



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110383009 B

(45) 授权公告日 2021.09.07

(21) 申请号 201880015050.3

(22) 申请日 2018.01.12

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110383009 A

(43) 申请公布日 2019.10.25

(30) 优先权数据
1700994.5 2017.01.20 GB

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2019.08.30

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2018/050793 2018.01.12

(87) PCT国际申请的公布数据
W02018/134137 EN 2018.07.26

(73) 专利权人 福克斯传感器有限公司

地址 英国纳特利

(72) 发明人 爱德华·阿尔弗雷德·登齐尔·奥
斯汀
赵渭忠

(74) 专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理
有限公司 11112

代理人 张娜 李荣胜

(51) Int.Cl.

G01D 5/353 (2006.01)

G01H 9/00 (2006.01)

审查员 王雨杉

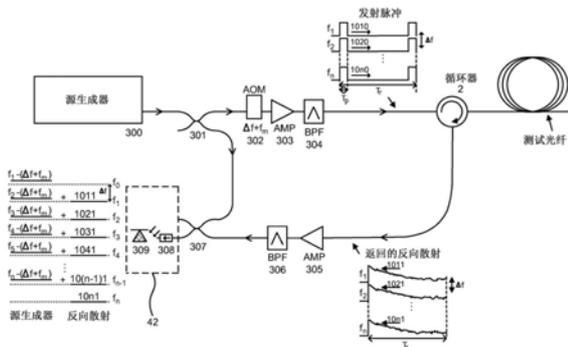
权利要求书2页 说明书14页 附图32页

(54) 发明名称

光学感测系统及检测光学感测光纤中应力的方法

(57) 摘要

用于感测光学感测光纤中的变化的系统和
方法,其主要用于检测应力变化。处于间隔开 Δf
的不同光学频率 (f_1, f_2, \dots, f_n) 下的多个光学探测
脉冲被发送到感测光纤。从光学感测光纤反向散射
的光可以与频移 $\Delta f + f_m$ 的延迟的反向散射混合,
其中, f_m 是外差频率。可以检测到反向散射的
或混合的光以确定感测光纤中的变化。可以选择
 Δf 以优化性能。



1. 一种光学感测系统,其包括:

源生成器,其被配置成生成

一组 n 个时间对准的光学探测脉冲,每个脉冲处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率,其中, n 为脉冲数且 n 等于2或更大,每个光学频率与其相邻的光学频率间隔开 Δf ,

所述源生成器被配置成将所述光学探测脉冲发送到光学感测光纤,其中,所述光学探测脉冲被所述光学感测光纤反向散射,所述反向散射的光的至少一部分在与所述光学探测脉冲传播相反的方向上被所述光学感测光纤捕获,

光学接收器系统,其被配置成从所述光学感测光纤接收所述反向散射的光,其中,所述光学接收器系统被配置成将延迟版本的所述反向散射的光与至少一个频移版本的所述反向散射的光混合,其中,所述至少一个频移版本的所述反向散射的光的频率偏移 $-(\Delta f + f_m)$,其中, f_m 是预定频率,且 f_m 小于 Δf 。

2. 根据权利要求1所述的光学感测系统,其中,所述光学感测光纤包括至少一个感测区域,其适于增加所述系统对在所述至少一个感测区域中发生的变化的灵敏度。

3. 根据权利要求1所述的光学感测系统,其中,检测到的幅度被解码以提供沿着所述光学感测光纤的应力变化的指示。

4. 根据权利要求1所述的光学感测系统,其中, $\Delta f = v/T_d$,其中, T_d 是光学观察时间且 v 是任意非零整数。

5. 根据权利要求1所述的光学感测系统,其中, $\Delta f = (1+2w)/(2 \times T_1)$ 或 $(1+2v)/(2 \times T_d)$,其中, w 和 v 是任意整数, T_d 是光学信号观察时间且 T_1 是反向散射延迟时间。

6. 根据权利要求1至5中任一项所述的光学感测系统,其中, Δf 为100-600MHz。

7. 根据权利要求1所述的光学感测系统,其中, $n \geq 50$ 。

8. 一种检测光学感测光纤中的应力的方法,所述方法包括以下步骤:

生成一组 n 个时间对准的光学探测脉冲,每个脉冲处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率,其中, n 为脉冲数且 $n \geq 2$,每个光学频率与其相邻的光学频率间隔开 Δf ,

将所述光学探测脉冲发送到所述光学感测光纤,其中,所述光学探测脉冲被所述光学感测光纤反向散射,所述反向散射的光的至少一部分在与所述光学探测脉冲传播相反的方向上被所述光学感测光纤捕获,

从所述光学感测光纤接收反向散射的光,

光学接收器系统,其被配置成从所述光学感测光纤接收所述反向散射的光,其中,所述光学接收器系统被配置成将延迟版本的所述反向散射的光与至少一个频移版本的所述反向散射的光混合,其中,所述至少一个频移版本的所述反向散射的光的频率偏移 $-(\Delta f + f_m)$,其中, f_m 是预定频率,且 f_m 小于 Δf ,以及

基于检测到的幅度的变化以及示出幅度变化的样本的时间,确定在沿着所述光学感测光纤的位置处的相位变化。

9. 根据权利要求8所述的方法,其中, $\Delta f = (1+2v)/T_d$ 或 $\Delta f = (1+2w)/T_1$,其中, T_d 是光学观察时间, T_1 是反向散射延迟时间且 v 和 w 是整数。

10. 根据权利要求8所述的方法,其中,通过调制一组源光学信号生成所述组 n 个时间对准的光学探测脉冲,每个源光学信号处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率。

11. 根据权利要求8至10中任一项所述的方法,其中,每个光学探测脉冲的偏振不同于

在相邻光学频率下的光学探测脉冲的偏振。

12. 根据权利要求11所述的方法,其中,相邻光学探测脉冲的偏振不正交。

13. 根据权利要求8至10中任一项所述的方法,其中, Δf 在100MHz-600MHz之间。

光学感测系统及检测光学感测光纤中应力的方法

技术领域

[0001] 本公开涉及光学传感器,且具体地,涉及利用基于光导纤维的传感器的分布式声感测。

背景技术

[0002] 已知基于光纤的传感器用于通过光纤中的应力变化检测各种参数,包括声信号。系统能够被概括的表征为利用离散式或分布式传感器。离散式传感器通常将光纤内的光学共振腔定位在所需的传感器位置处。光纤应力变化导致光学共振腔的物理长度变化,且因此,腔的光学相位长度针对在腔中传播的光学信号而变化。对来自光学共振腔的输出信号的检测允许推断相位长度变化,且因此,检测到感兴趣的参数。每个光纤可提供若干感测位置以允许对多个位置的同时测量。离散式传感器的缺点在于传感器的位置和计量长度是固定的,因此降低了灵活性。这种传感器的普通应用是在海床上检测地震事件,且因此,重新定位传感器来改变具体感测位置是不现实的。

[0003] 分布式光学传感器不具有限定的计量长度或传感器位置,但使用对返回的信号的分析来推断沿着光纤的长度的相位变化,且因此,检测信号(通常是声信号)。例如,瑞利(Rayleigh)反向散射可用作返回的信号。

[0004] 图1示出通常已知为分布式声传感器(DAS)的常规分布式光学传感器的示意图。询问器10将探测光脉冲11发射到测量光纤12的第一端中。测量光纤12铺设在需要感测的区域中。由于光纤的低损耗带来的光学传感器的优点是能够将不同位置中的询问器定位到感测位置。因此,会存在显著长度的测量光纤12,其提供从询问器10到其中不进行测量的测量区域的引入线。

[0005] 随着脉冲11传播通过光纤,光纤中的散射部位散射一部分光。该散射光的一部分被光纤的数值孔径捕获并朝向询问器10回传。感兴趣的主要的散射机制是Rayleigh散射,由于与散射部位(“散射体”)的弹性碰撞,该Rayleigh散射得到与传播光相同的频率的反向散射。

[0006] 在询问器处接收到反向散射脉冲14。询问器处的到达时间与从询问器到沿着光纤的点的往返距离成比例。由于损耗随着距离增加而增加,导致脉冲随时间衰退。通过在特定时刻对脉冲14采样,可以确定来自沿着光纤的特定位置的反向散射。光纤的干扰影响其物理结构(在微观层面)以及传播光的速度,且因此,影响反向散射脉冲14。这种变化可用来推断干扰光纤的信号。典型的DAS可具有沿着1-40km长的光纤的1-20m的分辨率。

[0007] 在典型的系统中,探测脉冲可以是10ns的相干脉冲,且在典型的光纤中具有约2m的物理长度。

[0008] 图2示出典型的询问器10的示意图。发送器20发射探测脉冲,且接收器21包括用于检测反向散射脉冲的光学传感器和采样系统。光学循环器22将来自发送器20的探测脉冲耦合到测量光纤12以及将返回的反向散射脉冲耦合到接收器21。

[0009] 尽管有可配置的计量长度和传感器位置的优点,分布式光学传感器也还是有明显

的缺点。由于返回信号取决于弱散射事件而非强的限定的反射器,分布式光学传感器的灵敏度明显低于离散式传感器。这种灵敏度的缺少能够使得没有足够的灵敏度确定应力以及因此检测声或其他参数。系统可具有对导致相位测量(且因此测量的应力)的失真和非线性的返回反向散射幅度的交叉灵敏度。

[0010] 反向散射发生自若干散射体,且来自每个散射体的散射光相干相加以形成反向散射脉冲。由于散射体位置是随机的,因此,这种相加能够是相消的且导致无返回信号。此外,散射体位置能够随时间变化,这导致相加的变化且因此导致信号随时间衰落。衰落还能够发生自双折射效应。

[0011] 因此需要改善的分布式光学传感器系统。下面描述的实施例不限于解决已知系统的任一或所有缺点的实施方式。

发明内容

[0012] 提供本发明内容以简化形式介绍一些概念,这进一步在下面的具体实施方式中描述。本发明内容不旨在确定所要保护的的主题的关键特征或必要特征,也不旨在用作对确定所要保护的的主题的范围的辅助。

[0013] 提供一种用于光学感测系统的光源生成器,其中,所述光源生成器被配置成生成一组 n 个时间对准的光学探测脉冲,每个脉冲处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率,其中, n 为脉冲数,每个光学频率与其相邻的光学频率间隔 Δf ,一组 n 个光学参考信号,每个光学信号处于从 $f_1 - (\Delta f + f_m), f_2 - (\Delta f + f_m) \dots f_n - (\Delta f + f_m)$ 选择的不同的光学频率,其中, f_m 是预定频率,且 n 等于2或更大。

[0014] 可以通过调制一组源光学信号生成所述组光学探测脉冲,每个源光学信号处于从 $f_1 - (\Delta f + f_m), f_2 - (\Delta f + f_m) \dots f_n - (\Delta f + f_m)$ 选择的不同的光学频率。

[0015] 可以通过在脉冲时间段期间以 $(\Delta f + f_m)$ 频率驱动的声光调制器来调制所述源光学信号。

[0016] 每个光学探测脉冲和每个参考信号的偏振可以分别不同于在相邻光学频率下的光学探测脉冲和参考信号的偏振。

[0017] 相邻光学探测脉冲和参考信号的偏振可以不正交。

[0018] 在示例中, $\Delta f = (2v+1) / (2 \cdot T_d)$,其中, v 是任意正整数且 T_d 是光学观察时间。

[0019] 在示例中, $\Delta f = 1 / (2 \cdot T_d)$ 。

[0020] Δf 可以约为100-600MHz。

[0021] 光学参考信号可以是CW信号。

[0022] n 可以是50或更大。

[0023] 还提供一种光学感测系统,其包括:一段感测光纤,如上所述的光源生成器,光学接收器系统,其中,所述光学探测脉冲耦合到所述光学感测光纤,在与所述光学探测脉冲发送到的方向相反的方向从所述光学感测光纤返回的脉冲耦合到所述光学接收器系统,以及所述光学参考信号耦合到所述光学接收器系统而不通过所述感测光纤。

[0024] 所述光学接收器系统可以被配置成将从所述光学感测光纤返回的脉冲与所述光学参考信号混合以及检测得到的混合信号。

[0025] 所述感测光纤可以包括至少一个感测区域,其适于增加所述系统对在所述至少一

个感测区域中发生的变化的灵敏度。

[0026] 提供一种光学感测系统,其包括:源生成器,其被配置成生成一组 n 个时间对准的光学探测脉冲,每个脉冲处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率,其中, n 为脉冲数且 n 等于2或更大,每个光学频率与其相邻的光学频率间隔开 Δf ,所述源生成器被配置成将所述光学探测脉冲发送到感测光纤,其中,所述光学探测脉冲被所述光学感测光纤反向散射,所述反向散射的光的至少一部分在与所述光学探测脉冲传播相反的方向上被所述光纤捕获;光学接收器系统,其被配置成从所述光学感测光纤接收所述反向散射的光,其中,所述光学接收器系统被配置成将延迟版本的所述反向散射的光与至少一个频移版本的所述反向散射的光混合,其中,所述频率偏移 $-(\Delta f + f_m)$,其中, f_m 是预定频率,且 f_m 小于 Δf 。

[0027] 还提供一种光学感测系统,其包括源生成器,其被配置成生成一组 n 个时间对准的光学探测脉冲,每个脉冲处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率,其中, n 为脉冲数且 n 等于2或更大,每个光学频率与其相邻的光学频率间隔开 Δf ,所述源生成器被配置成将所述光学探测脉冲发送到感测光纤,其中,所述光学探测脉冲被所述光学感测光纤反向散射,所述反向散射的光的至少一部分在与所述光学探测脉冲传播相反的方向上被所述光纤捕获,光学接收器系统,其被配置成从所述光学感测光纤接收所述反向散射的光,其中,所述光学接收器系统被配置成检测所述反向散射的光的幅度。

[0028] 所述感测光纤可以包括至少一个感测区域,其适于增加所述系统对在所述至少一个感测区域中发生的变化的灵敏度。

[0029] 所述检测到的幅度可以被解码以提供沿着所述感测光纤的应力变化的指示。

[0030] 在示例中, $\Delta f = v/T_d$,其中, T_d 是光学观察时间且 v 是任意非零整数。

[0031] 在示例中, $\Delta f = (1+2w)/(2xT_1)$ 和/或 $(1+2v)/(2xT_d)$,其中, w 和 v 是任意整数, T_d 是光学信号观察时间且 T_1 是反向散射延迟时间。

[0032] Δf 可以约为100-600MHz。

[0033] n 可以是50或更大。

[0034] 提供一种检测光学感测光纤中的应力的方法,所述方法包括以下步骤:生成一组 n 个时间对准的光学探测脉冲,每个脉冲处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率,其中, n 为脉冲数且 n 等于2或更大,每个光学频率与其相邻的光学频率间隔开 Δf ,将所述光学探测脉冲发送到感测光纤,其中,所述光学探测脉冲被所述光学感测光纤反向散射,所述反向散射的光的至少一部分在与所述光学探测脉冲传播相反的方向上被所述光纤捕获,从所述光学感测光纤接收反向散射的光,检测反向散射的光的幅度,以及基于检测到的幅度的变化以及示出幅度变化的样本的时间,确定在沿着所述光学感测光纤的位置处的相位变化。

[0035] 在示例中,其中, $\Delta f = v/T_d$,其中, T_d 是光学观察时间且 v 是非零整数。

[0036] 每个光学探测脉冲的偏振可以不同于在相邻光学频率下的光学探测脉冲的偏振。

[0037] 相邻光学探测脉冲的偏振可以不正交。

[0038] 还提供一种检测光学感测光纤中的应力的方法,所述方法包括以下步骤:生成一组 n 个时间对准的光学探测脉冲,每个脉冲处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率,其中, n 为脉冲数且 n 等于2或更大,每个光学频率与其相邻的光学频率间隔开 Δf ,将所述光学探测脉冲发送到感测光纤,其中,所述光学探测脉冲被所述光学感测光纤反向散射,所述反向散射的光的至少一部分在与所述光学探测脉冲传播相反的方向上被所述光纤捕获,从

所述光学感测光纤接收反向散射的光,光学接收器系统,其被配置成从所述光学感测光纤接收所述反向散射的光,其中,所述光学接收器系统被配置成将延迟版本的所述反向散射的光与至少一个频移版本的所述反向散射的光混合,其中,所述频移为 $-(\Delta f+f_m)$,其中, f_m 是预定频率,且 f_m 小于 Δf ,以及基于检测到的幅度的变化以及示出幅度变化的样本的时间,确定在沿着所述光学感测光纤的位置处的相位变化。

[0039] 在示例中, $\Delta f = (1+2v)/T_d$ 和/或 $\Delta f = (1+2w)/T_I$,其中, T_d 是光学观察时间, T_I 是反向散射延迟时间且 v 和 w 是整数。

[0040] 可以通过调制一组源光学信号生成所述组光学探测脉冲,每个源光学信号处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率。

[0041] 每个光学探测脉冲的偏振可以不同于在相邻光学频率下的光学探测脉冲的偏振。

[0042] 相邻光学探测脉冲的偏振可以不正交。

[0043] 在示例中, Δf 在100MHz-600MHz之间。

[0044] 还提供一种光学感测的方法,所述方法包括以下步骤:生成一组 n 个时间对准的光学探测脉冲,每个脉冲处于从 f_1, f_2, \dots, f_n 选择的不同的光学频率,其中, n 为脉冲数,每个光学频率与其相邻的光学频率间隔开 Δf ,和一组 n 个光学参考信号,每个光学信号处于从 $f_1 - (\Delta f + f_m), f_2 - (\Delta f + f_m) \dots, f_n - (\Delta f + f_m)$ 选择的不同的光学频率,其中, f_m 是预定频率,且 n 等于2或更大,将所述光学探测脉冲发送到感测光纤,光学地混合所述光学参考信号与从所述光学感测光纤返回的反向散射光,检测混合的光学信号,以及解码检测到的信号以确定所述感测光线中的应力变化。

[0045] 可以通过调制一组源光学信号生成所述组光学探测脉冲,每个源光学信号处于从 $f_1 - (\Delta f + f_m), f_2 - (\Delta f + f_m) \dots, f_n - (\Delta f + f_m)$ 选择的不同的光学频率。

[0046] 每个光学探测脉冲和每个参考信号的偏振可以分别不同于在相邻光学频率下的光学探测脉冲和参考信号的偏振。

[0047] 相邻光学探测脉冲和参考信号的偏振可以不正交。

[0048] 在示例中, $\Delta f = (1+2v)/(2 \cdot T_d)$,其中, T_d 是光学观察周期, v 是整数。

[0049] 在示例中, Δf 在100MHz-600MHz之间。

[0050] 还提供一种源生成器,其用于生成在离散光学频率 f_1, f_2, \dots, f_n 下的多个光学信号,其中, n 为频率数,每个光学频率与其相邻的光学频率间隔开 Δf ,所述源生成器包括,光源,其生成在第一离散光学频率下的光学种子信号,光学回路,其包括:声光调制器,其由在频率 Δf 下的RF信号在CW模式下驱动,光学放大器,其被配置成补偿所述光学回路中的损耗,光学带通滤波器,其具有的光学通带被限定为通过光学频率 f_1, f_2, \dots, f_n ,光学输入耦合器,其被配置成接收所述光学种子信号并将该光学种子信号耦合到所述光学回路,和光学输出耦合器,其被配置成将围绕所述光学回路传播的光的一部分耦合出所述光学回路以及耦合到光学输出端。

