



(10) 授权公告号 CN 110140063 B

(45) 授权公告日 2023. 10. 13

(21) 申请号 201780081807.4

(22) 申请日 2017.11.21

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110140063 A

(43) 申请公布日 2019.08.16

(30) 优先权数据
62/428,122 2016.11.30 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2019.07.01

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/US2017/062714 2017.11.21

(87) PCT国际申请的公布数据
W02018/125438 EN 2018.07.05

(73) 专利权人 布莱克莫尔传感器和分析有限责
任公司
地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 斯蒂芬·C·克劳奇
兰迪·R·雷贝尔 詹姆斯·柯里
特伦顿·伯格

(74) 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限
责任公司 11219
专利代理师 周亚荣 邓聪惠

(51) Int.Cl.
G01S 17/08 (2006.01)
G01S 7/481 (2006.01)
G01S 17/88 (2006.01)

(56) 对比文件
US 2016245903 A1, 2016.08.25
CN 105425245 A, 2016.03.23
US 9383753 B1, 2016.07.05
审查员 白渚铨

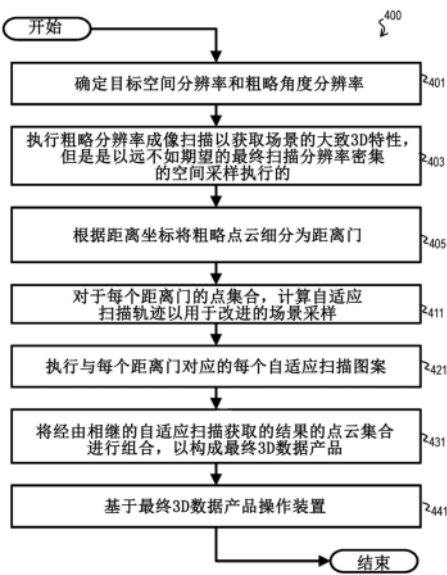
权利要求书2页 说明书17页 附图15页

(54) 发明名称

利用光学测距系统进行自适应扫描的方法和系统

(57) 摘要

利用激光扫描仪进行自适应扫描的技术包括：以粗略角度分辨率获得距离测量值，以及确定距离门子集和特征距离。精细角度分辨率基于该特征距离和目标空间分辨率。如果精细角度分辨率比粗略角度分辨率精细，则基于第一角度分辨率针对角度宽度子集的水平片段确定最小竖向角度和最大竖向角度。然后操作扫描激光测距系统以在最小竖向角度与最大竖向角度之间以片段中的第二角度分辨率获得第二距离测量值。在一些实施方式中，对于距离门子集中的每个水平片段，使用针对该片段的最小竖向角度和最大竖向角度重复扫描。



1. 一种光检测和测距LIDAR系统,包括:
激光源,所述激光源被配置成生成光学信号;
调制器,所述调制器被配置成调制所述光学信号的频率或相位中的至少一种;
一个或多个扫描光学器件,所述一个或多个扫描光学器件被配置成传输经调制的光学信号;以及
处理电路,所述处理电路被配置成:
使用粗略第一角度分辨率,操作所述一个或多个扫描光学器件,以在所述一个或多个扫描光学器件的视场中获得多个第一距离测量值;
使用与多个距离门中的特定距离门对应的一个或多个第一距离测量值以及目标空间分辨率,向所述多个距离门中的所述特定距离门分配精细第二角度分辨率,
其中,每个距离门由不同的非重叠的间隔限定,所述间隔由不同的非重叠的近距离和远距离给出,
其中,分配精细第二角度分辨率进一步包括:使用所述多个距离门中的所述特定距离门中的特征距离;
使用分配给所述多个距离门中的每个距离门的相应的所述精细第二角度分辨率来操作所述一个或多个扫描光学器件,以获得多个第二距离测量值;以及
使用所述多个第二距离测量值来控制车辆。
2. 根据权利要求1所述的LIDAR系统,其中,所述第一角度分辨率大于目标角度分辨率。
3. 根据权利要求1所述的LIDAR系统,其中,所述处理电路被配置成:
操作所述扫描光学器件,以使用锯齿扫描轨迹进行扫描来获得所述多个第一距离测量值或所述多个第二距离测量值中的至少一种。
4. 根据权利要求1所述的LIDAR系统,其中,所述粗略第一角度分辨率为所述精细第二角度分辨率的十倍至一百倍。
5. 根据权利要求1所述的LIDAR系统,其中,所述处理电路被配置成:
使用所述多个距离门中的所述特定距离门的特征距离来确定用于获得所述多个第二距离测量值的参考路径延迟,并且按照所述参考路径延迟来延迟被用于获得所述多个第二距离测量值的参考信号。
6. 根据权利要求1所述的LIDAR系统,其中,所述处理电路被配置成:
操作所述一个或多个扫描光学器件,以对于获得所述多个第二距离测量值,避免扫描不具有返回的角度空间。
7. 根据权利要求1所述的LIDAR系统,还包括检测器阵列,所述检测器阵列被配置成接收对由所述一个或多个扫描光学器件传输的经调制的光学信号为响应性的返回信号,
其中,所述处理电路被配置成使用所述返回信号确定至少一个第二距离测量值。
8. 一种用于操作LIDAR系统的方法,所述方法包括:
使用粗略第一角度分辨率操作一个或多个扫描光学器件,以获得所述一个或多个扫描光学器件的多个第一距离测量值;
使用与多个距离门中的特定距离门对应的一个或多个第一距离测量值以及目标空间分辨率,向所述多个距离门中的所述特定距离门分配精细第二角度分辨率,
其中,每个距离门由不同的非重叠的间隔限定,所述间隔由不同的非重叠的近距离和

远距离给出，

其中，分配精细第二角度分辨率进一步包括使用所述多个距离门中的所述特定距离门中的特征距离，

使用分配给所述多个距离门中的所述特定距离门中的每个的相应的所述精细第二角度分辨率来操作所述一个或多个扫描光学器件，以获得多个第二距离测量值；以及使用所述多个第二距离测量值来控制车辆。

9. 根据权利要求8所述的方法，其中，所述第一角度分辨率大于所述目标空间分辨率。

10. 根据权利要求8所述的方法，还包括：

使用视场中的对象的尺寸的预定值或者预定分数中的至少一个来确定所述目标空间分辨率，所述预定值小于或者等于十厘米。

11. 根据权利要求8所述的方法，其中，操作所述一个或多个扫描光学器件以获得所述多个第一距离测量值或所述多个第二距离测量值中的至少一种包括：

操作所述一个或多个扫描光学器件以使用锯齿扫描轨迹进行扫描。

12. 根据权利要求8所述的方法，还包括：

使用所述多个距离门中的特定距离门的特征距离来确定用于获得所述多个第二距离测量值的参考路径延迟，

其中，操作所述一个或多个扫描光学器件包括：按照所述参考路径延迟来延迟由所述一个或多个扫描光学器件使用以获得所述多个第二距离测量值的参考信号。

13. 根据权利要求8所述的方法，其中，操作所述一个或多个扫描光学器件以获得所述多个第二距离测量值包括：

操作所述一个或多个扫描光学器件，以避免扫描不具有返回的角度空间，以及

其中，操作所述一个或多个扫描光学器件，以获得所述多个第一距离测量值包括：

使用所述粗略第一角度分辨率作为垂直角度分辨率，以及使用与所述粗略第一角度分辨率不同的第三角度分辨率作为水平角度分辨率。

14. 根据权利要求8所述的方法，其中，

所述多个距离门中的所述特定距离门被关联于所述一个或多个扫描光学器件的视场的角度空间的一部分，并且

所述一个或多个距离测量值大于被分配给所述特定距离门的最小距离并且小于被分配给所述距离门的最大距离。

利用光学测距系统进行自适应扫描的方法和系统

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请根据35U.S.C.§119(e)要求于2016年11月30日提交的临时申请62/428,122的权益,其全部内容通过引用并入本文中,正如本文中充分阐述的。

[0003] 政府利益声明

[0004] 本发明是在政府支持下根据陆军部授予的协议W9132V-14-C-0002完成的。政府拥有本发明的某些权利。

背景技术

[0005] 通常由助记符LIDAR述及的、用于光检测和测距的光学距离检测用于从测高到成像再到避免碰撞的各种应用。与传统的微波测距系统诸如无线电波检测和测距(RADAR)相比,LIDAR提供具有较小光束大小的更精细的标度距离分辨率。光学距离检测可以利用若干不同的技术来完成,所述技术包括:基于光学脉冲到对象的往返行程行进时间的直接测距,和基于传输的啁啾光学信号与从对象散射的返回信号之间的频率差的啁啾检测,以及基于可与自然信号区分的一系列单频相位变化的相位编码检测。

[0006] 为了实现可接受的距离准确度和检测灵敏度,直接的长距离LIDAR系统使用具有低脉冲重复率和极高的脉冲峰功率的短脉冲激光器。高脉冲功率可能导致光学部件的快速劣化。啁啾和相位编码的LIDAR系统使用具有相对低的峰光学功率的长光学脉冲。在该配置下,距离准确度随着啁啾带宽或相位码的长度而增加而不是随着脉冲持续时间而增加,因此仍然可以获得优异的距离准确度。

[0007] 已经使用宽带射频(RF)电信号调制光学载波来实现有用的光学啁啾带宽。啁啾LIDAR的近期进展包括使用相同的调制光学载波作为参考信号,该参考信号与返回信号在光学检测器处组合以在结果的电信号中产生相对低的拍频,该拍频与参考信号和返回光学信号之间的频率或相位差成比例。这种在检测器处对频率差的拍频检测称为外差检测。它具有本领域已知的若干优点,诸如使用现成且便宜可用的RF部件的优点。美国专利号7,742,152中描述的近期的成果示出了一种新颖的较简单的光学部件布置,该布置将从传输的光学信号分离的光学信号作为参考光学信号。该布置在该专利中称为零差检测。

[0008] 还已使用了具有调制到光学载波上的相位编码微波信号的LIDAR检测。该技术依赖于使返回信号中的一系列特定频率的相位(或相位变化)与传输信号中的相关。与相关峰相关联的时间延迟通过光在介质中的速度与距离有关。该技术的优点包括需要较少的部件,以及使用为相位编码微波和光学通信开发的大规模生产的硬件部件。

发明内容

[0009] 本发明人已经认识到,为了在比当前方法短的时间内以目标空间分辨率扫描对象,期望作出改变;并且,通过光学测距系统在与期望对象相关联的角度范围内集中扫描,称为自适应扫描,可以实现该目标的进步。提供了利用扫描激光测距系统进行自适应扫描的技术。

[0010] 在第一组实施方式中,一种操作扫描激光测距系统的方法包括:针对在扫描激光测距系统的视野内处于目标最大距离处的对象的距离测量值确定目标空间分辨率,以及确定用于系统的使系统产生目标最大距离处的粗略空间分辨率的粗略角度分辨率,其中,粗略空间分辨率大于目标空间分辨率。该方法还包括操作扫描激光测距系统,以在第一维度上以基于粗略角度分辨率的粗略的第一维度角度分辨率在第一维度粗略开始角度与第一维度粗略停止角度之间以及在第二维度上以基于粗略角度分辨率的粗略的第二维度角度分辨率在粗略的第二维度开始角度与粗略的第二维度停止角度之间,获得粗略的多个距离测量值。此外,该方法包括确定粗略的多个距离测量值的距离门(gate,选通)子集,其中,距离门子集中的每个距离测量值大于或等于子集最小距离并且小于子集最大距离。此外,该方法包括基于距离门子集确定子集最小距离与子集最大距离之间的特征距离。此外,该方法包括基于特征距离和目标空间分辨率确定精的细的第一维度角度分辨率和精细的第二维度角度分辨率。更进一步,如果精细的第一维度角度分辨率比粗略的第一维度角度分辨率精细,或者如果精细的第二维度角度分辨率比粗略的第二维度角度分辨率精细,则该方法还包括下述步骤。基于粗略的第一维度角度分辨率确定子集第一维度角度筐(bin,直条、组界、容器、单元、组距)大小。确定由于子集第一维度角度筐大小分离的精细的第一维度开始角度和精细的第一维度停止角度。确定粗略的多个距离测量值的子集的片段(slice,切片、分割部、截片、时间片),其中片段中的每个距离测量值都在从精细的第一维度开始角度到精细的第一维度停止角度的子集中。也确定了片段中的最小第二维度角度和片段中的最大第二维度角度。然后,操作扫描激光测距系统针对片段在最小第二维度角度与最大第二维度角度之间以片段中的精细的第一维度角度分辨率和精细的第二维度角度分辨率获得精细的多个距离测量值。在第一组的一些实施方式中,第一维度是水平的,而第二维度是竖向的。

[0011] 在第一组的一些实施方式中,在距离门子集中的多个连续片段内重复步骤。

[0012] 在第一组的一些实施方式中,子集水平角度筐大小近似等于最小竖向角度处的第一水平角度分辨率的一半。

[0013] 在第二组实施方式中,系统包括激光源、分光器、电波形发生器、两个调制器以及处理器。分光器被配置为将来自激光源的光学信号分成传输路径光学信号和参考路径光学信号。电波形发生器被配置为在从处理器接收的数据中指示的时间产生用于激光测距的电波形。第一光学调制器被配置为基于来自电波形发生器的第一输出在传输路径光学信号上施加第一光学波形。不同的第二光学调制器被配置为基于来自电波形发生器的第二输出在参考路径光学信号上施加第二光学波形。处理器被配置为发送指示来自电波形发生器的第一输出的第一时间和来自电波形发生器的第二输出的第二时间的数据。

[0014] 在第二组的一些实施方式中,第二时间相对于第一时间延迟有利于测量特征距离的参考路径延迟时间。

[0015] 在其他实施方式中,系统或设备或计算机可读介质被配置为执行上述方法的一个或多个步骤。

[0016] 其他方面、特征和优点将通过以下具体实施方式而明显,该具体实施方式简单地通过示出包括预期用于实现本发明的最佳模式的多个特定实施方式和实现。其他实施方式也能够具有其他和不同的特征和优点,并且可以在各种明显的方面中修改其若干细节,所

有这些都不脱离本发明的精神和范围。因此,附图和实施方式本质上被认为是说明性的,而不是限制性的。

附图说明

[0017] 在附图的图中,通过实施例而非通过限制的方式示出了实施方式,其中类似的附图标记指代类似的元件,并且其中:

[0018] 图1A是示出了根据实施方式的示例性光学啁啾距离测量值的图的集合;

[0019] 图1B是示出了根据实施方式的由啁啾产生的、表示了距离的示例性拍频测量值的图;

[0020] 图2A和图2B是示出了根据各种实施方式的高分辨率LIDAR系统的示例性部件的方框图;

[0021] 图3A是示出了根据实施方式的待利用扫描激光测距系统扫描的示例性场景的图像;

[0022] 图3B是示出了根据实施方式的图3A中的场景的待自适应扫描的示例性水平部分的图像;

[0023] 图3C是示出了根据实施方式的用于图3B中明显的特征的角度空间中的示例集合或区域的方框图;

[0024] 图3D是示出了根据实施方式的对图3D中描绘的特征的示例性粗略角度扫描的方框图;

[0025] 图3E是示出了根据实施方式的用于图3D中描绘的特征的距离门的距离块内的角度扫描空间中被扫描范围的示例性连续区域的方框图;

