



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102608648 B

(45) 授权公告日 2015.06.03

(21) 申请号 201210008735.X

US 006288587 B1, 2001.09.11,

(22) 申请日 2007.07.18

CN 1190467 A, 1998.08.12,

(30) 优先权数据

CN 1806184 A, 2006.07.19,

60/820,615 2006.07.28 US

US 6803579 B2, 2004.10.12,

EP 0637759 B1, 1999.03.03,

(62) 分案原申请数据

审查员 朱艳

200780028522.0 2007.07.18

(73) 专利权人 皇家飞利浦电子股份有限公司

地址 荷兰艾恩德霍芬

(72) 发明人 T·弗拉奇 T·佐尔夫 A·托恩

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

72002

代理人 王英 刘炳胜

(51) Int. Cl.

G01T 1/29(2006.01)

(56) 对比文件

CN 1471644 A, 2004.01.28,

US 005241181 A, 1993.08.31,

US 2003062482 A1, 2003.04.03,

CN 1471644 A, 2004.01.28,

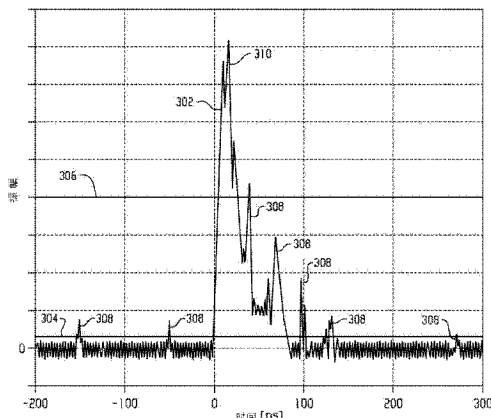
权利要求书2页 说明书9页 附图8页

(54) 发明名称

正电子发射断层摄影中的飞行时间测量

(57) 摘要

正电子发射断层摄影装置(100)包括:多个辐射敏感探测器系统(106)和选择性触发系统(120)。选择性触发系统识别由探测到的伽玛辐射产生的探测器信号(310)并同时丢弃乱真探测器信号(310)。在一种实现方式中,装置(100)包括时间-数字转换器,该时间-数字转换器根据级别H的二进制层次分解来分解测量时间间隔(T_{max}),其中H为大于等于1的整数。



1. 一种正电子发射断层摄影成像方法,包括:

通过将所接收到的探测器信号与第一阈值相比较评估来自伽玛辐射探测器的信号,以识别候选探测器信号,所述候选探测器信号包括探测到的伽玛辐射信号和乱真信号;

通过将所接收到的探测器信号与第二阈值相比较评估所述候选探测器信号,以识别探测到的伽玛辐射信号并且拒绝乱真信号;

产生指示所识别的探测器信号的已测量伽玛辐射能量和已测量探测时间中至少之一的输出。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述辐射探测器包括在盖革模式下工作的雪崩光电二极管,并且其中,所述乱真信号包括由所述雪崩光电二极管产生的暗计数。

3. 根据权利要求1所述的方法,其中,所探测到的伽玛辐射包括指示正电子湮灭的伽玛光子。

4. 权利要求1所述的方法,包括:

测量候选信号的特性;

使用所测量的特性调整所述第二阈值。

5. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述第一阈值具有与紧接着伽玛辐射光子的探测的探测器输出相对应的值,其中,所述第一阈值也与探测器噪声输出相对应。

6. 根据权利要求5所述的方法,其中,所述第一阈值与响应于时间上第一和第二闪烁光子中至少之一的探测器输出相对应,其中,所述第一和第二闪烁光子由闪烁体响应于所探测到的伽玛辐射光子而产生。

7. 根据权利要求1所述的方法,其中,评估所述候选探测器信号包括:

紧接着所述候选信号的识别建立接受时间窗口;

在所述接受时间窗口期间评估所述探测器信号的特性。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中,所述接受时间窗口约为5ns。

9. 根据权利要求1所述的方法,其中,通过如下步骤产生指示所识别的探测器信号的已测量探测时间的输出:

接收待测量信号(602);

将测量时间段(T_{max})划分为多个(N)子段(n),其中,每个子段包括宽度(T_w);

将所述信号的宽度(T_p)缩短一定量,所述量与所述子段中的至少一个的宽度相对应;

测量所缩短的信号的宽度(T_m);以及

使用所述量和所测量的宽度来确定所述信号的宽度。

10. 根据权利要求9所述的方法,其中,所述测量宽度包括使用脉冲收缩时间-数字转换器来测量所缩短的信号的宽度。

11. 根据权利要求9所述的方法,其中,所述划分包括将所述测量时间段划分为 2^x 个子段,其中,x为大于等于1的整数。

12. 根据权利要求9所述的方法,其中,每个子段均具有相等的宽度。

13. 根据权利要求9所述的方法,其中,根据H级别的二进制层次分解来划分所述测量时间段,其中,H为大于或等于1的整数。

14. 权利要求9所述的方法,包括使用延迟线来缩短所述信号的宽度。

15. 一种正电子发射断层摄影装置,包括:

多个探测器通道,其中,所述探测器通道的至少一部分包括:

辐射敏感探测器;

用于通过将所述探测器的输出与第一阈值相比较评估所述探测器的输出以识别候选探测器信号的器件,所述候选探测器信号包括探测到的伽玛辐射信号和乱真信号;

用于通过将所述探测器的输出与第二阈值相比较认为所述候选探测器信号合格以识别所述伽玛辐射信号的器件;

符合探测器,其可连接到所述探测器通道,其中,所述符合探测器识别指示正电子湮灭的所认为合格的探测器信号。

16. 一种正电子发射断层摄影装置,包括:

伽玛辐射敏感探测器 (106);

第一器件 (120),其可连接到所述辐射敏感探测器以便通过将所述探测器的输出与第一阈值相比较选择性地识别候选探测器信号,并且通过将所述探测器的输出与第二阈值相比较认为指示由所述辐射敏感探测器接收到的伽玛辐射的候选探测器信号合格;

脉冲收缩时间-数字转换器器件 (708),其可连接到所述第一器件以便产生识别所认为合格的探测器信号的探测时间的时戳数据。

正电子发射断层摄影中的飞行时间测量

[0001] 本申请是申请日为 2007 年 7 月 18 日、申请号为 200780028522.0、发明名称为“正电子发射断层摄影中的飞行时间测量”的中国专利申请的分案申请。

[0002] 本申请涉及正电子发射断层摄影 (PET), 并尤其涉及飞行时间 (TOF) PET 中符合事件的探测。其也可应用于非 TOF PET、单光子发射计算机断层摄影 (SPECT) 以及有必要在噪声存在下探测辐射的其他医学与非医学应用。

[0003] 在正电子发射断层摄影中, 在检查中将发射正电子的同位素引入人类患者或其他对象的体内。在被称为正电子湮灭事件的过程中, 正电子与电子相互作用, 从而产生沿着响应线 (LOR) 以基本相反的方向行进的 511keV 的伽玛射线符合对。通常通过 PET 扫描器记录在符合时间内探测的伽玛射线对。在典型扫描中, 探测成百上千万个这样的湮灭并且将其用于产生指示同位素分布的图像或其他信息。

[0004] PET 的一个重要应用是在医学中, 其中放射学家和其他医学专家广泛使用 PET 扫描器提供的信息用于疾病的诊断和治疗。在这点上, 期望在使施加给患者的剂量和成像程序的长度最小化的同时提供具有相对更高图像质量的图像。

[0005] 在 TOF PET 中, 测量对两条符合伽玛射线的探测之间的实际时间差并且将其用于估计沿着 LOR 的事件的位置。进而可以将该位置信息用于重建过程中以改进所重建的图像的质量。对于给定的活性水平和成像时间, 可以使用额外的位置信息来生成具有相比于非 TOF PET 图像具有改进的图像质量的图像。从另一观点看, 可以通过使用相对较少的剂量和 / 或相对较短的扫描时间, 获得具有可相比的质量的图像。

