同的输入泵浦峰值光功率和相同的重复测量次数下,循环编码解码技术相对于单脉冲技术的信噪比改善为:

$$[0039] \quad SNR_N = \frac{N+1}{2\sqrt{N}} \quad (3)$$

[0040] 其中 N 为编码码长, 码长越长信噪比改善程度越高, 但实现的复杂度越高。一般 255 位以下编码较合适。当 N 取 255 时:

$$[0041] \quad SNR_{255} = \frac{255+1}{2\sqrt{255}} \approx 8.02$$

[0042] 采用循环脉冲编码解码和瑞利解调的分布式光纤拉曼温度传感器的测温原理:

[0043] 1. 光纤光时域反射 (OTDR) 原理:

[0044] 当激光脉冲在光纤中传输时, 由于光纤中存在折射率的微观不均匀性, 会产生瑞利散射, 在时域里, 入射光经背向散射返回到光纤入射端所需的时间为 t , 激光脉冲在光纤中所走过的路程为 $2L$, $2L = V \times t$, V 为光在光纤中传播的速度, $V = C/n$, C 为真空中的光速, n 为光纤的折射率。在 t 时刻测量到的是离光纤入射端光纤长度为 L 处局域的背向瑞利散射光。用光时域反射技术, 可以确定光纤处的损耗, 光纤故障点、断点的位置, 对测量点进行定位, 因此也可称为光纤激光雷达。

[0045] 在空间域里, 光纤的瑞利背向散射光子通量:

$$[0046] \quad \phi_R = K_R \cdot S \cdot v_0^4 \cdot \phi_e \cdot \exp(-2\alpha_0 L) \quad (4)$$

[0047] ϕ_e : 在光纤入射端的激光脉冲的光子通量; K_R : 与光纤瑞利散射截面相关的系数; v_0 : 入射激光的频率; S 为光纤的背向散射因子; α_0 为入射光子频率处光纤的损耗; L 为局域处离入射端的光纤长度:

$$[0048] \quad L = \frac{C \cdot t}{2n} \quad (5)$$

[0049] 2. 光纤 Raman 背向散射及其温度效应:

[0050] 在频域里, 喇曼散射光子分为斯托克斯和反斯托克斯喇曼散射光子:

$$[0051] \quad \text{斯托克斯喇曼散射光子: } v_s = v_0 - \Delta v \quad (6)$$

$$[0052] \quad \text{反斯托克斯喇曼散射光子: } v_a = v_0 + \Delta v \quad (7)$$

[0053] Δv : 光纤声子的振动频率 $\Delta v = 1.32 \times 10^{13} \text{ Hz}$ 。

[0054] 在光纤 L 处局域的斯托克斯喇曼散射光子通量:

$$[0055] \quad \phi_s = K_s \cdot S \cdot v_s^4 \cdot \phi_e \cdot \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s) \cdot L] \cdot R_s(T) \quad (8)$$

[0056] 在光纤 L 处局域的反斯托克斯喇曼散射光子通量:

$$[0057] \quad \phi_a = K_a \cdot S \cdot v_a^4 \cdot \phi_e \cdot \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a) \cdot L] \cdot R_a(T) \quad (9)$$

[0058] K_s, K_a 分别是与光纤斯托克斯和反斯托克斯喇曼散射截面有关的系数; S 为光纤的背向散射因子; v_s, v_a 分别为光纤斯托克斯和反斯托克斯喇曼散射光子频率; $\alpha_0, \alpha_s, \alpha_a$ 分别为入射光、斯托克斯喇曼散射光、反斯托克斯喇曼散射光的光纤传输损耗; T 为温度; L 为光纤待测局域处的长度; $R_s(T), R_a(T)$ 分别为与光纤分子低能级和高能级上的布居数有关的系数, 与光纤局域处的温度有关。

$$[0059] \quad R_s(T) = [1 - \exp(-h \Delta v / kT)]^{-1} \quad (10)$$

$$[0060] \quad R_a(T) = [\exp(h \Delta v / kT) - 1]^{-1} \quad (11)$$

[0061] 式中 h 为普朗克常数; k 为波耳兹曼常数, 一般解调方法是用斯托克斯喇曼散射 OTDR 曲线来解调反斯托克斯喇曼散射 OTDR 曲线, 本实用新型采用瑞利散射 OTDR 曲线来解

调反斯托克斯喇曼散射 OTDR 曲线,以更好地减少光纤弯曲损耗的影响,并有效提高系统最大的泵浦激光峰值功率:

$$[0062] \quad \frac{\phi_{aL}}{\phi_{RL}} = \frac{K_a}{K_R} \cdot \left[\frac{v_a}{v_R} \right]^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \cdot \exp[-(\alpha_a - \alpha_0)L] \quad (12)$$

[0063] 当已知取样环 L_0 处温度 $T=T_0$ 时,由 (12) 式得:

$$[0064] \quad \frac{\phi_{aL_0}(T_0)}{\phi_{RL_0}(T_0)} = \frac{K_a}{K_R} \cdot \left[\frac{v_a}{v_R} \right]^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT_0}\right) - 1 \right]^{-1} \cdot \exp[-(\alpha_a - \alpha_0)L_0] \quad (13)$$

