



(45) 授权公告日 2015.05.20

权利要求书3页 说明书5页 附图2页

Figure 1 is a schematic diagram of a virtual optical Fourier transform system. The system includes a light source 105, a lens 130, a virtual plane 140, a lens 120, a scanning detector 115, a coincidence circuit 125, an array detector 110, and an object 145. The diagram shows the propagation of light pulses through the system, with labels for various components and distances. A legend indicates that dashed lines represent incident pulses, dotted lines represent reflected pulses, and solid lines represent sub-pulses.

1. 一种超分辨率成像雷达即 SRIR, 所述 SRIR 包括:

脉冲信号发生器,

其中所述脉冲信号发生器传播 N 个射频即 RF 能量突发,

其中每个突发包括 M+1 个单脉冲,

其中每个突发单脉冲中的一个是从属脉冲, 而且每个突发剩下的 M 个脉冲向目标物体传播;

阵列桶检测器即 ABD, 其中所述 ABD 收集从物体反射的脉冲;

虚像透镜, 其中所述从属脉冲通过所述虚像透镜传播;

虚像扫描检测器, 其中所述虚像扫描检测器检测虚像从属电场;

处理器, 其中所述处理器使用从属脉冲、虚像透镜属性以及虚像扫描检测器属性计算会在所述虚像扫描检测器中出现的虚像从属电场; 以及

重合电路, 其中所述重合电路计算由所述 ABD 收集的反射脉冲电场和虚像从属电场的跨时间关联函数, 以及所述重合电路使用所述跨时间关联函数结果生成所述物体图像的像素。

2. 根据权利要求 1 所述的 SRIR, 其中所述 M 个脉冲依次照射所述物体。
3. 根据权利要求 1 所述的 SRIR, 其中所述 N 个突发与所述物体的图像的粒度成反比。
4. 根据权利要求 1 所述的 SRIR, 其中所述 ABD 包括多个 RF 天线元件。

5. 根据权利要求 1 所述的 SRIR, 其中条件 $K_{A\perp}^i = -\frac{1}{M} K_{T\perp}^0$ 必须得到满足, 其中

$K_{T\perp}^0$ 代表每个突发中发射成像场的波矢量的横向分量, 以及

$K_{A\perp}^i$ 代表所述虚像从属电场的波矢量的横向分量。

6. 根据权利要求 5 所述的 SRIR, 其中所述跨时间关联函数利用以数字形式存储的数据计算。

7. 根据权利要求 1 所述的 SRIR, 其中所述跨时间关联函数与在所述虚像扫描检测器位置的图像像素强度有关。

8. 根据权利要求 1 所述的 SRIR, 其中所述跨时间关联函数由下列方程式给出:

$$G^{2(M+1)}(\vec{x}_{2j}) = \sum_{i=1}^{N_e} \left\langle E_{0j}^*(T_{0j}, \vec{x}_{2j}) E_{1j}^*(T_{1j}, i) \dots E_{Mj}^*(T_{Mj}, i) E_{Mj}(T_{Mj}, i) \dots E_{1j}(T_{1j}, i) E_{0j}(T_{0j}, \vec{x}_{2j}) \right\rangle$$

其中,

$\vec{x}_{2j}$ 为虚像扫描检测器的位置;

j 为与位置 $\vec{x}_{2j}=1, 2, \dots, N$ 相对应的突发指数;

E 为电场;

E* 为电场的复合共轭值; 以及

T 为每个突发到达的时间。

9. 一种获得超分辨率图像的方法, 所述方法包括:

提供超分辨率成像雷达即 SRIR,

其中所述 SRIR 包括脉冲信号发生器,阵列桶检测器即 ABD,虚像透镜,虚像扫描检测器,处理器,以及重合电路;

用脉冲信号发生器传播 N 个射频即 RF 能量的突发,

其中每个突发包括 $M+1$ 个单脉冲,

其中每个突发单脉冲中的一个是从属脉冲,而且每个突发剩下的 M 个脉冲向目标物体传播;

用所述 ABD 收集从所述物体反射的脉冲;

