



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101983325 A

(43) 申请公布日 2011. 03. 02

(21) 申请号 200980112097. 2

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2009. 03. 16

G01M 5/00 (2006. 01)

(30) 优先权数据

PA200800472 2008. 03. 31 DK

61/040, 756 2008. 03. 31 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 09. 30

(86) PCT申请的申请数据

PCT/DK2009/050060 2009. 03. 16

(87) PCT申请的公布数据

W02009/121367 EN 2009. 10. 08

(71) 申请人 维斯塔斯风力系统集团公司

地址 丹麦兰德斯希沃特

(72) 发明人 I · S · 奥勒森

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

72002

代理人 陈松涛 夏青

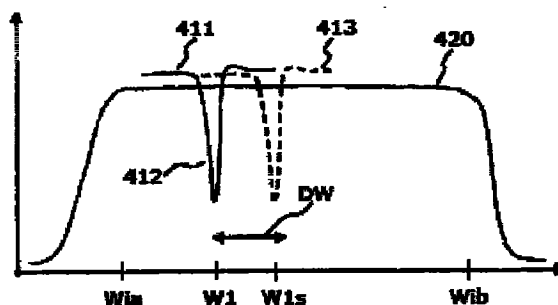
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 6 页

(54) 发明名称

用于风力涡轮机的光透射应变传感器

(57) 摘要

本发明涉及一种用于风力涡轮机的宽带光学应变感测系统。所述应变感测系统包括具有位于一个端部的输入端和位于相对端部的输出端的光纤。所述光纤在输入端和输出端之间设置有布拉格传感器。通过在光纤的输入端注入光、在光纤的输出端测量光谱强度分布、以及确定光谱强度分布中的强度凹口的光谱位置,能够从透射光中确定布拉格传感器位置处的应变值。



1. 一种用于感测风力涡轮机部件中的应变的方法,所述风力涡轮机包括光学传感器系统,所述方法包括以下步骤:

将输入光学信号输入到所述传感器系统的多个光纤,每个所述光纤包括一个或多个光纤布拉格光栅传感器,

响应于所述输入光学信号,利用多个光探测器来测量受所述一个或多个传感器影响的透射的输出光学信号的光谱强度分布,所述光探测器可操作地连接至所述光纤,其中第一和第二探测器连接至相应的第一和第二光纤,并且所述第一和第二探测器设置于相对于所述相应的第一和第二光纤的所述一个或多个传感器的下游,以及

在控制单元中处理所测量的输出光学信号,以便确立所述部件中的应变值。

2. 根据权利要求1所述的用于感测应变的方法,其中,所述输出光学信号包括至少一个表示最小光强度的凹口,并且其中通过确定所测量的光谱强度分布中的强度凹口的光谱位置来确立所述应变值。

3. 根据权利要求1和2中任一项所述的用于感测应变的方法,其中,利用光探测器在覆盖一个或多个光栅传感器的光谱工作范围的光谱范围上来测量所述输出光学信号的所述光谱强度分布。

4. 根据权利要求1-3中任一项所述的用于感测应变的方法,其中,至少一个光纤可操作地连接至所述风力涡轮机的所述部件。

5. 根据权利要求1-4中任一项所述的用于感测应变的方法,其中,所述输入光学信号是宽带光学信号,其具有比所述一个或多个光栅传感器的光谱工作范围更宽的光谱分布。

6. 根据权利要求1-5中任一项所述的用于感测应变的方法,其中,将所透射的输出光学信号的光强度与所述输入光学信号的光强度进行比较。

7. 根据权利要求1-6中任一项所述的用于感测应变的方法,其中,将所述输入光学信号利用时分交替地输入到至少两个光纤中的一个,并且其中将来自所述至少两个光纤的所述输出光学信号组合成单个输出光学信号。

8. 根据权利要求1-7中任一项所述的用于感测应变的方法,其中,将所述应变值供应至所述风力涡轮机控制器。

9. 根据权利要求1-8中任一项所述的用于感测应变的方法,其中,将所述应变值用于至少一个风力涡轮机叶片的桨距控制和/或者用于风力涡轮机的发电控制。

10. 一种用于风力涡轮机部件的光学应变感测系统,所述应变感测系统包括:

可操作地连接至所述涡轮机部件的多个光纤,并且每个光纤包括一个或多个光纤布拉格光栅传感器,

在所述一个或多个传感器的上游位置连接至所述光纤的输入光学信号源,

可操作地连接至所述光纤的多个光谱光探测器,其中第一和第二探测器连接至相应的第一和第二光纤,并且所述第一和第二探测器设置于所述相应的第一和第二光纤上的所述一个或多个传感器的下游,所述光探测器设置用于测量受所述光纤的一个或多个所述传感器影响的透射的输出光学信号,以及

至少一个用于处理所测量的输出光学信号的控制单元,以便确立所述部件中的应变值。

11. 一种用于风力涡轮机部件的光学应变感测系统,其中,所述风力涡轮机部件包括

至少第一和第二涡轮机叶片,并且其中第一和第二光纤固定于相应的第一和第二涡轮机叶片。

12. 根据权利要求 10 所述的应变感测系统,所述应变感测系统包括用于执行根据权利要求 1-9 中任一项所述的方法的装置。

13. 根据权利要求 10-12 中任一项所述的应变感测系统,其中,所述系统包括用于记录所述风力涡轮机部件中的应变的数据存储装置,以便评估所述部件的保持安全工作的条件。

14. 根据前述权利要求中任一项所述的方法或应变感测系统在风力涡轮机部件中的应用,以感测应变,所述风力涡轮机部件例如为风力涡轮机叶片、塔架、轴、轴承和 / 或变速箱。

15. 一种风力涡轮机,所述风力涡轮机包括根据权利要求 10-13 中任一项所述的应变感测系统。

## 用于风力涡轮机的光透射应变传感器

### 技术领域

[0001] 本申请涉及应变探测,尤其涉及使用光学传感器的应变探测。

### 背景技术

[0002] 风力涡轮机部件中的应变测量提供了对于风力涡轮机部件,例如涡轮机叶片的机械载荷的有价值的见解。

[0003] 在风力涡轮机中使用应变计传感器和光学传感器是已知的。然而,由于风力涡轮机的非常恶劣的工作条件,应变传感器应该非常健壮的。

[0004] W008020240 公开了一种结合光纤的风力涡轮机叶片,所述光纤被配置用于涡轮机叶片的结构监测。所述光纤包括至少一个应变传感器。光纤的一端是输出点,其连接至数据处理装置,所述数据处理装置被配置为处理来自应变传感器的信号。光纤的另一端为可替换的输出点,其也可连接至数据处理装置,使得在光纤中发生破损的情况下,来自应变传感器的信号可从至少一个输出点获得。

[0005] 尽管 W008020240 公开了具有两个输出点的应变传感器,使得在光纤中发生破损的情况下,应变传感器是可工作的,W008020240 中的应变传感器相对复杂。因此,具有更健壮设计的改进的应变传感器是有利的。

