



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107567575 A

(43)申请公布日 2018.01.09

(21)申请号 201680014100.7

(74)专利代理机构 北京三友知识产权代理有限

(22)申请日 2016.03.07

公司 11127

(30)优先权数据

1503861.5 2015.03.06 GB

代理人 吕俊刚 李艳芳

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

(51)Int.Cl.

2017.09.06

G01D 5/353(2006.01)

G01H 9/00(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/GB2016/050625 2016.03.07

(87)PCT国际申请的公布数据

W02016/142695 EN 2016.09.15

(71)申请人 希里克萨有限公司

地址 英国赫特福德郡

(72)发明人 M·法哈迪罗斯汉 T·帕克

S·沙塔林

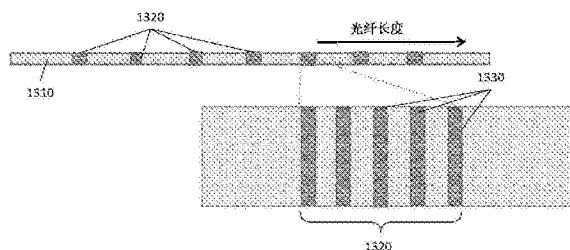
权利要求书5页 说明书20页 附图40页

(54)发明名称

用于光学感测的方法和设备

(57)摘要

本发明的实施方式提供了一种改进的光纤分布式声传感器系统，该系统使用专门设计的光纤来提高系统的整体灵敏度，在一些实施方式中，提高超过10的因数。这通过沿着光纤将弱宽带反射器周期性地插入到光纤中来实现。反射器仅反射来自DAS的光的一小部分，该一小部分沿着光纤返回入射在DAS上，每反射器的反射率通常在0.001%至0.1%的范围内，但优选地为大约0.01%。另外，为了允许温度补偿以保证在温度变化时获得相同的反射率，反射带宽为相对宽带的，即，在离标称激光波长+/-3nm的范围内。在一些实施方式中，反射器由一系列光纤Bragg光栅形成，每个光纤Bragg光栅具有不同中心反射频率，光栅的反射频率和带宽被选择为提供宽带反射。在其它实施方式中，啁啾光栅也可以用于提供相同效果。在优选实施方式中，反射器以标距长度（即，光纤DAS的期望空间分辨率）的一半隔开。



1. 一种光纤分布式传感器系统,所述光纤分布式传感器系统包括:
光源,所述光源被布置为用于产生光信号脉冲;
光纤,所述光纤能够部署为用于要感测的环境中,并且被布置为用于接收所述光信号脉冲;以及
感测设备,所述感测设备被布置为用于检测来自沿着所述光纤反射回的光信号脉冲的光,并且根据所述反射光确定扰动所述光纤的路径长度的声、振动、温度或其它参数中的任一个或更多个;
所述系统的特征在于:所述光纤包括多个反射器部分,所述多个反射器部分沿着光纤的长度分布在所述光纤的至少第一感测区域中,所述反射器部分的反射率相反地取决于:
 - i) 所述至少第一感测区域中的反射器部分的数量;以及
 - ii) 所述至少第一感测区域中的所述反射器部分之间的所选串扰量。
2. 根据权利要求1所述的系统,其中,根据所述光信号脉冲的定时特性设置所述反射器部分之间的间隔。
3. 根据权利要求1所述的系统,其中,根据所述反射器部分之间的间隔来设置所述光信号脉冲的定时特性。
4. 根据权利要求2或3所述的系统,其中,所述定时特性包括所述脉冲宽度和标距长度中的一个或更多个。
5. 根据权利要求1至4中的任一项所述的系统,其中,所述传感器系统的所述标距长度取决于:i) 所述反射器部分之间的所述间隔;和/或 ii) 所述光信号脉冲的所述定时特性。
6. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统,其中,所述反射器部分之间的所述间隔为所述传感器系统的所述标距长度的分数、等于所述标距长度、或为所述标距长度的倍数中的任一个。
7. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统,其中,所述反射器部分之间的所述间隔和/或所述光信号脉冲的所述定时特性被选择为使得获得双分辨率输出信号,所述双分辨率输出信号在所述光信号脉冲沿着所述光纤行进时在第一空间分辨率与第二空间分辨率之间交替。
8. 根据权利要求7所述的系统,其中,所述反射器部分之间的所述间隔小于所述光信号脉冲的所述脉冲宽度和所述脉冲间隔的总和。
9. 根据权利要求8所述的系统,其中,所述第二空间分辨率大体为所述第一空间分辨率的两倍。
10. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统,其中,所述反射器部分跨大带宽具有小反射率。
11. 根据权利要求10所述的系统,其中,所述反射器的反射率小于1%,并且优选地小于0.1%。
12. 根据权利要求11所述的系统,其中,所述反射器的反射率小于0.1%且大于0.001%,优选地在0.05%至0.005%的范围内,并且更优选地为大约0.01%。
13. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统,其中,所述反射器部分中的至少一个包括多个光纤Bragg光栅。
14. 根据权利要求13所述的系统,其中,所述多个光纤Bragg光栅沿着反射器部分布置

为阵列，所述阵列中的各个光栅具有与所述阵列中的其它光栅不相同但交叠的反射带宽，由此提供宽带反射器。

15. 根据权利要求14所述的系统，其中，所述阵列长度在30mm至60mm的范围内，优选地在40mm至50mm的范围内，所述光栅跨所述阵列长度大体均匀地布置。

16. 根据权利要求15所述的系统，其中，所述阵列中存在至少三个光栅，且更优选地存在4个或5个光栅。

17. 根据权利要求1至12中的任一项所述的系统，其中，反射器部分包括啁啾光栅。

18. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统，其中，反射器部分的所述反射带宽被选择为使得所述反射器部分跨所述系统的操作温度的预期范围反射所述光信号脉冲。

19. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统，其中，所述反射带宽为所述光源的波长周围的至少 $+/-2\text{nm}$ ，并且更优选地为至少 $+/-3\text{nm}$ ，甚至更优选地为至少 $+/-5\text{nm}$ 。

20. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统，其中，所述反射器部分沿着所述光纤的长度有规律地分布在至少所述第一感测区域中。

21. 根据权利要求4、5或6中的任一项所述的系统，其中，所述传感器系统的所述标距长度是能够分解入射在所述光纤上的声信号的光纤的最小长度。

22. 一种光纤分布式感测系统，所述光纤分布式感测系统包括：

光纤，所述光纤能够部署在要感测的环境中，所述光纤具有反射器部分，所述反射器部分有规律地分布在所述光纤的至少第一区域中，并且所述反射器部分之间具有第一间隔；

光信号源，所述光信号源被布置为用于将光脉冲输入到所述光纤中；以及

感测设备，所述感测设备被布置为用于检测来自沿着所述光纤反射回的所述光脉冲的光，并且根据所述反射光确定扰动所述光纤的路径长度的声、振动、温度或其它参数中的任一个或更多个；

其中，所述光信号源被控制为以如下方式产生根据所述反射器部分的至少所述第一间隔选择的第一脉冲宽度的光脉冲：所述感测设备交替地确定具有第一空间分辨率和第二空间分辨率的声信号。

23. 根据权利要求22所述的系统，其中，所述第一脉冲宽度小于所述第一间隔。

24. 根据权利要求22或23所述的系统，其中，所述第一间隔小于所述系统的所述标距长度。

25. 一种分布式感测系统，所述分布式感测系统包括：

光纤，所述光纤能够部署在要感测的环境中，所述光纤具有反射器部分，所述反射器部分有规律地分布在所述光纤的至少第一区域中，并且所述反射器部分之间具有第一间隔；

光信号源，所述光信号源被布置为用于将光脉冲输入到所述光纤中；以及

感测设备，所述感测设备被布置为用于检测来自所述反射器部分沿着所述光纤反射回的所述光脉冲的光，并且根据所述反射光确定扰动所述光纤的所述路径长度的声、振动、温度或其它参数中的任一个或更多个；

其中，所述光信号源被控制为根据所述第一间隔调节所述光脉冲的定时特性，以便选择期望空间感测分辨率。

26. 根据权利要求25所述的系统，其中，所述定时特性被调节为使得所述DAS的标距长度包含多个第一间隔。

27. 根据权利要求25和26所述的系统,其中,所述定时特性可调节以选择多个可能空间分辨率中的一个。

28. 根据权利要求25至27中的任一项所述的系统,其中,所述标距长度被调节为包含一个或更多个第一间隔,以选择期望空间感测分辨率。

29. 一种分布式感测系统,所述分布式感测系统包括:

光纤,所述光纤能够部署在要感测的环境中,所述光纤具有反射器部分,所述反射器部分有规律地分布在所述光纤的至少第一区域中,并且所述反射器部分之间具有第一间隔;

光信号源,所述光信号源被布置为用于将光脉冲输入到所述光纤中;以及

感测设备,所述感测设备被布置为用于检测来自所述反射器部分沿着所述光纤反射回的所述光脉冲的光,并且根据所述反射光确定扰动所述光纤的所述路径长度的声、振动、温度或其它参数中的任一个或更多个;

其中,所述感测设备的标距长度被调节为包含一个或更多个第一间隔,以选择期望空间感测分辨率。

30. 根据前述权利要求中的任一项所述的分布式感测系统,其中,所述反射器部分的反射率根据所述反射器部分沿着所述光纤的位置而变化。

31. 根据权利要求30所述的系统,其中,所述反射器部分的所述反射率根据以下中的任一个或更多个而增大:

- i) 沿着所述光纤与所述光信号源的距离;和/或
- ii) 从所述光信号源沿着所述光纤的光损耗;和/或
- iii) 连接器和引线的光损耗。

32. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统,其中,所述反射器部分包括:反射光栅,所述反射光栅形成在所述光纤的包层中;相应波导,所述相应波导被设置到所述光纤的芯中,以将来自所述芯的光能耦合至所述反射光栅。

33. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统,其中,所述反射器部分能够均被分别布置为具有从要反射的一组带宽选择的反射带宽。

34. 根据权利要求33所述的系统,其中,连续的反射器部分向彼此反射不同反射带宽。

35. 根据权利要求34所述的系统,其中,第一反射器部分反射以波长a微米为中心的第一反射带宽,并且被定位为连续地紧接所述第一反射器部分的第二反射器部分反射以波长b微米为中心的第二反射带宽,其中, $a < b$ 。

36. 根据权利要求35所述的系统,其中,被定位为连续地紧接所述第二反射器部分的第三反射器部分反射以波长c微米为中心的第三反射带宽。

37. 根据权利要求36所述的系统,其中, $b < c$,或者另选地 $b > c$ 。

38. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统,其中,所述光纤是多模光纤,并且所述反射器部分在相应位置处包括形成在所述多模光纤的所述芯中的相应光栅,以便引起相同传播模式的反射。

39. 根据权利要求38所述的系统,其中,所述光栅大体中心地形成在所述多模光纤的所述芯中,由此反射来自所述最低阶模式的能量。

40. 根据前述权利要求中的任一项所述的系统,其中,所述光纤是多芯光纤,所述反射器部分包括第一反射器,所述第一反射器被布置为将来自所述多个芯中的在使用时所述光

脉冲被输入到的第一芯的所述输入光脉冲的一部分反射到所述多个芯中的第二芯，并且将反射部分沿着所述多个芯中的所述第二芯朝向所述感测设备引导回去，所述感测设备被布置为用于检测来自所述多个芯中的所述第二芯的反射光。

41. 根据权利要求40所述的系统，所述系统还包括所述多个芯中的第三芯，第二反射器被设置为将来自所述第一芯的所述输入光脉冲的一部分反射到所述第三芯，并且将反射部分沿着所述多个芯中的所述第三芯朝向所述感测设备引导回去，所述感测设备被布置为用于检测来自所述多个芯中的所述第三芯的反射光。

42. 根据权利要求41所述的系统，其中，将所述第一芯耦合到所述第二芯的所述第一反射器之间的距离不同于将所述第一芯耦合到所述第三芯的所述第二反射器之间的距离，由此从所述多个芯获得不同空间感测分辨率。

43. 一种光纤分布式传感器系统，所述光纤分布式传感器系统包括：

第一光源，所述第一光源被布置为用于产生第一波长的光信号脉冲；

第二光源，所述第二光源被布置为用于产生第二波长的光信号脉冲；

光纤，所述光纤能够部署为用于要感测的环境中，并且被布置为用于接收所述光信号脉冲；

第一感测设备，所述第一感测设备被布置为用于检测来自沿着所述光纤反射回的第一波长的光脉冲的光，并且根据反射光确定入射在所述光纤上的声信号；以及

第二感测设备，所述第二感测设备被布置为用于检测来自沿着所述光纤反射回的所述第二波长的光脉冲的光，并且根据所述反射光确定扰动所述光纤的路径长度的声、振动、温度或其它参数中的任一个或更多个；

其中，所述光纤设置有第一反射器部分，所述第一反射器部分被布置为反射在所述光纤的第一段中的所述第一波长的信号的至少一部分；和第二反射器部分，所述第二反射器部分被布置为反射在所述光纤的第二段中的所述第二波长的信号的至少一部分。

44. 根据权利要求43所述的系统，其中，所述第一反射器部分与所述第二反射器部分不同地彼此隔开，由此在所述光纤的所述第一段和所述第二段中提供不同空间感测分辨率。

45. 一种光纤分布式传感器系统，所述光纤分布式传感器系统包括：

光源，所述光源被布置为用于产生光信号脉冲；

多个光纤芯长度，所述多个光纤芯长度能够部署为用于要感测的环境中；

光耦合器或光开关，所述光耦合器或光开关被布置为用于接收所述光信号脉冲并将所述光信号脉冲耦合到或切换到所述多个光纤芯长度；以及

感测设备，所述感测设备被布置为用于检测来自经由所述光耦合器或开关沿着所述光纤芯长度反射回的所述光信号脉冲的光，并且根据反射光确定扰动所述光纤的路径长度的声、振动、温度或其它参数中的任一个或更多个；

其中，所述光纤芯长度包括在至少相应感测区域中沿着长度分布的相应多个反射器部分。

46. 根据权利要求45所述的光纤分布式传感器系统，其中，所述相应感测区域沿着所述相应光纤芯长度彼此偏移。

47. 根据权利要求46所述的光纤分布式传感器系统，其中，所述相应感测区域沿着所述相应光纤芯长度纵向连续。

48. 根据权利要求45至47中的任一项所述的光纤分布式传感器系统,其中,所述多个光纤芯长度由以下来提供:

- i) 被布置为平行延伸的相应单芯光纤;或
- ii) 多芯光纤。

49. 根据前述权利要求中的任一项所述的光纤分布式传感器系统,其中,所述系统是被布置为感测入射在所述光纤上的声信号的光纤分布式声传感器系统。

50. 根据前述权利要求中的任一项所述的光纤分布式传感器系统,其中,反射器部分的数量和所述反射器部分的平均反射率的乘积为0.1或更小。

用于光学感测的方法和设备

技术领域

[0001] 本发明的实施方式涉及分布式光纤传感器，并且特别是在一些实施方式中涉及反射元件被集成到感测光纤中的这种传感器。

背景技术

[0002] 基于光纤的分布式传感器系统发现许多应用，特别是在石油天然气行业中用于流动监测和地震检测以及在安全行业中用于地区或周边安全监测或沿着长线路(诸如管线或铁路线)的监测。本申请人(伦敦埃尔斯特里的Silixa有限公司)销售两种光纤分布式感测系统：Silixa®iDAS™系统，该系统是非常灵敏的光纤分布式声传感器；和Silixa®Ultima™系统，该系统是基于分布式光纤的温度传感器。iDAS™系统的另外详情可以在<http://www.silixa.com/technology/idas/>处在优先权日获得，并且Ultima™系统的另外详情可以在<http://www.silixa.com/technology/dts/>在优先权日获得。另外，本申请人的更早国际专利申请W02010/136810给出了其分布式声传感器系统的操作的另外技术详情，以引证的方式将对于理解本发明必需的该申请的整个内容并入于此。

[0003] Silixa®iDAS™系统目前是鉴于空间分辨率、频率响应以及灵敏度导入的类型，并且能够以多达100kHz的频率沿着光纤的长度以低至1m的空间分辨率分解独立声信号。然而，总是期望尝试并提高所涉及的分辨率、频率响应或灵敏度参数中任一个方面的性能。

发明内容

[0004] 本发明的实施方式提供一种改进的光纤分布式声传感器系统，该系统使用专门设计的光纤来提高系统的整体灵敏度，在一些实施方式中提高超过10的因数。这通过沿着光纤将弱(我们通过弱意指低反射率)宽带反射器周期性地插入到光纤中来实现。反射器仅反射来自DAS的光的一小部分，该一小部分沿着光纤入射回到DAS，每反射器的反射率通常在0.001%至0.1%的范围内，但优选地为大约0.01%。另外，为了允许温度补偿，反射带宽是相对宽带的(即，等于或大于离标称激光波长 $\pm 2\text{nm}$ 的范围，优选地大至 $\pm 5\text{nm}$ 的范围)。这提供要容纳的反射器的温度依赖反射率，特别是在反射器由光栅形成的情况下，已知光栅通常展示反射波长在宽(例如， $\pm 2\text{nm}$)带宽上的温度依赖性。在一些实施方式中，反射器由一系列光纤Bragg光栅形成，每个光纤Bragg光栅具有不同中心反射频率，光栅的反射频率和带宽被选择为提供宽带反射。在其它实施方式中，啁啾光栅也可以用于提供相同效果。在其它实施方式中，具有低反射率和宽带宽的短光栅可以使用飞秒激光写处理被写入到感测光纤中。在一些实施方式中，反射器以标距长度(即，光纤DAS的期望空间分辨率)隔开，在其它实施方式中，反射器以根据标距长度计算的距离(例如，为该标距长度的分数或倍数)隔开。

[0005] 另外，一些实施方式允许双空间分辨率操作或空间分辨率选择性。这些效果通过当光脉冲沿着光纤行进时控制从反射器获得的反射之间的虚拟定时特性来获得。特别地，在本发明的一个实施方式中，光脉冲沿着光纤被发射并转而在它沿着光纤行进时从反射器

反射。这些反射在分布式声感测系统处被接收，并且经受已知延迟，以提供反射的延迟版本，该延迟版本然后干涉非延迟版本，以获得输出信号。所应用的延迟被称为标距(gauge length)长度。因此，延迟版本可以被认为是继实际脉冲“之后”但与实际脉冲间隔标距长度的虚拟脉冲。实际脉冲与虚拟脉冲之间的延迟或标距长度定义从系统获得的空间分辨率。通过相对于反射器部分的已知间隔控制标距长度，可以获得空间分辨率选择性或双分辨率操作。特别地，标距长度可以被控制为使得调节有效脉冲分离(即，原始脉冲与延迟脉冲之间的时间差或延迟)，以包含期望的一对反射器部分，例如以根据期望改变空间分辨率。通过将标距长度设置为特定值来获得双空间分辨率操作，特定值意味着当脉冲沿着光纤行进时交替地获得第一和第二感测分辨率。

[0006] 鉴于上述内容，在一些实施方式中，提供了一种光纤分布式声传感器系统，该光纤分布式声传感器系统包括：光源，该光源被布置为用于产生光信号脉冲；光纤，该光纤可部署在感测环境中，并且被布置为用于接收光信号脉冲；以及感测设备，该感测设备被布置为用于检测来自沿着光纤反射回的光信号脉冲的光，并且根据反射光确定入射在光纤上的声信号；该系统的特征在于：光纤包括多个反射器部分，该多个反射器部分沿着光纤的长度分布在光纤的至少第一感测区域中。

[0007] 本发明的另外特征、实施方式以及优点将从所附权利要求清楚。

附图说明

[0008] 现在将参照附图来描述本发明的实施方式，其中，相同参考标号提及相同部件，并且其中：

[0009] 图1、图2、图3以及图4示出了与本发明的实施方式有关的示意性干涉仪设备，该干涉仪设备包括环行器以及具有穿过干涉仪的不同光路径的多光纤耦合器、法拉第(Faraday)旋转镜和光电探测器；

[0010] 图5和图6示意性地示出了干涉仪可以如何根据本发明的实施方式以串联和/或星形构造被级联；

[0011] 图7示意性地示出了将干涉仪用于快速测量来自光纤的散射光和反射光的传感器系统；

[0012] 图8示意性地示出了分布式传感器系统，该分布式传感器系统使用干涉仪来生成均具有不同频率的一系列脉冲，从而允许散射光的不同部分与散射光的具有稍微频移的另一部分干涉，这产生外差信号；

[0013] 图9是表示数据处理方法的框图；

[0014] 图10是表示校准干涉仪的方法的框图；

[0015] 图11示意性示出了分布式传感器系统，在该分布式传感器系统中，光的光谱使用快速光调制器来调制，这生成多个频率边带，光谱的一部分使用滤光器来选择；

[0016] 图12A示出了使用用于图11所示的布置的滤光器调制并选择的光的光谱；

[0017] 图12B示意性示出了用于根据图11的方法的时序图；

[0018] 图13-1是例示了本发明的实施方式光纤的视图；

[0019] 图13-2是例示了本发明的另外实施方式光纤的视图；

[0020] 图14-1是例示了在本发明的实施方式中使用的一系列光纤Bragg光栅的反射带的

视图；

[0021] 图14-2是例示了在本发明的实施方式中使用的一系列短光纤Bragg光栅的反射带的视图；

[0022] 图15是另选反射结构的视图；

[0023] 图16是另一个另选反射结构的视图；

[0024] 图17和图18在数学上例示了本发明的实施方式的操作；

[0025] 图19是例示了使用本发明的实施方式获得的性能提高的一系列结果集合；

[0026] 图20是例示了在本发明的实施方式中的可以如何反射脉冲以提供双分辨率操作的视图；

[0027] 图21-1的A至J例示了由本发明的实施方式获得的双分辨率结果；

[0028] 图21-2例示了激光脉冲在区域中截断的双分辨率，其中，在反射区域中不存在交叠；

[0029] 图22的A至F例示了在本发明的实施方式中使用更密集间隔用于允许用于分辨率选择性的另一个实施方式；

[0030] 图23是例示了用于从双分辨率系统导出的数据的处理链的视图；

[0031] 图24是例示了反射器可以如何刚好处于光纤的子集中的视图；

[0032] 图25是例示了光栅反射器可以具有不同反射带宽的视图；

[0033] 图26是示出了光栅的反射率可以沿着光纤增大的视图；

[0034] 图27是例示了光栅可以如何形成在耦合到光纤芯的包层内而不是形成在芯本身中的视图；

[0035] 图28是示出了反射器可以如何形成在多模光纤的芯中的视图；

[0036] 图29是例示了光栅可以仅设置在光纤的一段中且因此脉冲定时被调节的视图；

[0037] 图30是示出具有还可以以不同波长为中心的不同反射间隔的另选双分辨率布置的视图；

[0038] 图31是示出了反射器可以如何形成在多模光纤的芯中的视图；

[0039] 图32和图33是示出了反射器可以如何用于提供多模和多芯光纤中的反向散射自由返回通道的实施方式；

[0040] 图34-1以及图34-2的(a)和(b)示出了可以如何通过使用激光频率周围的不同反射带宽的光栅来选择分辨率；

[0041] 图35和图36是例示了在本发明的实施方式中使用的反射器的特性的视图；以及

[0042] 图37的(a)至(c)是例示了本发明的另外实施方式的视图。

[0043] 实施方式的概述

[0044] 本发明的实施方式提供一种改进的光纤分布式传感器，并且在一些实施方式中提供一种通过改进信噪比来对W02010/136810中描述的Silixa® iDAS™系统进行改进的光纤分布式声传感器。这通过使用感测光纤来完成，该感测光纤沿着其长度具有若干弱相对宽带反射点，这些反射点大体以与标距长度相同距离隔开，该标距长度为在DAS系统的干涉仪的一个臂中应用至反射脉冲的路径长度延迟，该路径长度延迟转而涉及所获得的空间分辨率。由于弱反射率(设想大约0.01%的反射率)，沿着光纤的反射损耗较小，因此可以引入数千个反射点。例如，对于10m的感测分辨率，1000个反射点给出刚好0.4dB的过剩损耗，并且

获得10km的感测长度。在DAS系统中执行的处理与对来自沿着标准光纤的反向散射信号执行的处理大体相同,但因为存在沿着光纤向后的故意反射而不是散射,所以在DAS盒处接收回更大量的反射信号,该反射信号也更稳定,反射信号的两个因数有助于信噪性能的提高。有助于进一步增大SNR的具体方面是,因为反射点沿着光纤是固定的,所以由于随机反向散射的根本性质导致的 $1/f$ 噪声被减小至不可测量水平。这帮助降低所处理信号的信号的本底噪声。因此,通过结合 $1/f$ 噪声的降低增加光信号水平,增加总信噪比。技术测试示出实现超过因数10的信噪比的改进。