通过所述虚像透镜传播从属脉冲;

用所述虚像扫描检测器检测虚像从属电场;

所述处理器利用所述从属脉冲、虚像透镜属性以及虚像扫描检测器属性计算会在所述虚像扫描检测器中出现的所述虚像从属电场;

所述重合电路计算由所述 ABD 收集的反射脉冲电场和在所述虚像扫描检测器平面检测的所述虚像从属电场的跨时间关联函数;以及

所述重合电路利用所述跨时间关联函数结果生成所述物体图像的像素。

10. 根据权利要求 9 所述的获得超分辨率图像的方法,其中所述 M 个脉冲依次照射物体。

11. 根据权利要求 9 所述的获得超分辨率图像的方法,其中所述 N 个突发与物体图像粒度成反比。

12. 根据权利要求 9 所述的获得超分辨率图像的方法,其中所述 ABD 包括多个 RF 天线元件。

13. 根据权利要求 9 所述的获得超分辨率图像的方法,其中由所述 ABD 收集的反射脉冲的幅值以数字形式存储。

14. 根据权利要求 9 所述的获得超分辨率图像的方法,其中所述跨时间关联函数与在所述虚像扫描检测器位置的图像像素强度有关。

15. 根据权利要求 14 所述的获得超分辨率图像的方法,其中所述跨时间关联函数利用以数字形式存储的数据计算。

16. 一种超分辨率成像雷达即 SRIR,所述 SRIR 包括:

脉冲信号发生器装置,

其中所述脉冲信号发生器装置传播 N 个射频即 RF 能量突发,

其中每个突发包括 $M+1$ 个单脉冲,

其中每个突发单脉冲中的一个是从属脉冲,而且每个突发剩下的 M 个脉冲向目标物体传播;

阵列桶检测器装置即 ABD 装置,其中所述 ABD 装置收集从所述物体反射的脉冲;

虚像透镜装置,其中所述从属脉冲通过所述虚像透镜装置传播;

虚像扫描检测器装置,其中所述虚像扫描检测器装置检测虚像从属电场;

处理器装置,其中所述处理器装置使用所述从属脉冲、虚像透镜装置属性以及虚像扫描检测器装置属性计算会在所述虚像扫描检测器装置中出现的虚像从属电场;以及

重合电路装置,其中所述重合电路装置计算由 ABD 装置收集的反射脉冲电场和所述虚像从属电场的跨时间关联函数,

以及其中所述重合电路装置利用跨时间关联函数结果生成物体图像的像素。

17. 一种获得超分辨率图像的方法,所述方法包括:

提供超分辨率成像雷达即 SRIR,

其中所述 SRIR 包括脉冲信号发生器,阵列桶检测器即 ABD,透镜,扫描检测器,处理器,以及重合电路;

用脉冲信号发生器传播 N 个射频即 RF 能量的突发,

其中每个突发包括 M+1 个单脉冲,

其中每个突发单脉冲中的一个是从属脉冲,而且每个突发剩下的 M 个脉冲向目标物体传播;

用 ABD 收集从物体反射的脉冲;

通过透镜传播从属脉冲;

用扫描检测器检测从属电场;

重合电路计算由 ABD 收集的反射脉冲电场和由扫描检测器检测的从属电场的跨时间关联函数;以及

重合电路利用跨时间关联函数结果生成物体图像的像素。

超分辨率成像雷达

技术领域

[0001] 本公开涉及超分辨率成像雷达(SRIR)。尤其是其涉及使用高阶成像以便实现增强分辨率的超分辨率成像雷达。

背景技术

发明内容

[0002] 本公开涉及用于超分辨率成像雷达的系统、装置和方法。在一个或更多实施例中,超分辨率成像雷达包括传播 N 个射频(RF)能量突发的脉冲信号发射器。每个突发包括 M+1 个单脉冲。每个突发单脉冲中的一个从属脉冲,并且每个突发剩下的 M 个脉冲向目标物体传播。而且,阵列桶检测器(array bucket detector)(ABD)收集从物体反射的脉冲。