### 发明内容

[0006] 因此,本发明优选地试图单独地或以任意组合的方式来减轻、缓解或消除一个或多个上述的缺点。具体而言,本发明的目的在于通过提供应变传感器的简单且健壮的光学设计,来提供一种解决上述问题的应变传感器。

[0007] 通过提供用于感测包括光学传感器系统的风力涡轮机部件中的应变的方法,在本发明的第一方面获得该目的和几个其它的目的,所述方法包括以下步骤:

[0008] 将输入光学信号输入到所述传感器系统的多个光纤,所述光纤中的每一个包括一个或多个光纤布拉格光栅传感器,

[0009] 响应于所述输入光学信号,利用多个光探测器测量受所述一个或多个传感器影响的透射的输出光学信号的光谱强度分布,所述光探测器可操作地连接至光纤,其中第一和第二探测器连接至相应的第一和第二光纤,并且其中所述第一和第二探测器设置在相对于所述相应的第一和第二光纤的所述一个或多个传感器的下游,以及

[0010] 在控制单元中处理所测量的输出光学信号,以便确立所述部件中的应变值。

[0011] 特别地但不排它地,本发明的优点在于获得能够基于通过光纤透射的光来确立应变值的光纤光学应变传感器的简单且健壮的设计。

[0012] 因此,光在光纤的输入端被输入,并且测量从相对的光纤端部输出的光,以便确定风力涡轮机部件的应变值。在光纤的输入端和输出端之间设置一个或多个应变传感器,例如光纤布拉格传感器。因为布拉格传感器的光谱透射特性取决于光纤的应变,所以一个或多个布拉格传感器的应变值可以由透射光来确定。

[0013] 由透射光来确定应变值是有利的,这是因为与测量由布拉格传感器反射的光相比,它具有比较简单的光学设计。

[0014] 应理解,将输入光学信号输入到传感器系统的多个光纤中可以通过使用多个输入光源来实现,所述多个输入光源单独耦合到所述光纤,即,通过将第一和第二光源耦合到相应的第一和第二光纤。或者,单个输入光源也可以利用例如光纤分束器来耦合到所以光纤。

[0015] 使用多个光探测器是有利的,其中第一和第二探测器连接至相应的第一和第二光纤以用于测量光纤的输出光谱强度分布,这是因为针对每个光纤输出使用探测器可以有助于更简单且更可靠的检测系统。

[0016] 在实施例中,输出光学信号可以包括至少一个表示最小光强度的凹口 (notch),其中通过确定所测量的光谱强度分布中的强度凹口的光谱位置来确定应变值。因此,通过确定透射光中的强度凹口的光谱位置,其中强度凹口由布拉格传感器的滤波效应所导致,能够通过将所测量的光谱位置与没有应变时的布拉格传感器的波长相比较来确定应变值。

[0017] 在另一实施例中,输出光学信号的光谱强度分布可以利用光探测器在覆盖一个或多个光栅传感器的光谱工作范围的光谱范围上来测量。由于光纤可以包括多个光栅传感器,每个光栅传感器均具有不同的工作滤波波长,光栅传感器的整个工作光谱范围可以利用光探测器来测量,所述光探测器能够测量工作光谱范围内的所有波长处的强度。

[0018] 在实施例中,至少一个光纤可操作地连接至风力涡轮机的部件,例如将光纤粘结到该部件或将光纤与该部件集成。

[0019] 在实施例中,输入光学信号是宽带光学信号,其具有比一个或多个光栅传感器的光谱工作范围更宽的光谱分布。为了探测所有光栅传感器的透射率变化,输入光学信号的光谱宽度应该比所述传感器的光谱工作范围更宽。

[0020] 在实施例中,可以将透射的输出光学信号的光强度与输入光学信号的光强度进行比较。将输出光学信号与输入光学信号进行比较是有利的,这是因为,这可以提供一种用于补偿输入光学信号的强度变化的方法。

[0021] 在实施例中,输入光学信号利用时分交替地输入到至少两个光纤中的一个,其中来自所述至少两个光纤的输出光学信号合成为单个输出光学信号。当应变传感器包括多个光纤时,每次向一个光纤注入输入光是有利的,这是因为这可以使得能利用单个光谱探测器探测来自所有光纤的光谱强度曲线。

[0022] 在实施例中,将应变值供应至风力涡轮机控制器以用于控制风力涡轮机。

[0023] 在实施例中,应变值用于至少一个风力涡轮机叶片的桨距 (pitch) 控制和 / 或者用于风力涡轮机的发电控制。例如,涡轮机叶片中的应变信息可以用于通过调整桨距来优化发电。

[0024] 在第二方面中,本发明涉及一种用于风力涡轮机部件的光学应变感测系统,所述应变感测系统包括:

[0025] 可操作地连接至所述涡轮机部件的多个光纤,并且每个光纤包括一个或多个光纤布拉格光栅传感器,

[0026] 在所述一个或多个传感器的上游位置处连接至所述光纤的输入光学信号源,

[0027] 可操作地连接至光纤的多个光谱光探测器,其中第一和第二探测器连接至相应的第一和第二光纤,并且其中所述第一和第二探测器设置于所述相应的第一和第二光纤上的

一个或多个传感器的下游,所述光探测器被设置用于测量受所述光纤的一个或多个所述传感器影响的透射的输出光学信号,以及

[0028] 至少一个用于处理所测量的输出光学信号控制单元,以便确立部件中的应变值。

[0029] 因此,光谱光分布探测器可以可操作地连接至每个光纤并且设置在相对于每个光纤中的传感器的下游。当使用两个或多个光纤时,单独的应变感测光纤可以用于风力涡轮机的不同部件,使得可以通过连接至每个光纤的探测器来测量由光纤发射出的光谱强度曲线,以用于确定相应的风力涡轮机部件的应变值。

[0030] 应理解,风力涡轮机部件可以包括不同的部件,例如风力涡轮机塔架、发动机舱、旋转轴、包括旋转叶片的转子、或者转子的叶片。

[0031] 在实施例中,风力涡轮机部件包括至少第一和第二涡轮机叶片,并且第一和第二光纤固定至相应的第一和第二涡轮机叶片。

[0032] 应变感测系统的实施例包括用于执行根据前述任一方面和实施例的方法的装置。

[0033] 应变感测系统的实施例包括用来记录风力涡轮机部件的应变的数据存储装置,以便评估部件保持安全工作的条件。因此,可以对存储的应变值进行积分、求和或用其它的方式进行处理,以用于评估使部件保持安全工作条件的值。

[0034] 在第三方面中,本发明涉及根据如前述任一方面和实施例的方法或应变感测系统在风力涡轮机部件中的应用以感测应变,所述风力涡轮机部件例如为风力涡轮机叶片、塔架、轴、轴承和 / 或变速箱。

[0035] 在第四方面中,本发明涉及一种包括根据第二方面中的应变感测系统的风力涡轮机。

[0036] 本发明的第一、二、三和四方面均可以与任意其它方面结合。参考以下描述的实施例,本发明的这些和其他的方面将变得显而易见和明了。

[0037] 总之,本发明涉及一种用于风力涡轮机的宽带光学应变感测系统。所述应变感测系统包括具有位于一端的输入端和位于相对端的输出端的光纤。所述光纤在输入和输出端之间设置有布拉格传感器。通过在光纤的输入端注入光、测量光纤输出端处的光谱强度分布以及确定光谱强度分布中的强度凹口的光谱位置,能够从透射光来确定布拉格传感器处的应变值。

