



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114207474 A

(43) 申请公布日 2022. 03. 18

(21) 申请号 202080055900.X

(74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所  
11256

(22) 申请日 2020.06.05

代理人 韩雪峰

(30) 优先权数据

16/528,472 2019.07.31 US

(51) Int.Cl.

G01S 17/894 (2020.01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

G01S 17/36 (2006.01)

2022.02.07

G01S 17/32 (2020.01)

(86) PCT国际申请的申请数据

G01S 7/4915 (2020.01)

PCT/US2020/036225 2020.06.05

G01S 7/4914 (2020.01)

(87) PCT国际申请的公布数据

W02021/021286 EN 2021.02.04

(71) 申请人 微软技术许可有限责任公司

地址 美国华盛顿州

(72) 发明人 许展平

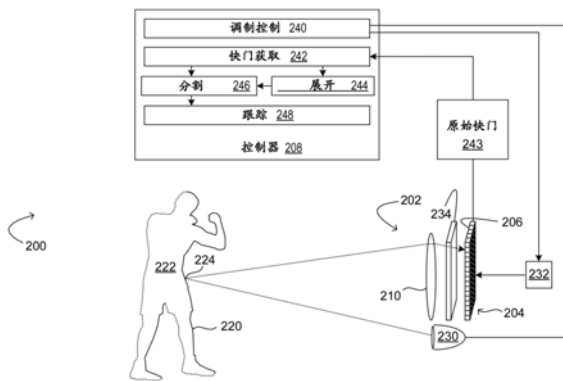
权利要求书2页 说明书13页 附图13页

(54) 发明名称

飞行时间调制光的展开相位

(57) 摘要

针对飞行时间相机的自适应相位展开。利用具有两个或更多个频率的调制光照射场景,该两个或更多个频率不具有公共整数分母。在传感器阵列处接收从场景内的对象反射的调制光。然后在复域中处理和加权所接收的调制光,以确定针对两个或更多个频率的调制光中的每个调制光的展开相位。



1. 一种飞行时间相机,包括:

调制光发射器,被配置为利用具有两个或更多个频率的调制光照射场景,所述两个或更多个频率不具有公共整数分母;

传感器阵列,被配置为接收从所述场景内的对象反射的所述调制光;

控制器,被配置为:

处理所接收的所述调制光以确定针对每个频率的调制光的包裹相位向量;以及确定针对所述两个或更多个频率的调制光中每个调制光的展开相位。

2. 根据权利要求1所述的飞行时间相机,其中所述控制器还被配置为:

将所述包裹相位向量转换为复域中的相位标量;以及

基于所述相位标量确定所述复域中的展开相位。

3. 根据权利要求2所述的飞行时间相机,其中所述相位标量用单个未知整数M表示,其中M是针对给定频率的调制光的 $2\pi$ 模的包裹周期数。

4. 根据权利要求3所述的飞行时间相机,其中所述控制器还被配置为:

在所确定的最大展开距离内确定所述包裹相位向量的 $M_{\max}$ 的值;以及

基于生成针对 $U_m$ 的值的极值的值,来确定M的值使得 $0 \leq M \leq M_{\max}$ ,其中

$$U_M = \sum_m \frac{N_k}{2} [AB_m \cdot [\cos \left( 2\pi f_m \left( \frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} - t_{d,m} \right) \right) - 1]] = 0$$

并且其中 $N_k$ 是在每个频率处的总相移步长, $AB_m$ 是在每个频率 $f_m$ 处的有效亮度,并且 $t_{d,m}$ 是在每个频率 $f_m$ 处的包裹飞行时间。

5. 根据权利要求4所述的飞行时间相机,其中针对一频率的调制光的展开相位至少基于生成针对所述 $U_m$ 的值的极值的所述M的值来确定。

6. 根据权利要求2所述的飞行时间相机,其中所述控制器还被配置为:

在所述复域中使用数字滤波器从所述相位向量中过滤高斯噪声。

7. 根据权利要求1所述的飞行时间相机,其中所述控制器还被配置为:

基于所述所接收的调制光的有效亮度对系统鲁棒性进行加权。

8. 一种飞行时间相机的方法,包括:

用三个或更多个频率的调制光照射场景;

在传感器阵列处,接收从所述场景内的对象反射的所述调制光;

处理所接收的所述调制光以确定针对每个频率的调制光的包裹相位向量;

将所述相位向量转换为复域中的相位标量;以及

基于所述相位标量确定所述复域中的展开相位。

9. 根据权利要求8所述的方法,其中所述相位标量用单个未知整数M表示,其中M是针对给定频率的调制光的 $2\pi$ 模的包裹周期数。

10. 根据权利要求9所述的方法,其中将所述相位向量转换为复域中的相位标量包括生成由复值 $R(m) = \sum_k [V_{m,k} \cos(\psi_k)]$ 和 $I(m) = \sum_k [V_{m,k} \sin(\psi_k)]$ 在所述复域中统一约束的展开公式:

$$U_M = \sum_m [R(m) \cdot \cos(2\pi f_m T_d) - I(m) \cdot \sin(2\pi f_m T_d) - \frac{N_k}{2} AB_m] = 0$$

11. 根据权利要求9所述的方法,还包括:

基于 $U_M$ 的最小化确定M的值,使得 $0 \leq M \leq M_{\max}$ ,其中

$$U_M = \sum_m \frac{N_k}{2} [AB_m \cdot [\cos\left(2\pi f_m \left(\frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} - t_{d,m}\right)\right) - 1]] = 0$$

12. 根据权利要求8所述的方法,还包括:

在第一条件期间,用第一组三个或更多个频率的调制光照射所述场景;以及

在第二条件期间,用第二组三个或更多个频率的调制光照射所述场景,其中所述第二组中的至少一个频率不同于所述第一组中的任何频率。

13. 根据权利要求8所述的方法,其中所述三个或更多个频率的调制光基于优化过程来选择,所述优化过程包括:

确定第一发射频率的调制光;

确定针对所述场景的最大展开范围;

在所述最大展开范围上扫描所述三个或更多个频率的调制光的一个或多个附加频率;

将所接收的调制光的噪声电平调节到预定相位噪声标准偏差内;

确定针对每组频率的调制光的展开相位;以及

指示具有最高展开通过速率的频率组。

## 飞行时间调制光的展开相位

### 背景技术

[0001] 飞行时间 (ToF) 成像系统可以用于产生环境的深度图像,其中深度图像的每个像素表示到环境中的对应点的距离。到环境中的成像表面上的点的距离是基于由成像系统发出的光传播到该点并且然后返回到成像系统中的传感器阵列的时间间隔(即,ToF)的长度来确定的。光学ToF相机测量针对表面上的很多点的这个间隔,从而组装深度图像,其中针对深度图像中的每个像素的深度坐标与在该像素处所观察到的ToF成比例。

### 发明内容

[0002] 提供本“发明内容”以便以简化的形式介绍在下面的“具体实施方式”中进一步所描述的概念的选择。本“发明内容”不旨在确定所要求保护的的主题的关键特征或者基本特征,也不旨在用于限制所要求保护的的主题的范围。此外,所要求保护的的主题不限于解决在本公开的任何部分中所指出的任何或者所有缺点的实现。

[0003] 使用飞行时间相机,用具有两个或更多个频率的调制光照射场景,该两个或更多个频率不具有公共整数分母。在飞行时间相机的传感器阵列处接收从场景内的对象反射的调制光。然后,处理所接收的调制光以确定针对两个或更多个频率的调制光中的每个调制光的展开相位。

### 附图说明

[0004] 图1示出了具有嵌入式或者外围数码相机的示例电子设备的方面。

[0005] 图2示出了示例数码相机的方面。

[0006] 图3示出了用于经由飞行时间相机确定展开相位的示例方法。

[0007] 图4示出了用于基于噪声条件调节相位展开参数的示例方法。

[0008] 图5A示出了展开通过速率的示例图。

[0009] 图5B示出了图5A的示例图的缩放版本。

[0010] 图6A示出了针对噪声条件的直到16.67m的距离的相位展开的示例图。

[0011] 图6B示出了针对零噪声条件的图6A的示例相位展开的图。

[0012] 图6C示出了针对噪声条件的直到50m的距离的相位展开的示例图。

[0013] 图6D示出了针对零噪声条件的图6C的示例相位展开的图。

[0014] 图6E示出了图6C的示例图的截断版本。

[0015] 图6F示出了图6D的示例图的截断版本。

[0016] 图7示意性地示出了计算系统的非限制性实施例。

### 具体实施方式

[0017] 由于高速高分辨率光学传感器阵列的发展,光学飞行时间 (ToF) 成像已经成为主要的深度成像技术。“基于相位”的光学ToF成像是该技术的重要变体,其中深度是基于从对象反射回来的调制光的相位滞后来计算的。采用这种技术的设备越来越多地在工业和消费

应用中被发现,包括设备自动化应用、游戏和虚拟现实应用、生物识别和面部识别应用等。本公开涉及对ToF成像的改进,其使用具有没有公共整数分母的两个或更多个频率的调制光来实现多频成像。进而,这导致能够调节所使用的频率,从而改进深度测量、改进功耗和/或提供其他优势。

[0018] 图1示出了具有嵌入式或者外围数码相机(102A-D)的电子设备(100A-D)的四个不同示例的方面。设备100A是包括相机102A的智能电话。设备100B是包括网络相机102B的个人计算机。设备100C是包括外围3D相机102C的视频游戏系统。设备100D是包括3D相机102D的虚拟现实耳机。在这些和其他设备环境中,本文中所公开的校正方法可以适用于这些和其他类型的面向用户和/或面向世界的数码相机的输出。

[0019] 图2示出了在一个实现中包括数码相机202的示例成像环境200的方面。数码相机202包括:具有多个传感器元件206(例如,像素)的传感器阵列204、控制器208和物镜系统210。物镜系统210被配置为将摄影对象222的至少一个表面220的图像聚焦到传感器阵列204上。控制器208被配置为收集和来处理来自各种传感器元件206的数据,并且从而构造对象的数字图像。控制器208可以跨一个或多个计算设备来实现,计算设备的示例在本文中关于图7讨论。

[0020] 由控制器208构造的数字图像可以表示为数值数组,其中为一组像素 $(X, Y)_j$ 中的每个像素提供了值 $S_j$ 。数字图像的每个像素的X、Y位置被映射到传感器阵列204的相关联的传感器元件206,并且经由物镜系统210被映射到表面220的对应关联轨迹224。在一些实现中,将图像像素映射到传感器元件的映射可以是1:1映射,但也可以使用其他映射,诸如1:4、4:1等。在一些实现中,数码相机202可以被配置为获取对象222的数字图像的时间分辨序列——即视频。

[0021] 像素 $(X, Y)_j$ 的 $S_j$ 值的维度没有特别限制。在一些示例中, $S_j$ 可以是指定像素 $(X, Y)_j$ 的亮度的实数或者整数值标量。在其他示例中, $S_j$ 可以是指定像素 $(X, Y)_j$ 的颜色的实数或者整数值的向量——例如,使用红色、绿色和蓝色颜色通道的标量分量值。在其他示例中, $S_j$ 可以被预处理以包括复数值 $a + b\sqrt{-1}$ ,其中a和b是整数或者实数。如下文更详细描述,复数值 $S_j$ 可以被用于表示采用连续波(CW)调制和相位鉴别来解析径向距离的光学ToF相机的传感器元件的信号响应。这样的相机在本文中被称为“CW-ToF相机”。

[0022] 图2的数码相机202是CW-ToF相机,该CW-ToF相机被配置为解析到摄影对象222的表面220上的多个点j的径向距离Z。为了实施基于相位的ToF成像,CW-ToF相机202包括调制光发射器230和传感器阵列204,传感器阵列204具有模拟和/或数字调制的电子快门232。调制光发射器230可以被配置为发射具有由传感器元件206可检测的任何频率的电磁辐射。例如,调制光发射器230可以是红外和/或近红外发光二极管(LED)或者激光二极管(LD),并且传感器阵列可以是互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器元件206的高分辨率阵列。设置在物镜系统210和波长滤波器234后面,其中波长滤波器234可以是传感器外光学组件或者直接位于传感器204上的滤光层上,传感器阵列被配置为对来自调制光发射器230的光进行成像,该光从表面220反射并且返回到相机。其他光学ToF相机可以包括不同光学、光发射器和/或传感器阵列变体——例如,电荷耦合器件(CCD)传感器阵列或者微透镜物镜阵列。

