



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110114632 B

(45) 授权公告日 2021.10.29

(21) 申请号 201780081215.2

(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 110114632 A

(43) 申请公布日 2019.08.09

(30) 优先权数据  
62/428,109 2016.11.30 US(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2019.06.27(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/US2017/062703 2017.11.21(87) PCT国际申请的公布数据  
W02018/160240 EN 2018.09.07(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

代理人 周亚荣 邓聪惠

(51) Int.Cl.  
G01C 3/08 (2006.01)(56) 对比文件  
US 2015323660 A1, 2015.11.12  
US 2011205523 A1, 2011.08.25

审查员 吉子雯

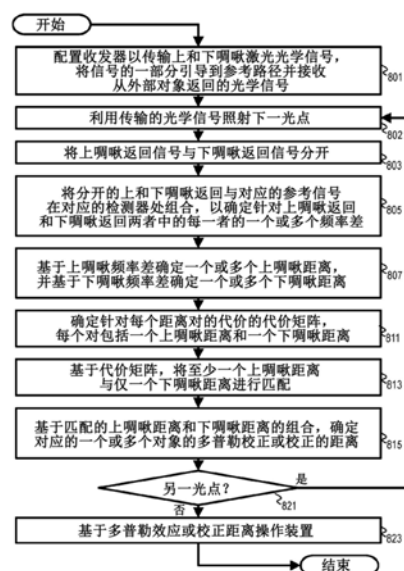
权利要求书2页 说明书22页 附图19页

## (54) 发明名称

用于对光学啁啾距离检测进行多普勒检测和  
多普勒校正的方法和系统

## (57) 摘要

用于对啁啾光学距离检测进行多普勒校正的技术包括：基于返回光学信号与具有使频率随时间增加的上啁啾的第一啁啾传输光学信号之间的对应频率差来获得距离的第一集合。基于返回光学信号与具有下啁啾的第二啁啾传输光学信号之间的对应频率差获得距离的第二集合。确定代价函数的值矩阵，每个值用于一个距离对，每个距离对包括第一集合中的一个距离和第二集合中的一个距离。基于矩阵确定第一集合中的一个距离和第二集合中的对应的一个距离的匹配对。基于对匹配的距离对进行组合，确定对距离的多普勒效应。基于多普勒效应操作装置。



1. 一种使用对象距离检测进行自主车辆控制的方法,包括:  
传输频率随时间增加的第一光学信号;  
接收对所述第一光学信号为响应性的第一返回信号;  
利用所述第一返回信号和基于所述第一光学信号的第一参考信号来确定到对象的至少一个第一距离;  
传输频率随时间降低的第二光学信号;  
接收对所述第二光学信号为响应性的第二返回信号;  
利用所述第二返回信号和基于所述第二光学信号的第二参考信号来确定到所述对象的至少一个第二距离;  
通过将所述至少一个第一距离与所述至少一个第二距离进行匹配来确定到所述对象的第三距离;以及  
至少基于到所述对象的所述第三距离来控制自主车辆的操作。
2. 根据权利要求1所述的方法,还包括:基于所述第一参考信号与所述第一返回信号之间的频率差来确定所述至少一个第一距离。
3. 根据权利要求1所述的方法,还包括:传输所述第一光学信号的同时传输所述第二光学信号。
4. 根据权利要求1所述的方法,其中,确定所述第三距离包括:校正与所述第一返回信号或所述第二返回信号中至少之一相关联的多普勒效应。
5. 根据权利要求1所述的方法,还包括:在第一频带传输所述第一光学信号,并且在不与所述第一频带重叠的第二频带传输所述第二光学信号。
6. 根据权利要求1所述的方法,还包括:使用显示装置呈现所述对象的多普勒校正位置。
7. 根据权利要求1所述的方法,还包括:  
确定所述对象是移动对象;以及  
使用显示装置呈现多普勒校正位置以指示所述对象是移动对象。
8. 根据权利要求1所述的方法,还包括:  
确定所述自主车辆与所述对象之间的接近速度;以及  
利用所述接近速度控制所述自主车辆的操作。
9. 根据权利要求1所述的方法,还包括:  
至少基于所述第三距离确定所述对象的形状;以及  
利用所述对象的形状控制所述自主车辆的操作。
10. 光检测和测距 (LIDAR) 系统,包括:  
激光源,配置成生成光学信号;  
调制器,配置成生成频率随时间增加的第一光学信号和频率随时间降低的第二光学信号;  
扫描光学器件,配置成传输所述第一光学信号和所述第二光学信号;以及  
处理电路,配置成:  
利用对所述第一光学信号为响应性的第一返回信号和基于所述第一光学信号的第一参考信号来确定到对象的至少一个第一距离;

利用对所述第二光学信号为响应性的第二返回信号和基于所述第二光学信号的第二参考信号来确定到所述对象的至少一个第二距离；

向车辆控制器输出通过将所述至少一个第一距离与所述至少一个第二距离进行匹配所得的到所述对象的第三距离，所述车辆控制器配置成至少基于到所述对象的所述第三距离来控制自主车辆的操作。

11. 根据权利要求10所述的LIDAR系统，其中，所述扫描光学器件包括光学耦接器，所述光学耦接器配置成传输所述第一光学信号和所述第二光学信号并接收所述第一返回信号和所述第二返回信号。

12. 根据权利要求10所述的LIDAR系统，还包括：检测器阵列，所述检测器阵列配置成获取所述第一返回信号和所述第二返回信号。

13. 根据权利要求10所述的LIDAR系统，其中，所述处理电路配置成：基于所述第一参考信号与所述第一返回信号之间的频率差来确定所述至少一个第一距离。

14. 根据权利要求10所述的LIDAR系统，其中，所述调制器配置成输出处于第一频带的所述第一光学信号和处于不与所述第一频带重叠的第二频带的第二光学信号。

15. 一种自主车辆系统，包括：

LIDAR传感器，配置成：

传输频率随时间增加的第一光学信号；

接收对所述第一光学信号为响应性的第一返回信号；

利用所述第一返回信号和基于所述第一光学信号的第一参考信号来确定到对象的至少一个第一距离；

传输频率随时间降低的第二光学信号；

接收对所述第二光学信号为响应性的第二返回信号；

利用所述第二返回信号和基于所述第二光学信号的第二参考信号来确定到所述对象的至少一个第二距离；以及

通过将所述至少一个第一距离与所述至少一个第二距离进行匹配来确定到所述对象的第三距离；以及

车辆控制器，所述车辆控制器配置成至少基于到所述对象的所述第三距离来控制自主车辆的操作。

16. 根据权利要求15所述的自主车辆系统，其中，所述车辆控制器配置成：至少基于所述第三距离来确定所述对象的形状，并利用所述对象的形状控制所述自主车辆的操作。

17. 根据权利要求15所述的自主车辆系统，其中，所述车辆控制器配置成：确定所述自主车辆与所述对象之间的接近速度，并利用所述接近速度控制所述自主车辆的操作。

18. 根据权利要求15所述的自主车辆，其中，所述LIDAR传感器配置成：传输处于第一频带的所述第一光学信号的同时传输处于与所述第一频带不重叠的第二频带的所述第二光学信号。

## 用于对光学啁啾距离检测进行多普勒检测和多普勒校正的方法和系统

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 根据35 U.S.C. §119(e), 本申请要求于2016年11月30日提交的临时申请第62/428,109号的权益, 其全部内容通过引用结合到本文中, 如同在本文中完全阐述。

[0003] 政府利益声明

[0004] 本发明根据美国陆军部准予的合同W9132V-14-C-0002、在美国政府的支持下完成。美国政府拥有本发明的某些权利。

### 技术领域

[0005] 本申请涉及用于对光学啁啾距离检测进行多普勒检测和多普勒校正的方法和系统。

### 背景技术

[0006] 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碰撞避免的各种应用。与传统微波测距系统诸如无线电波检测和测距(RADAR)相比, LIDAR以较小波束大小提供较精细的标度距离分辨率。光学距离检测可以通过几种不同的技术来完成, 包括基于光学脉冲到目标的往返行进时间的直接测距, 以及基于传输的啁啾光学信号和从目标散射的返回信号之间的频率差的啁啾检测。

[0007] 为了实现可接受的距离准确度和检测灵敏度, 直接长距离(long range, 远程)LIDAR系统使用脉冲重复率低且脉冲峰功率极高的短脉冲激光器。高脉冲功率可能引起光学部件快速退化。啁啾LIDAR系统使用峰光学功率相对低的长光学脉冲。在该配置下, 距离准确度取决于啁啾带宽而不是脉冲持续时间, 因此仍然可以获得优异的距离准确度。

[0008] 已经通过使用宽带射频(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的最新进展包括使用相同的经调制的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电信号中产生与参考信号和返回光学信号之间的频率差成比例的相对低的拍频。检测器处的这种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, 诸如使用现成且廉价可用的RF部件的优点。美国专利号7,742,152 中描述的最近成果示出了一种新颖的较简单的光学部件布置, 该布置使用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。

### 发明内容

[0009] 本发明人已经认识到一些情形和应用, 在这些情形和应用中对象(使用光学啁啾检测到其的距离)的运动由于多普勒频移而显著地影响这样的应用。提供了用于在这样的光学啁啾距离测量中检测多普勒效应并补偿多普勒效应的技术。

[0010] 在第一组实施方式中, 在处理器上实施的方法包括: 基于返回光学信号相较于第一啁啾传输光学信号的对应频率差来获得一个或多个距离的第一集合。第一啁啾传输光学

信号包括随时间增加其频率的上啁啾。该方法还包括基于返回光学信号相较于第二啁啾传输光学信号的对应频率差来获得一个或多个距离的第二集合。第二啁啾传输光学信号包括随时间降低其频率的下啁啾。该方法还更进一步包括确定代价函数的值矩阵,代价函数的每个值用于一个距离对,其中每个距离对包括第一集合中的一个距离和第二集合中的一个距离。更进一步地,该方法包括确定包括第一集合中的一个距离和第二集合中的对应的一个距离的匹配的距离对,其中对应关系是基于值矩阵的。还更进一步地,该方法包括基于对匹配的距离对进行组合来确定对距离的多普勒效应。还更进一步地,该方法包括基于多普勒效应操作装置。

[0011] 在第二组实施方式中,一种设备包括激光源,该激光源被配置成提供第一光学信号,该第一光学信号由处于第一光学频带的上啁啾和处于不与第一光学频带重叠的第二光学频带的同时式下啁啾构成。该设备包括第一分离器,该第一分离器被配置成接收第一信号并产生传输信号和参考信号。该设备还包括光学耦合器,该光学耦合器被配置成将传输信号引导到设备外部并接收从被传输信号照射的任何对象反向散射的任何返回信号。该设备还包括频移器,该频移器被配置成将传输信号或返回信号相对于参考信号偏移已知的频率偏移。还更进一步地,该设备包括光学检测器,该光学检测器设置成接收参考信号和施加了已知频率偏移之后的返回信号。另外,该设备还更进一步包括处理器,该处理器被配置成执行从光学检测器接收电信号的步骤。处理器还被配置成通过下述方式来支持对由于被传输信号照射的任何对象的运动引起的多普勒效应的确定:确定电信号的第一频带中的零个或多个拍频的第一集合以及电信号的第二不重叠频带中的零个或多个拍频的第二集合。第一频带和第二不重叠频带基于已知的频率偏移而确定。

[0012] 在第二组的一些实施方式中,激光源由激光器、射频波形发生器和调制器组成。激光器配置成提供具有载波频率 $f_0$ 的光束。射频波形发生器被配置成在 $f_a$ 和 $f_b$ 之间延伸的射频频带中产生第一啁啾,其中 $f_b > f_a > 0$ 。调制器被配置成基于第一啁啾产生第一光学信号,在第一光学信号中第一光学频带处于载波频率的第一边带,并且第二光学频带处于不与第一边带重叠的第二边带。

[0013] 在第三组实施方式中,一种设备包括激光源,该激光源被配置成提供由处于第一光学频带的上啁啾和处于不与第一光学频带重叠的第二光学频带的同时式下啁啾构成的第一光学信号。该设备包括第一分离器,该第一分离器被配置成接收第一信号并产生传输信号和参考信号。该设备还包括光学耦合器,该光学耦合器被配置成将传输信号引导到设备外部并接收从被传输信号照射的任何对象反向散射的任何返回信号。还更进一步地,该设备包括第二分离器,该第二分离器被配置成产生参考信号的两个副本和返回信号的两个副本。更进一步地,该设备包括两个光学滤波器。第一光学滤波器被配置成使第一光学频带通过并阻挡第二光学频带。第二光学滤波器被配置成使第二光学频带通过并阻挡第一光学边带。该设备再进一步包括两个光学检测器。第一光学检测器被设置成接收通过第一光学滤波器之后的参考信号的一个副本和返回信号的一个副本。第二光学检测器被设置来接收通过第二光学滤波器之后的参考信号的不同的副本和返回信号的不同的副本。另外,该设备还更进一步包括处理器,该处理器被配置成执行从第一光学检测器接收第一电信号和从第二光学检测器接收第二电信号的步骤。处理器还被配置成通过下述方式来支持对由于被传输信号照射的任何对象的运动而引起的多普勒效应的确定:所述方式为确定第一电信号

中的零个或多个拍频的第一集合,以及确定第二电信号中的零个或多个拍频的第二集合。

[0014] 在其他实施方式中,系统或设备或计算机可读介质被配置成执行上述方法的一个或多个步骤。

[0015] 然而,其他方面、特征和优点将根据以下简单地通过示出若干具体实施方式和实现(包括预期用于实施本发明的最佳模式)进行的详细描述而容易地变得明显。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,附图和描述本质上被认为是说明性而非限制性的。

## 附图说明

[0016] 在所附的附图中,通过示例而非限制的方式示出了实施方式,其中相同的附图标记指代相似的元件,并且其中:

[0017] 图1A是示出了根据实施方式的示例光学啁啾距离测量的一组图表;

[0018] 图1B是示出了根据实施方式的指示距离的、由去啁啾(de-chirp,去调频、解线频调)产生的拍频的示例测量的图表;

[0019] 图2A和图2B是示出了根据不同实施方式的高分辨率LIDAR系统的示例部件的框图;

[0020] 图3A是示出了根据实施方式的外差啁啾LIDAR系统的示例部件的框图;

[0021] 图3B是示出了根据实施方式的零差啁啾LIDAR系统的示例部件的框图;

[0022] 图4A是示出了示例图表的框图,该示例图表示出了根据实施方式的基于上啁啾LIDAR系统的拍频峰的到若干目标在移动时的这些目标的距离;

[0023] 图4B是示出了示例图表的框图,该示例图表示出了根据实施方式基于下啁啾LIDAR系统的拍频峰的、到正在移动时的若干目标的距离;

[0024] 图5A是示出了根据实施方式的用于LIDAR系统的示例串行上和下啁啾传输光学信号的图表;

[0025] 图5B是示出了根据实施方式的用于LIDAR系统的示例同时式上和下啁啾传输光学信号的图表;

[0026] 图5C是示出了根据实施方式的由调制器产生的用于为LIDAR系统生成同时式上和下啁啾传输光学信号的示例一阶边带的图表;

[0027] 图5D是示出了根据另一实施方式的用于LIDAR系统相对于光学载波的示例同时式上和下啁啾传输光学信号和参考信号(L0)的图表;

[0028] 图5E是示出了根据另一实施方式的用于LIDAR系统相对于光学载波的示例偏移的同时式上和下啁啾传输光学信号和参考信号(L0)的图表;

[0029] 图6是示出了根据实施方式的用于同时式上和下啁啾LIDAR系统的示例部件的框图;

[0030] 图7A是示出了根据实施方式的示例上啁啾和下啁啾距离对的框图;

[0031] 图7B是示出了根据实施方式的具有元素的示例代价矩阵的框图,这些元素对应于图7A中描绘的示例上啁啾和下啁啾距离对;

[0032] 图8是示出了根据实施方式的用于使用上和下啁啾LIDAR系统来补偿对距离的多

普勒效应的示例方法的流程图；

[0033] 图9A至图9C是示出了根据实施方式的基于多普勒校正距离和对未校正距离的改进的显示装置上的示例输出的图像；

[0034] 图10A是根据实施方式的一组三个图像，示出了显示装置上的基于针对接近LIDAR系统的目标的多普勒校正距离的示例输出；

[0035] 图10B是根据实施方式的一组三个图像，示出了显示装置上的基于针对从LIDAR系统撤退的目标的多普勒校正距离的示例输出；

[0036] 图11是示出了根据实施方式的显示装置上的基于高分辨率的多普勒校正距离的示例输出的图像；

[0037] 图12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框图；以及

[0038] 图13示出了可以在其上实施本发明的实施方式的芯片组。

## 具体实施方式

[0039] 描述了一种用于对光学啁啾距离检测进行多普勒校正的方法和设备以及系统和计算机可读介质。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，对于本领域技术人员明显的是，本发明可以在没有这些具体细节的情况下实践。在其他情况下，以框图形式示出了公知的结构和设备，以避免不必要地模糊本发明。

[0040] 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方式中阐述的数值。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各自的测试测量中发现的标准偏差。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位给出的暗含精度。因此，值1.1暗含从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，并且除非上下文另有说明，否则暗含最低有效位周围的较宽范围，诸如“约1.1”暗含从1.0到1.2的范围。如果最低有效位不清楚，则术语“约”暗含因子2，例如，“约X”表示0.5X至2X的范围内的值，例如，约100表示50至200范围内的值。此外，本文公开的所有范围应理解为包涵本文包含的任何和所有子范围。例如，“小于10”的范围可以包括最小值零和最大值10(含)之间的任何和所有子范围，即，具有等于或大于0的最小值和等于或小于10的最大值的任何和所有子范围，例如1至4。

[0041] 下面在线性频率调制的光学信号但是啁啾不需要是线性的并且可以根据任何随时间变化的变化率来改变频率的背景下描述本发明的一些实施方式。在单个检测器或检测器对上单个波束及其返回波束的背景下描述了实施方式，单个波束及其返回波束然后可以使用任何已知的扫描装置扫描，诸如线性步进或旋转光学部件，或者利用传输器和检测器或检测器对的阵列。

