



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105973277 A

(43)申请公布日 2016.09.28

(21)申请号 201610289389.5

(22)申请日 2016.05.03

(71)申请人 华南师范大学

地址 510006 广东省广州市番禺区广州大学城外环西路378号

(72)发明人 魏正军 陈章杰 章俊超 郭梦月 单秀莲 王金东

(74)专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限公司 44102

代理人 林丽明

(51)Int.Cl.

G01D 5/26(2006.01)

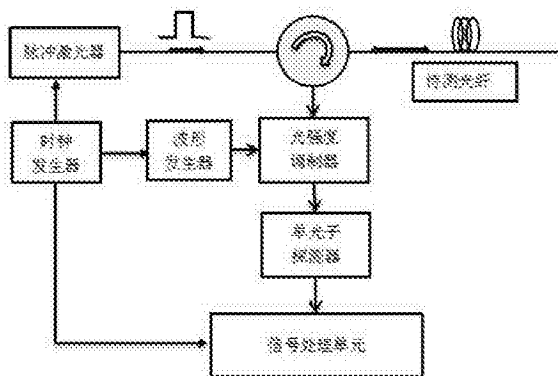
权利要求书1页 说明书10页 附图2页

(54)发明名称

基于单光子探测的分布式光纤传感系统的实现装置及方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于单光子探测的宽动态范围分布式光纤传感系统的实现装置及方法。该装置使用单光子探测器代替传统的光探测器提高了系统的探测灵敏度;使用光强度调制器对传感光纤的返回信号幅度进行实时整形,克服了单光子探测器饱和光强过低导致动态范围小的问题,提高光纤传感距离。结构原理:激光器经环形器向传感光纤注入激光脉冲。携带传感信息的背向散射光经过环形器再入射到光强度调制器。波形发生器输出与背向散射光信号同步的驱动信号来控制光强度调制器的衰减值。衰减后的光信号由单光子探测器探测。信号处理单元根据光强度调制器的衰减值和单光子探测器的输出值,恢复出原始信号光的强度,从而实现宽动态范围分布式光纤传感。



1. 一种基于单光子探测的宽动态范围分布式光纤传感系统的实现装置,其特征在于,该装置包括脉冲激光器、环形器、时钟发生器、波形发生器、传感光纤、光强度调制器、单光子探测器和信号处理单元,所述的脉冲激光器在时钟发生器的触发下经环形器向传感光纤注入激光脉冲,产生携带传感信息的背向散射光经过环形器入射到光强度调制器,波形发生器输出与背向散射光信号同步的驱动信号,控制光强度调制器的衰减值,经光强度调制器衰减后的信号再由单光子探测器探测,最后由信号处理单元根据探测到的信号强度,并恢复出原始散射信号光的强度,从而实现宽动态范围的分布式光纤传感。

2. 根据权利要求1所述的装置,其特征在于,使用光强度调制器对传感光纤的返回信号幅度进行实时整形,使得进入光强度调制器的传感光纤的背向散射光信号近端衰减大、远端衰减小。

3. 根据权利要求1所述的装置,其特征在于,其特征在于:上述动态范围定义为初始的背向散射光功率和噪声峰值功率之比,光强度调制器能够增大分布式光纤传感系统允许的最大初始背向散射光功率,单光子探测器能够降低分布式光纤传感系统噪声峰值功率,从而使装置的宽动态范围得以更好地实现。

4. 一种应用基于单光子探测的宽动态范围分布式光纤传感系统的实现装置的方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 脉冲激光器通过传感光纤的实际测量范围需求来设定输入光脉冲功率的大小,并在时钟发生器的触发下提供光脉冲信号;

2) 光脉冲信号通过与环形器连接,将功率为 P_0 的光脉冲注入传感光纤,当光脉冲在传感光纤内传输时,会由于光纤本身的性质而产生散射、反射或发生衰减,此外,光脉冲在传感光纤传输过程中会发生非线性效应,产生携带传感信息且光功率为 $P(L)$ 的背向散射光,当背向散射光沿反方向返回到光强度调制器时,其光功率变为 $P_s(L)$,此时得到的传感光纤沿路的背向散射光功率为一条指数衰减的曲线,该曲线表示出了传感光纤沿路的损耗情况,此时,动态范围 D_1 由初始的背向散射光功率 P_1 和噪声峰值功率 P_2 决定,从而得到此时可测量的传感距离为 L_1 ;

3) 通过光强度调制器和波形发生器,对返回的背向散射光进行同步调制,使近端的背向散射光衰减大、远端的衰减小,入射进光强度调制器之前的背向散射光的光功率呈指数衰减,那么,经光强度器调制的背向散射光功率的真实输出曲线会呈现阶段性水平趋势。

基于单光子探测的分布式光纤传感系统的实现装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光纤传感技术领域,更具体地,涉及一种基于单光子探测的宽动态范围分布式光纤传感系统的实现装置及方法。

背景技术

[0002] 分布式光纤传感技术是利用光纤几何上一维特性进行测量,光纤既作传感元件,又作传输元件,它把被测参量作为光纤位置长度的函数,对沿光纤几何路径分布的外部物理参量进行连续地测量,提供了同时获取被测物理参量随空间和时间变化的信息的手段。它最显著的优点就是可以准确地测出光纤沿线任意点上的应力、温度、振动和损伤等信息,无需构成回路。一次测量就可以获取整个光纤区域内被测量的一维分布,将光纤铺设成网状结构就可测定被测量的二维或三维分布情况,同时由于光纤传输损耗小,所以可实现几十甚至上百公里的全分布式测量。可对参数变化进行实时检测,这有利于大范围网络化和智能化的发展,实现对监测对象的全方位智能监测,从而克服传统点式监测漏检的弊端,分布式光纤传感系统中的传感光纤由于具备提取大范围测量场的分部信息的能力,能够解决目前测量领域的众多难题,因此具有巨大的应用潜力。让其在国防和民用工业中占据重要地位。