[0051] 在示例中, $\Delta f = (1+2v)/(2 \cdot T_d)$,其中, v 是整数且 T_d 是光学观察周期。

[0052] 在示例中, $\Delta f = 1/(2 \cdot T_d)$,其中, T_d 是光学观察周期。

[0053] 在示例中, $\Delta f = (2v+1)/(2 \cdot T_d)$ 和/或 $\Delta f = (2w+1)/(2 \cdot T_I)$,其中, v 和 w 是整数, T_d 是光学观察周期且 T_I 是光学传感器单元的反向散射延迟。

[0054] 在示例中, $\Delta f = v/(T_d)$,其中, v 是非零整数,且 T_d 是光学观察周期。

- [0055] Δf 可以在100MHz和600MHz之间。
[0056] 在示例中,n为50或更大。

附图说明

- [0057] 将通过示例参考以下附图描述本发明的实施例：
[0058] 图1和图2示出光学感测系统的示意图；
[0059] 图3示出发射到光学感测光纤并从其反向散射的脉冲的示意图；
[0060] 图4示出使用探测和参考脉冲的光学感测；
[0061] 图5示出示例的一组光学频率；
[0062] 图6示出反向散射信号；
[0063] 图7示出光学散射部位的示意图；
[0064] 图8示出一些散射部位的光学相位的图；
[0065] 图9示出光学感测系统和接收器架构的示意图；
[0066] 图10示出使用混合反向散射信号和频移反向散射信号的光学感测系统的示意图；
[0067] 图11和图12示出图10的系统的接收器；
[0068] 图13至图15示出示例处理过程；
[0069] 图16示出参考脉冲内相干衰落的散射分量；
[0070] 图17示出偏振分量；
[0071] 图18至图21示出图10的系统的示例接收器；
[0072] 图22至图29示出示例光源；
[0073] 图30示出使用偏移脉冲的系统；
[0074] 图31和图32示出使用多个接收器的感测系统；
[0075] 图33示出使用直接检测的系统；和
[0076] 图34示出解调算法。

具体实施方式

[0077] 现在将仅通过示例参考附图描述本发明的进一步的细节、方面和实施例。图中的元件仅为了简单而清楚被说明且不必按比例绘制。相同的附图标记已经包括在相应图中以容易理解。

[0078] 图3示出由系统中的询问器10发射的并返回到询问器10的探测和反向散射脉冲的示意图,该系统与图1和图2中的类似但是被配置成发送如下面所述的探测脉冲。

[0079] 发送器以不同的光学频率发送一组探测脉冲 $1010, 1020, 10n0$,每个频率与其相邻频率隔开 Δf 。脉冲宽度被示出为 T_p 以及重复频率被示出为 T_r 。在接收器处接收也隔开 Δf 的一系列反向散射脉冲 $1011, 1021, 10n0$ 。在典型的系统中可利用几百个频率。选择 T_r 和 T_p 以提供所需的感测频率和性能。还取决于待感测的最大距离选择 T_r 以避免来自光纤末端的反向散射信号与来自测量光纤的起始处的连续的探测脉冲的反向散射信号之间的重叠。这些返回反向散射信号可用在许多系统中以改善现有技术的DAS系统,如下面所述的。

[0080] 图4示出使用关于图3描述的探测信号的系统的示意图。该系统可以被称为频域反射计。源300的输出连接到光学耦合器301,来自光学耦合器301的一个输出连接到测量光纤

以及一个输出连接到接收器42以提供参考信号。耦合器301可以是50:50耦合器或可经选择以将较大部分的光引导至测量光纤或接收器以优化信噪比。

[0081] 源300在多个频率下生成CW光学信号,CW光学信号由声光调制器(AOM) 302调制以生成在 f_1, f_2, \dots, f_n 下的探测脉冲1010,1020, 10n0, f_1, f_2, \dots, f_n 中的每个与其相邻频率隔开 Δf 。期望的是, n 将是几百个。例如, n 可以大于50或100,这取决于系统的具体要求。

[0082] AOM使用RF信号调制光以衍射传播通过介质的光,且因此,输出光的频率偏移RF频率。AOM的RF频率(f_{RF})通常在200MHz的范围内,且 Δf 可经选择使得 $f_{RF} = (\Delta f + f_m)$,其中, f_m 是期望的外差频率。因此,源40输出的光学频率由下式给出: $f_1 - (\Delta f + f_m), f_2 - (\Delta f + f_m) \dots f_n - (\Delta f + f_m)$ 。 f_m 通常比 Δf 小例如几kHz。 f_m 可以被选择为零,这给出了零差系统。

[0083] f_m 可以被选择为 $<1/(T_r)$,因此,进行沿着测量光纤的点的单独的外差载波。

[0084] 探测脉冲1010,1020,10n0可被(AMP) 303放大且被(BPF) 304滤波,然后经由光学循环器2发射到测量光纤1中。返回反向散射通过循环器2耦合,可选择地通过放大器305和滤波器306到达光学耦合器307。在耦合器307中,反向散射光与来自源300的未调制的光混合且被引导至接收器42。

[0085] 在接收器处,(经由耦合器301,307发送的)在 f_1, f_2, \dots, f_n 下的反向散射脉冲与来自源的在 $f_1 - (\Delta f + f_m), f_2 - (\Delta f + f_m) \dots f_n - (\Delta f + f_m)$ 下的CW光学信号混合,如图5中示意性示出。每个返回的频率与与其相邻的来自生成外差频率 f_m 的源的较高频率混合,反向散射光的相位变化调制相位,该相位变化由导致反向散射的散射体的变化所导致。

[0086] 考虑与返回到询问器的具有相对于发射脉冲的延迟 t_1 的反向散射对应的测试光纤中的计量长度。如图6所示,每个发射脉冲对来自该计量器的反向散射的快照进行采样。如图所示,随后的样本在外差频率 f_m 下建立载波,因为本地源和返回的反向散射之间的相位差在频率 f_m 下增加 2π ,因此,在频率 f_m 下通过相长干涉和相消干涉循环。测试光纤内的达到时间 t_1 的总的光学相位的变化从该总的相位差中增加或减去,这改变相长干涉或相消干涉发生的时刻,且因此,导致载波中的相位调制。以此方式,外差载波相对于偏移 $f_m(\phi(t_1))$ 的相位是测试光纤中达到对应于时间 t_1 的沿着光纤的距离的积分应力变化的分量。为了计算计量长度内的相位变化(即,时间 Δt 期间行进的光纤的长度),计算 $\phi(t_1) - \phi(t_1 - \Delta t)$ 。

[0087] 如上所述,来自多个散射体的反向散射光相干相加且因此能够相消求和,使得没有能够测量的返回信号。如下面详细解释的,使用离散频率的大量探测脉冲可降低发生相消相加的概率。

[0088] 在来自多个散射体的散射叠加使得在光学检测器上不生成或生成很少的反向散射信号时,发生相干衰落。在从光纤的一部分未接收到反向散射时,不能进行测量或减小SNR。这种效果明显是不期望的。

[0089] 图7示出测量光纤的一部分,其中,探测光70从左向右传播,以及反向散射71从右向左返回。探测脉冲具有持续时间 T_p ,其通常为10-100ns量级。可以在周期 T_d 上对反向散射进行采样。散射体 72在整个光纤随机分布,其中,散射体之间的平均延迟明显小于 T_d 。每个位置(site)提供反射,其每一个反射都相干相加在一起。每个样本表示在窗口时间段 T_d 期间由长度 T_p 的脉冲照明的所有反射的叠加。以此方式,对应于 $T_p + T_d$ 的光纤长度内的散射体对在 T_d 期间采样的总的光功率有贡献。然而,在脉冲开始和结束时对应于持续时间 $T_d/2$ 的散射体在整个观察时间不被照明,因此能够被忽略。

[0090] 图8示意性示出相对于来自散射位置 p 的光学频率 q 的参考的光学相位 ϕ_p^q 。为了此次讨论,假设所有散射体带有相同功率返回。图8表示两个频率1,2以及六个散射体1-6。如能够在图8中看到的,来自特定散射体的每个频率的相位是不同的,如所期望的,差随时间(沿着光纤的距离)增加。每个反射相对于参考的时间延迟是 d_p ,使得:

$$[0091] \quad \phi_p^2 = \phi_p^1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot d_p}{\Delta f}$$

[0092] 由于激光在 T_p 上是相干的,因此能够忽略每个散射相位延迟内的 2π 的数量,使得 $-\pi < \phi_p^q \leq \pi$ 。因此,为了使一个探测频率完全衰落(即,无返回信号),对于每个散射体 p ,必须存在具有相反相位的另一散射体 j ,使得 $-\phi_p^q = \phi_j^q$ 或

$$[0093] \quad \sum_p \phi_p^1 = 0$$

[0094] 能够选择 Δf ,使得 f_1 和 f_2 处的光之间的相位差在 T_d 内变化小于 $2 \cdot \pi$ (即, $\Delta f < (1/T_d)$)。然后,来自 f_2 和 f_1 的反向散射将同时完全消失的可能性更小。对于其中 ϕ_p^1 足够小使得 $\phi_p^2 > \phi_p^1$ 的散射体,不能存在 j 使得 $\phi_j^2 = -\phi_p^2$,即,

$$[0095] \quad \sum_p \phi_p^2 - \sum_p \phi_p^1 = \sum_p \left(\phi_p^1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot d_p}{\Delta f} \right) - \sum_p \phi_p^1 = \sum_p \frac{2 \cdot \pi \cdot d_p}{\Delta f} \neq 0$$

[0096] 对于其中 ϕ_p^1 足够大以环绕震荡使得 $\phi_p^2 < \phi_p^1$ 的散射体,情况更为复杂。能够示出的是在两个频率下实现相干衰落的一组散射体较小。

[0097] 如果假设散射体在整个 T_p 内的照明段 T_d 内平均均匀分布,则在 f_1 和 f_2 处的反向散射之间的相位差在时间 T_d 上为 π (即, $\Delta f = 1/(2 \cdot T_d)$)的情况下,在 f_1 处的反向散射大部分衰落时,通常反向散射将在 f_2 处为强。以此方式,来自 T_d 中早和晚的散射体对叠加以在 f_1 处不生成光,叠加以在 f_2 处生成强光。以此方式,使用具有适当差频的两个相干频率系统能够明显不受相干衰落影响。

[0098] 在典型的系统中,其中, T_d 在4ns的范围内,最佳 $\Delta f = 1/(2 \cdot T_d)$ 为125MHz(100-600MHz的范围可适用于某些示例)。在一些情况下, T_d 可能明显较长以改善接收器处的SNR。这能够得到落入期望的检测带的内的较低的最佳 Δf 值,这使得不可能区分光纤上的邻近干扰。在该情况下,能够使用 $\Delta f = (2v+1)/(2 \cdot T_d)$ 的设置,其中, v 是任意整数,这极其可能在 f_1 衰落的情况下提供来自 f_2 的强的反向散射,从而允许进行测量。

[0099] 实际上, T_d 上的采样窗口可以不是矩形的,因此,可能需要对 Δf 和 T_d 进行一些调谐以最小化衰落。

[0100] 能够反向使用相同的原理来通过设置 $\Delta f = v/T_d$ (其中, v 是任意非零整数(例如))来创建复合脉冲,其比单频脉冲更容易遭受脉冲内相干衰落。这可用于创建分布式传感器,其中,光纤应力的变化有意导致来自光纤上的每个点的被直接解码的反向散射幅度的变化,如图33中所示。相比于本文公开的其他系统,在309直接检测返回反向散射的脉冲(在305,306处的可选择滤波和放大之后)。

[0101] 因此,能够确定返回脉冲的幅度变化但不能提取相位信息。在不存在相位信息的

情况下,不能解码应力和幅度之间的非线性关系,且因此,不能进行应力变化的定量测量。然而,系统提供应力已经在特定位置处(位置根据往返时间确定)改变的指示。一些形式的变化已经发生的信息在某些应用中可能是有用的,特别是与指示变化的频率的随时间的测量的结合。

[0102] 返回到最小衰落的实施例,对于理想的删除,必须由光纤捕获来自每个反射的相同的功率。理想的相干衰落的概率小,但能够发生。然而,由于任何量的衰落降低信号水平且因此降低信噪比,因此,不需要理想的衰落以降低性能。

[0103] 在上述示例中,已经考虑了两个频率,但完全衰落的概率可以通过增加光学频率的数量而被进一步降低。

[0104] 在接收器处,仅相同偏振的光干涉以相干相加并给出所需的信号。因此,在反向散射信号与来自源的参考信号之间需要偏振对齐。光纤和组件中的双折射能够导致传播光的偏振变化。尽管能够调节偏振以适于影响整个反向散射的慢的变化,但偏振还可以比能够适应(例如,在每个反向散射轨迹内)更快地变化,导致接收到的信号的偏振衰落。温度和应力能够导致双折射的变化,这导致测量SNR对旨在待测量的温度、振动以及甚至是应力变化的不期望的交叉灵敏度。

[0105] 图9示出使用上述相同原理的系统的示意图,但其包括用于减轻偏振衰落的装置。源300生成以 Δf 间隔开的频率阵列,如上所述,但在该示例中,相邻频率具有不同(但不是正交的)偏振。图9中示出的具有与图4中相同附图标记的组件提供等效功能。如果双折射不生成圆偏光,则相邻频率可以是正交的。

[0106] 在接收器91处,来自源300的光被耦合器310分到耦合器311, 314。每个耦合器311, 314的输出连接到检测器313, 316。来自测量光纤的反向散射信号被耦合器318分到耦合器311, 314。路径之一包括偏振控制器317,其将反向散射光的偏振旋转 90° 。示例偏振控制器317还可以被定位在任意其他三个路径中。

[0107] 由于在不存在双折射的情况下相邻频率分量(如上所述,其在接收器处干涉)不是正交偏振,因此,干涉将出现在313和316处。只要源生成器产生具有每个偏振的分量(包括圆偏振分量)的光,则无论组件和测试光纤的双折射如何,干涉总会出现在313或316处或在313和316处,并且能够总进行测量。源生成器发送线偏振和圆偏振。可能的是,双折射将构成四分之一波片以沿着光纤长度在一些点处将线偏振转换为圆偏振。如果只发射线偏振,则这可防止干涉(由于将线偏振撞向圆偏振导致的)。线偏振和圆偏振传输都避免这种限制。

[0108] 如上所述,参考图4描述的系统作为频域反射计操作,其将反向散射光与直接来自源的参考做比较。这种系统简单且具有高的空间分辨率,但也有缺点。这种系统依赖于稳定的源频率,且该频率随反向散射周期的变化无法与正被测量的应力变化区分开。另外,根据沿着光纤的整个长度的到具体计量长度的开始的积分应力与到具体计量长度的结束的积分应力之间的差确定每个计量长度的测量。例如由于沿着光纤在任意点处的相位变化超过能够解调的最大瞬时频率导致的任何测量错误导致错误测量。即,沿着光纤在任意点处的过度变化导致所有较大距离处的错误。

[0109] 图10示出利用与图4的系统类似原理的时域系统的图,但其可以克服频域系统的上述若干难点。具体地,独立于沿着测量光纤在其他位置中的应力变化,计算成为计量长度

的边界的两个点之间的应力变化。

[0110] 源201等效于源300并输出以 Δf 间隔开的CW光学频率阵列(至少两百,通常为几百)。可以为AOM的调制器202调制CW输出。然而,在该示例中,不需要上面利用的频移且因此能够利用任何类型的调制器。来自调制器202的探测脉冲1010,1020,10n0具有持续时间 T_p 和重复周期 T_r 。探测脉冲102通过循环器2耦合到测量光纤,循环器2还将返回的反向散射光耦合到接收器208。可选择的放大器203,205和带通滤波器204,207可用于改善信噪比。

[0111] 光纤的参考线圈209可以是温度和振动受控的以提供零信号参考。

[0112] 图11示出用作在图10的系统中的接收器208的示例接收器模块。在输入端110处的入射反向散射被光学耦合器111分成三路。第一光学路径在延迟元件213中延迟时间 T_1 。第二光学路径包括向下偏移器211(downshifter),向下偏移器211将光学频率向下偏移($\Delta f + f_m$),和第三光学路径中的向上偏移器212(upshifter)将频率向上偏移($\Delta f + f_m$)。向下偏移器211和向上偏移器212可以是在CW模式下运行的AOM以提供频率调制,但不提供幅度调制。

[0113] 向下偏移以及延迟的信号在光学耦合器115中组合并由检测器214接收。类似地,向上偏移以及延迟的信号在光学耦合器117中组合并由检测器215接收。

[0114] 在检测器214处, f_{k+1} 的延迟的反向散射光与 f_k 的未延迟的(但在光学频率被向下偏移)反向散射光干涉,以产生 f_m 的外差载波。每对频率以此方式组合以形成载波。类似地,在检测器215处, f_{k-1} 的延迟的反向散射光与 f_k 的未延迟的(但在光学频率被向上偏移)反向散射干涉,以还产生 f_m 的外差载波。在图11的下半部中示出所生成的组合。

[0115] 可包括可选择的偏振控制器209,210以说明接收器光学组件内的双折射。向下偏移器211或向上偏移器212可以被配置成给出信号的相位差,使得存在来自检测器214,215的信号之间的任意相位差,这可对解码过程提供优势。

[0116] 图11的接收器系统可以与振动隔离并且温度稳定,以避免会导致测量错误的相对路径长度中的变化。

[0117] 图12示出图11的接收器结构的替代接收器结构,其中,延迟施加至向上偏移和向下偏移路径,而不施加到未偏移的路径。图13的接收器的操作如关于图11所描述的。

[0118] 如之前解释的,能够通过设置 Δf 和观察时间 T_d 最小化脉冲内衰落使得相邻频率不可能都衰落。以此方式,如果由于1011或1022已经叠加为零而出现在检测器214上的1011+1022衰落,则都在检测器215上的1021和1012更不可能衰落。因此,信号应当总是存在于检测器211或检测器213上。

[0119] 然而,因为在时域实施例已经组合了延迟和未延迟的反向散射,因此,也必须考虑脉冲内相干衰落(图16)。因为时域反射计将反向散射光与沿着测试光纤来自更远处的延迟的反向散射叠加,因此来自延迟和未延迟的反向散射的分量相消干涉,不生成光。可以通过优化差频 Δf 和延迟时间 T_1 来最小化该可能性。考虑检测器214上的组合1011+1022。如果该组合生成相消干涉,则来自1011的反向散射必须与来自1022的延迟的反向散射相消相加,该延迟的反向散射通过频率为 f_2 的光通过 T_1 经历的延迟得到。对于检测器215上的等效组合1012+1021,频率为 f_1 的光经历延迟 T_1 。如果频率差 Δf 被设置为使得 $\Delta f = 1/(2 \cdot T_1)$,则检测器215上的组合1012+1021必须相长相加。以此方式,能够最小化脉冲内相干衰落。如上所述,会需要其中 $\Delta f = (1+2w)/(2 \cdot T_1)$ 的稍微次佳的设置,其中, w 是整数。