[0026] 图4是示出了根据实施方式的用于利用扫描激光测距系统进行自适应扫描的示例性方法的流程图;

[0027] 图5是以俯视图和成角度立体图示出了根据实施方式的到反向散射返回的示例性距离的图像。

[0028] 图6A是示出了根据实施方式的用于到来自图5的成角度立体图中的反向散射返回的距离的示例距离门的图像;

[0029] 图6B至图6E是根据实施方式的扫描角度空间中的遮蔽物(mask,时标、遮障),其示出了图6A中所示的四个距离门的每个距离门中的示例性返回;

[0030] 图7A和图7B是示出了根据实施方式的分别针对不同特征距离(或不同目标空间分辨率)的图6E中描绘的距离门的一部分中的多个连续水平片段中的示例性自适应扫描图案的图;

[0031] 图8是示出了可以在其上实施本发明的实施方式的计算机系统的方框图;

[0032] 图9是示出了可以在其上实施本发明的实施方式的芯片集合的方框图;以及

[0033] 图10是示出了根据实施方式的场景的粗略角度扫描中的距离的示例性直方图的图。

具体实施方式

[0034] 描述了用于利用激光距离检测系统进行自适应扫描的方法和设备以及系统和计

计算机可读介质。在以下描述中,出于解释的目的,阐述了许多具体细节以便提供对本发明的透彻理解。然而,对于本领域的技术人员而言明显的是,可以在没有这些具体细节的情况下实践本发明。在其他情况下,以方框图形式示出了公知的结构和装置,以避免不必要地模糊本发明。

[0035] 尽管阐述宽范围的数值范围和参数是近似值,但是尽可能精确地报告了具体的非限制性实施例中阐述的数值。然而,任何数值固有地包含某些误差,这些误差必然是由于在撰写本文时在其各自的测试测量中发现的标准偏差引起的。此外,除非上下文另有说明,否则本文呈现的数值具有由最低有效数字给出的暗示性精度。因此,值1.1暗示了从1.05到1.15的值。术语“约”用于表示以给定值为中心的较宽范围,并且除非从上下文另有说明,否则暗示在最低有效数字周围的较宽范围,诸如“约1.1”暗示从1.0到1.2的范围。如果最低有效数字不清楚,则术语“约”暗含因子2,例如,“约X”暗示从0.5X到2X的范围内的值,例如,约100暗示从50到200的范围内的值。此外,本文公开的所有范围应被理解为包涵其中包括的任何和所有子范围。例如,“小于10”的范围可以包括在最小值零与最大值10(含)之间的任何和所有子范围,即,具有等于或大于0的最小值以及等于或小于10的最大值的任何和所有子范围,例如1至4。

[0036] 下面在线性频率调制光学信号的背景下描述本发明的一些实施方式,但是不需要使用频率调制光学信号。在其他实施方式中,使用幅度脉冲或相位编码的光学信号。在有限水平角度扫频的静止扫描激光扫描的背景下描述了实施方式。在其他实施方式中,使用具有较窄或较宽的水平角度扫频的移动激光距离检测系统,包括全360度水平角度扫频。依据竖向锯齿扫描轨迹描述了许多实施方式。然而,在其他实施方式中,使用了竖向列顺序扫描轨迹,或水平行顺序扫描轨迹,或水平锯齿扫描轨迹,或某种组合。例如,竖向锯齿投射(projection,投影)与具有下述硬件配置的实施方式一起使用:该硬件配置具有用于水平运动(慢)的旋转台以及用于竖向(快速)的检流计扫描镜。另一个实施方式使用2轴快速转向镜(在二维中快速扫描,有限FOV)或者2轴平移倾斜单元(在2维中较慢运动,巨大FOV)或某种组合。

[0037] 1. 啁啾检测概述

[0038] 图1A是示出了根据实施方式的示例性光学啁啾距离测量值的图集合110、120、130、140。水平轴112对于所有四个图都是相同的,并且以大约毫秒(ms, $1\text{ms}=10^{-3}$ 秒)的任意单位指示时间。图110表示了用作传输光学信号的光束的功率。图110中的竖向轴114以任意单位表示传输信号的功率。迹线116表示功率在有限的脉冲持续时间内起作用, τ 在时间0处开始。图120表示传输信号的频率。竖向轴124表示以任意单位传输的频率。迹线126表示脉冲的频率在脉冲的持续时间 τ 内从 f_1 增加到 f_2 ,且因此具有带宽 $B=f_2-f_1$ 。频率变化率为 $(f_2-f_1)/\tau$ 。

[0039] 在图130中描绘了返回信号,和图120中的一样,其具有表示时间的水平轴112和表示频率的竖向轴124。图120的啁啾126也在图130上被绘制为虚线。第一返回信号由迹线136a给出,第一返回信号仅是强度减弱且延迟 Δt 的传输参考信号(未示出)。当在覆盖2R的距离后从外部对象接收返回信号,其中R是到对象的距离,返回信号在由 $2R/c$ 给出的延迟时间 Δt 开始,其中c是光在介质中的速度(大约 3×10^8 米每秒, m/s)。在这段时间内,频率所改变的量取决于距离,称为 f_R ,并且由频率变化率乘以延迟时间给出。这由等式1a给出。

[0040] $f_R = (f_2 - f_1) / \tau * 2R / c = 2BR / c\tau$ (1a)

[0041] 在被称为去啁啾的时域混合操作中,通过传输信号126与返回信号136a之间的频率差来测量 f_R 的值。所以距离R由等式1b给出。

[0042] $R = f_R c\tau / 2B$ (1b)

[0043] 当然,如果在脉冲完全传输之后返回信号到达,即,如果 $2R/c$ 大于 τ ,则等式1a和1b无效。在这种情况下,也称为本地振荡器(L0)的参考信号被延迟已知量或固定量,以确保返回信号与参考信号重叠。使参考信号的固定的或已知的延迟时间 Δt_{L0} 乘以光的速度 c ,以给出附加距离,该附加距离被加到根据等式1b计算出的距离。虽然绝对距离可能由于光在介质中的速度的不确定性而有偏差,但这是几乎恒定的误差,并且基于频率差的相对距离仍然是非常精确的。

[0044] 在一些情况下,由传输光束照射的光斑在不同的距离处遇到两个或更多个不同的散射体,诸如半透明对象的前面和后面,或者距LIDAR处于变化距离的对象的较近和较远的部分,或者被照射的斑点内的两个分离的对象。在这样的情况下,还将接收强度减弱且延迟不同的第二信号,在图130中由迹线136b表示。这将具有不同的 f_R 测量值,其使用等式1b给出不同的距离。在一些情况下,接收到多个返回信号。

[0045] 图140描绘了第一返回信号136a与参考啁啾126之间的差频 f_R 。和图1A中的所有其他对准的图一样,水平轴112表示时间,并且竖向轴134表示在更加扩展尺度上的频率差。迹线146描绘了在传输或参考啁啾期间测量的恒定频率 f_R ,其表示由等式1b给出的特定范围。第二返回信号136b如果存在的话将在去啁啾期间产生不同的、较大的 f_R 值(未示出);并且因此,使用等式1b得到更大的范围。

[0046] 用于去啁啾的常用方法是将参考光学信号和返回光学信号都引导到同一光学检测器。检测器的电输出由拍频支配,该拍频等于或以其他方式取决于会聚在检测器上的两个信号的频率、相位和幅度的差。该电输出信号的傅里叶变换将在拍频处产生峰。该拍频在兆赫(MHz, 1MHz = 10^6 赫兹 = 每秒 10^6 个周期)的射频(RF)范围内,而不是在太赫兹(THz, 1THz = 10^{12} 赫兹)的光学频率范围内。这样的信号易于通过普通且便宜的RF部件处理,诸如在微处理器上运行的快速傅里叶变换(FFT)算法或专门构建的FFT或其他数字信号处理(DSP)集成电路。在其他实施方式中,返回信号与充当本地振荡器(相对于作为本地振荡器的啁啾)的连续波(CW)音混合。这导致检测到的信号本身是啁啾(或者不论传输任何波形)。在这种情况下,检测到的信号将在数字域中经历匹配滤波,如Kachelmyer 1990中所述的。缺点是数字器带宽要求通常较高。在其他方面保留了相干检测的积极方面。

[0047] 图1B是示出了根据实施方式的由去啁啾产生的、表示距离的拍频的示例性测量值的图。水平轴152表示以兆赫为单位的频率;并且竖向轴表示以分贝(dB,以dB为单位的功率 = $20\log(I_R/I_T)$)为单位的关于传输功率密度 I_T 的返回信号功率密度 I_R 。迹线156是由光学检测器输出的电信号的傅立叶变换,诸如由FFT电路产生的;并且基于Adany等人2009年公布的数据绘制的数据。峰的水平位置使用等式1b给出表示距离的 f_R 。另外,峰的其他特性可以用于描述返回信号。例如,峰处的功率值由迹线156的最大值表征,或者更通常地,由峰(图1B中约为-31dB)与峰的肩部处的本底噪声(图1B中约为-50dB)之间的差值157(图1B中约为19dB)表征;并且,峰的宽度由半最大值(FWHM)处的频率宽度158(图1B中约0.08MHz)表征。如果存在多个可辨别的返回,则在光学检测器的电输出的FFT中将存在多个峰,可能具

有多个不同的功率水平和宽度。可以使用任何方法自动识别迹线中的峰,并通过位置、高度和宽度表征那些峰。例如,在一些实施方式中,使用了通过可从马萨诸塞州纳蒂克的MATHWORKS™的MTLAB™获得的MATLAB——信号处理工具筐进行的FFTW或峰检测。还可以使用依赖于CUDA中的FFTW和可从加利福尼亚州圣克拉拉市的NVIDIA™获得的CUDA™中的定制峰检测的定制实现。已经在现场可编程门阵列(FPGA)上编程了定制实施。常用的算法是对距离轮廓设阈值并且运行质心算法、峰拟合算法(3点高斯拟合)或用于一些函数(如高斯函数)的峰的非线性拟合,以更精确地确定峰的位置。

[0048] 在插入 t_i 之后使用不同的脉冲在移动LIDAR系统的不同角度或平移位置处进行新的独立测量,使得脉冲速率(PR)由表达式 $1/(\tau+t_i)$ 给出。帧是距离的二维图像,其中图像的每个像素表示到由传输光束观察的对象的不同部分的距离。对于每个为1000个水平角度乘以1000个竖向角度的由传输信号集合的帧,帧包括 10^6 个像素,并且帧速率(FR)是脉冲速率的 10^{-6} ,例如,是 $10^{-6}/(\tau+t_i)$ 。

[0049] 2. 啁啾检测硬件概述

[0050] 为了描绘如何实施距离检测方法,描述了一些通用硬件方法。图2A和图2B是示出了根据各种实施方式的高分辨率LIDAR系统的示例性部件的方框图。在图2A中,激光源212发射载波201,在调制器214中基于来自RF波形发生器215的输入对该载波进行幅度或频率或相位调制或某种组合,以产生具有脉冲的光学信号203,该脉冲具有带宽B和持续时间 τ 。在一些实施方式中,RF波形发生器215由来自处理系统250的命令进行软件控制。分光器216将调制的光学波形分成具有光学信号203的大部分能量的传输信号205以及具有少得多的能量的量的参考信号207,尽管如此,该参考信号仍足以与从目标(未示出)散射的返回光291产生良好的外差或零差干涉。在一些实施方式中,使用扫描光学器件218在多个角度上扫描传输光束,以描出其路径中的任何对象的轮廓。参考信号在参考路径220中被充分延迟以与散射光一起到达检测器阵列230。在一些实施方式中,分光器216在调制器214的上游,并且参考光束207是未调制的。在一些实施方式中,参考信号是使用新激光器(未示出)独立生成的,并且使用参考路径220中的单独调制器(未示出)和来自发生器215的RF波形单独地调制。在一些实施方式中,如下面参考图2B所述的,来自单个激光源212的输出在参考路径220中被独立地调制。在各种实施方式中,从不太灵活到更加灵活的方法,通过下述方式使参考与散射或反射场一起到达:1)在场景中放置反射镜,以将一部分传输光束反射回检测器阵列处,使得路径长度很好地匹配;2)使用光纤延迟来紧密匹配路径长度并用检测器阵列附近的光学器件来传播参考光束,如图2A所建议的,在有或没有路径长度调整的情况下,补偿在特定距离内观察到或预期的相位差;或者,3)使用频移装置(声光调制器)或者本地振荡器波形调制的时间延迟来产生单独的调制,以对路径长度不匹配进行补偿;或者某种组合,如下面参考图2B更详细描述。在一些实施方式中,目标足够接近并且脉冲持续时间足够长使得在没有延迟的情况下返回与参考信号充分重叠。在一些实施方式中,参考信号207b与返回信号291在一个或多个光学混合器232处光学混合。在各种实施方式中,对于每个扫描光束,目标的多个部分将相应的返回光291信号散射回检测器阵列230,产生基于由多个光束和多个返回照射的目标的相应多个部分的多个距离的点云。

[0051] 检测器阵列230是单个光学检测器或平衡对光学检测器或这种光学检测器的1D或2D阵列,其被布置在与来自目标的返回光束291大致垂直的平面中。接口模式的相位或幅度

或某种组合由获取系统240针对每个检测器在脉冲持续时间 τ 期间多次记录。每个脉冲持续时间的时态样本的数量影响下行(down-range, 向下范围)程度。该数量通常是基于脉冲重复率和可用相机帧速率选择的实际考虑因素。帧速率是采样带宽, 通常称为“数字器频率”。基本上, 如果在脉冲期间利用Y范围宽度的分辨率筐收集X个检测器阵列帧, 则可以观察到X*Y距离程度。所获取的数据可用于处理系统250, 诸如下文参考图8描述的计算机系统, 或者下文参考图9描述的芯片集合。在一些实施方式中, 所获取的数据是基于目标的相应多个部分的多个距离的点云。

[0052] 自适应扫描模块270确定由扫描光学器件进行的非均匀扫描是否是正被扫描的特定场景所期望的, 如下面更详细地描述的。例如, 自适应扫描模块270确定对于场景的不同部分使用什么扫描角度和分辨率, 使得用于构建帧的有价值的脉冲, 例如在几秒钟期间传输的数百万光束, 集中在存在来自待扫描的对象的返回的方向上, 并且避免在只有天空或不感兴趣的地面附近的方向上。在一些实施方式中, 自适应扫描模块270控制RF波形发生器215。

[0053] 图2B描绘了替代性硬件布置, 其允许将软件控制的延迟引入产生参考信号的参考路径中, 该参考信号也称为本地振荡器(L0)信号。激光源212、分光器216、发射信号205、扫描光学器件218、光学混合器232、检测器阵列230、获取系统240和处理系统250如上文参考图2A所述的。在图2B中, 存在两个单独的光学调制器, 传输路径中的214a和参考路径中的214b, 以将来自发生器215的RF波形施加到光学载波上。分光器216在激光源212与调制器214a和214b之间移动, 以产生冲击在调制器214a上的光学信号283和冲击在修正的参考路径282中的调制器214b上的低幅度参考路径信号287a。在该实施方式中, 在发生调制之前, 光201被分光成发射(TX)路径光束283和参考/本地振荡器(L0)路径光束287a; 并且, 在每个路径中使用单独的调制器。利用双调制器方法, 可以在偏移的开始频率和/或偏移的开始时间用啁啾编程任一路径。这可以用于允许自适应扫描方法在下行维度中自适应。通过使每个距离门中使用的延迟偏移, 系统可以以高分辨率明确地进行测量, 而不管其他的系统限制(检测器和数字器带宽、测量时间等)。因此, 在一些实施方式中, 修正的自适应扫描模块278控制RF波形发生器以施加适于由下面描述的自适应扫描产生的每个距离门的延迟时间。然后, 软件控制的延迟参考信号287b与返回信号291混合, 如上所述。在其他实施方式中, L0参考路径282的软件控制的延迟允许系统280也获得用于啁啾多普勒补偿的范围延迟效应。