[0045] 关于反射点的性质,在一些实施方式中,一系列光纤Bragg光栅(FBG)用于每个反射点,每个反射点具有不同弱反射波长但具有交叠反射带宽,光栅靠近彼此被写到光纤中,隔开5至15mm(优选地大约为10mm)的量级的很小量。使用5个光栅,它们之间具有10mm的间隔,每个反射点的总长度大约为45mm,并且允许用于各个光栅的交叠反射带宽的总反射带宽为大约 $+/-2\text{nm}$,但在一些实施方式中,该总反射带宽可以宽至至少 $+/-5\text{nm}$ 。在其它实施方式中,理想地,将使用单个相对弱宽带反射器;例如,长度小于1mm并且通常100 μm 的啁啾光栅或短宽带弱反射镜。下面描述另外实施方式。

[0046] 沿着光纤的反射点的使用还展示其它可能性,特别是关于DAS的空间分辨率。例如,在一些实施方式中,可以通过相对于沿着光纤的反射器部分的间隔选择适当标距长度和脉冲宽度来提供同时双分辨率布置。例如,对于给定反射器间隔L,假如脉冲宽度小于L(例如大约0.75L)且另外假如标距长度(即,DAS中的干涉仪的不同臂之间的长度差)(该标距长度转而涉及空间分辨率)被选择为使得反射光和干涉仪中的延迟版本从相邻反射点且然后从非相邻反射点连续地被反射,然后将成功地获得多分辨率性能。例如,在L为10m,脉冲宽度为7.5m且标距长度(干涉仪中的对应于干涉仪路径长度差的有效虚拟脉冲间隔)为15m的情况下,当脉冲沿着光纤行进时获得交替10m和20m分辨率性能。

[0047] 在其它实施方式中,相对于反射器间隔的脉冲定时特性的控制允许用于分辨率选择性。在这些实施方式中,反射器间隔可以小于初始标距长度,使得获得第一空间分辨率,但通过然后将标距长度减小以与反射器的更小节距(pitch)匹配,则获得第二提高分辨率。因此,提供反射器的更密集空间分布允许来自同一光纤的选择性空间分辨率。在优选实施方式中,反射器以标距长度的一半(即,光纤DAS的期望空间分辨率的一半)隔开。

[0048] 鉴于上述内容且假定以下事实:分布式声传感器可以与之前描述的分布式声传感器相同,在下面给出的实施方式的详细描述中,如WO2010/136810中描述的分布式声传感器被描述用于关于图1至图12的完整性,然后开始进行由本发明的实施方式提供的光纤以及所述实施方式的分布式声传感器系统可以如何进一步被改编以适于使用所描述的光纤作为感测光纤以获得提高的灵敏度和空间分辨率加强的进一步描述。

具体实施方式

[0049] 图1示出了用于测量光信号的光振幅、相位以及频率的干涉仪的第一实施方式,总体在100处描绘。来自光源(未示出)的进入光优选地在光放大器101处被放大且发送到滤光器102。滤光器102过滤放大器101的带外放大自发发射噪声(ASE)。光然后进入到连接到3×3光耦合器104的光环行器103。光的一部分被引导到光电探测器112以监测输入光的光强度。光的另一部分沿着第一光路径105和第二光路径106被引导,两个光路径之间存在路径

长度差(109)。因此,路径长度差将延迟引入到干涉仪的一个臂105中,使得在该臂105中在任意一次被反射回用于干涉的光来自沿着光纤比在另一个臂106中可用于干涉的光更近的点。干涉仪的臂之间的该长度差涉及(但不完全等于)所获得的空间分辨率,并且在这里被称为标距长度。在干涉仪臂的端部处的法拉第旋转镜(FRM)107和108分别借助第一路径105和第二路径106将光反射回去。法拉第旋转镜沿着光路径105和106提供自极化补偿,使得从FRM反射的两部分光在每个 3×3 耦合器104端口处高效地干涉。光耦合器104将0度、+120度以及-120度的相对相移引入到干涉信号中,使得产生第一、第二以及第三干涉信号分量,每个分量处于不同相对相位。

[0050] 第一和第二干涉信号分量由光耦合器引导到光电探测器113和114,该光电探测器113和114测量相应干涉信号分量的强度。

[0051] 环行器103借助耦合器104的同一端口提供用于输入光和返回(第三)干涉信号分量的高效路径。入射在光环行器103上的干涉信号分量朝向光电探测器115被引导以测量干涉信号分量的强度。

[0052] 如下面参照图7和图9更详细描述的,组合光电探测器113、114以及115的输出,以测量进入光的相对相位。

[0053] 可选地,移频器110和111和/或光调制器109可以沿着路径105和106用于外差信号处理。另外,110和111的频移可以分别从f1、f2变为f2、f1,以减少传播穿过光路径105和106的光的两部分之间的任意频率依赖效应。

[0054] 上述实施方式提供一种适于光场的扰动的快速定量测量的设备,特别是可以用于具有满足应用(诸如声感测)要求的高灵敏度和快速响应时间的分布式复用传感器。

[0055] 图7示出了图1的干涉仪到来自光学系统700的光信号的分布式感测的应用。将明显的是,虽然在分布式感测的背景中描述了本申请,但本申请还可以例如通过从耦合到光纤的一个或更多个点传感器接收所反射光来用于点感测。

[0056] 在该实施方式700中,由脉冲信号702调制由激光器701发出的光。光放大器705用于增强脉冲激光,在此之后带通滤波器706滤除放大器的ASE噪声。然后向光环行器707发送光信号。可以在环行器707的一个端口处使用另外滤光器708。光被发送到感测光纤712,该感测光纤例如为部署在期望监测声扰动的环境中的单模光纤或多模光纤。光纤的长度可以为独立的,并且例如在“安静”位置中用作参考段710。参考段710可以形成在反射器或分束器与反射器709和711的组合之间。

[0057] 沿着感测光纤712生成的反射和反向散射光被引导穿过环行器707且到达干涉仪713。早前参照图1描述了干涉仪713的详细操作。在这种情况下,使用快速低噪光电探测器112、113、114以及115将光转换成电信号。电信号被数字化,然后使用快速处理器单元714(如下面将描述的)计算沿着参考光纤710和感测光纤712的相对光相位调制。处理器单元与脉冲信号702时间同步。路径105与路径106之间的路径长度差(109)定义空间分辨率。光电探测器输出可以针对跨给定空间分辨率的多个样本被数字化。组合多个样本,以由组合光电探测器输出的加权平均算法提高信号可视性和灵敏度。

[0058] 可以期望的是稍微改变光的光频率,以提高反向散射或反射信号的灵敏度。光调制器703可以由大约10–40GHz的微波频率来驱动,以生成光载波调制边带。滤光器708可以用于选择相对于载波偏移的调制边带。通过改变调制频率,可以快速调制所选光频率。

[0059] 数据处理

[0060] 图9示意性地表示从光电探测器113、114、115的输出确定光相位角的方法1100。路径105与路径106之间的路径长度差定义系统空间分辨率。光电探测器输出可以针对跨给定空间分辨率的多个样本被数字化(即,对强度值进行过采样)。组合多个样本,以由组合光电探测器输出的加权平均算法提高信号可视性和灵敏度。

[0061] 在步骤1102处组合来自光电探测器113、114、115的三个强度测量 I_1 、 I_2 、 I_3 ,以计算来自感测光纤的反射或反向散射光的相对相位和振幅。在每个采样点处计算(步骤1104)相对相位,并且该方法采用过采样,使得比系统的所需空间分辨率所要求的更多数据点可用。

[0062] 用于从干涉信号的三个相移分量来计算相对相位和振幅的方法从文献已知。例如,Zhiqiang Zhao等人在"Improved Demodulation Scheme for Fiber Optic Interferometers Using an Asymmetric 3x3Coupler"中,J.Lightwave Technology,5Vol.13,No.11,1997年9月,pp.2059–2068以及US 5946429描述了用于在连续波复用应用中解调3×3耦合器的输出的技术。所述技术可以应用于本实施方式的时间序列数据。

[0063] 对于每个采样点,在步骤1106处针对每个脉冲根据方程(1)从来自光电探测器113、114、115的三个强度测量 I_1 、 I_2 、 I_3 计算可见度因数。

[0064] 方程(1) $V = (I_1 - I_2)^2 + (I_2 - I_3)^2 + (I_3 - I_1)^2$ 。

[0065] 在低可见度点处,各个相移处的强度值类似,因此V的值较低。根据V特征化采样点允许确定(步骤1108)相位角的加权平均值,朝向具有良好可见性的采样点对相位角的加权平均值进行加权。该方法提高相位角数据1110的质量。

[0066] 可选地,可见性因数V还可以用于调节(步骤1112)用于最大信号灵敏度位置的光的数字采样的定时。这种实施方式包括具有动态变化时钟周期(这里可以被称为"iclock")的数字化器。动态变化时钟可以用于调节用于最大信号灵敏度的位置的光电探测器输出处的数字化样本的定时和/或远离光信号衰落发生的位置偏移。

[0067] 相位角数据对由感测光纤经历的声扰动敏感。当声波穿过光纤时,声波使得玻璃结构收缩和膨胀。这改变从光纤中的两个位置反射的反向散射光(即,在干涉仪中的两个路径中向下传播的光)之间的光路径长度,该光路径长度在干涉仪中被测量作为相对相位变化。这样,可以在1114处处理光相位角数据,以测量生成光的点处的声信号。

[0068] 在本发明的优选实施方式中,数据处理方法1100使用专用处理器(诸如现场可编程门阵列)来执行。

[0069] 传感器校准

[0070] 对于精确相位测量,重要的是测量光电探测器113、114以及115的偏置信号和相对增益。这些可以由参照图10描述的方法1200来测量并校正。

[0071] 每个光电探测器具有光电探测器的电偏移(即,在没有光入射在光电探测器上时光电探测器的电压输出(该输出可以被称为"零光等级"偏移))。作为第一步骤(在1202处),切断来自光纤和光放大器101的进入光。当切断时,光放大器101充当高效衰减器,这允许没有大量光到达光电探测器。在这种条件下测量(步骤1204)光电探测器的输出,以确定形成用于校准的基本等级的电偏移。

[0072] 在当切断输入光的同时接通光放大器101(步骤1206)之后,可以在步骤1208处测量光电探测器的相对增益。表现为相干光源的带内自发发射(即,落在带通滤波器102的带

内的放大自发发射)然后可以用于确定标准化和偏移校正(步骤1210),以校准干涉仪臂之间的耦合效率与光电探测器113、114以及115的跨阻抗增益的组合。该信号还可以用于测量由带内自发发射引起的信号偏移。

[0073] 方便地,为干涉仪的组件的光放大器用作不要求辅助源的相干光源。源的非相干性对避免光电探测器处的干涉效应是必要的(即,光的相干长度应短于干涉仪的光路径长度)。然而,为了精确校准,优选的是使源的频带靠近来自光源的光的频率或以来自光源的光的频率为中心。因此,选择带通滤波器102来从放大自发发射滤除具有在期望带宽外部的频率的光。

[0074] 当在脉冲系统中使用(诸如在分布式传感器中使用)时,上述方法可以在来自光源的光脉冲之间使用,以在来自对测量处理实质没有干扰的光源的每个(或所选)脉冲之前在使用期间有效地校准系统。

[0075] 对上述实施方式的变化在本发明的范围内,并且下面描述一些另选实施方式。图2示出了与图1所示的干涉仪类似的但代替光电探测器112具有另外法拉第旋转镜201的新型干涉仪的另一个实施方式,如总体在200处描绘的。相同组件由相同参考标号来指示。在这种情况下,可能具有不同路径长度的不同路径之间的干涉可以以三个拍频 f_1 、 f_2 以及 (f_2-f_1) 分离。该实施方式的布置具有提供操作的另外灵活性的优点,例如,不同外差频率可以提供以不同空间分辨率生成测量结果的不同操作模式。

[0076] 图3示出了类似于图1的结构的新型干涉仪的另一个实施方式,总体在300处描绘,同样的组件由同样的附图标记来指示。然而,该实施方式使用 4×4 耦合器314和另外光路径301、移频器304、相位调制器303、法拉第旋转镜302以及另外光电探测器308。在这种情况下,可能具有不同路径长度差的不同路径之间的干涉可以以三个拍频 (f_2-f_1) 、 (f_3-f_2) 以及 (f_3-f_1) 分离。另选地,法拉第旋转镜302可以用隔离器或光纤匹配端来代替,使得没有光被反射穿过路径301,因此仅允许路径105与106之间的干涉。

[0077] 该布置的 4×4 光耦合器以-90度、0度、90度、180度的相对相移生成四个干涉信号分量。

[0078] 图4示出了干涉仪的另一个实施方式。在这种情况下,通过代替光电探测器112插入法拉第旋转镜402在干涉仪中引入另外路径。

[0079] 在所有上述实施方式中,光开关可以用于改变和/或选择穿过干涉仪的光路径长度的不同组合。这促进不同空间分辨率测量结果(对应于光路径长度的所选路径长度差)之间的切换。

[0080] 图5和图6示出了干涉仪系统500、600的示例,干涉仪系统被布置用于以级联或星形构造使用,以允许测量不同路径长度差的相对光相位。在图5中,串联组合具有不同路径长度差(因此具有不同空间分辨率)的三个干涉仪501、502、503。在图6中,具有不同路径长度差(因此具有不同空间分辨率)的四个干涉仪602、603、604以及605与干涉仪602、603、604并联组合,并且与干涉仪603和605串联组合。在图6中,601是用于在干涉仪之间分光的 3×3 耦合器。布置600还可以与波分复用组件组合来提供不同光波长的并行输出。

[0081] 上述实施方式涉及用于沿着光纤的长度传输、反射和/或散射的光场的声扰动的快速定量测量的设备和方法。本发明的实施方式可以以其它方式(例如,监测由激光器生成的光信号和/或监测外差信号生成器的性能以及生成用于发送到光信号中的光脉冲)来应

用或实现。参照图8描述示例。

[0082] 图8示出了总体在800处描绘的系统，该系统包括根据本发明的实施方式的干涉仪801，该干涉仪801用于生成相对于彼此具有一频移的两个光脉冲。干涉仪经由光环行器103从激光器701接收输入脉冲。 3×3 光耦合器104将输入脉冲的分量引导到光电探测器，并且将分量引导到干涉仪的臂。臂中的一个包括频移器110和RF信号805。两个脉冲之间的干涉由解调器802来监测。使用延迟803在耦合器809处组合由法拉第旋转镜107和108反射的光，以匹配干涉仪的路径长度，使得频移脉冲和输入脉冲叠加。耦合器809将相对相移引入到干涉信号，因此干涉仪以相对相移监测三个外差频率信号分量。光环行器103将两个脉冲传递到感测光纤中。

[0083] 在该实施方式中，反射和反向散射光根据本发明不由干涉仪来检测。而是，反射和反向散射光被传递穿过光放大器804和滤光器806，然后被发送到快速低噪光电探测器807。以本领域中已知的方式，通过以不同相位角混合RF信号805来拆分电信号且然后将电信号下转换为基带信号。数字化电信号，并且通过使用快速处理器808组合数字化信号来计算光纤的每段处的相对光相位调制。

[0084] 图11示出了用于点传感器以及分布式传感器的设备的另一个实施方式。在这种情况下，光调制器703的调制频率704在光脉冲调制包络内从f1切换至f2。

[0085] 滤光器708选择如图12中指示的由光调制器生成的两个调制频率边带1202/1203和1204/1205。第一级边带1202和1203之间的频移与频率调制差(f_2-f_1)成比例，而第二级边带1204与1205之间的频移与 $2(f_2-f_1)$ 成比例。因此，光电探测器输出806生成两个差拍信号，两个信号中的一个以 (f_2-f_1) 为中心，并且另一个以 $2(f_2-f_1)$ 为中心。使用解调器901，可以独立地测量差拍信号的相对光相位。可以组合两个独立测量结果，以提高沿着感测光纤的信号可见性、灵敏度以及动态范围。

[0086] 图12A示出了光的调制光谱和上面提及的边带的选择。

[0087] 图12B示出了在频率 f_0 下具有脉冲宽度T的初始激光脉冲1206，其分别在时段T1、T2以及T3期间以频率f1、f2以及f3被调制。还可以改变T1、T2以及T3之间的延迟。用滤光器708选择一个或更多个调制边带，以生成被发送到光纤中的频移光脉冲。来自光纤的反射和/或反向散射信号(709、710、711以及712)经由环行器707被引导到光电探测器。来自不同脉冲的反射和/或反向散射光在光电探测器输出处混合在一起，以生成外差信号(诸如 (f_2-f_1) 、 (f_3-f_1) 、 (f_3-f_2) 、 $2(f_2-f_1)$ 、 $2(f_3-f_1)$ 以及 $2(f_3-f_2)$)。还生成其它外差信号，但 $(2f_2-f_1)$ 、 $(2f_3-f_1)$ 、 $(2f_1-f_2)$ 、 $(2f_1-f_3)$ 、 $(2f_3-f_1)$ 以及 $(2f_3-f_2)$ 还以远远更高的频率来生成。外差信号被下转换为基带同相正交信号。同相正交信号由快速模数转换器被数字化，并且使用快速数字信号处理器计算相位角。

[0088] 如所注释的，上述实施方式对应于在之前的第W02010/136810号国际专利申请中公布的实施方式，并且涉及形成本发明的实施方式的基础的光纤分布式声传感器的各种版本。如之前在上面概述章节中说明的，本发明的实施方式使用之前公开的布置中的任一个来显著提高由此获得的整个光纤感测系统的灵敏度，该之前公开的布置具有修改的光纤，该光纤沿着其长度包括特定反射点，这些反射点根据DAS的预期空间分辨率(严格地说为标距长度)隔开，并且之前公开的布置还可选地具有一些另外信号处理增强。接着给出进一步详情。

[0089] 光纤分布式声传感器(DAS)的性能对于大多数应用受系统的声信噪比(SNR)限制。改善声SNR例如可以导致以其它方式不可测量的流、地震以及泄露信号的量化。DAS的声SNR转而取决于DAS光SNR,该DAS光SNR是光信号的振幅与关联检测噪声的关系。通过使从光纤返回的光信号量最大化来优化光SNR(因此声SNR)。

[0090] 返回的光信号可以使用若干技术(包括使用更短波长的源光(更短波长散射更多)和使用具有大散射系数或大俘获角的光纤)来最大化。这里,我们描述使用在光纤中的预定位置处引入的反射点的技术。这些反射点应具有部分反射镜的功能,理想地,它们应反射跨相对大带宽(例如,具有 $>2\text{nm}$ 的量级)的少量光(通常少于0.1%),并且透射(transmit)剩余光。即使具有这种小反射率,反射光的振幅仍然将多于在相同空间间隔内比自然反向散射光的数量级更大的数量级。因此,反射器的使用具有超过其它技术的优点(诸如使用更高散射系数,这是因为从传输损失的所有光朝向DAS被反射回去,而不是沿所有方向散射)。

[0091] 除了增大光信号之外,反射点的使用给出DAS噪声特性的另一个显著益处。这是因为在使用标准光纤时,DAS通常经受 $1/f$ 噪声,这意味着用于低频(特别是低于10Hz)的声噪声显著高于更高频率的噪声。 $1/f$ 噪声的存在对反向散射特性的随机性质很重要,并且控制低频测量结果的DAS性能,低频测量结果构成DAS应用的主要部分。然而,当使用反射点时,反射特性固定,而不是随机的,并且这具有将 $1/f$ 噪声降低至不可测量等级的效果。受控散射还在空间和时间这两者上导致均匀本底噪声,而随机散射固有地产生通常在距离上快速变化且在时间上缓慢变化的本底噪声特性。另外,固定反射特性导致比使用反向散射实现的更稳定测量声振幅。

[0092] 在理想实施方式中,沿着光纤的每个反射点将为弱镜子(即,反射点将以恒定反射系数均匀地反射光的所有波长)。通常,反射系数将大约为0.01%(这大约比每米光纤反向散射多 $100\times$ 更多的光),这意味着每个镜子反射入射光的0.01%并透射入射光的99.99%。然而,反射系数的范围根据设计考虑将为可接受的(例如,在从0.002%至0.1%的范围内)。通常,更小反射系数将导致更少反射光,因此导致更小性能提高,但将允许更大理论范围,而更高反射系数将反射更多光,因此提供更大信噪比,但可能影响沿着光纤的感测范围,特别是对于反射点更紧密在一起的更精细空间分辨率。在使用0.01%的反射系数的情况下,然后由于每个反射点处的低损耗,实际在不引入显著光损耗的情况下将许多100s的这种弱镜子插入到光纤中。例如,1000个反射点将引入仅0.4dB的过剩损耗(等于2km标准光纤的损耗)。

[0093] 反射点通常以与DAS的空间分辨率(“标距长度”)相同距离隔开。这意味着如果DAS空间感测分辨率为10m,则1000个反射点可以用于组成10km的总感测长度。在一些实施方式中,DAS不需要修改来使得其可以与包含反射点的光纤兼容(从概念上讲,DAS把新光纤看作与标准光纤相同)(虽然具有更高散射系数)。然而,在其它实施方式中,DAS信号处理可以通过使用以下事实被优化用于与该光纤一起使用:现在每对反射点之间的所有感测位置测量同一信号。这意味着例如,我们可以测量反射点之间的许多位置,然后对来自这些位置的信号求平均,以提高SNR。

[0094] 另外,增大的信噪比可以用于在仍然维持可接受噪声性能的同时显著提高DAS的空间分辨率。例如,然而,使用反向散射的DAS要求大约1m的标距长度来实现对于大多数应用的可接受SNR,使用反射器,可接受SNR可以用大约5cm的标距长度来实现。空间分辨率的

这种提高允许超声信号的精确测量和例如与短长度尺度关联的特征(诸如管中的涡流)的跟踪。必须使用具有窄检测带宽的相位相关布置来实现足够的信噪性能。在长范围应用(诸如泄漏检测、管线以及海底)中也可以存在优点。

[0095] 另一个特征是测量由于低至少于 $m^{\circ}K$ 和多达几赫兹的流体流动而引起的沿着管的一部分的非常小温度变化。高分辨率温度测量可以用于通过观测湍流热能的交换的传播来测量流体流动。

[0096] 注意,因为DAS构造对于对标准光纤或具有反射点的光纤的测量相同,所以可以执行混合测量,其中,DAS同时对两个光纤类型进行测量。这里,例如,反射点可以被定位在需要更多灵敏度的策略位置处(例如,以测量流动),而未被修改的光纤的剩余部分用于需要更多覆盖和更少灵敏度的测量(诸如地震)。

[0097] 虽然如上面注释的,理想反射点将为具有恒定反射系数的弱镜子(即,它将均匀地反射所有波长的光),但形成反射点的最合适当前技术是光纤Bragg光栅(FBG)。FBG通常被设计为滤光器或设计为光栅的峰值反射波长用于确定光栅间隔且因此确定FBG的张力或温度的感测元件。FBG可以使用飞秒激光写入处理被写入到光纤中。特别地,FBG现在可以在拉动光纤且在涂布光纤之前直接被写入到光纤中,这使得产生具有1000个FBG的光纤在经济和技术上是可行的。另外,FBG可以通过使用飞秒激光写入处理改变其折射率来嵌入到光纤中或在光纤拉动期间由UV激光写入。

[0098] 商业FBG的一个缺点是它们通常被设计为使峰值反射最大化,并且选择性地反射特定波长(该波长可能随着温度或张力而变化)。在本实施方式中,另一方面,我们想要相反特性(宽波长围内的低级反射),使得当FBG的温度变化时(例如当电缆向下部署在油井下面)恒定地反射我们的激光。

[0099] 为了解决我们到目前为止已经测试的原型实施方式中的该问题,通过在每个反射点处使用五个交叠(波长)FBG来处理峰值反射波长随着温度的变化。该示例中的每个FBG的长度大约为1mm,在FBG之间具有10mm的间隔,这意味着每个反射点的总长度大约为45mm。总反射带宽为大约 $+/-2nm$ 。但发现,该构造不理想。这是因为要求保证在整个带宽上得到反射的光栅交叠(波长)导致当DAS激光在交叠范围内时每个反射点处的FBG之间的干涉(参见图14)。由于该原因,在其它实施方式中,我们建议将FBG设计变为下面之一:

[0100] 1. 单个带宽光栅。通常,宽带光栅也为弱光栅,该光栅在期望弱反射和大透射的该应用中良好。通常,用于该应用的最佳FBG是行业通常将认为是“不良光栅”的光栅,这是因为研究适合朝向使带宽变窄并增大反射率。与之相比,我们的理想光栅可以提供弱宽带反射率,并且使用飞秒激光写入技术写入到光纤中。

