



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103329008 A

(43) 申请公布日 2013. 09. 25

(21) 申请号 201180062766. 7

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事务所 11038

(22) 申请日 2011. 11. 09

代理人 曹瑾

(30) 优先权数据

61/413, 173 2010. 11. 12 US

(51) Int. Cl.

G01V 1/00 (2006. 01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2013. 06. 26

G01V 1/46 (2006. 01)

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2011/059967 2011. 11. 09

(87) PCT申请的公布数据

W02012/064839 EN 2012. 05. 18

(71) 申请人 雪佛龙美国公司

地址 美国加利福尼亚

申请人 洛斯阿拉莫斯国家安全有限责任公司

(72) 发明人 C·K·武 C·H·斯克勒

K·T·尼赫尔 P·A·约翰松

R·A·谷野 J·A·藤凯特

P·Y·莱巴斯 C·S·拉尔马特

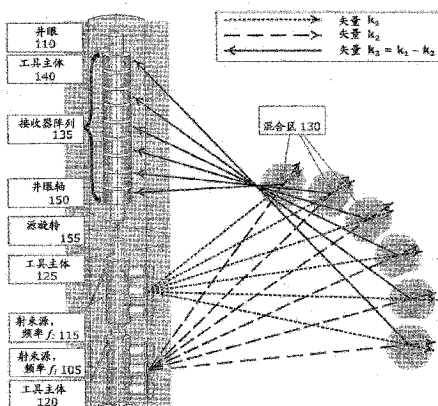
权利要求书35页 说明书24页 附图19页

(54) 发明名称

用于调查岩层的地下特征的系统和方法

(57) 摘要

提供了一种用于调查井眼外侧岩层的方法和系统。该方法包括以下步骤：通过第一声源生成具有第一频率的第一声波；并且通过第二声源生成具有第二频率的第二声波。该第一和第二声源被设置在井眼的局部化区域内。该第一和第二声波在井眼外侧的相交体积中相交。该方法还包括以下步骤：在设置在井眼中的接收器处接收具有第三频率的第三声波，第三剪切声波因相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程而返回至井眼。该第三频率等于第一频率与第二频率之差。



1. 一种用于调查井眼外侧岩层的系统,该系统包括:  
第一声源,被配置成生成具有第一频率的第一声学压缩波;  
第二声源,被配置成生成具有第二频率的第二声学压缩波,其中,该第一声源和第二声源被设置在井眼的局部化区域内,并且其中,第一声波和第二声波在井眼外侧的相交体积中相交;以及  
接收器,设置在井眼中并且被配置成接收具有第三频率的第三剪切声波,该第三剪切声波因相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程而返回至井眼,其中,该第三频率等于第一频率与第二频率之差。
2. 根据权利要求1所述的系统,其中,该第一声学压缩波和第二声学压缩波是声学射束。
3. 根据权利要求1所述的系统,其中,该第一声源、第二声源或两者被配置成包括换能器的线性阵列。
4. 根据权利要求1所述的系统,其中,该接收器被配置成夹紧至井眼的壁部,并且包括三分量接收器阵列。
5. 根据权利要求1所述的系统,还包括控制器,该控制器被配置成按方位角和仰角沿给定方向操纵具有第一频率的第二声波、具有第二频率的第二声波、或两者。
6. 根据权利要求1所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成处理机器可读指令,其在执行时使处理器分析返回的第三声波,并且确定岩层中的、非线性交互导致井眼中的返回能量的混合区的位置。
7. 根据权利要求1所述的系统,其中,该第一声源的轴被设置为相对于第二声源的轴成一角度。
8. 根据权利要求1所述的系统,其中,该第二频率与第一频率的比率被选择成最大化非线性混合区内的非线性混合过程的混合系数。
9. 根据权利要求1所述的系统,还包括编码器,该编码器被配置成以时间可变属性或频率可变属性或两者编码第一声波、第二声波或两者。
10. 根据权利要求1所述的系统,还包括:  
存储装置,被配置成记录与所接收的第三剪切声波相对应的数据,和  
处理器,被配置成处理机器可读指令,在执行所述机器可读指令时使处理器根据利用来自存储装置的所记录数据控制频率比和会聚角关系或井眼周围岩层的非线性特性的选择规则,并且通过重复以下操作来估算压缩与剪切速度比:生成具有第一频率的第一声波、生成具有第二频率的第二声波、接收返回至井眼的第三声波、以及基于第一声源与第二声源的布置和第一声波与第二声波的多个取向识别相交体积的位置。
11. 根据权利要求1所述的系统,还包括:  
存储装置,该存储装置被配置成记录与所接收的第三剪切声波相对应的数据,和  
处理器,被配置成处理机器可读指令,在执行所述机器可读指令时使处理器通过重复以下操作来计算岩层的非线性特性的三维图像或者压缩与剪切速度比的三维图像:生成具有第一频率的第一声波、生成具有第二频率的第二声波、接收返回至井眼的第三声波以及基于第一声源与第二声源的布置和第一声波与第二声波的多个取向识别相交体积的位置,利用来自存储装置的所记录数据。

12. 一种用于调查井眼外侧岩层的方法,包括:

通过第一声源生成具有第一频率的第一压缩声波;

通过第二声源生成具有第二频率的第二压缩声波,其中,该第一声源和第二声源被设置在井眼的局部化区域内,并且其中,第一声波和第二声波在井眼外侧的相交体积中相交;以及

在设置在井眼中的接收器处接收具有第三频率的第三剪切声波,第三剪切声波因相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程而返回至井眼,其中,该第三频率等于第一频率与第二频率之差。

13. 根据权利要求 12 所述的方法,其中,生成第一声学压缩波和生成第二声学压缩波包括:生成第一声学射束和生成第二声学射束。

14. 根据权利要求 12 所述的方法,还包括:将第一声源、第二声源、或两者布置为换能器的线性阵列。

15. 根据权利要求 12 所述的方法,还包括:将接收器夹紧至井眼的壁部,该接收器包括三分量接收器阵列。

16. 根据权利要求 12 所述的方法,还包括:通过按方位角或者仰角或者两者沿给定方向操纵具有第一频率的声波、具有第二频率的声波或者两者。

17. 根据权利要求 12 所述的方法,还包括:分析返回能量,并且确定岩层中的、非线性交互导致井眼中的返回第三声波的混合区的位置。

18. 根据权利要求 12 所述的方法,还包括:相对于第二声源的轴取向成角度地设置第一声源的轴取向。

19. 根据权利要求 12 所述的方法,还包括:利用编码器,以时间可变属性或频率可变属性或两者编码第一声波、第二声波或两者。

20. 根据权利要求 12 所述的方法,还包括:基于第一声源与第二声源的布置以及返回能量的方向,计算相交区的位置。

21. 根据权利要求 20 所述的方法,还包括:利用通过按第一声波和第二声波的多个取向重复生成和接收步骤所记录的数据来估算压缩速度与剪切速度比、或井眼周围岩层的非线性特征或两者。

22. 根据权利要求 12 所述的方法,还包括:确定非线性混合区内非线性混合过程的混合系数,并且选择第二频率与第一频率的比率以最大化混合系数。

23. 一种用于利用来自声源的编码信号调查井眼外侧岩层的系统,该系统包括:

第一声源,被配置成生成包括按时间序列排列的第一多个脉冲的第一声学信号,所述第一多个脉冲在时间上被分开,每一个脉冲包括具有中心频率的第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同;

第二声源,被配置成生成包括按时间序列排列的第二多个脉冲的第二声学信号,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和所述第一多个脉冲中的两个对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,在所述第二多个脉冲的广播的起始时间与所述第一多个脉冲的广播的起始时间之间设置起始时间差,其中,每一个脉冲包括第二调制信号,并且所述第二多个脉冲中的每一个脉冲内的第二调制信号的中心频率是所述第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的第一调制信号的中心频率的选定分数;

其中,第一声源和第二声源被设置在井眼内,并且可控制为使第一声学信号和第二声学信号的轨迹在井眼外侧的相交体积中相交;

设置在井眼内的接收器,该接收器被配置成检测返回至井眼的接收信号,所述接收信号包括通过第一声学信号和第二声学信号在相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程而生成的信号;以及

处理器,被配置成对接收信号执行数据处理,以相对于噪声或者由线性交互过程生成的信号或者两者提取通过非线性混合过程生成的信号。

24. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,所述第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

25. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,所述处理器被配置成,利用波形识别来提取由非线性混合过程生成的信号。

26. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,所述处理器被配置成,根据出现非线性混合过程的区域中的非线性混合的选择规则,基于非线性信号的预测特性,利用带通滤波来提取由非线性混合过程生成的信号。

27. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,所述处理器被配置成,根据出现非线性混合过程的区域中的非线性混合的选择规则,通过关联所检测的信号与根据信号的预测特性设计的模板信号,来提取由非线性混合过程生成的信号。

28. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,由非线性混合过程生成的信号包括按时间序列排列并且在时间上被分开的第三多个脉冲,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和所述第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔相同,

其中,所述第三多个脉冲中的每一个脉冲都包括具有第三中心频率的第三调制信号,第三中心频率等于所述第一多个脉冲与所述第二多个脉冲中的每一个对应脉冲中的第一中心频率与第二中心频率之差,

其中,所述第三多个脉冲中的每一个脉冲在接收器处的抵达时间相对于所述第一多个脉冲的对应脉冲的生成,时间延迟达从第一声源至混合区中心的行进时间与从混合区中心至接收器的行进时间的总和。

29. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,所述处理器被配置成,控制第一源和第二源以重复生成第一信号和生成第二信号,控制接收器以重复检测返回至井眼的接收信号并且重复对接收信号执行数据处理,以针对一个范围的起始时间差和一个范围的频率分数  $d$ ,相对于噪声或由线性交互过程生成的信号或者两者提取由非线性混合过程生成的信号,以获取在多个混合区处生成的信号。

30. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,只有当第二声源的所述第二多个脉冲与第一声源的所述第一多个脉冲之间的起始时间差等于从第一声源至混合区中心的行进时间与从第二声源至混合区中心的行进时间之间的行进时间差,才生成并检测由混合区处的非线性交互生成的信号。

31. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,增加所述第一多个脉冲的数量和增加所述第二多个脉冲的数量增强了相对于噪声或由线性交互过程生成的信号或者两者的由非线性混合过程生成的信号的辨别。

32. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,第一信号包括多个脉冲的和,其中,每一个脉



冲具有等于包络函数与调制信号函数的乘积的信号幅度。

33. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,第一信号  $u_1(t)$  采用形式

$$u_1(t) = \sum_n E1_n(t-T_n) * \exp(i2\pi * f_n * (t-T_n)) * \exp(i\zeta_n)$$

其中:

$E1_n(t-T_n)$  对应于所述第一多个脉冲中的第  $n$  个脉冲的包络,所述包络具有正或负幅度,

$\exp(i2\pi * f_n * (t-T_n))$  对应于所述第一多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的第一调制信号,  
 $f_n$  是第  $n$  个脉冲内的调制信号的中心频率,

$t$  是信号时间,

$T_n$  是生成第  $n$  个脉冲时的时间,以及

$\zeta_n$  是每一个脉冲  $n$  的相位,而  $\exp(i\zeta_n)$  是每一个脉冲  $n$  的相位项。

34. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,第二信号包括多个脉冲的和,其中,每一个脉冲都具有等于包络函数与调制信号函数的乘积的信号幅度。

35. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,第二信号  $u_2(t-\delta)$  采用形式:

$$u_2(t-\delta) = \sum_n E2_n(t-(T_n+\delta)) * \exp(i2\pi * d * f_n * (t-(T_n+\delta))) * \exp(i\zeta_n)$$

其中:

$E2_n(t-(T_n+\delta))$  对应于所述第二多个脉冲中的第  $n$  个脉冲的包络,

$\exp(i2\pi * d * f_n * (t-(T_n+\delta)))$  对应于所述第二多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的第二调制信号,

$d * f_n$  是所述第二多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的调制信号的频率,

$d$  是选定频率比,

$t$  是信号时间,

$(T_n+\delta)$  是在广播所述第二多个脉冲中的第  $n$  个脉冲时的时间,

$\delta$  是第二声学信号的广播的起始时间与第一声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差,以及

$\zeta_n$  是每一个脉冲  $n$  的相位,而  $\exp(i\zeta_n)$  是每一个脉冲  $n$  的相位项。

36. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,由非线性混合过程生成的信号成比例于每一个脉冲的包络函数与每一个脉冲的调制信号函数的乘积基于所述第三多个脉冲的数量的和。

37. 根据权利要求 23 所述的系统,其中,由非线性混合过程生成的信号  $u_3(t)$  采用形式:

$$u_3(t) \propto \sum_n E3_n(t-(T_n+T)) * \exp(i2\pi * (1-d) * f_n * (t-(T_n+T))) * \exp(i\zeta_n)$$

其中:

$E3_n(t-(T_n+T))$  是由非线性混合第一信号和第二信号所生成的信号  $u_3$  的第三多个脉冲中的一个脉冲的包络,

$\exp(i2\pi * (1-d)*f_n * (t - (T_n + T)))$  对应于所述第三多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的第三调制信号,

$(1-d)*f_n$  是所述第三多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的调制信号的频率, 其是所述第一多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的第一调制信号的中心频率  $f_n$  与所述第二多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的第二调制信号的中心频率  $d*f_n$  之差,

$d$  是选定频率比,

$t$  是信号时间,

$(T_n + T)$  是在所述第三多个脉冲中的第  $n$  个脉冲抵达接收器时的时间,

$T$  是从第一声源至混合区中心以及从混合区中心至接收器的总行进时间, 以及

$\zeta_n$  是每一个脉冲  $n$  的相位, 而  $\exp(i\zeta_n)$  是每一个脉冲  $n$  的相位项。

38. 根据权利要求 23 所述的系统, 其中, 所述处理器被配置成, 通过关联所检测的信号与模板信号来提取由非线性混合过程生成的信号, 其中, 模板信号包括多个脉冲的和, 其中, 每一个脉冲具有等于包络函数与调制信号函数的乘积的信号幅度。

39. 根据权利要求 23 所述的系统, 其中, 所述处理器被配置成, 通过关联所检测的信号与模板信号来提取由非线性混合过程生成的信号, 其中, 模板  $u_s$  采用形式:

$$u_s(t) = \sum_n W_n(t - T_n) * \exp(i2\pi * g(f_n) * (t - T_n)) * \exp(i\zeta_n)$$

其中:

$W_n(t - T_n)$  是模板信号中第  $n$  个脉冲的幅度包络,

$\exp(i2\pi * g(f_n) * (t - T_n))$  对应于模板信号的所述多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的调制信号,

$g(f_n)$  是模板的所述多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的调制信号的选定函数,

$t$  是传播时间,

$T_n$  是在所述多个脉冲中的第  $n$  个脉冲被仿真以抵达接收器时的时间, 以及

$\zeta_n$  是每一个脉冲  $n$  的相位, 而  $\exp(i\zeta_n)$  是每一个脉冲  $n$  的相位项。

40. 根据权利要求 23 所述的系统,

其中, 所述处理器被配置成, 通过根据声波的非线性交互的选择规则关联所检测的信号与根据信号的预测特性设计的模板信号, 来提取由非线性混合过程生成的信号,

其中, 所述处理器还被配置成, 针对所述第二多个脉冲与所述第一多个脉冲之间的多个起始时间差  $\delta$ , 并且针对所述第二多个脉冲中的每一个脉冲内的调制信号的中心频率与所述第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的调制信号的中心频率之间的多个频率比  $d$ , 重复模板信号与检测信号之间的关联, 以针对每一个起始时间差  $\delta$  并且针对每一个频率比  $d$  来生成包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ 。

41. 根据权利要求 40 所述的系统, 其中, 所述处理器还被配置成, 针对存在与由非线性混合过程所生成的信号的出现相对应的相关频带限制尖峰信号, 搜索信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值, 以确定抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值。

42. 根据权利要求 41 所述的系统, 其中, 在由非线性过程生成的带宽限制尖峰信号出现在关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的情况下, 所确定的起始时间差  $\delta_{NL}$  大致等于从第一声源至

混合区中心的行进时间与从第二声源至混合区中心的行进时间之间的时间差。

43. 根据权利要求 41 所述的系统,其中,在由非线性混合过程生成的带宽限制尖峰信号出现在关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的情况下,所确定的抵达时间  $T_{NL}$  大致等于从第一声源至混合区中心的行进时间以及从混合区中心至接收器的行进时间的总行进时间。

44. 一种用于调查井眼外侧岩层的方法,包括:

通过第一声源生成包括按时间序列排列的第一多个脉冲的第一声学信号,所述第一多个脉冲在时间上被分开,每一个脉冲包括具有中心频率的第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同;

通过第二声源生成包括按时间序列排列的第二多个脉冲的第二声学信号,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和所述第一多个脉冲中的两个对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,在所述第二多个脉冲的广播的起始时间与所述第一多个脉冲的广播的起始时间之间设置起始时间差,其中,每一个脉冲包括第二调制信号,并且所述第二多个脉冲中的每一个脉冲内的第二调制信号的中心频率是所述第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的第一调制信号的中心频率的选定分数;

其中,第一声源和第二声源被设置在井眼内,并且可控制为使第一声学信号和第二声学信号的轨迹在井眼外侧的相交体积中相交;

通过设置在井眼内的接收器接收返回至井眼的检测信号,该检测信号包括通过第一声学信号和第二声学信号在相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程生成的信号;以及

通过处理器对接收的信号执行数据处理,以相对于噪声或由线性交互过程生成的信号或者两者提取通过非线性混合过程生成的信号。

45. 根据权利要求 44 所述的方法,其中,生成第一声学信号包括:生成第一声学信号以使得所述第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

46. 根据权利要求 44 所述的方法,还包括:通过处理器利用波形识别来提取由非线性混合过程生成的信号。

47. 根据权利要求 44 所述的方法,还包括:由处理器根据其中出现非线性混合过程的区域中的非线性混合的选择规则,基于非线性信号的预测特性,利用带通滤波来提取由非线性混合过程生成的信号。

48. 根据权利要求 44 所述的方法,还包括:由处理器通过根据其中出现非线性混合过程的区域中的非线性混合的选择规则,关联所检测信号与根据信号的预测特性设计的模板信号,来提取由非线性混合过程生成的信号。

49. 根据权利要求 44 所述的方法,其中,由非线性混合过程生成的信号包括:按时间序列排列并且在时间上被分开的第三多个脉冲,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔与所述第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔相同,

其中,所述第三多个脉冲中的每一个脉冲包括具有第三中心频率的第三调制信号,所述第三中心频率等于所述第一多个脉冲与所述第二多个脉冲中的每一个对应脉冲中的第一中心频率与第二中心频率之差,

其中,所述第三多个脉冲中的每一个脉冲在接收器处的抵达时间相对于所述第一多个

脉冲的对应脉冲的生成,时间延迟达从第一声源至混合区中心的行进时间与从混合区中心至接收器的行进时间的总和。

50. 根据权利要求 44 所述的方法,还包括:重复生成第一信号、生成第二信号,重复通过接收器检测返回至井眼的接收信号,并且重复对所接收的信号执行数据处理,以针对一个范围的起始时间差和一个范围的频率分数  $d$ ,相对于噪声或由线性交互过程生成的信号或者两者提取由非线性混合过程生成的信号,以获取在多个混合区处生成的信号。

51. 根据权利要求 44 所述的方法,还包括:只有当第二声源的第二多个脉冲与第一声源的第一多个脉冲之间的起始时间差等于从第一声源至混合区中心的行进时间与从第二声源至混合区中心的行进时间之间的行进时间差时,才检测到由混合区处的非线性交互生成的信号。

52. 根据权利要求 44 所述的方法,还包括:增加所述第一多个脉冲的数量和增加所述第二多个脉冲的数量,以增强相对于噪声、或由线性交互过程生成的信号、或者两者的由非线性混合过程生成的信号的辨别。

53. 根据权利要求 44 所述的方法,其中,生成第一信号包括:生成作为多个脉冲的和的第一信号,其中,每一个脉冲具有等于包络函数与调制信号函数的乘积的信号幅度。

54. 根据权利要求 44 所述的方法,其中,生成第一信号包括:生成采用以下形式的第一信号  $u_1(t)$

$$u_1(t) = \sum_n E1_n(t - T_n) * \exp(i2\pi * f_n * (t - T_n)) * \exp(i\zeta_n)$$

其中:

$E1_n(t - T_n)$  对应于所述第一多个脉冲中的第  $n$  个脉冲的包络,所述包络具有正或负幅度,

$\exp(i2\pi * f_n * (t - T_n))$  对应于所述第一多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的第一调制信号,  
 $f_n$  是第  $n$  个脉冲内的调制信号的中心频率,

$t$  是信号时间,

$T_n$  是生成第  $n$  个脉冲时的时间,以及

$\zeta_n$  是每一个脉冲  $n$  的相位,而  $\exp(i\zeta_n)$  是每一个脉冲  $n$  的相位项。

55. 根据权利要求 44 所述的方法,其中,生成第二信号包括:生成作为多个脉冲的和第二信号,其中,每一个脉冲具有等于包络函数与调制信号函数的乘积的信号幅度。

56. 根据权利要求 44 所述的方法,其中,生成第二信号包括:生成采用以下形式的第二信号  $u_2(t - \delta)$ :

$$u_2(t - \delta) = \sum_n E2_n(t - (T_n + \delta)) * \exp(i2\pi * d * f_n * (t - (T_n + \delta))) * \exp(i\zeta_n)$$

其中:

$E2_n(t - (T_n + \delta))$  对应于所述第二多个脉冲中的第  $n$  个脉冲的包络,

$\exp(i2\pi * d * f_n * (t - (T_n + \delta)))$  对应于所述第二多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的第二调制信号,

$d * f_n$  是第二多个脉冲中的第  $n$  个脉冲内的调制信号的频率,

d 是选定频率比，

t 是信号时间，

$(T_n + \delta)$  是在广播所述第二多个脉冲中的第 n 个脉冲的时间，

$\delta$  是第二声学信号的广播的起始时间与第一声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差，以及

$\zeta_n$  是每一个脉冲 n 的相位，而  $\exp(i\zeta_n)$  是每一个脉冲 n 的相位项。

57. 根据权利要求 44 所述的方法，其中，由非线性混合过程生成的信号包括多个脉冲的和，其中，每一个脉冲具有等于包络函数与调制信号函数的乘积的信号幅度。

58. 根据权利要求 44 所述的方法，其中，由非线性混合过程生成的信号  $u_3(t)$  采用形式：

$$u_3(t) \propto \sum_n E_{3n}(t - (T_n + T)) * \exp(i2\pi * (1-d) * f_n * (t - (T_n + T))) * \exp(i\zeta_n)$$

其中：

$E_{3n}(t - (T_n + T))$  是由非线性混合第一信号和第二信号所生成的信号  $u_3$  的第三多个脉冲中的一脉冲的包络，

$\exp(i2\pi * (1-d) * f_n * (t - (T_n + T)))$  对应于所述第三多个脉冲中的第 n 个脉冲内的第三调制信号，

$(1-d) * f_n$  是所述第三多个脉冲中的第 n 个脉冲内的调制信号的频率，该频率是所述第一多个脉冲中的第 n 个脉冲内的第一调制信号的中心频率  $f_n$  与所述第二多个脉冲中的第 n 个脉冲内的第二调制信号的中心频率  $d * f_n$  之差，

d 是选定频率比，

t 是信号时间，

$(T_n + T)$  是在所述第三多个脉冲中的第 n 个脉冲抵达接收器时的时间，

T 是从第一声源至混合区中心以及从混合区中心至接收器的总行进时间，以及

$\zeta_n$  是每一个脉冲 n 的相位，而  $\exp(i\zeta_n)$  是每一个脉冲 n 的相位项。

59. 根据权利要求 44 所述的方法，还包括：处理器通过关联所检测的信号与模板信号来提取由非线性混合过程生成的信号，其中，模板信号包括多个脉冲的和，其中，每一个脉冲具有等于包络函数与调制信号函数的乘积的信号幅度。

60. 根据权利要求 44 所述的方法，还包括：处理器通过关联所检测的信号与模板信号来提取由非线性混合过程生成的信号，其中，该模板  $u_s$  采用形式：

$$u_s(t) = \sum_n W_n(t - T_n) * \exp(i2\pi * g(f_n) * (t - T_n)) * \exp(i\zeta_n)$$

其中：

$W_n(t - T_n)$  是模板信号中第 n 个脉冲的幅度包络，

$\exp(i2\pi * g(f_n) * (t - T_n))$  对应于模板信号的所述多个脉冲中的第 n 个脉冲内的调制信号，

$g(f_n)$  是模板的所述多个脉冲中的第 n 个脉冲内的调制信号的选定函数，

t 是传播时间，

$T_n$  是所述多个脉冲中的第 n 个脉冲被仿真以抵达接收器时的时间，以及

$\zeta_n$  是每一个脉冲  $n$  的相位, 而  $\exp(i\zeta_n)$  是每一个脉冲  $n$  的相位项。

61. 根据权利要求 44 所述的方法, 还包括:

处理器通过根据声波的非线性交互的选择规则, 关联所检测的信号与根据信号的预测特性设计的模板信号, 来提取由非线性混合过程生成的信号, 并且针对第二多个脉冲与第一多个脉冲之间的多个起始时间差  $\delta$  且针对第二多个脉冲中的每一个脉冲内的调制信号的中心频率与第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的调制信号的中心频率之间的多个频率比  $d$ , 重复在模板信号与检测信号之间关联, 以针对每一个起始时间差  $\delta$  并且针对每一个频率比  $d$  来生成包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ 。

62. 根据权利要求 61 所述的方法, 还包括: 处理器针对存在与由非线性混合过程所生成的信号的出现相对应的相关频带限制尖峰信号, 搜索信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值, 以确定抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值。

63. 根据权利要求 62 所述的方法, 其中, 在由非线性混合过程生成的带宽限制尖峰信号出现在关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的情况下, 所确定的起始时间差  $\delta_{NL}$  大致等于从第一声源至混合区中心的行进时间与从第二声源至混合区中心的行进时间之间的时间差。

64. 根据权利要求 62 所述的方法, 其中, 在由非线性混合过程生成的带宽限制尖峰信号出现在关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的情况下, 所确定的抵达时间  $T_{NL}$  大致等于从第一声源至混合区中心的行进时间以及从混合区中心至接收器的行进时间的总行进时间。

65. 一种用于调查井眼外侧岩层的系统, 该系统包括:

第一声源, 被配置成生成具有第一频率的第一声学信号;

第二声源, 被配置成生成具有第二频率的第二声学信号;

其中, 第一声源和第二声源被设置并定位在井眼内, 并且可控制以使第一声学信号和第二声学信号在井眼外侧的相交体积中相交, 并且第二声学信号与第一声学信号之间设置有起始时间差;

设置在井眼内的接收器, 该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号, 该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程生成; 以及

记录系统, 被配置成记录检测信号并将检测信号存储在存储装置中, 并且记录测量参数, 该测量参数包括: 第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的仰角和方位角、以及第二声学信号的仰角和方位角。

66. 根据权利要求 65 所述的系统, 还包括处理器, 该处理器被配置成扫描第一声学信号的广播的起始时间与第二声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差的范围, 以使起始时间差的范围包括使第一声学信号与第二声学信号大致同时抵达混合区的时间差。

67. 根据权利要求 65 所述的系统, 所述系统还包括硬件或软件或两者, 其被配置成控制第一声学信号的相位、或第二声学信号的相位、或两者, 以使来自第一声学信号与第二声学信号的交互的接收信号具有相反极性。

68. 根据权利要求 67 所述的系统, 其中, 来自第一声学信号与第二声学信号的交互的、具有相反极性的接收信号被组合, 以相对于噪声或源自线性交互的信号或两者增强由非线性交互生成的信号。

69. 根据权利要求 65 所述的系统,其中,由非线性交互生成的检测信号的至少一部分成比例于第一声学信号的幅度与第二声学信号的幅度的乘积。

70. 根据权利要求 65 所述的系统,还包括时变带通滤波装置,该时变带通滤波装置被配置成向检测信号应用时变频率带通滤波,以保持由非线性交互生成的信号的希望频率带宽左右的窄频率带宽,窄频率带宽被选自为在第一频率与第二频率之差左右。

71. 根据权利要求 65 所述的系统,其中:

该第一声学信号包括按时间序列排列的第一多个脉冲,所述第一多个脉冲在时间上被分开,每一个脉冲包括具有中心频率的第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同;

该第二声学信号包括按时间序列排列的第二多个脉冲,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,在第二多个脉冲的广播的起始时间与第一多个脉冲的广播的起始时间之间设置有起始时间差,其中,每一个脉冲包括第二调制信号,并且其中,该第二多个脉冲中的每一个脉冲内的第二调制信号的中心频率是第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的第一调制信号的中心频率的选定分数;并且

该起始时间差被控制成使得第一声学信号和第二声学信号在混合区中相交。

72. 根据权利要求 71 所述的系统,其中,第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

73. 根据权利要求 71 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成关联检测信号与包括多个脉冲的模板信号,所述多个脉冲按时间序列排列并且在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,所述多个脉冲中的每一个脉冲包括具有中心频率的调制信号,该中心频率等于第一多个脉冲和第二多个脉冲中的每一个对应脉冲中的第一调制信号的中心频率与第二调制信号的中心频率之差,以获取包含由非线性混合区中的非线性交互生成的信号的关联信号。

74. 根据权利要求 73 所述的系统,还包括多个接收器,所述多个接收器被配置成接收多个检测信号,其中,所述处理器被配置成,向通过所述多个接收器接收的所述多个检测信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者。

75. 根据权利要求 73 所述的系统,其中,所述接收器包括水中听音器、或多分量检测器、或两者,并且其中,所述检测信号包括由水中听音器检测的压力信号、或由多分量检测器检测的多分量信号、或两者。

76. 根据权利要求 75 所述的系统,其中,所述处理器还被配置成,针对所述检测信号执行速端图分析。

77. 根据权利要求 76 所述的系统,其中,所述处理器还被配置成,向与垂直剪切 SV 信号、水平剪切 SH 信号以及压缩 P 信号相对应的三个检测分量信号应用速端图分析。

78. 根据权利要求 77 所述的系统,其中,所述处理器还被配置成,向通过三个检测器接收的所述三个检测分量信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者,或者向由水中听音器检测的压力信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者。

79. 根据权利要求 77 所述的系统,还包括时变带通滤波装置,该时变带通滤波装置被

配置成,向检测信号应用时变频率带通滤波,以保持由非线性交互生成的信号的希望频率带宽左右的窄频率带宽,该窄频率带宽被选择为第一频率与第二频率之差左右。

80. 根据权利要求 79 所述的系统,其中,所述处理器还被配置成,控制第一声源、第二声源以及接收器,并且重复多次以下步骤:生成第一声学信号、生成第二声学信号、接收检测信号、应用时变频率带通滤波、关联检测信号与模板信号、应用速端图分析、以及组合多个信号,以改进信噪比。

81. 根据权利要求 79 所述的系统,其中,所述处理器还被配置成,改变起始时间差并且重复多次以下步骤:生成第一声学信号、生成第二声学信号、接收检测信号、应用时变频率带通滤波、关联检测信号与模板信号、以及针对三个检测信号中的每一个应用速端图分析,以分离不同的传播信号模式,包括压缩模式 P、垂直剪切模式 SV 以及水平剪切模式 SH。

82. 根据权利要求 79 所述的系统,其中,所述处理器还被配置成,改变起始时间差并且重复多次以下步骤:生成第一信号、生成第二信号、接收检测信号、应用时变频率带通滤波、以及关联由水中听音器检测的信号与模板信号。

83. 根据权利要求 79 所述的系统,其中,所述处理器还被配置成,控制第一声源、第二声源以及接收器,以扫描第一声学信号的多个方位角和仰角、第二声学信号的多个方位角和仰角、或接收器的位置,并且重复多次以下步骤:生成第一声学信号、生成第二声学信号、接收检测信号、应用时变频率带通滤波以获取滤波信号、关联滤波信号与模板信号、以及针对三个检测的分量信号应用速端图分析,以针对不同传播信号模式分离这些分量信号,所述不同传播信号模式包括压缩模式 P、垂直剪切模式 SV 以及水平剪切模式 SH。

84. 根据权利要求 83 所述的系统,其中,所述处理器还被配置成,重复改变第一声学信号的广播的起始时间与第二声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差,重复改变第一频率与第二频率之间的频率比,以及重复扫描第一声学信号的多个方位角和仰角、第二声学信号的多个方位角和仰角、以及接收器的位置,以获取多个信号测量结果。

85. 根据权利要求 84 所述的系统,还包括与处理器通信的存储装置,该存储装置被配置成存储获取的所述多个信号测量结果。

86. 一种调查井眼外侧岩层的方法,该方法包括:

通过第一声源生成具有第一频率的第一信号;

通过第二声源生成具有第二频率的第二信号;

其中,该第一声源和第二声源被设置并定位在井眼内,并且可控制以使第一声学信号和第二声学信号在井眼外侧的相交体积中相交,并且第二声学信号与第一声学信号之间设置有起始时间差;

通过接收器接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号,该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程生成;以及

记录检测信号并将检测信号存储在存储装置中,并且记录测量参数,该测量参数包括:第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的仰角和方位角、以及第二声学信号的仰角和方位角。

87. 根据权利要求 86 所述的方法,还包括:扫描第一声学信号的广播的起始时间与第二声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差的范围,以使起始时间差范围包括使第一



声学信号与第二声学信号大致同时抵达混合区中心的时间差。

88. 根据权利要求 86 所述的方法,还包括:控制第一声学信号的相位、或第二声学信号的相位或两者,以使来自第一声学信号与第二声学信号的交互的接收信号具有相反极性。

89. 根据权利要求 88 所述的方法,还包括:组合来自第一声学信号与第二声学信号的交互的、具有相反极性的接收信号,以相对于噪声、或源自线性交互的信号、或两者增强由非线性交互生成的信号。

90. 根据权利要求 86 所述的方法,其中,由非线性交互生成的检测信号的至少一部分成比例于第一声学信号的幅度与第二声学信号的幅度的乘积。

91. 根据权利要求 86 所述的方法,还包括:通过时变带通滤波器向检测信号应用时变频率带通滤波,以保持由非线性交互生成的信号的希望频率带宽左右的窄频率带宽,窄频率带宽被选择为在第一频率与第二频率之差左右。