## 附图说明

[0038] 参考附图,仅通过示例的方式来解释本发明,其中

[0039] 图 1 示出了风力涡轮机 1,

[0040] 图 2A 示出了公知的光纤布拉格光栅应变感测系统,

[0041] 图 2B 示出了光谱强度分布,

[0042] 图 3 示出了基于透射光的应变感测系统,

[0043] 图 4A-4C 示出了输入光和透射光的光谱曲线,

[0044] 图 5 示出了其中将单个探测器用于测量来自两个或多个光纤的输出光学信号的实施例,

[0045] 图 6 示出了具有 3 个光纤和控制器的应变感测系统。

## 具体实施方式

[0046] 图 1 示出了风力涡轮机 1, 其包括风力涡轮机塔架 2 和设置于塔架 2 顶部的风力涡轮机舱 3。风力涡轮机转子 4 包括至少一个风力涡轮机叶片, 例如图中所示的 3 个风力涡轮机叶片 5。转子安装在轮毂 6 上, 轮毂 6 通过从风力涡轮机舱前端延伸出的低速轴连接至发电机舱 3。

[0047] 图 2A 示出了公知的利用光纤布拉格光栅原理的应变感测系统, 其包括光纤 10, 其中多个 FBG 传感器 9a-9d 分布在光纤上。

[0048] 图 2B 示出了输入至光纤 10 的光的光谱强度分布 21, 通过 FBG 传感器 9a 透射的光的光谱强度分布 22, 以及通过 FBG 传感器 9a 反射的光的光谱强度分布 23。透射曲线 22 中的凹口 24 与反射的输入光的光谱部分相对应, 即, 凹口 24 对应于反射曲线 23。光谱强度分布表示光辐射幅值或一定范围波长的光强度。

[0049] 在图 2A 中, 光源 12 供应输入信号至在分光器 11 前的光纤的近端。输入信号的光谱强度分布的示例由图 2B 中的输入曲线 21 来示出。

[0050] 图 2A 中的每个 FBG 传感器 9a-9d 将一部分特定波长的输入信号反射回到光源 12。输入信号可以具有光谱强度分布 21 并且反射信号可以具有如图 2B 中的反射曲线 23 所示的光谱强度分布。由 FBG 传感器 9a-9d 之一透射的光的光谱强度分布由图 2B 中的透射曲线 22 示出, 其中弱强度的凹口 24 的光谱分布对应于反射曲线 21 的光谱分布。因此, 凹口 24 的光谱位置与反射曲线 23 的光谱位置相同, 并且, 例如凹口 24 的最小强度的光谱位置与反射曲线 23 的最大强度的光谱位置相同或者几乎相同。

[0051] 出于方便, 可以说传感器 9a-9d 具有特定的波长并且反射一特定的波长, 例如用于传感器 9a 的波长  $\lambda_1$ 。然而, 实际上传感器反射可以具有中心波长或峰值波长  $\lambda_1$  的光谱波长分布。图 2 示出了分别对应于传感器 9a-9d 的具有独特中心波长  $\lambda_1$ - $\lambda_4$  的这种光谱分布。

[0052] 此外, 每个 FBG 传感器发射信号到下一个传感器 9b, 其中发射的信号具有凹口 24, 其对应于在前的传感器 9a 的特定波长。

[0053] Y 连接器 11 使输入光传递到 FBG 传感器, 但是偏转和发送从具有波长  $\lambda_1$ - $\lambda_4$  的传感器 9a-9d 反射的信号至检测信号的询问器 13。

[0054] 为了能够由反射光确定应变值, 图 2 所示的传感器系统需要 Y 连接器 11 和远端光纤端部的光学终端 (未在图中示出), 从而避免来自远端光纤端部的反射。然而, Y 连接器 11 和光纤终端增加了应变感测系统的复杂度, 因此, 避免使用这样的光学部件是有利的。

[0055] 另外, 由反射光确定应变值可能需要光源 12 的较高的光功率输出来补偿 Y 连接器 11 中的光功率损失, 其中由于 Y 连接器的不完全透射特性, 输入光和反射光被衰减。因此, 需要具有与基于反射的应变传感器相比需要更低的输入功率的输入光源 12 的应变感测系统。

[0056] 图 3 示出了根据发明的用于风力涡轮机叶片 5 的光学应变感测系统 19 的实施例。包括 FBG 传感器 9a-9f 的光纤 10 可操作地连接至叶片 5。光纤 14 可粘结到空心叶片结构的外表面或内表面。

[0057] 可替换地, 光纤可以集成到用于制造叶片 5 的复合材料中。光纤 10 可以是单根光纤或者是由多段彼此光学连接的光纤组成。在一个实施例中, 将光由光源 12 引导到叶片远

端的光纤的第一部分 10a 包括传感器 9a-9f, 而不包括任何传感器的光纤的第二部分 10b 将光引导回光探测器 15。

[0058] 就此而论, 由光源 12 发射的光应该被理解为包括可见光或近可见光、紫外 (UV) 光和 / 或红外 (IR) 光。总体上, 光可以被理解为 350nm 至 800nm 的可见或近可见波长范围内的电磁辐射、以及波长范围下至大约 200nm 的 UV 光或近 UV 光、以及波长范围直至 1.7 微米的 IR 光或近 IR 光。

[0059] 光纤 10 可以被理解为薄的、透明的光纤, 通常由玻璃 (氧化硅) 或塑料制成, 以用于通过 (全) 内反射过程沿着其轴透射光。光纤由被包覆层包围的光密芯组成。光纤典型地是多模纤维或单模纤维, 然而也可以提供特殊用途的光纤。

[0060] 传感器 9a-9f 可以是插入光纤 10 中的独立的传感器元件, 或者传感器 9a-9f 可以形成为光纤 10 中的折射率的变化。

[0061] 光纤 10 可以具有输入端 10c 以及输出端 10d, 其可以延伸到风力涡轮机的轮毂 6, 并且分别连接至光源 12 和光探测器 15。

[0062] 输入光学信号源 12 连接至在传感器 9a-9f 上游位置的光纤 5, 并且光探测器 15 连接至在传感器 9a-9f 下游位置的光纤从而测量受传感器 9a-9f 的过滤效应影响的透射光。

[0063] 图 4A 示出了来自光源 12 的输入光学信号的光谱强度分布 420。输入光学信号是宽带信号, 其具有  $W_{ib}$ - $W_{ia}$  的光谱宽度。图 4A 还示出了 FBG 传感器 9a 的透射滤波特性 411。透射特性示出了在波长  $W_1$  处的最小透射率, 以及在波长  $W_1$  附近的滤波凹口 412。坐标系的横轴代表波长, 纵轴代表输入信号或通过 FBG 传感器 9a 透射的信号功率或强度。