[0042] 1. 啁啾检测概述

[0043] 图1A是示出了根据实施方式的示例光学啁啾距离测量的一组图表110、120、130、140。横轴112对于所有四个图表均是相同的，并且表示以类似毫秒(ms,  $1\text{ms}=10^{-3}$ 秒)的任意单位计的时间。图表110表示用作传输光学信号的光束的功率。图表110中的竖轴114表示以任意单位计的传输信号的功率。迹线116表示功率在有限的脉冲持续时间内是存在的， $\tau$ 从时间0开始。图表120表示传输信号的频率。竖轴124表示以任意单位计的传输频率。迹线126

表示脉冲的频率在脉冲的持续时间 $\tau$ 内从 $f_1$ 增加到 $f_2$ ,因此具有带宽 $B=f_2-f_1$ 。频率变化率为 $(f_2-f_1)/\tau$ 。

[0044] 在图表130描绘了返回信号,如同在图表120中,该图表具有表示时间的横轴112和表示频率的竖轴124。图表120的啁啾126也在图表130上绘制为虚线。第一返回信号由迹线136a给出,第一返回信号仅是强度减弱(未示出)并延迟 $\Delta t$ 的传输参考信号。当在经过距离 $2R$ 后从外部对象接收到返回信号时,其中 $R$ 是到目标的距离,以延迟时间 $\Delta t$ 开始的返回信号由 $2R/c$ 给出, $c$ 是光在介质中的速度(大约每秒 $3 \times 10^8$ 米,m/s)。在这段时间内,频率所改变的量取决于距离,称为 $f_R$ ,并由频率变化率乘以延迟时间给出。这由公式1a给出。

$$[0045] \quad f_R = (f_2 - f_1) / \tau * 2R / c = 2BR / c\tau \quad (1a)$$

[0046]  $f_R$ 的值在称为去啁啾的时域混合操作中通过传输信号126和返回信号136a之间的频率差来测量。所以距离 $R$ 由公式1b给出。

$$[0047] \quad R = f_R \cdot c\tau / 2B \quad (1b)$$

[0048] 当然,如果返回信号在完全传输脉冲之后到达,即,如果 $2R/c$ 大于 $\tau$ ,则等式1a和1b无效。在这种情况下,参考信号被延迟已知或固定的量以确保返回信号与参考信号重叠。将参考信号的固定或已知延迟时间乘以光的速度 $c$ ,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非常精确。

[0049] 在一些情形下,由传输光束照射的光点在不同的距离处遭遇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,或者对象的处于距LIDAR不同距离处的更近和更远的部分,或被照射的光点内的两个单独的对象。在这样的情形下,还将接收第二强度减弱且延迟不同的信号,在图表130上由迹线136b表示。这将具有不同的 $f_R$ 测量值,其使用公式1b给出不同的距离。在一些情形下,接收到多个返回信号。

[0050] 图表140描绘了第一返回信号136a和参考啁啾126之间的差频率 $f_R$ 。如图1A中的所有其他对准的图表,横轴112表示时间,并且竖轴134表示在更扩大的标度上的频率差。迹线146描绘了在传输啁啾期间测量的恒定频率 $f_R$ ,其表示由等式1b给出的特定距离。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);因此,使用公式1b得到较大的距离。

[0051] 用于去啁啾的常用方法是将参考光学信号和返回的光学信号都引导到相同光学检测器。检测器的电输出由拍频主导,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,  $1\text{MHz} = 10^6$ 赫兹=每秒 $10^6$ 个周期)的射频(RF)范围内,而不是在太赫兹(THz,  $1\text{THz} = 10^{12}$ 赫兹)的光学频率范围内。这样的信号易于由普通且廉价的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的连续波(CW)音(与啁啾用作本地振荡器比较)混合。这引起本身是啁啾的被检测信号(或者任何波形被传输)。在这种情况下,被检测信号将在数字域中经历匹配滤波,如Kachelmyer 1990中所述。缺点是数字化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。

[0052] 图1B是示出了根据实施方式的指示距离的、由去啁啾产生的拍频的示例测量的图表。横轴152表示以兆赫计的频率;并且竖轴表示相对于传输功率密度 $I_T$ 的返回信号功率密



度 $I_R$ ,单位为分贝(dB,以dB计的功率= $20\log(IR/IT)$ )。迹线156是光学检测器输出的电信号的傅立叶变换,诸如由FFT电路产生并且基于Adany等人2009年公布的数据。峰的水平位置给出 $f_R$ 并用于使用公式1b估计距离。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,由峰值(图1B中约为-31dB)和在峰的肩部处的本底噪声(图1B中约为-50dB)之间的差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、高度和宽度表征这些峰。例如,在一些实施方式中,使用了通过MATLAB——信号处理工具箱——进行的FFT或峰检测,MATLAB可从马萨诸塞 Natick的MATHWORKS™的MATLAB™获得。还可以使用依赖于CUDA 中的FFT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)上编程了定制实现。常用的算法是对距离简档进行阈值处理并运行质心算法、峰拟合算法(3点高斯拟合)或一些函数(如高斯函数)的峰的非线性拟合来更准确确定峰的位置。

[0053] 如果检测对象(源)在连接该检测对象与LIDAR系统(观察者)的矢量上以速率 $v_s$ 移动并且LIDAR系统在连接检测对象与该LIDAR系统的矢量上以速率 $v_o$ 移动,则返回信号可能被多普勒频移并且检测的拍频 $f_R$ 也被频移,这可能引起检测距离的误差。在许多情形下,基于多个返回的相对位置来识别被检测对象的形状。因此,对象的形状可能有误,并且识别对象的能力可能受到损害。

[0054] 观察到的返回的频率 $f'$ 与通过多普勒效应的返回的正确频率 $f$ 不同,并且由等式2a近似。

$$[0055] \quad f' = \frac{(c+v_o)}{(c+v_s)} f \quad (2a)$$

[0056] 其中 $c$ 是光在介质中的速度。注意,如果观察者和源在两者之间的矢量上以相同方向以相同速度移动,则两个频率是相同的。两个频率之间的差 $\Delta f = f' - f$ 是多普勒频移 $D$ ,它构成距离测量的误差,并由公式2b给出。

$$[0057] \quad D = \left[ \frac{(c+v_o)}{(c+v_s)} - 1 \right] f \quad (2b)$$

[0058] 注意,误差的幅度(magnitude,大小)随着信号的频率 $f$ 而增加。还注意,对于静止的LIDAR系统( $v_o = 0$ ),对于以10米每秒( $v_o = 10$ )移动的目标,以及频率约为500THz的可见光,则误差大小为大约16MHz,这是在图1B中约为22MHz的 $f_R$ 大小的75%,导致75%的 $f_R$ 误差,并因此导致75%的距离误差。在各种实施方式中,检测多普勒频移误差并用于校正如本文所述的距离。

[0059] 2.啁啾检测硬件概述

[0060] 为了描绘如何实现啁啾检测方法,描述了一些通用和特定的硬件方法。图2A和图2B是示出根据各种实施方式的高分辨率LIDAR系统的示例部件的框图。在图2A中,激光源212发射载波201,基于来自RF波形发生器215的输入在调制器214中对该发射载波进行频率调制以产生具有带宽 $B$ 和持续时间 $\tau$ 的脉冲。在一些实施方式中,RF波形发生器215利用来自处理系统250的命令被软件控制。分离器216将调制的光学波形分成具有波束203的大部

分能量的传输信号205和具有较小量的能量但仍然足以与从目标(未示出)散射的返回光291产生良好外差或零差干涉的参考信号207。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波束以对其路径中的任何对象建立简档。

[0061] 参考波束在参考路径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,分离器216在调制器214上游,并且参考波束207未经调制。在一些实施方式中,使用新激光器(未示出)独立地生成参考信号,并且使用在参考路径220中的单独调制器(未示出)和来自发生器215的RF波形单独调制参考信号。在一些实施方式中,如下面参考图2B所述,使用不同的调制器;但是,只有一个激光源212用于传输信号和参考信号两者,以确保相干性。在各种实施方式中,从不那么灵活到较灵活的方法,通过以下方式使得参考与散射或反射场一起到达:1)在场景中放置镜子,以将传输波束的一部分反射回检测器阵列,使得路径长度很好地匹配;2)在有或没有用以补偿在特定距离内观察到或预期的相位差的路径长度调整的情况下,使用光纤延迟与路径长度紧密匹配,并在检测器阵列附近用光学器件广播参考波束,如图2A所示;或者3)使用频移器件(声光调制器)或本地振荡器波形调制的时间延迟来产生单独的调制以补偿路径长度不匹配;或一些组合。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以使得返回与参考信号充分重叠而没有延迟。在一些实施方式中,参考信号207b在一个或多个光学混合器232处与返回信号291 光学混合。

[0062] 在各种实施方式中,目标的多个部分对于每个扫描波束将相应的返回光291信号散射回到检测器阵列230,从而基于由多个波束和多个返回照射的目标的相应多个部分的多个距离产生点云。检测器阵列是单个光学检测器或光学检测器平衡对或布置在大致垂直于来自目标的返回波束291的平面中的这样的光学检测器的1D或2D阵列。接口模式的相位或幅度或一些组合由获取系统240在脉冲持续时间 $\tau$ 期间多次针对每个检测器进行记录。每个脉冲持续时间的数量影响下行(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率选择的实际考虑因素。帧率是采样带宽,通常称为“数字化器频率”。基本上,如果在具有Y距离宽度的分辨率区间的脉冲期间收集了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,诸如下面参考图8描述的计算机系统,或下面参考图9描述的芯片组。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。

[0063] 多普勒补偿模块270确定多普勒频移的大小和基于此的校正距离。在一些实施方式中,多普勒补偿模块270控制RF波形发生器215。

[0064] 图2B描绘了允许将软件控制的延迟引入到产生L0信号的参考路径中的可替代硬件布置。激光源212、分离器216、传输信号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 如上参考图2A所述。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。分离器216被移动到激光源212和调制器214a和214b之间,以产生作用在调制器214a上的光学信号283和作用在修正的参考路径282 中的调制器214b上的较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被分成传输(TX)路径波束283和参考/本地振荡器(L0) 路径波束287a;并且,在每个路径中使用单独的调制器。通过使用双调制器方法,可以在偏移的起始频率和/或偏移的起始时间用啁啾编程任一路径。这可以用于允许系统280获得用于啁啾多普勒补偿的距离延迟效应。通过使每个距离门中使用的延迟偏移,

尽管存在其他系统限制(检测器和数字化器带宽、测量时间等),系统仍可以在高分辨率的情况下毫无疑问地进行测量。因此,在一些实施方式中,修正的多普勒补偿模块278控制RF波形发生器215以施加适合于下面描述的多普勒补偿模块产生的每个多普勒频移的延迟时间。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自适应扫描方法也在下行维度中自适应。

[0065] 例如,在一些实施方式中,所使用的激光器被主动线性化,其中调制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。该系统被配置成产生带宽B和持续时间 $\tau$ 的啁啾,该啁啾适合于期望的下行分辨率,如下面针对各种实施方式更详细地描述的。例如,在一些示出的实施方式中,选择B的值为约90GHz并且 $\tau$ 为约200毫秒(ms,  $1\text{ms} = 10^{-3}$ 秒)以在所进行的实验中在相对低的检测器阵列帧率的约束内工作。进行这些选择以观察约30cm的合理大距离窗口,这对于确定对象的形状和对象的识别通常是重要的。该技术对从10MHz至5THz的啁啾带宽起作用。然而,对于3D成像应用,典型范围是:从大约300MHz到大约20GHz的啁啾带宽、从大约250纳秒(ns,  $\text{ns} = 10^{-9}$ 秒)到大约1毫秒(ms,  $1\text{ms} = 10^{-3}$ 秒)的啁啾持续时间、从大约0米到大约20km的距目标的距离、目标处的从大约3毫米(毫米,  $1\text{毫米} = 10^{-3}$ 米)到大约1米(m)的光点大小、目标处的从大约7.5mm至大约0.5m的深度分辨率。注意,在这些条件下可以使距离窗口延伸到几千米,并且多普勒分辨率也可以非常高(取决于啁啾的持续时间)。尽管出于说明的目的,在图2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其部分以不同的方式布置在相同或者不同的主机上、在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包括在相同或不同的主机上。例如,分离器216和参考路径220包括零个或多个光学耦合器。

[0066] 图3A是示出根据实施方式的外差啁啾LIDAR系统300a的示例部件的框图。根据美国专利号7,742,152中描述的系统进行修改的该系统300a使用电子去啁啾。尽管描绘了对对象390以示出系统300a的操作,但是对象390不是系统300a的一部分。系统300a包括激光器301、调制器310、作为扫描光学耦合器320的望远镜、平衡光电检测器330、处理电路340、产生带宽B和持续时间 $\tau$ 的FM啁啾的波形发生器350、功率分离器351,去啁啾混合器360以及声光调制器370。在该系统中,源激光器301输出波束被波束分离器302分成两部分;一部分由调制器310基于来自功率分离器351和运算放大器352a的FM啁啾进行调制,以产生馈送到望远镜的波束305。

[0067] 波束的另一部分,波束307a,用于产生用于相干检测的本地振荡器(L0)。声学扬声器产生具有频率 $f_m$ 的声学信号以驱动声光调制器(AOM)370将光学频率偏移 $f_m$ 成波束307b,其用作外差检测的中频(IF)。光学耦合器322将波束307b引导到平衡光电检测器330中之一上。

[0068] 返回光学信号391也由光学耦合器322引导到平衡光电检测器的另一部分。平衡光电二极管330拒绝直接检测部件。输出电信号在运算放大器344a中被放大,IF信号由带通滤波器341选择,并由恢复基带波形的肖特基二极管342检测。结果电信号被引导通过低通滤波器343和运算放大器344b。

[0069] 去啁啾混合器将该检测信号与功率分离器351和运算放大器352b输出的原始啁啾波形进行比较,以产生具有取决于RF参考波形和检测波形之间的频率差的拍频的电信号。

另一运算放大器344c和FFT过程345用于求出拍频(beat frequency, 跳动频率)。处理器346被编程为进行数据分析。与直接检测脉冲行进时间相比,像300a这样的相干检测系统显著地改善了接收器信噪比(SNR),但代价是系统复杂性大大增加。从运算放大器344a 和去啁啾混合器360直到处理器346的电子部件构成信号处理部件340。

[0070] 根据所示实施方式,从光学耦合器320射出的光束以有限波束大小作用在一个或多个对象390上,其照射一个或多个对象的被照射部分392。来自被照射部分的反向散射光被返回通过望远镜,以由光学耦合器322引导到光学检测器诸如平衡光电检测器330的一个光电二极管上。一个或多个对象以对象速度分量394相对于系统300a移动,该对象速度分量对于来自被照射部分的不同部分的返回可以不同。基于该运动,系统300a检测到的信号的频率与仅基于该距离的频率不同。处理器346包括如下所述的多普勒补偿模块380,以检测多普勒效应并针对多普勒效应校正结果距离。

[0071] 图3B是示出根据实施方式的零差啁啾LIDAR系统300b的示例部件的框图。根据美国专利号7,742,152中描述的系统进行修改的该系统300b使用光子去啁啾并简化了RF部件。尽管描绘了对象390以示出系统300b的操作,但是对象390不是系统300b的一部分。系统300b包括波形发生器 350、激光器301、调制器310、调制器310下游的分离器302、用作扫描光学耦合器320的望远镜、平衡光电检测器330以及处理电路360。

[0072] 在该系统中,光学信号和本地振荡器LO都由相同波形发生器350驱动,并在运算放大器352中放大。由调制器310输出的波束被波束分离器302 分成波束部分305和波束部分307c。具有大部分波束能量(例如,90%或更多)的波束部分305传输通过光学耦合器320,以照射如上所述以速度分量394移动的对象390的被照射部分392。波束部分307c在延迟装置308 中被延迟所需的量以产生参考信号307d。在一些实施方式中,没有延迟因此省略了延迟装置308。参考信号307d和来自望远镜或其他光学耦合器320 的返回信号309通过光学耦合器322被引导到光电检测器330。在下面更详细描述的一些实施方式中,在传输通过耦合器320之前,将移频器318添加到传输信号305的光学路径。在下面描述的其他实施方式中,移频器318 设置在返回信号309通过耦合器320之后的光学路径中。

[0073] 去啁啾过程在平衡光电二极管330内完成,因此消除了对去啁啾混合和相关联的RF处理的需求。因为由LO承载的原始啁啾光学波形如所示在光电二极管处以其延迟版本跳动,所以可以通过对运算放大器344输出的光电流信号的FFT部件345的频率分析直接获得目标距离。处理器362被编程为进行数据分析。处理器362包括如下所述的多普勒补偿模块380以检测多普勒效应,并针对多普勒效应校正结果距离。从运算放大器344到处理器362的电子部件构成信号处理部件360。考虑到散粒噪声是相干检测情况下的主要噪声,拍频下的SNR相较于直接检测的SNR和系统300a的 SNR降低。

[0074] 3. 多普勒效应检测概述

[0075] 图4A是示出了根据实施方式的示例图表410的框图,该示例图表示出了基于上啁啾LIDAR系统的拍频峰的、到正在移动时的若干对象的距离。横轴 412表示基于拍频的以任意单位计的距离,并且竖轴414表示以相对单位计的峰功率。因为啁啾是上啁啾(在稍后时间频率较高),所以频率的增加转化为行进时间的增加并因此转化为距离的增加。拍频被绘制为位于与拍频相关联的距离处的箭头,箭头的高度表示峰的相对功率。三个观察峰414a、414b和414c由实线箭头在各个距离处表示。由于误差,将在下面更详细地讨论最后的峰

414c。

[0076] 第一观察峰414a是由于第一散射体以足以引入向较高频率偏移(称为蓝移)的速度向LIDAR系统移动引起的。描绘了蓝移的距离效应415。由于啁啾是上啁啾,如图1A的图表120所示,频率的增加与增加的距离相关联,并且实际位置413a在推断的距离的左侧。该对象实际上处于下述距离处,该距离在没有多普勒效应的情况下将位于距离413a处。但是,LIDAR系统数据处理部件既不知道蓝移距离效应415,也不知道实际距离413a。

[0077] 相较之下,第二观察峰414b是由于第二散射体以足以引入向较低频率偏移(称为红移)的速度远离LIDAR系统移动引起的。描绘了红移的距离效应416。由于啁啾是上啁啾,频率的降低与降低的距离相关联,并且实际位置413b在推断的距离的右侧。该对象实际上处于下述距离处,该距离在没有多普勒效应的情况下将位于413b距离处。但是,LIDAR系统数据处理部件既不知道红移距离效应416,也不知道实际距离413b。

