



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200410044684.1

[43] 公开日 2004 年 11 月 24 日

[11] 公开号 CN 1548986A

[22] 申请日 1999. 7. 30

[21] 申请号 200410044684.1

分案原申请号 99119117. X

[30] 优先权

[32] 1998. 7. 30 [33] US [31] 60/094677

[32] 1998. 12. 4 [33] US [31] 09/205965

[32] 1999. 7. 19 [33] US [31] 09/356844

[71] 申请人 施卢默格控股有限公司

地址 英属维京群岛

[72] 发明人 P·斯派尔 M·E·波伊茨施

S·F·克拉里

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

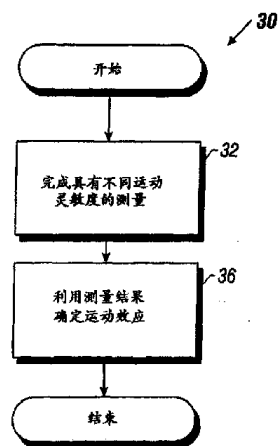
代理人 周备麟 郑建晖

权利要求书 3 页 说明书 28 页 附图 20 页

[54] 发明名称 利用运动检测装置检测井下测井仪
运动对核磁共振测量的影响

[57] 摘要

按照本发明的一个方面, 提供一种核磁共振测量装置, 该装置与一个样品之间可能有相对运动, 该装置包括: 至少一个磁铁; 至少一个线圈; 以及与所述的至少一个线圈相耦合并适合于采用所述至少一个磁铁和至少一个线圈的电路, 以便: 使存在样品中的不同区域中的自旋饱和; 完成这些区域的特性的核磁共振测量; 以及指示这些测量特性。按照本发明的又一方面提供一种可用于核磁共振测量装置的方法, 包括: 利用至少一个运动装置指示该核磁共振测量装置运动的特性, 完成对大地岩层区的若干核磁共振测量, 这些测量包括若干自旋回声; 检测这些自旋回声; 利用该运动特征校正该测量结果。



1. 一种核磁共振测量装置，该装置与一个样品之间可能有相对运动，该装置包括：

5 至少一个磁铁；

至少一个线圈；以及

与所述的至少一个线圈相耦合并适合于采用所述至少一个磁铁和至少一个线圈的电路，以便：

使存在在样品的不同区域中的自旋饱和，

10 完成这些区域的特性的核磁共振测量，以及
指示这些测量特性。

2. 一种可用于核磁共振测量装置的方法，包括：

利用至少一个运动装置指示该核磁共振测量装置运动的特性，

完成对大地岩层区的若干核磁共振测量，这些测量包括若干自旋回声；

15 检测这些自旋回声；

利用该运动特征校正该测量结果。

3. 如权利要求 79 所述的方法，其特征在于：所述至少一个运动检测装置包括一个磁场强度计。

4. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于：所述的至少一个运动检测装
20 置包括一个加速度计。

5. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于：所述的至少一个运动检测装置包括一个应变仪。

6. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于：所述的至少一个运动检测装置包括一个加速度计和一个磁场强度计。

25 7. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于：所述的至少一个运动检测装置包括一个应变仪和一个磁场强度计。

8. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于：所述应用步骤包括调整该测量结果，以补偿该运动。

9. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于：所述测量结果校正正是通过去
30 掉由该运动检测装置表示特性的加速度分量来完成的。

10. 如权利要求 2 所述的方法, 其特征在于: 表示装置运动的特性的步骤包括检测一平均运动半径。

11. 如权利要求 2 所述的方法, 其特征在于: 表示装置运动的特征的步骤包括检测该装置的瞬时取向。

5 12. 一种井下核磁共振测量装置, 该装置与大地岩层之间可能有相对运动, 该装置包括:

至少一个磁铁;

至少一个线圈;

至少一个表示该核磁共振测量装置的运动特性的运动装置,

10 与所述的至少一个线圈耦合并适合于采用所述至少一个磁铁和至少一个线圈以及所述至少一个运动装置的电路, 以便:

对大地岩层的一个区域完成若干核磁共振测量, 该测量包括若干自旋回声;

检测若干自旋回声;

15 根据表示特性的运动校正该测量结果。

13. 如权利要求 12 的井下核磁共振测量装置, 其特征在于: 所述至少一个运动检测装置包括一磁场强度计。

14. 如权利要求 12 的井下核磁共振测量装置, 其特征在于: 所述至少一个运动检测装置包括一加速度计。

20 15. 如权利要求 12 的井下核磁共振测量装置, 其特征在于: 所述至少一个运动检测装置包括一应变仪。

16. 如权利要求 12 的井下核磁共振测量装置, 其特征在于: 所述至少一个运动检测装置包括一加速度计和一磁场强度计。

25 17. 如权利要求 12 的井下核磁共振测量装置, 其特征在于: 所述至少一个运动检测装置包括一应变仪和一磁场强度计。

18. 如权利要求 12 的井下核磁共振测量装置, 其特征在于: 所述应用步骤包括调整该测量结果以补偿该运动。

19. 如权利要求 12 的井下核磁共振测量装置, 其特征在于: 所述测量结果校正通过去除由该运动检测装置表示特性的加速度分量来完成的。

30 20. 如权利要求 12 的井下核磁共振测量装置, 其特征在于: 表示装置运

动特性的步骤包括确定一平均运动半径。

21. 如权利要求 12 的井下核磁共振测量装置，其特征在于：表示装置运动特性的步骤包括确定该装置的瞬时取向。

利用运动检测装置检测
井下测井仪运动对核磁共振测量的影响

5

本申请根据 35U.S.C § 119 要求以 1998 年 7 月 30 日递交的流水号为 60/094677 的 U.S 临时性专利申请的申请日为优先权日, 本申请是 1998 年 12 月 4 日递交的名称为“Preconditioning Spins Near a Nuclear Magnetic Resonance Region”的流水号 09/205965 的 U.S 专利申请的部分继续申请。

10

发明领域

本发明总的涉及内外同步 (inside-out) 核磁共振 (NMR) 测量, 特别是涉及检测包围井孔的岩层性质、例如岩层之氢含量的 NMR 测量中井下测井仪的运动效应。

背景技术

15

核磁共振 (NMR) 测量可以用于测定一种样品例如人体组织 (为了医学成像目的) 或一种岩层结构 (为测井目的) 的性质。例如对于岩层结构, NMR 测量可以用于测定该岩层的空穴率、结构类型、渗透性和含油量, 并对上述各种性质进行勘测。

参看图 1, 作为一个例子, NMR 可以用在随钻测井 (LWD) 操作上, 以便对
20 岩层 10 的性质进行勘测。按照这种方式, 一个轴对称的 NMR 井下测井仪 6 可以是钻具组 5 的一部分, 该钻具组 5 用于在岩层 10 中钻出井孔 3。作为井下测井仪 6 的例子可以是在下述专利文件中描述的井下测井仪中的一种, 这些专利文件是: 1998 年 1 月 6 日授权于 Sezginer 等人的名称为 “Pulsed Nuclear Magnetism Tool For Formation Evaluation While Drilling Including a
25 Shortened or Truncated CPMG Sequence” 的 US5705927 号专利、1994 年 1 月 18 日授权于 Miller 的名称为 “System For Logging a Well During the Drilling Thereof” 的 US5280243 号专利, 1998 年 5 月 26 日授权于 Taicher 等人的名称为 “Nuclear Magnetic Resonance Well Logging Apparatus and Method Adapted for Measurement-While-Drilling” 的 US5757186 号专利, 1982 年 9 月 21 日
30 授权于 Jackson 等人的名称为 “Magnetic Resonance Apparatus” 的 US4350955 号专利或 1998 年 11 月 5 日递交的名称为 “Apparatus and Method for Obtaining

a Nuclear Magnetic Resonance Measurement While Drilling” 的流水号 09/186950 号 US 专利申请。

NMR 测量过程与大多数其它井下岩层测量相比有两个明显的区别特征。第一，来自该岩层的 NMR 信号是从一个小的共振体积，例如基本上薄的共振壳体或体积 20a（见图 2）中产生的，共振体积 20a 可以有一个正比于振荡磁场振幅和反比于静磁场梯度的径向厚度。随着共振区的形状不同，该共振体积可以扩展，作为一个例子，可以从在一个方向上小到 1mm 且在另一方向上长到几英寸。第二，该 NMR 的测量可以不是瞬时的，这两点结合在一起便使该 NMR 测量易于随井下测井仪产生一些运动，例如产生归于如下所述的 NMR 井下测井仪 6 在井孔 3 周边运动的那种运动。

为了进行 NMR 测量，NMR 井下测井仪 6 可以包括用于建立称为 B_0 的静磁场的的一个或多个永久磁铁；一个用于发射垂直于磁场 B_0 的随时间变化之磁场 B_1 的射频（RF）线圈即天线；和用于接收响应于 NMR 测量的来自岩层的自旋回波的 RF 线圈，即天线，这些将在下面描述。可以将这两个线圈组合成一个单个的发射/接收天线。

作为一个例子，NMR 井下测井仪 6 可以通过发射 NMR 检测序列（NMR detection sequences）以便使核产生自旋回波来测量岩层 10 中的氢核的自旋—自旋的弛豫时间 T_2 。接着可以对这些自旋回波进行分析，从而获得 T_2 时间分布，从该分布中可以获得岩层的性质。例如在图 4 中示出的 Carr-Purcell Meiboom-Gill (CPMG) 序列 15 就是一种这样的 NMR 检测序列。通过利用序列 15 可以获得 T_2 时间分布，这种分布可以用于测定岩层 10 的性质并对其进行勘测。

使用 CPMG 序列 15 测量 T_2 时间的技术可以包括下述步骤：在第一步骤中，NMR 井下测井仪 6 发射 B_1 磁场脉冲持续一段适当的时间间隔，以便提供一个 90° 的激发脉冲 14a，使那些原来沿着磁场 B_0 的方向取向的氢核自旋转动。虽然在图中没有详细示出，但每个脉冲实际上是一个射频（RF）载波信号的包络或脉冲串。当这些自旋偏离磁场 B_0 方向绕 B_1 转动时，这些自旋就立刻开始围绕 B_0 进动。当这些自旋转动 90° 到垂直于磁场 B_0 的平面中时，脉冲停止。这些自旋继续在这个平面内先是同步进动，接着逐渐失去同步。在第二步骤中，在跟随激发脉冲 14a 的固定时间 T_{cp} 内，NMR 井下测井仪 6 发射 B_0 磁场脉冲并持续一段时间（比激发脉冲 14a 长），以便提供 NMR 再聚焦脉冲 14b，使那些正在进

动的自旋转过 180° 的角度, 相对载波相移 $\pm 90^\circ$ 。NMR 脉冲 14b 使这些自旋再同步、并且发射一个辅助自旋回波信号 16 (见图 5), 该回波信号在使 NMR 脉冲 14b 180° 再聚焦后在称为 T_{cp} 的时间达到峰值。步骤 2 可以在 $2T_{cp}$ 间隔内重复 “K” 次 (此处 K 被称为回波数, 作为例子可以假设为从几到几千的
5 范围内的值)。在步骤 3 中, 在完成上述自旋回波序列后, 需要一段等待时间 (通常称为等待时间), 以便在开始下一个 CPMG 序列 15 以收集另一组自旋回波信号之前使这些自旋返回到沿磁场 B_0 的平衡状态。观察每组自旋回波的衰减, 并用于产生 T_2 分布。

T_2 时间表征在施加 90° 激发脉冲 14a 后使这些自旋不可逆地损失它们同
10 步进动的时间。照此下去, 在 90° 激发脉冲 14a 结束时, 所有这些自旋都指向在垂直于静磁场 B_0 的一个共同方向, 而这些自旋以一个被称为拉摩频率的共振频率相对一个完全均匀的磁场 B_0 进动。拉摩频率 ω_L 可以用方程 $\omega_L = \gamma B_0$ 表示, 式中 γ 是在研究中的那些核的回磁比。可是磁场 B_0 实际上是不均匀的, 并且, 这些脉冲激发的自旋大约在频率范围 $|\Delta\omega| < \gamma B_1$ 内, 其中 $\Delta\omega = \gamma B_0 - \omega_{rf}$
15 是失谐频率, ω_{rf} 是 RF 脉冲的载波频率。这样一来, 在激发后, 由于静态磁场 B_0 不均匀使这些自旋产生相移 T_2^* , 这种衰减是可逆的, 并且可以通过产生正弦回波信号的再聚焦脉冲 14b 使其反向。另外, 发生不可逆的相移 (自旋-自旋弛豫), 该不可逆的相移用 T_2 时间常数描述。这种效应引起回波振幅随 T_2 时间常数连续衰减。于是通常只测量 $T_2 \gg T_2^*$ 的自旋。

20 如上所述, T_2 时间分布可以用于测定岩层的性质。例如参看图 6, 岩层可以包括含有结合中流体的若干小空穴和含有自由的可开采流体的若干大空穴。 T_2 分界时间 (在图 6 中称为 $T_{\text{分离}}$ ($T_{\text{separation}}$)) 可以用于将 T_2 分布区分成两部分: 一部分包括一些比该 $T_{\text{分离}}$ 短的时间, 该部分表征结合中的流体, 另一部分包括一些比该 $T_{\text{分离}}$ 长的时间, 此部分表征自由的可开采的流体。

25 通常通过观察自旋回波信号 16 幅度的衰减来计算每个 T_2 时间, 该自旋回波信号 16 由一个特定的 CPMG 序列 15 产生。遗憾的是, 钻具组 5 (见图 1) 可能运动得过于迅速, 从而使 NMR 井下测井仪 6 不能精确地观察上述衰减。可是 T_2 时间与称为自旋点阵弛豫时间 T_1 的另一时间常数相关。时间 T_1 表征使这些自旋返回到平衡取向所需的时间。考虑到时间 T_1 和 T_2 两者, 可以认为每个自旋
30 在 T_1 衰减期间如同以很密螺距的螺旋线向平衡位置回动。幸好 T_1 与 T_2 时间

近似成正比。结果，可以用以 T1 为基础的测量代替以 T2 为基础的测量。事实上关于建立结合中流体分界值的早期工作是利用 T1 进行的，这些结果用 T2 表示出并且曾用于工业上。

以极化为基础的测量既可以用反转恢复程序也可用饱和恢复程序。在 1991 年 6 月 11 月授权于 Kleinberg 等人的名称为“Nuclear Magnetic Resonance Pulse Sequences For Use With Borehole Logging Tools”的 US5023551 号专利中描述了反转恢复程序的一个例子。在连同运动的内外同步状态下，使区域饱和比使区域完全反转或许更容易。因此可以推荐使区域饱和。

再返回参看图 2，通常利用以极化为基础的测量而不用上述的以衰减为基础的测量来测量 T1 时间。在这种方法中，每个以极化为基础的测量可以首先包括一个饱和程序，以便使在共振区内（如在图 2 中所示的圆筒形共振壳体即体积 20a）的自旋饱和。接着经过一个极化周期，以便使共振体积 20a 在磁场中极化。然后，利用一个检测序列例如 CPMG 序列，以便从岩层 10 产生自旋回波信号。再分析第一批少数回波信号的幅值，以便确定信号的幅值。因为只需观察第一批少数回波以确定信号的幅值，进行 T1 测量的持续时间比以衰减为基础的 T2 测量持续时间短，因此 NMR 井下测井仪 6 往往不太容易运动。上述检测序列可以以可变的等待时间连续重复（在相应的饱和序列后）几次，以便获得 T1 时间分布。

作为一个例子，可以利用以极化为基础的测量去测定在共振体积 20a 中的氢核的 T1 时间（见图 2）。在这种方式中，NMR 井下测井仪 6 首先可以在体积 20a 内自旋饱和。可是极化周期可能长到足以使 NMR 井下测井仪 6 产生明显移动（在图 3 中示出的从用标号“6a”指示的位置到用标号“6b”指示的位置），然后使 NMR 井下测井仪 6 接收来自共振体积 20b 的自旋回波信号（见图 3），该体积 20b 与先前饱和体积 20a 部分重叠。结果，这个新共振体积 20b 可能包括一个自旋未饱和的区（通常称为“运动的新鲜自旋进入”的效应），留下的只是原来的饱和体积 20a 的一部分。遗憾的是，当新鲜的自旋可能引起测量误差时，以极化为基础的 NMR 技术或许不能允许“新鲜的自旋”在极化期间进入。例如这些测量值可能错误地表示一个比实际存在于该岩层中结合中的流体体积（BFV）大的结合中流体体积。

识别由运动效应引起的潜在问题的方法可以用一种运动检测装置例如应变仪、超声距离探测器、加速度计，或者磁场强度计。在这种检测方式中，可以

用所述运动检测装置建立用于评价 NMR 测量质量的阈值。在 1997 年 12 月 29 日递交的名称为“Method for Formation Evaluation while Drilling” PCT/US97/23975 号 PCT 申请中描述了这样一种装置。可是一些传统的运动检测装置并没有指出具体的校正,而这些校正正在井下测井仪运动时对测量数据的补偿是必要的。

因此,继续需要用一种能更精确地检测井下测井仪的运动对 NMR 测量影响的装置。还需要一种能更精确地定量表示 NMR 测量中井下测井仪运动效应的装置。

发明概述

按照本发明的一个方面,提供一种核磁共振测量装置,该装置与一个样品之间可能有相对运动,该装置包括:至少一个磁铁;至少一个线圈;以及与所述的至少一个线圈相耦合并适合于采用所述至少一个磁铁和至少一个线圈的电路,以便:使存在在样品的不同区域中的自旋饱和;完成这些区域的特性的核磁共振测量;以及指示这些测量特性。

按照本发明的另一方面提供一种井下核磁共振测量装置,该装置与大地岩层之间可能有相对运动,该装置包括:至少一个磁铁;至少一个线圈;至少一个表示该核磁共振测量装置的运动特性的运动装置,与所述的至少一个线圈耦合并适合于采用所述至少一个磁铁和至少一个线圈以及所述至少一个运动装置的电路,以便对大地岩层的一个区域完成若干核磁共振测量,该测量包括若干自旋回声;检测若干自旋回声;和根据表示特性的运动校正该测量结果。

按照本发明的又一方面提供一种可用于核磁共振测量装置的方法,包括:利用至少一个运动装置指示该核磁共振测量装置运动的特性,完成对大地岩层区的若干核磁共振测量,这些测量包括若干自旋回声;检测这些自旋回声;利用该运动特征校正该测量结果。

附图简述

通过下面的描述、附图和权利要求书可以使本发明的优点和其它特点更加清楚。

图 1 是一个地下钻井的简图;

图 2 是沿图 1 中线 2-2 剖切的钻井的横剖视图;

图 3 是在 NMR 井下测井仪运动后该钻井的另一横剖视图;

图 4 和图 5 是表示 CPMG 脉冲序列的波形图;

图 6 是 T2 弛豫时间的典型分布;

图 7 是说明利用对井下测井仪运动而言具有不同灵敏度的不同测量来确定运动效应的算法的流程图;

图 8、11、12 和 13 是 NMR 测量井下测量仪的简图;

图 9 和 10 是表示在低和高梯度磁场中进行的测量中的运动效应的曲线;

5 图 14 是沿图 13 中线 14-14 剖切的井下测井仪的剖视图;

图 15 是说明用于获得根据 T1 和 T2 测量的运动效应的算法程序图;

图 16 是说明用于获得根据 NMR 测量的运动效应的算法流程图, 所述的 NMR 测量是在一些径向相邻的区域内进行的;