92. 根据权利要求 86 所述的方法,其中:

生成第一声学信号包括:生成按时间序列排列的第一多个脉冲,所述第一多个脉冲在时间上被分开,每一个脉冲包括具有中心频率的第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同;

生成第二声学信号包括:生成按时间序列排列的第二多个脉冲,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,在第二多个脉冲的广播的起始时间与第一多个脉冲的广播的起始时间之间设置有起始时间差,其中,每一个脉冲包括第二调制信号,并且其中,该第二多个脉冲中的每一个脉冲内的第二调制信号的中心频率是第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的第一调制信号的中心频率的选定分数;并且

该起始时间差被控制成使得第一声学信号和第二声学信号在混合区中相交。

93. 根据权利要求 92 所述的方法,其中,第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

94. 根据权利要求 92 所述的方法,还包括:

通过处理器关联检测信号与包括多个脉冲的模板信号,所述多个脉冲按时间序列排列并且在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,所述多个脉冲中的每一个脉冲包括具有中心频率的调制信号,该中心频率等于第一多个脉冲和第二多个脉冲中的每一个对应脉冲中的第一调制信号的中心频率与第二调制信号的中心频率之差,以获取包含由非线性混合区中的非线性交互生成的信号的关联信号。

95. 根据权利要求 94 所述的方法,还包括:在多个接收器处接收多个检测信号,并且通过处理器向通过所述多个接收器接收的所述多个检测信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者。

96. 根据权利要求 94 所述的方法,还包括:通过水中听音器检测压力信号,或者通过多分量检测器检测多分量信号,或两者。

97. 根据权利要求 94 所述的方法,还包括:通过接收器中的三个检测器中的每一个检测器检测接收信号的三个分量信号中的每一个分量信号。

98. 根据权利要求 97 所述的方法,还包括:通过处理器对检测信号执行速端图分析。

99. 根据权利要求 98 所述的方法,其中,执行速端图分析包括:向与垂直剪切 SV 信号、水平剪切 SH 信号以及压缩 P 信号相对应的三个检测分量信号应用速端图分析。

100. 根据权利要求 99 所述的方法,还包括:向通过所述三个检测器接收的所述三个检测分量信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者,或者向由水中听音器检测的压力信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者。

101. 根据权利要求 99 所述的方法,向检测信号应用时变频率带通滤波,以保持在由非线性交互生成的信号的期望频率带宽左右的窄频率带宽,窄频率带宽被选择为在第一频率与第二频率之差左右。

102. 根据权利要求 101 所述的方法,还包括:重复多次以下步骤:生成第一声学信号、生成第二声学信号、接收检测信号、应用时变频率带通滤波、关联检测信号与模板信号、应用速端图分析、以及组合多个信号,以改进信噪比。

103. 根据权利要求 101 所述的方法,还包括:改变起始时间差,并且重复多次以下步骤:生成第一声学信号、生成第二声学信号、接收检测信号、应用时变频率带通滤波、关联检测信号与模板信号、以及针对三个检测信号中的每一个应用速端图分析,以分离不同传播信号模式,包括压缩模式 P、垂直剪切模式 SV 以及水平剪切模式 SH。

104. 根据权利要求 103 所述的方法,改变起始时间差,并且重复多次以下步骤:生成第一信号、生成第二信号、接收检测信号、并且应用时变频率带通滤波、以及关联由水中听音器检测的信号与模板信号。

105. 根据权利要求 97 所述的方法,还包括:扫描第一声学信号的多个方位角和仰角、第二声学信号的多个方位角和仰角、或接收器的位置,并且重复多次以下步骤:生成第一声学信号、生成第二声学信号、接收检测信号、应用时变频率带通滤波以获取滤波信号、关联滤波信号与模板信号、以及对三个检测分量信号应用速端图分析,以针对不同传播信号模式分离这些分量信号,该不同传播信号模式包括压缩模式 P、垂直剪切模式 SV 以及水平剪切模式 SH。

106. 根据权利要求 105 所述的方法,还包括:重复改变第一声学信号的广播的起始时间与第二声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差,重复改变第一频率与第二频率之间的频率比,以及重复扫描第一声学信号的多个方位角和仰角、第二声学信号的多个方位角和仰角、以及接收器的位置,以获取多个信号测量结果。

107. 根据权利要求 106 所述的方法,还包括:在与处理器通信的存储装置中存储获取的所述多个信号测量结果。

108. 一种生成岩层的三维图像的方法,包括:

通过第一声源生成第一声学信号,其中,该第一声学信号包括按时间序列排列的第一个脉冲,第一个脉冲在时间上被分开,每一个脉冲包括具有中心频率的第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同;

通过第二声源生成第二声学信号,其中,该第二声学信号包括按时间序列排列的第二多个脉冲,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一个脉冲中的两个对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,在第二多个脉冲的广播的起始时间与第一个脉冲的广播的起始时间之间设置有起始时间差,其中,每一个脉冲包括一调制信号,并且其中,该第二多个脉冲中的每一个脉冲内的调制信号的中心频

率是第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的调制信号的中心频率的选定分数；

其中，第一声源和第二声源被设置在井眼内，并且可控制以使第一声学信号和第二声学信号的轨迹在井眼外侧的相交体积中相交；

通过设置在井眼内的接收器接收返回至井眼的检测信号，该检测信号包括通过第一声学信号和第二声学信号在相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程生成的信号；

通过处理器对接收信号执行数据处理，以相对于噪声、或相对于由线性交互过程生成的信号、或者两者提取通过非线性混合过程生成的信号；以及

基于由非线性混合过程生成的信号，生成传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或岩层的非线性特性、或其两个或更多个的任何组合的三维图像。

109. 根据权利要求 108 所述的方法，其中，生成第一声学信号包括：生成所述多个脉冲以使得第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

110. 根据权利要求 108 所述的方法，其中，生成传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或岩层的非线性特性、或其两个或更多个的任何组合的三维图像通过利用基尔霍夫成像、射束成像、或波动方程成像来执行。

111. 根据权利要求 110 所述的方法，还包括：利用层析速度反演或全波形反演，或者通过与层析速度反演相组合的迭代成像，来确定传播压缩速度的值、或者剪切速度的值或两者。

112. 根据权利要求 108 所述的方法，其中，生成传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或岩层的非线性特性、或其两个或更多个的任何组合的三维图像利用分析或映射方法来执行，该分析和映射方法包括：

利用井眼中的井日志和有关远离井眼的岩层的横向连续性的假定来估算初始传播速度模型；

计算从第一声源至混合区中心的第一声学信号的第一行进时间；

计算从第二声源至混合区中心的第二声学信号的第二行进时间；

计算混合区中心与接收器之间的第三行进时间，该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号，该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在混合区中的非线性混合过程生成；

通过相加第一行进时间与第三行进时间，来计算与返回至井眼的信号的总行进时间相对应的抵达时间  $T_p$ ，并且计算第一行进时间与第二行进时间之间的起始时间差  $\delta_p$ ；

从在接收器处接收的信号中提取由非线性混合过程生成的信号，以针对每一个起始时间差  $\delta$  并且针对每一个频率比  $d$  生成关联信号  $M(t, \delta, d)$ ，其是抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的函数，并且其包含非线性交互信号；

搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值，以确定使得出现由非线性混合过程所生成的频带限制尖峰信号的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值；

比较计算抵达时间  $T_p$  与测量抵达时间  $T_{NL}$ ，并且比较计算起始时间差  $\delta_p$  与测量起始时间差  $\delta_{NL}$ ；

确定计算抵达时间  $T_p$  是否不同于测量抵达时间  $T_{NL}$ ，和计算起始时间差  $\delta_p$  是否不同于

测量起始时间差  $\delta_{NL}$  ;并且如果是这样,则利用测量抵达时间与计算抵达时间之差和计算起始时间差与测量起始时间差之差来更新传播速度模型 ;并且

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围,迭代地重复上述步骤,直到与总行进时间相对应的计算抵达时间大致等于测量抵达时间,或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差,或两者为止,以获取传播速度  $V_p$  和传播速度  $V_s$ ,其导致计算抵达时间大致等于测量抵达时间,或者计算时间差大致等于测量起始时间差,或两者 ;以及

生成传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或非线性特性,或其两个或更多个的任何组合的三维图像。

113. 根据权利要求 108 所述的方法,其中,通过处理器对接收信号执行数据处理以提取由非线性混合过程生成的信号包括:通过以下步骤来提取由非线性混合过程生成的信号:根据针对非线性介质中的非共线混合的选择规则关联检测信号与根据该信号的预测特性设计的模板信号,并且针对第二多个脉冲与第一多个脉冲之间的多个起始时间差  $\delta$  和针对第二多个脉冲中的每一个脉冲内的调制信号的中心频率与第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的调制信号的中心频率之间的多个频率比  $d$ ,重复在模板信号与检测信号之间的关联,以针对每一个起始时间差  $\delta$  和每一个频率比  $d$  来生成包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ 。

114. 根据权利要求 112 所述的方法,还包括:基于传播速度模型,利用第一声源的位置、第一声学信号的仰角和方位角,以及第二声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角,来计算由第一声源发射的第一声学信号的轨迹和由第二声源发射的第二声学信号的轨迹。

115. 根据权利要求 114 所述的方法,还包括:基于第一声源的位置、第一声学信号的仰角和方位角,以及第二声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角,来确定其中第一声学信号和第二声学信号非线性地交互的混合区的位置。

116. 根据权利要求 115 所述的方法,还包括:基于第一声学信号的仰角和方位角和第一声源的位置、以及第二声学信号的仰角和方位角和第二声源的位置,计算其中这两个声学信号非线性地交互的混合区的空间坐标,并计算来自第一声源的第一声学信号与来自第二声源的第二声学信号之间的会聚角。

117. 根据权利要求 116 所述的方法,还包括:将关联信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至与混合区处的岩层的非线性特性相对应的混合区的空间坐标。

118. 根据权利要求 117 所述的方法,还包括:利用压缩速度与剪切速度的速度比、频率比  $d_{NL}$  以及会聚角之间的选择规则关系,根据频率比  $d_{NL}$  与会聚角来计算混合区处的压缩速度与剪切速度之间的速度比,并且将计算速度比映射至混合区的空间坐标。

119. 根据权利要求 118 所述的方法,还包括:针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围,重复将关联信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至混合区的空间坐标,或者将计算速度比映射至混合区的空间坐标,或两者,以通过组合经由重复测量得到的测量值,来获取非线性特性的强度的三维图像或速度比的三维图像,或两者。

120. 根据权利要求 108 所述的方法,还包括:确定传播压缩速度的值、传播剪切速度的值、或压缩速度与剪切速度的比率的值、或其两个或更多的任何组合。

121. 根据权利要求 108 所述的方法,其中,确定传播压缩速度的值、传播剪切速度的值、压缩速度与剪切速度的比率的值、或其两个或更多的任何组合,利用映射方法来执行,该映射方法包括:

利用井眼中的井日志和有关远离井眼的岩层的横向连续性的假定来估算初始传播速度模型;

计算从第一声源至混合区中心的第一声学信号的第一行进时间;

计算从第二声源至混合区中心的第二声学信号的第二行进时间;

计算混合区中心与接收器之间的第三行进时间,该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号,该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在混合区中的非线性混合过程生成;

通过相加第一行进时间与第三行进时间来计算与返回至井眼的的信号总行进时间相对应的抵达时间  $T_p$ ,并且计算第一行进时间与第二行进时间之间的起始时间差  $\delta_p$ ;

从在接收器处接收的信号中提取由非线性混合过程生成的信号,以针对每一个起始时间差  $\delta$  并且针对每一个频率比  $d$  生成关联信号  $M(t, \delta, d)$ ,关联信号  $M(t, \delta, d)$  是抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的函数,并且包含非线性交互信号;

搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值,以确定使得出现由非线性混合过程生成的信号的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值;

比较计算抵达时间  $T_p$  与测量抵达时间  $T_{NL}$ ,并且比较计算起始时间差  $\delta_p$  与测量起始时间差  $\delta_{NL}$ ;

确定计算抵达时间  $T_p$  是否不同于测量抵达时间  $T_{NL}$ ,和计算时间差  $\delta_p$  是否不同于测量起始时间差  $\delta_{NL}$ ,并且如果是这样,则利用测量抵达时间与计算抵达时间之差、和计算起始时间差与测量起始时间差之差来更新传播速度模型;并且

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多的任何组合的值的范围,迭代地重复上述步骤,直到与总行进时间相对应的计算抵达时间大致等于测量抵达时间,或者计算时间差大致等于测量起始时间差,或两者为止,以获取传播速度  $V_p$  和传播速度  $V_s$ ,其导致计算抵达时间大致等于测量抵达时间,或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差,或两者。

122. 根据权利要求 121 所述的方法,还包括:基于传播速度模型,利用第一声源的位置、第一声学信号的仰角和方位角、以及第二声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角、和接收器的位置,来计算由第一声源发射的具有第一频率的第一声学信号的轨迹和由第二声源发射的具有第二频率的第二声学信号的轨迹。

123. 根据权利要求 122 所述的方法,还包括:基于第一声源的位置、第一声学信号的仰角和方位角、以及第二声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角,来确定其中第一声学信号和第二声学信号非线性地交互的混合区的位置。

124. 根据权利要求 123 所述的方法,还包括:基于第一声学信号的仰角和方位角和第

一声源的位置、以及第二声学信号的仰角和方位角和第二声源的位置,计算其中这两个声学信号非线性地交互的混合区的空间坐标,并计算来自第一声源的第一声学信号与来自第二声源的第二声学信号之间的会聚角。

125. 根据权利要求 124 所述的方法,还包括:利用压缩速度与剪切速度的速度比、频率比以及会聚角之间的选择规则关系,根据频率比  $d_{NL}$  与会聚角来计算混合区处的压缩速度与剪切速度之间的速度比,并且将计算速度比映射至混合区的空间坐标。

126. 根据权利要求 125 所述的方法,还包括:针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围,重复将计算速度比映射至混合区的空间坐标,以针对井眼周围岩层的体积获取速度比的值。

127. 一种生成岩层的非线性特性的三维图像的方法,包括:

通过处理器读取测量参数,所述测量参数包括:被配置成生成具有第一频率的第一声学信号的第一声源的位置、被配置成生成具有第二频率的第二声学信号的第二声源的位置、被配置成接收从在第一声学信号与第二声学信号相交处的岩层内的混合区返回至井眼的检测信号的接收器的位置、以及第一声学信号和第二声学信号的仰角和方位角;

通过处理器读取关联信号  $M(t, \delta, d)$ , 其是抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及第一频率与第二频率之间的频率比  $d$  的函数,该关联信号  $M(t, \delta, d)$  包含由第一声学信号和第二声学信号在岩层内的混合区处的非线性混合过程所生成的信号;

通过处理器读取初始传播压缩与剪切速度模型;

通过处理器计算第一声学信号从第一声源至混合区中心的第一行进时间;

通过处理器计算第二声学信号从第二声源至混合区中心的第二行进时间;

通过处理器计算混合区中心与接收器之间的第三行进时间,该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号,该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在混合区中的非线性混合过程生成;

由处理器,通过相加第一行进时间与第三行进时间来计算与返回至井眼的信号的总行进时间相对应的抵达时间  $T_p$ , 并且计算第一行进时间与第二行进时间之间的起始时间差  $\delta_p$ ;

搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值,以确定使得出现由非线性混合过程所生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值;并且

通过处理器基于传播压缩与剪切速度模型,利用第一声学信号的仰角和第一声源的位置、以及第二声学信号的仰角和第二声源的位置,来计算声学传播的轨迹;

将由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至其中第一声学信号与第二声学信号相交的交互混合区的空间坐标;以及

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的仰角、第一声学信号的方位角、第二声学信号的仰角、或第二声学信号的方位角、或其两个或更多个的任何组合的多个值,重复将频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至交互混合区的空间坐标,并且生成非线性混合过程的强度的三维图像。

128. 根据权利要求 127 所述的方法,还包括:利用第一声源的位置、第一声学信号的仰

角和方位角、以及第二声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角,来确定其中第一声学信号和第二声学信号相交的混合区的位置。

129. 一种生成岩层的传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比,或其两个或更多个的任何组合的三维图像的方法,该方法包括:

通过处理器读取测量参数,所述测量参数包括:被配置成生成具有第一频率的第一声学信号的第一声源的位置、被配置成生成具有第二频率的第二声学信号的第二声源的位置、被配置成接收从第一声学信号与第二声学信号相交处的岩层内的混合区返回至井眼的检测信号的接收器的位置、以及第一声学信号和第二声学信号的仰角和方位角;

通过处理器读取关联信号  $M(t, \delta, d)$ , 其是抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及第一频率与第二频率之间的频率比  $d$  的函数,该关联信号  $M(t, \delta, d)$  包含由第一声学信号和第二声学信号在岩层内的混合区处的非线性混合过程所生成的信号;

通过处理器读取初始传播压缩与剪切速度模型;

通过处理器利用井眼中的井日志和有关远离井眼的岩层的横向连续性的假定来估算初始传播速度模型;

通过处理器计算从第一声源至混合区中心的第一声学信号的第一行进时间;

通过处理器计算从第二声源至混合区中心的第二声学信号的第二行进时间;

通过处理器计算混合区中心与接收器之间的第三行进时间,该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号,该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在混合区中的非线性混合过程生成;

由处理器通过相加第一行进时间与第三行进时间来计算与返回至井眼的信号的总行进时间相对应的抵达时间  $T_p$ , 并且计算第一行进时间与第二行进时间之间的起始时间差  $\delta_p$ ;

搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值,以确定使得出现由非线性混合过程所生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值;

比较计算抵达时间  $T_p$  与测量抵达时间  $T_{NL}$ , 或者比较计算起始时间差  $\delta_p$  与测量起始时间差  $\delta_{NL}$ ;

如果计算抵达时间不同于测量抵达时间则利用测量抵达时间与计算抵达时间之差,或者如果计算起始时间差不同于测量起始时间差则利用计算起始时间差与测量起始时间差之差,或利用两者,通过层析速度反演或全波形反演来更新传播速度模型;

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围,迭代地重复上述步骤,直到计算抵达时间大致等于测量抵达时间,或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差,或两者为止,以获取导致计算抵达时间大致等于测量抵达时间或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差或两者的传播速度  $V_p$  和传播速度  $V_s$ ; 以及

生成传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或其两个或更多个的任何组合的三维图像。

130. 根据权利要求 129 所述的方法,还包括:确定传播压缩速度的值、传播剪切速度的

值、或压缩速度与剪切速度的速度比的值、或其两个或更多的任何组合。

131. 根据权利要求 129 所述的方法,还包括:基于第一声学信号的仰角和方位角和第一声源的位置、以及第二声学信号的仰角和方位角和第二声源的位置,计算其中这两个声学信号相交的混合区的空间坐标,并计算来自第一声源的第一声学信号与来自第二声源的第二声学信号之间的会聚角。

132. 根据权利要求 131 所述的方法,还包括:利用压缩速度与剪切速度的速度比、频率比以及会聚角之间的选择规则关系,根据测量频率比  $d_{NL}$  与计算会聚角来计算混合区处的压缩速度与剪切速度的速度比。

133. 根据权利要求 132 所述的方法,还包括:针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多的任何组合的值的范围,重复将计算速度比映射至混合区的空间坐标,以获取速度比的三维图像。

134. 一种用于生成岩层的三维图像的系统,该系统包括:

第一声源,被配置成生成第一声学信号,其中,第一声学信号包括按时间序列排列的第一多个脉冲,所述第一多个脉冲在时间上被分开,每一个脉冲包括具有中心频率的第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同;

第二声源,被配置成通过第二声源生成第二声学信号,其中,该第二声学信号生成包括按时间序列排列的第二多个脉冲,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,在第二多个脉冲的广播的起始时间与第一多个脉冲的广播的起始时间之间设置有起始时间差,其中,每一个脉冲都包括调制信号,并且其中,第二多个脉冲中的每一个脉冲内的调制信号的中心频率是第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的调制信号的中心频率的选定分数;

其中,第一声源和第二声源被设置在井眼内,并且可控制以使第一声学信号和第二声学信号的轨迹在井眼外侧的相交体积中相交;

设置在井眼内的接收器,该接收器被配置成检测返回至井眼的接收信号,所述接收信号包括通过第一声学信号和第二声学信号在相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程生成的信号;

第一处理器,被配置成对接收信号执行数据处理,以相对于噪声、或者由线性交互过程生成的信号、或者两者提取通过非线性混合过程生成的信号;以及

第二处理器,被配置成基于由非线性混合过程生成的信号,生成传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或岩层的非线性特性、或其两个或更多的任何组合的三维图像。

135. 根据权利要求 134 所述的系统,其中,所述第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

136. 根据权利要求 134 所述的系统,其中,第二处理器被配置成,通过利用基尔霍夫成像、射束成像或波动方程成像,来生成传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或岩层的非线性特性、或其两个或更多的任何组合的三维图像。

137. 根据权利要求 136 所述的系统,其中,第二处理器被配置成,利用层析速度反演或



全波形反演,或者通过与层析速度反演相组合的迭代成像,来确定传播压缩速度的值、或者剪切速度的值、或两者。

138. 根据权利要求 134 所述的系统,其中,第二处理器被配置成:

利用井眼中的井日志和有关远离井眼的岩层的横向连续性的假定来估算初始传播速度模型;

计算从第一声源至混合区中心的第一声学信号的第一行进时间;

计算从第二声源至混合区中心的第二声学信号的第二行进时间;

计算混合区中心与接收器之间的第三行进时间,该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号,该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在混合区中的非线性混合过程生成;

通过相加第一行进时间与第三行进时间,来计算与返回至井眼的信号的总行进时间相对应的抵达时间  $T_p$ ,并且计算第一行进时间与第二行进时间之间的起始时间差  $\delta_p$ ;

从在接收器处接收的信号中提取由非线性混合过程生成的信号,以针对每一个起始时间差  $\delta$  并且针对每一个频率比生成关联信号  $M(t, \delta, d)$ ,其是抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的函数,并且包含非线性交互信号;

搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值,以确定使得出现由非线性混合过程所生成的频带限制尖峰信号的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值;

比较计算抵达时间  $T_p$  与测量抵达时间  $T_{ML}$ ,并且比较计算起始时间差  $\delta_p$  与测量起始时间差  $\delta_{ML}$ ;

确定计算抵达时间  $T_p$  是否不同于测量抵达时间  $T_{ML}$ ,和计算起始时间差  $\delta_p$  是否不同于测量起始时间差  $\delta_{ML}$ ,并且如果是这样,则利用测量抵达时间与计算抵达时间之差和计算起始时间差与测量起始时间差之差来更新传播速度模型;并且

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围,迭代地重复上述步骤,直到与总行进时间相对应的计算抵达时间大致等于测量抵达时间,或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差,或两者为止,以获取传播速度  $V_p$  和传播速度  $V_s$ ,其导致计算抵达时间大致等于测量抵达时间,或者计算时间差大致等于测量起始时间差,或两者;以及

生成传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或非线性特性,或其两个或更多个的任何组合的三维图像。

139. 根据权利要求 134 所述的系统,其中,第一处理器被配置成如下来提取由非线性混合过程生成的信号:根据针对非线性介质中的非共线混合的选择规则,关联检测信号与根据信号的预测特性设计的模板信号,并且针对第二多个脉冲与第一多个脉冲之间的多个起始时间差  $\delta$  和针对第二多个脉冲中的每一个脉冲内的调制信号的中心频率与第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的调制信号的中心频率之间的多个频率比  $d$ ,重复在模板信号与检测信号之间的关联,以针对每一个起始时间差  $\delta$  和每一个频率比  $d$  来生成包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ 。

140. 根据权利要求 138 所述的系统,其中,第二处理器被配置成,基于传播速度模型,

利用第一声源的位置、第一声学信号的仰角和方位角、第二声源的位置、以及第二声学信号的仰角和方位角,来计算由第一声源发射的第一声学信号的轨迹和由第二声源发射的第二声学信号的轨迹。

141. 根据权利要求 140 所述的系统,其中,第二处理器被配置成,基于第一声源的位置、第一声学信号的仰角和方位角、第二声源的位置、以及第二声学信号的仰角和方位角,来确定其中第一声学信号和第二声学信号非线性地交互的混合区的位置。

142. 根据权利要求 141 所述的系统,其中,第二处理器被配置成,基于第一声学信号的仰角和方位角、第一声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角、和第二声源的位置,计算其中这两个声学信号非线性地交互的混合区的空间坐标,并计算来自第一声源的第一声学信号与来自第二声源的第二声学信号之间的会聚角。

143. 根据权利要求 142 所述的系统,其中,第二处理器被配置成,将关联信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至与混合区处的岩层的非线性特性相对应的混合区的空间坐标。

144. 根据权利要求 143 所述的系统,其中,第二处理器被配置成,利用压缩速度与剪切速度的速度比、频率比以及会聚角之间的选择规则关系,根据频率比  $d_{NL}$  与会聚角来计算混合区处的压缩速度与剪切速度之间的速度比,并且将计算速度比映射至混合区的空间坐标。

145. 根据权利要求 144 所述的系统,其中,第二处理器被配置成,针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围,将关联信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至混合区的空间坐标,或者将计算速度比映射至混合区的空间坐标,或两者,以通过组合经由重复测量得到的测量值,来获取非线性特性的强度的三维图像、或速度比的三维图像或两者。

146. 根据权利要求 134 所述的系统,其中,第二处理器被配置成,确定传播压缩速度的值、传播剪切速度的值、或压缩速度与剪切速度的比率的值、或其两个或更多个的任何组合。

147. 根据权利要求 146 所述的系统,其中,第二处理器被配置成:

利用井眼中的井日志和有关远离井眼的岩层的横向连续性的假定来估算初始传播速度模型;

计算从第一声源至混合区中心的第一声学信号的第一行进时间;

计算从第二声源至混合区中心的第二声学信号的第二行进时间;

计算混合区中心与接收器之间的第三行进时间,该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号,该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在混合区中的非线性混合过程生成;

通过相加第一行进时间与第三行进时间,来计算与返回至井眼的信号的总行进时间相对应的抵达时间  $T_p$ ,并且计算第一行进时间与第二行进时间之间的起始时间差  $\delta_p$ ;

从在接收器处接收的信号中提取由非线性混合过程生成的信号,以针对每一个起始时间差  $\delta$  并且针对每一个频率比  $d$ ,生成关联信号  $M(t, \delta, d)$ ,其是抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的函数,并且包含非线性交互信号;

搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值,以

确定使得出现由非线性混合过程所生成的信号的到达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值；

比较计算到达时间  $T_p$  与测量到达时间  $T_{NL}$ ，并且比较所计算起始时间差  $\delta_p$  与测量起始时间差  $\delta_{NL}$ ；

确定计算到达时间  $T_p$  是否不同于测量到达时间  $T_{NL}$ ，和计算时间差  $\delta_p$  是否不同于测量起始时间差  $\delta_{NL}$ ，并且如果是这样，则利用测量到达时间与计算到达时间之差和计算起始时间差与测量起始时间差之差来更新传播速度模型；并且

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围，迭代地重复上述步骤，直到与总行进时间相对应的计算到达时间大致等于测量到达时间，或者计算时间差大致等于测量起始时间差，或两者为止，以获取传播速度  $V_p$  和传播速度  $V_s$ ，其导致计算到达时间大致等于测量到达时间，或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差，或两者。

148. 根据权利要求 147 所述的系统，其中，第二处理器被配置成，基于传播速度模型，利用第一声源的位置、第一声学信号的仰角和方位角、第二声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角、和接收器的位置，来计算由第一声源发射的具有第一频率的第一声学信号的轨迹和由第二声源发射的具有第二频率的第二声学信号的轨迹。

149. 根据权利要求 148 所述的系统，其中，第二处理器被配置成，基于第一声学信号的仰角和方位角、第一声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角、和第二声源的位置，计算其中这两个声学信号非线性地交互的混合区的空间坐标，并计算来自第一声源的第一声学信号与来自第二声源的第二声学信号之间的会聚角。

150. 根据权利要求 149 所述的系统，其中，第二处理器被配置成，利用压缩速度与剪切速度的速度比、频率比以及会聚角之间的选择规则关系，根据频率比  $d_{NL}$  与会聚角来计算混合区处的压缩速度与剪切速度之间的速度比，并且将计算速度比映射至混合区的空间坐标。

151. 根据权利要求 150 所述的系统，其中，该第二处理器被配置成，针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围，重复将计算速度比映射至混合区的空间坐标，以针对井眼周围岩层的体积获取速度比的值。

152. 一种用于生成岩层的非线性特性的三维图像的系统，该系统包括处理器，该处理器被配置成：

读取测量参数，所述测量参数包括：被配置成生成具有第一频率的第一声学信号的第一声源的位置、被配置成生成具有第二频率的第二声学信号的第二声源的位置、被配置成接收从第一声学信号与第二声学信号相交处的岩层内的混合区返回至井眼的检测信号接收器的位置、以及第一声学信号和第二声学信号的仰角和方位角；

读取关联信号  $M(t, \delta, d)$ ，所述关联信号  $M(t, \delta, d)$  是到达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及第一频率与第二频率之间的频率比  $d$  的函数，所述关联信号  $M(t, \delta, d)$  包含由第一声学信号和第二声学信号在岩层内的混合区处的非线性混合过程所生成的信号；

读取初始传播压缩与剪切速度模型；

计算从第一声源至混合区中心的第一声学信号的第一行进时间；

计算从第二声源至混合区中心的第二声学信号的第二行进时间；

计算混合区中心与接收器之间的第三行进时间,该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号,该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在混合区中的非线性混合过程生成；

通过相加第一行进时间与第三行进时间,来计算与返回至井眼的信号的总行进时间相对应的抵达时间  $T_p$ , 并且计算第一行进时间与第二行进时间之间的起始时间差  $\delta_p$ ；

搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值,以确定使得出现由非线性混合过程所生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值；并且

基于传播压缩与剪切速度模型,利用第一声学信号的仰角、第一声源的位置、第二声学信号的仰角、和第二声源的位置,来计算声学传播的轨迹；

将由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至其中第一声学信号与第二声学信号相交的交互混合区的空间坐标；以及

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的仰角、第一声学信号的方位角、第二声学信号的仰角、或第二声学信号的方位角、或其两个或更多的任何组合的多个值,重复将频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至交互混合区的空间坐标,并且生成非线性混合过程的强度的三维图像。

153. 根据权利要求 152 所述的系统,还包括:利用第一声源的位置、第一声学信号的仰角和方位角、第二声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角,来确定其中第一声学信号和第二声学信号相交的混合区的位置。

154. 一种用于生成岩层的传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或其两个或更多的任何组合的三维图像的系统,该系统包括处理器,该处理器被配置成:

读取测量参数,所述测量参数包括:被配置成生成具有第一频率的第一声学信号的第一声源的位置、被配置成生成具有第二频率的第二声学信号的第二声源的位置、被配置成接收从第一声学信号与第二声学信号相交处的岩层内的混合区返回至井眼的检测信号的接收器的位置、以及第一声学信号和第二声学信号的仰角和方位角；

读取关联信号  $M(t, \delta, d)$ , 所述关联信号  $M(t, \delta, d)$  是抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及第一频率与第二频率之间的频率比  $d$  的函数,该关联信号  $M(t, \delta, d)$  包含由第一声学信号和第二声学信号在岩层内的混合区处的非线性混合过程所生成的信号；

读取初始传播压缩与剪切速度模型；

利用井眼中的井日志和有关远离井眼的岩层的横向连续性的假定来估算初始传播速度模型；

计算从第一声源至混合区中心的第一声学信号的第一行进时间；

计算从第二声源至混合区中心的第二声学信号的第二行进时间；

计算混合区中心与接收器之间的第三行进时间,该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号,该检测信号通过第一声学信号和第二声学信号在混合区中的非线性混合过程生成；

通过相加第一行进时间与第三行进时间,来计算与返回至井眼的信号的总行进时间相

对应的抵达时间  $T_p$ ，并且计算第一行进时间与第二行进时间之间的起始时间差  $\delta_p$ ；

搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的全部值，以确定使得出现由非线性混合过程所生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  的值；

比较计算抵达时间  $T_p$  与测量抵达时间  $T_{NL}$ ，或者比较计算起始时间差  $\delta_p$  与测量起始时间差  $\delta_{NL}$ ；

如果计算抵达时间不同于测量抵达时间，则利用测量抵达时间与计算抵达时间之差，或者如果计算起始时间差不同于测量起始时间差，则利用计算起始时间差与测量起始时间差之差，或两者，通过层析速度反演或全波形反演来更新传播速度模型；

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围，迭代地重复上述步骤，直到计算抵达时间大致等于测量抵达时间，或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差，或两者为止，以获取导致计算抵达时间大致等于测量抵达时间、或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差、或两者的传播速度  $V_p$  和传播速度  $V_s$ ；以及

生成传播压缩速度、传播剪切速度、压缩速度与剪切速度之比、或其两个或更多个的任何组合的三维图像。

155. 根据权利要求 154 所述的系统，其中，所述处理器被配置成，确定传播压缩速度的值、传播剪切速度的值、或压缩速度与剪切速度的速度比的值、或其两个或更多个的任何组合。

156. 根据权利要求 154 所述的系统，其中，所述处理器被配置成，基于第一声学信号的仰角和方位角、第一声源的位置、第二声学信号的仰角和方位角、和第二声源的位置，计算其中这两个声学信号相交的混合区的空间坐标，并计算来自第一声源的第一声学信号与来自第二声源的第二声学信号之间的会聚角。

157. 根据权利要求 156 所述的系统，其中，所述处理器被配置成，利用压缩速度与剪切速度的速度比、频率比以及会聚角之间的选择规则关系，根据测量频率比  $d_{NL}$  与计算会聚角来计算混合区处的压缩速度与剪切速度的速度比。

158. 根据权利要求 157 所述的方法，还包括：针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的方位角、第二声学信号的方位角、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多个的任何组合的值的范围，重复将计算速度比映射至混合区的空间坐标，以获取速度比的三维图像。

159. 一种调查井眼外侧岩层的方法，包括：

通过设置在井眼内的第一声源生成第一锥形声学信号，该第一锥形声学信号按第一频率广播；

通过设置在井眼内的第二声源生成第二锥形声学信号，该第二锥形声学信号按不同于第一频率的第二频率广播，第一频率和第二频率处于大约 500Hz 与 500kHz 之间的频率范围中，