[0101] 2.“啁啾”光栅。这具有沿着光栅的长度的变化反射波长。这允许宽带反射率,而没有我们经历的干涉问题。在这种情况下,再次弱反射是跨反射带宽所要求的所有内容。

[0102] 串扰

[0103] 反射点的使用引入由于反射点之间的多个反射引起的串扰。该多个路径将导致为光信号的一部分的位置的歧义(串扰)。我们的建模提议假如反射点的反射率的总和不超过 $\sim 10\%$,则这将不是我们的目标应用的主要问题。例如,该条件允许均具有0.01%的反射率的1000个反射点的等同物。

[0104] 如果需要,则新型架构可以用于例如通过使用成角光栅(诸如图15所示)或通过使

用耦合器和镜子的组合(诸如图16所示)来减轻串扰。更详细地,图15例示了跨光纤延伸的成角光栅1510的使用。光栅包括成直角弯管段1530,该弯管段被布置为使得它经由来自光栅的两个大体90度反射接收从第一方向沿着光纤传递的光,并且沿相反方向将光反射回去。即,来自第一方向的光入射在弯管的“内部”边缘,使得它然后沿它来的方向反射回去。

[0105] 相反,从与第一方向相反的第二方向沿着光纤传递的光入射在弯管的“外部”边缘上,使得它然后以与其初始方向成90度反射离开外边缘,然后散射出光纤。这种布置通过防止不同附近光栅之间的多个反射来减轻串扰。

[0106] 降低串扰的另一种技术是随着距离增大反射率。因为较近的标志物对串扰贡献最大,所以这起作用。这种布置还具有以下优点:反射性轮廓可以被选择以补偿光纤中的损耗,因此沿着光纤长度给出相等SNR。

[0107] 图16例示了耦合器组件用于将光的一小部分耦合到另一个光纤(其然后耦合到镜子)的另选布置。这里,优选地,镜子为完全100%反射的,并且耦合器的耦合系数被控制为仅朝向镜子耦合少量(例如,如上面讨论的0.01%或某一这样的值)的入射光,使得获得如上所述期望的相同整体弱反射。

[0108] 图17和图18数字地例示了本发明的实施方式的概念。在图17的A中,考虑现有技术的典型DAS场景。这里,因为仅少量散射光($\Theta = 10^{-3}$)沿着光纤回来且实际上可以经常使用甚至更小数量($\Theta = 10^{-4}$),所以DAS限制是散射光损耗。相比之下,在诸如图17的B所示的典型时间域干涉式复用设置中(且从Kersey等人的Cross talk in a fiber-optic sensor array with ring reflectors, Optics Letters, Vol 14, No. 1, 1989年1月1日取得),直到光子的三分之一可以用于测量目的。

[0109] 因此,为了增加可用于这里考虑类型的DAS中的感测目的的沿着光纤返回的光量,如上面讨论的,考虑图17的C所示的中间设置,其中,反向散射通过在沿着光纤的点处故意放置弱宽带反射器来增强。如这里建模的,如之前讨论的,反射器是光纤Bragg光栅(FBG)。为了递送小于1%的串扰,沿着光纤的整个长度的总反射率优选地应小于10% ($RN < 0.1$),并且凭借这种约束,可以由具有10m时段的光栅覆盖3km光纤。如早前讨论的,这种系统然后可以递送多于比当前DAS系统好10倍的散粒噪声。

[0110] 再次考虑串扰的问题,用于之前DAS布置(被示出为图18的A的方程组)的串扰估计基于反向反射光的不相干添加来给出乐观结果,当在100至1000倍之间时,可以相对于理想Rayleigh反向散射($NR \sim 100\Theta$,其中 $\Theta = 10^{-3}$ 是散射的立体角)在声测量中涉及更多光子。相反,如果我们假设所有光为相干的且应添加光场而不是强度,那么结果是非常悲观的(参见图18的B)。在这种情况下,诸如在同上的Kersey论文中描述的一组低对比Fabry-Perot干涉仪在 $NR \sim \Theta$ (对于相同串扰1%)时不比反向散射更有效。图18的C处呈现了Kersey调查结果;结果是中间 $NR \sim 10\Theta$ 仅适度优于Rayleigh。该结果可以为这种简单声天线在25年来为何在水诊器时域复用中不流行的说明。然而,近10倍的SNR提高可以用真实系统来潜在地实现,记住真实DAS可见性和损耗。

[0111] 图19例示了在具有4个光栅的光纤模型上测试概念的结果,该4个光栅具有反射率0.001%,隔开10m,在短脉冲(10ns)照射下清楚可见(参见图19的A)。至于使用10m分辨率DAS,我们还看到延迟标距长度(DAS中的干涉仪的臂105与106之间的路径长度差,该标距长

度设置DAS的初始空间分辨率)的另外反射,所以干涉在3个低对比Fabry-Perot干涉仪内部。如在用1m采样测量的瀑布图(中间图)上可见的,声信号仅应用于它们中的2个。这里,可以看到,声信号每30个时间样本重复应用,或者因此以沿着光纤的50m至70m之间的距离应用。如从图19的B清楚的,更长光脉冲(70ns)可以生成更多信号。频谱中的红色水平线对应于声调制区域(即,应用声信号的区域);到位于70m至80m之间的第三干涉仪的光串扰可忽略。

[0112] 最后,对仅比反向散射等级($R=0.0001\%$)大10倍的小反射建模(参见图19的C)。然而,部分因为良好的可见性,DAS信号提高甚至多于3倍(如可以从散粒噪声期望的)。建模结果确认SNR提高甚至可以多于10倍。

[0113] 在感测光纤中使用有规律隔开的反射器的一个感兴趣优点是:通过选择合适光脉冲参数(并且特别是脉冲宽度)结合干涉仪相对于反射器间隔的标距长度,可以同时获得多分辨率分布式声测量结果。图20和图21更详细地例示了该布置。

[0114] 在图20中,假定我们具有光纤(该光纤具有每10m隔开的反射器),反射器例如可以在上述实施方式中描述的光栅。这些在图20上被示出为反射器202、204以及206。反射器在光纤的期望经受双分辨率感测的至少一部分中有规律地隔开。当然,在一些实施方式中,这可以沿着光纤的整个长度。在其它实施方式中,光纤的不同段可以具有以各个不同间隔隔开的反射器,使得从各个不同段获得不同空间分辨率。

[0115] 现在,给出这种光纤,如果我们控制DAS系统产生要发送到光纤中的光脉冲,使得脉冲宽度小于反射器间隔,但DAS系统的标距长度(即,DAS感测干涉仪713的臂105与107之间的路径长度差109)大于反射器间隔,那么当脉冲沿着光纤行进时,将存在以下情况:在该情况期间,来自干涉仪的臂105和107中的脉冲的相应反射光来自连续的反射器,在这种情况下,在该时间期间,获得等于反射器间隔的感测分辨率。接着将存在以下情况:仅在干涉仪臂中的一个中存在反射光,并且另一个臂中没有反射光(由于它们之间的延迟),在这种情况下,没有输出信号被获得,并且在此之后,然后将存在当干涉仪臂105和107中的相应反射光来自第一反射器且不来自下一个反射器而是来自沿着光纤紧挨着下一个反射器的反射器(即,沿着2个反射器间隔)时的情况,在这种情况下,此时,感测分辨率为反射器间隔的两倍。因此,凭借这种操作,获得双空间分辨率,该双空间分辨率在第一空间分辨率与第二双倍分辨率之间交替。图20更详细地例示了该概念。

[0116] 为了方便起见,在图20中,示出了沿着光纤向下行进的一对脉冲,光纤设置有隔开10m的反射器202、204以及206。为了方便描述,这里描述的一对脉冲对应于从DAS沿着光纤发送的实际脉冲210,并且在接收干涉仪布置的情况下,对应于被延迟干涉仪的标距长度的虚拟延迟脉冲212。当然,如上所述,虚拟延迟脉冲212实际上从未沿着光纤行进,而是作为实际脉冲210在干涉仪713的臂105中的反射的延迟版本被生成。然而,为了描述方便以例示本实施方式的操作,虚拟延迟脉冲可以被同样地认为沿着光纤在实际脉冲之后虚拟地行进,与其间隔标距长度,并且在下文中采用该模型。然而,应注意,实际上延迟脉冲仅曾经以在干涉仪的臂105中延迟时从实际脉冲沿着光纤的反射光的形式存在,因此沿着光纤行进的脉冲212是仅为了描述方便而提供的虚拟脉冲。

[0117] 考虑到上述内容,在该示例中,脉冲具有7.5m的相应长度,并且脉冲间隔(对应于标距长度)(即,从下降(或上升)缘到下降(或上升)缘)为15m;因此,在主要脉冲的下降缘与

随后虚拟脉冲的上升缘之间存在7.5m的间隙。脉冲之间且涉及它们长度的这些定时在脉冲沿着光纤行进时被保持。

[0118] 在时间A时,主要(leading)实际脉冲210被定位为使得它仍然在反射器204上传递,使得脉冲中的一些在脉冲经过反射器时沿着光纤反射回去。与之相比,后面的虚拟脉冲212仅入射在反射器202上,因此仅将要开始沿着光纤反射回其光中的一些(实际上当然,如上面注释的,被认为从虚拟脉冲反射的光为在干涉仪中经受标距长度延迟的来自实际脉冲的实际更早的反射光)。由此,在时间A与B之间,在一小部分虚拟脉冲212从反射器202被反射的同时,从反射器204反射一小部分实际脉冲210。来自两个脉冲的该反射光然后沿着光纤回去,然后例如可以通过在DAS干涉仪中一起被干涉而在DAS中被处理,以便允许找到具有等于反射器202与204之间的距离(即,一个反射器间隔,在这种情况下为10m)的分辨率的DAS信号。因此,在时间A与B之间,获得具有10m的空间分辨率(即,一个反射器间隔)的DAS输出。

[0119] 现在考虑从B至C的时段。在时间B时,主要实际脉冲210不再在反射器204上,而是在反射器204与反射器206之间。因此,不存在来自该脉冲的反射。后面的虚拟脉冲212仍然“传递”通过点B处的反射器202,因此从该反射器反射一些光,但因为没有来自实际脉冲210的光在DAS中干涉,所以此时没有信号被产生。该情况继续,直到时间C为止,在该点处,主要实际脉冲210然后开始传递通过下一个反射器206。此时,后面的虚拟脉冲212仍然“传递”通过反射器202,该反射器202位于离反射器206两个反射器间隔处。因此,光从两个脉冲沿着光纤被反射回去,但这次是从彼此之间的距离是之前距离的两倍的反射器反射回去。因此,来自两个反射点的光可用于在DAS干涉仪中被干涉(或以其它方式在DAS中被处理),以获得输出信号,但这次因为感测点之间的距离加倍,所以DAS输出信号的空间分辨率也被加倍(或减半,这取决于术语)以为反射点间隔的两倍(在该示例中为20m)。

[0120] 该20m感测分辨率然后从时间C到时间D获得,在该时间段期间,主要实际脉冲210传递通过反射器206,并且后面的虚拟脉冲212传递通过反射器202。因此,在时间C至D期间,获得20m(或反射器间隔两倍)的感测分辨率输出。在时间D,后面的虚拟脉冲212完成传递通过反射器202,因此从时间D开始,没有信号被获得,直到后面的虚拟脉冲212入射在下一个反射器204(未示出)上为止。在该时间点,主要实际脉冲210将仍然传输通过反射器206,因此除了沿着光纤的下一对反射器(即,204和206,而不是202和204),适于与时间A时示出的相同情况。因此,该处理对于沿着光纤的连续每对反射器重复。

[0121] 因此,凭借上述内容,获得的是感测分辨率在实际脉冲沿着感测光纤行进时在一个反射器间隔与两个反射器间隔之间交替的双分辨率DAS。这是重要结果,因为DAS系统经受被称为天线效应的效应,由于如果沿着光纤轴线行进的入射声波长等于标距长度,则没有信号被获得;光纤跨标距长度经历相等量的张力和压缩,因此没有有意义的信号被测量。然而,凭借通过使用有规律隔开的反射器和根据其进行的脉冲宽度和标距长度的仔细选择提供的自动双分辨率布置,可以至少以更长分辨率取消天线效应,因为还将自动进行以更小分辨率的测量。

[0122] 图21连同一些模拟结果再次例示了双灵敏度布置。图21的A处示出了原理,其中,光脉冲及其跨L0延迟的虚拟回声沿着光纤行进,它们因此覆盖隔开距离L~2/3L0的反射器之间的一个或两个区域。换言之,DAS的灵敏度基础(base)在脉冲沿着光纤行进时沿着光纤

从L变为2L且再次返回。该选项通过凭借用于不同声波长的75ns脉冲($\sim 7.5\text{m}$ 脉冲宽度)和1m采样对于 $L_0=15\text{m}$ 进行建模来演示,如果波长(Λ)为60m(因此它显著长于L和 L_0 ,参见图21的B),那么DAS输出模式(图21的C)跟随它,但一些空间区域具有两倍振幅,还参见图21的D上示出的光谱。

[0123] 图21的E-G呈现了用于波长等于反射器距离L两倍(即, $\Lambda=2L=20\text{m}$)的情况的另外结果。在这种情况下,对应于2L灵敏度基础的区域示出没有信号,这是由于上面提及的天线效应。这强调概念的优点:对于长声波长(即, $\Lambda \gg 2L$ 的情况),2L长灵敏度基础可以用于提高SNR,但对于短波长(即, $\Lambda \sim 2L$ 的情况),短基础长度L演示更佳SNR。

[0124] 最后图片(图21的H-J)演示了用于波长在双灵敏度之间(即,在10m至20m之间)的情况的DAS输出。通常,因此其中, $L < \Lambda < 2L$ 。这里,信噪比(SNR)仍然适度,但特殊处理对于将输出模式变换为对应于输入的形状是必要的(比较图21的H和I)。图23呈现了用于这种变换的一个算法。这里,通道A的2D向量被分成对应于L和2L的区域(以给出B和C),然后分别过滤(如果必要的话,包括去卷积)每个区域,以对应地产生 B_f 和 C_f 。然后通过组合 B_f 和 C_f 以给出包含具有最佳SNR的全平光谱的 $A_f=B_f+C_f$ 来产生最后结果。

[0125] 现在将关于图22的A至C描述另外实施方式。这里,图22的A和C再次示出了上述实施方式:沿着隔开距离 $L=L_0$ 的反射器行进的光脉冲(及其被示出为淡灰色矩形的跨 L_0 延迟的虚拟回声)。这种情况下的脉冲宽度应稍小于反射器间隔,例如对于 $L=1.5\text{m}$ 为10ns($\sim 1.0\text{m}$)。

[0126] 现在参见图22的B,考虑标距长度(L_0)现在被选择为反射器间隔的大于1的倍数的该设置的变更,其中, $L_0=3L$ 。在这种情况下,仅所例示的反射器(即,脉冲目前传输通过的反射器)产生反射信号,因此影响输出信号,因此声天线长度然后可以从对应于反射器之间的距离的不同倍数的长度范围来选择,以优化输出。即,标距长度可以被选择为选择多少反射器在脉冲对之间,因此DAS的空间分辨率可以使用具有固定组反射点的光纤来控制。

[0127] 该选项由通过凭借用于 $L=1.5\text{m}$ 的反射器之间的间隔和声波长 $\Lambda=7\text{m}$ 的10ns脉冲和1m采样对于 $L_0=4.5\text{m}$ DAS建模来演示,在这种情况下发现比脉冲间隔(从下降缘到下降缘)等于反射器之间的间隔的情况、间隔较小(例如, $\sim 1.5\text{m}$)和较大(例如, $\sim 9\text{m}$)的情况更佳的SNR,请比较图22的E与图22的D或22的F,并且看到获得更清楚的图像。

[0128] 关于选择空间分辨率,如上面提及的,这通过选择脉冲宽度和虚拟脉冲间隔(标距长度)特性来执行,使得脉冲宽度和脉冲间隔的总和包含期望数量的反射器,以给出所需的分辨率。由此,例如,从图22的B可以看到,通过增大虚拟脉冲间隔(或标距长度) L_0 以便包含更大或更小数量的反射器,然后可以获得更大或更小的空间分辨率。因此,该另外实施方式给出在不要求另外硬件的情况下改变DAS系统空间分辨率的非常方便方式,并且允许分辨率的快速脉冲到脉冲变化。

[0129] 现在将关于图24至图34描述各种修改和添加,以便提供本发明的另外实施方式。

[0130] 图24例示了可以对上述实施方式中的任一个进行的一种修改。这里,示出了反射器1320不需要沿着光纤1310自始至终设置,而是可以仅在特定段中设置,然后未设置反射器的光纤的另外段在其间。可以设置一个或多个光纤段,每个光纤段具有在内部沿着光纤分布的多个反射器。这些段然后可以散置在其中没有反射器的传统长度的光纤之间。这种布置的优点是可以仅通过在光纤的位于实际上期望感测的位置处的那些部分中设置反射

器来增大光纤分布式感测系统的范围。未设置反射器的那些位置之间的光纤的长度然后有效地变成用于在设置有反射器的感测部分之间输送光脉冲的相对低损耗传输部分。实际上,光纤可以被特征化为在反射器沿着光纤分布的一个或更多个感测部分之间具有未设置反射器的脉冲传输部分。

[0131] 另外,凭借这种结果,可以通过使用iDAS测量光栅区域之间的反向散射来进行分布式声测量。这种布置可以使用沿着检测路径的快速开关和衰减器以及iDAS中的多个干涉仪用于具有不同空间分辨率的段来实现。

[0132] 图25例示了上述内容的另外变体。这里,设置光纤的三个感测部分2510、2520以及2530,每个感测部分设置有多个反射器1320。光纤的感测部分分散在沿着整个光纤的不同纵向位置处,并且由其中未设置反射器的光纤的传输部分连接,因此传输部分对于从感测部分到感测部分承载光脉冲是相对低损耗的。在图25的布置中,每个感测部分2510、2520以及2530具有反射不同的大体非交叠波长的光的反射器。即,第一感测部分2510中的反射器反射大约 $a\mu m$ 的光,第二感测部分2520的反射器反射大约 $b\mu m$ 的光,并且第三感测部分2530的反射器反射大约 $c\mu m$ 的光。在反射器不反射的波长处,入射光在大体没有另外损耗的情况下由反射器透射。

[0133] 凭借这种布置,光纤分布式传感器系统能够通过改变所传输脉冲的波长以匹配要选择的一组反射器的反射器波长来提供在它希望从在哪一空间位置的哪一组反射器接收反射(从而使得能够在该位置处感测)方面的空间选择性。因此,改变波长提供感测系统将感测的位置的空间选择性,具体为,哪一组反射器将提供然后可以经受感测的反射。

[0134] 另外,因为未选择反射器在对于所选组反射器沿着光纤传输的脉冲的波长处大体不反射,所以保持来自不想要反射的损耗最小,并且增大传感器范围。

[0135] 图26例示了可以进行以提供本发明的另外实施方式的另外修改。这里,光纤1310再次连接到光纤分布式传感器系统(未示出),并且设置在其至少一个感测部分中(或另选地全部沿着其长度),具有反射率沿着光纤的长度不同的反射器部分。具体地,在图26所示的一个实施方式中,反射器部分的反射率沿着光纤的长度随着与光纤感测系统中的光脉冲源的距离增大,使得更远离源的反射器部分具有比更靠近源的反射器部分更大的反射率。

[0136] 反射率在一些实施方式中根据沿着光纤的距离的数学函数来确定地增大。例如,数学函数可以为使沿着光纤的距离与反射率有关的单调函数。

[0137] 用于改变沿着光纤的反射器的反射率的一个主要动机是说明反射器之间的串扰。串扰由经受离开多个反射器的反射的不想要光导致,同时返回仅经受一个反射的兴趣信号。然而,想要的光功率强度将与R(单个反射器的反射率)成比例,串扰信号(如果我们忽略光损耗且假定针对所有反射器的相等反射率)将与 $N \times R^3$ 近似成比例,其中,N为允许串扰光与信号光与信号光共同到达检测器的光路径的数量。

[0138] 串扰可以通过减小N和R这两者来最小化;然而,有用光信号可以通过增大R来最大化,并且空间分辨率可以通过增加反射器的数量(因此增大N)来优化。由此,必须借助N和R的适当选择来针对特定目标应用找到串扰、空间分辨率以及信噪比(该信噪比受光信号等级管理)之间的折衷。

[0139] 注意,N(并且从而信号所经历的串扰量)沿着光纤长度增大。例如,对于第一对反射器没有串扰,这是因为不存在允许串扰光与信号光共同地到达的有效串扰光路径。类似

地,来自朝向光纤的起点生成的声信号的串扰的贡献大于朝向光纤的终点的同一信号等级的贡献。这是因为朝向光纤的起点比朝向终点存在包含反射器的远远更多有效串扰光路径。例如,离开光纤中的最后一个反射器的反射没有可以帮助串扰的有效路径,而离开第一个反射器的反射可以通过反射来自任意其它反射器的光来帮助串扰。

[0140] 这意味着如果声信号等级沿着光纤恒定且如果反射器的反射率也恒定,则串扰的影响沿着光纤长度增加,并且撞击在光纤近端上的声信号比撞击在光纤远端上的声信号更有助于串扰。

[0141] 为了解决该问题,响应于该特性优化性能的简洁方法是改变沿着光纤长度的反射器的反射率。在这种情况下,更近的反射器(其更有助于串扰)被选择为具有比远反射器更低的反射率。这样,可以根据希望使光纤的串扰响应均衡或以其它方式调谐该串扰响应。这种类型的反射率配置数据(profile)也是有利的,这是因为:反射率可以被调谐为也补偿光纤中的光损耗(并且借助任何连接器/接头或沿着光路径的其它损耗),因此沿着光纤使信噪性能均衡或以其它方式调谐该性能,而且调谐串扰。

[0142] 另外,来自沿着具有低重要性的大声信号(例如,油井安装中的大表面噪声)的光路径的区域的串扰贡献可以通过选择沿着该段的低反射率反射器(或没有反射器)来取消。

[0143] 在一些应用中,感兴趣的信号朝向安装的远端(例如,油井底部处的穿孔段)。在这种情况下,来自安装的近端(可能非常嘈杂的油井的顶部)的串扰贡献可以通过将光纤部署为“U”布置来最小化,其中,反射器可以被定位在主要光纤的远端,然后可以继续到返回光纤的顶部。在这种情况下,激光沿着没有反射器的光纤支线向下发射,使得所遇到的第一个反射器在井的底部。这保证良好的串扰行为,这是因为井底部处的兴趣区域首先被定位在光路径中,因此遭遇最小串扰。而且,在井的顶部的喧闹段被定位在光纤的终点,因此不向大多数光路径(包括特定兴趣区域)贡献串扰。

[0144] 图27例示了在光纤的包层中而不是在芯中形成反射器部分的一种方式。这里,代替形成在光纤本身的芯中的光栅,它们形成在包层中,并且经由波导2710耦合到芯。在使用时,沿着芯传播的光耦合到波导2710中且被馈送到光栅1320,然后从该光栅沿着光纤反射回去。

[0145] 图29例示了与适应DAS的脉冲重复率有关的另外实施方式。如之前在本发明的实施方式中描述的,如上所述,DAS通过沿着光纤发送光脉冲且然后测量来自沿着光纤定位的反射器部分的反射器来操作。我们在上面描述了如何仅在光纤的位于期望感测的位置的单个部分中设置反射器。图29示出了这种布置的简化形式,其中,在光纤的单个感测部分处设置单组反射器,感测部分与DAS之间的光纤的剩余部分实质上没有传感器。

[0146] 凭借这种布置,通常如果期望沿着光纤的整个长度感测,那么一次一个脉冲将被传输到光纤,脉冲之间的时间至少等于脉冲沿着光纤的速度加上沿着光纤的长度反向散射的返回时间。当然,给出光在光纤中的速度,这仍然允许非常高的脉冲重复率,因此允许高采样频率(通常高达100kHz)。

[0147] 然而,如果期望仅沿着光纤的更小感测部分(诸如设置有反射器的感测部分)感测,那么重要的脉冲渡越时间是使脉冲仅经过感测部分的渡越时间加上沿着感测部分的长度反向散射的渡越时间。如果脉冲渡越时间为 T_r ,那么用于反向散射最小脉冲间隔的允许时间为 $2T_r$ 加上脉冲之间的一些小保护时间 g (其可以例如为 T_r 的10%)。然后,脉冲重复率