10 图 17 是说明用于确定根据自旋回波信号之形状的运动效应的算法的流程图;

图 18 是用于根据自旋回波信号确定运动效应的系统方框图;

图 19 示出了在运动情况下的图 8 中的系统的滤波器输出信号;

图 20 示出了在未运动情况下的图 8 中的系统的滤波器输出信号;

图 21A 示出对井下测井仪未运动情况下发生的自旋回波信号的谱响应;

15 图 21B 示出了对在井下测井仪未运动情况下发生的自旋回波信号的一个时间域响应的对称分量;

图 22A 和 23A 示出了对在井下测井仪运动期间发生的自旋回波信号的谱响应的对称分量;

20 图 22B 和 23B 示出了对在井下测井仪运动期间发生的回波信号的时间域响应的对称分量;

图 24 示出了对于在鞍点的几何测井仪运动期间发生的自旋回波信号的时间域响应的反对称分量;

图 25、26 和 27 是说明从一个实验装置上的模拟井下测井仪的运动中接收的回波信号的曲线;

25 图 28 是说明用于确定根据两个相邻的不同径向区域之初始饱和的运动效应的算法流程图;

图 29 是说明按照本发明的一个实施例的以极化为基础的测量的流程图;

图 30 是说明 NMR 脉冲序列的波形图;

图 31、34、36 和 38 是表明在一个共振区中饱和的等场强线图;

30 图 32、33、35、37 和 39 是从一个包围 NMR 井下测井仪的区域接收到的相

对信号振幅的图，表明饱和状态；

图 40 和 41 是说明对于具有和不具有自由交错的渐近周期的不同脉冲数目在共振区域中的饱和的等场强线图；

图 42 和 43 是说明对于具有和不具有自由交错的渐近周期的脉冲不同数目在共振区域中的饱和的等场强线图。

5 优选实施例详述

一个根据本发明的方法的实施例是通过利用 NMR 测量本身检测在该 NMR 测量期间的井下测井仪运动效应。按这种方式，该方法可以包括检测、表征和/或量化井下测井仪的运动效应。该方法可以用于对已记录的数据进行质量控制，
10 例如确定一个测量过的空穴率是否准确，确定回波振幅赖以精确的最大回波数，确定整个 T2 谱是否有效，和/或确定结合中的流体的测量是否精确，这些只是列举出的少数几个例子。如果运动测量的精度高到能精确量化运动效应，则可以修正测量的数据，以便抵消井下测井仪的运动效应。对于可以实时获得运动效应的指示的某些实施例，可以修正这种测量方法，以便抑制运动效应。

15 下面至少描述五种方式，这五种方式中可以通过 NMR 测量本身检测和量化井下测井仪运动，这五种方式分别是：1. 可以对来自具有不同灵敏度的回波衰减测量的 NMR 信号进行比较，以便获得运动效应；2. 可以对以 T1 和 T2 为基础的测量进行比较，以便获得运动效应；3. 可以在几个径向相邻的共振壳体内进行测量，以便获得运动效应；4. 可以分析自旋回波信号的形状或频率成分，以便获得运动效应；
20 5. 可以利用不同宽度的饱和区域以检测在若干个极化周期中的运动。

下述的某些技术允许进行一些适应测量数据的调整，以便抵消测井仪的运动。对于某些技术，这些必要的调整从测量数据本身看来可能是明显的；然而在那些从测量的 NMR 数据中不能直接看出修正的实施例例子中，可以将这些测量
25 数据与自旋动力学的模拟和井下测井仪响应和/或与井下测井运动有关的外部数据结合使用。这样一来，测量数据可以指示位移，并可以调节 NMR 测量的模拟，直到该模拟结果与观察到的位移相符为止。一旦发生这种情况，就可以在该模拟中使用的参数的基础上进行适应这些运动数据的调节。如果井下测井仪的稳定状态运动不变化，则可以用其它一些方法进行校正。

30 虽然下面描述的 NMR 测量技术通常可以成对组合在一起，但是可以用下述技术的不同组合确定运动效应。

在某些实施例中，下述的技术可以与运动检测装置使用，例如应变仪，超声测距装置，加速度计和磁场强度计等结合起来。这样，在某些实施例中，可以用（一些）运动检测装置检测最大的运动阈值，在该阈值下那个（那些）NMR测量可能是不可校正的或不可靠的。作为另一个例子，如果这个或这些运动检测装置不采用被下述技术所提供的附加数据就可能难于进行标定和解释，可以利用由一个或一些 NMR 测量完成的一些运动指示来对运动检测装置提供的运动指示进行解释。下述的运动检测装置和运动检测技术的其它应用组合是可能的。

如下所述，在某些实施例中，为了校正 NMR 测量和核查 NMR 测量的质量可以利用一个或几个运动检测装置本身检测和表征运动效应。

在本申请中，短语“运动”和“井下测井仪的运动”一般是指发生在样品与由 NMR 井下测量仪产生的那些场之间的相对运动。因此，根据具体的实施例，上述运动可以起因于井下测井仪的运动，样品的运动（例如样品是一种流体）或样品和井下测井仪两者的运动。

1. 用 NMR 测量检测和表征运动效应

A. 对具有不同运动灵敏度的一些回波串的衰减的不同测量的比较

参看图 7，根据本发明的一种方法包括：完成（程序 32）一些具有不同运动灵敏度的 NMR 测量，接着利用（程序 36）上述测量确定运动效应。随着具体的实施例的不同，可以在不同的时间和/或在不同的空间位置上完成这些测量。因为运动效应在响应来自不同测量的回波信号串上产生差别，所以可以分析这些回波信号串，以便获得例如尚能为对运动而言灵敏度最低的那个测量提供有用信号的最高回波数。

在某些实施例中，对运动的灵敏度可以通过改变共振区域的大小而改变，即通过测量不同场的几何特性（作为具有两个不同几何特性的例子是鞍点几何形状和梯度几何特性）或者通过利用不同梯度进行测量。例如，参看图 8，构成一个按照本发明的 NMR 井下测井仪 40，以利用两个不同梯度在两个不同位置上进行两个不同的测量。这样，NMR 井下测井仪 40 可以包括上部永磁铁 44、中间永磁铁 46 和下部永磁铁 48，这三个永磁铁外切于 NMR 井下测井仪 40 的内保护套 60。上部永磁铁 44 和中部永磁铁 46 产生一个径向轴对称的静磁场 B_0 ，而中部永磁铁 46 和下部永磁铁 48 产生另一个径向轴对称静磁场 B_0 。作为一个

例子, 因为上部永磁铁 44 和中部永磁铁 46 彼此靠得比中部永磁铁 46 和下部永磁铁 48 彼此靠得近, 所以上部磁场 B_0 的梯度比下部磁场 B_0 的梯度大 (这样上部对运动的灵敏度比较高)。为了方便起见, 在下面的描述中将下部磁场 B_0 用 LG 标出, 表示低梯度, 而上部磁场 B_0 用 “HG” 标出, 表示高梯度。

- 5 连同 NMR 井下测井仪 40 的其它一些部件一起, 井下测井仪 40 可以包括一个用于发射 B_1 脉冲并接收上部磁场 B_0 的自旋回波信号的射频 (RF) 线圈 54 和一个用于发射 B_1 脉冲并接收下部磁场 B_0 的自旋回波信号的 RF 线圈 56。线圈 54 和 56 可以与 (NMR 井下测井仪 40 的) 电子电路 42 相耦合, 连同其它器件一起, 该电子电路包括: B_1 脉冲发生器 43 和一个用于在向井上发射自旋回波指令之前存储接收到的自旋回波之指令的存储器 45。

电子电路 42 可以与运动装置 41 (如只作为少数几个例子举出的加速度计, 应变仪, 超声测距仪和/或磁场强度计等) 耦合, 上述运动装置指示 NMR 井下测井仪 40 的运动。这个指示可以在向井上发射之前由电子电路 42 进一步处理。

- 作为一个例子, 磁铁 44 和 46 的北极可以彼此面对, 以便产生一个具有从 NMR 井下测井仪 40 的纵轴线离开的径向延伸等场强线的磁场 B_0 , 与此类似, 磁铁 46 和 48 的南极可以彼此面对, 以便产生一个具有径向延伸到 NMR 井下测井仪 40 之纵向轴线的等场强线的磁场 B_0 , 在某些实施例中, 为了产生更均匀磁场 B_0 , NMR 井下测井仪 40 可以包括可导磁的套筒 50 和 52, 套筒 50 和 52 外接在套筒 60 上, 它们可以分别固定在上部磁铁 44 与中部磁铁 46 之间以及中部磁铁 46 与下部磁铁 48 之间。

- 作为一个更具体的例子, HG 磁场的强度可以为 17G/cm, 而 LG 磁场强度可以为 3G/cm。这样, 为了分辨脉冲幅值, 共振壳的厚度的比是 17/3。换句话说, HG 测量对运动的灵敏度约是 LG 测量对运动灵敏度的 6 倍。图 9 示出了由于同一运动引起的两个模拟衰减的例子 (HG 和 LG 测量)。在经一定的位移后, HG 信号已完全消失, 而 LG 信号仍保持。这个信号是否由于运动继续衰减或不衰减, 现在不能根据 HG 信号确定, 这进一步的衰减很可能取决于该井下测井仪的未来未知的轨迹。在图 10 中, LG 测量的时间基线是用梯度比刻度的。如图所示, 这两条初始衰减曲线如预期那样非常相似, 这两条曲线的歧离出现在回波数接近 200 之处, 这是因为对于模拟的圆周运动和场几何特性, 对失谐频率的变化率 $\frac{d}{dt} \Delta \omega$ 随时间改变。

- 在某些实施例中，可以把两个或两个以上的按标准制造的分别具有不同运动灵敏度的 NMR 井下测井仪单元重叠在一起，其中的每个单元可以建立不同的场几何特性，即建立不同运动灵敏度的因素。作为例子，这些单元中的一个
- 是 NMR 井下测井仪 60，NMR 测量井下测井仪单元 61（示在图 11 中），井下测
- 井仪单元 61（示在图 11 中），井下测井仪单元 77（示在图 12 中），或井下测
- 井仪单元 86（示在图 13 和 14 中）。参看图 11，井下测井仪单元 61 可以包括
- 外接在套筒 60 圆周上的上部永久磁铁 64 和下部磁铁 74。上磁铁 64 和下磁铁
- 74 彼此协同产生径向轴对称磁场 B_0 。磁铁 64 和 74 的北极可以彼此相对，以便
- 产生具有从 NMR 井下测井仪 60 的纵轴线离开的径向延伸等场强线的磁场 B_0 。
- 在某些实施例中，可以把一个导磁件 72 外接在套筒 60 的圆周上，并可以将其
- 固定在上磁铁 64 和下磁铁 74 之间。这种布置的结果是，导磁的套筒 72 使磁
- 场 B_0 聚焦，从而使磁场 B_0 的梯度最小，于是便产生一个比较均匀的磁场。单
- 元 61 可以包括也可以不包括套筒 72。这种布置的详细描述可以参看 1998 年 3
- 月 3 日递交的名称为 “Nuclear Magnetic Resonance Apparatus and Method For
- Generating an Axisymmetric Magnetic Field Having Straight Contour Lines
- in the Resonance Region” 的 US 流水号 09033965 和 1982 年 9 月 21 日授权的
- 的名称为 “Magnetic Resonance Apparatus” 的 US4350955 号专利，这两篇专
- 利文件在此作为参考被引用。

- 单元 61 包括例如线圈 66 和 70 的梯度线圈，这些线圈也外接在套筒 28 上。
- 线圈 66 和 70 可以固定在磁场 64 和 74 之间，以便使这两个线圈 64 和 74 为磁
- 场 B_0 提供一个正分量，根据具体的实施例该正分量可以（或不需要）与磁场 B_0
- 大致方向一致。在某些实施例中，可以把线圈 64 和 74 只形成为单个的一对电
- 流回路，或形成多个电流回路，使这些电流在数值上相等、环流方向相反。例
- 如线圈 64 和 74 可以形成一个鞍形线圈。例如在线圈 66 和 70 之间还可采用一
- 第三线圈 68。

- 在图 12 中示出了径向轴对称磁场 B_0 的另一个例子，该图示出了 NMR 井下
- 测井仪单元 77。该井下测井仪单元 77 包括永久磁铁 64 和 74，这两个磁铁可
- 以被一个外接在套筒 60 圆周上的环形永磁铁 84 代替，作为例子，该套筒 80
- 可以固定在梯度线圈 80 和 82 之间。与磁铁 64 和 74 相类似，磁铁 84 产生从
- 井下测井仪单元 77 的轴线离开的径向延伸的 B_0 等场强线。作为一个例子，磁
- 铁 84 的顶部可以形成磁铁 84 的北极，而磁铁 84 的底部可以形成南极。

在图 13 中示出一个产生不同于图 13 所示径向轴对称 B_0 几何特性的 B_0 磁场几何特性的井下测井仪单元 86 的例子。将该井下测井仪单元 86 设计成具有两维 (2D) 双极 B_0 , 该设计方案在 1994 年 1 月 18 日授权的名称为 “System For Logging a Well During the Drilling Thereof” 的 US5280243 号专利中有进一步描述, 这篇专利被本申请作为参考引证。按照这种方式, 井下测井仪单元 86 包括一个环形磁铁, 该环形磁铁建立一个如图 13 和 14 中所示的 B_0 磁场的双极图形分布。在上述井下测井仪中的对应物不同之处是, 井下测井仪 86 的 RF 线圈 92 和 94 与井下测井仪 86 的纵轴线不同轴, 而将 RF 线圈 92 和 94 排列成能在 B_1 场中产生一个双极图形分布的场, 以便在共振区内使 B_1 场的等场强线大致垂直于 B_0 的等场强线。井下测井仪单元 86 可以包括梯度线圈 88 和 90, 这两个线圈分别可以包括一个或几个用于产生梯度场的矩形环路, 该梯度场与由井下测井仪单元 86 的环形永久磁铁建立的 B_0 场一致。

可以利用除了梯度和场几何特性的技术之外的其它一些技术产生不同的运动灵敏度。例如共振区的大小影响运动的灵敏度, 于是可以通过改变在各个测量之间的 B_1 脉冲强度改变共振区的大小。对于这种技术 (在某些实施例中) 可以用同一测量装置, 例如上述的井下测井仪或井下测井单元中的一个。作为另一个例子, 可以通过在测量之间改变各个 B_1 脉冲之间的间隔来改变灵敏度, 因为对运动的灵敏度大致随该间隔的平方增加。作为另一个例子, 可以利用测量一些类似量但有不同运动灵敏度的不同脉冲序列。那么, 可以将 Carr-Purcell-Freeman-Hill (CPF II) 序列用于一种测量, 而将 CPMG 序列用于另一测量。

作为另一变化的实例, 可以将同一序列 (例如 CPMG 序列) 用于两种测量, 但可以使一个序列相对另一序列有所改变。例如一种测量可以用一个标准的 CPMG 序列, 而另一种测量可以用一个修改的 CPMG 序列, 例如包括修改的脉冲, 非 180° 再聚焦脉冲, 不同形状的脉冲和/或频率调制脉冲的 CPMG 序列。

上述技术的潜在缺点在于: 这些测量必须在时间和/或空间上分开进行。为了说明这些结论, 假设在不运动的情况下, NMR 信号 (因此和该测量的岩层) 在两种测量中是相同的。对于一个连续运动测井的测井仪, 这个状态不能始终满足。另外, 这个运动在这两种测量期间应该相同或至少具有相同的特征。因此, 在某些实施例中, 可以把上述的技术用于质量控制, 而不用于定量地确定

运动效应。然而，在其它一些实施例中，可以把上述技术用于定量测量，特别是通过在同一时间向多个体积提供脉冲或利用交错提供脉冲的技术，将这些测量作为建立在空间上（例如径向隔开）紧密地靠在一起的共振体积和使上述序列同时运行。

- 5 对钻孔的同时进行测井（LWD）的应用而言，钻具组的 NMR 的横向振动可能是最主要的运动。因此，将磁场选择为轴对称的，以便在转动同时使持续测量时间延长。因此，共振区的径向延伸可能是运动灵敏度的一个重要参量。

因为对于应用电缆 NMR 的共振区是打算用于高测井速度的，所以只要一些位移很大（例如大于 1 英寸），这些纵向位移就影响电缆 NMR 测量。可以利用
10 其它的设备，例如通过测量该电缆向井口的速度来测量这些大的纵向位移。对于电缆 NMR，横向运动可能是个问题，该横向移动是由梯度几何特性引起的，因为其壳体的宽度非常窄。在某些实施例中，对于电缆 NMR，这些测量发生在径向彼此隔开的一些壳体中，可以用一种能提供在空间上间隔很小且不使测量的垂直分辨率递减的不同梯度的技术。再结合经调整的脉冲幅度可以获得不同的
15 壳体的厚度（从而获得不同的灵敏度）。

B. 以 T1 和 T2 为基础的测量的比较：

一般说来，回波衰减测量即以 T2 为基础的测量的运动效应比极化即以 T1 为基础的测量的运动效应大，因此可以通过比较这两种测量来表征运动，这两种测量是对相类似的量进行测量，但其中一个是以 T1 为基础的测量，另一个
20 是以 T2 为基础的测量。对此参看图 15，具有观察优越性的方法 100 可以包括完成（程序 102）以 T1 为基础的和以 T2 为基础的 NMR 测量，接着比较（程序 106）这些测量结果，以便获得运动效应。这些测量不必非得按特定的顺序完成，这些测量可以以交互方式完成。可以用一个或多个上述讨论过的 NMR 测量测井仪或测井仪单元完成这些测量。

25 作为一个例子，可以完成一个以具有锥形截止的 T2 为基础的测量，以便测定结合中的流体（BFV），也可以完成以 T1 为基础的局部极化测量，以便测定该 BFV。然后可以比较这两个结果，以便确定运动效应。上述局部极化测量在测量体积中的磁化（体积的磁化将被后面的读出程序询问）是完全饱和的，而如果 NMR 测量测井仪在极化期间移出该饱和区，这样就把一些新鲜的自旋引
30 入到该测量体积内，使完全饱和可能不出现。然而如下面将进一步描述的那样，

如果在读出程序中回波少到 40, 该完全饱和的体积可以在运动状态下扩展到约 4 个共振壳体的厚度。通常可以如下所述的在读出程序的结尾利用适当的“预先处理程序”可以优化饱和。

为了比较以 T_1 为基础的测量和以 T_2 为基础的测量且进行定量的修改, 比值 T_1/T_2 必须近似或已知。然而, 如果所描述的方法只用于质量控制, 这个比值的精确值可能不是重要的。

C. 在相邻区域中进行的测量的比较

参考图 16, 另一种获得运动效应的方法 110 是观察在测量期间发生的测井仪运动导致的在附近一些区域中的自旋极化损失超出的预期量 (下面将进一步描述的效应)。作为结果, 该方法 110 可以包括使不同的区域饱和及完成 (方框 112) 在不同区域的测量, 接着利用 (方框 116) 测量结果确定运动效应。作为一个例子, 以 T_2 为基础的测量可以在一个内部第一共振壳体进行, 接着可以在一个邻近的外部共振壳体进行第二种以时间 T_2 为基础的测量。径向相邻的壳体只是一个不同区域的例子。在其它一些实施例子, 这些测量可以在其它一些区域中进行。