[0065] (12) 式除 (13) 得:

$$[0066] \quad \frac{\phi_{aL}(T) \cdot \phi_{RL_0}(T_0)}{\phi_{aL_0}(T_0) \cdot \phi_{RL}(T)} = \frac{\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT_0}\right) - 1}{\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1} \cdot \exp[-(\alpha_a - \alpha_0)(L - L_0)] \quad (14)$$

[0067] 在 (14) 式中 T_0 , $\frac{\phi_{aL_0}(T_0)}{\phi_{RL_0}(T_0)}$, $\frac{\phi_a(T)}{\phi_R(T)}$ 均为已知,则可得到局域 L 处的温度 T 。

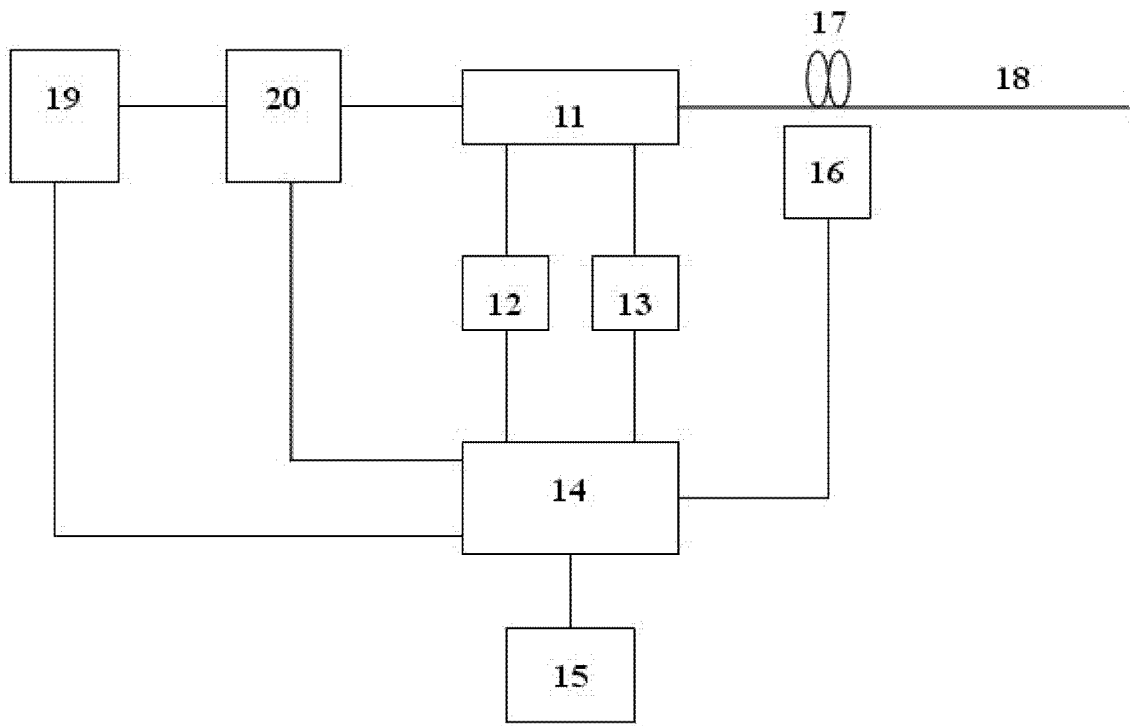


图 1

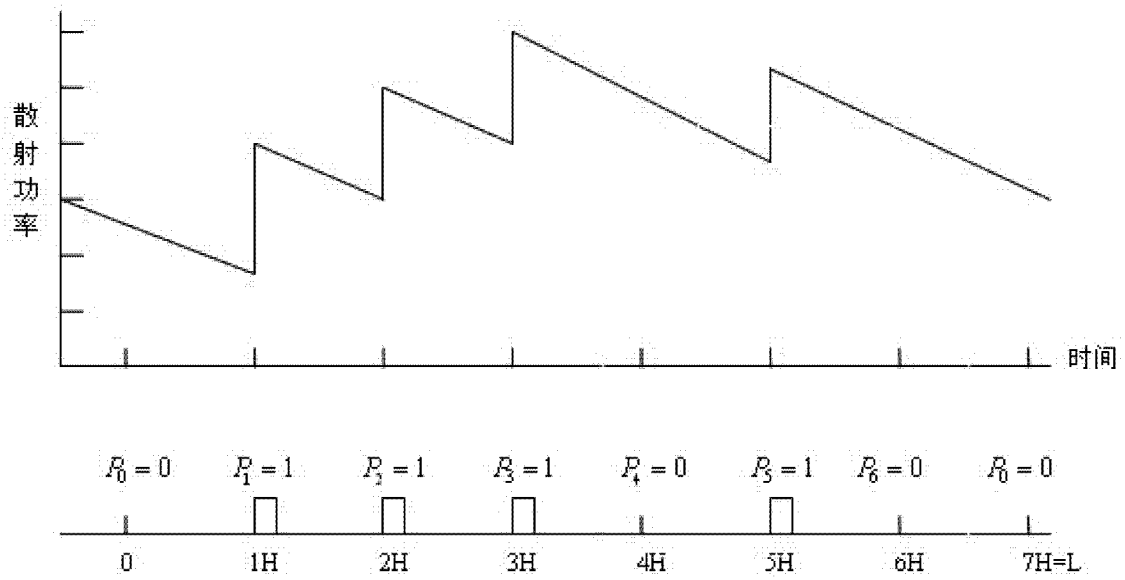


图 2