[0023] 电子快门232可以是指受控电压信号,包括任何合适的调制波形,该信号具有可选

地同时施加到传感器阵列204的各种传感器元件206的某些电极结构的调节偏置。在一些示例中,接收具有偏置的受控电压信号的电极结构可以包括集电器,该集电器取决于偏置电压信号的电平而引起在传感器元件206内产生的光电子漂移到集电器并且经由到电压转换器的电流被测量为电流或者电压。在一些示例中,接收受控偏置电压信号的电极结构可以包括栅极,该栅极取决于偏置电压信号的电平而引起光电子向集电器或者到电压转换器的电流漂移。

[0024] CW-ToF相机202的控制器208包括调制控制引擎240,调制控制引擎240被配置为调制光发射器230并且同步地调制传感器阵列204的电子快门232。在一些示例中,光发射器230和电子快门232以一个或多个预定频率被调制,该预定频率具有预定角相位偏移 $\varphi'$ ,该预定角相位偏移 $\varphi'$ 控制电子快门调制相对于光发射器调制的延迟。在一些示例中,本文中所使用的“调制”是指正弦或者数字化准正弦波形和/或矩形波形的基本谐波,这简化了分析。然而,该特征并不是绝对必要的,因为可以替代为使用其他波形的调制。

[0025] 在一些实现中,传感器阵列204对反射光的分量成像,该分量使发射器调制滞后一系列预定相位偏移 $\varphi'$ 中的每个相位偏移。控制器208的快门获取引擎242被配置为询问传感器阵列204以从每个传感器元件206检索所得到的信号值 $S_j$ 。以这种方式捕获的一个数字图像被称为“原始快门”。原始快门243可以表示为具有为每个传感器元件206而提供的 $\varphi'$ 特定实际强度值 $S_j$ 并且与指定该特定传感器元件206在传感器阵列204中的位置的坐标 $(X, Y)_j$ 相关联的数值数组。通过捕获具有三个或更多个不同相位偏移 $\varphi'$ 的三个或更多个连续原始快门243,可以构造揭示被反射回每个传感器元件206的光的实际相位滞后 $\varphi$ 的“相位图像”。相位图像是具有为每个传感器元件 $j$ 而指定的 $\varphi'$ 并且与指定该特定传感器元件206在传感器阵列204中的位置的坐标 $(X, Y)_j$ 相关联的数值数组。在具有信号预处理的一些实现中,每个信号值 $S_j$ 是复数 $a + b\sqrt{-1}$ ,其中 $a$ 是与发射器调制同相的信号分量, $b$ 是使发射器调制滞后 $90^\circ$ 的信号分量。在这种情况下,复信号值 $S_j$ 与模量 $\|S_j\|$ 相关并且具有相位滞后 $\varphi$

$$[0026] \quad S_j = \|S_j\| e^{-i\varphi} \quad (\text{等式 } 1)$$

[0027] 在其中对象的相位无关反射率也受到关注的实现中,给定相位图像可以通过用其模量或者用其模量的平方代替每个复信号值 $S_j$ 来处理。这种图像在本文中被称作“有效亮度”图像。

[0028] 使用来自单相图像或者组件原始快门组的数据,可以有条件地估计深度相机与在每个传感器元件 $j$ 处成像的表面点之间的径向距离 $Z_j$ 。更具体地,可以使用下式求解深度

$$[0029] \quad (\varphi / 4 \pi) + (N / 2) = (Z_j f / c), \quad (\text{等式 } 2),$$

[0030] 其中 $c$ 是光速, $f$ 是调制频率, $N$ 是非负整数。

[0031] 当深度值 $Z_j$ 的整个范围不大于光在一个调制周期 $c / (2f)$ 中传播的距离的一半时,上述解决方案是唯一的,在这种情况下, $N$ 是常数。否则,解决方案是不确定的和周期性的。

特别地,在相同的相位滞后 $\varphi$ 下观察到深度相差 $c/(2f)$ 的任何整数倍的表面点。深度图像数据只能解析到这个程度——例如,来自单相图像或者对应原始快门三元组的数据——被称为“混叠”或“包裹”。

[0032] 为了解析大于 $c/(2f)$ 的范围内的深度,可以使用以不同调制频率所获取的原始快门来计算附加相位图像。在一些示例中,可以使用三个、四个、五个或更多个频率;在其他示例中,两个频率就足够了。来自所有原始快门的组合输入(例如,在三个频率的情况下为九个,在两个频率的情况下为六个)足以唯一地确定每个 $Z_j$ 。提供非周期性深度估计的同一对象和图像帧的冗余深度成像被称为“去混叠”或者“展开”;该功能在控制器208的展开引擎244中执行。展开的深度图像或者“径向距离图”可以表示为具有为每个像素而提供的径向距离值 $Z_j$ 并且与指定像素位置的坐标 $(X, Y)_j$ 相关联的数值数组。例如,调制控制引擎240可以同时地向移相器输出调制信号。针对每个调制频率 $f_m$ ,相移步长( $\geq 3$ )可以设置为 $2\pi$ 以内的相等距离。然后可以使用相移 $rf$ 信号来解调每个像素处的信号。

[0033] 在一些实现中,可以根据单层或者多层(即,分层)分类方案将展开的深度图像的像素分类为一个或多个片段。控制器208的分割引擎246可以被配置为制定分类。在一些示例中,像素可以被分类为前景或者背景。在一些示例中,分类为前景的像素可以进一步分类为人类对象。在一些示例中,分类为人类对象的像素可以进一步分类为“对象头部”、“对象手部”等。分类的数字图像可以表示为具有为每个像素而提供的信号值 $S_j$ 和类别值 $C_j$ 并且与指定像素位置的坐标 $(X, Y)_j$ 相关联的数值数组。

[0034] 可选地,在视频实现中,可以应用模型拟合以逐帧跟踪分类的深度图像片段的运动。在其中深度成像对象包括人的示例中,与手部相对应的分类的深度图像片段可以从对象的其余部分分割。在深度视频应用中,然后通过深度图像帧序列和/或适合运动学模型来跟踪手部片段。例如,所跟踪的手部片段可以用作虚拟现实视频游戏的输入或者作用于控制计算机的手势输入。跟踪可以在控制器208的跟踪引擎248中进行。自然地,本文中的方法扩展到可以对基于相位的CW-ToF相机的输出执行的各种其他分割和跟踪任务。

[0035] 使用单个较高无线电频率可以增加深度分辨率,但是这样做的无歧义性有限(例如,200MHz下的0.75m)。因此,通常应用多个较高无线电频率来扩展遵循相位展开技术的测量距离。可以使用不同调制频率的发射光来捕获同一环境的多个深度图,从而提高具有不同反射率和/或部分遮挡对象的环境的准确性。

[0036] 当前现有展开技术是在相位域(相位向量域)中执行的。这可能会导致很多限制。例如,多个频率的值被限制为与频率之间的公分母具有积分关系,(例如, $[153, 162, 198]/9 = [17, 18, 22]$ )以提供可重复的相位周期,其中所有频率在已知距离处周期性交叠。通常,基频相对较低,以设置展开距离,并且所应用的频率相对较高。如果没有共同整数,则频率仍然会相遇,但是这可能发生在无穷大或者其他一些无理数处。

[0037] 这使得构造经济的适应性强的ToF相机系统的灵活性较低,因为潜在频率配置的阵列限于常见的相关值。因此,可以提高功率效率的很多频率配置可能无法使用。随着频率数的增加,相位域展开过程会增加计算负担。例如,在应用查找表的方法中,只要频率数和配置发生变化,查找表的大小和参数就会发生变化。此外,系统鲁棒性可能无法自动适应,因为不同频率的相位域可能具有不同相位噪声大小。

[0038] 在本公开中呈现了用于在复域中进行相位展开的示例系统和方法,其中向量相位

展开被转换为标量相位展开过程。这种方法允许3DToF相机使用任何优化的频率组,而不受公共整数分母的限制,从而实现自适应系统功率效率。对于使用相同或者甚至更高频率数的情况,执行标量展开所需要的计算能力低于基于相位向量的方法。复域中的标量展开方法可以根据有效亮度进行加权,因此生成自动自适应的系统,因为系统会老化或者在每个频率遇到不平衡的相位噪声。这种展开方法可以使用相同的通用公式来处理任何数量的频率以及任何类型的频率组合,从而实现自适应的用户友好的ToF相机,该相机可以针对给定成像环境进行自我优化。虽然本公开集中于基于调制光的幅度连续波应用,诸如红外成像,但是本文中所公开的技术还可以适用于依赖于不同频率的波形的相位检测来确定距离的雷达和其他距离测量技术。

[0039] 图3示出了用于使用诸如数码相机202等飞行时间相机进行相位展开的示例方法300的流程图。在310处,方法300包括用具有没有公共整数分母的两个或更多个频率的调制光(例如,红外光)照射场景。该组两个或更多个频率可以包括整数频率和/或分数频率。例如,诸如调制控制器240等调制控制器可以被配置为生成射频调制信号。诸如调制光发射器230等调制光发射器可以被配置为从调制控制器接收射频调制信号并且用调制光照射场景。作为非限制性示例,各组示例频率(以MHz为单位)可以包括{151,167,197}、{160.123,168.456,198.789}、{96.9,102,114,141.3,2016}和{68,2,1225,148}。

[0040] 在320处,方法300包括在传感器阵列处接收从场景内的对象反射的调制光。传感器阵列可以包括多个传感器元件,其子集被调谐和/或过滤以接收一个或多个发射频率的红外光,如针对传感器阵列204所描述的。

[0041] 在330处,方法300包括处理所接收的红外光以确定每个频率的调制光的包裹相位向量。例如,对于在传感器阵列处接收的每个调制光频率,合成的捕获信号可以表示为:

$$[0042] \quad V_{m,k} = CM_m + AB_m \cdot \cos(\varphi_{d,m} + \psi_k), \text{ 其中 } k=1, 2, \dots, N_k \text{ 并且 } m=1, 2, \dots, N_m \text{ (等式3)}$$

[0043] 其中m是频率的数目,并且其中 $V_{m,k}$ 表示调制频率 $f_m$  ( $m \geq 2$ )的传感器电压输出(例如,捕获信号)。捕获强度可以是二维的并且具有与位置和距离相对应的索引(i, j)。 $CM_m$ 是调制频率 $f_m$ 的捕获的共模,其表示信号的DC分量。 $AB_m$ 是调制频率 $f_m$ 的有效亮度,其与相位信号有关并且由从调制光发射器发出的有效光贡献。这允许在下游等式中考虑不同频率的照射功率差异。 $\varphi_{d,m} = 2\pi f_m t_d$ 表示调制频率 $f_m$ 的飞行时间对应相位。 $\psi_k$ 表示 $2\pi$ 模内的等距相移步长( $k \geq 3$ )。在每个频率条件下,相移步长可以相同。 $N_k$ 表示每个频率的相移步长总数,其中假定它们在每个频率相同。 $N_m$ 表示由调制光发射器输出的频率的总数。

[0044] 虽然等式3不包括高次谐波,它可以用于展开所捕获的相位向量。等式3可以转换为正规等式及其伴随推导:

$$[0045] \quad E = \sum_{m,k} [V_{m,k} - CM_m - AB_m \cos(2\pi f_m t_d + \psi_k)]^2 \quad (\text{等式4})$$

$$[0046] \quad \frac{\partial E}{\partial CM_m} = 0 \quad (\text{等式4a})$$



$$[0047] \quad \frac{\partial E}{\partial t_d} = 0 \quad (\text{等式 4b})$$

$$[0048] \quad \frac{\partial E}{\partial AB_m} = 0 \quad (\text{等式 4c})$$

[0049] 正规等式应用最小二乘法,该方法使用复域中的数值滤波器从相位向量中有效地过滤高斯噪声。通过包括有效亮度,可以考虑跨不同频率的幅度调制。当幅度较低时,相位误差往往较大,从而包含较多相位噪声。考虑有效亮度允许对不同频率进行加权以减少对整个系统造成的误差。因此,当相位误差不平衡时,相位展开变得鲁棒。