[0064] 当 FBG 传感器 9a 被拉伸时, 传感器的最小透射率以及由此的强度凹口 412, 如由偏移的透射特性 413 所示从波长  $W_1$  偏移至波长  $W_{1s}$ 。因此, 通过确定偏移的波长  $W_{1a}$  或者波长偏移  $DW$ , 可以确定 FBG 传感器的应变。

[0065] 图 4B 示出了受多个 FBG 传感器 9a-9b 影响的透射的输出光学信号的所测量的光谱强度分布, 其中第一传感器 9a 导致具有波长  $W_1$  的凹口 412, 第二传感器 9b 导致具有波长  $W_2$  的凹口 412, 以及例如第六传感器 9f 导致具有波长  $W_3$  的凹口 412。

[0066] 光谱强度分布 411、431 中的凹口的偏移  $DW$  可以利用可操作地连接至光纤 10 的输出端的光谱探测器 15 监测透射通过一个或多个 FBG 传感器 9a-9f 的光来确定。

[0067] 因此, 当来自光纤 10 的输出光学信号包括至少一个代表最小光强度的凹口时, 可以通过确定所测量的光谱强度分布中的强度凹口的光谱位置, 即波长  $W_{1s}$  来确立传感器 9a 的应变值。

[0068] 光谱光探测器 15, 例如光谱分析仪或询问器检测不同波长处, 更确切地说, 不同波长的小区间处的光功率, 并且从而能够确定光谱曲线 431。光谱光探测器 15 可以使用色散元件, 例如棱镜, 用来空间分离不同的波长, 使得可以使用不同的光传感器, 例如 CCD 传感器的像素来测量不同的波长。

[0069] 通过在控制单元中处理来自光谱探测器 15 的所测量的输出光学信号, 能够确定其中具有最小光功率的输出光学信号的波长  $W_{1s}$ 。通过将确定的波长  $W_{1s}$  与代表 FBG 传感器没有应变时的凹口波长的标称波长  $W_1$  进行比较, 波长差  $DW$  并且从而在传感器 9a 处的实际应变能够被确定。显然地, 通过确定在不同偏移波长  $W_{1s}$ - $W_{6s}$  处的波长差  $DW$ , 可以确定相应的应变传感器 9a-9f 处的应变值。



[0070] 可以由与探测器 15 集成的处理器或者连接至探测器 15 的例如计算机的处理器来执行来自光谱探测器 15 的所测量的输出光学信号。通过数学分析光谱曲线 411、431 的数据采样,例如通过确定最小强度值、平均强度值、或者使用曲线拟合可以执行凹口 412 的偏移波长  $W1s$  的确定。

[0071] 光纤 10 包括的一个或多个光栅传感器 9a-9f 的光谱工作范围对应于 FBG 传感器的标称波长  $W1-Wn$  所横跨的光谱范围。例如,作为示例,4 个传感器 9a-9d 的光谱工作范围可以为从 1120nm 至 1180nm 的范围,其中单个的传感器的标称波长在光谱工作范围内是等间隔的。

[0072] 在特定应用中,输入信号应为宽带光学信号,其具有比传感器 9a-9f 的光谱工作范围更宽的光谱分布。因此,当光谱工作范围为从 1120nm 到 1180nm 时,宽带输入源 12 可以具有例如从 1000nm-1300nm 的光谱范围。

[0073] 传感器的零应变和最大应变之间的波长差  $DW$  例如可以是 2nm。强度凹口 412 的宽度例如可以是 0.1nm。

[0074] 为了测量光谱强度分布 431 的若干强度凹口 412,光探测器 15 应该具有至少覆盖传感器 9a-9f 的光谱工作范围的光谱探测范围。

[0075] 图 4c 示出了具有强度谱 420 的输入光的示例,其中由于强度的变化 421,强度谱 420 在整个传感器的光谱工作范围并非平坦的。这种输入光的强度变化 421 可能被错误地探测为来自传感器的强度凹口 412,或者可能影响强度凹口 412 的光谱位置的确定。然而,通过将透射的输出光学信号的所测量的光强度与输入光学信号的所测量的光强度进行比较,在应变结果的准确性上,至少部分地消除输入强度变化 421 的负面效应是可能的。

[0076] 例如,输出光学信号和输入光学信号的比较可以包括计算在给定波长处的输出光学信号的强度与相同波长处的输入光学信号的强度的比率。通过这种方式,消除输入强度变化 421 的负面效应,这是因为输入强度变化 421 出现在输入和输出光学信号两者中。输入光的光谱强度分布的测量可以通过测量一部分输入光来确定,所述一部分输入光通过在光透射通过传感器 9a-9f 之前,使来自光源 12 的部分光进行分支来获得,例如通过光纤分束器来获得。可替代地,输入光的光谱强度分布可以在 FBG 传感器仅仅被机械应力轻微地影响的状态下通过探测器 15 来测量。在另一替换中,输入信号的光谱强度分布仅仅被测量一次,例如在输入光源 12 的制备过程中,并且作为数字文件存储,供控制单元使用,以用于计算输出光学信号和储存的输入光学信号的比率。

[0077] FBG 传感器的滤波透射特性 411 通过光纤 10 的折射率的交替或者周期的变化来生成。因此,FBG 传感器 9a 可被视为具有不同透射率的光纤 10 的多个部分。为了获得具有最小透射波长  $W1$ ,例如 1500nm 的 FBG 传感器,相邻的具有不同折射率的光纤部分间的距离应该满足规定的布拉格条件。假设所述部分之一的折射率大约为 1.5,随后部分间的距离,或者对等地,折射率的周期变化的周期,大约是 500nm,即,大约是波长  $W1$  的三分之一。

[0078] 因此,折射率的周期性变化的光栅周期与 FBG 传感器的标称滤波波长  $W1$  有关,并且从而与窄带输入光学信号的波长有关。输入光学信号的波长可以在 300nm 至 6000nm 之间,或者优选地,在 600nm 至 2000nm 之间。因为光栅周期取决于光纤的折射率和其它因素,例如期望的滤波特性,用于根据本发明实施例的 FBG 传感器的光栅周期可以在 100nm 至 5000nm 之间。如上所述,在 100nm 至 5000nm 的范围内的光栅周期可以与在 300nm 至 15000nm

之间的输入光学信号的波长一起使用。

[0079] FBG 传感器以及由此的光栅周期可以由不同的光纤处理来制造。例如, 光纤可以用 UV 光照明来形成光栅。因此, 不同的光栅周期可以根据光纤的光栅处理来选择的。例如, 光纤中的不同的 FBG 传感器可以具有不同的由光纤的处理所产生的光栅周期。

[0080] 因此, 在用于感测应变的方法的实施例以及光学应变感测系统的实施例中, 布拉格光栅传感器的折射率的周期性变化的光栅周期可以在 100nm 至 500nm 的范围内, 优选地, 在 100nm 至 1000nm 的范围内, 或者更优选地, 在 200 至 700nm 的范围内。