[0003] 例如,用于测量某种物理量(温度、应力等)的分布式光纤传感器,通常是将传感光纤沿物理量场分布,测量激光在传感光纤中传输时所产生的散射光,根据散射光所携带的待测物理信息,同时采用光时域反射技术,对沿光纤传输路径的空间分布和随时间变化的传感信息进行测量和监控:激光器在一定控制下经环形器向传感光纤注入激光,而传感光纤敷设在待测的场内,光脉冲在光纤传输过程中发生非线性效应,产生散射光,再由理论分析背向散射光中相关信号的大小来表征待测点的物理量,依据在测量终端接收到该信号在时间上的先后来确定其在光纤上的对应位置,从而用传感光纤实现待测物理量场的分布式测量。

[0004] 但现在技术上存在两个问题:

[0005] (1)光脉冲信号在光纤中传输时会产生衰减,传输越远,衰减就越大,传感光纤的传感距离越长,远端返回的散射光信号就越弱,甚至会淹没在噪声里,用通常的探测方法不能把这种湮没在噪声中的信号提取出来,所以就要求探测器具有很高的灵敏度。而单光子探测器采用的是一种极微弱光探测法,而能够对单个光子能量水平的微弱光信号进行探测,灵敏度比普通的探测器高5~7个数量级。将单光子探测技术应用到分布式光纤传感系统中,可以大大提高随着光纤传感系统的灵敏度和测量结果的信噪比。

[0006] (2)分布式光纤传感的动态范围定义为初始的背向散射光功率和噪声峰值功率之比。它决定了系统所能测得的最大传感距离,一般采用对数单位(dB)。为增大测量的最大传感距离,就必须提高系统动态范围,当探测器被确定后,也就是需要增大系统装置的初始背向散射光功率。单光子探测器的入射背向散射光功率必须小于探测器的最大饱和光功率,否则发生堆积效应,造成计数饱和。目前红外单光子探测器的最大计数频率受后脉冲问题

的制约,远远小于探测器电路的重复频率。受堆积效应引起的计数饱和效应的影响,单光子探测器的饱和光功率远小于传统探测器,所以增大散射光功率的范围很受限制,这是目前单光子探测器急需解决的难点和问题。

发明内容

[0007] 为了克服上述现有技术的不足,本发明首先提供了一种基于单光子探测的宽动态范围分布式光纤传感系统的实现装置。该方法使用单光子探测器代替传统的光探测器,提高了系统的探测灵敏度;使用光强度调制器对传感光纤的返回信号幅度进行实时整形,克服了单光子探测器饱和光强过低导致动态范围小的问题,提高光纤传感距离。

[0008] 本发明还提供一种基于单光子探测的宽动态范围分布式光纤传感系统的实现方法。

[0009] 为了实现上述目的,本发明所采用的技术方案是:

[0010] 一种基于单光子探测宽动态范围的分布式光纤传感系统的实现装置,主要包含脉冲激光器(光源)、环形器、传感光纤(传感光纤是指放在待测物理环境中的光纤;当入射光在传感光纤中传输过程中受到物理环境的作用时,会发生散射效应,其中产生的沿原路返回的背向散射光就是要探测的携带传感信息的信号光)、波形发生器、光强度调制器、单光子探测器和信号处理单元。所述的脉冲激光器在时钟发生器的触发下经环形器向传感光纤注入激光脉冲,携带传感信息的背向散射光经过环形器入射到光强度调制器,波形发生器输出与背向散射光信号同步的驱动信号来控制光强度调制器的衰减值,使得传感光纤的背向散射光信号,使原本呈现一定指数衰减形式的背向散射光信号在光强度调制器对其近端衰减大、远端衰减小的调整之后,进入到单光子探测器的信号强度将趋于相对平稳,最后由信号处理单元恢复出原始散射信号光的强度,从而实现宽动态范围的分布式光纤传感(分布式光纤传感的动态范围表示初始的背向散射光功率和噪声峰值功率之差)。

[0011] 光强度调制器的功能:主要是调制整条传感光纤上返回散射光的强度幅度值,使得传感光纤的背向散射光信号近端衰减大、远端衰减小,使光强度调制器的输出光强趋于稳定。当增大入射光强时,经光强度调制整形后的背向散射光不仅避免了近端光强过大而导致单光子探测器饱和,而且使传感光纤的散射光强能随入射光功率增大而增强,从而避免了远端信号因过弱而淹没在噪声里,最后再解调恢复信号,从而可以增大动态范围,提高传感距离。

[0012] 本发明装置的主要原理如下:

[0013] 光纤本身作为传感元件,利用其材料本身对光波的散射特性,可以构建成分布式的光纤传感器。在分布式光纤传感系统中,注入传感光纤(传感元件)中的高功率的光脉冲,在传输过程中会由于吸收、散射和波导缺陷等机理产生功率损耗,从而引起光强衰减,分布式光纤传感器就是利用返回的背向散射光信号的强度,在显示器上呈现出一个倾斜的曲线,根据该曲线可以测量出光纤的衰减系数,根据任何集总的不均匀点,比如连接处、熔点、断点等在背向散射光的回波信号曲线中出现的尖峰或者凹陷;以及外部环境,包括温度和应变力的变化,同样也会反映在回波信号的强度曲线上,从而根据曲线特性分析出待测场所发生的物理事件以及位置。