[0006] 实际 PET 系统的性能受其灵敏度、其能量和时间分辨率、时间响应、探测器系统的其他特性以及噪声的影响。在可购买到的 PET 系统中, 将诸如光电倍增管 (PMT) 的光电传感器阵列设置在闪烁体材料后面。在 TOF 系统中, 使用诸如正硅酸钆镱 (LYSO)、硅酸镱 (LSO) 或溴化镧 (LaBr) 的相对快速的闪烁体材料来提供必需的时间分辨率。还提议使用固态光电传感器, 诸如在盖革模式 (GM-APD) 下驱动的雪崩光电二极管 (APD) 阵列。虽然它们也具有相对优良的时间分辨率特性, 但是 GM-APD 也倾向于产生暗计数, 而该暗计数并非源于光子吸收。虽然暗计数速率取决于诸如器件几何结构和工艺参数、温度和所施加的偏置电压等因素, 但是暗计数会对结果图像的质量产生有害影响。

[0007] 因此, 仍有改进的空间。例如, 期望在改进定时测量精确度的同时, 减小暗计数和其他噪声源所产生的乱真 (spurious) 事件的影响。除了降低图像质量, 响应和处理这些乱真事件还会限制最大探测器计数率, 从而导致遗漏潜在的有效计数。虽然可以通过减小光电传感器偏置电压或增加事件触发阈值来改善这些影响, 但是这样做趋于减小定时测量的整体灵敏度和 / 或精确度。当然, 在系统复杂度、可靠性和成本方面也必须考虑这些问题。

[0008] 影响实际 TOF PET 系统性能的另一因素是用于执行必需的时间测量的时间 - 数字转换器 (TDC)。

[0009] 模拟 TDC 典型地基于电容器的时间常数, 利用恒流源对该电容器进行充电和 / 或放电。虽然模拟 TDC 可以提供具有相对高的时间分辨率的测量, 但是必需的模拟电路、积分电容器和电压 - 时间转换电路限制了它们的吸引力。此外, 模拟 TDC 提供非线性响应。虽

然有可能补偿非线性,但是这样做会增加转换时间。在转换时间超过闪烁体脉冲长度的情况下,增加了像素死时间。

[0010] 可以以高级 CMOS 工艺实现数字 TDC,其中将 TDC 与 GM-APD 或其他数字信号源集成在一起。数字 TDC 还包括环形振荡器和在事件时刻存储环形振荡器状态的锁存器。然而,这种设计典型地不会在事件之间停止,因此具有相对高的静态高能耗。因此,基于环形振荡器的时间-数字转换不是非常适合用于大尺度传感器,尤其在为每个探测器像素提供 TDC 的情况下。另一可替换选择是使用抽头延迟线和游标线 TDC。然而,这种实现方式也倾向于区域密集的,并且工艺变化以及诸如环境温度和操作电压的操作条件会影响时间分辨率。

[0011] 另一种 TDC 技术是所谓的脉冲收缩 (pulse shrinking) 方法。参见例如 Chen 等人的题为“CMOS Pulse Shrinking Delay Element with DeepSubnanosecond Resolution”的美国专利 No. 6, 288, 587。这种系统典型地包括一个或多个脉冲收缩延迟元件,所述脉冲收缩延迟元件将测量的脉冲的宽度减少时间 dT 。在一种实现方式中,使用异步计数器来确定脉冲消失所需的周期数量。

[0012] 虽然脉冲收缩可以提供相对优良的线性和低功耗,但是最坏情况转换时间 T_c 为待转换脉冲的最大宽度 T_{max} 和时间分辨率 dT 的函数:

[0013] 等式 1

$$[0014] \quad T_c = \frac{T_{max}^2}{dT}$$

[0015] 例如,如果 T_{max} 为 10 纳秒 (ns) 并且 $dT = 10$ 皮秒 (ps),那么最坏情况转换时间将大约为 10 微秒 (μs)。如此长的转换时间在 TOF PET 和其他高速率系统中是不可接受的。

[0016] 因此,仍然期望提供一种改进的 TDC 用于 TOF PET 和其他应用中,尤其在需要相对高的时间分辨率和短的转换时间的情况下。

[0017] 本发明的各方面解决这些问题和其他问题。

[0018] 根据一个方面,辐射探测装置包括:闪烁体和与闪烁体进行光学通信的光电传感器,该闪烁体响应于接收到的辐射光子而产生闪烁光子。光电传感器响应于闪烁光子而产生光电传感器信号。所述装置还包括:第一信号探测器,其在光电传感器信号满足第一信号准则的情况下产生第一输出信号;第二信号探测器,其在光电传感器信号满足第二信号准则的情况下产生第二输出信号;以及辐射信号探测器,其估计第一输出信号和第二输出信号以识别指示由闪烁体接收到的辐射的光电传感器信号。

[0019] 根据另一方面,方法包括以下步骤:从伽玛辐射探测器接收信号;估计所接收到的信号以识别候选探测器信号。候选探测器信号包括探测到的伽玛辐射信号和乱真信号。该方法还包括以下步骤:估计候选探测器信号以识别探测到的伽玛辐射信号并且拒绝乱真信号;以及产生指示所识别的探测器信号的已测量伽玛辐射能量和已测量探测时间中至少之一的输出。

[0020] 根据本发明的另一方面,正电子发射断层摄影装置包括多个探测器通道。探测器通道包括辐射敏感探测器和用于估计探测器输出以识别候选探测器信号的器件,其中候选探测器信号包括探测到的伽玛辐射信号和乱真信号。探测器通道还包括用于认为候选探测器信号合格以便识别伽玛辐射信号的器件。该装置还包括可连接到探测器通道的符合探测器,其中符合探测器识别指示正电子湮灭的合格的探测器信号。

[0021] 根据本发明的另一方面,装置包括:伽玛辐射敏感探测器;第一器件,其可连接到辐射敏感探测器,用于选择性地识别指示由辐射敏感探测器接收到的伽玛辐射的候选探测器信号并认为其合格;以及脉冲收缩时间-数字转换器器件,其可连接到第一器件,用于产生识别所认为合格的探测信号的探测时间的的时间戳数据。

[0022] 根据又一方面,时间-数字转换方法包括以下步骤:接收待测量信号;和将测量时间段划分为多个子段,其中每个子周期包括宽度。该方法还包括:将信号宽度缩短一定量,该量与子段中的至少一个的宽度相对应;测量所缩短的信号的宽度;以及使用该量和所测量的宽度来确定该信号宽度。

[0023] 根据另一方面,用于测量信号宽度的装置包括用于将测量时间段划分为多个子段的器件,其中每个子段包括宽度。该装置还包括:用于将信号宽度缩短一定量的器件,其中该量与子段中的至少一个的宽度相对应;用于测量所缩短的信号的宽度的器件;以及用于使用该量和所测量的宽度来计算信号宽度的器件。

[0024] 在阅读和理解下面详细描述的基础上,本领域普通技术人员将会意识到本发明的更多方面。

[0025] 本发明可以以各种组件和组件的布置以及各种步骤和步骤的布置而变得明显。附图仅用于图示说明优选实施例的目的而不应被解释为限制本发明。

[0026] 图 1 示出了一种成像系统;

[0027] 图 2 示出了 PET 数据采集系统的组件;

[0028] 图 3A 和图 3B 示出了选择性光子触发系统的操作;

[0029] 图 4 示出了一种成像方法;

[0030] 图 5 示出了一种时间测量方法;

[0031] 图 6 示出了一种时间测量方法;

[0032] 图 7 为时间-数字转换器的功能框图。

[0033] 参考图 1,组合 PET/CT 系统 100 包括 PET 扫描架部分 102 和 CT 扫描架部分 104。PET 扫描架部分 102 包括围绕检查区域 108 的一个或多个轴向环形辐射探测敏感探测器 106。探测器 106 包括响应于在其辐射敏感面上接收的伽玛光子而产生光子的闪烁体材料 140。与闪烁体 140 光学通信的光电传感器 142 响应于所产生的光子而产生电信号。因此,探测器 106 产生指示探测到的伽玛辐射的输出信号。虽然探测器 106 的数量和配置与整体系统设计和其他特定应用的需求相关,但将意识到典型 PET 系统可以包括 10^4 数量级的探测器通道。

[0034] CT 部分 104 包括绕 CT 检查区域 112 旋转的诸如 X 射线管的辐射源 110。辐射敏感探测器 114 探测由 X 射线源发射的已经横贯检查区域 112 的辐射。

