



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103261909 A

(43) 申请公布日 2013. 08. 21

(21) 申请号 201180050704. 4

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

(22) 申请日 2011. 08. 19

代理人 赵蓉民

(30) 优先权数据

1018933. 0 2010. 11. 09 GB  
61/375, 403 2010. 08. 20 US

(51) Int. Cl.

G01S 7/52(2006. 01)  
G01S 15/89(2006. 01)  
G01N 21/00(2006. 01)  
G01N 22/00(2006. 01)  
G01N 29/00(2006. 01)  
G01V 1/00(2006. 01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2013. 04. 19

(86) PCT申请的申请数据

PCT/GB2011/051564 2011. 08. 19

(87) PCT申请的公布数据

W02012/035312 EN 2012. 03. 22

(71) 申请人 瑟夫技术公司

地址 挪威特隆赫姆

(72) 发明人 B·A·J·安格森 R·汉森

T·A·唐恩

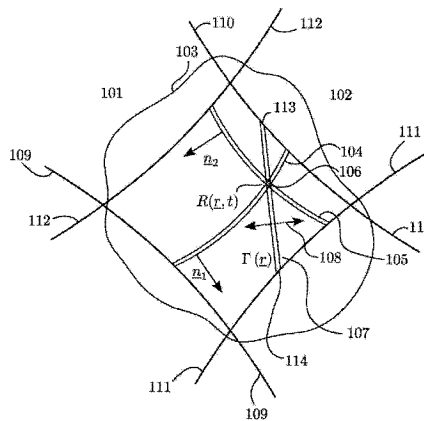
权利要求书4页 说明书20页 附图14页

(54) 发明名称

用于成像非线性相互作用散射的方法

(57) 摘要

第一和第二脉冲波 (105, 105) 沿着第一和第二发射波束 (101, 102) 被发射, 其中至少一个波束在至少一个方向上是宽的, 并且第一和第二脉冲波之间的发射定时被选择成使得脉冲波前重叠在沿着材料物体中的至少一个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  (107) 传播的重叠区  $R(\underline{r}, t)$  (106)。至少接收并处理由重叠区 (106) 中第一和第二波之间的非线性相互作用产生的散射信号, 从而沿着  $\Gamma(\underline{r})$  形成非线性相互作用散射图像信号。通过改变第一和第二脉冲波 (104, 105) 之间的相对发射定时或改变第一和第二发射波束 (101, 102) 的至少一个的方向或两者, 能够横向扫描测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  (107)。该方法适用于为电磁波和弹性波及其组合成像非线性散射源。



1. 一种方法,其用于沿着具有产生波散射的非线性材料参数的材料物体中的至少一个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  测量或成像两个波之间的非线性相互作用散射,所述方法包含的步骤:

a) 在至少一个发射事件中发射,其中 i) 至少一个第一发射脉冲波,其沿着具有第一发射方向的第一发射波束具有第一发射时间和第一发射中心频率,和 ii) 至少一个第二发射脉冲波,其沿着具有第二发射方向的第二发射波束具有第二发射时间和第二发射中心频率,其中所述第一和第二发射方向和所述第一和第二发射时间被设置成使得所述第一和第二脉冲波的脉冲空间重叠在沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的材料物体中随时间传播的重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中,和

b) 选择 i) 所述第一和第二发射时间之间的时间关系,和 ii) 所述第一和第二发射方向的至少一个中的的一项或两者,控制所述材料物体内的所述测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的所述位置,和

c) 用至少一个接收器检测从所述重叠区  $R(\underline{r}, t)$  散射的波,并且生成至少一个接收信号,所述接收信号包括至少非线性相互作用散射信号分量,其涉及在所述重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中的所述第一和第二脉冲波之间的所述非线性相互作用散射的波,和

d) 处理所述接收信号以提取所述非线性相互作用散射信号分量,并且沿着所述测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  形成非线性相互作用测量或图像信号。

2. 根据权利要求 1 所述的用于测量或成像的方法,其中所述提取非线性相互作用信号分量的过程包括所述接收信号的时间频率过滤,其中所述过滤通过所述非线性相互作用散射信号分量并且阻断其他时间频率分量。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的用于测量或成像的方法,其中

a) 所述发射步骤包含至少两个发射事件,并且其中所述第一和第二发射方向和所述第一和第二发射时间之间的所述时间滞后对于所述至少两个发射事件是相同的,并且其中

b) 所述第一和第二脉冲波中的一个在所述至少两个发射事件之间的极性、振幅、相位和频率中的至少一项改变,包括所述第一和第二脉冲波的至少一个对于所述发射事件中的至少一个具有零振幅的可能性,并且其中

c) 提取非线性信号分量的所述过程包括组合来自所述至少两个发射事件的所述接收信号。

4. 根据权利要求 3 所述的用于测量或成像的方法,其中在来自所述至少两个发射事件的信号在步骤 c) 中组合之前,来自所述至少两个发射事件的至少一个的所述接收信号是 i) 延迟修正和 ii) 脉冲失真修正中的一个或两者。

5. 根据前述任一权利要求所述的用于测量或成像非线性相互作用散射的方法,其中

a) 通过选择 i) 所述第一和第二发射时间之间的所述时间关系,和 ii) 所述第一和第二发射方向的至少一个中的一项或两者在所述材料物体中选择多个测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$ ,  $k=1 \dots K$ , 和

b) 根据前述任一权利要求获得相应于每个具体的测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  的所述测量或图像信号。

6. 根据前述任一权利要求所述的用于测量或成像非线性相互作用散射的方法,其中所述发射步骤包含多个发射事件,并且所述发射事件之间的时间差是足够短的,以便在所述

物体内部同时传播至少两个不同的重叠区  $R(\underline{r}, t)$ ，并且所述第一和第二发射脉冲之间的相对定时和所述第一和第二发射方向中的一个和两者在所述发射事件之间改变，以便所述至少两个不同的重叠区沿着至少两个不同的测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  传播，并且来自所述不同的重叠区的所述散射信号被并行地接收和处理以改进测量或成像率。

7. 根据权利要求 3 所述的用于测量或成像的方法，其中

a) 所述第一和第二脉冲波中的一个的脉冲宽度比所述第一和第二波中的另一个的时间振荡周期的一半短，以便所述非线性相互作用重叠区被分为高灵敏度的子区域，其中所述第一和第二波的所述另一个的波场的大小足够高，以便并行地从多于一个测量或像曲线的一组  $\Gamma_k(\underline{r})$ ,  $k=1..K$  获得具有高灵敏度的散射信号，和

b) 来自所述多于一个测量或像曲线的所述接收信号被并行地接收和处理，从而为所述多于一个测量或像曲线并行地获得所述图像信号。

8. 根据前述任一权利要求所述的方法，其中来自用于所述相同测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的多个发射事件的接收信号被平均以减少噪声并改进灵敏度。

9. 根据权利要求 5 所述的用于测量或成像非线性相互作用散射的方法，其中通过在至少两个测量或像曲线上的图像信号之间插值获得用于所述测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  的图像点的图像信号。

10. 根据权利要求 5 或 9 所述的用于测量或成像非线性相互作用散射的方法，其中所述测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  被跨表面空间分布，从而获得用于跨所述表面的非线性相互作用散射的二维图像的图像信号。

11. 根据权利要求 5 或 9 所述的用于测量或成像非线性相互作用散射的方法，其中所述测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  被空间分布在三维区域内，从而获得用于所述区域中的非线性相互作用散射的三维图像的图像信号。

12. 一种仪器，其用于沿着具有产生波散射的非线性材料参数的材料物体中的至少一个测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  测量或成像两个波之间的非线性相互作用散射，所述仪器包括：

a) 发射装置，其被设置成在由下面构成的至少一个发射事件中发射：i) 至少一个第一发射脉冲波，其沿着具有第一发射方向的第一发射波束具有第一发射时间和第一发射中心频率，和 ii) 至少一个第二发射脉冲波，其沿着具有第二发射方向的第二发射波束具有第二发射时间和第二发射中心频率，其中所述发射装置被设置成使得所述第一和第二波束重叠在材料物体的重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中，其中所述重叠区沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  在材料物体中随时间传播，和

b) 控制装置，其被设置成选择 i) 所述第一和第二发射时间之间的时间关系，和 ii) 所述第一和第二发射方向中的至少一个中的一项或两者，从而在空间上控制所述材料物体内的所述测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的所述位置，和

c) 接收装置，其被设置成至少从所述重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中所述第一和第二脉冲波之间的非线性相互作用接收材料物体的散射波分量，并且被设置成生成至少一个接收信号，所述接收信号包括来自至少所述重叠区  $R(\underline{r}, t)$  的至少非线性相互作用散射信号分量，和

d) 处理装置，其被设置成处理所述接收信号以从所述重叠区  $R(\underline{r}, t)$  提取所述非线性相互作用散射信号分量，以沿着所述至少一个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  形成非线性相互作用测量或图像信号。

13. 根据权利要求 12 所述的仪器,其中所述处理装置包括用于所述接收信号的时间频率过滤的装置,其中所述过滤通过所述非线性相互作用散射信号分量并且阻断其他时间频率分量。

14. 根据权利要求 12 或 13 所述的仪器,其中

a) 所述发射装置被设置成为每个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  发射至少两个发射事件,和

b) 所述发射装置包括用于改变所述至少两个发射事件之间的所述第一和第二脉冲波的一个的极性、振幅、相位和频率的至少一个的装置,包括所述第一和第二脉冲波的至少一个对所述至少两个发射事件的至少一个具有零振幅的可能性,并且其中

c) 所述处理装置包括用于在沿着所述测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  形成图像信号的过程中结合来自至少两个发射事件的所述接收信号。

15. 根据权利要求 14 所述的仪器,其中所述处理装置包括这样的装置,其在来自至少两个发射事件的所述信号被结合之前,用 i) 延迟修正和 ii) 脉冲失真修正中的一项或两者修正来自所述至少两个发射事件的至少一个的至少一个接收信号。

16. 根据权利要求 15 所述的仪器,其中所述处理装置包括用于估算 i) 延迟修正和 ii) 脉冲失真修正中的一项或两者的装置。

17. 根据权利要求 12 到 16 的任何一项所述的仪器,其中所述用于接收的装置包含聚焦接收器系统。

18. 根据权利要求 17 所述的仪器,其中所述聚焦接收器系统被设置成随时间动态聚焦,以便焦点在重叠区  $R(\underline{r}, t)$  随时间移动时跟随重叠区  $R(\underline{r}, t)$ 。

19. 根据权利要求 17 或 18 的所述的仪器,其中所述聚焦接收器系统是聚焦摄像机。

20. 根据权利要求 17、18 或 19 所述的仪器,其中所述聚焦接收器系统包括:

多个接收器元件的阵列,其被设置成并行接收所述散射信号,和

装置,其从多组接收器元件并行生成多个接收信号,以便不同的接收信号被并行地分配给不同的测量或像曲线  $\Gamma_m(\underline{r})$ ,  $m=1 \dots M$ 。

21. 根据权利要求 20 所述的仪器,其中所述控制装置包含发射多组发射事件从而为每个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  接收多个接收信号的装置和用于处理所述多个接收信号的装置,所述处理通过下列至少一个执行:

i) 将所述接收信号平均以增加信噪比并由此增加灵敏度,和

ii) 比较所述多个接收信号之间的差异,从而确定所述散射体的移动。

22. 根据权利要求 12 到 21 中的任何一项所述的仪器,其中所述控制装置包括这样的装置,其通过改变 i) 所述第一和第二发射时间之间的时间关系和 ii) 所述第一和第二发射方向中的至少一个的一项和两者,通过所述材料物体的区域中的一组不同的测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$ ,  $k=1 \dots K$  扫描所述测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$ 。

23. 根据权利要求 22 所述的仪器,其中所述用于处理的装置包括用于在邻近测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  之间插值图像信号从而为所述邻近测量或像曲线之间的图像点生成图像信号的装置。

24. 根据权利要求 21、22 或 23 所述的仪器,其中所述控制装置包括用于跨贯穿所述材料物体的表面扫描所述测量或像曲线从而为跨所述表面的非线性相互作用散射的二维图像提供图像信号的装置。

25. 根据权利要求 21、22 或 23 所述的仪器,其中所述控制装置包括用于在所述材料物体的三维区域内扫描所述测量或像曲线从而为所述区域中的非线性相互作用散射的三维图像提供图像信号的装置。

26. 根据权利要求 12 到 25 的任何一项所述的仪器,其中所述第一和第二发射波束的至少一个在至少方位方向上是宽的。

27. 根据权利要求 12 到 26 的任何一项所述的仪器,其中所述第一和第二发射波束的至少一个在垂直方向上是窄的。

28. 根据权利要求 27 所述的仪器,其中所述第一和第二发射波束的另一个至少在方位方向上是窄的,并且所述接收装置包括聚焦接收波束,该聚焦接收波束的轴沿着在所述方位方向上是窄的所述发射波束的轴,并且扫描测量或像曲线是通过扫描所述接收波束和在方位方向上是窄的所述发射波束两者获得的。

29. 根据权利要求 12 到 28 的任何一项所述的仪器,其中所述发射装置和接收装置包括元件阵列,其中相同的阵列表面能够被用于发射所述第一和第二脉冲波两者并至少接收所述非线性相互作用散射信号。

30. 根据权利要求 12 到 29 中的任何一项所述的仪器,其中所述发射装置包括发射所述第一脉冲波的元件阵列和发射所述第二脉冲波的另一个元件阵列。

31. 根据权利要求 12 到 30 中的任何一项所述的仪器,其中所述发射装置包含元件的环形阵列。

32. 根据权利要求 12 到 31 中的任何一项所述的仪器,其中所述第一和第二脉冲波的至少一个是弹性压缩波。

33. 根据权利要求 12 到 32 中的任何一项所述的仪器,其中所述第一和第二脉冲波的至少一个是弹性横波。

34. 根据权利要求 12 到 33 中的任何一项所述的仪器,其中所述第一和第二脉冲波的至少一个是电磁波。

## 用于成像非线性相互作用散射的方法

### 技术领域

[0001] 本发明解决了使用弹性和电磁波及其组合成像非线性散射。其应用在医学和技术领域两者中。

### 背景技术

[0002] 用于电磁(EM)波和弹性(EL)波两者的材料性质通常示出非线性特性,其中材料参数取决于波的场变量的振幅。非线性材料特性的空间改变提供了EM和EL波两者的非线性散射,这种非线性散射源的成像在许多情况中对识别材料性质有用处。EM和EL波的正向波传播和局部散射两者都具有数学相似性,并且因此用于成像的方法和仪器具有相似的结构。EL波的使用的示例是用横波/剪切波和压缩波两者的材料试验、用压缩波的超声医学成像、和海底声纳和地质测量。EM波具有类似使用,其中尤其为提供二维信息给超声图像的医学成像研发波长在0.1-1mm范围的高GHz和THz范围中的EM技术。在红外线和光频范围中的EM成像也为材料试验和医学成像两者提供了有用信息。

[0003] 非线性散射能够用于被分为参数的和共振散射类型的EM和EL波两者。对于EL波,参数散射来源于随局部弹性波场的振幅的局部弹性参数的非线性改变,其中非线性改变的空间改变产生非线性散射。对于EM波,参数散射来源于随局部EM波场的振幅的局部介电常数或磁导率的非线性改变,其中非线性改变的空间改变产生非线性散射。用被称为声波的弹性压缩波,例如用从软质肿瘤组织中微型钙化的超声非线性散射发现的,或用从像矿井的土层中的硬质物体或其他物体的声散射发现的,一个在软质材料和硬质材料之间的界面上得到强烈的非线性参数散射。例如,如用从血液中的微气泡或水中鱼鳔等等填充的气体的超声扩散得到的,在较硬材料和更加软的材料之间的界面得到强烈的非线性散射。

[0004] 用单频率波段入射波,该参数非线性散射在散射波中产生入射频率波段的谐波分量。用局部相互作用的双波段入射波,该参数非线性散射围绕入射频率波段的回旋的波段,其提供围绕入射频率的和差的波段。然而,材料参数的非线性改变也产生正向传播波的聚集的非线性失真。当高频脉冲的脉冲宽度增加超过低频脉冲的近似一半周期时,来自非线性正向传播失真的线性散射具有与局部非线性散射类似的子波,并且在这个情形中很难辨别从入射波的非线性传播失真的线性散射发生的信号分量和从局部非线性散射发生的信号分量。本发明以方法和仪器的方式呈现解决方法,这方法和仪器抑制来源于由非线性正向传播失真产生的分量的强线性散射的分量,并且提取局部非线性散射部件,从而产生局部非线性散射源的空间成像。

[0005] 共振非线性散射具有相关的时间滞后,在一些情形中其能够被用于将来自入射波的局部非线性散射和正向传播失真的信号分量。然而,本发明进一步提供用于成像局部共振图像非线性散射源的优点。

[0006] 对于声波,微气泡示出共振散射,例如其中该共振来源于具有壳层和气体的气泡的非线性弹性和体积近似气泡体积三倍的围绕气泡的共摆动流体质量之间的能量交换。由于弹性和质量随气泡压缩改变,所以共振频率受入射声波场的非线性影响,在散射场中产

生具有大量入射频率的谐波分量(入射频率的  $n$  倍)以及甚至入射频率的子谐波分量(一小部分入射频率)的极其强的非线性散射。然而,为以大大高于气泡共振频率的频率成像,非线性散射是非常低的,并且本发明为以超过共振频率的频率加强成像微气泡提供了解决方法。

[0007] 在波场和原子和分子之间的相互作用中发生共振非线性 EM 散射,这在量子物理学领域中最好地描述。EM 共振散射的示例是与子谐波声散射具有相似性的荧光。双光子量子散射类似于第二谐波参数散射,但是包括随着过程中的时间滞后的详细动力。