配置第一声源和第二声源，以使第一锥形声学信号和第二锥形声学信号在井眼外侧的希望相交体积中相交；以及

通过设置在井眼内的接收器接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号,该检测信号通过第一锥形声学信号和第二锥形声学信号在相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程生成;

记录检测信号并将检测信号存储在存储装置中;以及在存储装置中记录测量参数,所述测量参数包括:第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、以及第一信号的锥角与锥轴取向、和第二锥形声学信号的锥角与锥轴取向。

160. 根据权利要求 159 所述的方法,其中,生成第一锥形声学信号和生成第二锥形声学信号包括:在将第一声源和第二声源定位在单一井眼中的同时,生成第一锥形声学信号和第二锥形声学信号。

161. 根据权利要求 159 所述的方法,其中,所述井眼不是直的,或者所述井眼包括侧线,以使第一锥形声学信号和第二锥形声学信号具有不共线的对称轴。

162. 根据权利要求 159 所述的方法,其中,生成第一锥形声学信号包括:生成包括按编码时间序列排列的第一多个脉冲的第一锥形声学信号,所述第一多个脉冲在时间上被分开,每一个脉冲都包括具有中心频率的第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同。

163. 根据权利要求 160 所述的方法,其中,第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

164. 根据权利要求 159 所述的方法,其中,生成第二锥形声学信号包括:生成按编码时间序列排列的第二多个脉冲,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,第二多个脉冲的广播的起始时间与第一多个脉冲的广播的起始时间之间设置有起始时间差  $\delta$ ,其中,每一个脉冲包括调制信号,并且,第二多个脉冲中的每一个脉冲内的调制信号的中心频率是第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的调制信号的中心频率的选定分数频率比  $d$ 。

165. 根据权利要求 164 所述的方法,还包括:针对第一声学信号与第二声学信号之间的多个起始时间差  $\delta$  并且针对第一频率与第二频率之间的多个频率比  $d$ ,重复生成第一声学信号、生成第二声学信号以及接收检测信号。

166. 根据权利要求 159 所述的方法,其中,生成第一锥形声学信号和生成第二锥形声学信号包括:控制第一锥形声学信号的相位、或第二锥形声学信号的相位、或两者,以使广播信号具有相反极性。

167. 根据权利要求 166 所述的方法,还包括:将在接收器处检测的、通过第一锥形声学信号和第二锥形声学信号的混合过程而生成的信号添加至在接收器处检测的、通过具有相反极性的第一锥形声学信号和具有相反极性的第二声学信号的混合过程而生成的信号,以便增强非线性交互信号,并且最小化线性交互信号和噪声。

168. 根据权利要求 159 所述的方法,还包括:通过多个检测器接收多个检测信号,并且向通过所述多个检测器接收的所述多个检测信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者。

169. 根据权利要求 168 所述的方法,其中,通过多个检测器接收检测信号包括:通过所述多个检测器中的每一个检测器的多个分量检测器接收每一个检测信号的多个分量检测

信号,并且向在所述多个接收器中的每一个接收器的所述多个分量检测器上接收的所述多个分量检测信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者。

170. 根据权利要求 159 所述的方法,还包括:针对第一声源的不同位置、第二声源的不同位置、接收器的不同位置、第一声源的广播锥角、或第二声源的广播锥角、或其两个或更多的任何组合,重复生成第一锥形声学信号、第二锥形声学信号、以及接收检测信号。

171. 根据权利要求 159 所述的方法,还包括:从通过由第一声源和第二声源在岩层中的非线性交互而生成的记录检测信号中,提取并增强由非线性混合过程生成的信号,并且抑制由线性交互过程生成的信号、或噪声、或两者。

172. 根据权利要求 159 所述的方法,其中,生成第一锥形声学信号包括:生成按编码时间序列排列的第一多个脉冲,所述第一多个脉冲在时间上被分开,每一个脉冲包括具有中心频率的第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同,

其中,生成第二锥形声学信号包括:生成按编码时间序列排列的第二多个脉冲,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,在第二多个脉冲的广播的起始时间与第一多个脉冲的广播的起始时间之间设置有起始时间差  $\delta$ ,其中,每一个脉冲包括第二调制信号,并且,第二多个脉冲中的每一个脉冲内的第二调制信号的中心频率是第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的第一调制信号的中心频率的选定分数频率比  $d$ ,并且

读取记录数据,并且利用处理器关联检测信号与包括按时间序列排列的多个脉冲的模板信号,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大致相同,其中,所述多个脉冲中的每一个脉冲包括具有中心频率的调制信号,该中心频率等于第一多个脉冲和第二多个脉冲中的每一个对应脉冲中的第一调制信号的中心频率与第二调制信号的中心频率之差。

173. 根据权利要求 172 所述的方法,其中,第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

174. 根据权利要求 172 所述的方法,针对多个起始时间差  $\delta$  并且针对第一频率与第二频率之间的多个频率比  $d$ ,重复在模板信号与检测信号之间关联,以生成包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ 。

175. 根据权利要求 174 所述的方法,还包括:向检测信号应用时变频率带通信号,以保持在检测信号的期望频率带宽左右的窄频带,该窄频带被选择为每一个脉冲的第一频率与第二频率之差左右。

176. 根据权利要求 172 所述的方法,还包括:利用处理器执行检测信号的速端图分析。

177. 根据权利要求 159 所述的方法,还包括:扫描第一频率与第二频率的频率比,或扫描起始时间差的范围,或两者,以根据针对声学信号在岩层内的非线性交互的选择规则来控制相交体积内的混合区的位置。

178. 根据权利要求 159 所述的方法,还包括:在井眼内沿第一轴取向定位第一声源,并且在井眼内沿第二轴取向定位第二声源,该第一轴取向和第二轴取向为非同轴取向或者是不平行的。

179. 根据权利要求 178 所述的方法,还包括:控制第一频率与第二频率的频率比以及起始时间差,以选择相交体积内的、定位在第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交的

轨迹处的特定混合区。

180. 根据权利要求 179 所述的方法,还包括:根据第一声源至混合区中心和从混合区中心至接收器的总行进时间、或者根据会聚角与第一声学信号和第二声学信号的频率比之间的非线性交互选择规则关系的第一锥形声学信号与第二锥形声学信号之间相对于混合区的会聚角、或两者,在定位在第一锥形广播与第二锥形广播相交的轨迹上的混合区之间辨别。

181. 根据权利要求 159 所述的方法,还包括:在第一井眼内定位第一声源,在第二井眼内定位第二声源,并且在第一井眼、或第二井眼、或者第三井眼内定位接收器。

182. 根据权利要求 181 所述的方法,还包括:选择锥角或锥轴取向或两者,以使第一锥形声学信号和第二锥形声学信号在井眼周围的岩层中的目标区域处相交。

183. 一种通过行进时间层析反演来确定井眼周围的岩层体积中的传播压缩速度或传播剪切速度或两者的值的方法,该方法包括:

利用井眼中的井日志和有关远离井眼的岩层的横向连续性的假定来估算初始传播速度模型;

通过处理器根据广播第一锥形声学信号的第一声源的位置和广播第二锥形声学信号的第二声源的位置以及第一锥形声学信号的仰角和第二锥形声学信号的仰角,来计算混合区的空间坐标;

通过处理器计算从第一声源至混合区中心以及从混合区中心至接收器的总行进时间;

通过处理器计算从第一声源至混合区中心与从第二声源至混合区中心的行进时间差;

通过处理器读取关联信号  $M(t, \delta, d)$ , 所述关联信号  $M(t, \delta, d)$  是抵达时间  $t$ 、第二声学信号与第一声学信号之间的起始时间差  $\delta$ , 以及第一声学信号的频率与第二声学信号的频率之间的频率比  $d$  的函数, 并且包含非线性交互信号;

通过处理器扫描信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的值范围, 以确定针对抵达时间  $T_{NL}$  的多个值、针对起始时间差  $\delta_{NL}$  的多个值、针对频率比  $d_{NL}$  的多个值, 以使得测量的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  对应于由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$ ,

通过处理器比较计算抵达时间与测量抵达时间  $T_{NL}$ , 或者比较计算起始时间差与测量起始时间差  $\delta_{NL}$ , 或两者;

如果计算抵达时间不同于测量抵达时间并且计算起始时间差不同于测量起始时间差, 则利用针对所有接收器、第一源、第二源以及第一锥形声学信号的仰角和第二锥形声学信号的仰角的测量抵达时间与计算抵达时间之差和计算起始时间差与测量起始时间差之差, 通过层析速度反演或全波形反演来更新传播速度模型,

对于针对第一声源的多个位置、第二声源的多个位置、第一锥形声学信号的多个仰角以及第二锥形声学信号的多个仰角获得的多个检测信号迭代地重复上述步骤, 直到与总行进时间相对应的计算抵达时间大致等于测量抵达时间、或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差、或两者为止, 以获取导致计算抵达时间大致等于测量抵达时间并且计算起始时间差大致等于测量起始时间差的传播速度  $V_p$  和传播速度  $V_s$ 。



184. 根据权利要求 183 所述的方法,还包括:利用射线追踪或其它声学数值建模技术,基于传播速度模型来计算声学传播的轨迹和行进时间。

185. 根据权利要求 183 所述的方法,还包括:通过映射、基尔霍夫成像、射束成像或波动方程成像,根据记录的信号数据来生成非线性特性的三维图像、或压缩速度与剪切速度的速度比的三维图像、或其两个或更多个的任何组合,或者利用层析速度反演、或全波形反演、或者与层析速度反演相组合的迭代成像来确定传播压缩速度或剪切速度或两者。

186. 一种生成非线性特性的三维图像的方法,该方法包括:

通过处理器读取测量参数,所述测量参数包括:被配置成生成具有第一频率的第一锥形声学信号的第一声源的位置、被配置成生成具有第二频率的第二锥形声学信号的第二声源的位置、被配置成接收从第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交处的岩层内的混合区返回至井眼的检测信号的接收器的位置、以及第一锥形声学信号的锥角与锥轴取向和第二锥形声学信号的锥角与锥轴取向;

通过处理器读取包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ , 其是抵达时间  $t$ 、第一锥形声学信号的广播的起始时间与第二锥形声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差  $\delta$ 、以及第一频率与第二频率之间的频率比  $d$  的函数;

通过处理器读取初始传播压缩与剪切速度模型;

通过处理器利用第一声源的位置和第二声源的位置、以及第一锥形声学信号的锥角与轴取向和第二锥形声学信号的锥角与轴取向,基于传播压缩与剪切速度模型来计算声学传播的轨迹;

计算其中第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交的相交体积区的空间坐标;

通过处理器针对一个范围的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  来搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$ , 以确定针对抵达时间  $T_{NL}$  的多个值、针对起始时间差  $\delta_{NL}$  的多个值、针对频率比  $d_{NL}$  的多个值,使得测量的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  对应于由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$ ; 以及

将由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至其中第一锥形广播声学信号与第二锥形广播声学信号相交的交互混合区的空间坐标; 以及

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一锥形声学信号的锥角与轴取向或第二锥形声学信号的锥角与轴取向、或其两个或更多个的任何组合的多个值,重复将频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至交互混合区的空间坐标,并且组合所映射的关联信号,以获取非线性混合过程的强度的三维图像。

187. 一种生成压缩速度与剪切速度的速度比的三维图像的方法,该方法包括:

通过处理器读取测量参数,所述测量参数包括:被配置成生成具有第一频率的第一锥形声学信号的第一声源的位置,被配置成生成具有第二频率的第二锥形声学信号的第二声源的位置,被配置成接收从第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交处的岩层内的混合区返回至井眼的检测信号的接收器的位置,以及第一锥形声学信号的锥角与锥轴取向和第二锥形声学信号的锥角与锥轴取向;

通过处理器读取包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ , 其是抵达时间  $t$ 、第一锥形声学信号的广播的起始时间与第二锥形声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差  $\delta$  以及第一频率与第二频率之间的频率比  $d$  的函数;

通过处理器读取初始传播压缩与剪切速度模型；

通过处理器利用第一声源的位置和第二声源的位置、以及第一锥形声学信号的锥角与轴取向和第二锥形声学信号的锥角与轴取向，基于传播压缩与剪切速度模型来计算声学传播的轨迹；

计算其中第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交的相交体积区的空间坐标；

基于第一锥形声学信号的锥角与轴取向和第二锥形声学信号的锥角与轴取向、第一声源的位置、和接收器的位置，来计算第一锥形声学信号与第二锥形声学信号之间的会聚角；

通过处理器搜索在抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的值的范围内的关联信号  $M(t, \delta, d)$ ，以确定针对抵达时间  $T_{NL}$  的多个值、针对起始时间差  $\delta_{NL}$  的多个值、针对频率比  $d_{NL}$  的多个值，其使得测量的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  对应于由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$ ；

利用导致检测的非线性信号的频率比  $d_{NL}$  来计算速度比，并且利用频率比与会聚角之间的选择规则关系来计算会聚角；

将计算速度比映射至混合区的空间坐标；

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一锥形声学信号的锥角与轴取向、或第二锥形声学信号的锥角与轴取向、或其两个或更多个的任何组合的多个值，重复将速度比映射至混合区的空间坐标，并且组合所映射的关联信号以获取速度比的三维图像。

188. 一种用于调查井眼外侧的岩层的系统，该系统包括：

设置在井眼内的第一声源，该第一声源被配置成生成第一锥形声学信号，该第一锥形声学信号按第一频率广播；

设置在井眼内的第二声源，该第二声源被配置成生成第二锥形声学信号，该第二锥形声学信号按不同于第一频率的第二频率广播，第一频率和第二频率处于大约 500Hz 与 500kHz 之间的频率范围中，

其中，第一声源和第二声源被配置成使得第一锥形声学信号和第二锥形声学信号在井眼外侧的希望相交体积中相交；以及

设置在井眼内的接收器，该接收器被配置成接收返回至井眼的、具有等于第一频率与第二频率之差的频率的检测信号，该检测信号通过第一锥形声学信号和第二锥形声学信号在相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程生成；

存储装置，被配置成记录检测信号和存储该检测信号，并且记录和存储测量参数，所述测量参数包括：第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一锥形声学信号的锥角与锥轴取向、和第二锥形声学信号的锥角与锥轴取向。

189. 根据权利要求 188 所述的系统，其中，生成第一锥形声学信号的第一声源和生成第二锥形声学信号的第二声源定位在单一井眼中。

190. 根据权利要求 188 所述的系统，其中，该井眼不是直的，或者该井眼包括侧线，以使第一锥形声学信号和第二锥形声学信号具有不共线的对称轴。

191. 根据权利要求 188 所述的系统，其中，第一锥形声学信号包括按编码时间序列排列的第一个脉冲，所述第一个脉冲在时间上被分开，每一个脉冲包括具有中心频率的

第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同。

192. 根据权利要求 191 所述的系统,其中,所述第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

193. 根据权利要求 188 所述的系统,其中,第二锥形声学信号包括按编码时间序列排列的第二多个脉冲,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,起始时间差  $\delta$  设置在广播第二多个脉冲的起始时间与广播第一多个脉冲的起始时间之间,其中,每一个脉冲包括调制信号,并且,该第二多个脉冲中的每一个脉冲内的调制信号的中心频率是第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的调制信号的中心频率的选定分数频率比  $d$ 。

194. 根据权利要求 193 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成控制第一声源和第二声源以及接收器,以针对第一声学信号与第二声学信号之间的多个起始时间差  $\delta$  并且针对第一频率与第二频率之间的多个频率比  $d$ ,重复生成第一声学信号、生成第二声学信号以及接收检测信号。

195. 根据权利要求 188 所述的系统,还包括相位控制器,该相位控制器被配置成控制第一锥形声学信号的相位或第二锥形声学信号的相位,或两者,以使得第一锥形声学信号与第二锥形声学信号具有相反极性。

196. 根据权利要求 195 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成将在接收器处检测的、通过第一锥形声学信号和第二锥形声学信号的混合过程而生成的信号添加至在接收器处检测的、通过具有相反极性的第一锥形声学信号和具有相反极性的第二声学信号的混合过程而生成的信号,以便增强非线性交互信号,并且最小化线性交互信号和噪声。

197. 根据权利要求 188 所述的系统,还包括多个检测器,所述多个检测器被配置成接收多个检测信号,并且向通过所述多个检测器接收的所述多个检测信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者。

198. 根据权利要求 197 所述的系统,其中,该检测器包括多个分量检测器,其中,该检测信号包括通过所述分量检测器检测的分量,并且所述系统还包括处理器,该处理器被配置成,向在所述多个分量检测器上接收的所述多个检测分量信号应用多维滤波、或时间时差分析与堆叠、或两者。

199. 根据权利要求 188 所述的系统,所述系统还包括处理器,该处理器被配置成控制第一声源、第二声源以及接收器,以针对第一声源的不同位置、第二声源的不同位置、接收器的不同位置、第一声源的广播锥角、或第二声源的广播锥角、或其两个或更多个的任何组合,重复:生成第一锥形声学信号、生成第二锥形声学信号、以及接收检测信号。

200. 根据权利要求 188 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成,从通过由第一声源和第二声源在岩层中的非线性交互而生成的记录检测信号中,提取并增强由非线性混合过程生成的信号,并且抑制由线性交互过程生成的信号、或噪声或两者。

201. 根据权利要求 188 所述的系统,其中,第一锥形声学信号包括按编码时间序列排列的第一多个脉冲,所述第一多个脉冲在时间上被分开,每一个脉冲包括具有中心频率的第一调制信号,其中,两个相继脉冲的中心频率不同,

其中,第二锥形声学信号包括按编码时间序列排列的第二多个脉冲,所述第二多个脉冲在时间上被分开,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个

对应脉冲的中心之间的时间间隔相同,其中,起始时间差  $\delta$  设置在广播第二多个脉冲的起始时间与广播第一多个脉冲的起始时间之间,其中,每一个脉冲包括第二调制信号,并且该第二多个脉冲中的每一个脉冲内的第二调制信号的中心频率是第一多个脉冲中的每一个对应脉冲内的第一调制信号的中心频率的选定分数频率比  $d$ ,并且

所述系统还包括处理器,该处理器被配置成,读取记录数据并且关联检测信号与包括按时间序列排列的多个脉冲的模板信号,其中,两个相继脉冲的中心之间的时间间隔和第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大致相同,其中,所述多个脉冲中的每一个脉冲包括具有中心频率的调制信号,该中心频率等于第一多个脉冲和第二多个脉冲中的每一个对应脉冲中的第一调制信号的中心频率与第二调制信号的中心频率之差。

202. 根据权利要求 201 所述的系统,其中,该第一多个脉冲中的两个相继脉冲的中心之间的时间间隔大于每一个脉冲的持续时间。

203. 根据权利要求 201 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成,针对多个起始时间差  $\delta$  并且针对第一频率与第二频率之间的多个频率比  $d$ ,重复在模板信号与检测信号之间关联,以生成包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ 。

204. 根据权利要求 203 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成,向检测信号应用时变频率带通信号,以保持检测信号的期望频率带宽左右的窄频带,该窄频带被选择为每一个脉冲的第一频率与第二频率之差左右。

205. 根据权利要求 201 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成执行检测信号的速端图分析。

206. 根据权利要求 188 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成扫描第一频率与第二频率的频率比、或者扫描起始时间差的范围、或两者,以根据针对声学信号在岩层内的非线性交互的选择规则来控制相交体积内的混合区的位置。

207. 根据权利要求 188 所述的系统,其中,该第一声源沿第一轴取向定位在井眼内,并且第二声源沿第二轴取向定位在井眼内,第一轴取向和第二轴取向非同轴取向或不平行。

208. 根据权利要求 207 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成,控制第一频率与第二频率的频率比以及起始时间差,以选择相交体积内的、定位在第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交的轨迹处的特定混合区。

209. 根据权利要求 208 所述的系统,还包括处理器,该处理器被配置成,根据第一声源至混合区中心以及从混合区中心至接收器的总行进时间、或者根据会聚角与第一声学信号和第二声学信号的频率比之间的非线性交互选择规则关系的第一锥形声学信号与第二锥形声学信号之间针对混合区的会聚角、或两者,在定位在第一锥形广播与第二锥形广播相交的轨迹上的混合区之间辨别。

210. 根据权利要求 188 所述的系统,其中,第一声源定位在第一井眼内,并且第二声源定位在第二井眼内,而接收器定位在第一井眼、第二井眼、或者第三井眼内。

211. 根据权利要求 210 所述的系统,其中,锥角或锥轴取向或两者被选择成使得第一锥形声学信号和第二锥形声学信号在包围井眼的岩层中的目标区域处相交。

212. 一种用于通过行进时间层析反演来确定包围井眼的岩层体积中的传播压缩速度的值、或剪切速度的值、或两者的系统,该系统包括处理器,该处理器被配置成:

利用井眼中的井日志和有关远离井眼的岩层的横向连续性的假定来估算初始传播速

度模型；

根据按第一锥形信号广播的形式广播第一声学信号的第一声源的位置、按第二锥形信号广播的形式广播第二声学信号的第二声源的位置、以及第一锥形广播与第二锥形广播的仰角来计算混合区的空间坐标；

计算从第一声源至混合区中心以及从混合区中心至接收器的总行进时间；

计算从第一声源至混合区中心与从第二声源至混合区中心的行进时间差；

读取关联信号  $M(t, \delta, d)$ ，所述关联信号  $M(t, \delta, d)$  是抵达时间  $t$ 、第二声学信号与第一声学信号之间的起始时间差  $\delta$ 、以及第一声学信号的频率与第二声学信号的频率之间的频率比  $d$  的函数，并且包含非线性交互信号；

扫描信号  $M(t, \delta, d)$  中的抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的所有值，以确定针对抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$ 、频率比  $d_{NL}$  以及  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  的多个值，使得测量的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  对应于由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$ ；

通过处理器比较计算抵达时间与测量抵达时间  $T_{NL}$ ，或者比较计算起始时间差与测量起始时间差  $\delta_{NL}$ ，或两者；

如果计算抵达时间不同于测量抵达时间，并且计算起始时间差不同于测量起始时间差，则利用针对所有接收器、第一源、第二源以及广播仰角配置的测量抵达时间与计算抵达时间之差和计算起始时间差与测量起始时间差之差，通过层析速度反演或全波形反演来更新传播速度模型，

针对关于第一声源的多个位置、第二声源的多个位置、第一声学信号的多个广播仰角以及第二声学信号的多个广播仰角所获取的多个检测信号迭代地重复上述步骤，直到与总行进时间相对应的计算抵达时间大致等于测量抵达时间，或者计算起始时间差大致等于测量起始时间差，或两者为止，以获取导致计算抵达时间大致等于测量抵达时间并且计算起始时间差大致等于测量起始时间差的传播速度  $V_p$  和传播速度  $V_s$ 。

213. 根据权利要求 212 所述的系统，还包括处理器，该处理器被配置成利用射线追踪或其它声学数值建模技术，基于传播速度模型来计算声学传播的轨迹和行进时间。

214. 根据权利要求 212 所述的系统，还包括处理器，该处理器被配置成，通过映射、基尔霍夫成像、射束成像或波动方程成像，根据记录信号数据来生成非线性特性的三维图像、或压缩速度与剪切速度的速度比的三维图像、或其两个或更多的任何组合，或者利用层析速度反演或全波形反演或者与层析速度反演相组合的迭代成像，来确定传播压缩速度或剪切速度或两者。

215. 一种用于生成非线性特性的三维图像的系统，该系统包括处理器，该处理器被配置成：

读取测量参数，所述测量参数包括：被配置成生成具有第一频率的第一锥形声学信号的第一声源的位置、被配置成生成具有第二频率的第二锥形声学信号的第二声源的位置、被配置成接收从第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交处的岩层内的混合区返回至井眼的检测信号的接收器的位置、以及第一锥形声学信号的锥角与锥轴取向和第二锥形声学信号的锥角与锥轴取向；

读取包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ ，其是抵达时间  $t$ 、第一锥形声学信号

的广播的起始时间与第二锥形声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差  $\delta$ 、以及第一频率与第二频率之间的频率比  $d$  的函数；

读取初始传播压缩与剪切速度模型；

利用第一声源的位置和第二声源的位置、以及第一锥形声学信号的锥角与轴取向和第二锥形声学信号的锥角与轴取向，基于传播压缩与剪切速度模型来计算声学传播的轨迹；

计算其中第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交的相交体积区的空间坐标；

针对抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的一个范围搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$ ，以确定针对抵达时间  $T_{NL}$  的多个值、针对起始时间差  $\delta_{NL}$  的多个值、针对频率比  $d_{NL}$  的多个值，其使得测量的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  对应于由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$ ；

将由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至其中第一锥形广播声学信号与第二锥形广播声学信号相交的交互混合区的空间坐标；以及

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一锥形声学信号的锥角与轴取向或第二锥形声学信号的锥角与轴取向、或其两个或更多个的任何组合的多个值，重复将频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  映射至交互混合区的空间坐标，并且组合所映射的关联信号，以获取非线性混合过程的强度的三维图像。

216. 一种用于生成压缩速度与剪切速度的速度比的三维图像的系统，该系统包括处理器，该处理器被配置成：

读取测量参数，所述测量参数包括：被配置成生成具有第一频率的第一锥形声学信号的第一声源的位置、被配置成生成具有第二频率的第二锥形声学信号的第二声源的位置、被配置成接收从第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交处的岩层内的混合区返回至井眼的检测信号的接收器的位置、以及第一锥形声学信号的锥角与锥轴取向和第二锥形声学信号的锥角与锥轴取向；

读取包含非线性交互信号的关联信号  $M(t, \delta, d)$ ，其是抵达时间  $t$ 、第一锥形声学信号的广播的起始时间与第二锥形声学信号的广播的起始时间之间的起始时间差  $\delta$ 、以及第一频率与第二频率之间的频率比  $d$  的函数；

读取初始传播压缩与剪切速度模型；

利用第一声源的位置和第二声源的位置、以及第一锥形声学信号的锥角与轴取向和第二锥形声学信号的锥角与轴取向，基于传播压缩与剪切速度模型来计算声学传播的轨迹；

计算其中第一锥形声学信号与第二锥形声学信号相交的相交体积区的空间坐标；

基于第一锥形声学信号的锥角与轴取向、第二锥形声学信号的锥角与轴取向、第一声源的位置、和接收器的位置，来计算第一锥形声学信号与第二锥形声学信号之间的会聚角；

针对抵达时间  $t$ 、起始时间差  $\delta$  以及频率比  $d$  的值范围来搜索关联信号  $M(t, \delta, d)$ ，以确定针对抵达时间  $T_{NL}$  的多个值、针对起始时间差  $\delta_{NL}$  的多个值、针对频率比  $d_{NL}$  的多个值，其使得测量的抵达时间  $T_{NL}$ 、起始时间差  $\delta_{NL}$  以及频率比  $d_{NL}$  对应于由非线性混合过程生成的频带限制尖峰信号  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$ ；

利用导致检测的非线性信号的频率比  $d_{NL}$  来计算速度比，并且利用频率比与会聚角之间的选择规则关系来计算会聚角；

将计算速度比映射至混合区的空间坐标；

针对第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一锥形声学信号的锥角与轴取向、或第二锥形声学信号的锥角与轴取向、或其两个或更多个的任何组合的多个值，重复将速度比映射至混合区的空间坐标，并且组合所映射的关联信号，以获取速度比的三维图像。

217. 一种用于调查井眼周围岩层的非线性特性的系统，该系统包括：

第一子系统，被配置成执行数据获取、数据的控制和记录；

与该第一子系统通信的第二子系统，该第二子系统被配置成执行非线性和速度预备成像；

与该第一子系统通信的第三子系统，该第三子系统被配置成发射受控声学广播并且接收声能；

与该第一子系统和第三子系统通信的第四子系统，该第四子系统被配置成生成朝向岩层的源信号；以及

与第三子系统和第四子系统通信的第五子系统，该第五子系统被配置成执行对表示岩层的非线性特性的信号的检测。

218. 根据权利要求 217 所述的系统，其中，该第一子系统包括获取模型化模块，该获取模型化模块被配置成，接收来自第二子系统的输入和操作员输入。

219. 根据权利要求 218 所述的系统，其中，该第一子系统包括数据获取控制器，该数据获取控制器被配置成，接收操作员输入和来自获取设计模块的输入。

220. 根据权利要求 219 所述的系统，其中，该第一子系统包括数据预处理与增强模块和数据存储装置，该数据预处理与增强模块被配置成，从数据存储装置读取数据并且将数据输入到第二子系统中。

221. 根据权利要求 217 所述的系统，其中，该第二子系统包括初始速度模型模块，该初始速度模型模块被配置成，向第一子系统提供由压缩与剪切慢度的日志导出的初始速度模型和有关地层横向连续性的信息。

222. 根据权利要求 221 所述的系统，其中，该第二子系统包括图像初始化模块，该图像初始化模块被配置成，初始化与由混合区处的非线性交互所生成的测量信号的幅度相关联的传播压缩与剪切速度值、速度比图像，以及非线性图像的体积。

223. 根据权利要求 217 所述的系统，其中，该第三子系统包括：第一声源、第二声源、一个或更多个接收器、工具部署与输送模块、工具机械控制器、用于控制第一声学信号的取向的方向控制器、以及用于控制第二声学信号的取向的方向控制器。

224. 根据权利要求 223 所述的系统，其中，该第三系统被配置成，从第一子系统接收用于控制第三子系统内的方向控制器的命令，以控制第一声学信号的方位角与仰角、第二声学信号的方位角与仰角，或两者。

225. 根据权利要求 223 所述的系统，其中，从第三子系统收集与工具配置和广播几何学有关的获取记录参数，将其并且记录在第一子系统内的数据存储装置中。

226. 根据权利要求 217 所述的系统，其中，该第四子系统包括：被配置成生成第一信号的信号发生器、被配置成生成第二声学信号的信号发生器、倍频器与起始时间差模块、以及编码信号发生器。

227. 根据权利要求 226 所述的系统,其中,该第四子系统被配置成接收来自第一子系统的输入命令。

228. 根据权利要求 227 所述的系统,其中,该第四子系统被配置成接收来自第一子系统的输入命令,以利用编码信号发生器模块生成脉冲序列。

229. 根据权利要求 228 所述的系统,其中,由编码信号发生器模块生成的编码信号被输入到第一信号控制与放大器模块中,以向第一声源输入具有第一频率的第一信号,其中,由编码信号发生器模块生成的编码信号被输入到倍频器与起始时间差模块中,并接着输入到第二信号控制与放大器模块中,以向第二声源提供第二信号,所述第二信号相对于第一信号具有起始时间差并且具有作为第一频率的选定分数的第二频率。

230. 根据权利要求 229 所述的系统,其中,起始时间差和频率分数作为记录广播信息存储在第一子系统内的数据存储装置中。

231. 根据权利要求 217 所述的系统,其中,该第五子系统包括:被配置成接收来自一个或多个接收器的信号的接收器模块、被配置成增强由信号接收器模块所接收的信号的非线性信号增强模块、被配置成生成模板信号的模板信号发生器、以及被配置成关联接收信号与模板信号的信号关联模块。

232. 根据权利要求 231 所述的系统,其中,来自接收器模块的信号通过非线性信号增强模块处理,以增强非线性源点的内容并减小噪声,其中,来自接收器模块的信号和增强信号被存储在第一子系统内的数据存储装置中。

233. 根据权利要求 231 所述的系统,其中,该模板发生器被配置成生成模板信号,其中,该关联模块被配置成关联模板信号与接收信号,以提取关联信号,该关联信号识别来自第一声源的第一信号与来自第二声源的第二信号在井眼周围岩层内的非线性混合区中的相交处生成的信号,其中, $t$  对应于信号时间, $d$  对应于第一频率与第二频率的频率比, $\delta$  是第一信号与第二信号之间的时间延迟。

234. 根据权利要求 233 所述的系统,其中,该关联信号被存储在第一子系统内的数据存储装置中。

235. 根据权利要求 234 所述的系统,其中,该第一子系统内的数据获取控制器被配置成,在第一子系统的存储装置内重复记录,并且重复从第一声源的位置、第二声源的位置、接收器的位置、第一声学信号的仰角、或第二声学信号的仰角、或其两个或更多的任何组合的多个值提取关联数据。

236. 根据权利要求 235 所述的系统,还包括速端图分析模块,该速端图分析模块被配置成,处理存储装置内的存储数据以进一步增强关联数据。

237. 根据权利要求 217 所述的系统,还包括与该第二子系统通信的第六子系统,该第六子系统被配置成执行对岩层的非线性特性的成像和确定岩层内的声学信号速度。

238. 根据权利要求 237 所述的系统,其中,该第六子系统包括:子系统数据预处理与增强模块,速度模型迭代模块,成像迭代模块,用于速度比图像和 / 或非线性图像的输出图像模块,以及用于输出压缩速度  $V_p$ 、剪切速度  $V_s$ 、或压缩速度与剪切速度之间的速度比、或其两个或更多的任何组合的确定值的输出速度模块。



## 用于调查岩层的地下特征的系统和方法

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求保护 2010 年 11 月 12 日提交的美国专利申请 No. 61/413, 172 的权益，其全部内容通过引用并入于此。

[0003] 政府权利

[0004] 本发明产生于由美国能源部授予的政府支持下的合作研究和开发协议 (CRADA) 合同号 DE-AC52-06NA25396, 该政府在本发明中可以具有特定权利。

### 技术领域

[0005] 本发明总体上涉及岩层的地震询问, 并且更具体地说, 涉及利用井眼中多个源的组合来创建远离井眼的一区域中的非线性特性和 / 或压缩与剪切速度的比率的三维图像, 和接收并分析得到的通过混合过程形成的第三波。

### 背景技术

[0006] 地下特征的声学询问趋于受限于实际源的尺寸和功率, 而且实际上, 井下声学换能器的输出受限于有线电缆的输电能力。高频信号具有相对较短的穿透距离, 而低频信号通常需要大的源, 所述源夹紧至井眼壁以最大化针对地层的能量传递并且最小化井孔内不需要的信号。当前, 声学井眼工具设计有井眼中的声源, 以检测沿井眼壁传播的或者因井眼周围岩层的线性特性的不均匀性而散射的返回声波。Leggett、III 等人的美国专利 No. 7301852 公开了一种被设计成检测岩层边界的随钻测井工具。该工具使用从井眼发射两个声波的两个声源阵列, 其通过在井眼周围岩层中、该声波相交位置处非线性混合而生成第三波。该第三波继续向前并且利用地下特性的不均匀性而线性地交互。该第三波因地下特性的不均匀性而散射, 并且所散射信号通过测井工具中的传感器被检测。美国专利 No. 7, 301, 852 未讨论直接检测第三波, 而相反检测因岩层中的不均匀性而散射的信号。美国专利 No. 7, 301, 852 仅使用所得到的散射波来检测岩层边界。