[0035] PET 扫描架部分 102 和 CT 扫描架部分 104 优选地位于邻近它们各自的检查区域 108、112,将检查区域 108 和 112 沿共同的纵轴或 z 轴设置。对象支架 116 支撑诸如人类患者的待成像对象 118。对象支架 116 优选地可协同 PET/CT 系统 100 的操作而纵向移动,因此 PET 和 CT 扫描架部分 102 和 104 都可以根据所需的扫描轨迹而在多个纵向位置扫描对象 118。

[0036] CT 数据采集系统 122 处理来自 CT 探测器 114 的信号,以产生指示沿着经过检查区域 112 的多条线或射线的辐射衰减的数据。CT 重建器 126 使用适当的重建算法重建数据,

以产生指示对象 118 的辐射衰减的体积图像数据。

[0037] 如下面将更详细地描述的, PET 数据采集系统包括多个选择性光子触发系统 120_1 、 120_2 、 120_3 ... 120_n 。可连接到各自的探测器通道的触发系统 120 用于优选识别那些由探测到的辐射产生的有效探测器信号, 而忽视那些更可能由诸如噪声的因素产生的信号。在所说明的实施例中, 触发系统 120 也产生指示探测事件的时间、能量和位置的信号。符合逻辑电路 121 识别同时探测到的并因此代表湮灭的伽玛射线对。

[0038] PET 重建器 129 例如利用适当的迭代或解析重建算法处理湮灭数据, 以产生指示对象 118 中放射性核素分布的体积数据。在所说明的混合 PET/CT 系统 100 的情况下, PET 重建器 129 使用来自 CT 系统的信息以将衰减和其他所需的校正应用于 PET 数据。

[0039] 工作站计算机用作操作者控制台 128。控制台 128 包括诸如监视器或显示器的人类可读输出设备和诸如键盘和鼠标的输入设备。驻存在控制台 128 上的软件允许操作者观察和另外操纵由 PET 和 CT 重建器 129、126 产生的体积图像数据。驻存在控制台 128 上的软件也允许操作者通过建立所需的扫描协议、开始和终止扫描以及另外与扫描器 100 相互来控制系统 100 的操作。

[0040] 也可预期系统 100 的变形。因此, 例如可以省略扫描器的 CT 部分、将其安置于远离 PET 扫描架部分 102 或将其替代为诸如磁共振 (MR) 扫描器的另一形态。也可以使用与 PET 扫描架部分 102 相关联的透射源产生衰减或解剖信息, 或从另外的源获得衰减或解剖信息。

[0041] 图 2 示出了示例性选择性光子触发系统 120。如图所示, 触发系统 120 实现了多水平触发系统, 包括第一信号探测器或甄别器 202_1 和第二信号探测器或甄别器 202_2 , 该第一和第二信号探测器或甄别器的输入可连接到一个或多个探测器通道。当其各自的输入条件得以满足时, 信号探测器 202 产生各自的触发输出信号。如图所示, 将第一信号探测器 202_1 实现为具有第一相对低阈值的水平探测器。类似地将第二信号探测器 202_2 实现为具有第二相对较高阈值的水平探测器。虽然示出了双水平触发系统, 但将理解仍可以提供额外的信号探测器 202 并且因此提供触发水平。除了水平以外的触发条件 (例如变化速率或探测器信号的积分) 也是可预期的, 可以是单独的也可以与水平探测相结合。

[0042] 在所说明的实现方式中, 特别是很好地适合与其中精确探测时间测量尤其重要的 TOF PET 系统结合使用的实现方式中, 将第一信号探测器 202_1 的阈值设为与由闪烁体的第 k 个离散光子所产生的期望信号相对应的水平。在一种实现方式中, 将第一阈值设为与第一光子相对应的值, 尽管可以将阈值设为探测第二或其他在时间上随后的光子。此外, 可能不由常规水平探测器实现触发生成, 而可以以不同的方式从闪烁光子导出触发生成, 例如, 通过使用 GM-APD (或多像素 GM-APD) 实现第一光子触发。通常期望在探测辐射光子之后触发由初始闪烁光子引起的信号以改进时间测量的精确度, 尤其是在辐射光子的探测与探测器 106 输出信号的生成之间的时间变化或抖动相对小的情况下。另一方面, 这样做趋于使第一信号探测器 202_1 对噪声或其他乱真事件更敏感。因此, 将第二信号探测器 202_2 的阈值设为这样一个水平: 该水平可以用于确认由第一信号探测器 202_1 识别出的作为最可能由有效光子信号产生的可能事件或认为其合格。那么在这个意义上, 可以将第一触发信号视为候选或单个光子触发信号, 并且可以将第二触发信号视为合格或使能光子触发信号。

[0043] 选中 (hit) 或触发逻辑电路 204 根据一个或多个接受准则估计来自信号探测器

202 的触发输出信号,以识别那些可能由有效探测器信号产生的探测器信号,同时忽略那些更可能由噪声或其他因素产生的探测器信号。一个适当的接受准则是确定在一个接受时间窗口内候选光子触发信号之后是否跟随有合格光子触发信号。如果是这样,那么将该探测器信号作为有效探测器信号。如果不是这样,那么丢弃该探测器信号,例如通过将其标记为无效。

[0044] 触发逻辑电路 204 的输出进而连接到能量测量系统 206 和时间测量系统 208。能量测量系统 206 产生指示所探测的伽玛光子的能量的输出。如图 2 所示,能量测量系统 206 包括积分器 209、定时器 210 和模数转换器 212。一从触发逻辑电路 204 接收到有效探测器信号,定时器 210 就使积分器 209 在所需的积分时间段内对探测器信号进行积分。如本领域普通技术人员将意识到的,积分器 209 的输出代表所探测的伽玛光子的能量。模数转换器 (ADC) 212 进而将积分器 209 的输出数字化。

[0045] 诸如时间-数字转换器 (TDC) 的时间测量系统 208 产生指示何时探测到伽玛射线的时间戳数据。如图 2 所示,时间测量系统 208 包括高速 DLL 时钟 214、锁存器 216 和译码器 218。一从触发逻辑电路 204 接收到有效探测器信号,锁存器 216 就锁存时钟 214 的当时值。译码器将时钟值译码,以产生光子时间戳。

[0046] 通道识别器 224 用于识别特定通道。如将意识到的,可以使用通道信息来识别关联的探测器通道的物理位置,并且因此建立相关 LOR 的坐标。

[0047] 输入/输出总线 224 提供触发系统 120 与 PET 数据采集系统的其余部分之间的通信接口。更具体地,总线 224 用于传送与给定探测器信号关联的诸如时间戳、能级、通道标识符等信息。总线 224 还可用于提供用于控制触发系统 120 的操作和用于提供所需的设置 120 等所必需的控制信息。

[0048] 禁止或禁能输入 220 用于根据需要禁能数据采集。在一种实现方式中,协同混合扫描器的操作来禁能数据采集。在混合 PET/MR 系统的情况下,例如,与磁共振激励和探测过程有关的时变梯度磁场和其他信号可能致使探测器信号不可靠。因此,可能期望与之协同来禁能 PET 数据采集。禁止输入 220 (或另一输入) 还可用于迫使选定通道的转换,以通过实现区域共同触发模式来实现邻域逻辑。例如,可能期望读出已触发的通道的一定数量的邻域,尽管这些邻域自身可能还没有产生触发信号。

[0049] 使用校准输入 222 来校准触发系统 120,例如通过校准能量测量系统 206 和定时测量系统 208、探测器 220 阈值等来校准。可以通过在校准过程中改变阈值来获得对触发阈值的实际校准。也可以通过改变校准脉冲的长度和/或振幅来校准能量测量系统 208。虽然将禁止 220 和校准 222 图示说明为分离的输入,但是将意识到也可以通过输入输出总线 226 提供适当的控制信号。

[0050] 控制器 228 控制触发系统 120 的操作。控制器也可用于为探测器 202 提供触发阈值或其他相关操作参数,以及用于控制高速时钟的偏置电流等。控制器 228 也可用于执行诸如上电初始化、自检和诊断、在总线 226 上通信等功能。

[0051] 可以基于分离或集成电子技术或其组合来实现触发系统 120。然而,由于相对高的通道数量,使用一个或多个专用集成电路 (ASIC) 来实现触发系统 120 是有优势的。可以在共同的 ASIC 中实现与多个通道关联的电路 120。