[0014] 分布式光纤传感器作为光纤衰减特性的表征和断点、扰动、温度、压力等的探测手

段,动态范围是其主要性能指标之一,分布式光纤传感的动态范围表示初始的背向散射光功率和噪声峰值功率之比,它决定了传感光纤的最大有效测量长度。当动态范围较小,传感光纤具有较高的损耗时,远端返回的信号可能会消失在噪声中;而当动态范围较大时,曲线线性越好,那么可测距离就越长。

[0015] 增大动态范围主要有两个途径:

[0016] 1)降低噪声峰值功率:噪声峰值功率为最小可测的有效背向散射光功率。

[0017] 2)增大初始背向散射光功率:即增大传感光纤的入射光功率。

[0018] 单光子探测器是一种超低噪声器件,采用的是一种极微弱光探测法,而能够对单个光子能量水平的微弱光信号进行探测,灵敏度比普通的探测器高5~7个数量级,使得远端返回的弱散射光信号不至于被淹没在噪声里,所以用单光子探测器取代传统的光电探测器能提高探测灵敏度,降低噪声峰值。但是单光子探测器动态范围有限且容易饱和:单光子探测器的最大计数频率受后脉冲问题的制约,远远小于探测器电路的重复频率,当进入单光子探测器的背向散射光功率大于探测器的最大饱和光功率,就会发生堆积效应,造成计数饱和,即单光子探测器的饱和光功率远小于传统探测器,入射光强受限,所以,当通过单光子探测器降低系统噪声峰值的同时,会使最大背向散射光功率受限,无法到达增大系统动态范围的真正目的。

[0019] 所以,本发明将光强度调制器引入分布是光纤传感器的系统中,能在增大传感光纤的入射光功率的同时,又能保证返回的背向散射光经光强度调制器调制后,不会超过单光子探测器的最大响应值而出现饱和情况。这样,将单光子探测器和光强度调制器放在系统里,既降低了系统的噪声峰值功率,有增大了初始背向散射光功率,是分布式光纤传感器的系统动态范围得到显著的提高。

[0020] 综上可知,在一般的分布是光纤传感器系统里同时加入单光子探测器和光强度调制器,能在降低噪声峰值功率的同时,增大系统允许传感光纤的最大输入光强,从而实现了宽动态范围的分布式光纤传感。

[0021] 本发明的一种基于单光子探测宽动态范围的分布式光纤传感系统的实现方法,包括以下步骤:

[0022] 1)所述的脉冲激光器通过传感光纤的实际测量范围需求来设定输入光脉冲功率的大小,并在时钟发生器的触发下为整个系统提供光脉冲信号;

[0023] 2)脉冲激光器信号通过与所述的环形器连接将功率为 P_0 的光脉冲注入传感光纤,当光脉冲在传感光纤内传输时,会由于光纤本身的性质,温度、压力、接合点、弯曲或其它类似的事件而产生散射、反射,发生衰减,此外,光脉冲在光纤传输过程中会发生非线性效应,产生携带传感信息且光功率为 $P(L)$ 的背向散射光,当背向散射光沿反方向返回到光强度调制器时,其光功率变为 $P_s(L)$,此时得到的光纤沿路的背向散射光功率为一条指数衰减的曲线,该曲线表示出了光纤沿路的损耗情况,此时,动态范围 D_1 由初始的背向散射光功率 P_1 和噪声峰值功率 P_2 (噪声峰值功率为最小可测的有效背向散射光功率)决定,从而得到此时可测量的传感距离为 L_1 。

[0024] 3)通过所述的光强度调制器和波形发生器,对返回的背向散射光进行同步调制,使近端的背向散射光衰减大、远端的衰减小。入射进光强度调制器之前的背向散射光的光功率呈指数衰减,那么,经光强度器调制的背向散射光功率的真实输出曲线会呈现阶段性

水平趋势。

[0025] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0026] (1)单光子探测器是一种超低噪声器件,采用的是一种极微弱光探测法,而能够对单个光子能量水平的微弱光信号进行探测,灵敏度比普通的探测器高5~7个数量级,使得远端返回的弱散射光信号不至于被淹没在噪声里,所以用单光子探测器取代传统的光电探测器能提高探测灵敏度,降低了系统装置的噪声峰值。

[0027] (2)通过使用光强度调制器对传感光纤的返回信号幅度进行实时整形,使得进入调制器的传感光纤的背向散射光信号近端衰减大、远端衰减小,从而增大了传感光纤允许的最大入射光功率。克服了单光子探测器饱和光强过低导致动态范围无法增大的问题,提高了系统最大传感距离。

[0028] (3)根据分布式光纤传感器的动态范围定义,本发明通过光强度调制器增大了系统允许的最大初始背向散射光功率,通过单光子探测器降低了系统的噪声峰值功率,从而使系统装置的宽动态范围得到了更好地实现。

附图说明

[0029] 图1是基于单光子探测的宽动态范围分布式光纤传感系统的实现原理图。

[0030] 图2是入射光强为 P_0 时的分布式光纤传感系统光功率 $I(L)$ 有关的曲线对比图。

[0031] 图3是入射光强为 P_0' ($P_0' > P_0$)时的分布式光纤传感系统光功率 $I'(L)$ 有关曲线对比图。

具体实施方式

[0032] 附图仅用于示例性说明,不能理解为对本专利的限制;为了更好说明本实施例,附图某些部件会有省略、放大或缩小,并不代表实际产品的尺寸;