可以增大至 $1/(2Tr+g)$ ，根据感测部分与整个光纤长度相比的相对长度，该脉冲重复率将显著高于提供整个长度的光纤感测所需的脉冲重复率。因此，可以增大DAS的采样频率，以便允许DAS检测更高的频率。

[0148] 通常，可以将DAS的脉冲重复率增大等于光纤的传输部分与感测部分的比率的因数。因此，例如，如果感测部分仅沿着光纤长度的四分之一设置，那么脉冲重复率可以被增大倒数量(即，因数四)。

[0149] 图30示出了另外布置，在该布置中，两个DAS系统被复用到单个光纤上，并且光纤在两个可区分的感测部分(第一部分中的反射器之间的间隔大于第二部分中的反射器之间的间隔)上设置有反射器。第一部分中的反射器被布置为反射第一波长 $a\mu m$ ，并且第二部分中的反射器被布置为反射第二波长 $b\mu m$ 。如图所示，在该示例中，第一部分中的反射器被隔开 $10m$ ，并且第二部分中的反射器被更紧密地隔开，以给出为 $1m$ 的更高空间感测分辨率。

[0150] 两个DAS系统(DAS1和DAS2)被设置为复用到单个感测光纤上。DAS1以第一波长 $a\mu m$ 操作，而DAS2以第二波长 $b\mu m$ 操作。将两个DAS系统设置为复用到同一光纤上允许同时多频率操作，在这种情况下，这由于两个感测部分中的不同反射器间隔提供同时多空间分辨率操作。因此，凭借这种布置，可以从同一光纤的不同部分同时获得多个感测分辨率。

[0151] 在上述内容的变体中，代替不同波长反射器被设置在光纤的不同部分中，它们在交叠部分中但以相同相应间隔沿着光纤的长度设置。然而，因为反射器被布置为以不同波长(分别为DAS1的第一波长和DAS2系统的第二波长)反射，所以不存在两个DAS系统的相应操作的干涉，然后沿着同一光纤的长度获得为两个分辨率的多空间分辨率感测。

[0152] 图31示出了多模光纤实施方式，其中，如图所示，反射器光栅设置在多模芯内。如本领域中已知的，多模光纤芯远远宽于单模光纤芯，但因为DAS系统内为单模系统，所以使反射器光栅定位在芯的中心来反射最低阶模式是足够的，该最低阶模式是通常被耦合到DAS中的模式。图28例示了另选版本，其中，代替光栅，弱反射直角反射结构形成在芯中。这种操作与在使用光栅时相同，但不同之处在于：反射结构为真实宽带的，并且将反射在光纤中传播的任何波长的入射光中的一些。

[0153] 图32和图33示出了本发明的多芯实施方式。使用多芯光纤揭示了用于从DAS或DTS系统发射的向前脉冲的“向前”通道和向前光可以被反射以便返回到DAS或DTS系统的“返回”通道的概念。具有单独向前通道和返回通道的优点是返回通道上将没有来自向前脉冲的反向散射，因此可以获得更高的信噪比。

[0154] 图32例示了具有多芯光纤的基本概念。这里，芯2为来自DAS或DTS系统的光脉冲被发射到的向前通道。设置协作成角的反射器3210和3220，针对芯1和芯2中的每个设置一个反射器，并且每个反射器与其相应芯成 45 度角，与彼此成 90 度角。这种布置意味着沿着由芯2提供的向前通道行进的光脉冲从反射器3210反射 90 度进入芯1中，并且由反射器3220进一步反射 90 度，以便沿着芯1朝向DAS或DTS系统沿相反返回方向返回行进。如上面注意的，因为芯1不承载向前脉冲，所以在芯1上没有不想要的反射或反向散射，仅被承载回DAS系统的光是芯1上的反射光。

[0155] 图33通过提供为芯1和芯3形式的两个返回芯来进一步扩展概念。提供两个(或更多个)返回芯通过在每个返回芯上提供不同反射器间隔揭示了多空间感测分辨率的方面。在所示示例中，如上所述的拐角反射器以间隔 $r1$ 设置在向前芯2与返回芯1之间，并且以间

隔 r_2 设置在向前芯2与返回芯3之间,其中, $r_2 > r_1$ 。凭借这种布置,向前芯2和返回芯1的组合被提供用于以与 r_1 有关的空间分辨率感测,并且向前芯2和返回芯3的组合提供用于以不同的更长空间分辨率 r_2 感测。

[0156] 在该实施方式的另外变体中,可以设置另外返回芯来提供用于甚至更多的空间分辨率,这些返回芯具有甚至更大或甚至更小间隔的反射器。而且,在一些实施方式中,对仅具有单个向前芯没有限制,并且根据芯的数量,可以存在多于一个向前芯,每个向前芯被多个返回芯包围,从返回芯到芯具有不同间隔的反射器。由此,可以同时使用多芯光纤测量许多不同的空间分辨率。

[0157] 图34-1和图33-2示出了本发明的另外实施方式。在图34-1中,如图所示,连续的反射器部分1320以交叠的特定相应反射带宽在沿着光纤反射不同波长 $a\mu\text{m}$ 和 $b\mu\text{m}$ 时交替。激光波长被选择为在交叠波长区域内,使得它被所有反射器部分1320反射,并且具体为远离以 a 微米反射的反射器的中心反射频率的波长距离 ϵ_z 微米,并且为远离以 b 微米反射的反射器的中心反射频率的波长距离 $\epsilon_{(z+1)}$ 。凭借这种布置,可以使用反射带来直接测量反射器的强度的变化,从而获得沿着光纤区域的静态张力的测量。

[0158] 图34-2通过给定反射器1320具有沿着光纤重复的在量级上为 a 微米、 c 微米以及 b 微米的三个相应反射波长来建立图34-1的布置。激光波长在 c 微米处,再次与 a 微米分离远离以 a 微米反射的反射器的中心反射频率的波长距离 ϵ_z 微米,并且再次远离以 b 微米反射的反射器的中心反射频率的波长距离 $\epsilon_{(z+1)}$ 。再次,凭借这种布置,可以使用反射带来直接测量反射器的强度的变化,从而获得沿着光纤区域的静态张力的测量。

[0159] 转到考虑反射器间隔,反射器之间的间隔在本发明的实施方式中不需要为有规律的,并且可变间隔是可以的。假设在干涉仪中存在来自实际脉冲和虚拟脉冲的反射之间的脉冲交叠,则间隔可以变化多达10%至20%。

[0160] 另外且如之前提及的,光栅间隔可以沿着光纤的长度变化(例如,沿着光纤离DAS越远,光栅之间的间隔可以越大)。而且,沿着光纤离DAS越远,光栅的反射率也可以增大。反射器的一个特别优选间隔是使间隔为DAS的标距长度的一半,标距长度为DAS中的干涉仪的不同臂之间的长度差(例如,所以对于10米标距长度,我们具有5m反射器间隔)。

[0161] 关于形成本发明的实施方式中的反射器的光栅的规范,如本领域中已知的,光栅可以在生产光纤时被写入到光纤中,或者也如本领域中已知的,在已经生产光纤之后被写入光纤中。每个反射器的反射强度可以在-30dB至-60dB之间,更优选地在-40dB至-50dB之间,甚至更优选地为大约-45dB。总反射器反射率总计可以在-10dB与-30dB之间。

[0162] 图35和图36是两个相应图表,这两个图表在反射器的数量、反射器的反射率以及反射带宽方面使反射器的规范进一步特殊化。具体地,查阅图35,可以看到,对于给定可接受等级的串扰,感测点的数量(即,反射器的数量)相反地与反射器的反射率有关,这是因为可以在反射器点的反射率更低时设置更多反射器点。而且,对于给定数量的反射器,那些反射器的反射率也与期望或可允许串扰有关,这是因为如果更高串扰可接受,那么可以使用更高反射率。由此,当指定用于特定应用的光纤时,首先可以基于光纤的感测长度(即,感测需要发生的长度)指定感测点的数量,并且指定转而限定反射器之间的间隔的期望空间分辨率。然后,(根据感测需要发生的光纤的期望长度和跨该长度的期望空间分辨率)确定所需的反射器的数量,然后可以指定可接受等级串扰,该串扰然后转而允许根据用曲线图表

示的函数确定反射器的反射率。

[0163] 另一个考虑是反射器的反射波长宽度,涉及反射器在什么波长上反射。图36例示了波长宽度为温度依赖的,这是因为光纤处的温度变化使得反射器光栅反射峰值波长变化。另外,为了除了处理温度变化之外还处理光纤上张力的变化,还可期望宽反射带宽。这是因为张力以及温度改变光栅反射器的中心波长。

[0164] 如将从图36看到的,期望波长宽度为操作温度依赖的,并且还取决于光纤的情况(例如,光纤是否附接到任何结构等)。具体地,期望波长宽度与操作温度范围成比例地有关,这是因为温度范围越大,所需的波长宽度越大。实际上,激光波长周围的相对宽带波长宽度是可期望的,以允许温度变化,而不管这种变化是否发生。因此,至少 $+/-2\text{nm}$ (或更优选地为至少 $+/-3\text{nm}$ 或更优选地为至少 $+/-4\text{nm}$,甚至更优选地为至少 $+/-5\text{nm}$)的线宽是可期望的。

[0165] 可以用作光纤的方便设计参数的一个参数优选是“NR”(其中,NR是标志物的数量(N)乘以沿着光纤的标志物的平均反射率(R))。为了获得良好的性能,给定减轻串扰并提供期望空间分辨率的一般目标,优选10%的最大NR。

[0166] 图37示出了通过使用多个光纤通道来解决串扰问题的另外实施方式。这些通道可以一起运行(例如,平行)的离散独立光纤,或者可以为单个多芯光纤,或者这两者的组合。不管光纤的构造如何,结果是提供多个光纤通道,该多个光纤通道在一端处复用在一起,并且连接到DAS,DAS是之前描述的DAS。独立光纤通道内设置有设置反射器的相应区域,独立光纤通道的剩余部分没有反射器,以减轻串扰和其它损耗。沿着平行光纤的长度的从光纤到光纤的各个区域的纵向定位使得区域基本上是纵向连续的,并且不纵向交叠,或仅非常部分地交叠。

[0167] 上述布置的结果是感测可以被提供为犹如单个光纤沿着光纤自始至终具有反射器,但具有比这种情况大大减轻的串扰。这是因为每个平行光纤通道实际上存在比单个光纤的情况少与独立光纤通道的数量有关的因数的反射器。例如,如图所示,在存在4个光纤通道的情况下,另外被要求均沿着单个光纤长度以期望空间分辨率提供感测的反射器的数量可以分成4组,每光纤一组,在各个连续组中沿着光纤纵向定位。这意味着每个独立光纤通道的反射器点的数量也降至该数量的四分之一,从上述图35看,这意味着对于给定期望水平的串扰,可以使用更高反射率,或者相反地,对于相同反射率,获得更低水平串扰。

[0168] 为了实现上述内容,应使用诸如图37的(b)或(c)所示的布置的布置。不幸的是,因为耦合器损耗意味着到达DAS系统的反射光保持相同,所以无法使用如图37的(a)所示的具有 $1\times N$ 耦合器的简单光分离。然而,耦合器损耗可以通过在每个光纤长度上使用双向应用(如图37的(B)所示,)或由独立平行光纤长度之间的快速光切换(如图37的(c)所示)来克服。具有 2ns 切换时间的快速集成光开关例如从诸如美国加利福尼亚州卡尔弗城的PhotonIC公司的公司可购得。

[0169] 上述实施方式已经集中于本发明到光纤分布式声传感器系统的应用。然而,这里所述的光纤还可以与光纤分布式温度传感器系统(诸如在<http://silixa.com/technology/ultima-dts/>处描述的Silixa®Ultima™DTS系统)一起使用。例如,现有技术Silixa®Ultima™DTS系统针对 10m 标距长度可以测量 0.3nm ,因此对于 10cm 标距长度,分辨率将为 30nm 。光纤温度系数为大约 $10-5/\text{°K/m}$ 。对于 10cm , $1\mu\text{m}/\text{°K}$ 或 $1\text{nm}/\text{°mK}$ 。然而,使用其中具

有如上所述的宽带弱反射器的感测光纤,我们可以提高 $\times 10$,因此对于10cm,我们应能够在10kHz下测量 3°mK 。平均到10Hz,性能然后应接近 0.1°mK 。

[0170] 总之,因此,本发明的实施方式提供一种改进的光纤分布式声传感器系统,该系统使用专门设计的光纤来提高系统的整体灵敏度,在一些实施方式中提高超过10的因素。这通过沿着光纤将弱宽带反射器周期性地插入到光纤中来实现。反射器仅反射来自DAS的光的沿着光纤返回到DAS上的一小部分,每反射器通常在0.001%至0.1%的范围内,但优选地为大约0.01%。另外,为了允许温度补偿保证在温度变化时获得相同的反射率,反射带宽为相对宽带的,即,在离标称激光波长 $+/-3\text{nm}$ 至 $+/-5\text{nm}$ 的范围内。在一些实施方式中,反射器由一系列光纤Bragg光栅形成,每个光纤Bragg光栅具有不同中心反射频率,光栅的反射频率和带宽被选择为提供宽带反射。在其它实施方式中,啁啾光栅也可以用于提供相同效果。在优选实施方式中,反射器以标距长度(即,光纤传感器系统的期望空间分辨率)的一半隔开。光纤分布式传感器系统可以为声传感器系统、振动传感器系统、温度传感器系统或扰动光纤的路径长度的任何其它感测参数中的任一个。

[0171] 可以对上面提及的实施方式进行各种另外修改(不管是添加、删除还是替换的方式),以提供另外实施方式,另外实施方式中的任一个和全部旨在由所附权利要求包括。