[0078] 确定对距离的多普勒效应的大小的一种方法是用上啁啾一次并再次使用下啁啾确定距离,其中传输的光学信号的频率随时间降低。利用下啁啾传输信号,后来到达的具有较低的频率而不是较高的频率,并且每个红移或蓝移对距离将具有与其在上啁啾传输信号情况下相反的效应。可以组合两个相反影响的距离,例如通过取平均,以确定多普勒效应已经减少或消除的距离。两个距离之间的差可以表示多普勒效应的大小(例如,距离效应可以被确定为两个距离中的差的一半)。

[0079] 图4B是示出根据实施方式的示例图表420的框图,该示例图表示出了基于下啁啾LIDAR系统的拍频峰的、到正在移动时的若干对象的距离。横轴412和竖轴414如上所述。因为啁啾是下啁啾(在稍后时间频率较低),所以频率的降低转化为行进时间的增加并因此转换为距离的增加。仅两个观察峰424a和424b用实线箭头在相应距离处表示。

[0080] 如上所述,第一观察峰414a是由于第一散射体以足以引入向较高频率偏移(称为蓝移)的速度向LIDAR系统移动引起的。蓝移的距离效应425与针对上啁啾的距离效应不同;距离效应在相反的方向上。由于啁啾是下啁啾,频率的增加与降低的距离相关联,并且实际位置413a(与示例图表410中相同的距离)在推断距离的右侧。还如上所述,第二观察峰424b是由于第二散射体以足以引入向较低频率的偏移(称为红移)的速度远离LIDAR系统移动引起的。红移的距离效应426朝向更长的距离。该对象实际上在距离413b处在推断的距离左侧,比推断的距离更近。

[0081] 如上所述,可以组合两个相反影响的距离,例如通过取平均,以确定多普勒效应已经减少或消除的距离。可以看出,距离414a与424a的组合,诸如平均值,将给出非常接近实际距离413a的值。类似地,距离414b与424b的组合,诸如平均值,将给出非常接近实际距离413b的值。对象A的距离效应415的幅度(等于对象A的距离效应425的幅度)可以被确定为两个距离的差的一半,例如, $1/2 * (\text{距离}414a - \text{距离}425a)$ 。类似地,对象B的距离效应416的幅度(等于对象B的距离效应426的幅度)可以被确定为两个距离的差的一半,例如, $1/2 * (\text{距离}424b - \text{距离}414b)$ 。在一些实施方式中,上啁啾/下啁啾返回以将距离程度结合到检测的上啁啾/下啁啾峰的方式组合。基本上,组合上啁啾/下啁啾返回上的检测峰的分布(许多不同的统计选项),以减少多普勒估计的方差。

[0082] 该校正取决于能够将上啁啾返回中的峰与下啁啾返回中的对应峰配对。在一些情形下,这是明显的。然而,发明人已经注意到,由于伪峰诸如峰414c,如何自动确定配对哪

个峰(例如,图4A的三个峰中的哪个与图4B 的两个峰中的每个峰配对)并不总是清楚的。另外,由于视场中的杂波或其他噪声因素引起的伪峰的数量以及与移动对象和移动LIDAR系统相关联的距离的变化意味着峰的配对在上啁啾传输脉冲和下啁啾传输脉冲在时间上分开时变得困难。

[0083] 图5A是示出根据实施方式的用于LIDAR系统的示例系列(也称为顺序)上和下啁啾传输光学信号的图表。横轴512表示以任意单位计的时间;并且竖轴514表示光传输信号或参考信号的以任意单位计的频率。持续时间515a的第一脉冲是上啁啾,并且持续时间515b的第二脉冲是下啁啾。可以组合从上啁啾和下啁啾获得的距离对,以确定较好的距离估计和多普勒效应。图2、图3A或图3B中的任何LIDAR系统都可以用这样的顺序上和下啁啾操作。对于上啁啾和下啁啾脉冲,不要求带宽或脉冲持续时间或两者都相同,只要每个跨越特定应用感兴趣的距离值即可。

[0084] 如上所述,如果顺序距离测量可以成功地配对和取平均,则可以通过对顺序测量的距离取平均来正确地推断目标的距离和多普勒。然而,当多普勒频移在测量之间变化或者当转化的波束(例如,LIDAR扫描仪)转化到测量之间的新位置时,顺序上/下方法导致错误,这可能导致被测量对象的变化或者距相同对象的实际距离的变化或一些组合。如下面更详细地解释的,使用代价函数来生成代价矩阵,然后该代价矩阵用于确定来自上和下啁啾的距离的期望配对。

[0085] 在一些实施方式中,改变LIDAR系统以产生同时式上和下啁啾。该方法消除了由对象速度差或者LIDAR位置相对于实际改变距离的对象的变化、或者波束中的瞬态散射体等或者一些组合引起的可变性。该方法然后保证在上和下啁啾上测量的多普勒频移和距离确实相同并且可以最有效地组合。多普勒方案保证了频率空间中非对称偏移返回对的并行捕获,以获得高概率的正确补偿。

[0086] 图5B是示出根据实施方式的用于LIDAR系统的示例同时式上和下啁啾传输光学信号的图表。横轴表示以任意单位计的时间,不一定与图5A中的轴线限制相同。例如,在一些实施方式中,轴524的全时间范围是轴512 的全时间范围的一半。竖轴522表示光传输信号或参考信号的以任意单位计的频率。在持续时间252a的脉冲期间,生成在任何时间包括两个光学频率的光束。一个频率增加例如从 $f_1$ 增加到 $f_2$ ,而另一频率降低,例如从 $f_4$ 降低到 $f_3$ 。两个频带,例如,从 $f_1$ 到 $f_2$ 的频带1和从 $f_3$ 到 $f_4$ 的频带2,不重叠,使得传输信号和返回信号都可以通过高通滤波器或低通滤波器或一些组合在光学上分离,其中通频带从通过频率 $f_p$ 开始。例如 $f_1 < f_2 < f_p < f_3 < f_4$ ,但是,在所示实施方式中,较高频率提供下啁啾,而较低频率提供上啁啾,在其他实施方式中,较高频率产生上啁啾,较低频率产生下啁啾。

[0087] 在一些实施方式中,两个不同的激光源用于在每个时间在每个波束中产生两个不同的光学频率。然而,在一些实施方式中,单个光学载波由单个RF啁啾调制以产生用作同时式上和下啁啾的对称边带。在这些实施方式的一些中,使用双边带Mach-Zehnder调制器,这一般会在载波频率中留下太多能量;相反,几乎所有的能量都进入了边带。

[0088] 图5C是示出根据实施方式的由调制器产生的用于为LIDAR系统生成同时式上和下啁啾传输光学信号的示例一阶边带的图表。横轴532表示信号的频率,并且竖轴534表示信号的功率。当光学载波 $f_0$ 由频率为 $f$ 的RF 信号调制时,对于多个RF频率的每个产生两个光学边带。一阶边带在光学载波频率 $f_0$ 上方和下方的RF频率 $f$ 处,由箭头536a和536b表示。二

阶边带在光学载波 $f_0$ 上方和下方 $2f$ 处产生,等等。与前一低阶边带相比,每个高阶边带的功率减小。

[0089] 当使用从 $f_b$ 变化到 $f_a < f_b$ 的RF下啁啾产生光学啁啾时,带宽 $B = (f_b - f_a)$ 。上边带从 $f_0 + f_a + B = f_0 + f_b$ 变化到 $f_0 + f_a$ ,如频率536a上的左指向箭头所示,产生带538a中的信号。下边带同时从 $f_0 - f_a - B = f_0 - f_b$ 变化到 $f_0 - f_a$ ,如频率536b上的右指向箭头所示,产生频带538b中的信号。在其他实施方式中,RF下啁啾用于调制光学载波,并且频率536a和536b分别在相反的方向上移动通过带538a和538b,例如在带538a中从左到右,在带538b中从右到左。在不同实施方式中使用不同方法区分来自上啁啾和下啁啾的返回。在一些优选实施方式中,通过添加频移来去除上边带和下边带的对称来执行分开,如下所述。在边带被足够宽地分开以进行光学滤波的其他实施方式中,来自每个边带的信号被分开。来自参考和返回中的每个的一个信号通过从 $f_{pl}$ 开始的低通滤波器以滤除载波 $f_0$ 和高频带538a以获得低频带538b。类似地,来自参考和返回中的每个的一个信号通过从 $f_{ph}$ 开始的高通滤波器以滤除载波 $f_0$ 和低频带538b以获得高频带538a。如上所述处理两个频带以产生上啁啾距离和下啁啾距离。在配对来自上啁啾和下啁啾的距离之后,确定多普勒效应和校正距离。

[0090] 作为边带对称的结果,如果使用相同阶的边带,则两个光学啁啾的带宽将是相同的。在其他实施方式中,使用其他边带,例如,使用两个二阶边带,或者使用一阶边带和非重叠的二阶边带,或一些其他组合。

[0091] 图3B还示出了根据实施方式的用于同时式上和下啁啾LIDAR系统的示例部件。在该实施方式中,频移器318被添加到传输波束305的光学路径。在其他实施方式中,替代地,频移器被添加到返回波束309的光学路径或参考路径。一般地,频移元件被添加到本地振荡器(L0,也称为参考路径)侧或传输侧(光学放大器之前),因为装置(AOM)具有一些相关联的损耗,并且将有损耗的部件放置在接收侧或光学放大器后是不利的。光学偏移器318的目的是将传输信号(或返回信号)的频率相对于参考信号的频率偏移已知量 $\Delta f_s$ ,使得上和下啁啾的拍频发生在不同的频带中,这可以在对通过光学检测器输出的电信号的分析中例如通过FFT部件345拾取。例如,如果分别引起图4A和图4B的距离效应415和425的蓝移为 $f_b$ ,那么上啁啾的拍频将通过偏置增加并出现在 $f_b + \Delta f_s$ 处,并且下啁啾的拍频将通过偏置降低到 $f_b - \Delta f_s$ 。因此,上啁啾相较于下啁啾将处于较高的频带中,从而将它们分开。如果 $\Delta f_s$ 大于任何预期的多普勒效应,则在将与上啁啾和下啁啾相关联的范围内不存在含糊不清。然后可以使用已知 $\Delta f_s$ 的正确有符号的值来校正所测量的拍,以获得正确的上啁啾和下啁啾范围。在一些实施方式中,来自平衡检测器的RF信号直接被数字化,其中频带通过FFT分开。在一些实施方式中,来自平衡检测器的RF信号用模拟RF电子装置预处理,以使可以直接被数字化的低频带(对应于上啁啾或下啁啾中之一)和可以电子地向下混合到基带然后被数字化的高频带(对应于相反的啁啾)分开。两个实施方式都提供了将检测信号的频带与可用数字化器源相匹配的途径。

[0092] 当选择传输(TX)和本地振荡器(L0)啁啾波形时,有利的是确保系统的频移频带最大限度地利用可用的数字化器带宽。一般地,这通过将上啁啾或下啁啾偏移成具有接近零的范围频拍来实现。

[0093] 例如,在另一实施方式中,使用载波频率上的两个不同调制器上的上边带和下边带独立地生成传输(TX)信号和参考(L0)信号。图5D是示出根据另一实施方式的用于LIDAR



系统相对于光学载波的示例同时式上和下啁啾传输光学信号和参考信号(L0)的图表。横轴是以相对单位计的时间,竖轴是相对于绘制成 $f_0=0$ 的光学载波 $f_0$ 的频率。参考信号(L0)从传输信号(TX)偏置了偏置频率 $f_0$ ,由于边带对称,并且与上述示例不同,该偏置频率相较于下啁啾在上啁啾的相反侧上。在所示实施方式中,对于上啁啾L0信号频率低于同时的TX信号频率,并且对于下啁啾L0信号频率高于同时的TX信号频率。因此,TX上啁啾波形在带宽B上从 $f$ 到 $f+B$ 啁啾;并且L0上啁啾波形从 $f-f_0$ 到 $f-f_0+B$ 啁啾。下啁啾在绘制成0的光载波频率周围反射。

[0094] 在这种情况下,为了获得接近零的上啁啾拍频,选择偏移频率 $\Delta f_s=f_0$ 使得上啁啾与传输对准是有意义的。下啁啾将分开 $2*f_0$ 。图5E是示出根据另一实施方式的用于LIDAR系统相对于光学载波的示例偏移的同时式上和下啁啾传输光学信号和参考信号(L0)的图表。横轴是以相对单位计的时间,竖轴是相对于绘制成 $f_0=0$ 的光学载波 $f_0$ 的频率。总的来说,这使得 $f_R$ 的上啁啾拍频带从0到 $2*f_0$ ,并且使得 $f_R$ 的非重叠下啁啾拍频带从 $2*f_0$ 到系统截止频率(可能是数字化器受限的)。如果下啁啾拍频太大,则用于大拍频带的向下混合级将大拍频带以 $2*f_0$ 向下混合,使得它可以在基带处数字化。

[0095] 可以使用本领域中已知的任何频移器318。例如,在一些实施方式中,使用声光调制器(AOM);并且,在其他实施方式中,基于serradyne的相移与相位调制器一起使用。

[0096] 图6是示出根据另一实施方式的用于同时式上和下啁啾LIDAR系统600的示例部件的框图。尽管描绘了对象390以示出系统600的操作,但是对象390不是系统600的一部分。如下面更详细描述,系统600是根据图3B中的系统300b、通过添加第二检测器并对同时的第二啁啾参考信号和返回信号作处理进行的修改。在一些实施方式中,系统600还根据图3B中的系统300b、通过添加第二激光器601、第二波形发生器650和运算放大器652以及调制器610来产生第二同时式啁啾信号来进行修改。然而,在其中使用具有多个边带的单个调制器来产生同时式上和下啁啾的一些实施方式中,省略了第二激光器和部件。

[0097] 例如,在一些实施方式中,激光器601产生频率 $f_0$ 的光学载波,波形发生器650产生从 $f_b$ 到 $f_a$ 的RF下啁啾,其中 $f_a < f_b$ ,其中功率由运算放大器652增强,以驱动调制器610产生图5C所示的光学载波频率 $f_0$ 和光学边带538a和538b。这提供了图5B中描绘的同时式上和下啁啾,其中: $f_1=(f_0-f_b)$ ;  $f_2=(f_0-f_a)$ ;  $f_3=(f_0+f_a)$  并且  $f_4=(f_0+f_b)$ , 并且上和下啁啾是对称的。在这些实施方式中,省略了激光器301、波形发生器350、运算放大器352和调制器310。

[0098] 在任一类型的实施方式中,进入波束分离器602的光学信号包括同时式上啁啾和下啁啾。该波束被分成波形相同但功率不同的两个波束,其中大部分功率,例如90%或更多,作为波束605通过扫描光学耦合器320以作用在对象390上。剩余的功率作为波束607a通过延迟器308以添加任何期望的延迟或相位或其他属性以产生参考信号607b。在一些实施方式中,省略延迟308,并且参考信号607b与信号607a相同。

[0099] 光学耦合器624被配置成将参考信号分成两个参考波束,并将接收的从对象390起、通过扫描光学耦合器320的返回信号分成两个返回信号。波束可以分成相等或不相等的功率波束。一个参考信号和一个返回信号通过低通滤波器626以去除光学载波和高频带。将低通参考和返回信号引导到光电检测器330上以产生拍频电信号,该拍频电信号在运算放大器344中被放大并在FFT部件345中变换并被馈送到数据分析模块662。另一参考信号和另一返回信号通过高通滤波器628以去除光学载波和低频带。高通参考和返回信号被引导



到光电检测器630上以产生拍频电信号,该拍频电信号在运算放大器644a中被放大并在FFT部件645中变换并被馈送到数据分析模块662。多普勒补偿模块680匹配系统600的上啁啾和下啁啾路径中的距离对,确定多普勒效应,或基于相应的多普勒效应校正距离,或两者。在一些实施方式中,模块680还基于多普勒效应或多普勒校正距离或一些组合来操作装置。例如,操作显示装置1214以产生距对象的距离或对象速度或一些组合的图像或点云。部件344、345、644、645、662和680 构成数据处理系统660。在许多实施方式中,上啁啾和下啁啾在边带的分离小于1GHz并且不足以使用现有的光学滤波器干净利落地分离。在这样的实施方式中,使用上面描述的图3B的系统代替图6的系统。

[0100] 如上所述,第三观察峰414c是由于系统误差导致的示例外部峰,该系统误差可以在自然设置下的实际系统中发生并且与任何感兴趣的实际对象的距离无关。在确定多普勒效应或校正距离或两者时,这可能导致在确定要配对的上啁啾距离和下啁啾距离方面出现问题。也就是说,当FM啁啾波形(FMCW)系统解决沿着给定的站点线的所有散射体的返回时,出现复杂情况。在该场景下,任何多普勒处理算法都必须有效地应对下述需求,该需求即对上啁啾和下啁啾距离简档的多个返回应被正确配对以进行补偿。在单个距离返回的情况下,对于“上”的一个峰和对于“下”的一个峰将被隔离并正确配对。当在“上”和“下”侧存在来自多个散射体的多个峰时,出现混杂情况。必须确定哪个峰应该与哪个峰配对以获得期望的补偿效应,并且优选地使用可以实现为例如在处理器或集成电路上自动进行的方法来确定。

[0101] 这里论证了一种自动配对上啁啾距离和下啁啾距离以计算多普勒效应和多普勒校正距离的方法。该方法使用双分图匹配公式来以高概率实现正确的上/下返回配对。图7A是示出根据实施方式的上啁啾和下啁啾距离的示例对的框图。每个对包括一个上啁啾距离和一个下啁啾距离。该图假设存在两个下啁啾距离和三个上啁啾距离,例如分别如图4B和图4A中所图示的下啁啾距离424a和424b和上啁啾距离414a、414b和414c。有六种将两个下啁啾距离与三个上啁啾距离配对的可能性,由连接下啁啾距离1和2 与三个上啁啾距离1、2和3中的每个的线表示。

[0102] 对于每个可能的对,确定代价。代价是对中两个距离之间的不相似性的度量。可以使用任何方法来评价不相似性。例如,在一些实施方式中,每对的代价是针对两个距离的检测距离的差。在一些实施方式中,代价是与两个距离相关联的检测峰高度的差。在一些实施方式中,代价是与两个距离相关联的峰宽度的差。在一些实施方式中,代价是各不相似性中两者或更多者的标量值函数,诸如距离差、峰高度差和峰宽度差等等。在一些实施方式中,代价是具有从距离差、峰高度差和峰宽度差等等中选择两个或更多个元素的矢量函数。代价由符号 $C_{nm}$ 表示,其中m表示下啁啾距离的指数,n表示上啁啾距离的指数。图7B是示出了根据实施方式的具有下述元素的示例代价矩阵的框图,这些元素对应于图7A中描绘的示例上啁啾和下啁啾距离对。在图7中,指数颠倒,首先显示下啁啾距离指数 $C_{mn}$ 。