为了测定运动效应可以比较这些测量结果。这样, 在不运动的情况下, 来自在外部壳体中进行的测量的最大信号损失不应超过某一数值, 倘若如此, 可以按下面的描述检测运动, 然后量化。为了完成这些测量可以利用一个或几个上述的 NMR 测量的测井仪或测井单元。

更具体地说, 作为一个例子, 在壳体 1 中, 可以用一个大致具有多于 5 个脉冲 (例如 40 个脉冲) 的 CPMG 回波串。根据这个测量可以获得初始振幅, 即对应一些足够长的极化时期的空穴率 ϕ_1 。在最后的回波过后, 立刻按 $\Delta\omega$ 切换 RF 频率, 然后在一个径向邻近的壳体 II 内记录标准的 CPMG 回波信号串。这个回波信号串产生标准的回波衰减常数和初始幅值即空穴率 ϕ_{11} 。因为这两个体积靠在一起, 所以我们预料该岩层不会从一种状况变到另一种状况, 如果这两种测量不互相干扰, 我们可以预计 ϕ_1 与 ϕ_2 相等。在不运动的情况下, 在壳体 II 中的最大信号损失不超过比值 F 。如果 ϕ_{11} 不比 $(1-F)\phi_1$ 小很多, 则在上述第一序列期间, 在第一回波串的时间刻度上以及在该壳体厚度的一部分的长度刻度上都无明显的运动发生。因此来自第一序列的那些结果是可靠的。此外, 来自第二序列的那些结果好象也不太受运动的影响。于是, 壳体 1 的回波串提供精确的空穴率和结合中流体体积 BFV。壳体 II 的第二回波串提供

一个程度以 $1-F$ 为刻度的或许未失真的 T_2 分布。通过把这两个测量相结合来提高信噪比可能是值得怀疑的, 因为 F 是不确定的。

如果 ϕ_{11} 比 $(1-F)\phi_1$ 小很多, 则在第一序列期间在第一回波串上的时间刻度上和至少在壳体厚度的一部分的长度刻度上发生运动。于是第一序列的回波衰减可能被运动缩短, 因此, 不能用于确定 BFV 。另外, 第二测量可能不受运动影响。因此只有 ϕ_1 是可靠的。利用同样的推理, 如果第一脉冲序列是一个长的序列 (脉冲数比 100 大很多), 则能够检测对应一个完整 T_2 分布的信息。

如果在图 8 的 HG/LGLWD 的测井仪设计中, 这个方法是在高梯度条件下使用, 并且显示出没有运动效应, 则, 该 LG 甚至更可能不受运动影响。如果在第一测量期间没有达到饱和平稳值, 而且只要有足够多的关于 T_2 分布的信息 (例如, 来自以前的测量), 则可以获得有关在第一序列期间的传递运动的定量信息。

D. 自旋回波信号形状的分析

参看图 17, 另一种方法 120 通过观察测井仪运动时在检测脉冲串期间自旋回波信号频率成分的变化来表征测井仪的运动效应。方法 120 包括发出 (程序 122) 一系列 NMR 脉冲, 以便产生自旋回波信号。然后分析这些自旋回波信号 (程序 124), 以便测定运动效应。

如果测井仪在检测回波串期间不运动, 则自旋回波信号的形状和幅值由于磁化而发生初始变化, 该磁化不与沿着从回波信号 (每一脉冲系列的一个表征) 到回波信号的实际转动轴线一致。根据已知的测量参数预言的这些变化在一些回波信号中逐渐减少。对剩下的序列, 回波信号的幅值随着自旋的弛豫而衰减, 但回波信号的形状保持不变。

为了检测回波, 应对相当数量的回波信号数字化, 通过把这个输入的信号矢量与一个滤波器矢量相乘, 然后计算合成矢量来计算该回波能量。为了优化信噪比, 而使该滤波器矢量具有期望回波的形状。如果该回波偏移这个形状, 则将获得一个减小的信号, 甚至这个回波最大值与原来相同

图 18 示出一个可以用于反映测井仪运动效应的系统 126。系统 126 包括至少如下所述的两个不同类型的滤波器 128 和 130, 系统 126 可以用于检测井下测井仪的运动。作为一个例子, 在某些实施例中, 系统 126 可以是 NMR 井下

测井仪的电子线路的一部分。然而，在另一些实施例中，系统 126 可以用于处理由 NMR 井下测井仪提供的测井数据。

图 19 示出在没有运动情况下用两个不同回波检测滤波器记录后的回波串。回波串 140 是由宽带滤波器（滤波器 128，作为例子）检测，而回波串 142 是由匹配的带阻滤波器（滤波器 130，作为例子）检测。宽带滤波器的一个简单的例子应是除了在回波的最大值处之外都为零值。如图 19 所示，如果井下测井仪不发生运动，用这两条曲线 140 和 142 表示的回波串的衰减互相成比例。然而，如果发生运动，这些衰减不再互相成比例，这正如图 20 中的曲线 140 和 142 中所示那样：这两条曲线由于运动而比较快地衰减，但衰减的速率不同。带阻信号衰减较快。因此这种技术包括比较由匹配的宽带滤波器（滤波器 128 和 130 作为例子）提供的两个信号的比值来产生一个如被图 18 中的方框 132 所示的运动指示。或者更一般地说，该技术包括比较由不同滤波器检测的信号

5 的比值，所述不同的滤波器对运动具有不同的运动依赖关系。

滤波器 128 和 130 可以是几种不同类的滤波器，例如，除了上述的滤波器外，滤波器 128 和 130 中的一个可以是适于提供幅值随运动数值增加而增加的输出信号的滤波器。

15

图 21A, 21B, 22A, 22B, 23A, 23B 和 25 示出了在以下各种情况中在频率和时间域上理想化的回波形状，即：在没有运动的情况下[（见图 21A（频率域 350）和图 21B（时间域 352））]；就轴对称的梯度几何特性而言，在存在运动的情况下[见图 22A（无运动的频率域 354 和有运动的频率域 356）和 22B（无运动的时间域 358 和响应运动的时间域 360）]；以及就鞍点或非定向梯度几何特性而言，在存在运动的情况下[见图 23A（没有运动的频率域 362 和运动的频率域 364），23B（没有运动的时间域的对称分量 368 和时间域的对称分量 366）和 24（有运动的时间域反对称分量 370）]。

20

每个回波信号是一个复数矢量。通过相位校正所输入的回波信号，将这个合成信号分解成一个吸收的（对称的）实数分量和一个弥散的（反对称的）虚数分量。反对称分量经常（但不总是）大至为零，因此被忽略。然而，如图 24 所示，对于具有鞍形点几何特性的运动的情况下，虚数弥散分量 370 不为零。这两种场几何特性在井下测井仪运动的情况下对自旋在静磁场中运动的方式是不同的：在轴对称梯度的情况下，对于朝向较低 B_0 运动的每个自旋，有某个自

25

30

旋会朝向较高 B_0 运动。这将引起在吸收通道内的信号的对称分裂和在弥散通道中的一些信号的抵消。对于鞍形点几何特征，测井仪的横向运动使自旋径向离开鞍点运动。不管是否朝向或离开测井仪，这个运动始终是朝向较低的 B_0 。因此，运动归结为平均信号频率净移动和归结于在时间域内的一个非零的弥散信号。

在图 25 中示出回波形状变化的例子，这个图用于模拟线性梯度场中锯齿形运动中的情况。样品是水，该样品位于一个放置在 B_0 的鞍形点中心的一定尺寸的 Hassler 线圈中。利用下述技术模拟这个运动，在第一 50 个回波期间，使频谱仪的工作频率 ω_{rf} 线性增加，在从回波 50 到回波 100 期间使频率线性回到起始频率。

如图所示，为了显示回波信号 10 至 40，使那些已激发的自旋离开共振状态运动，使吸收的回波形状发生变化（用曲线 160 表示）。耗散的信号（用曲线 162 表示）也增加。

在图 26 中示出了合成的傅立叶变换回波信号，回波的最大值随锯齿运动的频率变化。在不运动的状态下，回波的幅值由于 T_2 的弛豫在脉冲序列结尾将下降到 0.8 左右。在图 27 中示出了用于获得表征回波信号的幅值的不同情况的结果。菱形符号表示在回波最大值处选取的吸收通道中的信号幅值。如上所述，这构成一个非常宽频带的、但带噪声的检测滤波器。十字线表示对吸收的信号 R 的所有样品的（规一化的）和，上述吸收信号 R 等同于在积分前把一个平方滤波器用于时间数据上。这个积分表示优化窄带滤波器的严格的信噪比，该信噪比受运动的影响比受回波的最大值的影响大得多。通过比较两个测量，在这种情况下可以无歧意地检测由于运动引起的衰减。通过利用噪声的但受运动影响较小的空白带数据来代替信噪比优化的窄带数据可以使运动效应最小。

参看图 27，实线表示用等权重对那些试样的幅值 $\sqrt{R^2 + I^2}$ 求和的结果，式中 I 表示弥散信号。因为通过改变频谱仪的工作频率来模拟运动，所以所有的自旋都曾精确地经历同样的频率变化，与在鞍点几何特性中的运动效应类似，在这个实验中出现耗散信号。如上所述，在轴对称梯度几何特性中，横向运动使自旋位移到测井仪的低场强一侧，在相对的高场强位置上，这些自旋的弥散信号消失。如果可能（例如在鞍形点几何特性和非轴对称梯度几何特性中），

则以模数值的方式检测的回波可以近似提供如同选取回波最大时那样的对运动的灵敏度。它的优点是能提高信噪比，其缺点是有一个不得不扣除的非零的噪声背景。

通过分析回波形状测定运动的方法的至少一个优点是：这种技术不需要附加的 NMR 测量（这些测量将占用宝贵的测量时间），这种技术反而是对测量本身毫无损害地从 NMR 测量中获得的副产物。因此，与在此描述的以 NMR 为基础的运动测量不同，在 NMR 测量与运动测量之间没有任何时间间隔和空间间隔。另外，测量精度适合于被测量的效应。因此，这种技术可以用于定量表征在 NMR 测量中的运动效应。

10 为了消除因“内外同步”NMR 的信噪比通常较小而引起的问题，可以用两个方案，第一个方案是把这些未处理的回波形状叠加，然后只对叠加的回波进行上述分析。当然，它只能获得平均的测井仪运动参数。尽管如此，仍可以分出是由于测井仪运动还是由于 T2 弛豫引起回波衰减，以便供获得平均运动参数的情况使用。然而，对于非轴对称梯度几何特性的情况，在横向通道中由反对称运动引起的信号平均为零，因为其符号取决于运动方向。因此，在这种情况下，应该把反对称信号幅值以模数值的方式叠加。虽然反对称的鞍点几何特性经受了横向运动，但在耗散通道中的信号总是具有相同符号。

第二个方案是对每个回波串中的相邻的回波求和，直到信噪比能满足分析为止。为了使结果精确，这种技术要求运动应慢到足以在整个叠加的回波组中的频率成分基本上不变化。

E. 比较来自不同宽度的饱和区的测量

在某些实施例中，上面讨论过的技术可以较好地适用于在高至接近共振区横向厚度的测量期间的井下测井仪的运动。然而，井下测井仪随时可以自由地在井孔中从一个壁到另一个壁运动，并超过共振区的横向厚度。为了适应这些较大的运动，可以采用极化即以 T1 为基础的 NMR 测量，因为这些测量依靠检测信号的幅值，而不依靠检测 T2 的分布。然而，这些方法依赖于全部自旋饱和。使大体积饱和的技术将在下节中描述。按照这种方式，如果测井仪运动到饱和区之外，则就使不完全饱和的新鲜的自旋运动到测量区域中，并且由于增加测量的幅值而影响测量。这样一来，就可以利用极化方法检测这个状态，从而检测测井仪的运动。

因此,在某些实施例中,可以用 NMR 测量(例如上述的测井仪)完成具有等效饱和脉冲系列的极化实验,还可以应用具有上述的不同运动灵敏度的测量。例如,可以利用一个高梯度(HG)场和一个低梯度(LG)场测量结合中的流体体积(BFV),然后可以比较这些结果,以便测定运动效应。利用 HG 和 LG, 5 可以获得在运动显著大于共振区的横向厚度的运动情况下的运动效应。

在某些实施例中,可以通过比较两种利用不同饱和脉冲系列以产生不同宽度饱和区的处于相同梯度的测量来检测在极化期间的横向位移。这可以通过例如利用对于饱和脉冲的不同的自旋取向角(flip-angle)或一些在下面的预调节自旋的说明中描述的其它技术而获得。参看图 28,按照本发明的方法 164 可以 10 以使具有预定宽度的第一区域饱和(程序 164)。接着,方法 164 包括使具有不同宽度的另一区饱和的步骤。在上述第一和第二区完成测量,然后比较这些结果(程序 174),以便获得运动效应。

虽然这些比较方法能对测量的质量进行控制,但不能对测量进行定量校正,因为这些测量是分别在不同的时间和深度下,即在可能是一些不同运动状态 15 的条件下完成的。只有在极化期间出现大位移和在回波检测期间存在可忽略的(相对 T_2 刻度)运动的情况下才可能进行定量校正。如果发生大的运动,则回波串不因运动而畸变,并且可以在长 T_2 分量中核查这些回波串。因为 $T_2 \leq T_1$, 出现比极化时间大的那些 T_2 时间可被认为是由经历过长极化时间的“新鲜的自旋”所造成的。为了区别 T_2 大于极化时间的那些自旋,回波串的持续时间 20 必须与该极化时间相当或大于该极化时间。在这种情况下,可以把这些自旋从分析中扣除。这样,这种技术可以用作一个质量控制标志。如果回波分析产生一些具有比在这个作用的极化周期中所预料的大的 T_2 分量,则这个实验系列的初始回波幅值是不可信赖的,因为它包含新鲜自旋的作用,而只有低 T_2 分量的幅值是可用的。

25 F. 预调整自旋

a 简介

本部分提出使得用于以 T_1 为基础的测量的大区域饱和的技术,并涉及在该饱和区域中的运动效应。在这种情况下,参看图 29,为了获得按照本发明的以极化为基础的 T_1 测量的方法的实施例 250 可以利用一种 NMR 测井仪,例如 30 上述的一些 NMR 测井仪和测井仪单元。该方法 250 包括使特性待测量的一个样

品的某一区域内的自旋饱和（程序 252）。接着经过预定时间间隔（程序 254）以便使在这个区域中的自旋至少局部极化。随后，方法 250 包括提供（程序 256）一系列检测脉冲（作为例子，可提供以 CPMG 为基础的脉冲序列，），以便从该样品的一个共振区产生自旋回波。

- 5 原则上，每个以极化为基础的 NMR 测量包括三个插入程序 252，254 和 256（见图 29），可以利用一个或几个测量以便获得每个 T1 值。当然，上述检测脉冲系列（即程序 252）可以用于完成饱和（即完成程序 256 的功能），并且在满足下述两个要求时可以省去程序 252，这两个要求是这些测量逐次重复（所谓“重叠”试验）和信号检测脉冲序列 268 完全使下次测量的磁化畸变。如果采
10 用这种技术，当第一测量在不正确的极化时间内完成的情况下，应将从第一测量获得的结果废弃。

- 从这三个基本程序 252，254 和 256 还可以产生其它一些变型。作为另一个例子，顺序程序 254-程序 256-程序 252 也可以用来完成每个测量，从编程的观点上看这个变型可能是具有优越性的。当利用上述的第二变型时，第一测
15 量被取消。只要能实现程序 252，254 和 256 的功能，可以对方法 250 作出其它改变。

- 饱和的瞄准点应是用射频（RF）辐射使一个大的区域或体积饱和，而不管饱和是否由明确的饱和程序或检测脉冲序列完成。如下面详细描述和通过模拟举例那样，随着具体的实施例的不同，可以通过提供一个 RF 脉冲序列，例如 CPMG
20 检测序列来产生饱和，这可满足为通过缓慢改变在 NMR 测井仪运动或不运动期间之外的脉冲序列的一个特性，通过随机地改变脉冲序列的所述特性，或者利用这些技术的组合达到那个期望的饱和。NMR 测井仪的运动可以使饱和区扩大，这将在下面进一步描述。

- 一个具有一些不变参量的简单的 CPMG 序列在自旋分布中形成一些所谓“空
25 穴”的陡饱和区。上述空穴烧穿（holeburning）现象正向远处蔓延，但因为这些空穴彼此明显分开，所以只使饱和降低。另外，只要在这些空穴的位置上的磁化发生畸变，继续上述序列可能不会进一步提高饱和，如下所述，通过“掠过”在该整个饱和体积内的那些空穴，NMR 井下测井仪的运动可以增加饱和密度。

- 30 为了使再聚焦脉冲数增加到为测量回波串的初始幅值所必需的再聚焦脉冲

标准数（例如 10），可以修改该 CPMG 检测脉冲序列。如果 NMR 测井仪在极化期间的运动始终与在检测程序期间 NMR 测井仪的运动相匹配，本方法可形成大饱和区域。但是如果 NMR 测井仪在检测的程序 258 期间是静止的，而在极化期间运动，则出现欠饱和。一些模拟（在下面讨论）表明即使在测井仪不运动的情况下，通过缓慢改变在整个时间的脉冲序列的特性也可以使饱和的范围扩大，以便扩大这个饱和区，这将在下面进一步描述。在本说明书中，术语“脉冲序列的特性”一般可以指例如脉冲指令的一个包络或一段 RF 下载波频率。作为改变该包络的可能方式的一些例子，该包络可以包括一串皆具有一段持续时间（所谓 t_p ）的脉冲 320（见图 30）。脉冲 320 可以（从中心到中心）分开所谓 t_d 时间间隔。在这种方式下， t_p 持续时间和/或 t_d 时间间隔（作为例子）可以改变，以便扩大饱和区，这将在下面进一步描述。

检测的脉冲序列（即用于饱和目的的脉冲序列）的特性不仅可以缓慢改变，而且也可以按脉冲一脉冲间的非相关的即随机的方式改变，这将在下面进一步描述。随机的极限是非相干的噪声辐射。上述特性的随机改变与其中饱和效应向远处波及的那个特性的缓慢变化形成对照，因为，该脉冲序列的相干的、非随机的特性占优势，结果，特性的慢改变可能形成一些被相继的脉冲逐渐烧穿的激发的远的失谐空穴。当然这些随机变化使该序列的相继脉冲对同一个空穴无作用。作为结果，脉冲的随机改变一般提供一个比较均匀的饱和密度。如下所述（用模拟说明）的那样，可以把这两种技术结合起来，以便提高饱和区的范围和密度图纹。还如下所述那样，如果在仅有的几个脉冲期间存在快到足以扫过把相邻空穴分开的整个距离上的一些空穴，则这些脉冲序列的相干组元发生畸变，并且一系列缓慢改变特性的脉冲可以实现类似于具有一些随机改变特性的脉冲序列。

如下所述，在 CPMG 序列中的再聚焦脉冲的取向角可能不需要大到能使在与某些其它变化（例如载波频率段的改变）结合的条件下产生失谐饱和区的程度，因此通过使 RF 脉冲变短，可以降低饱和和所需要的功率。在足够短的脉冲的情况下，空穴烧穿的影响可以略去。事实是，在脉冲间的自由回旋周期可以缩短，并可以在相当短的时间达到饱和。在很短脉冲的限制范围内，这种技术产生具有指定频谱的相干的噪声辐射，以便满足要求。在实践中，根据脉冲的最后的上升和下落时间设定脉冲持续的下限。如下所述，为达到饱和和所需要的