[0050] 例如,可以基于针对每个特定频率 $f_m$ 求解等式4a、4b和4c来导出三个系统变量:

$$[0051] \quad CM_m = 1/N_k \sum_k (V_{m,k}) \quad (\text{等式 5a});$$

$$[0052] \quad \varphi_{d,m} = 2\pi f_m t_{dm} = \arctan \left( \frac{-I(m)}{R(m)} \right) \quad (\text{等式 5b});$$

$$[0053] \quad AB_m = 2/N_k \sqrt{I(m)^2 + R(m)^2}, \quad (\text{等式 5c})$$

[0054] 其中 $I(m) = \sum_k [V_{m,k} \sin(\psi_k)]$ ,并且表示复数值的虚部; $R(m) = \sum_k [V_{m,k} \cos(\psi_k)]$ ,并且表示复数值的实部; $\varphi_{d,m} = 2\pi f_m t_{dm}$ ,并且表示遵循等式5b中表示的反正切运算的 $2\pi$ 模中的包裹相位; $t_{dm}$ 表示每个频率 $f_m$ 的包裹飞行时间。

[0055] 在340处,方法300包括确定两个或更多个频率的调制光中的每个调制光的展开相位。如本文中所使用的,展开相位表示与调制光的飞行时间相对应的相位滞后。先前使用的相位展开方法是经由处理相位向量集 $\{\varphi_{d,m}\}$ 以找到真正的飞行时间来完成的。然而,如上所述,这些方法对于频率选择是不灵活的,并且随着所使用的频率数的增加在计算上越来越昂贵。因此,使用先前使用的方法优化频率组具有挑战性,导致非最佳相机操作,这可能是低能效的。

[0056] 因此,可选地,在350处,方法300包括将包裹相位向量转换为复域中的相位标量。例如,通过在所有频率 $f_m$ 一起的情况下进一步求解等式5c,可以生成由复值 $R(m)$ 和 $I(m)$ 在复域中统一约束的展开公式:

$$[0057] \quad U_M = \sum_m [R(m) \cdot \cos(2\pi f_m T_d) - I(m) \cdot \sin(2\pi f_m T_d) - \frac{N_k}{2} AB_m] = 0 \quad (\text{等式 6})$$

[0058] 其中 $T_d$ 表示与单个特定频率 $f_{m0}$ (例如,最高频率)相关的展开的飞行时间。将该值与等式5b中给出的包裹飞行时间一起考虑,得到以下关系:

$$[0059] \quad 2\pi f_{m0} T_d = 2\pi M + 2\pi f_{m0} t_{dm0} \quad (M=0, 1, 2, \dots, M_{\max}) \quad (\text{等式 6a})$$

将等式6a的关系代入等式6,得到:

$$U_M = \sum_m \left[ R(m) \cdot \cos \left( 2\pi f_m \left( \frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} \right) \right) - I(m) \cdot \sin \left( 2\pi f_m \left( \frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} \right) \right) - \frac{N_k}{2} AB_m \right] = 0 \quad (\text{等式 7})$$

[0060] 其中M是频率 $f_{m0}$ 的 $2\pi$ 模的包裹周期数。从等式4c的推导条件可以推断,如果整数M使等式7的函数 $U_M$ 达到极值(例如,最小值),则M值为重复数 $2\pi$ ,因此展开过程可以假定为正在解决。该公式产生相位标量,该相位标量用约束在复域中的单个未知整数(M)表示,从而将向量相位展开过程转换为标量相位展开过程。

[0061] 因此,可选地,在360处,方法300包括基于相位标量确定复域中的展开相位。例如,M的值可以基于最小化 $U_M$ 的值的值来确定,使得 $0 \leq M \leq M_{\max}$ 。例如,等式7可以使用等式5b和等式5c改写:

$$U_M = \sum_m \frac{N_k}{2} [AB_m \cdot [\cos\left(2\pi f_m \left(\frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} - t_{d,m}\right)\right) - 1]] = 0 \quad (\text{等式 8a})。$$

[0063] 等式8a可以被认为等价于等式6和等式7。常量 $\frac{N_k}{2}$ 可以被丢弃,但在这里保留以供完成。对于其中 $f_m = f_{m0}$ 的条件,展开相位表达式

$2\pi f_m \left(\frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} - t_{d,m}\right) = 2\pi M$  具有频率 $f_{m0}$ 的一项是多余的,并且可以消除,得到:

$$U_M = \sum_{m \neq m0} \frac{N_k}{2} [AB_m \cdot [\cos\left(2\pi f_m \left(\frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} - t_{d,m}\right)\right) - 1]] = 0 \quad (\text{等式 8b})。$$

[0065] 如果频率 $f_{m0}$ 的整数M满足等式8a或8b,则所有其他频率 $f_m$ 的展开相位可以表示为理想情况或者假定理想情况下的 $2\pi$ 的整数倍。在存在显著噪声的情况下,展开相位项可以用整数( $N_{0m}$ )和该整数的残差 $\Delta N_m$ 来表示,即:

$N_m = f_m \left(\frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} - t_{d,m}\right) = (N_{0m} + \Delta N_m)$  因此等式8b现在等价于:

$$U_M = \sum_{m \neq m0} \frac{N_k}{2} [AB_m \cdot [\cos(2\pi \Delta N_m) - 1]] = 0 \quad (\text{等式 8c})。$$

[0067] 其中 $2\pi \Delta N_m$ 是少量,因此 $\cos(2\pi \Delta N_m) \approx 1 - 0.5 \cdot (2\pi \Delta N_m)^2$ 。等式8c可以简化为:

$$U_M = \sum_{m \neq m0} \frac{N_k}{2} [AB_m \cdot [-0.5 \cdot (2\pi \Delta N_m)^2]] = 0 \quad (\text{等式 8d})。$$

[0069] 丢弃所有常数参数,得到:

$$U_M = \sum_{m \neq m0} [AB_m \cdot (\Delta N_m)^2] = 0 \quad (\text{等式 8e})。$$

[0071] 等式8e可以改写为:

$$[0072] \quad U_M = \sum_{m \neq m_0}^{m-1} \left[ \frac{AB_m}{AB_{m_0}} \cdot (\Delta N_m)^2 \right] = 0 \quad (\text{等式 8f}), \quad \text{使得等}$$

式8e或者等式8f可以使用即时测量的 $AB_m$ 或者先前测量的和求平均的比率 $\frac{AB_m}{AB_{m_0}}$ ，其对于

每个传感器元件可以是常数，而不管在理想情况下的信号强度如何。

[0073] 残差整数 $\Delta N_m$ 可以表示为具有以下关系的舍入运算:

$$[0074] \quad \Delta N_m = N_m - \text{round}(N_m) = f_m \left( \frac{M}{f_{m_0}} + t_{d,m_0} - t_{d,m} \right) - \text{round} \left[ f_m \left( \frac{M}{f_{m_0}} + t_{d,m_0} - t_{d,m} \right) \right] \quad (\text{等式 8g}).$$

[0075] 作为示例,从0到 $M_{\max}$ 计数的总整数等于特定频率 $f_{m_0}$ (例如,由系统使用的最高频率)的所设计的展开距离内的包裹 $2\pi$ 计数。展开过程可以通过以下示例概括:可以确定最高射频的无线电波长。例如,如果 $f_{m_0}=180\text{Mhz}$ ,则波长为1.6667m。可以为所确定的最大展开距离内的包裹相位向量确定 $M_{\max}$ 的值。例如,在15m的所设计的展开距离处,

$$M_{\max} = \frac{2 \times 15}{1.666\dots} = 18.00072, \quad \text{并且可以四舍五入为整数}18. M \text{可以在等式6e或者6f内}$$

设置为等于 $0, 1, 2, \dots, (M_{\max} - 1)$ , 例如 $0, 1, 2, \dots, 18$ , 以确定哪个 $M_0$ 值最小化 $U_m$ 。然后可以基于至少 $M$ 确定每个频率的调制光的展开相位。这产生用 $M_0$ 表示的所有展开相位 $\Psi_m$ 连同包裹相位 $\varphi_{d,m}$ , 如下:

$$[0076] \quad \Psi_m = 2\pi \cdot \text{round}(N_m) + \varphi_{d,m} = 2\pi \cdot \text{round} \left[ f_m \left( \frac{M_0}{f_{m_0}} + t_{d,m_0} - t_{d,m} \right) \right] + \varphi_{d,m}, \quad \text{其中} m=1, 2, 3, \dots, \quad (\text{等式9})$$

[0077] 方法300和伴随的公式因此使得能够使用多个频率,该频率不受频率之间具有公分母的积分关系的限制,从而生成可以允许保持经济的可切换的适应性强的ToF相机系统的灵活性。方法300允许3D ToF系统使用被确定为在环境范围内以降低功耗实现准确的深度测量的任何频率配置。可以基于展开距离来选择频率组合,以提高功率效率、减少与深度抖动相关的噪声等。作为示例,在第一条件期间,场景可以用第一组三个或更多个频率的调制光照射。在第二条件期间,场景可以用第二组三个或更多个频率的调制光照射,其中第二组的至少一个频率不同于第一组中的任何频率。

[0078] 这种展开方法将多维相位向量映射到仅具有一个未知整数(M)的标量,从而在调制光的频率数增加时减少计算负担。此外,系统鲁棒性可以由所接收的调制光的系统有效亮度 $AB_m$ 自动调节或者加权。等式8揭示了在高于阈值的高斯噪声条件下的鲁棒的展开结果。可以修改等式6-8f的一些变体,例如:

$$[0079] \quad U_M = \sum_{m \neq m_0}^{m-1} [AB_m \cdot \text{abs}(\Delta N_m)] = 0 \quad (\text{等式 } 10)。$$

[0080] 等式10可以有效地确定展开相位,但未针对显著的高斯噪声条件进行优化。因此,当相位噪声超过阈值时,展开结果可能不准确。这可以描述为噪声条件下的展开失败概率或者展开通过速率,其定义为以下比率:

[0081]  $UR = [1 - (\text{完全展开距离下的展开故障计数} / \text{完全设计展开距离下的总展开计数})] \%$  (等式11)

[0082] 图4的方法400示出了用于基于噪声条件调节相位展开参数的示例方法。例如,采用三频系统  $\{f_1, f_2, f_3\}$  的ToF相机用于描述在给定噪声条件下提高展开通过速率的鲁棒优化工作。然而,应当理解,类似的方法可以应用于使用较小或者较大频率组的系统。

[0083] 在410处,方法400包括确定由光发射器输出的光的第一频率。例如,光的第一频率可以是由光发射器输出的光的最高频率。第一频率可以是任意的、预定的或者基于操作条件。例如,最高频率可以基于频率组中的其他较低频率的期望深度分辨率和/或期望范围。作为一个示例, $f_3$ 可以设置为198MHz,但也可以使用较高或者较低频率。

[0084] 在420处,方法400包括确定要成像的场景的最大展开范围。最大展开范围可以凭经验确定、估计、预定或者任意,和/或可以基于所确定的第一(例如,最高)频率。作为一个示例,展开距离L可以设置为16m,但是可以备选地使用较高或者较低距离。

[0085] 在430处,方法400包括在最大展开范围内扫描一个或多个其他频率。例如,如果确定了 $f_3$ ,则可以确定 $f_1$ 和 $f_2$ 的期望范围,并且在保持较高频率恒定的同时,针对每个较低频率以间隔分辨率进行ToF测量。例如, $f_1$ 和 $f_2$ 可以在50-189MHz范围内对两个频率进行扫描,尽管可以使用较大或者较小范围。 $f_1$ 和 $f_2$ 的范围不必相同或者甚至交叠。频率间隔分辨率可以是任何合适的值,例如1MHz。在一些示例中,可以预先确定最低频率,并且可以仅扫描中间频率。可用频率的上限可能受限于频率( $f$ )和ToF像素调制效率 $ME(f)$ 的乘积,例如, $f \cdot ME(f)$ 。然而,扫描的频率范围可以包括大于该上限的频率。如果设备、系统和/或环境的特性在未来发生改变,这可以使得以后能够选择最佳频率设置。

[0086] 在440处,方法400包括将每个捕获图像的噪声水平调节到预定相位噪声标准偏差内。给定噪声扰动,诸如应用于等式3的高斯噪声,噪声水平可以被均衡。例如,等式3中表示捕获的噪声水平可以调节以将相位噪声带入9.5度的标准偏差内,尽管可以使用任何合适的值。这可能会在完全展开范围L下产生如等式5b和5c所示的噪声仿真结果。