[0008] 在材料的 EM 和 EL 波中也得到非线性相互作用,其中例如在所谓的声光效应的过程中 EL 压缩波改变 EM 材料参数。材料中 EM 波的吸收产生材料的辐射力和局部加热,这在所谓的光声效应的过程中生成声波。因此,本发明解决了 EM 和 EL 波两者及其组合,其中本说明书和权利要求中涉及的波能够是 EM 和 / 或 EL 波。

## 发明内容

[0009] 本发明内容给出本发明的内容的简要概述,并且不存在关于本发明范围的任何限制,其中本发明仅由附属权利要求限定。

[0010] 根据本发明,提供了用于沿着实物 / 材料物体(material object)中至少一个测量或像曲线  $T(\underline{r})$  测量或成像两个波之间的非线性相互作用散射的方法,其中非线性材料参数产生波散射,该方法包括的步骤有 a) 在至少一个发射事件中发射,情况如下 i) 至少一个第一发射脉冲波,其沿着具有第一发射方向的第一发射波束具有第一发射时间和第一发射中心频率,和 ii) 至少一个第二发射脉冲波,其沿着具有第二发射方向的第二发射波束具有第二发射时间和第二发射中心频率,其中第一和第二发射方向和第一和第二发射时间被设置成事的来自第一和第二脉冲波的脉冲空间重叠在重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中,其沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  在实物中随时间传播,和 b) 选择下列的一个或两者 i) 所述第一和第二发射时间之间的时间关系,和 ii) 所述第一和第二发射方向的至少一个,从而控制实物内的测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的位置,并且 c) 用至少一个接收器检测从重叠区  $R(\underline{r}, t)$  散射的波,并且生成至少一个接收信号,该信号包括至少非线性相互作用散射信号分量,这些分量涉及在所述重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中从第一和第二脉冲波之间的非线性相互作用散射的波,和 d) 处理所接收的信号,从而提取非线性相互作用散射信号分量并从而相应于所述测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  形成非线性相互作用测量或图像信号。

[0011] 优选地,提取非线性相互作用信号分量的过程包括接收信号的时间频率过滤,其中所述过滤通过所述非线性相互作用散射信号分量并且阻断其他时间频率分量。

[0012] 在优选实施例中, a) 所述发射步骤包括至少两个发射事件,并且所述第一和第二发射方向和所述第一和第二发射时间之间的时间滞后对于所述至少两个发射事件是相同的, b) 所述第一和第二脉冲波的一个在所述至少两个发射事件之间极性、振幅、相位和频率的至少一个改变,包括所述第一和第二脉冲波的至少一个对于至少一个所述发射事件具有零振幅,并且 c) 提取非线性信号分量的过程包括组合 / 结合来自所述至少两个发射事件的接收信号。

[0013] 优选地在来自所述至少两个发射事件的信号在步骤 c) 中结合之前,来自所述至少两个发射事件的至少一个的接收信号经下列一个或两个操作, i) 延迟修正和 ii) 脉冲失真

修正。

[0014] 在优选的实施例中, a) 通过选择下列一项或两项在实物中选择多个测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$ ,  $k=1 \dots K$ , i) 所述第一和第二发射时间之间的时间关系, 和 ii) 所述第一和第二发射方向的至少一个, 和 b) 如上所述获得相应于每个具体的测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的测量或图像信号。

[0015] 优选地, 所述发射步骤包括发射多个发射事件, 其中所述发射事件之间的发射时间足够长, 以便至少两个不同的重叠区在物体内部同时传播, 并且所述第一和第二发射脉冲和所述第一和第二发射方向之间的相对正时在发射事件之间改变, 以便为了测量或成像的改进率, 所述至少两个不同的重叠区沿着至少两个不同的测量或像曲线传播, 并且并行地接收和处理来自所述不同重叠区的散射信号。

[0016] 在优选的实施例中, a) 所述第一和第二脉冲波的一个的脉冲宽度比所述第一和第二波的另一个的时间振荡周期的一半短, 以便非线性相互作用重叠区被分为高灵敏度的子区域, 其中所述第一和第二波的所述另一个的波场的数值 / 大小 (magnitude) 足够高, 以便并行地从多于一个测量或像曲线的一组  $\Gamma_k(\underline{r})$ ,  $k=1 \dots K$  获得具有高灵敏度的散射信号, 和 b) 并行地 / 同时 (in parallel) 接收和处理来自多于一个测量或像曲线的接收信号, 从而为所述多于一个测量或像曲线同时获得图像信号。

[0017] 优选地用于同一测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的来自多个发射事件的接收信号被平均从而减少噪声并改进灵敏度。

[0018] 优选地通过在至少两个测量或像曲线上的图像信号之间插值获得用于在所述测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  之间的图像点的图像信号。

[0019] 优选地所述测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  跨表面空间分布, 从而为跨所述表面散射的非线性相互作用的二维图像获得图像信号。

[0020] 优选地所述测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  在三维区域内空间分布, 从而为在所述区域中散射的非线性相互作用的三维图像获得图像信号。

[0021] 根据另一方面, 本发明提供了用于测量或成像在沿着实物 / 材料物体中至少一个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的两个波之间非线性相互作用散射的仪器, 其中非线性材料参数产生波散射, 该仪器包括 a) 发射装置, 其经设置从而发射由下列组成的至少一种发射事件 i) 沿着具有第一发射方向的第一发射波束具有第一发射时间和第一发射中心频率的至少一个第一发射脉冲波, 和 ii) 沿着具有第二发射方向的第二发射波束具有第二发射时间和第二发射中心频率的至少一个第二发射脉冲波, 其中发射装置被设置成使得所述第一和第二波束在实物中的重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中重叠, 其中所述重叠区在实物中沿着测量或像曲线  $T(\underline{r})$  随时间传播, b) 控制装置, 其经设置从而选择下列的一个或两个 i) 第一和第二发射时间之间的时间关系, 和 ii) 所述第一和第二发射方向的至少一个, 从而控制测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  在实物内的空间中的位置, c) 接收装置, 其被设置成至少从所述重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中所述第一和第二脉冲波之间的非线性相互作用接收来自实物的散射波, 并且经设置成产生至少一个接收信号, 该信号包括来自至少装置重叠区  $R(\underline{r}, t)$  的至少非线性相互作用散射的分量, 和 d) 处理装置, 经设置从而处理所述接收信号, 从而从所述重叠区  $R(\underline{r}, t)$  提取非线性相互作用散射信号分量, 从而沿着至少一个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  形成非线性相互作用测量或图像信号。



[0022] 优选地,所述处理装置包括用于接收信号的时间频率过滤的装置,其中所述过滤通过所述非线性相互作用散射信号分量并且阻断其他时间频率分量。

[0023] 在优选的实施例中,a)所述发射装置经设置从而为每个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  发射至少两个发射事件,b)所述发射装置包括用于在所述至少两个发射事件之间改变所述第一和第二脉冲波的一个的极性、振幅、相位和频率的至少一个的装置,其允许所述第一和第二脉冲波的至少一个为所述至少两个发射事件的至少一个具有零振幅,和 c)所述处理装置包括用于在沿着所述测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  形成图像信号的过程中组合来自至少两个发射事件的接收信号的装置。

[0024] 优选地所述处理装置包括在结合来自至少两个发射事件的信号之前,用 i)延迟修正和 ii)脉冲失真修正的一个或两个修正来自所述至少两个发射事件的至少一个的至少一个接收信号。

[0025] 优选地,所述处理装置包括用于估算 i)延迟修正和 ii)脉冲失真修正的一个或两个的装置。

[0026] 优选地所述用于接收的装置包括聚焦接收器系统。优选地,所述聚焦接收器系统被设置成随时间动态聚焦,以便该焦点在重叠区  $R(\underline{r}, t)$  随时间移动时跟随重叠区  $R(\underline{r}, t)$ 。优选地所述聚焦接收器系统是聚焦摄像机。

[0027] 在优选的实施例中,所述聚焦接收器系统包括 a) 多个接收器元件的阵列,其经设置从而并行地/同时(in parallel)接收散射信号,和 b) 从多组接收器元件并行地/同时生成多个接收信号的装置,以便不同的接收信号被并行地/同时分配给不同的测量或像曲线  $\Gamma_m(\underline{r}), m=1 \dots M$ 。

[0028] 优选地所述控制装置包括发射多组发射事件的装置和用于将来自多组发射事件的所述不同的接收信号平均的装置,从而产生不同的平均接收信号并将所述不同的平均接收信号分配给所述不同的测量或像曲线。

[0029] 一组发射事件可以是单个发射事件或多个发射事件,其提供多个测量或像曲线。如其他地方更详细所述,单个发射事件可以引起多个的子区域的高灵敏度,其依次引起多个测量或像曲线。类似地,多个发射事件(其每个都可能引起或不引起多个子区域)可以引起多个平行测量或像曲线。然后,该组发射事件可以被发射多次,以便从多个测量或像曲线的每个上升的信号能够被平均(即为每个测量或像曲线产生平均的信号)。

[0030] 优选地所述控制装置包括发射多组发射事件从而为每个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  接收多个接收信号的装置和用于处理所述多个接收信号的装置,其中所述处理通过下列的至少一项 i)将接收信号平均从而增加信噪比由此增加灵敏度,和 ii)比较所述多个接收信号之间的差值,从而确定散射体的移动。

[0031] 优选地所述控制装置包括这样的装置,其通过改变下列的一项或两项 i)所述第一和第二发射时间之间的时间关系和 ii)所述第一和第二发射方向的至少一个,从而在实物的区域中通过一组不同的测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r}), k=1 \dots K$  扫描所述测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$ 。

[0032] 优选地所述用于处理的装置包括用于在邻近测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  之间插值图像信号的装置,从而为所述邻近测量或像曲线之间的图像点生成图像信号。

[0033] 在一些优选的实施例中,所述控制装置包括用于跨通过所述实物的表面扫描所述测量或像曲线的装置,从而为跨所述表面的非线性相互作用散射的二维图像提供图像信

号。

[0034] 所述控制装置可以包括用于在所述实物的三维区域内扫描所述测量或像曲线的装置,从而为所述区域中的非线性相互作用散射的三维图像提供图像信号。

[0035] 优选地所述第一和第二发射波束的至少一个在至少方位方向上是宽的。更优选地,所述第一和第二发射波束的另一个在至少方位方向上时窄的,并且接收装置包括轴沿着方位方向上窄的发射波束的轴的聚焦接收波束,并且扫描测量或像曲线是通过扫描接收波束和方位方向上是窄的发射波束两者获得的。

[0036] 优选地所述发射装置和接收装置包括元件阵列,其中相同阵列表面能够被用于发射所述第一和第二脉冲波两者并且至少接收非线性相互作用散射信号。

[0037] 优选地,所述发射装置包括发射所述第一脉冲波的元件阵列和发射所述第二脉冲波的另一个元件阵列。

[0038] 优选地,所述发射装置包含环形元件阵列。

[0039] 所述第一和第二脉冲波的至少一个可以是弹性压缩波。所述第一和第二脉冲波的至少一个可以是弹性横波。所述第一和第二脉冲电磁波的至少一个可以是电磁波。

[0040] 该方法和仪器适用于为电磁和弹性波及其组合的非线性材料参数成像。沿着第一和第二发射波束发射第一和第二脉冲波,其中在优选的实施例中至少一个波束在至少一个方向上是宽的。选择所述第一和第二脉冲波之间的发射定时,以便波脉冲在沿着实物中的测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  传播的重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中重叠。至少接收并处理在重叠区中所述第一和第二波之间非线性相互作用散射产生的散射信号,从而沿着  $\Gamma(\underline{r})$  形成非线性相互作用散射图像信号。通过改变第一和第二脉冲波之间的相对发射定时或改变第一和第二发射波束的方向或两者,可以二维或三维横向扫描测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$ ,从而形成物体的二维或三维图像。该方法增强了散射体的测量或成像,这些散射体比周围介质更软或更硬,并且该方法例如对医学成像中的微钙化和造影剂微气泡成像、土层中像矿井的硬式结构的成像、潜水员血液中的气泡形成的成像、和水中的鱼等的鱼鳔的成像有用,但不限制于此。

## 附图说明

[0041] 现在将仅通过示例并参考附图描述本发明的某些优选的实施例,其中:

[0042] 图 1a 示出沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  获得非线性相互作用测量或图像信号的基本原理;

[0043] 图 1b 示出沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的重叠区  $R(\underline{r}, t)$  的有效传播速度的计算;

[0044] 图 2a 和 2b 示出入射第一和第二发射时间频率波段的和和差频率波段的形成和通过在时间频率域中过滤的非线性相互作用散射信号的提取;

[0045] 图 2c 示出当第一中心频率小于第二发射波的时间频率带宽时,入射第一和第二发射时间频率波段的和和差频率波段的形成;

[0046] 图 3 示出当一个脉冲的频率比另一个脉冲的带宽低很多时非线性相互作用源项被如何分解为子区域;

[0047] 图 4 示出从一组第一和发射时间和第一和第二发射波束方向上升的灵敏度子区域的传播;

[0048] 图 5 示出第一和第二发射时间之间的发射时间差的改变能够被怎样用于将灵敏

度子区域移动到先前的低灵敏度区域；

[0049] 图 6 示出根据本发明的仪器的方框图；

[0050] 图 7 示出用于检测超声波的非线性相互作用散射信号的第一和第二波发射装置和接收装置的示例实施例；

[0051] 图 8 示出用于检测超声波的非线性相互作用散射信号的第一和第二波发射装置和接收装置的另一个示例实施例；

[0052] 图 9 示出用于检测超声波的非线性相互作用散射信号的第一和第二波发射装置和接收装置的还另一个示例实施例；

[0053] 图 10 示出其中第一和第二发射波束的一个是窄波束的实施例；和

[0054] 图 11 示出其中接收器系统是摄像机的实施例。

### 具体实施方式

[0055] 在图 1a 中示出由线 109 和 110 定边界的第一脉冲波波束 101 和由线 111 和 112 定边界的第二脉冲波波束 102, 其中第一和第二波束两者都入射到物体 103 上。在这个示例中, 两个波束在为纸平面的方位面中都是宽的, 但是在这个示例中优选在垂直于方位面的垂直方向上是窄的。图 10 中示出其中在方位方向上一个波束是窄的而另一个波束是宽的实施例。继续图 1, 104 表示沿着具有垂直于脉冲波前的单位法线  $\underline{n}_1(\underline{r})$  的第一波束传播的第一脉冲波场, 其中  $\underline{r}$  是结合的方位方向和垂直方向的三维空间中的坐标向量。第二脉冲波场 105 沿着第二波束传播, 其具有垂直于脉冲波前的单位法线  $\underline{n}_2(\underline{r})$ 。第一和第二脉冲波具有第一和第二中心频率  $\omega_1=2\pi f_1$  和  $\omega_2=2\pi f_2$ , 并且例如其能够用波场表示。

[0056] 脉冲波 104 :  $p_1(\underline{r}, t) = \text{Re} \left\{ \tilde{p}_1(\underline{r}, t) e^{i\omega_1(t - \underline{n}_1 \underline{r}/c)} \right\}$

[0057] 脉冲波 105 :  $p_2(\underline{r}, t) = \text{Re} \left\{ \tilde{p}_2(\underline{r}, t) e^{i\omega_2(t - \underline{n}_2 \underline{r}/c)} \right\}$  (1)

[0058] 第一和第二脉冲波 104 和 105 在被示为 106 的区域  $R(\underline{r}, t)$  中重叠。重叠区沿着示为 107 的图像或测量曲线  $\Gamma(\underline{r})$  随时间传播。通过变换第一和第二脉冲波之间的发射时间的差, 测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  能够被如箭头 108 所示的横向移动。根据本发明的优选实施例,  $\Gamma(\underline{r})$  的这个移动允许为成像扫描物体。用第一(101)和第二(102)发射波束的固定选择,  $\Gamma(\underline{r})$  的尾端界线 113 和 114 由波束界线 109-112 限制。

[0059] 在这个示例中, 重叠区以有效传播速度沿着  $\Gamma(\underline{r})$  传播(移动), 其中有效传播速度为

[0060]

$$c_R = \frac{c}{\cos \varphi} = \frac{2c}{|\underline{n}_1(\underline{r}) + \underline{n}_2(\underline{r})|} \quad (2)$$

[0061] 其中  $c$  是两个波束中的波的传播速度, 并且  $2\varphi$  是两个波束法线之间的角。参考图 1b 导出这个表达式, 其中 104 和 105 示出在被示为 106 的重叠区  $R(\underline{r}, t)$  的中心在时间  $t$  的第一和第二脉冲波前。在时间  $\Delta t$  之后, 波前垂直于波前移动距离  $c \Delta t$  到分别用于第一和第二脉冲波的波前 124 和 125, 即沿着法线  $\underline{n}_1$  和  $\underline{n}_2$  移动。现在重叠区的中心已经传播到 126,

并且传播线 127 的长度是  $c\Delta t / \cos\varphi$ , 其中  $2\varphi$  是波前 124 和 125 的法线之间的角。在 120 所示的细节示出  $|n_1(\underline{r})+n_2(\underline{r})|=2\cos\varphi$ , 其证明是等式 (2)。

[0062] 当该非线性材料参数能够近似于波场中的二阶时, 例如能够为超声波气压波计算波动方程, 其包括非线性的正向传播和散射现象, 该方程为:

[0063]

$$\underbrace{\nabla^2 p(\underline{r}, t) - \frac{1}{c_0^2(\underline{r})} \frac{\partial^2 p(\underline{r}, t)}{\partial t^2}}_{(1) \text{Linear propagation}} + \underbrace{\frac{\beta_p(\underline{r})}{c_0^2(\underline{r})} \frac{\partial^2 p(\underline{r}, t)^2}{\partial t^2}}_{(2) \text{Nonlinear propagation}} - \underbrace{h_p(\underline{r}, t) \otimes \frac{1}{c_0^2(\underline{r})} \frac{\partial^2 p(\underline{r}, t)}{\partial t^2}}_{(3) \text{Absorption}} \quad (3)$$

$$= \underbrace{\frac{\sigma_l(\underline{r})}{c_0^2(\underline{r})} \frac{\partial^2 p(\underline{r}, t)}{\partial t^2} + \nabla(\gamma(\underline{r}) \nabla p(\underline{r}, t))}_{(4) \text{Linear scattering source terms}} - \underbrace{\frac{\sigma_n(\underline{r})}{c_0^2(\underline{r})} \frac{\partial^2 p(\underline{r}, t)^2}{\partial t^2}}_{(5) \text{Nonlinear scattering source term}}$$

[0064] 其中  $p(\underline{r}, t)$  是脉冲波场变量, 其用于超声波压力波是声压。  $c_0(\underline{r})$  是用于低场振幅的线性波传播速度,  $\beta_p(\underline{r})$  是非线性传播参数,  $h_p(\underline{r}, t)$  是表示加热的波能吸收的卷积核,  $\sigma_l(\underline{r})$  和  $\gamma(\underline{r})$  是线性散射参数, 和  $\sigma_n(\underline{r})$  是非线性散射参数。左侧传播参数在  $>$  近似波长的范围上随  $\underline{r}$  改变, 而右侧散射参数在  $<$  近似波长的范围上随  $\underline{r}$  改变。能够计算用于电磁波之类的等式, 其表示用于 EM 波之类的非线性传播和散射现象。

[0065] 线性材料参数中的空间改变产生沿着波的整体传播路径的独立于彼此的波  $p_1(\underline{r}, t)$  和  $p_2(\underline{r}, t)$  两者的线性散射, 并且产生频率在入射波的波段内的散射波。对于相对于波中得到的场参数的振幅材料参数中非线性足够高的材料, 非线性影响波的传播和散射两者。

[0066] 等式 (3) 中的不同项对波的传播和散射具有不同影响: 线性传播项 (1) 引导入射波的正向空间传播, 而不增加新的频率分量。线性散射源项 (4) 产生入射波的局部三色, 而不增加新的频率分量, 也就是说线性散射波具有与入射波相同的频率分量。然而, 对于相对于波场振幅在材料参数中非线性足够高的材料, 非线性波的影响传播和局部散射两者。非线性材料参数的缓慢的改变 (在  $>$  ~波长的范围上接近于常数) 将提供入射波的非线性正向传播失真, 其在振幅中通过项 (2) 随传播距离积聚 / 增加。非线性材料参数的快速改变 (在  $<$  ~波长的范围上) 通过项 (5) 产生入射波的局部非线性散射。

[0067] 非线性传播 (2) 和散射 (5) 现象是在两者都与  $p(\underline{r}, t)^2$  成比例的这个近似中 (二阶)。对于位两个分量的和  $p=p_1+p_2$  的波, 非线性传播和散射两者都由下列给出:

[0068]

$$\sim p(\underline{r}, t)^2 = (p_1(\underline{r}, t) + p_2(\underline{r}, t))^2 = \underbrace{p_1(\underline{r}, t)^2}_{\text{nonlin self distortion}} + \underbrace{2p_1(\underline{r}, t)p_2(\underline{r}, t)}_{\text{nonlin interaction}} + \underbrace{p_2(\underline{r}, t)^2}_{\text{nonlin self distortion}} \quad (4)$$

[0069] 在时间域中两个函数的放大在时间频率域中产生函数时间的傅里叶变换的卷积 (即时间频率谱)。这个卷积引入功能的乘积中的频率分量, 其为放大的因子的频率分量的和和差。我们在散射信号中定义两个组非线性失真项:

[0070] A 组来源于入射波中的正向累积非线性传播失真分量的线性散射, 即为等式 (3) 中项 (2) 和项 (4) 的组合, 其中线性散射即等式 (3) 的项 (4), 和

[0071] B 组直接来源于用线性传播的入射波中原始的频率分量的局部的非线性散射,即项(1)和项(5)直接的相互作用,其中局部的非线性散射即为项(5)。

[0072] 也存在 C 组,其辱来自入射波中正向累积非线性传播失真分量的项(5),及等式(3)中的项(2)和项(5)之间的相互作用,但是典型的非线性材料参数过低以至于该组是可忽略的。

[0073] 对于散射信号的 A 组和 B 组两者,对于自失真项,入射频谱之间的卷积引入谐波波段和子谐波波段,谐波波段中和频率给出大约是入射频率的整数倍的波段,并且子谐波波段中差频率给出低于由入射脉冲的包络线确定的入射频率以下的波段。对于非线性自失真,在入射波束的整个传播路径上积聚非线性传播失真,并且因此 A 组分量通常比局部散射中来源的 B 组分量强很多,除非在像用超声造影剂微气泡的共振散射或光学荧光和双光子散射的一些情况中,其中自失真散射(B 组)是同等高的。非线性自失真的 A 组和 B 组分量也具有相同波形特征,以便其通常难以提取局部散射的非线性自失真分量(B 组),除非在共振散射的一些情况中。

[0074] 与自失真项相反,在沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的两个入射脉冲波之间的重叠区  $R(\underline{r}, t)$  中只得到非线性相互作用项。因此能够使得提供入射波的非线性相互作用正向传播失真的正向传播距离比用于非线性自失真项的短很多,限制 A 组分量的振幅。通常想将重叠区  $R(\underline{r}, t)$  设计得足够小,以便 B 组分量的振幅比 A 组分量的振幅高,这允许测量或成像局部非线性相互作用散射(B 组)。

[0075] 如关于图 2a 讨论的,这个现象用于本发明的第一实施例,从而为测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  获得散射波的非线性相互作用分量。在这个图 201 和 202 中示出入射脉冲波 104 和 105 的时间频率谱,其中  $f_1 \approx f_2/3$  用于插图的目的。相互作用项中的两个波场的乘积等于频率域内的卷积,其以入射波段的和和差频率产生非直线型相互作用项(等式(4))中的频率波段。然后,非线性相互作用项  $\sim 2p_1(\underline{r}, t)p_2(\underline{r}, t)$  的时间频率谱是如 203 和 204 所示的 201 和 202 的卷积。A 组和 B 组分量提供散射信号的类似的波形特征和从而 A 组分量的数值为局部非线性相互作用散射(B 组)的灵敏度提供下限。然而,重叠区  $R(\underline{r}, t)$  的尺寸足够小,存在许多情况,其中 A 组分量与局部非线性相互作用散射分量(B 组)相比是弱的。

[0076] 沿着  $\Gamma(\underline{r})$  接收或测量来自  $R(\underline{r}, t)$  的非线性相互作用散射信号提供沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的基本的测量或图像信号。例如能够用时间灵敏探测器系统获得沿着提取具有空间分辨率的散射波,由于沿着  $\Gamma(\underline{r})$  从  $R(\underline{r}, t)$  的散射发生具有从图 1a 中  $\Gamma(\underline{r})$  的顶点 113 到底点 114 的累积时间滞后。例如图 7-11 中所述,也能够用聚焦检测系统获得接收或测量空间分辨率沿着  $\Gamma(\underline{r})$  的非线性相互作用散射信号,该系统有选择地观察沿着  $\Gamma(\underline{r})$  的聚焦区域,例如摄像机系统(例如, CCD 摄像机)或动态聚焦的接收器元件阵列(例如使用波束形成技术),或为有利地改进空间和对比度分辨率其能够结合时间滞后和聚焦探测/拾取系统。

[0077] 当入射频率波段 201 和 202 被设置成以使得非线性相互作用散射波段 203 和 204 不存在重叠时,如图 2a 所示,例如通过用图 2a 所示的带通滤波器 205 和 206 带通过滤时间频率域中的接收信号,能够线性地抑制散射波段 201 和 202 提取非线性相互作用散射分量。为了增加非线性相互作用散射的灵敏度,能够形式合并以图像信号的波段 203 和 204 两者的输出。

[0078] 例如通过横向改变第一和第二脉冲波的发射之间的定时,或改变第一和第二波束的至少一个的方向,或其组合能够横向扫描测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$ , 并且通过这个扫描,能够为一组多次测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$ ,  $k=1 \dots K$  获得图像数据,这些曲线在物体的二维或三维空间中分布,从而形成物体的二维或三维图像。通过当曲线之间的距离关于系统的基本空间分辨率足够短时插值,能够获得这些测量或像曲线  $\Gamma_k(\underline{r})$  之间的图像数据,其中该基本空间分辨率由  $R(\underline{r}, t)$  结合聚焦接收器系统的空间分辨率的细节给出。

[0079] 能够通过使用在第一和第二脉冲波的发射之间具有相同时间关系并且第一和第二波束的方向相同的至少两个发射事件测量散射体的移动或位移,以便来自第二发射事件的重叠区沿着与用于第一发射事件相同的测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  传播。然后随着来自两个发射事件的接收信号之间的相位和包络线的改变,会得到两个发射事件之间散射体的移动。相位改变通常被称作多普勒效应,并且引起对移动的最灵敏的检测。其只示出沿着两个入射波的和相位的坡度的移动或位移的分量,其中在图 1a、1b 的示例中其沿着  $n_1+n_2$ 。随测量或像曲线的横向扫描获得的图像中的斑点的改变,并且分析区域(即沿着每个  $\Gamma(\underline{r})$  的至少两个发射事件)的两个图像之间的斑点图样的改变会为 3D 成像给出完全的位移矢量并且为 2D 成像给出平面中或表面上的位移矢量的分量。

[0080] 在许多情形中,通过正向传播失真或局部非线性散射或其两者,能够从入射波段 201 或 202 的谐波自失真分量得到具有非线性散射波段 203 和 204 的干涉波段,减少对非线性相互作用散射的灵敏度。改进这个情况的一个方式使发射两个脉冲组,为第二组边和  $p_1$  和  $P_2$  的一个的极性。然后用于第二发射的散射非线性相互作用项 $\sim$ 的极性会改变极性,而用于 A 组和 B 组两者散射的偶数的(第二、第四...)谐波自失真分量 $\sim p_1^2$  和  $p_2^2$  不会改变极性。由此,在该方法中从这两个发射时间中减去接收信号通常被称作脉冲倒置,然后会增强入射波段的偶数谐波分量上的非线性相互作用散射项。能够通过时间域中过滤抑制入射波段 201 和 202 的线性散射分量。

[0081] 在图 2a 中的示例中,主要是入射波段 201 的谐波分量干涉非线性相互作用光谱,并且在第二发射事件中能够有利地改变  $P_2$  的信号,其中减法接收信号会抵消 201 及其全部谐波,而检索非线性相互作用光谱 203 和 204。因此,入射光谱 202 能够通过过滤抑制。在这个示例中,也能够通过在第二发射事件中只发射第一脉冲  $p_1$  并且从来自包括  $P_2$  的第一发射事件的接收信号减去来自这个第二发射事件的接收信号,抑制来自入射光谱 201 及其谐波分量的干涉,其中第一和第二发射时间都用 205 (和选择性地 206) 带通过滤。忽略第二发射事件中的第二发射波段减少物体对波的暴露,并且减少物体应力或破坏的加热或其他潜在源。本领域的任何技术人员能够研发这些方案的改变。

[0082] 图 2b 示出图 2a 中光谱的变形例,其中围绕  $f_1$  的发射光谱 221 和围绕  $f_2$  的 222 现在这样闭合以便在很好地低于较低发射波段 221 的频率的围绕  $f_1-f_2$  的非线性相互作用卷积光谱,而在接近较高的发射波段 222 频率两倍的频率(即接近于 222 的第二谐波分量)得到围绕  $f_1+f_2$  的非线性相互作用卷积光谱 224。通过用过滤器 225 带通过滤能够分离低频相互作用散布范围 223,并且用过滤器 226 能够分离高频相互作用散布范围 224。也能够使用脉冲逆转技术,其中例如高频发射光谱 222 的极性在第二发射事件中改变。因此围绕  $f_2$  的带阻过滤能够用于去除接收信号中的 222 的光谱。低非线性相互作用散射波段 223 的减少频率提供了接收时这个波段的低吸收率并且增加了对非线性相互作用散射的灵敏度。本

领域的任何技术人员能够研发这些方案的改变。

[0083] 为了进一步改进用于物体中大深度的非线性相互作用项  $\sim 2p_1(\underline{r}, t)p_2(\underline{r}, t)$  的灵敏度, 其对为低吸选择尽可能低的低频(LF)有用, 但是为了得到充分对准波束选择足够高频率。选择高的高频(HF) $f_2$ , 从而得到足够的空间分辨率用于到物体中的给定成像深度, 例如频率比  $f_1:f_2 \sim 1:5-1:30$ 。在尤其优选的实施例中该比值大约 1:10。为了超声波成像, 例如在一个应用中能够选择  $f_1 \sim 10\text{MHz}$ , 从而用  $f_1 \sim 1\text{MHz}$  成像低至 40mm, 或在另一个应用中选择  $f_2 \sim 3.5\text{MHz}$  从而用  $f_1 \sim 0.3\text{MHz}$  成像低至 150mm, 也就是说频率比大约 1:10。为 EM 波的散射能够得到类似示例。

[0084] 在图 2c 中, 对于这种情况示出用于  $p_1$  的示例入射 LF 光谱 210 和用于  $p_2$  的示例入射 HF 光谱 211, 其卷积和和差频率光谱为来自等式(4)中的  $p_1$  和  $p_2$  的非线性相互作用乘积的 212 和 213。212 和 213 的中心频率分别为  $f_2+f_1$  和  $f_2 - f_1$ 。在这个示例中和和差频率光谱 212 和 213 和入射 HF 光谱 211 彼此重叠。在频率光谱 210 和 211 之间的卷积中, 在 LF 光谱 210 的波段宽度  $B_1$  上得到 HF 光谱 211 的邻近频率分量的平均。这个平均化也产生光谱 212 和 213 的边缘偏斜。当 HF 脉冲比 LF 脉冲短得多时, HF 光谱 211 中的频率分辨率比 210 的波段宽度  $B_1$  宽, 并且这个平均对和和差光谱 212 和 213 的影响可忽略, 并且在等式(5-9)中的分析中允许连续 LF 振荡的假设(即, 无限长 LF 脉冲)。

[0085] 图 2c 示出这样的示例, 其中在和和差光谱 212 和 213 和原始 HF 光谱 211 之间存在相当大的重叠。这给出信号处理的机会, 其抑制接收信号中 A 组散射分量(上面定义)。由此这个抑制改进了对 B 组散射分量的灵敏度, 并且下面进一步讨论。然而, 由于重叠区的尺寸小, A 组分量通常具有非常低的振幅, 以便在许多情况中得到对 B 组散射分量足够的灵敏度, 而不需要增加对 A 组分量的抑制。在这个情形中能够通过使用组合 LF 和 HF 脉冲发射的两个发射事件通过脉冲逆转技术从接收信号检索 B 组分量, 改变用于第二发射事件的 LF 脉冲  $p_1$  的极性。然后, 散射非线性相互作用项(212 和 213)  $\sim p_1p_2$  的极性会改变用于第二发射事件的极性, 而线性散射 HF 信号(211)不改变。然后, 减去来自两个发射事件的接收信号会强烈地已知线性散射 HF 信号(211)并且从  $R(\underline{r}, t)$  提取非线性散射 HF 信号(212 和 213)。在这个过程中也会抑制 LF 脉冲的偶数谐波分量。

[0086] 通过在时间频率域中过滤能够在接收信号中抑制来自 LF 信号的频率分量, 包括基本和谐波分量两者, 并且从两个发射事件减去过滤的接收信号会高度抑制来自高频波段 211 的线性散射频率分量, 并为进一步处理提取非线性相互作用散射频率波段 212 和 213, 从而沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  形成图像信号。也能够通过使用其中只发射第一脉冲波(即 LF)的第一发射事件抑制来自第一频率范围(即, LF 波段)的散射信号及其谐波分量, 并且从来自其中发射第一和第二脉冲波两者的第二发射事件的接收信号减去来自这个第一发射事件的接收信号。然后需要为局部非线性相互作用散射信号的脉冲逆转提取分开用于 LF 脉冲  $p_1$  的两个极性的每个的第一和第二发射时间, 这意思是全部 4 个发射事件提取非线性相互作用散射信号。

[0087] 也能够通过发射其中  $p_1$  是零而  $p_2$  非零的第一事件, 随后发射具有相同  $p_2$  和非零  $p_1$  的第二发射事件, 并从用于第二发射事件的接收信号减去用于第一发射事件的接收信号, 提取局部非线性相互作用。甚至能够改变两个事件之间的  $P_2$  的发射振幅, 来自两个事件的一个具有接收信号的类似定标, 从而在减去之后最小化来自  $p_2$  的线性散射信号的任何剩

余。也能够为手动和自动调节两者调节用于一个接收信号的定标变量,从而最小化得到信号中的保持分量 210 和 211,从而补偿两个发射事件之间的发射和接收通道。这也能够为脉冲逆转发射完成。当该物体移动时,能够使用多于两个发射事件并按照本领域技术人员所已知的方法估算和补偿接收信号中的多普勒位移。根据上述讨论,本领域技术人员能够由此应用许多方案从接收信号提取局部非线性相互作用散射信号分量 B 组。