[0007] 已经进行了特征化从井眼勘探石油天然气区域中地层的非线性特性的多种尝试, 但皆具有其自身的局限性。例如, D' Angelo 等人的美国专利 No. 5521882 公开了一种被设计成利用压力接收器来记录因两个波的非线性混合而生成的非线性波的声学工具。该非线性波沿井眼传播, 并且有限地穿透到周围岩层中, 接着反向折射到井孔流体中。利用非线性的指示来提供对井眼周围地层的相对固结 (consolidation) 的指示。美国专利 No. 5521882 未讨论测量远离井眼的岩层的非线性特征。Khan 的美国专利 No. 6175536 公开了这样一种方法, 即, 该方法根据从第一井眼发送到地球地层中并且在第二井眼中接收的地震信号的频谱分析, 来估算地球地层的非线性程度。美国专利 No. 6175536 中的方法根据该频谱分析来确定, 在位于第二井眼的接收器处存在表示由位于第一井眼的两个源生成的发送地震信号的两个选定频率之和或差的频率。美国专利 No. 6175536 未讨论在接收器和源位于一个井眼中的情况下测量井眼的远程区域中的岩层的非线性特征。

[0008] 根据这些现有尝试, 需要用于特征化井眼的远程区域中的非线性特性的系统和方

法。

### 发明内容

[0009] 本公开的一个方面是,提供一种用于调查井眼外侧岩层的方法。该方法包括:通过第一声源生成具有第一频率的第一声波;并且通过第二声源生成具有第二频率的第二声波。该第一和第二声源被设置在井眼的局部化区域内。该第一和第二声波在井眼外侧的相交体积中相交。该方法还包括:在设置在井眼中的接收器处接收具有第三频率的第三声波,第三剪切声波因相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程而返回至井眼。该第三频率等于第一频率与第二频率之差。

[0010] 本公开的另一方面是提供一种用于调查井眼外侧岩层的系统。该系统包括:第一声源,该第一声源被配置成生成具有第一频率的第一声波;和第二声源,该第二声源被配置成生成具有第二频率的第二声波。该第一和第二声源被设置在井眼的局部化区域内。该第一和第二声波在井眼外侧的相交体积中相交。该系统还包括:接收器,该接收器设置在井眼中,并且被配置成接收具有第三频率的第三声波,该第三剪切声波因相交体积内的非线性混合区中的非线性混合过程而返回至井眼。该第三频率等于第一频率与第二频率之差。

[0011] 在本公开的一些方面,第一声波和第二声波包括编码声学信号。在本公开的其它方面,第一和第二声源被配置成生成锥形广播声学信号。在本公开的另一方面,提供了这样一种系统和方法,即,其用于成像岩层的非线性特性,或确定岩层中的压缩速度、剪切速度、或压缩速度与剪切速度之间的速度比,或其任何组合。

[0012] 根据本公开另一些方面,提供了一种用于调查井眼周围岩层的非线性特性的系统。该系统包括:第一子系统,该第一子系统被配置成执行数据获取、数据的控制和记录;与该第一子系统通信的第二子系统,该第二子系统被配置成执行非线性和速度预备成像;与该第一子系统通信的第三子系统,该第三子系统被配置成发射受控声学广播并且接收声能;与该第一子系统和第三子系统通信的第四子系统,并且该第四子系统被配置成生成朝向岩层的源信号;以及与该第三子系统和第四子系统通信的第五子系统,该第五子系统被配置成执行对表示岩层的非线性特性的信号的检测。

[0013] 当参照附图考虑下面的描述和所附权利要求书时,本发明的这些和其它目的、特征以及特性,和结构与组合部分的相关部件的操作与功能的方法以及制造的经济性将变得更清楚,其全部形成了本说明书的一部分,其中,相同标号指定各个图中的对应部分。然而,应当明白,附图仅仅是出于例示和描述的目的,而非旨在作为对本发明的限制的解说。如在本说明书和权利要求书中使用的,单数形式“一(a)”、“一(an)”,以及“该/所述(the)”包括多个指示物,除非上下文另外清楚地规定。

### 附图说明

[0014] 图 1 示出了根据本公开各个方面的、用于创建远离井眼的区域中的非线性特性的三维图像的构造;

[0015] 图 2 示出了根据本公开多个方面的、用于创建远离井眼的区域中的非线性特性的三维图像的另一构造;

[0016] 图 3 示出了根据本公开多个方面的、用于创建远离井眼的区域中的非线性特性的

三维图像的又一构造；

[0017] 图 4 示出了根据本公开各个方面的、用于创建远离井眼的区域中的非线性特性的三维图像的流程图；

[0018] 图 5a、5b 以及 5c 示出了当两个初级波是射束时针对表 1 中列举的射束 - 射束交互的第一选择规则的数值模拟；

[0019] 图 6 例示了如由非线性混合选择规则支配的、因两个初级声波的非线性混合而生成差频第三波的几何图；

[0020] 图 7 示出了本公开多个方面的、用于利用射束和宽射束或平面波来成像的应用；

[0021] 图 8 示出了根据本公开一方面的、针对用于利用非共线声学混合来远程映射岩层的非线性特性和 / 或  $V_p/V_s$  比的基于井眼的系统的示例构造；

[0022] 图 9a 示出了用于标识表示广播和散射声波的矢量的图 8 的构造；

[0023] 图 9b 示出了图 9a 的非共线声学混合的矢量表示；

[0024] 图 10a 示出了根据本公开多个方面的、针对混合区压缩速度与剪切速度比  $V_p/V_s$  的范围的, 有关平面波频率比的混合系数的典型依赖性；

[0025] 图 10b 示出了符合针对  $\mathbf{P} + \mathbf{P} \Rightarrow \mathbf{SV}$  交互的选择规则的、会聚角与平面波频率比的典型依赖性；

[0026] 图 10c 示出了符合针对  $\mathbf{P} + \mathbf{P} \Rightarrow \mathbf{SV}$  交互的选择规则的、散射角与平面波频率比的典型依赖性；

[0027] 图 11a 至 11c 示出了根据本公开多个方面的、平面波在非线性介质中的、导致生成返回至井眼的散射波的非共线交互的数值模拟的示例结果；

[0028] 图 12a 示出了根据本公开多个方面的、针对初级声波与散射声波的方向和飞行时间的示例表示；

[0029] 图 12b-12d 示出了根据本公开一实施例的、来自第一声源的模拟信号、来自第二声源的模拟信号、以及模拟模板信号的示例；

[0030] 图 13a 示出了根据本公开一实施例的、第一声源和第二声源以及接收器阵列的位置；

[0031] 图 13b 至 13d 示出了根据本公开一实施例的、接收脉冲系列与模型化模板信号的关联如何导致标识信号在接收器阵列处的抵达时间；

[0032] 图 14a 示出了根据本公开一实施例的、第一声源和第二声源以及接收器阵列的位置；

[0033] 图 14b 至 14d 示出了根据本发明多个方面的、发送编码脉冲系列并且利用关联技术来改进信噪比的效果；

[0034] 图 15a 和 15b 示出了根据本公开多个方面的、在两个共轴圆锥的交界处的按环绕井眼的环形形式的示例非共线混合布置；

[0035] 图 16a 和 16b 示出了根据本公开多个方面的、两个相交共轴圆锥之间的示例非共线混合布置；

[0036] 图 17a 示出了根据本公开多个方面的、具有其中存在下圆锥与上圆锥完全相交的曲柄状鼠洞 (cranked rathole) 的一示例单一井布置；

[0037] 图 17b 示出了根据本公开多个方面的、具有其中下发送器发射几乎与井眼轴正交

的能量的曲柄状鼠洞的另一示例单一井布置；

[0038] 图 18a 示出了根据本公开多个方面的、垂直井与侧线(sidetrack)的一示例,其中接收器在该井的垂直部分中；

[0039] 图 18b 示出了根据本公开多个方面的、垂直导向孔(pilot hole)与水平侧线的另一示例,其中接收器在该侧线中；以及

[0040] 图 19 是根据本公开多个方面的、用于执行勘测设计、数据获取、数据处理以及成像的系统的示意性系统图。

### 具体实施方式

[0041] 图 1 示出了根据本公开各个方面的、用于创建远离井眼的区域中的压缩速度与剪切速度比和非线性特性的三维图像的几个可能构造之一。第一声源 105 设置在井眼 110 中,以生成具有第一频率  $f_1$  的可操纵初级声能射束。第二声源 115 也设置在井眼 110 中,以生成具有第二频率  $f_2$  的可操纵初级声能射束。通过非限制例的方式,第一声源 105 和第二声源 115 都可以是源的相控阵列,并且可以被配置成生成可操纵压缩或剪切射束。在本公开中,术语“声学”可以指 P、SV 或 SH 声学模式。

[0042] 如图 1 所示,第一声源 105 被设置在第一工具主体 120 上,而第二声源 115 被设置在第二工具主体 125 上。然而,本公开并不受限于此,如第一工具主体 120 和第二工具主体 125 还可以一起被设置在共同工具主体(未示出)上。工具主体 120 和 125 被配置成可按至少两个自由度(包括沿井眼 110 的纵轴 150 平移、和按环绕井眼 110 的纵轴的方位旋转 155)在井眼 110 内独立地移动。第一声源 105 可以在井眼 110 中设置在第二声源 115 之上或之下。工具主体 120 和 125 可以设置在井眼 110 内的传送测井工具(未示出)上。

[0043] 对于第一声源 105 和第二声源 115 的给定方位取向来说,由第二声源 115 生成的射束和由第一声源 105 生成的射束被配置成,使得该射束在远离井眼 110 的混合区 130 中会聚和相交。通过独立操纵射束和改变源 105、115 之间的间隔的组合,混合区 130 沿由射束和井眼纵轴 150 限定的平面移动,同时控制相交角。混合区 130 相距井眼 110 的距离可以从接近井眼 110 的边缘至进入周围地下岩层大约 300 米的范围变动。通过非限制例的方式,上面段落中涉及的源阵列 105、115 中的相邻部件之间的相位差和 / 或起始时间差可以被修改成在特定混合区 130 处聚焦初级射束的声能。

[0044] 两个波之间的位置处的大地的非线性特性导致生成第三弹性波。该第三弹性波是出现在非线性材料(在这种情况下,岩层)中的三波混合过程的结果。在这个过程中,具有不同频率  $f_1$  和  $f_2$  的两个会聚非共线波(还称作初级波)混合以形成具有谐波和互调频率  $f_1-f_2$ 、 $f_1+f_2$ 、 $2 \times f_1$  以及  $2 \times f_2$  等的附加波。第三波的强度是混合区中岩石的非线性的函数。通过非限制例的方式,当具有频率  $f_1$  的初级压缩(P)波和具有频率  $f_2$  的初级剪切(SV)波在非线性和交叉或相交时,生成具有频率  $f_1 - f_2$  的第三压缩(P)或剪切(SV)波。

[0045] 在传播选择规则下,第三波传播矢量与两个初级波的传播矢量共平面。相交角、 $f_1/f_2$  比以及压缩与剪切速度比的某些组合导致沿相对于初级射束的特定角反向向井眼 110 传播的、具有频率  $f_1 - f_2$  的第三弹性波。

[0046] 将传感器或接收器阵列 135 设置在井眼 110 中的特定位置处,以检测返回至井眼 110 的第三波。在一个实施例中,例如,如图 1 所示,传感器阵列 135 包括多于一个的传感

器,被设置为传感器工具主体 140 上的传感器阵列,并且与工具主体 120 和 125 隔开。传感器 135 被配置成,可沿井眼 110 的纵轴 150 在井眼 110 内独立地移动。例如,传感器工具主体 140 可以设置在工具主体 120 和 125 之下,或者设置在工具主体 120 和 125 之上和之下。在一些实施例中,传感器工具主体 140 可以连接至任一工具主体 120 和 125,或者两者。

[0047] 第三波通过传感器阵列 135 在井眼 110 处检测。图 2 示出了与图 1 类似的布置,其中,接收器 135 包括夹紧至井眼壁的三分量地震检波器 145。所得信号通过处理而被分解成其仰角(elevation)和方位(azimuth),以便通过确定引入的第三波抵达的方向来向该系统添加冗余。

[0048] 在一个实施例中,可以设置第一处理器或控制器,并且将其配置成执行机器可读指令(未示出)以执行各种处理任务,如控制源触发和压缩或者过滤由传感器阵列 135 记录的数据。在一个实施例中,第一处理器可以设置在井眼 110 内。在一个实施例中,可以设置第二处理器并且将其配置成执行用于辅助第一处理器或者与第一处理器相比执行不同处理任务的机器可读指令(未示出)。例如,第二处理器可以执行创建三维图像方面的一部分或全部处理活动。发送器或收发器(未示出)可以设置在井眼 110 中,以通过有线电缆(未示出)沿孔向上发送数据。在一个实施例中,第二处理器例如可以设置在井眼外侧。

[0049] 在沿具有源 105、115 之一的井眼的给定深度,按恒定相对方向沿仰角扫描射束,以沿穿过井眼轴的平面空间地扫描混合区,方位地旋转源以使旋转地扫描混合区并沿井眼 110 移动整个装配件,导致针对非线性特性扫描井眼周围的混合区的 3D 体积。利用源 105、115 和位于独立工具主体上的传感器阵列 135,可以获取数据中的冗余,并且可以改变调查的深度。这样,可以询问井眼周围岩石的 3D 体积的非线性特性,并且可以根据返回信号(即,由传感器阵列 135 检测的信号)处理和计算非线性特性的 3D 图像。

[0050] 图 3 示出了根据本发明另一实施例的、用于创建远离井眼 110 的区域中的非线性特性的三维图像的另一布置。图 3 的布置类似于图 2 的布置,并且主要差别在于,所述源设置在井眼 110 中以生成弹性波(例如,球面波)而不是可操纵定向射束。参照图 3,第一声源 305 设置在井眼 110 中的第一工具主体 320 上,以生成声能的具有第一频率  $f_1$  的第一弹性波。第二声源 315 设置在井眼 110 中的第二工具主体 325 上,以生成声能的具有第二频率  $f_2$  的第二弹性波。由源 305、315 生成的第一和第二弹性波被配置成,远离井眼 110 在不同混合区 130 处相交。接收器 145 设置在井眼 110 内,以接收通过如上讨论的并且下面进一步讨论的第三波混合过程而在混合区 130 中生成的第三波。因为由源 305、315 生成的波基本上不定向,所以这些波之间的混合同时出现在混合区 130 的整个区域中,其还延伸出该图的平面,并且接收器 145 趋于具有定向特征。通过非限制例的方式,可以将三分量地震检波器用于该目的。所得信号通过处理而按多个仰角和方位及行进时间分解成多个抵达信号。给定源 305 和 315 以及接收器 145 的位置,每一个分解定向抵达的行进时间和方向,则有了足够信息来应用下面段落中描述的选择规则,以确定在其中生成第三波的唯一混合区。该唯一映射允许根据所接收信号的特性来构建三维(3D)图像。

[0051] 图 4 示出了根据本发明一实施例的、利用传送测井工具来创建远离井眼的区域中的非线性特性的三维图像和压缩与剪切速度比的三维图像的方法的流程图。该方法在 405 开始,其中,将第一声源设置在井眼中,以生成具有第一频率的可操纵弹性能量射束,并且将第二声源设置在井眼中,以生成具有第二频率的可操纵弹性能量射束。具有第一和第二

频率的可操纵射束被配置成,在远离井眼的位置处相交。同样地,第二射束按和第一射束相同的方位、但按相对于井眼的纵轴的不同仰角生成。该方法在 410 继续,其中,通过传感器阵列在井眼处接收第三弹性波。如上所述,第三弹性波通过混合过程创建,具有等于第一与第二频率之差的频率和朝着井眼的传播方向。在 415,依靠选择规则,根据第一与第二声源的布置和第三波的特性来确定远离井眼的混合位置。在 420,利用通过按多个方位、仰角以及井眼内的纵向位置重复生成步骤 405、接收步骤 410 和确定步骤 415 所记录的数据,来创建非线性特性的三维图像。对于压缩剪切交互来说,针对如上述段落中讨论的压缩 / 剪切速度 ( $V_p/V_s$ ) 比,在步骤 425 分析接收的信号。在 430,将非线性特性变换成物理储集层特性,如流体饱和度、有效应力、断裂密度以及矿物特性。

[0052] 在本公开的一些方面,第一和第二声源可以是射束波源或柱状波源、或者球面波源,并且该传感器阵列可以是非定向单一分量传感器和三分量地震检波器的任何组合。分量部件的另选改变在信号处理和成像中提供了不同的冗余度。

[0053] 在其中具有频率  $f_1$  的初级压缩(P)波和具有频率  $f_2$  的初级剪切(S)波在非线性介质中彼此交叉的特定情况下,生成具有频率  $f_1 - f_2$  的第三 P 或 S 波。如果初级 P 和 S 波分别是具有波矢量  $k_1$  和  $k_2$  的射束,并且非线性地层特性均匀,则波交互的运动学需要所得的第三波成为具有服从选择规则  $k_1 - k_2 = k_3$  的波矢量  $k_3$  的平面波。该选择规则在初级波的可允许交叉角和第三波的特定传播方向上设置了非常严格的限制。针对两个线性平面波的非线性混合以及选择规则和幅度响应的一般运动学理论具有来自 Jones and Kobett(1963)、Rollins, Taylor et al. (1964) and later by Korneev, Nihei and Myer (1998) 的贡献,其全部通过引用其全部内容而并入于此,他们还提供了混合介质的非线性参数与非线性混合信号强度之间的特定关系。例如, Korneev, Nihei 以及 Myer 的方程 53 和 54 示出了 P 与 SV (垂直偏振剪切) 平面波的混合强度成比例于岩石的非线性参数的特定组合。

[0054] 支配两个弹性平面波的非线性交互的选择规则可以被用作对两个弹性射束的交互的引导。这些平面波选择规则指示下面六个非线性交互生成反向散射波。

[0055] 表 1- 支配两个弹性平面波的非线性交互的选择规则。在该表中,并且在本文档的任何地方,  $f_1$  大于  $f_2$ 。

[0056]

选择规则	第一射束或波	第二射束或波	根据第一+第二的所得第三射束或波
1	$P(f_1)$	$SV(f_2)$	$P(f_1 - f_2)$
2	$P(f_1)$	$SV(f_2)$	$SV(f_1 - f_2)$
3	$P(f_1)$	$SH(f_2)$	$SH(f_1 - f_2)$
4	$P(f_1)$	$SV(f_2)$	$P(f_1 + f_2)$
5	$SV(f_1)$	$SV(f_2)$	$P(f_1 + f_2)$
6	$SH(f_1)$	$SH(f_2)$	$P(f_1 + f_2)$

[0057] 图 5a、5b 以及 5c 示出了当两个初级波是具有射束 - 射束交互的射束时表 1 的选择规则 1 的数值仿真。图 5a 所示的 25kHz 压缩射束和图 5b 所示的 18kHz 剪切射束混合以形成图 5c 所示的具有频率  $7\text{kHz}=25\text{kHz} - 18\text{kHz}$  的第三射束。在这个示例中,根据平面波预测,通过在其中射束  $P(f_1)$  和  $SV(f_2)$  交叠的区域中非线性混合而生成与  $P(f_1)$  波成  $133^\circ$  角的具有频率  $(f_1 - f_2)$  的第三反向传播 P 射束。

[0058] 射束的非线性交互的运动学导致生成波矢量和频率的特定组合。第三波按特定行进时间返回,并且具有特定频率  $f_3$  和波矢量  $k_3$ ,如  $f_3=f_1 - f_2$  和  $k_3=k_1 - k_2$ 。针对  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $k_1$  以及  $k_2$  的组合,存在处于由  $k_1$  和  $k_2$  限定的同一平面中的第三波明确限定的传播波矢量  $k_3$ 。在按特定接收器位置检测的信号与其中发生两个初级波  $k_1$  和  $k_2$  的非线性混合的位置之间存在直接对应。接收器的信号强度成比例于混合区中岩石的非线性的强度以及其它因素等,并且对于位于矢量  $k_3$  上的接收器达到最大值。因此,接收器处的信号强度可以沿射束轨迹(举例来说,如图 1 所示)以几何方式映射到岩层的非线性上。

[0059] 波传播的几何理论指示每一个混合区中生成的射束在特定时间延迟之后,抵达井眼处的、由三个波矢量  $k_1$ 、 $k_2$  以及  $k_3$  的几何学限定的特定接收器。返回信号在井眼中特定位置处的特定时间的强度取决于交互位置的非线性程度。因此,可以构建沿射束的岩石的非线性特性的相对强度的时间图像。接收器处返回信号的幅度或量值本身可以指示混合区的特定石油物理特性。如果该射束和平面波在保持会聚角的同时按方位和仰角扫描,则可以获取井眼周围岩石的非线性特性的局部化外周和径向 3D 图像。通过在井眼中上下移动整个装配件,可以获取井眼周围岩石的非线性特性的重复 3D 图像。通过对这些重复图像进行加权叠加,可以通过随后的计算机处理构建整个井眼周围岩石的非线性特性的最终图像。另外,如果源和接收器是三个分离工具主体中的一部分,则可以移动一个或两个而将第三个固定(例如,将源固定,而上下移动接收器工具主体)。另选的是,可以以工具主体之间的不同间距进行进入井中的几个下降(descent)。

[0060] 对于弹性射束与更宽射束(准平面波)之间的非线性混合来说,选择规则放宽。如果射束宽度大约为第三波的十个波长,则沿初级射束连续生成以波矢量  $k_3=k_1 - k_2$  为中心的、具有频率  $f_1 - f_2$  的第三波。针对  $f_3=f_1 - f_2$  的所得信号强度是混合区的平均非线性特性、

$f_1$  传播速度与  $f_2$  传播的平均速度的平均比(注意,具有频率  $f_1$  和  $f_2$  的射束可以是压缩或剪切的)、混合区的体积以及混合的几何学的函数。可以针对各种混合模式来计算该函数。例如,针对特定混合模式(如  $f_1$  为压缩波 P 和  $f_2$  为 SV)的信号强度通过下式给出:

$$[0061] \quad U = 2\pi^2 \beta_{PS_vP} A_1 B_2 \frac{f_1 f_2 (f_1 - f_2) V_{PS_vP}}{V_P^2 V_s} \frac{F_{PS_vP} \Delta_{PS_vP}}{L} \quad (1)$$

[0062] 其中,  $U$  是在井眼处接收的第三波的位移幅度,  $A_1$  是压缩波的纵向偏振, 而  $B_2$  是剪切波的横向偏振。  $\beta$  是表示混合区中岩石的非线性的 Landau 和 Lifschitz 的 A、B 以及 C 参数的函数。  $v$  是混合区的体积,  $L$  是从混合区至接收器的距离。  $F$  是取决于入射射束的几何学的 1 阶几何形状因子并且可以针对特定几何学数值地计算。  $\Delta$  是作为波矢量  $k_1$ 、 $k_2$  以及  $k_3$  的可数值计算函数的选择规则形状因子, 并且仅当交互几何学遵守该选择规则时才显著。该公式中的下标  $PS_vP$  指生成压缩波的压缩 - 剪切交互。

[0063] 根据本公开的某些方面, 压缩与剪切速度比的图像可以构建如下。当这些源之一生成具有频率  $f_1$  的压缩波(P-wave)而另一源生成具有频率  $f_2$  的 SV 波, 并且两个波朝着特定交互体积操纵时, 具有差频  $f_3=f_1-f_2$  的第三压缩波(P-wave)的传播方向受如通过如图 6 所示选择规则支配的、混合区中岩石的平均原位  $V_p/V_s$  速度比控制。根据在图 2 或图 3 上的三分量接收器阵列 145 中测量的信号, 可以确定该第三波的方向, 并由此, 可以计算混合区的原位  $V_p/V_s$ 。如果该射束和平面波在保持必要会聚角的同时按方位和仰角扫描, 则可以获取环绕井眼的岩石的原位  $V_p/V_s$  比的局部化外周和径向 3D 图像。通过在井眼中上下移动整个装配件, 可以获取环绕井眼的岩石的原位  $V_p/V_s$  的重复 3D 图像。通过对这些重复图像进行加权叠加, 可以通过随后的计算机处理构建环绕整个井眼的岩石的原位  $V_p/V_s$  的最终图像。另选的是, 可以以工具主体之间的不同固定间距进行进入井中的几个下降。

[0064] 在本公开的一些方面,  $V_p/V_s$  比的另选确定通过扫描初级射束的频率  $f_1$  与  $f_2$  的比率来实现。图 6 例示了两个射束(如按图 1 的构造生成的那些)的交互的几何学, 其可以利用矢量数学和三角学来分析。矢量  $k_1$  和  $k_2$  的长度  $k_1$  和  $k_2$  根据它们的对应频率和速度的比率来限定。如图 6 所示, 返回角  $\Phi$  是两个初级射束的  $f_1/f_2$ 、 $V_p/V_s$  比以及相交角  $\theta$  的函数。另外, 该物理选择规则仅准许按  $f_1/f_2$ 、 $V_p/V_s$  比以及相交角  $\theta$  的特定组合来生成第三波, 如图 5 所示的示例。

[0065] 利用针对  $V_p/V_s$  比的符号  $r$ , 和图 6 上定义的项, 根据  $k_1$  和  $-k_2$  的矢量和(即,  $k_3 = |k_1 - k_2| = \frac{f_1 - f_2}{V_p}$ ) 并且还根据规定  $k_3^2 = k_1^2 + k_2^2 - 2k_1 k_2 \cos \theta$  的余弦定律给出矢量  $k_3$  的量值  $k_3$ 。组合这两个方程, 并且代入针对  $k_1$  的  $f_1/V_p$  和针对  $k_2$  的  $f_2/V_s$ , 得到由选择规

则施加的几何条件的陈述。二次方程  $\frac{f_2}{f_1} r^2 - 2r \cos \theta - \frac{f_2}{f_1} + 2 = 0$  可以针对混合区的  $r$ 、 $V_p/V_s$

比来求解。这导致用于通过下列顺序来测量特定混合区的原位  $V_p/V_s$  比的非限制另选方法: a) 记录标准声波波形, 以确定井眼附近的  $V_p$  和  $V_s$ , 获取用于估算相控源阵列中相邻部件之间的相位差的数据, 以按针对计划测量的几何学的近似会聚角来操作射束; b) 操作 P 和 SV 源, 以按可控角  $\theta$  会聚, 并且在环绕井眼的空间中的特定区域处混合; c) 改变  $f_2$  同时固定  $f_1$ , 并且在井眼中的传感器处测量具有差频  $f_1 - f_2$  的接收信号的幅度; d) 标识该阵



列中每一个接收器的信号达到最大幅度强度的频率；以及 e) 根据源和接收器的几何学确定角  $\theta$  和  $\Phi$ 。通过按仰角扫描射束、按方位旋转、以及在井眼中上下移动整个装配件并且重复上述过程，询问井眼周围的 3D 体积的  $V_p/V_s$  比，并由此可以获取环绕井眼的岩石的原位  $V_p/V_s$  比的 3D 图像。

[0066] 上述方法提供了：频率差  $f_1 - f_2$  非常特定，允许频谱分析以增强测量的信噪比。而且，如果  $f_1$  和  $f_2$  都同时成比例地啁啾，则所得差频信号  $f_1 - f_2$  也是明确限定的啁啾信号。时变代码可以包括第一或第二、或第一和第二射束或波两者的幅度变化、频率变化、和 / 或相位变化中的一个或更多个。如果初级频率之一在固定它们的频率比的同时扫描一频率范围，则第三差波可以是宽带的。由此，所得第三射束  $f_2 - f_1$  将跨宽频率范围扫描，同时保持相同方向。这允许根据经啁啾或编码的信号的标准自动相关来改进信噪比。

[0067] 因为波矢量  $k_3 = k_1 - k_2$  明确限定，所以来自接收器 135 的记录第三波的信噪辨别可以通过在井眼中采用三分量接收器来进一步增强。例如，来自三个分量的信号可以通过诸如速端图 (hodogram) 分析的技术而调谐至特定方向性。

[0068] 在本公开的一些方面，信噪比可以通过重复上述步骤并且利用反极性 (180 度异相) 源信号以及将结果相加在一起来改进。返回差频信号相干地相加，因为其幅度成比例于两个初级波的幅度的乘积，并由此在该初级源的极性反转时不反转极性。另一方面，由该系统中的初级源生成的任何线性噪声将反转极性并由此在相加时抵消。

[0069] 另选方法可以进行射束和波的各种非排它组合。通过非限制例的方式，用于通过对声学 and 地震信号的计算机处理来生成图像的方法包括以下步骤。首先，该方法执行对记录的第三波的频率内容的频谱分析和不同频率信号的可应用选择规则，以便隔离由非线性混合过程生成的第三波信号。对于传感器包括三分量地震检波器的情况来说，利用定向技术来确定落在井眼上的第三波的方向。该方法接着根据非线性介质中的非共线混合的选择规则、第一和第二射束以及第三波的波数以及两个射束源和传感器阵列的位置，来分析作为初级混合波的频率比的函数的所记录的第三波的幅度，并且确定第三波信号所源自的混合位置。该方法接着构建通过针对每一个源 - 接收器组合的接收信号与经啁啾的发送器信号的互相关性所确定的地震图。该方法接着执行针对整个数据集的三维时间或深度成像，以便按时间和距离中的任一者或两者来获取井眼周围地层的非线性特性的三维图像。用于根据地震图生成图像的方法是已知的，例如 Hi11 等人 (其通过引用而并入于此) 已经提供了针对根据射束成像的特定情况的一般方法。

[0070] 图 7 中例示了另一非限制另选成像方法，其示出了窄射束 705 和宽 (阔) 射束 710 交互的情况。给定被调查体积的  $V_p$  和  $V_s$  的平滑背景模型，应用选择规则使能将接收器位置 735 处检测的能量沿窄射束几何映射到混合区 730 上。非线性特性的时间图像由此可以沿窄射束构建。通过按方位旋转并且沿井眼移动装配件，可以构建以井眼为中心的体积的三维时间图像。按不同射束仰角连续重复测量，并且改变  $f_2/f_1$  频率比生成一系列三维时间图像。成像中的这种冗余准许进一步精炼平滑背景模型和三维空间图像。

[0071] 岩石的非线性参数已经被发现与许多重要的碳氢化合物储集层参数相关，如随气、油以及水饱和度、有效应力、断裂密度以及矿物学内容而变化。在本公开的某些方面，由上述方法构建的非线性特性的 3D 图像被转换，以按记录时间提供有关井眼周围这些特性的分布的量化信息。另外，顺序重复该方法被用于出于储集层监测目的而检测储集层特性

随时间的变化。

[0072] 记录的所接收波形被处理以生成地层的非线性特征的图像。射束的方向性和飞行时间可以固定在其中生成散射波的位置,由此,区别该方法与利用常规非定向单极和双极源的普通声波成像技术。

[0073] 通过非限制例的方式,当具有频率  $f_1$  的初级压缩(P)波和具有频率  $f_2$  的初级压缩(P)波在非线性介质中交叉,并且遵守选择规则时,可以生成具有频率  $f_1 - f_2$  的第三剪切(SV)波。这种特殊构造可以被用于针对相对于井眼的调查距离的许多范围来创建井眼周围岩层的  $V_p/V_s$  速度比和非线性特性的 3D 图像。压缩非线性混合以生成剪切波(即,  $P+P \rightarrow SV$ ) 的该特定示例将被用于描述出于下列段落中的测量和分析目的的许多新构思、方法、处理以及系统。这些可等同地应用至  $P+SV \rightarrow SV$ , 或两个声学压缩或剪切波的非线性混合的任何置换,以生成第三波。

[0074] 图 8 示出了根据本公开一方面的、用于利用非共线声学混合来远程映射岩层的非线性特性和  $V_p/V_s$  速度比的基于井眼的系统的示例构造。来自位于井眼 800 中的上和下发送器阵列 801 和 802 的两个初级声学射束(例如,压缩(P)波)被定向到井眼周围岩层中。该发送器阵列可以被定向成,使得声能按任何方位  $\phi_{1809}$  和  $\phi_{2811}$  和相对于井眼轴的仰角  $\alpha_{1810}$  和  $\alpha_{2812}$  来传播。针对合适仰角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  以及方位角  $\phi_1$  和  $\phi_2$  来说,传播通过岩层的两个初级 P 射束在远离井眼 800 的混合区 805 处以会聚角  $\theta_{804}$  相交。该会聚角  $\theta$  被限定为两个会聚射束的方向之间的角,在图 8 上被表示为将两个发送器 801 和 802 连接至混合区 805 的线。如果相交点的岩层具有非线性特性,则次级(S)剪切波 SV(例如,沿由两个相交压缩波的轴限定的平面偏振的剪切波)因非线性交互而生成。该次级剪切沿由选择规则限定的方向传播,用散射角  $\psi_{806}$  表示。该散射角  $\psi$  被定义为来自下发送器的声波的轴与散射波的轴之间的角。在所示构造中,能量 807 返回至井眼,并且在接收器或接收器阵列 803 处记录。

[0075] 如上所述,适于生成次级剪切波的条件可以根据可以通过能量守恒和动量守恒而导出的选择规则来推断。次级波 S 必需服从以下任一条件:

$$[0076] \quad f_3 = f_1 - f_2 \quad (2)$$

$$[0077] \quad k_3 = k_1 - k_2 \quad (3)$$

[0078] 或者

$$[0079] \quad f_3 = f_1 + f_2 \quad (4)$$

$$[0080] \quad k_3 = k_1 + k_2 \quad (5)$$

[0081] 其中  $k_1$ 、 $k_2$  以及  $k_3$  是波矢量。第一频率条件(其中,  $f_3 = f_1 - f_2$ ) 特别关注于调查井眼附近岩层的特性。如图 9 所示,条件(2)和(3)可以通过形成波矢量三角形来表示,并且根据下面的关系(6)、(7)以及(8)而满足。

$$[0082] \quad |k_3| = 2\pi |f_1 - f_2| / V_s = (|f_1 - f_2| / V_p) \times (V_p / V_s) \quad (6)$$

$$[0083] \quad |k_1| = 2\pi f_1 / V_p \quad (7)$$

$$[0084] \quad |k_2| = 2\pi f_2 / V_p \quad (8)$$

[0085] 利用图 9b 的矢量图中的三角关系,可以示出,这些条件可以在满足方程(9)和(10)时满足。

$$[0086] \quad \sin(\theta/2) = \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \frac{\sqrt{(V_p/V_s)^2 - 1}}{2\sqrt{\frac{f_2}{f_1}}} \quad (9)$$

$$[0087] \quad \sin(\psi) = (f_2/f_1) \times \sin(\theta) / (1 - f_2/f_1) \quad (10)$$