[0087] 在450处,方法400包括确定每组频率的调制光的展开相位。例如,展开可以基于等式8e和等式9在复域中执行。然后将每个结果与不考虑噪声扰动的结果进行比较。然后可以为每个频率组分配一个值,例如,使用等式9。例如,该值可以指示在彼此的360度内(+/-噪声)或者大于360度(+/-噪声)内是否有更多比较结果。

[0088] 在460处,方法400包括指示具有最高展开通过速率的频率组。例如,可以使用等式9绘制展开图,其中在固定 $f_3$ (例如,198MHz), $UR = RU(f_1, f_2)$ 。

[0089] 图5A是9.5度相位噪声条件下在每个相位噪声标准偏差下的展开通过速率的图500,按图右侧所示从50-100%缩放。从视觉上看,这种缩放分辨率可能太低而无法确定期望频率配置。

[0090] 图5B示出了图520,图520指示展开通过速率图500的一部分,为了频率选择的方便,该图从99-100%缩放。图上的所有可见点都具有较高展开概率或者通过速率,如等式9所示。

[0091] 对于使用多于3个频率的系统,展开频率的优化可以通过扫描所有频率来执行,在给定噪声条件下,迭代地从较低频率数开始到较高频率数,使用上述相同过程,尽管在2D图上可视化结果可能不可行。

[0092] 图6A和图6B-6C示出了两个示例,它们展示了3频和5频系统的展开结果,而没有在这些频率之间使用有理整数。

[0093] 图6A示出了图600,图600指示在 $f_1=160.123\text{MHz}$ 、 $f_2=168.456\text{MHz}$ 和 $f_3=198.789\text{MHz}$ 的频率的直到16.67m的展开距离的示例相位展开结果。在1个标准偏差相位噪声条件下(约9.3度),展开通过速率/概率约为99.46%。图6B示出了指示图600的示例相位展开结果的图610,但是处于零噪声(理想)条件。

[0094] 图6C示出了图620,图620指示在 $f_1=96.9\text{MHz}$ 、 $f_2=102\text{MHz}$ 、 $f_3=114\text{MHz}$ 和 $f_4=141.3\text{MHz}$ 、 $f_4=201.6$ 的频率的直到50m的展开距离的示例相位展开结果。在1个标准偏差相位噪声条件下(约15度),展开通过速率/概率约为99.66%。增加频率数使得展开距离更大和更鲁棒。图6D示出了指示图620的示例相位展开结果的图630,但是在零噪声条件下。图6E示出了指示图620的特写部分的图640,示出了大约10m的距离的值。图6F示出了指示图630的特写部分的图650,示出了在零噪声条件下大约10m的距离的值。

[0095] 在一些实施例中,本文中所描述的方法和过程可以绑定到一个或多个计算设备的计算系统。特别地,这样的方法和过程可以实现为计算机应用程序或者服务、应用程序编程接口(API)、库和/或其他计算机程序产品。

[0096] 图7示意性地示出了可以执行上述方法和过程中的一个或多个的计算系统700的非限制性实施例。计算系统700以简化形式示出。计算系统700可以采用以下形式:一个或多个个人计算机、服务器计算机、平板计算机、家庭娱乐计算机、网络计算设备、游戏设备、移动计算设备、移动通信设备(例如,智能电话)和/或其他计算设备。计算系统700可以是控制器208的示例。

[0097] 计算系统700包括逻辑机710和存储机720。计算系统700可以可选地包括显示子系统730、输入子系统740、通信子系统750和/或图7中未示出的其他组件。

[0098] 逻辑机710包括被配置为执行指令的一个或多个物理设备。例如,逻辑机可以被配置为执行作为一个或多个应用、服务、程序、例程、库、对象、组件、数据结构或者其他逻辑构造的一部分的指令。这样的指令可以被实现以执行任务、实现数据类型、变换一个或多个组件的状态、实现技术效果、或者以其他方式实现期望结果。

[0099] 逻辑机可以包括被配置为执行软件指令的一个或多个处理器。附加地或者备选地,逻辑机可以包括被配置为执行硬件或者固件指令的一个或多个硬件或者固件逻辑机。逻辑机的处理器可以是单核或者多核,并且在其上执行的指令可以被配置用于顺序、并行和/或分布式处理。逻辑机的个体组件可选地可以分布在两个或更多个独立设备之间,这些设备可以远程定位和/或被配置用于协调处理。逻辑机的各方面可以由以云计算配置进行配置的远程可访问的联网计算设备虚拟化和执行。

[0100] 存储机720包括被配置为保持由逻辑机可执行以实现本文中描述的方法和过程的

指令的一个或多个物理设备。当这样的方法和过程被实现时,存储机720的状态可以被变换——例如,以保持不同数据。

[0101] 存储机720可以包括可移动和/或内置设备。存储机720可以包括光学存储器(例如,CD、DVD、HD-DVD、蓝光光盘等)、半导体存储器(例如,RAM、EPROM、EEPROM等)、和/或磁存储器(例如,硬盘驱动器、软盘驱动器、磁带驱动器、MRAM等)等。存储机720可以包括易失性、非易失性、动态、静态、读/写、只读、随机存取、顺序存取、位置可寻址、文件可寻址和/或内容可寻址设备。

[0102] 应当理解,存储机720包括一个或多个物理设备。然而,本文中描述的指令的各方面备选地通过由物理设备在有限持续时间内不保持的通信介质(例如,电磁信号、光信号等)来传播。

[0103] 逻辑机710和存储机720的方面可以一起集成到一个或多个硬件逻辑组件中。例如,这样的硬件逻辑组件可以包括现场可编程门阵列(FPGA)、程序和应用特定集成电路(PASIC/ASIC)、程序和应用特定标准产品(PSSP/ASSP)、系统级芯片(SOC)和复杂可编程逻辑器件(CPLD)。

[0104] 术语“模块”、“程序”和“引擎”可以用于描述被实现以执行特定功能的计算系统700的一个方面。在一些情况下,模块、程序或引擎可以经由逻辑机710执行由存储机720保持的指令来实例化。应当理解,不同的模块、程序和/或引擎可以从相同的应用、服务、代码块、对象、库、例程、API、函数等实例化。同样,相同的模块、程序和/或引擎可以由不同的应用、服务、代码块、对象、例程、API、函数等实例化。术语“模块”、“程序”和“引擎”可以包括个体或者成组的可执行文件、数据文件、库、驱动程序、脚本、数据库记录等。

[0105] 当被包括时,显示子系统730可以用于呈现由存储机720保持的数据的视觉表示。该视觉表示可以采用图形用户界面(GUI)的形式。由于本文中描述的方法和过程改变由存储机保持的数据,并且从而变换存储机的状态,因此显示子系统730的状态同样可以被变换以在视觉上表示底层数据的变化。显示子系统730可以包括使用几乎任何类型的技术的一个或多个显示设备。这样的显示设备可以与逻辑机710和/或存储机720组合在一个共享外壳中,或者这样的显示设备可以是外围显示设备。

[0106] 当被包括时,输入子系统740可以包括一个或多个用户输入设备或与一个或多个用户输入设备接口,诸如键盘、鼠标、触摸屏或者游戏控制器。在一些实施例中,输入子系统可以包括所选择的自然用户输入(NUI)组件或者与其接口。这样的组件可以是集成的或者外围的,并且输入动作的转换和/或处理可以在机上或者机外处理。示例NUI组件可以包括用于语音和/或声音识别的麦克风;用于机器视觉和/或手势识别的红外、彩色、立体和/或深度相机;用于运动检测和/或意图识别的头部跟踪器、眼部跟踪器、加速度计和/或陀螺仪;以及用于评估大脑活动的电场感测组件。

[0107] 当被包括时,通信子系统750可以被配置为将计算系统700与一个或多个其他计算设备通信耦合。通信子系统750可以包括与一个或多个不同通信协议兼容的有线和/或无线通信设备。作为非限制性示例,通信子系统可以被配置用于经由无线网络或者有线或者无线局域网或者广域网进行通信。在一些实施例中,通信子系统可以允许计算系统700经由诸如互联网等网络向和/或从其他设备发送和/或接收消息。

[0108] 在一个示例中,一种用于飞行时间相机的方法,该方法包括用具有两个或更多个

频率的调制光照射场景,该两个或更多个频率不具有公共整数分母;在传感器阵列处,接收从场景中的对象反射的调制光;并且确定针对两个或更多个频率的调制光中的每个调制光的展开相位。在这样的示例或任何其他示例中,附加地或者备选地,确定针对两个或更多个频率的调制光中的每个调制光的展开相位包括:处理所接收的调制光以确定针对每个频率的调制光的包裹相位向量;将包裹相位向量转换为复域中的相位标量;并且基于相位标量确定复域中的展开相位。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或备选地,相位标量用单个未知整数M表示,其中M是针对给定调制光频率的 $2\pi$ 模的包裹周期数。在前述示例中的任何一个或任何其他示例中,附加地或者备选地,该方法包括在所确定的最大展开距离内确定包裹相位向量的 $M_{\max}$ 的值;并且基于最小化 $U_M$ 值的值来确定M的值,使得 $0 \leq$

$$U_M = \sum_m \frac{N_k}{2} [AB_m \cdot [\cos \left( 2\pi f_m \left( \frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} - t_{d,m} \right) \right) - 1]] = 0'$$

$M \leq M_{\max}$ , 其中

并且其中 $N_k$ 是在每个频率处的总相移步长, $AB_m$ 是在每个频率 $f_m$ 处的有效亮度,并且 $t_{d,m}$ 是在每个频率 $f_m$ 处的包裹飞行时间。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,针对频率的调制光的展开相位至少基于M来确定。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,在复域中使用数字滤波器从相位向量中过滤高斯噪声。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,基于所接收的调制光的有效亮度对系统鲁棒性进行加权。

[0109] 在另一示例中,一种飞行时间相机包括:调制光发射器,被配置为用具有两个或更多个频率的调制光照射场景的,该两个或更多个频率不具有公共整数分母;传感器阵列,被配置为接收从场景内的对象反射的调制光的;以及控制器,该控制器被配置为:处理所接收的调制光以确定针对每个频率的调制光的包裹相位向量;以及确定针对两个或更多个频率的调制光中每个调制光的展开相位。在这样的示例或者任何其他示例中,附加地或者备选地,控制器被配置为:将包裹相位向量转换为复域中的相位标量;以及基于相位标量确定复域中的展开相位。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,相位标量用单个未知整数M表示,其中M是针对给定频率的调制光的 $2\pi$ 模的包裹周期数。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,控制器被配置为在所确定的最大展开距离内确定包裹相位向量的 $M_{\max}$ 的值;以及基于最小化 $U_M$ 的值的值来确定M的值,

$$U_M = \sum_m \frac{N_k}{2} [AB_m \cdot [\cos \left( 2\pi f_m \left( \frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} - t_{d,m} \right) \right) - 1]] = 0$$

使得 $0 \leq M \leq M_{\max}$ , 其中 并且其中 $N_k$

是在每个频率处的总相移步长, $AB_m$ 是在每个频率 $f_m$ 处的有效亮度,并且 $t_{d,m}$ 是在每个频率 $f_m$ 处的包裹飞行时间。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,特定频率的调制光的展开相位至少基于 $U_M$ 生成针对 $U_M$ 的值的极值的M的值来确定。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,控制器被配置为:在复域中使用数字滤波器从相位向量中过滤高斯噪声。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,控制器被配置为:基于所接收的调制光的有效亮度对系统鲁棒性进行加

权。

[0110] 在又一示例中,一种用于飞行时间相机的方法,该方法包括:用三个或更多个频率的调制光照射场景;在传感器阵列处,接收从场景内的对象反射的调制光;处理所接收的调制光以确定针对每个频率的调制光的包裹相位向量;将相位向量转换为复域中的相位标量;以及基于相位标量确定复域中的展开相位。在这样的示例或者任何其他示例中,附加地或者备选地,相位标量用单个未知整数 $M$ 表示,其中 $M$ 是针对给定频率的调制光的 $2\pi$ 模的包裹周期数。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或备选地,将相位向量转换为复域中的相位标量包括生成由复值 $R(m) = \sum_k [V_{m,k} \cos(\psi_k)]$ 和 $I(m) = \sum_k [V_{m,k} \sin(\psi_k)]$ 在复域中统一约束的展开公式:

$$U_M = \sum_m [R(m) \cdot \cos(2\pi f_m T_d) - I(m) \cdot \sin(2\pi f_m T_d) - \frac{N_k}{2} AB_m] = 0$$
。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,该方法包括基于 $U_M$ 的最小化确定 $M$ 的值,使得 $0 \leq M \leq M_{\max}$ ,其中

$$U_M = \sum_m \frac{N_k}{2} [AB_m \cdot [\cos(2\pi f_m (\frac{M}{f_{m0}} + t_{d,m0} - t_{d,m}))] - 1] = 0$$
。在任何