[0003] 在一个或更多实施例中,从属脉冲通过虚像透镜传播。另外,虚像扫描检测器用于检测通过虚像透镜传播的虚像从属电场。此外,处理器使用从属脉冲,虚像透镜属性,以及虚像扫描检测器属性计算会在扫描检测器平面中出现的虚像从属电场。进一步地,重合电路计算由 ABD 收集的反射脉冲电场和由处理器计算的虚像从属电场的跨时间关联函数。重合电路使用跨时间关联函数结果生成物体图像的像素。

[0004] 在某些实施例中, M 个脉冲依次照射该物体。在至少一个实施例中, N 个突发与物体图像的粒度成反比。在一个或更多实施例中, ABD 包括多个 RF 天线元件。在至少一个实施例中,必须满足条件 $K_{A\perp}^i = -\frac{1}{M} K_{I\perp}^0$ 。 $K_{I\perp}$ 代表每个突发中发出的成像电场波矢量的横向分量,而 $K_{A\perp}$ 代表虚像从属电场波矢量的横向分量。

[0005] 在一个或更多实施例中,以数字形式存储由 ABD 收集的反射脉冲幅值。在某些实施例中,跨时间关联函数与在虚像扫描检测器位置的图像像素强度有关。在至少一个实施例中

$$G^{2(M+1)}(\bar{x}_{2j}) =$$

中,跨时间关联函数由
$$= \sum_{i=1}^{N_e} \langle E_{0j}^*(T_{0j}, \bar{x}_{2j}) E_{1j}^*(T_{1j}, i) \dots E_{Mj}^*(T_{Mj}, i) E_{Mj}(T_{Mj}, i) \dots E_{1j}(T_{1j}, i) E_{0j}(T_{0j}, \bar{x}_{2j}) \rangle$$

给出。 $\bar{x}_{2j}$ = 虚像扫描检测器的位置; j = 与位置 $\bar{x}_{2j}$ = 1, 2, ..., N 相对应的突发指数; E = 电场; E^* = 电场的复合共轭值; 以及 T = 每个突发到达的时间。

[0006] 在某些实施例中,获得超分辨率图像的方法包括提供超分辨率成像雷达(SRIR)。在一个或更多实施例中, SRIR 包括脉冲信号发生器,阵列桶检测器(ABD),虚像透镜,虚像扫描检测器,处理器,以及重合电路。该方法还包括用脉冲信号发生器传播 N 个射频(RF)能量突发,其中每个突发包括 M+1 个单脉冲。每个突发单脉冲中的一个从属脉冲,并且每个突发剩下的 M 个脉冲向目标物体传播。

[0007] 该方法进一步包括用 ABD 收集从物体反射的脉冲。该方法还包括通过虚像透镜传播从属脉冲,并用虚像扫描检测器检测虚像从属电场。另外,该方法包括用处理器计算由虚像扫描检测器检测的虚像从属电场。而且,该方法包括用重合电路计算由 ABD 收集的反射

脉冲电场和由处理器计算从属电场的跨时间关联函数。最终,该方法包括通过利用跨时间关联函数结果用重合电路生成物体图像的像素。

[0008] 在可选实施例中,超分辨率成像雷达(SRIR)包括传播 N 个射频(RF)能量突发的脉冲信号发生器。每个突发包括 $M+1$ 个单脉冲。另外,每个突发单脉冲中的一个是从属脉冲,并且每个突发剩下的 M 个脉冲向目标物体传播。超分辨率成像雷达进一步包括收集从物体反射脉冲的阵列桶检测器(ABD)以及透镜。通过透镜传播从属脉冲。

[0009] 而且,超分辨率成像雷达包括检测从属电场的扫描检测器。另外,超分辨率成像雷达包括计算由 ABD 收集反射脉冲电场和由扫描检测器检测从属电场跨时间关联函数的重合电路。重合电路使用跨时间关联函数结果生成物体图像像素。