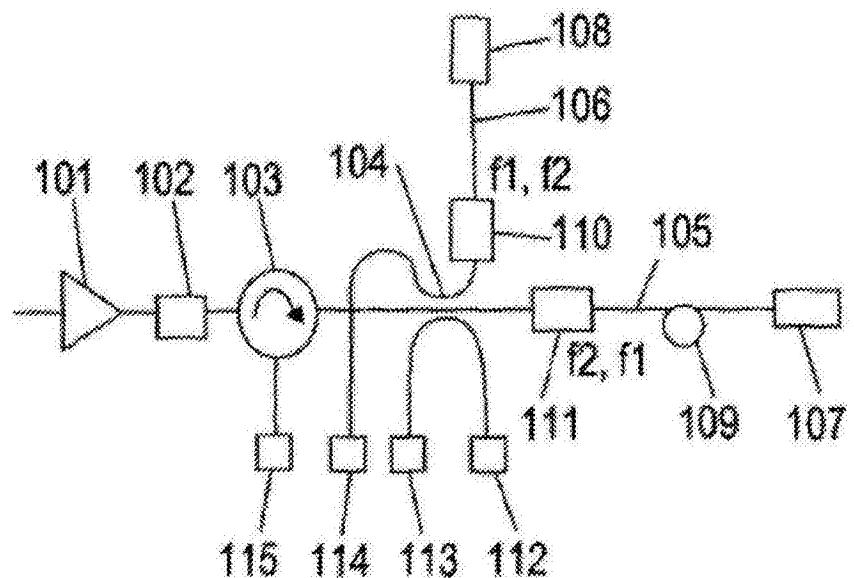


图1

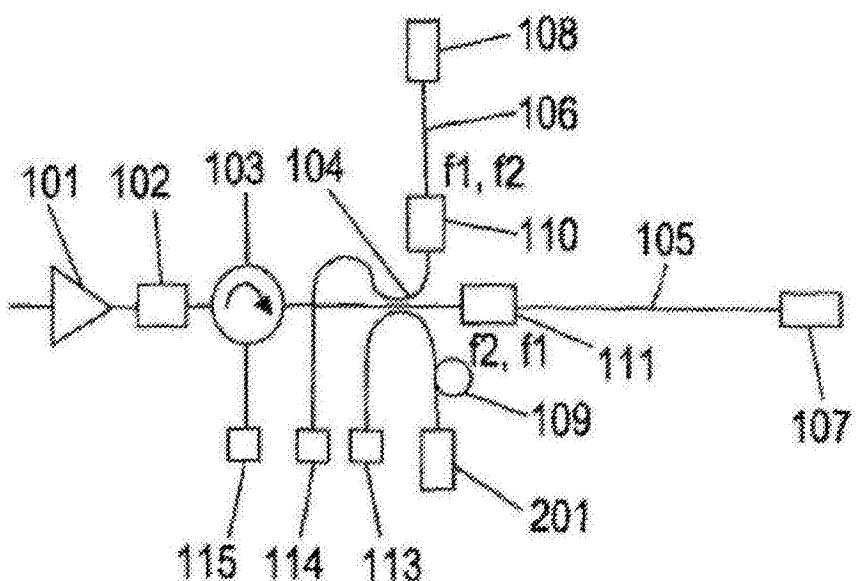


图2

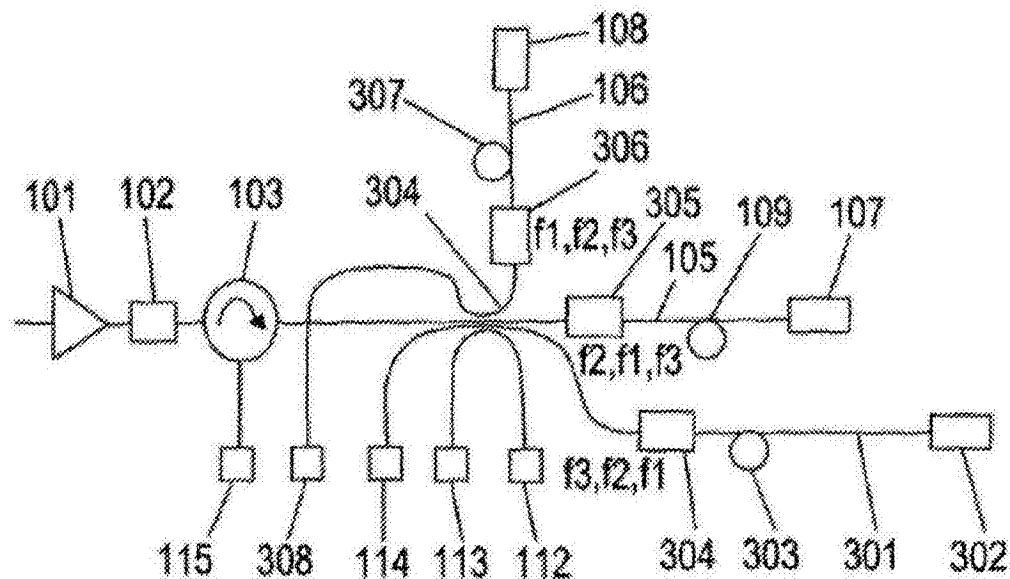


图3

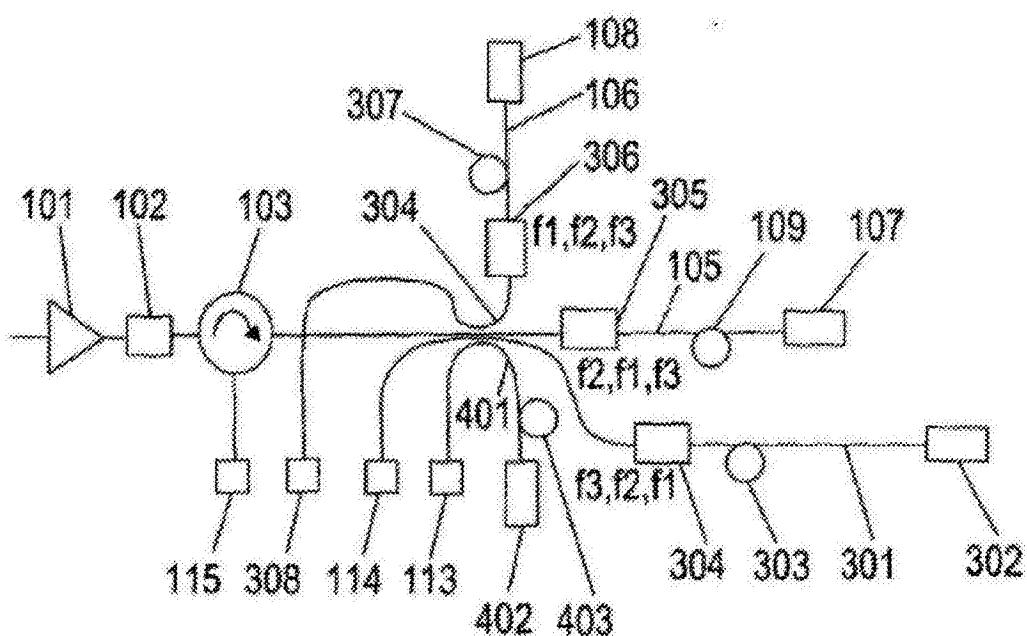


图4

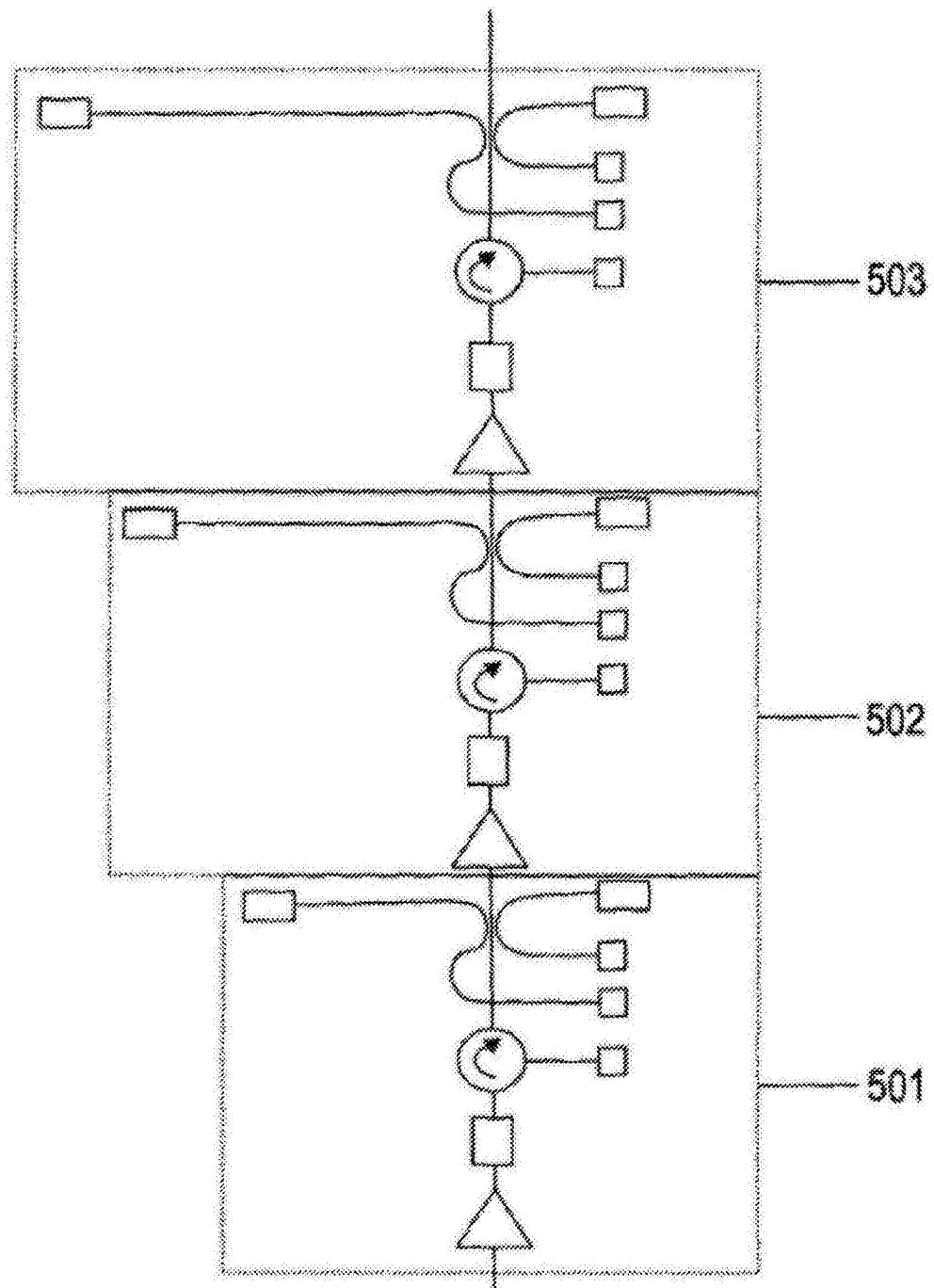


图5

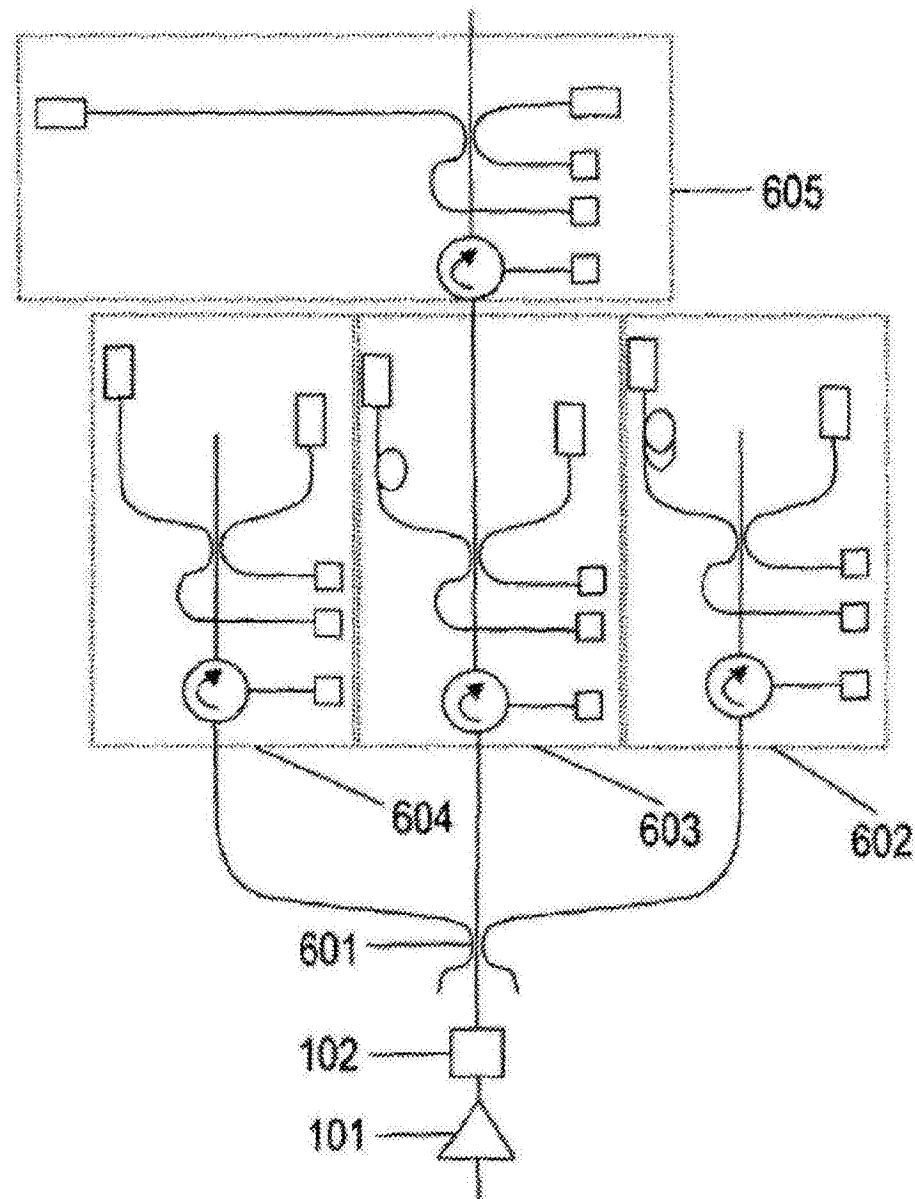


图6

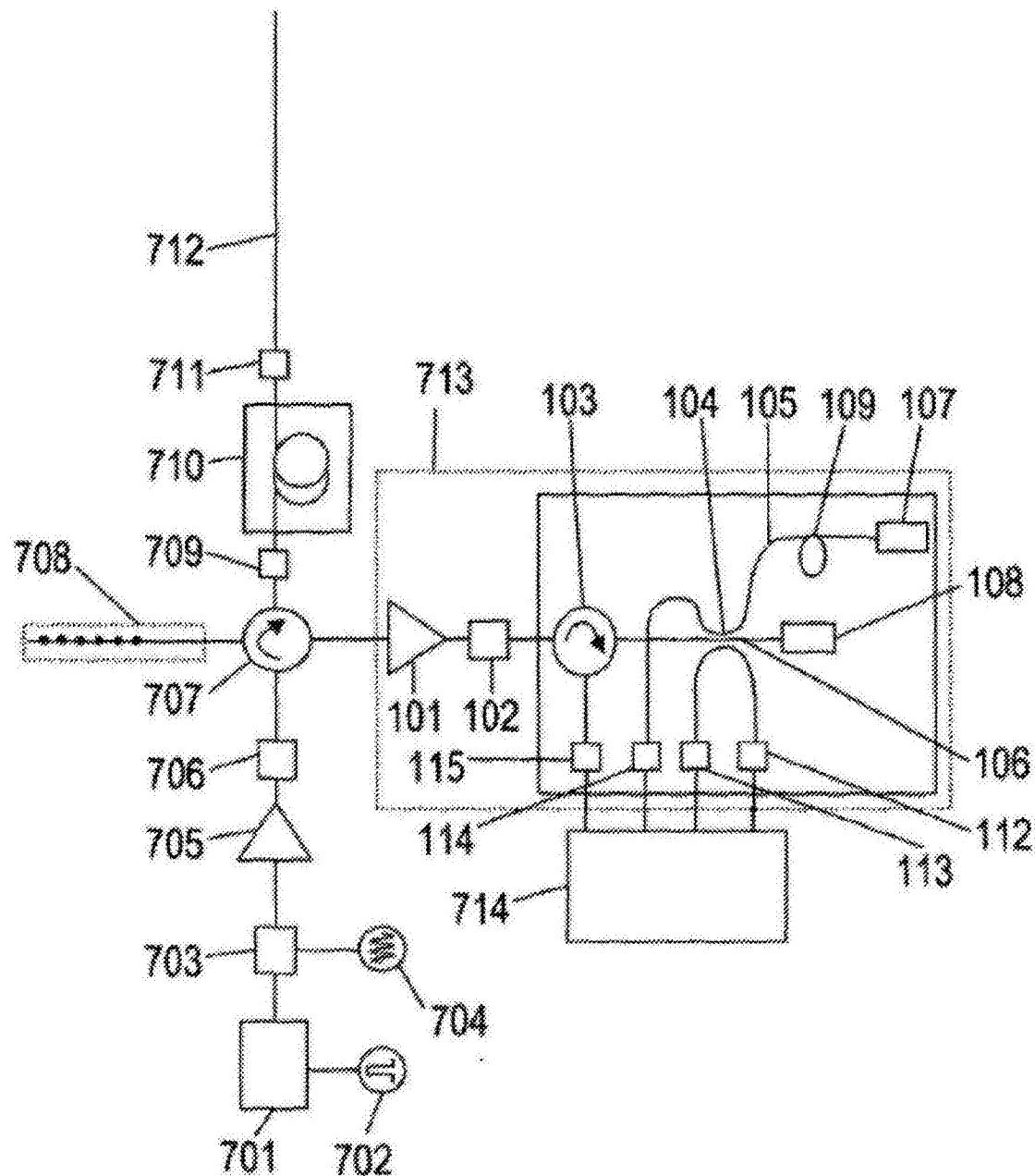


图7

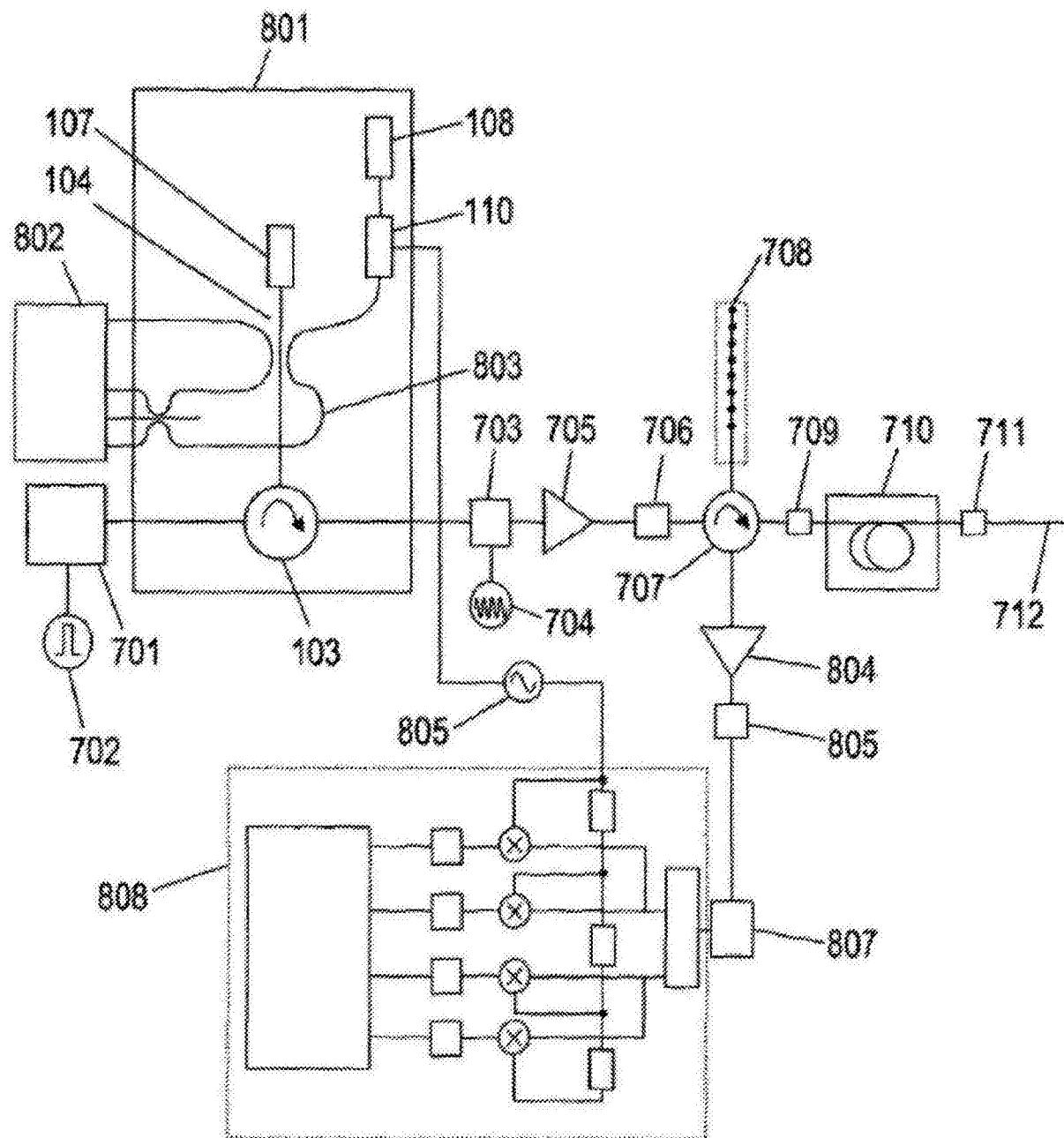


图8

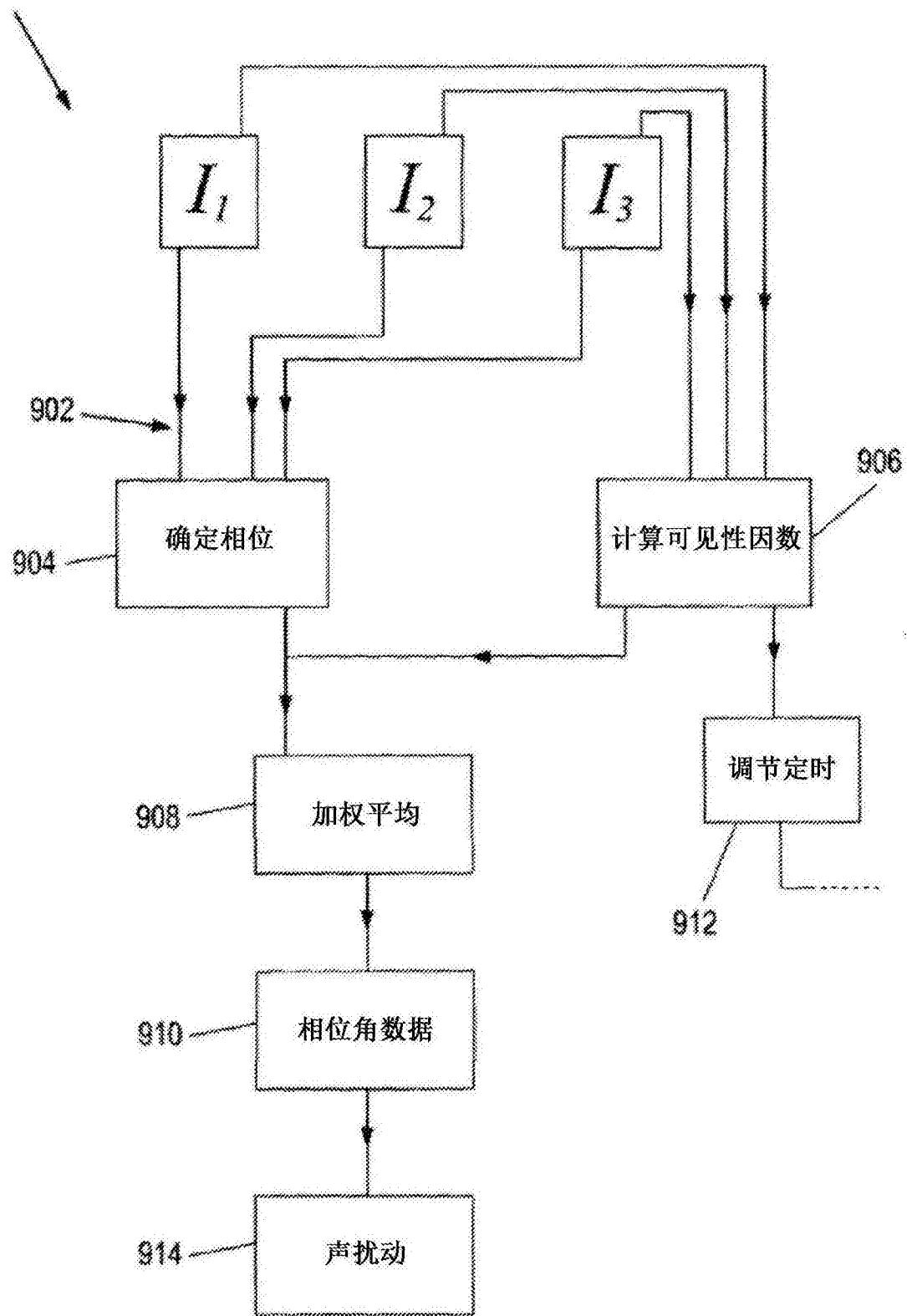


图9

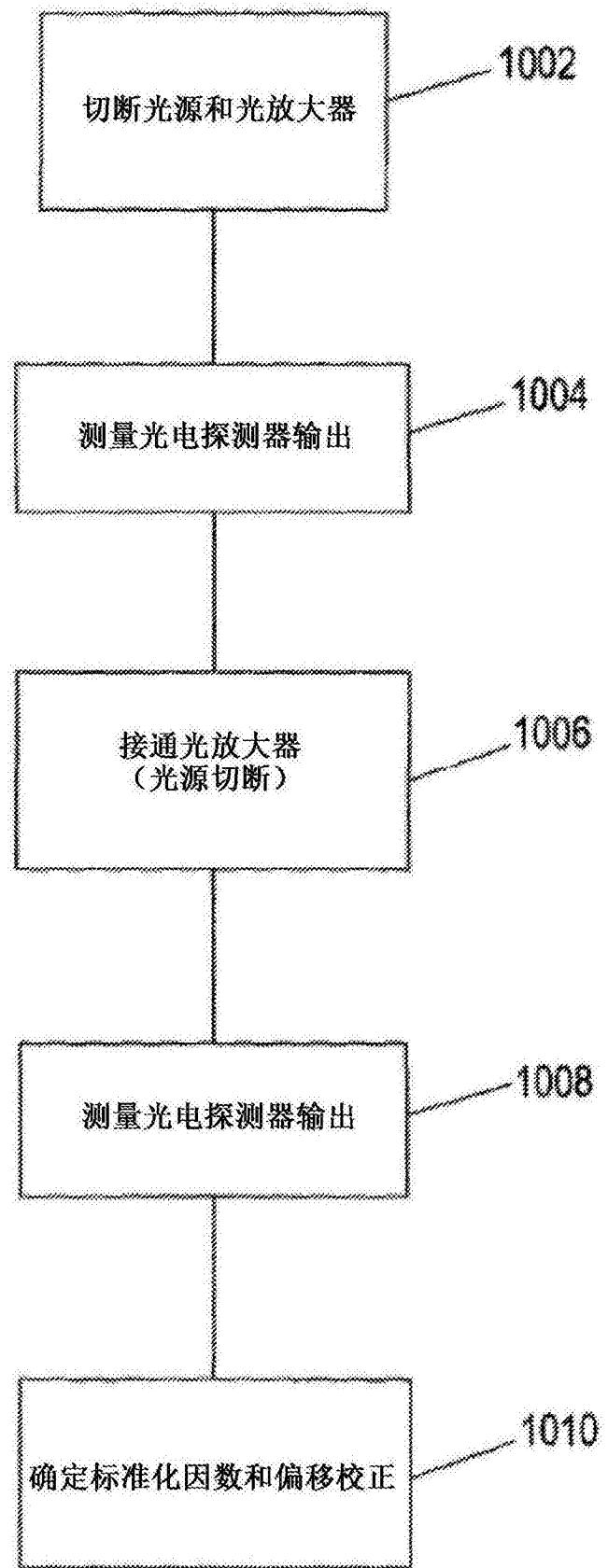


图10