前述示例或者任何其他示例中,附加地或者备选地,该方法包括:在第一条件期间,用第一组三个或更多个频率的调制光照射场景;以及在第二条件期间,用第二组三个或更多个频率的调制光照射场景,其中第二组中的至少一个频率不同于第一组中的任何频率。在前述示例中的任何一个或者任何其他示例中,附加地或者备选地,三个或更多个频率的调制光基于优化过程来选择,优化过程包括:确定第一发射频率的调制光;确定针对场景的最大展开范围;在最大展开范围上扫描三个或更多个频率的调制光的一个或多个附加频率;将所接收的调制光的噪声电平调节到预定相位噪声标准偏差内;确定针对每组频率的调制光的展开相位;以及指示具有最高展开通过速率的频率组。

[0111] 应当理解,本文中所描述的配置和/或方法本质上是示例性的,并且这些具体实施例或者示例不应当被视为限制性的,因为很多变化是可能的。本文中所描述的特定程序或者方法可以表示任何数目的处理策略中的一种或多种。因此,所示出和/或描述的各种动作可以按照所示出和/或描述的顺序、以其他顺序、并行执行或者省略。同样,上述过程的顺序可以改变。

[0112] 本公开的主题包括本文中公开的各种过程、系统和配置以及其他特征、功能、作用和/或特性的所有新颖和非明显的组合和子组合、以及任何及其所有等价物。



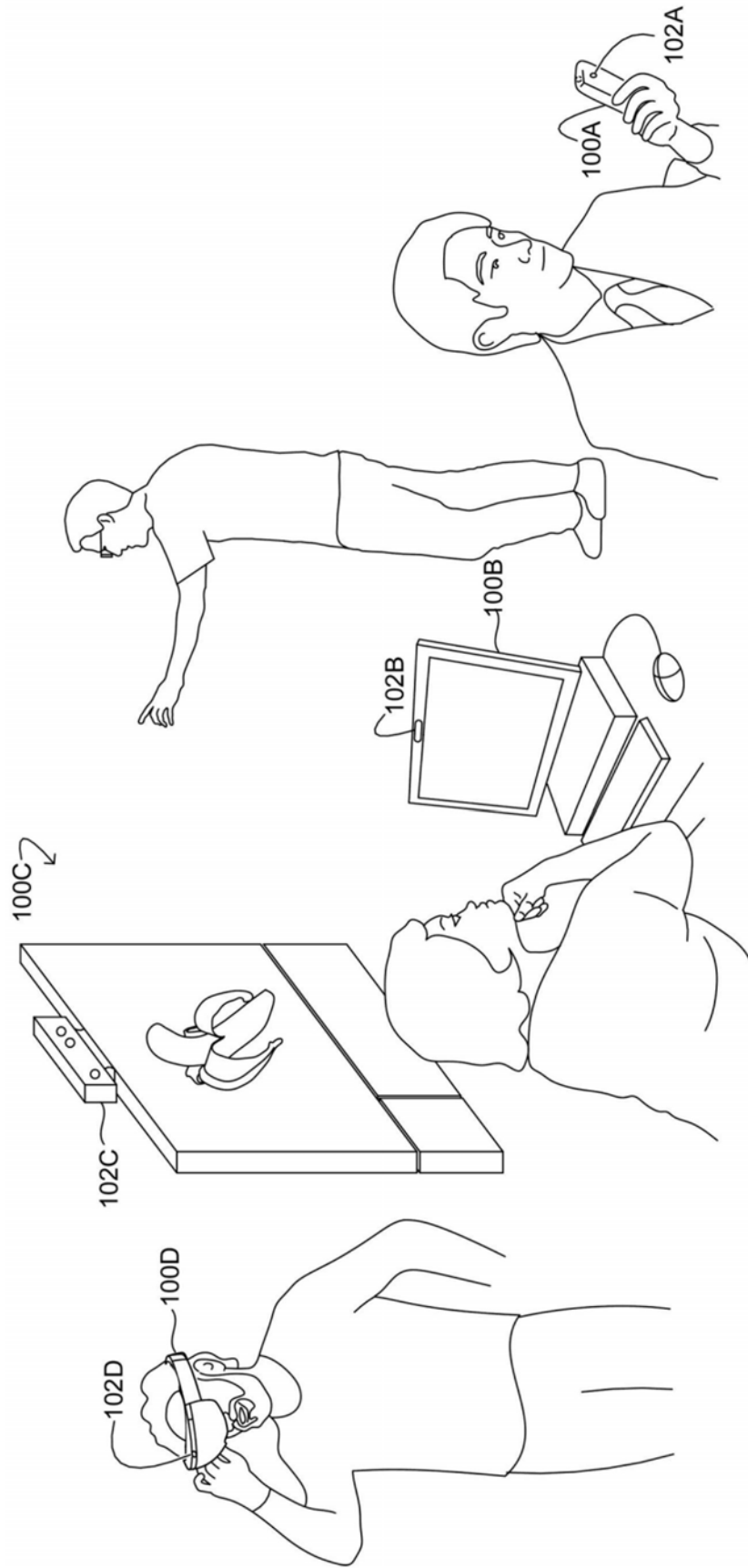