[0088] 因为针对许多沉积岩,  $V_p/V_s$  速度比处于 1.5 至 3.0 的范围中, 所以存在会聚角  $\theta$  与频率比  $f_1/f_2$  (在此指示为  $d$ ) 的组合, 其准许在图 9a 所示构造中, 生成反向传播至井眼的次级剪切波 SV。

[0089] 如上所述, 可计算由相交非共线平面波的非线性交互而生成的声能的行为。该选择规则定义一组准许交互。P+P  $\rightarrow$  SV 交互附加于表 1 上列举的部分。这些不同交互基于汇聚波是压缩还是剪切、交互位置处的材料的  $V_p/V_s$  速度比, 使用会聚角、频率比以及散射角的某些组合, 并且针对生成和  $(f_1+f_2)$  与差  $(f_1-f_2)$  频率能量的交互而不同。下列示例中呈现的几何学基于 **P( $f_1$ ) + P( $f_2$ )  $\Rightarrow$  SV( $f_1-f_2$ )** 交互, 并且针对生成差或和频率谐振的其它准许交互, 可以等同地呈现类似情况, 例如, 但不限于, 交互包括 **P( $f_1$ ) + SV( $f_2$ )  $\Rightarrow$  SV( $f_1-f_2$ )** 和 **P( $f_1$ ) + SV( $f_2$ )  $\Rightarrow$  P( $f_1-f_2$ )**。

[0090] 例如, 考虑 **P( $f_1$ ) + P( $f_2$ )  $\Rightarrow$  SV( $f_1-f_2$ )**, 图 10a 示出了作为两个源的频率比的函数的混合系数  $W$ 。作为对生成散射波的转换系数幅度的度量的混合系数  $W$  方程(11) 给出。

$$[0091] \quad W = D \frac{(1+f_1/f_2)}{2(V_s/V_p)} \sin(2\theta) \times m \quad (11)$$

[0092] 其中,  $D$  取决于 Lamé 系数  $\lambda$  和  $\mu$  并且成比例于针对给定混合区的  $f_2/f_1$ , 如方程(12) 中定义的。

$$[0093] \quad D = \frac{f_1/f_2}{4\pi(\lambda + 2\mu)} \quad (12)$$

[0094]  $\theta$  是混合区处两个初级射束的会聚角, 而  $m$  是与 Landau-Lifshitz 非线性常数  $A$  和  $B$  相关的比例因子, 如方程(13) 中表达的,

$$[0095] \quad m = \frac{A}{2} + B \quad (13)$$

[0096] 因此,  $m$  是用于给定混合区的常数。

[0097] 图 10a、10b 以及 10c 示出了在混合位置处的混合系数  $W$ 、会聚角以及散射角对从 1.5 至 2.0 的范围的  $V_p/V_s$  速度比的依赖性, 假定针对  $m$  为 -3660GPa 的典型值(根据 Korneev、Nihei and Myer 1998)。图 10a 示出了针对混合区  $V_p/V_s$  比的范围, 混合系数对平面波频率比的依赖性。图 10b 和 10c 示出了遵守针对 **P + P  $\Rightarrow$  SV** 交互的选择规则的对应会聚角和散射角。如可以从图 10a 明白, 混合系数在第二频率  $f_2$  与第一频率  $f_1$  之比等于大约 0.7 时达到最大。另外, 从图 10b 中可以清楚, 当第二频率  $f_2$  与第一频率  $f_1$  之比等于

大约 0.7 时,会聚角处于大约 30 度与大约 40 度之间的范围中。而且,还可以清楚,当第二频率  $f_2$  与第一频率  $f_1$  之比等于大约 0.7 时,返回波与第一波的方向相对的散射角等于大约 40 度。

[0098] 图 11a 至 11c 示出了声学射束在非线性介质中的导致生成返回至井眼的散射波的非共线交互的数值仿真的示例结果。在图 11a 至 11c 中,井眼 1100 包括:下发送器 1101、上发送器 1102 以及接收器阵列 1103。采用由下发送器 1101 和上发送器 1102 生成的压缩射束形式的声能以会聚角 1104 按相距井眼的一距离会聚。接收器阵列 1103 被配置成,按散射角 1106 接收散射波 1107,其通过如根据选择规则限定的声学射束的交互来生成,如上所述并且下面再次描述。在图 11a、11b 以及 11c,示出了沿井眼的距离(米)与远离井眼的径向距离(米)的关系。在图 11a 和 11b 中,示出了与由两个源生成的两个射束的压缩声能相关联的体积应变。在图 11c 中,示出了与散射剪切波 1107 相关联的剪切应变。

[0099] 在下列段落中,描述了可以被用于增强或提取源自初级声学信号在井眼周围岩层内的混合区中的非线性混合的测量散射声波的编码方案。根据远离井眼的岩层中的非线性声学现象所生成的散射声波的测量可以通过广播编码初级声学信号、记录来自非线性交互的返回信号并且随后利用波形识别方法和/或基于非线性信号的预测特性的带通滤波方法来增强。一个非限制例是,根据选择规则关联记录信号与表示对由广播参数导出的其定时和频率内容的预测的模板。该关联的结果表示行进通过井眼的声波。例如,对于  $P+P \rightarrow SV$  交互的情况来说,由非线性交互产生的返回能量呈现出按等于地层的剪切波速度除以其传播方向与井眼轴之间的角的余弦的速度沿井眼行进。当应用至诸如图 8 所示的系统时,该编码和关联方法改进了对弱非线性信号的检测,并由此增强了通过该测量探测的体积中的非线性特性和  $V_p/V_s$  速度比的 3D 图像的构建。

[0100] 下列段落中描述了将编码和信号相关性用于增强由非线性介质中的非共线声学混合所生成的信号的一个非限制实现。针对编码方案的更一般实现的详细描述可以在与本申请同时提交的、代理人案卷号为 091230-0397046 的、题名为“System and Method for Generating Micro-Seismic Events and Characterizing Properties of a Medium With Non-Linear Acoustic Interactions”的美国专利申请中找到,其全部内容通过引用并入于此。参照图 12a 到 12d,源 1201 在时间  $t=0$  开始广播由  $N$  个声学脉冲序列构成的第一编码或调制时间列  $u_1(t)$ 。第  $n$  声学脉冲具有频率  $f_n$ ,和具有有限持续时间的幅度包络  $E_{1n}(t-T_n)$ ,其中, $n=1,2,\dots,N$ ,并且  $T_n$  是第  $n$  个脉冲的广播时间。顺序脉冲之间的时间间隔可变。在一些实施例中,顺序脉冲之间的时间间隔比单个脉冲的持续时间长得多,并且这些脉冲不交叠。从源 1202 广播第二编码或调制时间列  $u_2(t)$ 。该第二编码或调制时间列由  $N$  个顺序声学脉冲的序列构成,并且在时间  $t=\delta$  开始,其中, $\delta$  是广播第一编码列的起始时间与广播第二编码列的起始时间之间的起始时间差。在一个实施例中,该起始时间差可以被理解为广播第一编码列与第二编码列之间的时间延迟。如可以清楚,广播第一编码列可以相对于广播第二编码列延迟,反之亦然。在本描述中,通常将  $\delta$  称为“时间延迟”。然而, $\delta$  应当被广泛地解释为“时间差”,因为第二脉冲序列也可以在第一脉冲序列之前开始。第  $n$  声学脉冲具有频率  $d*f_n$ ,和具有有限持续时间的幅度包络  $E_{2n}(t-(T_n+\delta))$ ,其中, $n=1,2,\dots,N$ 。两个列中的对应脉冲之间的频率比固定在  $d$ 。 $T_n+\delta$  是第  $n$  个脉冲的广播时间。第一和第二编码信号列的幅度包络  $E_1$  和  $E_2$  各自可以不同或相同。图 12b-12c 示出了时间编码信

号列的示例。这些编码信号可以通过下面的公式(14)和(15)数学地表示。在本描述中,符号“\*”被用于作为乘法算子。

$$[0101] \quad u_1(t) = \sum_n E1_n(t-T_n) * \exp(i2\pi * f_n * (t-T_n)) * \exp(i\zeta_n) \quad (14)$$

[0102]

$$u_2(t-\delta) = \sum_n E2_n(t-(T_n+\delta)) * \exp(i2\pi * d * f_n * (t-(T_n+\delta))) * \exp(i\zeta_n) \quad (15)$$

[0103] 其中,  $\zeta_n$  是每一个脉冲  $n$  的相位, 而  $\exp(i\zeta_n)$  是每一个脉冲  $n$  的相位项。

[0104] 相应信号包络  $E1_n(t-T_n)$  和  $E2_n(t-(T_n+d))$  可以具有任何形状或形式, 如高斯形式等。类似的是, 尽管包络内的调制信号按方程(14)和(15)表达, 但它们可以通过其它数学公式来建模。当时间延迟  $\delta$  等于从发送器 1201 和 1202 至混合区 1204 的行进时间  $t_1$  和  $t_2$  之差(就是说,  $\delta = t_1 - t_2$ ) 时, 来自两个广播列的对应脉冲  $n$  的声能同时抵达混合区, 并且如果该混合位置的会聚角、频率比以及  $V_p/V_s$  比符合选择规则的标准, 则生成具有等于两个初级脉冲中的频率  $f_n$  与  $d*f_n$  之差的支配频率  $(1-d)*f_n$  的第三系列散射声学脉冲。接收器处记录的该第三波(表示为  $u_3$ ) 继承两个初级信号的编码并由此可以被表达为方程(16)。

[0105]

$$u_3(t) \propto \sum_n E3_n(t-(T_n+T)) * \exp(i2\pi * (1-d) * f_n * (t-(T_n+T))) * \exp(i\zeta_n) \quad (16)$$

[0106] 其中,  $\zeta_n$  是每一个脉冲  $n$  的相位, 而  $\exp(i\zeta_n)$  是第三波的每一个脉冲  $n$  的相位项。

[0107]  $E3_n(t)$  是因初级脉冲的混合所得的幅度包络, 而  $T$  是从源 1 起经由混合区中心至记录接收器的总行进时间, 如下进一步说明的。

[0108] 在一个实施例中, 信号增强可以利用地震处理工业中公知的关联技术来实现, 以提取测量信号  $u_3$  中的非线性交互和行进时间信息的相关部分。该技术涉及构建模板信号  $u_s$ , 其具有如方程(17)中表达的编码信号形式。

$$[0109] \quad u_s(t) = \sum_n W_n(t-T_n) * \exp(i2\pi * g(f_n) * (t-T_n)) * \exp(i\zeta_n) \quad (17)$$

[0110] 其中,  $\zeta_n$  是每一个脉冲  $n$  的相位, 而  $\exp(i\zeta_n)$  是模板信号的每一个脉冲  $n$  的相位项。

[0111]  $W_n$  是某一合适选定的包络函数, 而  $g(f_n)$  是频率  $f_n$  的某一合适选定的函数。选定恰当的函数  $g(f_n)$  可以基于测量信号  $u_3$  内的希望调制信号的形状, 以实现最佳非线性信号提取。例如,  $g(f_n)$  可以被选择成为  $(1-d)*f_n$ , 以使  $u_s$  等于  $u_s(t) = \sum_n W_n(t-T_n) \exp(i2\pi(1-d)(t-T_n)) \exp(i\zeta_n)$ , 如图 12d 所示。然而, 其它函数  $g(f_n)$  也

处于本发明的范围内。

[0112] 为从  $u_3$  中提取来自非线性交互的信号, 可以执行  $u_3$  与  $u_s$  之间的互相关以获取关

联信号 M, 其中, M 由方程(18) 数学地定义。

$$[0113] \quad M(t) = \int u_3(t') * u_s(t-t') dt' \quad (18)$$

[0114] 可以按数学方式示出, 所得关联信号 M 是尖锐频带限制尖峰, 其具有包括所有频率  $(1-d) * f_n$  (针对在脉冲数 N 较大时,  $n=1, 2, \dots, N$ ) 的带宽。术语“频率限制”尖峰在此被用于指具有限制频率带宽的尖峰信号。在一个实施例中, 通过增加脉冲数 N 来增加广播持续时间增强了关联信号 M 中的由非线性交互而生成的信号, 同时更有效地抑制由线性交互和其它噪声学生成的信号。应注意到, 利用编码信号模式的关联技术是提取和增强由非线性交互生成的信号的许多方法之一。包括模式识别或频带过滤的另选信号处理技术可以被等同地用于信号提取和增强。

[0115] 该相关测量信号 M 具有以下特性。首先, 只有第一与第二初级编码信号之间的时间延迟  $\delta$  等于从第一声源 1201 至混合区 1204 的行进时间  $t_1$  与从第二声源 1202 至混合区 1204 的行进时间  $t_2$  之差, 即,  $\delta = t_1 - t_2$ , 该关联信号才包含与混合区处的非线性交互相对应的尖锐频带限制尖峰。如果不满足该条件, 则高度抑制该关联信号。第二, 如果条件  $\delta = t_1 - t_2$  满足, 则该频带限制尖峰在时间 T 出现在关联信号 M(t) 上, 该时间 T 等于从第一初级声源至混合区的行进时间与从混合区 1204 至接收器阵列 1203 内的接收器的行进时间之和, 即,  $T = t_1 + t_3 = \delta + t_2 + t_3$ 。第三, 增加编码信号列的持续时间, 即, 增加广播列中的脉冲数 N 改进了信号与噪声的区分, 因为噪声不具有模板信号  $u_s$  的形式。

[0116] 图 13a-13d 示出了其中下发送器 1201 和上发送器 1202 发射由具有高斯包络的顺序声学脉冲构成的两个编码信号列的情况的数值模拟结果。在该非限制例中, 具有 12 个脉冲的编码信号与频率对 (574Hz, 373Hz) (624Hz, 405.6Hz) (700Hz, 455Hz) (757Hz, 492Hz) (802Hz, 521.3Hz) (870.5Hz, 566Hz) (947Hz, 615.5Hz) (1000Hz, 650Hz) (1120Hz, 728Hz) (1218Hz, 792Hz) (1324Hz, 861Hz) (1440Hz, 936Hz) 一起使用。这些对之间的频率比  $f_2/f_1$  是常数 0.65。两个信号列之间的起始时间延迟  $\delta$  被选择成等于  $(t_1 - t_2)$ 。在计算机上执行对因广播两个编码波列  $u_1$  和  $u_2$  而造成的非线性交互的数值仿真。图 13 (b) 示出了因来自广播在接收器阵列 1203 的非限制例中的 110 个接收器 (被索引为 1 至 110) 中的六个接收器处接收并记录的两个顺序脉冲的非线性交互而造成的模拟信号。图 13 (c) 示出了针对返回编码信号的模板  $u_s$ 。图 13 (d) 示出了在模板信号与每一个接收器处的记录信号之间关联的结果。图 13 (d) 所示每一个接收器处的所得关联信号示出了非常尖锐的频带限制尖峰。该尖锐尖峰出现在时间  $T = t_1 + t_3$  处, 其中,  $t_1$  是从源 1 至混合区中心的行进时间, 而  $t_3$  是从混合区中心至接收器的行进时间。跨接收器阵列的时间延迟或“时差 (move-out)”好像声能在以等于剪切波速度除以返回波方向与井眼轴之间的角的余弦的视速度沿井眼行进。

[0117] 图 13a-13d 所示的数值仿真清楚地例示了在结合图 12a-12d 或图 8 中的测量系统使用时的编码方案的功率和使用。其允许计算机处理接收器处的记录信号, 以生成包含具有与混合区 1204 处的非线性交互的强度成比例的强度的频带限制尖峰信号的关联记录。频带限制尖峰的抵达时间 T 等于从源 1201 至混合区 1204 并且返回至井眼的接收器 1203 处的总行进时间。该频带限制尖峰的幅度随着接收器位置而变, 并且最大值出现在特定接收器处, 其位置取决于混合区 1204 处的非线性交互的散射角  $\psi$  1206。该散射角  $\psi$  取决于混合区 1204 处的岩石的特性, 例如,  $V_p/V_s$  速度比。应注意到, 该结果是该编码方案的特征

并且是图 12a-12d 或图 8 所示测量系统的特征。结合模板使用高斯包络和编码信号是出于例示编码方案及其特征的目的而使用的非限制例。可以考虑  $u_1$ 、 $u_2$  以及  $u_s$  的变量,以便响应于由现场应用所施加的各种考虑来最优化关联处理在分辨率与信噪比方面的性能。

[0118] 在本公开的一些方面,初级声学射束中的编码声学信号还可以被用于增强返回至井眼的非线性信号的幅度与聚焦,和改进信号检测灵敏度与信噪比。图 14a-14d 示出了将编码信号方案应用至通过数值模拟生成的有噪声时间系列信号的示例。该有噪声时间系列信号模拟返回至井眼的信号,作为非线性交互的结果。在应用与编码模板的关联之前,将具有比非线性交互信号的幅度大 10% 的幅度的白高斯噪声添加至通过数值仿真非线性模型中的波传播而生成的时间系列信号。该构造和图 12a-12d 与图 13a-13d 所示构造相同。图 14 (b) 示出了在接收器阵列 1403 中的六个接收器处记录的包含噪声的仿真接收信号。图 14 (d) 示出了当与图 14 (c) 所示的 12 个脉冲中的编码模板  $u_s(t)$  关联时,从同一接收器上的噪声信号(在这种情况下为仿真噪声信号)检索到的信号。该编码方案由此被示出为有效地提取来自非线性交互的信号并且最小化噪声,对于现场应用这是有用的特征。

[0119] 可以使用前文描述的怎样组合广播编码和信号处理,以改进检测,并且确定由非线性介质中的非共线混合所生成的声波信号,并且确定从源经由混合区至接收器阵列的声学行进时间,和推断混合区的非线性与  $V_p/V_s$  比。下列段落描述在基于井眼的测量系统的背景下编码与信号处理方法的非限制实现。

[0120] 给定井眼周围地层的初始压缩与剪切速度模型,可以使用诸如射线跟踪的技术来估算与选定倾角和方位 ( $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\phi_1$  以及  $\phi_2$ 、809 至 812) 并且还与会聚角和散射角 ( $\theta$  和  $\psi$ , 804 和 806) 相对应的混合区的位置(图 8 上的 805)。该信息被用于预测针对来自两个发送器的脉冲所需的时间延迟  $\delta_p$  和频率比  $d_p$ ,以使同时抵达混合区,并且因非线性交互而生成抵达接收器的散射脉冲序列,并且预测从第一声源经由混合区至接收器的总行进时间  $T_p$ 。围绕它们的预测值系统性地扫描  $\delta$  和  $d$ ,并且关联模板  $u_s(t)$  与记录信号  $u_3(t)$  导致针对阵列 803 中的每一个接收器部件的一组结果  $M(t, \delta, d)$ 。如先前段落讨论的,如果选择规则准许非线性交互,则针对每一个接收器部件的关联信号  $M(t, \delta, d)$  包含与混合区 805 中的非线性交互相对应的频带限制尖峰。在有关  $M(t, \delta, d)$  的空间  $(t, \delta, d)$  中进行搜索,以识别与混合区 805 处的非线性交互相对应的频带限制尖峰的位置  $(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$ ,其应当处于  $(T_p, \delta_p, d_p)$  的邻域。 $(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  与  $(T_p, \delta_p, d_p)$  之间的差异是传播速度模型与岩层的真实传播特征的偏差的指示。接着,将这些差异被用于通过速度层析反演或其它速度更新方法来更新传播速度模型。给定来自方程 9 和图 10 的频率比  $d$ 、 $V_p/V_s$  比、会聚角以及散射角之间的关系,接着,根据混合区处的观测值  $d_{NL}$ 、会聚角以及散射角(后两个量可以通过射线跟踪或其它数值方法根据所更新的传播速度模型来计算)计算混合区处岩层的  $V_p/V_s$  比。幅度值  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  包含有关混合区 805 处岩层的非线性混合强度的信息。其可以被用于对岩层的非线性特性的 3D 成像,如下讨论中所述。

[0121] 用于通过与模板信号关联来处理非共线声学混合信号以识别与特定混合区相关联的参数的组合(即,随后可以被用于确定  $V_p/V_s$  比、传播模型  $V_p$  和  $V_s$  以及非线性特性的  $M(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$ 、 $T_{NL}$ 、 $\delta_{NL}$  以及  $d_{NL}$ ) 的能力是编码与关联协议的直接结果。该唯一特征加强了接着的成像方案的基础。

[0122] 下面段落中的讨论将集中于将编码声学信号用于创建井眼周围岩层的  $V_p/V_s$  比

和非线性特性的 3D 图像的一个非限制例。然而,使用编码声学信号具有超出与地质学和石油物理应用有关的那些应用的更广泛应用,包括非破坏性测试与医学成像领域。

[0123] 通过非限制例的方式,在下列段落中,针对图 8 所述系统讨论了用于增强信噪比的一种测量与数据处理协议。

[0124] 为简单起见,在非衰减性岩层的背景下描述该操作协议。然而,以下测量与数据处理协议可以等同地应用至衰减性岩层。岩层中的衰减效应要移位散射波的源点达与地层 Q 有关的可预测量。

[0125] 首先,针对如上面段落中描述的两个编码信号的给定频率比  $d$ ,将来自图 8 中描述的测量系统的第一声能源 801 和第二声能源 802 的编码初级声学射束信号发送到大地上。在源 801 与源 802 的两个编码信号之间保持时间延迟  $\delta$ 。该测量几何学遵守该选择规则,并且该时间延迟使得来自两个源的能量大致同时抵达混合区。在一个实施例中,位置  $z_3$  处的接收器 803 的三分量地震检波器的每一个分量检测并记录返回声波。该测量被表示为  $m(t, \delta, d, z_3)$ 。另选的是或者另外,还可以设置水中听音器以检测返回声波的压力信号。

[0126] 第二,编码初级声学信号如上面段落中所述从第一和第二声能源发送,但具有相反极性,即,具有按 180 度移位的相位。在接收器 803 处记录的信号被表示为  $m_-(t, \delta, d, z_3)$ 。

[0127] 第三,两个信号  $m(t, \delta, d, z_3)$  和  $m_-(t, \delta, d, z_3)$  被相加在一起,以形成组合信号,其可以被表示为  $mm(t, \delta, d, z_3)$ 。因为信号  $m(t, \delta, d, z_3)$  和  $m_-(t, \delta, d, z_3)$  具有相反极性,所以来自岩层的线性交互的信息将通过  $m(t, \delta, d, z_3)$  和  $m_-(t, \delta, d, z_3)$  的相加来抵消。然而,大地的非线性响应因非线性响应的幅度成比例于两个初级信号的幅度的乘积而相干地相加,并由此在两个初级信号的极性反转时不反转极性。因此, $mm(t, \delta, d, z_3)$  将基本上包含来自岩层的非线性交互的信号。

[0128] 第四,可以在所获取信号  $mm(t, \delta, d, z_3)$  上应用时变带通滤波器,以保持围绕该信号的希望带宽的窄频带。所获取信号的带宽根据两个初级广播信号的频率差和带宽来确定。

[0129] 第五,如上面段落中所述,执行已滤波信号  $mm(t, \delta, d, z_3)$  与模板编码信号的互相关,以获取可以被表示为  $mmc(t, \delta, d, z_3)$  的脉冲信号。

[0130] 第六,可以将速端图分析应用至从接收器的三个单轴传感器获取的三分量数据,和 / 或应用至通过水中听音器检测的压力信号。这些数据可以被用于分析可能模式 P、SH 以及 SV 中的任一个,并且可以被变换以获取对任何 SV、SH 以及 P 抵达的单独测量结构,被表示为  $mmcr(t, \delta, d, z_3)$ 。

[0131] 第七,上面六个步骤可以用不同广播编码信号重复多次,并且可以将收集的  $mmcr(t, \delta, d, z_3)$  信号堆叠以改进信噪比。所得堆叠信号是针对 SV、SH 以及 P 中的每一个抵达的信号记录  $M(t, \delta, d, z_3)$ 。例如,在 P+P 至 SV 模式下,SV 模式通过接收器检测,而在 P+SV 至 P 模式下,接收器处的检测信号将为 P 模式。

[0132] 第八,可以对于扫描通过许多值  $\delta$  和  $d$  的序列重复上面七个步骤,以获取整组  $M(t, \delta, d, z_3)$ 。所述测量与处理协议允许以接收器阵列处的高信噪比来构建测量信号  $M(t, \delta, d, z_3)$ 。

[0133] 由于发送器阵列和接收器阵列可以独立移动,因而测量  $M(t, \delta, d, z_3)$  可以针对



许多发送器位置  $z_1, z_2$  和许多接收器阵列位置来重复。由于来自源 801 和 802 的初级声学射束可以针对任何方位角  $\phi_1, \phi_2$  和仰角  $\alpha_1, \alpha_2$  来操纵,因而测量  $M(t, \delta, d, z_3)$  还针对许多角  $\phi_1, \phi_2, \alpha_1$  以及  $\alpha_2$  进行重复。这些反复多次的测量可以包含针对  $z_1, z_2, z_3, \phi_1, \phi_2, \alpha_1$  以及  $\alpha_2$  的许多值根据大地中的非线性交互而生成的多个冗余信号。该冗余允许通过计算机上的信号处理的附加信噪比增强,并且允许创建井眼周围岩石特性的 3D 图像。

[0134] 应注意到,上面针对测量与处理协议描述的步骤可以在如所保证的各种改变中重新排序或消除。而且,存在地震信号处理领域的技术人员所熟悉的许多附加信号处理技术,例如,多维滤波、时间时差分析与堆叠。这些附加技术可以被添加至上面段落中描述的测量与数据处理协议,以改进所记录数据和处理图像的质量。来自非线性交互的关联声学信号  $M(t, \delta, d, z_3)$  具有来源于编码方法和选择规则的许多特性。

[0135] 在下面的段落中,讨论了利用这些特性来构建大地体积的非线性特性和  $V_p/V_s$  速度比的 3D 图像并且确定诸如  $V_p$  和  $V_s$  的其它岩石特性的成像方法和工作流程。下面讨论了该工作流程的非限制例。

[0136] 参照图 8 中描述的测量系统和图 12a-12d 中指示的行进时间注释,以及上面段落中的讨论,如果满足下列条件,则在接收器位置  $z_3$  处针对一个特定发送器位置和射束角 ( $z_1, z_2, \phi_1, \phi_2, \alpha_1$  以及  $\alpha_2$ ) 的测量和处理之后的关联信号记录  $M(t, \delta, d, z_3)$  将包含行进时间  $T=t_1+t_3$  时的频带限制尖峰:

[0137] a) 所发送射束在混合区 805 处非线性地相交并且交互。

[0138] b) 时间差  $\delta$  等于行进时间差  $t_1 - t_2$ 。

[0139] c) 服从选择规则,即,编码方案中使用的频率比  $d$  服从方程(9)的条件。

$$[0140] \quad \sin(\theta/2) = (1-d) \frac{\sqrt{(V_p/V_s)^2 - 1}}{2\sqrt{d}} \quad (19)$$

[0141] 其中,  $V_p/V_s$  是在混合区 805 的压缩与剪切速度比,而  $\theta$  是第一与第二发送射束之间的会聚角。该  $V_p/V_s$  比和会聚角  $\theta$  可以通过根据射束几何学、位置和射束方向参数 ( $z_1, z_2, z_3, \phi_1, \phi_2, \alpha_1$  以及  $\alpha_2$ ) 以及所调查的岩石体积的压缩速度  $V_p$  和剪切速度  $V_s$  的模型进行射线跟踪来计算。

[0142] 上述条件支配混合区 805 处的非线性交互作为针对接收器 803 的每一个位置  $z_3$  的  $(t, \delta, d)$  空间中的单一点处的频带限制尖峰信号贡献于记录  $M(t, \delta, d, z_3)$ 。记录  $M(t, \delta, d, z_3)$  上的频带限制尖峰信号的位置可以被指示为  $(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL}, z_3)$ 。该频带限制尖峰的幅度是混合区 805 处的非线性交互强度  $\beta$  的函数。

[0143] 如通常在地震工业和井眼声学波形分析中使用的组合处理(例如,堆叠处理)可以针对信号记录  $M(t, \delta, d, z_3)$  来执行。信号记录  $M(t, \delta, d, z_3)$  上的频带限制尖峰的渐进时间延迟或“时差”可以被分析为  $z_3$  的函数。例如,在堆叠处理中,可以将信号记录堆叠,以获取与选定基准位置  $z_{3r}$  相对应的堆叠记录  $M_s(t, \delta, d, z_{3r})$ 。该基准位置可以被选择成,使得多个信号记录  $M(t, \delta, d, z_3)$  可以被恰当地堆叠。该堆叠处理增强了信噪比,并且改进了记录  $M_s(t, \delta, d, z_{3r})$  上的、源自非线性交互的频带限制尖峰的位置  $(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL}, z_{3r})$  可检测性。尽管在此描述了堆叠处理,但还可以使用其它组合技术。

[0144] 给定初始  $V_p$  和  $V_s$  速度模型(其可以根据井眼井日志以及有关远离井眼的岩层特性的横向连续性的假定估算),来自位置  $z_1$  处的发送器 801 的具有仰角  $\alpha_1$  和方位角  $\phi_1$  的声学射束的轨迹和行进时间、以及来自位置  $z_2$  处的发送器 802 的具有仰角  $\alpha_2$  和方位角  $\phi_2$  的声学射束的轨迹和行进时间可以通过射线跟踪或其它数值建模技术来计算。

[0145] 因此,如果射束相交,则混合区 805 的位置可以通过射线跟踪或其它声学数值建模技术,根据参数  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_{3r}$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\alpha_1$  以及  $\alpha_2$  而空间中定位。发送器位置 801 和 802、基准接收器  $z_{3r}$  以及混合区 805 之间的预测行进时间  $t_{1p}$ 、 $t_{2p}$  以及  $t_{3p}$  还可以利用射线跟踪或其它声学数值建模技术,基于位置和速度来计算。

[0146] 预测脉冲抵达时间  $T_p=t_{1p}+t_{3p}$  和时间差  $\delta_p=t_{1p}-t_{2p}$  可以根据压缩速度  $V_p$  和剪切速度  $V_s$  模型来预测,并接着与实际记录  $M_s(t, \delta, d, z_{3r})$  上的观察到的频带限制尖峰的抵达时间  $T_{NL}$  和时间差  $\delta_{NL}$  相比较。如果  $V_p$  和  $V_s$  速度模型正确地近似岩层的真实  $V_p$  和  $V_s$  速度,则预测时间  $(T_p, \delta_p)$  等于观察时间  $(T_{NL}, \delta_{NL})$ 。如果预测时间与观察时间存在差别,则可以将这些差别用于更新传播  $V_p$  和  $V_s$  速度模型,以最小化该差别,并且实现建模数据与观察数据之间的一致性。地震处理工业成像领域的技术人员所熟悉的各种迭代速度层析反演方法可以被用于更新传播  $V_p$  和  $V_s$  模型。

[0147] 给定通过上述层析速度反演步骤获取的  $V_p$  和  $V_s$  传播模型,来自位置  $z_1$  处的发送器 801 的具有仰角  $\alpha_1$  和方位角  $\phi_1$  的声学射束的轨迹、以及来自位置  $z_2$  处的发送器 802 的具有仰角  $\alpha_2$  和方位角  $\phi_2$  的声学射束的轨迹可以通过射线跟踪或其它数值建模技术来计算。针对给定方位角  $\phi_1$ ,存在源射束将在混合区 805 处相交的方位角  $\phi_2$ ,针对该混合区的位置和会聚角  $\theta$  可以通过射线跟踪或其它数值建模技术,根据参数  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_{3r}$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\alpha_1$  以及  $\alpha_2$  来计算。记录  $M_s(t, \delta, d, z_{3r})$  上的点  $(T_{NL}, \delta_{NL}, d_{NL})$  处的脉冲的幅度接着可以映射至混合区 805 的空间坐标。因为  $d_{NL}$  必须服从方程(19),所以混合区 805 处的  $V_p/V_s$  速度比可以根据方程(19)来计算,并且映射到其空间位置上。通过针对参数  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\alpha_1$  以及  $\alpha_2$  的值的范围重复上述映射步骤,可以构建非线性交互强度  $\beta$  的 3D 图像和速度比  $V_p/V_s$  的 3D 图像。利用选择规则根据上述映射方法获取的速度  $V_p/V_s$  比是一种使用根据行进时间的层析反演获取的传播速度  $V_p$  和  $V_s$  之比的另选方法。

[0148] 上述段落中讨论的几何映射步骤仅是可以被用于针对参数  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\alpha_1$  以及  $\alpha_2$  的许多值,对来自信号记录  $M(t, \delta, d, z_3)$  的非线性特性和  $V_p/V_s$  速度比进行 3D 成像的许多映射技术的一个示例。地震工业中使用的诸如基尔霍夫(Kirchhoff)成像、射束成像、波动方程成像的其它高级成像技术可以适于对非线性特性和  $V_p/V_s$  速度比的 3D 成像。例如,压缩速度  $V_p$  传播的三维图像、剪切速度  $V_s$  传播的三维图像、压缩速度与剪切速度之比  $V_p/V_s$  的三维图像、或岩层的非线性特性的三维图像,或其两个或更多个的任何组合都可以利用基尔霍夫成像、射束成像或波动方程成像来执行。另外,在一个实施例中,传播压缩速度的值或剪切速度的值或两者还可以利用层析速度反演或全波形反演、或者通过与层析速度反演或全波形反演相组合的迭代成像来确定。

[0149] 如可以清楚,确定参数的值可以不同于成像该参数。实际上,参数的图像可以仅包含该参数的相对值,而不必提供有关该参数的绝对值的信息。因此,获取速度比  $V_p/V_s$  的图像可以不同于确定速度比  $V_p/V_s$  的值。根据速度比的图像确定速度比的值可能需要附加信息。