[0052] 参考图 3,现将结合示例性探测器信号进一步描述水平探测器 202 和触发逻辑电

路 204 的操作。图 3A 示出了由探测器通道产生的信号 302, 该探测器通道包括与 LYSO 闪烁体 140 光学通信的 GM-APD 光电传感器 142。横坐标代表以纳秒 (ns) 为单位的时间, 纵坐标代表探测器信号的振幅。第一信号探测器的 202_1 的阈值在 304 处示出。第二信号探测器的 202_2 的阈值在 306 处示出。

[0053] 信号 302 包括由暗计数或其他噪声产生的噪声信号 308。信号 302 还包括由 511keV 闪烁事件产生的信号 310。可以看到, 信号 310 的特征在于相对快的上升时间和随后的一般性指数衰减。第一信号探测器 202_1 探测超过第一水平阈值 304 的噪声信号 308, 产生相对应的单光子 (SP) 或潜在光子触发信号。第二信号探测器 202_2 探测超过第二阈值 306 的诸如有效闪烁信号 310 的信号, 产生合格或使能 (EN) 触发信号。

[0054] 另外参考图 3B, 一从第一信号探测器 202_1 接收到潜在光子触发信号, 触发逻辑电路 204 就打开接受时间窗口 312。如图所示, 接受时间窗口大约为 5ns, 尽管根据特定探测器系统的特性或其他专用需要可以实现其他窗口。如果在接受时间窗口 312 中没有接收到使能触发信号, 则假设探测信号由噪声信号 308 产生。另一方面, 如果在接受时间窗口期间接收到合格信号 314, 则认为信号 310 为有效光子信号。在闪烁体衰减时间期间接收的噪声信号 308 可能源于闪烁信号的波动、暗计数或其他噪声。这些信号也被忽略, 因为它们没有超过低阈值水平, 或者即使它们超过了低阈值水平, 却没有在相对应的接受窗口中接收到使能触发。

[0055] 注意, 各种阈值和时间窗口可动态变化。例如, 接受时间窗口的宽度可作为信号 302 的上升时间的函数而变化 (例如, 通过测量探测和使能信号之间的时间差)。

[0056] 在有效光子的情况下, 能量测量系统 206 和时间测量系统 208 使用接受窗口 312 的结束或终止来启动通常在 316 说明的数据采集过程。在一种实现方式中, 触发逻辑电路 204 使锁存器 216 锁存当前时钟值, 该当前时钟值用作所探测到的伽玛的时间戳。类似地, 触发逻辑电路 204 启动探测器信号的积分, 以便测量所探测到的伽玛的能量。使用接受时间窗口 312 的结束来启动数据采集过程的一个具体优势是其容易实现, 尤其是当接受时间窗口 312 具有恒定值时。可以以其他方式启动数据采集, 例如通过从潜在光子触发信号导出的信号来启动, 尤其通过与触发信号具有已知时间关系的导出信号来启动。

[0057] 在另一实现方式中, 锁存器 216 一接收到潜在光子触发信号就锁存或标记时间戳。如果在接受时间窗口 312 内接收到使能光子触发信号, 那么触发逻辑电路 204 使事件被标记为有效并且保留时间戳。否则, 丢弃时间戳, 例如通过将时间戳或相对应的事件标记为无效。同样可以使用潜在光子触发信号来启动能量测量过程, 这种情况下只有当在接受时间窗口内接收到使能光子触发信号时才保留能量测量。这种实现方式特别适合于接受时间窗口 312 具有可变宽度的情形, 诸如上述动态可变的接受时间窗口的情况。

[0058] 现将结合图 4 描述成像方法。

[0059] 在 400 处, 启动 PET 或其他所需检查。

[0060] 在 402 处, 监测来自探测器通道的信号 302。

[0061] 在 404 处, 识别潜在地由有效光子产生的候选信号, 例如通过识别超过第一阈值 304 的信号。

[0062] 在 406 处, 认为候选信号合格, 例如通过在接受时间窗口 312 内确定信号 302 是否超过第二阈值 306。如果没有超过, 则过程返回至步骤 402。

[0063] 如果超过,则在步骤 408 获得时间戳、能量、通道位置和 / 或其他所需的事件数据。如上所述,在认为指示探测光子的信号合格之前可以测量一些或全部事件数据。

[0064] 在步骤 410 处,监测探测器通道直到完成检查。

[0065] 在步骤 412 处,重建事件数据以产生指示所探测到的事件的体积的或体积空间数据。虽然为了解释清楚,结合监测单个探测器通道来描述方法步骤 402-408,但本领域普通技术人员将认识到通常会监测多个探测器通道,并且在重建过程中使用来自各种通道的数据。

[0066] 在步骤 414,产生一个或多个指示体积空间数据的人类可读图像。

[0067] 可以预期各种可替换选择。例如,前述技术也可应用于非 TOF PET、单光子发射计算机断层摄影 (SPECT) 以及在噪声存在下需要精确信号探测的其他医学和非医学应用。本技术也更通常地适用于采集时间戳数据的脉冲或信号探测器。示例包括例如在高能物理实验中和激光测距中对电离或非电离辐射的探测,该高能物理实验测量参考触发与探测到的闪烁脉冲 (簇射) 之间的飞行时间。根据特定应用的需求,可以省略能量和时间戳测量二者中的一个或两个。还可以提供另外的其他测量。

[0068] 虽然定时测量的精确度通常受益于具有相对快的时间响应和相对慢的时间抖动的探测器,但根据具体应用的速度、灵敏度、能量和其他需求可以预期其他探测器和探测器配置。例如,APD 可以在盖革模式以外的模式下运行。也可以使用光电倍增管 (PMT)、多阳极 PMT 或其他光敏设备来实现光电传感器 140。可以使用其他闪烁体 142 材料,包括但不限于 LS0、LaBr、GSO 和 BGO。作为另一可替换选择,可以使用半导体和其他直接转换探测器。

[0069] 此外,可以使用其他适当的技术实现能量测量系统 206 和时间测量系统 208。时间测量系统 208 的一种可替代实现方式使用层次脉宽压缩技术来缩短脉冲的宽度或待测量信号的宽度。脉宽压缩尤其适用于脉冲缩减或其他时间测量技术,其中转换时间为最大脉宽的函数。

[0070] 现将结合图 5 和图 6 描述这种方法。在 502 处,将与待测量信号的最大期望宽度相对应的测量时间段 T_{\max} 划分为 N 个子段,其中 N 为大于 1 的整数。虽然子段可以是任意数量或长度,但根据以下关系建立子段的数量 N 是有利的:

[0071] 等式 2

[0072] $N = 2^x$

[0073] 其中 x 为大于或等于 1 的整数。类似地,子段的宽度 T_w 可以根据以下关系建立:

[0074] 等式 3

[0075] $T_w = \frac{T_{\max}}{N}$

[0076] 从另一观点看,可以将测量时间段的划分表示为将测量时间段 T_{\max} 多级别层次分解为 H 个级别,其中 H 为大于或等于 1 的整数。

[0077] 在图 6 中图示说明了这种布置的非限制性示例,其中测量时间段 T_{\max} 具有 100 个任意时间单位 (AU) 的宽度。如图所示,将测量时间段划分为四个 (4) 子段 n ,每个子段具有 25 个 AU 的宽度。从另一观点看,可将子划分视为测量时间段的两 (2) 级别二进制层次分解 (即 $H = 2$)。

[0078] 在 504 处接收具有任意时间宽度 T_p 的待测量信号 602。在图 6 的示例中,测量信

号具有 70 个 AU 的宽度 T_p 。

[0079] 在 506 处, 执行总时间测量来确定与测量信号宽度 T_p 相对应的子段 n 。以另一方式陈述, 就是将测量信号宽度减少一定量, 该量与一个或多个子段的宽度相对应。在所述示例中, 测量信号宽度 T_p 落入第三子段 (即 $n = 2$) 中。

[0080] 在 508 处, 对测量信号 602 落入所确定的子段内的部分 T_m 进行测量。在一种实现方式中, 使用脉冲缩减技术测量宽度。如图 6 所示, 测量部分 T_m 距离第三子段的开始有 20 个 AU。从另一可替代观点看, 测量部分 T_m 距离第三子段的结束有 5 个 AU。

[0081] 在 510 处, 使用所确定的子段 n 和所确定的部分 T_m 来计算测量信号宽度 T_p 。在子段具有相等宽度的情况下, 可以根据以下关系确定测量信号宽度 T_p :