[0088] 当散射体在发射事件之间移动时,原始光谱会在上述为图 2a-c 讨论的两个发射事件的信号的组合中渗漏,从而抵销不需要的分量。为了在如上所述的发射脉冲波的变量(例如极性和振幅)之间区分和发射事件之间的散射体位移,必须使用增加数目的发射事件也估算散射体位移,其中重叠区沿着相同发射测量或像曲线传播。根据已知方法,这允许散射体位移的结合估算和不需要分量的抑制。

[0089] 如上面所呈现的,当高频(HF 第二脉冲波)的脉冲宽度  $T_{p2}$  比低频(LF- 第一脉冲波)时间周期  $T_1$  短时,尤其是比  $T_1/2$  短时,能够进一步抑制来自正向运送传播失真的线性散射的分量。图 5a 中示出这个情形的示例,其中 HF 脉冲宽度  $T_{p2} \ll T_1/2 = 1/2f_1$ 。对于依靠 LF 振荡 503 的顶点的 HF 脉冲 504,等式(3)的非线性传播项(2)产生由 HF 脉冲观察的传播速度的改变,HF 脉冲产生用于 HF 脉冲的额外的非线性传播延迟。为了研究这个,应当注意:  $|2\beta_p(\underline{r})p_1(\underline{r}, t)| = |x| \ll 1$  对于  $|x| \ll 1$  其允许近似值  $1-x \approx 1/(1+x)$ ,并且等式(3)左侧的传播项能够近似用于 HF 脉冲,其包括与 LF 脉冲的相互作用,如下

[0090]

$$\underbrace{\nabla^2 p_2(\underline{r}, t) - \frac{1}{c_0^2(\underline{r})} \frac{\partial^2 p_2(\underline{r}, t)}{\partial t^2}}_{(1) \text{Linear propagation}} + \underbrace{\frac{2\beta_p(\underline{r})p_1(\underline{r}, t)}{c_0^2(\underline{r})} \frac{\partial^2 p_2(\underline{r}, t)}{\partial t^2}}_{(2) \text{Nonlinear propagation}}$$

$$\approx \nabla^2 p_2(\underline{r}, t) - \frac{1}{c_0^2(\underline{r})(1+2\beta_p(\underline{r})p_1(\underline{r}, t))} \frac{\partial^2 p_2(\underline{r}, t)}{\partial t^2} \quad (5)$$

[0091] 在这个传播算子中的时间导数的前面的分子是平方传播速度,并因此看出 LF 脉冲  $p_1$  使传播速度变形用于共同传播 HF 脉冲  $p_2$ , 如下:

[0092]

$$c(\underline{r}, p_1) = \sqrt{c_0^2(\underline{r})(1+2\beta_p(\underline{r})p_1)} = c_0(\underline{r})(1+\beta_p(\underline{r})p_1) \quad (6)$$

[0093] 其中,  $p_1$  是沿着共同传播 HF 脉冲的实际 LF 场变量。因此降至 HF 脉冲的深度  $\underline{r}$  的传播时间是

[0094]

$$t(r) = \int_0^r \frac{ds}{c(\underline{r}, p_1)} \approx \int_0^r \frac{ds}{c_0} - \int_0^r \frac{ds}{c_0} \beta_p(s) p_1(s) = t_0(r) + \tau(r) \quad (7)$$

$$t_0(r) = \int_0^r \frac{ds}{c_0} \quad \tau(r) = - \int_0^r \frac{ds}{c_0} \beta_p(s) p_1(s)$$

[0095] 其中  $p_1(s)$  是与深度有关的沿着共同传播 HF 脉冲的平均 LF 场,积分变量  $s$  其中



LAF 场采取这个平均值的位置。在许多实际情况中,这接近传播 HF 脉冲的重心,并且  $t_0(\underline{r})$  是沿着 HF 脉冲的传播降至范围  $\underline{r}$  的零 LF 脉冲得出的传播滞后,并且  $\tau(\underline{r})$  是降至深度  $\underline{r}$  的非线性传播延迟。对于  $\beta_{p1} > 0$ , LF 脉冲产生 HF 脉冲(即负的非线性传播延迟)前进的传播速度的增加,而对于  $\beta_{p1} < 0$ , LF 脉冲产生 HF 脉冲的真实延迟(即正的非线性传播延迟)的传播速度的降低。

[0096] 等式(3)中的非线性散射项(5)能够为非线性相互作用项是近似的,在与下列相同范围内

[0097]

$$\underbrace{\frac{\sigma_n(\underline{r}) \partial^2 p(\underline{r}, t)^2}{c_0^2(\underline{r}) \partial t^2}}_{(5) \text{ Nonlinear scattering source term}} \approx \frac{2\sigma_n(\underline{r}) p_1(\underline{r}, t) \partial^2 p_2(\underline{r}, t)}{c_0^2(\underline{r}) \partial t^2} \quad (8)$$

[0098] 由此,可以看出在这个情形中( $T_{p2} \ll T_1/2$ )LF 脉冲对 B 组分量上的影响是散射波的振幅调制,其与  $2\sigma_{np1}$  成比例。由此在这个情形中在 A 组和 B 组散射分量的波形特征之间存在大的差异,其能够被用于通过在接收信号上信号处理进一步抑制接收信号中的 A 组分量。

[0099] 例如这种处理,假设 LF 脉冲的振幅在第一散射中下降非常多,以至于在第一散射之后非线性相互作用可以忽略。然后 A 组和 B 组散射分量的相同的非线性传播延迟,并且能够使用下来模型用于来自具有反向极性的 LF 脉冲的两个发射事件的非线性相互作用接收信号。

[0100]

$$y_+(t) = a(t - \tau(t)) + b(t - \tau(t)) \quad (9)$$

$$y_-(t) = \underbrace{a(t + \tau(t))}_{\text{Class A}} - \underbrace{b(t + \tau(t))}_{\text{Class B}}$$

[0101] 其中  $t$  是从深度  $\underline{r}$  的散射信号的到达时间,并且  $a(t)$  源于 A 类散射并且  $b(t)$  源于 B 类散射。在文献中存在许多估算信号之间延迟的方法,并且能够通过估算非线性传播延迟  $\hat{\tau}(t)$  为  $y_+$  和  $y_-$  之间延迟的一半获得 B 组信号的估算  $\hat{b}(t)$ 。并且校正估算的延迟并且将信号组合为

[0102]

$$\hat{b}(t) = \frac{1}{2} \{ y_+(t + \hat{\tau}(t)) - y_-(t - \hat{\tau}(t)) \} \quad (10)$$

[0103] 根据已知的方法本领域技术人员能够研发更精密的估算方案。

[0104] LF 场变量围绕其平均值沿着 HF 脉冲的改变产生传播速度(等式(6)),其沿着 HF 脉冲改变并产生随传播距离积累的 HF 脉冲的正向传播失真。对于位于 LF 脉冲 503 的顶点的 HF 脉冲 504, LF 振荡的曲率产生失真,其中 LF 脉冲的前部和尾部得到相同的传播速度,而 HF 脉冲的中心在共同传播 HF 脉冲的中心为  $\beta_{p1} > 0$  得到较高的传播速度并且为  $\beta_{p1} < 0$  得到较低的传播速度。对于围绕 LF 脉冲 502 的零交点传播的 HF 脉冲 501,沿着 HF 脉冲的平均 LF 场变量是零并且 HF 脉冲的非线性传播延迟是零。然而,在这个情形中,沿着 HF 脉

冲存在 LF 脉冲振荡的强坡度,其产生 HF 脉冲的长度改变(脉冲宽度根据  $\beta_{p_1}$  的信号的压缩或膨胀)。

[0105] 沿着 HF 脉冲的 LF 场变量的改变也会产生局部非线性散射中的失真。因此 A 组和 B 组之间的差异能够被总结为

[0106] A 组,正向非线性相互作用传播失真:

[0107] AI:沿着共同传播 HF 脉冲的平均 LF 压力产生 HF 脉冲的非线性传播延迟,所述延迟在相互作用区域中随着 HF 脉冲的传播距离积累。

[0108] AII:沿着共同传播 HF 脉冲的 LF 压力围绕其平均值的改变产生 HF 脉冲的非线性传播脉冲波形失真,所述失真在相互作用区域中随着 HF 脉冲的传播距离积累。

[0109] B 组,局部非线性相互作用散射失真:

[0110] BI:沿着共同传播 HF 脉冲的平均 LF 压力产生与沿着 HF 脉冲的 LF 场变量的局部平均成比例的局部散射 HF 信号的非线性振幅调制。

[0111] BII:沿着共同传播 HF 脉冲的 LF 压力围绕其平均值的改变产生由沿着 HF 脉冲的 LF 场变量的局部改变给出的局部散射高频信号的脉冲波形失真。

[0112] 在 BII 下的脉冲波形失真与 AII 下的不同,由于在 AII 下网络失真由沿着 HF 脉冲的传播路径的局部失真的累积给出,其中局部失真沿着传播路径改变,并且如下面讨论的甚至正负摆动,而在 BII 下该失真由 LF 脉冲场变量沿着在局部散射体的 HF 脉冲的局部改变给出。

[0113] 该脉冲波形失真能够由操作人员在 A 组和 B 组散射分量上建模为

[0114]

$$y_+(t) = H_+ \{a(t - \tau(t))\} + H_{b+} \{b(t - \tau(t))\}$$

a)

$$y_-(t) = \underbrace{H_- \{a(t + \tau(t))\}}_{\text{Class A}} - \underbrace{H_{b-} \{b(t + \tau(t))\}}_{\text{Class B}}$$

(11)

$$H_{\pm} \{a(t \mp \tau(t))\} = \int dt_1 h_{\pm}(t - t_1, t_1) a(t_1 \mp \tau(t_1))$$

b)

$$H_{b\pm} \{a(t \mp \tau(t))\} = \int dt_1 h_{b\pm}(t - t_1, t_1) b(t_1 \mp \tau(t_1))$$

[0115] 其中  $y_+$  和  $y_-$  是来自发射 LF 脉冲极性相反的两个发射事件的接收信号。 $H_q$ ,  $q = \pm$  和  $b_{\pm}$  是表示脉冲波形失真的算子。

[0116] 为了缓和脉冲波形失真,能够在等式(11b)中由线性过滤器模型这些算子,脉冲响应  $h_q$ ,  $q = \pm$  和  $b_{\pm}$ 。例如能够从材料中的估算  $\beta_p(\underline{r}) p_1(\underline{r})$  和材料中共同传播脉冲的非线性波传播的计算机模拟获得脉冲波形失真的估算。例如,能够从等式(7)获得  $\beta_p(\underline{r}) p_1(\underline{r})$  的估算,其为估算的非线性传播延迟的空间梯度。

[0117] 当得到失真算子的估算并且其具有逆转时,能够获得 B 组散射信号的估算,其具有对 A 组分量的强的抑制,如下

[0118]

$$\hat{b}(t) = \frac{1}{2} \left\{ H_+^{-1} \{ y_+(t + \hat{\tau}(t)) \} - H_-^{-1} \{ y_-(t - \hat{\tau}(t)) \} \right\} \quad (12)$$

[0119] 其中  $H_+^{-1}$  和  $H_-^{-1}$  是相反的, 或至少  $H_+$  和  $H_-$  算子近似相反, 并且其表示对于  $H_+$  和  $H_-$  的脉冲波形失真的修正。反向过滤器通常存在  $b(t)$  的限制的频率波段内的至少近似的波形, 其中在文献中存在价格反向过滤的方法。

[0120] 为了在图 2c 所示的情况中的 A 组和 B 组散射的波形特征的差异的更详细的分析, 即  $T_{p2} < T_1$ , 假设 LF 和 HF 脉冲具有下列简单的平面波形

$$[0121] \quad \text{LF 脉冲: } p_1(\underline{r}, t) = a_1(\underline{r}, t - t_1 - \underline{n}_1 \underline{r}/c) \cos \omega_1(t - t_1 - \underline{n}_1 \underline{r}/c)$$

$$[0122] \quad \text{HF 脉冲: } p_2(\underline{r}, t) = p_2(t - \underline{n}_2 \underline{r}/c) \quad (13)$$

[0123] 跨时间脉冲宽度  $T_{p2} \ll T_{p1}$  的 HF 脉冲, LF 脉冲宽度, 近似  $a_1(\underline{r}, t - t_1 - \underline{n}_1 \underline{r}/c) \approx a_1$ , 即为常数, 其中同意省略由相对于上面图 2c 讨论的入射 LF 光谱 210 的频率平均。然后, 非线性相互作用散射源项源于

[0124]

$$2p_1(\underline{r}, t)p_2(\underline{r}, t) = 2a_1 \cos \omega_1(t - t_1 - \underline{n}_1 \underline{r}/c) p_2(t - \underline{n}_2 \underline{r}/c) \quad (14)$$

$$= a_1 \left( e^{i\omega_1(t - t_1 - \underline{n}_1 \underline{r}/c)} + e^{-i\omega_1(t - t_1 - \underline{n}_1 \underline{r}/c)} \right) p_2(t - \underline{n}_2 \underline{r}/c)$$

[0125] 为第二脉冲 (HF) 引入迟至时间  $\tau = t - \underline{n}_2 \underline{r}/c$ , 其给出

[0126]

$$2p_1(\underline{r}, \tau)p_2(\underline{r}, \tau) \quad (15)$$

$$= a_1 \left( e^{i\omega_1(\tau - t_1 - (\underline{n}_1 - \underline{n}_2)\underline{r}/c)} + e^{-i\omega_1(\tau - t_1 - (\underline{n}_1 - \underline{n}_2)\underline{r}/c)} \right) p_2(\tau)$$

[0127] 并且估算  $\tau$  上的傅里叶变换, 如下

[0128]

$$F_\tau \{ 2p_1(\underline{r}, \tau)p_2(\underline{r}, \tau) \}$$

$$= a_1 \left( e^{-i\omega_1(t_1 + (\underline{n}_1 - \underline{n}_2)\underline{r}/c)} P_2(\omega - \omega_1) + e^{i\omega_1(t_1 + (\underline{n}_1 - \underline{n}_2)\underline{r}/c)} P_2(\omega + \omega_1) \right)$$

$$= a_1 \cos \theta(t_1, \underline{r}) [P_2(\omega - \omega_1) + P_2(\omega + \omega_1)] \quad (16)$$

$$- ia_1 \sin \theta(t_1, \underline{r}) [P_2(\omega - \omega_1) - P_2(\omega + \omega_1)]$$

[0129] 其中用  $\omega = 2\pi f$  定义相位  $\theta(t_1, \underline{r}) = \omega_1(t_1 + (\underline{n}_1 - \underline{n}_2)\underline{r}/c)$ 。注意  $P_2(\omega - \omega_1)$  是图 2c 中的 212 并且  $P_2(\omega + \omega_1)$  是 213。进一步地注意 HF 脉冲的脉冲宽度  $T_{p2}$  与波段宽度  $B_2$  有关, 为  $T_{p2} = 1/B_2$ 。然后具有等价式  $T_{p2} < T_1 = 1/f_1 \Leftrightarrow B_2 > f_1$ 。因为 HF 和 LF 脉冲的传播方向不同, 所以正向传播延迟的累积和沿着 HF 脉冲传播方向的脉冲失真会具有最大延迟

和失真围绕零振荡,并且具有最大和零的非线性相互作用散射信号的振幅的振荡取决于  $\theta(t_1, \underline{r})$  的值。右侧的第一相,即光谱的和项,对于  $\theta(t_1, \underline{r}) = m\pi, m=0, \pm 1, \dots$  具有最大值,其中  $\cos \theta(t_1, \underline{r}) = \pm 1$ 。右侧的第二项,即光谱的差项对于  $\theta$  的这些值是零,其中  $\sin \theta(t_1, \underline{r}) = 0$ 。对于  $\theta(t_1, \underline{r}) = (2m+1)\pi/2, m=0, \pm 1, \dots$  和项为零,其中  $\cos \theta(t_1, \underline{r}) = 0$ , 因为对于  $\theta$  的这些值  $\sin \theta(t_1, \underline{r}) = \pm 1$  用于差项最大。光谱  $P_2(\omega - \omega_1)$  和  $P_2(\omega + \omega_1)$  之间强烈重叠,差项被高度减少并且比和项提供更少的传播失真和散射。

[0130] 对于  $B_2 < f_1$ , 光谱  $P_2(\omega + \omega_1)$  和  $P_2(\omega - \omega_1)$  具有与  $P_2(\omega)$  的最小重叠,并且和项  $P_2(\omega - \omega_1) + P_2(\omega + \omega_1)$  和差项  $P_2(\omega - \omega_1) - P_2(\omega + \omega_1)$  近似产生相同的散射量,除非两项的相对数值取决于  $\theta(t_1, \underline{r})$ 。然而,因为 HF 脉冲传播方向  $\underline{n}_2 \neq \underline{n}_1 - \underline{n}_2$ ,  $\cos \theta(t_1, \underline{r})$  和  $\sin \theta(t_1, \underline{r})$  项会在  $R(\underline{r}, t)$  内随着  $\underline{r}$  摆动,并且得到空间摆动并且近似等于从和和差项到  $R(\underline{r}, t)$  内的非线性相互作用术语的贡献。在这个情形中, A 组和 B 组项之间的波形特征的差异低。因此用信号处理难以抑制 A 组项,并且由此 A 组信号限制对 B 组信号的灵敏度,即局部非线性相互作用散射信号。因此对于  $B_2 < f_1$  必须依靠小的重叠区  $R(\underline{r}, t)$ , 从而能够测量局部非线性相互作用散射(B组)。