[0150] 对于调查从井眼进入岩层更远的非线性特性和压缩与剪切速度比来说,可能需要低频(在 500Hz 至 10kHz 数量级)源,因为低频的声能可以在被衰减至不可检测水平之前在岩层中穿透更远。500Hz 至 10kHz 频率范围中的低频声能具有比井眼直径更加大的波长。在这些情况下,难于控制来自部署在井眼中的源的声波广播的方位方向。图 8 所示的具有发源于井眼的声能的两个初级射束的构造可能不适于在距井眼大于几百英尺的较大距离来探测和成像非线性特性。鉴于此,需要不同的低频(500Hz 至 10kHz)系统和方法来最大化离井眼的调查距离。下面的段落描述了用于利用低频源来生成非线性声学特性和  $V_p/V_s$  速度比的三维图像的这种系统和方法的非限制例。尽管下面的描述将涉及频率范围 500Hz 至 10kHz,但所述系统和方法在更高频率范围(例如,10kHz 至 500kHz)下也可以应用且有益。

[0151] 图 15a 示出了用于检测井眼周围岩石体积中的非共线混合的、具有设置在井眼中的两个发送器和一接收器或接收器阵列的系统。在一个实施例中,上发送器 1502 包括可以夹紧至井眼或从井眼松开的发送器的线性阵列。下发送器 1501 包括也可以夹紧或松开的发送器线性阵列。接收器阵列 1508 包括夹紧的三分量接收器或夹紧的三分量接收器阵列。该发送器和接收器可以一起或独立移动。在一个实施例中,发送器 1501 和 1502 的阵列部件例如可以利用相位控制来设置,以将声能广播成两个锥形(由发送器 1501 生成的下声学圆锥 1504,和由发送器 1502 生成的上声学圆锥 1505),其具有与发送器 1501 和 1502 共线的轴。在相位控制系统中,锥角取决于发送器部件与岩层速度之间的相位差。声能的两个锥形广播的相交是环形形状相交体积 1506。在遵守选择规则的情况下,散射能量 1507 通过环绕相交体积中心 1506 的非线性交互生成。源自非线性交互的散射量在接收器或接收器阵列 1508 处记录。

[0152] 因为发送器 1501 和 1502 的锥形广播的垂直位置和仰角可控制,所以它们的环形相交体积 1506 的空间位置(距井眼和垂直位置的距离)可以控制,并且在井眼 1500 周围的三维岩石体积上扫描。就两个圆锥的会聚角和两个源的频率比可以被配置成遵守选择规则的程度,接收器 1508 处记录的、因混合区 1506 处的非线性混合而造成的散射信号包含两个圆锥之间的相交处的地层的非线性特性的信息。可以对通过三分量地震检波器阵列 1508 记录的数据进行分析以确定针对其源点的方位和仰角。上述段落中描述的信号编码方法和上述测量与处理协议可以被应用至图 15 (a) 中的系统。从后者系统和构造获取的关联信号  $M(t, \delta, d, z_3)$  由所有相交体积区段 1509-1、2、3、...、1509-k 处的非线性交互所生成的所有脉冲的线性叠加组成,其覆盖环形相交体积 1506 的整个圆周,如图 15 (b) 所示。如在上述段落中讨论的,如果满足下列条件,则由与交互或混合区相对应的区段 1509-k 的波的非线性交互对接收器阵列 1508 的在位置  $z_3$  处的接收器的所得关联信号  $M(t, \delta, d, z_3)$  的贡献,是具有等于从发送器 1501 至区段 1509-k 并接着从 1509-k 至接收器的飞行时间的行进时间的脉冲:

[0153] a) 特定区段 1506-k 处的频率比  $d$ 、会聚角  $\theta$  以及速度比  $V_p/V_s$  服从方程(19)的选择规则条件,

[0154] b) 编码源发送器信号之间的时间延迟  $\delta$  等于从发送器 1501 至 1509-k 的飞行时间与从发送器 1502 至 1509-k 的飞行时间之差。

[0155] 换句话说,关联信号  $M(t, \delta, d, z_3)$  中的、由相交体积区段 1509-1 至 1509-k 处的非线性混合所生成的脉冲分布在针对位置  $z_3$  处的每一个接收器的范围  $(t, \delta, d)$  内。每

一个区段 1509-k 的贡献可以映射至关联信号  $M(t, \delta, d, z_3)$  中的空间中的一点  $(t, \delta, d)$ 。该特性, 与从三分量接收器获取的信号轨迹信息一起, 允许利用上述段落中讨论的成像方法, 将关联信号  $M(t, \delta, d, z_3)$  中的点  $(t, \delta, d)$  处的信号幅度几何映射至环形相交体积内的相交体积区段 1509-1 至 1509-k 的空间位置。构建初始  $V_p$  和  $V_s$  传播模型。接着执行射线跟踪、行进时间分析以及迭代层析速度确定, 以获取更新的  $V_p$  和  $V_s$  传播模型。接着, 利用上述段落中描述的工作流程, 可以提取环形相交体积中的区段 1509-1 至 1509-k 中的非线性特性和  $V_p/V_s$  速度比, 并且利用施加至更新的  $V_p$  和  $V_s$  模型的射线跟踪分析映射至环形相交体积上的空间位置。通过针对锥形广播的所有仰角和发送器在井眼中的垂直位置重复该测量, 可以针对井眼周围所有混合区构建非线性特性和  $V_p/V_s$  速度比的图像。接着, 可以利用地震成像领域技术人员已知的合适处理方法(举例来说, 如加权堆叠方法), 组合针对所有扫描混合区的图像, 以生成所有图像的非线性特性和  $V_p/V_s$  速度比的完整 3D 图像。

[0156] 利用针对垂直井的低频锥形声学广播的系统和方法在岩石体积没有方位对称性时可以很好地工作。然而, 如果岩石体积针对传播速度  $V_p$  和  $V_s$  (并由此隐含地针对它们的  $V_p/V_s$  速度比) 具有非常高度的方位对称性, 则这种系统在求解地层特性中的方位变化和生成 3D 图像方面可能遭遇某些困难。参照图 15 (b), 由来自环形相交体积中的区段 1509-1 至 1509-K 的非线性交互所生成的非线性信号在它们整体方位对称时同时抵达每一个接收器。在这种情况下, 由于源自环形相交体积中的多个区段 1509-1 至 1509-K 的脉冲同时出现在关联信号  $M$  中, 因而难于分离这些脉冲。这将模糊性引入了映射任务中。如果井眼或井眼系统被设计成克服因方位对称而造成的局限性, 则可以避免上述困难。在下面的段落中, 对利用被设计成实现该目标的各种井孔构造的非限制测量系统和方法进行描述。

[0157] 图 16a 和 16b 示出了具有位于井眼的笔直部分中的接收器阵列 1603, 和位于接收器阵列的延伸轴 1625 上的发送器 1601 和 1602 的中心的非共线混合布置的示例。针对线性相控阵列的情况来说, 发送器按具有与发送器阵列对准的轴的圆锥 1604 和 1605 广播声能。根据本公开的多个方面, 图 16a 和 16b 例示了该圆锥和它们的相交轨迹 1607。如图 16a 所示, 相交轨迹可以被认为是一系列相邻相交体积区段 1608-k, 其中,  $k=1$  至  $K$ , 其中四个被标识为 1608a、1608b、1608c 以及 1608d。根据几何分析, 可以表明, 如果两个相交体积区段具有相同会聚角, 则它们的对应飞行时间差(从下和上发送器至相交体积区段)  $t_1-t_2$  不同。与混合区相对应的相交轨迹的相对两侧上的、具有相似会聚角和  $V_p/V_s$  速度比的两个位置由此可以通过控制频率比  $d$  和来自两个发送器的编码广播之间的时间延迟  $\delta$  而单个地启用。类似的是, 具有相同的飞行时间差  $t_1-t_2$  的两个混合区具有不同会聚角  $\theta$ , 使得同时抵达两个混合区段的声学信号可以仅遵守针对这两个位置之一的  $V_p/V_s$  速度比、频率比  $d$  以及会聚角  $\theta$  的选择规则需求。

[0158] 如根据上述段落可以清楚, 两个锥形声学广播的相交限定了采用环形形式的相交体积。对于本公开的目的来说, 将环形定义为通过转动平面几何形状(如多边形形状、圆形、椭圆形或其它形状)以限定一封闭体积而生成的“环形”形状。在一个实施例中, 该环形可以是圆环面或 O 状环, 其中, 平面几何形状或截面形状是绕一轴转动的圆圈。在另一实施例中, 该环形可以被定义为椭圆形地旋转以形成一封闭体积的多边形形状。该环形体积可以被分段成多个相交体积区段。根据非线性选择规则和各种参数(包括广播声学信号的起始

时间差和其之间的频率比)的明智选择,可以启用一个或更多个相交体积区段,以提供一个或更多个混合区,其中,两个锥形广播信号在该混合区内非线性地交互,以生成表示该区域中岩层的非线性特性的信号。

[0159] 上述段落中讨论的编码方法、上述段落中描述的测量与处理协议以及上述段落中讨论的成像方法可以被应用至图 16a 和 16b 所示的测量系统。这些应用跟随上述段落中描述的一般方法。与图 15 的笔直井眼构造不同,存在同时抵达空间( $t, \delta, d$ )的问题。由此,图 16 所述利用具有有意弯曲轨迹的井眼的测量系统对于非线性特性和  $V_p/V_s$  速度比的一般 3D 成像来说更鲁棒。成像方法的副产品是由成像处理的中间步骤的层析速度反演所生成的  $V_p$  和  $V_s$  传播模型。

[0160] 应注意到,如图 16 上所示在弯曲或角状井眼轨迹的构造中缺乏方位对称性和倾斜的锥形声波广播还可以通过偏置笔直井眼内的更小发送器阵列的轴,或者通过有线线路或管道运送测井工具上的类似构造等而以更小比例实现。

[0161] 图 17a 和 17b 示出了各种井眼构造内的、具有轴取向和锥角的发送器-接收器布置的两个附加例,其可以被用于创建井眼周围岩层的  $V_p/V_s$  速度比和非线性特性的 3D 图像。图 17a 示出了具有其中存在下圆锥与上圆锥完全相交的曲柄状鼠洞的一示例单一井布置。例如,如图 17a 所示,上发送器 1702 被配置成生成比下发送器 1701 所生成的较窄圆锥 1704 更宽的声能圆锥 1705,以使得存在下圆锥与上圆锥的完全相交。发送器 1701 和 1702 都位于鼠洞 1706 中,而接收器 1703 位于主垂直井眼 1700 中。如在图 15 和 16a-16d 的构造中,发送器 1701 和 1702 可以被设置为井眼中声学点源的阵列,例如,线性阵列。由发送器 1701 和 1702 生成的声能在相交区中的非线性材料中交互,并且根据选择规则在接收器 1703 处接收声能,如上所述。非线性混合区包括圆锥 1704 与 1705 之间的相交轨迹 1709,其横跨针对井眼 1700 的最近点 1707 和相距井眼 1700 的最远点 1708。

[0162] 图 17b 示出了具有更严重的曲柄状鼠洞的单一井布置的另一示例,并且下发送器几乎垂直于井眼 1700 的轴发射能量。在这些构造中,圆锥之间的相交是双曲线,而非如上述示例中的椭圆。尽管如此,类似测量、编码、数据处理以及成像协议仍保持可应用。另外,因为圆锥之间的相交不是封闭曲线,所以调查的深度根据源强度、接收器灵敏度、以及信号处理算法的有效性来确定。

[0163] 导致封闭椭圆相交轨迹的构造与导致抛物线开放曲线轨迹的构造之间的一个差别是,在封闭椭圆相交轨迹中,频率比扫描可以按对应于比最近点的会聚角更高的会聚角的较低频率比  $f_2/f_1$  (例如,参见图 10b) 开始。例如,接着可以增加该频率比  $f_2/f_1$ ,直到椭圆上的最近点被启用为止。该扫描可以继续直到到达最远相交点为止。通过进一步增加频率比  $f_2/f_1$ ,因为没有区域被启用而未接收到信号。另一方面,如果该相交是开放曲线,则频率比  $f_2/f_1$  可以在最近点开始扫描并且继续直到从双曲线的任一侧至接收器的返回信号变得不可检测为止。

[0164] 图 18a 示出了接收器在该井的垂直部分中的情况下垂直井与侧线的一示例。图 18b 示出了根据本公开多个方面的、在该侧线中具有接收器的情况下垂直导向孔与水平侧线的另一示例。主垂直井眼 1800 包括被配置成生成声能 1804 的垂直圆锥的发送器 1801,而侧线井眼 1806 包括被配置成生成声学圆锥 1805 的发送器 1802。接收器 1803 可以根据所使用的特定应用,设置在如图 18a 中的主垂直井眼 1800、侧线井眼 1806 中的任一者中,或

者设置在主井眼 1800 和侧线井眼 1806 两者中。如在图 17a 至 17c 的示例中,发送器 1801 和 1802 以及接收器 1803 分别可以包括发送器和接收器的阵列。侧线井眼 1806 中的发送器 1802 可以定位于主垂直井眼 1800 中的发送器 1801 之上或之下。

[0165] 尽管从钻探和操作观点来看,图 17a 至 17b 与 18a 和 18b 的构造在复杂性上稍微不同,但对于利用不同构造来说存在许多益处,包括用于通过最大化到两个圆锥的相交处的距离来执行相距井眼更深的远程感测。而且,沿几乎垂直于井眼的方向生成声能的发送器可以向由更小锥角限定的扫描提供更多功率和更多角分辨率。应注意到,上述图仅是使用众多可能井眼构造的示例构造。如可以清楚,还存在允许按不同方位角和仰角放置两个初级声学阵列的许多其它井眼构造。

[0166] 上述技术,调用选择规则和信号编码的组合可以被用于扫描由根据离井眼某一距离的、由来自两个发送器的声能所形成的两个相交圆锥限定的体积并成像。上述讨论描述了  $P + P \Rightarrow SV$  交互。然而,其它准许交互也可以按类似方式与表 1 所示示例一起使用。

[0167] 如根据上述段落可以清楚,调查岩层的各种方法可以利用用于勘测规划、数据获取和存储、以及图像处理 and 解释的系统来实现。图 19 描绘了根据本发明一实施例的、用于勘测规划、数据获取与存储、以及图像处理 and 解释的系统。在一个实施例中,该系统可以生成以井眼为中心的岩层的柱状体积的非线性特性、 $V_p/V_s$  速度比以及传播压缩与剪切速度的 3D 图像。在一个实施例中,非线性和  $V_p/V_s$  速度比的 3D 图像例如可以包括延伸出几百米调查半径的非线性和  $V_p/V_s$  速度比的图像。

[0168] 在一个实施例中,该系统被视为一套硬件和 / 或软件或模块子系统。子系统 1900 至 1904 被用于勘测规划和执行、井下工具输送、编码和广播所发送声波、以及记录和检测非线性信号。子系统 1901 和 1905 被用于勘测后图像处理。子系统 1900 被用于勘测设计、数据设计获取、控制以及记录。子系统 1901 被用于预备非线性和速度成像。子系统 1902 被用于接收器和传感器控制与发送。子系统 1902 被配置成发射受控声学广播并且接收声能。子系统 1903 被用于生成广播信号。子系统 1904 被用于非线性信号检测。子系统 1905 被用于非线性成像和速度成像。

[0169] 在一个实施例中,子系统 1900 包括:用于获取建模以获取模块 1907、数据获取控制器 1908、数据预处理与增强模块 1930 以及数据存储装置 1921。在一个实施例中,子系统 1901 包括:初始速度模型模块 1906 和用于预备生成三维图像的模块 1931,该三维图像包括传播压缩与剪切速度图像、 $V_p/V_s$  速度比图像以及与源自混合区处的非线性交互的测量信号的幅度相关联的非线性的图像。在一个实施例中,子系统 1902 包括:工具部署与输送模块 1909、工具机械控制器 1910、用于控制第一声源(S1)的方位与仰角的方位与仰角控制器 1917、以及用于控制第二声源(S2)的方位与仰角的方位与仰角控制器 1918。在一个实施例中,子系统 1903 包括:编码信号发生器 1911、倍频器与时间延迟模块 1912、用于生成向第一声源(S1)发送的信号的信号放大器 1913、用于生成向第二声源(S2)发送的信号的信号放大器 1914。在一个实施例中,子系统 1904 包括:用于接收来自接收器 R1、R2、...、Rn 的信号  $u_3(t)$  的接收器模块 1922、用于增强由信号接收器模块 1922 所接收的信号的的非线性信号增强模块 1924、用于生成模板信号  $u_s(t)$  的模板信号发生器模块 1927、以及用于关联接收信号  $u_3(t)$  与模板信号  $u_s(t)$  的信号关联模块 1928,如在上述段落中所述。在一个实施例中,子系统 1905 包括:数据预处理与增强模块 1932、速度模型迭代模块 1933、成像迭

代模块 1934、用于速度比图像和 / 或非线性图像的输图像模块 1936、以及用于输出速度  $V_p$ 、速度  $V_s$  和 / 或  $V_p/V_s$  速度比的确定值的输出速度模块 1935。

[0170] 如可以清楚的,在此使用术语模块以涵盖硬件装置、软件程序或两者。例如,图像迭代模块可以是硬件,其被配置成执行迭代或者可以在计算机上运行以执行该迭代的软件程序,或者包括硬件和软件应用两者。

[0171] 在操作中,在数据获取之前,压缩与剪切慢度的日志和有关地层横向连续性的信息可以被用于利用模块 1906 构建远离井孔横向延伸的初始分层地球模型。来自模块 1906 的初始速度模型被正向建模获取模型 1907 用于提供针对数据获取的计划,该计划被操作员用于利用操作员输入来编程数据获取控制器 1908。

[0172] 在经由工具部署与输送模块 1909 将子系统 1902 部署到井眼中并且在需要的情况下经由工具机械控制器 1910 夹紧至井眼壁之后,可以向编码信号发生器子系统 1903 发送输入命令,其中,编码脉冲序列由编码信号发生器模块 1911 生成。由编码信号发生器模块 1911 生成的编码信号按频率调节,并且通过倍频器和时间延迟模块 1912 延迟,致使信号放大器 1913 和 1914 向发送器或源 S21915 和 S21916 提供信号,以使按延迟方式广播该信号,使得来自 S1 和 S2 的信号同时抵达混合区,举例来说,如图 12a 上所描绘的。

[0173] 包括来自源 S11915 和 S21916 的声学广播的仰角和方位角的广播几何学通过来自数据获取控制器 1908 的命令控制,该数据获取控制器 1908 向井下方位与仰角控制器 1917 和 1918 发送角控制命令。从工具部署 1909、工具机械控制器 1910、方位与仰角控制器 1917 与 1918 收集的、与工具配置和广播几何学有关的在此被指示为记录获取参数 1919 的所有数据被记录在数据存储装置 1921 中。类似的是,来自编码信号发生器子系统 1903 的、在此被指示为记录广播信息 1920 的编码方案也被记录在数据存储装置 1921 处。

[0174] 在一个实施例中,来自信号模块 1922 的、在一个或多个接收器 1923 处记录的信号(例如,每一个接收器例如皆可以具有水中听音器、3 分量地震检波器或两个  $R_1$  至  $R_n$ ) 可以通过非线性信号增强模块 1924 被处理以增强非线性起源的内容,并且缩减或基本上抑制线性交互起源的信号或潜在噪声。来自信号接收模块 1922 的原始信号 1925 和增强信号 1926 被存储在数据存储装置 1921 中。由模板信号发生器 1927 生成的模板信号  $u_s(t)$  (其可以从由信号发生器 1912 和倍频器与时间延迟模块 1912 生成的信号  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$  导出) 与由 1925 表示的接收信号在 1928 相关联,例如,如图 12 至 14 中所述。模板信号  $u_s(t)$  与接收或检测信号  $u_3(t)$  的相关性被用于经由关联信号输出模块 1929 提取关联信号  $M(t, d, \delta, z_3)$ 。该关联信号也被存储在数据存储装置 1921 中。

[0175] 在一个实施例中,利用组件或模块 1909 至 1929 实现的数据获取处理可以利用不同射束几何学或者按井内的多个位置( $z_3$ )重复。在一个实施例中,已经记录的数据可以被用于引导获取参数中的变化。例如,存储装置 1921 内的存储数据例如还可以通过预处理与速端图处理模块 1930 内的速端图分析而进一步增强。存储在存储装置 1921 中的数据还可以结合来自初始速度模型模块 1906 的初始速度模型使用,以利用成像模块 1931 创建非线性特性和 / 或  $V_p/V_s$  比的一组图像。这些可以被用于通过获取设计模块 1907 和 / 或由数据获取控制器 1908 控制的获取参数来精炼建模。

[0176] 在完成该勘测之后,另一数据处理可以经由数据预处理与增强模块 1932 来实现。在一个实施例中,可以进行速端图分析,以预调节用于最终分析的数据。模块 1906 中的初

始速度模型和来自模块 1931 的图像可以被用作通过速度模型迭代模块 1933 进一步迭代速度模型的起始点、和通过速度建模模块 1933 与成像模块 1934 之间的成像迭代的非线性特性和 / 或  $V_p/V_s$  比的成像迭代的起始点。该迭代的最终结果是通过输出模块 1935 输出的最优化速度模型、和通过输出模块 1936 输出的包括  $V_p/V_s$  比图像和 / 或非线性特性图像的图像。

[0177] 在一个实施例中,该系统的上述实现适于针对相距井眼相对更大距离(例如,几百米开外)来成像,并且包括被设计成最大化信噪比和从复杂石油物理、地层学以及结构性背景中检测脆弱信号的组件。探测特性中具有很少变化的更小体积和更强返回信号的近井眼应用可以潜在地省却该系统中的涉及信号检测和速度模型迭代的某些方面或部分或模块。同样地,在要求不高的获取环境下,可以简化硬件的某些方面,例如,夹紧的三分量地震检波器可以用安装在集中式探测器上的非定向水中听音器接收器来替换。

[0178] 而且,如可以清楚,尽管该系统在上面被描述为将该系统的获取数据部分链接至该系统的成像部分,但数据部分的获取可以与  $V_p/V_s$  比和 / 或非线性特性的成像分离地实现。实际上,所获取数据可以通过第一实体和存储在数据存储装置 1921 中的数据来实现。接着,数据存储装置 1921 中的获取数据被传递至可以和第一实体相同或不同的第二实体,该第二实体可以采用上述段落中描述的成像子系统或成像方法,以获取  $V_p/V_s$  和 / 或非线性特性图像。

[0179] 而且,尽管每一个模块在上述段落中被描述为具有特定功能,但如可以清楚,一个或更多个模块中的任何功能可以移动至任何其它一个或更多个模块。例如,编码信号发生器子系统 1903 中的一些或全部功能可以移动至非线性信号检测子系统 1904。

[0180] 另外,必须清楚,术语处理器在此被用于涵盖一个或更多个处理器。所述一个或更多个处理器可以被配置成实现在此描述的方法或该方法的多个部分。所述一个或更多个处理器可以位于一个或更多个计算机上,举例来说,如位于分布式计算环境中。在一些实施例中,用于执行根据本发明多个实施例的方法的程序可以被具体实施为诸如个人计算机或服务器的计算机中的或者包括多个计算机的分布式计算环境中的程序产品。在对处理器进行说明的情况下,该术语应被理解成涵盖这些计算布置中的任一种。该计算机例如可以包括:台式计算机,膝上型计算机、手持式计算装置。该计算机程序产品可以包括其上存储有被用于编程计算机以执行上述方法的指令的计算机可读介质或存储介质或媒介。合适存储介质或媒介的示例包括任何类型的盘(包括软盘、光盘、DVD、CD ROM、磁光盘)、RAM、EPROM、EEPROM、磁卡或光学卡、硬盘、闪速卡(例如,USB 闪速卡)、PCMCIA 存储器卡、智能卡、或其它介质。另选的是,一部分或整个计算机程序产品可以经由网络(如因特网、ATM 网络、广域网(WAN)或局域网)从远程计算机或服务器下载。

[0181] 尽管基于当前所考虑的是最有用且优选的实施例,而出于例示的目的,对本发明进行了详细描述,但应当明白,这种细节单独出于该目的,并且本发明不限于所公开实施例,而且,正相反,其旨在覆盖处于所附权利要求书的精神和范围内的修改例和等同布置。作为另一实施例,应当明白,本发明设想,在尽可能的情况下,可以将任何实施例的一个或更多个特征与任何其它实施例的一个或更多个特征相组合。