时间和功率与饱和带宽之间存在折衷方案。

b. 采用一个 CPMG 序列的饱和

在下文中，详细讨论利用一个 CPMG 序列的具有和不具有由慢运动引起的 $\bar{\omega}_0$ 变化的饱和的例子。作为一个实例，虽然上述描述具体参考了一个 CPMG 序列，但是上述的空穴烧穿可以被以大量重复的标准脉冲 (building block of pulses) 为特征的所有多脉冲序列完成。

在一个 CPMG 序列期间的重复的相干脉冲以 $\Delta \omega \gg \omega_1$ 激发选定的自旋，其中 ω_1 近似等于共振体积的径向厚度。

这些激发步骤随着 $\Delta \omega$ 增加变得越来越慢，但在具有大量空穴的情况中，这些激发要从脉冲到脉冲地汇总。由于横向磁化随 T2 衰减，所以那些选定的自旋变成“饱和的”。这些空穴的间隔（所谓 $\Delta \omega_h$ ）由上述脉冲序列的周期确定。不可忽略的脉冲持续时间和失谐效应引起某些偏差，使这些空穴的间隔 $\Delta \omega_h$ 近似地按下式描述， $\Delta \omega_h = \frac{2\pi}{t_e}$ ，其中 t_e 是从一个再聚焦的脉冲的开始到下一个再聚焦脉冲的开始的回波间隔。

与弛豫相关，这种简单的 CPMG 序列技术在某些失谐频率上引起空穴烧穿。在两个烧穿的空穴之间进行测量或许是不可能的，因为该测量区域的宽度 $\Delta \omega_s$ 扩大到 $\Delta \omega_s \approx 2\omega_1$ ，其中对于持续时间 t_p 的 180° 再聚焦的脉冲变为 $\Delta \omega_s \approx \frac{2\pi}{t_p}$ 。因为 T_e 总是大于 t_p ，所以 $\Delta \omega_s > \Delta \omega_h$ ，并且在共振区中可以有一些被烧穿的空穴。为了计算信号损失的程度，必须考虑场几何特性、弛豫时间和检测的带宽。

为了说明空穴的分布，图 31 示出了留在 $M_z=1$ 的纵向磁化作用中的空穴分布的计算的等场强线图的两维等场强线图 280（从模拟中获得），水平轴表示 ω_0 的线性变化，垂直轴表示 t_p 的线性变化。白色区域表示磁化作用的完全保守区，黑色区表示从 100%饱和减少，或反向磁化区。在 $\Delta \omega_0=0$ 时提供第一 CPMG 脉冲序列并示出了对在这个 CPMG 序列结束后立刻出现的失谐磁化作用 M_z 的影响。该 CPMG 脉冲的序列参数是 $t_e=500\mu s$ ， $t_{p180}=125\mu s$ ，其中 k 是再聚焦的脉冲=1000 的数目。弛豫时间要选择长一些，但为回波串的持续时间的一部分。在这个模拟中，最好用矩形脉冲。虽然，本发明的实施例可以用大致矩形的脉冲，也可以用基本上为非矩形的脉冲。在图 31 中，第一激发脉冲的效应没有被模拟。

图 32 示出了对几个弛豫时间的模拟的最后相对信号幅值 282 (即 M_z/M_{∞}), 这些相对信号幅值可以得到在变化了横座标 $\Delta\omega$ 的那个频率上的一个第二测量值, 该第二测量值在平均的 $\Delta\omega = \pm 0.75\omega_1$ 时对应 $\omega_1 t_p = \pi$ 随着从第一测量值 (如上所述的) 饱和而降低。这意味着这个载波频率 ω_0 已经在测量之间移动

5 $\Delta\omega$ 。这些相对信号幅值 282 分别与不同的 T_1 时间 (作为一个例子近似等于 $2 \cdot T_2$) 相关联。第二次测量的一些参数与第一次测量的一些参数相同, 并且脉冲的触发角被选为 180° , 在图中 (和在模拟中) 假设 $\frac{d\omega_1}{d\omega_0} = 0$, 即在轴对称的 B_0 和 B_1 梯度几何特性中, B_0 场在共振区的邻域中不变。在这种情况下, 水平刻度正比于在第一和第二测量之间的半径 (共振范围的) 的差。另外, 在上述半

10 径差比这两个半径小得多时 ω_1 是不变的这一假设近似成立, 这个事实证明了在图中选择不变的取向角是正确的。

从图 32 可以清楚看出, 饱和区基本上不扩大到 $2 \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega_1}$ 、即共振区的径向厚度的两倍之外, 如果共振区的径向移动小于 $1 \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega_1}$, 只要完全饱和, 下一个测量就开始。图 33 表明分别与在第一脉冲序列中的再聚焦脉冲的数目相

15 关的一些相对的信号幅值 284。正如所看到的那样, 在较小 $\Delta\omega$ 情况下的大多数饱和出现在第一次的十个回波内。在此和在下述的例子中, 选择 $T_1 = 2 \cdot T_2 = 100 \text{ msec}$ (毫秒)。

在第一 CPMG 序列期间的测井仪运动可以引起在一些邻近的共振范围内的损失增加。例如图 34 示出在第一脉冲序列期间对于一个测井仪的横向速度为-

20 $20\omega_1/S$ 时失谐的 M_z 磁化产生的等场强度线 286。水平轴线代表失谐频率 $\Delta\omega$ 与第一 CPMG 脉冲序列的 ω_1 (脉冲幅值) 之比。上述等场强度线描述了在第一 CPMG 脉冲序列之后留下的相对的纵向磁化作用。假设脉冲的幅值不变, 脉冲的参数和弛豫时间与上述相同。垂直轴线代表在具有载频 ω_{RF} 的第一 CPMG 脉冲序列中使用了多少再聚焦的脉冲, 上述载频正比于这个脉冲序列的持续时间。再聚焦

25 脉冲数 k 的范围从顶部图的 1 个再聚焦脉冲 (即一个分组间隔近似 500_s) 到底部图的 100 个再聚焦脉冲 (即一个分组间隔近似 50 ms)。在这个例子中, 在 50 ms 期间, NMR 测井仪通过 $+1\omega_1$ 距离, 这个距离大约是壳体宽度的一半。在开始时, 载频 ω_{RF} 相应于 $\Delta\omega = 0$, 在结束时, 载频 ω_{RF} 相应于 $\Delta\omega = +1 \cdot \omega_1$, 如图所示, 如果增加弛豫时间和/或回波, 则 NMR 测井仪的位移掠过自旋分布上的空穴,

30 从而使饱和密度增加。

在图 35 中示出了当对一个（矩形、为了模拟目的）宽度为 $\pm 0.75\omega_1$ 的壳体取平均时的最终的相对信号幅值（即 M_z/M_∞ ）288。从顶到底，幅值 288 表示相应于 $k=1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91$ 的结果。需要指出的是，这个损耗随着回波数的增加而增加，而对于回波数大于 10 而言，这个损耗比 NMR 测井仪不运动时的饱和效应强很多，这正如图 32 和 35 所示那样。这时饱和范围的宽度大于 $5\omega_1$ 。这个损耗在与自旋的弛豫时间可比拟的时间内增加，并且可以产生具有小 $\Delta\omega$ 的负信号。精确的分布图取决于运动和自旋系统的弛豫时间，对于比较短的弛豫时间，这个分布也变窄。

假设上面的 CPMG 脉冲序列中的脉冲最好是矩形脉冲。然而实际的“矩形”脉冲根本达不到理想矩形，但是应得到无限小的上升和下降时间。这就限制了包含在这些脉冲中的频谱宽度。在远离共振的状态下，烧穿的空穴的宽度和烧穿速度正比于在该空穴位置上的脉冲的频率分量的幅值。因此在某些实施例中，在远离共振状态下，空穴的烧穿可能没有在上述的模拟中有效。在某些实施例中，可以有意地使用非矩形脉冲。

对于在本申请讨论过的脉冲，宽频率分布是有利的。因此，在某些实施例中，具有尽可能短的上升和衰减时间常数的矩形脉冲可能是优选的。另外，通过改变脉冲包络的形状可以优化饱和范围，以便适应脉冲的频率含量。

一般说来，通过辐射一个具有缓慢变化参量的重复的多个脉冲序列和宽带脉冲可以产生在不运动状态下的向远处扩展的饱和。如果上述脉冲序列的参数在该脉冲序列被提供的同时缓慢改变，则烧穿的空穴的位置缓慢地在自旋分布上运动，并增加饱和。可变的脉冲序列的参数包括：

- *回波间隔 t_e 的改变；
- * t_p 的变化；
- *通过例如脉冲的幅度、场方向和载波频率 ω_{RF} 使 $\bar{\omega}_1$ 变化；
- * $\bar{\omega}_1$ 的变化，以及；
- *脉冲相的变化。

也可以使这些参数的组合变化及其他一些参数变化。通过实际改变 B_0 和 B_1 场（例如，磁铁间隔和 RF 功率的变化）或通过样品和 NMR 测井仪的相对运动使 $\bar{\omega}_0$ 和 $\bar{\omega}_1$ 变化。在这种情况下，样品相对 NMR 测井仪的运动可以由样品的运动（例如流体流动或扩散）或测井仪的运动引起。

另一种改变 ω_0 的方法是借助一个电磁铁或“梯度线圈”例如 NMR 测井仪 40 (见图 8)、测井单元 61 (见图 11)、测井单元 77 (见图 12) 或测井单元 86 (见图 13 和 14) 的梯度线圈改变静磁场, 当然, 这些仅是几个例子。因此, 作为上述的一些布置的结果是使自旋绕 $\omega_0 + \omega_0^{\text{梯度}}$ 进行。如果这两个矢量平行, 则效应最大。于是, 作为这个技术的结果, 不改变 ω_{RF} 也能改变 $\Delta\omega_0$ 。这对改变 ω_{RF} 是有利的, 因为具有高质量因数的天线的带宽限制了 ω_{RF} 的可能变化范围 (不进行重调, 因为如果通过利用机械开关切换电容器, 在至少一个饱和脉冲序列期间这是不实用的)。在某些实施例中, 这个方法的缺点可能是为了激励电磁铁需要相当多的能量 (与用作一个成像装置的磁铁相比), 这是因为必需改变整个饱和脉冲序列的幅值才能激发。为了利用梯度线圈 (或几个线圈) 有各种方法:

*在一整个脉冲 (B_1 场的) 期间在梯度线圈中建立恒定电流, 以便对这个脉冲有效地改变共振范围的半径;

*在一整个脉冲 (B_1 场的) 期间改变该梯度线圈中的电流, 以便在不改变 rf 脉冲频率的情况下产生“扫描脉冲”。随着实际参数的不同, 扫描脉冲可以使特定区域反相、激发特定范围或使该区域饱和;

*在这些脉冲 (B_1 场的) 之间激励梯度线圈, 以便破坏可能保持的横向磁化作用。如果这个梯度脉冲的持续时间 (所谓 $t_{\text{梯度}} (t_{\text{grad}})$) 短到能使取向角 $\alpha = \omega_0^{\text{gradient}} t_{\text{grad}} (\alpha = \omega_0^{\text{梯度}} t_{\text{梯度}})$ 在整个饱和范围内的变化可以略去, 这类似于随机地改变 B_1 场脉冲的相位;

*在梯度线圈中的电流可以随 B_1 场的每个脉冲同时脉冲地产生, 作为一个例子, 这种技术可以用在反向存储脉冲序列 (代替饱和脉冲序列) 中, 以便使绕 NMR 井下测量仪的大的区域反向;

*梯度线圈可以用于产生上述的随机的或连续的变量;
可以有其他利用一个或几个梯度线圈的情况。

C 具有随机变化的 CPMG 脉冲系列

也可以随机地改变 CPMG 脉冲序列的脉冲串的特性。作为一些实例, 例如每个脉冲的 t_p 持续时间可以随机地改变, 以便随机地产生例如 0° , 90° , 180° 和 270° 脉冲相位 (在一些典型的 NMR 谱仪上至少可以获得三个脉冲相位)。参看图 36 (示出了一个对应于不同回波数的相对信号损失的等场强线 290)

和图 37 (示出了一个在 $\pm 0.75\omega_1$ 径向体积厚度上求平均的情况下, 相应于不同回波数的相对信号损失的等强场线 292), 图中示出的例子中, 随机产生脉冲, 而且 NMR 测井仪不运动。除了脉冲相位无规则之外, 所有的自旋和脉冲参量与上述的那些例子相同。

- 5 如图中可以看出的那样, 在自旋分布中饱和烧穿出一些宽的和明显分开的带。饱和范围的宽度小于受运动影响的 CPMG 脉冲序列所产生的区域的宽度, 但饱和变化曲线比由 CPMG 序列形成的变化曲线平滑得多。这表明在共振范围的限度(利用相干特性)和可靠的定量的饱和变化曲线(利用随机特性)之间的折衷。应该指出的是, 由 CPMG 脉冲序列产生的变化曲线对于具有 $T_{1,2}$ (例如 100ms) $\leq t_m$ (例如 50ms) 的自旋而言是比较平滑的形状, 其中 t_m 是 CPMG 脉冲序列的持续时间。在这个随机相位序列期间发生运动能对 CPMG 脉冲序列的性能稍有提高, 并且使变化曲线保持平滑。

15 因为不是每个空穴都是以相同的“速度”烧穿而成, 所以出现一些没有完全饱和的带。随着位置 $\Delta\omega$ 的不同, 如从图中可以看出那样, 某些空穴甚至可能完全被消除, 作为一个例子, 在图 38 中, 所有的第四空穴都未出现。这些未充分饱和的点的位置取决于再聚焦脉冲的持续时间: 失谐状态, 一个持续时间 t_p 的脉冲使一个自旋绕其“有效的旋转轴”转动通过角度 α ($\Delta\omega$) $= \sqrt{\omega_1^2 + \Delta\omega^2} t_p$, 该旋转轴指出 $\bar{\omega}_1 + \Delta\bar{\omega}$ 的方向。那些非饱和的“节点”出现在 α 为 2π 的倍数处。因此通过改变 ω_1 , t_p 也可以使这些点饱和。

- 20 在图 38 (示出一个相应于不同回波数的相对信号损失的等场强线 294) 和图 39 (表示在 $\pm 0.75\omega_1$ 径向体积厚度上求平均时对于不同回波数的相对信号损失的图 296) 中示出了这种运动效应, 这是作为一个缓慢增加脉冲宽度(在图 30 中用“ t_p ”表示)的例子。在这个模拟中, 脉冲长度从第一再聚焦脉冲的 125 μ s (180° 脉冲) 线性增加到第 100 个再聚焦脉冲的 250 μ s (360° 脉冲), 同时 $t_{\text{自由}}(t_{\text{free}})$ (如图 30 中所示, 在脉冲间的间隔) 保持不变。所有的其它参量与先前的例子相同, 最终的饱和变化曲线比脉冲长度没有改变的变化曲线平滑且略为宽一些。

- 30 另外, 一般来讲, 通过改变脉冲序列的各种参量和在相干的和随机特性之间采取折衷, 可以在运动的特定范围内优化脉冲序列的饱和效应, 所述的各种参量例如是大致与烧穿的空穴间距成反比的 t_0 , t_p 和脉冲相位等。

上述的饱和脉冲序列的例子利用了远离共振空穴烧穿效应 (far-off-resonance hole burning effect), 以便产生饱和。如上所述, 持续时间为 t_p 的脉冲使自旋转动, 该自旋始终以大于额定取向角 $\alpha(0)$ 的角度 $\alpha(\Delta\omega)$ 不共振。因此, 对于具有 $\alpha(0)=180^\circ$ 的再聚焦脉冲 (即“ 180° 脉冲”), 该脉冲始终保持 $\alpha(\Delta\omega)>180^\circ$ 的远离共振状态。另一方面, 如果 $\alpha(\Delta\omega)=(2n+1)\cdot 180^\circ$, 则发生最佳激励和最佳激励远离共振。于是, 某一个自旋转动离开纵轴的有效的取向角是 $\theta=\theta_{\max}$, 而 $\theta_{\max}=2\arctan\left(\frac{\omega_1}{\Delta\omega}\right)$ 是对应给定 $\Delta\omega$ 的最大有效的取向角。因此利用 180° 脉冲产生非共振饱和可能浪费能量。

图 40 和 41 说明了与在脉冲序列中使用的再聚焦脉冲的 $\alpha(0)$ 有关的饱和曲线变化 (在共振壳体厚度上求平均)。其相位如上所述随机地变化。在图 46 中, 示出了在 $t_{\text{自由}}$ 进展时间 (即如图 30 所示的再聚焦脉冲间的时间间隔) 设定为 $375\mu s$ 时的相对信号损失 198。在图 41 中示出了在 $t_{\text{自由}}$ 时间设定为零时的相对信号损失 100。在图 40 和 41 两幅图中, 示出了对于 1 至 100 个脉冲在相应于 $9^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 180° 取向角下的信号损失 298 和 300, 所述的取向角是 $\Delta\omega$ 的函数。通过改变 t_p 脉冲持续时间可获得不同的取向角。正象从图中可以看到那样, 这些信号损失分布对于不同的 $t_{\text{自由}}$ 时间几乎是相同的, 因此, 在随机相位变化情况下, 上述饱和图纹主要由脉冲持续时间确定而不由自由进展时间 (free evolution period) 持续的长短确定。

通过脉冲的上升时间常数 (称为 t_r) 可确定与一个给定硬件一起使用的最小脉冲持续时间。如果 $t_p<3t_r$, 则脉冲在被断开之前不能达到最大的 ω_1 , 并且当 t_p 进一步减少时, 该脉冲迅速变得不太有效。对于一个测井的 NMR 装置, 一个合适的推定时间是 $t_r=5\cdots\cdots 30\mu s$ 。

当 t_p 减少时, 饱和范围变宽。实际上感兴趣的主要是具有 $|\Delta\omega|\sqrt{\left(\frac{2\pi}{t_r}\right)^2-\omega_1^2}$ 的范围, 即在两个内部未饱和节点中的具有 $\alpha(\Delta\omega)<2\pi$ 的范围。最大取向角 α 随 $\Delta\omega$ 增加而减少。因此饱和范围越宽, 用于产生饱和所需要的脉冲越多。如果在饱和状态的时间常数是 T_s , 则只有具有 $T_1>T_s$ 的自旋可以完全被饱和。因此可以在饱和的带宽与仍可以饱和的最低 T_1 之间取折衷。这也表明在一些实施例中, 通过使最小的 $t_{\text{自由}}$ 变成尽可能小的值来使脉冲序列尽可能短是有优越性的, 这可以借助可购到的硬件获得。

图 42 和 43 分别示出了相应具有 $t_{\text{自由}}$ (图 24) 和没有 $t_{\text{自由}}$ (图 25) 的脉

冲序列的损失 102 和 104。显示出的两个损失 102 和 104 是对应不同的弛豫时间的。对于 $t_{\text{自由}}=375\mu\text{s}$ 的情况,再聚焦脉冲的脉冲 100 的序列是 40ms 长,对于没有自由进展周期的情况,脉冲序列仅为 2.4ms 长。对于额定的取向角 $\alpha(0)=35^\circ$,这两个脉冲序列都可以使自旋随自由流体弛豫时间 ($T_1>50\text{ms}$) 饱和,但是,没有自由进展周期的那个脉冲序列可以使自旋以比 T_1 低 20 倍的时间饱和,时间 T_1 对希望要在结合中流体截断装置的下方消散自旋分布是必须的。在这两种情况下,产生饱和所需要的能量是 $100 \frac{35}{180} \approx 20$ 倍的用于一个单个 180° 再聚焦脉冲的能量,这个能量看来对一些下井孔 NMR 测井仪没有提出任何严重问题,这些 NMR 测井仪通常可以产生来自在 t_w 期间储存在电容器中的能量的数百个 180° 再聚焦脉冲串。