[0033] 对于本领域技术人员来说,附图中某些公知结构及其说明可能省略是可以理解的。下面结合附图和实施例对本发明的技术方案做进一步的说明。

[0034] 一种基于单光子探测宽动态范围的分布式光纤传感系统的实现装置,主要包含光源(脉冲激光器)、环形器、传感光纤、波形发生器、光强度调制器、单光子探测器和信号处理单元。所述的脉冲激光器在时钟发生器的触发下经环形器向传感光纤注入激光脉冲,携带传感信息的背向散射光经过环形器入射到光强度调制器,波形发生器输出与背向散射光信号同步的驱动信号来控制光强度调制器的衰减值,使得传感光纤的背向散射光信号,使原本呈现一定指数衰减形式的背向散射光信号在光强度调制器对其近端衰减大、远端衰减小的调整之后,进入到单光子探测器的信号强度将趋于相对平稳,最后由信号处理单元恢复出原始散射信号光的强度,从而实现宽动态范围的分布式光纤传感(分布式光纤传感的动态范围表示初始的背向散射光功率和噪声峰值功率之差),如图1所示。

[0035] 光强度调制器的功能:主要是调制整条传感光纤上返回散射光的强度幅度值,使得传感光纤的背向散射光信号近端衰减大、远端衰减小,使光强度调制器的输出光强趋于稳定。当增大入射光强时,经光强度调制整形后的背向散射光不仅避免了近端光强过大而导致单光子探测器饱和,而且使传感光纤的散射光强能随入射光功率增大而增强,从而避免了远端信号因过弱而淹没在噪声里,最后再解调恢复信号,从而可以增大动态范围,提高

传感距离。

[0036] 本发明的主要原理如下：

[0037] 光纤本身作为传感元件，利用其材料本身对光波的散射特性，可以构成分布式的光纤传感器。在分布式光纤传感系统中，注入传感光纤(传感元件)中的高功率的光脉冲，在传输过程中会由于吸收、散射和波导缺陷等机理产生功率损耗，从而引起光强衰减，分布式光纤传感器就是利用返回的背向散射光信号的强度，在显示器上呈现出一个倾斜的曲线，根据该曲线可以测量出光纤的衰减系数，根据任何集总的不均匀点，比如连接处、熔点、断点等在背向散射光的回波信号曲线中出现的尖峰或者凹陷；以及外部环境，包括温度和应变力的变化，同样也会反映在回波信号的强度曲线上，从而根据曲线特性分析出待测场所发生的物理事件以及位置。

[0038] 分布式光纤传感器作为光纤衰减特性的表征和断点、扰动、温度、压力等的探测手段，动态范围是其主要性能指标之一，分布式光纤传感的动态范围表示初始的背向散射光功率和噪声峰值功率之比，它决定了传感光纤的最大有效测量长度。当动态范围较小，传感光纤具有较高的损耗时，远端返回的信号可能会消失在噪声中；而当动态范围较大时，曲线线性越好，那么可测距离就越长。

[0039] 增大动态范围主要有两个途径：

[0040] 1)降低噪声峰值功率：噪声峰值功率为最小可测的有效背向散射光功率。

[0041] 2)增大初始背向散射光功率：即增大传感光纤的入射光功率。

[0042] 单光子探测器是一种超低噪声器件，采用的是一种极微弱光探测法，而能够对单个光子能量水平的微弱光信号进行探测，灵敏度比普通的探测器高5~7个数量级，使得远端返回的弱散射光信号不至于被淹没在噪声里，所以用单光子探测器取代传统的光电探测器能提高探测灵敏度，降低噪声峰值。但是单光子探测器动态范围有限且容易饱和：单光子探测器的最大计数频率受后脉冲问题的制约，远远小于探测器电路的重复频率，当进入单光子探测器的背向散射光功率大于探测器的最大饱和光功率，就会发生堆积效应，造成计数饱和，即单光子探测器的饱和光功率远小于传统探测器，入射光强受限，所以，当通过单光子探测器降低系统噪声峰值的同时，会使最大背向散射光功率受限，无法到达增大系统动态范围的真正目的。

[0043] 所以，本发明将光强度调制器引入分布是光纤传感器的系统中，能在增大传感光纤的入射光功率的同时，又能保证返回的背向散射光经光强度调制器调制后，不会超过单光子探测器的最大响应值而出现饱和情况。这样，将单光子探测器和光强度调制器放在系统里，既降低了系统的噪声峰值功率，有增大了初始背向散射光功率，是分布式光纤传感器的系统动态范围得到显著的提高。

[0044] 光强度调制器的功能：主要是调制整条传感光纤上返回散射光的强度幅度值，使得传感光纤的背向散射光信号近端衰减大，远端衰减小，使光强度调制器的输出光强趋于稳定。当增大入射光强时，经光强度调制整形后的背向散射光不仅不会因为近端光强过大而导致单光子探测器饱和，从而避免了远端信号因过弱而淹没在噪声里，最后再解调恢复信号，从而可以增大动态范围，提高传感距离。

[0045] 注：

[0046] 1)当只用单光子探测器替代传统分布式光纤传感器里的探测器，而没有加入光强

度调制器时,已知单光子探测器的动态范围为 $d_1[p_2, p_1]$ (其中 p_2 为单光子探测器的最小可探测光强, p_1 为最大响应值)时,分布式光纤传感器的系统动态范围为 $D_1[P_2, P_1]$;根据光电探测原理,此时的系统动态范围由单光子探测器的动态范围决定,即:

$$\begin{aligned} [0047] \quad D_1[P_2, P_1] &\propto d_1[p_2, p_1] \\ [0048] \quad P_1 &\propto p_1 \\ P_2 &\propto p_2 \end{aligned} \quad (1)$$