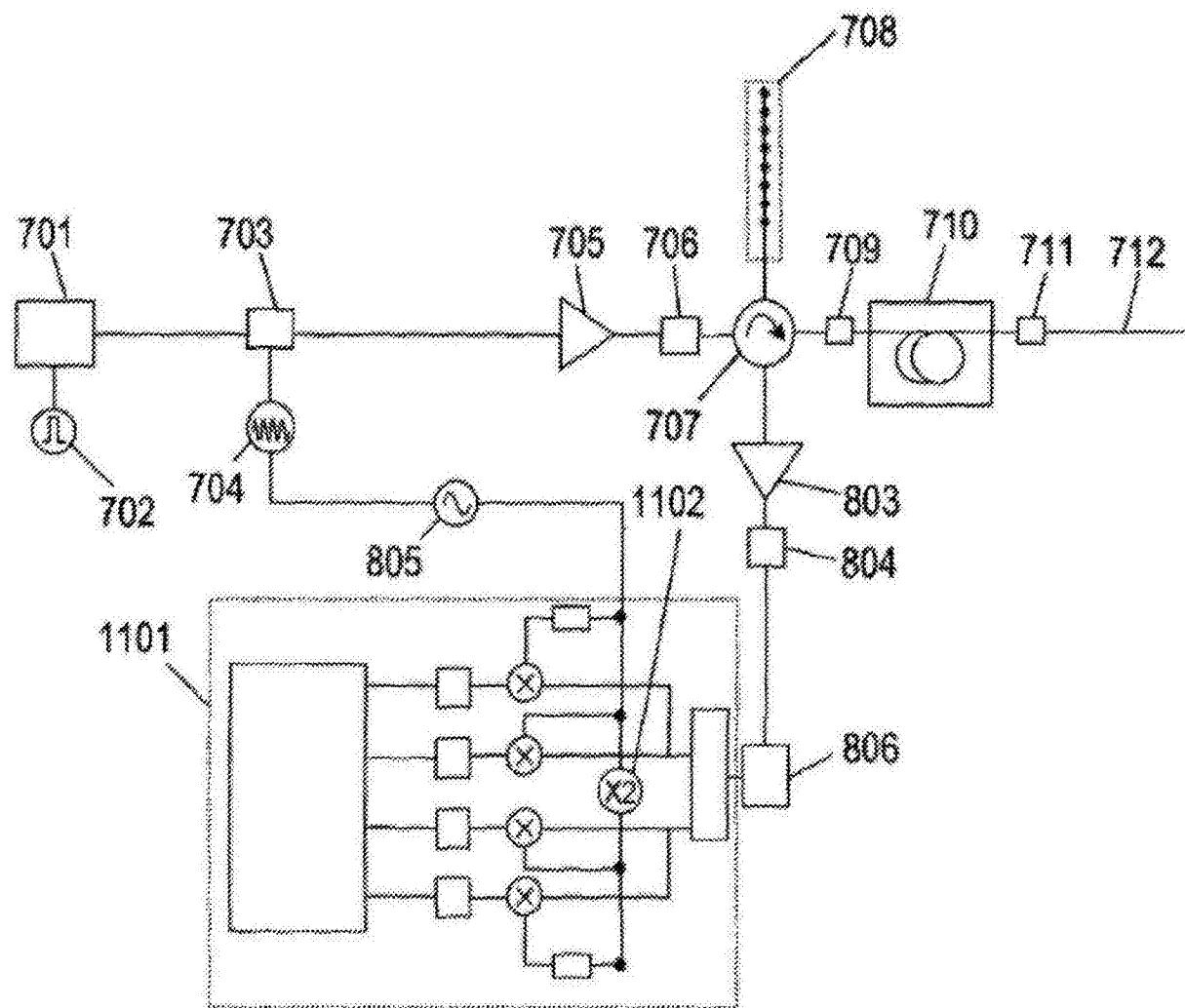


图11

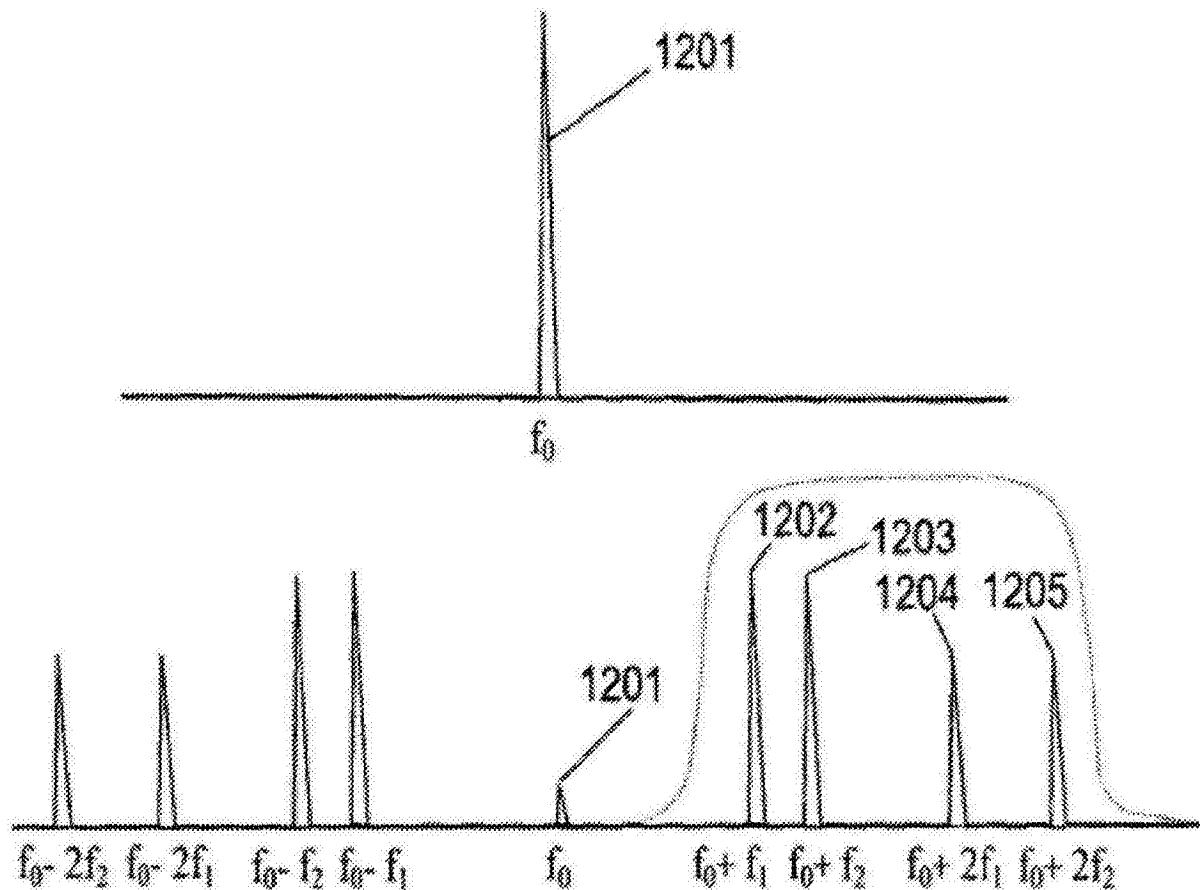


图12A

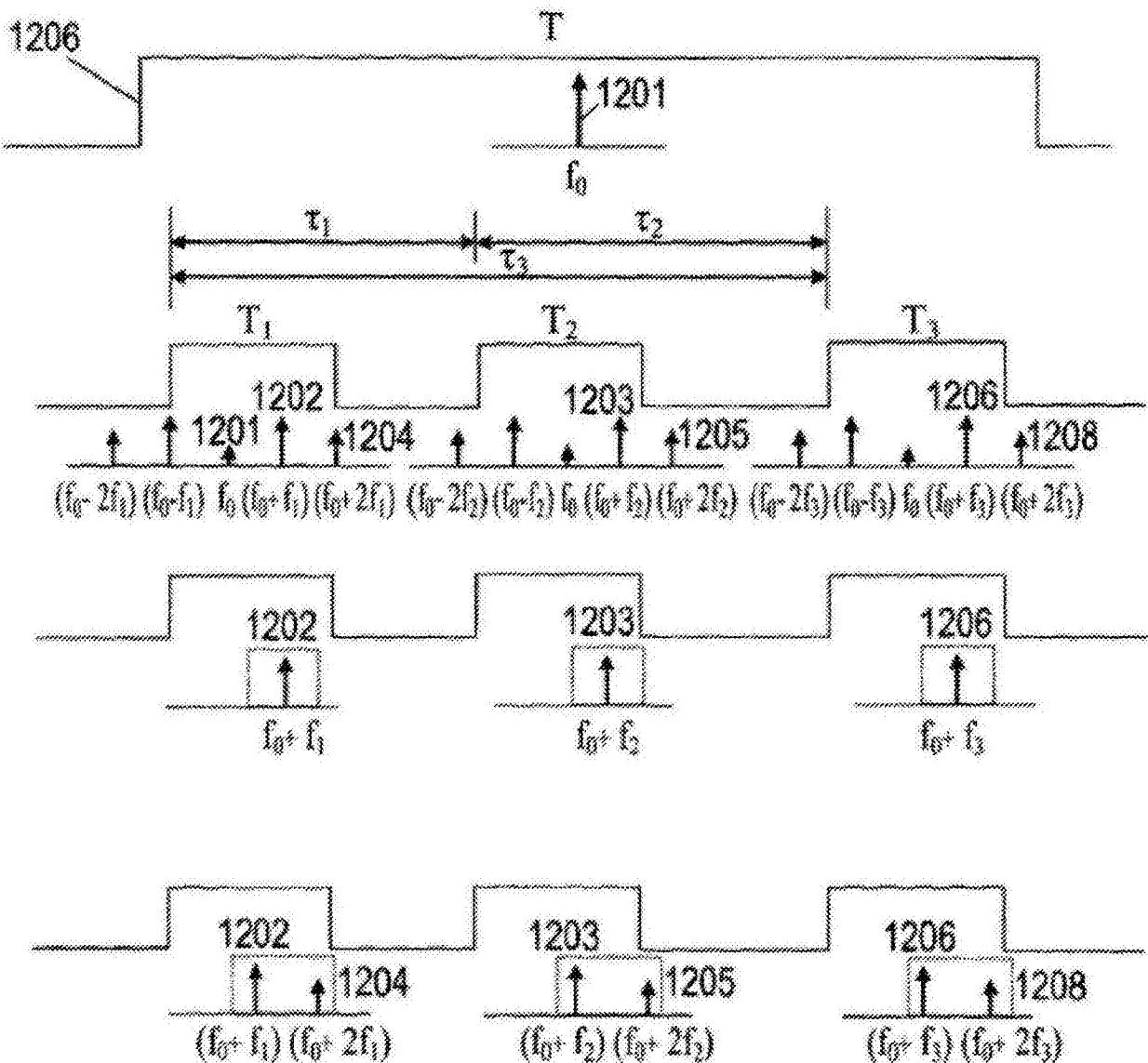


图12B

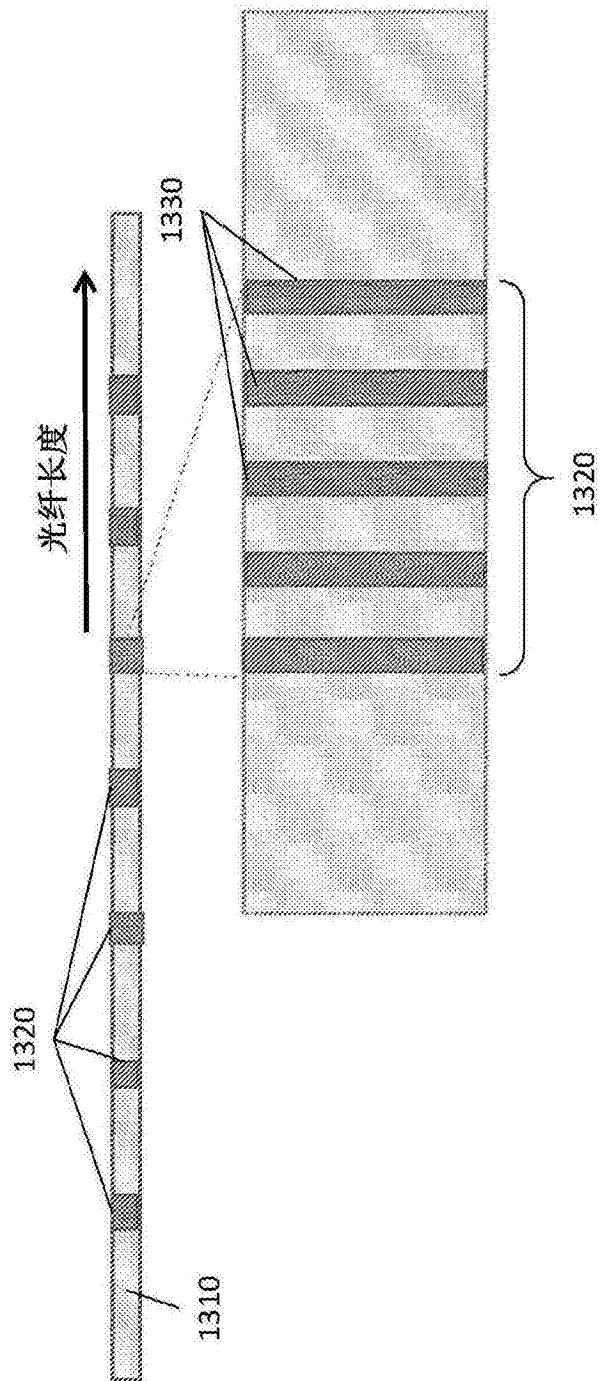


图13-1

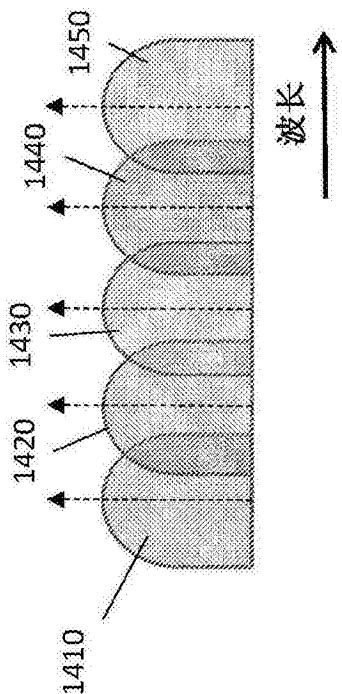


图14-1

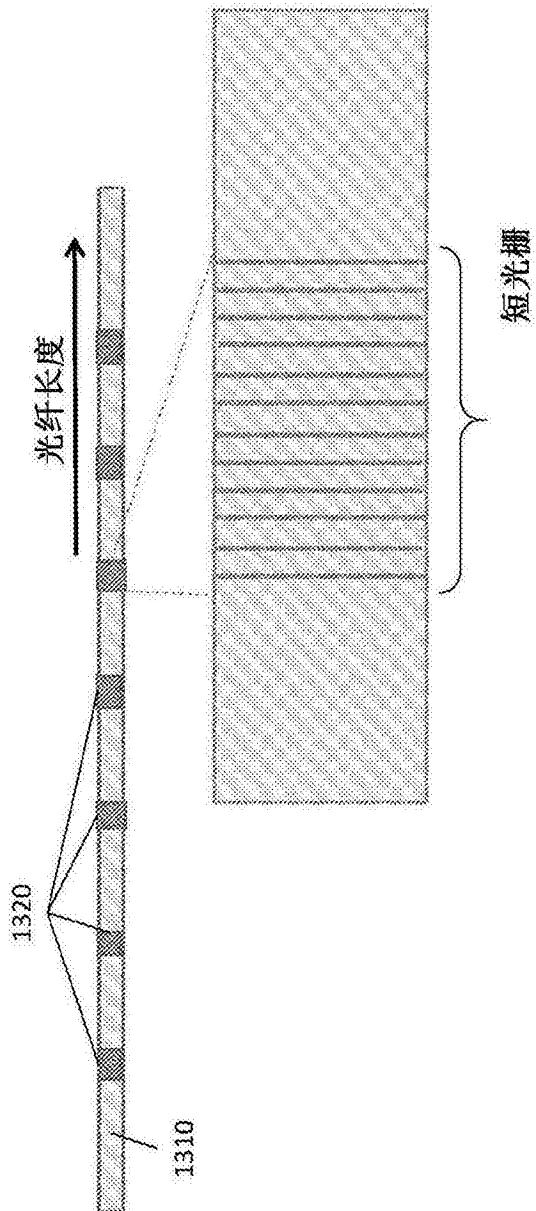


图13-2

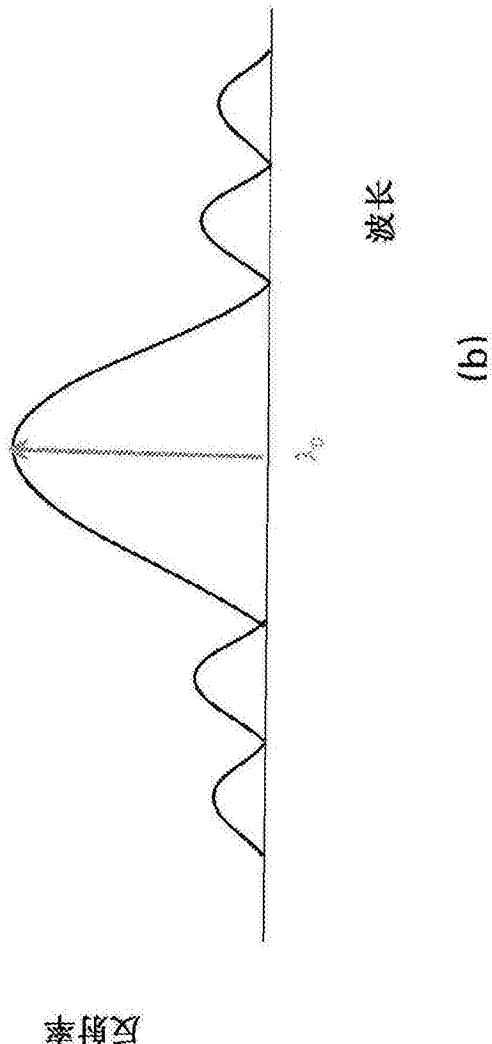


图14-2

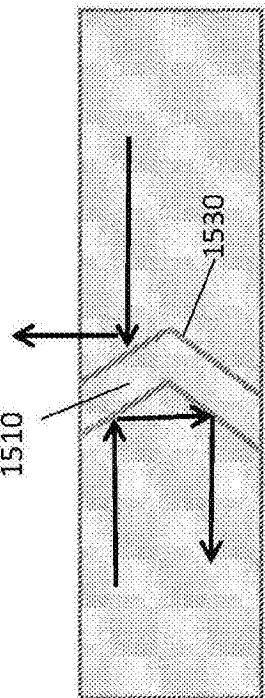


图15

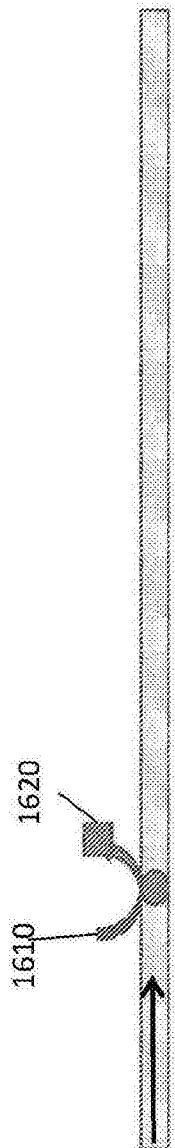
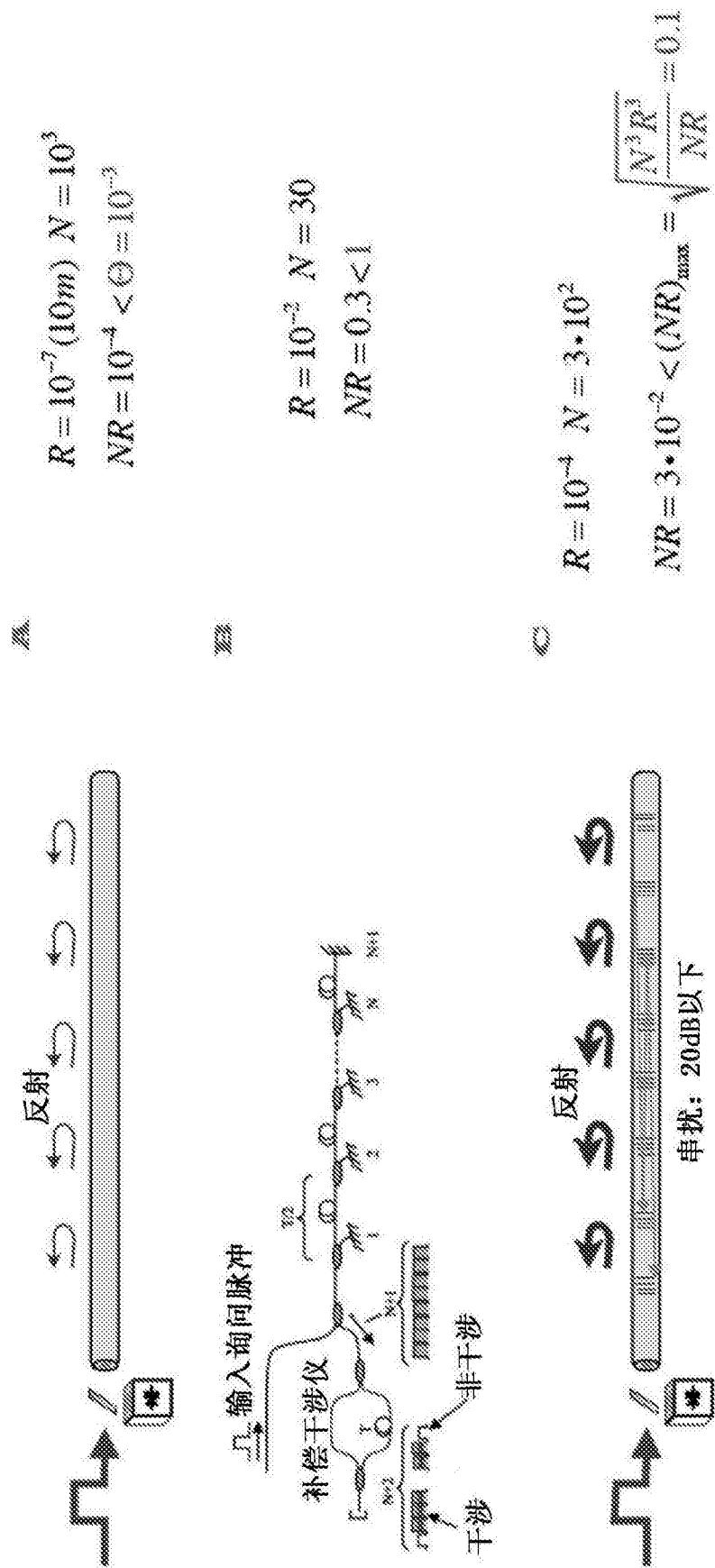


