



(12) 发明专利

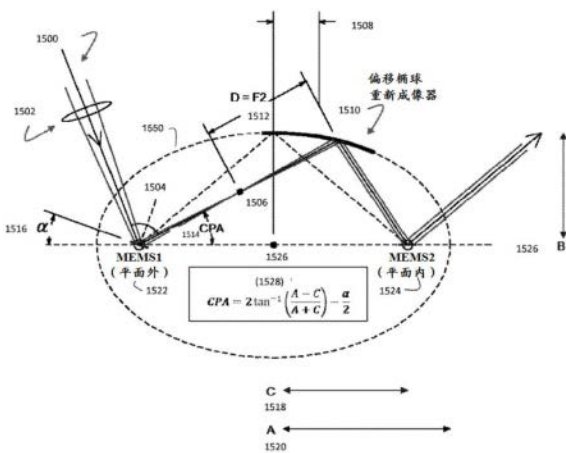
(10) 授权公告号 CN 111108406 B

(45) 授权公告日 2024. 06. 04

(21) 申请号 201880052565.0	(74) 专利代理机构 北京思益华伦专利代理事务所 (普通合伙) 11418
(22) 申请日 2018.07.06	专利代理师 赵飞
(65) 同一申请的已公布的文献号 申请公布号 CN 111108406 A	(51) Int.Cl.
(43) 申请公布日 2020.05.05	G01S 7/481 (2006.01)
(30) 优先权数据 15/644,242 2017.07.07 US	G01S 17/02 (2020.01)
(85) PCT国际申请进入国家阶段日 2020.02.13	G02B 26/08 (2006.01)
(86) PCT国际申请的申请数据 PCT/US2018/041102 2018.07.06	G02B 26/10 (2006.01)
(87) PCT国际申请的公布数据 W02019/010425 EN 2019.01.10	(56) 对比文件
(73) 专利权人 艾耶股份有限公司 地址 美国伊利诺伊州	CN 104136882 A, 2014.11.05
(72) 发明人 L·C·杜珊 D·R·德默尔 J·斯托克顿 A·斯坦哈德特 D·库克	CN 104303091 A, 2015.01.21
	CN 104914445 A, 2015.09.16
	US 2011149360 A1, 2011.06.23
	US 2015369920 A1, 2015.12.24
	US 2015378011 A1, 2015.12.31
	US 6245590 B1, 2001.06.12
	US 9285477 B1, 2016.03.15
	审查员 何强
	权利要求书5页 说明书19页 附图24页

(54) 发明名称
具有重新成像器的激光雷达发射器

(57) 摘要
本文公开了一种紧凑型光束扫描器组件,其包括椭球重新成像镜。



1. 一种扫描器设备,其包括:

第一镜,其中所述第一镜可扫描;

第二镜,其中所述第二镜可扫描;

透镜,所述透镜光学地定位在所述第一镜的上游;

第三镜,所述第三镜光学地定位在所述第一镜与所述第二镜之间,其中所述第三镜具有反射面,所述反射面是在三维中椭球地凹面的并将来自第一镜的光线重新成像到第二镜上;以及

光源,所述光源光学地定位在所述透镜的上游,其中所述光源被配置为透过所述透镜向所述第一镜上发射光,由此所述第一镜将所述光朝向所述第三镜反射,并且由此所述第三镜将所述光朝向所述第二镜反射;

其中所述第一镜、所述第二镜和所述第三镜定位成使得,相对于由椭球地凹面的反射面限定的椭球,

(1) 所述第一镜具有定位在所述椭球的第一焦点处的中心区,

(2) 所述第二镜具有定位在所述椭球的第二焦点处的中心区,并且

(3) 所述第三镜沿着所述椭球位于光学上处于所述第一镜与所述第二镜之间的位置;并且

其中所述第三镜被定位作为偏移椭球重新成像器。

2. 如权利要求1所述的设备,其被布置作为激光雷达发射器,所述设备还包括:

光束扫描器控制器,所述光束扫描器控制器被配置为

(1) 使所述第一镜沿着第一轴线扫描,并且

(2) 使所述第二镜沿着第二轴线扫描,以在扫描区域内限定扫描图案;以及

处理器,所述处理器与所述光源和所述光束扫描器控制器协作,所述处理器被配置为经由压缩感测而智能地选择测距点的子集,用于用来自所述光源的光经由所述第一镜、所述第三镜和所述第二镜进行瞄准。

3. 如权利要求1和2中任一项所述的设备,其中所述椭球具有主轴线和沿着所述主轴线的对称轴线,并且其中所述椭球地凹面的反射面中心地偏离所述对称轴线。

4. 如权利要求3所述的设备,其中所述第三镜定位在所述椭球上使得来自所述第一镜的光线扇面被所述第三镜反射,使得被所述第三镜反射的光线扇面中的所有光线的交叉点位于含有所述第二镜的所述中心区的平面上。

5. 如权利要求1和2中任一项所述的设备,其中所述第一镜和所述第二镜包括MEMS镜。

6. 如权利要求1和2中任一项所述的设备,其中所述第一镜和所述第二镜具有相等的大小。

7. 如权利要求1和2中任一项所述的设备,其中所述第三镜充当单个重新成像镜。

8. 如权利要求1和2中任一项所述的设备,其中所述透镜被适配和定位成提供用于入射光的焦点,其中所述焦点位于所述第一镜与所述第三镜之间。

9. 如权利要求1和2中任一项所述的设备,其中所述第三镜和所述透镜被适配和定位成一起用作无焦透镜系统。

10. 如权利要求1和2中任一项所述的设备,其中所述第二镜具有中心倾斜轴线,其中所述椭球呈现水平宽度,其中距离A对应于所述水平宽度的一半,并且其中距离C对应于从所

述椭球的中心到所述第二镜的所述中心倾斜轴线的距离；

其中用于所述第一镜的共面角度CPA被限定为使得该共面角度 $CPA = 2 \tan^{-1} \left(\frac{A-C}{A+C} \right)$ 。

11. 如权利要求1和2中任一项所述的设备, 其中所述第一镜具有倾斜角度 α , 其中所述第二镜具有中心倾斜轴线, 其中所述椭球呈现水平宽度, 其中距离A对应于所述水平宽度的一半, 并且其中距离C对应于从所述椭球的中心到所述第二镜的所述中心倾斜轴线的距离;

其中用于所述第一镜的共面角度CPA被限定为使得该共面角度 $CPA = 2 \tan^{-1} \left(\frac{A-C}{A+C} \right) - \frac{\alpha}{2}$ 。

12. 如权利要求1和2中任一项所述的设备, 其还包括:

光束扫描器控制器, 所述光束扫描器控制器被配置为

(1) 使所述第一镜沿着第一轴线扫描, 并且

(2) 使所述第二镜沿着第二轴线扫描, 以在扫描区域内限定扫描图案, 其中所述光束扫描器控制器还被配置为驱动所述第一镜和所述第二镜, 使得所述第一镜和所述第二镜中的至少一者以正弦频率进行扫描。

13. 如权利要求1和2中任一项所述的设备, 其还包括:

光场分离器/反转器, 所述光场分离器/反转器光学地定位在所述第一镜和所述第二镜的下游, 以分离和反转由所述第一镜和所述第二镜限定的扫描区域。

14. 如权利要求1和2中任一项所述的设备, 其中所述第一镜和所述第二镜以并排布置进行定位。

15. 一种采用第一镜、第二镜和第三镜的光转向方法, 其包括:

朝向透镜发射光;

所述透镜将所述发射的光传递到第一镜, 其中所述第一镜进行扫描;

所述第一镜将所述发射的光朝向第三镜反射, 其中所述第三镜具有反射面, 所述反射面是在三维中椭球地凹面的并将来自第一镜的光线重新成像到第二镜上;

所述椭球地凹面的反射面将所述发射的光重新成像在所述第二镜上, 其中所述第二镜进行扫描; 以及

所述第二镜反射所述发射的光;

其中所述第一镜、所述第二镜和所述第三镜定位成使得, 相对于由椭球地凹面的反射面限定的椭球,

(1) 所述第一镜具有定位在所述椭球的第一焦点处的中心区,

(2) 所述第二镜具有定位在所述椭球的第二焦点处的中心区, 并且

(3) 所述第三镜沿着所述椭球位于光学上处于所述第一镜与所述第二镜之间的位置; 并且

其中所述第三镜被定位作为偏移椭球重新成像器。

16. 如权利要求15所述的方法, 其还包括处理器经由压缩感测而智能地选择测距点的子集以用于通过激光雷达发射器经由所述第一镜和所述第二镜进行瞄准。

17. 如权利要求15和16中任一项所述的方法, 其中所述第一镜和所述第二镜包括MEMS镜。

18. 如权利要求15和16中任一项所述的方法, 其中所述第二镜具有中心倾斜轴线, 其中所述椭球呈现水平宽度, 其中距离A对应于所述水平宽度的一半, 并且其中距离C对应于从

所述椭球的中心到所述第二镜的所述中心倾斜轴线的距离；

其中用于所述第一镜的共面角度CPA被限定为使得该共面角度 $CPA = 2 \tan^{-1} \left(\frac{A-C}{A+C} \right)$ 。

19. 如权利要求15和16中任一项所述的方法, 其中所述第一镜具有倾斜角度 α , 其中所述第二镜具有中心倾斜轴线, 其中所述椭球呈现水平宽度, 其中距离A对应于所述水平宽度的一半, 并且其中距离C对应于从所述椭球的中心到所述第二镜的所述中心倾斜轴线的距离；

其中用于所述第一镜的共面角度CPA被限定为使得该共面角度 $CPA = 2 \tan^{-1} \left(\frac{A-C}{A+C} \right) - \frac{\alpha}{2}$ 。

20. 如权利要求15和16中任一项所述的方法, 其还包括：

经由光学地定位在所述第一镜和所述第二镜下游的光场分离器/反转器来分离和反转由所述第一镜和所述第二镜的扫描限定的扫描区域。

21. 如权利要求15和16中任一项所述的方法, 其中所述第一镜和所述第二镜以并排布置进行定位。

22. 一种激光雷达扫描系统, 所述系统包括：

光源；以及

椭圆共轭反射器ECR组件, 所述椭圆共轭反射器组件将来自所述光源的光扫描至扫描区域；并且

其中所述椭圆共轭反射器ECR组件具有：

第一可扫描镜；

第二可扫描镜；以及

椭球镜, 所述椭球镜光学地定位在所述第一可扫描镜与所述第二可扫描镜之间；

其中所述椭球镜将来自第一可扫描镜的光线重新成像到第二可扫描镜上, 其中所述椭球镜具有反射面, 所述反射面的形状是中空椭球体的区段, 其中所述中空椭球体关于对称轴线旋转对称, 其中所述中空椭球体限定椭球, 所述椭球处于包括对称轴线的平面内, 并且所述椭球表现出处于对称轴线上的第一焦点和第二焦点；

其中所述第一可扫描镜具有定位在所述第一焦点处的中心区, 其中所述第一可扫描镜关于第一镜旋转轴线可旋转, 并且其中所述第一镜旋转轴线经过所述第一焦点；

其中所述第二可扫描镜具有定位在所述第二焦点处的中心区, 其中所述第二可扫描镜关于第二镜旋转轴线可旋转, 并且其中所述第二镜旋转轴线经过所述第二焦点；

其中所述第一镜旋转轴线和第二镜旋转轴线布置成用于通过在所述扫描区域中响应于所述第一可扫描镜和第二可扫描镜分别关于第一镜旋转轴线和第二镜旋转轴线的旋转的不同方位和高度产生椭圆共轭反射器ECR组件对来自所述光源的光的扫描；并且

其中所述椭球镜的反射面被定位作为偏移椭球重新成像器使得：

(1) 所述椭球镜的反射面

(i) 接收与来自第一可扫描镜的扫描入射光线相对应的光线的第一扇面, 并且

(ii) 将光线的第二扇面引导到第二可扫描镜上, 其中第二扇面在第二可扫描镜的中心汇聚, 并与椭球镜的反射面对光线的第二扇面的反射相对应, 并且

(2) 光线的第二扇面是平面的。

23. 如权利要求22所述的系统, 包括：

光束扫描器控制器,所述光束扫描器控制器被配置为驱动所述第一可扫描镜和所述第二可扫描镜,以分别沿着第一轴线和第二轴线进行扫描,以便限定在所述扫描区域内的扫描图案,使得所述第一可扫描镜和所述第二可扫描镜中的至少一者以正弦频率进行扫描。

24. 如权利要求22和23中任一项所述的系统,进一步包括光场分离器/反转器,其光学地定位在所述第一可扫描镜和所述第二可扫描镜的下游,其中所述光场分离器/反转器将所述第一可扫描镜和所述第二可扫描镜限定的扫描区域分离并反转。

25. 如权利要求24所述的系统,其中所述场分离器/反转器定位成使得所述系统的光的扫描在所述分离和反转的扫描区域的中间区段中比在所述分离和反转的扫描区域的外部区段处相对更慢地移动。

26. 如权利要求24所述的系统,其中所述场分离器/反转器包括三角棱镜形状。

27. 如权利要求26所述的系统,其中所述三角棱镜形状包括在所述三角棱镜形状的相对端处的第一三角面和第二三角面,其中所述三角棱镜形状还包括第一侧、第二侧和第三侧,其中所述第一侧、所述第二侧和所述第三侧连接到所述第一三角面和所述第二三角面;

其中所述第一侧、所述第二侧和所述第三侧的内部的至少一部分包括反射器镜;并且

其中所述三角棱镜形状被布置和定位成从所述第一可扫描镜和所述第二可扫描镜接收光脉冲,并且将所述接收的光脉冲反射离开所述反射器镜以实现所述分离和反转的扫描区域。

28. 如权利要求22和23中任一项所述的系统,其还包括处理器,所述处理器被配置为根据智能选择的测距点的子集来限定系统的瞄准列表,用于用来自光源的激光雷达脉冲进行瞄准,其中激光雷达脉冲瞄准是经由所述第一可扫描镜和所述第二可扫描镜扫描时来自所述第一可扫描镜向椭球镜的反射以及从椭球镜向第二可扫描镜的反射来瞄准测距点。

29. 如权利要求22所述的系统,

其中光线的第一扇面是平面的。

30. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,其中所述椭圆共轭反射器ECR组件在扫描区域内按照基本上直线的扫描图案扫描过方位和高度。

31. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,其中所述第一镜扫描轴线和第二镜扫描轴线相互垂直。

32. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,其中所述第一镜旋转轴线处于所述椭球所处的平面内,并且其中所述第二镜旋转轴线法向于所述椭球所处的平面。

33. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,其中椭圆具有主轴线和次轴线并且所述对称轴线是所述椭圆的主轴线。

34. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,其中所述第一可扫描镜和所述第二可扫描镜中的一个以谐振频率进行扫描,并且其中所述第一可扫描镜和所述第二可扫描镜中的另一个是步进扫描。

35. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,其中所述第一可扫描镜具有反射面,所述反射面相对于所述椭球所处的平面中的对称轴线表现出偏移倾斜角 α ,其中所述第一镜旋转轴线相对于所述椭球所处的平面中的对称轴线也以偏移倾斜角 α 倾斜。

36. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,其中在所述第二可扫描镜上施加偏移角度,以便扫描光从椭圆共轭反射器ECR组件离开。

37. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,进一步包括:

透镜,所述透镜光学上位于所述光源和所述第一可扫描镜之间,其中所述透镜将来自所述光源的光聚焦到第一可扫描镜上。

38. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,进一步包括:

激光雷达接收器,所述激光雷达接收器

(1) 接收来自扫描区域中的物体的扫描光的反射以及

(2) 处理所接受的反射以确定到所述物体的距离,并且其中所述椭圆共轭反射器ECR组件与所述激光雷达接收器相偏移使得从椭圆共轭反射器ECR组件到所述物体的光学路径和从所述物体的反射到所述激光雷达接收器的光学路径是不同的光学路径。

39. 如权利要求22和29中任一项所述的系统,其中所述第一可扫描镜和所述第二可扫描镜以并排布置进行定位。

具有重新成像器的激光雷达发射器

背景技术

[0001] 我们相信,在本领域中存在对改进计算机视觉技术的巨大需求,特别是在诸如汽车计算机视觉的领域中。然而,这些需要并不限于汽车计算机视觉市场,因为对改进的计算机视觉技术的需求在广泛范围的领域中无所不在,包括但不限于,自主平台视觉(例如,用于空中、陆地(包括地下)、水域(包括水下)和太空的自主交通工具,诸如自主陆基交通工具、自主空中交通工具等)、监督(例如,边境安全、空中无人机监控等)、绘制(例如,地下隧道的绘制、经由空中无人机的绘制等)、目标识别应用、远程感测、安全警告(例如,针对驾驶员)等等)。

[0002] 如本文所使用,术语“激光雷达”是指并且涵盖激光雷达、激光检测和测距以及光检测和测距(“光雷达”)中的任一种。激光雷达是结合计算机视觉广泛使用的技术。激光雷达系统与雷达系统的深度信息(测距)共享无源光学传感器的高分辨率和直观感觉。在示例性激光雷达系统中,包括激光源的发射器向附近环境中发射诸如激光雷达脉冲的激光输出。然后,激光雷达接收器将从附近环境中的物体接收这个激光输出的反射,并且激光雷达接收器将处理接收到的发射以确定到这个物体的距离(测距信息)。基于这个测距信息,可以通过希望计算诸如障碍物回避情形下的路径规划、路点确定等事物的主处理器来获得对环境的几何结构的更清楚理解。然而,对于计算机视觉问题的常规激光雷达解决方案经受高成本、大尺寸、大重量和大功率需要以及大数据带宽使用。这个的最佳实例就是交通工具自主。这些复杂因素将它们的有效使用主要限于仅需要短视力范围、窄视场和/或慢再访速率的昂贵应用。

[0003] 例如,本领域中已知其中激光雷达发射器同时照亮大量测距点(range point)的激光雷达系统。闪光式激光雷达就是这种系统的实例。然而,人们认为这些常规系统经受许多缺点。例如,闪光式激光雷达系统需要每脉冲激光极高的能量,这不仅昂贵而且也可能危害眼睛。此外,用于闪光式激光雷达系统的读出集成电路通常非常吵。而且,用于闪光式激光雷达系统的宽视场信噪比(SNR)通常非常低,这导致短范围,从而减少它们的有用性。

[0004] 为了满足本领域中对改进的基于激光雷达的计算机视觉技术的需要,发明人已经公开了以新颖和创新的方式应用扫描激光雷达传输概念的方法和系统的许多实施方案,如在2014年8月15日提交的美国专利申请序列号62/038,065以及美国专利申请公开号2016/0047895、2016/0047896、2016/0047897、2016/0047898、2016/0047899、2016/0047903和2016/0047900中所述,其中每一者的全部公开内容以引用方式并入本文。

[0005] 发明人相信本领域中需要关于可以如何设计扫描激光雷达发射器以优化它们对环境中的感兴趣区的注视的进一步改进。尽管已经通过调度方法来高度优化雷达以在需要注视时停留(注视)在需要注视的地方,但当今的常规激光雷达系统并不共享这个停留最优性。这是因为激光雷达所经受的正是使它们具有吸引力的东西:它们的分辨率。

[0006] 这是因为尽管甚至世界上最大的雷达都具有可以停留的数千个光束选择,但甚至装配在手掌中的小型汽车激光雷达系统常规地具有100,000+或甚至数百万个停留选

择。这导致激光雷达工程师有两种总体设计选择：(i) 机械地从停留 迈向停留,或者(ii) 使用迅速地扫描场景的谐振镜。设计方法 (i) 是精确且适应性强的,但在存在大量询问单元的环境中极慢。设计方法 (ii) 历史上一直是 不可适应的。为了改进这些常规设计方法,发明人公开了一些技术,借此可以减少基于谐振镜的激光雷达的缺点,同时实现历史上只可用于机械步进技术的很多灵敏度和特殊性并且不损失谐振扫描镜的速度优点。