[0103] 来自上啁啾距离简档的距离返回 $R_{i\ up}$ 的组( $S_{up}$ )和来自下啁啾距离简档的距离返回 $R_{j\ down}$ 的组( $S_{down}$ )使用等式1b和通过标准阈值和光电检测器的电输出的FFT谱的峰拟合程序(例如,基于峰的高度和宽度的峰求取) 选择的峰的频率来确定。

$$S_{up} = [R_{1up}, R_{2up}, \dots, R_{Nup}] \quad (3a)$$

[0105] 和

$$[0106] \quad S_{\text{down}} = [R_{1\text{down}}, R_{2\text{down}}, \dots, R_{M\text{down}}] \quad (3b)$$

[0107] 具有N个“上”峰和M个“下”峰。然后使用距离简档的两个组来定义代价矩阵C, 其中每个矩阵元素是对的函数  $C_{nm} = F(R_{n,\text{up}}, R_{m,\text{down}})$ 。静态场景(成像器相对于场景不移动)的良好代价函数仅仅是针对配对的多普勒效应的幅度。 $F(R_{n,\text{up}}, R_{m,\text{down}}) = |R_{n,\text{up}} - R_{m,\text{down}}|/2$ , 其中 $| \cdot |$ 是绝对值运算。一般方法允许灵活定义代价函数。例如, 代价可以包括其他参数, 诸如峰的组的强度、未补偿距离、外部信息诸如成像空间中的成像器运动(用于移动扫描)或其组合。

[0108] 一旦定义了代价矩阵C, 该方法就进行二分图匹配程序。该程序通常限制配对, 使得给定的上啁啾距离只能与单个下啁啾距离配对, 反之亦然。可以施加其他约束, 诸如连接匹配对的线不交叉。在一些实施方式中, 匹配过程以贪婪的方式进行, 由此算法总是从组中选择最低代价配对, 最小 ( $C_{\min}$ ), 直到不存在另外的配对。可替代地, 匈牙利二分图匹配算法(例如, 参见Munkres, 1957)可以用于生成在所有对上平均的最佳“最低代价”配对组。在其他实施方式中, 使用其他图匹配方法。已经发现, 在所观察的现实世界场景的情况下, 贪婪方法对于预期目的而言既快又充足。选择该方法是因为它限制任一侧的峰与另一侧峰的最大值配对。这是配对程序中最“物理”的解释, 因为一侧的峰与另一侧的两个峰配对将意味着非物理或混杂场景。肯定存在着其他匹配程序(也观察了这些其他匹配程序, 但是表现不如在实验实施方式中那样好)。例如, “距离有序”方法根据距离对上和下返回进行排序, 并顺序地对其进行配对(从最近到最远)。当一侧“用完峰”时, 任一侧上的额外峰被丢弃。这在具有轻微多普勒频移的近峰的常见场景下失败。类似地, “振幅有序”根据振幅对峰进行分类, 并以振幅的降序对其进行配对。该方法不能很好地发挥作用, 因为相干检测中的散斑效应导致检测峰的幅度变化大。这引起许多不正确的配对。代价矩阵方法似乎是考虑到上述选项和全局地最小化选项组的最常用方法。在图7A中, 确定了两个低代价对, 由实线表示。因此, 一个上啁啾距离(3) 不与两个下啁啾距离中的任何一个配对。

[0109] 图8是示出了根据实施方式的用于使用上和下啁啾LIDAR系统来补偿对距离的多普勒效应的示例方法的流程图。尽管步骤在图8中出于说明的目的被描绘为特定顺序的整体步骤, 但是在其他实施方式中, 一个或多个步骤或其部分以不同的顺序执行, 或者在时间上重叠、串联或并行执行, 或者被省略, 或者添加一个或多个附加步骤, 或者方法以方式的一些组合改变。

[0110] 在步骤801中, 收发器, 例如, LIDAR系统, 被配置成传输上啁啾和下啁啾光学信号。上啁啾和下啁啾信号中的每个的一部分(例如, 1%至10%) 还被引导到参考光学路径。收发器还被配置成从由传输信号照射的任何外部对象接收反向散射光学信号。在其他实施方式中, 同时传输上啁啾和下啁啾信号。在一些实施方式中, 步骤801也包括以硬件配置其他光学部件以提供以下步骤中的一个或多个的功能, 如例如图3A或图3B或图6中所示, 或等效物。注意, 传输信号不必是波束。发散信号肯定会在单个距离简档内有许多不同的距离和多普勒值; 但是, 在照射光点内不提供交叉距离(cross range, 交叉范围、方位向)分辨率。然而, 使用提供了逐点扫描所带来的固有稀疏性的窄波束以提供对识别对象有用的交叉距离分辨率是有利的。

[0111] 在一些实施方式中, 上啁啾光学信号与下啁啾对称, 即, 它们具有相同的带宽B, 并且它们具有相同的持续时间 $\tau$ 。但是可以针对跨越感兴趣的返回的任何带宽和持续时间确

定距离。因此,在一些实施方式中,上啁啾光学信号和下啁啾光学信号分别具有不同的带宽  $B_u$  和  $B_d$ ,或者分别具有不同的持续时间,  $\tau_u$  和  $\tau_d$ ,或一些组合。在一些实施方式中,例如通过使用光学载波的一个一阶边带和一个二阶边带,而不是使用如图5C所描绘的正和负一阶边带,来对  $B$  和  $\tau$  产生稍微不同的值是方便的。这可以完成,但必须在多普勒处理中考虑。在下面描述的示例实施方式中,啁啾来自相同的调制器,确切地说具有相同的带宽和时序。这保证了系统观察到的多普勒和距离完美地重叠。在直接调制激光频率的系统(与使用外部电子调制相比)的情况下,将使用不同的  $B$  和  $\tau$ 。在那种情况下,两个激光器或顺序方法对生成上啁啾和下啁啾有用,如图6所示。这打开了通向用于两个激光器或顺序啁啾的不同  $B$  和  $\tau$  的大门。

[0112] 在步骤802中,将传输信号引导到场景中的光点,在该场景中可能存在或可能不存在对象或对象的一部分。

[0113] 在步骤803中,返回的上啁啾返回信号与下啁啾返回信号分开。例如,上啁啾和下啁啾处于不同的光学频带中,并且通过返回路径实现分开,该返回路径包括将返回信号分成两个副本并使每个副本通过不同的光学滤波器。一个滤波器(例如,光学滤波器626)通过上啁啾的频率,同时阻挡下啁啾的频率;并且,另一滤波器(例如,光学滤波器628)通过下啁啾的频率,同时阻挡上啁啾的频率。当顺序传输上啁啾和下啁啾时,通过在不同时间窗口中处理信号而不是通过光学滤波器来完成分开,并且两个啁啾可以使用相同的频带。

[0114] 在步骤805中,分离的上啁啾返回与上啁啾参考信号在第一检测器处组合,以确定上啁啾返回信号中的零个或多个频率差(或结果拍频)。例如,来自检测器的电信号在可编程处理器上由硬件或软件的FFT模块操作。当同时传输上啁啾信号和下啁啾信号时,使用上述方法和系统中的一个或多个,例如图3B中传输或返回信号相对于参考信号的频移,或如图6中的光学滤波,来分开返回信号的上啁啾和下啁啾部分。

[0115] 在步骤807中,一个或多个上啁啾距离  $R_{1up}, \dots, R_{Nup}$  是例如使用处理器 662 中的等式1b或等效物基于一个或多个上啁啾频率差(拍频)确定的。另外,一个或多个下啁啾距离  $R_{1down}, \dots, R_{Mdown}$  是例如使用处理器662中的等式1b或等效物基于一个或多个下啁啾频率差(拍频)确定的。在步骤807 期间丢弃没有上啁啾拍频或没有下啁啾拍频的返回。由于步骤807,对于照射场景中的某一光点的每个传输信号,生成组  $S_{up}$  和  $S_{down}$ , 如等式3a和3b 所示。

[0116] 在步骤811中,使用上面识别的任何不相似度量,诸如距离差、峰高度差、峰宽度差/或任何其他拍频峰特性差、或一些标量或矢量组合,来确定代价矩阵的元素的值。在一些实施方式中,每个距离对的代价是这些度量中的若干度量的等级加权函数,例如,赋予距离差最高权重(例如,约 60%),赋予峰高度差中等权重(例如,约30%),赋予峰宽差低权重(例如约10%)。在一些实施方式中,将偏置项添加到代价矩阵的每个元素,这考虑了成像系统的运动及其可指向的方向。这在用于移动成像的实施方式中是有利的,在该实施方式中在成像系统瞄准静止对象但其自身处于运动的情况下可以预期非零的有符号多普勒值。在其他实施方式中,对象在移动或者对象和成像都在移动,并且基于对象的相对运动和跟踪来添加偏置项是有利的。校正的幅度仅取决于称为径向的连接成像系统和目标的线上的速度的元素。因此,在一些实施方式中,偏置取决于相对于传感器的运动的波束指向的方向。注意,成像系统本身可以用于估计相对速率。代价矩阵包括两个组中每个距离对(一个上啁啾距离和一个下啁啾距离)的代价。

[0117] 在步骤813中,至少一个上啁啾距离基于代价矩阵例如使用二分图匹配算法与至少一个下啁啾距离匹配。发现贪婪匹配提供了更简单的实现、更快的操作以及足以为多普勒校正目的进行良好自动匹配的优点。例如,如下面所描述的图9B和图9C所示,该方法生成的图像比诸如顺序配对向上侧和向下侧的最亮峰或总是配对距离中的最近的峰并且向外行进的单纯方法生成的图像具有更好的多普勒补偿。

[0118] 在步骤815中,使用针对当前照射光点的至少一个匹配对来通过该对中的距离进行差分来确定在该光点处对于在该光点中照射的至少一个对象或对象的至少一个部分的多普勒效应。在一些实施方式中,基于组合该对中的两个距离,例如,通过取平均,来确定多普勒校正距离。在一些实施方式中,如果认为上啁啾距离或下啁啾距离中的一个较可靠,则使用加权平均。例如,可以认为一个距离较可靠,因为它基于较宽的带宽或较长的持续时间。在一些实施方式中,使用可靠性度量来对该距离进行加权,从而为较可靠的距离赋予较多权重。如果若干匹配的距离可以用于当前照射光点,则所有匹配对用于求取针对该光点的多个距离或多个多普勒效应。

[0119] 在步骤821中,例如,通过对扫描光学耦合器320进行扫描以查看感兴趣的场景中的新的光点来确定在感兴趣的场景中是否存在待照射的另一光点。如果存在,则控制转回到步骤802和随后的步骤以照射下一光点并处理任何返回。如果不存在,则在使用结果之前没有其他光点要照射,控制转到步骤823。

[0120] 在步骤823中,基于多普勒效应或校正距离来操作装置。在一些实施方式中,这涉及在显示装置上呈现表示在由传输光学信号照射的多个光点处的任何对象的多普勒校正位置的图像。在一些实施方式中,这涉及向装置传送基于在由传输光学信号照射的多个光点处的多普勒校正位置的点云来识别至少一个对象的数据。在一些实施方式中,这涉及在显示装置上呈现表示在由传输光学信号照射的多个光点处的多普勒效应的大小的图像,由此将移动对象与静止对象和不存在的对象区分开。在一些实施方式中,这涉及移动车辆以避免与对象碰撞,其中基于由传输光学信号照射的多个光点处的多普勒效应的大小来确定车辆与对象之间的接近(close,靠近、闭合)速度。在一些实施方式中,这涉及基于由传输光学信号照射的多个光点处的多普勒校正位置的点云来识别车辆或识别碰撞路线上的对象。基于多普勒过滤点云数据具有识别和去除可能在微风中移动的植被的效果。然后通过过滤过程更好地揭示硬目标、人造目标或密集目标。这在防御和监视场景中可能是有利的。在车辆场景中一多普勒可以用于分割目标(即路面与移动车辆相比)。

#### [0121] 4. 示例实施方式

[0122] 在这些示例实施方式中,LIDAR系统使用上面说明的部件来产生同时式上和下啁啾传输信号。该系统可从Bozzman Montana的BLACKMORE SENSORS AND ANALYTICS, INC.<sup>TM</sup>以HRS-3D商购获得。在这些示例实施方式中,使用贪婪匹配。第一匹配是具有最低代价的匹配。然后去除该对,并使用具有下一最低代价的对。

[0123] 图9A至图9C是示出了根据实施方式的基于多普勒校正距离和对未校正距离的改进的显示装置上的示例输出的图像。使用宽视场(FOV)、三维(3D)FM啁啾波形(FMCW)LIDAR系统收集图9A的图像。该场景用 $B = 2$ 千兆赫兹(GHz,  $1\text{GHz} = 10^9$ 赫兹)光学带宽波形成像。图像的暗像素表示没有返回,白色像素表示具有可忽略的多普勒效应(上啁啾距离和下啁啾距离相同)的稳定返回。灰色区域表示在多普勒幅度上使用二进制滤波器的具有不可忽

略的多普勒效应的像素。灰色像素论证了对植被运动的敏感性。图像清晰地区分了植被和硬目标。后处理消除了硬目标表面上不想要的强度散斑。在示例实施方式中,根据经验选择阈值。在其他实施方式中,通过某种结果良好的度量选择若干阈值;并选择产生最佳结果的阈值。

[0124] 使用与图9A中相同的配置收集图9B的图像,但是在后检测器处理中不执行多普勒补偿。用相同的LIDAR系统收集图9C的图像,但是使用图8的方法执行多普勒校正。可以看出,在图9C中,由树中的叶子运动引起的模糊大大减少,使能够辨别更多的个别分枝和叶子。

[0125] 另一项测试是使用快速帧率、窄视场成像器运行,该视场成像器以10 Hz帧率每帧产生10,000个数据点点云。测试人在传感器的视场中来回跑动。从几百个3D成像帧的时间序列中切割出人的每个图像(从相同的3D取向透视图切割)。

[0126] 图10A是根据实施方式的一组三个图像,示出了在显示装置上的基于针对接近LIDAR系统的目标的多普勒校正距离的示例输出。每个点表示基于距对象(在该情况下是移动的人)上的光点的距离的在3D空间中的透视图。这些点用灰度绘制,从相对于LIDAR系统无运动的浅色延伸到3.5米/秒(m/s)的接近速度的黑色。白色像素表示无返回。叠加了三个不同的图像。图像1012清楚地表示在几乎静止的表面上的几乎静止的人。图像1013清楚地表示人具有一些运动部位和一些几乎静止的部位。主体和前腿看起来几乎是静止的,而后腿和前臂都明显地更加快速地移向LIDAR系统,正如行走步态所预期的那样。图像1014清楚地表示人在快速移动。身体和前腿的速度高于后腿的速度,与跑步步态一致。相对运动在色度中比在所示的灰度级中更明显。此外,人的不同速度部位不会偏离其正确的相对位置。

[0127] 图10B是根据实施方式的一组三个图像,示出了显示装置上的基于针对从LIDAR系统撤退的目标的多普勒校正距离的示例输出。每个点表示基于距对象(在该情况下是移动的人)上的光点的距离的在3D空间透视图中的位置。这些点用灰度绘制,从相对于LIDAR系统无运动的浅色延伸到3.5m/s的分开(open,打开)速度的黑色。白色像素表示无返回。叠加了三个不同的图像。图像1022清楚地表示人以约-2m/s的中等速度移动离开。图像1023清楚地表示人以大约-3m/s的速度移动离开,竖着的腿(plant leg) 略慢,与跑步步态一致。图像1024清楚地表示人以约-2m/s的速度移动离开,着地腿和身体比抬起的腿略慢,这与跑步后停止一致。相对运动在色度中比在所示的灰度级中更明显。如上所述,人的不同速度部位不会偏离其正确的相对位置。

[0128] 因此,系统不仅在校正距离的情况下正确地将所有像素置于的人的形式中,而且还基于多普勒效应确定人物的移动。

[0129] 在另一实施方式中,该系统用于校正摇摆的植被。准直激光波束扫描通过头顶上的树。多普勒值存在的多个返回的概率非常高,尤其是在微风或风存在的情况下。这样的植被提供沿着给定的视线在距离内紧密分开的密集散射体。风本身可能导致植被的多普勒频移,从而使植被成像更具挑战性。图11是示出了显示装置上的根据实施方式的基于高分辨率的多普勒校正距离的示例输出的图像。如该图像所示,利用所描述的技术可以获得非常清晰的图像。这提供了强有力的证据,表明该技术在这样的场景下提供非常逼真的图像是有效的。

[0130] 5. 计算硬件概述

[0131] 图12是示出可以在其上实现本发明的实施方式的计算机系统1200的框图。计算机系统1200包括通信机制,诸如用于在计算机系统1200的其他内部和外部部件之间传递信息的总线1210。信息表示为可测量现象的物理信号,典型地是电压,但在其他实施方式中包括诸如磁、电磁、压力、化学、分子原子和量子相互作用的现象。例如,北极和南极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。测量前多个同时量子态的叠加表示量子比特(量子位)。一个或多个数字的序列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区表示。计算机系统1200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装置。

[0132] 二进制数字序列构成用于表示字符的数字或代码的数字数据。总线1210包括许多并行的信息导体,使得信息在耦接到总线1210的装置之间快速传递。用于处理信息的一个或多个处理器1202与总线1210耦接。处理器1202对信息执行一组操作。该组操作包括从总线1210引入信息以及将信息置于总线1210上。该组操作典型地还包括比较两个或更多个信息单元、移位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。待由处理器1202执行的一系列操作构成计算机指令。

[0133] 计算机系统1200还包括耦接到总线1210的存储器1204。存储器1204,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。动态存储器允许计算机系统1200改变存储在其中的信息。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。存储器1204还被处理器1202用以在执行计算机指令期间存储临时值。计算机系统1200还包括只读存储器(ROM) 1206或耦接到总线1210的用于存储包括指令的而不被计算机系统1200改变的静态信息的其他静态存储装置。还耦接到总线1210的是非易失性(永久性)存储装置1208,例如磁盘或光盘,用于存储即使在计算机系统1200关闭或以其他方式断电时仍然存在的包括指令在内的信息。