[0054] 例如, 在一些啁啾实施方式中, 所使用的激光器被主动线性化, 其中调制被施加到驱动激光器的电流。还用提供调制的电光调制器进行实验。该系统被配置为产生适合于期望的下行分辨率的带宽B和持续时间 τ 的啁啾, 如下面针对各种实施方式更详细地描述的。该技术将用于从10MHz到5THz的啁啾带宽。然而, 对于3D成像应用, 典型范围是从约300MHz到约20GHz的啁啾带宽, 从约250纳秒(ns, $ns = 10^{-9}$ 秒)到约1毫秒(ms, $ms = 10^{-3}$ 秒)的啁啾持续时间, 从约0米到约20千米(km, $1km = 10^3$ 米)的到目标的距离, 从约3毫米(mm, $1mm = 10^{-3}$ 米)到约1米(m)的目标处的斑点大小, 从约7.5mm到约0.5m的目标处的深度分辨率。在一些实施方式中, 目标具有最小距离, 诸如400米(m)。应注意, 在这些条件下, 可以使距离视窗延伸到几千米。尽管为了说明的目的, 在图2A和图2B中将过程、装备和数据结构描绘为特定布置中的整体块, 但是在其他实施方式中, 一个或多个过程或数据结构或它们的部分以不同

的方式布置在相同或不同的主机上、一个或多个数据库中或者被省略,或者一个或多个不同的过程或数据结构被包括在相同或不同的主机上。例如,分光器216和参考路径220包括零个或多个光学耦合器。

[0055] 3. 自适应扫描概述

[0056] 图3A是示出了根据实施方式的待利用扫描激光测距系统扫描的示例性场景的图像。该图像是使用扫描3D激光测距系统的最大水平和竖向角度分辨率产生的,该系统被配置为用于以约10厘米距离分辨率(例如,5cm至20cm)的最高达约1千米(例如,0.5km至2km)的测距。图3B是示出了根据实施方式的图3A中场景的待自适应扫描的示例性水平部分的图像。如从静止LIDAR系统观察的,水平尺寸表示以相对单位计的水平角度,并且竖向尺寸表示以相对单位计的竖向角度。进行自适应扫描以通过下述来加速所期望的测距信息的收集:通过避免在无返回的角度处进行测量;通过仅对需要高角度分辨率采样以获得目标空间分辨率的较远目标使用这种采样;并且通过在较低角度分辨率足以提供目标空间分辨率的较近对象处使用较低角度分辨率采样。

[0057] 在图3C中示出了自适应扫描的优点。图3C是示出了根据实施方式的用于图3B中明显的特征的示例性距离集合的方框图。图3C表示采样角度空间。在区域310中,没有返回,并且期望不扫描这个角度空间区域。在区域320中,仅仅存在在系统紧前方的不那么感兴趣的地面(例如,该区域被很好地理解为或包括仅少量的不是特别感兴趣的特征)。也期望不扫描角度空间的这个区域。远处的圆顶结构占据角度空间的区域332,圆顶前面的结构占据角度空间的区域330,这些前面的墙壁或栅栏占据角度空间的区域328,并且更靠近的结构和杆占据角度空间的区域322。在不感兴趣的区域320与区域330中的结构之间,在角度空间中标记为区域321、323、325和327的不断增加的距离处,地形是明显的。为了利用至少目标空间分辨率 s 例如10厘米识别场景特征,要使用的角度分辨率 $\Delta\theta$ 是到对象的距离 R 的函数,如由等式2给出的。

$$[0058] \quad \Delta\theta = \arctan(s/R) \quad (2a)$$

[0059] 对于小的比值 s/R , $\Delta\theta \approx s/R$ 。在大多数情况下, s 远小于 R ,并且近似值 $\Delta\theta = s/R$ 在许多实施方式中用于加速处理。为了确保实现在从近距离 R_{near} 到远距离 R_{far} 的距离间隔中所有对象的至少目标空间分辨率 s 或实现更好的,在等式2a中使用远距离以给出等式2b。

$$[0060] \quad \Delta\theta = \arctan(s/R_{far}) \quad (2b)$$

[0061] 当小角度近似值有效时,等式2b缩减为等式2c。

$$[0062] \quad \Delta\theta = s/R_{far} \quad (2c)$$

[0063] 当然,任何给定的激光测距系统都具有单个光束的最小角度宽度,并且实际上不能限定远小于这种角度光束宽度的角度分辨率。因此,在某些大距离处,可能无法获得目标空间分辨率 s 。为简单起见,在下面的描述中,假设计算的 $\Delta\theta$ 始终大于光束角度宽度。

[0064] 等式2a至2c暗示了到场景中的各种对象的距离是已知的。根据各种实施方式,场景中涉及的距离由第一遍粗略的角度分辨率确定。通常场景中的距离在一个维度上比在另一个维度上延伸的更远,或者通常设备在一个维度上与另一个维度相比具有更大的控制;因此,在一些实施方式中,粗略水平角度分辨率与粗略竖向角度分辨率不同。图3D是示出了根据实施方式的对图3C中描绘的特征的示例性粗略角度扫描的方框图。水平轴342表示水平角度(也称为方位角),并且竖向轴表示竖向角度(也称为仰角)。竖向锯齿扫描轨迹由虚

线346表示。为了说明的目的,假设路径遵循从左下到右上的扫描光学器件。扫描轨迹346是具有 A_{HR} 标记的水平重复分离角347的竖向锯齿图案。与可以由扫描LIDAR测距系统执行的最精细的水平扫描相比,扫描轨迹346在水平上间隔很宽。另外,沿路径346以粗略竖向采样分辨率进行距离测量。因此,与目标帧速率相比,可以在短时间内获得沿扫描轨迹346的测量值。水平分辨率是可变的,但是由每水平重复分离 A_{HR} 两个样本表征;因此,平均水平分辨率为 $A_{HR}/2$ 。在其他实施方式中,使用行顺序或列顺序扫描轨迹,其中水平采样分离和竖向采样分离在扫描上都是恒定的。在这些实施方式中的一些实施方式中,水平和竖向分离都被设定为 $\Delta\theta$ 。

[0065] 作为粗略扫描的结果,从粗略的最小水平角度 α_{min} 到粗略的最大水平角度 α_{max} 的所有水平角度,以及从粗略的最小竖向角度 ϵ_{min} 到粗略的最大竖向角度 ϵ_{max} ,可获得多个距离 $R(\alpha, \epsilon)$,其中 α 是水平(方位角)扫描角并且 ϵ 是竖向(仰角)扫描角;因此,形成点云。区域320中的距离被排除在外。剩余的距离被分成多个距离间隔,称为距离门,每个距离门由不同的非重叠的间隔限定,非重叠的间隔由不同的非重叠的 R_{near} 和 R_{far} 给出。如果距离 $R(\alpha, \epsilon)$ 是 N 个距离门的距离门数字 n 、指定 RG_n 集合的成员,则它满足等式3。

[0066] $R_{near_n} < RG_n < R_{far_n}$ (3)

[0067] R_{near_n} 值可以用于使用指令诸如下述指令将距离 $R(\alpha, \epsilon)$ 及其相关联的角度坐标 (α, ϵ) 分配给一个距离门集合的门:

[0068] 对于 $\alpha = \alpha_{min}$ 到 α_{max} , $\epsilon = \epsilon_{min}$ 到 ϵ_{max}

[0069] $n = 0$

[0070] 对于 $i = 1$ 到 N ,如果 $R(\alpha, \epsilon) > R_{near_i}$,则 $n = i$

[0071] 将 $R(\alpha, \epsilon)$ 添加到集合 RG_n

[0072] 然后可以使由距离门集合中的所有角度坐标 (α, ϵ) 组成的角度空间的每个部分与距离门之一相关联。与每个距离门相关联的区域称为距离门区域。图3E是示出了根据实施方式的用于图3D中描绘的特征的距离门的距离块内的角度扫描空间中被扫描距离的示例性连续区域的方框图。区域356a被分配给包括近建筑物和杆区域322的 RG_1 ;区域356b被分配给 RG_2 ,区域356c被分配给包括墙壁结构区域328的 RG_3 ,区域356d被分配给 RG_4 ,区域356e被分配给包括建筑物区域330的 RG_5 ,并且区域356f被分配给包括圆顶结构332的 RG_6 。

[0073] 在各种实施方式中,在与每个距离门 n 相关联的角度空间区域中调整水平或竖向分辨率或两者,以满足等式2b或等式2c,其中 R_{far} 由 R_{far_n} 给出。在一些实施方式中,通过每个水平角度的最小竖向角度和每个水平角度的最大竖向角度基于粗略采样来勾画每个距离门区域。将最小竖向角度和最大竖向角度中的每一个插值到目标水平角度间隔(由等式2b给出的间隔,其中 R_{far} 由 R_{far_n} 给出)。然后,使用由其中 R_{far} 由 R_{far_n} 给出的等式2b给出的水平和竖向角度分辨率利用锯齿扫描图案(或其他扫描图案)分别扫描每个距离门区域。扫描图案也称为扫描轨迹。

[0074] 图4是示出了根据实施方式的用于利用扫描激光测距系统进行自适应扫描的示例性方法的流程图。尽管在图4中以及随后的流程图14中出于说明的目的将步骤描绘为呈特定顺序的整体步骤,但是在其他实施方式中,一个或多个步骤或它们的部分以不同的顺序执行,或者在时间上重叠、连续或并行或者被省略,或者添加一个或多个附加步骤,或者以某种组合的方式改变方法。

[0075] 在步骤401中,确定目标空间分辨率 s 。可以使用任何方法。这可以未经请求或者响应于查询来由用户手动输入,或者从计算机可读介质上的存储器检索,或者从本地或远程数据库或服务器接收。在一些实施方式中,输入感兴趣的对象的大小范围 $0s$,并且基于所表示的对象大小 $0s$ 的预定或特定分数诸如百分之一或千分之一来确定目标空间分辨率 s 。在一些实施方式中,在步骤401中,还使用上述方法中的一种或多种来确定用于检测这些对象的最大距离 R_{max} 。在一些实施方式中,还使用上述方法中的任一方法提供粗略角度分辨率。在一些实施方式中,基于一个或多个其他输入确定粗略角度分辨率。例如,如果期望的目标空间分辨率是 s 并且感兴趣的最大距离是 R_{max} ,则最精细的角度分辨率 $\Delta \theta_{best}$ 由等式2a给出,其中 R 由 R_{max} 代替。在这种情况下,粗略的角度分辨率是该最精细分辨率 $\Delta \theta_{best}$ 的倍数。为了在与帧速率相比的少量时间内完成该粗略扫描,该倍数较大,例如,在最精细分辨率的约10倍到约100倍的范围内(在高分辨率帧的一百分之一到一万分之一中完成粗略帧)。特定的空间分辨率将取决于应用(例如,勘测可能具有与用于3D形状检测的不同的要求)。在各种实验性实施方式中,对象上的空间分辨率为约1cm或更大,其中对象上的10cm被认为对于实验成像器是相当大的最终分辨率。用于粗略扫描分辨率的倍数在目标上的精细分辨率的约10倍至约25倍之间。然后,粗略扫描将仍然是总扫描时间的一部分,但将为自适应扫描图案的生成提供良好的信息。

[0076] 在步骤403中,执行粗略分辨率成像扫描以获取场景的大致3D特性,但是是以远小于期望的最终扫描角度分辨率的空间采样的密度执行的。该粗略扫描的结果是粗略的三维(3D)点云,云中的每个点表示激光反向散射表面上的照射斑点的3D坐标位置。3D坐标可以是极坐标诸如来自测距系统的方位角 α 、仰角 ϵ 和距离 R ,或者是笛卡尔坐标诸如 x 水平(例如,从某个参考点例如测距系统的位置以北的距离)、 y 水平(例如,从参考点以东的距离)和 z (例如,水平面以上的高度)。

[0077] 在步骤405中,根据距离坐标例如使用上面的等式3以及直接遵循等式3的伪代码将粗略点云细分为距离门。细分可以用 N 个 R_{near_n} 的固定值进行硬编码或者基于 R_{near_n} 的一到 N 个计算值进行自适应。例如,在一些实施方式中,第五和第99百分位数距离 R_5 和 R_{99} 分别根据粗略3D点云中的距离分布确定;并且,基于第99百分位数距离和第5百分位数距离之间的差异以及感兴趣对象的大小(例如, $N = \text{模数}(.R_{99} - R_5, M * 0s)$)来确定距离门的数量 N ,其中 $0s$ 是感兴趣对象的对象大小,并且 M 是大于1的倍数,诸如 $M = 4$ 。在该自适应实施例中, N 个距离门均匀地分布在 R_5 至 R_{99} 之间。在一些实施方式中,步骤405包括在确定距离门之前,将所获取的粗略点云数据的笛卡尔表示转换为相对于LIDAR测距系统的球面坐标。在其他实施方式中,通过作为距离的函数的点密度的基本数据分析来完成 N 个距离门的确定。示例性自适应数据分析在密度分布中存在最小数量点的距离处放置距离门。这样做是为了使距离门“接缝”被放置在系统可见的最小对象密度的位置。

[0078] 在步骤411中,对于每个距离门的点集合 RG_n ,确定自适应扫描轨迹以用于改进的场景采样。为了确保集合 RG_n 中的每个对象在目标空间分辨率 s 下或接近该目标空间分辨率被分辨,使用距离门中的特征距离代替等式2b或等式2c的 R_{far} ,来确定竖向和水平扫描特性的角度分辨率。例如,为了确保以至少目标空间分辨率 s 对距离门中的每个对象进行采样,特征距离是 R_{far_n} ;并且,使用等式2b或等式2c。在一些实施方式中,锯齿图案的水平重复分离角 A_{HR} 被设定为角度分辨率 $\Delta \theta$,使得最差的水平分辨率是 $\Delta \theta$ 并且平均水平分辨率甚

至更好为 $\Delta \theta/2$ 。在一些实施方式中,其中平均空间分辨率 s 是可接受的, A_{HR} 被设定为 $2 \Delta \theta$, 因为平均水平分辨率于是 $\Delta \theta$ 。然而,在其他实施方式中,使用其他特征距离,诸如被限定为在 R_{near_n} 和 R_{far_n} 之间的一半处的中间距离 R_{mid_n} 。因此,在角度空间中的距离门区域中的所有水平角度处在最小竖向角度与最大竖向角度之间确定自适应扫描轨迹。

[0079] 在一些实施方式中,根据等式4使用第 n 个距离门 R_{Gn} 的距离门距离 R_{GRn} 来确定用于距离门 n 的每个距离门采样轨迹的本地振荡器的延迟时间 Δt_{L0n} ,例如, R_{GRn} 等于 R_{near_n} 或如上限定的特征距离或者是它们的函数。

[0080] $\Delta t_{L0n} = R_{GRn}/c$ (4)