发明内容

[0007] 在示例实施方案中,发明人公开了一种紧凑型光束扫描器组件,其包括椭球 共轭反射器重新成像镜。椭球镜可以光学地定位在第一可扫描镜与第二可扫描 镜之间。透镜可以光学地定位在第一可扫描镜的上游。这样的布置可以提供(除 其他益处外)紧凑的光束扫描器设计,其中两个可扫描镜的大小相等并且在组件 内紧密地放置在一起。此外,重新成像在与场反转结合使用时可以特别有用,因为它限制了反转器(inverter)透镜所需的额外上层空间净空。

[0008] 下文将向本领域的普通技术人员描述本发明的这些以及其他特征和优点。

附图说明

[0009] 图1A和图1B示出了激光雷达发射器/接收器系统的示例实施方案。

[0010] 图2A描绘了激光雷达发射器的示例实施方案。

[0011] 图2B示出了由用于示例扫描激光雷达发射器的两个可扫描镜限定的扫描区 域。

[0012] 图2C示出了由图2B限定的扫描布置的顶视图。

[0013] 图3示出了根据示例实施方案的包括场分离器(splitter)/反转器的光束扫 描器。

[0014] 图4示出了由图3限定的光束扫描器布置的顶视图。

[0015] 图5示出了场分离器/反转器如何操作来使扫描区域上的镜的扫描图案分离 和反转。

[0016] 图6A示出了根据另一个示例实施方案的场分离器/反转器的透视图。

[0017] 图6B和图6C示出了图6A的场分离器/反转器的附加视图。

[0018] 图6D示出了呈现可调整的镜俯仰角的铰链式场分离器/反转器的示例实施 方案。

[0019] 图7示出了相对于图6A-图6C的场分离器/反转器中的光束路径的示例光 线跟踪。

[0020] 图8示出了分离/反转的扫描区域可以如何重叠的实例。

[0021] 图9是呈现激光雷达发射器的不同使用情况的表现结果的表。

[0022] 图10A描绘了标准Lissajous扫描图案的实例。

[0023] 图10B描绘了分离/反转的Lissajous扫描图案的实例。

[0024] 图10C描绘了图10A的Lissajous扫描图案的再访表现。

[0025] 图10D描绘了在采用场反转器以沿着高度提供反转时分离/反转的Lissajous 扫描再访的实例的再访表现的图。

[0026] 图11A和图11B分别描绘了结合图10A和图10B的扫描图案的扫描间隙存 在的地方。

[0027] 图12描绘了用于将周期性相位漂移诱导入Lissajous扫描图案的示例过程流 程。

[0028] 图13A和图13B分别描绘了非反转的Lissajous扫描和反转的Lissajous扫描 的示例使用情况的投影到地平面上的扫描间隙。

[0029] 图14A和图14B分别示出了具有诱导的相位漂移和没有诱导的相位漂移的 示例反转的Lissajous扫描图案。

[0030] 图15示出了椭球共轭反射器 (ECR) 重新成像系统的示例实施方案。

[0031] 图16显示了被配置成没有光线扇面对准的重新成像光学器件的常规扫描器 的扫描的场。

[0032] 图17显示了具有根据我们公开的设计公式选择的几何结构的重新成像器的 实施方案。应注意,指向重新成像器下游的光线扇面位于含有第二扫描镜的中心 的平面中。

[0033] 图18显示了可能通过以符合示例实施方案的方式使用椭球反射器来消除扫 描的输出场的失真。

[0034] 图19是ECR 2D扫描器的示例实施方案的侧视示意图。

[0035] 图20示出了将成对的“亲吻”镜用作虚拟的低成本场反转源。

具体实施方式

[0036] 图1A示出了激光雷达发射器/接收器系统100的示例实施方案。系统100 包括激光雷达发射器102和激光雷达接收器104,它们各自与系统接口和控制件 106通信。激光雷达发射器102被配置为朝向多个测距点110发射多个激光雷达 脉冲108(为便于说明,图1A中示出了单个这样的测距点108)。激光雷达接收 器104从测距点110接收这个激光雷达脉冲的反射112。激光雷达接收器104被 配置为接收并处理所反射的激光雷达脉冲112以支持确定测距点距离[深度]和 强度信息。另外,接收器104通过 (i) 发射脉冲定时的先验知识和 (ii) 用于检 测到达角的多个检测器的任何组合来确定空间位置信息[在相对于发射平面的 水平和竖直取向上]。

[0037] 在示例实施方案中,激光雷达发射器102可以采用包括扫描镜的激光雷达 发射器的形式。此外,在示例实施方案中,激光雷达发射器102使用测距点向下 选择算法以支持预扫描压缩(这在本文中可以被称为“压缩感测”),如由图1B所 示。这样的实施方案还可以包括向激光雷达发射器102提供环境场景数据以支持测距点向下选择的环境感测系统120。具体地,控制指令将指示激光源何时发 射,并且将指示发射器镜指向哪里。此类激光雷达发射器设计的示例实施方案可 以见于2014年8月15日提交的美国专利申请序列号62/038, 065以及美国专利 申请公布2016/0047895、2016/0047896、2016/0047897、2016/0047898、 2016/0047899、2016/0047903和2016/0047900中,其中每一者的全部公开内容以引用方式 并入本文。通过使用预扫描压缩,这样的激光雷达发射器可以通过智 能测距点目标选择来 更好地管理带宽。激光雷达接收器104的示例实施方案可 以见于2016年2月18日提交的美国专利申请序列号62/297,126、美国专利申请 公布2017/0242102、2017/0242105、2017/ 0242106、2017/0242107和2017/0242109 以及美国专利号9,933,513中,其中每一者的全部 公开内容以引用方式并入本文。尽管这些引用和并入的专利申请描述了激光雷达发射器 102和激光雷达接收器104的示例实施方案,但应当理解,实际工作者可以选择与这些引用 和并入的专 利申请中公开的不同地实现激光雷达发射器102和/或激光雷达接收器104。

[0038] 图2A描绘了如由上文引用和并入的专利申请中公开的激光雷达发射器104 的示

例实施方案。激光雷达发射器104可以包括与激光光学器件202、光束扫描器204和发射光学器件206光学对准的激光源200。这些部件可以容纳在包装中,该包装提供合适形状的占用空间以在期望的应用中使用。例如,对于其中激光源200是光纤激光器或光纤耦合的激光器的实施方案,激光光学器件202、光束扫描器204和任何接收器部件可以一起容纳在不包括激光源200的第一包装中。激光源200可以容纳在第二包装中,并且光纤可以用来将第一包装与第二包装相连。这样的布置因为缺少激光源200而允许第一包装更小且更紧凑。此外,由于激光源200可以经由光纤连接而远离第一包装定位,因此这样的布置为实际工作者提供关于系统的占用空间的更大灵活性。

[0039] 基于控制信息发射器控制指令,诸如由系统控制件106生成的发射列表212,光束扫描器控制器208可以被配置为控制由光束扫描器204执行的扫描的性质以及控制激光源200的发射。可以相对于光束扫描器204和光束扫描器控制器208采用闭环反馈系统210,使得可以细微地控制光束扫描器204的扫描位置,如在上述引用和并入的专利申请中解释。

[0040] 激光源200可以是适合于激光雷达脉冲发射的许多激光器类型中的任一种,如本文所述。

[0041] 例如,激光源200可以是脉冲光纤激光器。脉冲光纤激光器可以采用约1-4 ns的脉冲持续时间,以及约0.1-100 μ J/脉冲的能含量。脉冲激光光纤的重复率可以在kHz范围内(例如,约1-500kHz)。此外,脉冲光纤激光器可以采用单脉冲方案 and/或多脉冲方案,如在上述引用和并入的专利申请中描述。然而,应当理解,可以使用这些激光器特性的其他值。例如,可以采用更低或更高的能量脉冲。作为另一个实例,重复率可以更高,诸如在数十MHz的范围内(但预期这样的高重复率将需要使用在当前市场定价下相对昂贵的激光源)。

[0042] 作为另一个实例,激光源200可以是脉冲IR二极管激光器(具有或没有光纤耦合)。脉冲IR二极管激光器可以采用约1-4ns的脉冲持续时间,以及约0.01-10 μ J/脉冲的能含量。脉冲IR二极管光纤的重复率可以在kHz或MHz范围内(例如,约1kHz-5 MHz)。此外,脉冲IR二极管激光器可以采用单脉冲方案 and/或多脉冲方案,如在上述引用和并入的专利申请中描述。

[0043] 激光光学器件202可以包括用来使由激光源200产生的激光束准直的伸缩件。激光光学器件可以被配置为提供期望的光束发散和光束质量。作为实例,根据实际工作者的期望,可以采用二极管到镜耦合光学器件、二极管到光纤耦合光学器件以及光纤到镜耦合光学器件。

[0044] 光束扫描器204是向激光雷达发射器104提供扫描能力的部件,使得可以用激光雷达脉冲瞄准期望的测距点。光束扫描器从激光源200接收进入的激光雷达脉冲(通过激光光学器件202)并且经由来自可移动镜的反射将这个激光雷达脉冲指向期望的沿试验航向的位置(诸如发射列表上的测距点)。镜移动可以由从光束扫描器控制器208接收到的一个或多个驱动电压波形216控制。光束扫描器204可以使用多个配置中的任一个。例如,光束扫描器可以包括双微机电系统(MEMS)镜、MEMS镜结合旋转的多面镜或者其他布置。合适的MEMS镜的实例是单面倾倒/倾斜/平移MEMS镜。通过又一实例,在示例双MEMS镜实施方案中,可以使用单面倾倒MEMS镜和单面倾斜MEMS镜。然而,应当理解,也可以采用这些MEMS镜的阵列。而且,双MEMS镜可以以多个频率中的任一个操作,其实例在上述引用和并入的专利申请中描述,其中附加实例在下文讨论。作为其他布置的另一个实例,可以将小型检流

计镜用作快轴扫描镜。作为另一个实例,可以将声光偏转器镜用作慢轴扫描镜。此外,对于下文讨论的采用螺旋形动态扫描图案的示例实施方案,镜可以是谐振检流计镜。此类替代镜可以从诸如纽约的光电产品公司(Electro-Optical Products Corporation)等多个来源中的任一个获得。作为另一个实例,可以将诸如可从科罗拉多的Vescent Photonics 商购的光子束转向装置用作慢轴扫描镜。作为又一个实例,可以使用相控阵列装置(诸如由DARPA SWEEPER计划开发的一种装置)来代替快轴和/或慢轴镜。最近,可以考虑使用液晶空间光调制器,诸如由Boulder Nonlinear Systems和 Beamco供应的那些。

[0045] 而且,在其中光束扫描器204包括双镜的示例实施方案中,光束扫描器204 可以包括在第一镜与第二镜之间的中继成像光学器件,这将准许使用两个小的快轴镜(例如,与一个小的快速镜和一个长的较慢镜相反的两个小的快速镜)。

[0046] 发射光学器件206被配置为通过孔口向期望的位置发射如由光束扫描器204 瞄准的激光雷达脉冲。发射光学器件可以具有多种配置中的任一个,具体取决于实际工作者的期望。例如,环境感测系统106和发射器104可以将二向色光束分离器用作发射光学器件206的一部分而光学地组合到一个路径中。作为另一个实例,发射光学器件可以包括放大光学器件,如在上述引用和并入的专利申请中描述,或者全范围[例如,广角]光学器件。此外,可以包括对准传感器光束分离器,作为发射光学器件206的一部分。

[0047] 场分离和反转以优化激光雷达发射器对扫描区域内的期望区的注视:

[0048] 光束扫描器控制器208可以向光束扫描器204提供电压波形214,所述电压波形会将光束扫描器的镜驱动到期望的扫描位置对(例如,扫描角度)。电压波形214将限定用于使激光雷达发射器102在扫描区域内对准的扫描图案。由光束扫描器控制器208生成的发射命令214可以与扫描图案协调,使得激光雷达发射器102朝向扫描区域内的期望测距点发射激光雷达脉冲。在上述引用和并入的专利申请中描述了光束扫描器控制器208的示例实施方案。

[0049] 图2B示出了其中镜250和252围绕旋转轴线258和260的定位分别限定光束扫描器在扫描区域254内的对准的示例光束扫描器布置。从激光源200发出的来自方向256的进入的入射激光雷达脉冲将撞击扫描镜250,随之它朝向扫描镜252反射,随之它朝向扫描区域254内的测距点反射。扫描镜250和252的定位将控制扫描区域254内的哪些水平和竖直位置被瞄准,并且然后将从接收器内的脉冲压缩处理提取这些位置的距离[深度]。

[0050] 在示例实施方案中,镜250可以控制光束扫描器沿着扫描区域254的第一轴线262的瞄准位置,并且镜252可以控制光束扫描器沿着扫描区域104的第二轴线264的瞄准位置。第一轴线和第二轴线可以彼此正交(例如,水平X-轴和竖直Y-轴)。应当注意,在这个实施方案中,第二镜252被示为比第一镜250大。这是因为在第一镜扫描时出现扫描角度,图中示出了三个这样的位置。期望的是压紧以在250与252之间引入中继成像光学器件,这减小第二镜的大小。当一个或两个镜以谐振频率扫描时,扫描的速度在扫描区域的中间将较快并且 在扫描区域的边缘处将较慢。这个特性由图2C示出,该图提供了光束扫描器布置的顶视图。在图2C的视图中,当镜250以谐振扫描时,沿着扫描区域254的X-轴262的光束扫描器的瞄准将在扫描区域的中间比在边缘上更快。这对于扫描区域254的Y-轴264同样适用(其中瞄准将在扫描区域的中间比在边缘上移动更快)。当实际工作者想要实现在扫描区域的中间内包括大量测距点和/或在扫描区域的中间包括行间跳跃/迂回的扫描图案时,

在扫描区域的中间的这个高速率可以造成效率问题。结合激光雷达发射器对行间跳跃和迂回的描述可以见于上述引用和并入的专利申请中。这个“在中间较快”的扫描特性在两个镜都以谐振扫描以便实现Lissajous扫描图案(下面讨论其示例实施方案)时特别严重。Lissajous扫描图案允许镜以高速率扫描,并且因此提供快速移动扫描图案。然而,通过“在中间较快”的扫描特性,Lissajous扫描图案就是其最好的实例,激光雷达发射器在至少不增加激光器发射率(其可以降低脉冲能)或不包括扫描图案的附加行重复的情况下可能没有足够的时间来向扫描区域的中间内的所有测距点发射激光雷达脉冲。

[0051] 为了解决这个问题,发明人公开了对光场分离器/反转器(下文称为“场反转器”)的使用,所述光场分离器/反转器光学地定位在镜250和252的下游并且定位成接收并重新定向源于镜的激光雷达脉冲,使得扫描区域以致使扫描的快速部分驻留在扫描区域的边缘处并且扫描的较慢部分驻留在扫描区域的中间的方 式分离和反转。

[0052] 图3示出了其中用于扫描激光雷达发射器的光束扫描器包括场分离器/反转器300的示例实施方案,所述场分离器/反转器光学地定位在镜250和252的下游以使得扫描区域相对于图2B的扫描区域254分离和反转。

[0053] 出于简单解释的目的,在这个实例中,光束扫描器包括可以采取双MEMS镜形式的镜250和252。然而,应当理解,可以将其他镜用于第一和/或第二镜(例如,检流计镜)。第一镜250定位成接收入射激光雷达脉冲。镜250将这个激光雷达脉冲反射到第二扫描镜252。应当理解,这个反射可以是直接反射或间接反射,由此从镜250反射的光束穿过在其到镜252的路上的中继成像光学器件,诸如一体放大伸缩件。镜252定位成从镜250接收反射的激光脉冲,并且进一步使这个激光脉冲反射到场反转器镜300上。离开这个镜的反射然后可以穿过伸缩件/全范围件以产生输出激光脉冲108,所述输出激光脉冲然后行进到扫描区域302内的与光束扫描器瞄准的发射列表中的测距点相对应的指定水平/竖直位置。

[0054] 第一镜250和第二镜252可控制地围绕它们相应的旋转轴线258和260旋转,如上面讨论。因此,镜250将可旋转以控制激光雷达脉冲在扫描区域302内沿着扫描区域的X-轴的位置,而镜252将可旋转以控制激光雷达脉冲在扫描区域302内沿着扫描区域的Y-轴的位置。因此,在激光雷达脉冲撞击每个镜时镜250和252沿着它们的相应旋转轴线的组合定位对于将发出的激光雷达脉冲108定向到扫描区域302内的期望位置是有效的。在示例实施方案中,X-轴镜250以谐振进行扫描。然而,应当理解,Y-轴镜252也可以以谐振进行扫描。此外,镜250和252的任何组合可以以谐振进行扫描。

[0055] 还应当理解,轴线中的一者可以充当“快轴”并且另一轴线充当“慢轴”以反映镜250和252的相对扫描速率。例如,X-轴可以充当快轴,并且Y-轴可以充当慢轴。实际工作者应当理解,将快轴指定为X-轴并且将慢轴指定为Y-轴是任意的,因为系统的位置转动90度将使X-轴为慢轴并且使Y-轴为快轴。此外,在示例实施方案中,就镜面积而言,快轴镜比慢轴镜小,并且也定位在慢轴镜的上游(也就是说,快轴镜接收激光雷达脉冲并且将它反射到慢轴镜,以便朝向所瞄准的测距点发射)。然而,对于其他实施方案,这个配置可以改变。例如,尽管使慢轴镜比快轴镜大在准许较大的扫描区域方面提供了益处,但对于其中准许减小扫描区域的大小的实施方案,慢轴镜可以是与快轴镜相同的大小或甚至更小。作为另一个实例,如果快轴镜在慢轴镜的下游,那么在两个镜之间可以使用重新成像光学器件,诸如中继成像光学器件,以支持这样的布置。

[0056] 图3示出了其中光场分离器/反转器300定位成接收和重新定向由镜252反射的激光雷达脉冲的实施方案。因此,场分离器/反转器300在光学上处于在镜250和252的下游。场分离器/反转器300可以包括被布置成分离发射器的视场并且使所分离的视场反转的镜或透镜。应当注意,附图假设使用镜/反射器,使得成像的场景302在最右边的MEMs组件的后面。

[0057] 在示例实施方案中,场反转器300可以采取以W形布置的反射器的形式,如图3所示(也见图4,该图是图3布置的顶视图)。此处,从第二镜发出的激光脉冲107被反转并且以速度反转的方式传递到将要成像的场景302。发出的脉冲108现在将缓慢地扫描,其中107较快(且反之亦然)。

[0058] 图4是图3的光束扫描器布置的顶视图,并且它示出了场反转器300对得到的视场/扫描区域的影响。如上面解释,不同于图1的实施方案(其中光束扫描器以在中间较快而在边缘处较慢的方式扫描经过扫描区域,而镜250以谐振进行扫描(如由图4在镜102的上方的括号描述所反映)),图3和图4的实施方案的光束扫描器因场反转器300而以在中间较慢而在边缘处较快的方式扫描经过扫描区域。图3和图4的光束扫描器的光束光线路径经由图4中的箭头示出,并且可以看出,原本将落在扫描区域的中间的光束经由场反转器反而重新定向到扫描区域400的边缘(302的顶视图)。

[0059] 图5示出了场反转器300对光束场的影响。图5的顶部帧示出了在镜250以谐振进行扫描时场上的扫描速度的曲线图。如可以看出,扫描速度在中间比在边缘处更快。场反转器300提供分离效果和反转效果。图5的中间帧示出了在线500处的分离效果,其中场被分离成两半。图5的底部帧示出了在分离的场中的每一者上操作的反转效果(其中由线500限定的每一半都反转)。对于图3和图4的示例实施方案,分离线500对应于场反转器的W形的中心峰。场反转器300可以光学地定位,使得对应于分离线500的这个中心峰落在视场的中间内。归因于场反转器300,每个分离的场内的光束扫描路径被反转。这产生了场上的扫描速度的曲线图,如由图5的底部帧所示。如可以看出,扫描速度现在变成在边缘处比在中间更快。这个扫描特性为激光雷达发射器提供更多的时间来适应帧中间的测距点的分组。此外,在与采用发射列表和包括行间跳跃和/或迂回的动态扫描图案的激光雷达发射器相配对时,这个扫描特性还为激光雷达发射器提供更多的时间来适应可能在帧的中间出现的行跳跃和/或行迂回。