图1

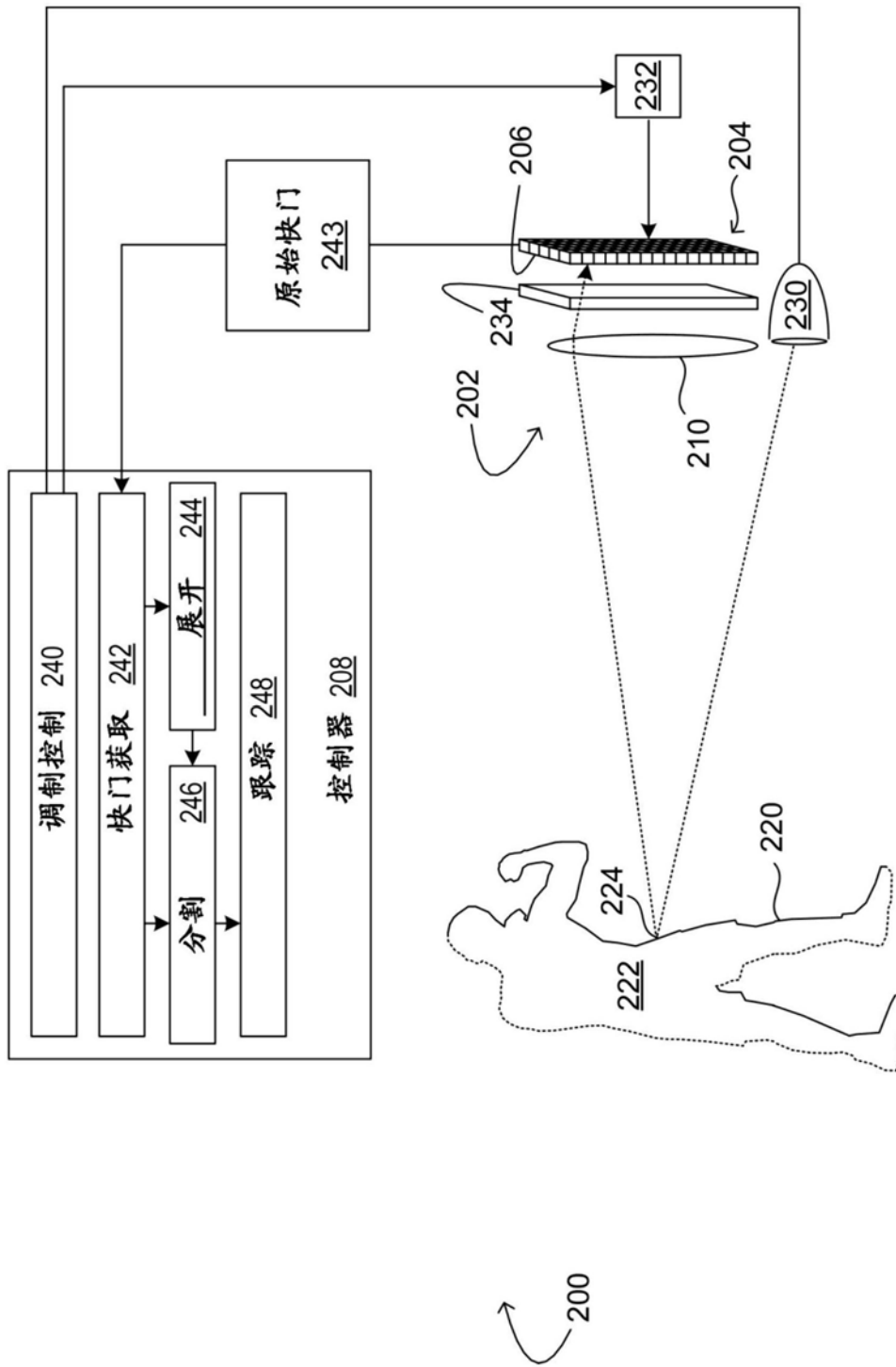


图2

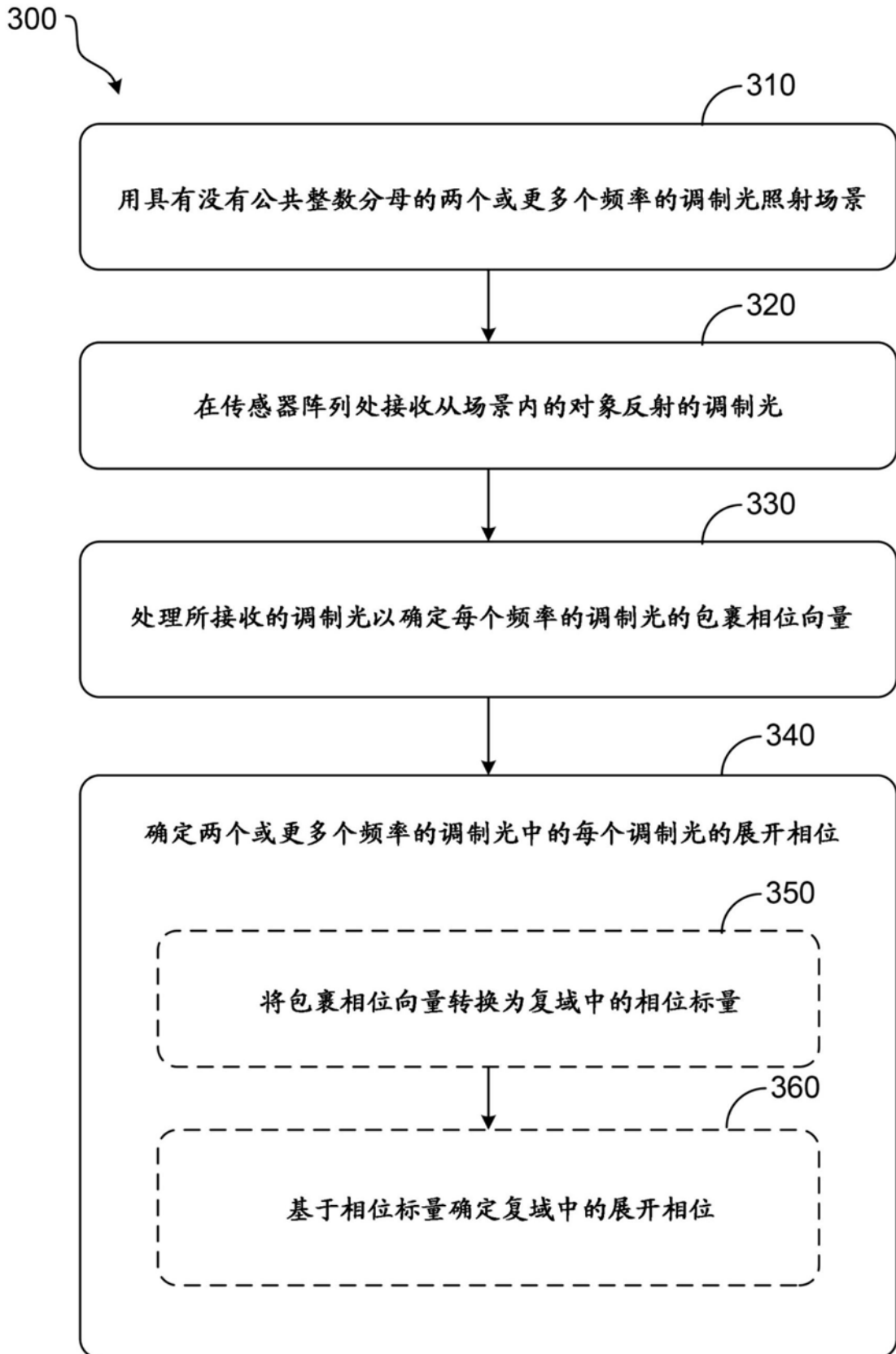


图3

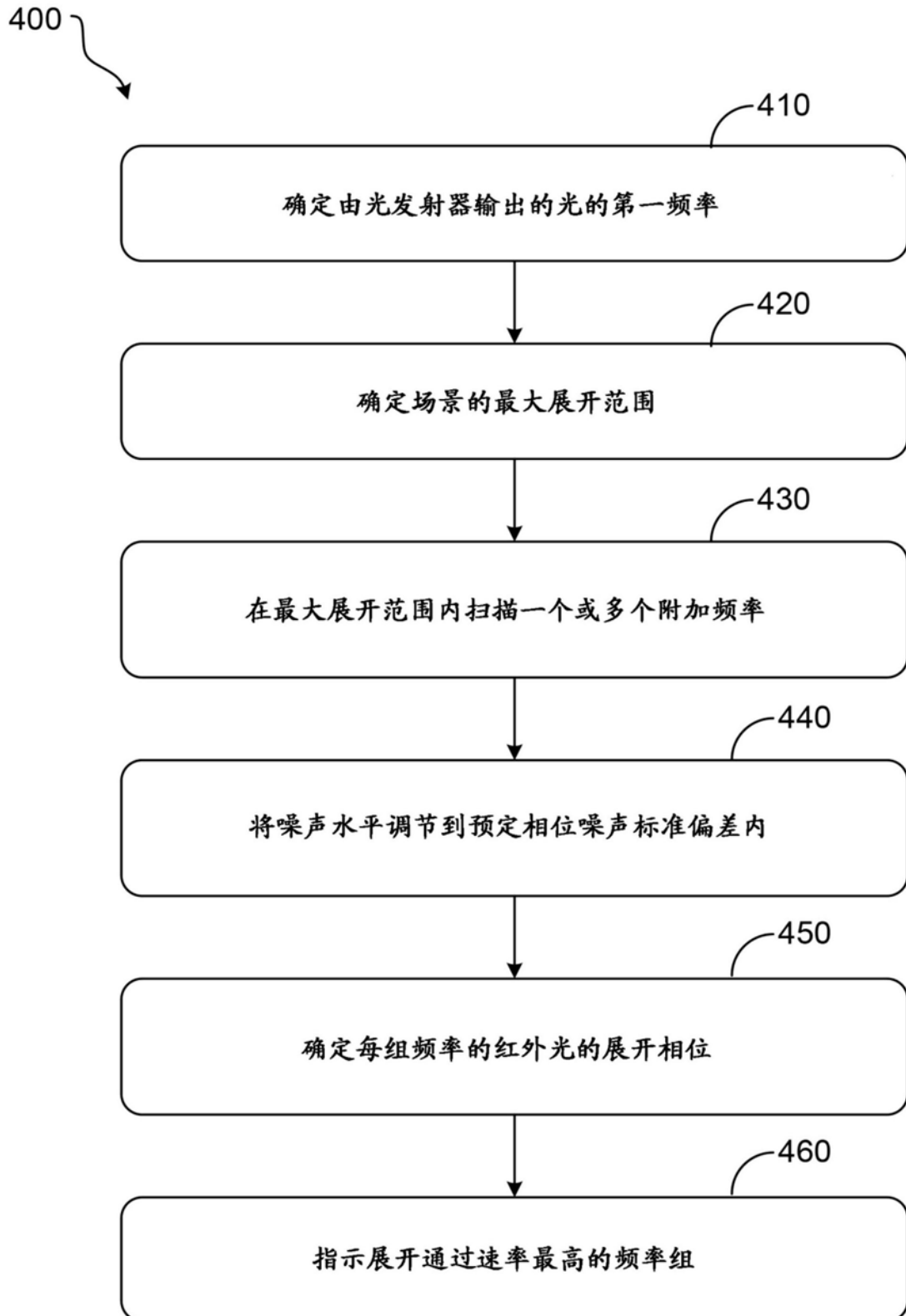


图4

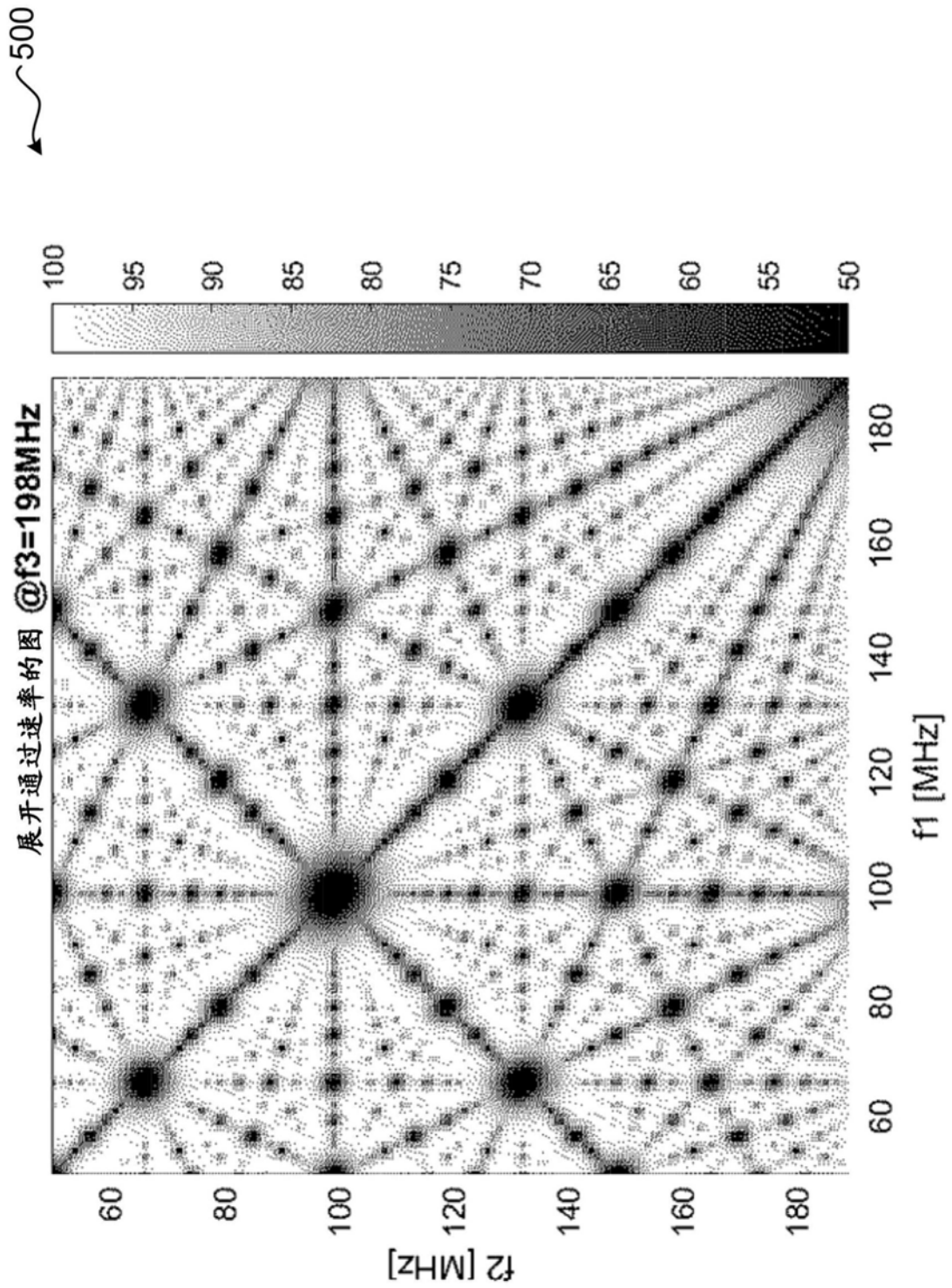


图5A

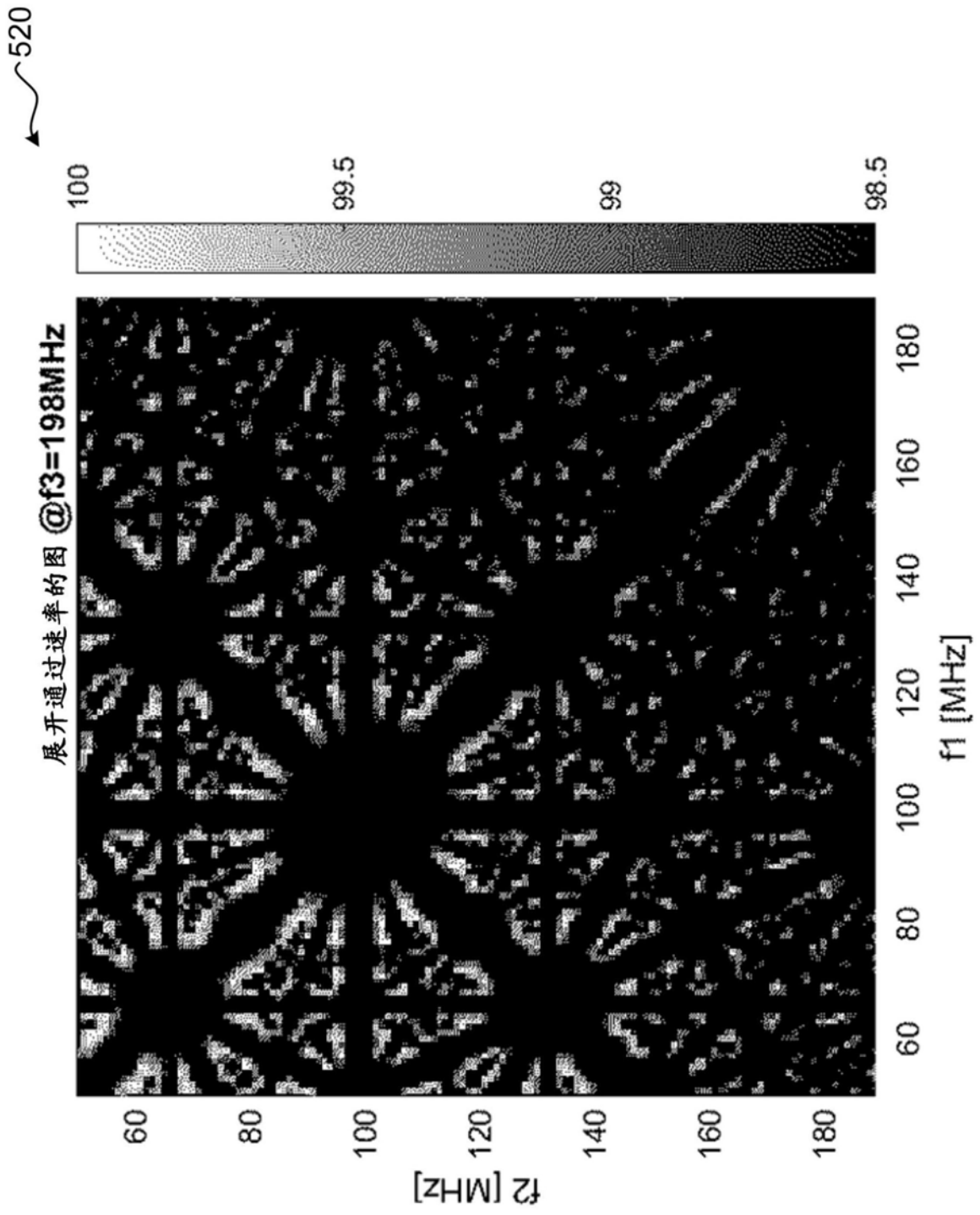


图5B

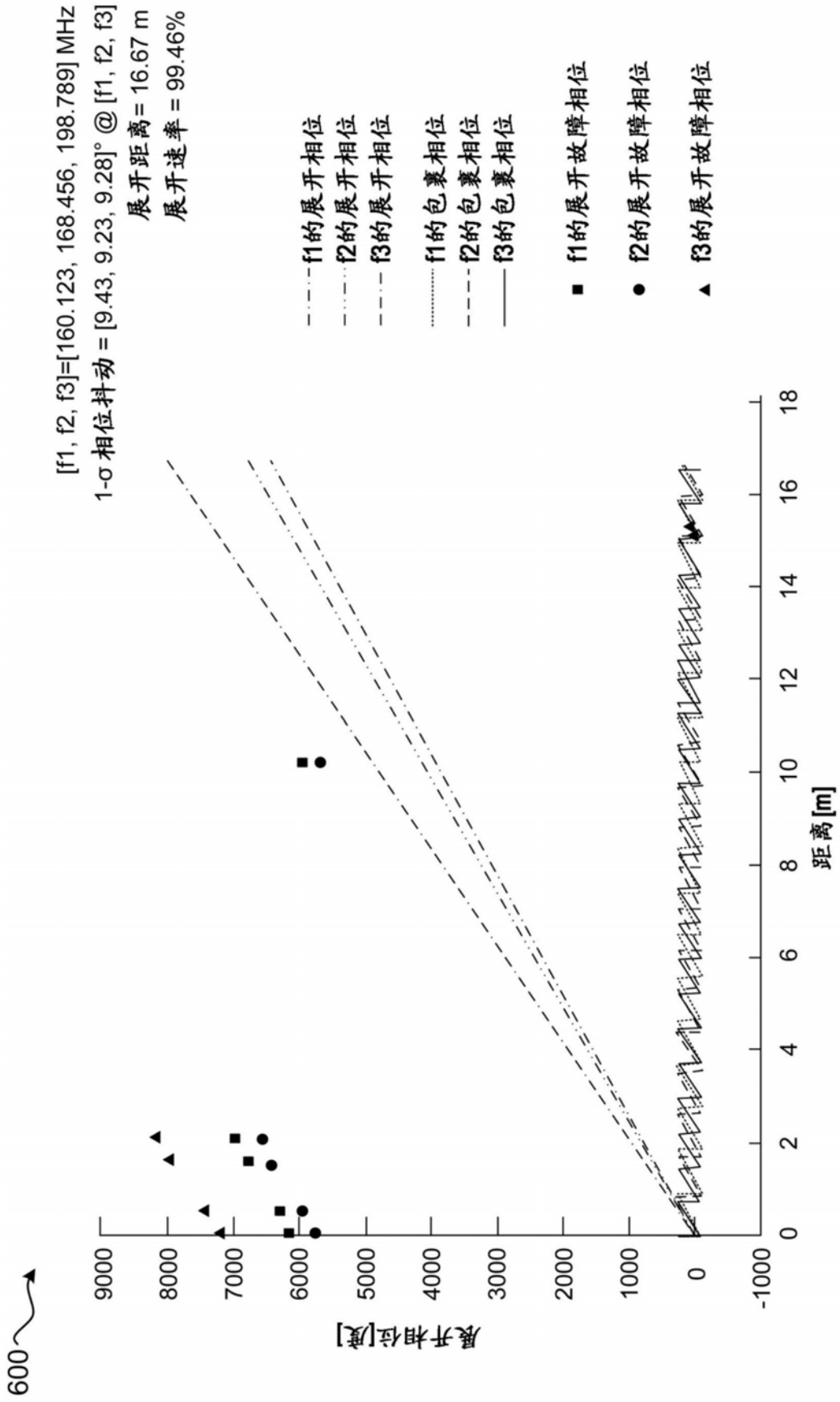