[0049] 由于从激光脉冲经环形器入射进传感光纤,到距离 L 远处产生背向散射光,再返回到光强度调制器这一段时间 t 里,光传输的距离为 $2L$ 。因此根据光的传播原理可知:

$$[0050] \quad L = vt/2 \quad (2) \text{ 其中 } v \text{ 是光在光纤中的传播速度。}$$

[0051] 由光纤传输特性可知,光纤的一个重要参量是光信号在光纤中传输时的功率衰减。当传感光纤总的衰减系数是 α 时,若入射进传感光纤的功率是 P_0 ,则光脉冲传播到光纤 L 位置处时的光功率:

$$[0052] \quad P_a(L) = P_0 \cdot e^{-\alpha L} \quad (3)$$

[0053] 此外,脉冲光在光纤传输过程中会发生非线性效应,产生携带传感信息的背向散射光。当宽度为 w 的脉冲光在传感光纤中以 v 光速度传输到 L 处时,结合式(3),在该处产生的散射光功率:

$$\begin{aligned} [0054] \quad P(L) &= P_a(L) \cdot S \cdot \alpha_s \cdot wv/2 \\ &= P_0 \cdot e^{-\alpha L} \cdot S \cdot \alpha_s \cdot wv/2 \\ &= \frac{1}{2} wvS\alpha_s P_0 e^{-\alpha L} \end{aligned} \quad (4)$$

[0055] 其中 α_s 是散射系数。

[0056] 当背向散射光沿反方向返回到单光子探测器时,传输过程同样受光纤传输衰减特性的影响,其光功率变为:

$$\begin{aligned} [0057] \quad P_s(L) &= P(L) \cdot e^{-\alpha L} = \frac{1}{2} wvS\alpha_s P_0 e^{-\alpha L} \cdot e^{-\alpha L} \\ &= \frac{1}{2} wvS\alpha_s P_0 e^{-2\alpha L} \end{aligned} \quad (5)$$

[0058] 此时 $P_s(L)$ 为单光子探测器的输入光功率,又因为单光子探测器的最大响应光功率为 p_1 ,所以:

$$\begin{aligned} [0059] \quad P_s(L) &= \frac{1}{2} wvS\alpha_s P_0 e^{-2\alpha L} \leq p_1 \\ P_0 &\leq \frac{2p_1 e^{2\alpha L}}{wvS\alpha_s} \end{aligned} \quad (6)$$

[0060] 由上可知,系统允许传感光纤最大的入射光功率为:

$$[0061] \quad P_{\text{omax}} = \frac{2p_1 e^{2\alpha L}}{wvS\alpha_s} \quad (7)$$

[0062] 所以,此时系统的动态范围 $D_1[P_2, P_1] = D_1[P_2, P_{\text{omax}}]$,如图2。

[0063] 2)如图1,在上述的单光子探测器前加一个光强度调制器,已知单光子探测器的动

态范围为 $d_1[p_2, p_1]$, 此时分布式光纤传感器的系统动态范围为 $D_2[P'_2, P'_1]$; 由于系统的最大噪声峰值(最小可探测光强)由单光子探测器决定, 所以 $P_2 = P'_2$ 。

[0064] 根据式(5), 当背向散射光沿反方向返回到强度调制器输入端时, 其光功率同样为:

$$[0065] \quad P'_s(L) = \frac{1}{2} wvS\alpha_s P_0 e^{-2\alpha L} \quad (8)$$

[0066] 即, $P_s(L)$ 为光强度调制器的输入光功率, 根据光电强度调制器的工作原理, 此时, 其输出光功率为:

$$P_c(L) = \frac{P'_s(L)}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi V}{V_\pi}\right) \right]$$

[0067]

$$= \frac{1}{4} wvS\alpha_s P_0 e^{-2\alpha L} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi V}{V_\pi}\right) \right] \quad (9)$$

[0068] 其中, V 表示光强度调制器的输入偏置电压, V_π 表示调制器的半波电压, 即: 输出光强从大变化到最小需要改变的电压值。

[0069] 此时, $P_c(L)$ 为单光子探测器的输入光功率。同理, 又因为单光子探测器的最大响应光功率为 p_1 , 所以:

$$[0070] \quad P_c(L) = \frac{1}{4} wvS\alpha_s P_0 e^{-2\alpha L} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi V}{V_\pi}\right) \right] \leq p_1$$

$$[0071] \quad P_0 \leq \frac{4p_1 e^{2\alpha L}}{wvS\alpha_s \left[1 + \cos\left(\frac{\pi V}{V_\pi}\right) \right]} \quad (10)$$

[0072] 由上可知, 此时系统允许传感光纤最大的入射光功率为:

$$[0073] \quad P'_{\text{omax}} = \frac{4p_1 e^{2\alpha L}}{wvS\alpha_s \left[1 + \cos\left(\frac{\pi V}{V_\pi}\right) \right]} \quad (11)$$

[0074] 所以, 此时系统的动态范围:

$$[0075] \quad D_2[P'_2, P'_1] = D_2[P'_2, P'_{\text{omax}}] = D_2[P_2, P'_{\text{omax}}]$$

[0076] 结合注:1)和2)可得:

$$[0077] \quad \frac{P'_{\text{omax}}}{P_{\text{omax}}} = \frac{2}{\left[1 + \cos\left(\frac{\pi V}{V_\pi}\right) \right]} > 1 \quad (12)$$

[0078] 所以:

$$[0079] \quad D_2[P'_2, P'_1] > D_1[P_2, P_1] \quad (13)$$

[0080] 综上所述, 在一般的分布是光纤传感器系统里同时加入单光子探测器和光强度调制器, 能在降低噪声峰值功率的同时, 增大系统允许传感光纤的最大输入光强, 从而实现了宽动态范围的分布式光纤传感。

[0081] 本发明的一种基于单光子探测的宽动态范围分布式光纤传感系统的实现方法,包括以下步骤:

[0082] 1)所述的脉冲激光器通过传感光纤的实际测量范围需求来设定输入光脉冲功率的大小,并在时钟发生器的触发下为整个系统提供光脉冲信号;

[0083] 2)脉冲激光器号通过与所述的环形器连接将功率为 P_0 的光脉冲注入传感光纤,当光脉冲在传感光纤内传输时,会由于光纤本身的性质,温度、压力、接合点、弯曲或其它类似的事件而产生散射、反射,发生衰减,此外,光脉冲在光纤传输过程中会发生非线性效应,产生携带传感信息且光功率为 $P(L)$ 的背向散射光,当背向散射光沿反方向返回到光强度调制器时,其光功率变为 $P_s(L)$,此时得到的光纤沿路的背向散射光功率为一条指数衰减的曲线,该曲线表示出了光纤沿路的损耗情况,如图2中的曲线a所示,此时,动态范围 D_1 由初始的背向散射光功率 P_1 和噪声峰值 P_2 决定,从而得到此时可测量的传感距离为 L_1 。

[0084] 3)通过所述的光强度调制器和波形发生器,对返回的背向散射光进行同步调制,使近端的背向散射光衰减大、远端的衰减小。入射进光强度调制器之前的背向散射光的光功率呈指数衰减,那么,经光强度器调制的背向散射光功率的真实输出曲线会呈现阶段性水平趋势,如图2中的曲线b所示。

[0085] 注:如图3所示,当增大入射光强为 $P_0' (>P_0)$ 时,根据式(4)可知,在 L 处产生的散射光功率:

$$[0086] \quad P'(L) = \frac{1}{2} wvS\alpha_s P_0' e^{-\alpha L} \quad (14)$$

[0087] 再根据式(5)可知,此时散射光返回到光强度调制器的光功率:

$$[0088] \quad P_s''(L) = \frac{1}{2} wvS\alpha_s P_0' e^{-2\alpha L} \quad (15)$$

[0089] 在不考虑传感光纤沿途上的物理事件时,使传感光纤的背向散射光信号近端衰减大、远端衰减小,达到最大传输距离,光强度调制器的输出光功率应该趋近常数 k ,即功率输出近似水平曲线,则此前需要设置光强度调制器的调制函数 $F(t)$ 满足:

$$[0090] \quad \begin{aligned} F(L) \cdot P_s''(L) &= k \\ F(L) &= \frac{2ke^{2\alpha L}}{wvS\alpha_s P_0'} \\ F(t) &= \frac{2ke^{\alpha vt}}{wvS\alpha_s P_0'} \quad (\text{注: } L = vt/2) \end{aligned} \quad (16)$$

[0091] 又根据式(9),光强度调制器的输出光功率也为 $P'_c(L)$,所以:

$$[0092] \quad \begin{aligned} P'_c(L) = k &= \frac{P_s''(L)}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi V}{V_x}\right) \right] = \frac{1}{4} wvS\alpha_s P_0' e^{-2\alpha L} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi V}{V_x}\right) \right] \\ k &\propto \cos\left(\frac{\pi V}{V_x}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

[0093] 即:经强度调制器调制后的输出光功率 k 由调制器的偏置电压 V 和半波电压 V_x 决定。

[0094] 时钟发生器会根据返回的散射光到达光强度调制器的进光端口的时间 t ,给波形

发生器一个同步时钟信号来控制光强度调制器对返回的背向散射光信号进行同步调制。

[0095] 此时,调制后的输出光功率如图3中的曲线b'所示,在只增大入射光强的前提下, $P_c'(L)$ 应在 $[P_c, P_1]$ 范围内(对应图2中的 P_1, P_c),即 P_c' 最大可以取到 P_1 ,得到此时最大传感距离为 L_2 。

[0096] 4)之后,来自所述的单光子探测器对调制过后的光功率为 $P_c'(L)$ 的光信号进行光子计数,记录不同时刻进入探测器的光子数,由于经调制后进入单光子探测的光子数在单位时间内处于相对稳定的状态,当发生温度、压力、接合点、弯曲等物理变化事件时,相应的散射光强会在调制的基础上发生变化,此时单光子探测器探测的光子数受相应物理事件的影响也会发生相应变化;

[0097] 5)然后通过所述的信号处理单元根据强度调制器所设定的驱动信号(与调制器的偏置电压 V 和半波电压 V_{π} 相关联),将单光子探测器的输出光强 $P_d(L)$ ($=P_c'(L)=k$)恢复成

背向散射光进入光强度调制器之前的大小($P_s''(L) = P_d(L) \cdot \frac{1}{F(L)}$),即 $P_c'(L)$ 恢复后的曲

线如图3中的曲线a'所示,此时的动态范围为 D_2 , P_c' 的值 $[P_2', P_1']$ 范围内。

[0098] 由步骤3)知, P_c' 取值也应在 $[P_c, P_1]$ 之内,又因在相同的距离 L 处,

[0099] $P_c' > P_c$ (18)

[0100] 从而得出, $P_1' > P_1, P_2' = P_2$ (由单光子探测器的噪声峰值决定)。综上可知,动态范围 $D_2 > D_1$,最大传感距离 $L_2 > L_1$ 。

[0101] 6)再将解调恢复后的信息进行后期处理,使光功率的变化真实反应传感光纤沿途发生物理事件的位置信息,返回的光信息经光强度调制器后由单光子探测器探测,由式(1)可知,用从光信号发射到返回所用的时间 t ,以及光在光纤中的速度 v ,就可以计算出距离 L ,从而得到最后的光纤线路状况信息曲线图,如图3中的曲线a'所示;