[0060] 应当理解,激光雷达发射器所采用的发射列表将采用对发射列表上的测距点的重新映射,以适应分离和反转的视场。

[0061] 在另一个示例实施方案中,场反转器300可以采取三角棱镜600的形式,如图6A所示。三角棱镜600可以限定用于反射光脉冲的倒V形,如下面讨论。图6的示例三角棱镜是以透视图示出,并且呈现在棱镜600的相对端处包括第一三角面602和第二三角面604的形状。第一侧606、第二侧608和第三侧610分别充当图6所示的三角棱镜600的下侧、右侧和左侧,并且这些侧将三角面602和604相连。在图6A的实例中,三角面602和604相对于侧606、608和610垂直地取向,但情况不一定如此。三角棱镜600可以由对入射激光波长透明的任何材料形成,其中可以存在反弹路径的活动区用反射材料进行处理。由于空的空间(空气或真空)对激光雷达激光是透明的,因此棱镜可以是真空的或密实的,按任何期望的制造而定。

[0062] 图6A的视图是从激光馈送107上方的角度,其中部分透明的镜用来准许棱镜内部的可视化。图6B提供了图6A的三角棱镜600的竖直剖视图,并且图6C提供图6A的三角棱镜600的深度剖视图。在这个实例中,可以将水平方向(方位)作为我们试图反转的快轴扫描,并且高度可以是步进扫描或谐振扫描的。对于这个选择,图6所示的棱镜600的架构是不变的。

[0063] 参考图6A,激光脉冲107通过射入区620进入棱镜600。进入的确切地点622将因为镜的扫描而变,以限定扫描区域上的扫描图案。因此,射入区620在图6A中被示为加框区域以指示潜在进入点的这种范围。在进入棱镜600中之后,脉冲107将线性地行进,直到撞击在反射器镜624的下侧606的内部部分上为止,其中反射器镜624在棱镜600内的深度上偏移。图6A中的点句示出棱镜600内的反射(或“反弹”)地点,其中传输通过600的脉冲在新方向上反射。每个反弹地点基于脉冲107的反弹顺序而标记为I、II或III。因此,在撞击反射器镜624之后,脉冲撞击在反射器镜的右侧608的内部部分上(反弹地点II),接着脉冲107重新定向以撞击在反射器镜的左侧610的内部部分上(反弹地点III)。

[0064] 射入地点622处的激光射入角度可以从竖直到水平的半途倾斜地选择。这允许脉冲107碰撞右侧镜608(反弹地点II)和左侧镜610(反弹地点III)两者反弹,并且最终通过出口切口626离开棱镜600并到外部透镜670上(见图6C;例如,向上/向下镜)而不会遇到闭塞。我们将镜608的侧面俯仰角标记为 z^+ 。参考图6B,扫描镜250和252的方位扫描通过反弹地点I-III映射到在图的右手侧的两条虚线之间形成的角度 f 654。远场角度 S 655由在右侧的竖直虚线与离开场反转组件的脉冲108的“飞行轨迹”之间的角度形成。从一致的观点来看, $S=f$ 。如在图3和图4的W实施方案中,当107慢时脉冲108快,并且反之亦然,因为角度是互相关的。如果希望避免间隙500,则我们的目标是设定 S ,使得我们可以扫描到的最左边的角度是竖直的,即, $S(\text{最小})=0$ 。这确保扫描角度竖直地开始并且向右移动;如果在任何其他地方开始,那么缝隙500将较大,否则它可忽视地小并且限于蠕波。代数学表明 $f = S \approx 4z^+ - \frac{\pi}{4} - \phi$ 。(见654文本)。当扫描镜方位扫描被设定为 $\phi = 0$ 时[其中107的轨迹是最快的],我们看出发出的脉冲108被发送到 $4z^+ - \frac{\pi}{4}$ 。同样地,当扫描处于其角度时,我们得到 $S \approx 4z^+ - \frac{\pi}{4} - \phi_{\text{最大}}$ 。因此我们得到 $\phi_{\text{最大}} = 4z^+ - \frac{\pi}{4}$ 作为期望的镜俯仰角。这完成了场反转棱镜形状的外部602-610,因为它与预反转扫描角度和场景方位定位相关。仍要讨论棱镜内部结构和仰角扫描。

[0065] 参考图6C,代数学可以表明,对射入角度 c [扫描镜输出脉冲107的竖直角]675的选择将产生这个恰好相同值的期望的远场仰角扫描角度,也就是, c 675等于光线670的俯角。在射入仰角 c 从 c' 变到 c 时,它扫描经过角度 e 673(扫描镜的仰角宽度)。图6C中的反弹点I然后将沿着棱镜底座674移动。应当明白,这个扫描的长度确定了必须用反射表面处理镜内部的程度。整个棱镜设备可以按照总比例因子进行缩放以考虑投影几何结构。具体地,从棱镜发出的脉冲将沿着向量 $t \sin(c) [\sin(4z - \phi), \cos(4z - \phi), \cot(c)]$ 行进。我们可以看出,我们可以将 x, h 分析视为二维问题并且之后通过比例因子 $\sin(c)$ 进行校正。这个观察事实上使得我们能够将问题分解成 x, h ,然后首先是 y, h ,如先前完成的那样。

[0066] 图6B中还示出了在水平对称轴处穿过射入地点622的虚线660。这个虚线660并未被激光经过,而是能够在建模时替换用于第一反弹地点I的实际路径的虚拟路径。这样做

的目的是大大简化几何数学。可以观察到,从扫描镜到达的激光脉冲107将借助于镜252上被照亮的不同点而来自不同的位置。107四处移动的事实使数学复杂化,并且容易得多的是调用对称并且“假装”激光脉冲以不同的到达角源于点650。

[0067] 我们现在介绍一些符号。我们可以将水平方向表示为 x ,将高度表示为 h (高度),并且将棱镜的深度(即,沿着将602和604相连的线的距离)表示为 y 。利用这个符号,图6A示出了棱镜600,其中侧602、604在 x, h 平面中并且下侧位于 x, y 平面中。接下来,我们引入下标 l, r 来分别表示左侧镜610和右侧镜608。这意味着镜俯仰角可以被表示为 z ,其中 $z^{\pm} \equiv \frac{\pi}{4} \pm z$ 。

[0068] 这个符号简化了棱镜600的数学表示。回顾一下,V形的俯仰角为 z^+ 并且V形内部的内角(其为 z^+ 的角互补)为 z^- 。场反转经由激光角度经历的数学舞蹈而被限定为完成这些角度。回顾一下,符号 f 654表示我们在远场中期望的水平方向上的扫描角度,其也刚好等于 S 655。符号 c' 表示在高度扫描中使用的最陡向下射入角度(当脉冲107行进路径672时)(如从图6A上的竖直轴线测量到)。回顾一下,符号 c 是可调谐的远场仰角,范围在零到 e 673(见图6C)内,如对照水平面测量到(见图6C中的水平轴线)。我们引入的符号为 ϕ ,在第二扫描镜252输出脉冲在激光射入地点622处提供的时间点上的方位扫描角度。回顾一下可以看出,远场角度 f 可以表达为 $f \approx 4z - \phi$ 。按照对称性,如果我们相对于左侧来开始扫描右侧,那么将出现相同的行为,其中左和右被限定为如图6B所示。由于 ϕ 已经反转,因此棱镜600实现分离和反转。

[0069] 此外,为了说明棱镜600可以是无妨碍的,我们可以提高缩放比例。图6C示出了 yr 的深度公式作为中介来计算输入/输出不变性673。这个公式可以用来将外部全范围/伸缩透镜670定位在最后反弹III之外,如在深度上测量。

[0070] 如果实际工作者期望,那么位置传感器(未示出;例如,4四位置传感器)可以定位在第二扫描镜252附近以精确地确定镜252的扫描位置,这允许在 f 的上述公式之外校准出材料缺陷。这个校准可以通过向脉冲108中添加辅助波长并且在射入地点622附近放置频率/波长选择性镜(例如,二向色镜674)来实现。这个镜可以选择性地将处于辅助波长的光反射到位置传感器,以随时间推移而准确检测镜252的扫描位置。二向色镜还可以用来校准镜250的扫描,如果实际工作者需要的话。

[0071] 而且,应用于远场角度 S 的泰勒级数将表明,出于所有实践目的: $\delta f = -\delta\phi - \delta\frac{\phi^3}{2}$ 。这个公式可以用来构建远场图案的变形,即,通过调整镜252的扫描和镜俯仰角 z^+ 来获得期望的校正角度 S 。对于大多数以及可能的任何衍射限制的商业系统来说,可以通过校准出光学组件中的缺陷来掩盖这个点之外的任何校正。如上所述,可以通过二向色镜674来实现这种校准。通过分析地校正时间扭曲,可以大大简化将正弦扫描镜控制信号与远场中的扫描位置相关的时间扭曲校准的范围和复杂性。

[0072] 而且,应当理解,左镜608和右镜610可以被选择为整体或在射入区620上是单向的,以允许射入区620也成为潜在的反弹地点。对同一物理镜不动产的这种重新利用可以导致更紧凑的设计,由此为实际工作者节省成本、重量和大小。作为示例实施方案的最低限度,我们可以要求V的底部所沿循的棱镜侧的部段到图6B中的点622必须是双向的,就像V的另一侧上的镜像必须是双向的。这个原因在于,当 ϕ 接近零时,我们想要在从板624朝

向660移动时反弹回来,而 同时我们也希望当在相反方向上移动时V的底部没有反弹。

[0073] 此外,光线跟踪可以用来确定在操作期间棱镜内部的哪些区可以充当激光 脉冲108的反弹地点。图7的左半部示出 x_l, y_l (图的左侧)和 x_r, y_r (图的右 侧) 光线跟踪以及在扫描体积上的出口窗口626中的激光照射区 (以mm示出), 其中扫描镜间间隔为1mm并且V形槽底部到反射器尺寸为1mm。702的x-轴 可以用来选择L-R镜x-轴 (610、608) 开始并且704x-轴作为镜610、608y-轴 开始。706的y-轴可以用作深度的终点。如图7的右半部所示,我们可以使用 708的x,y位置作为出口窗口626的开始 (内部终点) 并且我们可以使用710 的x,y位置作为出口窗口626的结束 (外部终点)。我们使用在这里具有恒定 高度的出口窗口实施方案,使得棱镜606的底部与出口窗口626共平面,所述 出口窗口直接附接到向上/向下镜。然而,应当注意,可以选择与向上镜的倾斜 接口,如压紧可能要求的那样,并且光线跟踪仍可以用来确定对棱镜尺寸和单向 镜最小面积的要求。到目前为止,我们已经限定了镜610/608/606的矩形边界。现在可以消除从未接收反弹I、II或III的镜腔的部分。这可以通过计算702、712、706和704、710、714所沿循的轮廓并且将镜 (即,反射涂层) 分配到在 所有角度集合上变化的参与凸壳来实现。镜仅需要在由扫描镜的扫描角度上的 扫描镜输出的光线跟踪 x, r 所确定的区上是单向的。通过这个过程,可以实现 镜压紧,这可以降低制造和原材料成本。

[0074] 重叠的反转/分离:

[0075] 场反转器300还可以被配置为提供重叠的反转/分离视场。这个配置不仅使 镜反转与场观看方向脱离,而且允许单轴扫描内的每场观看方向多个镜反转。这 个重叠效果允许沿着期望区 (诸如视场的中间区或中心线) 的更长注视。因此, 应当理解,场反转器300不需要将视场分离成两个不重叠的场。为了实现重叠, 镜俯仰角 $z+$ 可以被修改,使得脉冲108的发出角度 (即,角度S) 在扫描角度 ϕ 的极值下为负 (即,竖直的左边)。

[0076] 通过产生重叠,我们用高的高度扫描时间来交换对指定的foviation区的双 重再访,这允许可以用于避开接近的障碍物的更深俯视。

[0077] 这种布置的实例由图8示出。在这个实例中,我们选择使方位 (水平轴线) 上的扫描进行场反转,其中选定的扫描体积为45度 $A_{az} = \frac{\pi}{4}$ 。在没有场反转的情 况下,x-轴、镜252的谐振扫描角度与竖直轴线、远场扫描角度 f 之间的关系将 是相同的,即, $=A_{az}$ 。

[0078] 在场反转的情况下,我们观察到当谐振镜扫描角度从-22.5度变成零时,远 场扫描角度 f 在零至-22.5度的范围内。这个“翻转”由 f 的公式数学地表达,其中 存在偏移 ($4z$) 和将竖直轴线与水平轴线相关的负号。在扫描镜从0-移动到0+ 的时刻,远场扫描角度 f 从-22.5度翻转到21度。在缺少重叠的情况下,这个翻 转将以22.5度结束,而不是21度。重叠的扫描与不重叠的扫描之间的差异可以 通过铰链来实时地限定和实现,如下面讨论。由于我们以21度开始远场扫描角 度,并且我们必须在扫描镜中摆动通过净22.5度,因此,我们在 另一方向上以- 1.5度结束 (与如我们在不重叠的场反转中的零相反)。就是这个改变提供了重叠 的有益效果,因为对于每个扫描分支而言,我们现在扫描通过水平线两次 (其中 预期将需要更多的测距点检测)。

[0079] 图8的水平轴线是扫描镜 (例如, MEMS镜) “观看”的角度。由于扫描镜在 改变方向时最低,因此我们可以从图8的顶部处的曲线看出,扫描镜在中心 (0 度) 处移动最快。它也

在扫描的边缘处(在这个实例中,在-22.5度和22.5度处)移动最慢。如上面讨论,当中心区是期望最大化注视时间(以增加在中心区中用激光照射的测距点数量)的区域时(例如,对于汽车应用,中心区是可能发生最多事故的地方),这对于实际工作者来说可能成为问题。图8中的垂直轴线是远场中的激光雷达发射器在注视的位置,即,瞬时视场。在传统的不反转的视场中,这个注视位置将等于水平轴线。如果向激光雷达发射器添加变焦或向上镜,那么关系仍将保持成线性比例。这意味着扫描镜的“坏”边缘注视在激光雷达发射器对场景的注视中是“继承的”。由于扫描镜的扫描位置仅确定瞬时注视在场景中位于哪里,因此我们可以绘制出表示连接这两条轴线的关系的曲线。尽管仅针对一个谐振扫描镜示出了图8的实例,但同样的理念对于2D谐振镜扫描起作用,但对于铰接来说更复杂,因此为便于说明,示出了单个谐振扫描镜实例。对于标准的 不反转的激光雷达发射器,这个关系曲线仅仅是连续直线。然而,在场反转的情况下,如图8所示,曲线由两个线段表示,其中垂直轴线周围反映出“跳跃”。最终结果见于图8的最右边的待成像的场景内的瞬时视场的速度曲线图。相对于图8的顶部曲线图,速度关于水平MEMS轴线反转。实际上,我们现在在0度处注视相对较长时间(其中速度低)并且在场景边缘处花费相对较少时间(其中速度高)。

[0080] 关于使反转的视野重叠,我们可以选择在镜扫描的一个或两个边缘处在零之外进行扫描。图8示出了其中针对重叠选择右手扫描(并且在这个实例中仅有右手扫描)的实例。可以看出,在右手扫描上在0度处检查场景并且向下至-1.5度,这增加了我们注视0度中心线的时间量并且经由重叠进行环绕。

[0081] 为了控制和调整实现多少重叠,可以使用一个或多个控制的铰链628来限定镜俯仰角 z^+ ,如图6D所示。铰链628允许调整棱镜600的镜俯仰角。镜俯仰角调整机构(诸如带螺纹的旋钮布置630和632,借此使镜608和610在铰链628处枢转以调整镜俯仰角)可以用来使镜608和610沿着底座606滑动。这导致能够实时地以亚秒速率动态地调整反向扫描的度数和或视场。通过调整镜俯仰角 z^+ ,动态地控制扫描体积和场反转器的重叠。具体地,中场和远场角度 S 和 f 变成使用机械致动器可调谐,以调整右镜608和左镜610的交叉,其中平面对着反射器606。

[0082] 应当理解,实际工作者可以使用场反转器600的其他实施方案。例如,反射器606可以用扫描镜来替换以增加更多的压紧并且缩小图7所示的跨度,以交换来自606的边界处的非反射材料的潜在闭塞。另一个实例是使用被设计成以潜在的重叠扫描左右角度间隔的两个谐振镜。左镜的右手边缘和右镜的左手边缘然后可以充当场反转器。这种情况的实例由图20示出。图20示出了扫描镜2010和2012(例如,在这个实施方案中,MEMS扫描器)中的每一者所共用的激光器2000。示出了单个扫描轴线,正交轴线扫描通过场反转器(标准扫描),其中具有共用镜或独立镜,视实际工作者的期望而定。激光输出2002馈送到光束分离器2004中。作为实例,分离器2004可以是WDM(波分复用器)、MEMS开关、Pockel开关等。在分离器2004的右侧,我们具有扫描镜2010,其中扫描扇区由虚线示出、从正前方2014开始到最右手方向2018。在分离器2004的左侧是另一扫描镜2012,其中扫描扇区由虚线示出、从正前方2016开始到最左手方向2020。由于扫描速度在扫描的边缘处最慢,因此显然图20的布置实现反转的场。

[0083] 图9描绘了展示可以经由场反转(不重叠)和重叠的场反转实现的增加的注视时间的效果的表。图9的表基于90度扫描范围,并且它示出了在标准操作(无场反转)、场反转

操作(不重叠)和重叠的场反转(其中5毫拉德光束发散 具有1度分离场)的每个扫描上测量在中心线附近(在中心线的3度内)所花 的时间的结果。如可以看出,场反转和不重叠的场反转在中心线附近的停留时间方面产生显著改进。

[0084] 具有诱导的周期性相位漂移的Lissajous扫描图案:

[0085] 当且仅当2D光束沿着每条轴线正弦扫描(在时间上)时,2D激光扫描图 案被称为Lissajous扫描图案。方位和高度两者的相位可以是任意的,但在标准 Lissajous扫描中是固定的。当想要最快可能的扫描时,Lissajous图案通常是期望的。这是因为最快镜是必须周期性地且谐振地驱动的并且因此正弦地驱动的 谐振镜。因此,在Lissajous扫描图案中,镜250和252两者将由正弦信号驱动。尽管这些正弦曲线的两个相位是自由的,但它们之间的差会影响扫描性能。实际 工作者对相位差 ξ 的常用选择是90度,这最小化邻近光束扫描的地方之间的最 大间隙。

[0086] 2D谐振光束扫描器的Lissajous扫描图案可以表达为:

[0087] $[\text{height}(t), \text{azimuth}(t)] = [A_h \sin(ft), A_{az} \sin((f+1)t + \xi)]$ (等式1)

[0088] 在很多应用中,谐振频率 f 、 $f+1$ 仅相差1,因为这是公知的以最小化间隙时 间。然而,对于在道路驾驶背景下的激光雷达,因为方位变化率和高度变化率对 于道路表面上的物体来说是不同的事实,可能期望其他选择。

[0089] 图10A描绘了当不采用场反转器300时激光雷达发射器的Lissajous扫描图 案的实例。图10C描绘了图10A的Lissajous扫描图案的再访表现。图10A和 图10C中的轴线是对应于水平线/方位的X-轴和对应于高度的Y-轴。在图10C 中,Z轴是每Lissajous循环的再访次数,其中990的总Lissajous循环具有周期 性99、10。此处选择的扫描范围在每条轴线上是45度。为了物理保真度,添加 9毫拉德的光束发散的一半的统一相位漂移。另外,添加了道路表面,其中光雷 达速度为30m/s,其中上方水平切片为4m。包括了运动,因为实际再访必须考虑到这个变量。然而,这个分量仅具有很小的影响。图10A中的线是示出在镜 扫描时激光雷达发射器所瞄准位置的迹线。白色区是在理论上全部沿着扫描线 发射的光束之间将存在的间隔或间隙。图10C中的表面网格示出再访率如何根 据方位和高度而改变。例如,在边缘处,我们获得每循环约8次机会来再访点。图10C的这个方面示出了激光雷达的常规Lissajous曲线的“缺点”:最佳再访是 在最不需要它的扫描体积的边缘处。具体地,图10A和图10C的图示出标准 Lissajous扫描如何相对于扫描区域的中心区而在扫描区域的边缘处引起更密集 的访问。也就是说,图10A和图10C表明扫描行之间存在较大的间隙和延迟,并且在曲线的中心区中比在边缘处存在更多的机会。同样,这与其中在中心区处 期望更密集的访问的大多数期望应用(诸如大多数的汽车应用)相反。