[0082] 等式 4

$$[0083] \quad T_p = ((n-1) \times T_w) + T_m$$

[0084] 其中从子段的开始表示 T_m 。在图 6 的示例中, 测量信号宽度 T_p 因此为 $((2-1) \times 25) + 20 = 70\text{AU}$ 。等式 5 表示了关于测量时间段 T_{\max} 的测量信号宽度 T_p :

[0085] 等式 5

$$[0086] \quad T_p = T_{\max} - ((N-n) \times T_w) + T_m$$

[0087] 其中仍从子段的开始表示 T_m 。在子区域具有不相等的宽度的情况下或在从子段的结束表示 T_m 的情况下, 可以很容易地概括出等式 4 和等式 5。

[0088] 如将意识到的, 相对于常规脉冲缩减转换器, 所描述的技术将转换时间减少到 $1/4^H$ 。

[0089] 图 7 示出了示例性 TDC 系统 500, 其中 $N = 2$, $T_w = 0.5 \times T_{\max}$, $H = 1$ 。如图所示, TDC 系统 700 包括抽头延迟线 702、第一时间 - 数字转换器 704₁ 和第二时间 - 数字转换器 704₂ 以及第一逻辑与 (AND) 功能元件 706₁。

[0090] 延迟线 702 具有宽度 T_{\max} , 并且在与时间 $T_{\max}/2$ 或最大脉宽的一半相对应的点 708 处将其抽头。将第一逻辑与功能元件 706₁ 连接到延迟线的输入 710 和中点 708。

[0091] 时间 - 数字转换器 704 是为具有最大长度 $T_{\max}/2$ 的脉冲设计的脉冲缩减 TDC。将第一时间 - 数字转换器 704₁ 连接到第一与功能元件 706 的输出。将第二时间 - 数字转换器连接到延迟线 702 的输出。

[0092] 在一种实现方式中, 脉冲缩减转换器 704 包括含有不对称逆变器的反馈延迟线。不对称逆变器具有稍微不同的上升时间和下降时间, 因此使输入脉宽减少了时间 dT 。异步计数器对需要消失的脉冲的周期数量进行计数。注意, 也可以使用其他适当的时间 - 数字转换器实现方式、脉冲缩减或其他方式。

[0093] 在运行中, 在延迟线 702 的输入 710 处接收具有未知宽度 T_p 的测量信号 602。如果信号 602 具有大于 $T_{\max}/2$ (即 $n = 1$) 的宽度, 那么将具有宽度 $T_p - T_{\max}/2$ 的已缩短的脉冲送至第一时间 - 数字转换器 704₁ 并且使用其输出来确定 T_m 。如果脉冲短于 $T_{\max}/2$ (即 $n = 0$) 第一时间 - 数字转换器 704₁, 那么第二时间 - 数字转换器 704₂ 将接收已缩短的脉冲并且使用其输出来确定 T_m 。注意, 为了说明清楚, 省略了用于执行必需的计算的算术功能元件和各种控制功能元件。虽然图示说明为具有两个子段, 但也可实现三个或更多个子段。

[0094] 由于子区域不重叠, 因此所述系统 700 将对于子区域 $T_p < 0.5T_{\max}$ 和 $T_p > 0.5T_{\max}$ 展现出分段的线性响应。然而, 转换器 704 之间的差异以及延迟线 702 和与功能元件 706

的影响可能影响子区域的匹配,例如导致在子区域之间的交点处的失配,并且导致在不同子区域上的不同增益或斜率。在后测量校正模式下,针对各种子区域的需要的偏置和增益校正被存储在校准表或另外存储在适当的存储器中。在延迟均衡校正模式下,可以通过调整各个转换器 704 的时间分辨率 dT 来校准增益。可以通过将可调延迟元件插入到延迟线中来校正子区域之间的偏置。调整延迟元件以提供所需子区域之间的共同交点。

[0095] 如图 7 所示,在层次分解的每一级别 H 上使用一个转换器 704。可以通过在各个子区域之间复用转换器来减少转换器 704 的数量,例如通过对每个层次级别使用一个转换器 704 并且相应地复用转换器。此外,可以在相同的延迟线上实现各种级别层次,因此减少了其区域需求。

[0096] 已通过参考优选实施例对本发明进行了描述。在阅读和理解前面的详细描述的基础上,其他人员可以进行修改和改变。意在将本发明解释为包括所有这些修改和改变,只要它们落入所附权利要求书或其等价物的范围内。