在一些实施例中,用包括自由进展周期的脉冲序列烧穿的曲线变化比用连续辐射烧穿的花纹稍微平滑一些。这可能是由在自由进展周期内发生的附加相移引起,上述自由进展时间在第二种情况下不存在,但也不严格这样。另外,如果将具有轴对称场几何特性的测井仪移动距离 $\Delta\vec{r}$,则每个自旋根据它的方位中的位置可以用频率间隔 $\Delta\omega = \frac{d\omega_0}{d\vec{r}} \cdot \Delta\vec{r}$ 表示不同的位移。这将引起实际饱和曲线变化的附加的有效平滑。

在上述的模拟中,利用一个随机数发生器选择四个脉冲相位。因此,脉冲序列的性能从一个序列到另一个序列稍有变化,而在一些实施例中,可以使用具有几个相位的预定脉冲序列,以便优化饱和性能。在一些实施例中,最优的参量变化可以是非周期性的变化。

II 为了校正和核查 NMR 测量的质量而进行检测和用特征表述的运动传感器的使用

如果测井仪的运动是已知的,则可以数字模拟测井仪的 NMR 响应,并在一些极限范围内,可以利用例如三种类型检测装置:加速度计,应变仪和磁场强度计校正运动畸变的测量数据。也可以用其它类型的运动检测装置,例如超声传感器。这些运动检测装置可以是测井仪或测井仪单元的电路 42 (见图 8,作为例子) 的部分。

磁场强度计记录瞬时方向,从而记录测井仪随时间的转动。这个信息用于帮助其它一些测量。例如,可以用磁场强度计来旋转在一个参照于加速度计的固定在大地上的框架中的其它传感器所测得的参数。可以用磁场强计扣除由测

井仪旋转引起的加速度分量。

- 可以利用加速度计描绘测井仪的轨迹特性，所述的轨迹是通过下述技术获得的，这些技术包括：a. 重复地对数据进行滤波（例如取出 DC 偏移，低频数字的和位移的噪声和高频的噪声，这些成分都与宏观的钻孔运动无关）；b. 对
- 5 加速度数据积分一次，以便产生一个随时间变化的速度轨迹，以及 c. 再次对上述速度积分，以便产生一个随时间变化的位置轨迹。可根据有用的物理假设选择积分常数。这些假设例如是在足够长的时间周期内的平均位移和速度是零。可以从一个或几个加速度计的测量中提取的有用信息包括关于运动幅值的信息；平均运动半径；运动频率；位置、速度和加速度的柱形坐标图；冲击记录
- 10 和表述，以及冲击静力学。在一些实施例，可以在测井仪的相对侧固定一对加速度计。这样使该对加速度计的灵敏轴指向同一方向，以便可以用所指示的加速度的和来获得测井仪的转动数据，以及可以利用指示的加速度差来获得测井仪的平移运动数据。

- 用应变仪直接测量钻具的弯曲，这些应变仪可以例如放置在钻孔里或在该
- 15 钻孔内的基座上。使该钻具的弯曲与装配这些应变仪的钻孔的截面的横向位移相关联。这样，这些应变仪即使用未知的比例因子可测量只在二重积分后才可能受到加速度计干扰的相同位移轨迹。因此，这些应变仪可以用于动态修改加速度仪的数据。例如这些技术之一包括识别具有零速度和位置的点并连续地调整以这个数据为基础的加速度积分。另一种技术是使用那些测定运动幅值的加
- 20 速度计和测定运动频率的应变仪。

特别是在低梯度运动和开始甚至与以 T1 为基础的方法相干扰的大幅值运动的情况下，上述的传感器的灵敏度足以表征这个运动，因此可用作对 NMR 测量的质量控制标志，也可以用从一个或几个传感器获得的上述数据校正回波幅值。

- 25 虽然已经用有限的实施例对本发明进行了描述，但是本技术领域的普通技术人员利用本说明书可作出种种改型和改变。权利要求覆盖了所有落在本发明的构思和保护范围内的这类改型和改变。

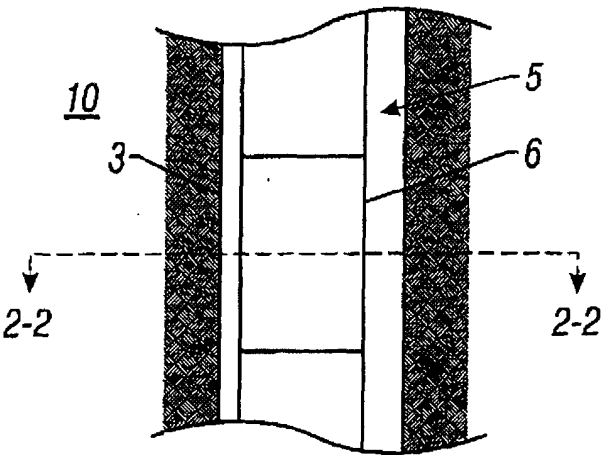


图 1
(现有技术)

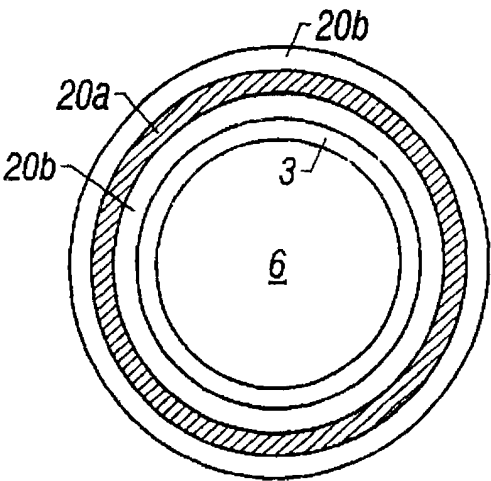


图 2
(现有技术)

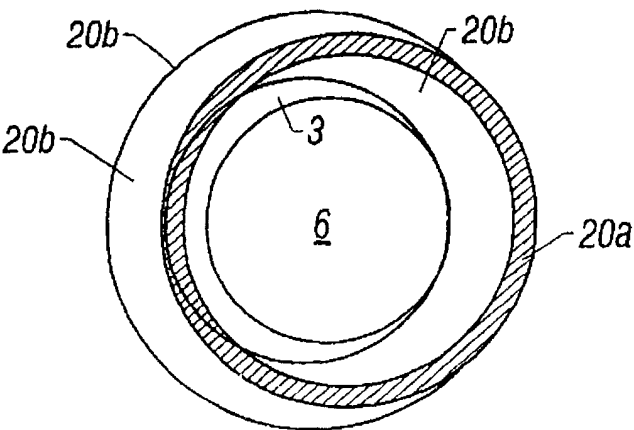


图 3
(现有技术)

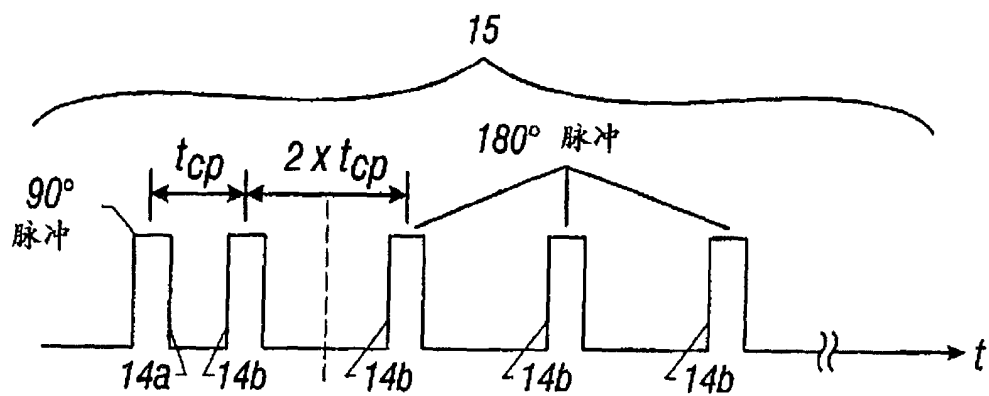


图 4 (现有技术)

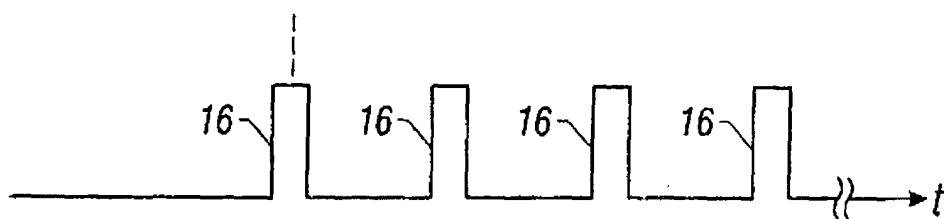


图 5 (现有技术)

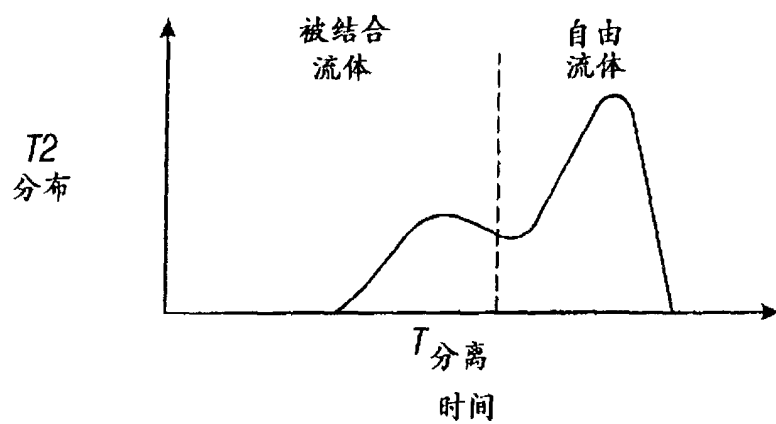


图 6 (现有技术)