图6A

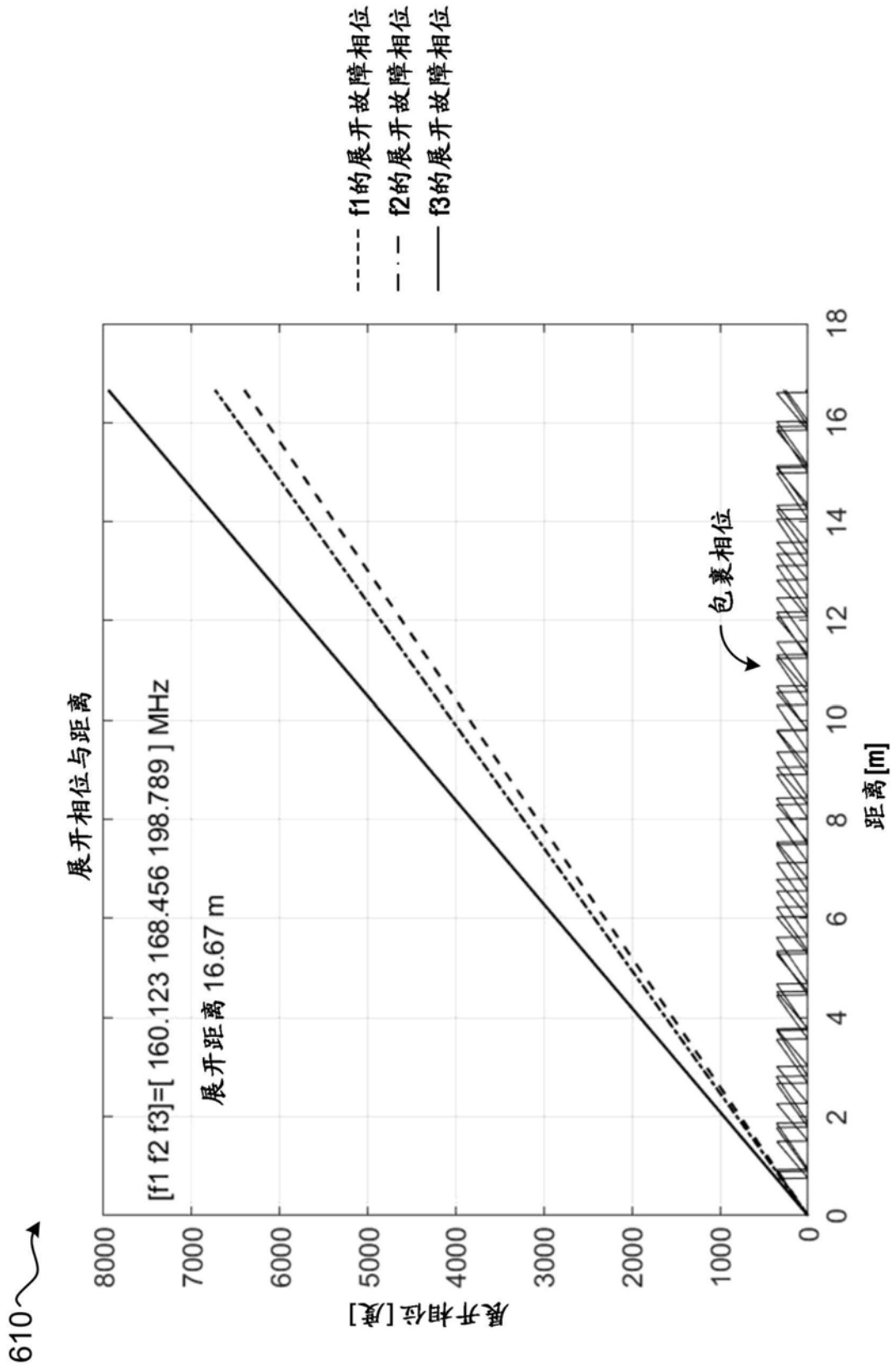


图6B



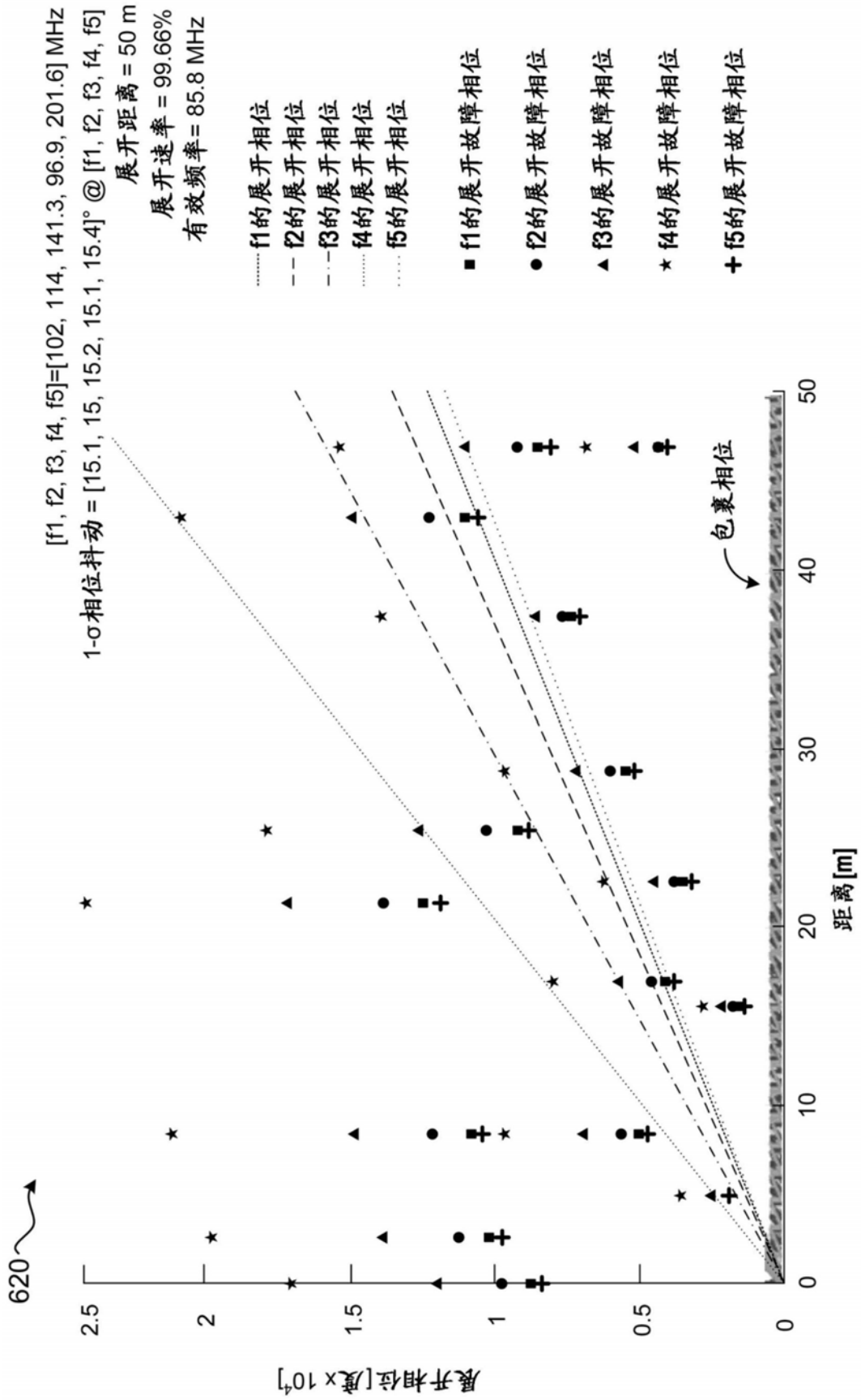


图6C

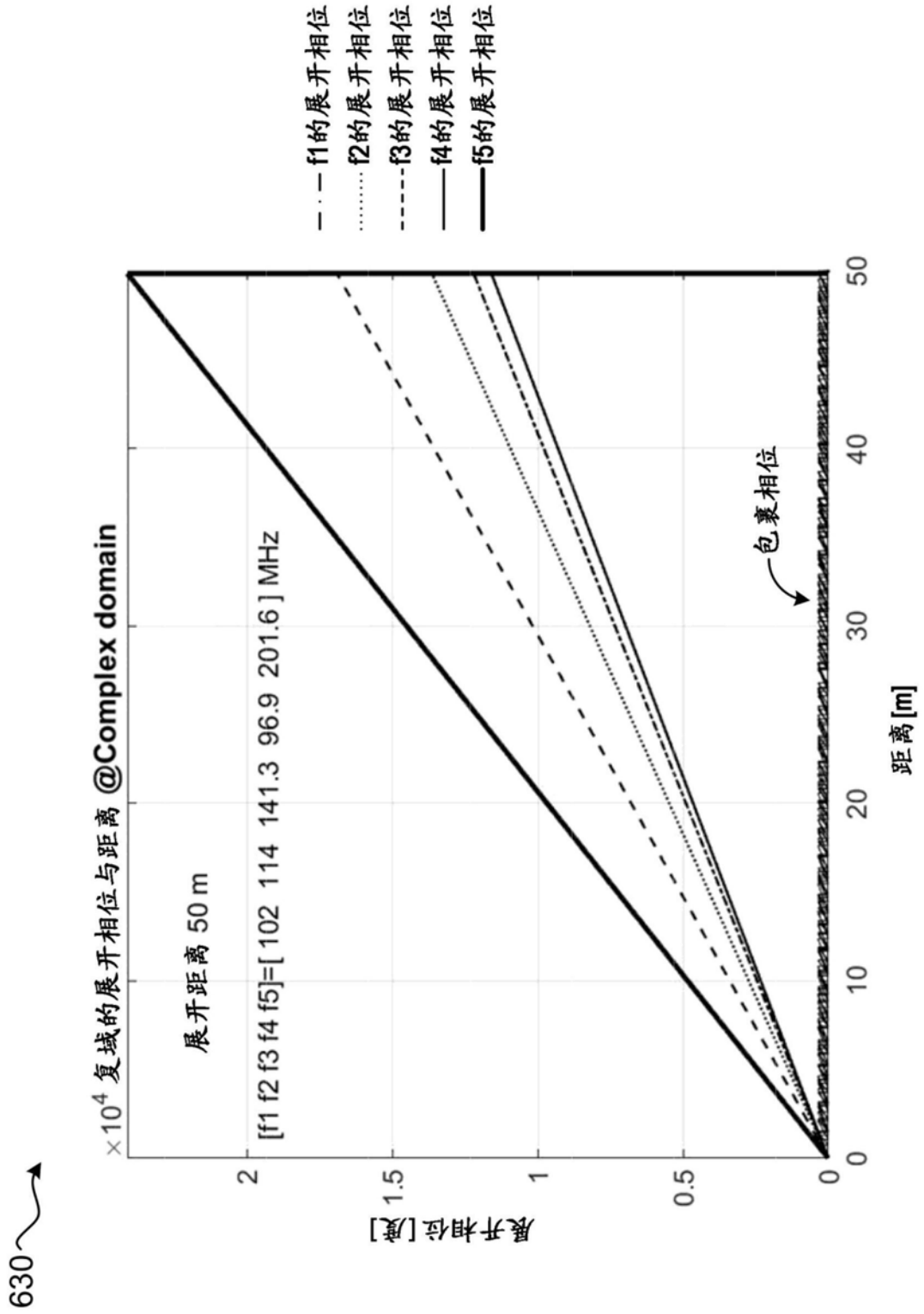


图6D

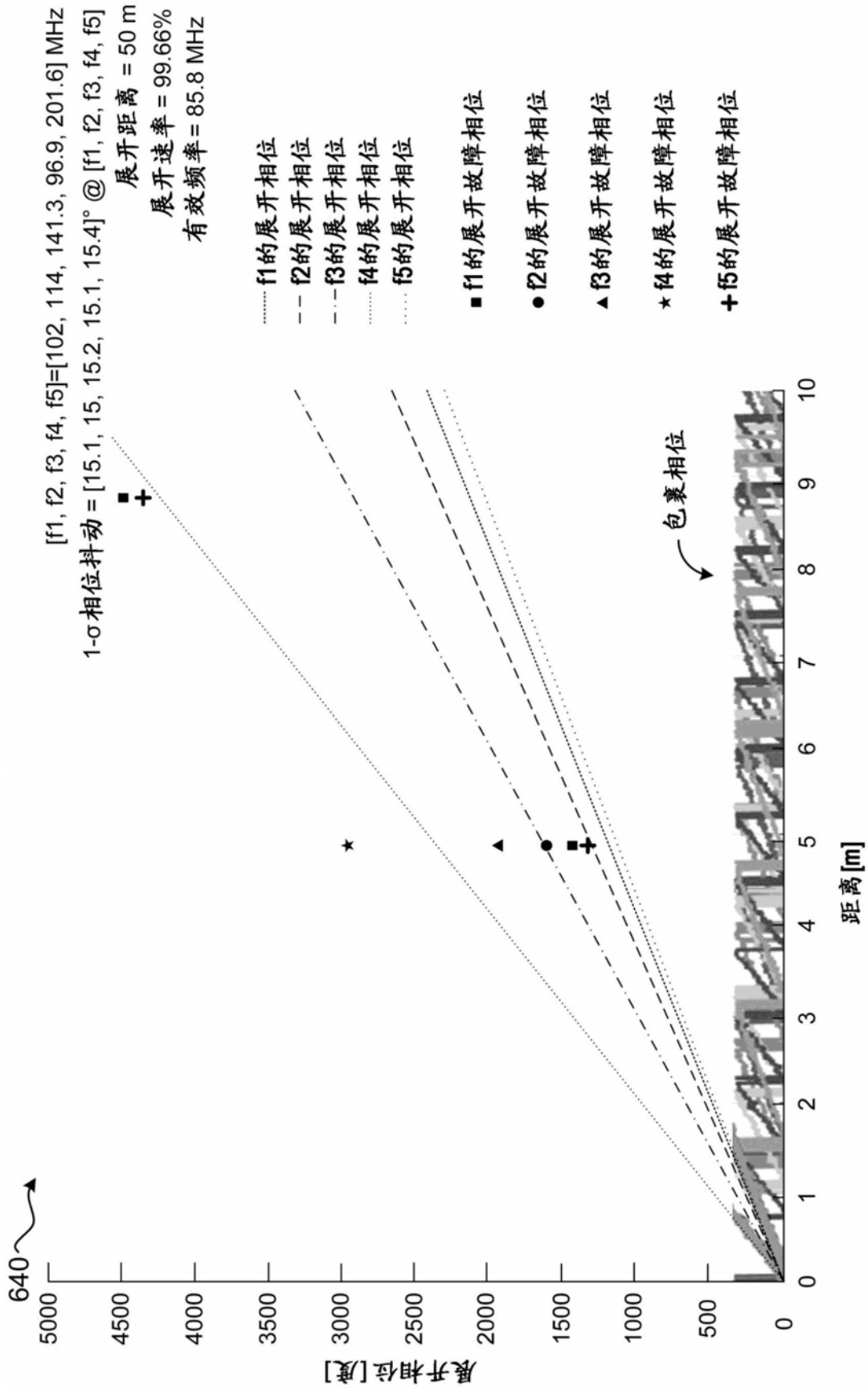


图6E

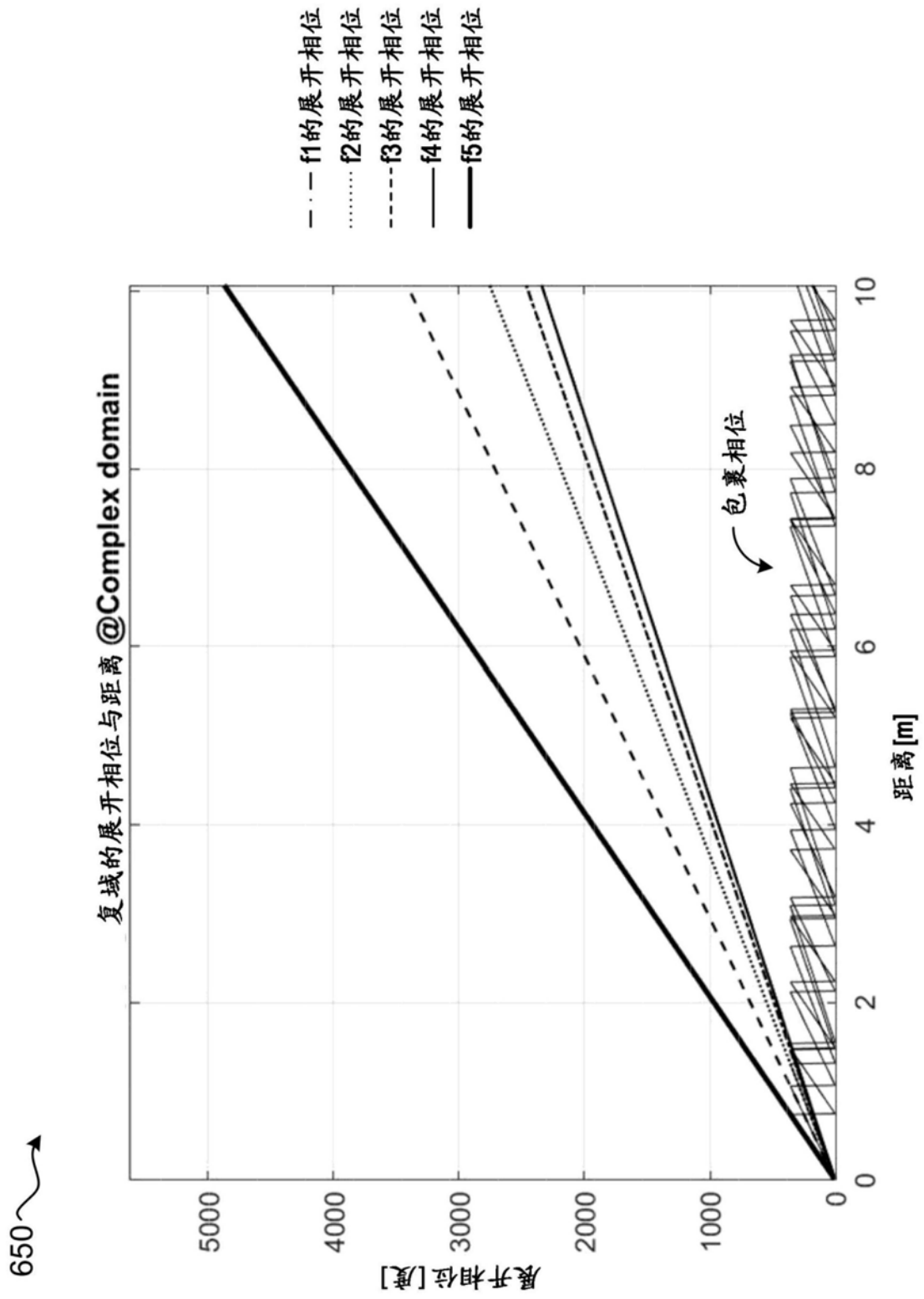


图6F

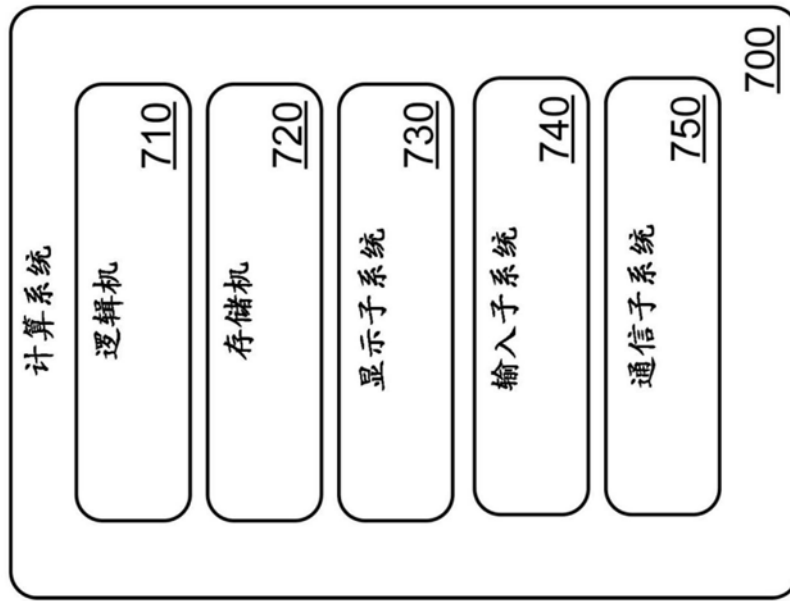


图7