[0081] 在步骤421中,用于基于与每个距离门对应的每个自适应扫描图案的扫描光学器件的命令被转发到测距系统或系统内的扫描光学器件,以操作扫描激光测距系统来以自适应水平角度分辨率和自适应竖向角度分辨率,以获得沿自适应扫描轨迹的距离测量值。在一些实施方式中,步骤421包括发送表示用于当前距离门或 N 个不同距离门中的多个距离门的来自等式4的延迟时间 Δt_{L0n} 的数据。在这些实施方式中的一些实施方式中,测距系统使用图2B中的RF波形发生器215a和调制器214b来调制激光,以施加计算的延迟时间 Δt_{L0n} 。

[0082] 在步骤431中,对于所有扫描的对象,将经由对角度空间中的所有距离门区域的相继自适应扫描获取的结果的点云点集合进行组合,以构成最终3D数据产品,其是对保留目标空间分辨率 s 的一个或多个点云的收集。同时,自适应扫描避免扫描没有返回或太接近测距系统或某种组合的角度空间。在步骤441中,基于最终3D数据产品操作装置。在一些实施方式中,这涉及在显示装置上呈现表示3D数据产品的图像。在一些实施方式中,这涉及将基于3D数据产品的点云识别至少一个对象的数据传送到装置。在一些实施方式中,这涉及移动车辆来接近所识别的对象或避免与所识别的对象碰撞或者操作武器系统以将弹药指向所识别的对象上。

[0083] 4. 示例性实施方式

[0084] 在频率调制连续波(FMCW)啁啾LIDAR测距系统中,通过啁啾带宽、数字器带宽和脉冲重复频率(PRF)的组合管理距离视窗。因此,对于较大的PRF和带宽,基本FMCW系统将在距离上受到限制。这限制了系统快速且长距离地获取距离数据的能力。该限制通过下述克服:通过考虑啁啾波形的LO和发射器/返回信号路径上的单独调制器来影响软件可编程范围延迟(例如,将RF波形发生器215与如以上参考图2B所述的参考路径282中的单独的调制器214b一起使用)。LO波形的时间延迟允许给定距离延迟的测距频率带宽 B 减小,使得它处于检测器/数字器系统的频带中。该概念使得能够在距离视窗内以非零距离延迟进行快速距离数据获取。这可以与自适应扫描算法配对,以例如使用针对每个不同距离门的扫描轨迹的不同参考路径延迟来更快速地获取感兴趣体积中的数据。

[0085] 自适应角度扫描程序被设计成产生(在光束扫描硬件的能力内)与经询问的体积的角度边界符合的扫描图案。这防止系统“扫描天空”或“扫描地面”。通过考虑体积的粗略非自适应扫描来构建扫描图案。这用于限定所讨论的距离视窗内的实际硬目标的边界。实施研究软件以证明速度和方法的效用。

[0086] 图5是以俯视图和成角度立体图示出了根据实施方式的到反向散射返回的示例性距离的图像。图5A的上部部分中的灰度像素描绘了水平角度的空中视图501以及在实验性实施方式中由扫描激光测距系统检测到返回的距离。在该实验中,扫描激光测距系统包括

来自蒙大纳州博兹曼市的BLACKMORE SENSORS AND ANALYTICS™ Inc的模型HRS-3D-AS自适应扫描仪。距离视窗为3米至96米。水平角度的范围是利用旋转台覆盖的约370度,并且竖向角度范围是约60度。距离分辨率约为7.5cm。图5A的下部部分中的灰度像素描绘了距离和高度的成角度立体视图511以及在相同实验中由扫描激光测距系统检测到返回的相对水平位置。在两个视图中,扫描激光测距系统位置503在图像的左边缘处。在扫描激光测距系统位置503附近,返回505提供高空间密度,甚至高于一些实施方式所期望的空间密度,因此是比对应的目标空间分辨率 s 精细的空间分辨率。对于一些实施方式,远离扫描激光测距系统位置503,返回507提供在期望的空间密度以下的低空间密度,且因此比对应的目标空间分辨率 s 更粗略。

[0087] 图6A是示出了根据实施方式的用于到来自图5的成角度立体图中的反向散射的返回的距离的示例距离门的图像。灰度像素描绘了距离和高度的成角度立体视图511以及在与图5A的下部部分相同的实验中由扫描激光测距系统检测到返回的相对水平位置。距离已经被分成4个距离门,例如 $N=4$,它们是距离门1,521;距离门2,522;距离门3,523;以及距离门4,524。

[0088] 图6B至图6E是根据实施方式的扫描角度空间中的遮蔽物,其示出了图6A中所示的四个距离门的每个距离门中的返回的示例性位置。角度空间中的黑色区域表示方位角 α 和仰角 ϵ ,其中第一距离门中存在距离返回,且因此表示了精细分辨率扫描有用的区域。粗略遮蔽物具有的水平分辨率为 10^{-3} 弧度(约0.06度),竖向分辨率不超过 10^{-4} 弧度(约0.006度)。水平轴632表示从约-0.2弧度到约+0.2弧度的、对应于约-11.5度到+11.5度的方位角 α 。竖向轴表示仰角 ϵ ,并且在四个遮蔽物之间程度略有变化。图6B是描绘了来自第一距离门 $n=1$ 的返回的角度空间中的位置的二进制图像630。竖向轴634从约-0.12弧度延伸到约0弧度,对应于约-7度到0度的水平。在-.05弧度(约-3度)以上没有返回。黑色遮蔽物区域635中的特征距离与目标空间分辨率 s 和等式2a或2c一起用于确定角度分辨率 $\Delta\theta$ 。对于列顺序的或竖向锯齿扫描轨迹,待覆盖的区域在约-0.12弧度的最小竖向角度与由虚迹线636描绘出的最大竖向角度之间。对于行顺序的或水平锯齿扫描轨迹,对于在-0.05弧度以下的仰角,最小和最大方位角(未示出)将分别为-0.2弧度和+0.2弧度。

[0089] 类似地,图6C是描绘了来自第二距离门 $n=2$ 的返回的二进制图像640。竖向轴644从约-0.06弧度延伸到约0.11弧度,对应于约-3.5度到6.3度。在第一距离门的最大仰角-.05弧度(约-3度)以下没有返回。第二距离门中的返回由黑色区域645表示,并且显示灯柱和灯柱右侧的树具有低于0弧度的地平面。黑色遮蔽物区域645中的特征距离与目标空间分辨率 s 和等式2a或2c一起用于确定角度分辨率 $\Delta\theta$ 。对于列顺序的或竖向锯齿扫描轨迹,待覆盖的区域在约-0.5弧度的最小竖向角度与由虚迹线646描绘出的在每个方位角 α 处是单值的最大竖向角度之间。对于行顺序或水平锯齿扫描轨迹,最小和最大方位角(未示出)每个都是仰角 ϵ 的单值。最小方位角将跟踪灯柱的左侧,并且最大方位角将跟踪树的右侧。

[0090] 图6D是描绘来自第三距离门 $n=3$ 的返回的二进制图像650。竖向轴654从约-0.01弧度延伸到约0.11弧度,对应于约-0.6度到6.3度。在约是第二距离门的地面水平的最大仰角的-.01弧度(约-0.6度)以下没有返回。第三距离门中的返回由黑色区域655表示,并且显示树丛、几个灯和树丛右侧的标志杆以及一个最右边的灌木,其中地面水平高度约为0弧度。黑色遮蔽物区域中的特征距离与目标空间分辨率 s 和等式2a或2c一起用于确定角度分

分辨率 $\Delta\theta$ 。对于列顺序或竖向锯齿扫描轨迹,待覆盖的区域在由迹线658给出的最小竖向角度与由虚迹线656给出的在每个方位角 α 处是单值的最大竖向角度之间。对于行顺序或水平锯齿扫描轨迹,最小和最大方位角(未示出)每个都是仰角 ϵ 的单值。最小方位角将跟踪树丛的左侧,并且最大方位角将跟踪树的右侧以至杆的高度,从那里到杆的右侧以至灌木的高度,从那里到灌木的右侧。

[0091] 图6E是描绘来自最后距离门 $n=4$ 的返回的二进制图像660。竖向轴664从约0弧度延伸到约0.08弧度(由于透视,较远的对象看起来较小并且在竖向角度上延伸较短的距离),对应于约0度至约4.5度。在约是第三距离门的地面水平的最大仰角的0弧度以下没有返回。第四距离门的返回由黑色区域665表示,并且显示树丛、空地、然后是一大堆树,其中地面水平高度约为0.01弧度。黑色遮蔽物区域665中的特征距离与目标空间分辨率 s 和等式2a一起用于确定角度分辨率 $\Delta\theta$ 。对于列顺序或竖向锯齿扫描轨迹,待覆盖的区域在由迹线668给出的最小竖向角度与由虚线666给出的在每个方位角 α 处是单值的最大竖向角度之间。对于行顺序或水平锯齿扫描轨迹,最小和最大方位角(未示出)每个都是仰角 ϵ 的单值。最小方位角将跟踪树丛的左侧,并且最大方位角将跟踪树的右侧以至一堆树的高度,从那里到0.20弧度的右边缘。注意,这种行顺序扫描不会从高精度扫描中消除像列顺序或锯齿扫描轨迹那样多的区域。虚线筐669表示在图7A和图7B中以高精度扫描轨迹显示的区域水平部分。

[0092] 图7A和图7B是示出了根据实施方式的分别针对不同特征距离(或不同目标空间分辨率)的图6E中描绘的距离门的一部分中的多个连续水平片段中的示例性自适应扫描图案的图标。水平轴712表示从约-0.085弧度到约0.005弧度的以弧度为单位的方位角,对应于从约-5度到约0.3度的视窗,并且描绘了图6E中虚线矩形669的水平程度。竖向轴714表示从约-0.01弧度到约0.06弧度的以弧度为单位的仰角,对应于从约-0.6度到约3.5度的视窗。还在当前视窗中绘制了来自图6E的由迹线668给出的最小竖向角度和由虚迹线666给出的最大竖向角度。两条迹线都已插值到该自适应扫描轨迹的精细角度分辨率。图7A是最小和最大仰角之间的高分辨率扫描轨迹716的图710。水平重复分离角 A_{hr} 约为0.0005弧度(注意,在相距0.01弧度的刻度线之间有20个重复),对应于约0.03度的分离角。假设该重复分离角等于 $\Delta\theta$,则 $\Delta\theta$ 也等于0.03度。因此,沿着该锯齿扫描轨迹在竖向上每0.03度测量距离。

[0093] 图7B是在不同距离或目标分辨率条件下最小和最大仰角之间的高分辨率扫描轨迹726的图720。出于说明的目的,在图7B中,假设特征距离小得多,或者目标空间分辨率 s 比用于生成图7A的值粗略的多。结果,由等式2a确定的角度分辨率不那么精细。在图7B中,水平重复分离角 A_{hr} 约为0.003弧度(注意,在相距0.01弧度的刻度线之间有约3.3次重复),对应于约0.17度的分离角,比图7A中不精细约6倍。假设该重复分离角等于 $\Delta\theta$,则 $\Delta\theta$ 也等于0.17度。因此,沿着该锯齿扫描轨迹在竖向上每0.17度测量距离。出于说明目的,读者可以采用关于点在表示锯齿扫描轨迹的点划线段中的位置进行距离测量。

[0094] 如上所述,在一些实施方式中,距离门例如 N 的值和 R_{near_n} 的 N 值是在自适应扫描之前预定或手动设置的。然而,在一些实施方式中, N 的值或用于 R_{near_n} 的 N 值或两者是基于粗略间隔距离测量中的观察距离 $R(\alpha, \epsilon)$ 自动且自适应地确定的。例如,如上所述, N 和 R_{near_n} 是基于观察距离的低和高百分位数(例如,第5和第99百分位数)确定的。

[0095] 在另一实施方式中,数量 N 和值 R_{near_n} 是基于粗略间隔距离测量中的 $R(\alpha, \epsilon)$ 的直

方图确定的。图10是示出了根据实施方式的场景的粗略角度扫描中的距离的示例性直方图的图1010。假设扫描激光测距系统被配置用于最高达 R_{\max} 的距离。水平轴1012表示距离筐具有比 R_{\max} 小的筐宽度,例如,具有 R_{\max} 的十分之一到百分之一或甚至千分之一筐宽度。竖向轴1014表示落入任一距离筐内的测量距离的出现次数。轨迹1016描绘了示例性直方图。注意,出现次数不是平坦的,而是具有几个峰1017和谷1015。大的特征可能在直方图中生成峰,而空旷区域可能产生谷。在一些实施方式中,距离直方图被重新缩放为距离的函数,以解释利用恒定的角度密度执行粗略扫描的事实。重新缩放在直方图中对更远的点测量加更大的权重,以解决这种差异。

[0096] 在一些实施方式中,一个或多个距离门值 R_{near_n} 被确定位于直方图1016中出现的谷处,如竖向虚线所表示的。在这些实施方式中的一些实施方式中,距离门的特征距离然后是距离门中的出现的最大的距离(例如, R_{peak_n})。使用各种可用的软件程序快速且自动地确定最小值和峰值。

[0097] 5. 计算硬件概述

[0098] 图8是示出了可以在其上实施本发明的实施方式的计算机系统800的方框图。计算机系统800包括用于在计算机系统800的其他内部部件与外部部件之间传递信息的通信机制,诸如总线810。信息被表示为可测量现象的物理信号,该可测量现象通常是电压,但在其他实施方式中,包括磁性、电磁、压力、化学、分子原子和量子相互作用等现象。例如,北和南磁场或者零和非零电压表示二进制数字(比特)的两个状态(0、1)。其他现象可以表示较高基数的数字。在测量前的多个同时量子态的叠加表示量子比特(量子位)。一系列一个或多个数字构成用于表示字符的数字或代码的数字数据。在一些实施方式中,称为模拟数据的信息由特定范围内的可测量值的近似连续体表示。计算机系统800或其一部分构成用于执行本文描述的一个或多个方法的一个或多个步骤的工具。

[0099] 一系列二进制数字构成用于表示字符的数字或代码的数字数据。总线810包括许多并行的信息导体,使得信息在耦合到总线810的装置之间快速传递。用于处理信息的一个或多个处理器802与总线810耦合。处理器802对信息执行一组操作。该组操作包括从总线810引入信息并将信息放置在总线810上。该组操作通常还包括比较两个或更多个信息单元、转移信息单元的位置以及诸如通过加法或乘法组合两个或更多个信息单元。由处理器802执行的一系列操作构成计算机指令。

[0100] 计算机系统800还包括耦合到总线810的存储器804。存储器804诸如随机存取存储器(RAM)或其他动态存储装置存储包括计算机指令的信息。动态存储器允许存储在其中的信息被计算机系统800改变。RAM允许存储在称为存储器地址的位置处的信息单元独立于相邻地址处的信息被存储和检索。处理器802还使用存储器804来在执行计算机指令期间存储临时值。计算机系统800还包括不被计算机系统800改变的只读存储器(ROM)806或耦合到总线810的用于存储静态信息包括指令的其他静态存储装置。还耦合到总线810的是用于存储信息包括指令的非易失性(永久)存储装置808,诸如磁盘或光盘,该信息即使在计算机系统800关闭或以其他方式断电时仍然存在。

[0101] 信息包括指令被提供给总线810以供来自外部输入装置812的处理器使用,该外部输入装置诸如包含由人类用户操作的字母数字键的键盘或传感器。传感器检测其附近的状况并将这些检测变换成与用于表示计算机系统800中的信息的信号兼容的信号。耦合到总