[0131] 当  $B_2$  增加超过  $f_1$  时,光谱  $P_2(\omega + \omega_1)$  和  $P_2(\omega - \omega_1)$  可以与图 2c 中的  $P_2(\omega)$  重叠,并且进一步当  $B_2$  增加超过  $2f_1$  时,即  $T_{p2} < T_1/2$ , 光谱  $P_2(\omega + \omega_1)$  和  $P_2(\omega - \omega_1)$  开始重叠。为了用强重叠谱进一步分析,重写等式(16)有用,如下

[0132]

$$F_{\tau} \{ 2p_1(\underline{r}, \tau) p_2(\underline{r}, \tau) \} = 2a_1 \cos \theta(t_1, \underline{r}) P_2(\omega) \\ + a_1 \cos \theta(t_1, \underline{r}) [ P_2(\omega - \omega_1) + P_2(\omega + \omega_1) - 2P_2(\omega) ] \\ - ia_1 \sin \theta(t_1, \underline{r}) [ P_2(\omega - \omega_1) - P_2(\omega + \omega_1) ] \quad (17)$$

[0133] 右侧上的第一项产生具有线性散射的正向传播失真的 AI 组(非线性传播延迟),并且 BI 组振幅调制具有局部非线性相互作用散射的  $a_1$ 。在正向传播失真(AII 组)和局部非线性散射(BII 组)两者中,第二项产生脉冲波形失真,其与沿着 HF 脉冲的 LF 脉冲的曲率有关。在正向传播失真(AII 组)和局部非线性散射(BII 组)两者中,第三项产生脉冲波形失真,其与沿着 HF 脉冲的 LF 脉冲的坡度有关。在光谱  $P_2(\omega - \omega_1)$  和  $P_2(\omega + \omega_1)$  之间具有强重叠,即  $B_2 \gg 2f_1 \Leftrightarrow T_{p2} \ll T_1/2$ , 第二和第三项(脉冲波形 AII 和 BII)与第一项(用于 AI 组的传播延迟和用于 BI 组的散射振幅调制)相比被高度减少。

[0134] 由此对于这个情形(图 2c 的  $T_{p2} < T_1/2$ ) 在 B 组(来自  $R(\underline{r}, t)$  的局部非线性相互作用散射信号)和 A 组(从  $R(\underline{r}, t)$  内的聚集的非线性相互作用传播失真分量的线性散射上升的信号)之间的存在强烈差异。这个波形特征的差异用于由等式(10、12)所述的信号处理,从而与如图 2a 和 2b 中举例说明的发射波相比,抑制接收信号中的 A 组分量,并增加对来自  $R(\underline{r}, t)$  的局部非线性相互作用散射信号(B组)的灵敏度,其中  $T_{p2} > T_1$ 。

[0135] 如上面关于图 2c 所讨论的,为了提取非线性相互作用散射信号,能够使用组合 LF 和 HF 脉冲发射的两个发射事件,为第二发射事件改变 LF 脉冲  $p_1$  的极性。然而,在减去接收信号之前,用延迟和脉冲波形修正的一个或两者修正接收信号的一个或两者,例如在修

正过滤器中,在减去信号之前。然后,校正过滤器产生下列的至少一个, i) 延迟修正,其补偿非线性相互作用传播延迟(上面 AI)的影响,和 ii) 脉冲波形失真修正,补偿线性散射接收信号中的非线性相互作用脉冲波形传播失真(上面 AII)。

[0136] 当 HF 脉冲波段宽度比 LF 大很多时(例如  $B_2 \sim 5f_1$ ),重叠区分为子区域。为了更好地理解这个现象,参考图 3,其中图 3 中的 301 示出灰度图中在固定时间在空间中随着其在  $n_1$  的方向上传播的示例 LF 脉冲波场(104)的脉冲振荡。302 示出 LF 脉冲沿着线 303 的空间振荡改变。304 在灰度图中示出在固定时间在空间中随着在  $n_2$  的方向上传播的示例 HF 脉冲波场(105)脉冲振荡。305 示出 HF 脉冲沿着线 306 的空间改变的放大图例。图 3b 示出非线性相互作用源项  $2p_1(\underline{r}, f)p_2(\underline{r}, t)$ ,即图 3a 中的脉冲的乘积。可以看出为 LF 振荡的高值(两者正的和负的)得到源项的高值,并且在围绕 LF 振荡的零的源项中具有低值。这个产生非线性相互作用源项子区域 308,其在中间具有非线性相互作用源项的低值子区域 309。

[0137] 非线性相互作用子区域 308 在  $n_1+n_2$  的方向上传播。应当注意,等式(8、9)中的相位  $\theta(t_1, \underline{r}) = \omega_1(t_1 + (\underline{n}_1 - \underline{n}_2) \underline{r}/c)$  取决于沿着  $(n_1, n_2)$  的  $\underline{r}$  的分量,并且由于  $(\underline{n}_1 - \underline{n}_2)(\underline{n}_1 + \underline{n}_2) = n_1^2 - n_2^2 = 0$ ,可以看出  $\theta(t_1, \underline{r})$  在非线性相互作用子区域的传播方向上是常数。 $t_1$  的改变(即, LF 和 HF 脉冲之间的发射定时)引起非线性相互作用源项子区域的横向移动。当  $\theta(t_1, \underline{r}) = m\pi, m=0, \pm 1, \dots$  时,  $\cos \theta(t_1, \underline{r}) = \pm 1$  并且  $\sin \theta(t_1, \underline{r}) = 0$ , 并且 HF 脉冲取决于 LF 波的顶点或谷点。然后,得到等式(17)的延迟项和和项的最大值,即等式(17)右侧的第一和第二项,而等式(17)的右侧第三项(差项)是零。当  $\theta(t_1, \underline{r}) = (2m+1)\pi/2, m=0, \pm 1$  时,即  $\cos \theta(t_1, \underline{r}) = 0$  并且  $\sin \theta(t_1, \underline{r}) = \pm 1$ , HF 脉冲沿着 LF 波的零并且位于低值子区域 309 中,其中差项是最大值并且延迟和和项是零。然而,如上面所讨论的,由于 HF 脉冲足够短,差项是可忽略的,并且非线性相互作用散射(B组)的灵敏度低。

[0138] 由于 HF 带宽和 LF 之间具有这样大的差异(例如  $B_2 \sim 5f_1$ ),从而能够为单个发射事件同时分析多次测量或像曲线,其中图 4 举例将三个测量或像曲线  $\Gamma_{k-1}(\underline{r})$ 、 $\Gamma_k(\underline{r})$ 、 $\Gamma_{k+1}(\underline{r})$  示为 410、404、411,用于为三个不同的时间点所示的三个非线性相互作用子区域  $t_a$ 、 $t_b$ 、 $t_c$  示为 401、402、和 403。由图中弯曲的箭头所示,非线性相互作用源项在  $n_1+n_2$  的方向上以等式(2)的速度  $c_R$  向下传播。可以看出存在  $\theta(t_1, \underline{r}) = m\pi, m=0, \pm 1, \dots$  的高非线性相互作用的区域(A区域),其中对成像非线性相互作用参数中空间改变的灵敏度高,用于足够短的 HF 脉冲。示出三个区域 405、406、和 407,但是如点 412 所示  $\hat{-}$  区域能够根据第一和第二发射波束 101 和 102 的 LF 脉冲的长度及其他细节进一步横向延伸。图 4 也举例示出用于  $\theta(t_1, \underline{r}) = (2m+1)\pi/2, m=0, \pm 1, \dots$  的低非线性相互作用的两个 B 区域 408 和 409,其中对成像非线性相互作用参数中的空间改变的灵敏度低,用于足够短的 HF 脉冲。在竖直方向(垂直于纸平面)上重叠子区域(401、402、403)的厚度由在竖直方向上最薄的波束 101 和 102 的竖直厚度确定。

[0139] 在典型的测量情况中能具有  $f_2=10f_1$ 。图 4 中 A 类型的子区域的宽度是  $cT_1/2 \cos\varphi = \lambda_1/2 \cos\varphi = 5\lambda_2 \cos\varphi$ ,其中  $T_1$  是 LF 震荡的时间周期,并且  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别是 LF 和 HF 脉冲波的宽度。例如用于图 7-11 中所述的系统,用于 HF 的聚集接收器系统的分辨率是  $\Delta \underline{r} = 2\lambda_2 FN$ ,其中  $FN=F/D$  是接收器的光圈值,其作为焦距  $F$  和光圈宽度(例如,直径)  $D$  之间的比值给出。可以看出用  $FN < 2.5 \cos\varphi$  的聚焦接收器系统分析子区域的宽度,其对

于  $\varphi = 30\text{deg}$  给出  $\text{FN} < 2.1$ 。用许多 EM 和 EL 接收器系统可以实现这些低光圈数。因此能够用平行接收器系统分析几个 A 区域(例如 405、406、407), 并且用波束宽度例如由在测量或像曲线  $\Gamma_{k-1}(\underline{r})$ 、 $\Gamma_k(\underline{r})$ 、 $\Gamma_{k+1}(\underline{r})$  的每侧上的点垂直线显示的动态聚焦平行接收波束从这些区域接收信号。这些平行接收波束为几个曲线(例如, 410、404、411)同时提供测量或图像信号, 其中用相同的发射事件和根据已知方法在许多阵列元件上的接收信号上并行处理获得图像数据, 并且参考图 6 的仪器方框图进一步地讨论。

[0140] 为了增加对区域 B 中的非线性相互作用参数的成像灵敏度, 能够发射第二组第一和第二脉冲波, 其中如图 5a 所示改变第一和第二脉冲之间的定时关系量  $\Delta t_1 = \pi / 2 \omega_1$ , 其中 501 示出用于位于低频脉冲 502 的零的对非线性相互作用参数成像灵敏度低的区域 B 的 HF 脉冲。在这个图中, HF 脉冲 501 和 LF 脉冲 502 示出用于图 4 中低灵敏度子区域(区域 B)的定时关系。在第二发射组中, 改变 LF 和 HF 脉冲之间的发射定时的差异量  $\Delta t_1 = \pi / 2 \omega_1$ , 以便 LF 脉冲到达相对位置 503, 其中现在 HF 脉冲 504 在对区域 B 中的非线性相互作用参数具有最大成像灵敏度的峰值 LF 场变量上。这与图 4 中的第一发射组的灵敏度子区域 401、402、和 403 一起生成用于在图 5b 的区域 B 中的时间点  $t_a$ 、 $t_b$ 、和  $t_c$  的灵敏度子区域 510、511、和 512。点 515 指示能够横向具有更多 A 区域和 B 区域, 这取决于如上面参考图 4 讨论的波束的 LF 脉冲的长度及其他细节。由于如上面示例中所述的接收器系统的足够高的焦点分辨率(其中  $\text{FN} < 2.5 \cos\varphi$ ),  $t_1$  的改变提供了测量或新的像曲线, 其中能够使用接收信号的并行处理的许多平行接收波束沿着几个测量或像曲线与相同发射事件并行提供图像信号, 其中图 5b 举例显示两个测量或像曲线  $\Gamma_{m-1}(\underline{r})$ 、 $\Gamma_m(\underline{r})$  为用于 5- 区域的 513 和 514。用于具有相同发射事件的 A- 和 B- 区域两者的平行测量或像曲线的总数取决于发射脉冲 104 和 105 的细节形状。

[0141] 入射频率的大差异也对提高共振非线性散射体的成像有用, 其中选择第二发射频率达高于共振频率, 例如从而获得高的空间分辨率。然后, 选择低于或等于共振频率的第一发射频率, 并且使用参考图 2c 所述的方法从非线性相互作用共振散射体提取信号。例如, 这对在大大高于共振频率的频率下高分辨率声成像造影剂微气泡有用, 以及对高分辨率电磁波成像荧光分子有用。

[0142] 使用发射事件之间的增加重复率, 其中在第一和第二脉冲波之间的相对发射定时  $t$  改变, 能够获得为许多重叠区  $Rt(\underline{r}, t)$ ,  $i=2, \dots$  的进一步增加平行测量或成像, 这些区域沿着物体中不同的测量或像曲线  $\Gamma_i(\underline{r})$ ,  $i=2, \dots$  同时传播。在这个情形中聚焦接收系统适合于平行观察来自在物体中同时传播的不同重叠区的散射信号。该方法也为入射频率  $f_1$  和  $f_2$  提供平行测量, 这些频率如此靠近以至于  $B_2 < f_1$ , 以便重叠区不分解为如图 3-5 所述的子区域, 其中  $B_2 \gg f_1$ 。该平行接收成像增加潜在帧速率, 其打开平均接收信号或图像信号或图像信号的可能性, 从而改进信号噪音比并增加用于成像从材料的局部非线性相互作用散射的灵敏度。

[0143] 在上述讨论中, 假设具有波场的非线性材料参数的第二顺序改变。这提供了等式(4)的简单的非线性相互作用项  $2p_1(\underline{r}, t)p_2(\underline{r}, t)$ , 其进一步提供图 2a-c 的卷积频谱。由于材料参数的更复杂非线性, 能够具有有非线性波传播和非线性散射引入的频率分量。第二顺序非线性用于说明的目的, 并且不是意图为本发明提供限制。本领域技术人员在本发明的保护范围中能够为每个特殊情况引入更复杂的非线性材料参数的细节, 例如包含非线性

共振散射体的波在材料中的传播和散射。

[0144] 图 6 示出根据本发明的示例仪器的方框图,其中可以根据所述的方法操作仪器。该仪器包含用于分别将脉冲波束 101 和 102 发射到物体 103 中的装置 601 和 602。至少一个波束在方位方向上(纸平面中)是宽的,并且在垂直方向上(垂直于纸平面)是窄的,其中这个图示出波束 101 和 102 两者在方位面上都是宽的示例。发射装置是由发射器 603 和 604 驱动的,其由控制单元 605 经由控制总线 606 在发射定时和发射振幅和发送频率和发射波束方向的至少一个上控制。根据已知方法,控制单元经由键盘或其他的用户界面从仪器操作员接收输入,从而为实际使用安装仪器。换句话说,控制单元 605 能够从软件或从反馈机构接收输入。接收器装置 607 从物体拾取散射波 608,从而形成接收信号传送给接收信号预处理单元 609,在这里这个单元的输出传送到图像处理单元 610 用于根据本发明进一步处理,以便单元 607、609、和 610 中的信号调节和处理的最后结果是沿着至少一个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  (107) 提取局部非线性相互作用散射信号(B 组),例如用参考图 2-5 所述的方法,并且形成测量或图像信号,其被传送到显示装置 611 用于显示。显示单元举例说明沿着一个测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的非线性相互作用信号的图像,其为强度或颜色调制的显示线 612。沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  (107) 的非线性散射信号的选择能够在接收器装置 607、预处理单元 609 或图像处理单元 610、或在结合的全部单元 607、609 和 610 中部分地或完全完成。通过变换第一和第二发射脉冲之间的发射时间关系和发射脉冲波束 101 和 102 的相对方向的至少一个,能够通过例如跨二维表面区域或在物体体积区域中的三维中横向扫描测量或像曲线 107,从而提供物体的区域的二维(2D)或三维(3D)图像。

[0145] 图 6 中的单元表示功能单元,并且在各种实施例中能够被疑相同物理单元(硬件)组合,这取决于可利用的优选技术和性能要求。例如,控制单元 605 和图像处理单元 610 能够被结合为单个计算机系统上的软件模块,并且该单元 603、604、和 609 的电子装置能够被制成到计算机总线 606 的插件。

[0146] 即使也用接收器装置 607,发射装置 601 和 602 能够类似地被组合为一个物理单元。在图 7 中得到这种情况的示例用于超声波成像,其中示出在物体 701 的表面 702 上放置的线性超声阵列。超声阵列根据已知的原理操作,并且能够沿着波束 101 和 102 同时发射第一和第二脉冲超声波 104 和 105。对于大大分离的第一和第二频率,例如能够使用美国专利 6,645,150 或美国专利 7,727,156 中所述的阵列解决方法。能够用于接收波束 703 相同的阵列接收散射信号,其包含重叠区  $R(\underline{r}, t)$  (106)。在这个示例中接收波束 703 包含整体测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  (107),其中通过接收信号的时间滞后获得沿着  $\Gamma(\underline{r})$  的空间分辨率。然后,应该注意散射信号的深度以等式(2)中重叠区  $R(\underline{r}, t)$  的速度  $cR$  传播,而背散射信号以速度  $c$  传播,并且接收时间和沿着  $\Gamma(\underline{r})$  的深度之间的转化考虑此情况。如上所述并根据已知原理,能够通过使用  $FN < 2.5 \cos\phi$  的大孔径、动态聚焦接收波束改进与接收波束横向的空间分辨率。也能够使用几个并排平行接收波束,其同时从图 4 和 5 的许多 A 和 B 区域接收信号,根据已知方法并行处理来自全部区域的接收信号从而加速帧速率。在这个情况下,接收信号能够包含从重叠区  $R(\underline{r}, t)$  的内侧和外侧两者线性散射的分量和来自内侧  $R(\underline{r}, t)$  的非线性相互作用散射信号分量,特别是当在第一和第二频率之间存在大的差异时。然后在图 6 的单元 609 和 610 中通过参考图 2-5 所述的方法提取非线性相互作用散射信号。