[0134] 包括指令在内的信息被从外部输入设备1212提供给总线1210以供处理器使用,该外部输入设备例如由人类用户操作的包含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那些检测变换成与用于表示计算机系统1200中的信息的信号兼容的信号。耦接到总线1210的主要用于与人交互的其他外部装置包括用于呈现图像的显示装置1214,诸如阴极射线管(CRT)或液晶显示器(LCD),以及定点装置1216,诸如鼠标或轨迹球或光标方向键,用于控制在显示器1214上呈现的小光标图像的位置,并发出与在显示器1214上呈现的图形元素相关联的命令。

[0135] 在所示实施方式中,专用硬件诸如专用集成电路(IC) 1220耦接到总线1210。专用硬件被配置成出于特殊目的执行处理器1202执行不够快的操作。专用IC的示例包括用于为显示器1214生成图像的图形加速器卡、用于加密和解密通过网络发送的消息的密码编译板、语音识别以及特殊外部装置的接口,诸如重复执行以硬件更有效地实现的一些复杂操作序列的机械臂和医疗扫描装备。

[0136] 计算机系统1200还包括耦接到总线1210的通信接口1270的一个或多个实例。通信接口1270提供耦接到各种外部装置的双向通信,这些外部装置利用它们自己的处理器诸如打印机、扫描仪和外部磁盘操作。一般地,耦接利用网络链路1278,该网络链路连接到本地网络1280,具有其自己的处理器的各种外部装置连接到本地网络。例如,通信接口1270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1270是提供与相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1270是将总线1210上的信号转换为用于通过同轴电缆的通信连接的信号或转换成用于通过光缆的通信连接的光学信号的电缆调制解调器。作为另一示例,通信接口1270可以用以提供与兼容 LAN诸如以太网的数据通信连接的局域网 (LAN) 卡。还可以实现无线链路。载波诸如声波和电磁波包括无线电、光学和红外波,在没有线或电缆的情况下行进通过空间。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1270发送和接收携载信息流诸如数字数据的电信号、声信号或电磁信号,包括红外和光学信号。

[0137] 术语计算机可读介质在本文中用于指代参与向处理器1202提供信息的任何介质,上述信息包括用于执行的指令。这样的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1208。易失性介质包括例如动态存储器1204。传输介质包括例如同轴电缆、铜线、光纤电缆和在没有线或电缆的情况下行进通过空间的波,诸如声波和电磁波,包括无线电波、光学波和红外波。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1202提供信息的任何介质。

[0138] 常见形式的计算机可读介质包括例如软盘、柔性盘、硬盘、磁带或任何其他磁介质、光盘ROM (CD-ROM)、数字视频盘 (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或任何其他存储器芯片或者盒式磁带、载波或计算机可以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1202提供信息的任何介质。

[0139] 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和专用硬件诸如ASIC 1220上的处理器指令中的一个或两个。

[0140] 网络链路1278典型地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1278可以提供通过本地网络1280到主机计算机1282或由因特网服务提供商 (ISP) 操作的装备1284的连接。ISP 装备1284又通过现在通常称为因特网1290的网络的公共全球分组交换通信网络提供数据通信服务。称为服务器1292、连接到因特网的计算机响应于通过因特网接收的信息提供服务。例如,服务器1292提供用于在显示器 1214处呈现的、表示视频数据的信息。

[0141] 本发明涉及计算机系统1200用于实现本文所述技术的用途。根据本发明的一个实施方式,由计算机系统1200响应于执行包含在存储器1204中的一个或多个指令的一个或多个序列的处理器1202执行那些技术。这样的指令 (也称为软件和程序代码) 可以从诸如存储装置1208的另一计算机可读介质读入存储器1204。包含在存储器1204中的指令序列的执行使得处理器1202执行本文描述的方法步骤。在可替代实施方式中,可以使用硬件诸如专用集成电路1220来代替软件或与软件组合以实现本发明。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。

[0142] 经由网络链路1278和其他网络传输通过通信接口1270的信号将信息携载到计算机系统1200以及携载来自该计算机系统的信息。计算机系统 1200可以通过网络链路1278



和通信接口1270、通过网络1280、1290等发送和接收包括程序代码的信息。在使用因特网1290的示例中,服务器1292 通过因特网1290、ISP装备1284、本地网络1280和通信接口1270发送由计算机1200发送的消息所请求的特定应用的程序代码。所接收的代码可以在其被接收时由处理器1202执行,或者可以存储在存储装置1208或其他非易失性存储器或者两者中以供稍后执行。以这种方式,计算机系统1200 可以获得载波上的信号形式的应用程序代码。

[0143] 将一个或多个指令序列或数据或两者携载到处理器1202以供执行可能涉及各种形式的计算机可读介质。例如,远程计算机诸如主机1282的磁盘上可以最初携载指令和数据。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1200本地的调制解调器接收电话线上的指令和数据,并使用红外传输器将指令和数据转换成用作网络链路1278的红外载波上的信号。用作通信接口1270的红外检测器接收红外信号中携载的指令和数据,并将表示指令和数据的信息置于总线1210上。总线1210将信息携载到存储器1204,处理器1202 从该存储器检索并使用与指令一起发送的一些数据来执行指令。在存储器 1204中接收的指令和数据可以可选地在由处理器1202执行之前或之后存储在存储装置1208上。

[0144] 图13示出了在其上可以实现本发明的实施方式的芯片组1300。芯片组 1300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(例如,芯片)中的关于图12描述的处理器和存储器部件。通过示例,物理封装包括在结构组件(例如,基板)上的一个或多个材料、部件和/或线的布置,以提供一种或多种特性,诸如物理强度、大小保持和/或电气相互作用限制。预期在某些实施方式中,芯片组可以在单个芯片中实现。芯片组1300或其一部分构成用于执行本文所述方法的一个或多个步骤的装置。

[0145] 在一个实施方式中,芯片组1300包括通信机制,诸如用于在芯片组1300 的部件之间传递信息的总线1301。处理器1303具有到总线1301的连接以执行指令并处理存储在例如存储器1305中的信息。处理器1303可以包括一个或多个处理核,其中每个核被配置成独立地执行。多核处理器能够在单个物理封装中实现多处理。多核处理器的示例包括两个、四个、八个或更多个处理核。可替代地或另外地,处理器1303可以包括经由总线1301 依次排列配置的一个或多个微处理器,以能够实现独立执行指令、流水线和多线程。处理器1303还可以附属有一个或多个专用部件,诸如一个或多个数字信号处理器 (DSP) 1307或一个或多个专用集成电路 (ASIC) 1309,以执行某些处理功能和任务。DSP 1307典型地被配置成独立于处理器1303 实时处理现实世界信号(例如,声音)。类似地,ASIC 1309可以被配置成执行不易由通用处理器执行的专用功能。帮助执行本文描述的发明功能的其他专用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)、或一个或多个其他专用计算机芯片。

[0146] 处理器1303和附属部件具有经由总线1301到存储器1305的连接。存储器1305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执行本文描述的方法的一个或多个步骤。存储器1305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。

[0147] 6. 改动、扩展和修改

[0148] 在前面的说明书中,已经参考本发明的具体实施方式描述了本发明。然而,明显的



是,在不脱离本发明的较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说明性的而非限制性的。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“包括”及其变体,诸如“包括(comprises)”和“包括…的(comprising)”将被理解为暗示包括所陈述的项、元素或步骤或项、元素或步骤的组,但不排除任何其他项、元素或步骤或项、元素或步骤组。此外,不定冠词“一(a)”或“一个(an)”旨在表示由该物品修改的项、元素或步骤中的一个或多个。如本文所用,除非上下文另有说明,否则如果值在另一值的两倍(两倍或一半)内,则该值“约”为另一值。尽管给出了示例范围,但是除非上下文另有说明,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,范围0到10包括范围1到4。

[0149] 7. 参考文献

[0150] Adany, P., C. Allen, and R. Hui, “Chirped Lidar Using Simplified Homodyne Detection,” *Jour. Lightwave Tech.*, v. 27 (16), 15 August, 2009.

[0151] Hui, R., C. Allen, and P. Adany, “Coherent detection scheme for FM Chirped laser RADAR,” US patent 7,742,152, 22 June 2010.

[0152] Kachelmyer, A. L., “Range-Doppler Imaging with a Laser Radar,” *The Lincoln Laboratory Journal*, v. 3. (1), 1990.

[0153] Munkres, J., “Algorithms for the Assignment and Transportation Problems,” *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, v 5 (1), pp 32-38, Mar., 1957.