线810的主要用于与人交互的其他外部装置包括:显示装置814,诸如用于呈现图像的阴极射线管(CRT)或液晶显示器(LCD);以及指向装置816,该指向装置用于控制在显示器814上呈现的小光标图像的位置并发出与在显示器814上呈现的图形元素相关联的命令,诸如鼠标或轨迹球或光标方向键。

[0102] 在所实施实施方式中,特殊用途硬件诸如专用集成电路(IC)820耦合到总线810。特殊用途硬件被配置成为了特殊用途足够快地执行处理器802未执行的操作。专用IC的示例应用包括用于生成用于显示器814的图像的图形加速卡、用于加密和解密通过网络发送的消息的加密板、语音识别以及与特殊外部装置的接口,特殊外部装置诸如为重复执行在硬件中更有效地实施的某些复杂操作序列的机械臂和医疗扫描装备。

[0103] 计算机系统800还包括耦合到总线810的通信接口870的一个或多个实例。通信接口870提供耦合到与其自己的处理器诸如打印机、扫描仪和外部磁盘一起操作的各种外部装置的双向通信。通常,耦合是与网络链路878耦合,该网络链路连接到本地网络880,具有其自己的处理器的各种外部装置连接到该本地网络。例如,通信接口870可以是个人计算机上的并行端口或串行端口或通用串行总线(USB)端口。在一些实施方式中,通信接口870是提供与对应类型的电话线的信息通信连接的综合业务数字网(ISDN)卡或数字用户线(DSL)卡或电话调制解调器。在一些实施方式中,通信接口870是电缆调制解调器,其将总线810上的信号转换成用于通过同轴电缆进行通信连接的信号或转换成用于通过光纤电缆进行通信连接的光学信号。作为另一个示例,通信接口870可以是局域网(LAN)卡,以提供与兼容LAN诸如以太网的数据通信连接。还可以实施无线链接。载波诸如声波和电磁波包括在没有电线或电缆的情况下穿过空间的无线电、光波和红外波。信号包括载波的幅度、频率、相位、极化或其他物理特性的人为变化。对于无线链路,通信接口870发送和接收电信号、声信号或电磁信号,包括红外和光学信号,其携带信息流,诸如数字数据。

[0104] 术语计算机可读介质在本文中用于指代参与向处理器802提供信息的任何介质,该信息包括用于执行的指令。这种介质可以采用许多形式,包括但不限于非易失性介质、易失性介质和传输介质。非易失性介质包括例如光盘或磁盘,诸如存储装置808。易失性介质包括例如动态存储器804。传输介质包括例如同轴电缆、铜线、光纤电缆和在没有电线或电缆的情况下穿过空间的波,诸如声波和电磁波,包括无线电、光波和红外波。术语计算机可读存储介质在本文中用于指代除了传输介质之外参与向处理器802提供信息的任何介质。

[0105] 计算机可读介质的常见形式包括例如软盘、柔性盘、硬盘、磁带或任何其他磁性介质、光盘ROM(CD-ROM)、数字化视频光盘(DVD)或任何其他光学介质、穿孔卡、纸带或任何其他具有孔图案的物理介质、RAM、可编程ROM(PROM)、可擦除PROM(EPROM)、FLASH-EPROM或任何其他存储芯片或盒式磁带、载波或计算机可以从其读取的任何其他介质。术语非暂时性计算机可读存储介质在本文中用于指代除了载波和其他信号之外参与向处理器802提供信息的任何介质。

[0106] 在一个或多个有形介质中编码的逻辑包括计算机可读存储介质上的处理器指令和特殊用途硬件诸如ASIC 820中的一者或两者。

[0107] 网络链路878通常通过一个或多个网络向使用或处理信息的其他装置提供信息通信。例如,网络链路878可以通过本地网络880提供与主机计算机882的连接或与由因特网服务提供商(ISP)操作的装备884的连接。ISP装备884又通过现在通常称为因特网890的网络

的公共全球分组交换通信网络提供数据通信服务。连接到因特网的称为服务器892的计算机响应于通过因特网接收的信息来提供服务。例如,服务器892提供表示用于在显示器814处呈现的视频数据的信息。

[0108] 本发明涉及使用计算机系统800来实施本文描述的技术。根据本发明的一个实施方式,由计算机系统800响应于执行包含在存储器804中的一个或多个指令的一个或多个序列的处理器802执行那些技术。这些指令,也称为软件和程序代码,可以从另一计算机可读介质诸如存储装置808被读入存储器804。存储器804中包含的指令的序列的执行使得处理器802执行本文所述的方法步骤。在替代性实施方式中,硬件诸如专用集成电路820可以用于代替软件或与软件结合来实施本发明。因此,本发明的实施方式不限于硬件和软件的任何特定组合。

[0109] 通过网络链路878和其他网络通过通信接口870传输的信号将信息携带到计算机系统800并从计算机系统800携带信息。计算机系统800可以通过网络880、890等、通过网络链路878以及通信接口870发送和接收信息,包括程序代码。在使用因特网890的示例中,服务器892通过因特网890、ISP装备884、本地网络880和通信接口870传输由计算机800发送的消息所请求的用于特定应用的程序代码。接收到的代码可以在被接收时由处理器802执行,或者可以存储在存储装置808或其他非易失性存储器中以供稍后执行,或者两者。以这种方式,计算机系统800可以获得呈载波上的信号的形式的应用程序代码。

[0110] 在将一系列指令或数据或两者携带到处理器802以供执行中可以涉及各种形式的计算机可读介质。例如,指令和数据最初可以携带在远程计算机诸如主机882的磁盘上。远程计算机将指令和数据加载到其动态存储器中,并使用调制解调器通过电话线发送指令和数据。计算机系统800本地的调制解调器在电话线上接收指令和数据,并使用红外发射器将指令和数据转换成用作网络链路878的红外载波上的信号。用作通信接口870的红外检测器接收红外信号中携带的指令和数据,并将表示指令和数据的信息放置到总线810上。总线810将信息携带到存储器804,处理器802从该存储器检索指令并使用与指令一起发送的数据中的一些数据执行指令。在存储器804中接收的指令和数据可以可选地在由处理器802执行之前或之后存储在存储装置808上。

[0111] 图9示出了可以在其上实施本发明的实施方式的芯片集合900。芯片集合900被编程为执行本文描述的方法的一个或多个步骤,并且包括例如结合在一个或多个物理封装件(例如,芯片)中的关于图8描述的处理器和存储器部件。举例来说,物理封装件包括在结构组件(例如,基板)上的一种或多种材料、部件和/或电线的布置,以提供一种或多种特性,诸如物理强度、大小的保持和/或电气相互作用的限制。预期在某些实施方式中,可以在单个芯片中实施芯片集合。芯片集合900或其一部分构成用于执行本文所述的方法的一个或多个步骤的工具。

[0112] 在一个实施方式中,芯片集合900包括用于在芯片集合900的部件之间传递信息的通信机制,诸如总线901。处理器903具有与总线901的连接以执行存储在例如存储器905中的指令和处理信息。处理器903可以包括一个或多个处理核,其中每个核被配置为独立地执行。多核处理器能够在单个物理封装件中实施多重处理。多核处理器的示例包括两个、四个、八个或更多个处理核。替代性地或另外,处理器903可以包括经由总线901串联配置的一个或多个微处理器,以使得能够指令、流水线和多线程的独立执行。处理器903还可以伴有

一个或多个专门部件以执行某些处理功能和任务,诸如一个或多个数字信号处理器(DSP) 907,或者一个或多个专用集成电路(ASIC) 909。DSP 907通常被配置为独立于处理器903实时处理现实世界信号(例如,声音)。类似地,ASIC 909可以被配置为执行通用处理器不容易执行的专门功能。帮助执行本文描述的发明功能的其他专门部件包括一个或多个现场可编程门阵列(FPGA)(未示出)、一个或多个控制器(未示出)或者一个或多个其他专用计算机芯片。

[0113] 处理器903和伴随部件具有经由总线901与存储器905的连接。存储器905包括用于存储可执行指令的动态存储器(例如,RAM、磁盘、可写光盘等)和静态存储器(例如,ROM、CD-ROM等),该可执行指令在被执行时实施本文描述的方法的一个或多个步骤。存储器905还存储与执行本文描述的方法的一个或多个步骤相关联或由其生成的数据。

[0114] 6. 改动、扩展和修改

[0115] 在前述说明书中,已经参考其具体实施方式描述了本发明。然而,将明显的是,在不脱离本发明的更广泛的精神和范围的情况下,可以对其进行各种修改和改变。因此,说明书和附图应被视为是说明性意义而非限制性意义。在整个说明书和权利要求书中,除非上下文另有要求,否则词语“包括(comprise)”及其变型诸如“包括(comprises)”和“包括.....的(comprising)”将被理解为暗示包括所陈述的项目、元素或步骤或者项目、元素或步骤的集合,但不排除任何其他项目、元素或步骤或者项目、元素或步骤的集合。此外,不定冠词“一”或“一个”旨在表示由文章修改的项目、元素或步骤中的一个或多个。如本文所使用的,除非从上下文另有说明,否则如果值在另一个值的两倍(两倍或一半)内,则该值是“约”另一个值。尽管给出了示例性范围,但是除非从上下文另有说明,否则任何包含的范围也意图在各种实施方式中。因此,在一些实施方式中,从0到10的范围包括范围1到4。

[0116] 7. 参考文献

[0117] Adany, P., C. Allen, 和 R. Hui, “Chirped Lidar Using Simplified Homodyne Detection,” Jour. Lightwave Tech., v.27(16), 15 August, 2009.

[0118] Haralick, R. M., S. R. Sternberg 和 X. Zhuang, “” Image Analysis Using Mathematical Morphology,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v.PAMI-9(4), July 1987.

[0119] Hui, R., C. Allen, 和 P. Adany, “Coherent detection scheme for FM Chirped laser RADAR,” US 专利 7,742,152, 22 June 2010.