[0090] 如上所述,诸如棱镜600的场反转器300可以用来分离和反转扫描图案,其在应用于图10A和图10C的Lissajous扫描图案时产生在中心区附近增加注视 时间的扫描图案,如由图10B的实例所示。图10B描绘了在采用场反转器300 以沿着水平线(即,在高度为零时的水平轴线)提供反转时分离/反转的Lissajous 扫描图案的实例,并且图10B示出激光雷达反射器在中心线附近的访问密度相 对于图10A的来说大大增加。这个差异是显著的,因为实际上消除了沿着水平 线的间隙。

[0091] 图10D描绘了在采用场反转器300以沿着高度(即,在水平线为零时的竖 直轴线)提供反转时分离/反转的Lissajous扫描再访的实例的再访表现的图,以 及在方位方向上

的亲吻镜图案。图10D示出激光雷达发射器在中心线附近的访问密度相对于图10C的来说大大增加。这个差异也是显著的,对装配激光雷达的交通工具的正前方的水平线的接近多出大约20倍。

[0092] 测量这些间隙的显著性的另一方式是确定哪些间隙超过限定的阈值。这个阈值可以基于光束发散而限定以考虑激光脉冲108在相对于所瞄准的测距点的假设距离处的轮廓/直径。如果间隙大于阈值,那么这将代表激光雷达发射器可能无法瞄准的潜在盲点。然而,如果间隙小于阈值,那么这样小的间隙可以被在附近瞄准的激光脉冲108包括在内。图11A示出了表示在采用诸如图10A和图10C所示的Lissajous扫描图案时(没有场反转器300)激光雷达发射器的潜在盲点的一系列点,现在具有周期性48、49。如可以看出,图的中心区中存在相对大量的盲点。图11B示出了反转的Lissajous扫描图案的对应盲点图,诸如图10B(同样地,其中每个点表示潜在的盲点)但现在具有周期性48、49。如可以通过图11B看出,场反转器300与Lissajous扫描图案的组合产生在中心区中具有明显的无盲点区域的激光雷达发射器。

[0093] 然而,图11B示出在中心区外部的区中,分离/反转的Lissajous扫描图案中存在盲点。这产生以下问题:系统可以如何设计成理想地以允许系统智能地选择不一定在中心区内部的增加注视的期望区的方式降低此类盲点的程度。

[0094] 作为这个问题的解决方案,发明人公开了在Lissajous扫描图案中使用诱导的周期性相位漂移。利用这种方法在Lissajous扫描图案中常见的固定相位被时变漂移替换。扫描镜250/252中的一者(或两者)通过稍微改变其相位而被驱动成稍微非谐振。因此,通过这个实施方案,我们可以将相位表示为 $\xi(t)$ 而不是 ξ ,如由上述Lissajous扫描图案的公式表示中的等式1所示。这个相位漂移 $\xi(t)$ 是通过使光束扫描器控制器缓慢地改变提供给主题扫描镜的驱动器的命令信号而诱导的(例如,其中驱动器可以是用于步进扫描的马达或用于MEMS镜的活塞)。这个命令信号关于镜如何进行扫描来控制镜。在示例实施方案中,相位漂移可以表示为:

$$[0095] \quad \xi(t) = \sum_{i=1}^{M/2} A_i \sin(K_i t + \mu_i) \quad (\text{等式 } 2)$$

[0096] 因此,被修改为包括两个维度上的诱导的周期性相位漂移的Lissajous扫描图案可以表示为:

$$[0097] \quad [height(t), azimuth(t)]_{drifted} = \left[A_h \sin(ft + \sum_{i=1}^{M/2} A_i \sin(K_i t + \mu_i)), A_{az} \sin\left((f+1)t + \sum_{i=1+\frac{M}{2}}^M A_i \sin(K_i t + \mu_i)\right) \right] \quad (\text{等式 } 3)$$

[0098] 在这个表达式中,我们将M表示为两个镜上的相位频率漂移分量的总数。我们可以采取所有的M个漂移分量并且将它们应用于扫描镜中的一者,或者如上述公式所示,我们可以将相位频率漂移分量分布在两个扫描镜上。这个分布可以是均匀分布或者某一其他分布。应当理解,即使在单个谐振镜的情况下,就在瞄准区中增加注视时间而言,系统仍可以受益于诱导的漂移,但我们将在两个镜以谐振进行扫描方面描述示例实施方案。对于与小振幅 A_i 相关联的等式3的线性化近似,我们得到:

$$[0099] \quad [height(t), azimuth(t)]_{drifted} \approx \left[A_h \left(\sin(ft) + \cos(ft) \sum_{i=1}^{M/2} A_i \sin(K_i t + \mu_i) \right), A_{az} (\sin(ft+t) + \cos(ft+t) \sum_{i=M/2+1}^M A_i \sin(K_i t + \mu_i)) \right] \quad (\text{等式 } 4)$$

[0100] 对于这个实例讨论,我们可以设定 $M=4$ 以简化叙述,并且我们将忽略相位 漂移项 μ_i ,应当理解,对于其中使用总体最小二乘法来发现期望的漂移的示例实 施方案,项 μ_i 在优化和致动期间表现得就像漂移频率项 K_1 、……一样。

[0101] 还有利的是相位漂移是周期性的,其中具有初始图案的谐波子周期,即,其 中 $\frac{K_i}{f}, \frac{K_{M/2+i}}{f+1}$ 是有理数并且小于单位模。这确保再访时间不减少,由此确保不以更慢 的图案再访时间为代价来实现间隙减小。

[0102] 关于选择周期性漂移频率 K_i ,将涉及权衡。如果我们选择太接近Lissajous 频率 f 的周期性漂移频率 K_i ,那么将对图案产生很小的影响,因为相位改变率 将模糊成频率。而且,如果漂移频率太低,那么相位改变率模糊成Lissajous图 案的固定相位项。在下面呈现的实例中,我们描述其中在迭代之前将漂移频率设 定为位于中间点的实施方案。然而,应当理解,这些仅仅是实例并且可以选择其 他值。

[0103] 在示例实施方案中,固定漂移频率的最佳相位被确定为总体最小二乘法的 解。总体最小二乘(TLS)在因变量和自变量都是自由变量时拟合参数,在这里 将是用于TLS的自变量为时间的情况。最小化采用成本函数。作为实例,考虑 汽车激光雷达,其中我们将地平面中的区域选择为我们希望移除间隙的区。

[0104] 图12公开了用于控制如何诱导扫描镜的周期性相位漂移的示例过程流程。用于扫描镜的驱动器1250包括致动器,所述致动器可以周期性地调制相位 ξ 使 用参数 $A_{az}, A_h, K_i, \mu_i, i=1, \dots, M$,同时维持频率 $f, f+1$ 。图12中的步骤1204描 述了集中于总体最小二乘的扫描镜的扫描图案中的帧相关反馈。使用奇异值分 解(SVD) 确保图12过程流程可以实时地执行、特别是在毫秒级上执行。

[0105] 在步骤1200处,经由选择系统参数来启动该过程流程。作为此一部分,限 定最小可接受地面间隙。这可以被设定为角度或以米为单位的距离。对于示例实 施方案,我们选择以米为单位的间隙。我们通过观察脉冲从一个扫描到另一个扫描可以发射的位置以及测量该距离是否大于被测量为超出光束发散的半极大处 之全宽的程度的这个量来计算间隙。我们宣布间隙,并且在如1202-1204所示,间隙(i) 大于1m并且(ii)在优选场景(注视区)Q内时使用该间隙来计算相 位漂移。这个的实例在图13A(针对未反转的情况)和图13B(针对反转的情况) 示出,其中 $f=49$ 。图13A和图13B中的黑色区(例如,见1302)是对于上述等 式1中的时间 t 的所有值来说, x, y 轴中的远离激光脉冲超过1米乘1米的区。在这个实例中,使用地平面来确定间隙。然而,在另一个实施方案中,可以使用 方位高度平面来识别间隙,在这种情况下,我们将使用图11A和图11B中的黑 团,而不是图13A和图13B。

[0106] 接下来,选择漂移频率(其中对于这个实例中的 $M=4$,将2个漂移频率用 于每个扫描轴线)。我们还选择Lissajous频率 $f, f+1$ 、视场(FOV)以及可容许 的间隙大小。Lissajous频率将由发射器控制指令103设定。FOV将由镜扫描的 速度以及我们希望激光器检查的期望区结合间隙来确定。例如,如果最大扫描频 率为10Khz并且我们以1微秒脉冲间距扫描经过100度,那么间隙将是约三度, 如果我们以10毫秒扫描经过20度,那么间隙将是4度。例如,在图13A和图 13B的情况下,FOV在方位上是 ± 45 度(如由黑色三角形1304的斜率证 明)。同样地,竖直FOV在水平线向下至12度的范围内,如由在0,0附近的小黑色 三角形1306证明,从而假设对激光雷达发射器进行2米高度监测。

[0107] 出于相位漂移的目的,FOV的相关的唯一部分是在水平线下方的范围,因 此超过

零的高度FOV的上限是不重要的(如在图13A中通过在1600英尺以上没有示出黑点所指示并且在图13B中通过在800英尺以上没有示出黑点所指示)。

[0108] 在步骤1202处,我们根据限定的参数生成标准固定相位Lissajous图案。图13A示出了标准Lissajous图案的间隙,其中 f 、 $f+1$ 是49、50并且没有发生反转,并且图13B示出了标准Lissajous图案的间隙,其中 f 、 $f+1$ 是49、50,并且其中发生具有1度重叠的反转。图11A和图11B示出了对于3毫拉德光束宽度的未反转和反转空间的在竖直方向(激光视线)上的相应间隙,并且图13A和图13B示出了以一米间隙公差投影到地平面上的这些相同间隙。区1310示出了期望减小间隙的注视区 Q 。注视区在图12中标记为1202的区段中进入处理流。只有这个区段中的间隙在后续算法阶段使用,忽略所有其他区。在我们的实例中,1310中的所有间隙都被移除,这就是我们为何将它们标记灰色。区1310可以呈现任何形状,并且它可以基于环境场景进行选择(见图1B中的120)。例如,考虑以下情况:我们具有旁路,我们希望在其十字路口附近扫描沿着方位 $=0$ 从出现十字路口的0至800英尺正在移动的配备激光雷达发射器的交通工具。 Q 选择可以是数据自适应的(我们观察到沿着区1310的交通移动并且尝试进行调查),或者它可以根据先验信息(诸如道路网络地图)进行选择。 M 的大小将确定实时可容许的 Q 选择的改变率。初步工作指示 $M=4$ 工作相当好并且容易及时地收敛,以便以毫秒速率进行更新。在我们的实例中,投影到地平面,但应当理解,任何投影表面都可以,从而合并地形高度或者可以用其他拓扑流形来替换地平面的其他考虑。

[0109] 超过限定的最小接受间隙的检测到的间隙分组成一组点为 S 。因此, S 将是表示图13A(或图13B)中的黑点1302的点的集合。

[0110] 接下来,使用等式1来发现产生最接近 S 中的每个点的坐标的时间 t 。这些时间可以在集合 T 中表示。

[0111] 接着是步骤1204,其中使用来自步骤1202和1204的主要分量解出TLS解。在以下描述中,我们将实施方案限于地平面注视,其中具有场反转和重叠。首先,我们使用等式4进行线性化,其中时间 t 基于 T 中的元素进行设定。TLS解将基于漂移的线性化泰勒级数表示而选出对 A_i, μ_i 以及更新的时间戳 T 。我们现在可以将这些值带入等式3中,并且由此发现新(通常更小)的一组黑点,其限定我们将表示为 S_drift 的新集合。接下来,我们再次递归,从而在时间戳、振幅以及漂移相位和频率上再求解TLS,直到达到期望的性能水平为止。

[0112] 根据步骤1210,如果在任何点处, S 或 S_drift 为零,那么我们将对应于该 S 或 S_drift 的相位漂移控制注入驱动器1250中。这个过程存在两个相互排斥且完全穷尽的结果。第一个是 S 中的集合不再减少(见步骤1212),在这种情况下,我们可以更新Lissajous参数 $[K, f]$ 并且重复测试性能是否改进(S 、 S_drift 减小)。替代地, S 、 S_drift 减小到被视作值得终止(或完全消失)的大小。

[0113] 对于示例操作,可以将图13B的区1310中的所有黑点移除(即, S_drift 是空的)。示例操作仅花费可针对1Gflop处理器在1ms内执行的1Mflops,这足够快以在单个帧的基础上进行更新。场反转和相位漂移的重叠图案的缩放由图14A示出。图14B示出了对应的非相位漂移的Lissajous图案。图14A和图14B放大了水平线附近,因为那里是主要活动发生的地方,并且对图14A和图14B的检查暴露关于诱导的相位漂移如何改进性能和移除间隙的线索。首先,我们注意到,在这两种情况下,以扩展视图示出扫描范围区,因为图10A和图

10B中的全视图曲线图太粗糙而无法获得洞察。接下来,我们注意到,在水平线偏下存在很多扫描,并且这个区在激光扫描之间具有极紧密的间隔。这是场反转和重叠的覆盖两者的组合特征,对于两个实例来说是共同的。在这两种情况下,我们选择调谐两个镜场反转器以再次强调高度上的约-0.3度与-1.2度之间的高度扫描。对图14A的检查表明,在密集扫描区和较粗糙的扫描区(-0.2度高度以上和1.2度高度以下)内,菱形间隙区是不规则的,并且比图14B中更不规则。这就是图12的过程流程通过确定使相位漂移以便压低集合S的最佳方式而授予的礼物。而且,我们注意到,图14A中的竖直条纹比它们在图14B中间隔得更开。这就是相位漂移使再访图案分叉并且用更紧密的间隙替换菱形间隙的结果。

[0114] 因此,应当理解,诱导的相位漂移可以用来智能地选择扫描区的用于更长停留注视的区域。此外,当与场反转器300结合时,预期以具有诱导的相位漂移的Lissajous图案使用镜扫描提供显著的性能改进,从而允许在每帧扫描区域中更好地询问期望的区。

[0115] 用于紧凑型光束扫描器组件的椭球重新成像镜:

[0116] 发明人认识到,本领域中还期望紧凑型光束扫描器组件。例如,发明人相信,人们对于紧凑型2D扫描镜用于汽车和机载激光雷达、生物学成像(即,内窥镜检查)、虚拟和增强现实以及共焦主动成像越来越感兴趣。不论实现为检流计、MEMS还是其他镜,扫描镜通常都因为相关联的高扫描速度和紧凑的形状因数而用于激光扫描系统。通常通过将一对平面内和平面外单轴(与双轴相反)MEMS装置级联来获得最快的实际扫描速率和倾斜角度。光路径中的第二镜因为光束发散而具有比第一镜更大的点大小。发明人公开了一种在第二镜上对点光束重新成像的装置,由此缩小所需的镜大小。这不仅减小扫描器的形状因素,而且增加扫描速度和/或最大倾斜角度,并且因此增加扫描视场,因为镜面积与扭矩和扫描速度成比例。

[0117] 在示例实施方案中,两个扫描镜(例如,MEMS镜)可以放在由椭球反射器/镜限定的椭球的焦点处。聚焦透镜(或镜)可以定位成在将输入光束定向到第一扫描镜上之前调节光束,以便输出光束可以保持准直。这在光学上等效于将第一扫描镜的图像置于第二扫描镜的位置,这种情形已知为光学共轭。出于这个原因,反射器组件可以被称为椭圆共轭反射器(ECR)组件。在示例实施方案中,只有完整椭球的相对小部分将拦截从第一扫描镜反射的光,如由光束在第一扫描镜处的入射角度决定。这允许仅使用椭球的对应区段来构建ECR。这进而提供用于允许进入和输出光束进入和离开组件的准备机构。

[0118] 对椭球的成像性质的分析表明,在第一扫描镜处的入射角度可以被选择为使得从第一扫描镜朝向椭球内部的反射表面的反射光线扇面取向成使得随后的扇面中的所有光线的交叉处都位于也含有第二扫描镜的中心的平面中。我们公开确保这个共面依赖的设计公式,其中扫描器上具有或没有倾斜偏移。倾斜偏移允许组件的长度、高度和宽度的灵活性,这具有增加实际工作者可用的交易的益处。

[0119] 除了2D扫描应用之外,本文公开的ECR技术提供任何级联的镜组件的改进。级联的镜增加总体扫描孔口,并且本文公开的重新成像器也使这些系统更紧凑。与现有技术相比,本文公开的ECR解决方案提供更紧凑的解决方案(例如,见使用单个镜进行重新成像的实施方案),而不向扫描的场中引入伪影。

[0120] 激光器可以利用一对单轴镜进行扫描。如果镜附接到螺线管,那么这被称为检流计扫描器。在很多现代的紧凑型激光系统(其包括复印机、条形码读取器和激光系统)中,

MEMS单芯片装置通常用作倾斜镜以减小大小、重量和成本，同时增大扫描速度。由于期望镜自由地铰接并且在它们之间传递的光锥不受阻，因此对于铰接的镜之间的距离可以有多近存在硬性约束。由于第二扫描镜必须足够大以适应由第一扫描镜引起的整个角度范围，因此常规地，第二扫描镜通常比第一扫描镜大。这进而减小可实现的最大扫描角度或最大可实现的扫描频率，或这两者。由于这两者都是对激光领域的实际工作者来说的重要设计参数，因此发明人在示例实施方案中公开了通过使系统具有较小且相等大小的两个扫描镜（诸如MEMS装置）而允许扫描体积显著增大的设计。对镜大小的限制是激光光束腰和扫描体积两者的函数。重新成像允许MEMS装置大约为几毫米。为了解决本领域中的这个问题，发明人公开了使用光学地定位在第一扫描镜与第二扫描镜之间的椭球重新成像反射器。这样的设计可以保留将平面MEMS镜作为可扫描镜的简单性，而且同时提供改进的性能。此外，这个椭球反射器可以是系统所使用的单个重新成像镜。

[0121] 图15示出了采用椭球反射器1510的设计的示例实施方案。参考文献H.雷恩(H.Rehn),“椭圆反射器的光学性质(Optical Properties of Elliptical Reflectors)”,光学工程,43(7)1480(2004年), (其全部公开内容以引用方式并入本文), 提供了附加细节,包括与椭球反射器相关联的光学性质。应当理解,当反射器1510被称为椭球反射器时,这意味着反射器1510呈现与椭球形状的至少一部分对应的曲率。因此,椭球反射器1510优选地呈现与中空椭球的区段对应的形状和曲率。图15所示的示例系统使用处于偏移配置的椭球反射器1510。而且,在示例实施方案中,用于反射器1510的具体椭球结构可以是扁长的球状形状。此类椭球关于主轴线呈旋转对称,并且这个结构允许两个扫描镜的物理分开。

[0122] 考虑由以下公式限定的旋转椭球： $\frac{z^2}{A^2} + \frac{r^2}{B^2} = 1$,其中 $r^2 = x^2 + y^2$ 。这到平面中的投影是具有水平长度2A(见图15中的1520,其标记长度A)和竖直长度2B(见图15中的1526,其标记高度B)的椭圆1550。扫描镜1522和1524各自设定在距椭圆中心1526的距离C(见图15中的1518)处。为了使这些位置处于椭圆的焦点处,C的值应当限定为 $C = \sqrt{A^2 - B^2}$ 。

[0123] 在反射器1510的上游,我们插入透镜1502,其使从源1500发射的光聚焦。如下面解释,椭球反射器1510和透镜1502可以共同充当无焦透镜系统(afocal lensing system)。透镜1502的形状和位置被选择为使得焦点1506位于第一扫描镜1522与椭球反射器1510的反射表面之间。回顾一下,按照定义,焦点1506表示点大小处于最小的位置。我们将从1506到椭球镜上的光源投影的位置的距离表示为F2(1512)。期望入射在第二扫描镜上的光束是准直的,以便扫描镜1522的输出也是准直的。因此,由输入光束1500和聚焦元件1502的特性确定的焦点1506的最佳位置可以符合以下要求:距离1512等于椭球的与由椭球反射器1510的在来自1510的反射点处的形状和曲率限定的椭圆1550相对应的有效焦距F2。