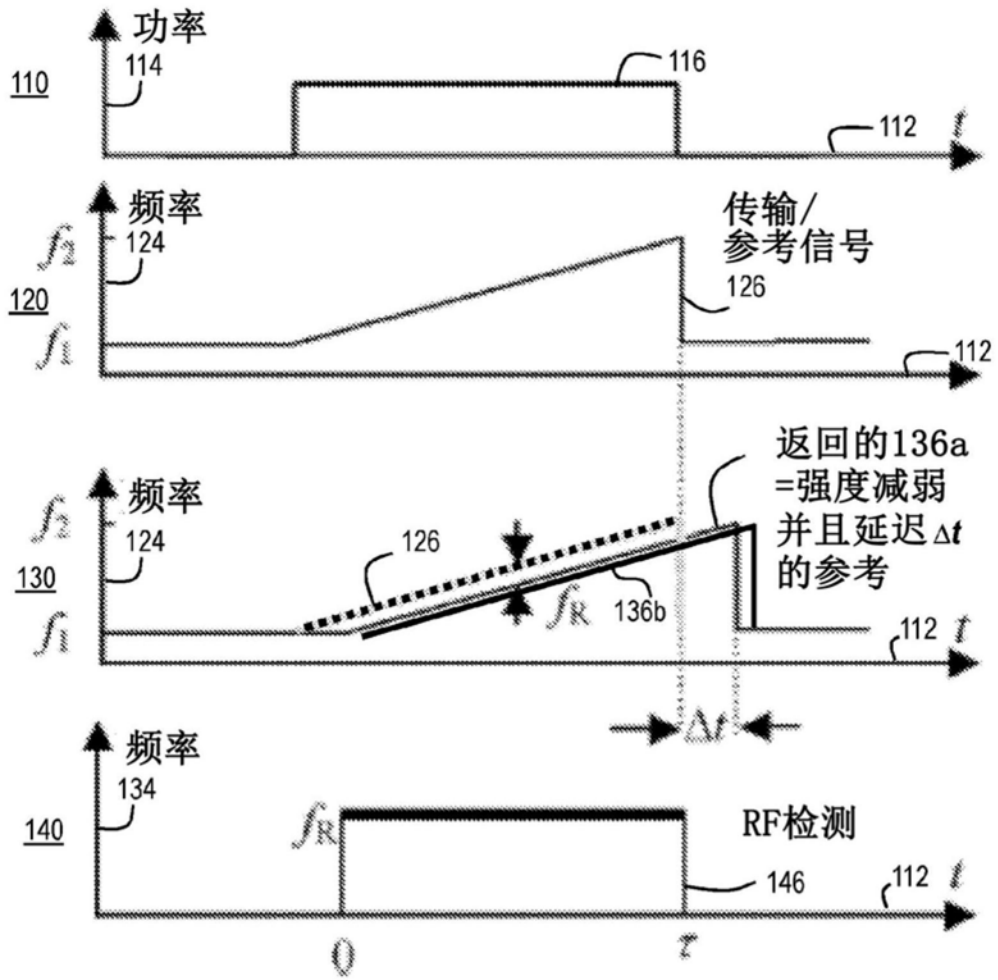


图1A

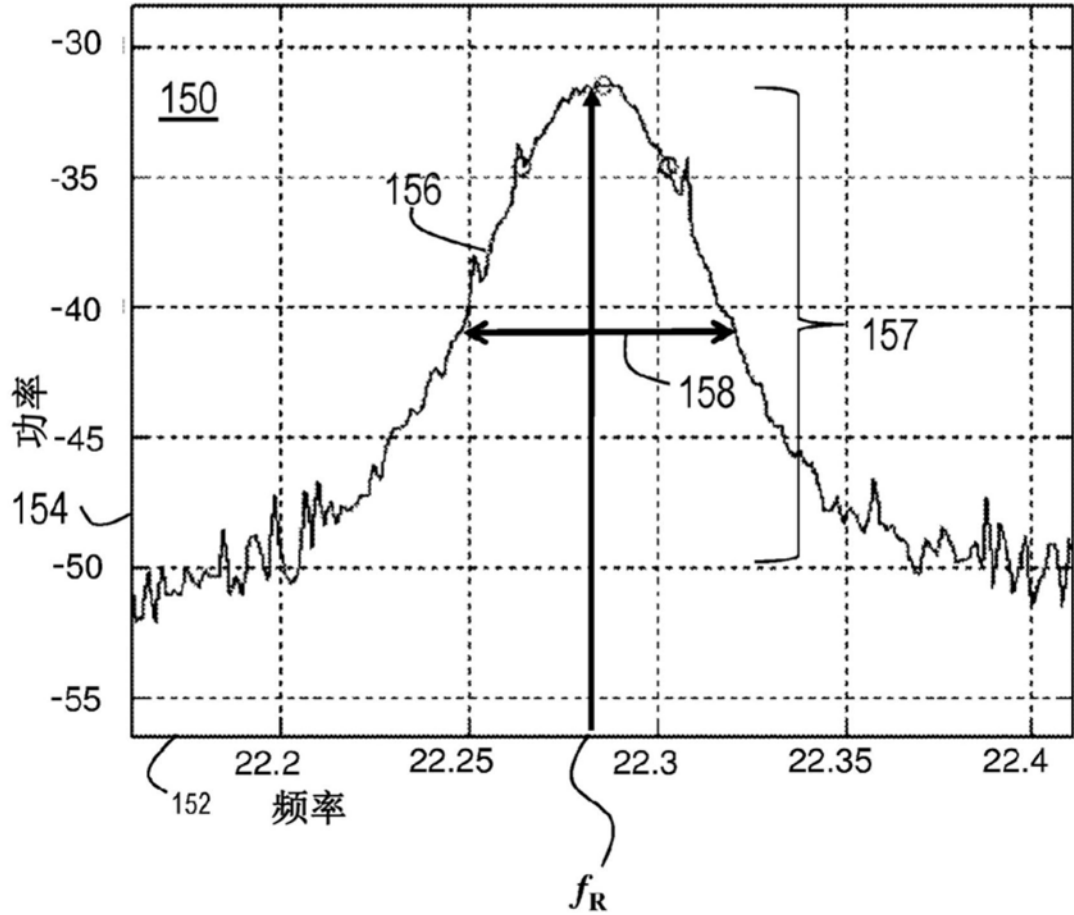


图1B

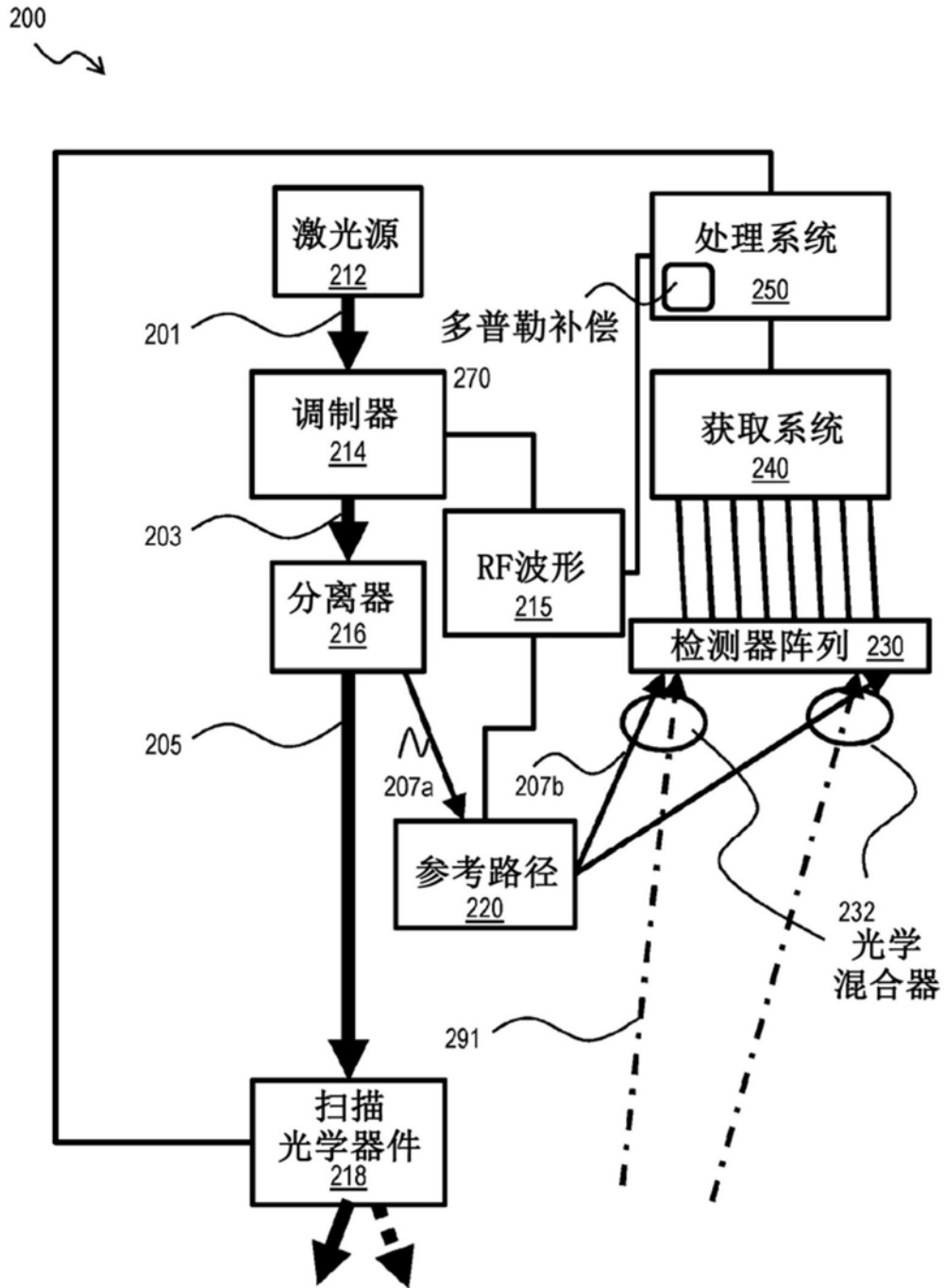


图2A

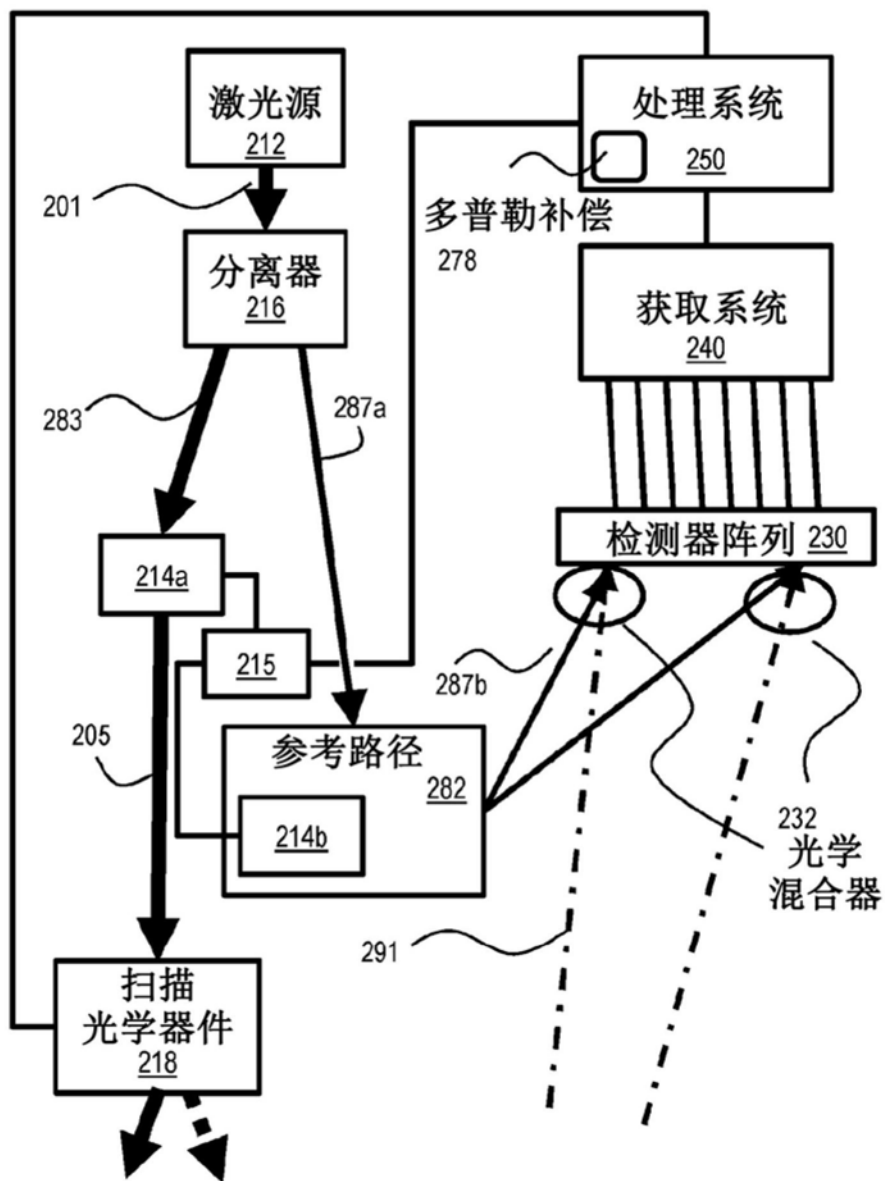
280  
~

图2B

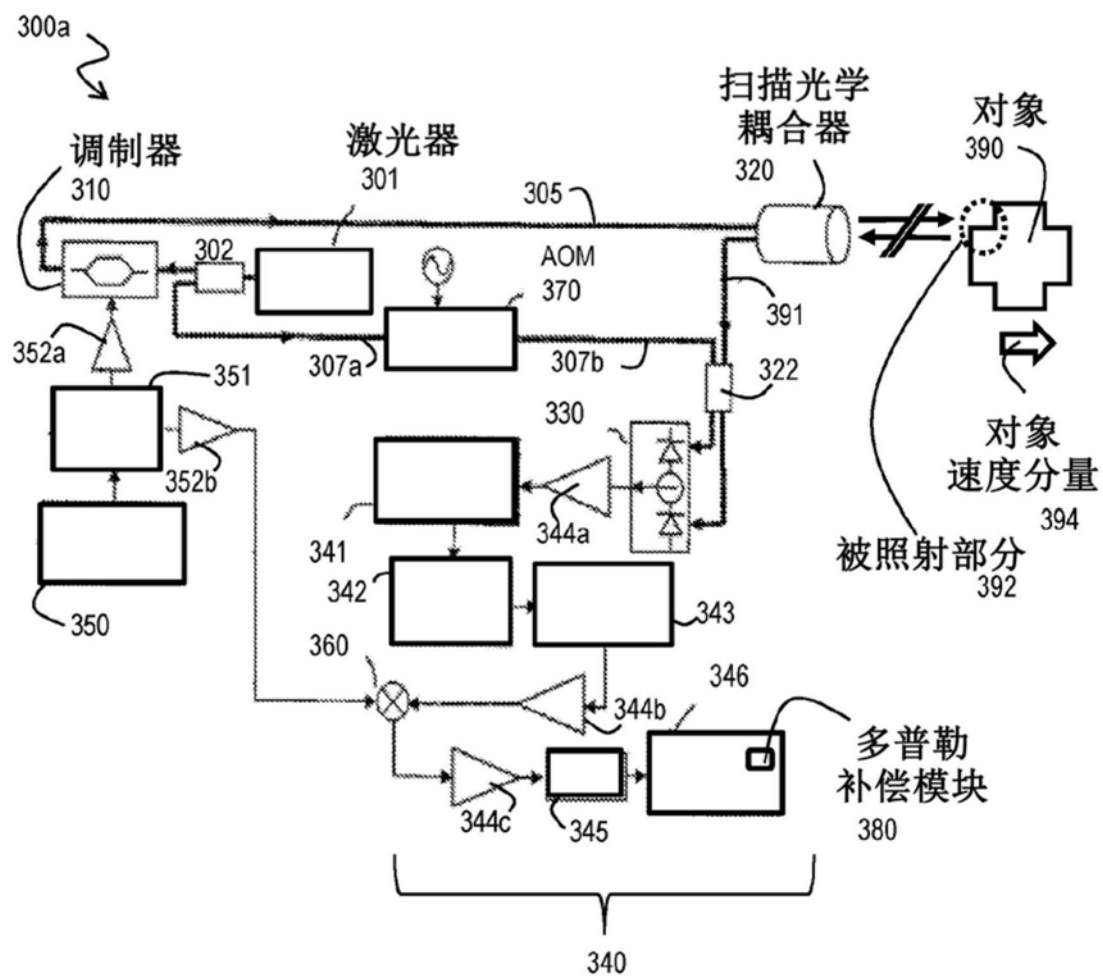


图3A

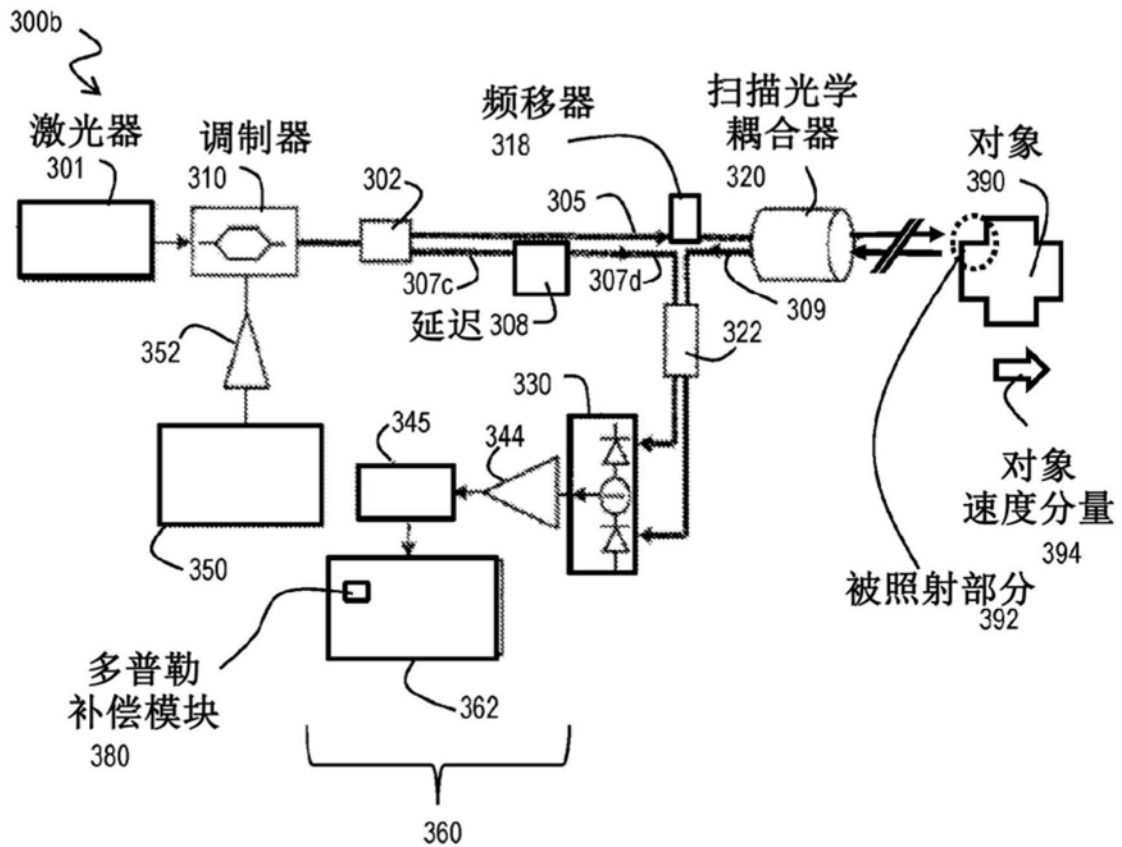


图3B

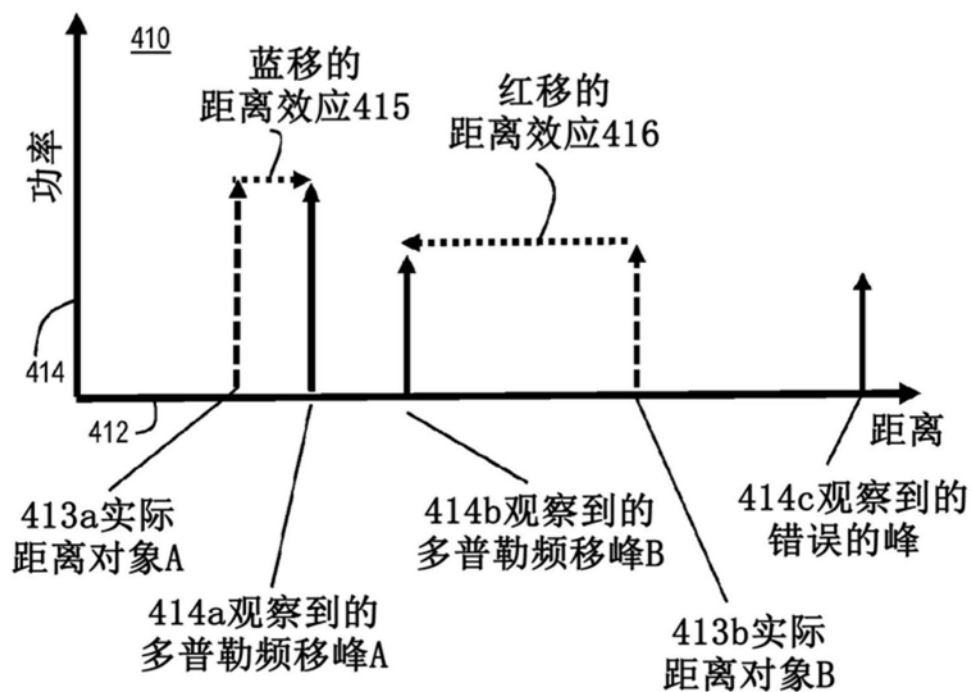


图4A

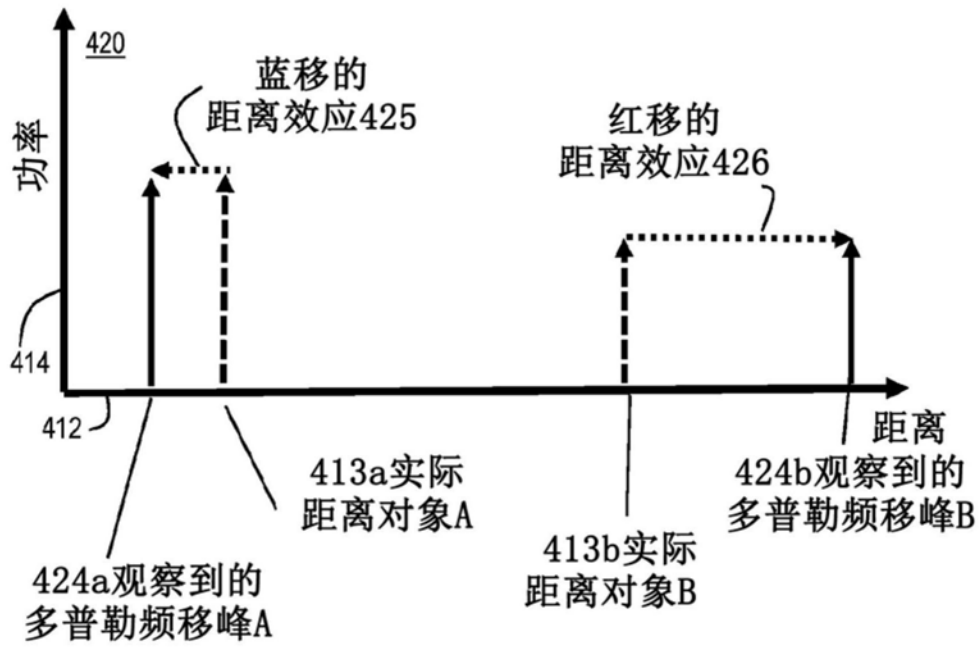


图4B