[0120] 在生成几百个频率音调(tone)时,明智的是稍微从该设置去谐,使得 f_1, f_3, f_5 等的

组合不可能立刻全都衰落。

[0121] 图13示出使用来自图11和图12的接收器中示出的检测器的信号进行测量的解调算法。该示例算法基于在检测器116和118上观察到的载波之间布置180度的相位差,使得在来自两个检测器214和 215的信号被减去时得到最大载波信号。这具有以下优点:降低共模噪声(如,向上偏移器/向下偏移器驱动电子元件中的频率噪声)的影响。从502减去后的信号被分开并进入1个或更多样本拾取模块(508,510,513,516)。这些模块从与测试光纤上感兴趣的区域(以相对于探测脉冲延迟 t_x 到达检测器)相对应的时刻提取反向散射并丢弃其他区域。样本拾取模块还可以根据需要执行平均或滤波。相对于 f_m 下的载波参考的存在于样本拾取模块的信号相位由模块509,511,514和517计算。

[0122] 在图14中示出使用反正切(\arctan)的示例标准正交相位解调模块。解调的相位表示测试光纤上的点处在时间 T_d 内的相位变化。以延迟 t_0 返回的反向散射对应于非敏感参考光纤,因此,可以通过将该信号从解调的信号取走来降低激光噪声,该解调的信号解调自光纤上的其他点,以获得最终的相位信号512,515和518。明显地,以此方式,通过增加更多的样本拾取模块和相位解调模块,可以解调多达最大值为 T_r/T_T 的任意数量的感兴趣的点 q 。

[0123] 随着时间的消逝,询问器内的光纤、组件和源的相位延迟和双折射将缓慢漂移,因此,有必要对系统操作参数进行小的调整以便持续的最佳操作。接收器中的向上偏移器和向下偏移器模块施加的相位差 ϕ_{AOM} 将被修整以维持检测器214和215上的反相 f_m 载波。这通过最小化从参考线圈接收到的共模载波实现。求和单元503将来自检测器214和215的光相加。样本拾取器504提取涉及参考线圈的反向散射。由模块505提取载波频率 f_m 的功率大小。

[0124] 如前所述,仅具有类似偏振的光分量叠加才生成干涉。因此,存在以下可能性:光学测试光纤1和互连的组件中的双折射能够共同作用(*conspire*)使得在检测器214和215上不生成干涉光。这能够通过以下方式克服:设置偏振控制器209和210以补偿接收器干涉仪中的剩余双折射。然后,源生成器能够被设置成使得相邻的光分量频率具有45度的相对偏振,其中,初始偏振被设置成使得在复合脉冲中发射具有每个偏振状态的光分量。如图17中所示,对于一个频率分量对,不论测试光纤的双折射如何,在至少一个检测器上都会观察到干涉。

[0125] 图15示出示例载波大小测量模块。接收到的载波的强度在506 被低通滤波。反馈模块507调整向上偏移器和向下偏移器施加的相位差 ϕ_{AOM} ,使得最小信号从模块506被输出,因此,确保载波反相出现在两个检测器处。

[0126] 图34示出替代的解调算法,其分别组合来自检测器的信号。在此,对应于测试光纤上的每个点的来自每个检测器的反向散射被单独确定,得到针对测试光纤上的每个感兴趣的点的两个拾取的样本流。然后确定每个拾取的样本流内的载波的强度。组合步骤选择或组合来自两个(或更多个)所得到的拾取的载波样本流的反向散射,以提供单相解码的载波。例如,组合步骤可以选择与最大载波大小一致的拾取的样本流。单个组合的相位解码的载波随后被解调以表示测试光纤上特定点处的应力变化。

[0127] 总之,这些布置具有许多优点:

[0128] 1. 分量频率的许多组合都对载波 f_m 有贡献。由于以下原因,这改善了灵敏度:

[0129] i. 能够以单频发射的功率通常受受激布里渊散射和其他非线性效应的限制。因为复合脉冲包括许多不同频率, 因此, 能够由本文描述的系统发射的总功率远远超过可以由单频系统发射的功率。这导致较高的反向散射功率和较好的SNR。

[0130] ii. 因为较大比例的光学检测带被想要的信号占据, 因此, 检测 SNR相比于单频系统得以改善。

[0131] iii. 差分检测移除检测器上的共模信号的效应, 如, 频移器噪声、电气干扰和一些光学噪声。

[0132] 2. 如前所述, 通过将 Δf 设置为适当值, 能够使来自都衰落的相邻频率的反向散射的可能性非常小。因为不同反向散射对在每个检测器214和215上形成载波, 因此, 来自两个检测器的光都能够衰落实际上不可能。

[0133] 3. 通过发射具有45度或附近相对偏振状态的相邻频率, 来自 214和215的光必须包含干涉, 而不用考虑在延迟时间 T_1 期间的在源光纤中的双折射。如果双折射使来自(例如(say)) 1011的光与1022 正交, 从而在检测器214上不产生来自该组合的干涉光, 则该相同的旋转必须使1021+1012在215上生成干涉光。(频率差约 Δf 的光经历的双折射将非常类似)

[0134] 4. 频移器211和212能够施加相位差, 使得214和215处接收到的载波 f_m 能够具有任意相位差。会需要反馈系统来补偿变化的接收器光学器件以及维持在检测器214和215上所需的相位差。可以以以下两种方式使用该相位差:

[0135] i. 在需要对衰落最小敏感性和最低噪声的情况下, 180度的相位差将允许在从215减少214时形成强的载波, 因此, 降低如上面详述的噪声

[0136] ii. 在需要最高动态范围的情况下, 90度的相位差将允许解码光纤的每个部分内的应力变化, 而不需要参考通过正交检测的之前的样本。

[0137] 替代地, 未延迟的光能够与如图12中所示的延迟的且向下偏移的光或延迟的且向上偏移的光叠加。

[0138] 图18示出如以上关于图11和图12在功能上描述的时域接收器的示例物理实现。

[0139] 接收到的反向散射光被耦合器210分开, 其中, 每个输出在相反的方向上将光引导通过系统。耦合器211, 221分开相应的光, 其中, 第一部分跟随旁通路径180, 该旁通路径180可包括可选择的衰减器212来调整功率电平。耦合器211, 221的其他输出将光耦合到另一对耦合器214, 219, 该对耦合器214, 219在两个方向路径之间的分光。光学隔离器217, 218将光限制成在每个路径上在所需方向上传播。隔离器可以与其他组件在每个路径上以任意适当顺序设置。例如, 可以优选的是将每个隔离器定位在每个路径的输入端处以避免来自频移器215, 216或偏振控制器226, 227的反射。频移器215(例如, AOM)将信号的光学频率向上偏移 $\Delta f + f_m$, 且频移器216(例如, AOM)将光学频率向下偏移 $\Delta f + f_m$ 。

[0140] 向上偏移和向下偏移的光在相反方向传播通过耦合器211, 214, 219, 221, 并在接收器223, 225处被接收到, 其中, 光与通过旁通路径180传输的光相干混合。

[0141] 图19示出时域接收器的进一步的物理实现。接收到的反向散射光被3x3耦合器231分成三个分量。一个分量被引导通过具有延迟($T_1/2$)的延迟线圈232且被引导到法拉第镜233上。返回到耦合器231的光因此被延迟 T_1 。法拉第镜减轻延迟线圈232中的任何双折射效应。

[0142] 来自耦合器231的另外两个输出被分别引导到向上偏移器238 和向下偏移器234,二者中的每个可以是如上所述的AOM。向上偏移和向下偏移的光与耦合器235,240中的延迟光组合并被引导至接收器237,242以进行检测。可包括可选择的偏振控制器239,241以确保延迟的和偏移的信号的偏振在检测器237,242处对准。因此,图19的接收器在检测器处生成所需的信号组合。

[0143] 图20示出时域接收器的进一步的物理实现。接收到的反向散射光被耦合器250分开。耦合器250的一个输出耦合到耦合器251,耦合器251将光分到延迟路径254和向下偏移路径中。耦合器250的另一输出耦合到耦合器257,耦合器257将光分到延迟路径254和向上偏移路径中。

[0144] 向下偏移路径包括AOM 252和法拉第镜253。光通过向下偏移路径,在两次通过向下偏移器252中光学频率被向下偏移并返回到耦合器251。AOM 252在 $(\Delta f + f_m)/2$ 的RF频率下操作,这提供总的 $(\Delta f + f_m)$ 的频移。向下偏移光在耦合器251中与延迟光混合并通过检测器261,其中,其相干混合并被检测到。类似地,光被AOM 256向上偏移并在接收器259与延迟光混合,从而生成所需分量。可包括可选择的偏振控制器262以移除接收器系统中的双折射。

[0145] 图21示出仅利用一个频移器的接收器的进一步的示例。接收到的反向散射光耦合到耦合器270,耦合器270的一个输出连接到第一旁通路径282。耦合器270的另一输出连接到AOM 271,AOM 271将频率偏移 $\Delta f + f_m$ (向上偏移或向下偏移)。另一耦合器272将偏移光引导至法拉第镜273,法拉第镜273通过AOM 271并经由耦合器270将光返回到第二旁通路径283。耦合器272的另一输出通过延迟元件274 且然后经由耦合器275,276,277将光耦合到检测器279,281。在检测器279处,延迟的偏移的光与通过旁通路径282的未偏移未延迟的光混合。在检测器281处,延迟的两次偏移的光与一次偏移的光混合。因此,在两个检测器处,在它们之间存在具有一个 Δf 的分量的混合。可选择的偏振控制器283和282被设置成补偿光学系统中的双折射。图22示出示例两个分量的频率源生成器。来自低频噪声激光器101的光被耦合器111分成两个分量。一个路径被AOM 112频移 Δf 。来自111的剩余的光通过可选择的衰减器115以平衡分量幅度并通过可选择的偏振控制器116,该偏振控制器116能够用于设置两个频率源分量的偏振之间的差。两个路径被耦合器117重新组合,通过可选择的隔离器118,然后到达输出端。

[0146] 图23示出替代的源生成器,其产生三个频率分量。来自激光源 131的光被3x3耦合器132分开。输出光的一部分被未偏移地反射通过FRM 133。剩余部分被引导通过向上偏移AOM 137且经由偏振偏移器138并被FRM 139反射回耦合器132。以此方式,三个光分量出现在输出端。通过检测 Δf 下的分量,检测器133处的光能够用来平衡来自三个分量的功率。偏振旋转器138和135能够用来设置三个分量的相对偏振。

[0147] 图24示出用于生成三个分量频率的第二示例配置。这里,来自低频噪声激光源141的光被耦合器142分开。光的一部分被耦合器 143进一步分开。光的未偏移部分继续通过耦合器146和149,通过可选择的隔离器152到达输出端。光的另一部分被AOM 144偏移,其偏振被控制器145调整,然后被重新组合以到达输出端。另一路径通过耦合器142和AOM 147(其被选择以在相反的意义偏移来自AOM 144的光)和偏振控制器148以出现在输出端。偏振控制器能够用于生成在分量之间的任何期望的相对偏振。在150和151处的 Δf 分量能够被

监控以平衡三个频率处的输出的大小。

[0148] 图25示出用于生成三个频率分量的另一选择。来自激光器161的光被耦合器162分开。出射的未偏移的光的一部分被170反射,返回通过耦合器162,经由可选择的隔离器171到达输出端。170可以是法拉第旋转器镜,以移除光学组件中的双折射效应。来自162的剩余光被引导到耦合器163,在耦合器163被进一步分开。光的一部分被164向上偏移,剩余部分被167向下偏移,并被可以是FRM的166和169反射回输出端。可以是法拉第旋转器的可选择的偏振偏移器165和168允许分量具有所期望的相对偏振。

[0149] 图26示出用于基于循环回路生成多个频率的示例配置。来自低频噪声激光器101的光被耦合器102耦合到回路。光的一部分继续通过AOM 103,在AOM 103被偏移 Δf 。放大器104补偿回路损耗,滤波器105限制所生成的频率数并改善SNR。耦合器106将一些光从回路分离出,经由可选择的隔离器110朝向输出端。剩余光被可选择的隔离器107耦合,通过可选择的偏振旋转器108(其可以是45度法拉第旋转器),通过可选择的衰减器109,并经由耦合器102回到回路。衰减器109能够用来调谐回路并平衡所有多个分量的功率。滤波器105能够被布置成限制所生成的频率的数量,并提供预加强以平衡每个频率的CNR。

[0150] 图27示出替代版本,其中,来自源181的光被耦合器182分开,然后行进通过AOM 183,通过偏振控制器184、偏振旋转级185、带通滤波器186,通过耦合器187并通过可选择的隔离器190到输出端。放大器188再循环光,使得多个光分量在输出端生成。滤波器186能够用来平衡分量的SNR并限制所生成的分量的数量。

[0151] 图28示出用于生成多个频率的替代布置。两个或三个频率源142被143放大。高度非线性光纤(如,光子晶体光纤)144加上放大器光纤通过四波混频生成额外的频率分量。BPF 145将分量限制到所需的数量和波长范围。

[0152] 图29示出替代配置。这里,梳状波发生器输出被带通滤波到感兴趣的范围。注意,对于一些梳状波发生器类型,所生成的频率的数量将由 $T_1 \cdot \Delta f$ 给出,因此,可以需要较长的 T_1 以确保发射足够的分量。

[0153] 在上述说明中,已经发送了在限定频率下的多个探测信号。在每个频率的一系列对准的脉冲被发送到测量光纤。为了改善系统的灵敏度和动态范围,可以发送第二组探测信号,如图30所示。第二组信号具有上述相同特征但处于第二波长,其与第一信号所处波长分离。即,存在在 λ_0 下的多个光学信号和在 λ_1 下的多个光学信号,其中, λ_0 下的和 λ_1 下的信号之间在频率/波长域上不重叠。 λ_0 下的和 λ_1 下的信号都是如上所述的时域中的一系列脉冲,但在系列脉冲之间具有时间偏移,如图30中所看到的。

[0154] 在接收器处,两个波长被分开且被独立检测到。上述接收器架构能够用于两个波长,其中,每个波长被引导到特定波长的检测器。例如,在多个检测器之前立即利用波长选择多路分用器。

[0155] 该系统增加系统的动态范围,因为采样率被加倍,从而允许相位变化的较高的最大瞬时速率。由于采样率被加倍,还增加了灵敏度。

[0156] 还可利用两组以上的信号进一步改善性能。

[0157] 可以通过分开来自一个宽带宽的源生成器的光或通过具有从两个激光器得到的两个单独的源生成器来获得信号。

[0158] 时域接收器中的延迟长度设置计量长度,在该计量长度上计算测试光纤中的相位

变化。对于各种应用,可以期望不同的计量长度。这能够通过将反向散射光分到均具有不同时间的两个或更多个接收器而适应,如图31中所示。图31的布置能够同时测量不同计量长度。此外,可变延迟元件可用在任何接收器中以提供可变的计量长度。

[0159] 接收器系统中的频移设置照在检测器上的反向散射的组合以生成载波。通过引入具有不同向上偏移和向下偏移的第二组接收器,如图32中所示,不同频率组合可以引导到检测器。每个接收器使用等于 $n \cdot \Delta f + f_m$ 的频移,使得不同载波组合混频以产生 f_m 下相同的外差载波。

[0160] 这可以具有优点:因为相比于611和612都衰落的可能性,所有检测器610-613上的信号衰落的可能性降低,因此,观察到显著的双折射或衰落。

[0161] 已经主要仅参考分布式传感器给出了上述发明。然而,这些技术和设备还可应用于具有反射器的系统以产生沿着光纤的在限定位置处的特定的返回信号。可以期望的是增加沿着测量光纤的在限定位置处的测量光纤的灵敏度。此外,系统可以提供足够的灵敏度以使用适当的换能器检测事件。例如,光纤的长度可以缠绕将加速度转换成光纤应力的换能器。本文描述的系统可以能够感测与换能器相关联的光纤的相对短长度的变化以检测加速度。在此情况下,所述系统具有以下优点:从调制的光纤长度内得到的反向散射光可用于进行测量,而不是特别需要在换能器附近的不敏感的光纤。这是因为系统对由换能器光纤中的应力变化引起的衰落不敏感。

[0162] 本文描述的任何光学耦合器可以是相同的耦合器,或可以配置有对每个输出的不同的耦合比例。选择所需比例优化系统性能。

[0163] 尽管已经关于一些实施例描述了本发明,但不旨在限于上述具体形式。然而,本发明的范围仅由随附权利要求限制。此外,尽管似乎关于具体实施例描述了特征,但本领域技术人员将认识到所述实施例的各种特征可根据发明被组合。在权利要求中,术语“包括”不排除存在其他元件或步骤。

[0164] 此外,权利要求中的特征的顺序不意味着必须执行特征的任何特定顺序,且具体地,方法权利要求中的单独的步骤的顺序不意味着必须以该顺序执行步骤。然而,可以以任何适当顺序执行步骤。此外,单数引用不排除多个。因此,对“一个(a、an)”、“第一”、“第二”等的引用不排除多个。在权利要求中,术语“包括(comprising 或including)”不排除存在其他元件。