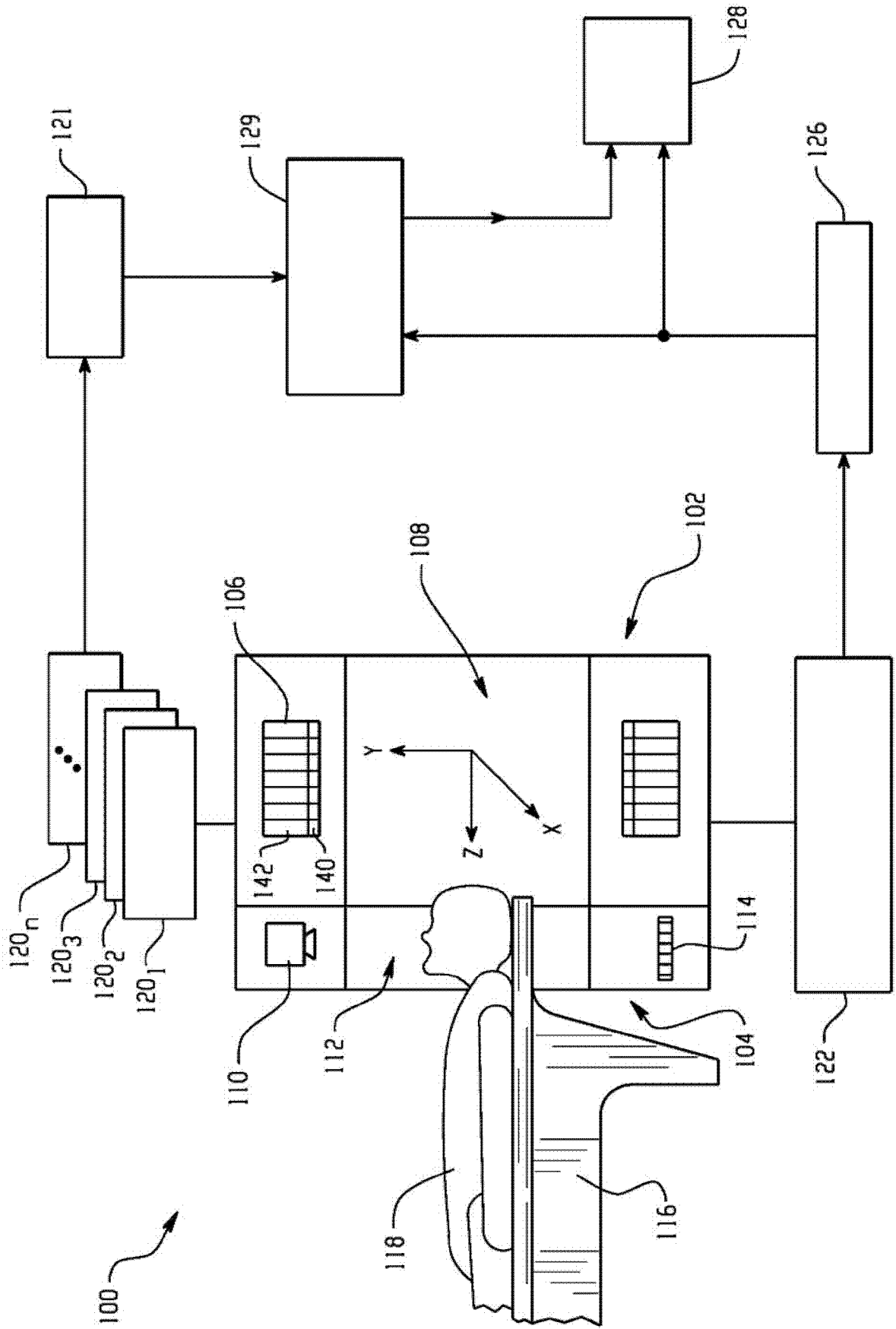


图 1

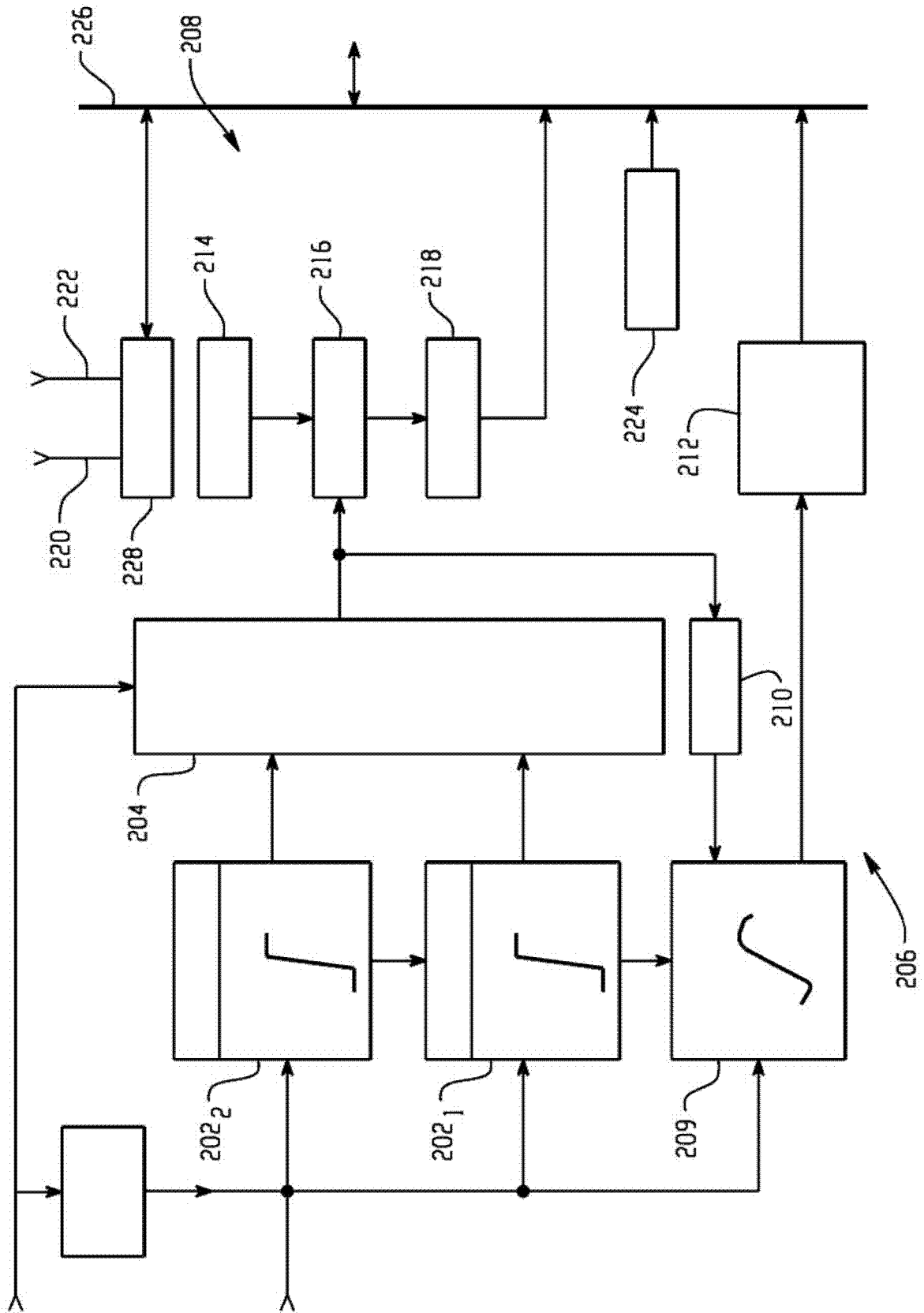


图 2

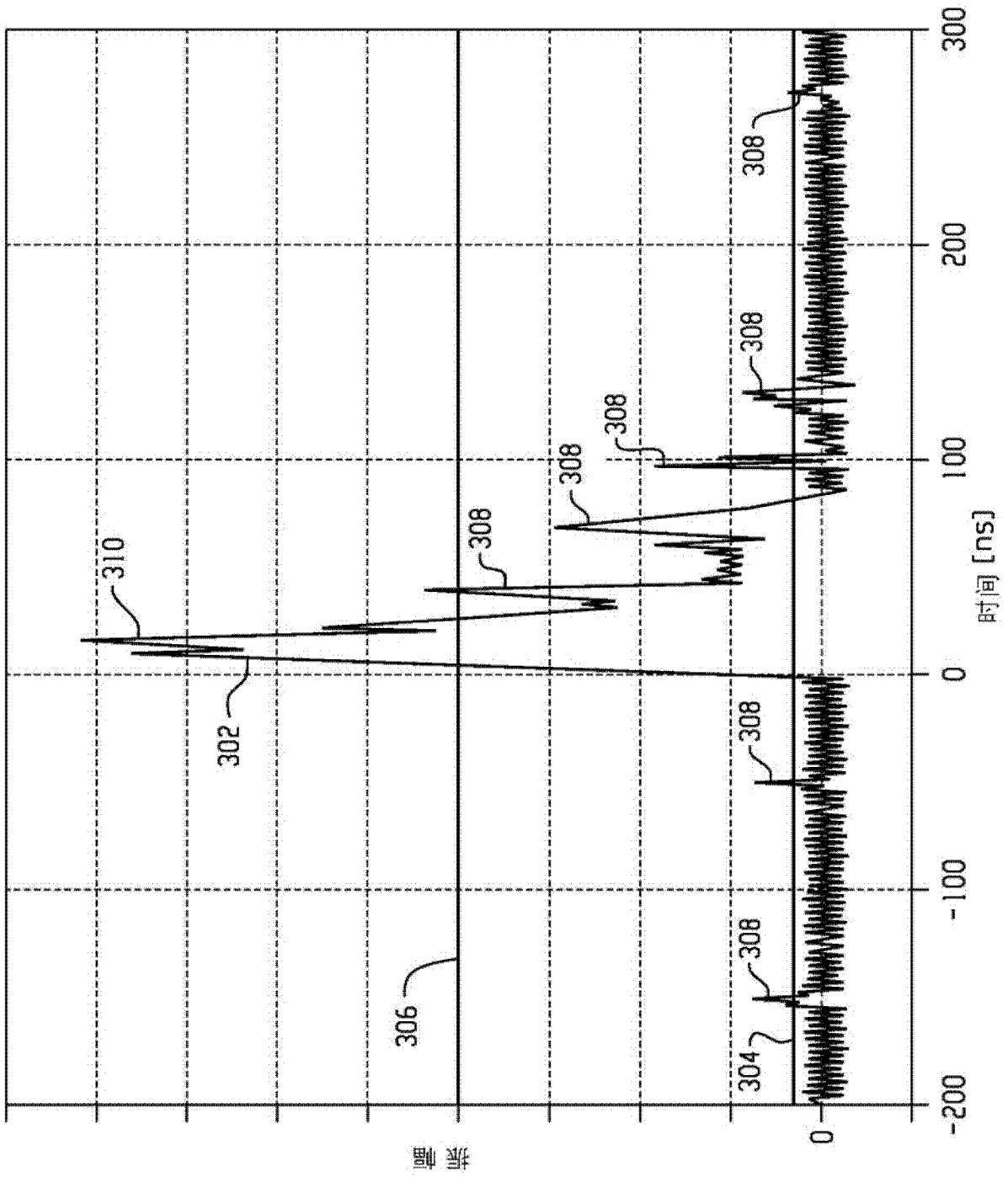