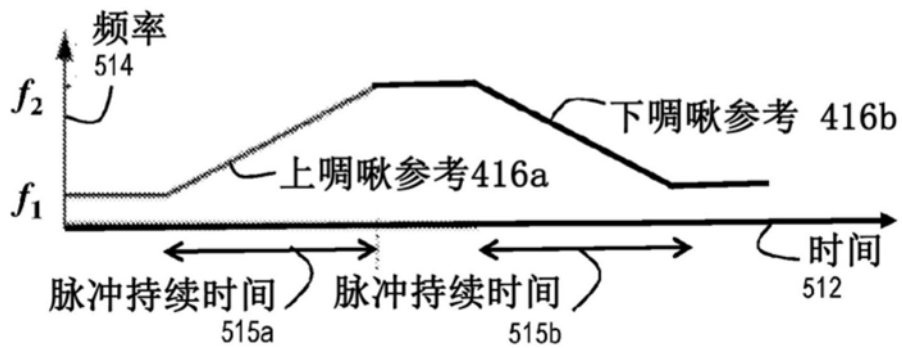


图5A



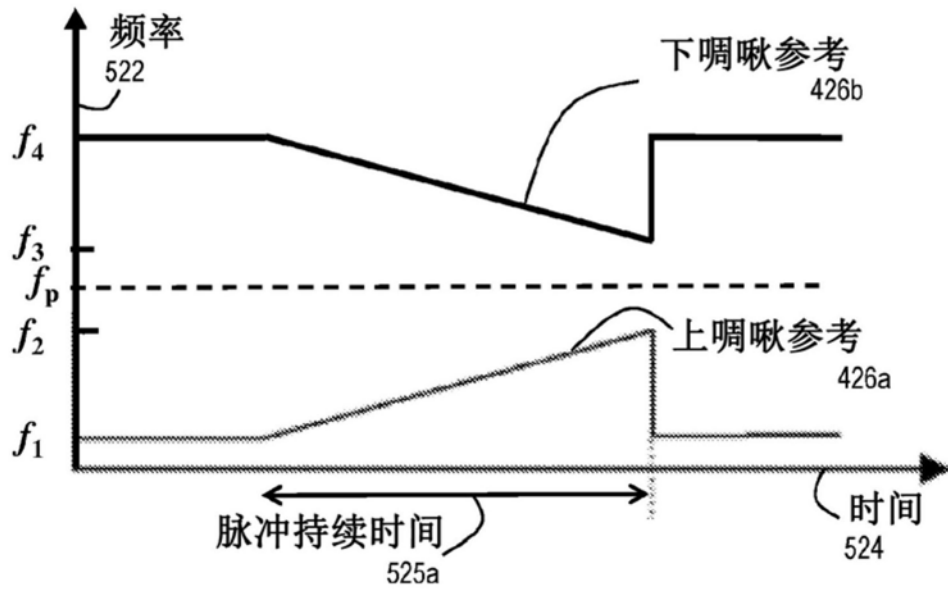


图5B

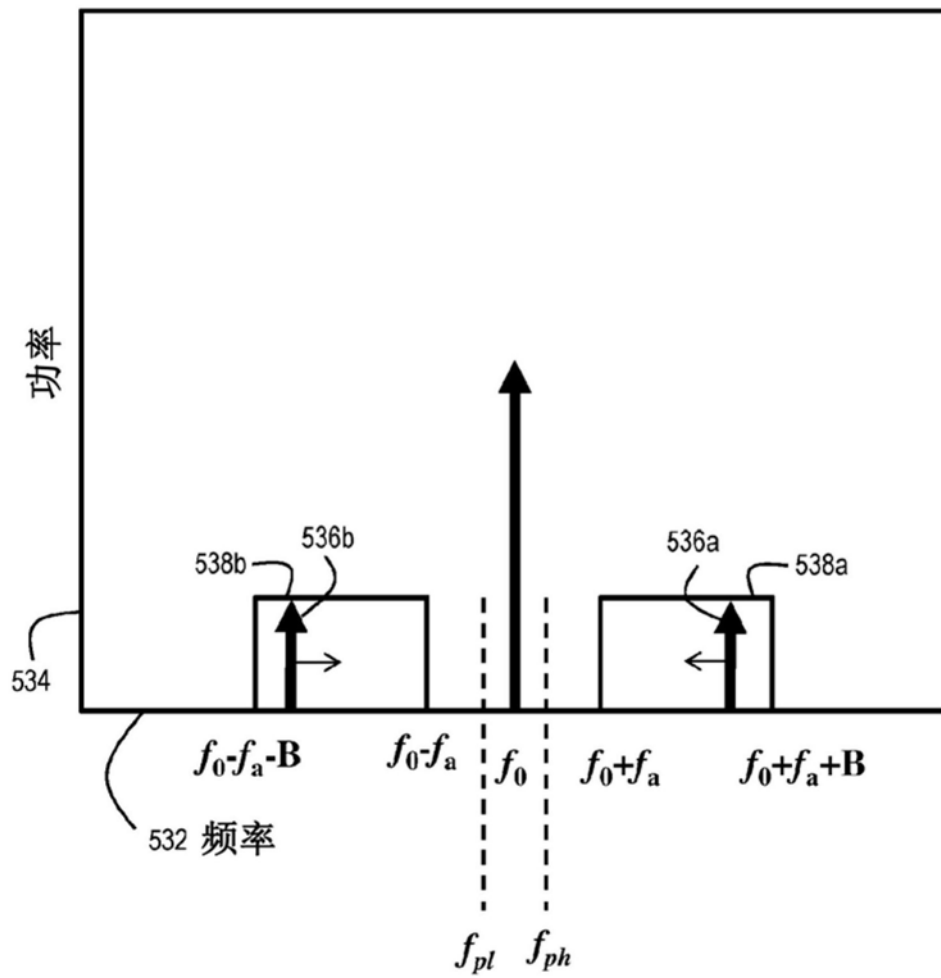


图5C

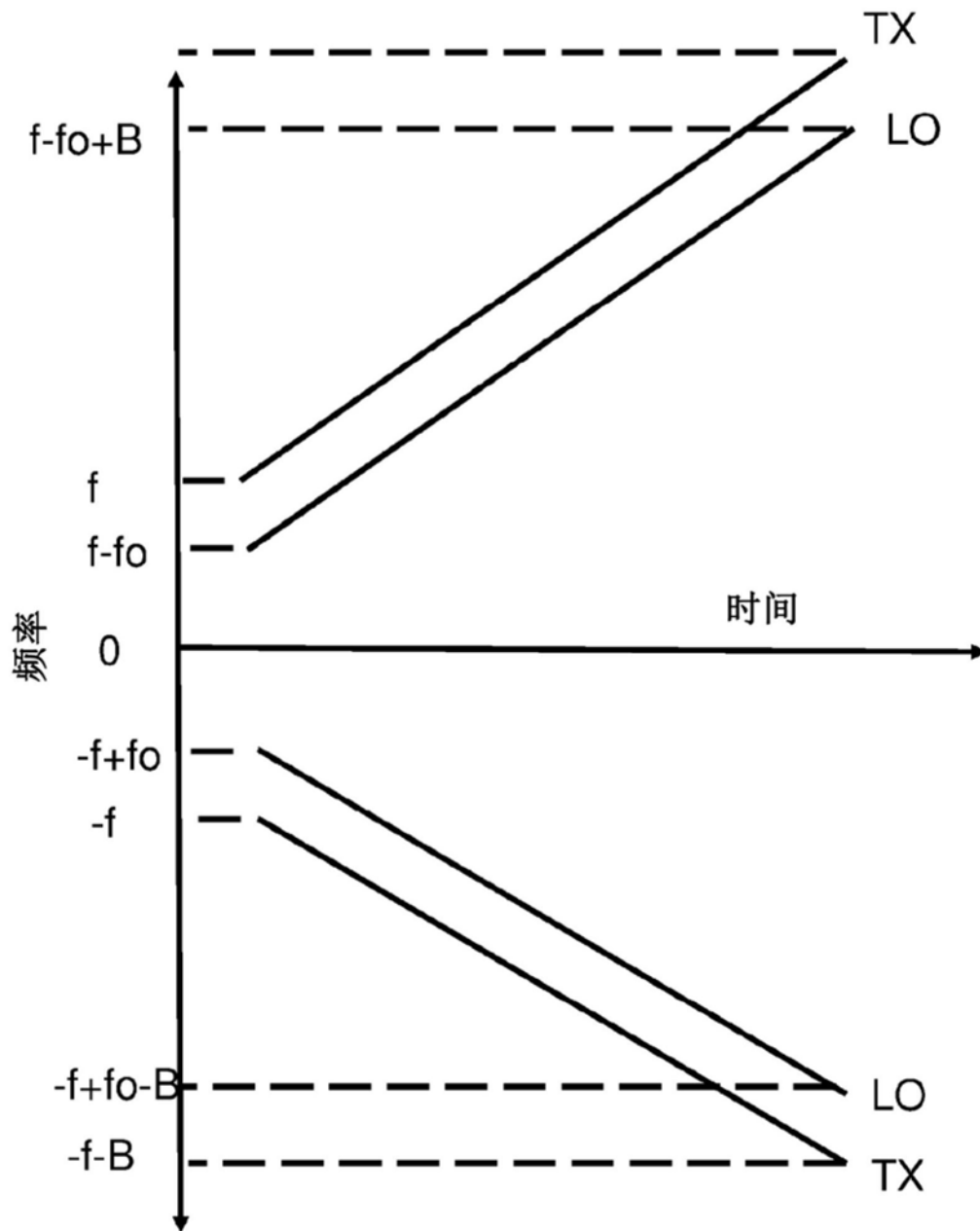


图5D

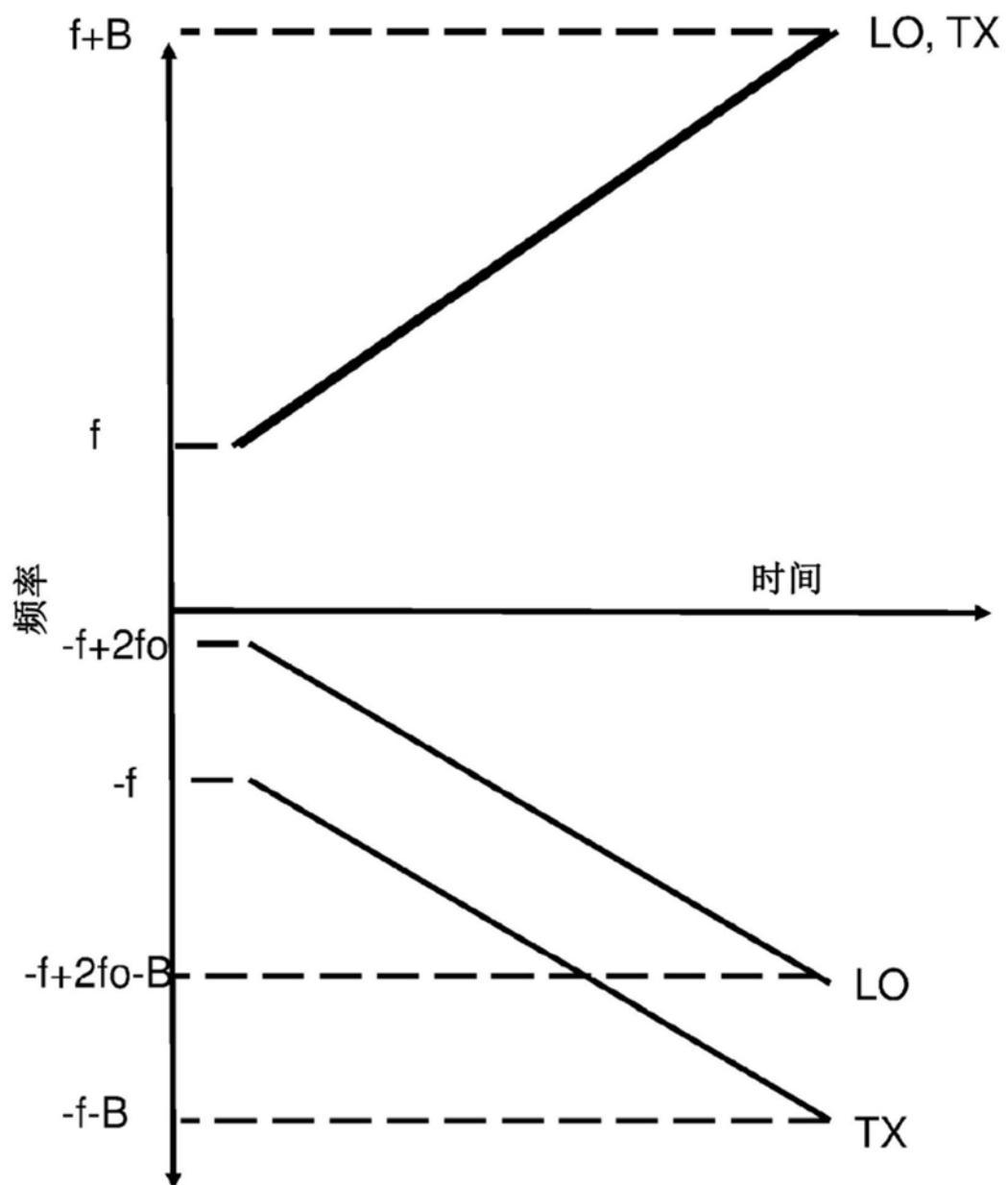


图5E

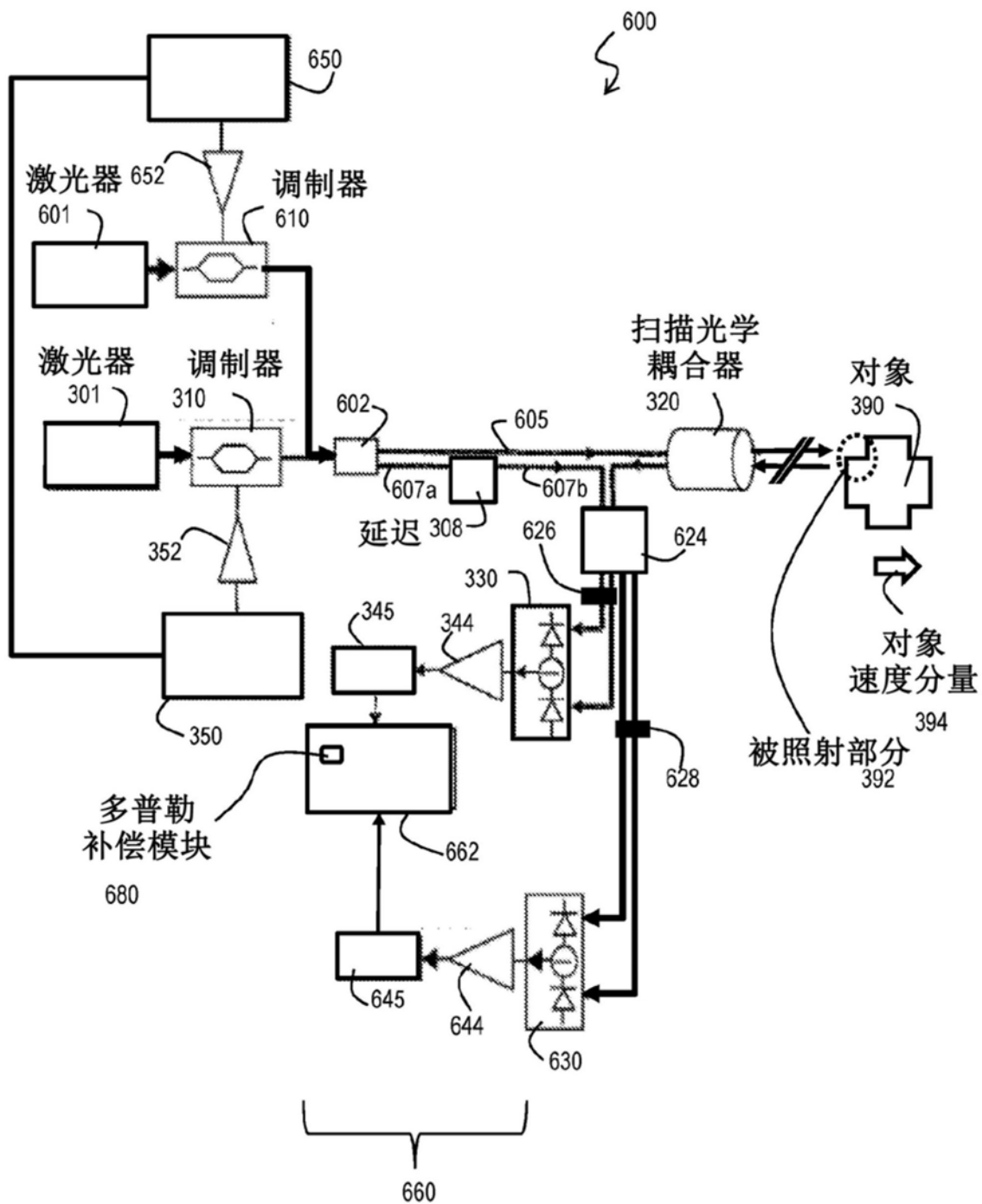


图6

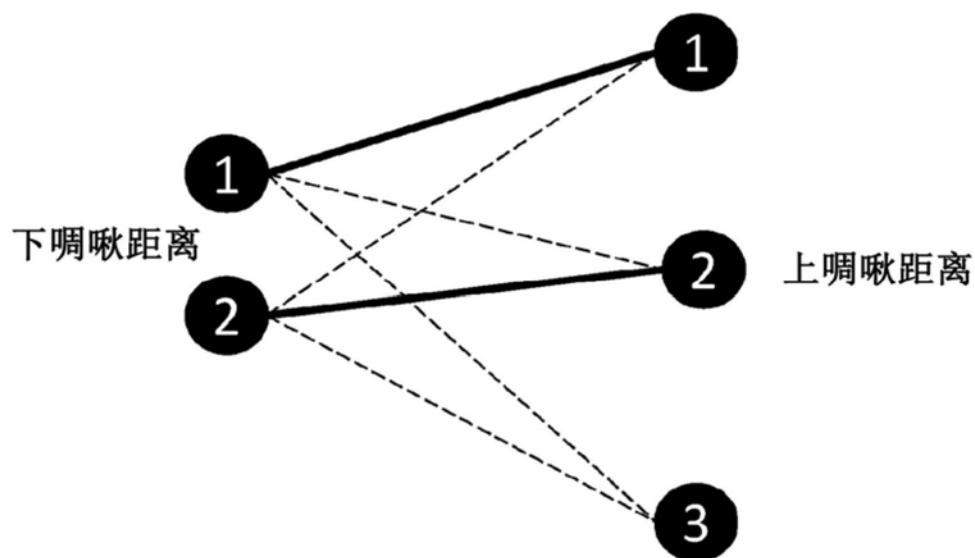


图7A

代价矩阵

$$= \begin{matrix} & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \end{matrix}$$