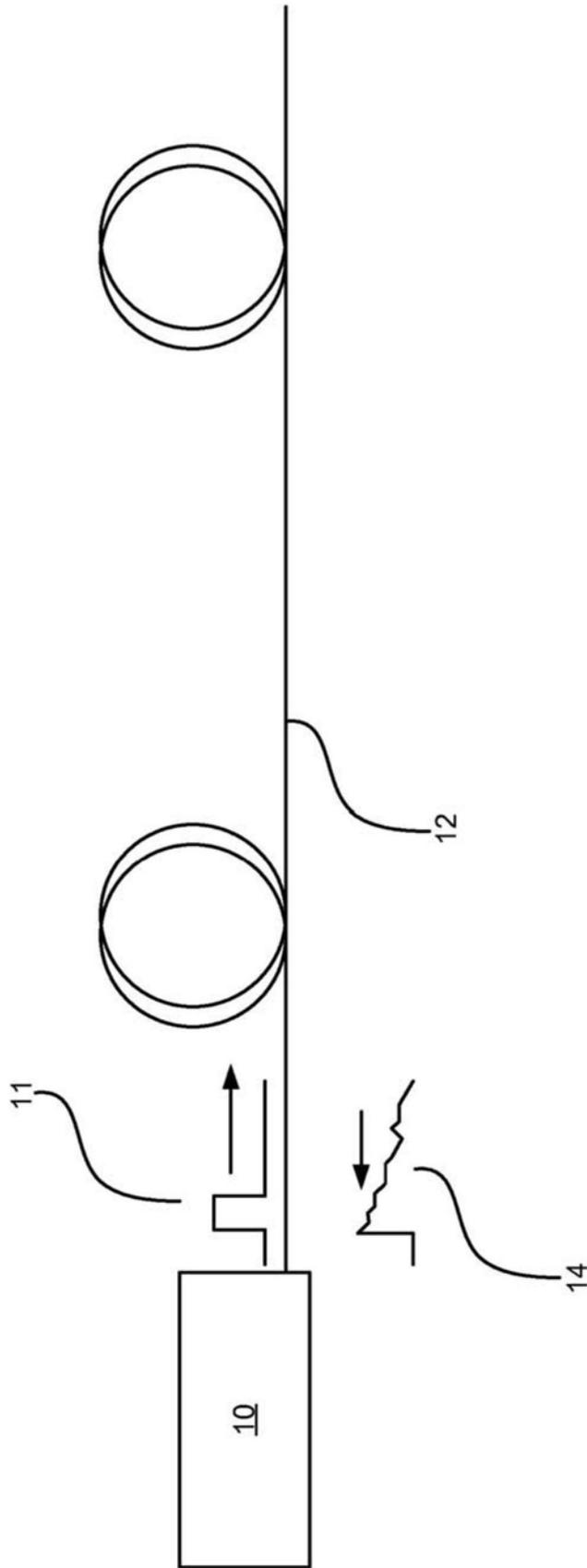


图1

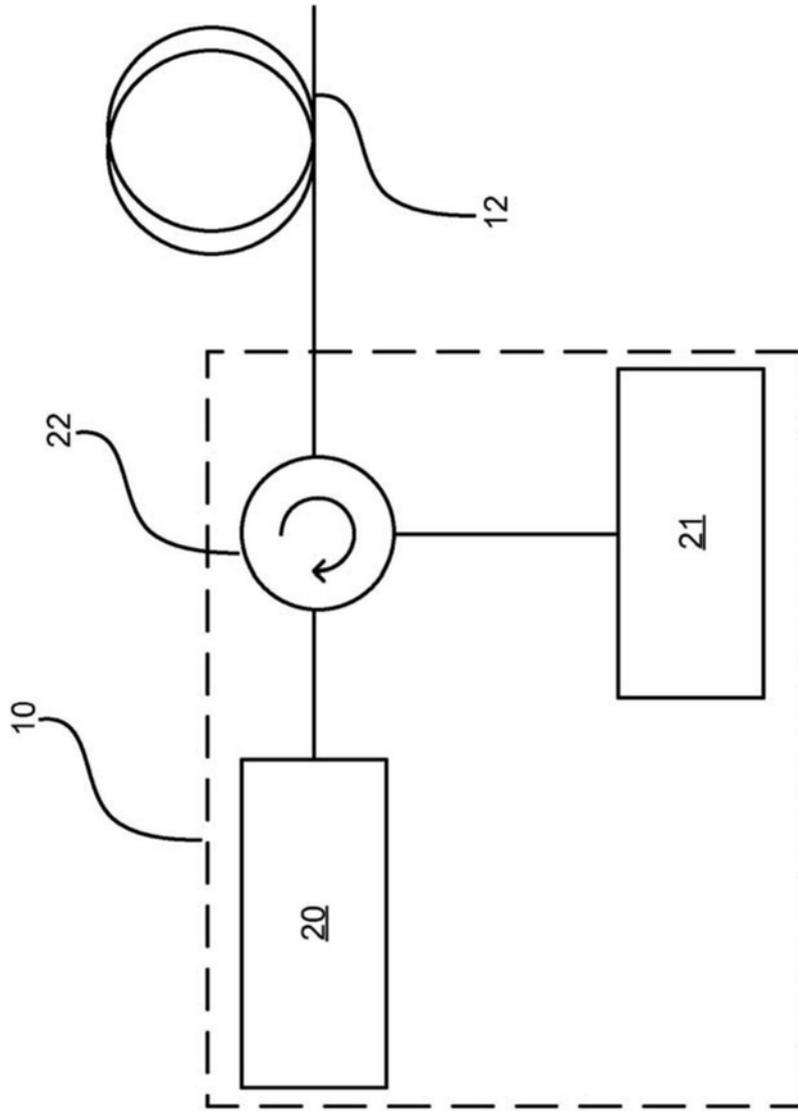


图2

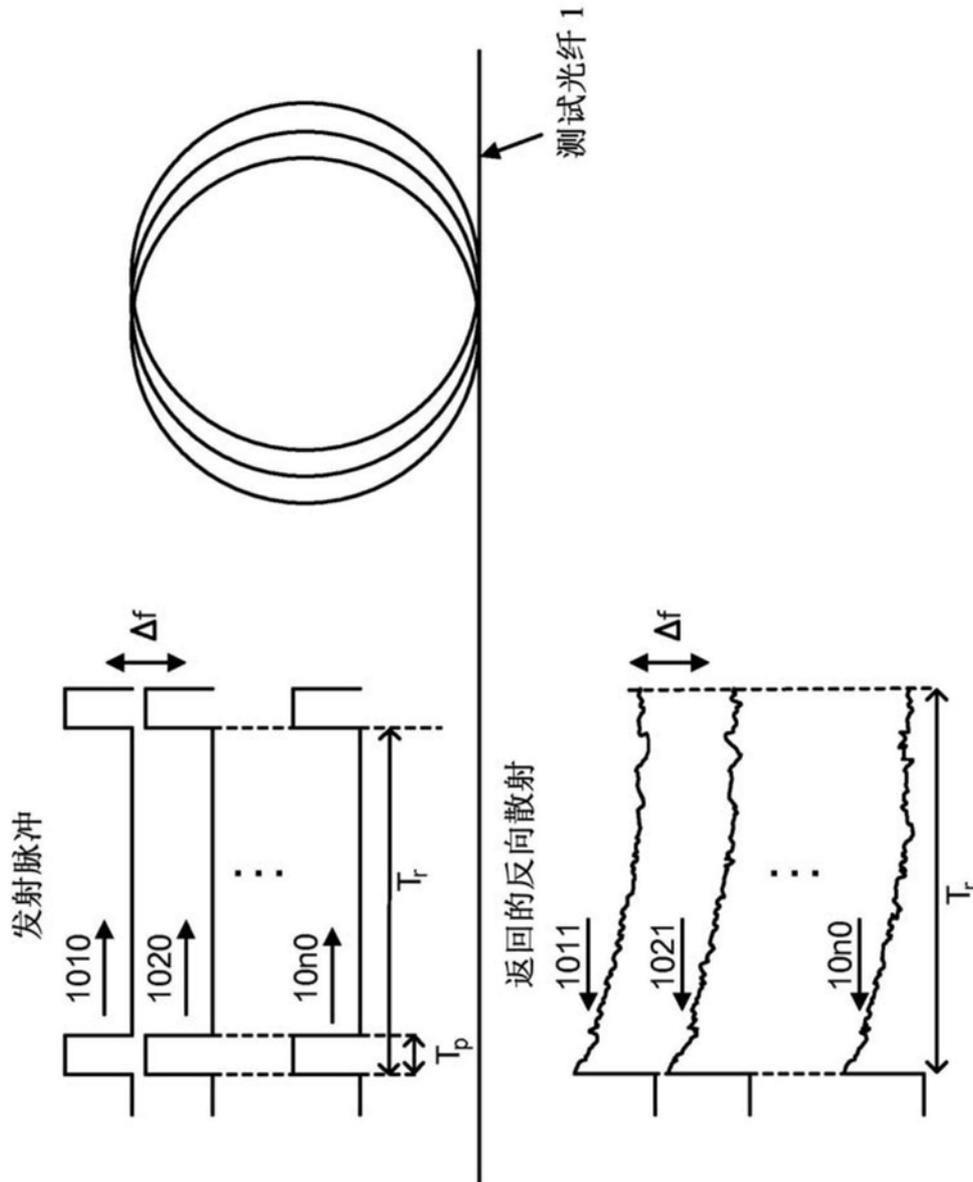


图3

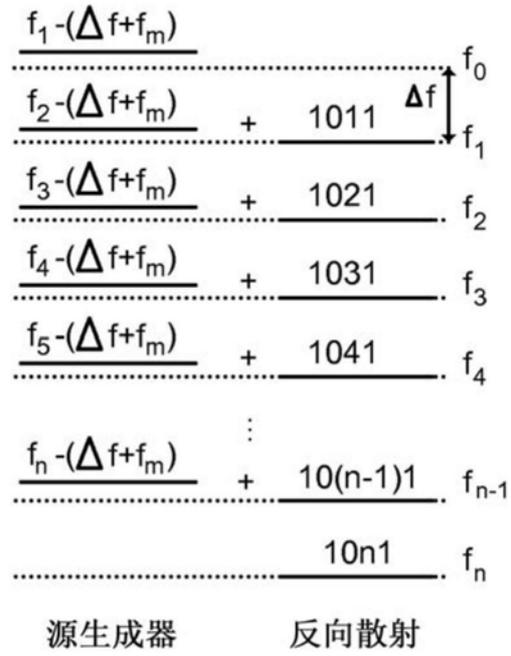


图5

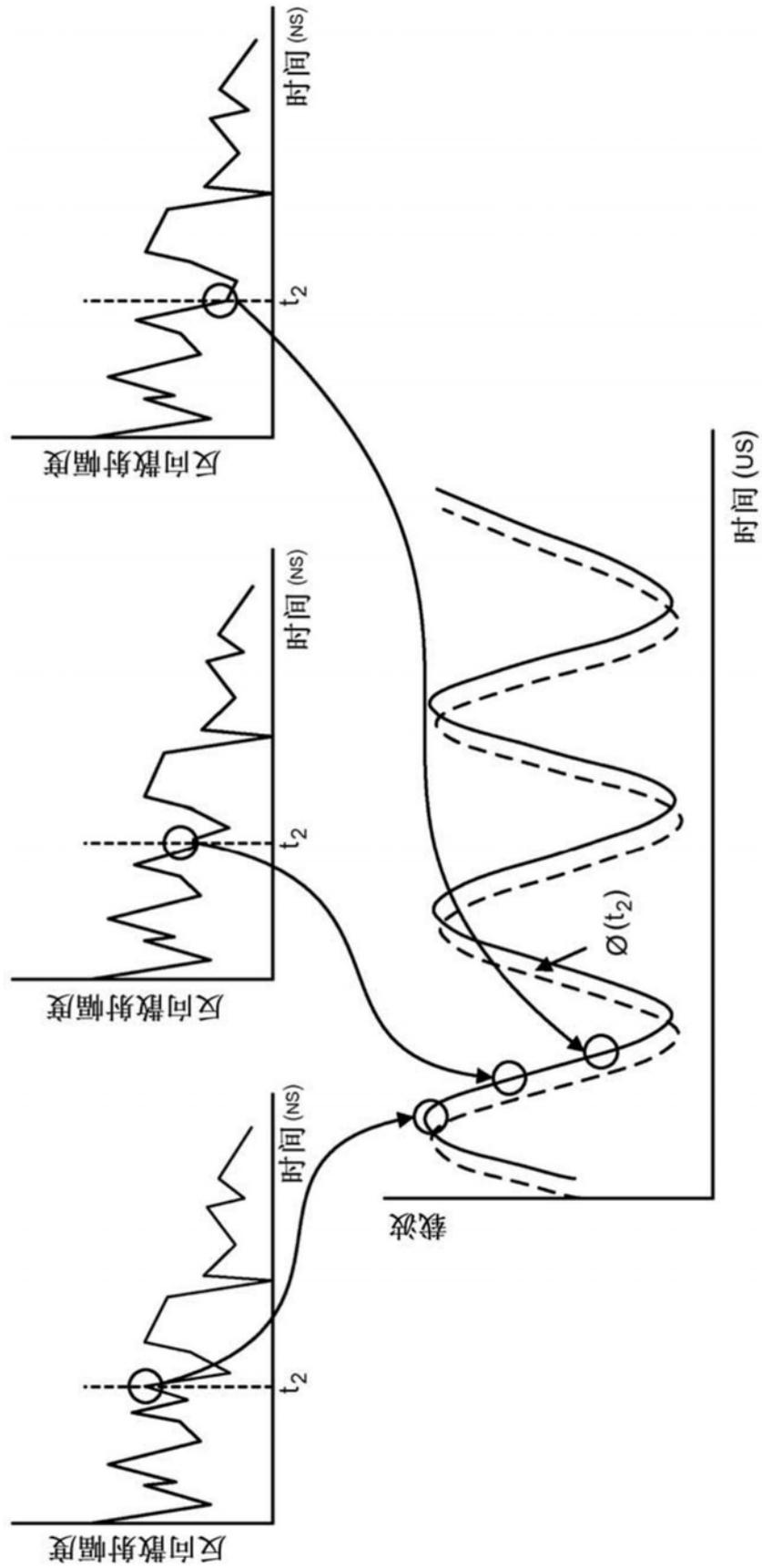


图6

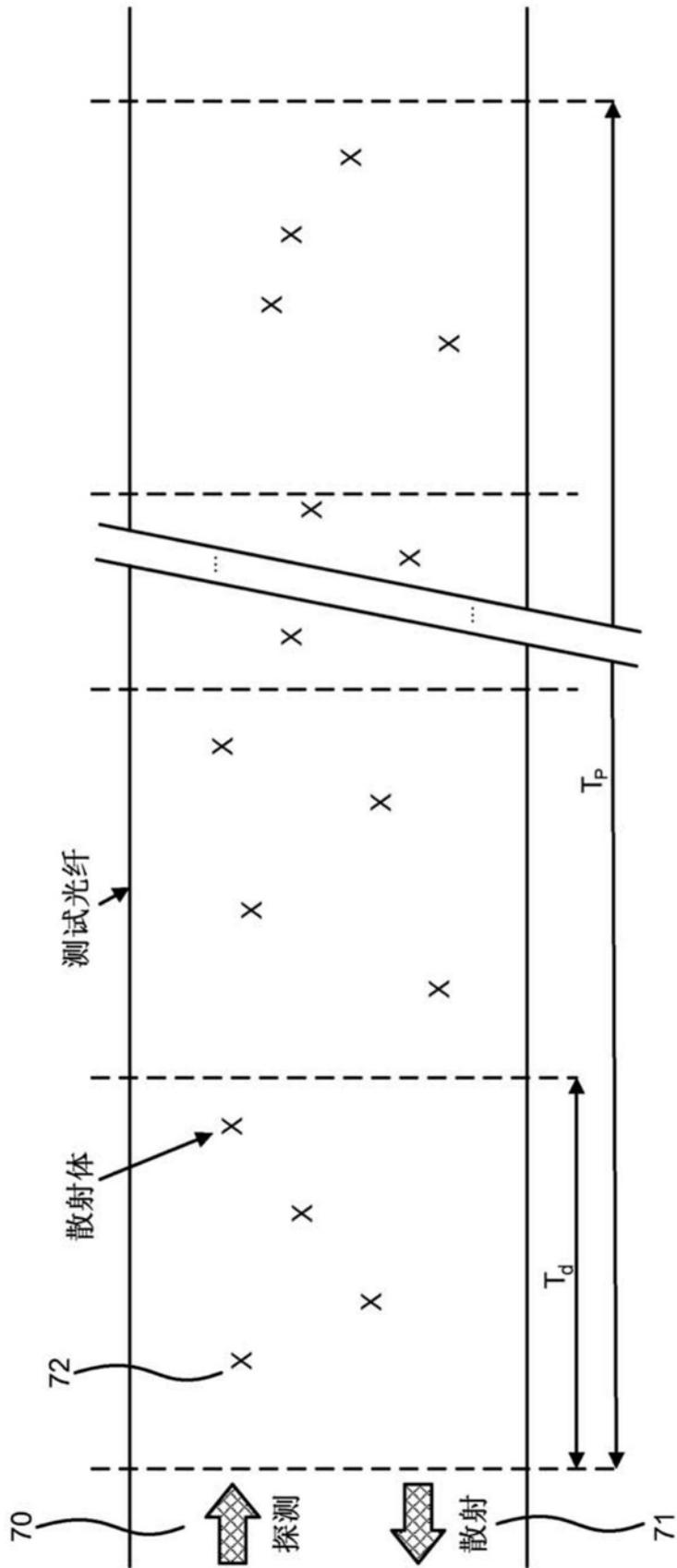


图7

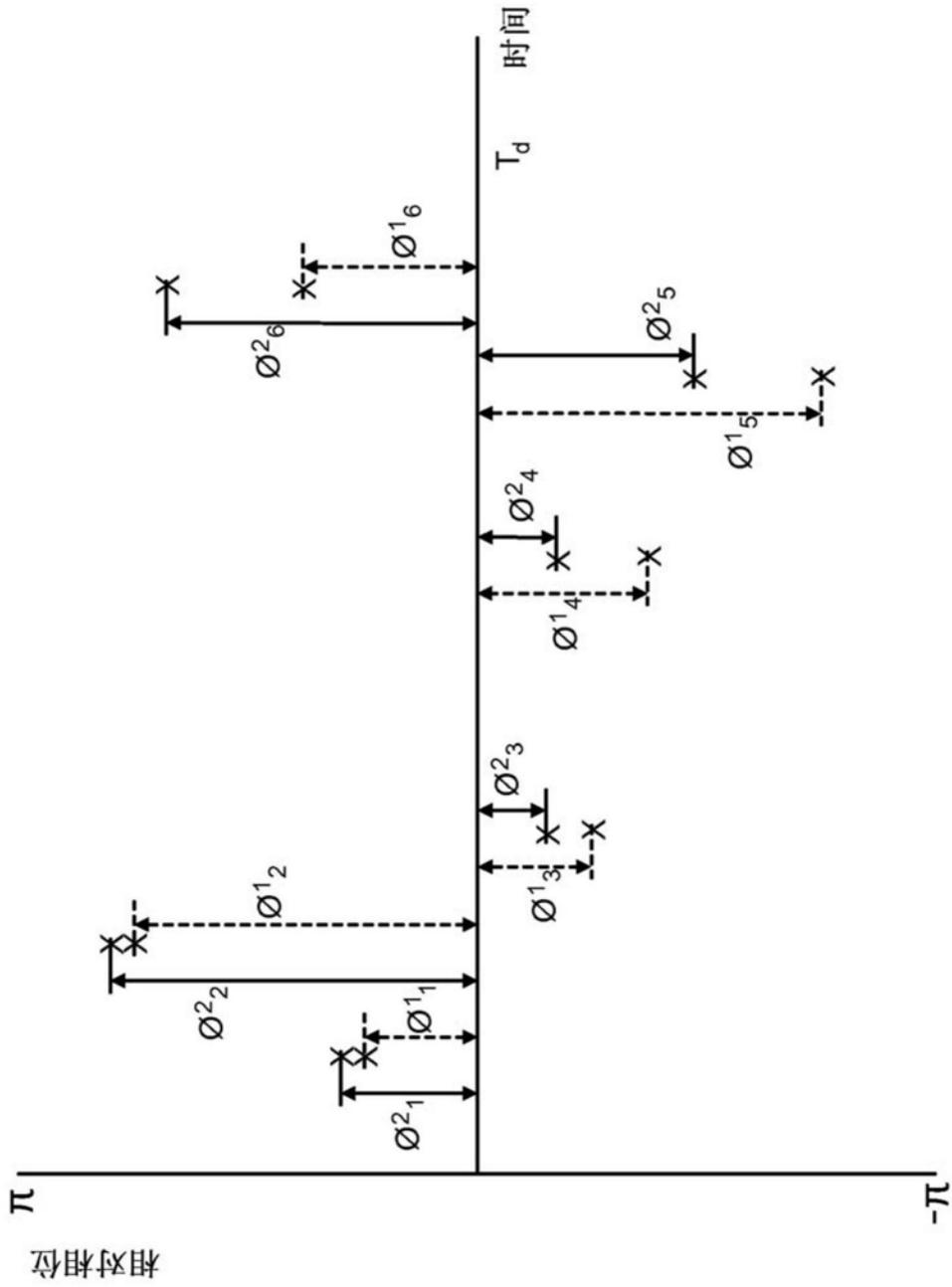