[0102] 7)由步骤3)和步骤5)可知,这种在后处理阶段加入光强度调制器的一种基于单光子探测的宽动态范围分布式光纤传感系统的实现方法及装置,在增大入射光强后,经光强度调制器调制的背向散射光不仅不会因为近端光强度过大而导致单光子探测器饱和,反而使传感光纤的散射光强能随入射光功率增大而增强,从而避免了远端携带信息的背向散射光信号因过弱而淹没在噪声里。最后解调恢复光路上的真实光功率等信息,实现宽动态范围的分布式传感,扩大传感距离。

[0103] 如图1所示,一种基于单光子探测宽动态范围的分布式光纤传感系统的实现方法中,主要包含探测脉冲产生单元(脉冲激光器)、环形器、传感光纤、波形发生器、光强度调制器、单光子探测器和信号处理单元。所述脉冲激光器通过传输光纤与环形器相连,然后环形器的另一端与传感光纤相连,使光脉冲经环形器进入传感光纤后,同一端检测沿光纤轴向返回的散射光经光强度调制器再进入单光子探测器后的光强度信息,最后信号处理单元对探测光信息进行恢复解调和处理。

[0104] 上述脉冲激光器采用明鑫激光公司MTFLP-系列的台式脉冲激光器,波长在1539nm—1562nm范围内可调谐;1—50ns级脉冲输出;线宽为20MHz(mm);脉宽、频率、功率均可调;作为分布式光纤传感系统装置的光源,实现脉冲光信号的传输。

[0105] 上述波形发生器采用谱源RIGOL DG4162的函数/任意波形发生器,采样率为500MSa/s,垂直分辨率14bits,标配带宽达160MHz,2ppm高频率稳定度,-115dBc/Hz的低

相位噪声信号输出。

[0106] 上述光强度调制器采用晟明时公司2.5G马赫-曾德尔电光强度调制器(M-ZEOIM),其消光比大于27dB,调制带宽3GHz,插入损耗为4dB,半波电压约为3.8V。

[0107] 上述单光子探测器采用idQuantique的ID200单光子探测器,该探测器是基于InGaAs/InP APD的单光子探测器(InGaAs/InP SPAD),具备探测性能高、可靠度高等特点,InGaAs/InP SPAD主要工作于0.9-1.6 μm 近红外波段,其探测原理基于雪崩光电二极管结构(p-ti或者p-i-n结),探测效率 $\eta \approx 10\%$ (-60 $^{\circ}\text{C}$ 左右),暗计数 $p_{dc} = 2000\text{s}^{-1}$,等效噪声功率NEP。 $10^{-16}[\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}]$ 。

[0108] 本发明的上述实施例仅仅是为清楚地说明本发明所作的举例,而并非是对本发明的实施方式的限定。对于所属领域的普通技术人员来说,在上述说明的基础上还可以做出其它不同形式的变化或变动。这里无需也无法对所有的实施方式予以穷举。凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明权利要求的保护范围之内。