[0147] 图 7 中的非线性相互作用散射图像场的深度由波束 101 和 102 的宽度界定,并由

此得到三角形形式。图 8 中示出提供非线性相互作用散射图像区域的矩形形式的实施例,其中用于第一和第二波束 101 和 102 的发射装置是物理上分离的线性超声换能器阵列 801 和 802。用于第一和第二脉冲波(104、105)、重叠区  $R(\underline{r}, t)$  (106)和测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  (107)的标识与图 1a 和 7 中相同。来自第一阵列 801 的接收波束聚集到重叠区  $R(\underline{r}, t)$  上,该波束被示为 803。应该注意,在这个情形中所示的接收波束不覆盖整体测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$ ,因此为了接收沿着  $\Gamma(\underline{r})$  的全部的非线性相互作用信号,波束位置 / 方向必须与焦点深度一起调向。根据已知方法,在一个示例中这能够通过选择不工作的有源接收元件,和 / 或为适当的方向调向调节延迟和聚焦波束实现,以便由于其实时移动,该聚焦按照重叠区  $R(\underline{r}, t)$ 。在另一个示例中,根据已知方法能够在 801 的全部接收元件上同时接收散射信号,并同时在处理单元中形成聚焦图像波束,以便随着重叠区  $R(\underline{r}, t)$  获得接收波束交点。

[0148] 图 9 示出根据本发明的用于超声波成像的集成发射与接收装置的再另一个实施例,其中超声阵列被设置为环形 901。当物体能够由阵列围绕时,例如胸部成像时,这个实施例具有的优点在于其允许按照已知方法断层分析图像重构。该阵列由沿着整体环形 901 的独立元件 903 组成,该环形提供大的柔韧性,从而为发射和接收孔隙选择元件。在这个示例中,选择元件组 904 从而形成第一发射孔隙发射第一脉冲波波束 101,并且选择另一元件组 905 从而形成第二发射孔隙发射第二脉冲波波束 102。用于第一和第二脉冲波(104、105)、重叠区  $R(\underline{r}, t)$  (106)和测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  (107)与图 1a、7、和 8 中相同。该示例进一步示出接收元件组 906,其给出接收波束 907,以便接收波束的轴的全长沿着测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  (107)。例如,根据已知方法,扫描曲线  $F(\underline{r})$  形成图像能够通过改变第一和第二脉冲波的第一和第二发射时间之间的关系完成,或能够通过选择分享第一(904)和第二(905)发射孔隙的不同元件以及使用用于不同元件的发射脉冲的可变延迟,改变第一和第二脉冲波的第一和第二波束方向。然后完成用于接收孔隙(905)的元件的选择和来自元件的信号的电位延迟转向,从而匹配沿着每个实际测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的接收波束的扫描。

[0149] 在图 1a 和 7-9 中,脉冲波前被示为相当直的线,其产生也是直线的测量或像曲线。在实际情况下,具有有限的孔隙的折射使得波前变得有些弯曲,尤其是在波束的边缘。这使得测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  产生一些曲率,其能够被认为是电子接收波束转向。在相同的图中,已经说明第一和第二发射波束在相同平面中。在许多情况下这能够是有利的,由于曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的横向扫描能够通过改变第一和第二脉冲波的发射定时关系获得。然而,从本发明的大体原理应当清楚,第一和第二发射波束能够在彼此交叉的不同平面中,其中发射定时关系必须被调节到波束彼此交叉,这在实际情况中能够由本领域技术人员改造。

[0150] 按照本发明的发射和接收装置的变形例的另一个示例在图 10 中被示为物体 1000 表面上的 1001,其中至少在方位面上第一和第二发射波束的一个是窄波束 1002 并且第一和第二发射波束的另一个是宽波束 1003。然后,如 1004 所示,沿着波束 1003 的发射脉冲必须足够长,以便为想要的图像范围的整体长度沿着 1002 在两个脉冲波 1004 和 1007 之间得到相互作用。测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  是窄波束 1002 的轴 1006,并且接收波束轴优选地沿着窄波束 1002 的轴对准。然后由宽波束(1003)的长脉冲 1004 和窄波束(1002)的短的发射脉冲 1007 的重叠给出重叠区  $R(\underline{r}, t)$  1005。为了改进可能的分辨率,有利的是沿着窄波束发射高频脉冲。由于第一和第二波束之间的传播方向偏斜,类似于图 4 和 5 所示的,沿着波束 1002 会具有对非线性相互作用散射的灵敏度高和低的区域。类似于图 5a 和 b 中所示,能够



由本领域技术人员改造的,通过改变第一和第二发射脉冲之间的发射定时的差异能够沿着 1002 移动高灵敏度区域。为了沿着整个接收波束得到对非线性相互作用散射的完全灵敏度,然后必须以所述第一和第二发射时间之间不同的时间滞后发射多于一个发射事件。通过横向扫描窄波束横向地扫描测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$ 。

[0151] 在图 7-10 中,例如已经使用超声波成像,但是按照本发明发射器和接收器的类似几何设置也能够与 EM 波一起使用。为了以在 GHz 和 THz 范围中的频率 EM 成像,发射装置和接收装置能够是带状天线或微波激光器 / 激光二极管、和这些元件的阵列。为了在红外线光频范围中 EM 成像,用于发射装置的简单的解决方法是激光二极管系列,或机械方向转向激光二极管。用于接收探测装置的简单的解决方法能够是光敏二极管 / 晶体管或聚焦摄像机系统(例如 CCD 摄像机),其提供来自  $R(\underline{r}, t)$  的散射信号沿着  $\Gamma(\underline{r})$  的实时成像,其中可以直接观察到通过第一和第二脉冲波的相对的发射定时和 / 或第一和第二波束方向的改变横向扫描  $\Gamma(\underline{r})$ 。图 11 中示出这种接收装置的示例实施例,其中 1101 和 1102 示出用于第一和第二波束 101 和 102 的发射这种,其脉冲波前 104 和 105 具有重叠区  $R(\underline{r}, t)$  (106) 和测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  (107)。接收器装置是 EM 摄像机系统 1109,其观察锥体 1111 聚焦到来自区域 1110 的非线性相互作用散射信号的区域上,该区域 1110 覆盖两个发射波束 101 和 102 直接的相互作用。

[0152] 为了进一步增加对非线性相互作用散射信号的灵敏度,能够根据已知方法方便地将来自用于每个单独测量或像曲线  $\Gamma(\underline{r})$  的许多发射事件的接收信号或图像信号平均。

[0153] 因此,尽管已经示出并描述并指出如应用于本发明的优选实施例的本发明的基本新颖特征,但是应当理解,本领域技术人员可以进行所示装置的形式和细节上及其操作的各种省略和代替和改变,而不偏离本发明的精神。

[0154] 也明确地意图以大体上相同的方式实行大体上相同的功能的这些元件和 / 或方法步骤的全部组合在本发明的保护范围中。元素和 / 或方法台阶哪些实行实质上一样功能在实质上同样地到实现一样结果在... 的区域之内发明的范围是也明确地打算让全部的综合。此外,应该认识到,结合本发明任何公开的形式或实施例所示和 / 或所述的结构和 / 或元件和 / 或方法步骤可以以任何其他所公开或所述或所提出的形式或实施例合并,作为设计选择的一般主题。因此,仅由权利要求的保护范围所述的限制本发明的意图。

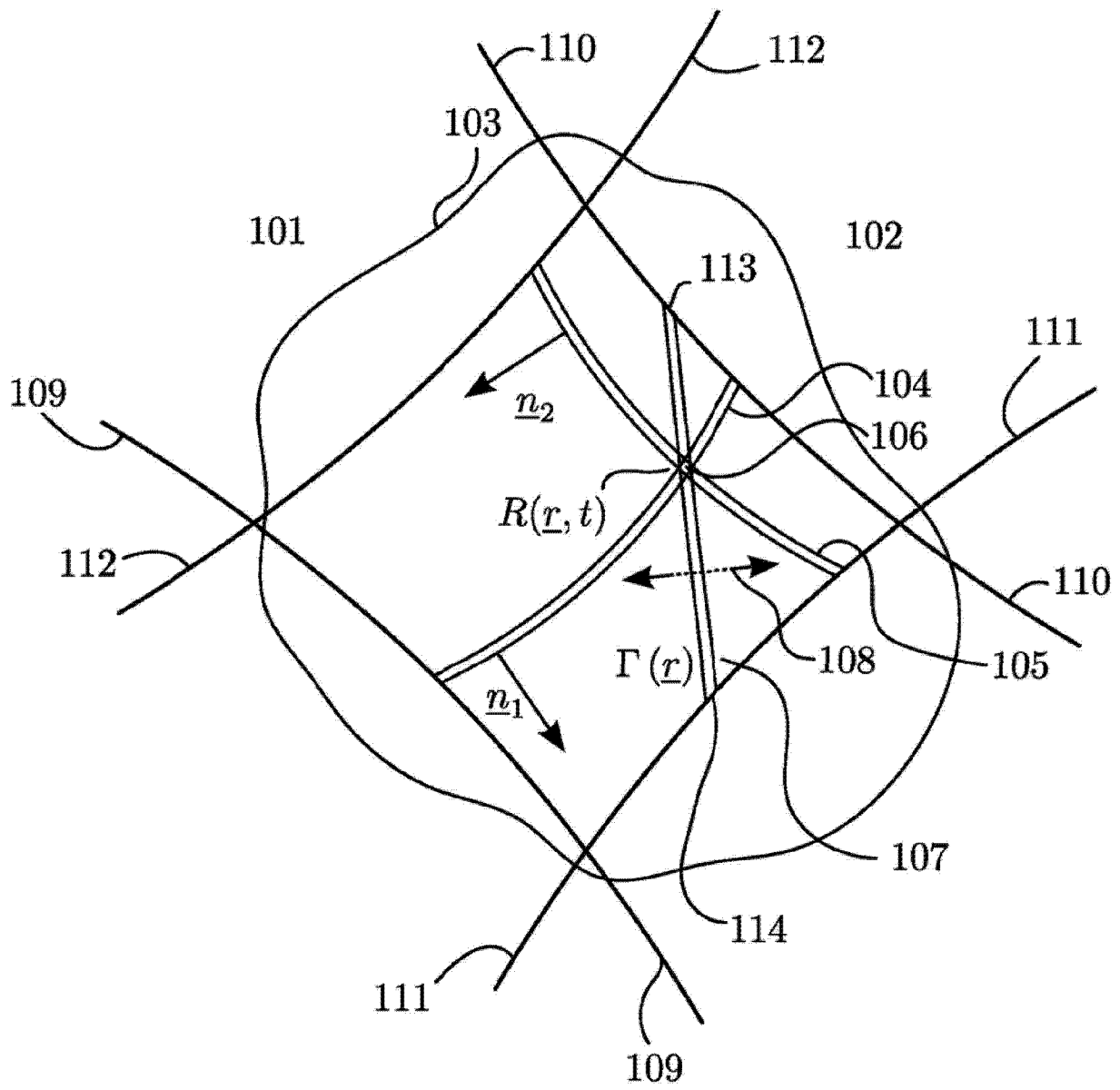


图 1a

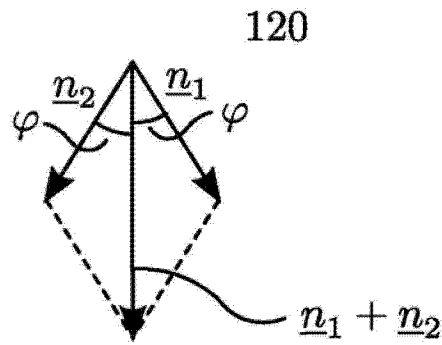
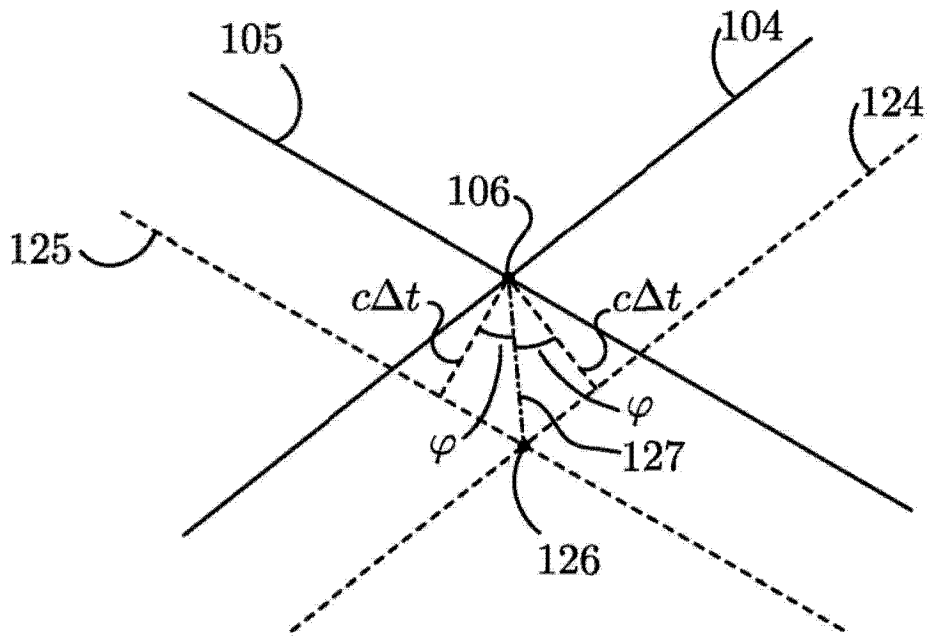