图8

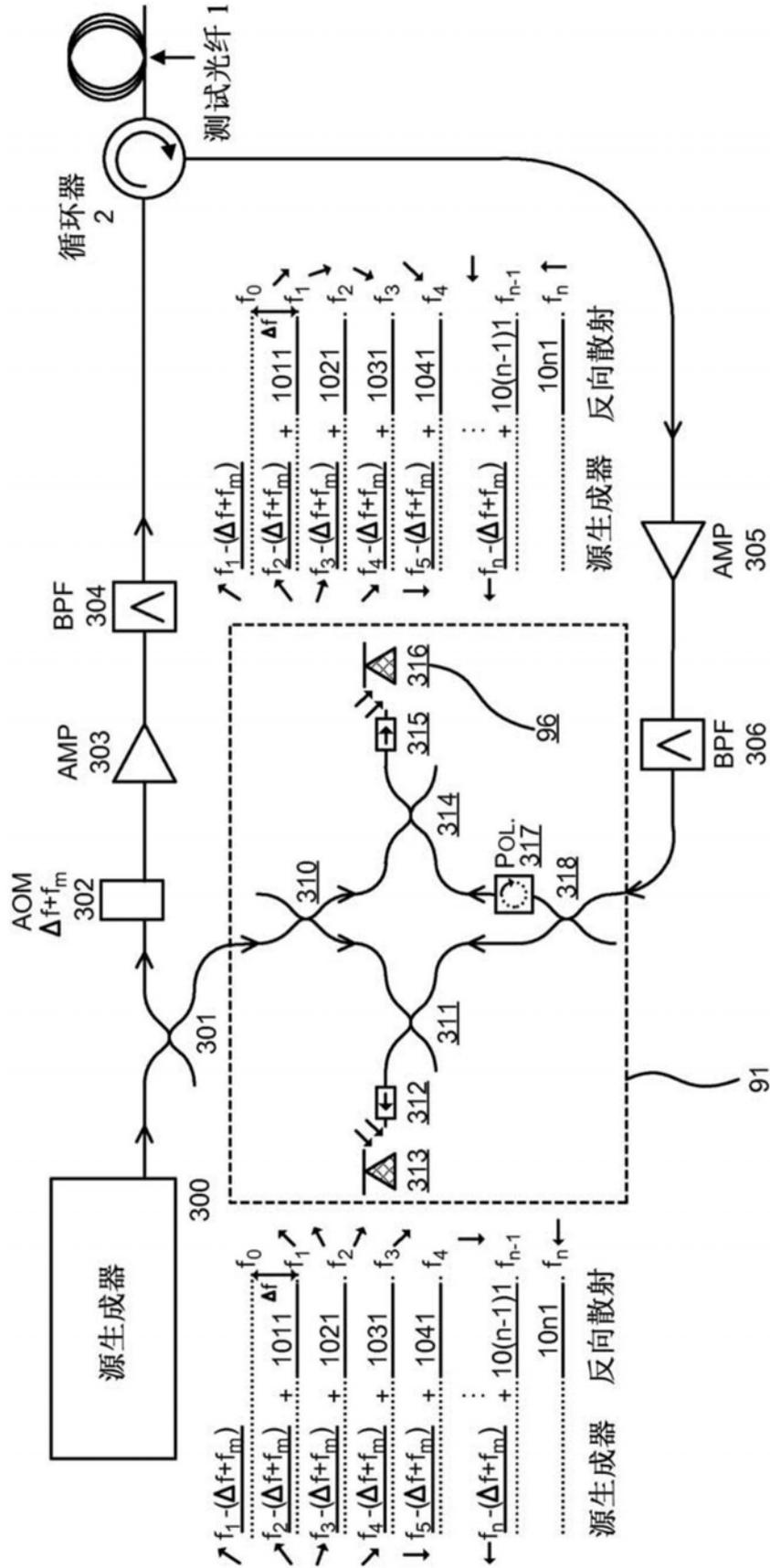


图9

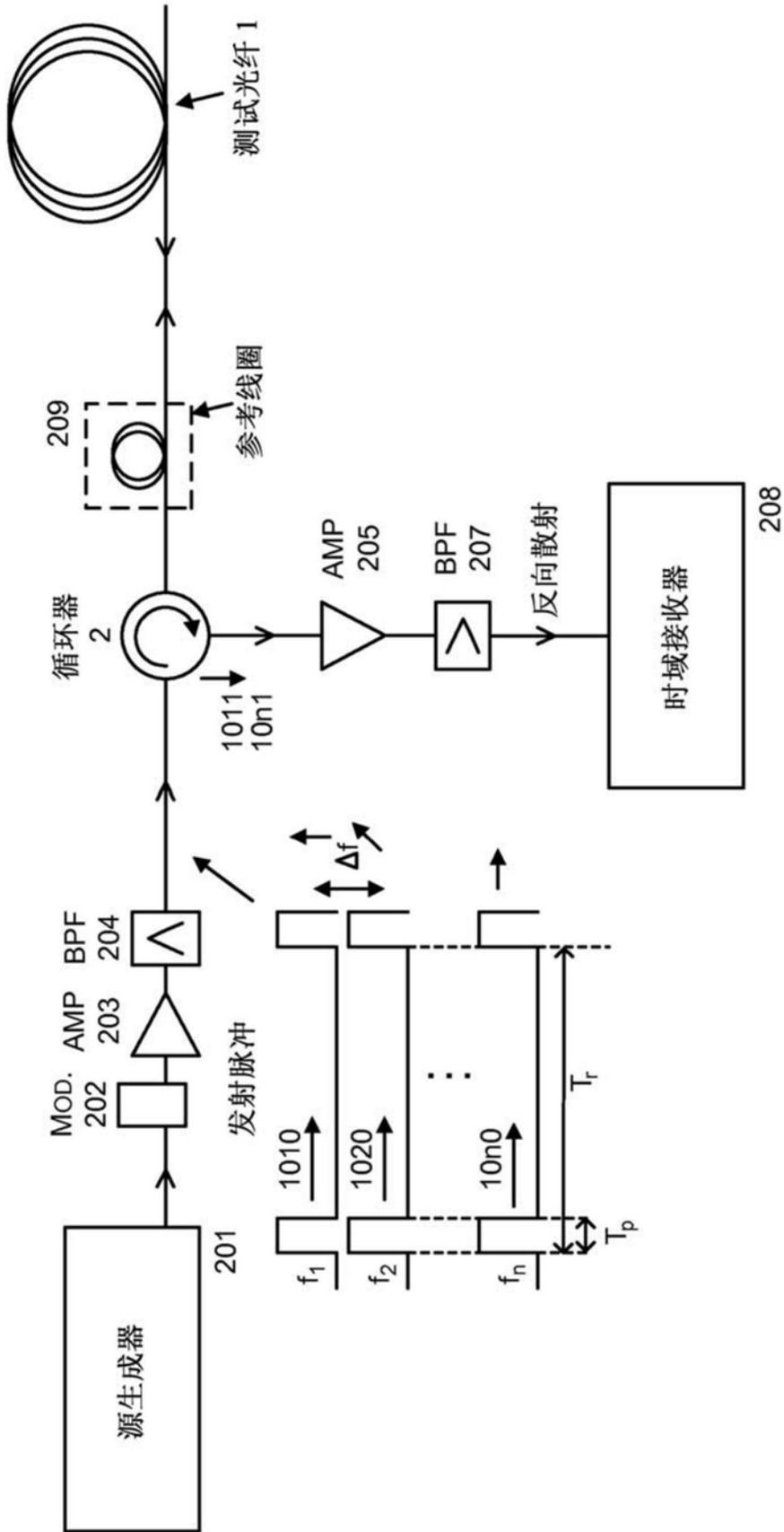


图10

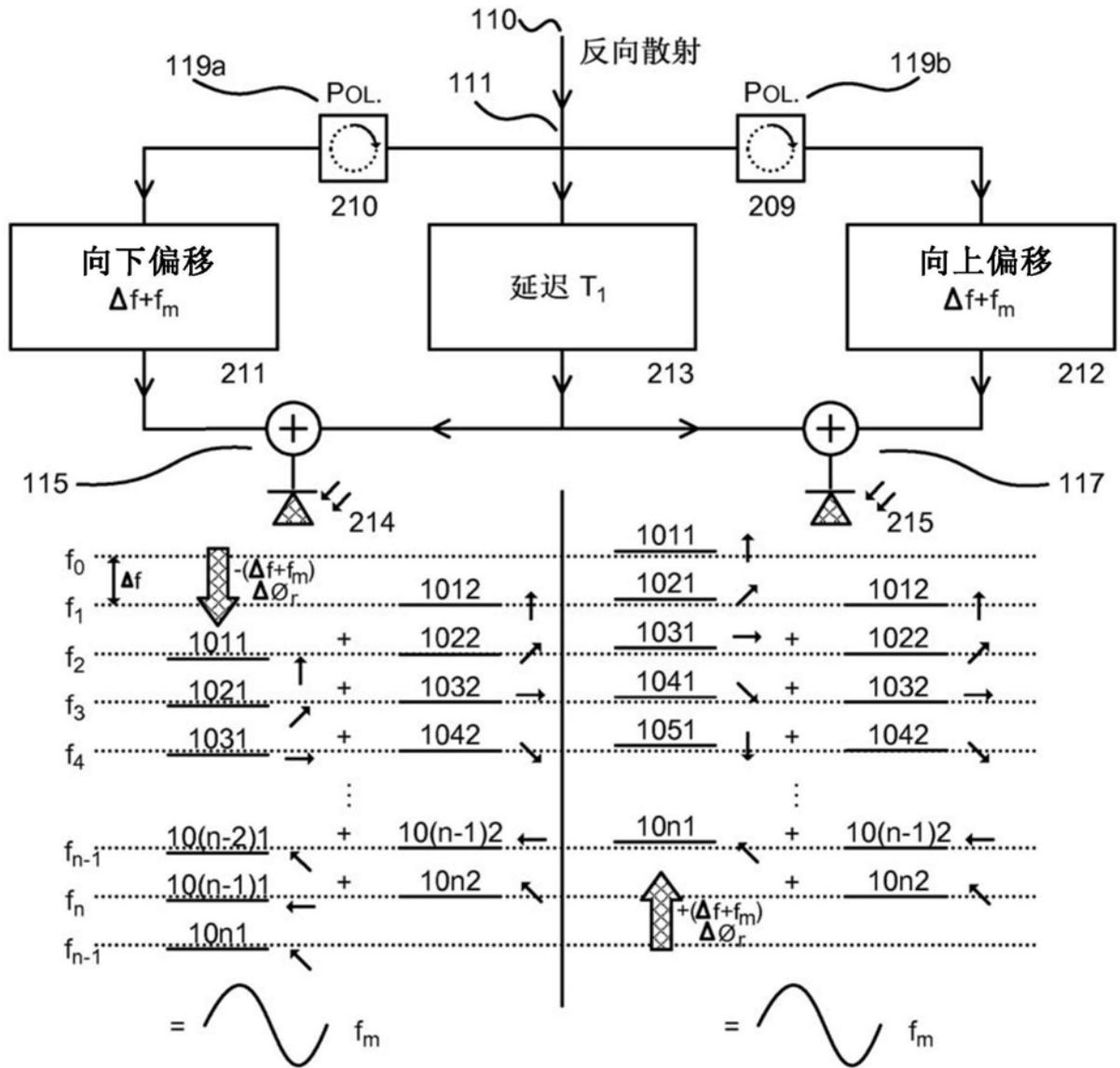


图11

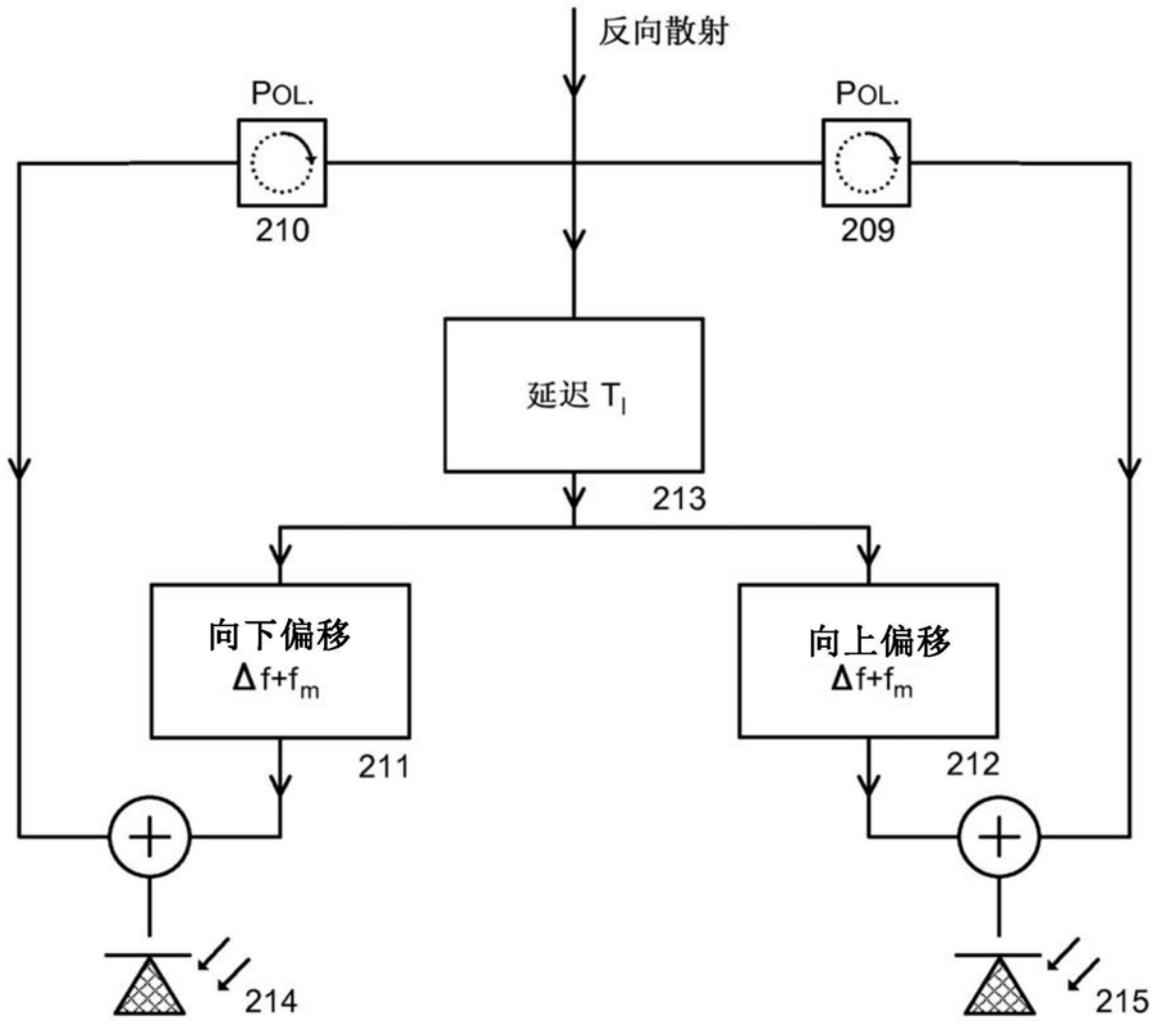


图12

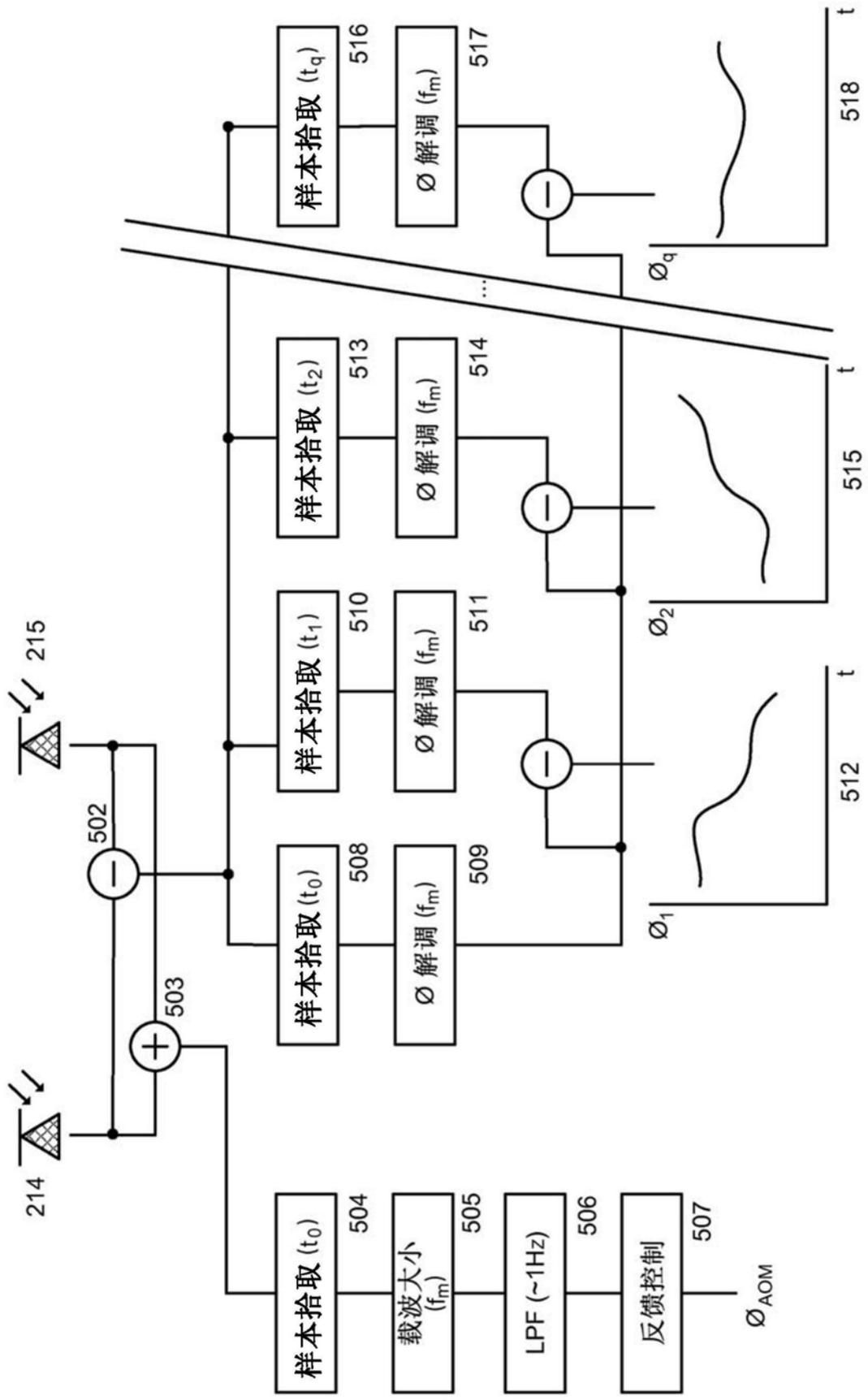


图13

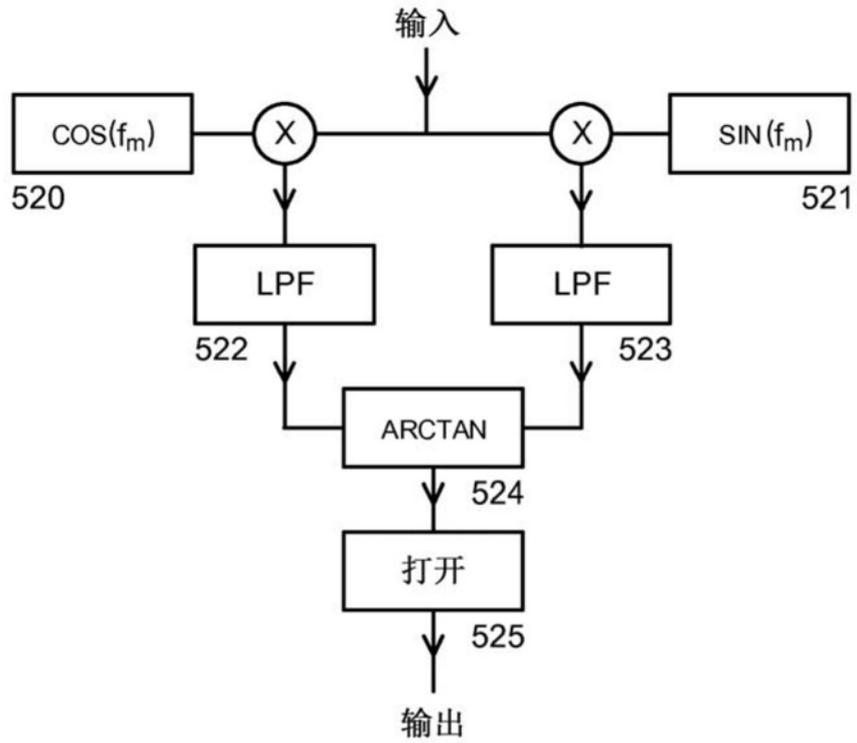


图14