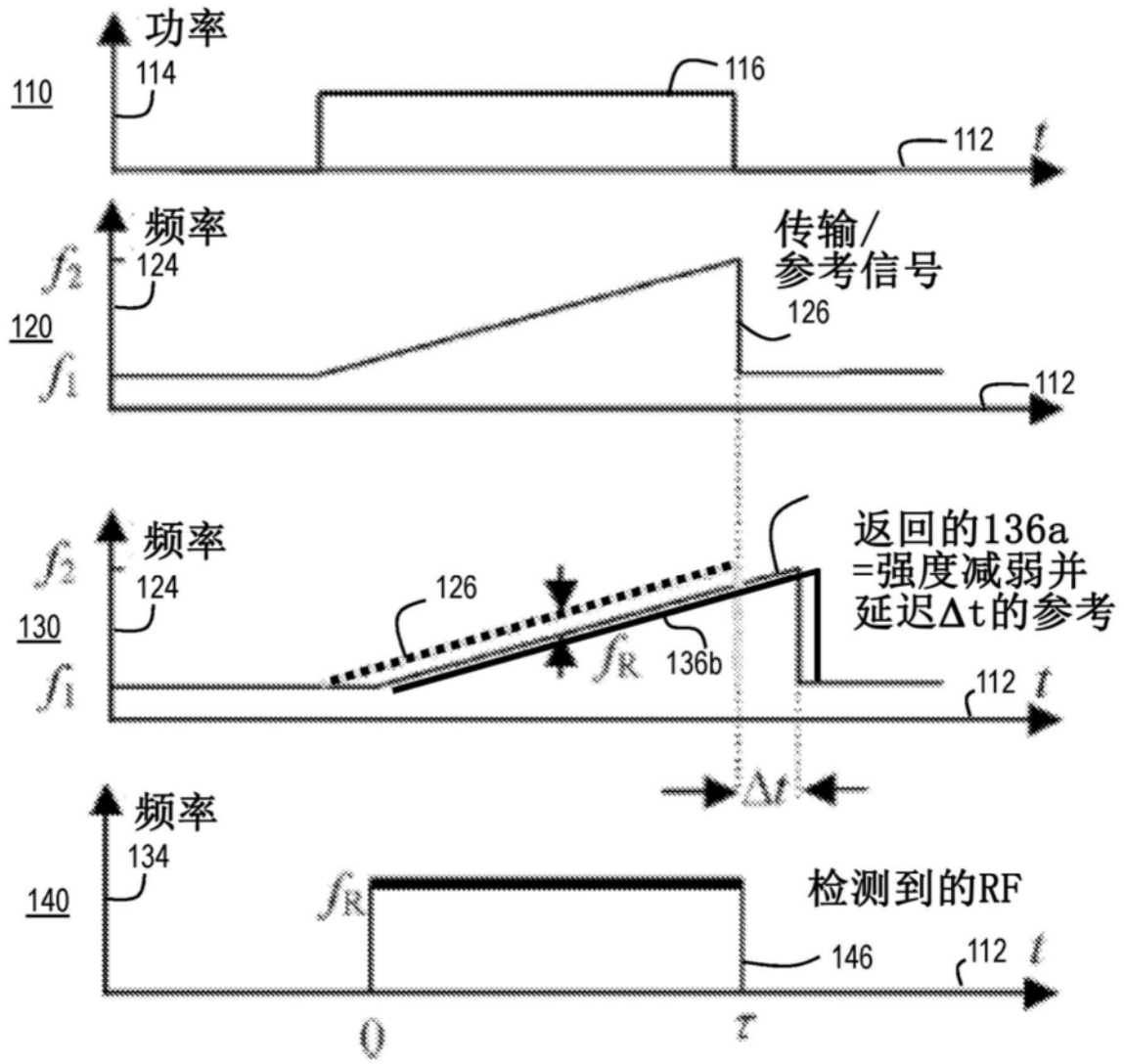


图1A

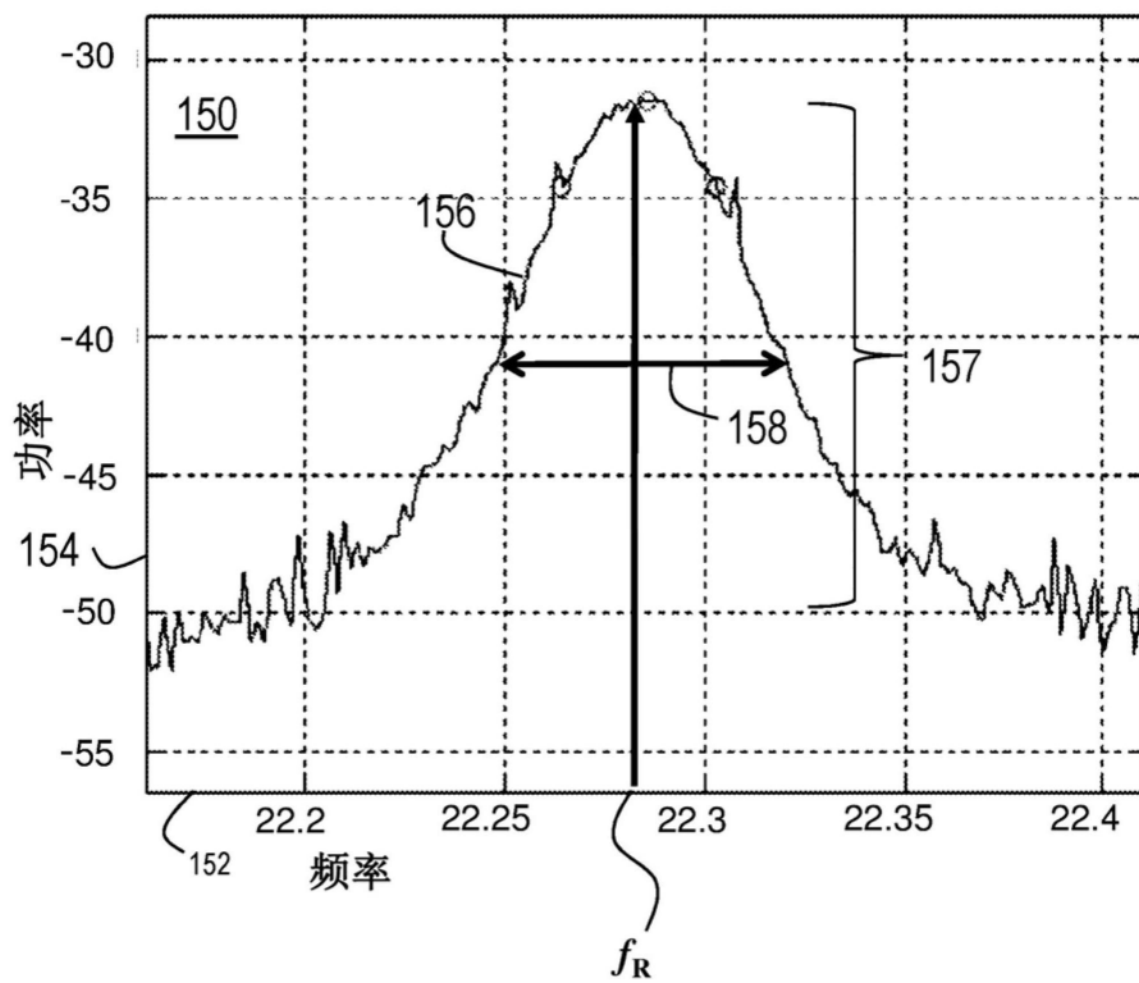


图1B

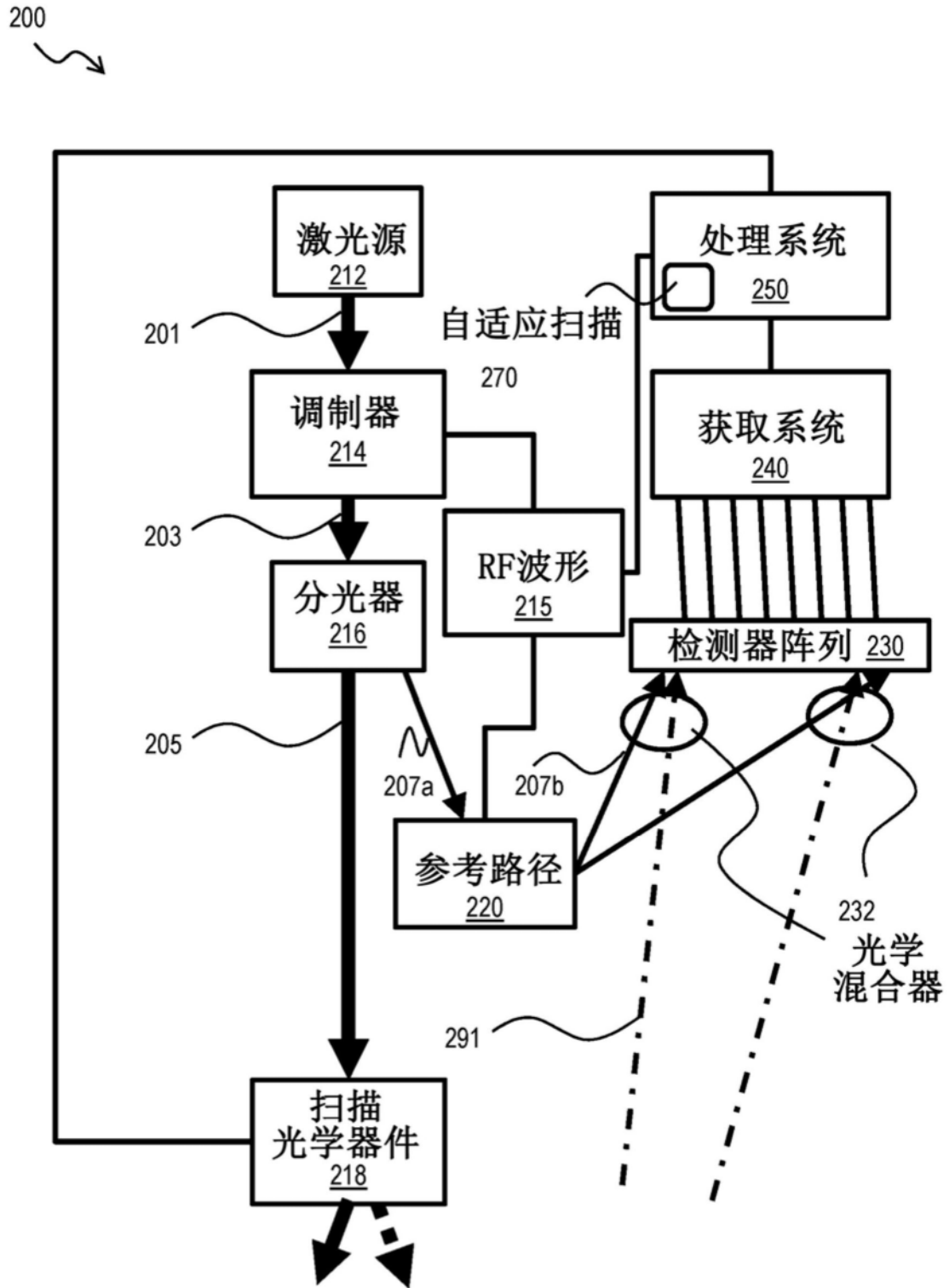


图2A

280

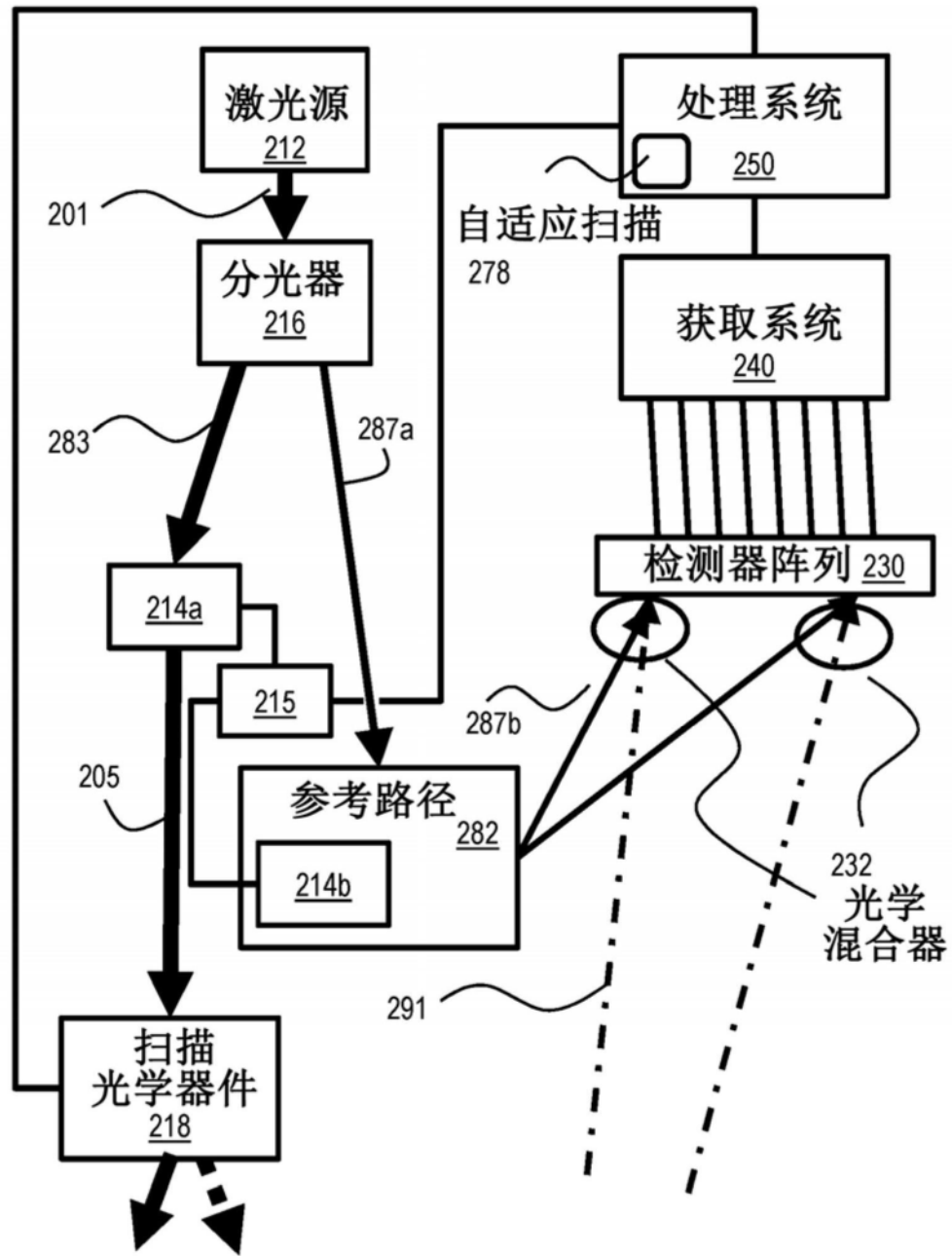


图2B

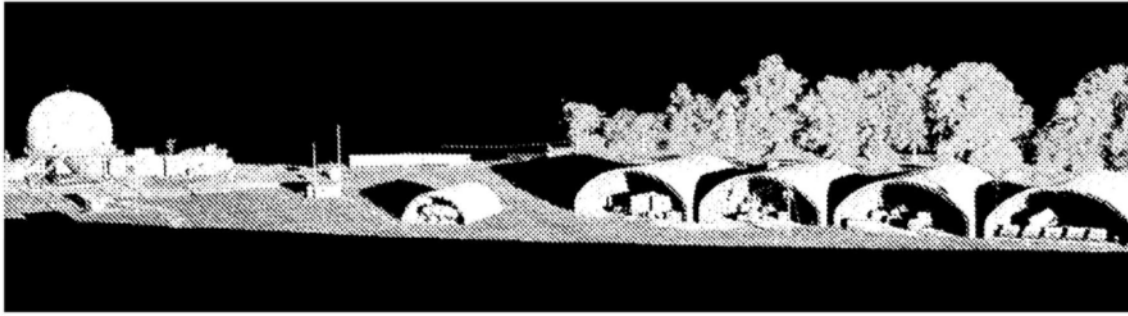


图3A

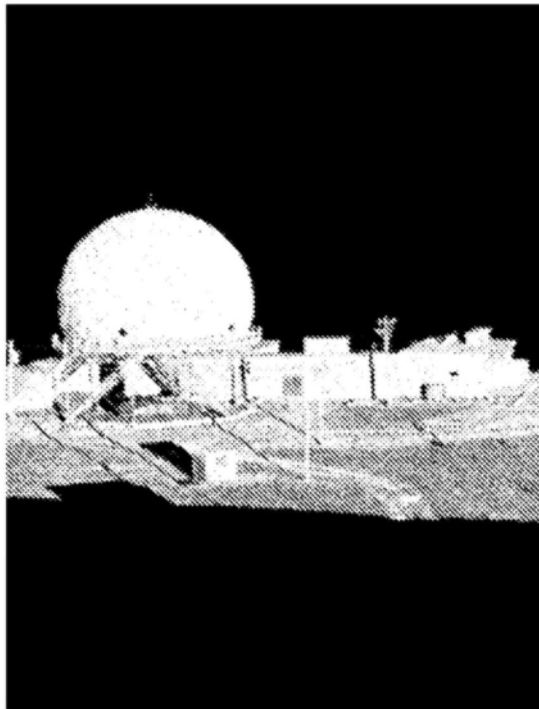


图3B

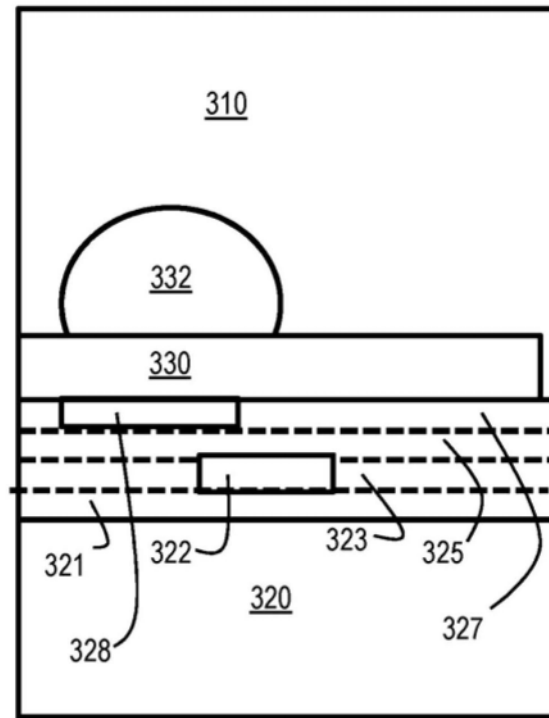
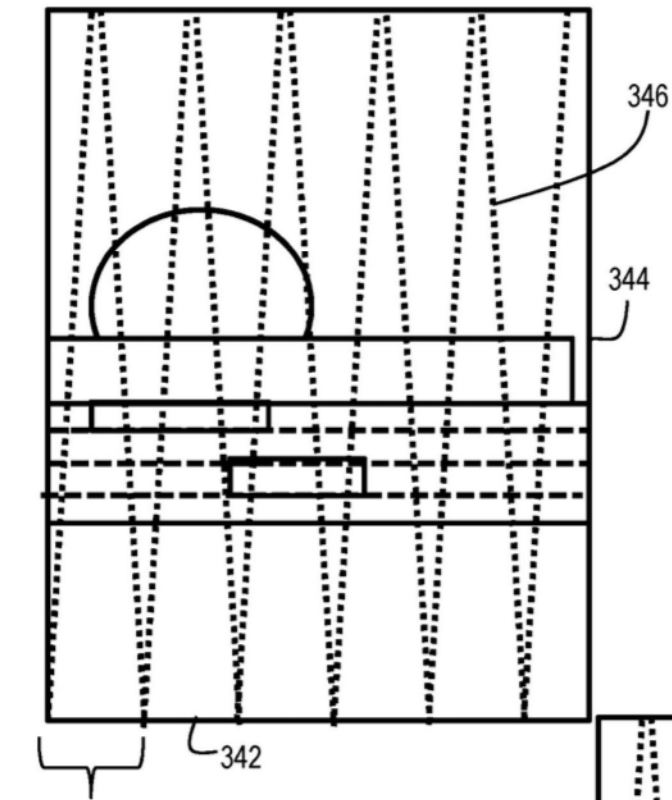