[0081] 响应于输入光学信号, 透射的输出光学信号受一个或多个 FBG 传感器的影响。因此, FBG 传感器对输出光学信号的影响至少部分地由 FBG 传感器的光栅周期来确定。例如通过使凹口 412 的凹口 - 宽度与输入光学信号的光谱宽度 ( $\Delta\lambda$ ) 相适应, 即, 通过使凹口 - 宽度足够小来为输入信号的光谱宽度内的大量非重叠的凹口 412 提供空间, 可以选择光栅周期以改善探测器的探测, 所述探测器位于相关的一个或多个 FBG 传感器的下游。

[0082] 例如通过选择光栅周期以最小化波长  $\lambda_1$  处的 FBG 传感器的最小透射率, 也可以改进下游探测器的探测。因此, 如果在最小透射率和在滤波凹口之外的透射率之间有较大差异, 透射光的检测可以更精确。

[0083] 因此, 根据本发明的用于感测应变的方法和光学应变感测系统, 可以选择 FBG 传感器的光栅周期以显著地改进下游探测器 15, 15a-c 的探测。

[0084] 在用于感测应变的方法和应变感测系统中, 其中在根据光栅传感器选择的频带上, 利用光探测器来测量输出光学信号的光强度, 可以根据覆盖不同 FBG 传感器的不同凹口波长  $\lambda_1$  的波长范围给出所述频带。因此, 可以选择不同光栅周期以与光探测器 15, 15a-c 的给定频带相匹配。

[0085] 在用于感测应变的方法和应变感测系统中, 输出光学信号的至少一个凹口的最小光强度至少部分地通过至少基于 FBG 传感器的光栅周期来确定。因此, 凹口的最小光强度可以通过选择给定的光栅周期来确定, 以便获得特定的透射曲线 411。

[0086] 图 5 示出了本发明的实施例, 其中利用单个光谱探测器 15 来测量来自两个或多个光纤 510-512 的输出光学信号。来自多个光纤 510-512 的输出光学信号被组合成单个输出光学信号, 其可以由单个探测器 15 来进行测量。将来自光纤 510-512 的光学信号组合成单个光学信号可以利用 N:1 的光纤耦合器 502 或者其他光纤耦合装置 502 来实现, 例如, 利用用于将光学输出光束聚焦到单个探测器 15 的透镜来实现。为了区分第一光纤 510 和第二光纤 511 的光学输出信号, 可以利用时分交替地将输入到光纤 510-512 的输入光学信号输入。输入信号的时分可以通过使用光开关 501 来实现, 其在第一时间间隔  $T_1$  期间将来自输入源 12 的光切换到第一光纤 510, 并且在下一个时间间隔  $T_2$  期间将来自输入源 12 的光切换到第二光纤 511, 如此等等。可选择地, 输入光学信号的时分可以通过使用单独的可控输入光源 12 以及通过交替地将输入源 12 打开来实现, 所述可控输入光源可操作地连接于每个光纤 510-512。通过暂时地将输入光学信号的时分与探测器 15 或用于处理输出光学信号的控制单元同步, 可以交替地确定来自各个光纤 510-512 的应变值。

[0087] 除了对多个光纤 510-512 采用单个探测器 15 外, 为每个光纤 510-512 采用探测器 15 也是可能的。然而, 在这种情况下, 采用输入光学信号的时分是不必要的。

[0088] 图 6 示出了应变感测系统的实施例, 其中利用光纤分束器 17 将来自光源 12 的光

分送到 3 个光纤 10,510。在光纤的另一端,光学连接至光纤 10,510 的端部的三个光谱光探测器 15a-15c 测量从光纤输出的光的光谱强度分布 431。包括 FBG 应变传感器 9a-9f 的光纤 10,510 固定在风力涡轮机部件 4 上,例如固定在三个涡轮机叶片上。

[0089] 控制单元 16 处理由探测器 15a-15c 提供的测量结果以确定强度凹口 412 的光谱位置以及附接在三个涡轮机叶片上不同位置的 FBG 传感器的应变值。

[0090] 控制单元 16 不需要连接至输入源 12。然而,如果采用控制单元 1 和光学开关 501 之间的同步,则可以在控制单元 16 和输入控制器或开关 501 之间提供连接,从而使其同步。

[0091] 当例如由于风力作用,风力涡轮机叶片弯曲或者伸展时,安装的光纤 510,10 以及传感器 9a-9f 的长度改变,从而透射的光的强度凹口 412 的光谱位置改变。光探测器 15 测量透射光的光谱变化并且为控制单元 16 提供用于确定应变值的所测量的光谱强度曲线的采样数据。

[0092] 在本发明的实施例中,应变感测系统的带宽应该足够大以确定风力涡轮机叶片的结构振动。根据叶片的振动模式,应变感测系统的带宽应该大于 5Hz,优选大于 10Hz,或者大于 20Hz。为了确定更高频率的结构振动和 / 或以更高精度确定结构振动,期望具有 25Hz 或者甚至是 50Hz 的带宽的应变感测系统。因此,如果应变感测系统的带宽大于 20Hz,可以测定具有至少 10Hz 振动频率的结构振动。具有高带宽,例如大于 20Hz 的应变感测系统可以通过使用具有高光学灵敏度的探测器 15,或者通过使用具有高输出光功率的光学输入源 12 来获得。具有 100nW(0.1 微瓦)光功率的输入光源 12 对确定具有合理带宽的应变值是足够的。然而,使输入功率增加还能够使得应变感测系统的设计具有较高的带宽,因此,对于高带宽系统要求 10 或 100 微瓦的输入功率。

[0093] 来自控制单元 16 的应变值可以用于整个风力涡轮机的控制,以便减少部件的维护费用以及增加风力涡轮机的可靠性,例如,如果应变值达到很高的水平,则可以控制风力涡轮机以减少应变值,或者甚至停止风力涡轮机。

[0094] 应变值可以用于至少一个风力涡轮机叶片的桨距控制和 / 或风力涡轮机的发电控制。因此,能够降低风力涡轮机部件的应变,例如通过使风力涡轮机叶片或多或少偏离风以及在强阵风期间减少风力涡轮机的发电。类似地,桨距控制可以用于优化发电,其通过调整桨距直到一个或多个风力涡轮机叶片达到一定的压力来实现,其中压力由测得的应变值来确定。

[0095] 尽管结合具体实施例已经描述了本发明,但并不局限于此处所阐述的特定形式。相反地,本发明的范围仅由所附的权利要求进行限定。在权利要求中,术语“包括”并不排除其它元件或步骤的存在。此外,尽管单独的特征被包括在不同的权利要求中,但是可以有利地组合这些特征,而且不同权利要求的内容并不意味着特征的组合是不可行和 / 或不利的。另外,单数的引用并不排除复数。因此,对“一个”,“第一”,“第二”等的引用并不排除复数个。此外,权利要求的附图标记不应理解为限定范围。