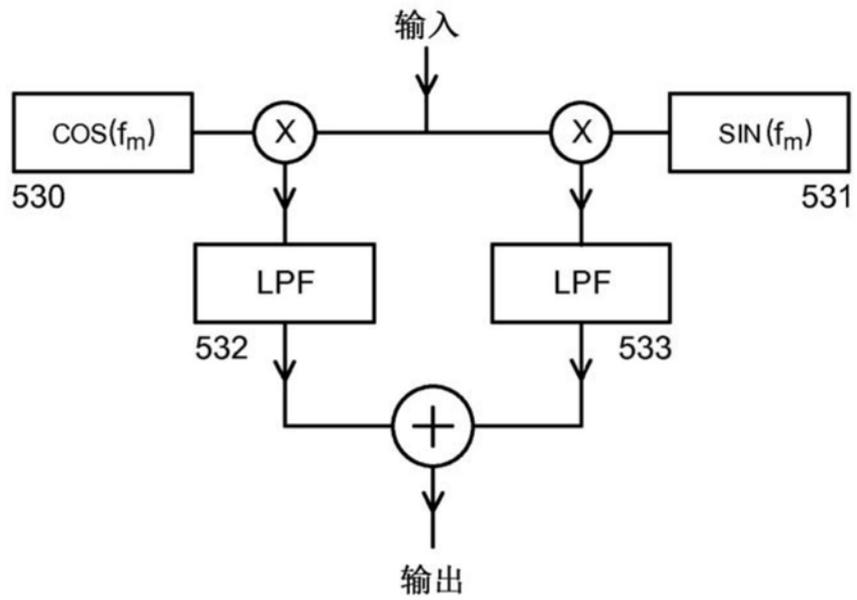


图15

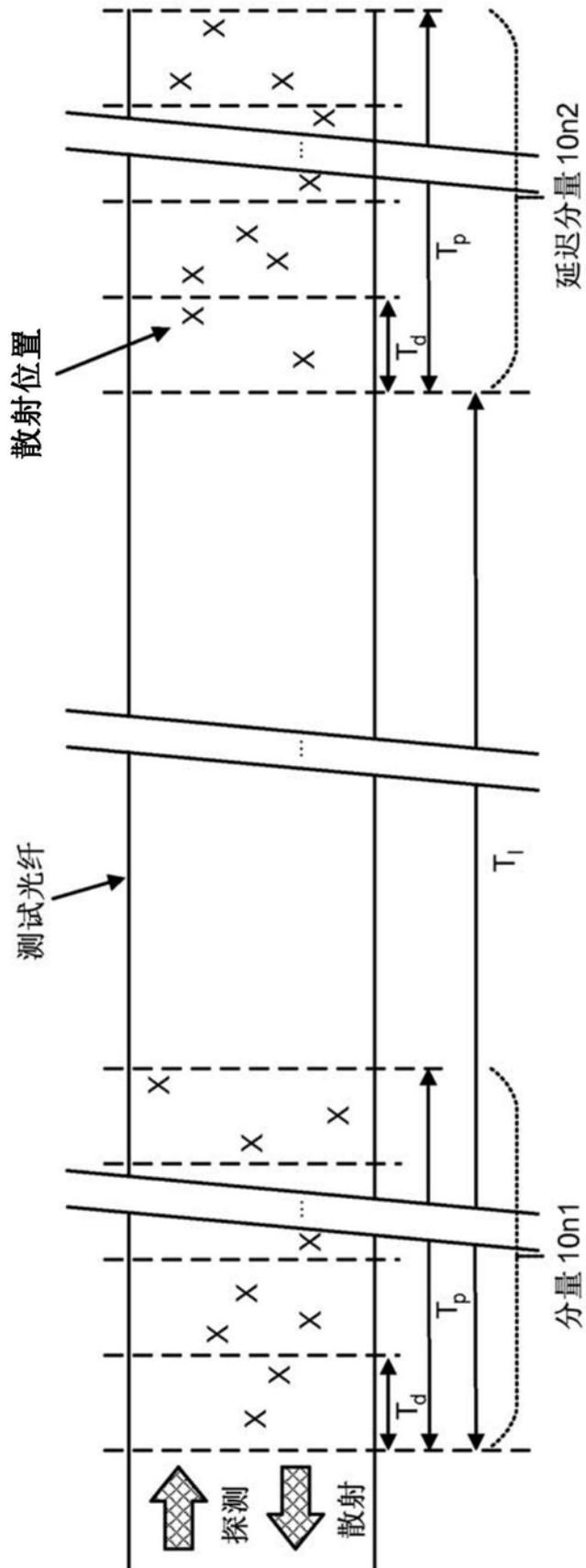


图16

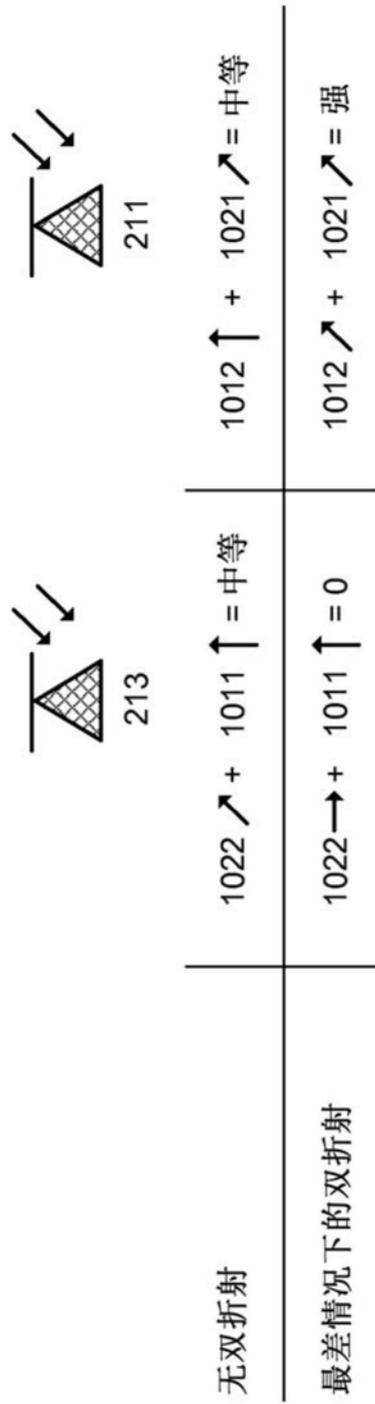


图17

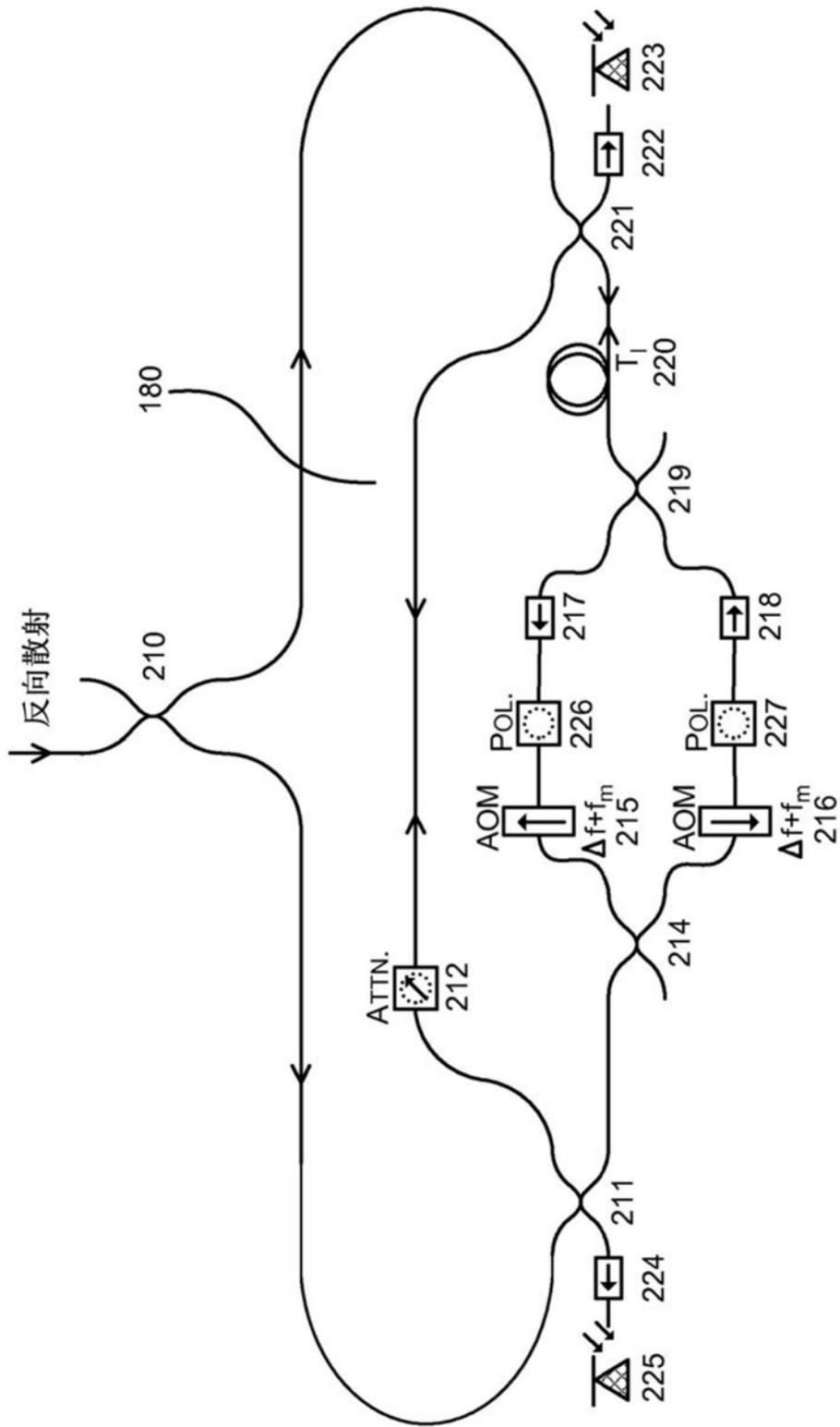


图18

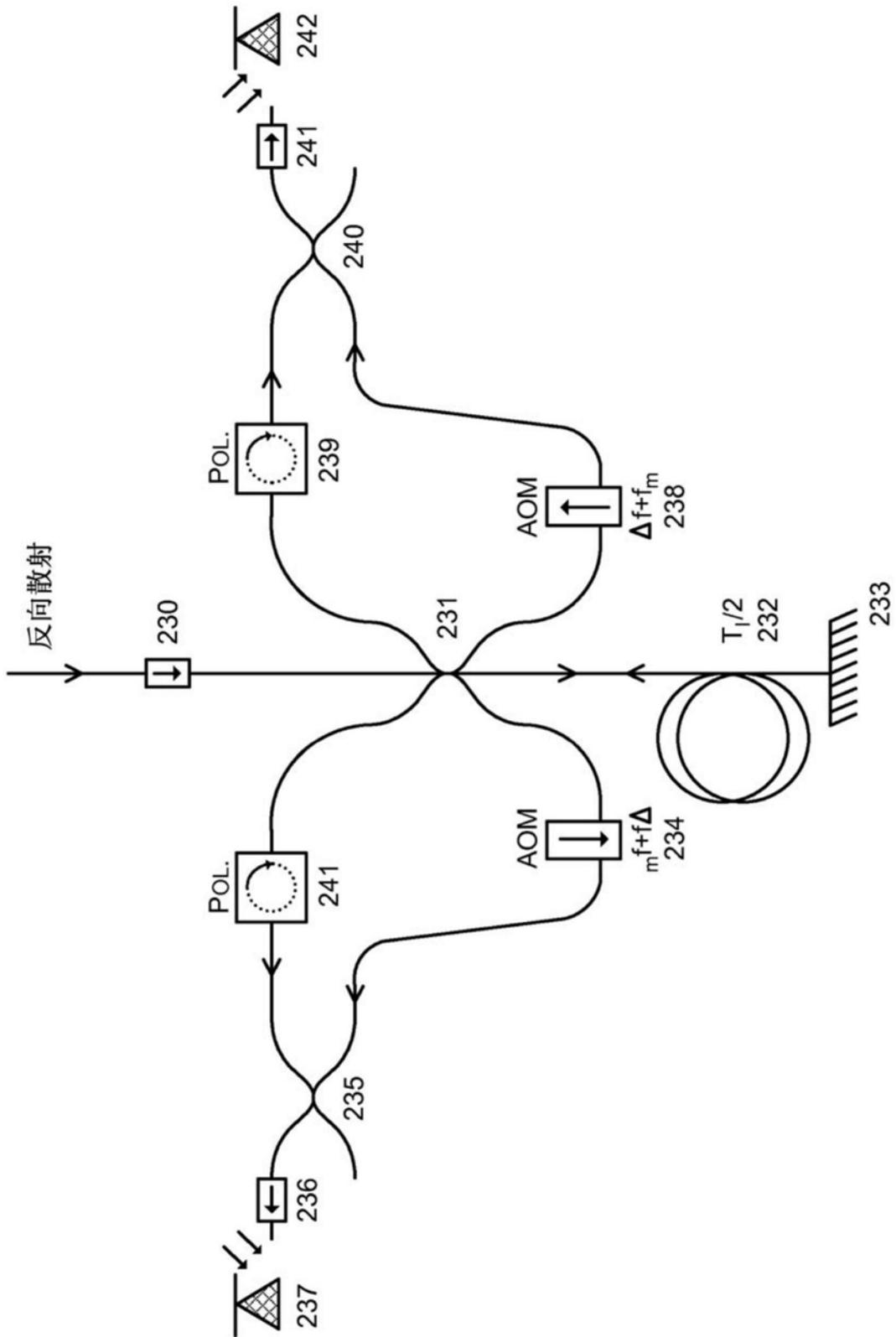


图19

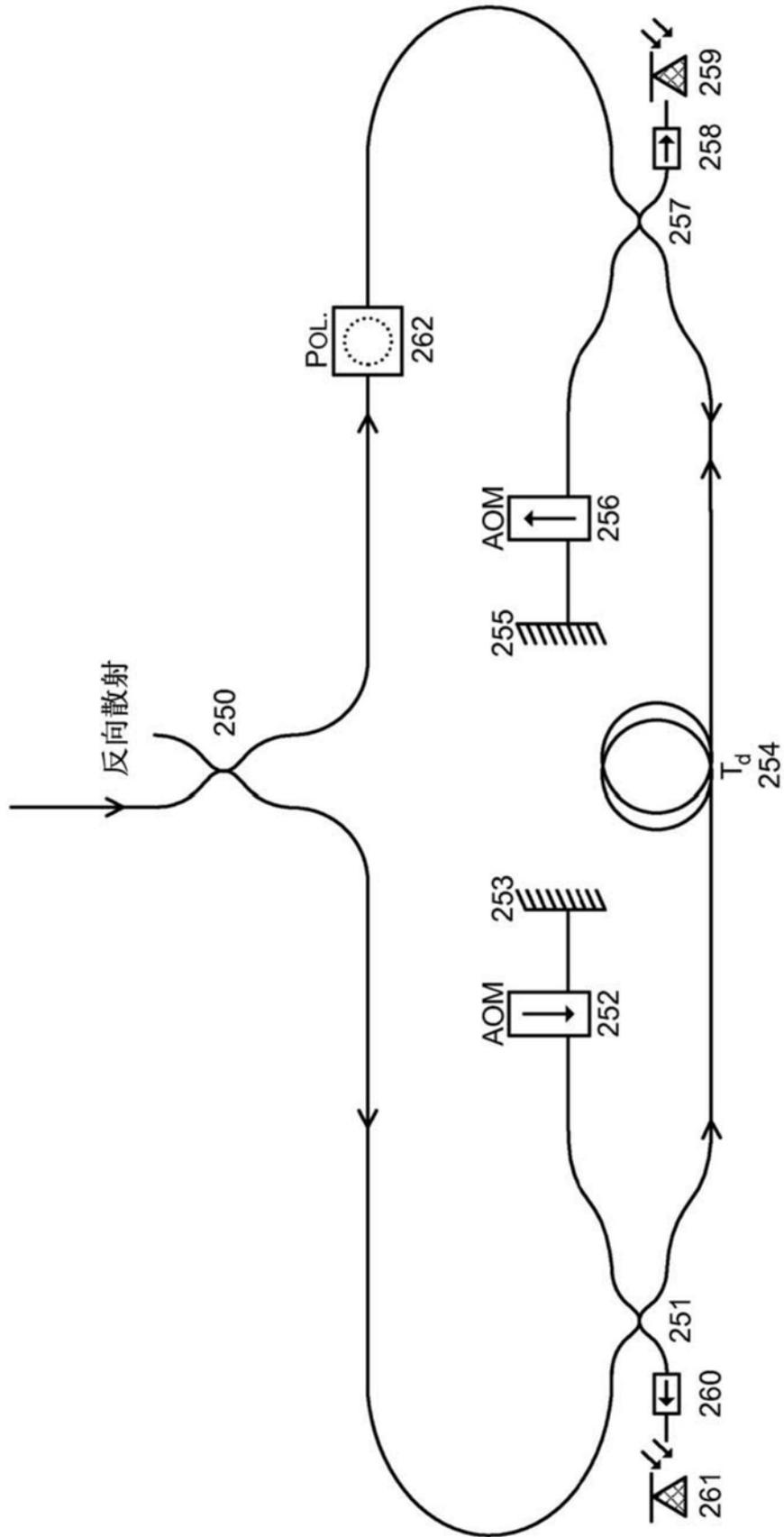


图20

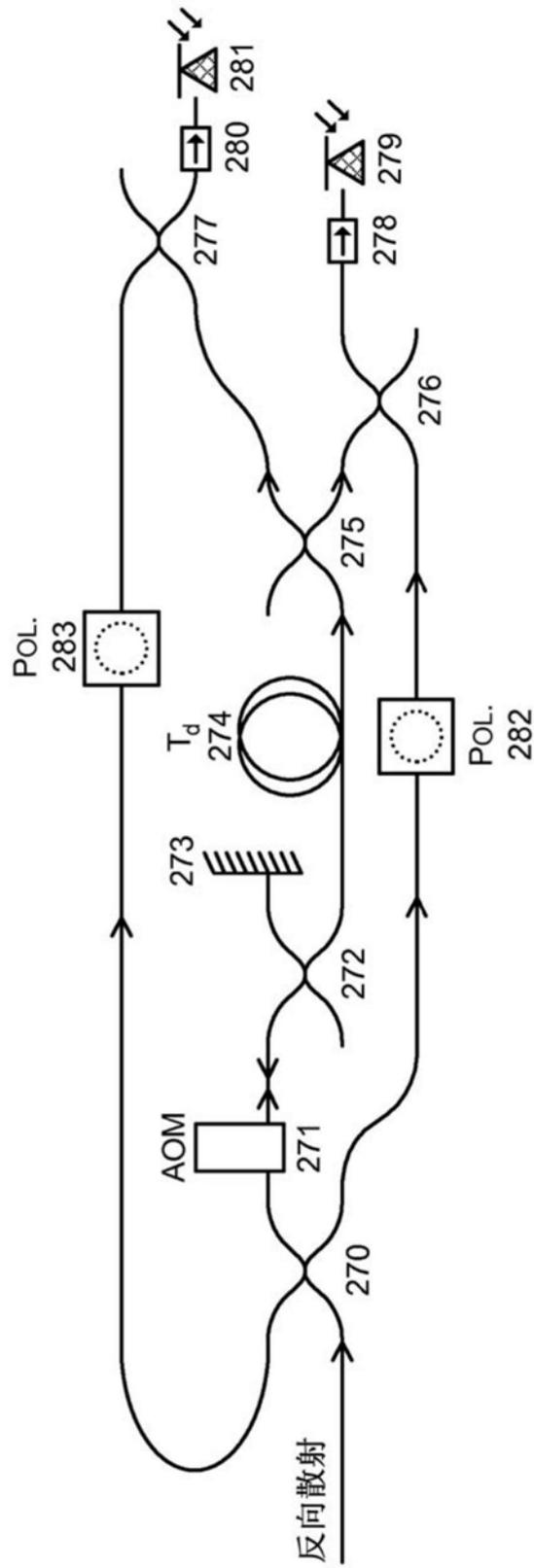