[0124] 角度 α 1516是第一扫描镜1522的偏移倾斜。应当注意,当倾斜在第1扫描镜1522上变化时,入射角度(AOI)1504也变化。这并不构成使用系统的要求,而是通过使输入光的轨迹与随后描述的几何形状要求分离来向希望并入该系统的实际工作者提供额外的灵活性。我们将偏移1508表示为从椭球投影1550的中心1526到椭球反射器1510的反射表面的部分的中心的距离。

[0125] 如果点源定位在扁长球状椭球的两个焦点中的一个处,那么光都将在没有行差

的情况下到达第二焦点,并且所有光线的总路径长度将是相等的。因此,原则上,可以从任何角度将光束定向到第一扫描镜1522上并且它将反射到第二扫描镜1524上,只要第二扫描镜1524位于椭球的第二焦点处即可。

[0126] 影响光束输入角度的更重要因素源于期望优化被输出光束的扫描图案覆盖的场的特性。这可以通过考虑在光学光线上操作而没有中介光学器件的理想双镜扫描系统的操作来理解。在这样的系统中,针对第一镜的各种倾斜角度反射的光线的积聚导致处于各种角度的一组反射光线,在这里被称为光线扇面。期望这个扇面中的所有光线都在同一平面中。这个光线扇面然后入射在第二镜上,其具有可以容纳扇面中的所有光线的足够程度。当在正交于第一镜的方向上扫描这个第二镜时,得到的2D输出扇面具有以下性质:当投影在垂直于中心光线的平面上时,2D输出扇面形成其中扫描行是线性且水平的扫描图案。来源于第一镜的光线扇面的每个成员的入射平面当入射在第二镜上时然后将旋转到由X镜施加的扫描角度的大小确定的程度。这仅导致X方向上的小枕形失真,这在图16中可见,如与矩形边界示出的精确直线图案的偏差。可以通过容易通过针对每个Y位置调整X镜扫描的振幅或者调整激光雷达系统中的激光脉冲定时来适应这个失真。

[0127] 考虑来自第一扫描镜1522的光线扇面,因为它遇到椭球反射器1510的内部反射表面,由此它向下反射到第二扫描镜1524上。对于示例实施方案,为了扫描器以与先前描述的理想镜对相同的期望方式操作,在来自椭球反射器1510的反射之后,现在会聚到第二扫描镜1524的中心上的光线扇面应全部位于同一平面中。这可以仅在扇面的中心光线的交叉点位于第二扫描镜1524的正上方的情况下发生。

[0128] 图17示出了图15所示的布置的3维视图,其中焦点在光线扇面几何形状上。在图17中,再次标记了图15的各个元素(1500、1502、1522、1524、1510、1514),并且现在将3D椭球画成丝网1700。图17还添加了以下标记:1704(用于向环境场景呈现的图像平面)、1706(用于来自第二扫描镜1524的扇形光束、1708(用于被椭球反射器1510反射的扇形光束)。图17还示出了涵盖扇形光束1708的平面1702。有用的是应当注意,在任意几何形状的情况下,从椭球反射器1510反射到第二扫描镜1524上的光束具有不是平面的扇形光束1708。

[0129] 对于示例实施方案,使这个扇形光束1708成平面对从第一扫描镜1522的反射角度施加要求。对于共面角度,这个角度缩写为CPA(见图15中的1514)。CPA是对在椭球的对称轴线和椭球与穿过第二扫描镜1524的中心的垂直线的交叉点之间对着的角度。CPA可以使用以下表达式(示为图15中的1528)根据用来限定椭球1550的A和C的值来计算:

$$[0130] \quad CPA = 2 \tan^{-1} \left(\frac{A-C}{A+C} \right)。$$

[0131] 为了有助于随后的设计行业,我们可以将倾斜角度 α 的可选偏移添加到第一扫描镜1522。我们然后获得CPA的修改公式,示为图15中的1528并且为了方便起见在这里重新创建:

$$[0132] \quad CPA = 2 \tan^{-1} \left(\frac{A-C}{A+C} \right) - \frac{\alpha}{2}。$$

[0133] 应当注意,CPA 1528在数学上不再精确(如在不包括添加可选的偏移倾斜角度的第一公式中一样),而是足够实际使用的近似。

[0134] 应当注意,光不与ECR相互作用,按照从第二扫描镜1524的反射,因此可以在第二扫描镜1524上施加偏移角度,以有助于扫描到的体积离开而不影响性能。

[0135] 准直的输入1500与准直的离开光束(图15)之间的放大由比率 $M=F2/F1$ 给出。这是施加到级联的光学系统的透镜等式的结果。在实践中,实际工作者可能希望这个比率接近一,以保持两个扫描镜1522和1524的大小相等。

[0136] 图16和图17示出了CPA约束可以如何影响可用ECR的构建。图16示出了当没有注意确保构建ECR并将其与CPA约束一起使用时分别对X和Y角度进行24度×20度(光学)扫描所产生的场的实例。应当注意,图16示出了在Y和X扫描行两者中的强烈弯曲,从而使得这个图案难以与直线坐标系匹配,特别是对于利用被动光学器件的共轴相机配准来说成问题。图18示出了在ECR被约束为根据1528进行操作的情况下操作的相同扫描场。与图16相比,扫描行(恒定的Y角度)是线性的,并且沿着X方向的枕形失真等效于在没有中介光学器件的理想(但没有重新成像且因此不紧凑)系统中看到的那样。应当注意,在这个图案中,对于 $\alpha=0$,第二(竖直)扫描角度的失真数学地消失。第一(水平)扫描方向上的残余失真包括类似于1D枕形失真的微小过扫描,并且在后处理中容易补偿。

[0137] 图19示出了示例实施方案中的我们可以获得的简洁形状因数压紧。从侧面看,利用对于大约100 μm 的标称光束腰来说特别可行的毫米公尺紧密地包装两个扫描镜。回顾一下,在这个示例实施方案中的第一扫描镜的方向离开平面,即,朝向观察者,而第二扫描镜在含有图像本身的平面内。为简洁和清楚起见,图19中省略了标记,但可见CPA角度、扫描镜输入和输出光线、输入光束源和输入透镜以及椭球反射器。这个镜的3D性质在图19中也可见。

[0138] 尽管上文已经关于本发明的示例实施方案描述了本发明,但可以对本发明作出各种修改,这些修改仍落在本发明的范围内。在查阅本文中的教导之后将可认识到对本发明的此类修改。例如,尽管Lissajous扫描图案被公开为可以经由场反转和诱导的周期性相位漂移来增强的扫描图案的主要实例,但应当理解,可以类似地增强螺旋形扫描图案。此类图案通常被实现为抑制的Lissajous图案,其中缓慢地调制振幅。