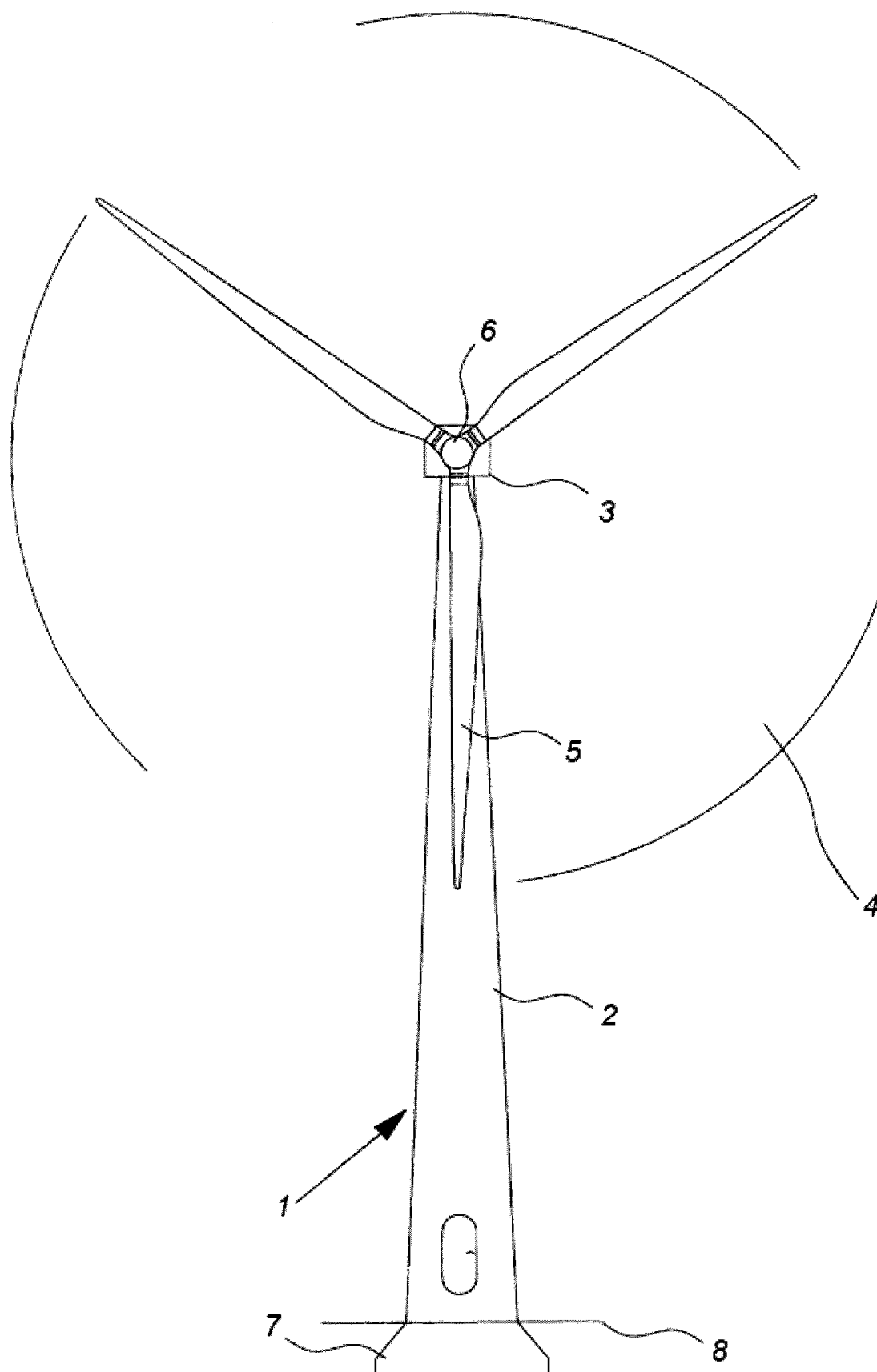


图 1

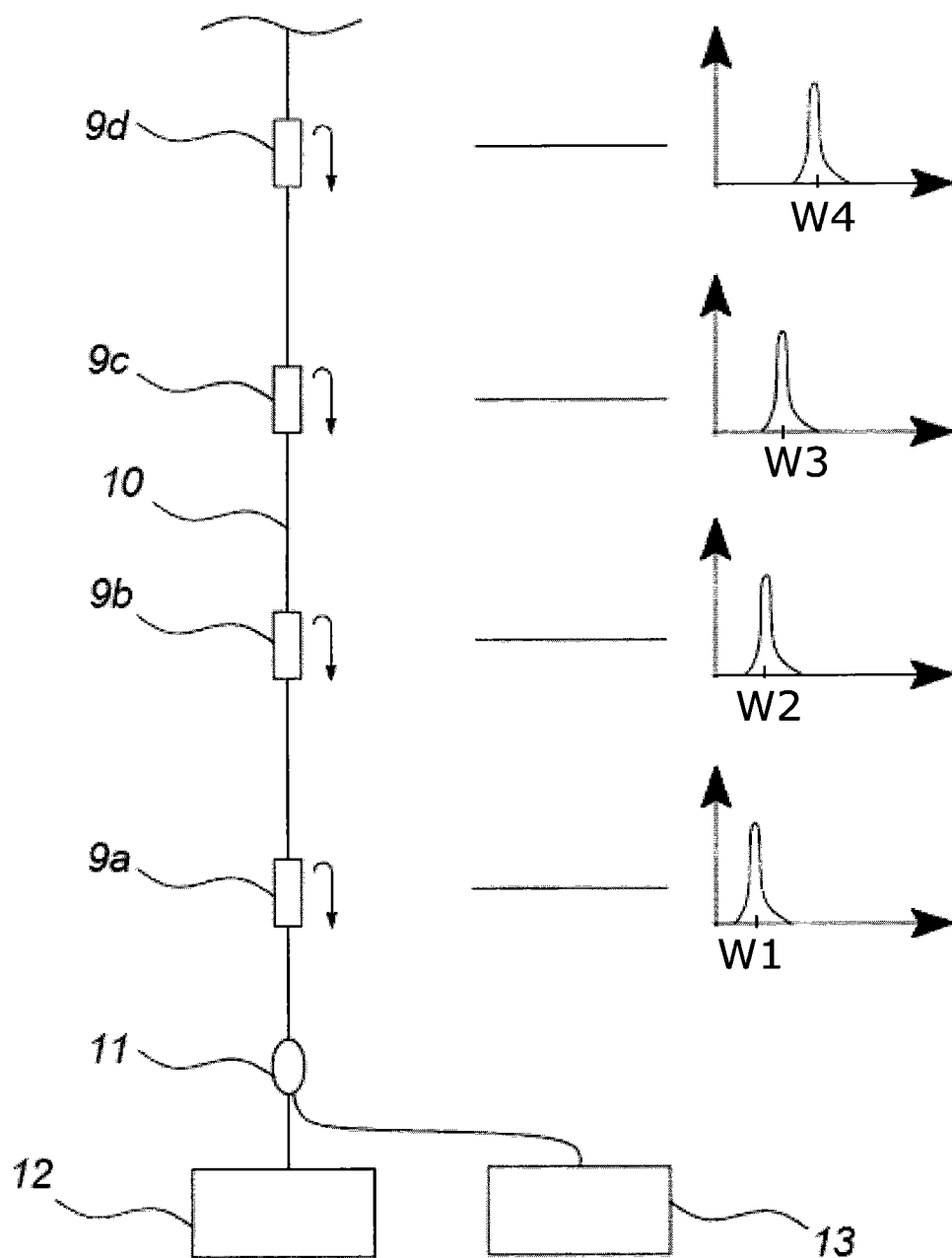


图 2A

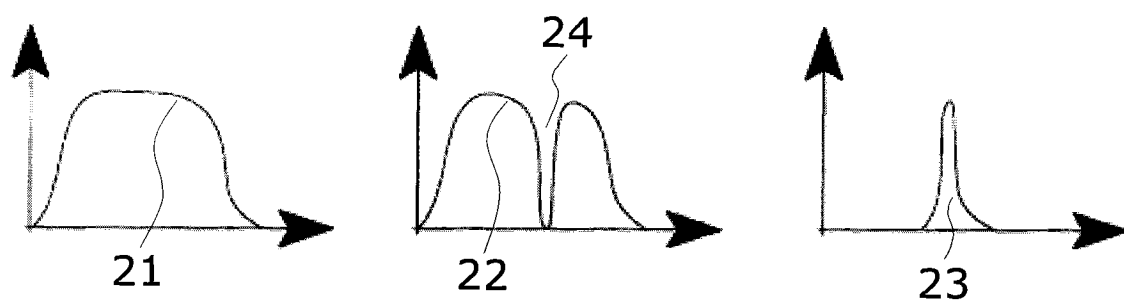


图 2B