图21

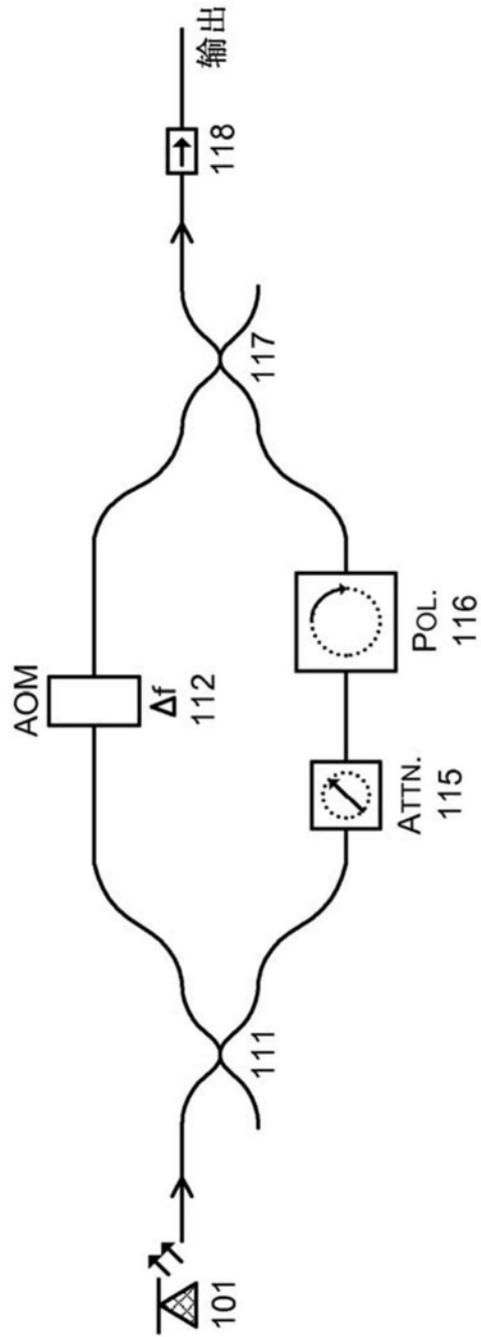


图22

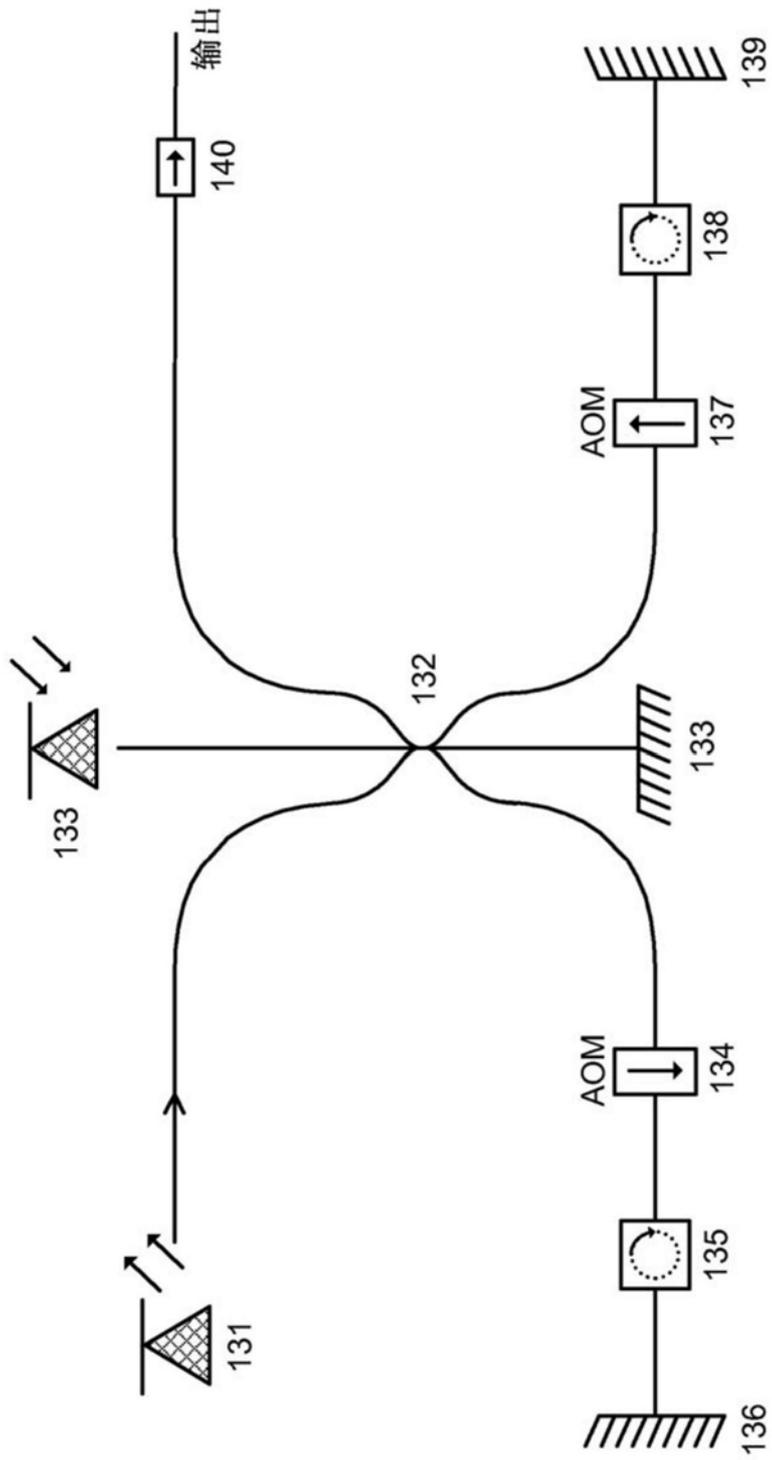


图23

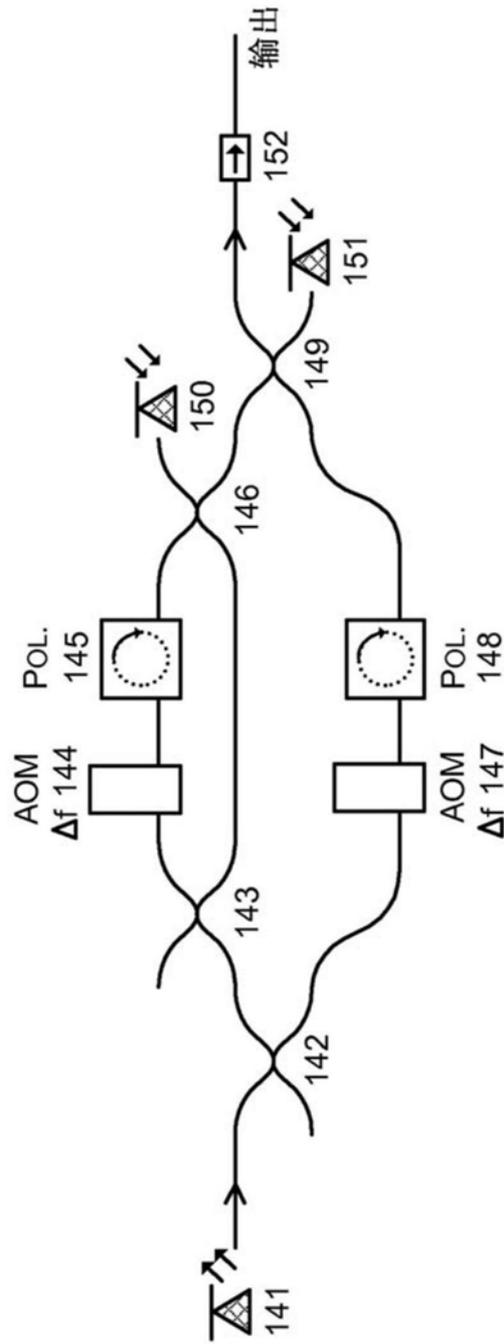


图24

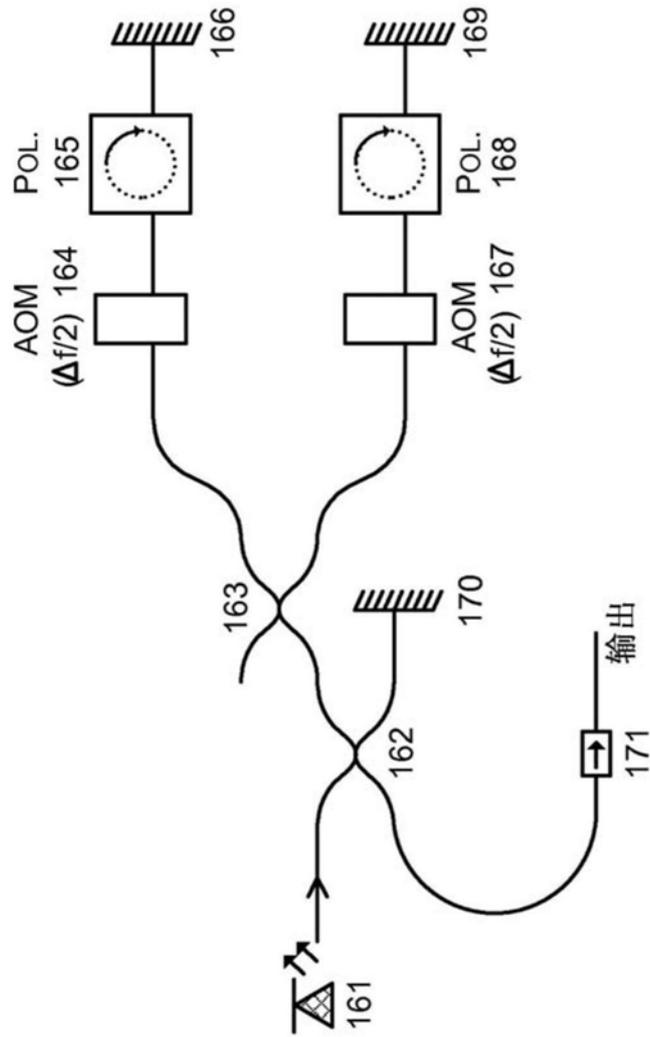


图25

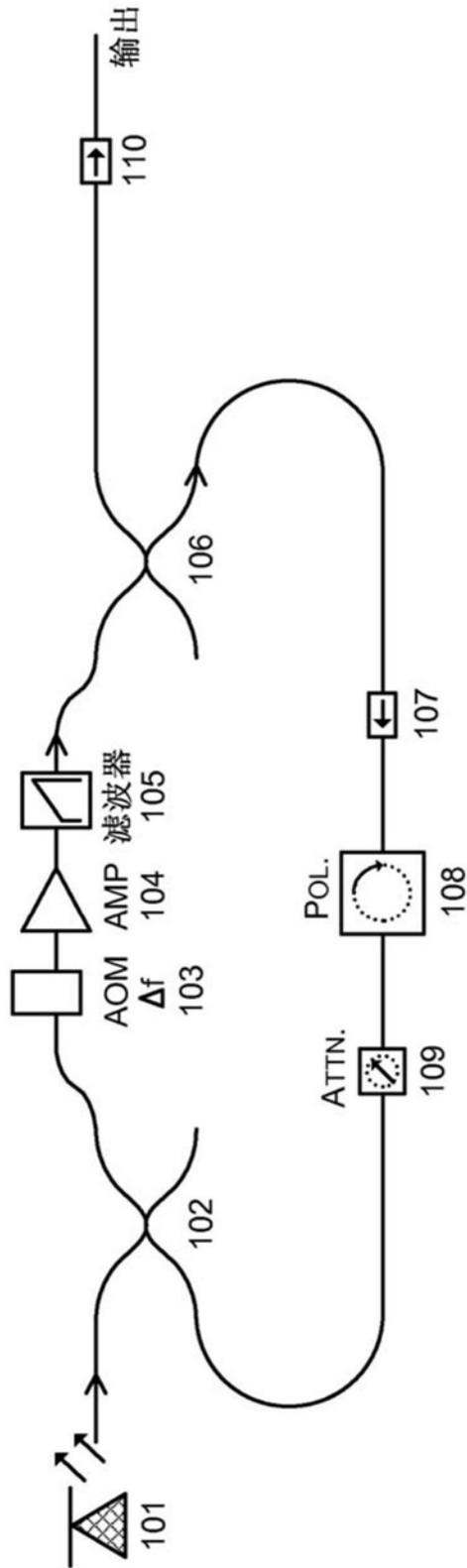


图26

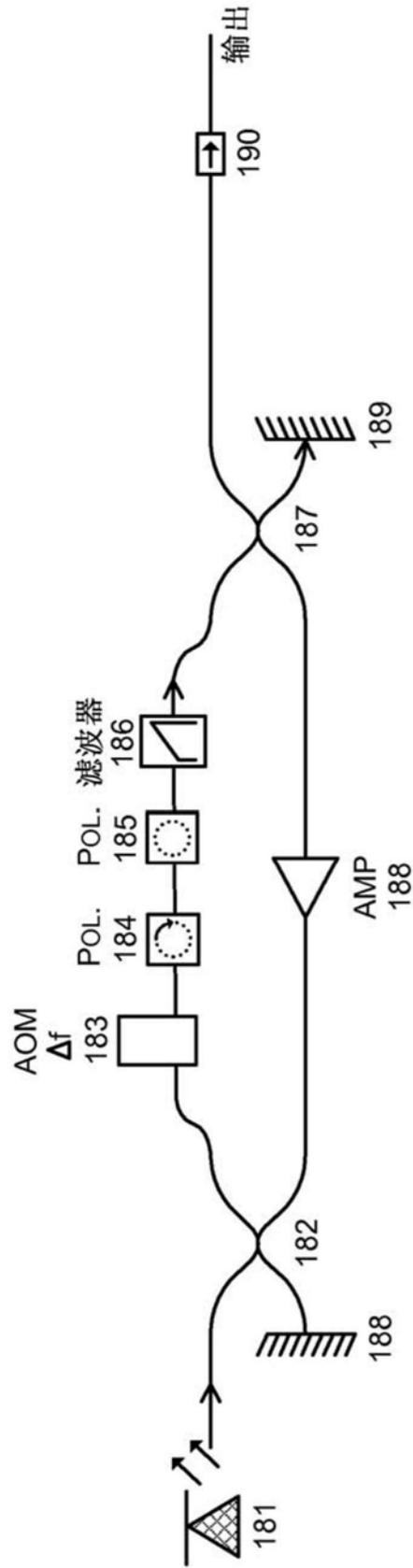


图27