图 3A

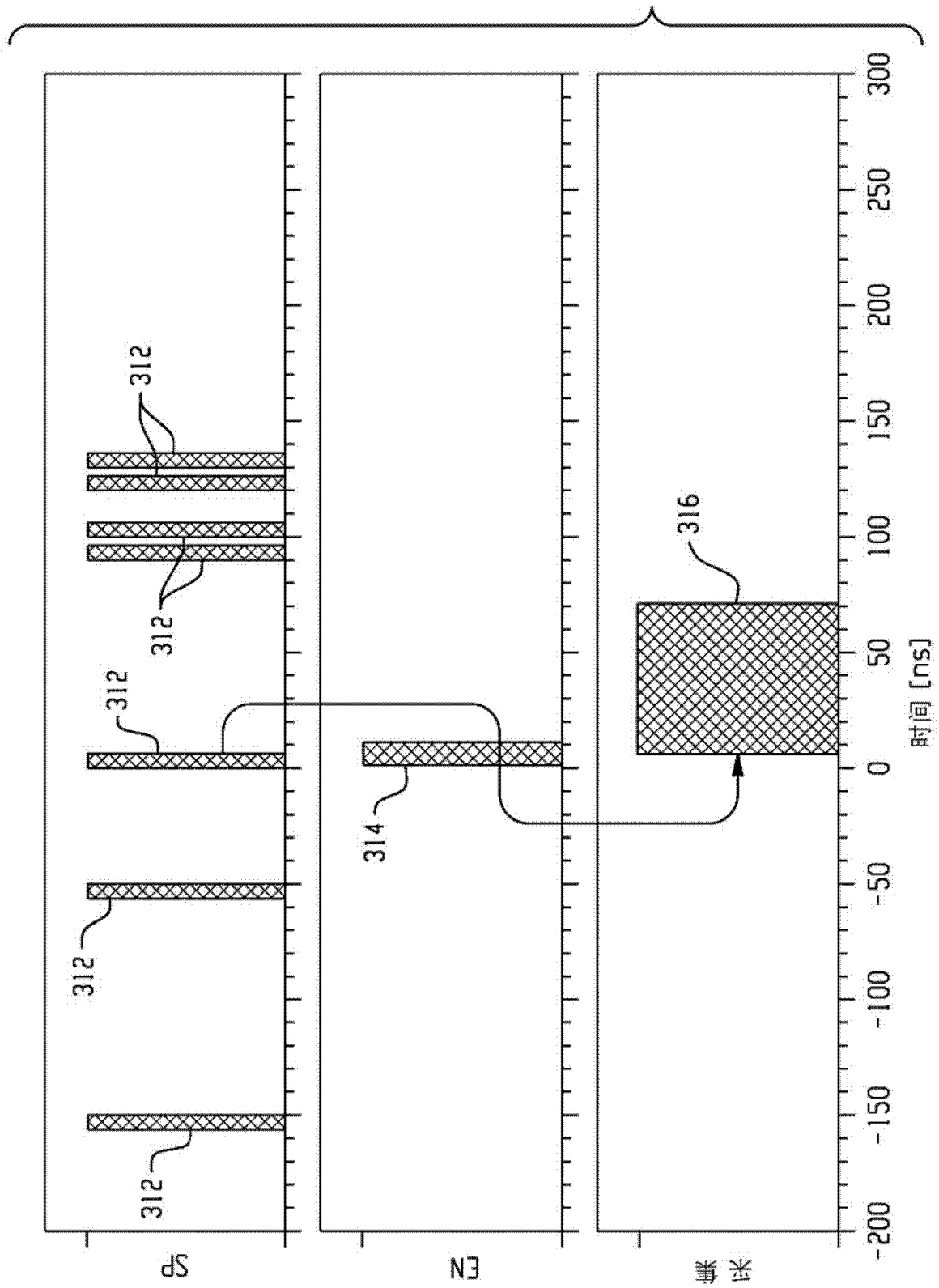


图 3B

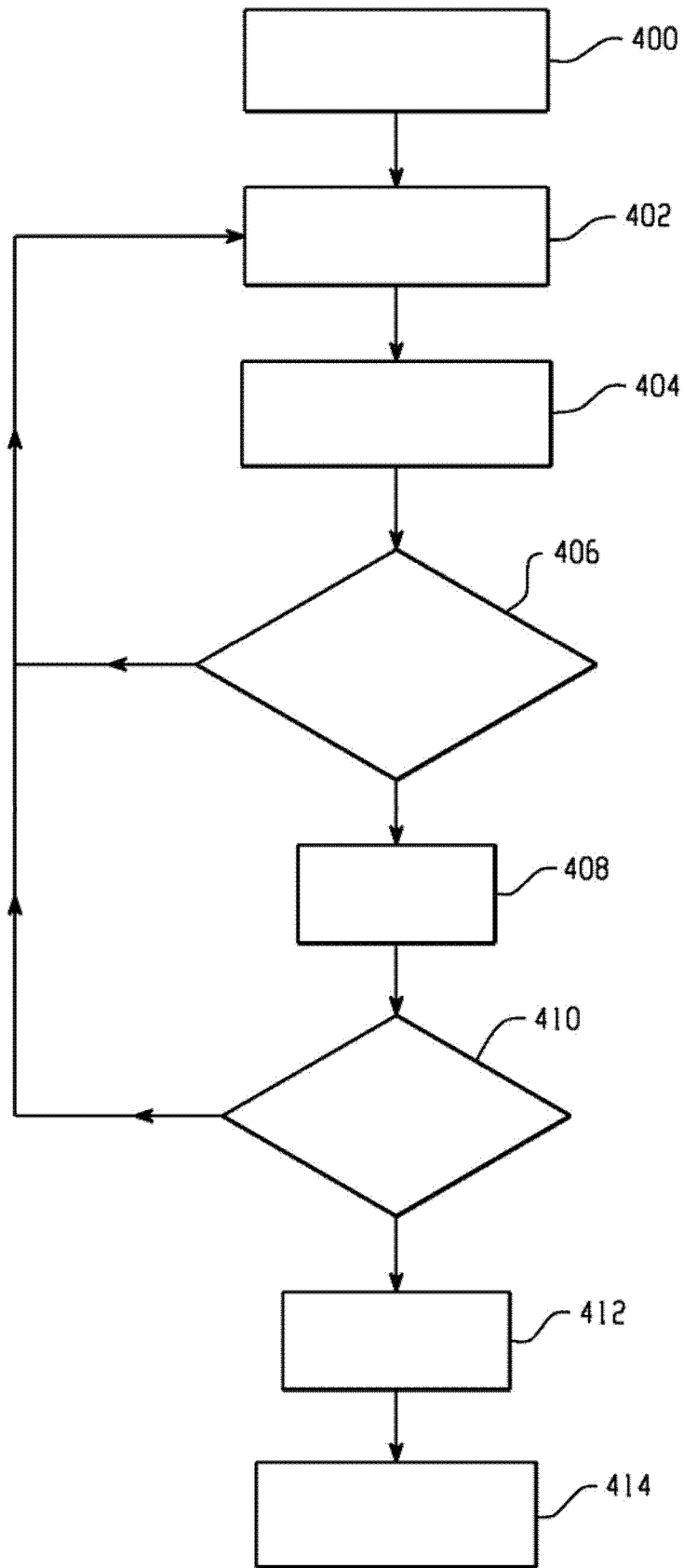


图 4