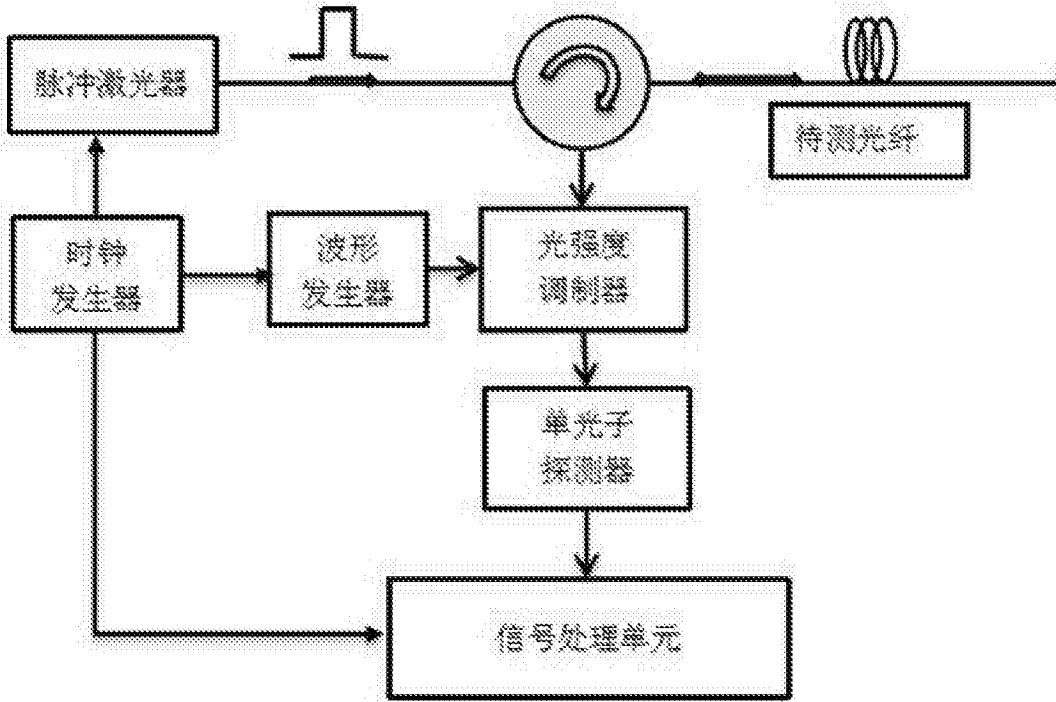


图1

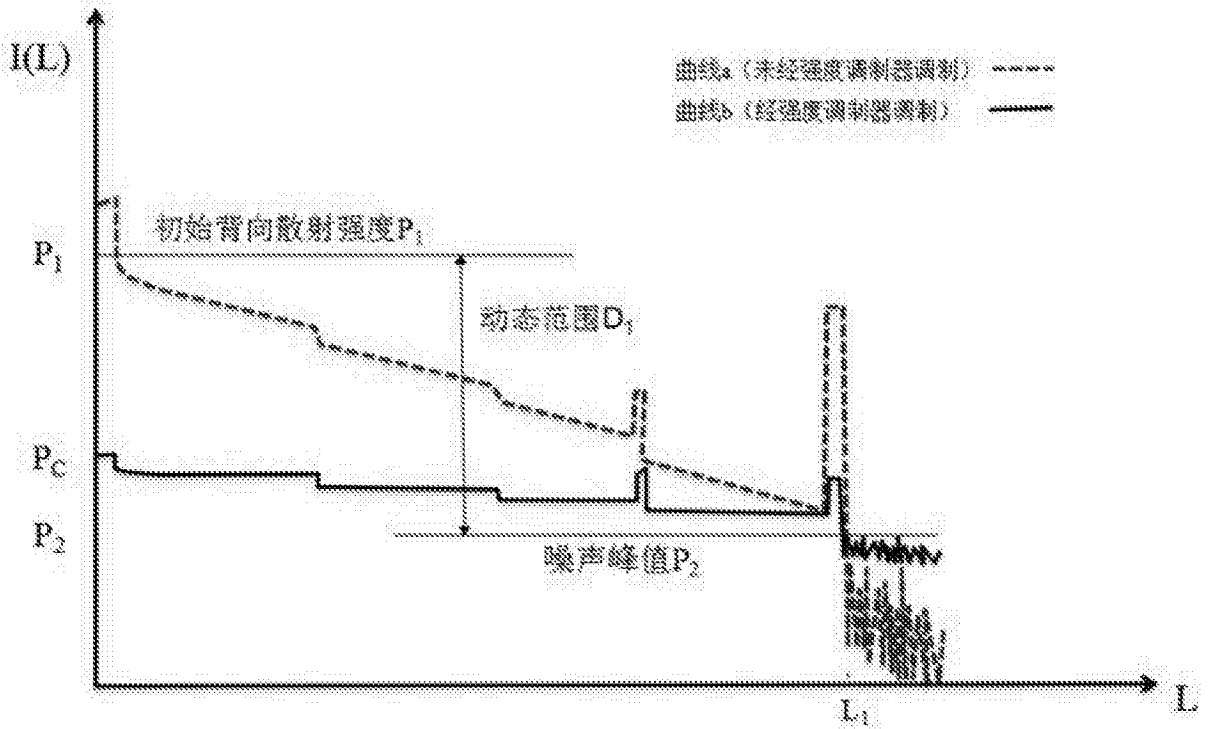


图2

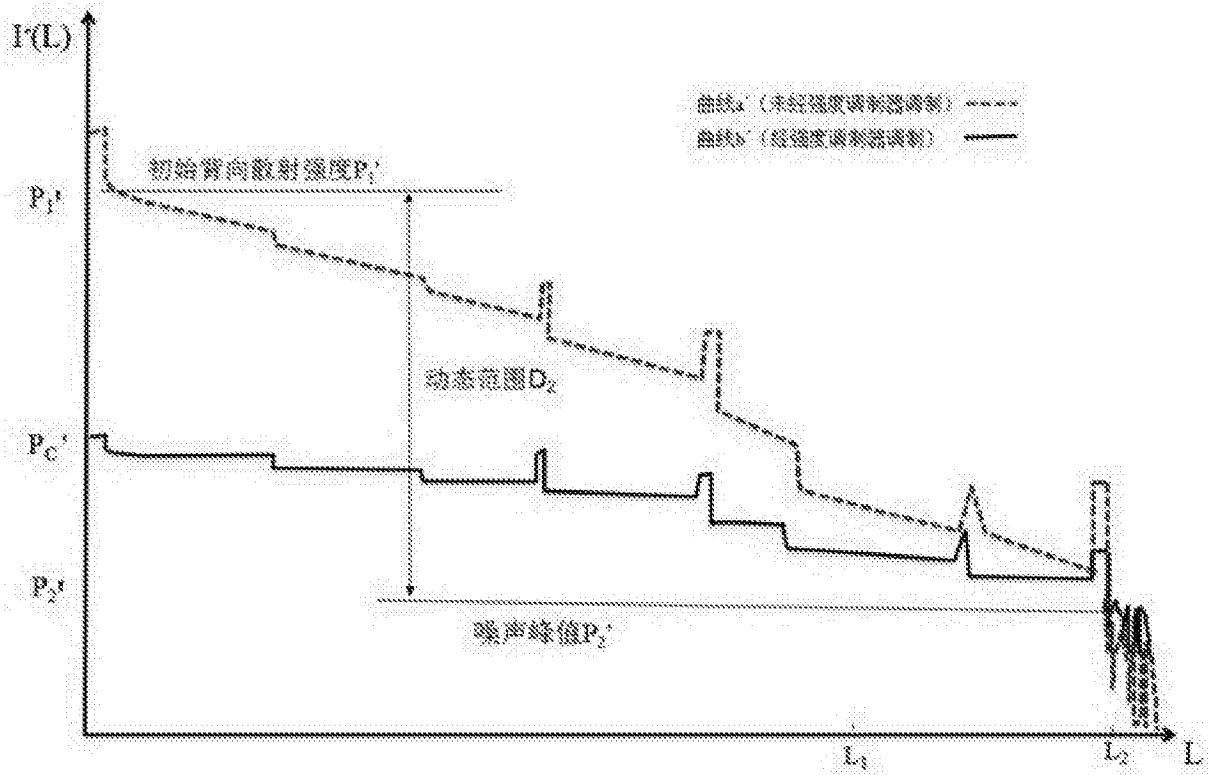


图3