图7B

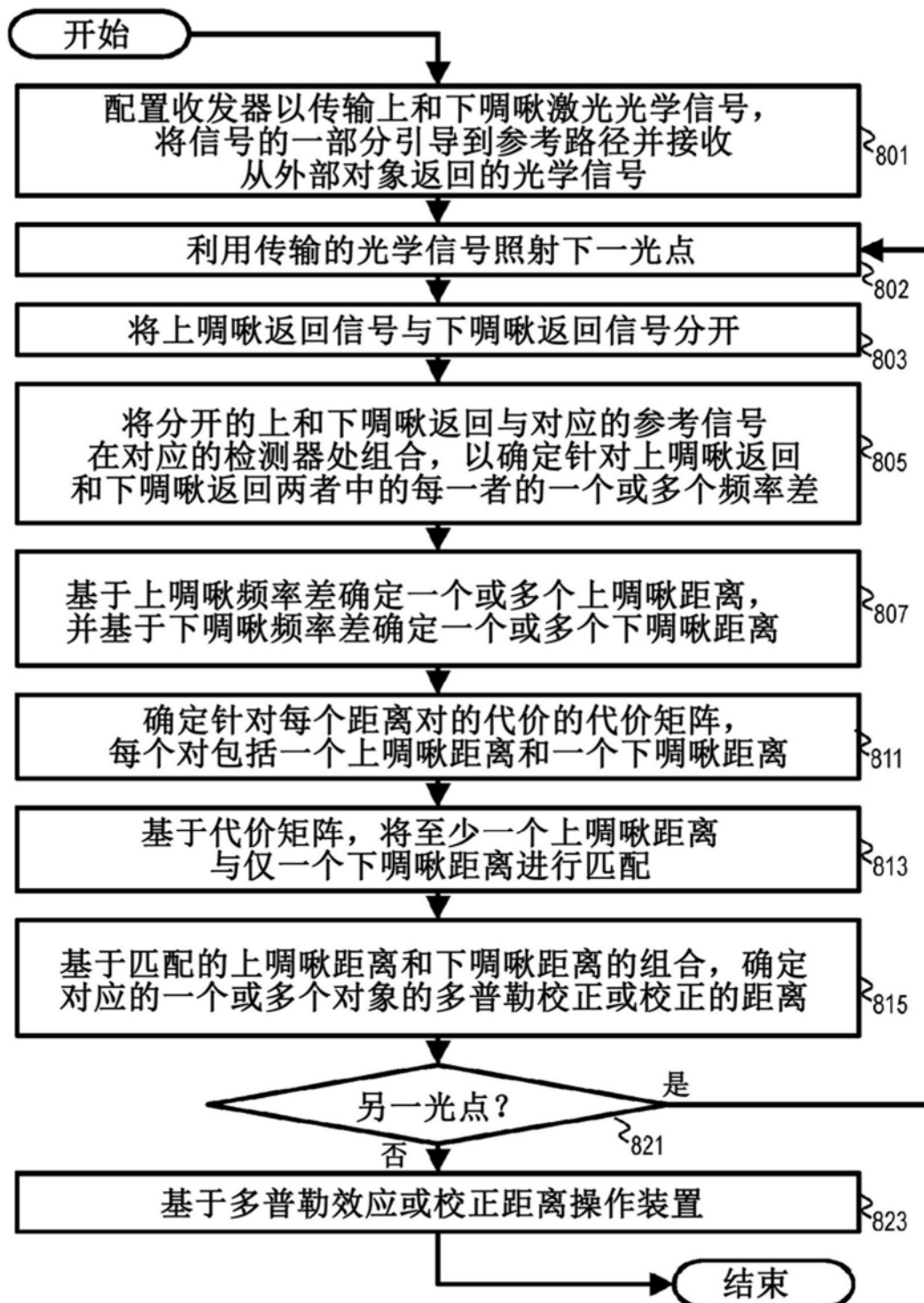


图8

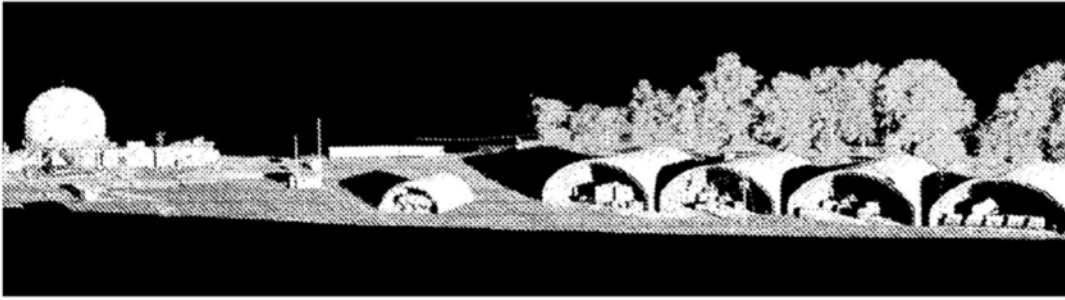


图9A

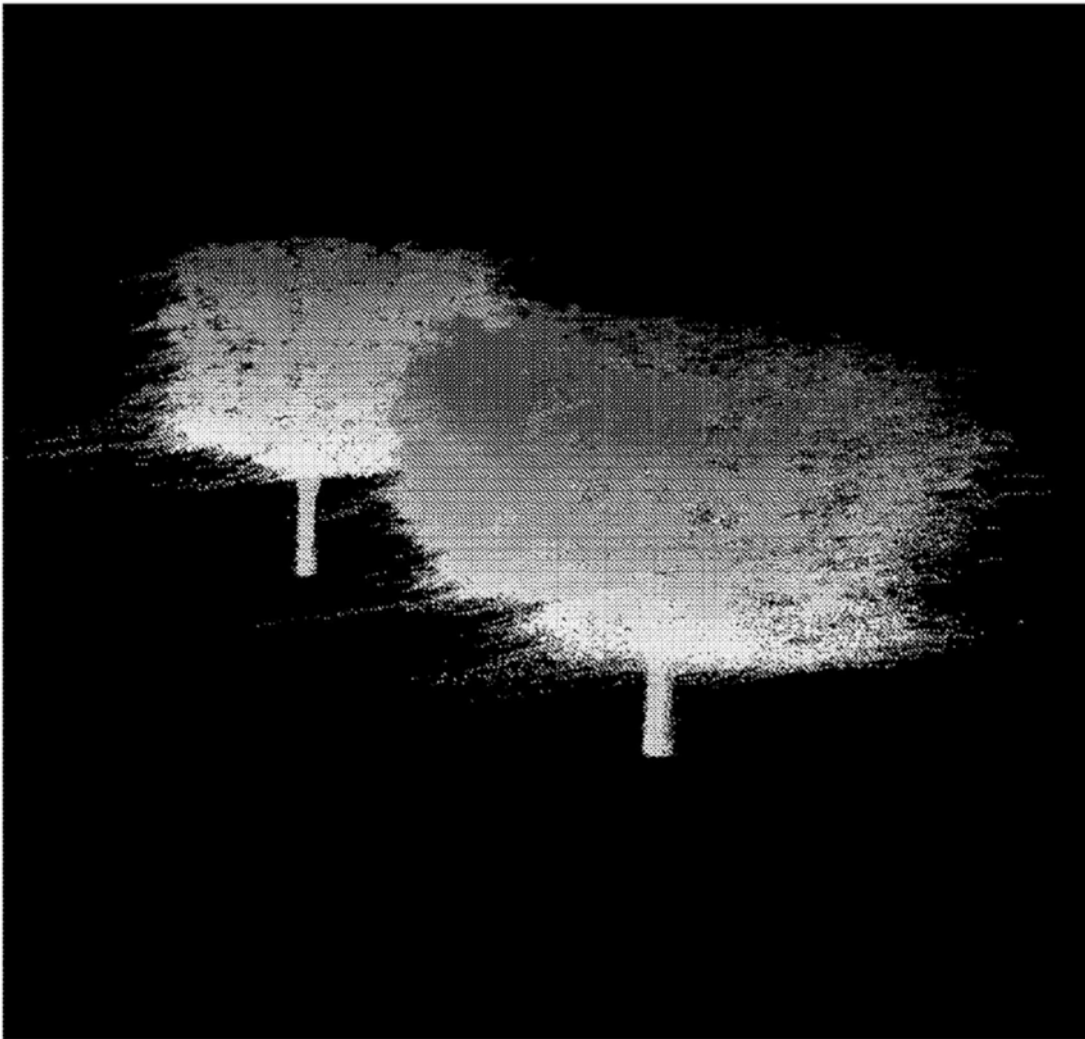


图9B

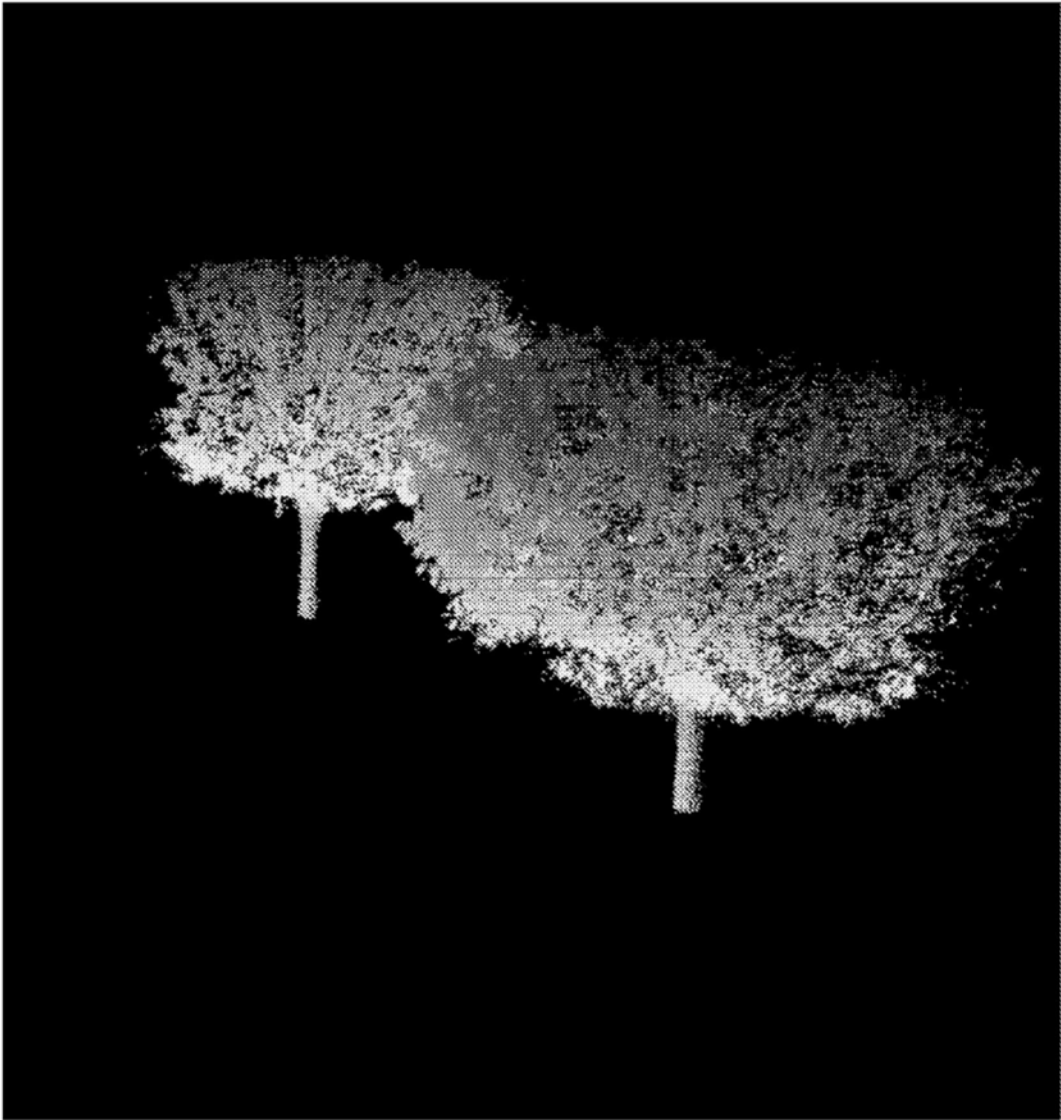


图9C



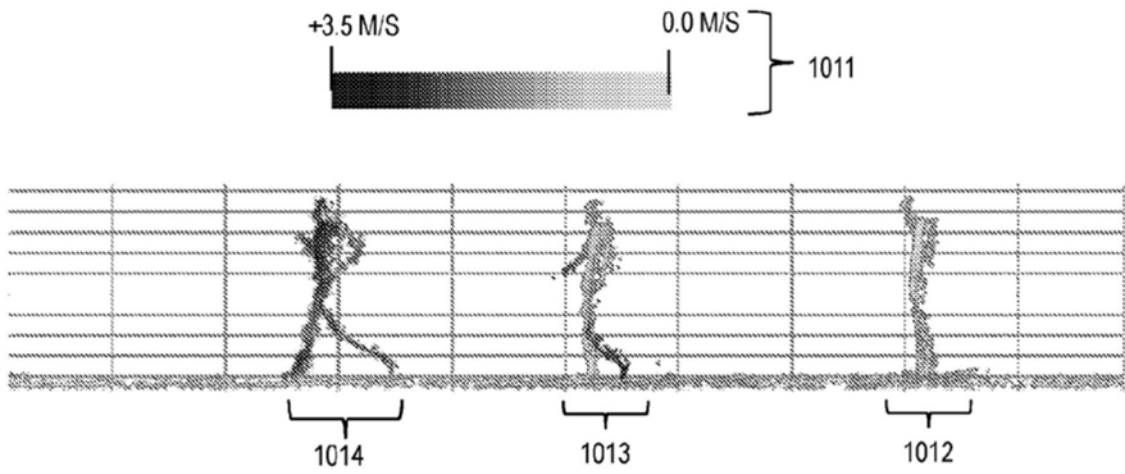


图10A

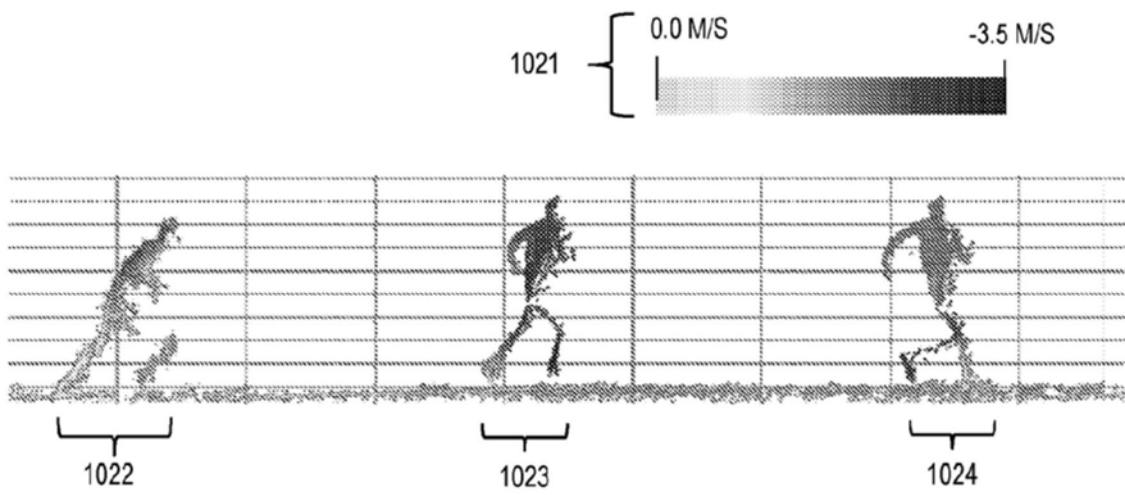


图10B



图11

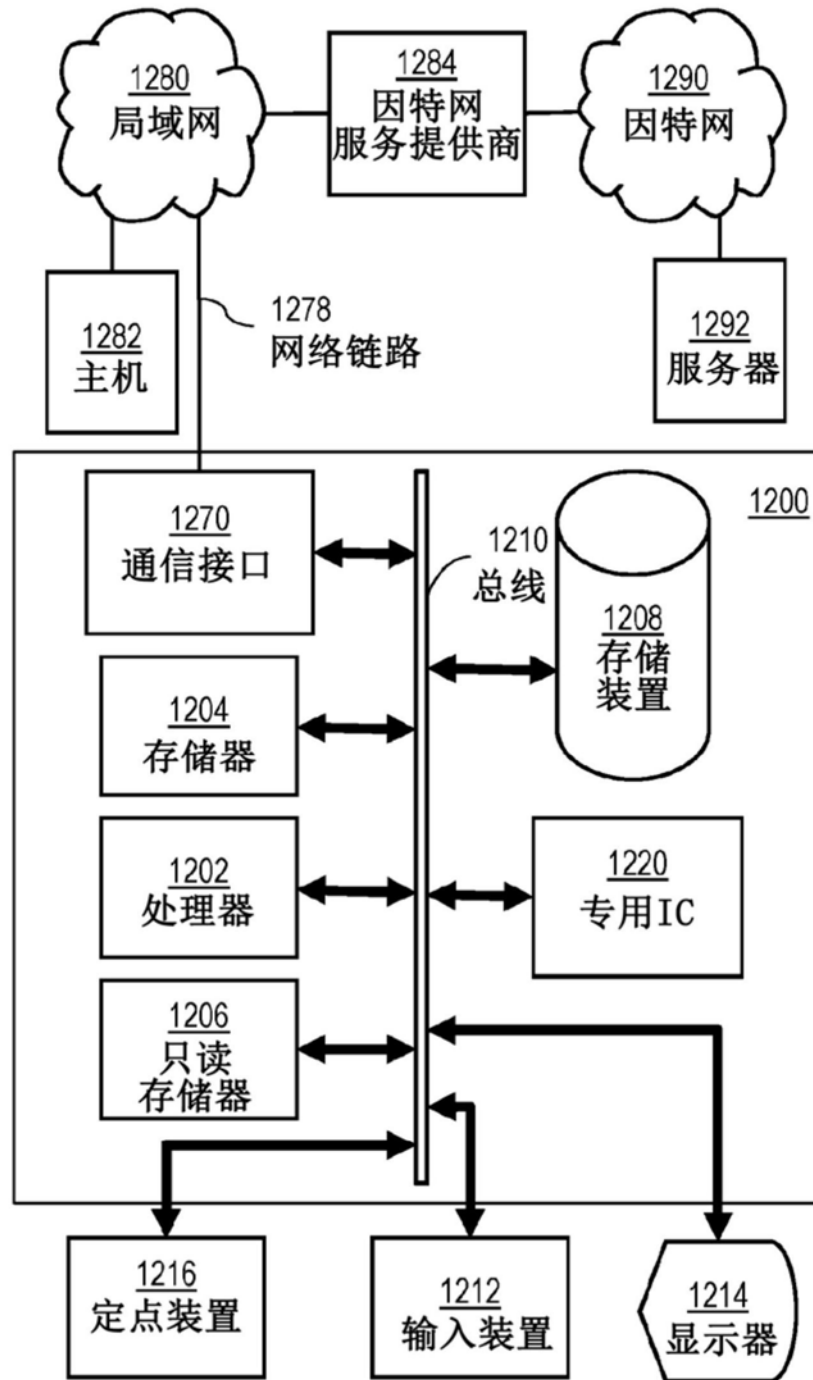


图12

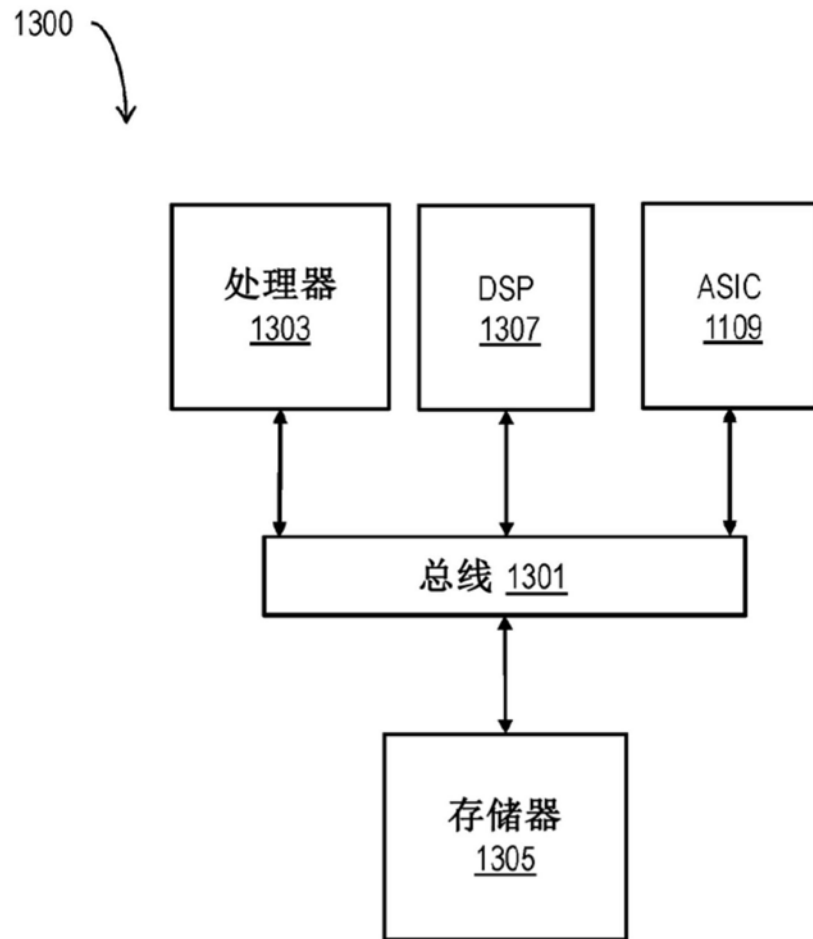


图13