图16



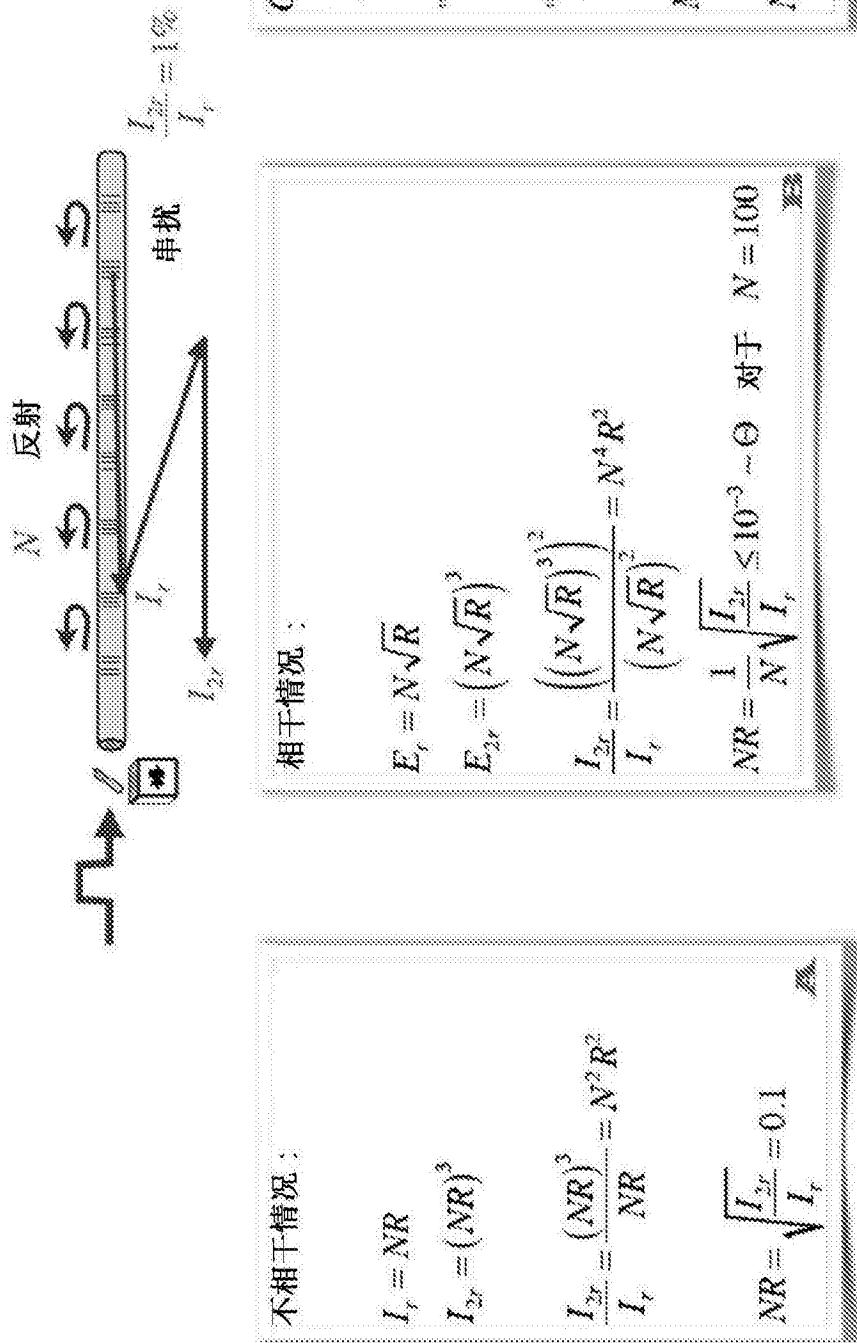


图18

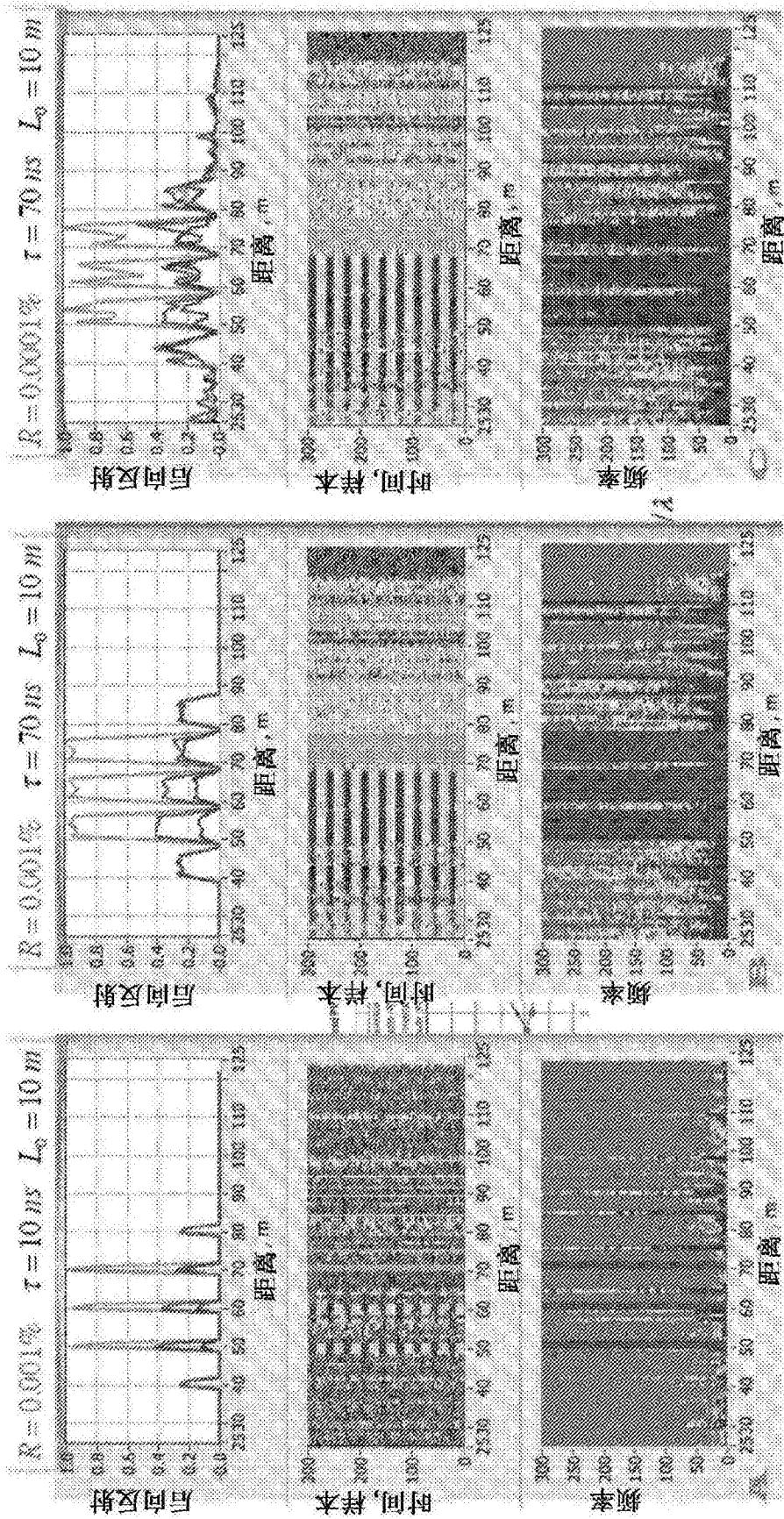


图19

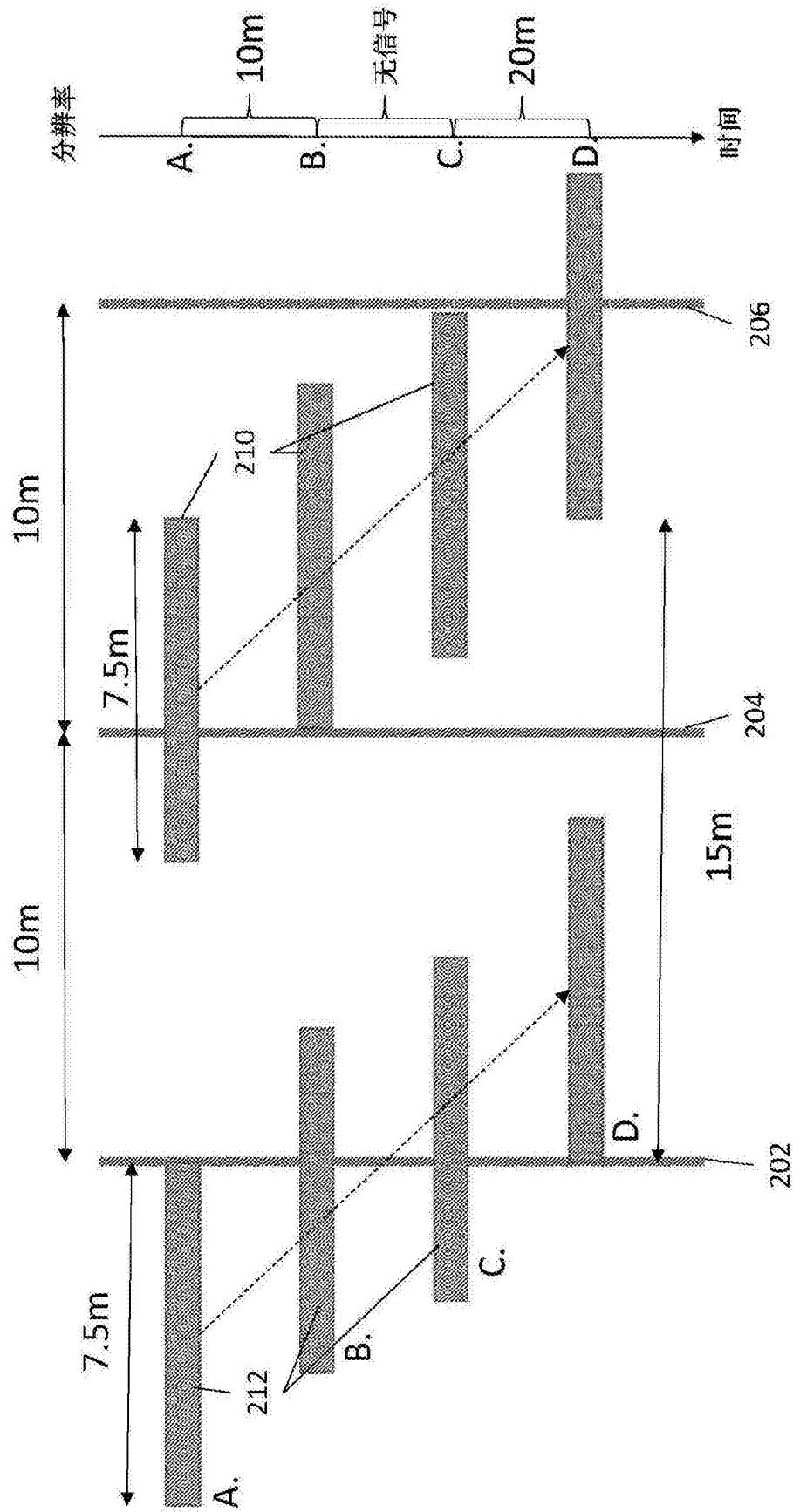


图20

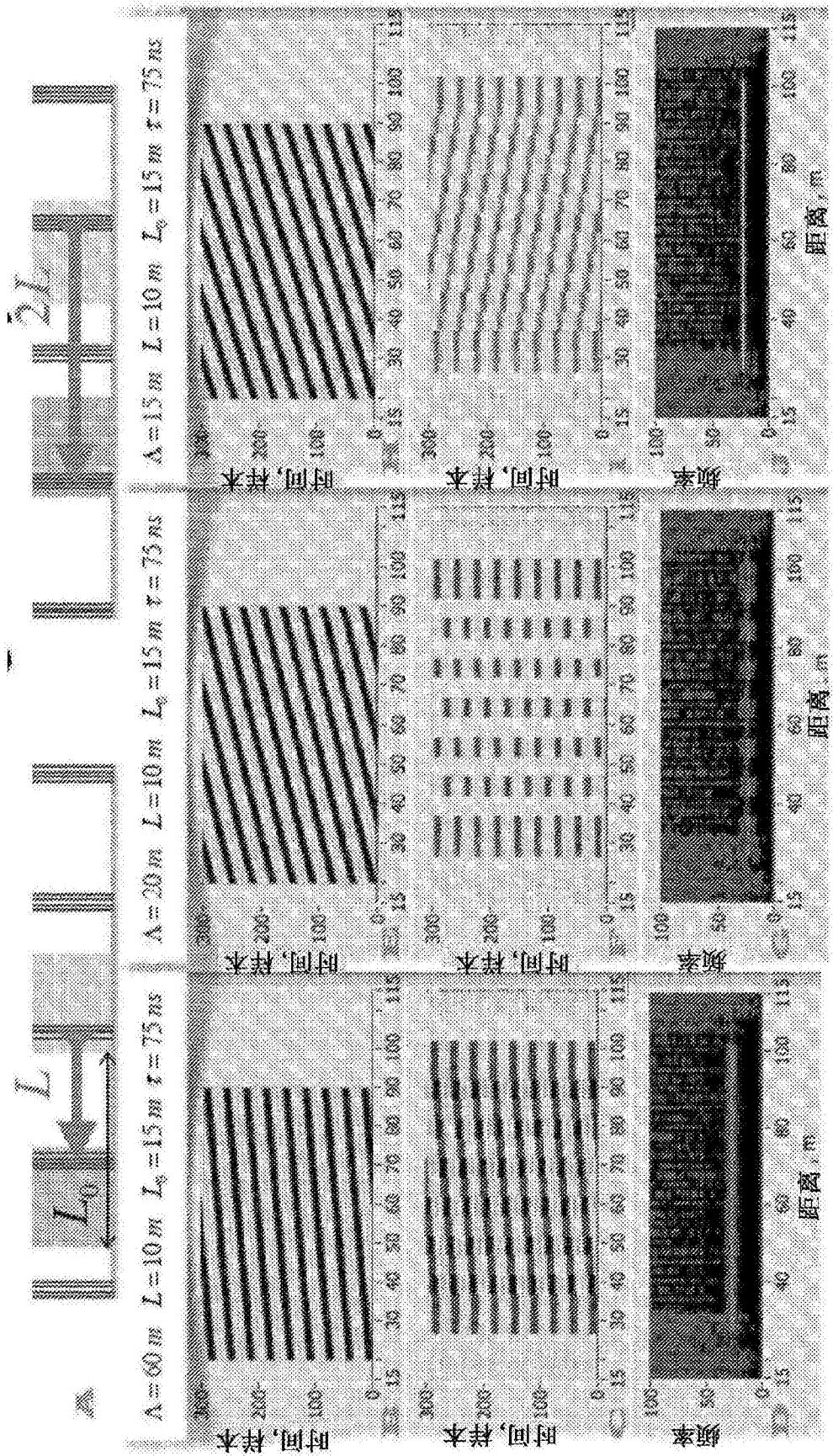


图 21-1

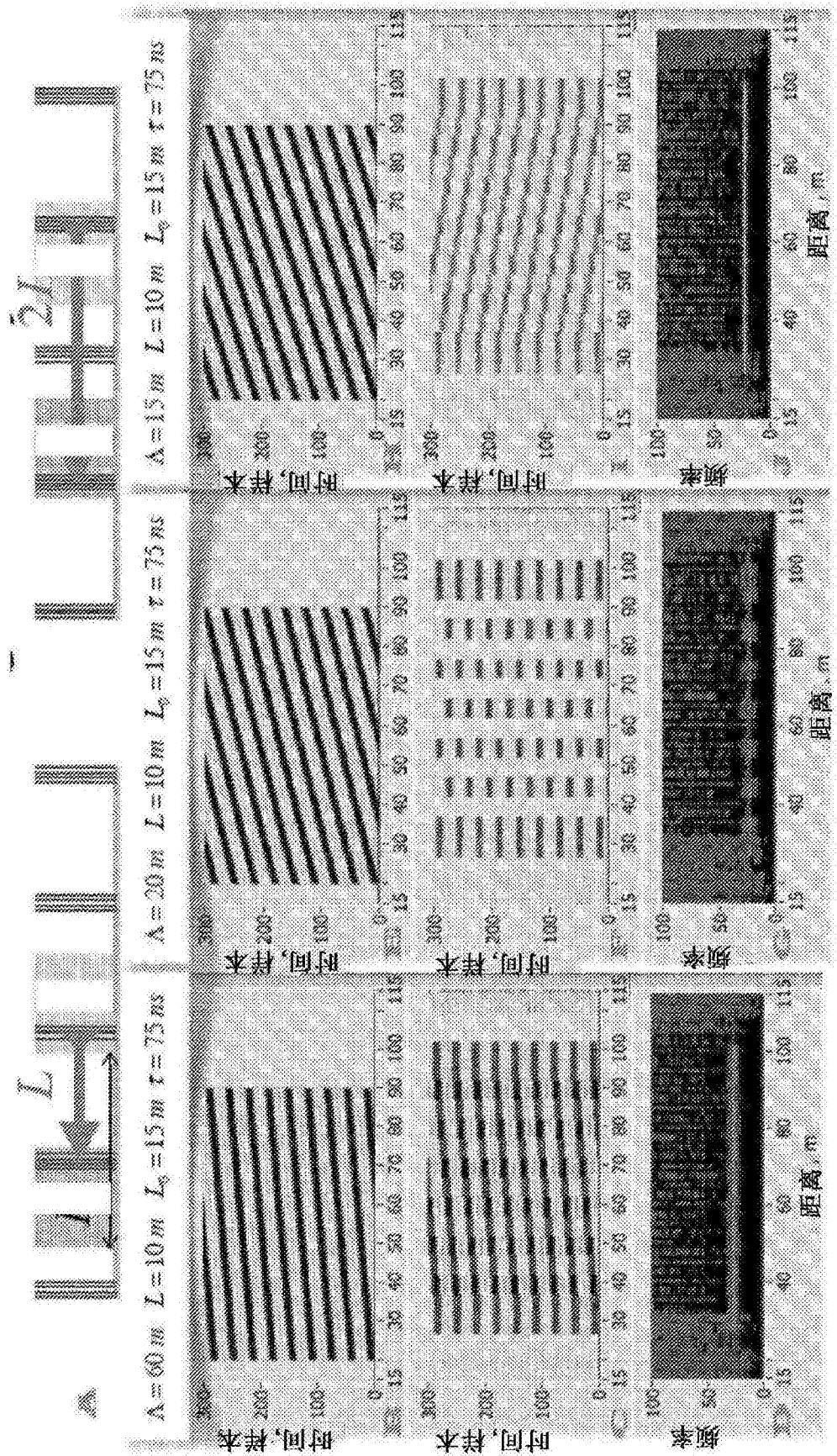


图 21-2

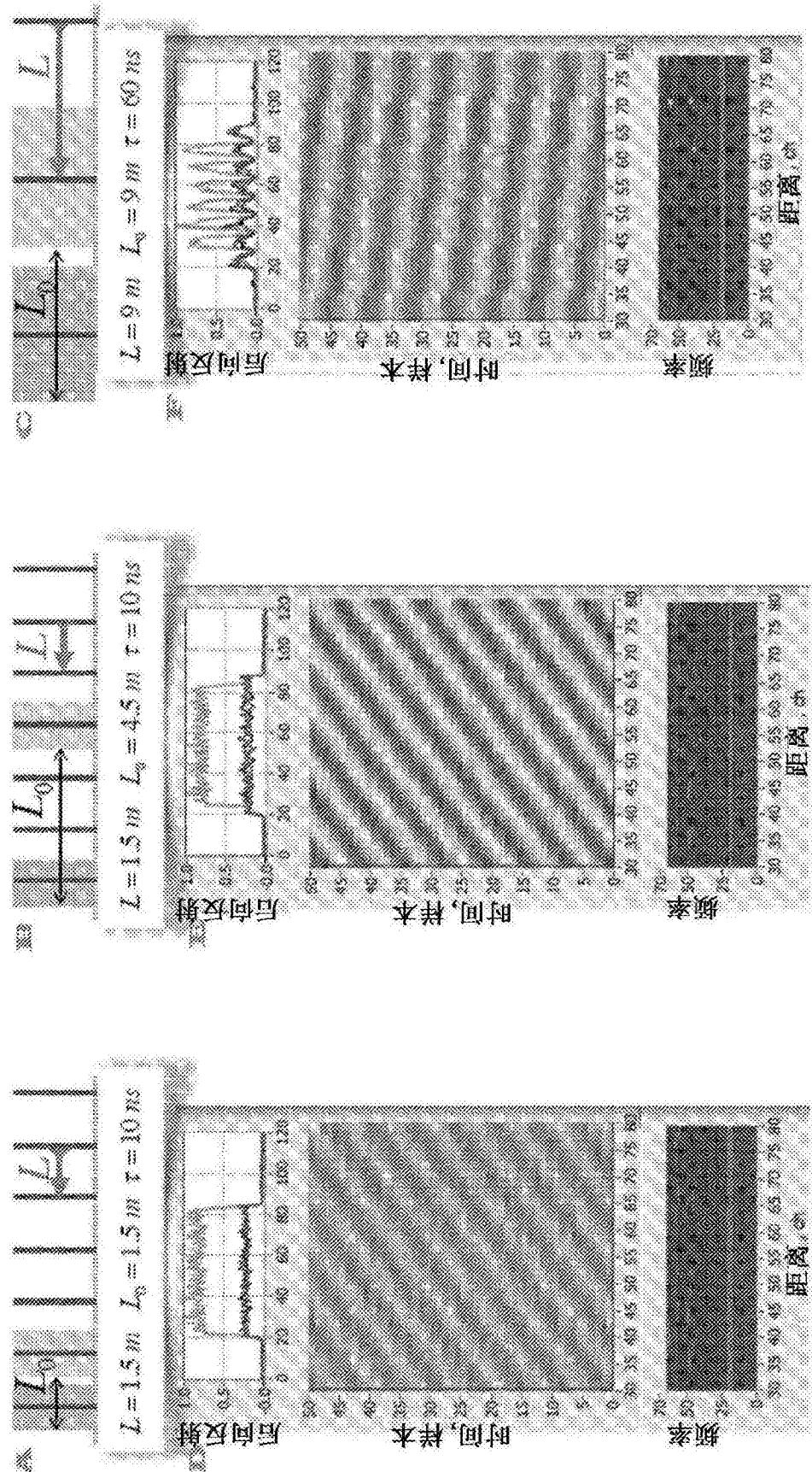


图22

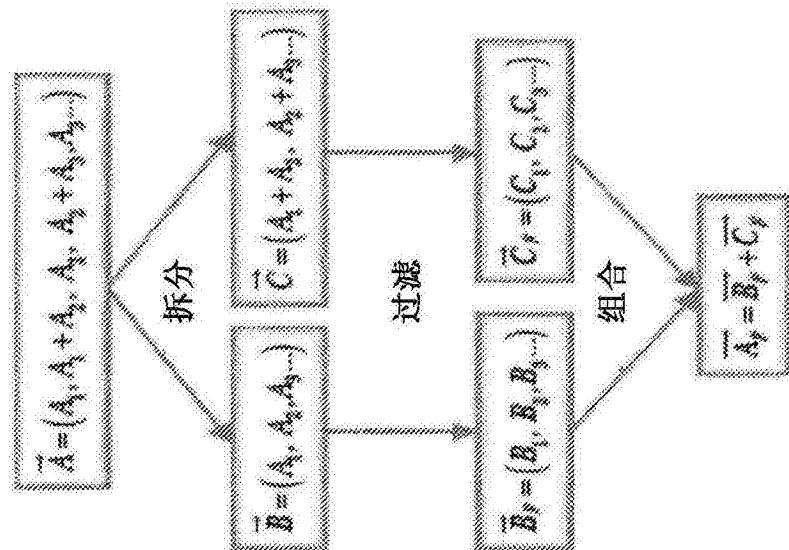


图23

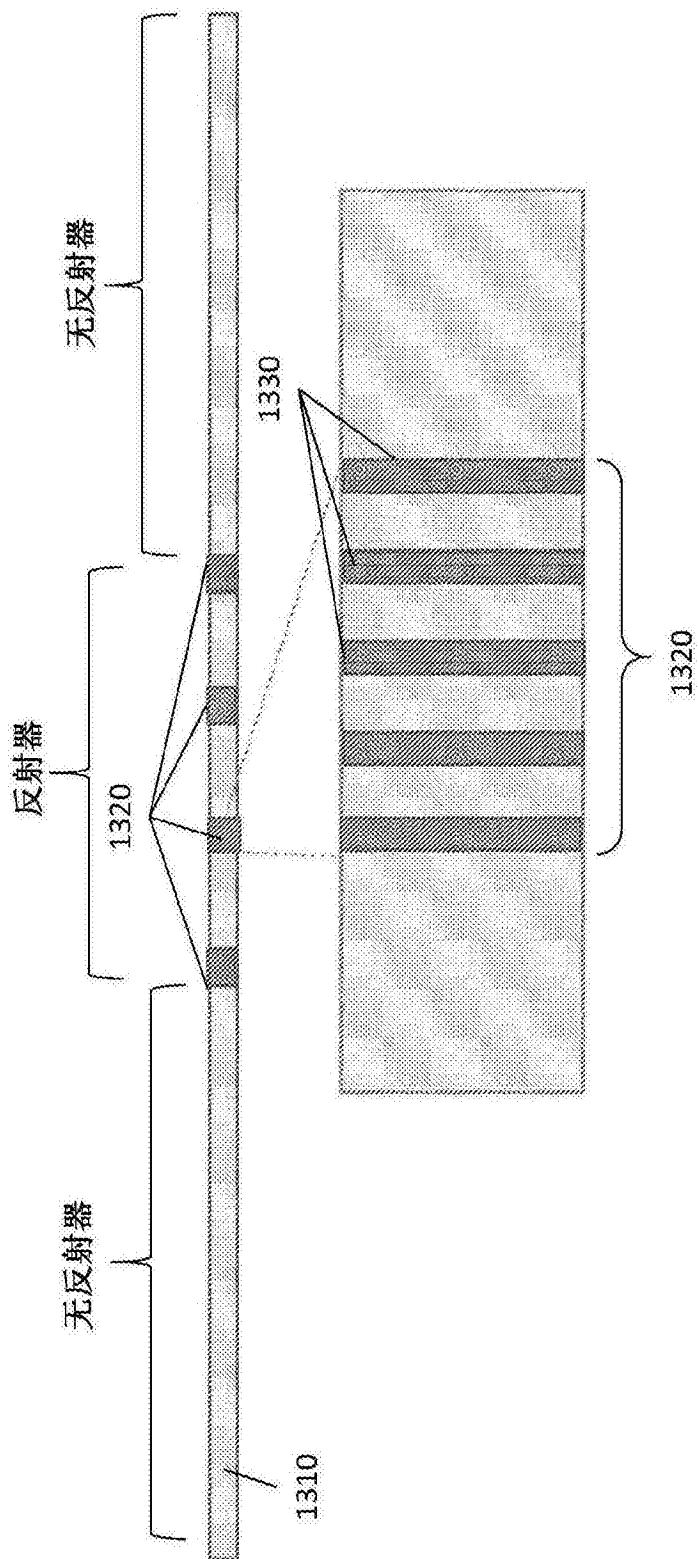


图24

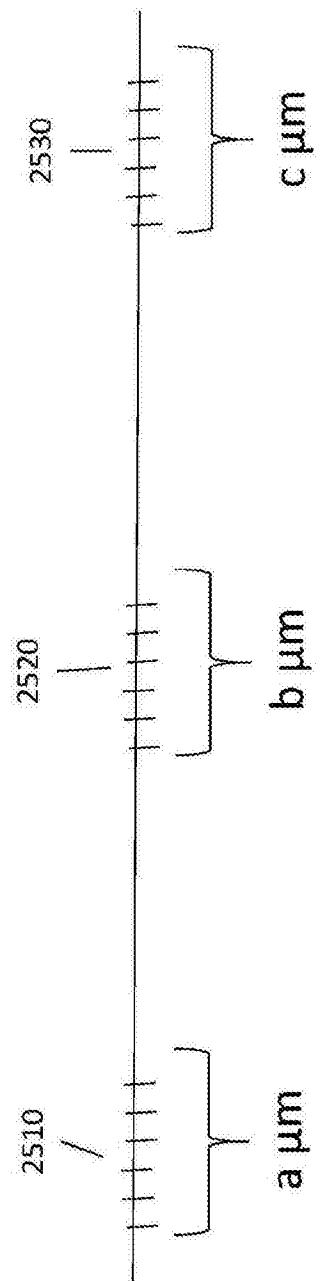


图25

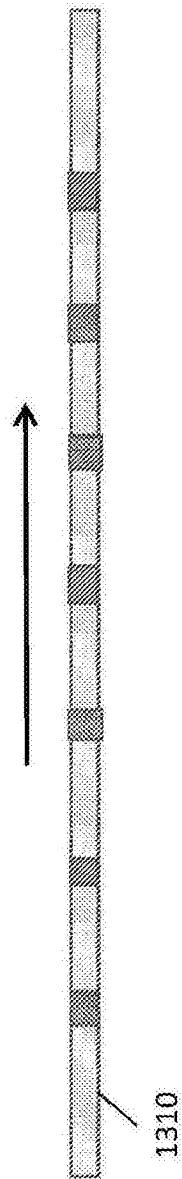


图26

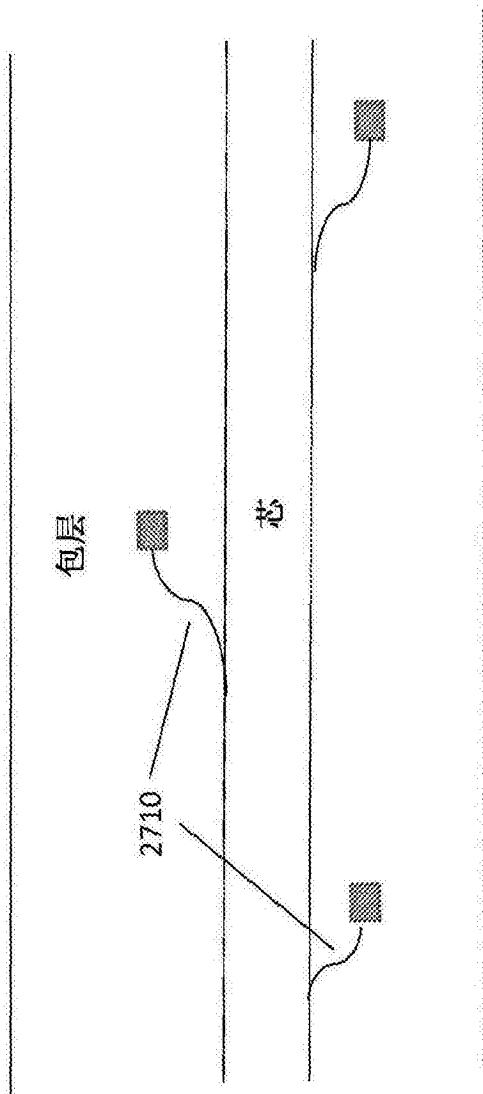