图3C



水平重复
分离角, A_{HR}

347

图 3D

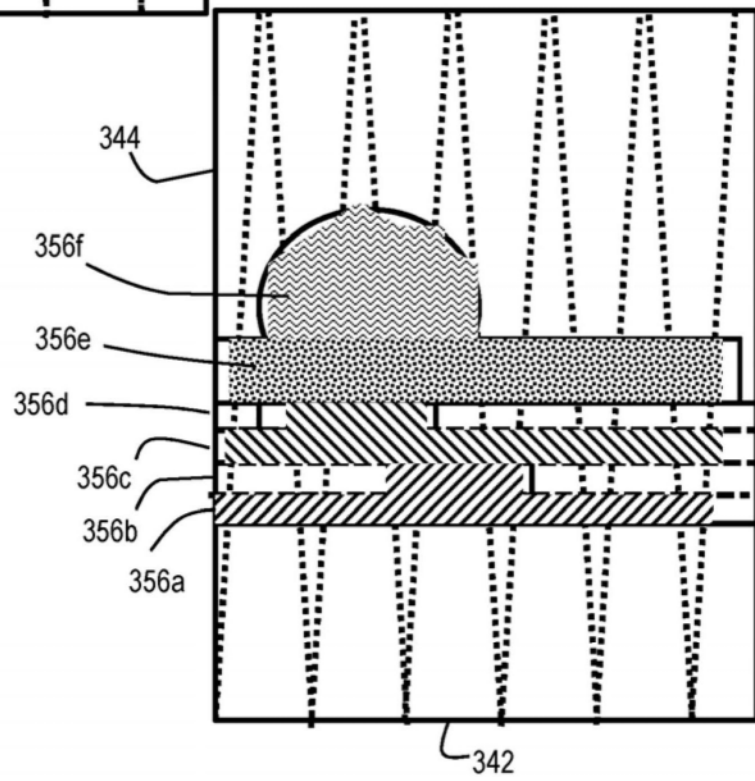


图 3E

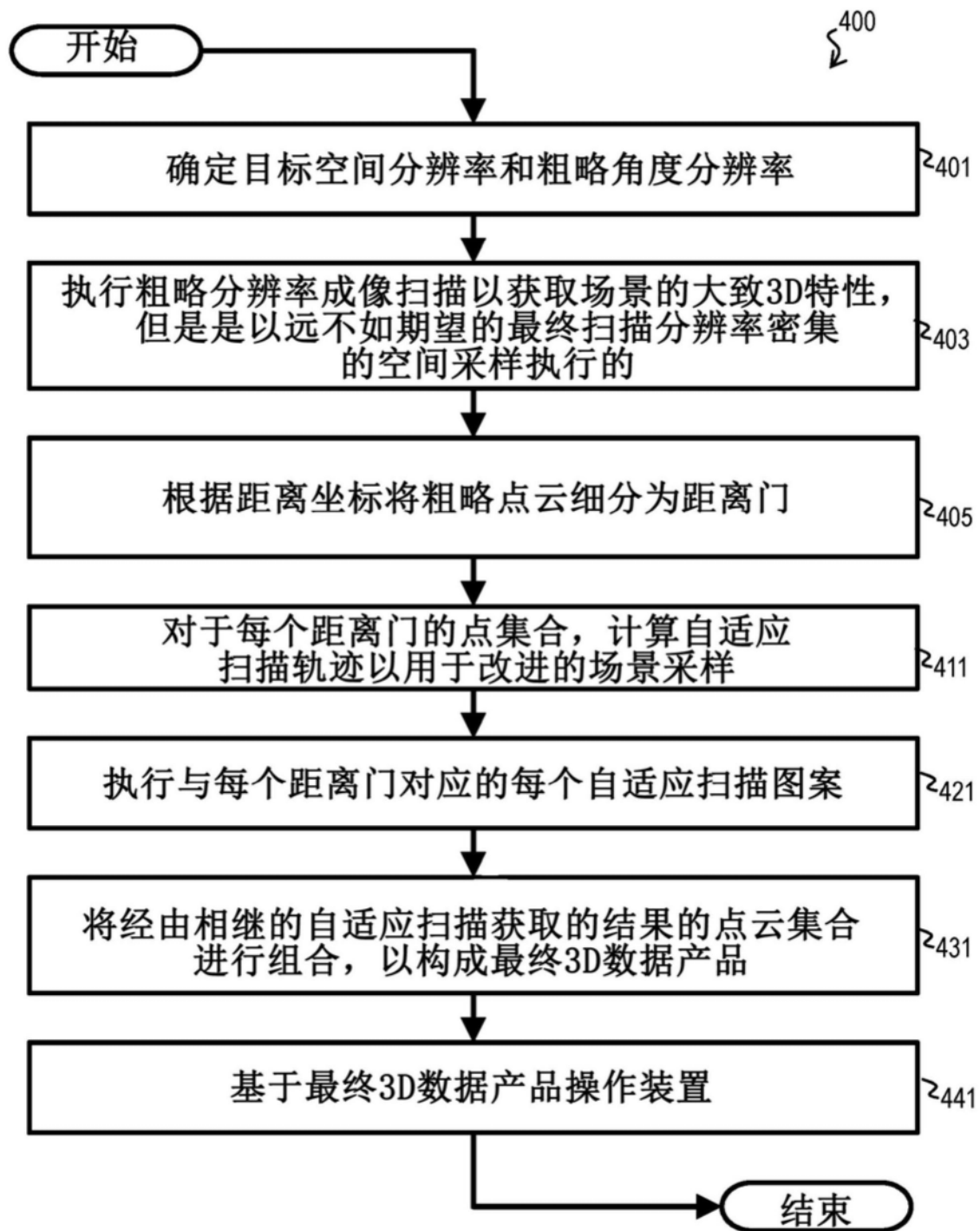


图4

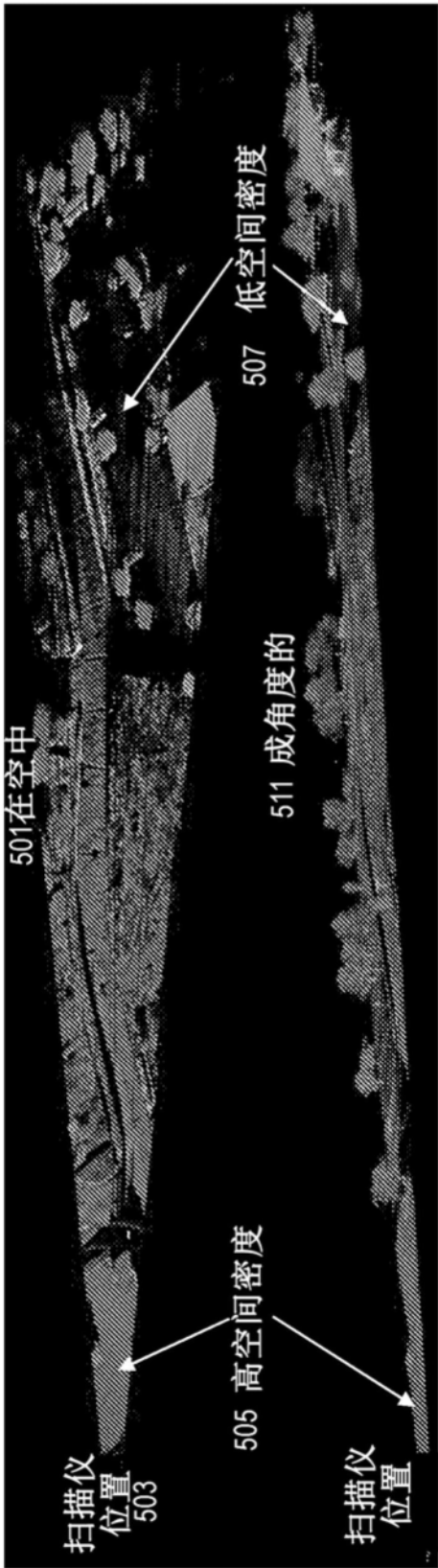


图5

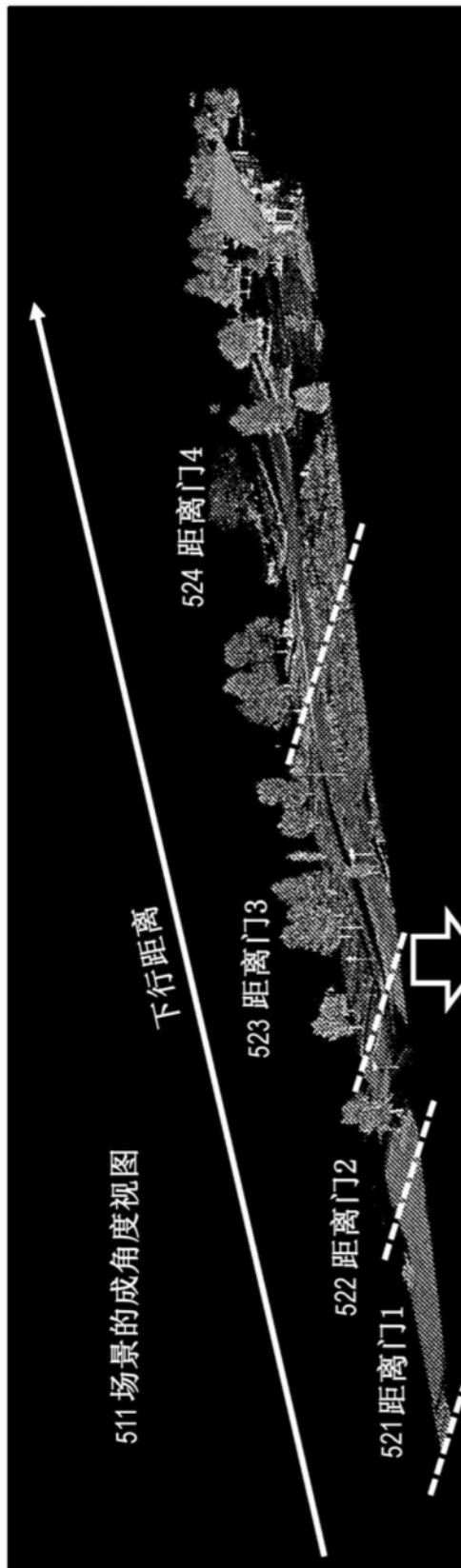


图 6A

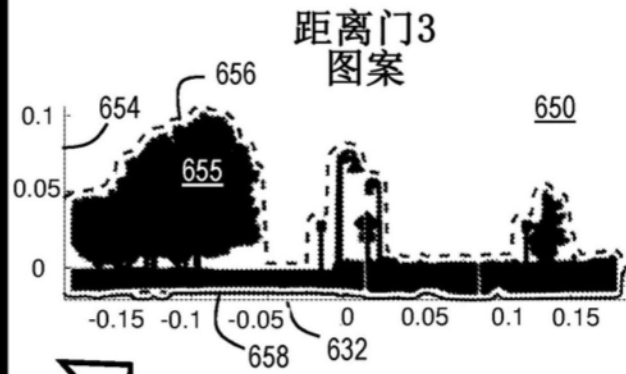


图 6D

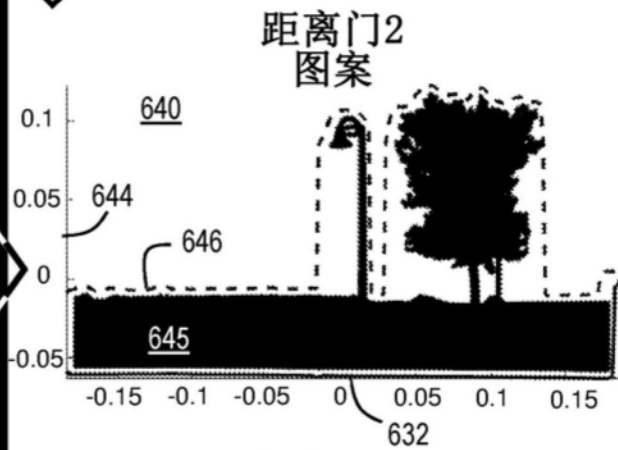


图 6C