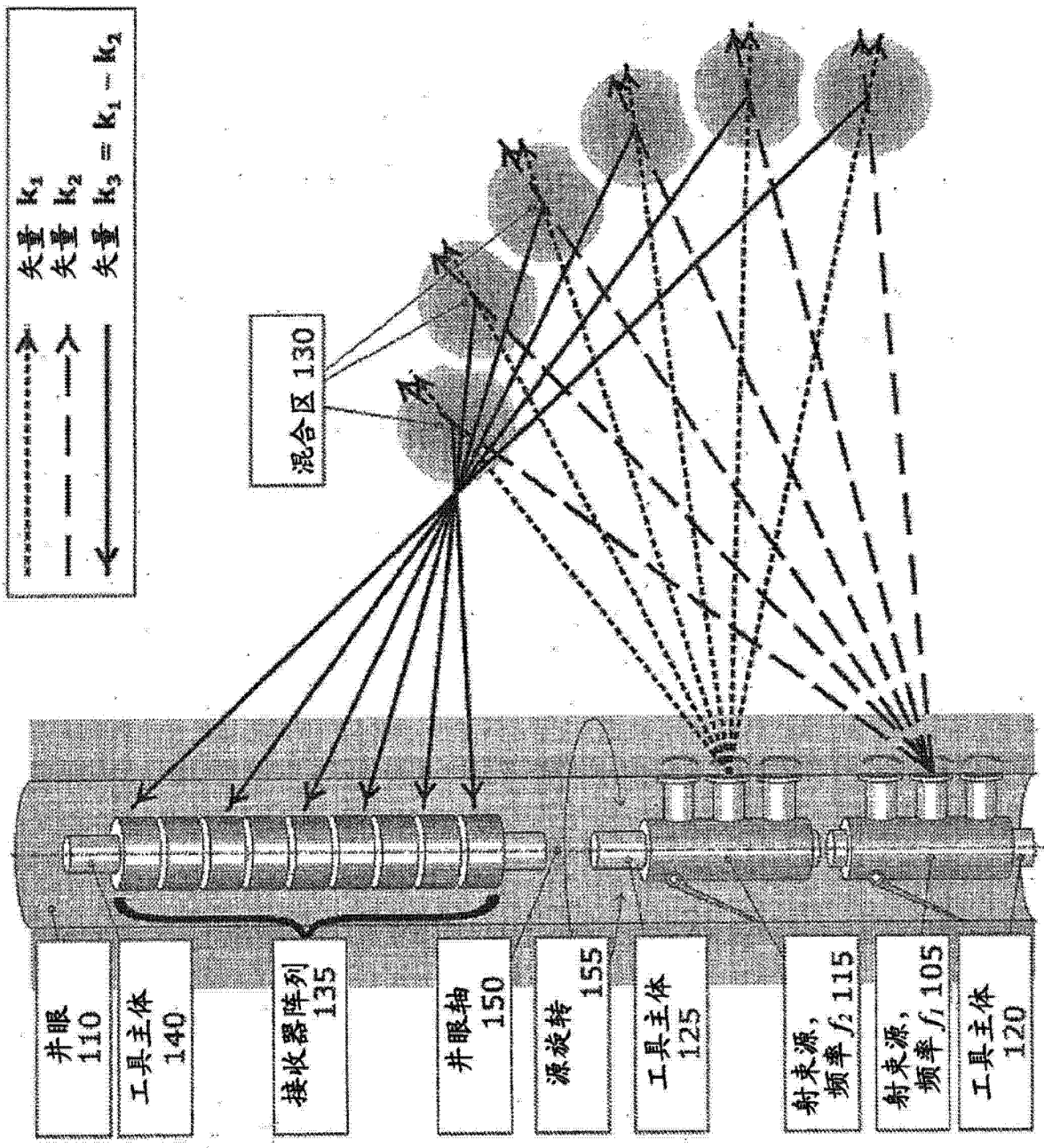


图 1

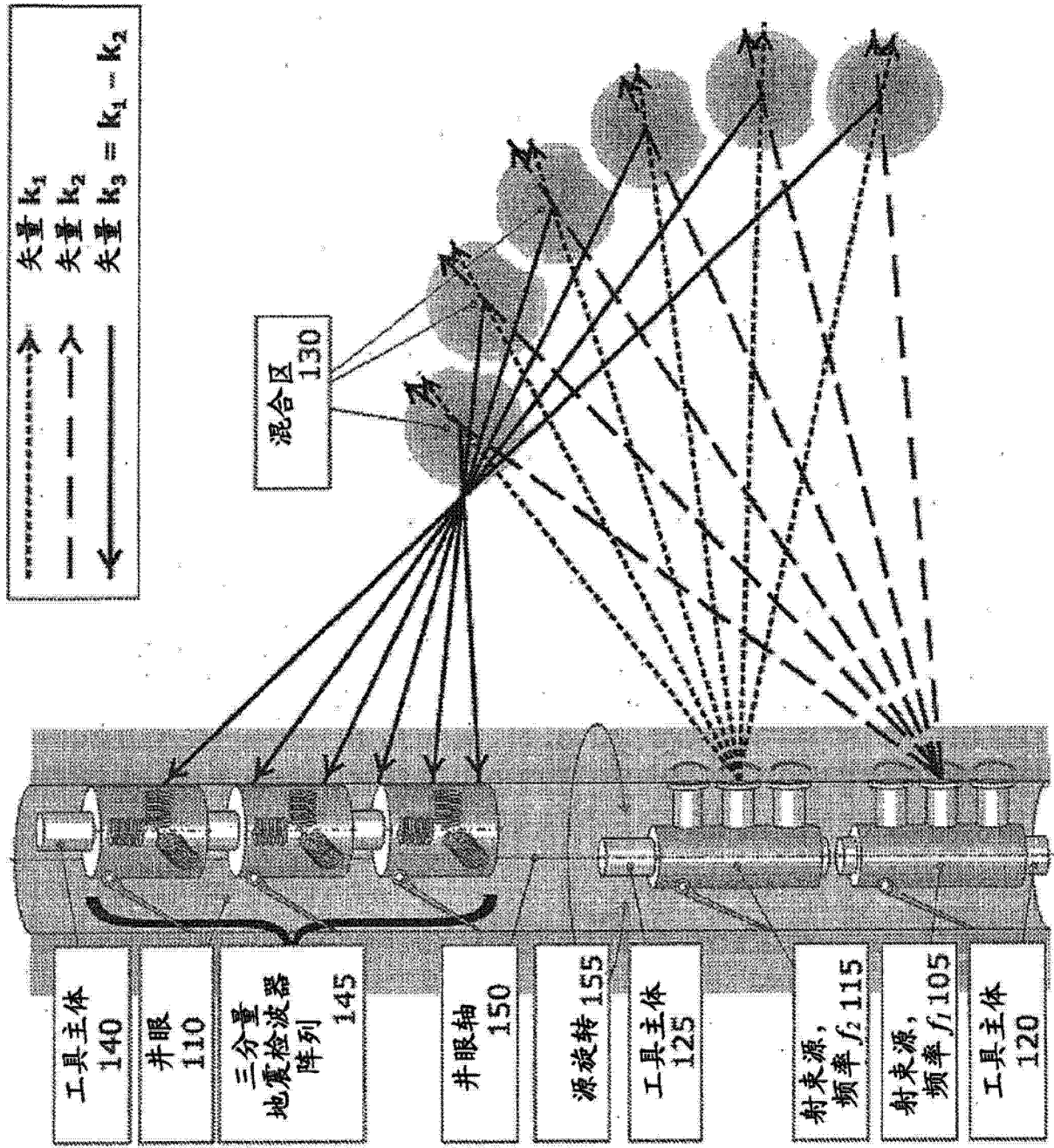


图 2

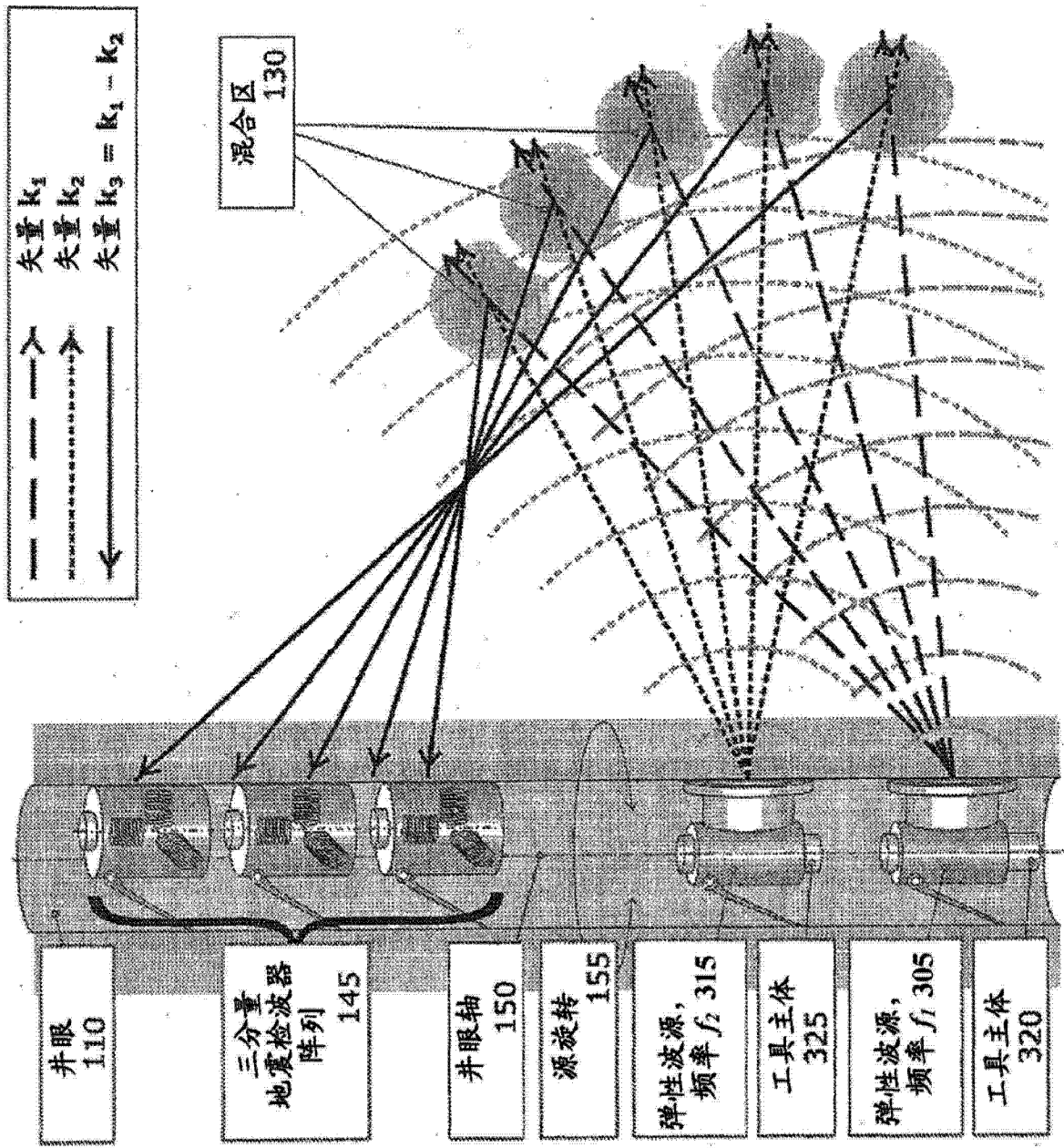


图 3

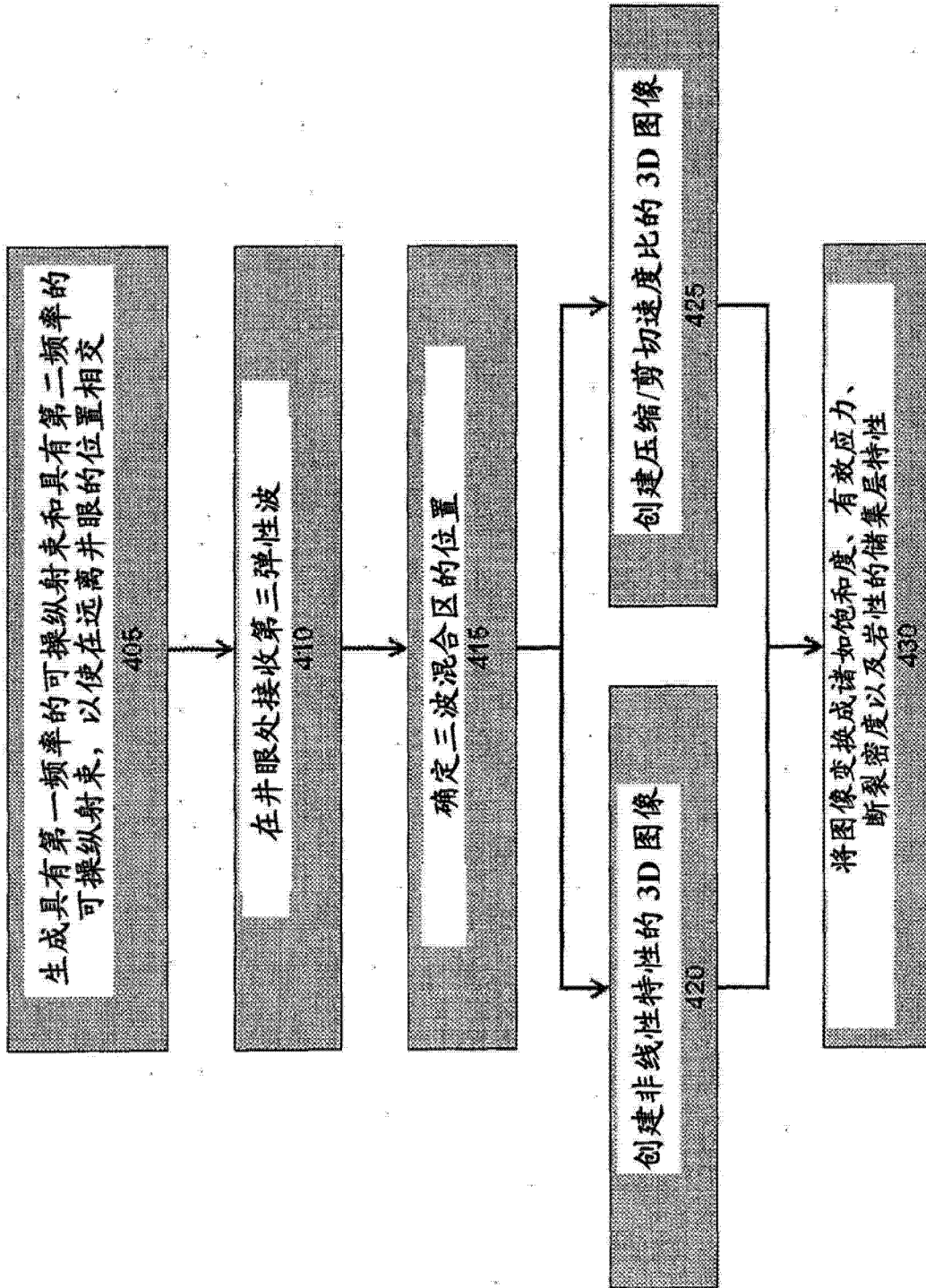


图 4

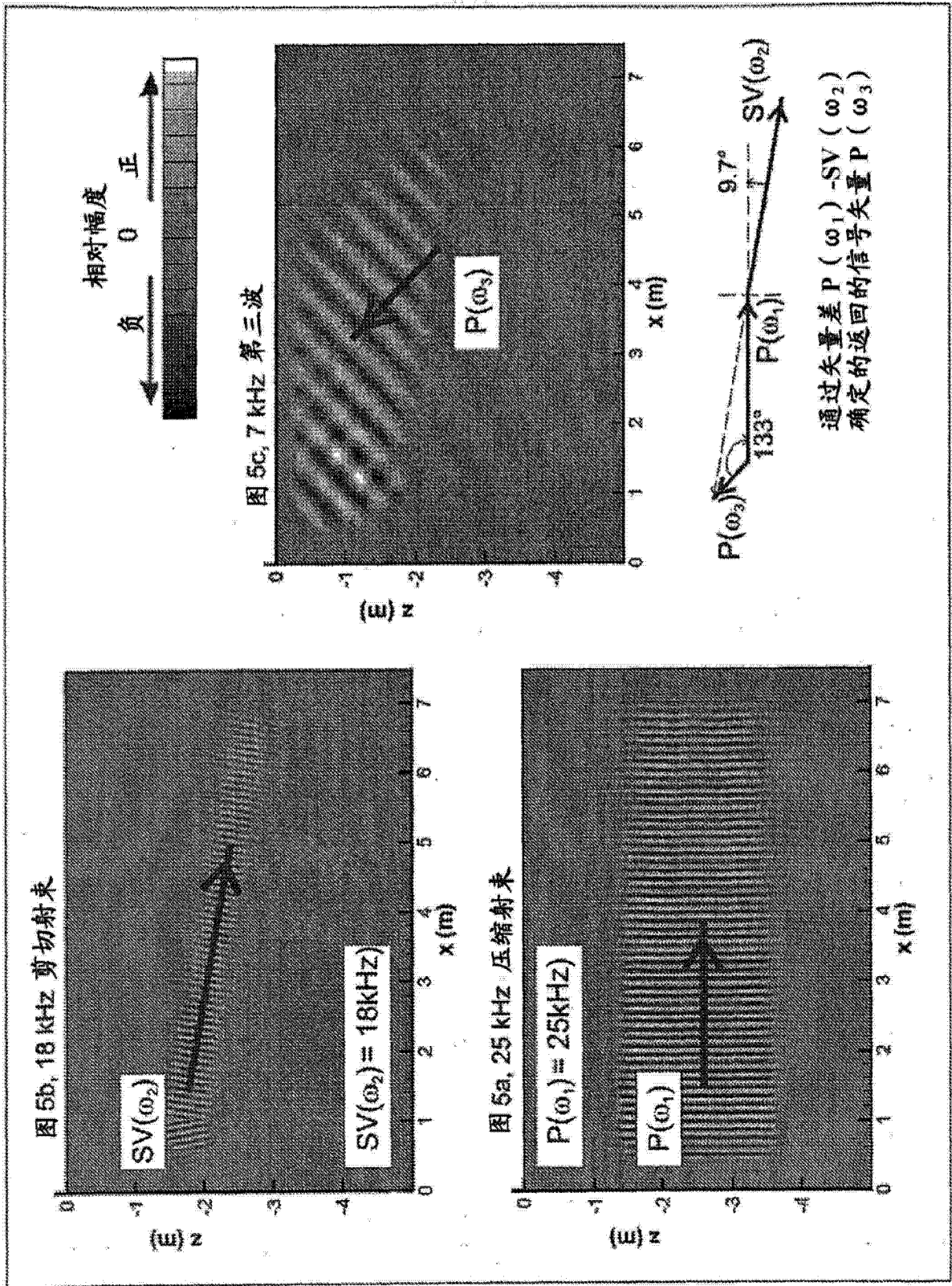


图 5

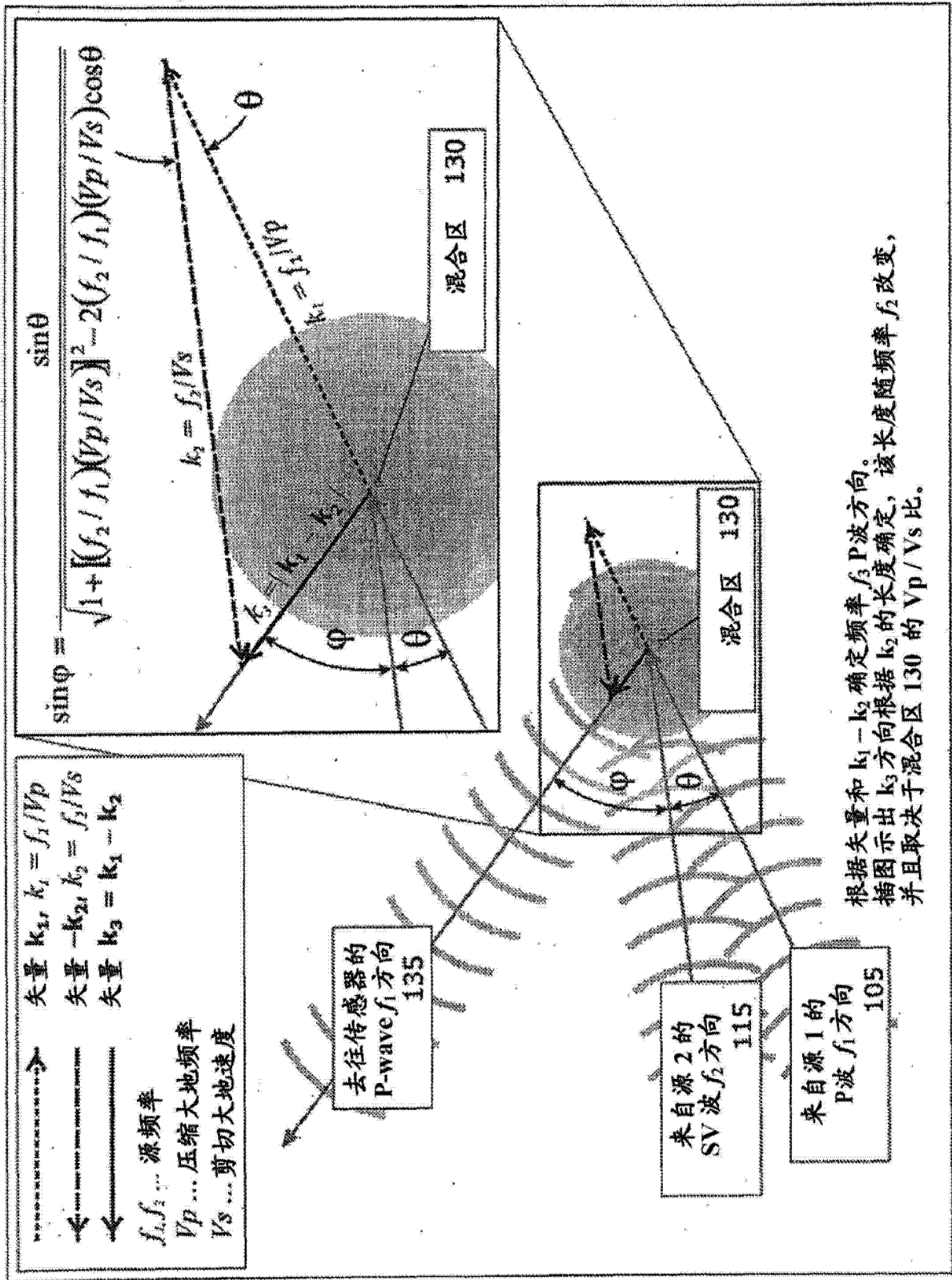


图 6



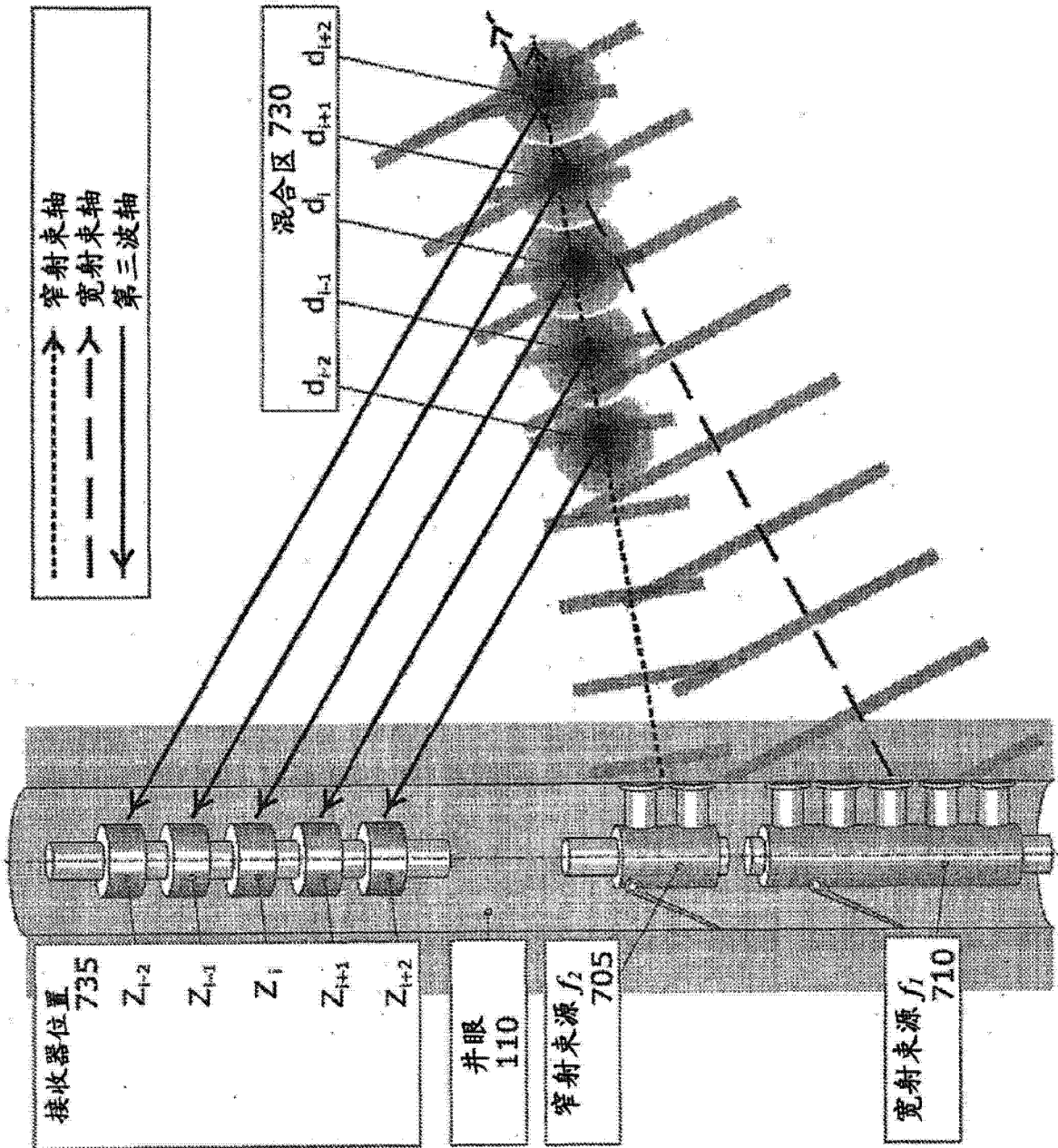


图 7

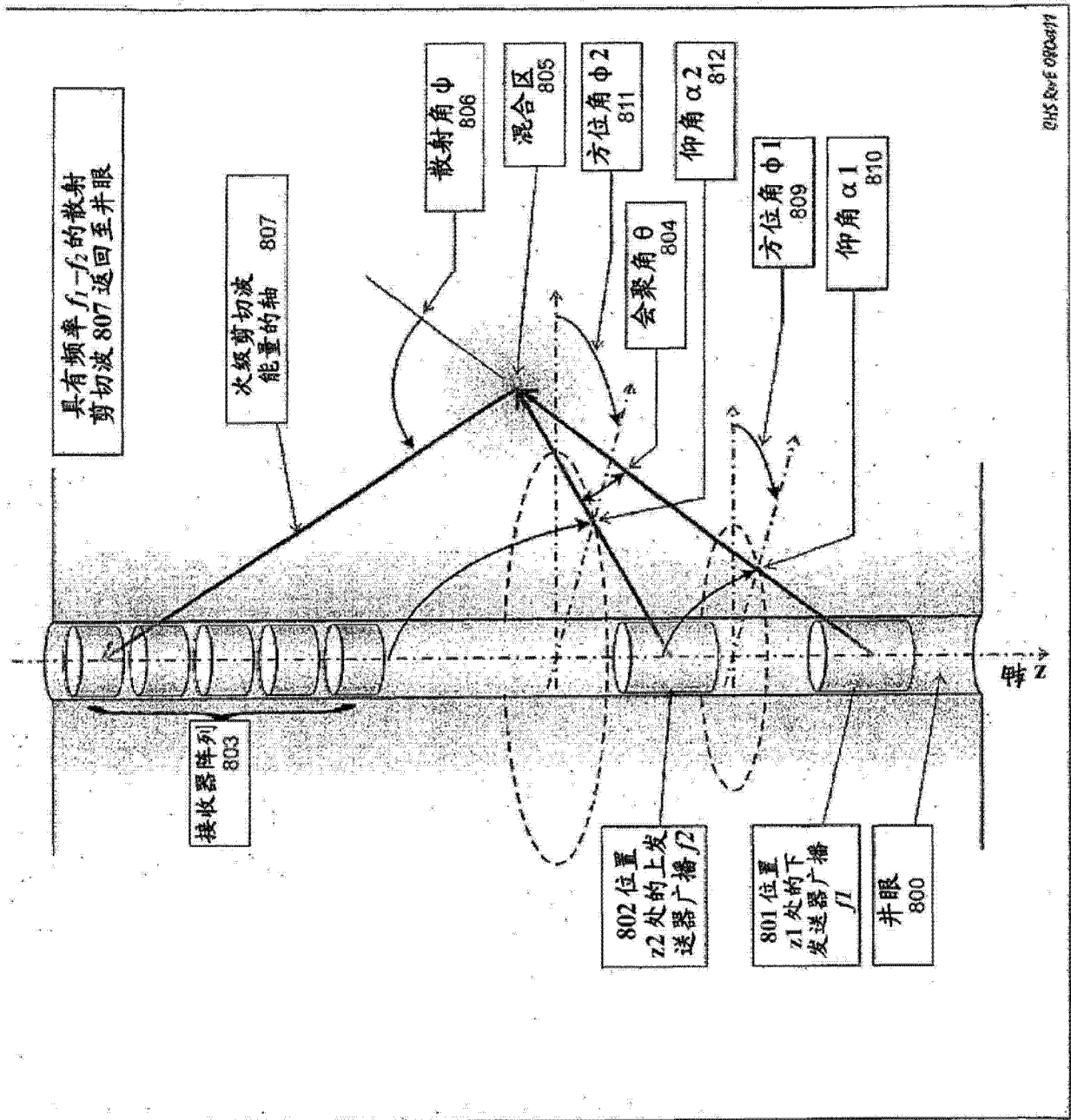


图 8



图 9a 和 9b 示出了根据图 8 所示构造的几何学展开的波矢量三角形。图 9b 中三角形 ABC 的边平行于来自上和下发送器的射束的延伸轴以及次级剪切波的轴。在图 9b 中，矢量  $k_3$  等于矢量差  $k_1 - k_2$ 。

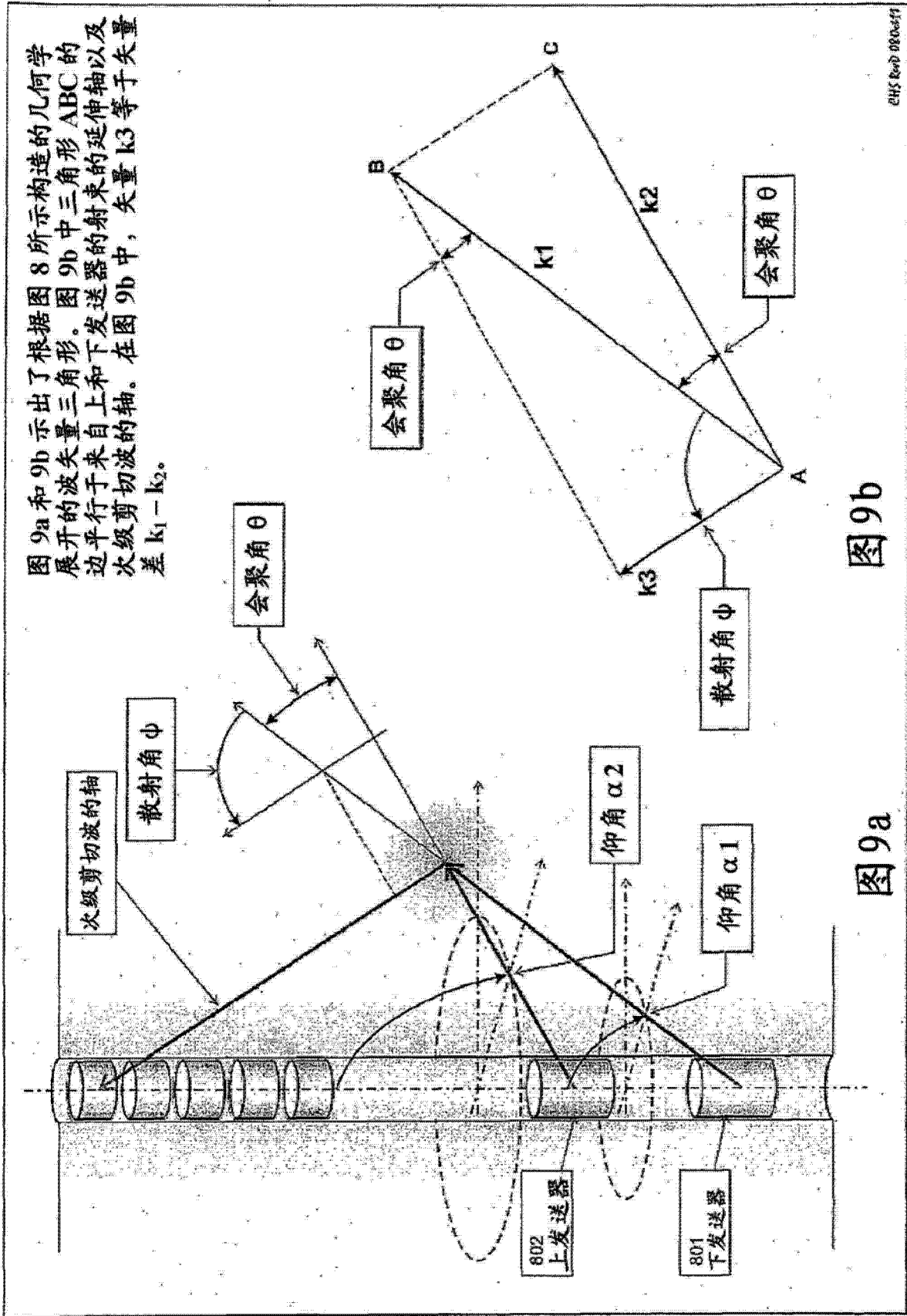


图 9b

图 9a

CHS RevD 08/06/11

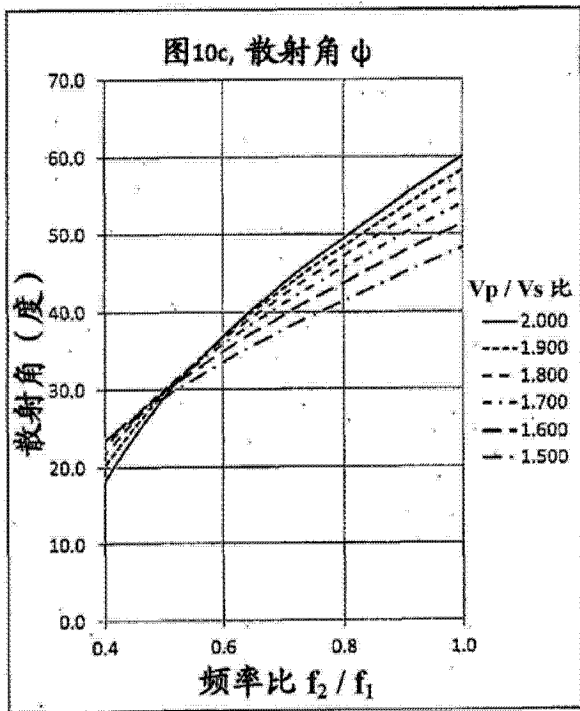
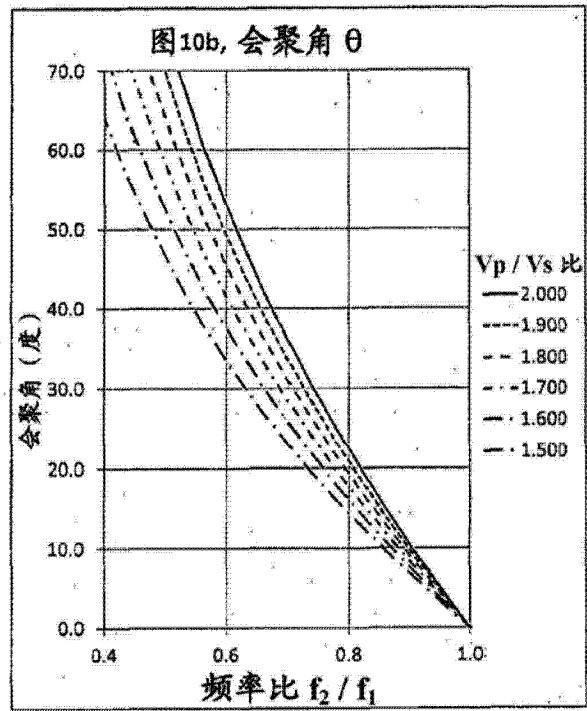
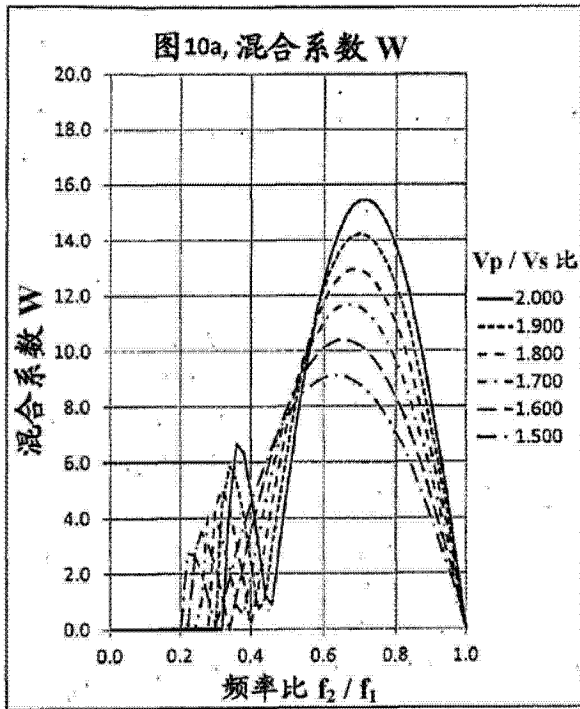
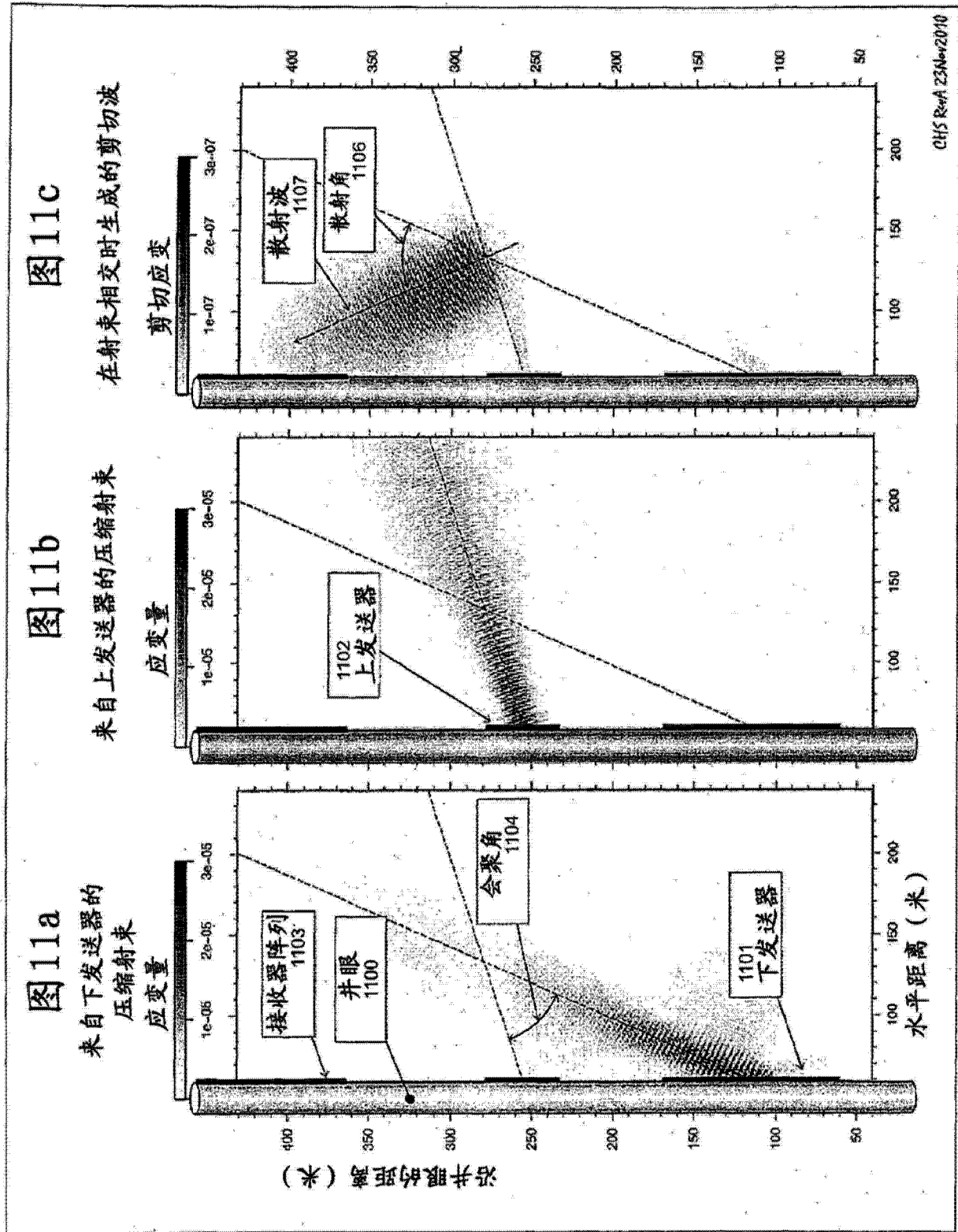
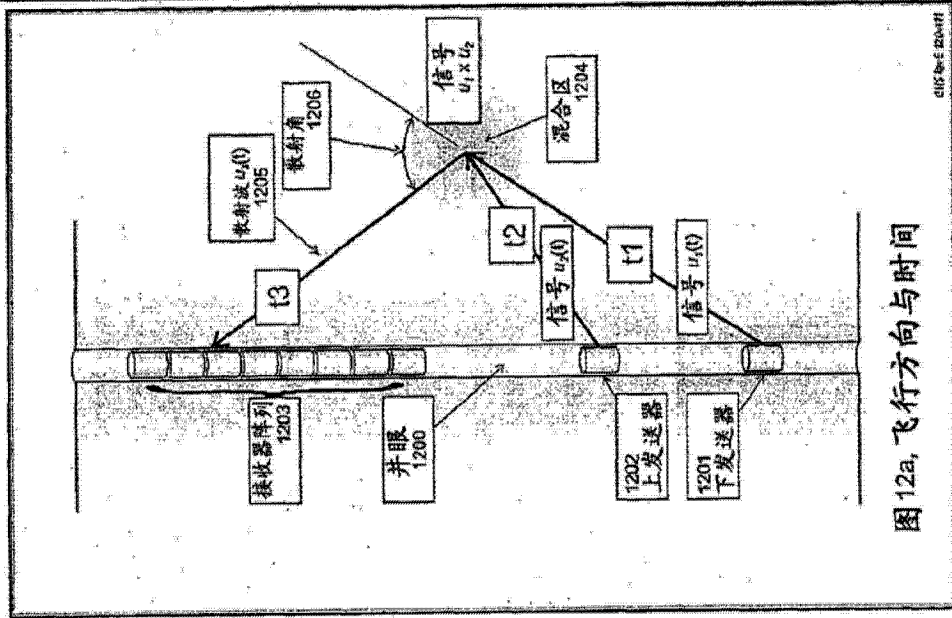
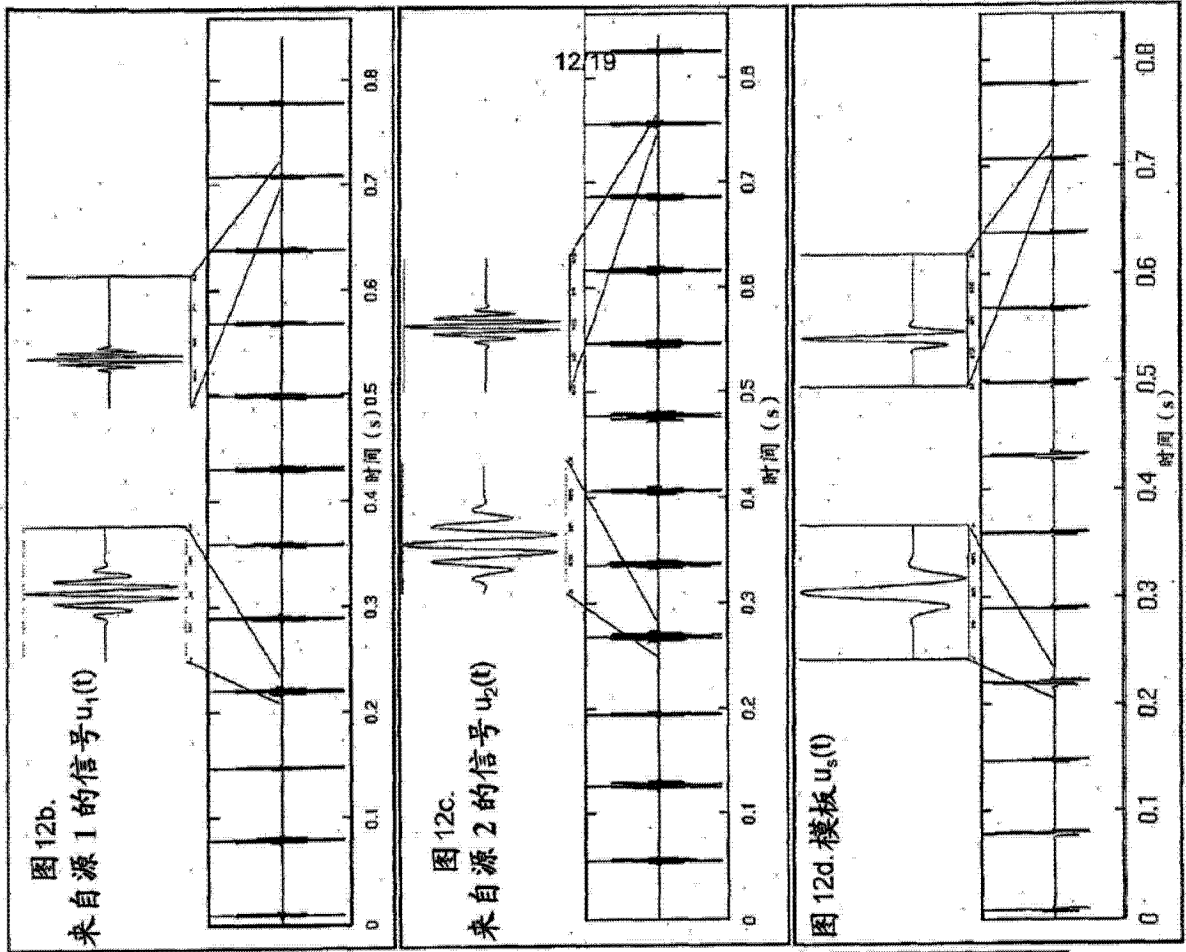
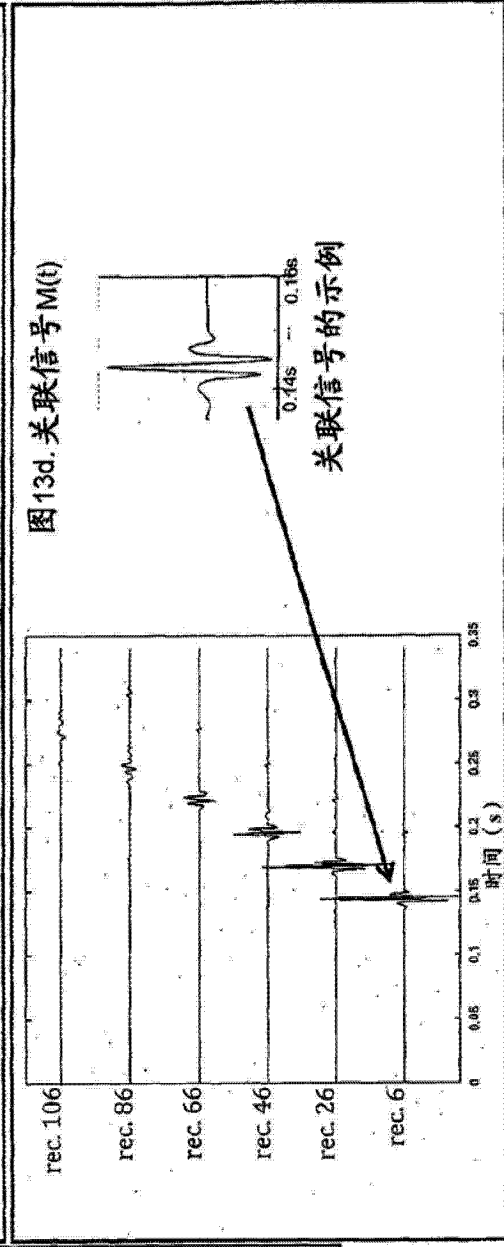
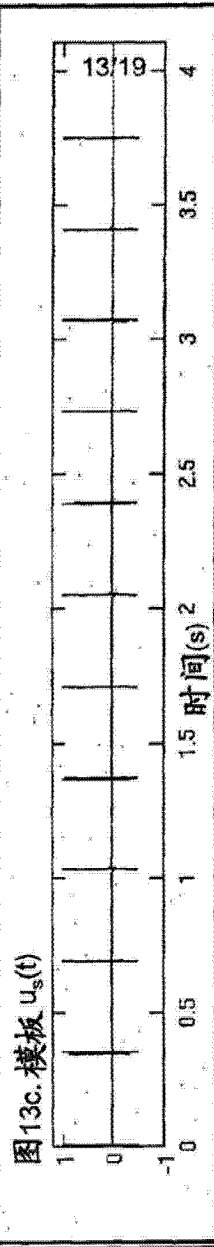
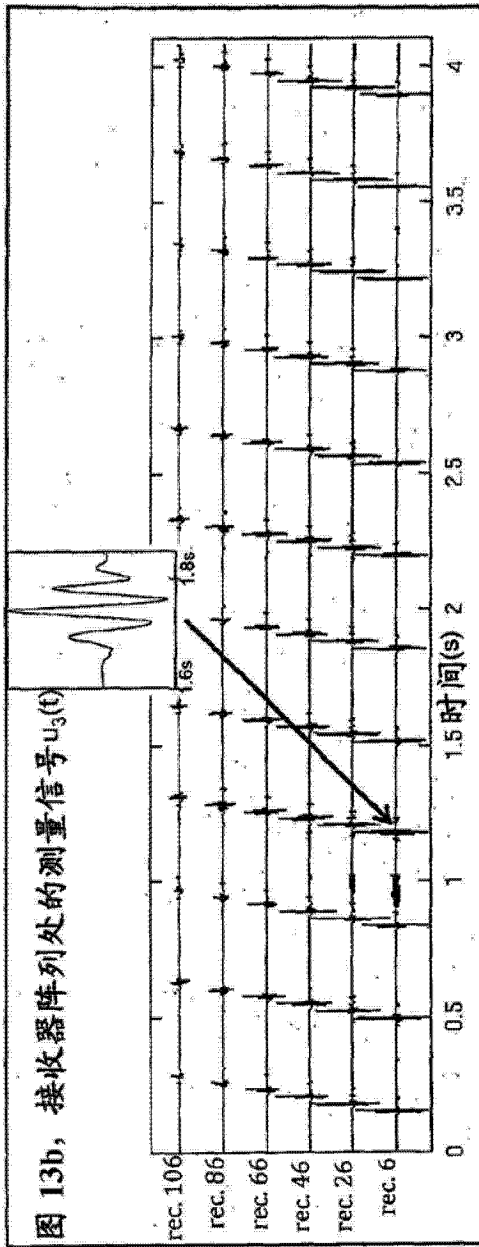
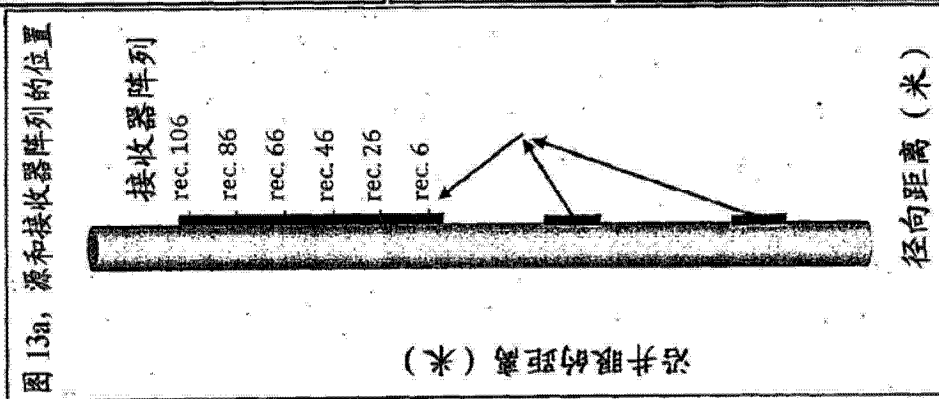