[0010] 在其他实施例中,用于获得超分辨率图像的方法包括提供超分辨率成像雷达(SRIR)。该 SRIR 包括脉冲信号发生器,阵列桶检测器(ABD),透镜,扫描检测器,以及重合电路。而且,该方法包括用脉冲信号发生器传播 N 个射频(RF)能量的突发。每个突发包括 $M+1$ 个单脉冲。以及,每个突发单脉冲中的一个是从属脉冲,而且每个突发剩下的 M 个脉冲向目标物体传播。

[0011] 进一步地,该方法进一步包括用 ABD 收集从物体反射的脉冲,以及通过透镜传播从属脉冲。另外,该方法包括用扫描检测器检测通过透镜传播到扫描检测器平面的从属电场。进一步地,该方法包括用重合电路计算由 ABD 收集反射脉冲电场和由扫描检测器检测从属电场的跨时间关联函数。而且,该方法包括通过利用跨时间关联函数结果用重合电路生成物体图像的像素。

附图说明

[0012] 本公开的这些和其他特征、方面以及优势在参考下列的描述、随附的权利要求以及附图后会变得更加易于理解。其中在附图中:

[0013] 图 1 示出根据本公开至少一个实施例的超分辨率成像雷达(SRIR)示意图。

[0014] 图 2 示出根据本公开至少一个实施例的超分辨率成像雷达仿真试验数据。

具体实施方式

[0015] 本文公开的方法和装置提供了用于超分辨率成像雷达(SRIR)的运作系统。具体地,这个系统涉及使用高阶成像以便完成增强分辨率的超分辨率成像雷达。

[0016] 该公开的系统修改了在光学范围中称为“幻影成像”的技术,并使之适应用于高分辨率成像雷达。这个修改的技术采用微波或射频(RF)范围中电场的第四阶关联以形成比当前现有技术的成像雷达具有 $100\times$ 分辨率改进的图像。本公开系统和当前现有技术在成像雷达中的直接比较显示点扩散函数(PSF)能够从 $5\text{--}10\text{m}$ 减少到 $\sim 0.045\text{m}$ 。

[0017] 成像雷达非常像闪光照相机,其自身提供光照射地面上的区域,并取得快照图片那样来工作。但是不像照相机,成像雷达使用射频波段。闪光照相机发出光脉冲(即,闪光)并在胶片上记录穿过照相机胶片反射回来的光。代替使用照相机透镜和胶片,成像雷达采用雷达天线和数字计算机磁带和/或存储器以记录图像。图像雷达测量由雷达天线发出并由远处表面或物体反射回来的微波信号的强度和往返时间。因此,雷达图像仅仅示出反射回来接近雷达天线的光。

[0018] 目前,有两种主要类型的用于生成高分辨率雷达图像的成像雷达。这两种主要类型是合成孔径雷达(SAR)和逆合成孔径雷达(ISAR)。这两种类型的第一个,合成孔径雷达是处理多雷达图像比可能的通过利用传统方法产生更高分辨率图像的雷达形式。合成孔径雷达使用(1)一个或更多安装在例如飞机或航空器的移动平台上的天线照射目标区域;(2)使用很多散布(scatter)在靠近目标区域的区域上方的低方向性小固定天线,或(3)使用所述的结合体。在采用很多低方向性小固定天线的情况下,后处理在不同天线位置的很多回波波形以解决目标区域。

[0019] 因此,合成孔径雷达的劣势在于,因为仅能利用在相对静止目标上方的一个或更多运动天线,利用在相对大区域上方的多静止天线,或者利用上述的结合体实施合成孔径雷达,那么它就需要高成本、复杂的系统。合成孔径雷达的额外劣势包括它需要大量数据存储的事实以及它需要大量后处理以便生成由此产生的图像。

[0020] 用于生成高分辨率雷达图像的两种类型成像雷达中的第二个是逆合成孔径雷达。逆合成孔径雷达用于生成物体的二维(2D)高分辨率图像。通过旋转目标和处理散布中心的由此产生的多普勒历史以产生逆合成孔径雷达图像。