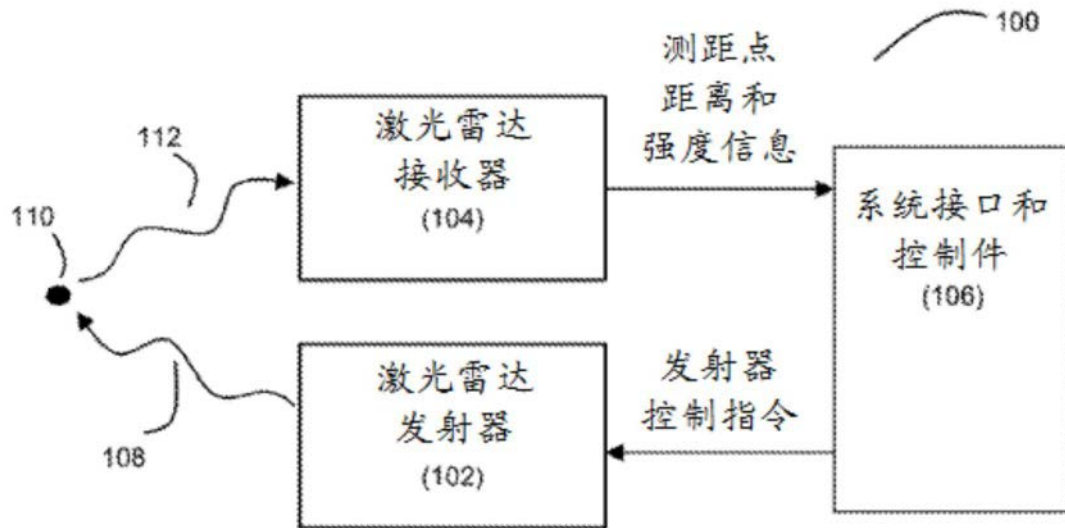


图1A

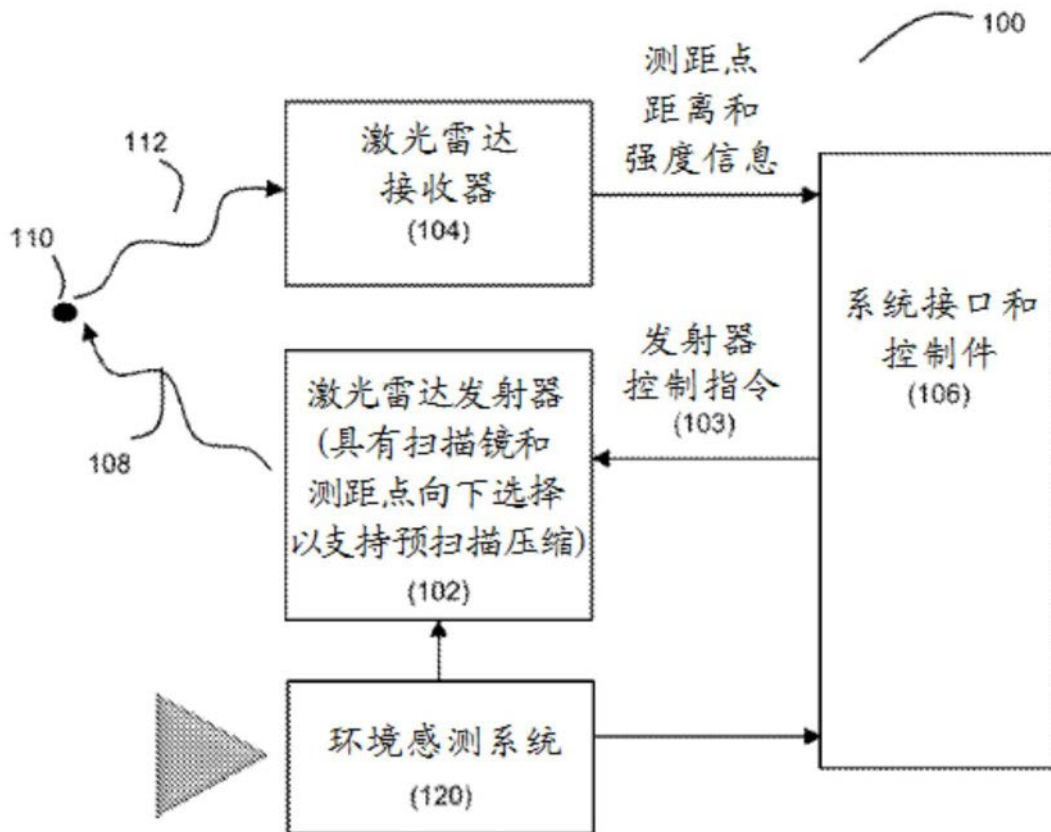


图1B

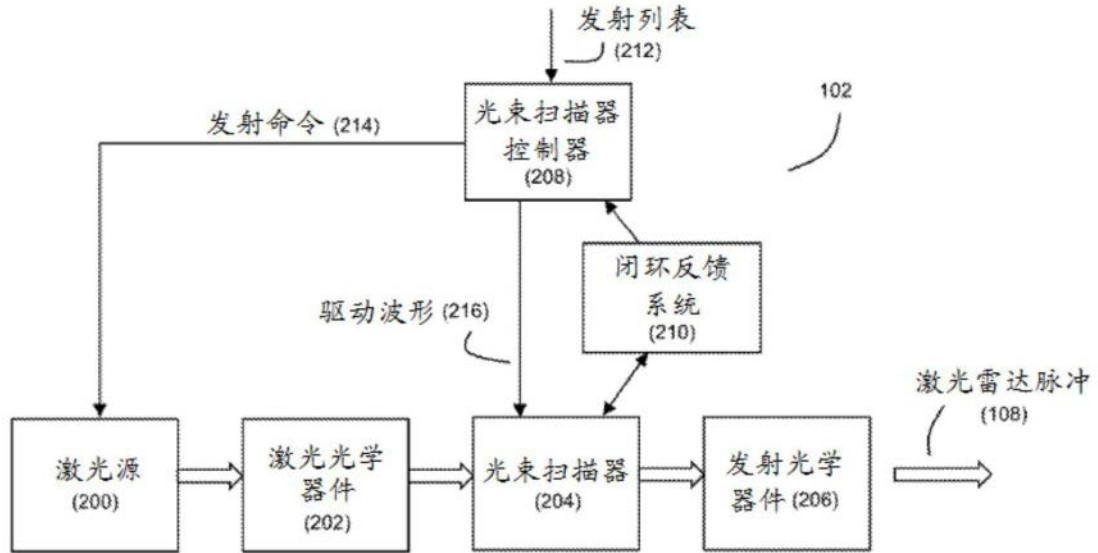


图2A

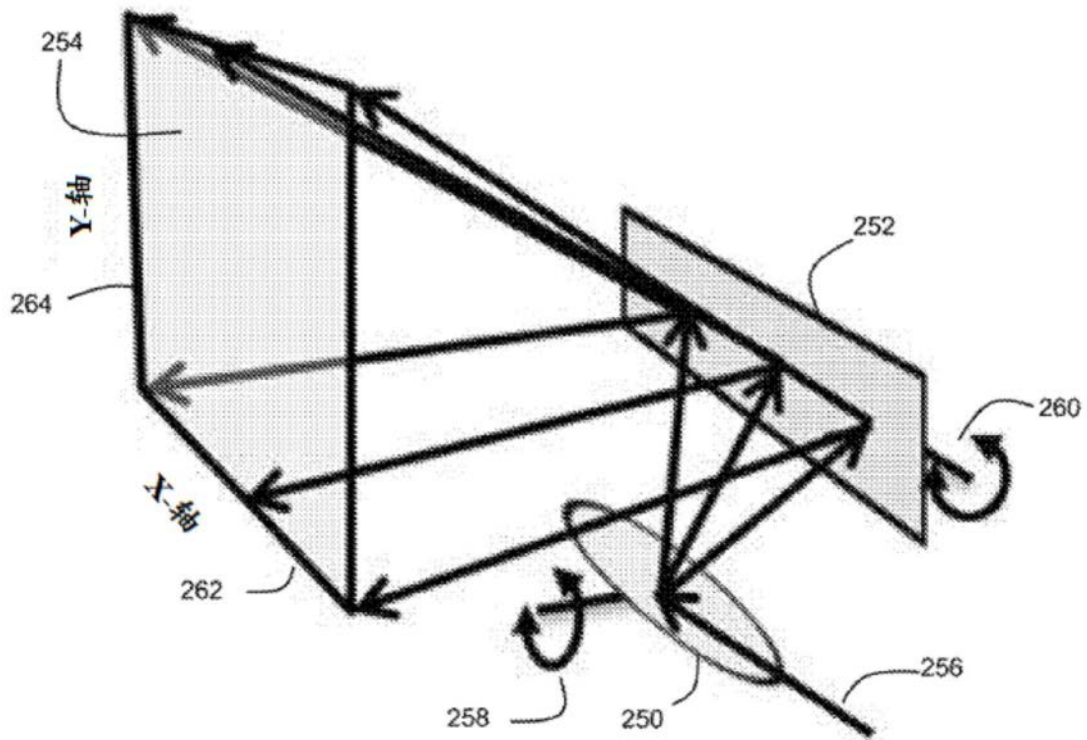


图2B

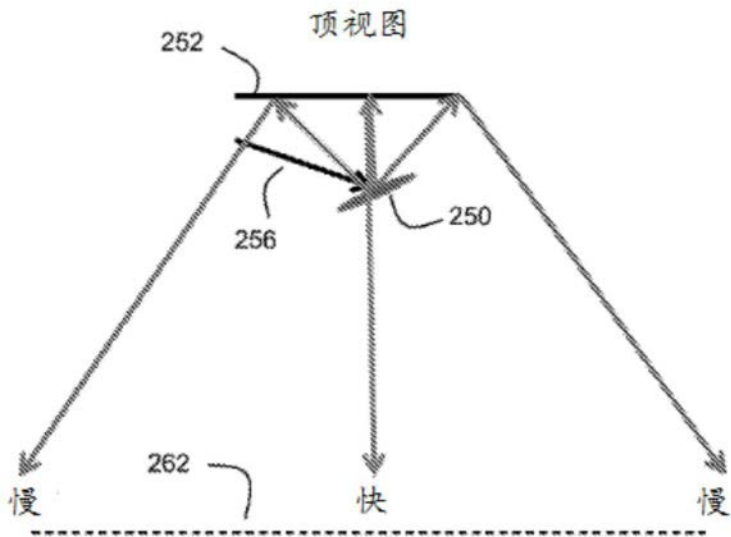


图2C

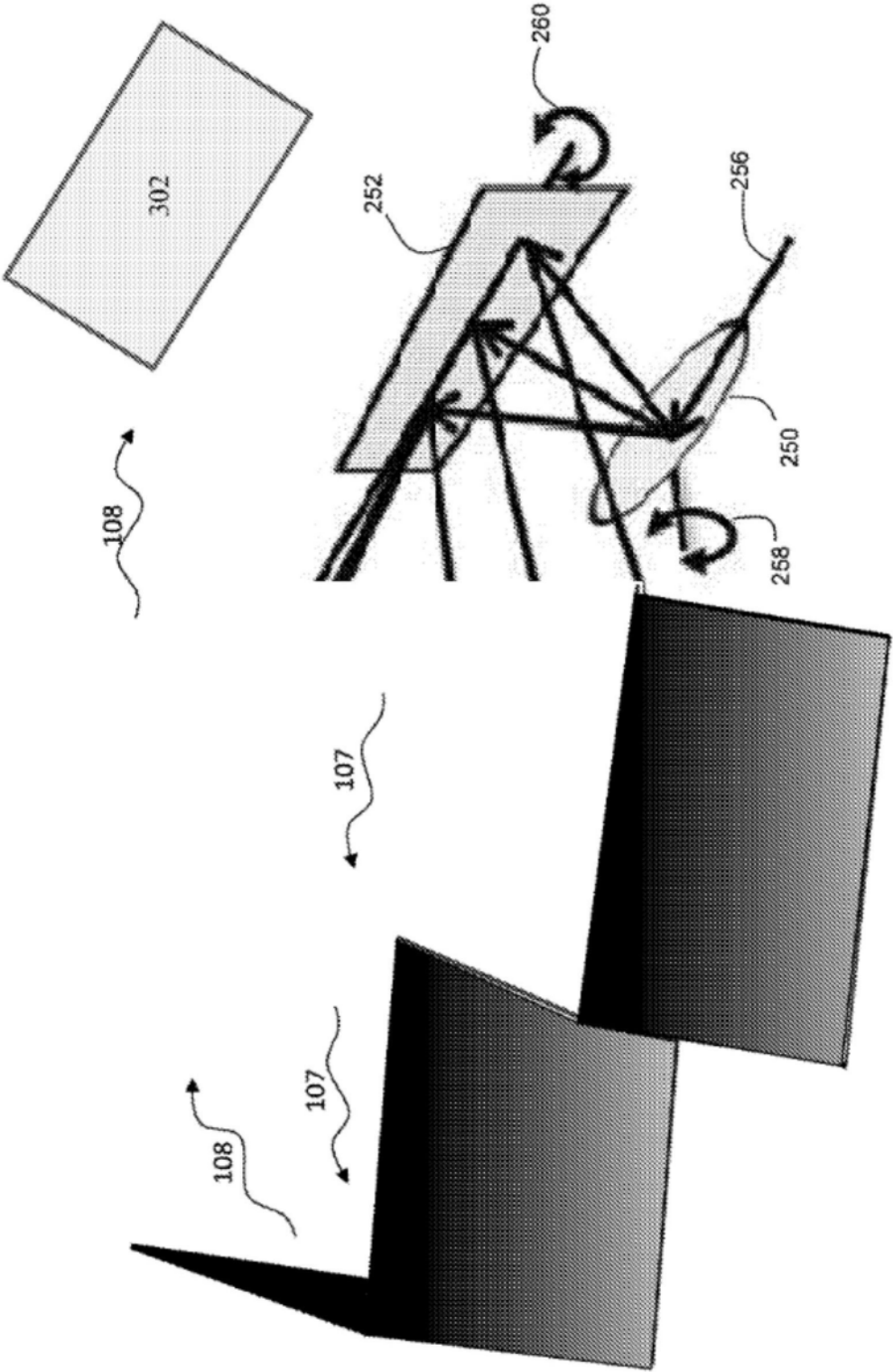


图3

具有分离器/反转器的顶视图

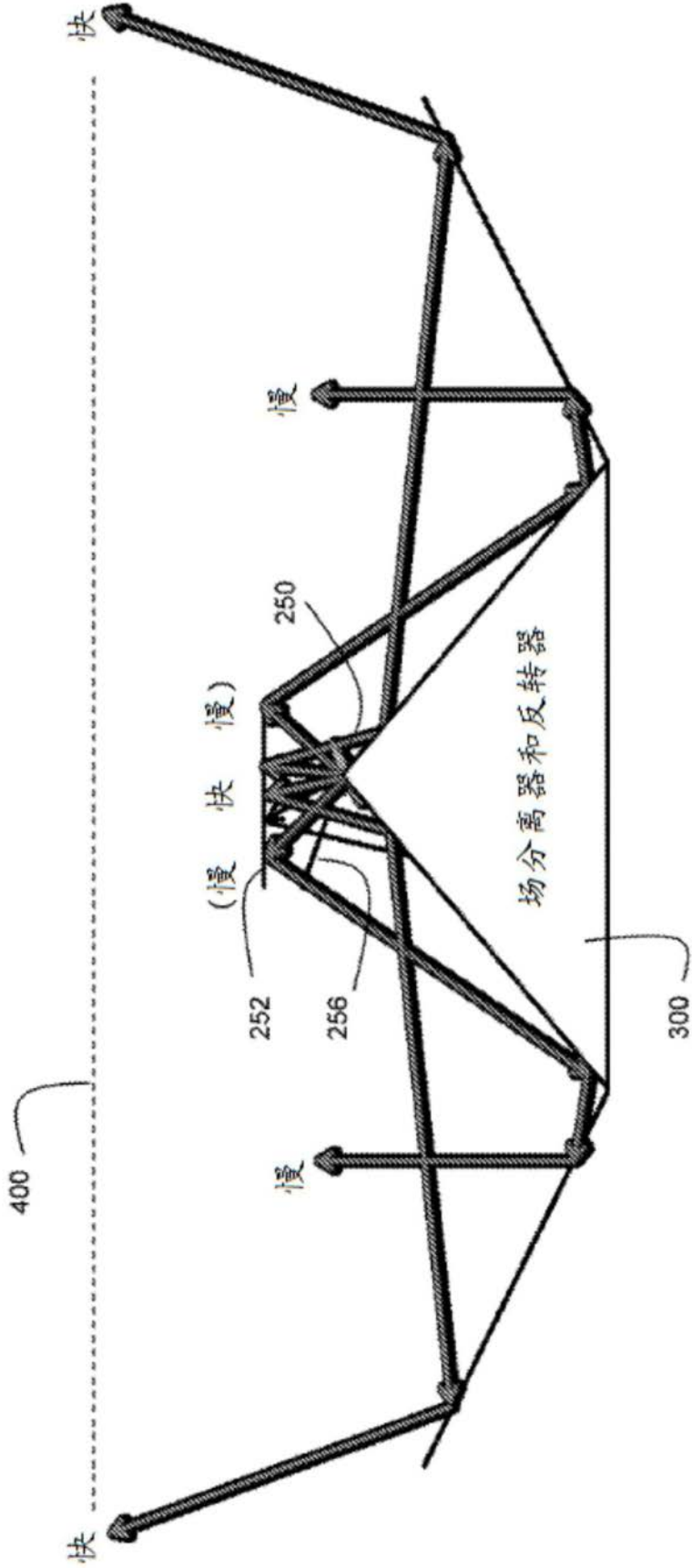


图4

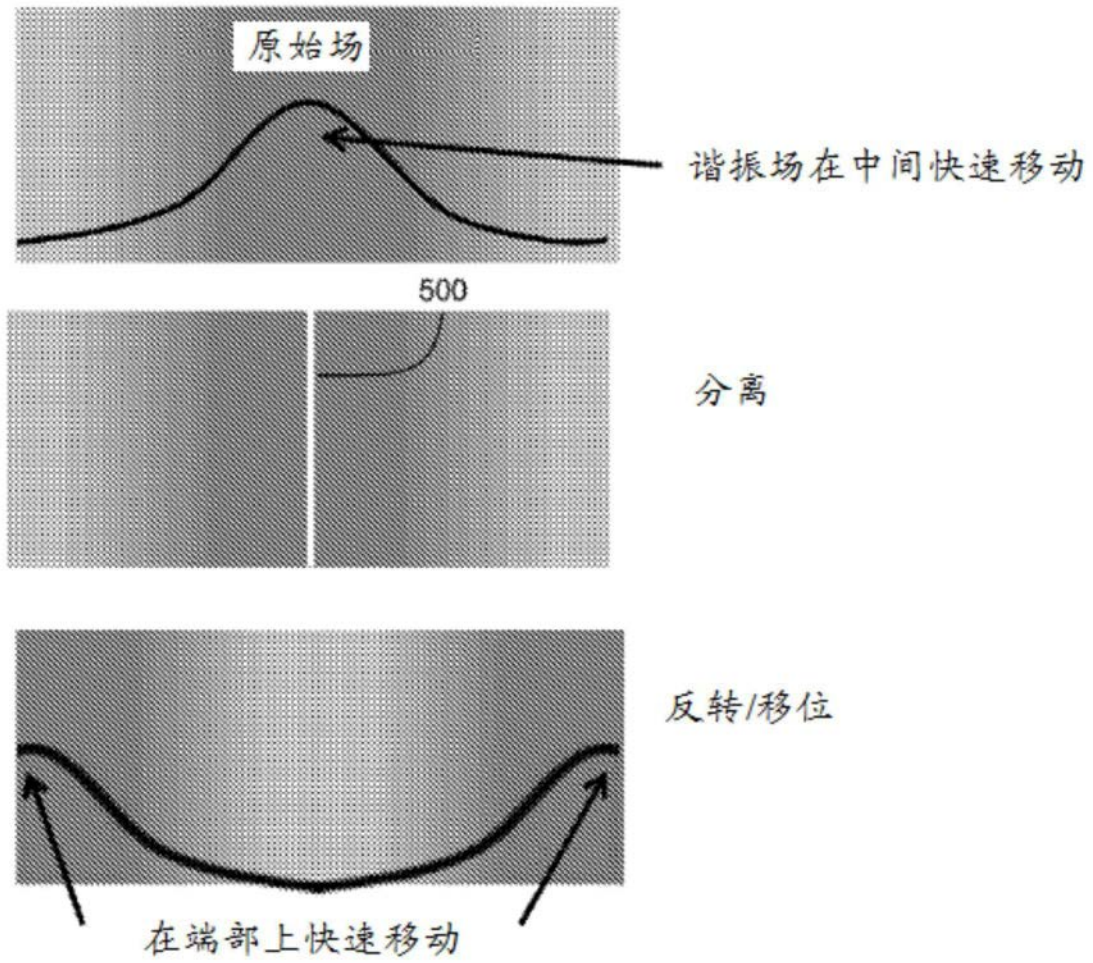


图5

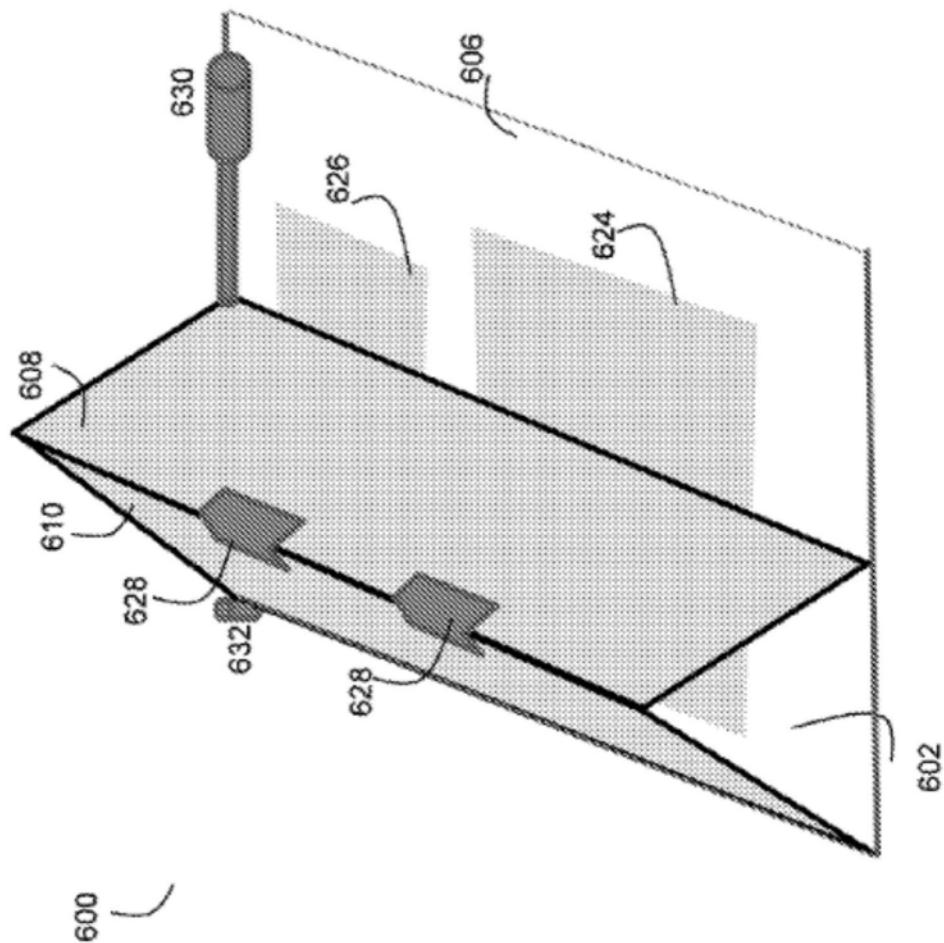


图6D

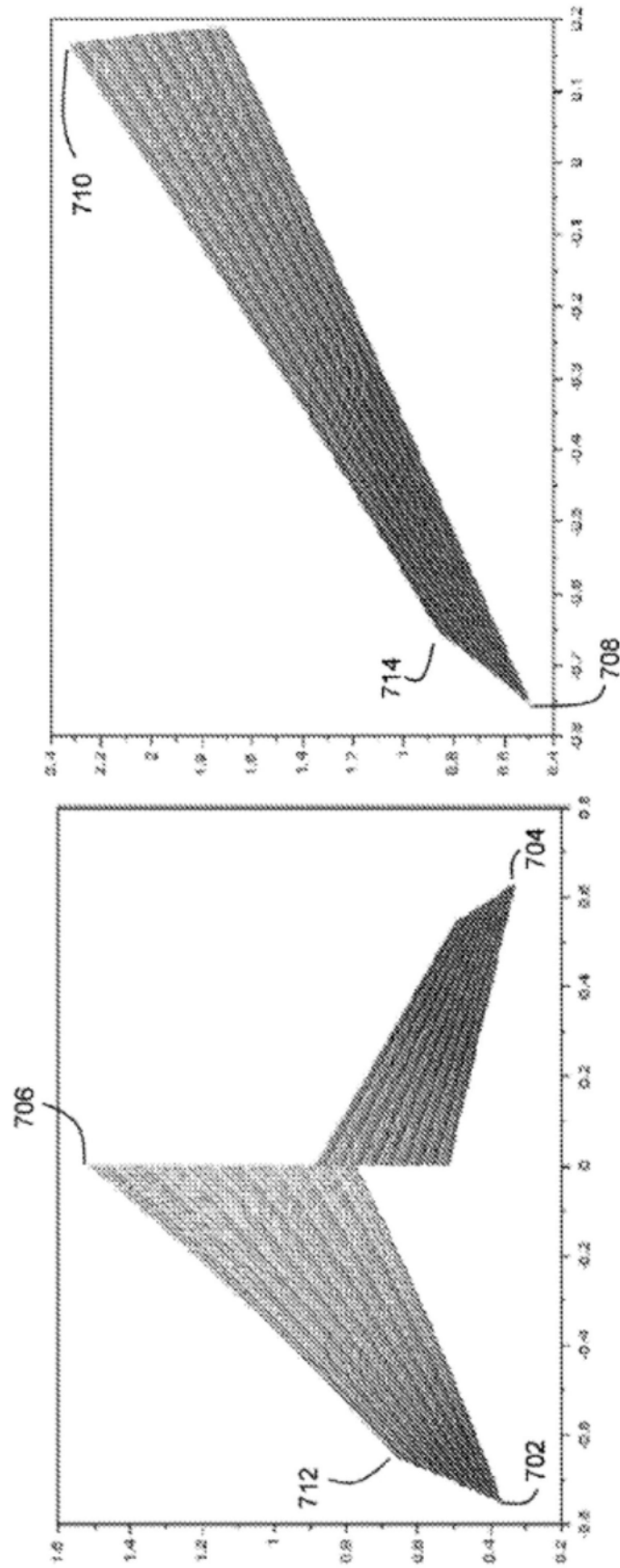