图 1b

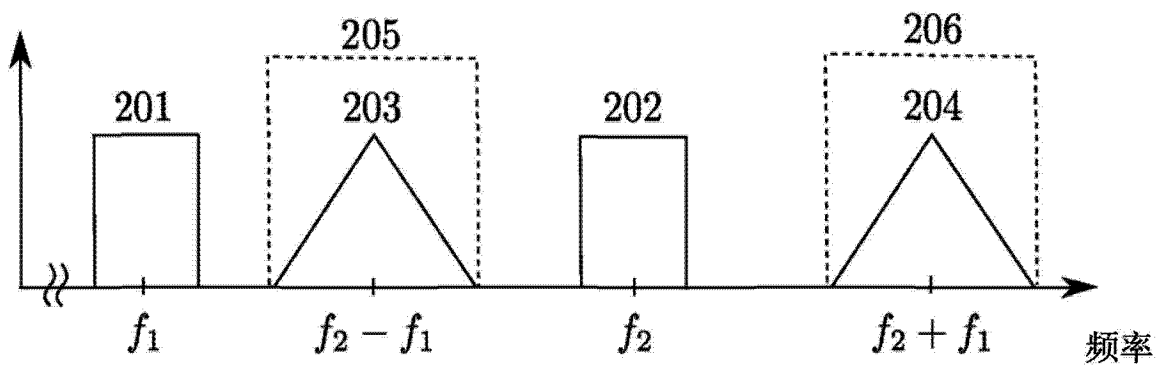


图 2a

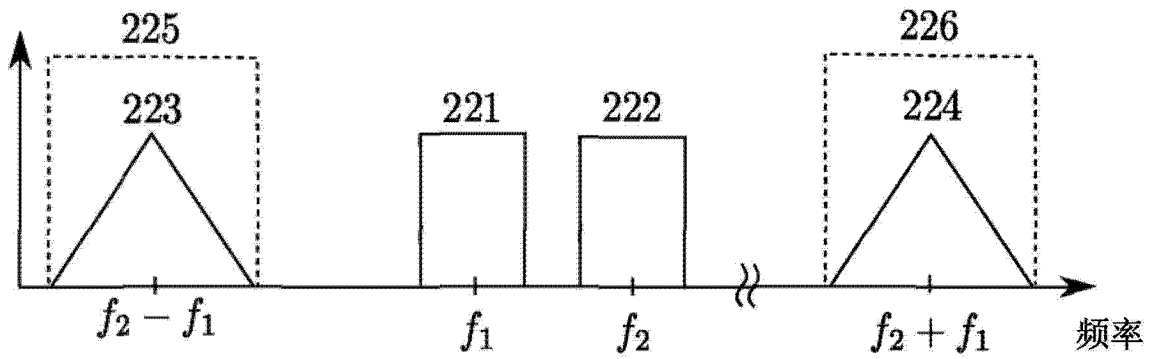


图 2b

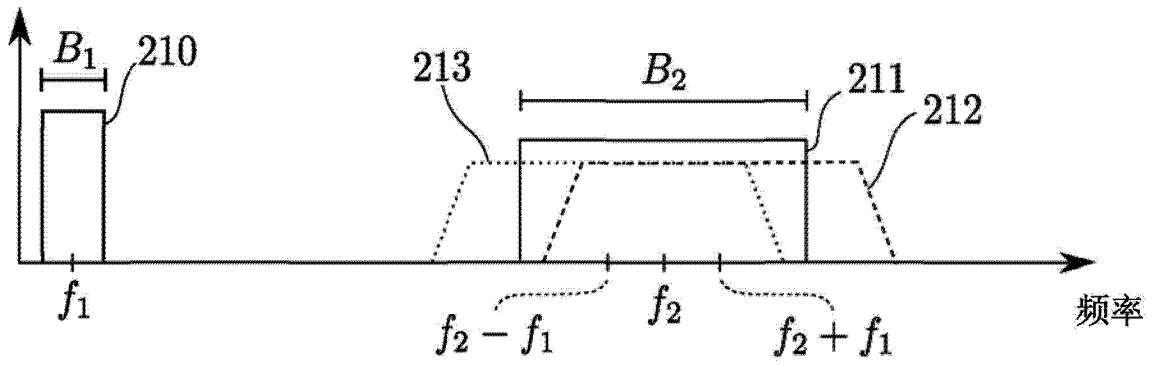


图 2c

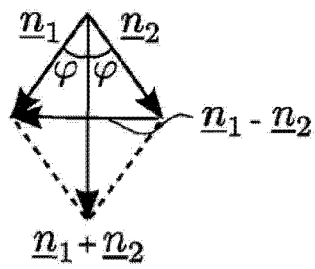
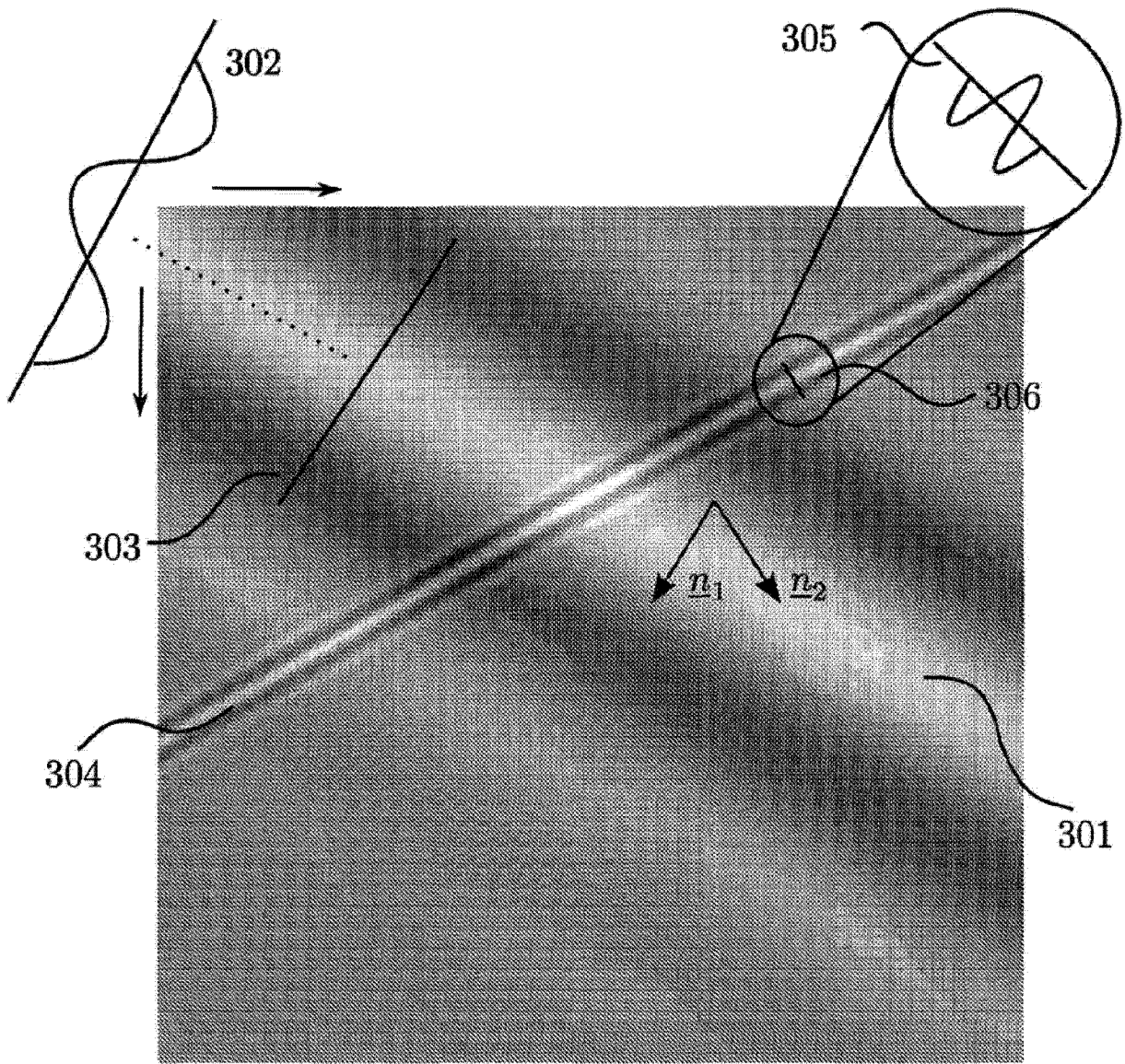


图 3a

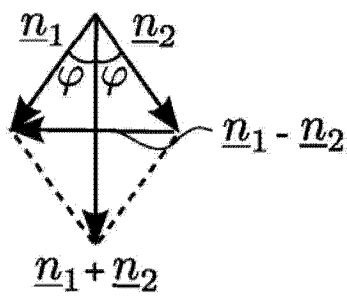
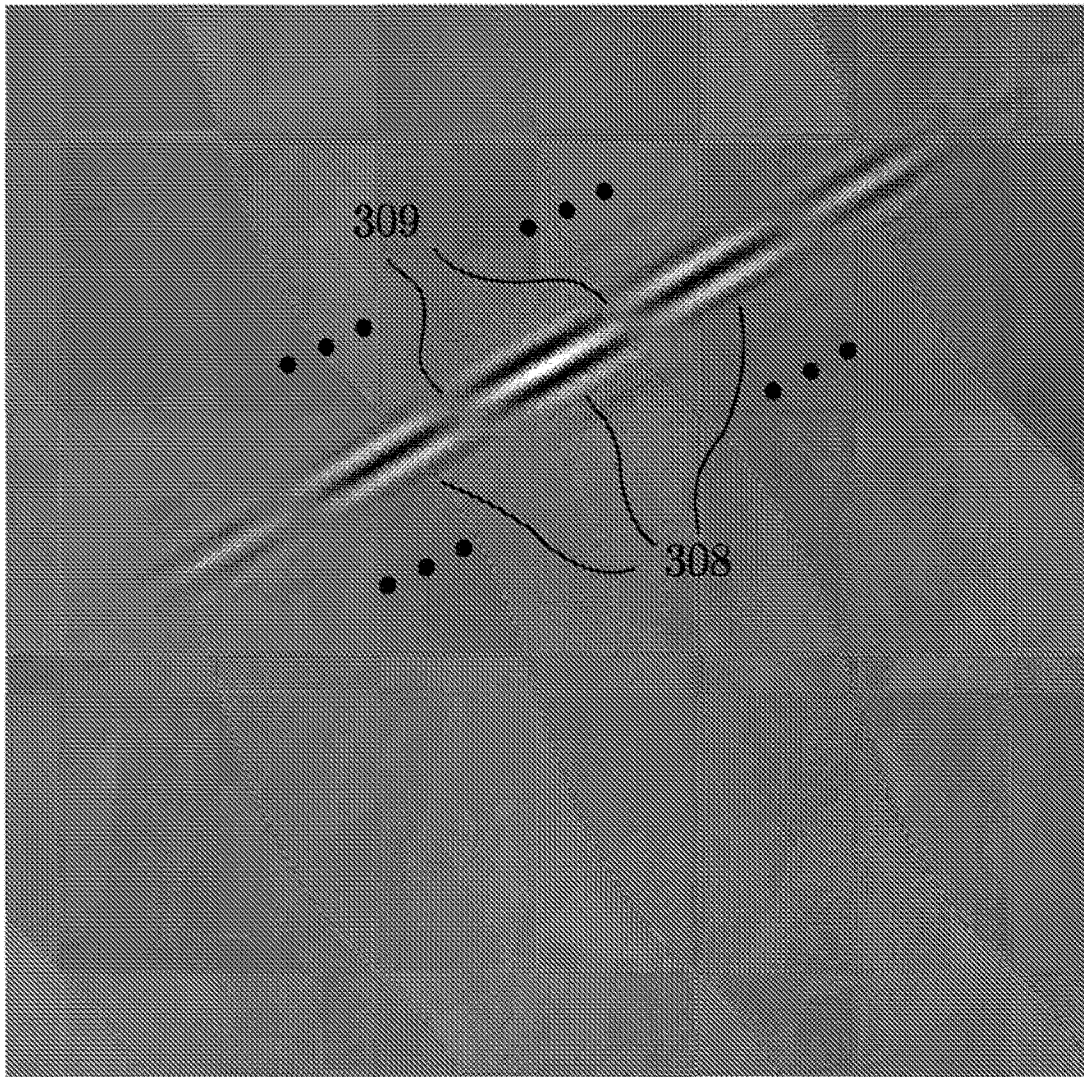