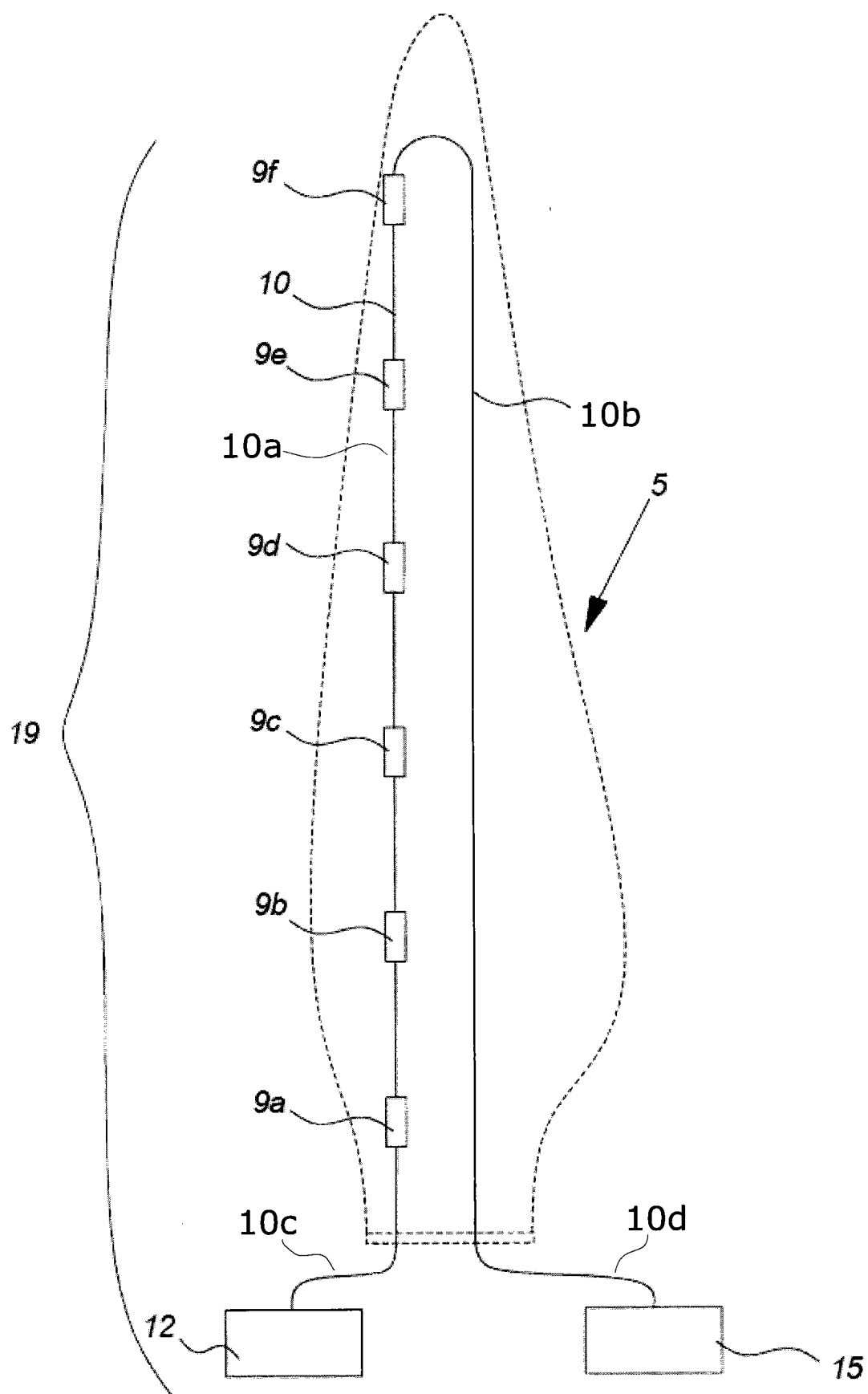


图 3

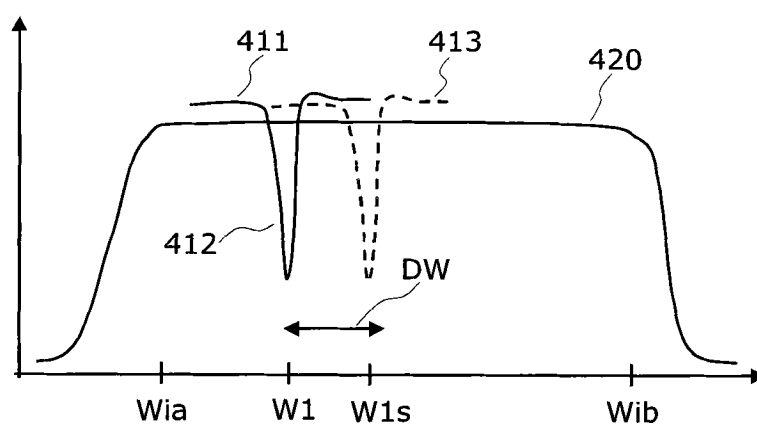


图 4A

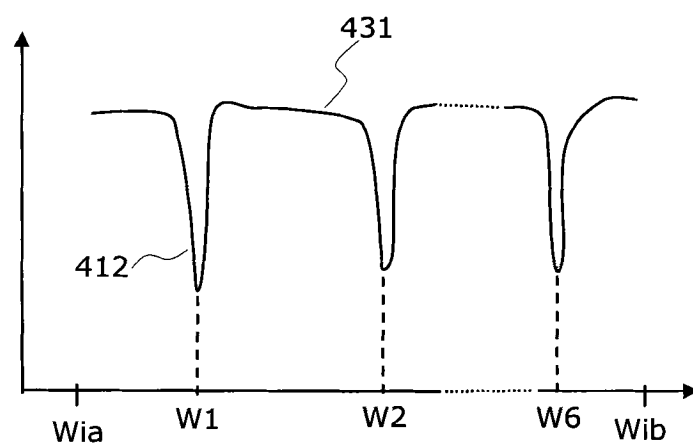


图 4B