图7

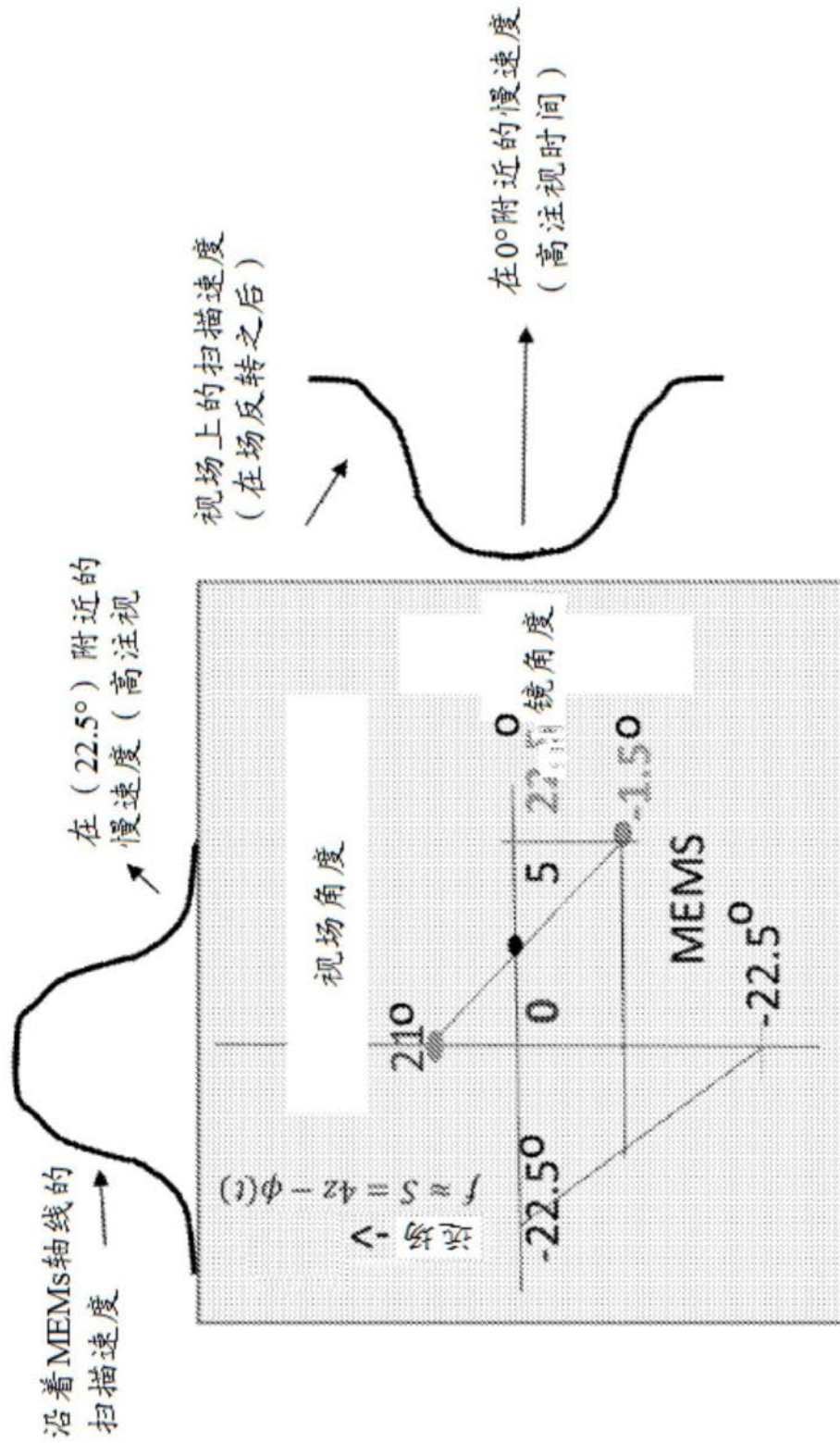


图8

光学器件	% 3度中心线
标准	1%
场反转	11%
重叠的反转	13%

图9

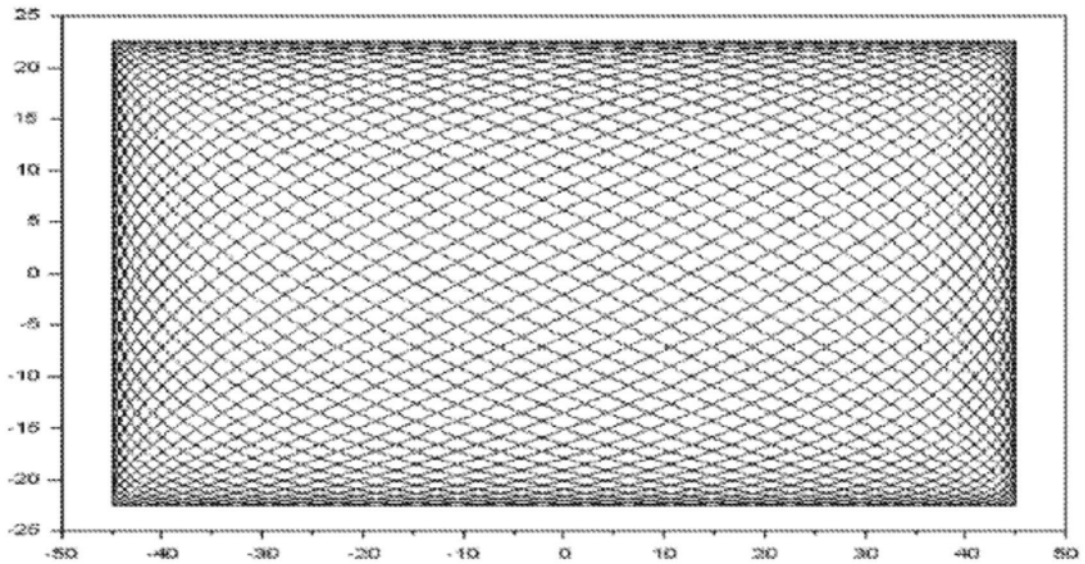


图10A

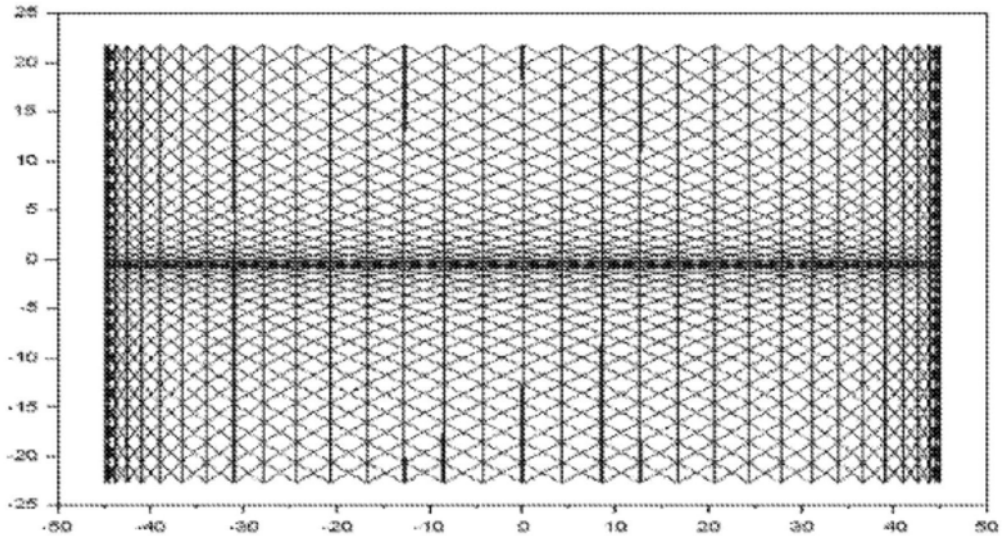


图10B

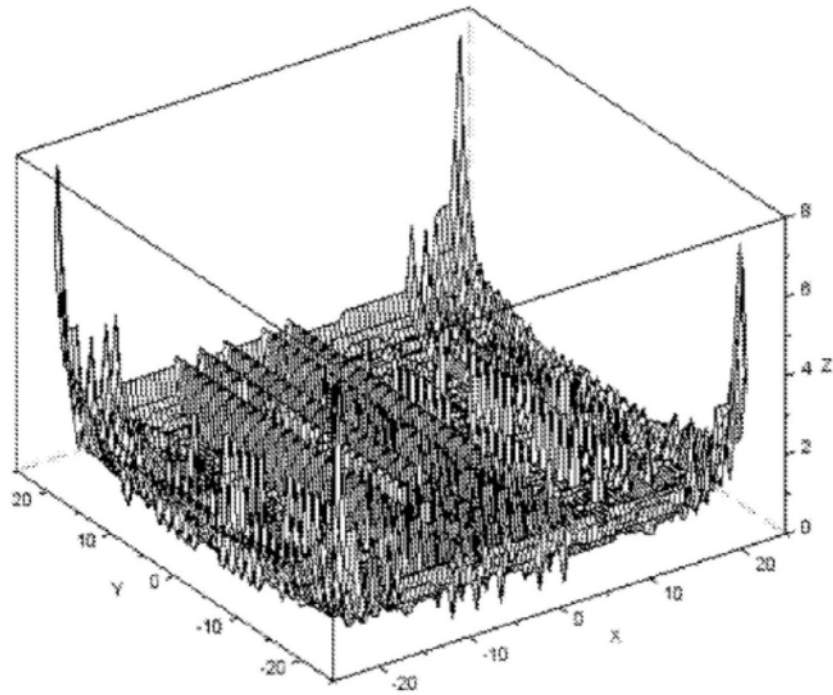


图10C

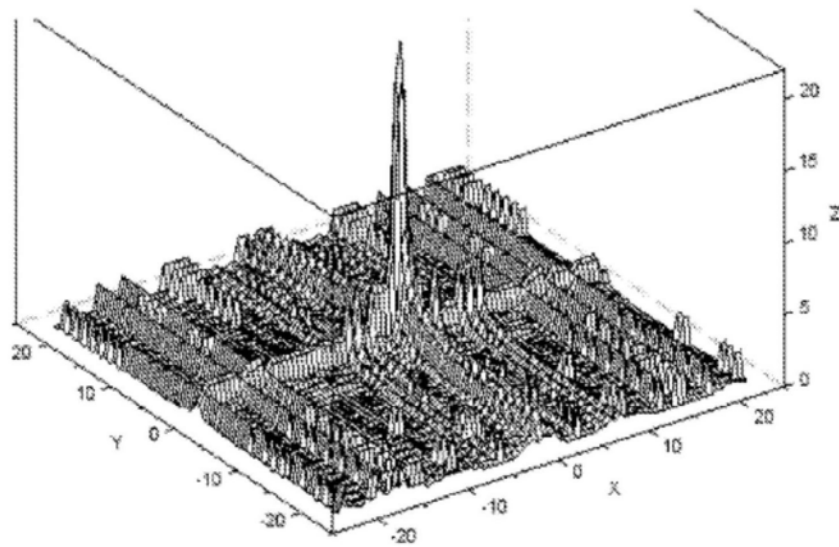


图10D

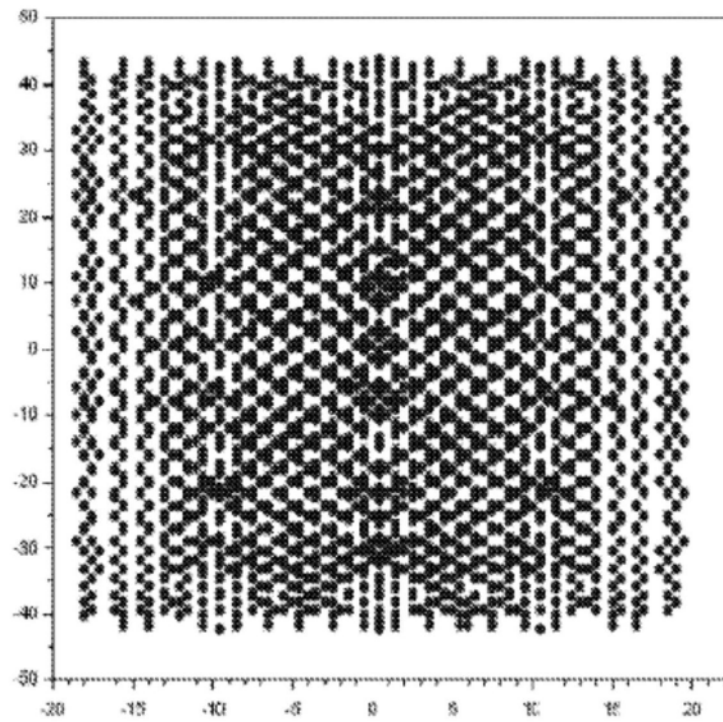


图11A

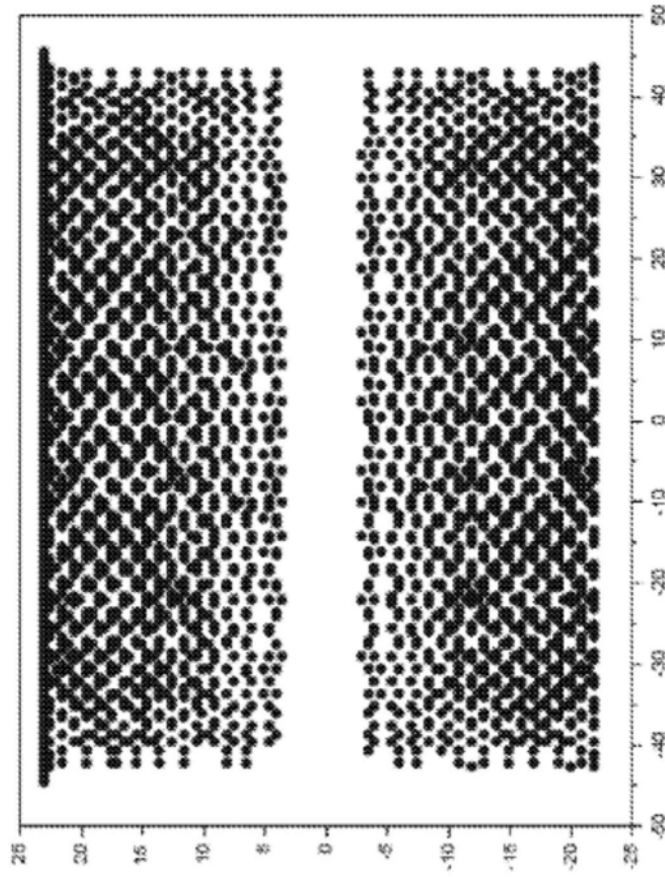


图11B

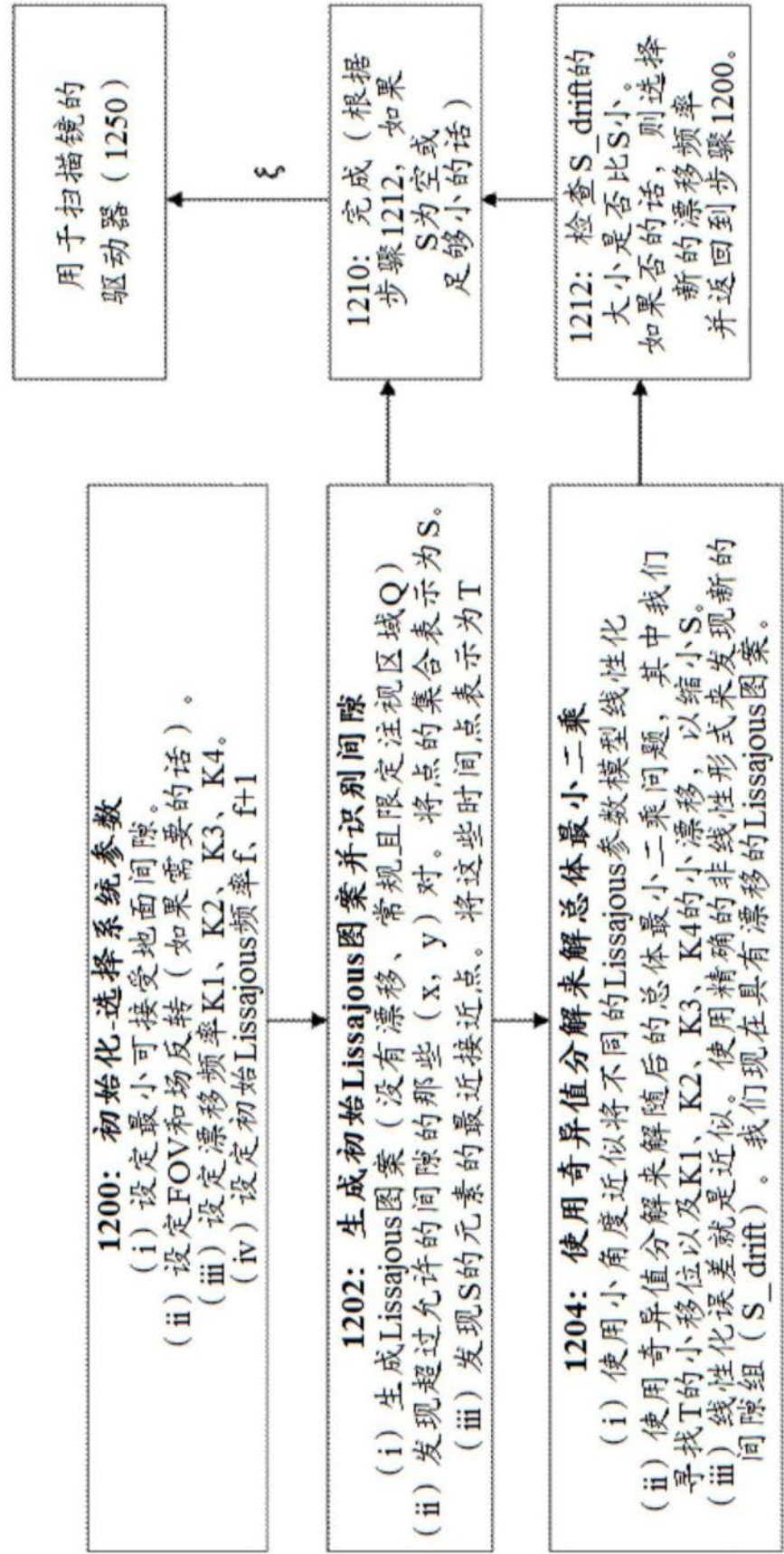


图12