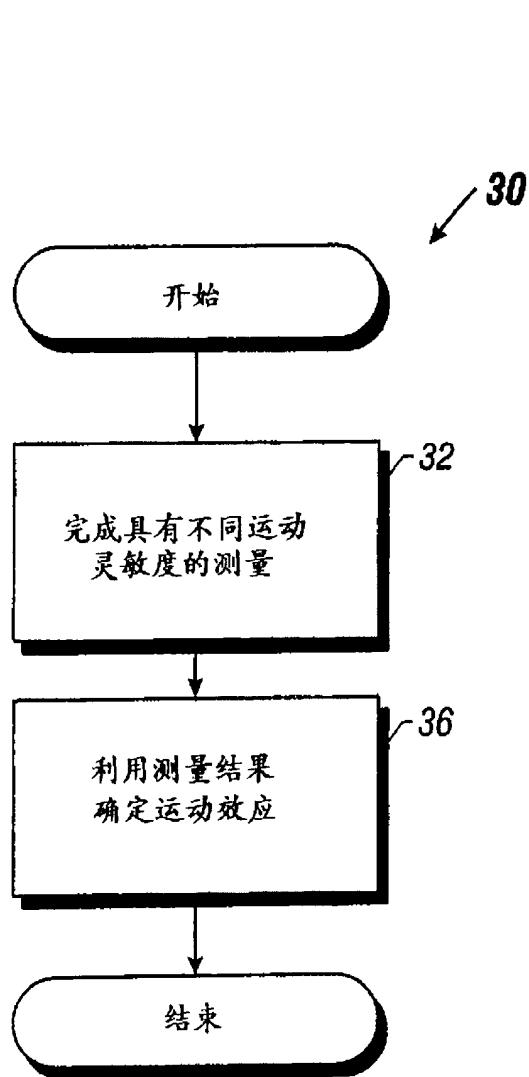


图 7

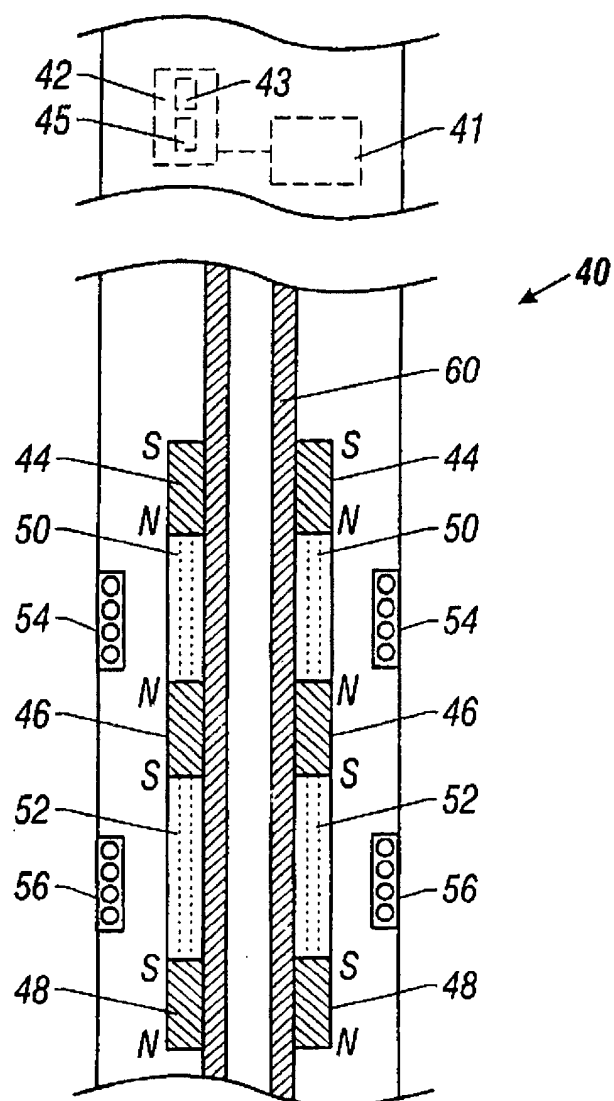


图 8

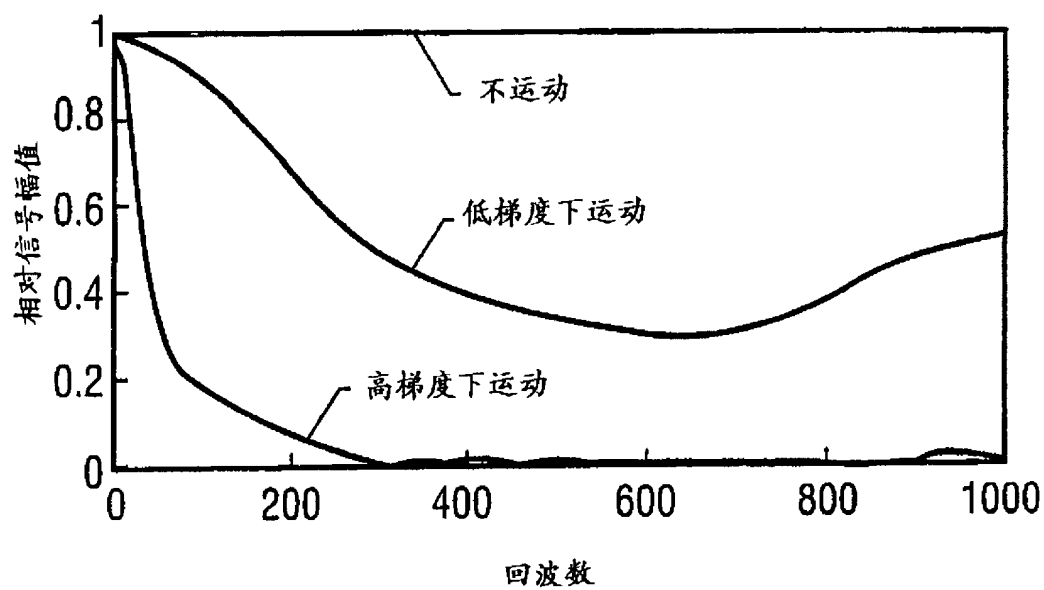


图 9

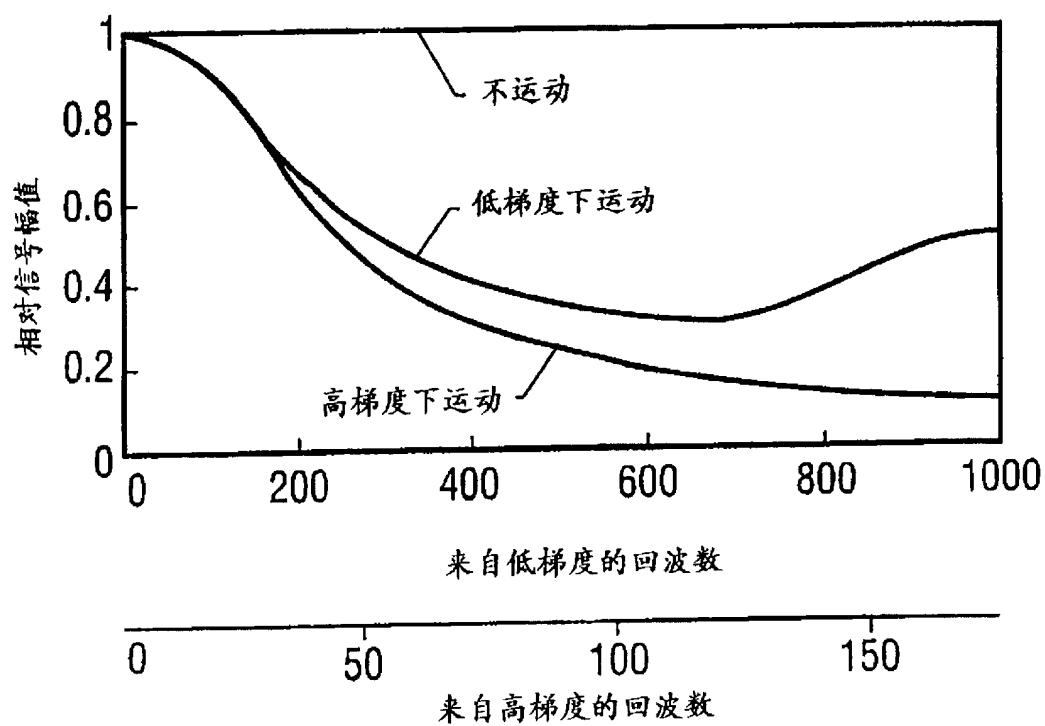


图 10

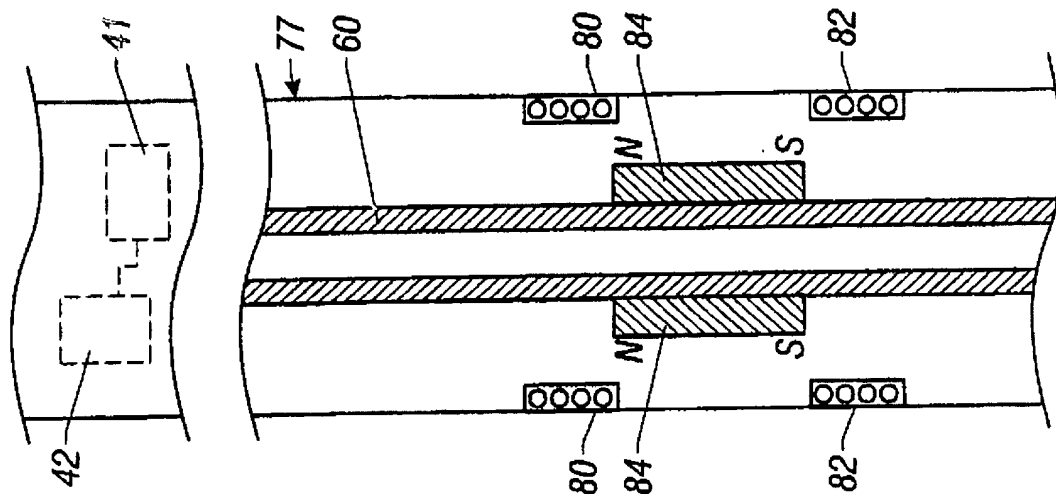


图 12

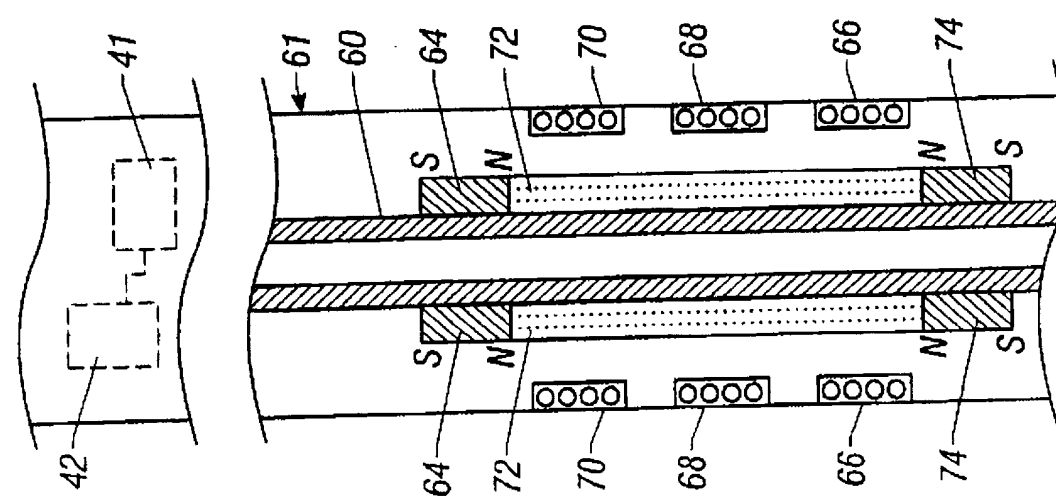


图 11

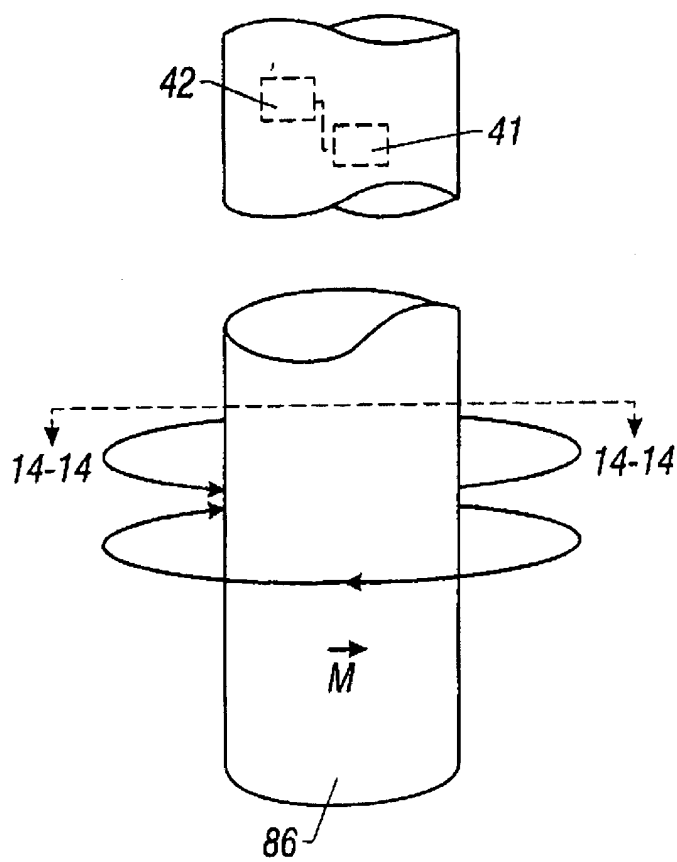


图 13

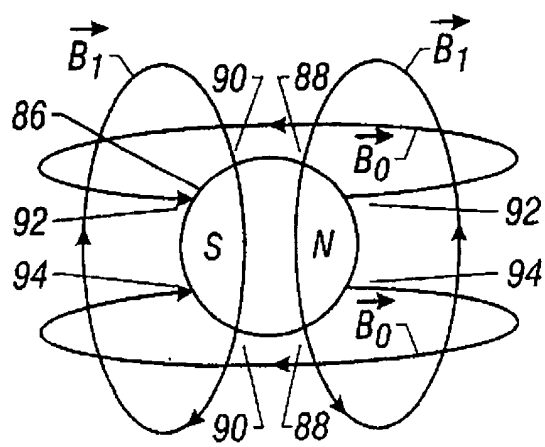


图 14

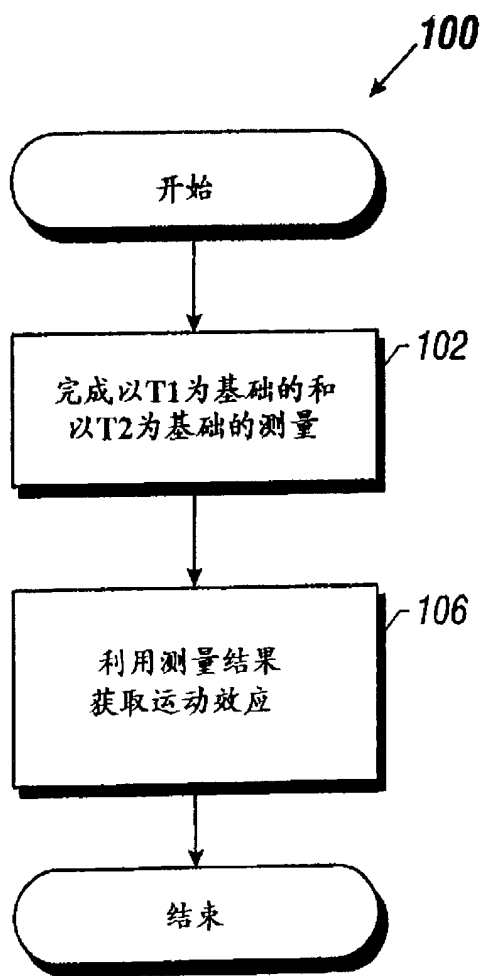


图 15

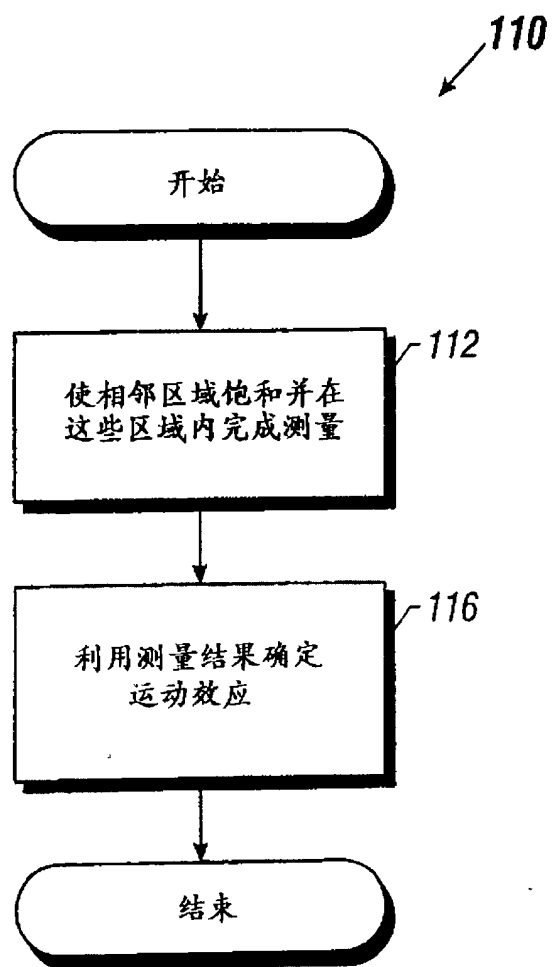


图 16

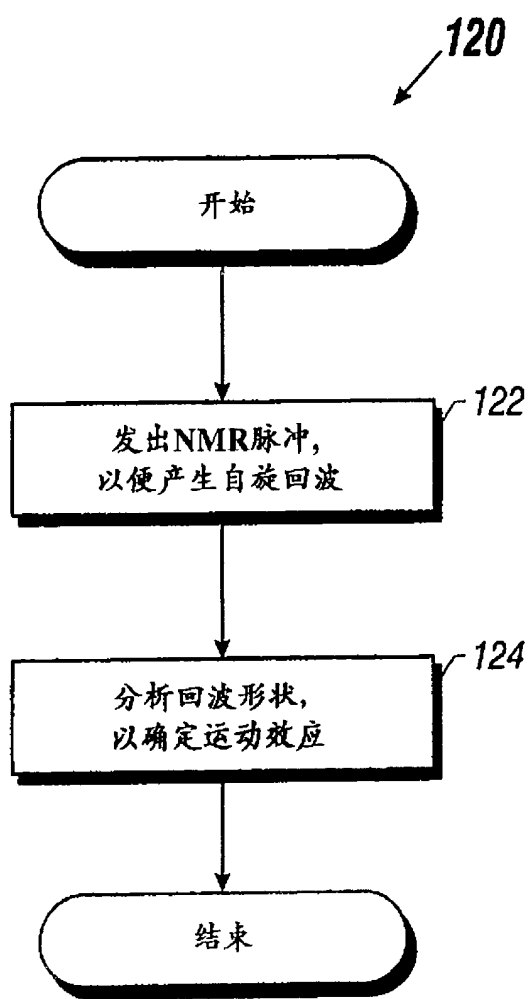


图 17

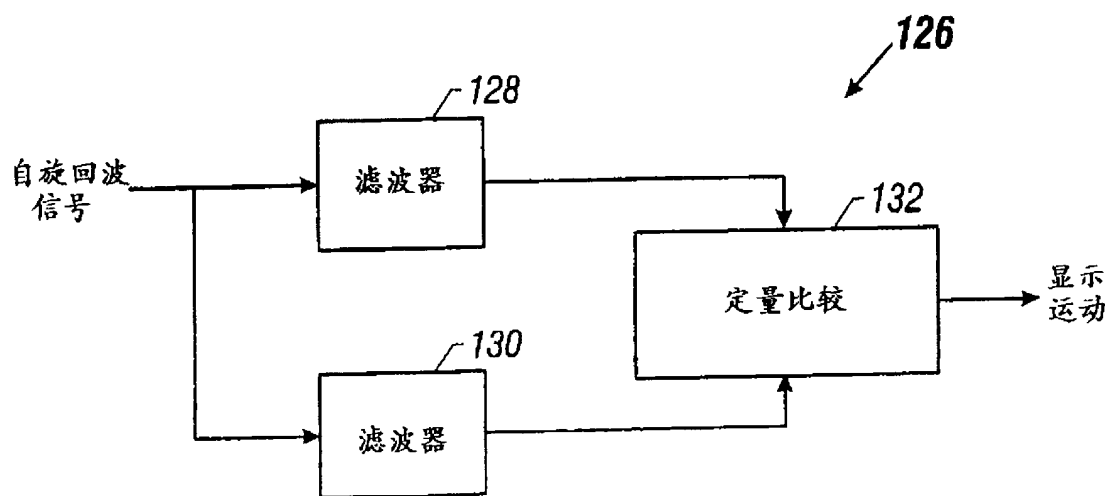


图 18