图 10







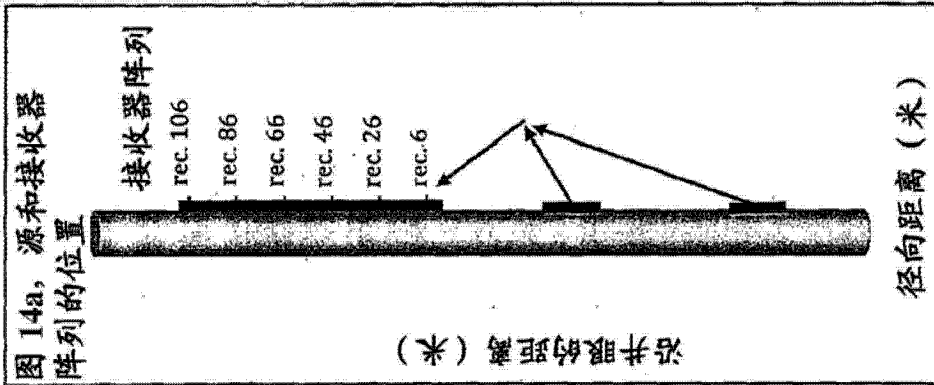


图 14b. 接收器阵列处的测量信号  $u_g(t)$

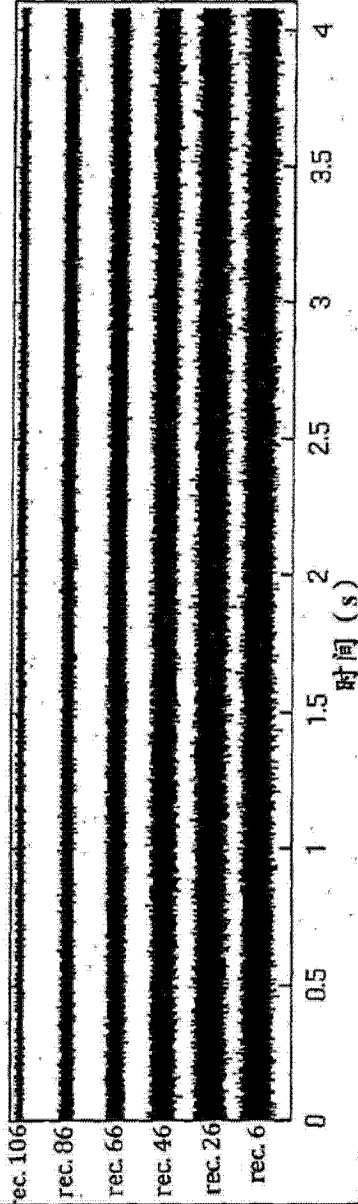


图 14c. 模板  $u_s(t)$

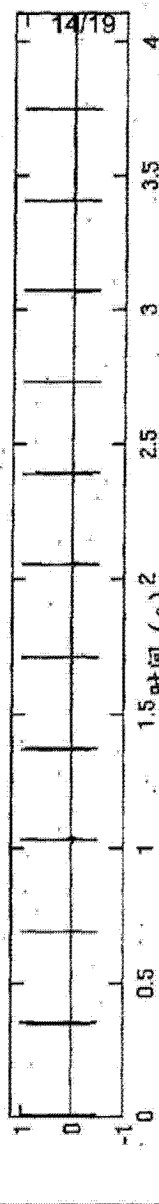
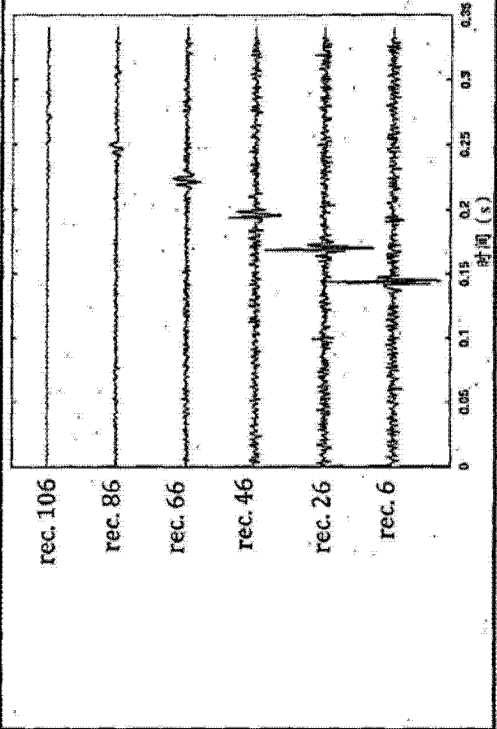
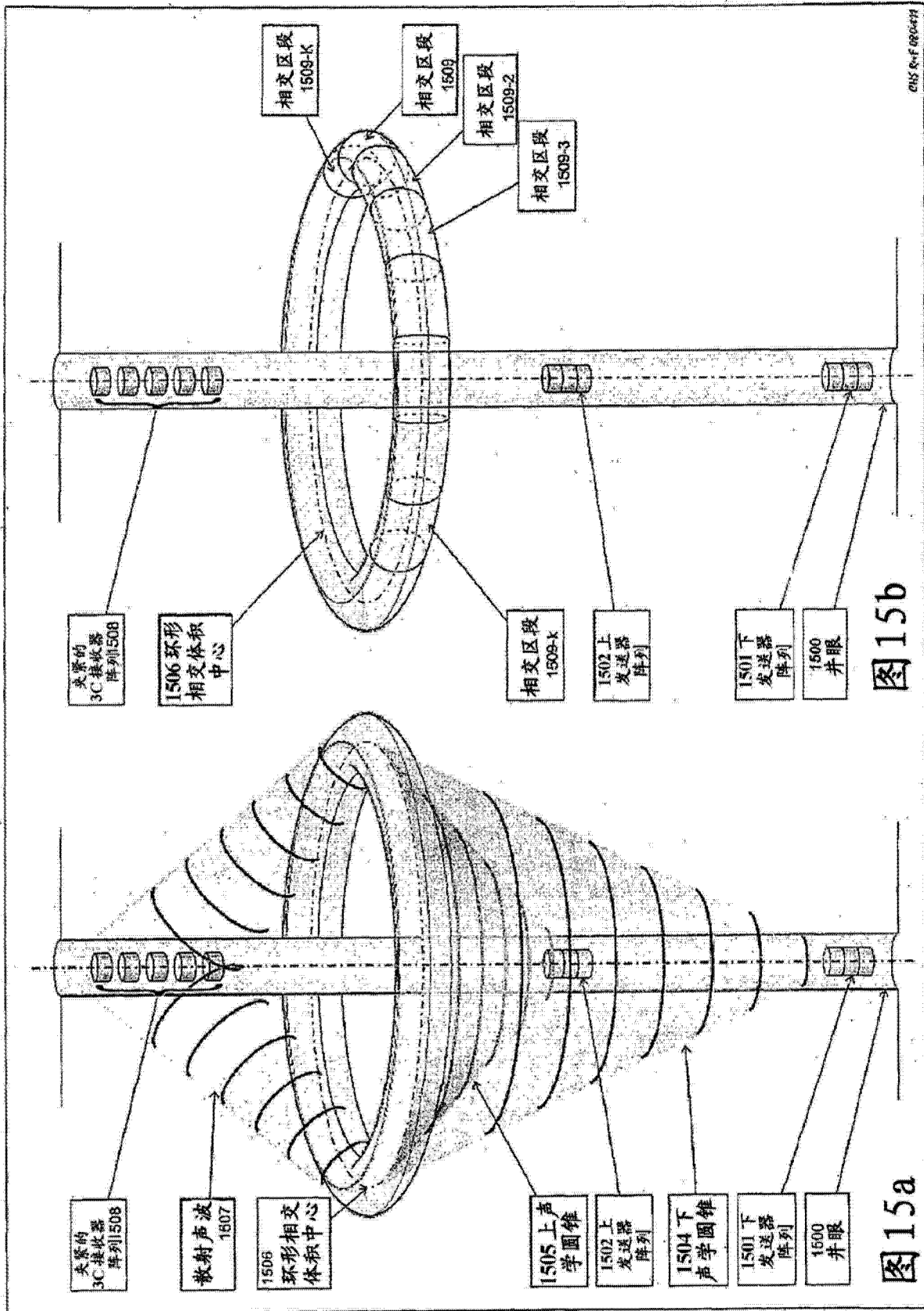


图 14d. 关联信号  $M(t)$





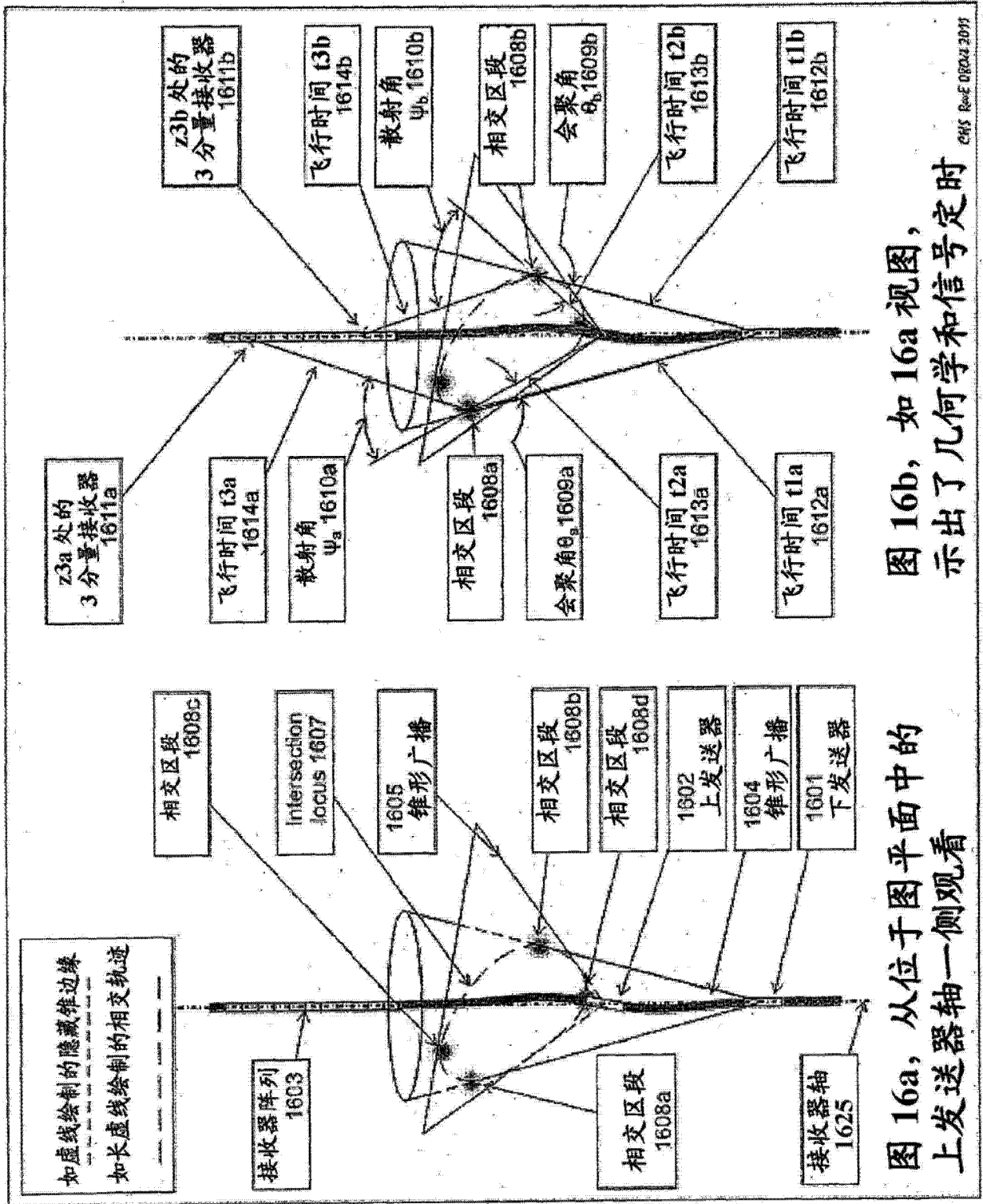


图 16b, 如 16a 视图,  
示出了几何学和信号定时

CHS Rev E 0702.2011



图17a

下圆锥与上圆锥完全相交

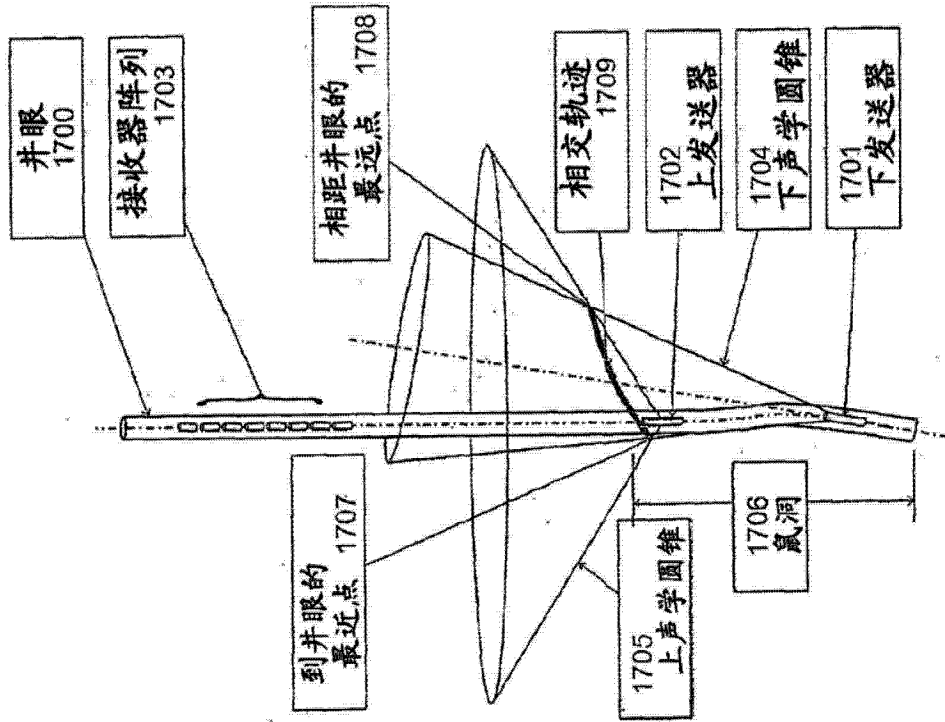
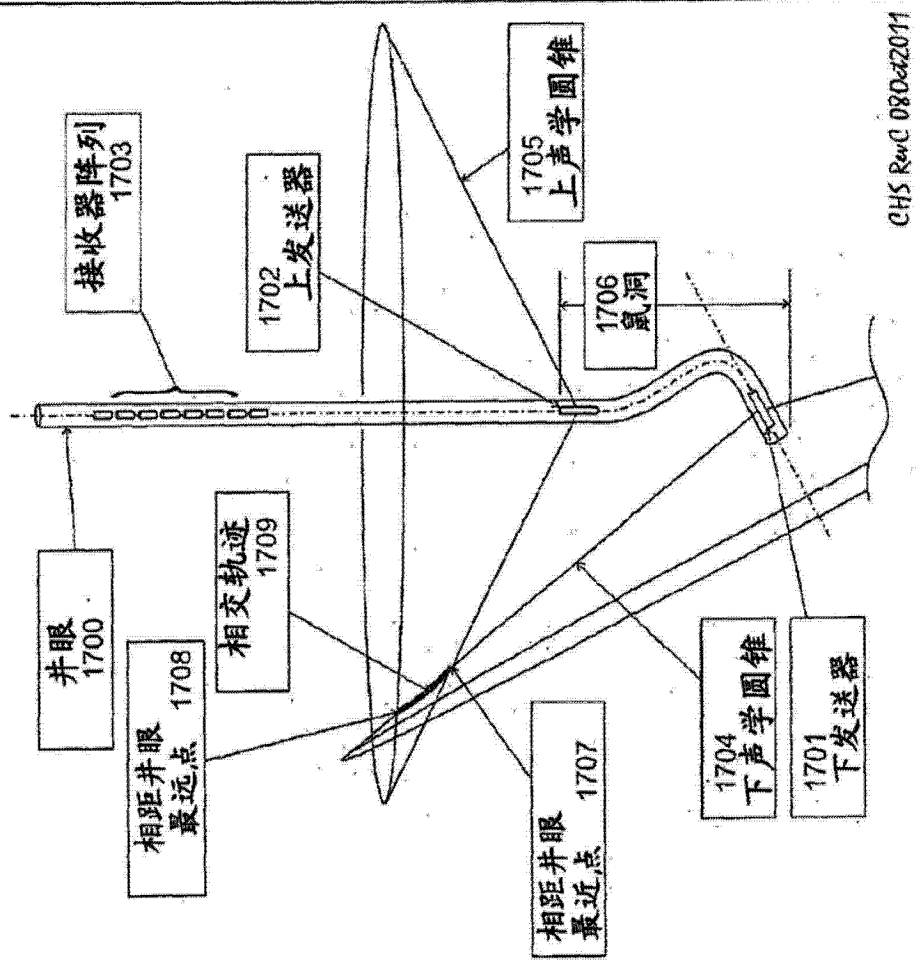
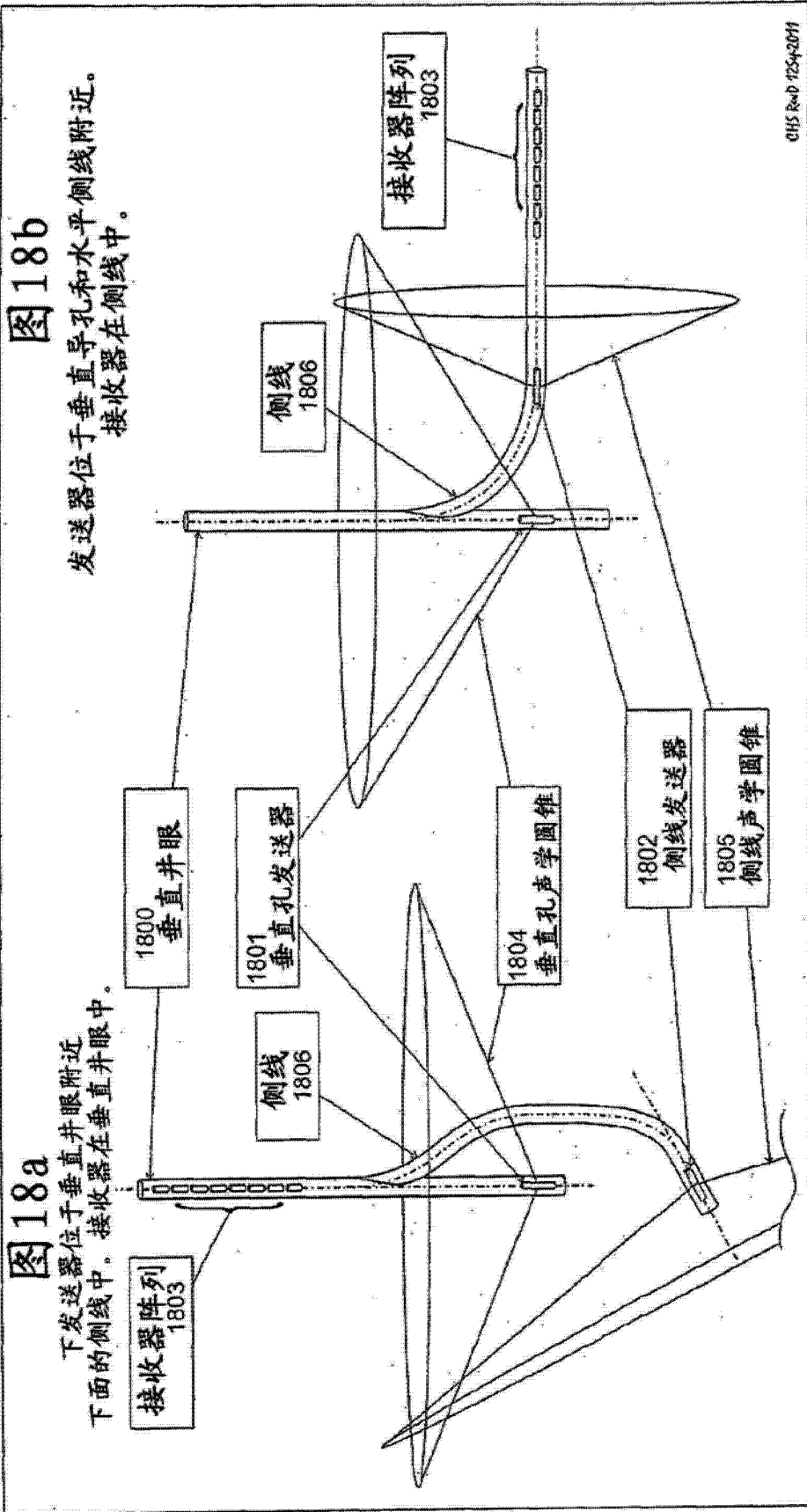


图17b

下发送器几乎垂直于井眼轴发送能量



CHS RevC 080-d2011



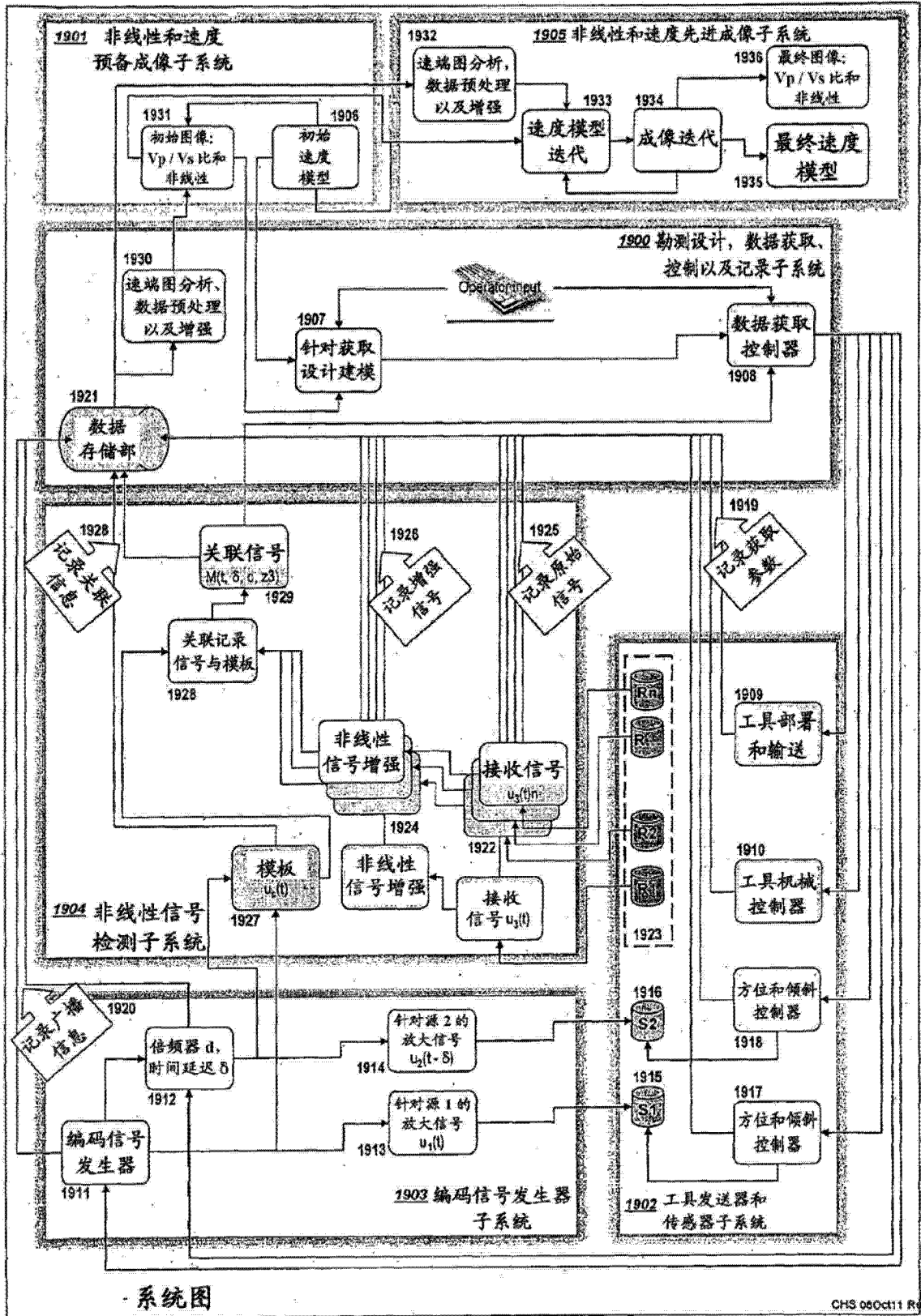


图 19