[0021] 在逆合成孔径雷达操作期间,若目标以恒定速率以方位角方向穿过小角度旋转,散布会以根据横向距离位置的速率靠近雷达或退离雷达,横向距离位置是垂直于具有最初位于旋转目标轴中心雷达视线的距离。旋转会导致独立于多普勒频率横向距离的生成,多普勒频率可以由傅里叶变换整理。这个操作等同于大型合成孔径相控阵列天线的生成,其由用于变化目标和/或天线几何形状的接收器输出的相干求和形成。因此,若穿过小角度旋转目标,由此产生的逆合成孔径雷达图像是作为频率和目标方面角度函数的接收信号的二维傅里叶变换。

[0022] 相反地,若穿过大角度旋转目标,散布的多普勒频率历史是非线性的并且遵循正弦波的轨迹。因为涂抹的多普勒频率历史会导致横向分辨率的损失,所以多普勒频率历史不能由傅里叶变换直接处理。由未变傅里叶变换处理的旋转最大角度由跨越合成孔径的孔径相位失误约束确定,通常是45度,其应当在少于规定的随意数量内变化。

[0023] 逆合成孔径雷达具有某些劣势。一个劣势是逆合成孔径雷达需要通常是在图像和传感器之间旋转的运动。其他的劣势包括逆合成孔径雷达需要大量数据存储和相当数量的后处理以便获得由此产生目标图像的事实。

[0024] 应当注意两个前述类型的成像雷达,合成孔径雷达和逆合成孔径雷达局限于使用电场的第二阶关联以便产生由此产生的图像。目前,还没有使用更高阶用于雷达成像关联的已知技术。本公开的系统采用更高阶在雷达频率电磁场之间的关联以形成图像。通过采用更高阶成像,由于许多指数乘积的数学重合,增强了分辨率。

[0025] 本公开的技术类似于“重合成像”或者光学范围制度幻影成像。不过,需要若干修改以便能够采用该技术用于雷达配置。在幻影成像中,通过照射物体的光成像该物体,并且该光由没有空间分辨率的单像素检测器(即,桶检测器)收集。这通过使用两个空间相关的光束实现。光束中的一个照射物体,而且由物体传送的光子由桶检测器收集。另一个光束甚至没有穿过物体,撞击多像素检测器(例如,电荷耦合器件(CCD)照相机)。尽管如此,通过将桶检测器测量的强度和像素检测器中每个像素的强度关联,就重现了物体的图像。

[0026] 本公开的系统使用类似于在幻影成像中使用技术的的技术。这两种技术的主要不同

在于,本公开的系统通过射频(RF)能量的使用成像物体,相反地,幻影成像通过光束的使用成像物体。下面紧接着本公开的系统采用技术的详细讨论。

[0027] 在下列描述中,阐述了众多细节以便提供系统的更为彻底的描述。不过,没有这些具体细节而实践本公开的系统这对本领域的技术人员来说是显而易见的。在其他情况下,没有详细描述已知的特征,以便不必要地模糊本公开系统的本质。

[0028] 图 1 示出根据本公开至少一个实施例的超分辨率成像雷达(SRIR)100。在这个图中,超分辨率成像雷达包括脉冲信号发生器 105,阵列桶检测器(ABD)110,虚像透镜 115,虚像扫描检测器 120,处理器(未示出),以及重合电路 125。

[0029] 在超分辨率成像雷达(SRIR)操作期间,脉冲信号发生器 105 传播 N 个射频(RF)能量突发 130, RF 能量的每个突发 130 包括 M+1 个单脉冲 135。每个突发单脉冲中的一个是从属脉冲 140,而且每个突发 130 剩下的 M 个脉冲向目标物体 145 传播。如图中所见, M 个脉冲依次照射物体 145。N 个突发 130 与物体 145 由此产生图像的粒度成反比。

[0030] 阵列桶检测器 110 收集从物体 145 反射的脉冲 150。在一个或更多实施例中,阵列桶检测器 110 包括多个 RF 天线元件。本公开的阵列桶检测器 110 采用各种类型的 RF 天线元件。在某些实施例中,由阵列桶检测器 110 收集的反射脉冲 150 的幅值以数字形式存储。