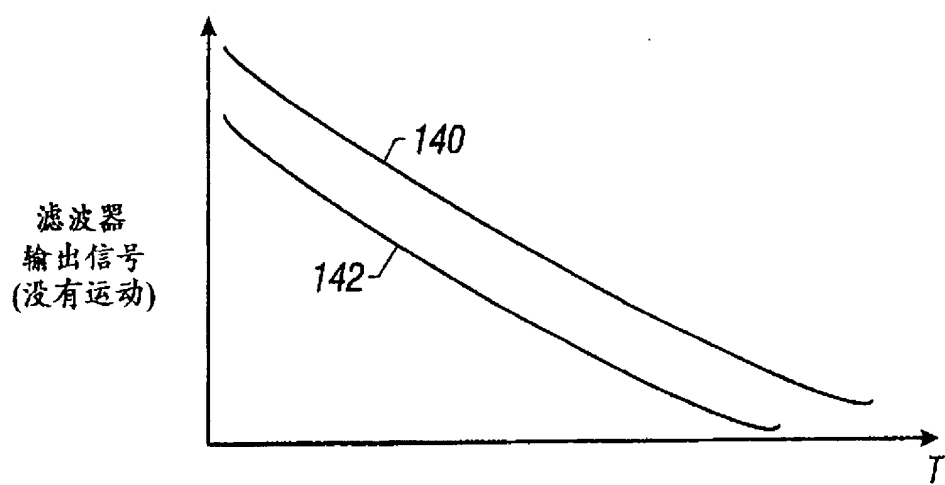


图 19

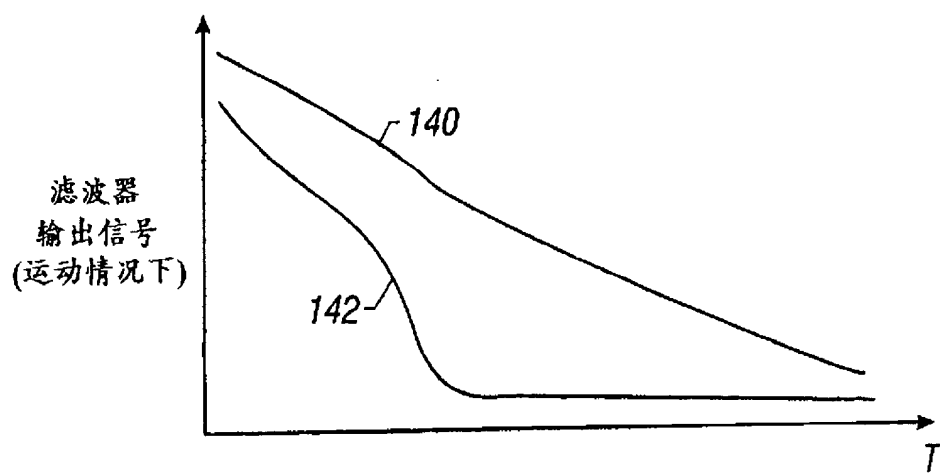


图 20

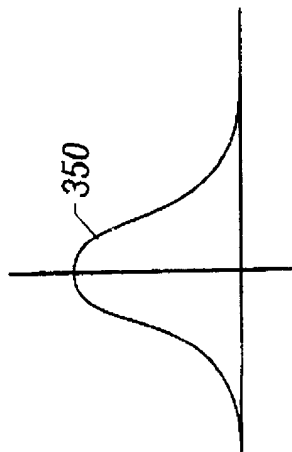


图 21A

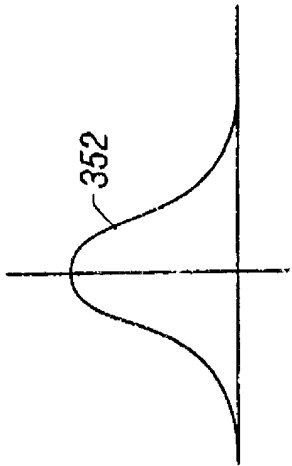


图 21B

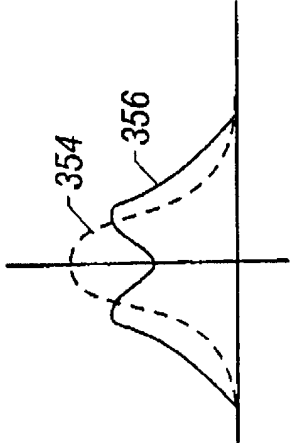


图 22A

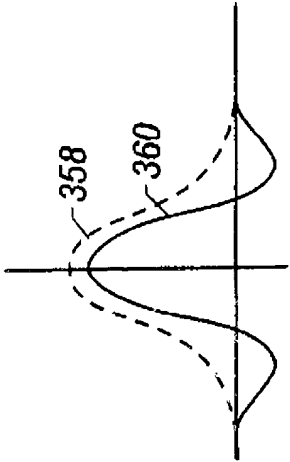


图 22B

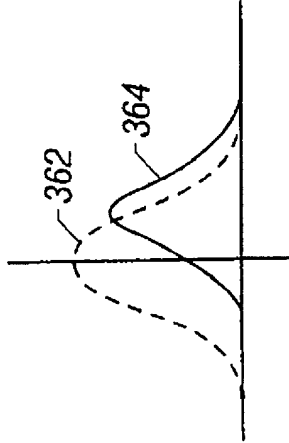


图 23A

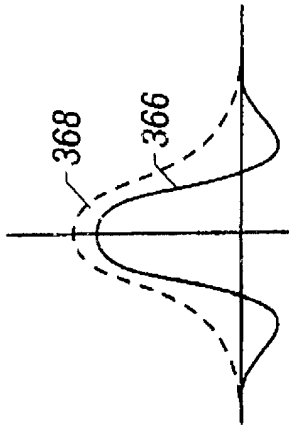


图 23B

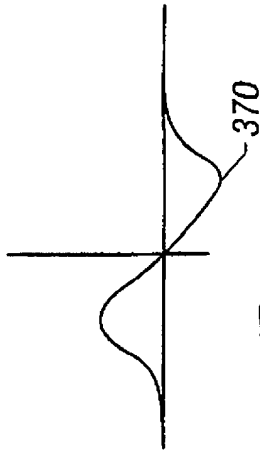


图 24

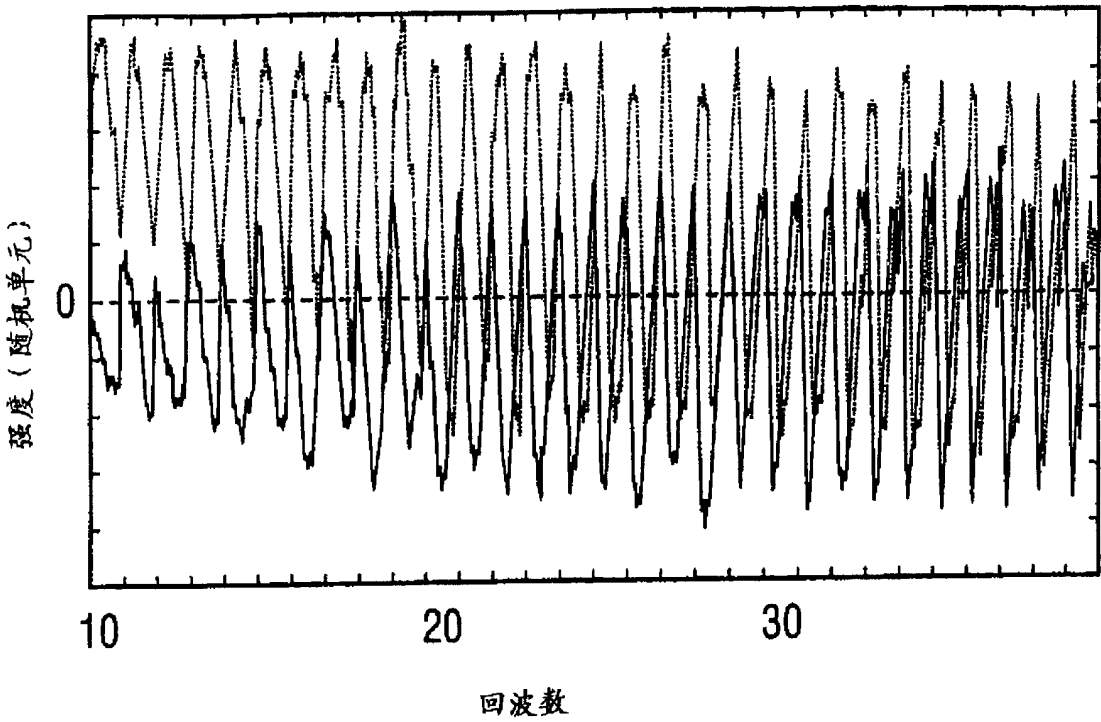


图 25

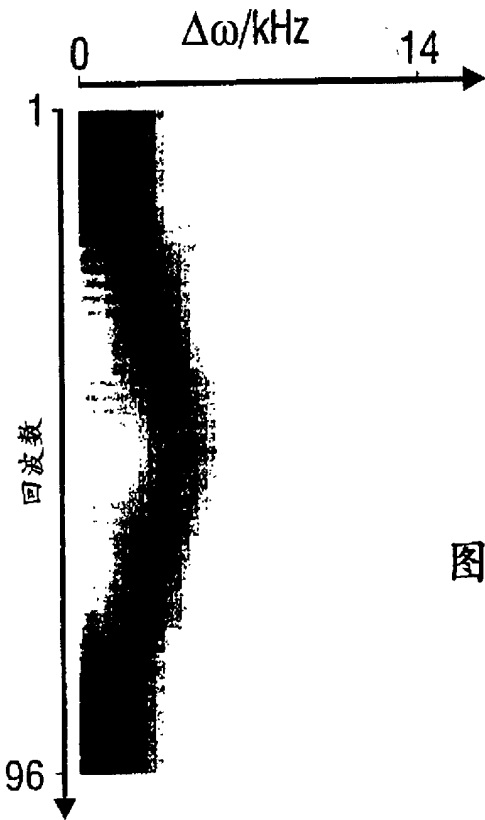
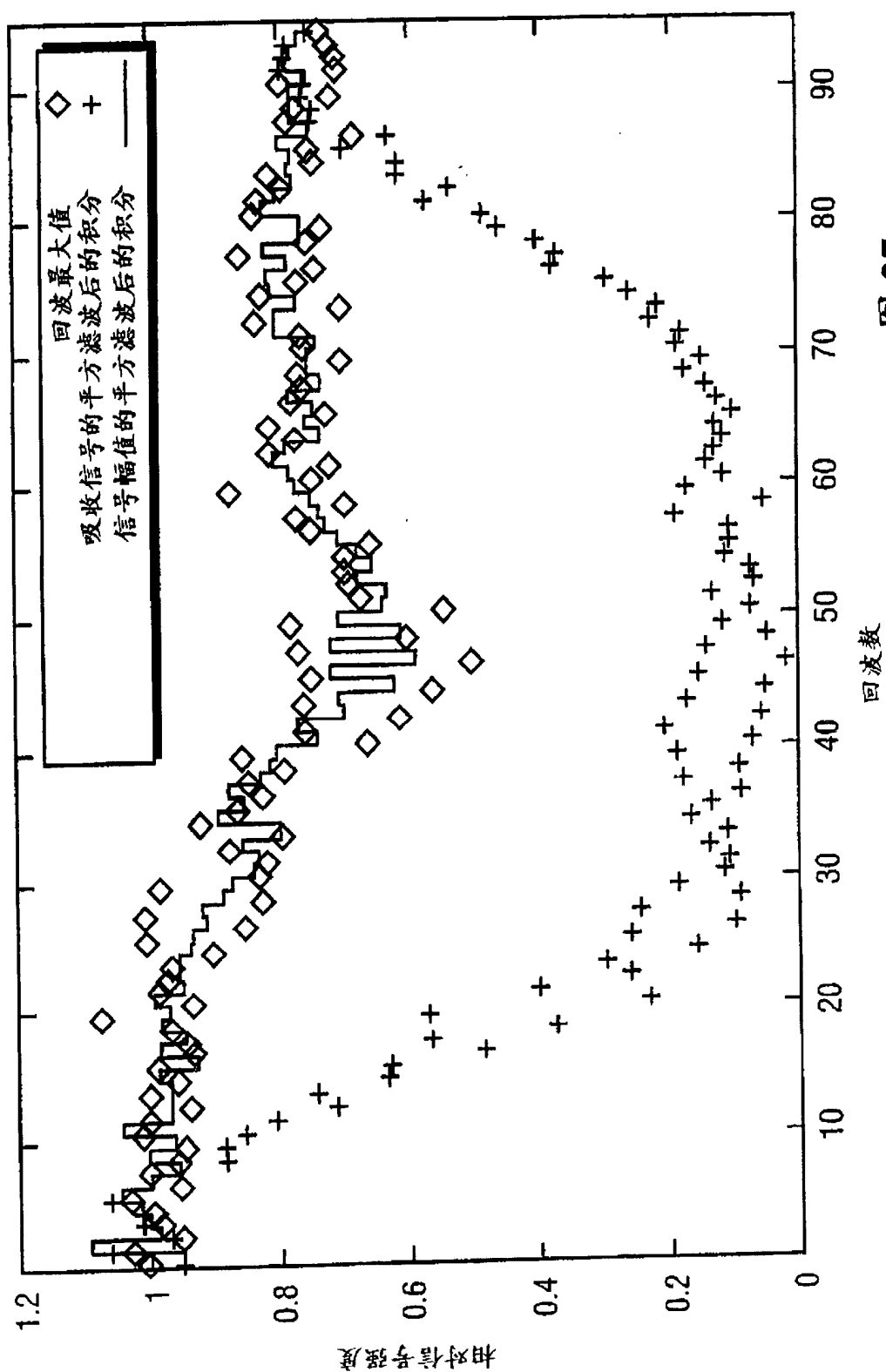