图27

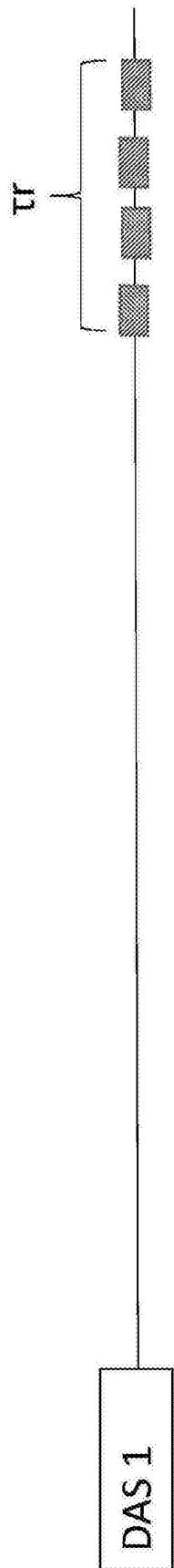


图29

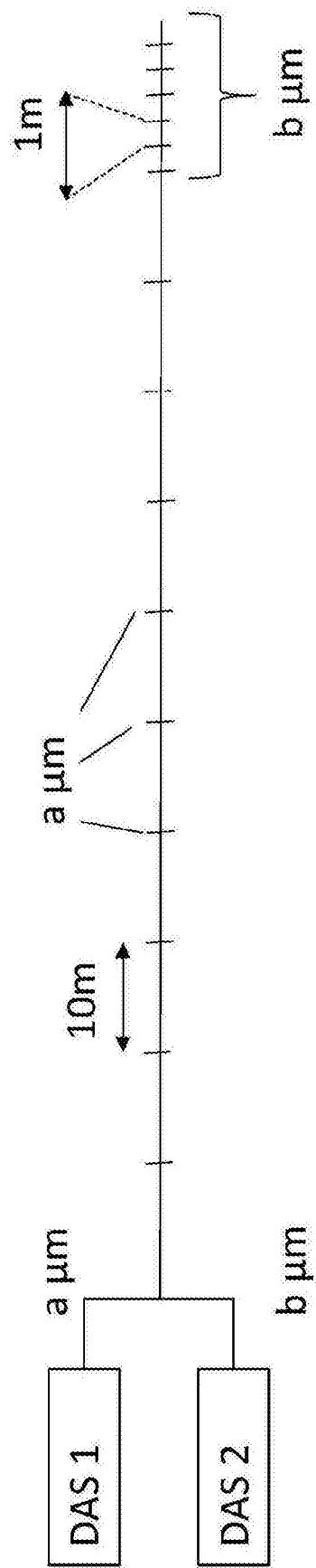


图30

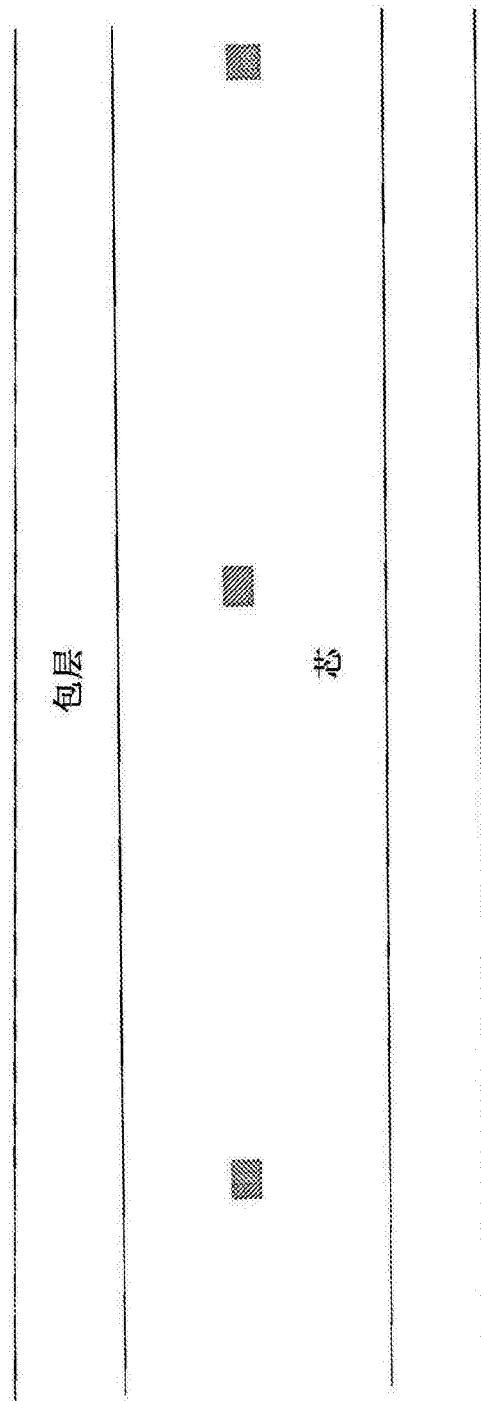


图31

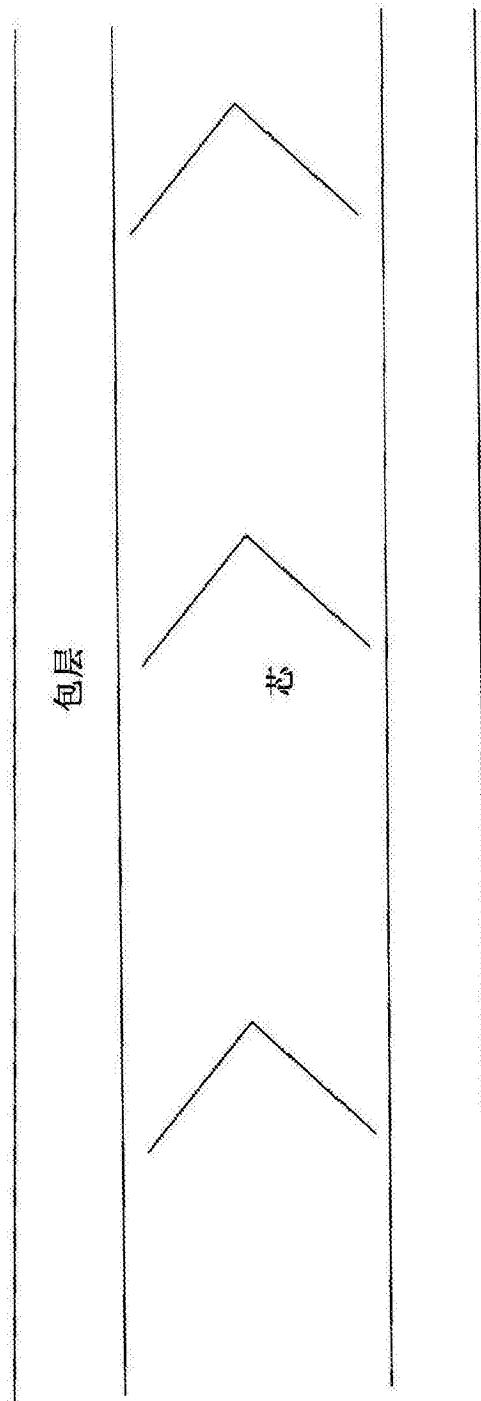


图28

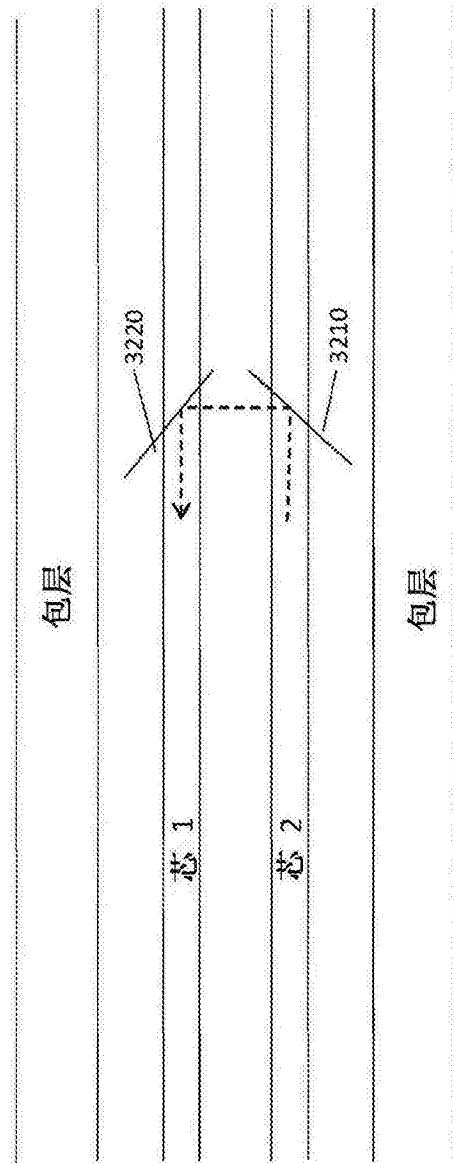


图32

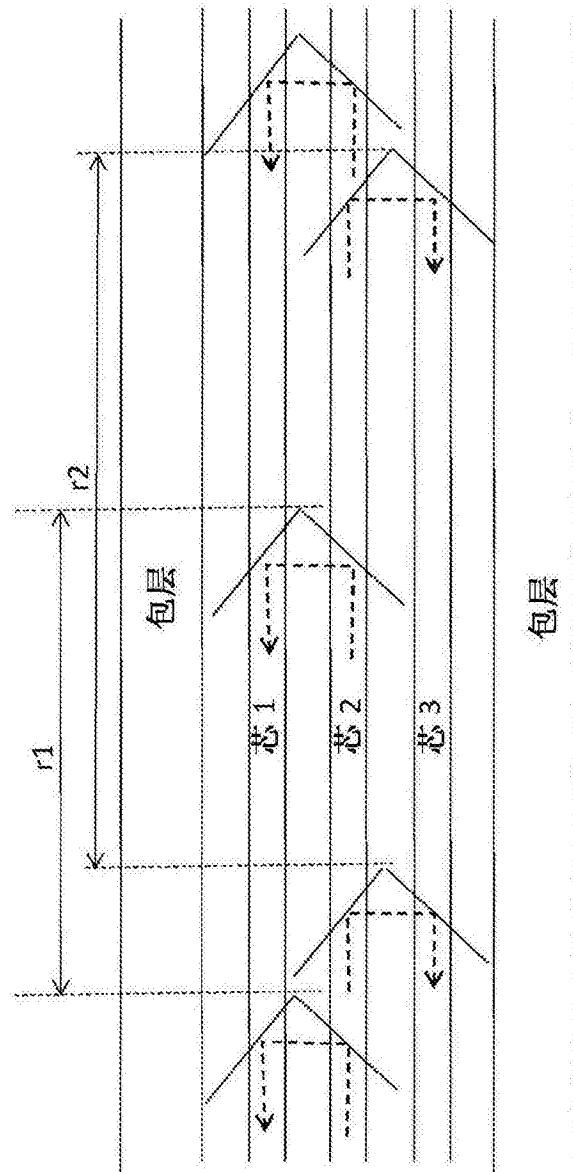


图33

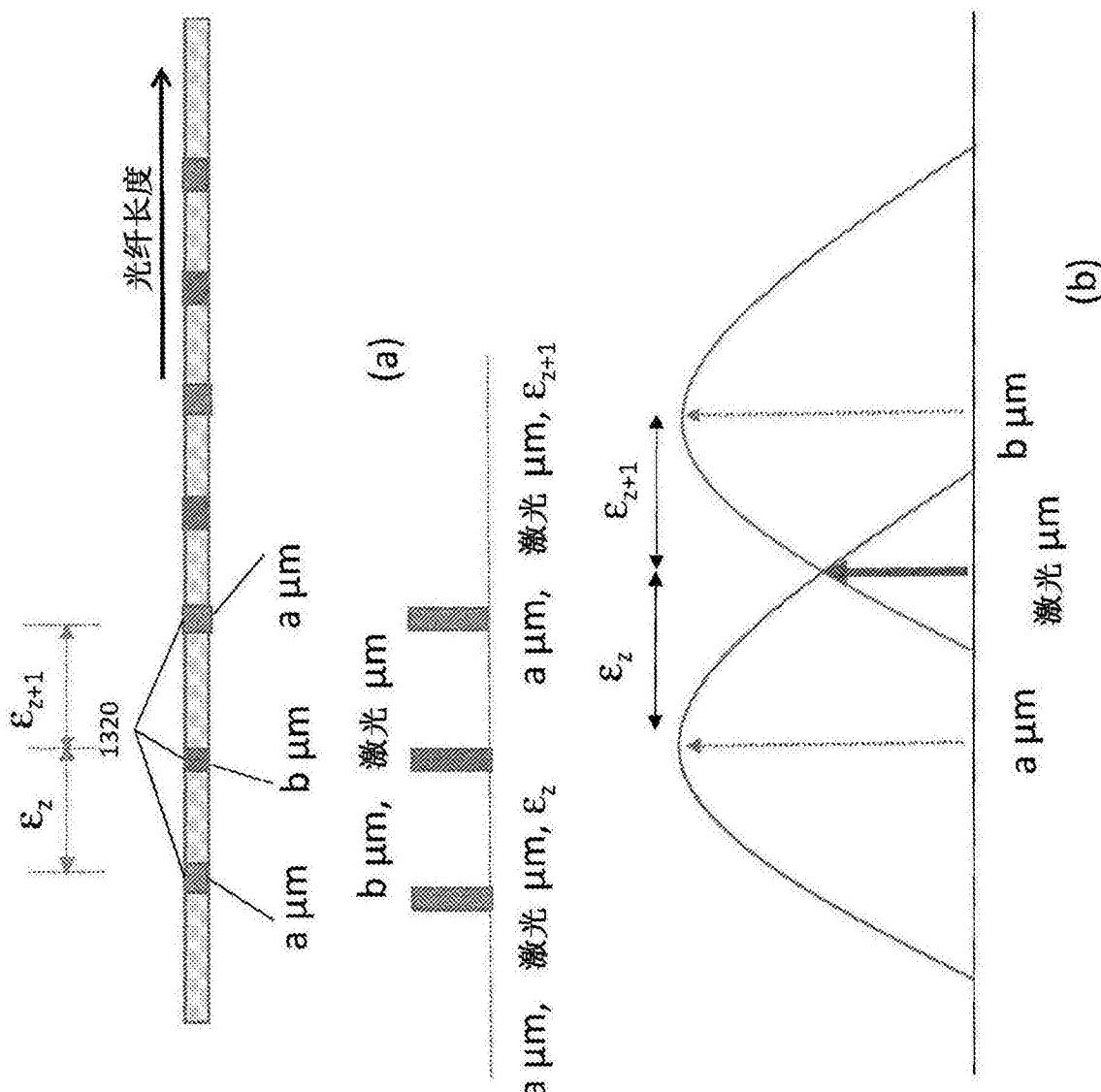


图34-1

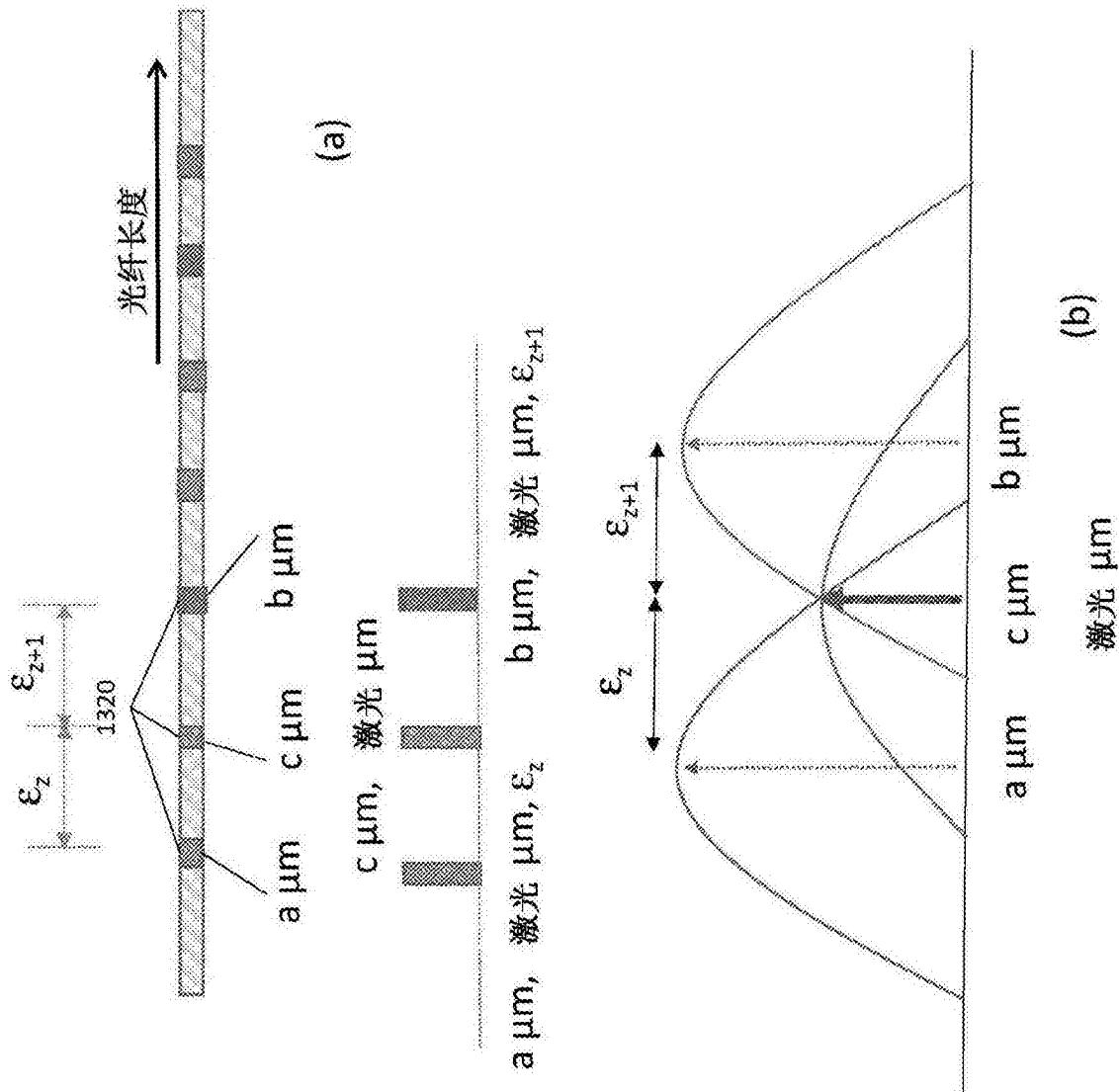


图34-2

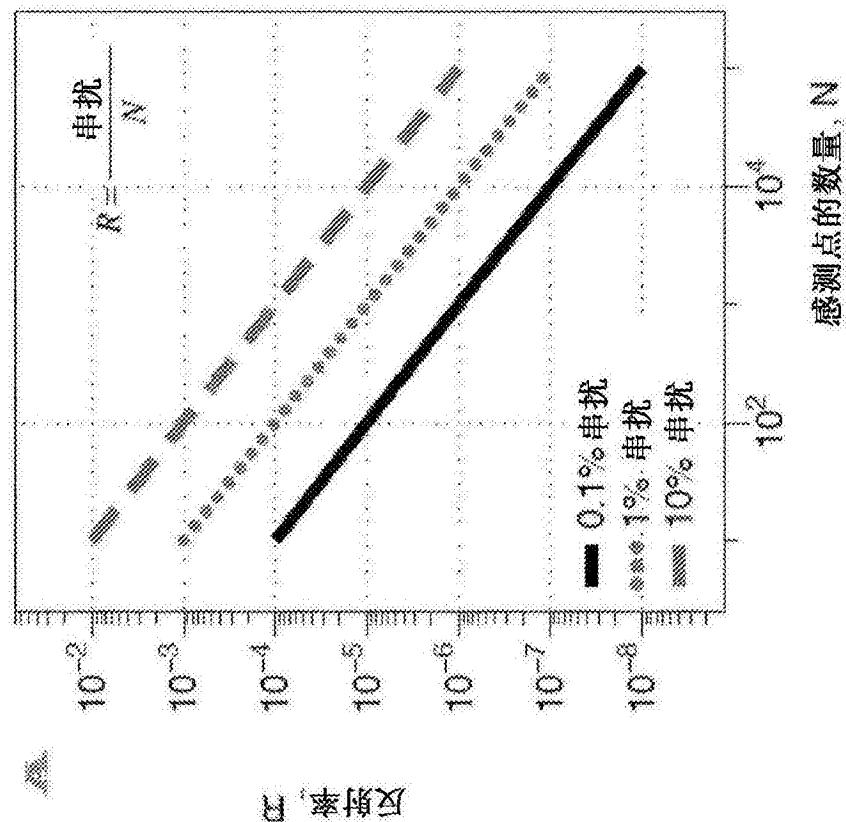


图35

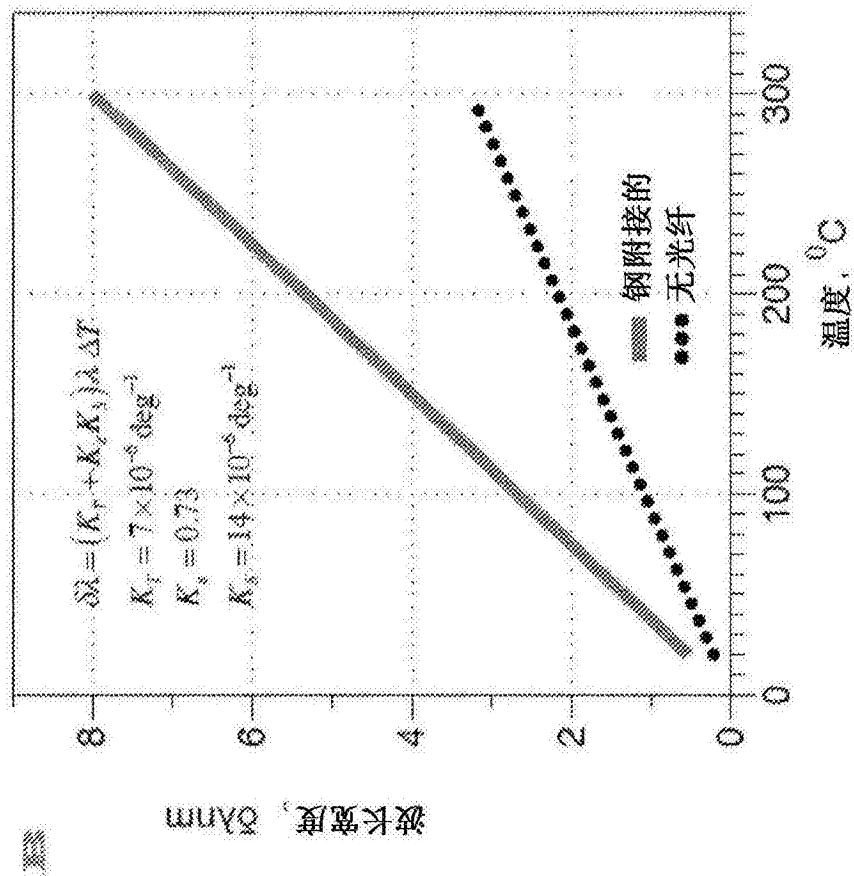


图36

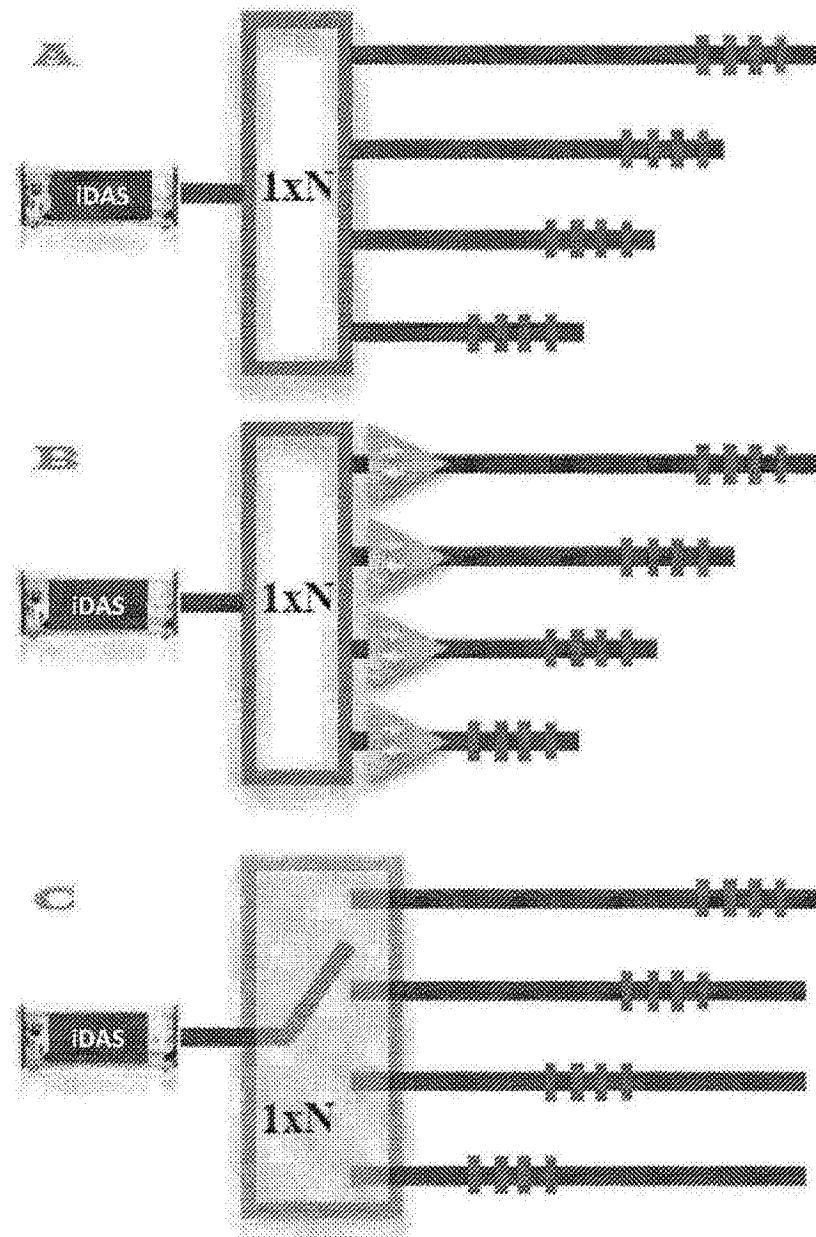


图37