[0031] 如图所示,通过虚像透镜 115 传播从属脉冲 140。每个突发 130 发出的成像电场 $K_{A\perp}$ 波矢量横向分量必须满足涉及虚像从属电场 $K_{A\perp}$ 波矢量横向分量的条件

$$K_{A\perp}^i = -\frac{1}{M} K_{A\perp}^0。$$

[0032] 在通过虚像透镜传播虚像从属电场后,虚像扫描检测器 120 沿着平面 155 检测虚像从属电场。处理器使用从属脉冲 140,虚像透镜 115 属性,以及虚像扫描检测器 120 属性以计算会出现在虚像扫描检测器 120 的虚像从属电场。重合电路 125 用于计算由阵列桶检测器 110 收集反射脉冲 150 电场和由处理器计算的虚像从属电场的跨时间关联函数。在一个或更多实施例中,重合电路 125 使用由阵列桶检测器 110 收集反射脉冲 150 的幅值并以数字形式存储以计算跨时间关联函数。在模拟重合成像的情况下,与图像像素强度在 $\vec{x}_{2j}$ 相关

$$G^{2(M+1)}(\vec{x}_{2j})=$$

的跨时间关联函数由

$$= \sum_{i=1}^{N_e} \langle E_{0j}^*(T_{0j}, \vec{x}_{2j}) E_{1j}^*(T_{1j}, i) \dots E_{Mj}^*(T_{Mj}, i) E_{Mj}(T_{Mj}, i) \dots E_{1j}(T_{1j}, i) E_{0j}(T_{0j}, \vec{x}_{2j}) \rangle$$

给出。其中, $\vec{x}_{2j}$ 是虚像扫描检测器 120 的位置。以及 $\vec{x}_{1j}$ 是物体 145 的位置。而且 $j = 1, 2, \dots, N$; 以及 j 是与位置 $\vec{x}_{2j} = 1, 2, \dots, N$ 相对应的突发指数。另外, E 是电场, E* 是电场的复合共轭值; 以及 T 是每个突发到达的时间。在可选实施例中,本公开的系统可以使用各种类型的跨时间关联函数。应当注意的是,存在于图中的标出“虚像”盒子中的所有函数可以由软件虚像完成。

[0033] 在可选实施例中,存在于标出“虚像”盒子中的部分或所有项目可以实际上是非虚像设备。例如,在至少一个实施例中,可触摸的 RF 透镜可以由这个图示出的虚像透镜 115 替代。此外,在某些实施例中,可触摸扫描检测器可以由这个系统的虚像扫描检测器 120 替代。在“虚像”设备存在的任何实施例中,处理器用于计算适当的电场。

[0034] 在重合电路 125 计算跨时间关联函数后,重合电路 125 使用跨时间关联函数结果以生成物体 145 图像的像素。每个突发 130 用于生成由此产生图像的一个像素。随后的突

发 130 完整绘出物体 145 的图像。因此,突发 130 的数量会决定最终图像的粒度。

[0035] 图 2 示出根据本公开至少一个实施例的超分辨率成像雷达仿真试验数据。对于这个仿真,为定量幻影成像开发的软件适应于仿真本公开的超分辨率成像雷达。对于过程,为了简化的缘故,做了几个假设,但维持基本的要素。对于特殊仿真,在 1.76cm (17.0GHz)的放射线用于照射由半径为 0.5m 的两个痕迹反射体形成的物体。这两个痕迹反射体隔开 1m,位于距离资源 3.0Km 的位置。该物体由具有 M 个脉冲的突发照射,而且由此产生的图像示出在这个图中。正如图所见,当物体由 50 或 100 个脉冲照射时,目标的轮廓时完全模糊的。当脉冲数量增加到 200-265 时,获得物体的完整解析图片。