图 26



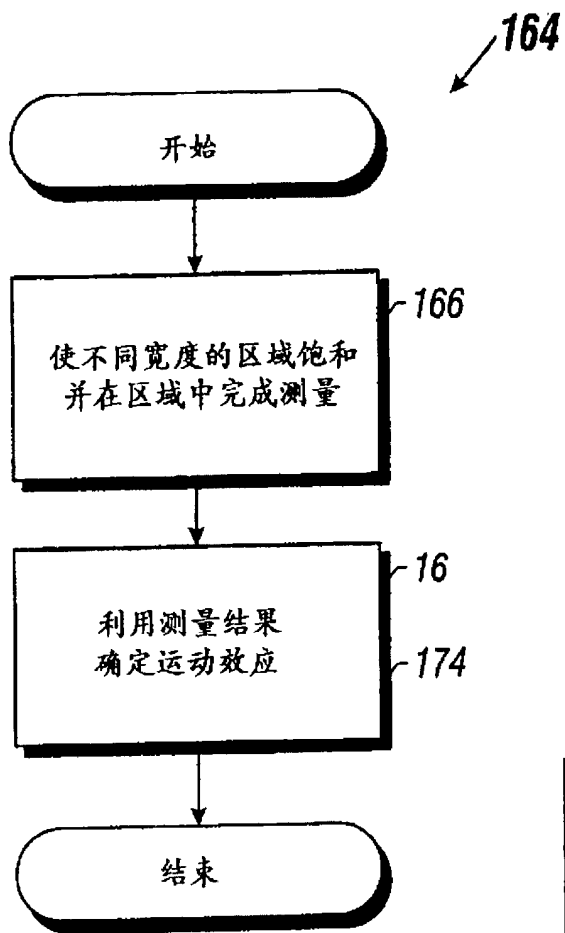


图 28

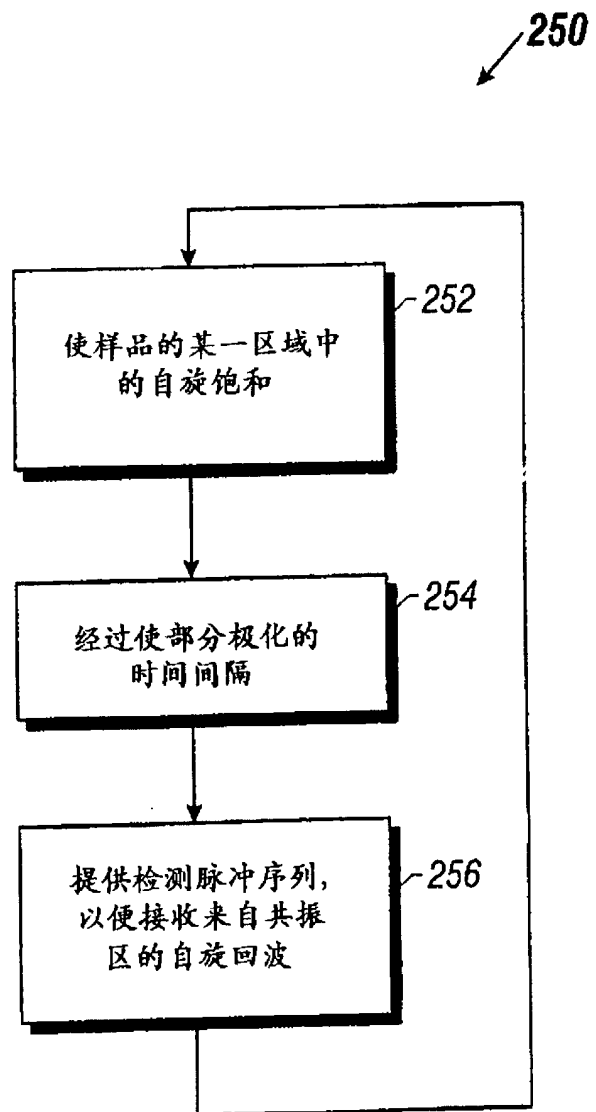


图 29

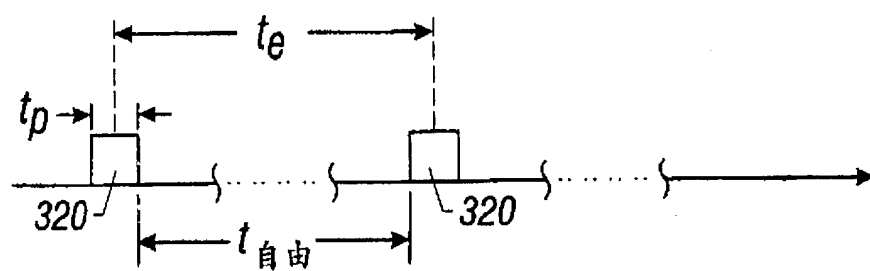


图 30

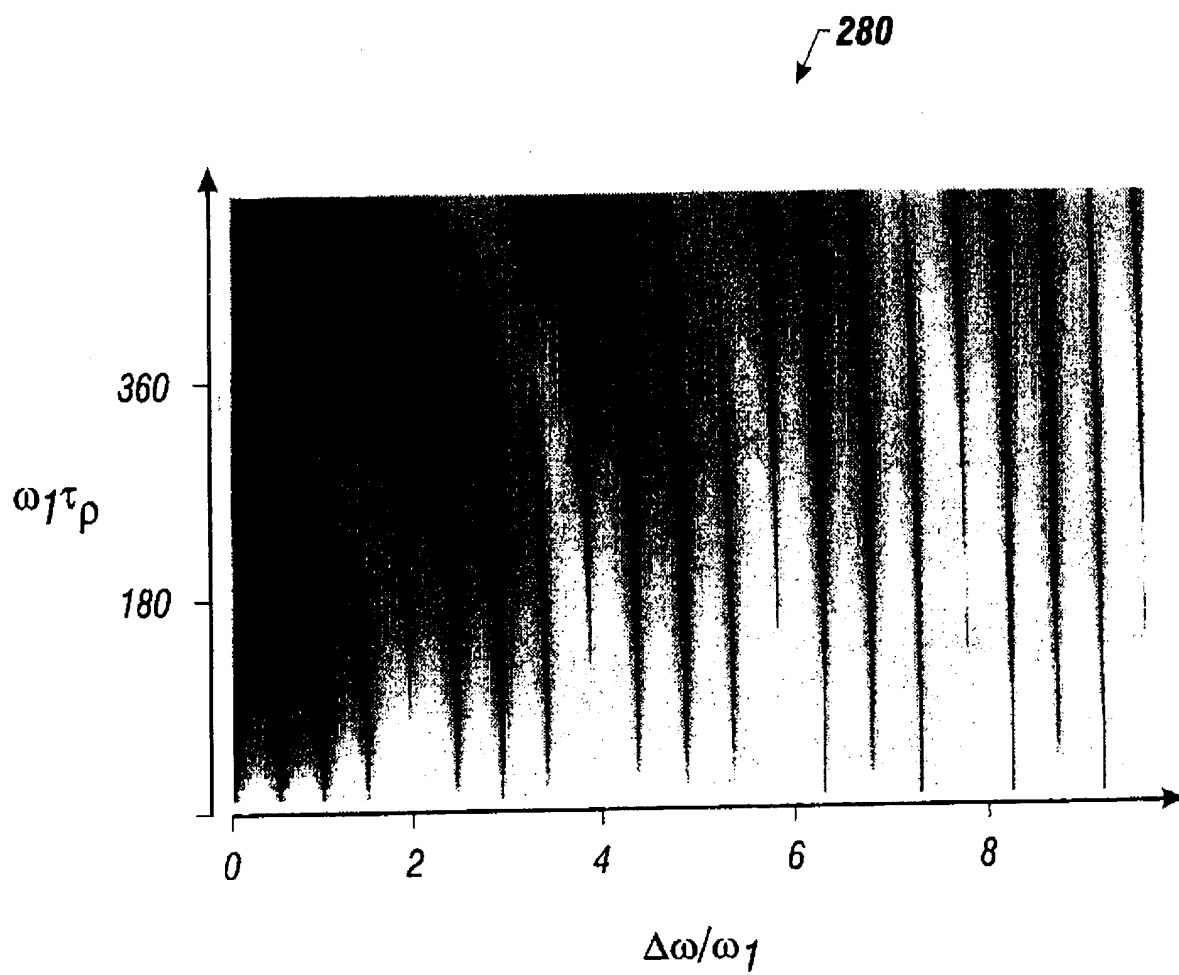


图 31

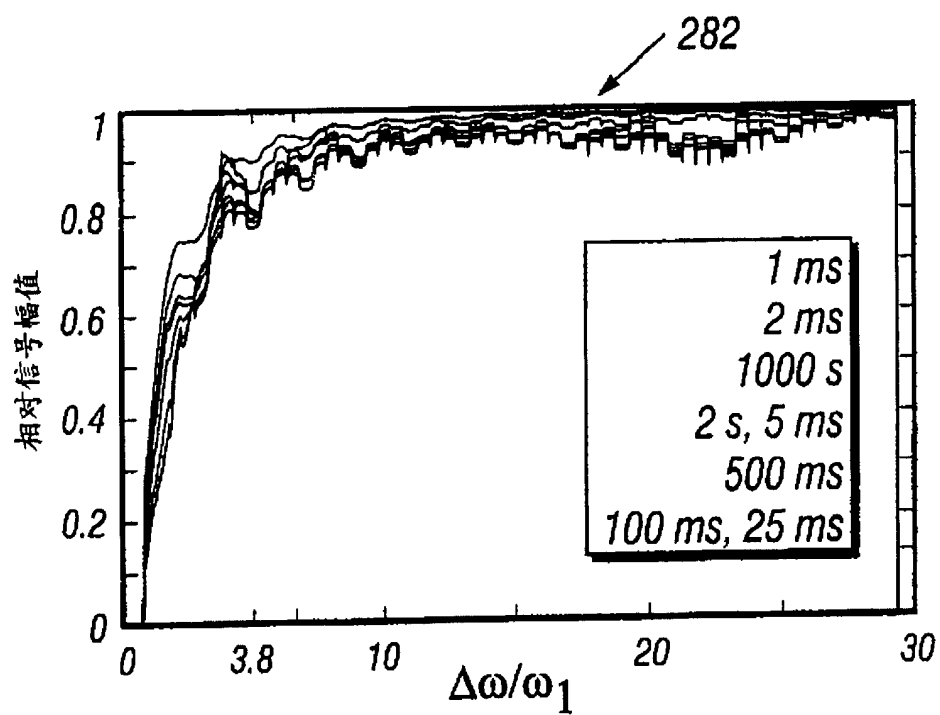


图 32

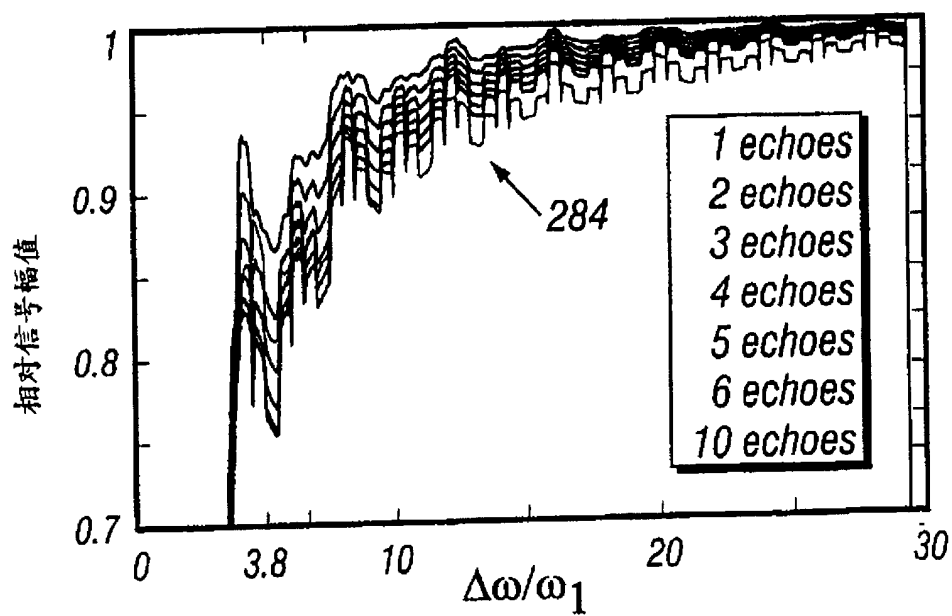


图 33

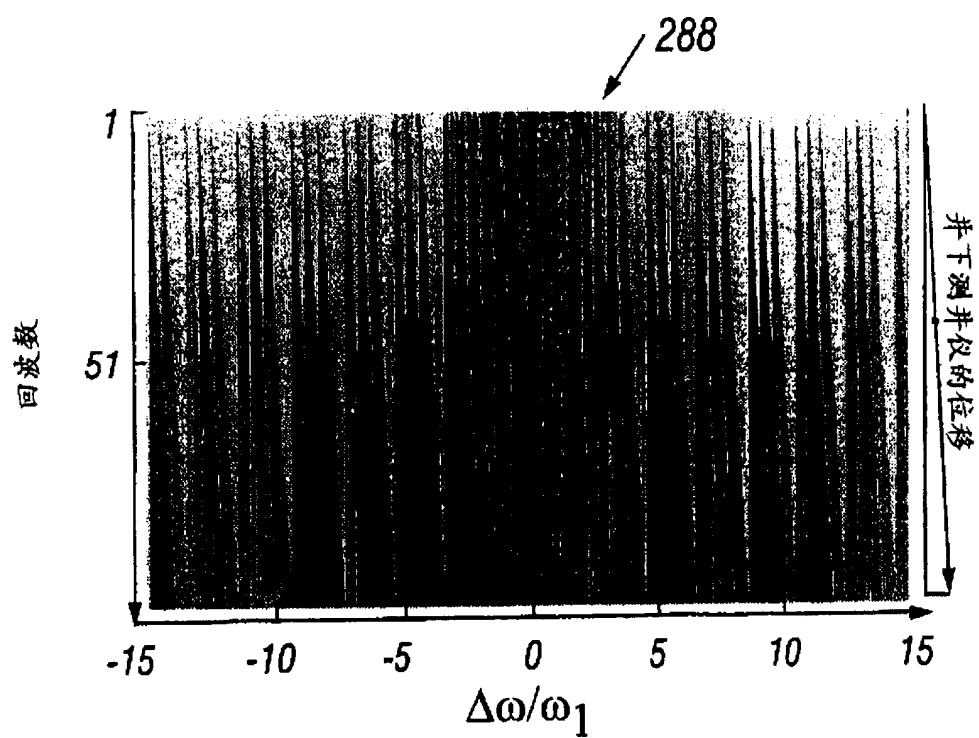


图 34

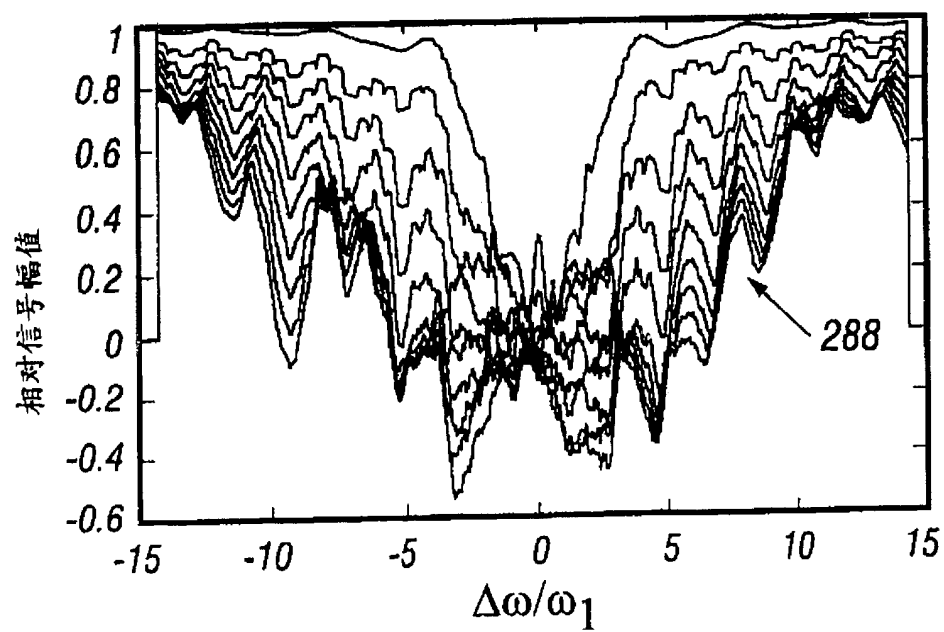


图 35

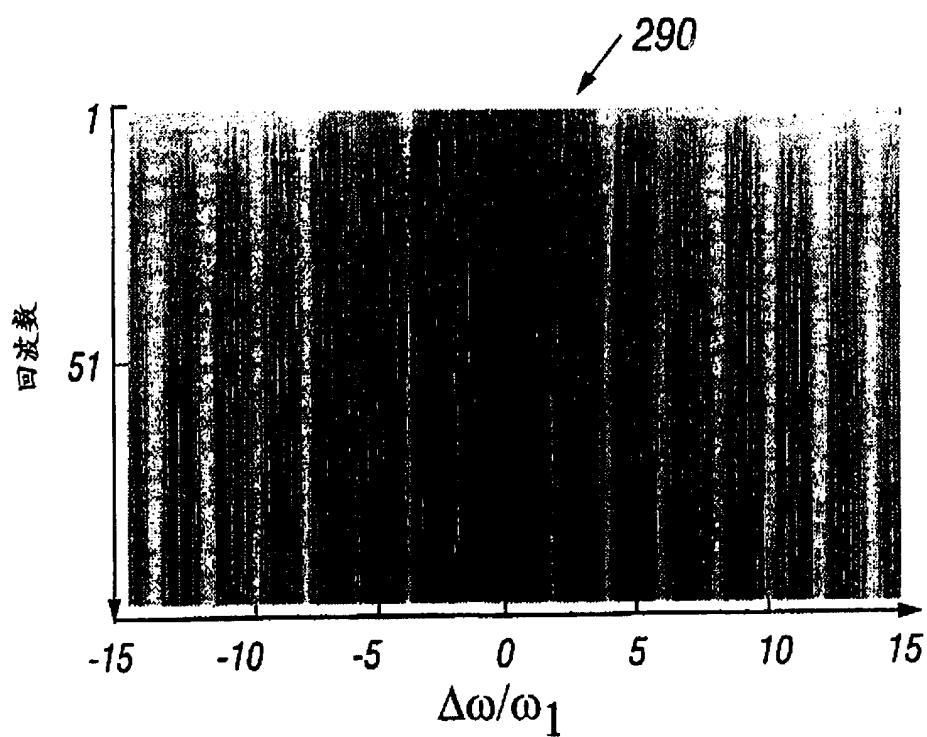


图 36

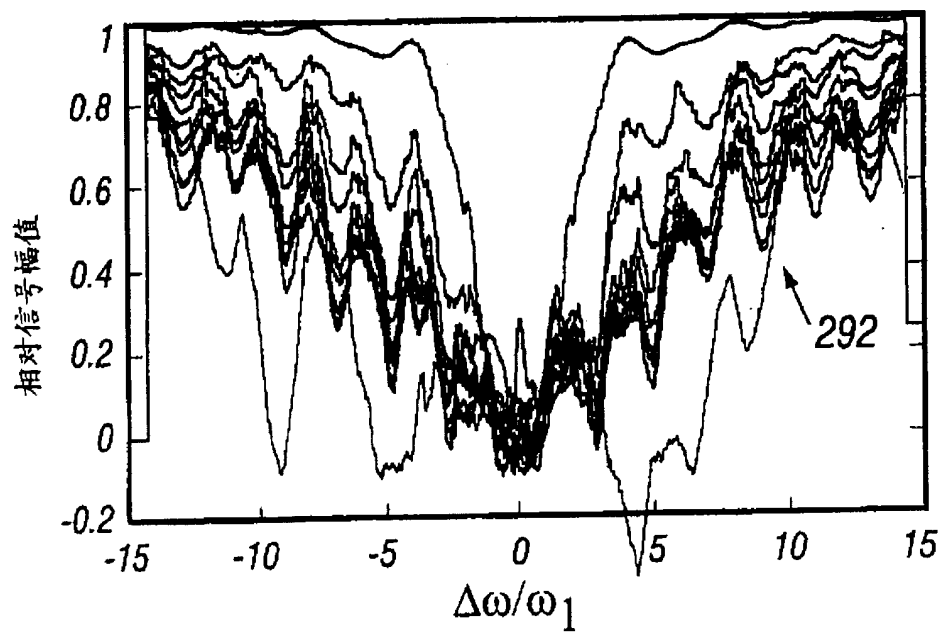


图 37

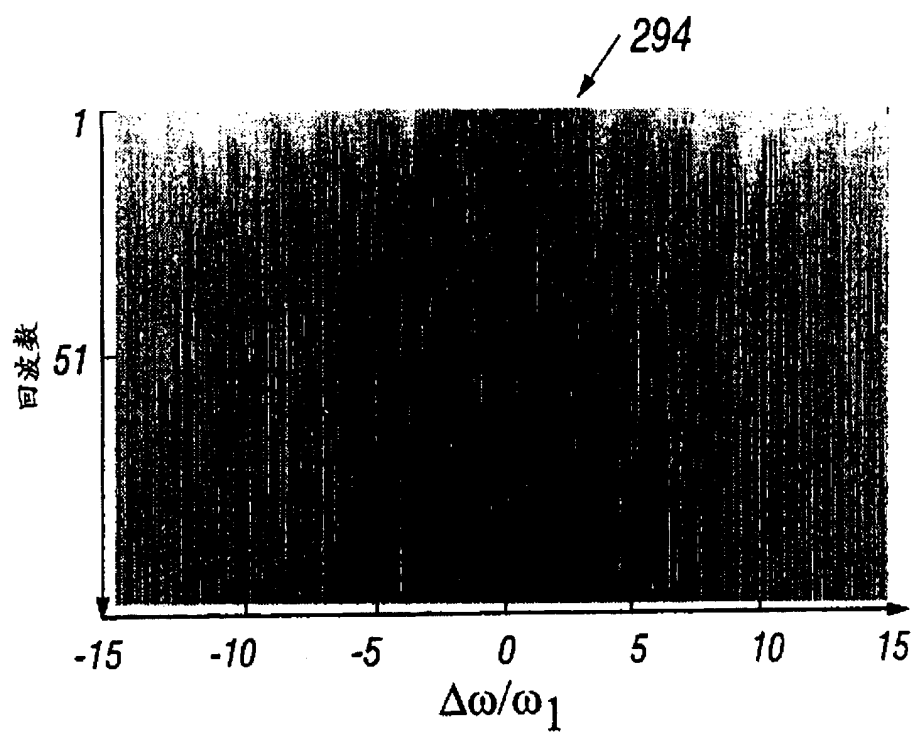


图 38

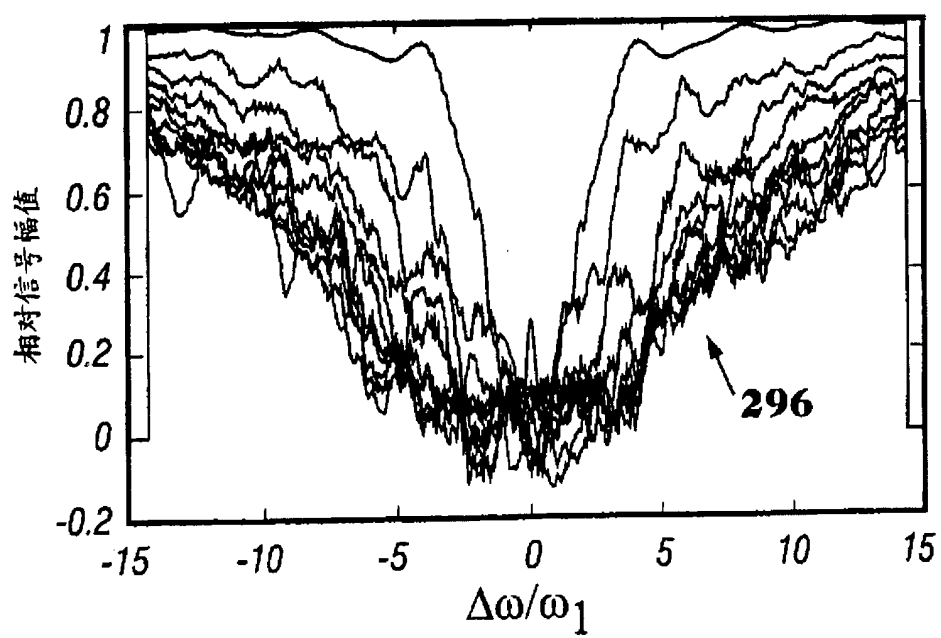


图 39

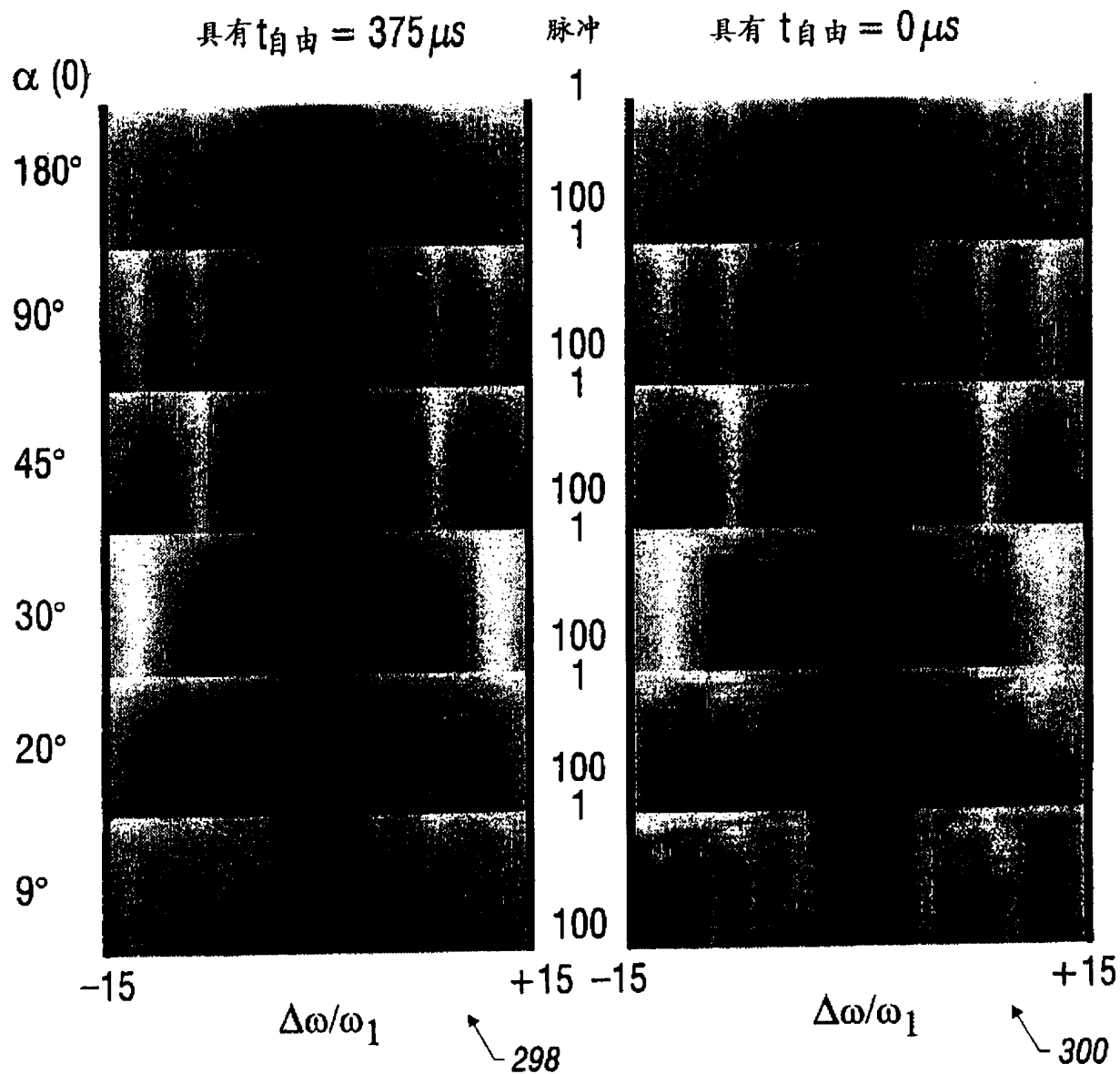


图40

图 41

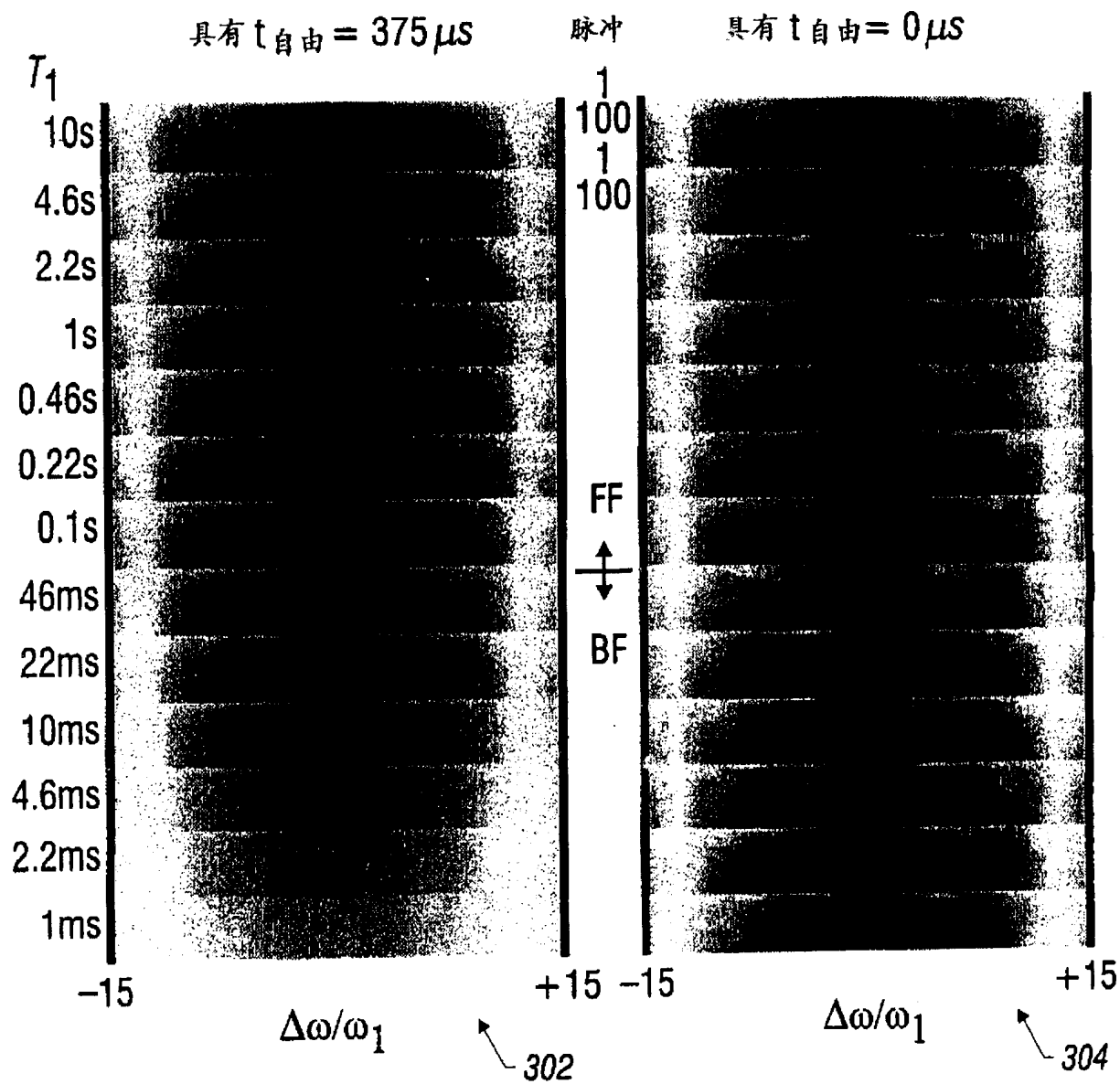


图 42

图 43