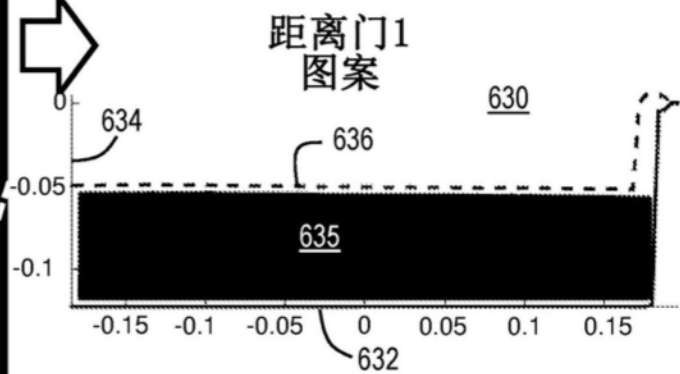


图 6B

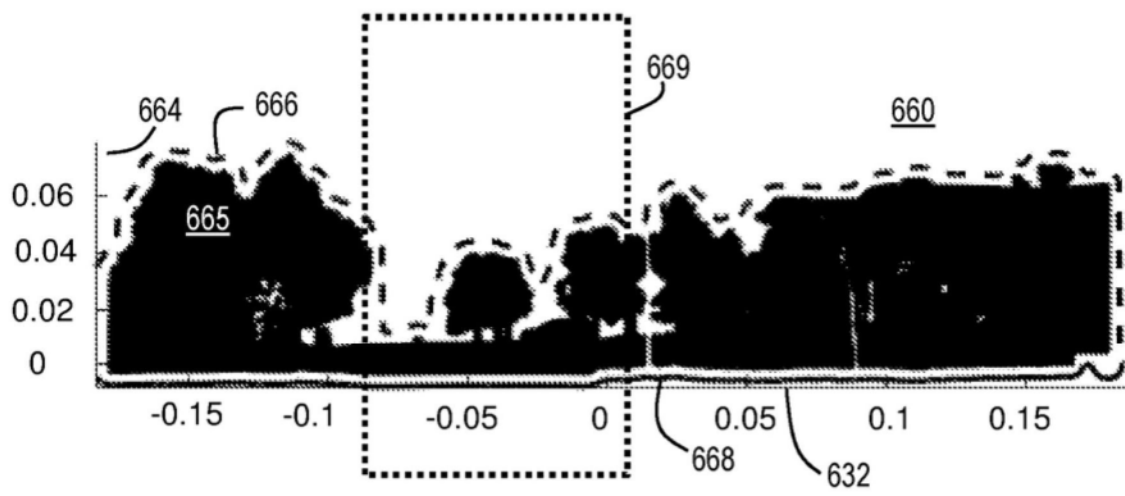
距离门4
图案

图6E

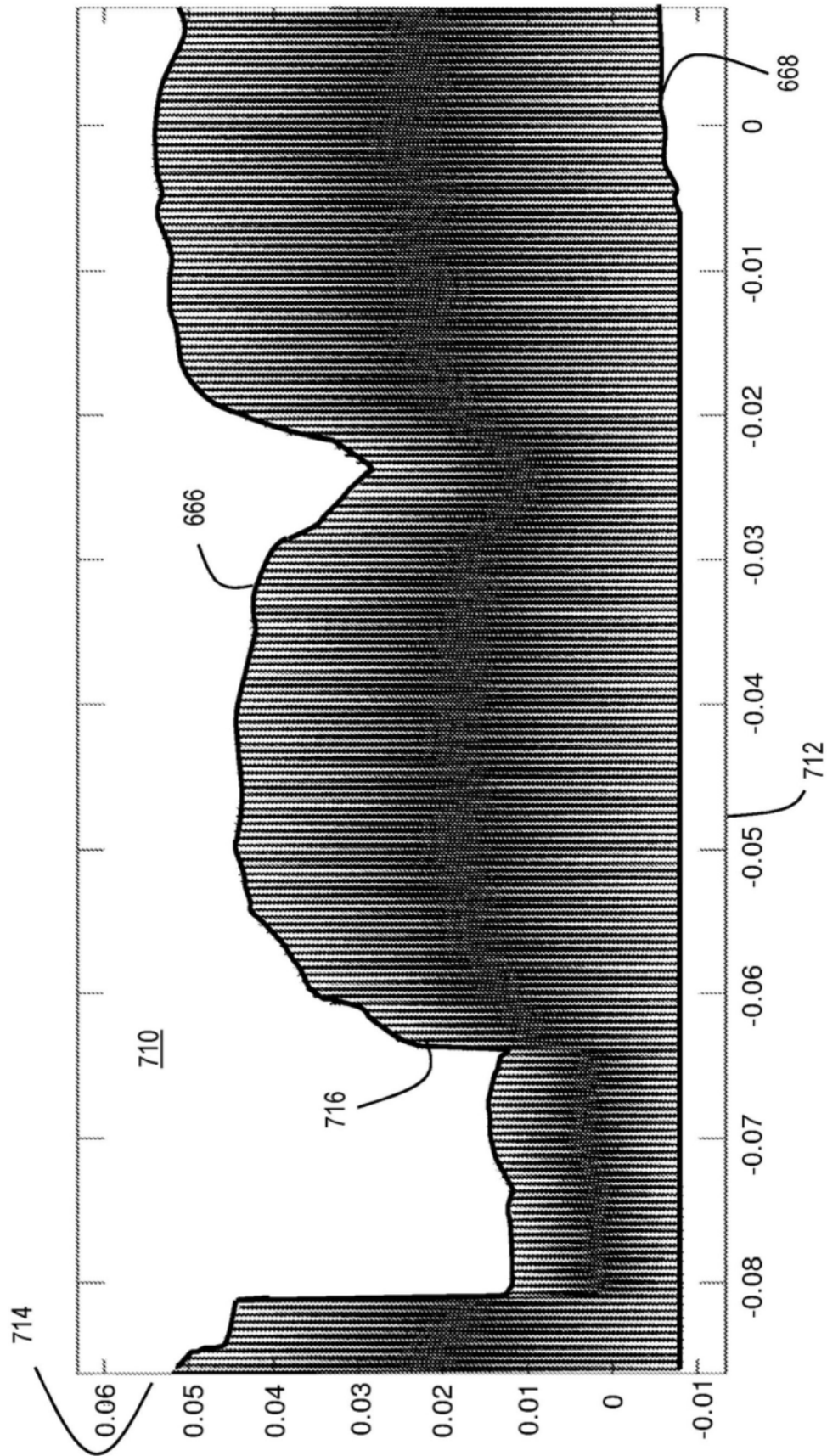


图7A

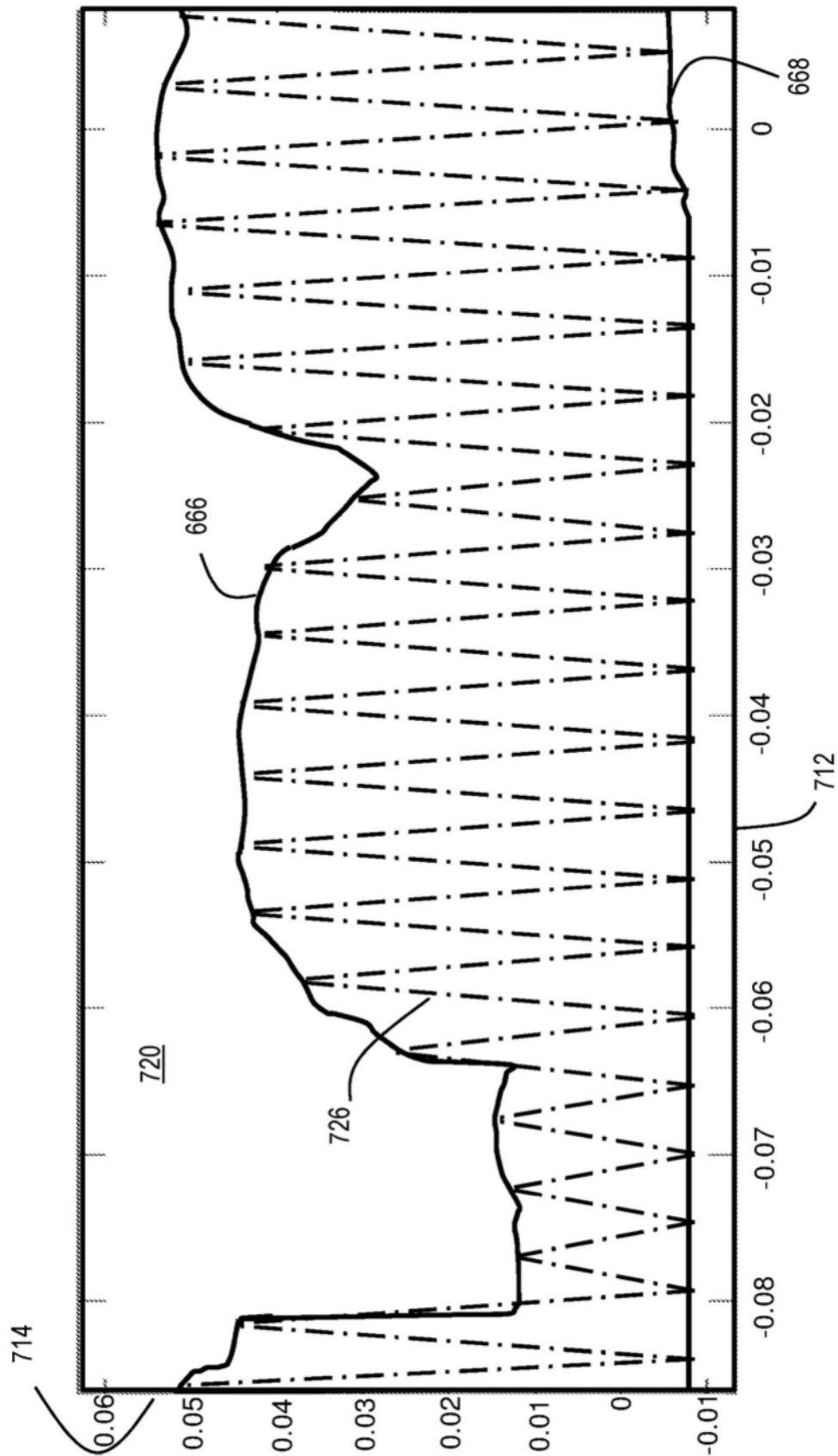


图7B

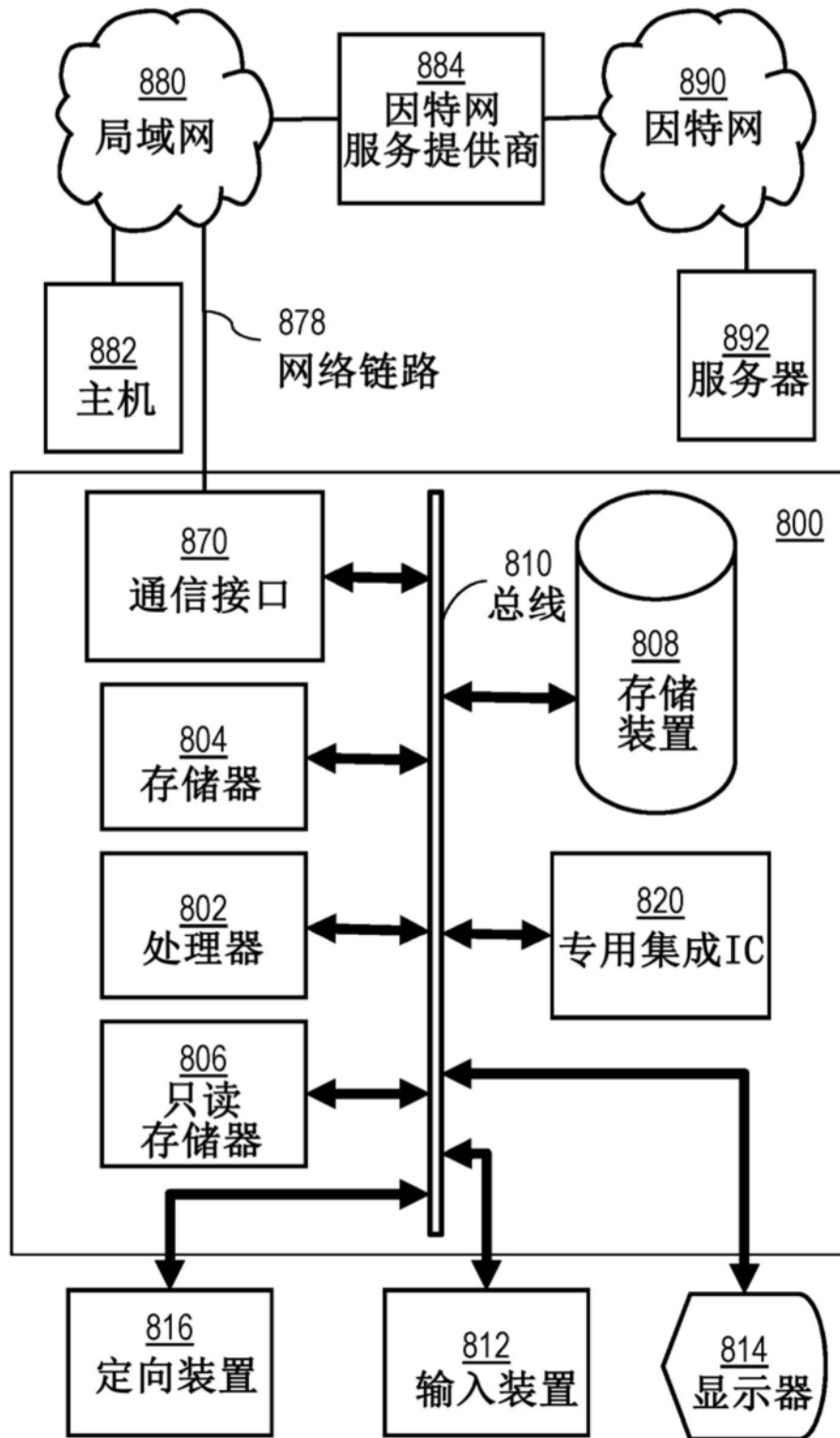


图8

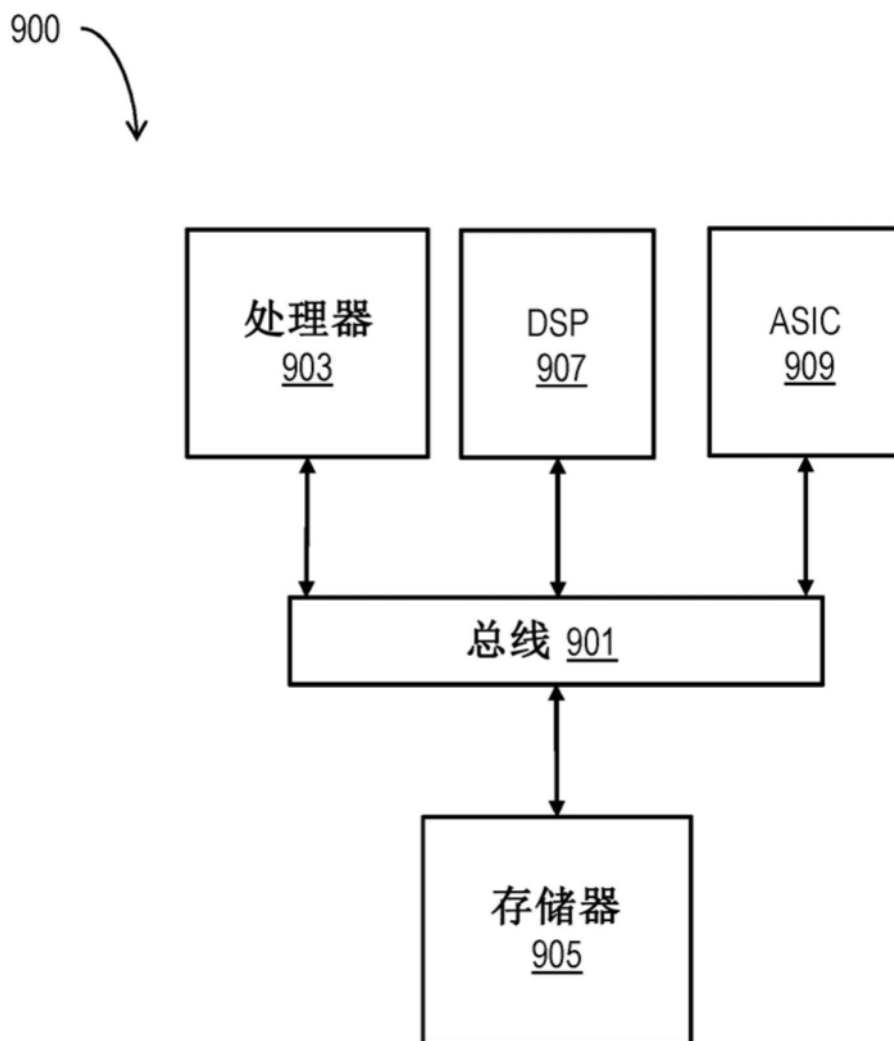


图9

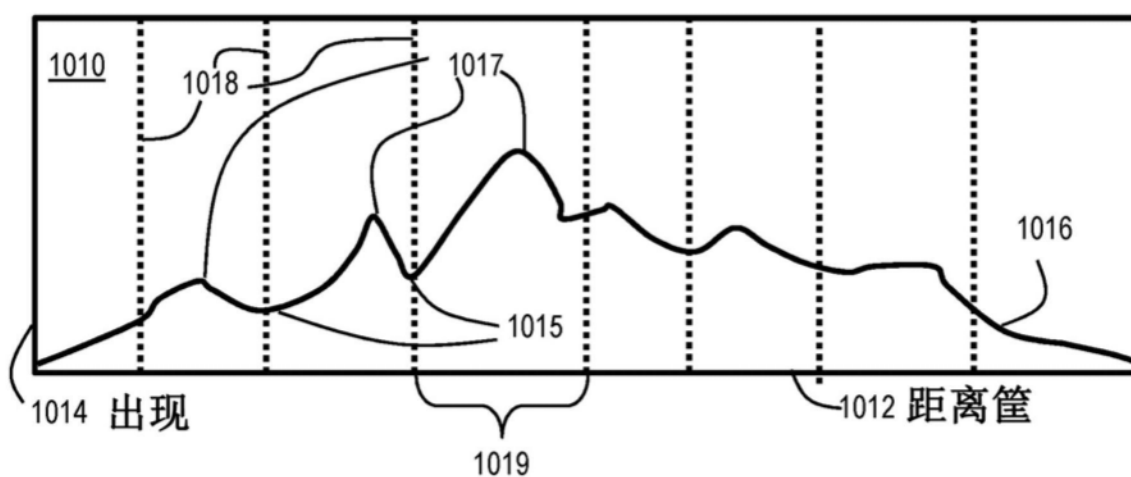


图10