[0036] 虽然本文已经公开了某些说明性实施例和方法,本领域的技术人员从前述公开应当清楚在不偏离本公开真实精神和范围的前提下,可以对这些实施例和方法做出修改和变化。本公开的许多例子,他们相互之间不同仅在于其细节的不同。因此,本公开应当仅局限于随附的权利要求和适用法律的规则和准则。

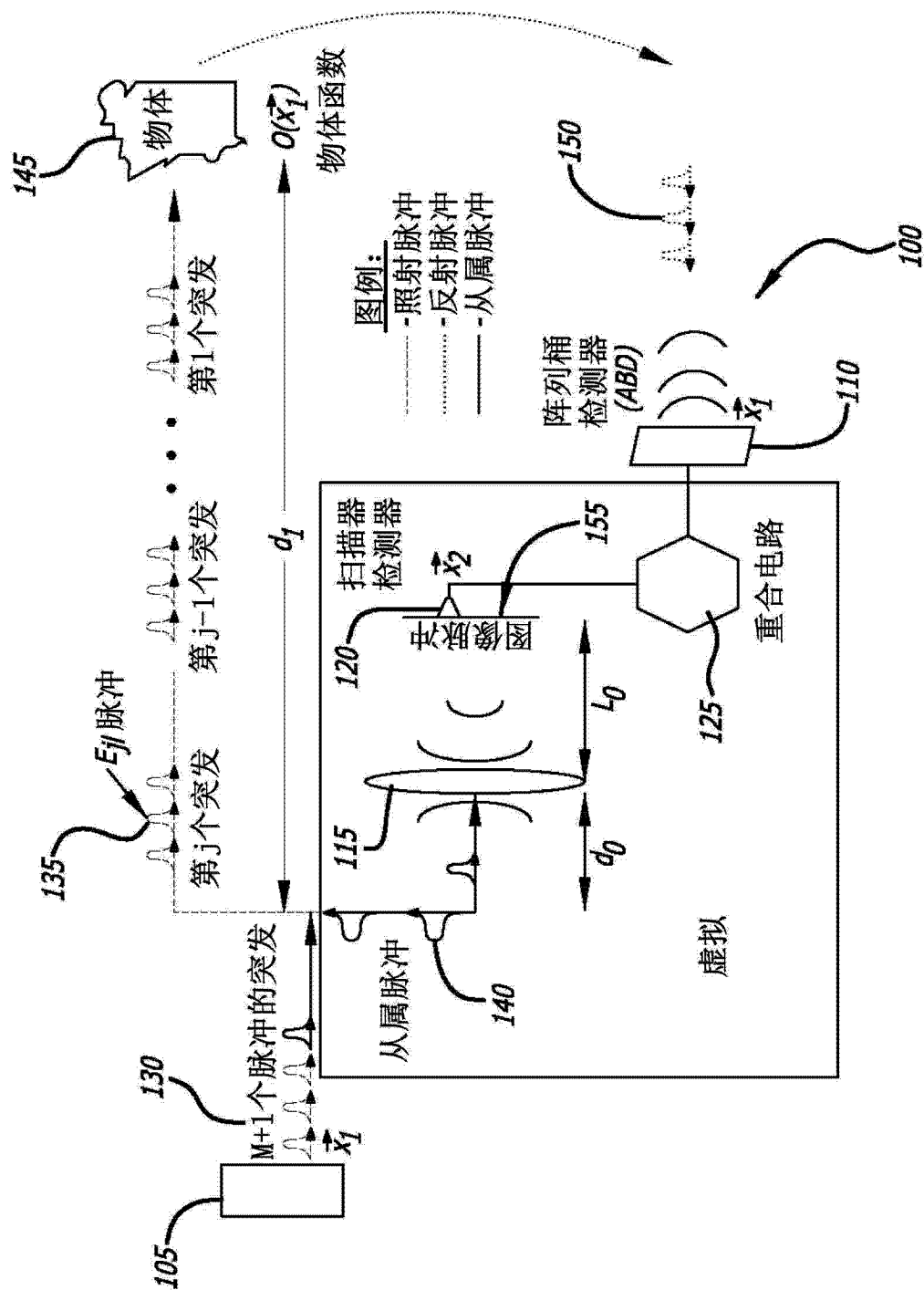


图 1

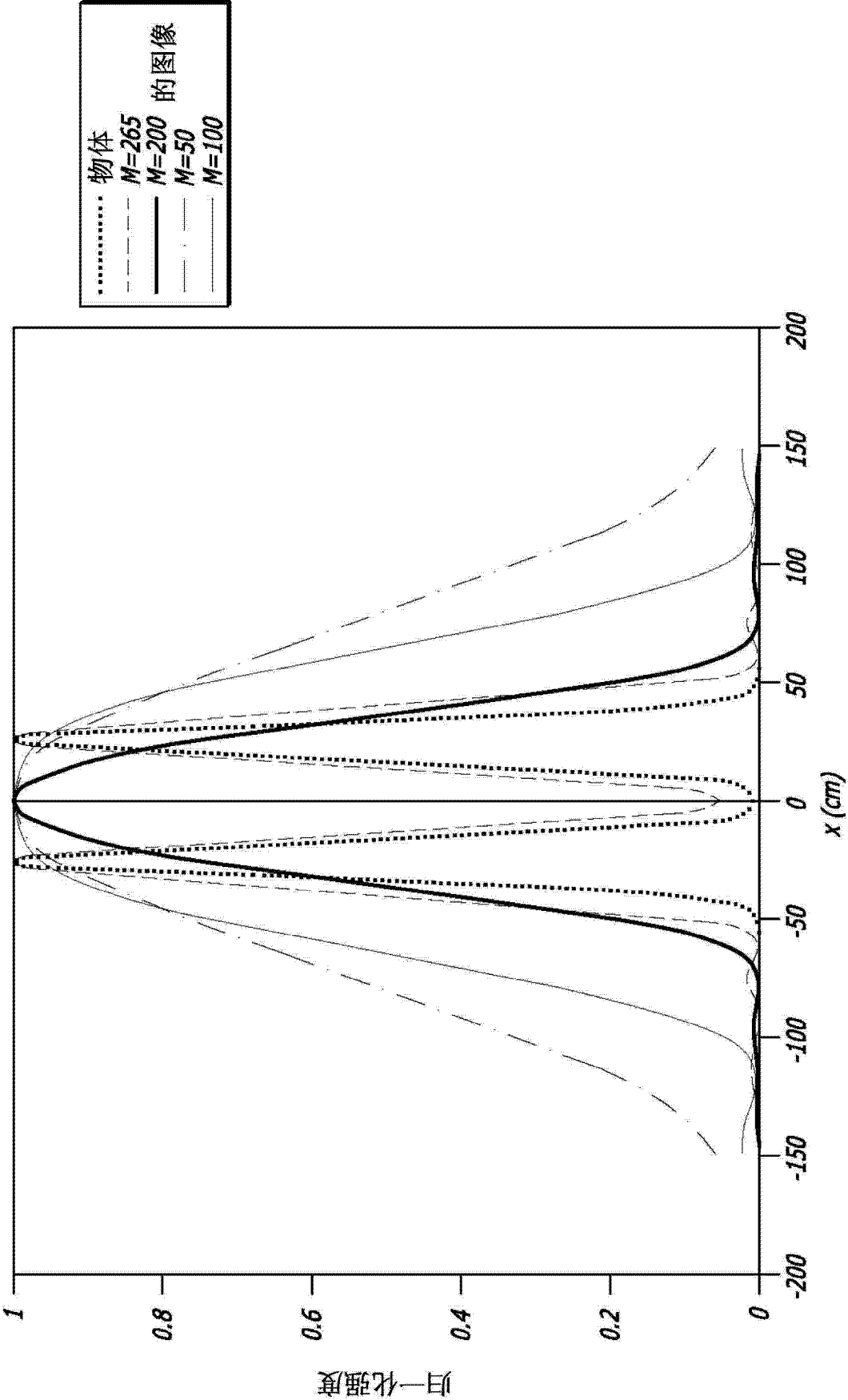


图 2