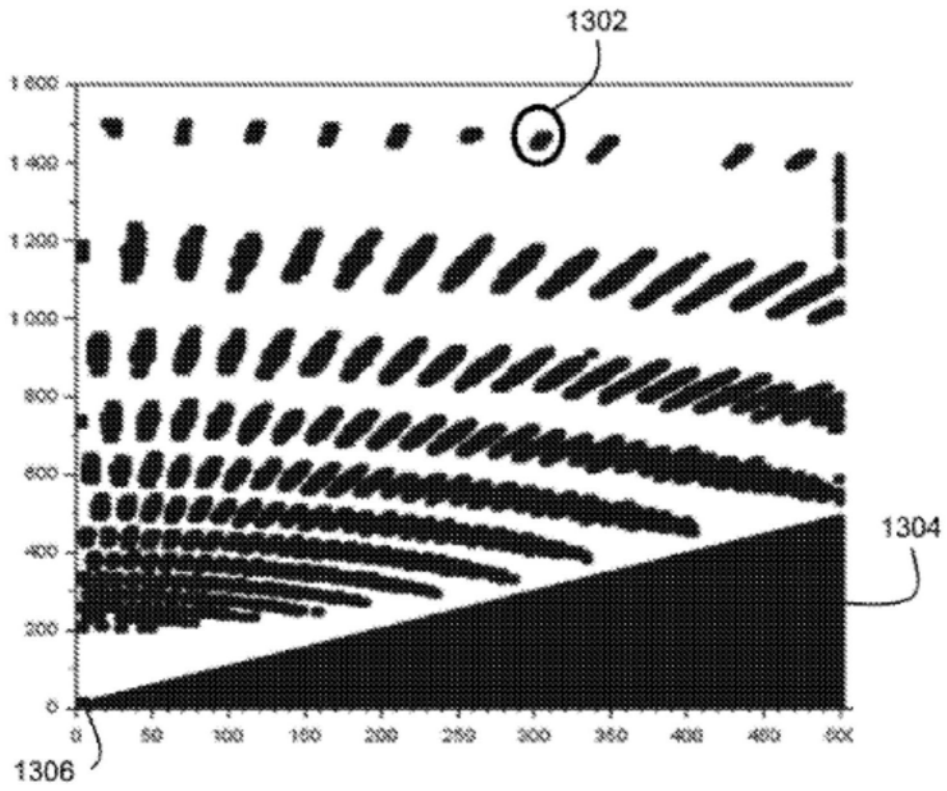


图13A

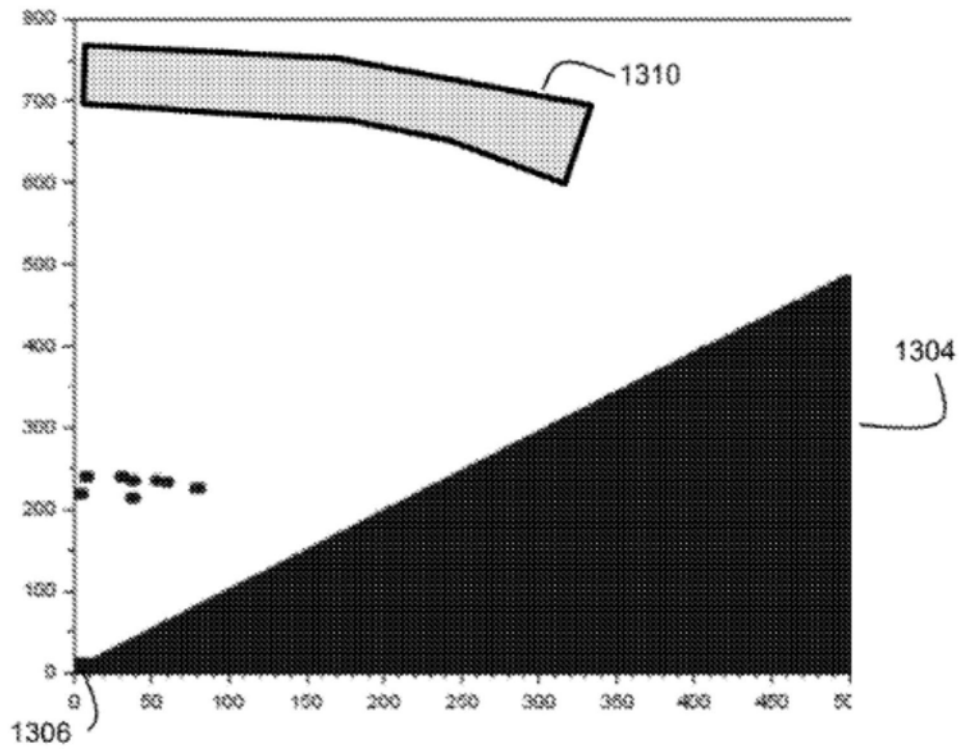


图13B

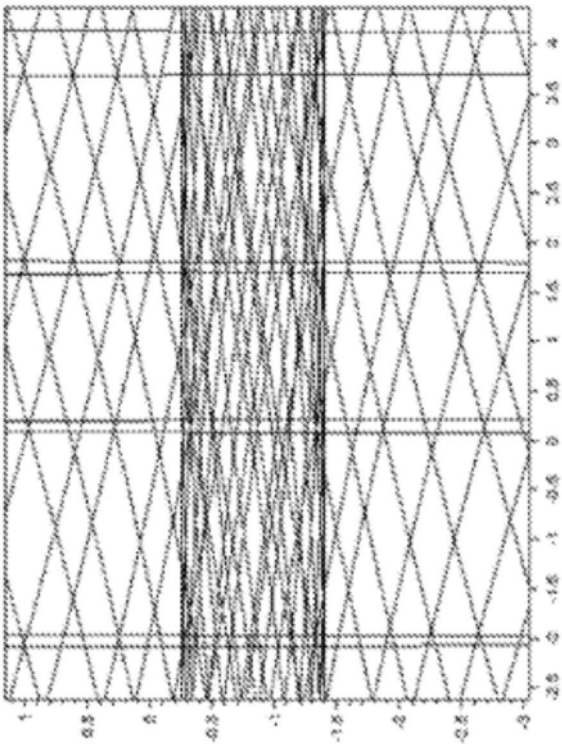


图14A

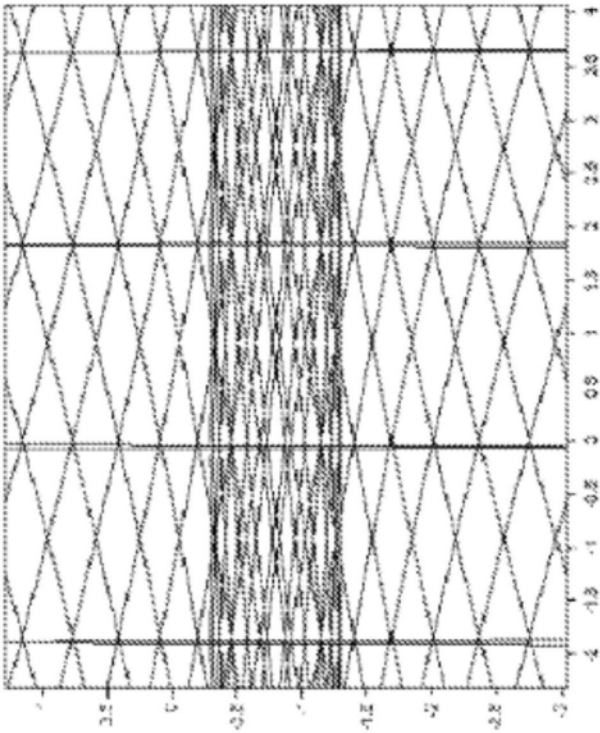


图14B

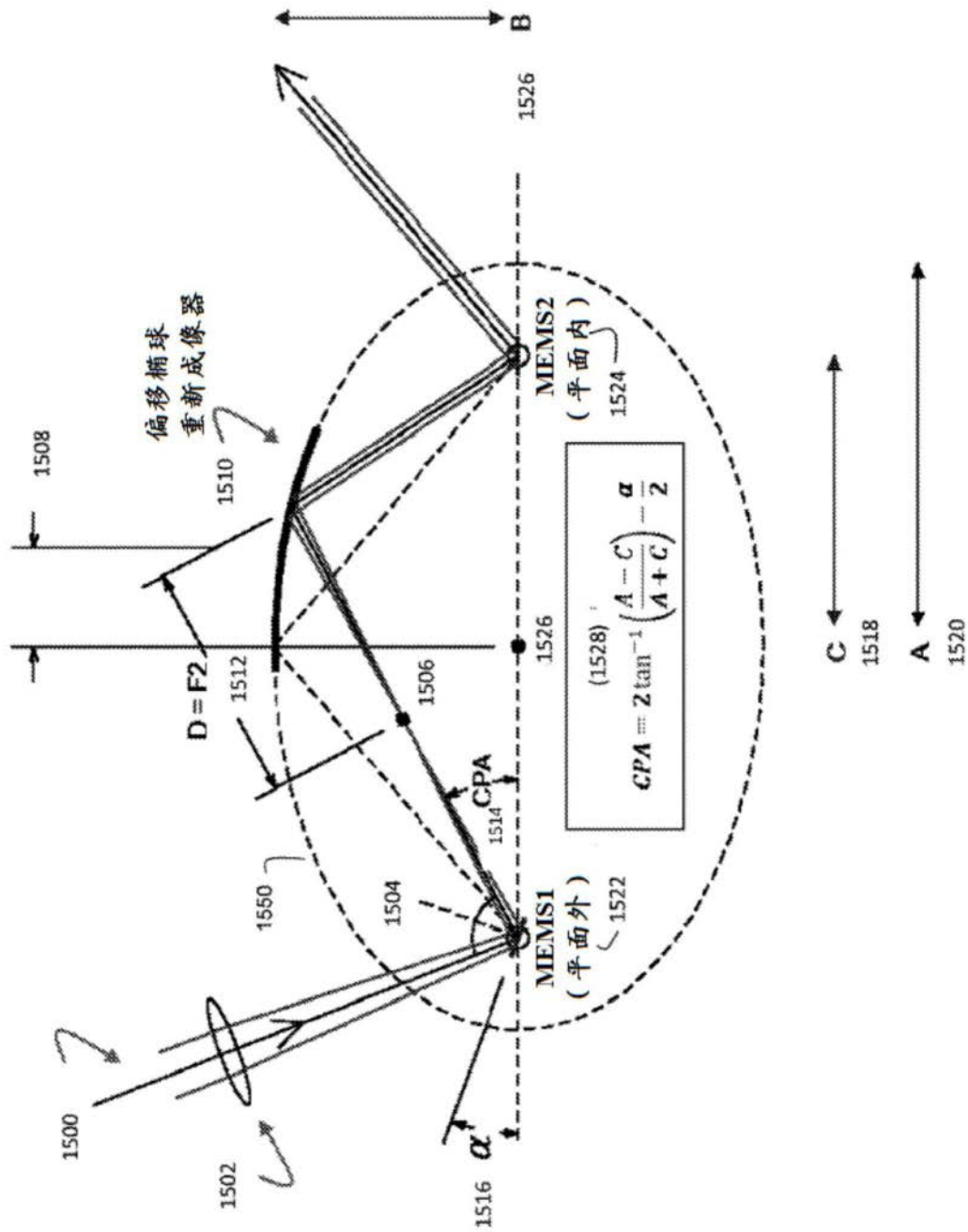


图15

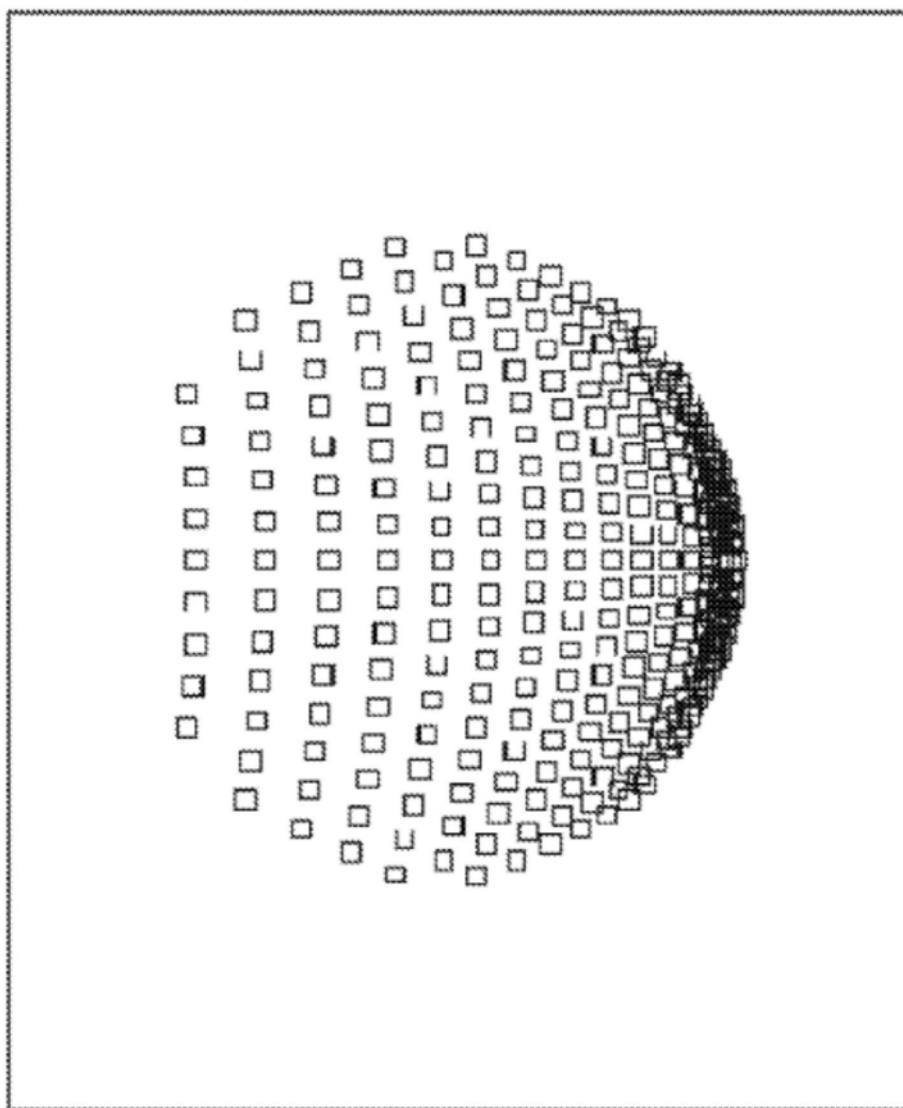


图16

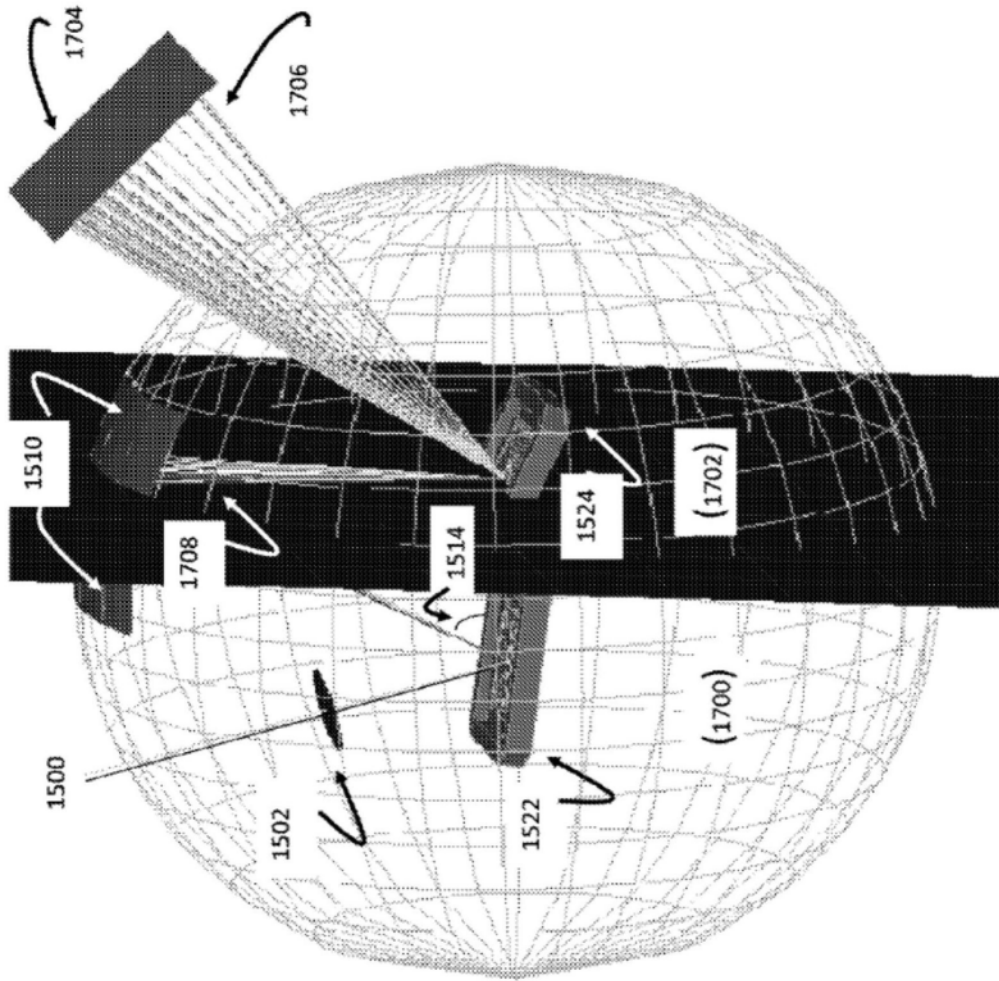


图17

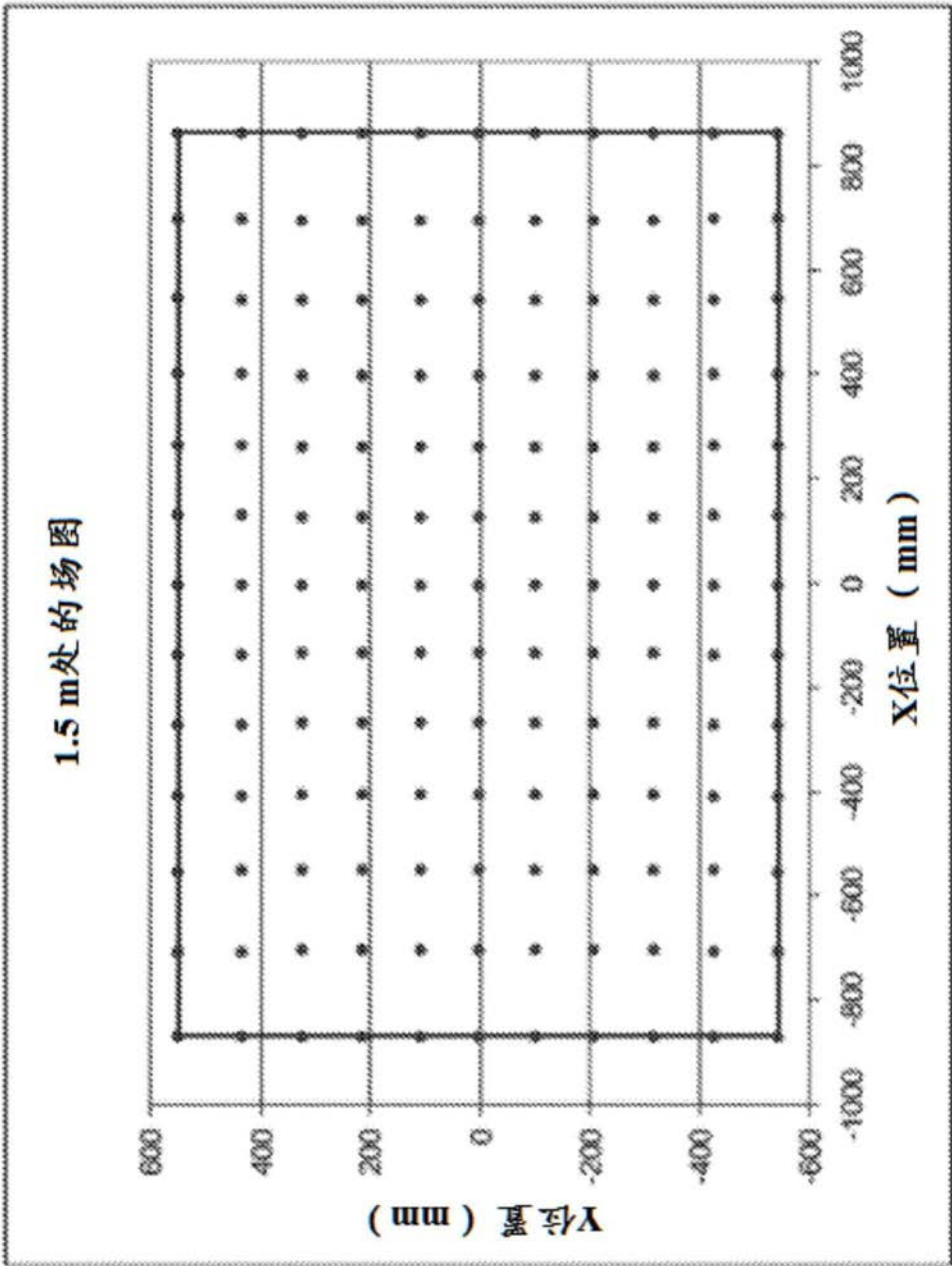


图18

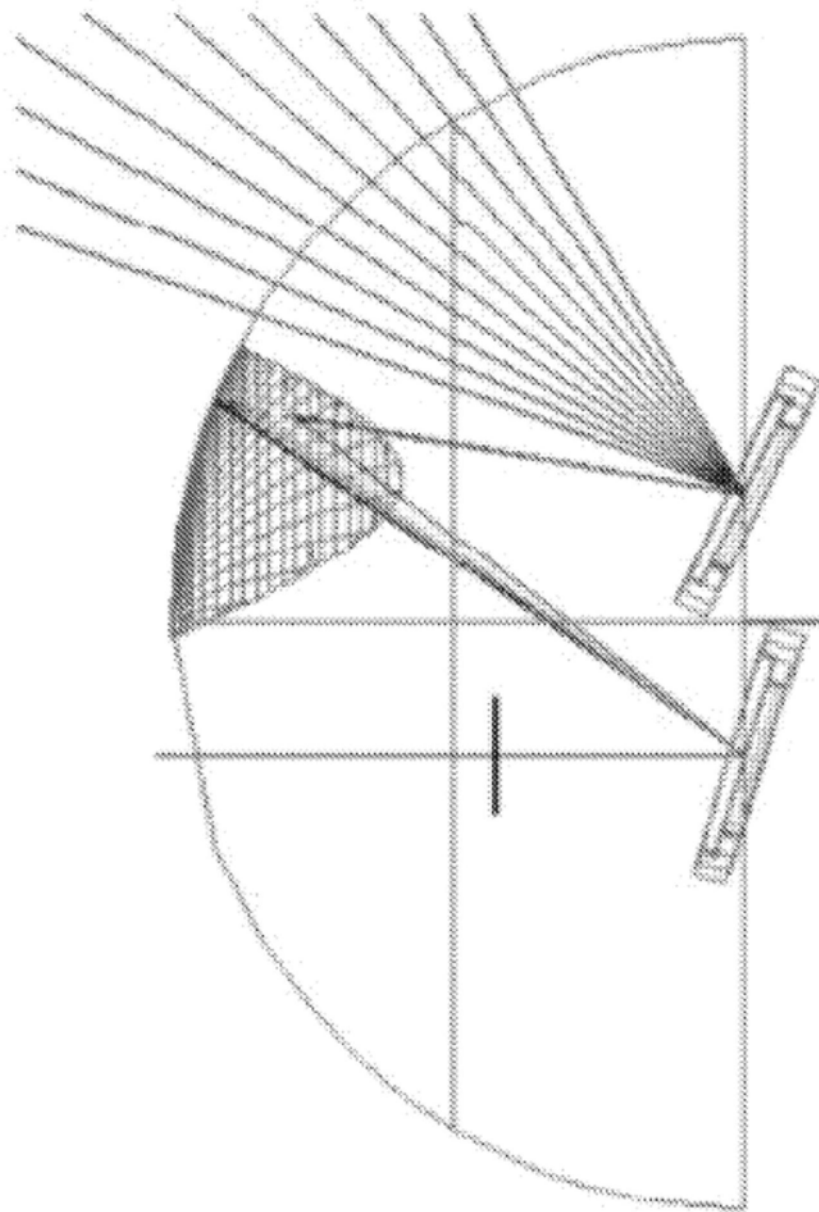


图19

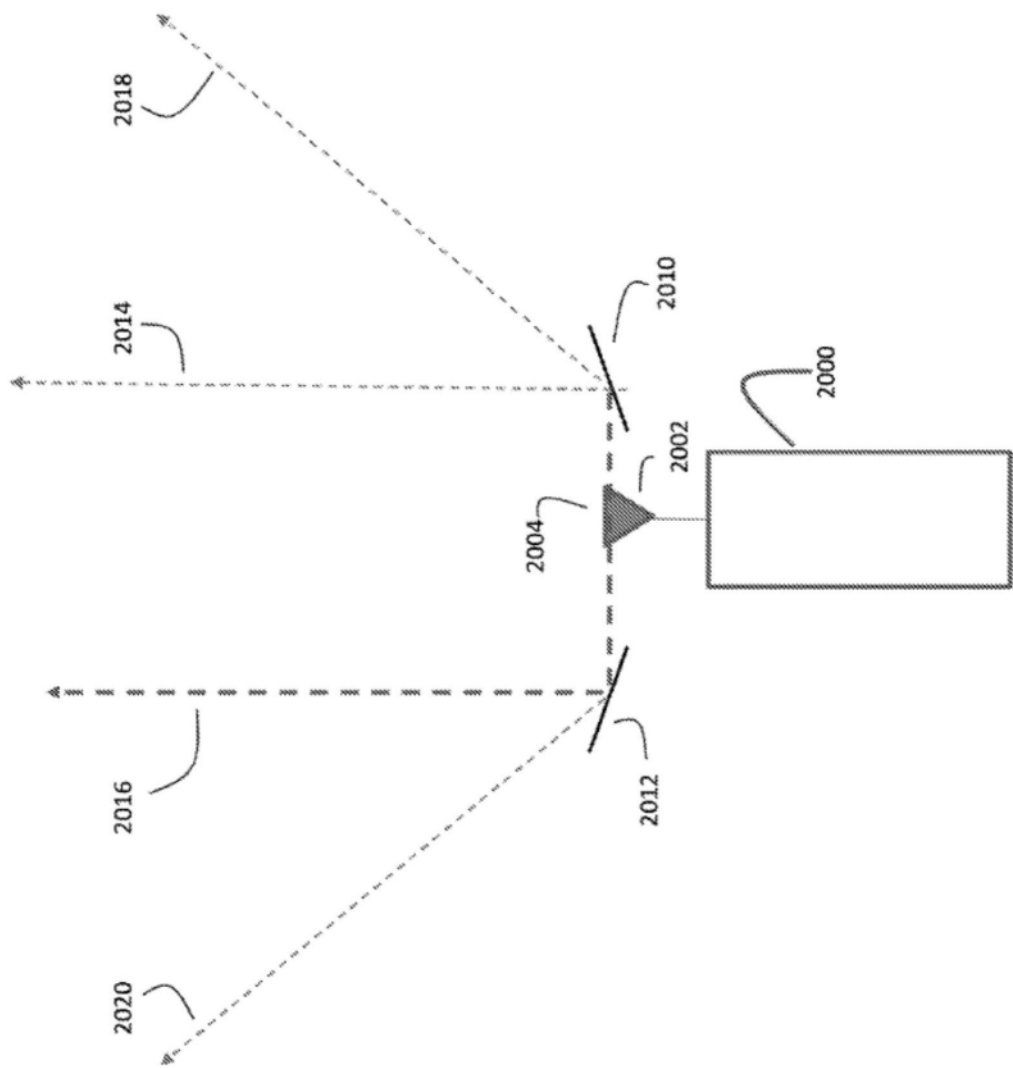


图20