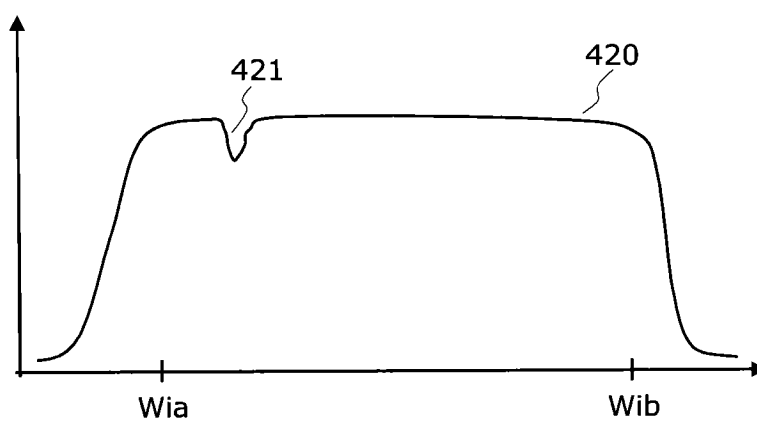


图 4C

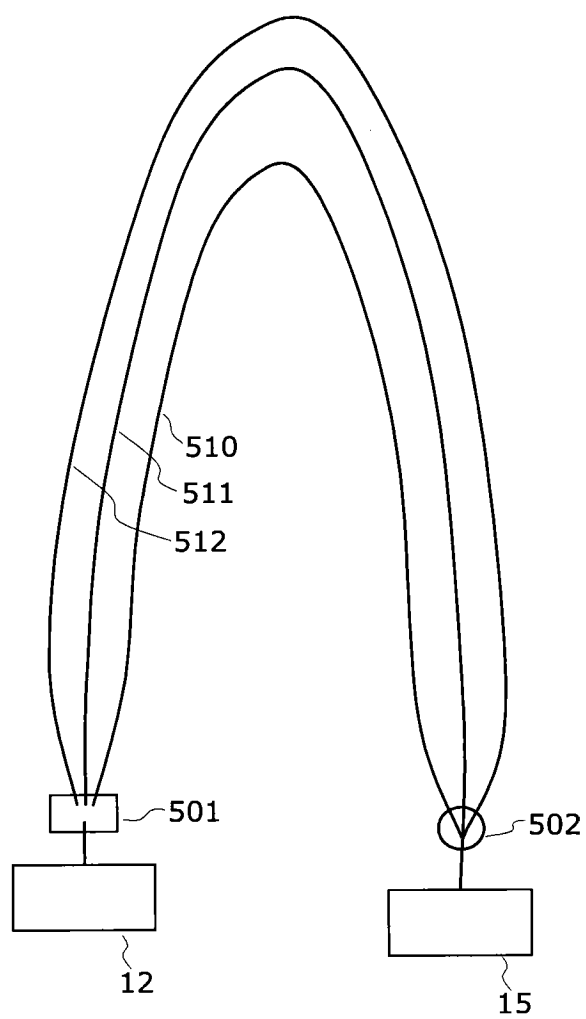


图 5



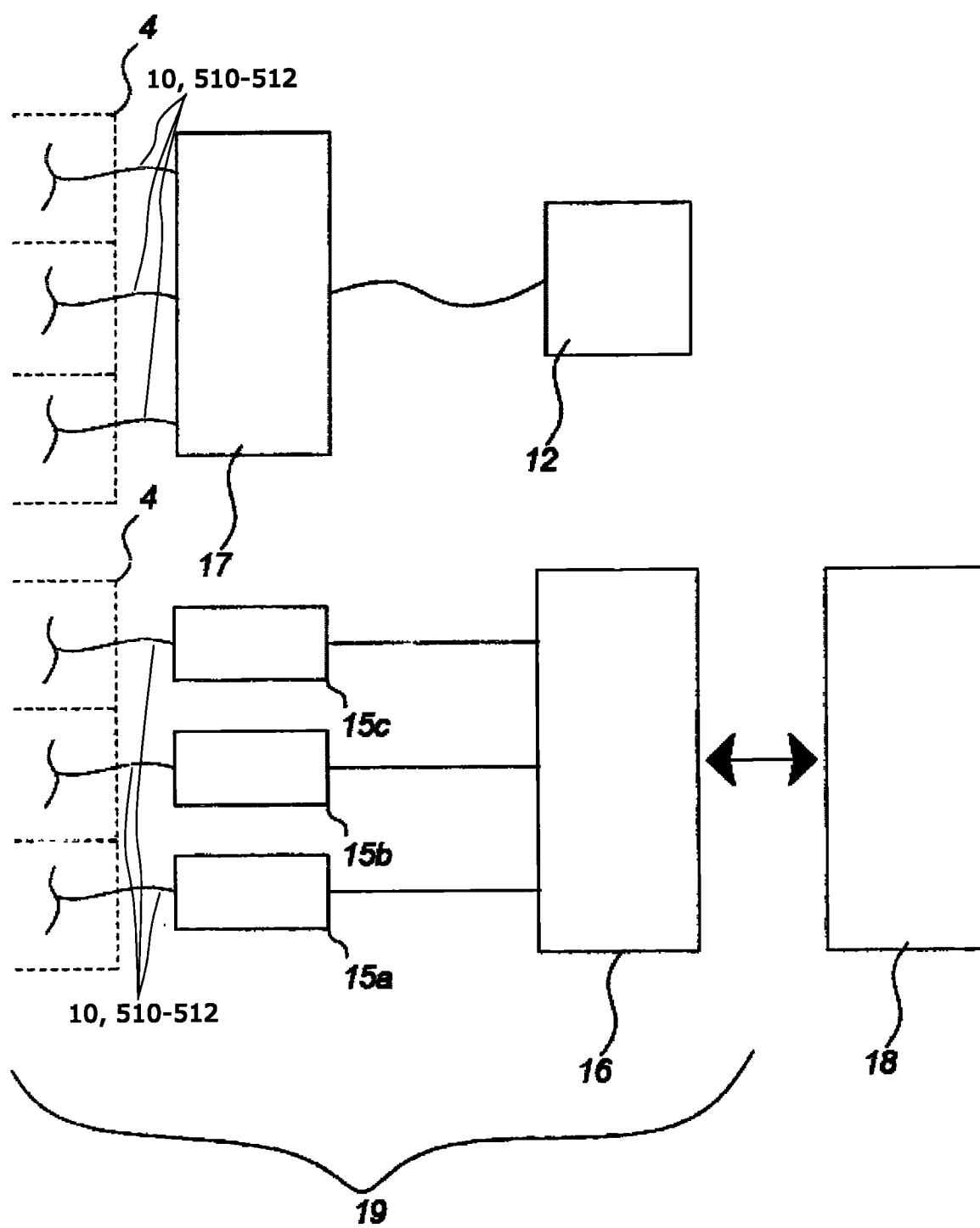


图 6