图 3b

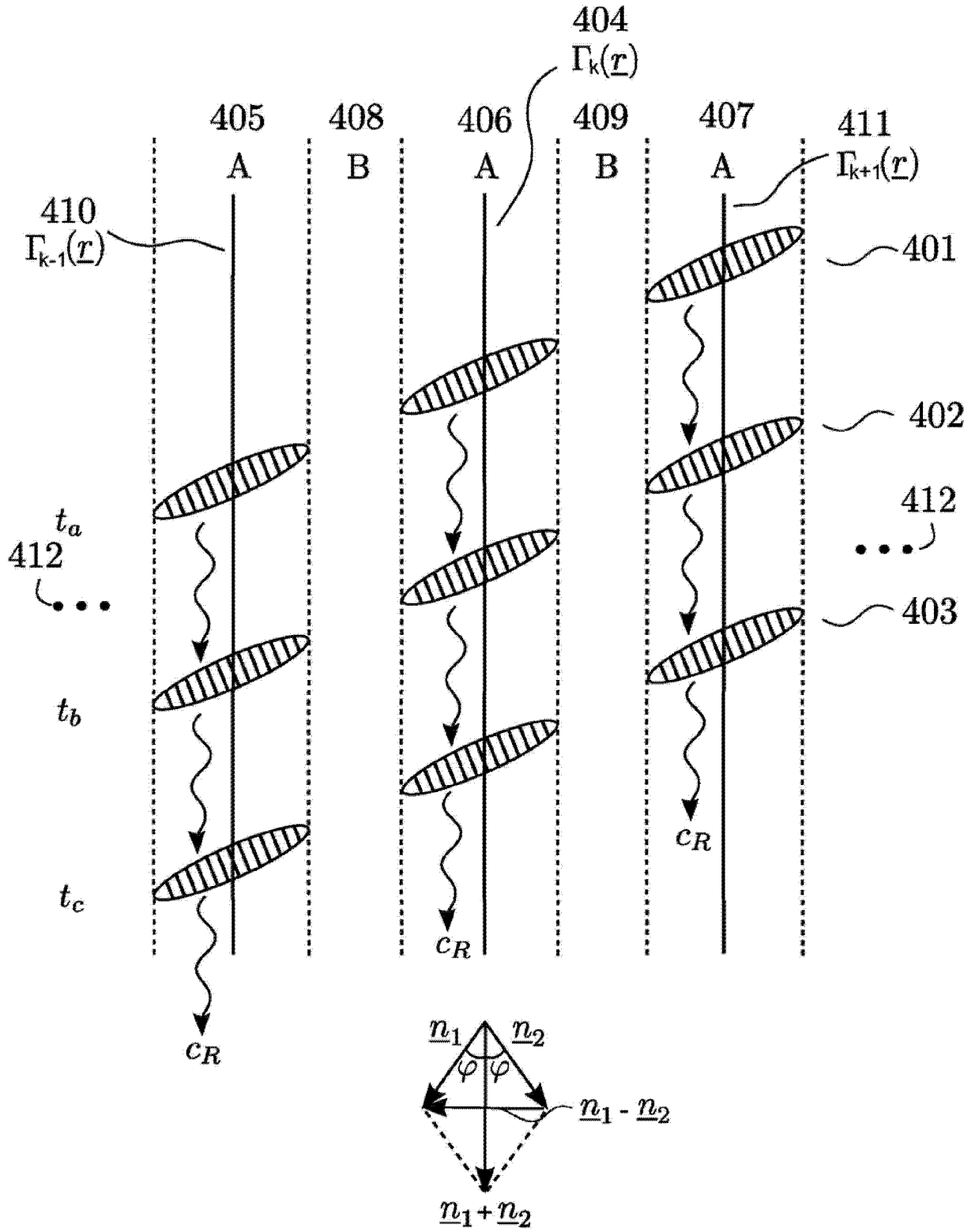


图 4

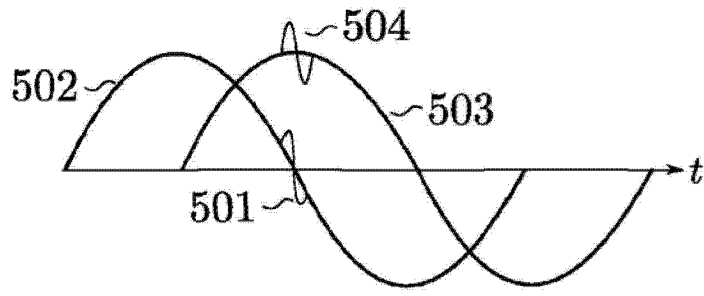


图 5a



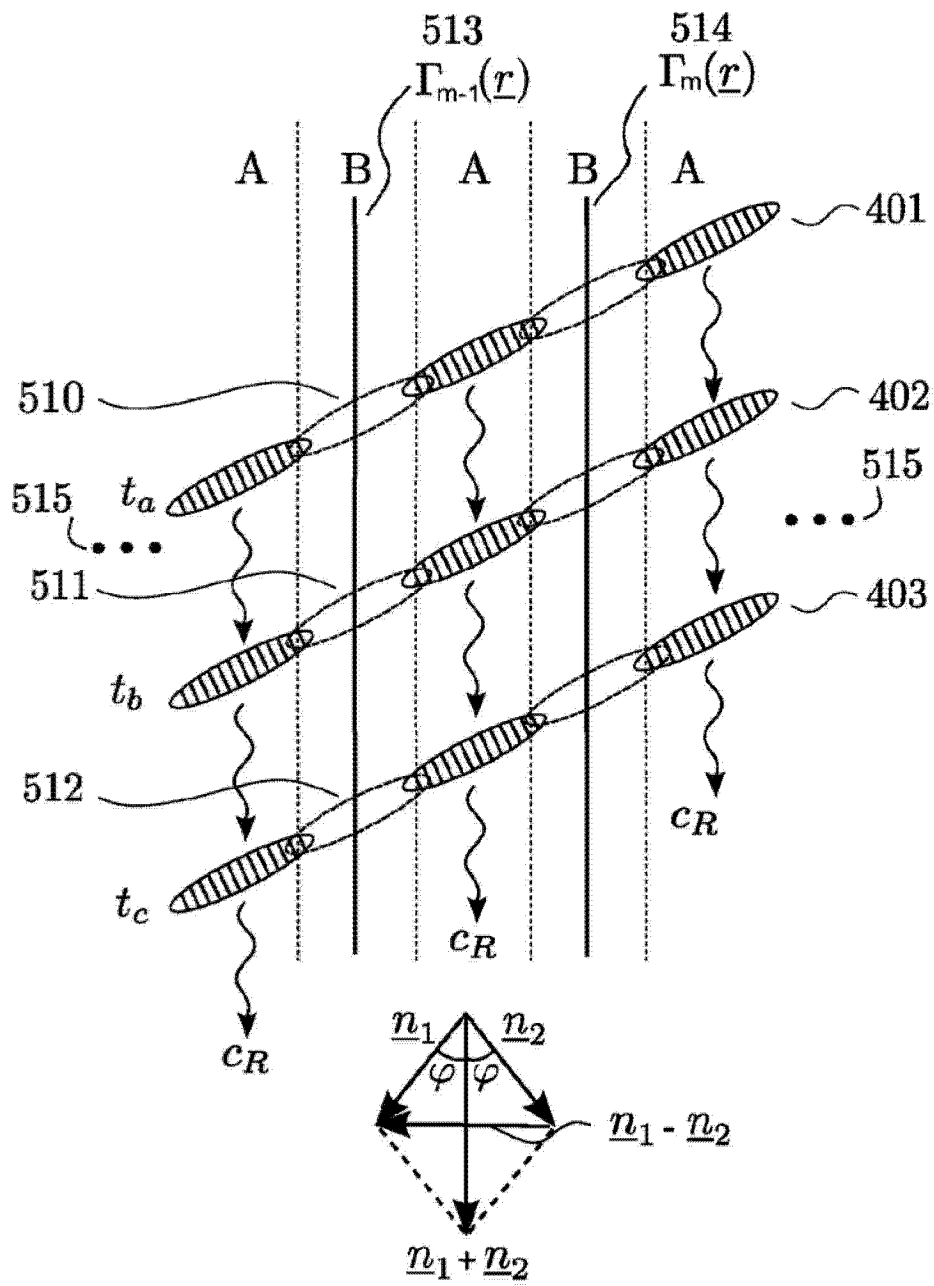


图 5b

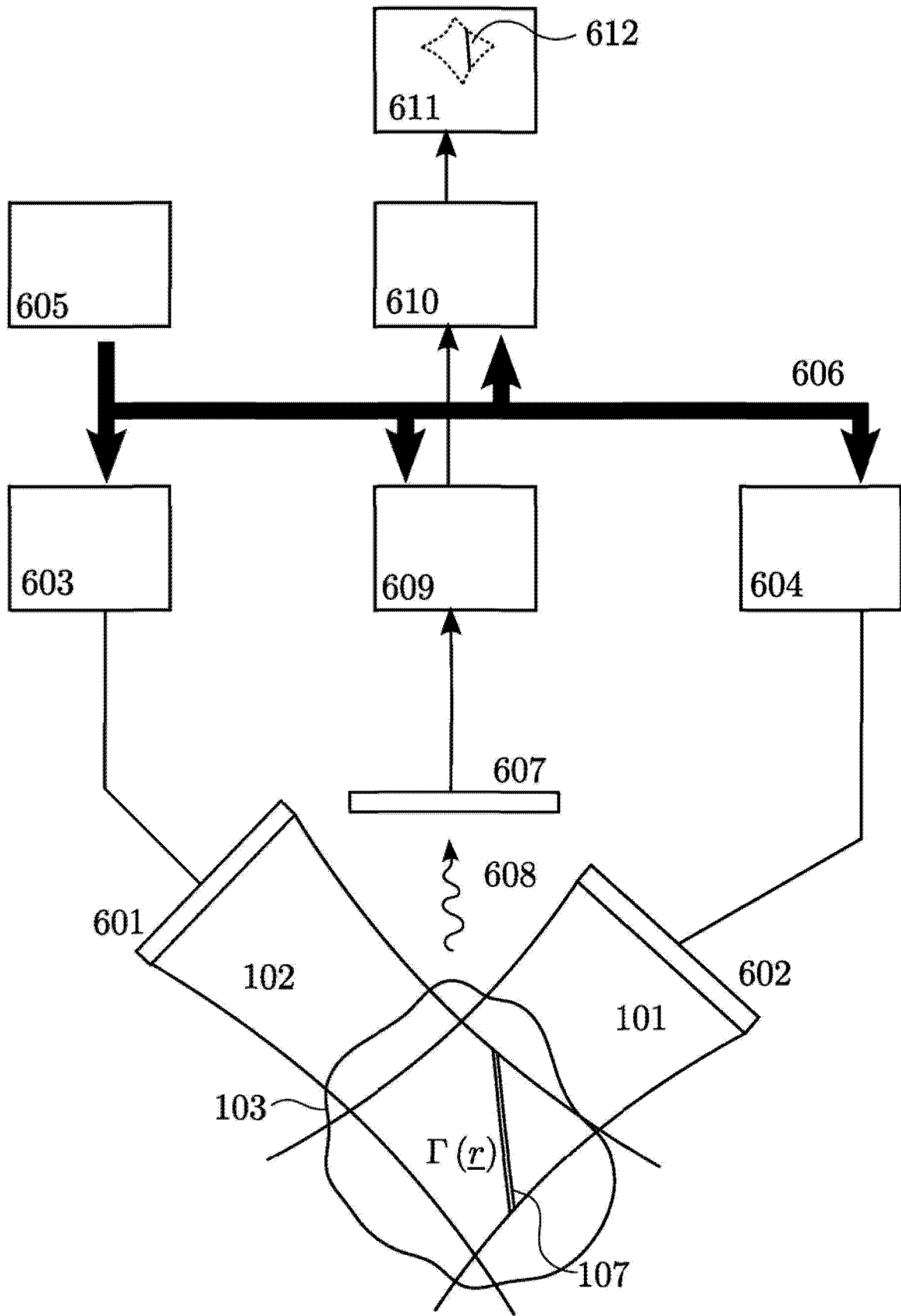


图 6

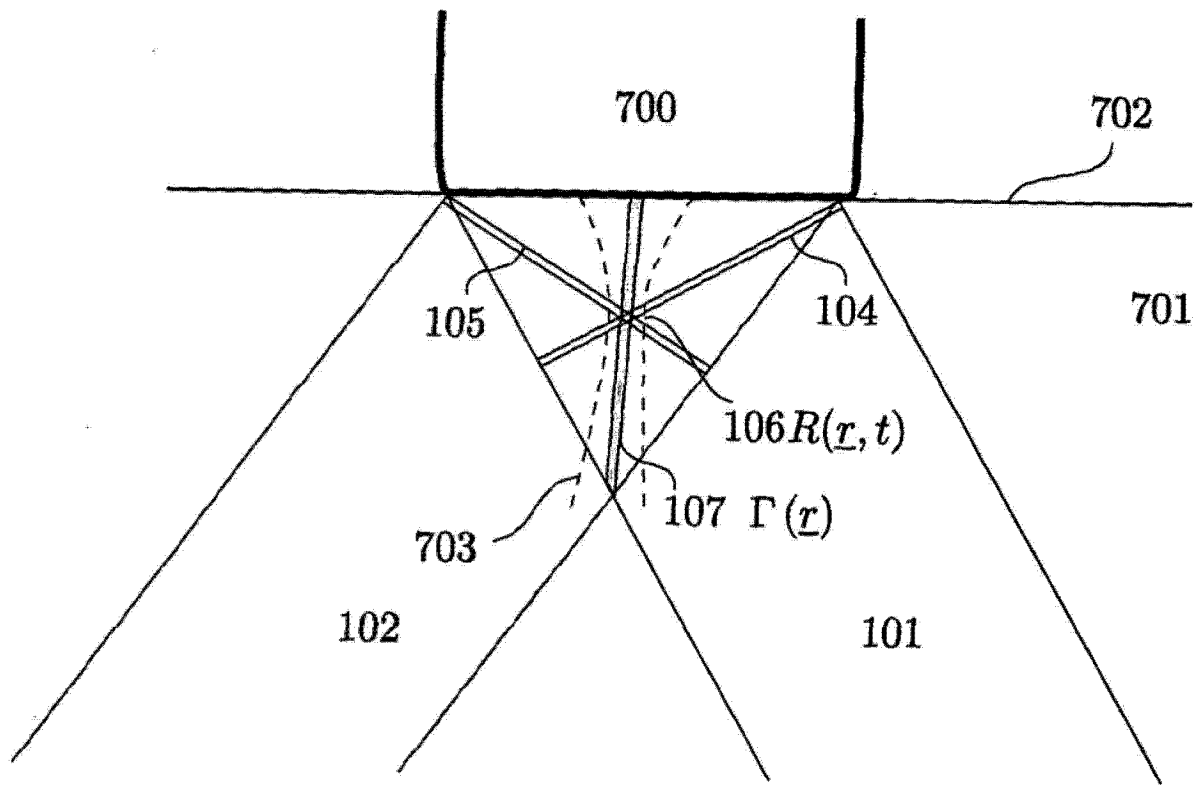


图 7

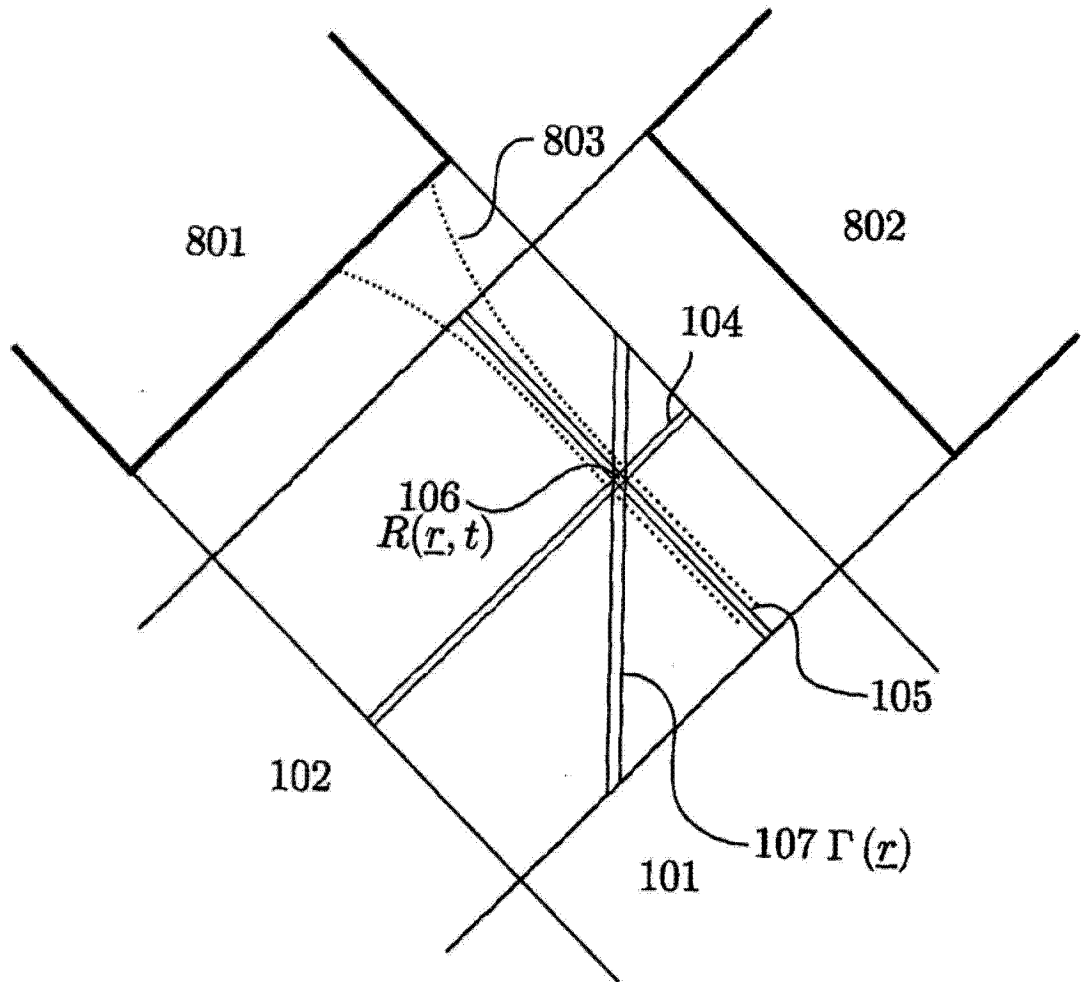


图 8

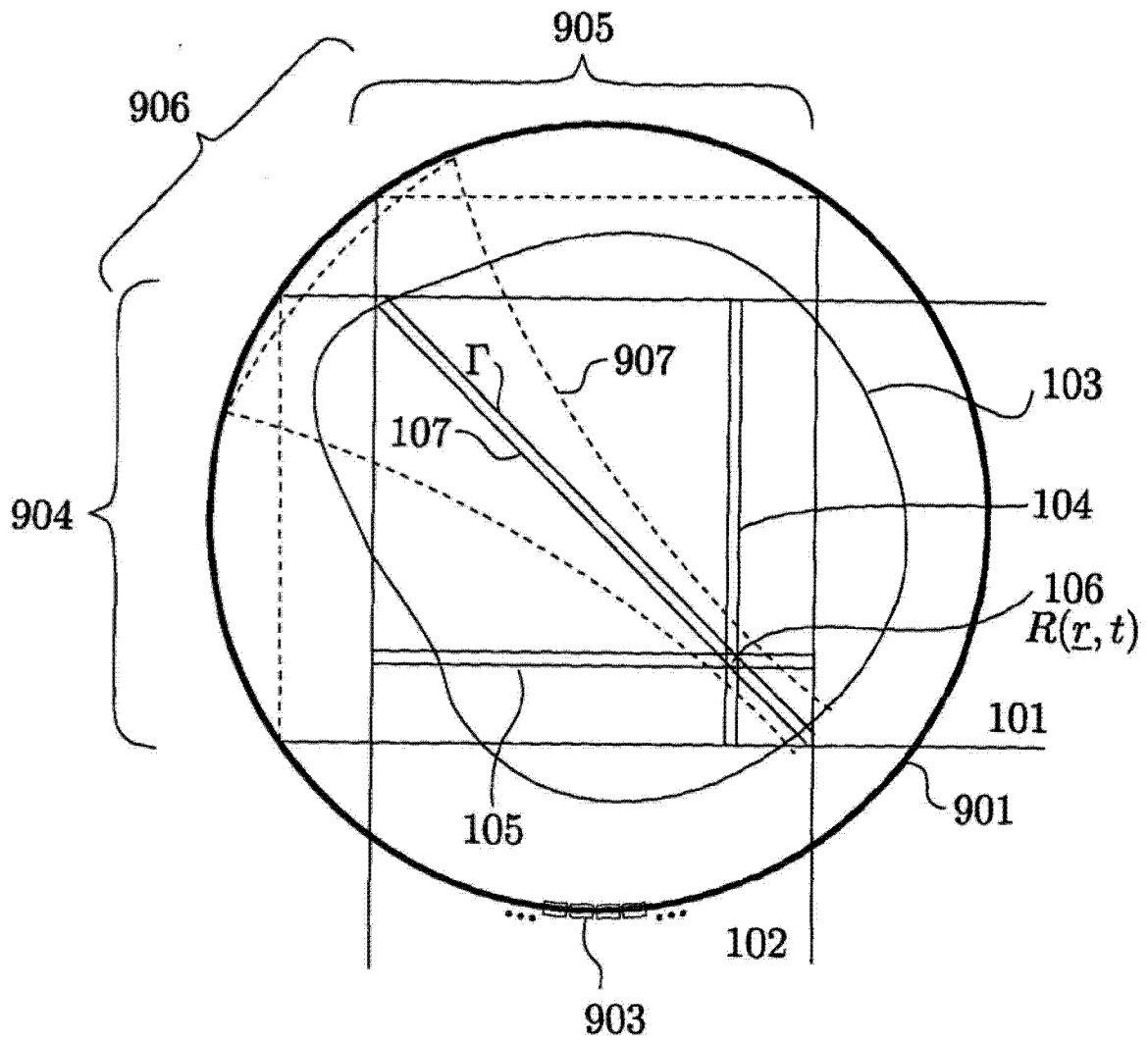


图 9

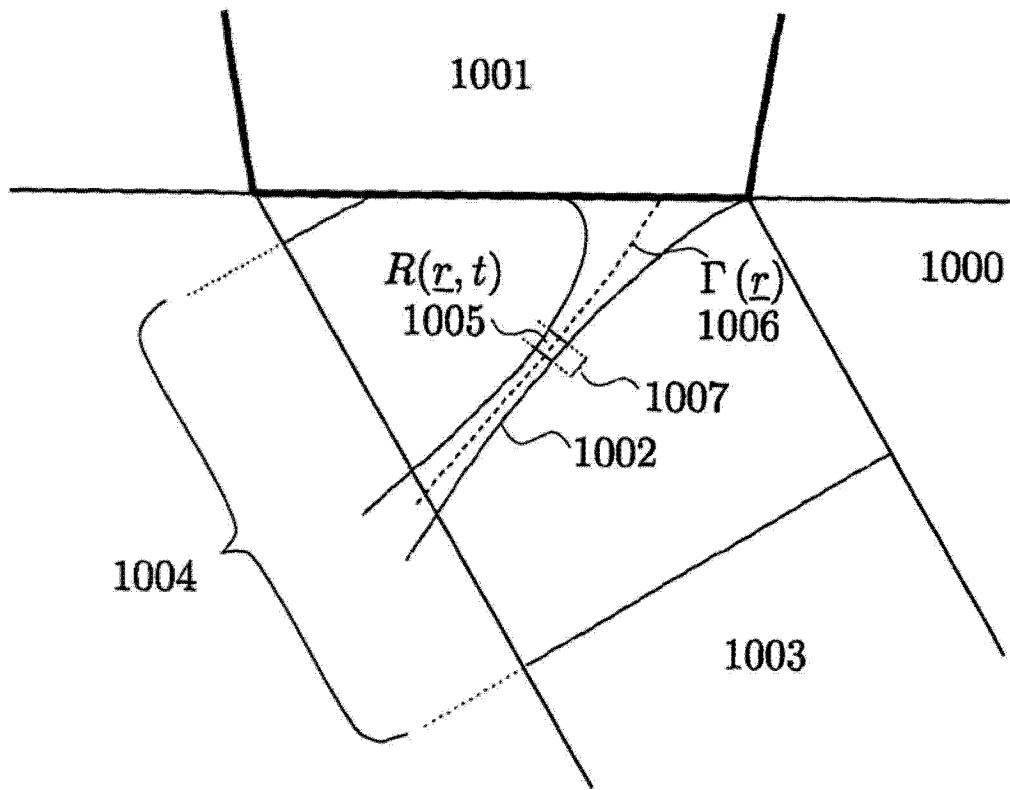


图 10

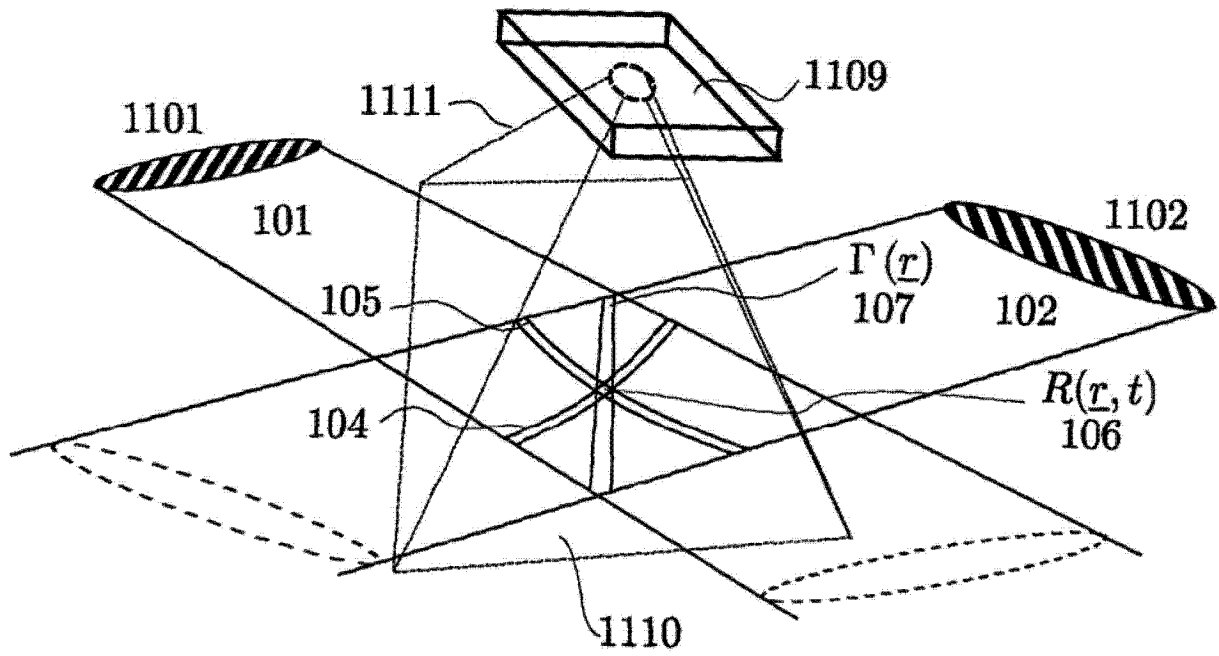


图 11