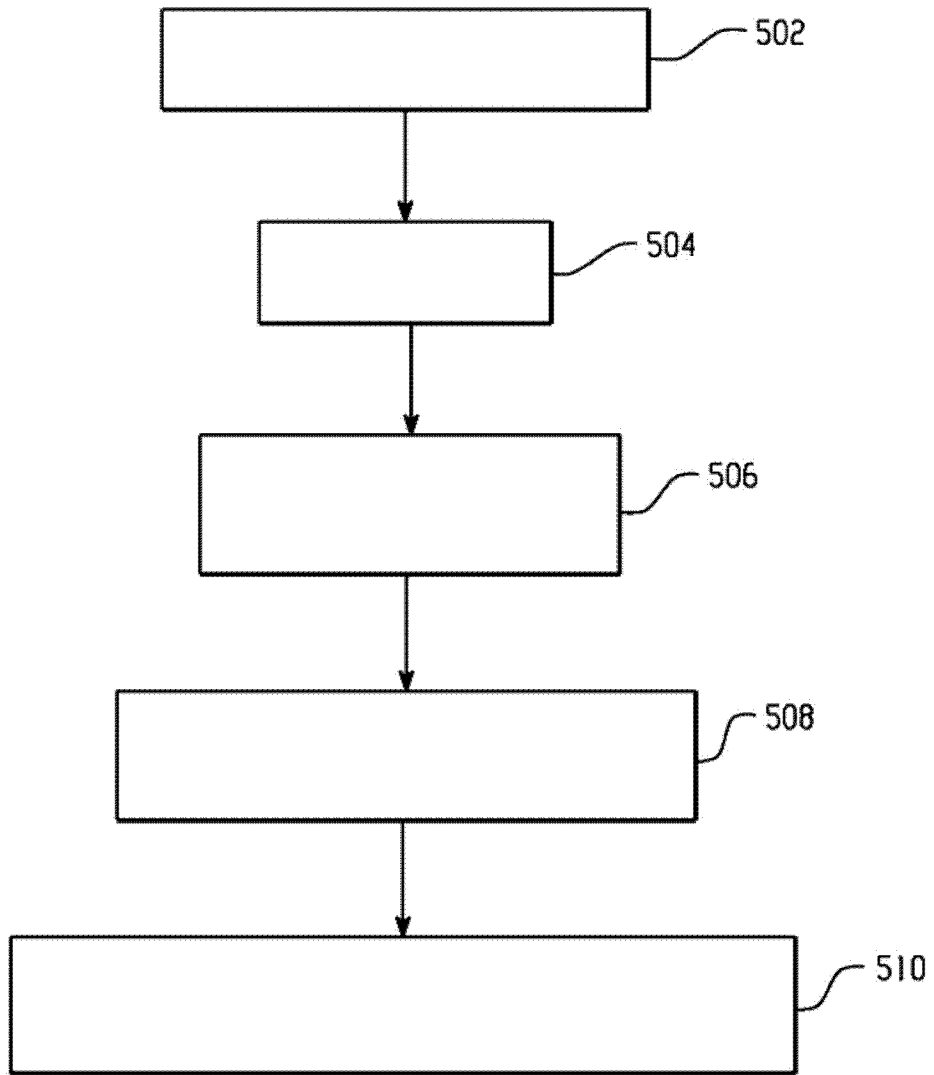


图 5

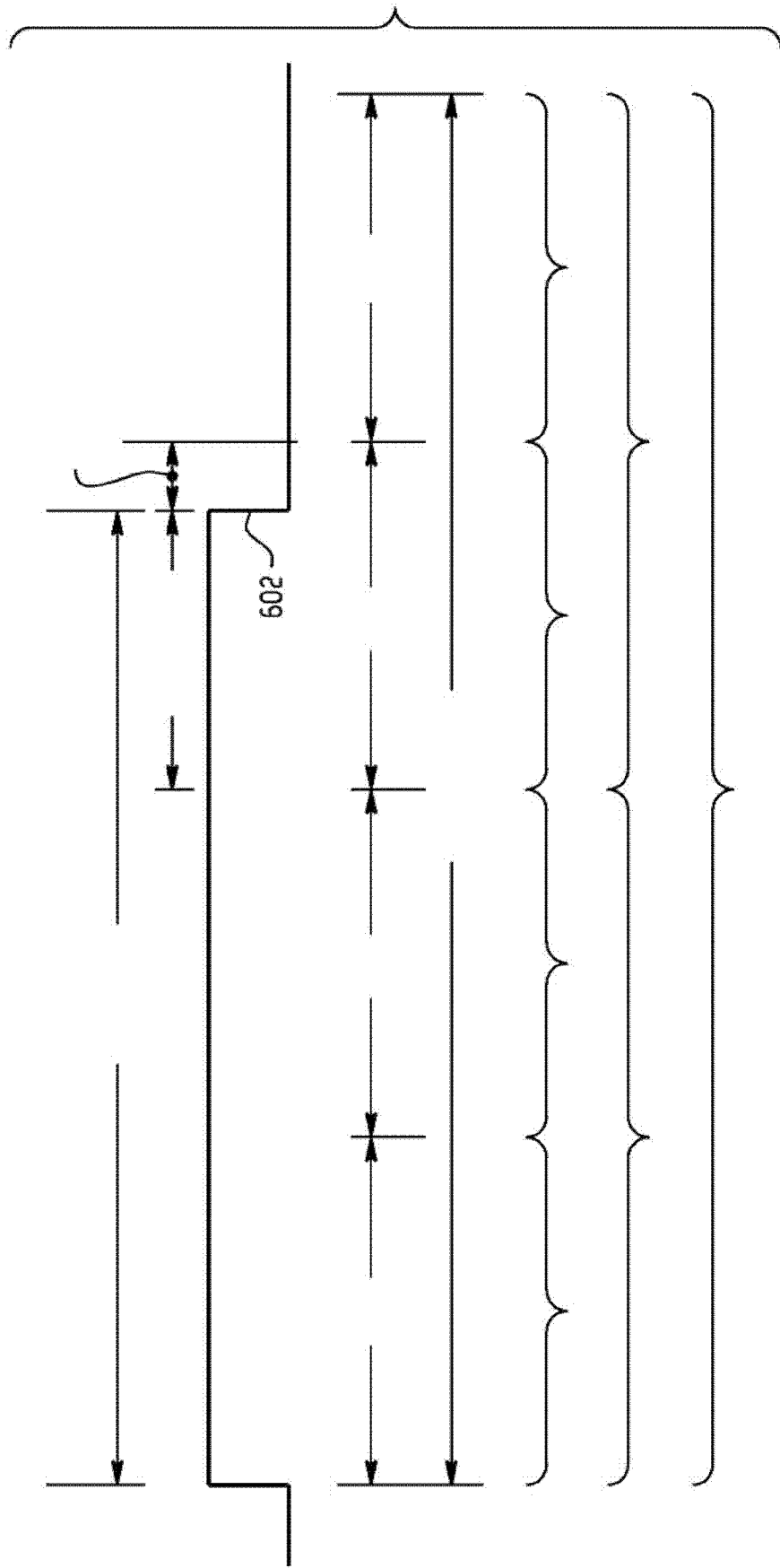


图 6

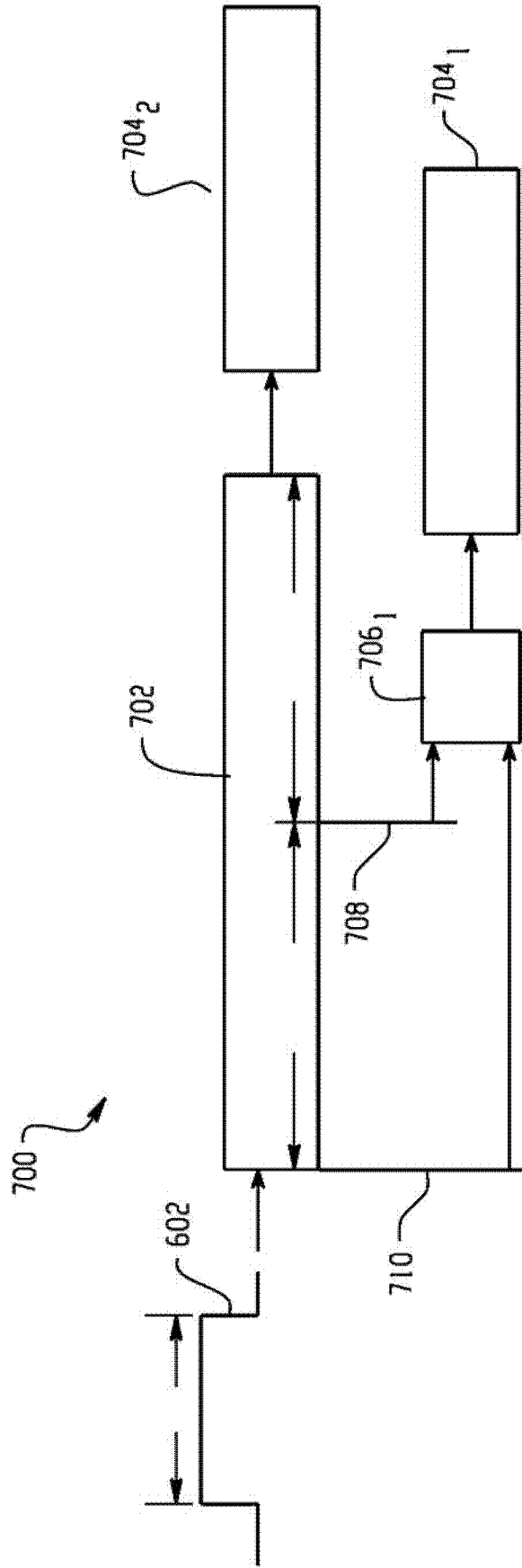


图 7