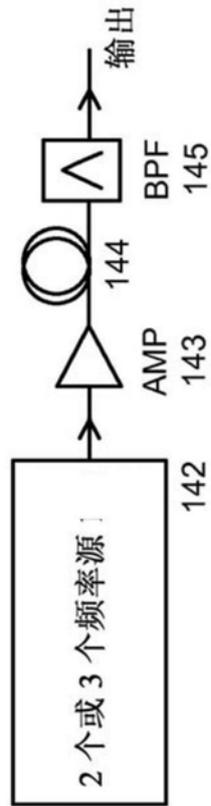


图28

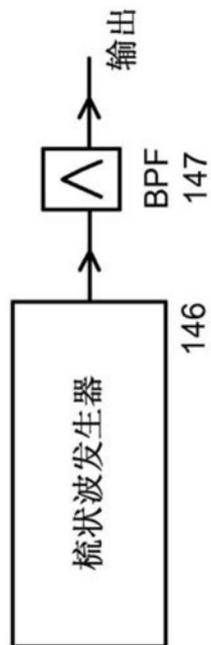


图29

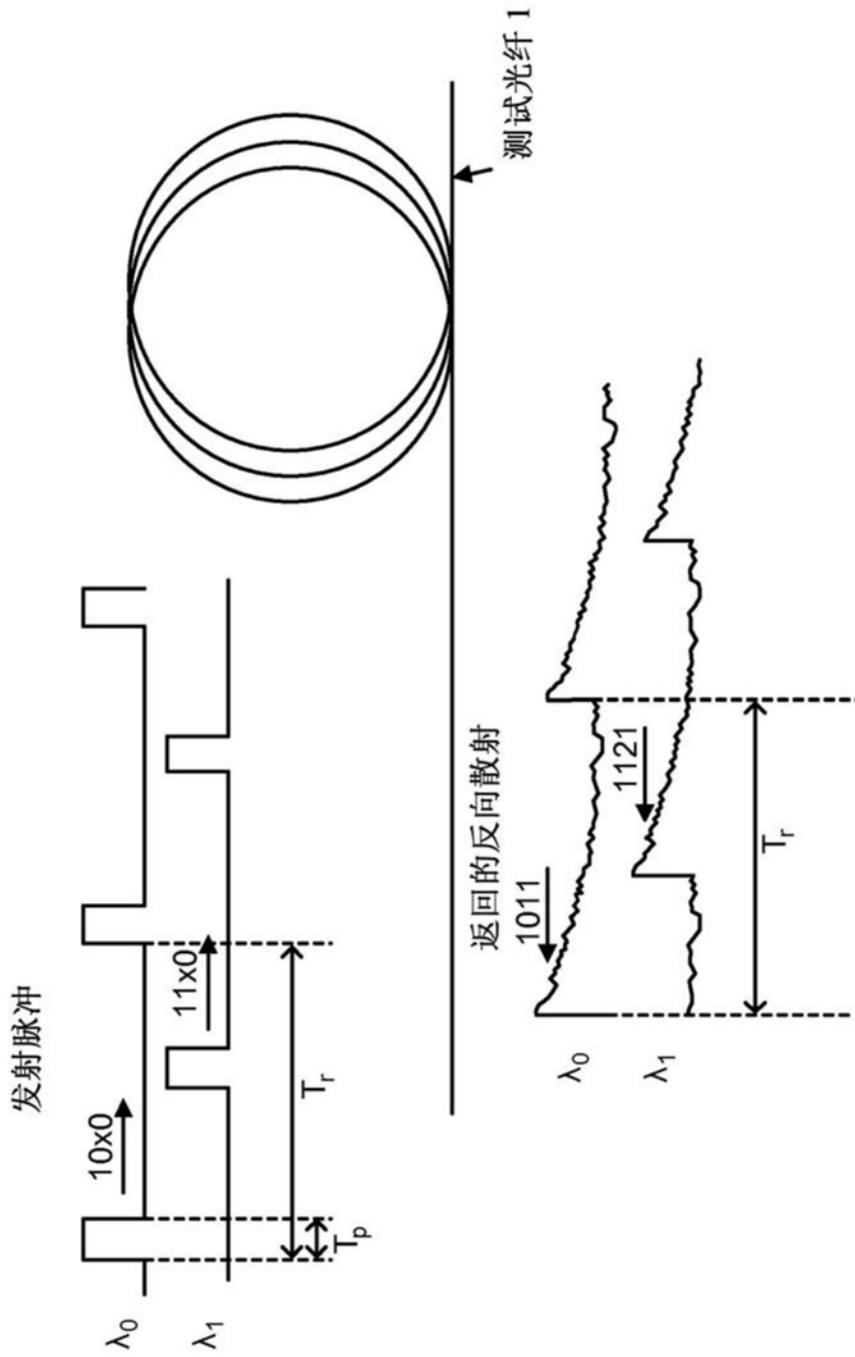


图30

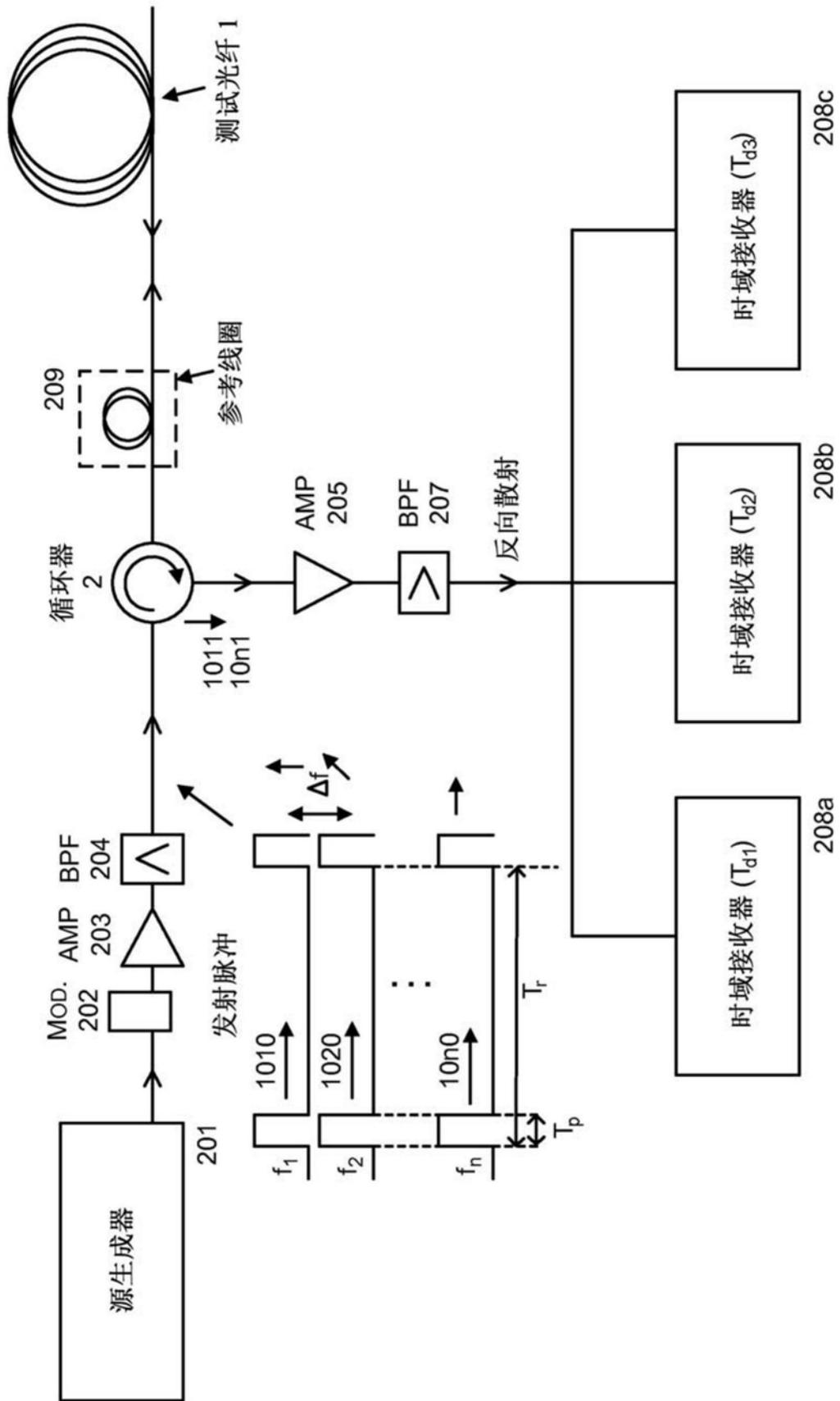


图31

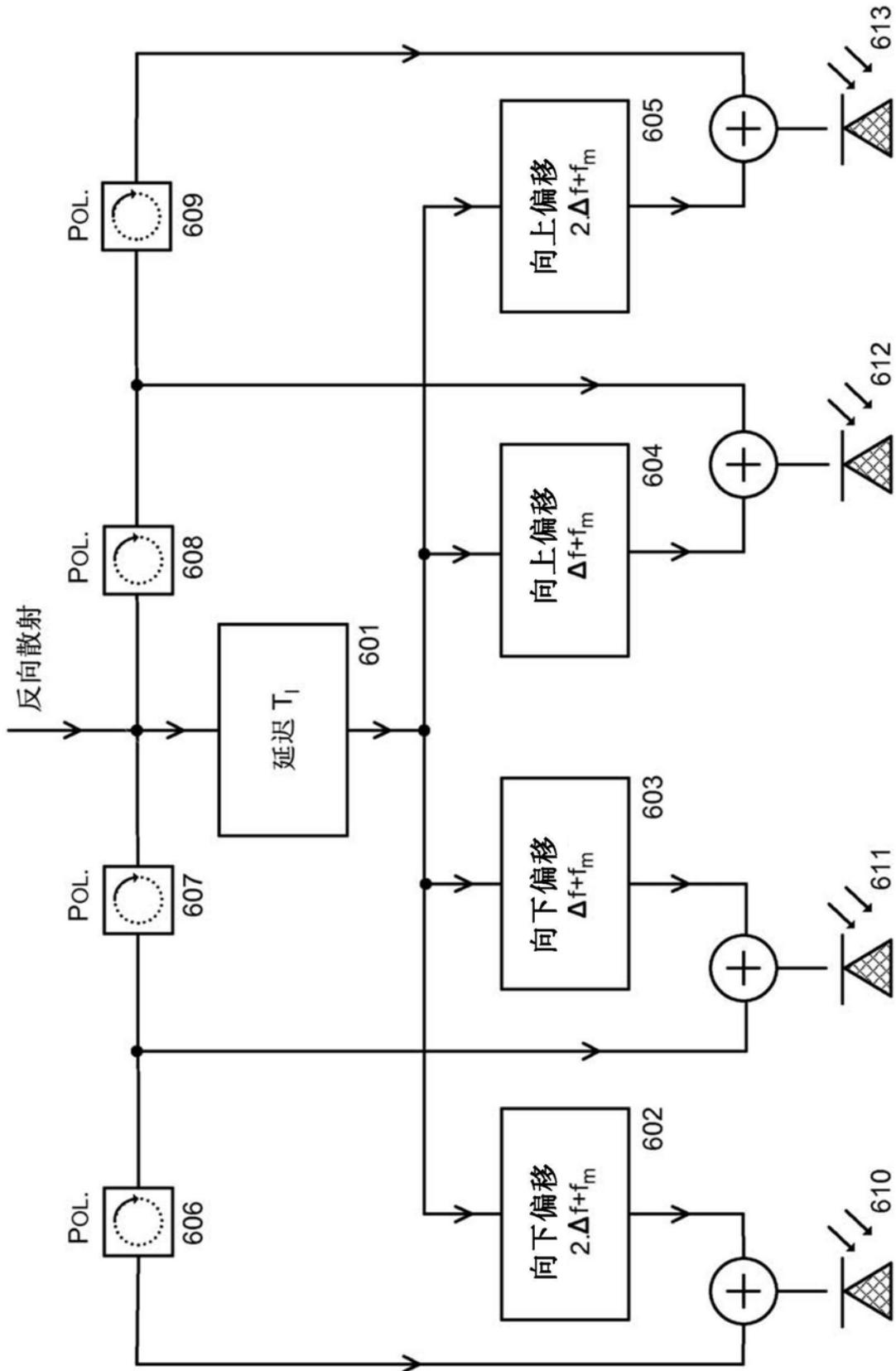


图32

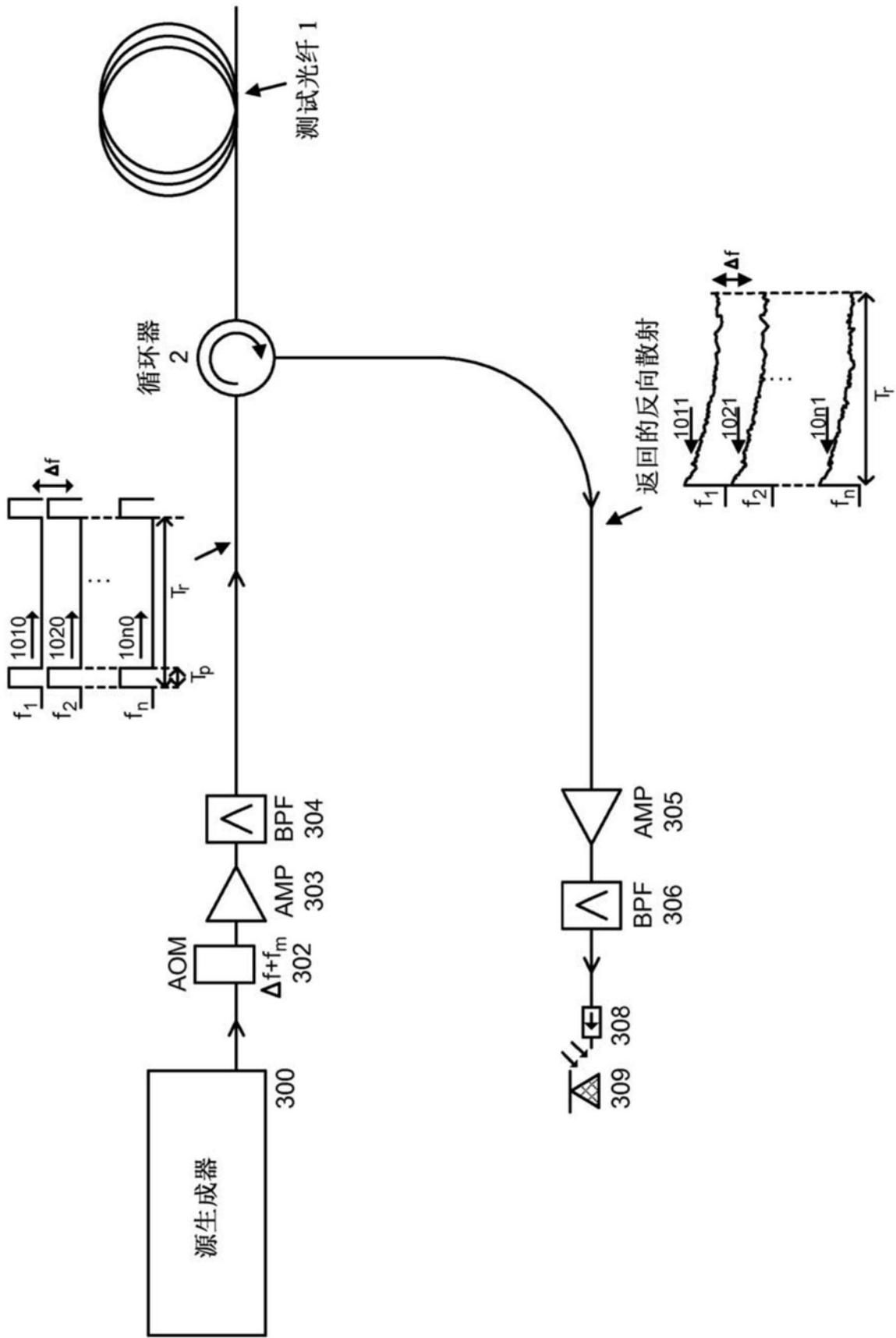


图33

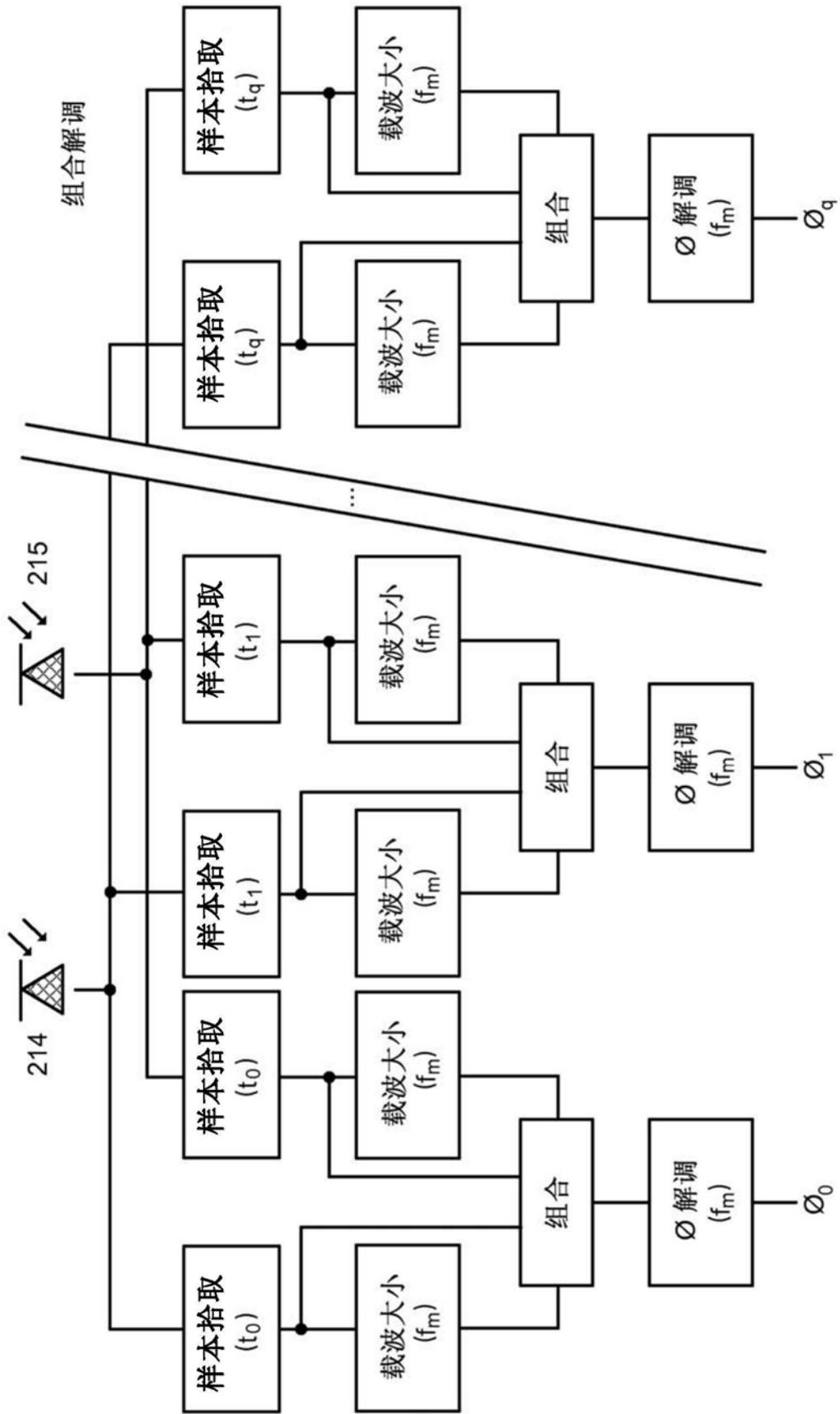


图34