



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112384826 B

(45) 授权公告日 2024.07.12

(21) 申请号 201980038699.1

(22) 申请日 2019.04.25

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112384826 A

(43) 申请公布日 2021.02.19

(30) 优先权数据  
2018202912 2018.04.27 AU

(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2020.12.10

(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/AU2019/050366 2019.04.25

(87) PCT国际申请的公布数据  
W02019/204872 EN 2019.10.31

(73) 专利权人 南方创新国际股份有限公司  
地址 澳大利亚维多利亚省

(72) 发明人 M·鲍里 P·斯库勒  
C·麦克莱恩 A·周  
N·德拉布金

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司  
72001

专利代理师 李雪娜 周学斌

(51) Int.Cl.  
G01T 1/17(2006.01)

(56) 对比文件  
CN 101124725 A, 2008.02.13  
CN 101983342 A, 2011.03.02

审查员 华艳

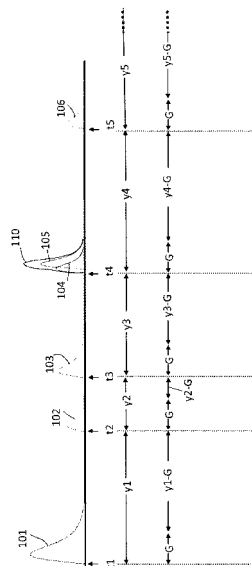
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

辐射脉冲检测器中的输入计数率估计

(57) 摘要

本发明提供了一种根据检测器信号来估计辐射脉冲检测器的输入计数率的方法,其中构成检测器信号的一些个体信号脉冲在时间上紧密间隔小于最小可靠检测间隙(104, 105;  $t_c, t_d$ )。一方面,使用检测算法来检测个体信号脉冲,并且定义多个间隔开始时间( $s_k$ ),每个被插入有检测到的个体信号脉冲到达时间( $t_k$ )中的至少一个,每个间隔开始时间( $s_k$ )比对应的最近检测到的个体信号脉冲到达时间( $t_{k-1}$ )晚至少最小可靠检测间隙。在每个间隔开始时间( $s_k$ )与对应的下一个检测到的个体信号脉冲到达时间( $t_k$ )之间计算对应的多个个体信号脉冲到达间隔。



1. 一种测量辐射脉冲检测器的输入计数率的方法,所述方法包括以下步骤:

(1) 在检测器处从辐射源接收辐射脉冲,每单位时间接收到的辐射脉冲定义了输入计数率;

(2) 从检测器接收检测器信号,所述检测器信号包括来自每个接收到的辐射脉冲的个体信号脉冲的聚合;

(3) 使用检测方法,在检测器信号中检测个体信号脉冲,并且确定对应的检测到的个体信号脉冲到达时间;

(4) 定义多个间隔开始时间,其每个相邻对被插入有检测到的个体信号脉冲到达时间中的至少一个,每个间隔开始时间比对应的最近检测到的个体信号脉冲到达时间晚发生指定检测间隙,所述指定检测间隙至少与检测方法的最小可靠检测间隙一样大,由此确保每个间隔开始时间与对应的下一个检测到的个体信号脉冲到达时间之间没有未检测到的个体信号脉冲发生;

(5) 计算每个间隔开始时间与所述对应的下一个检测到的个体信号脉冲到达时间之间的对应的多个个体信号脉冲到达间隔;

(6) 基于个体信号脉冲到达间隔,计算输入计数率参数。

2. 根据权利要求1所述的方法,进一步包括在验证阶段中的以下步骤:

基于对于检测器而言已知的个体脉冲形状,对不同已知输入计数率的检测器信号进行仿真;对仿真的检测器信号施行从检测到计算的步骤;以及

确认输入计数率参数对每个不同已知输入计数率产生无偏估计。

3. 根据权利要求1所述的方法,进一步包括在验证阶段中的以下步骤:

处理全部具有相同频谱但具有不同计数率的真实检测信号的数据集的集合,每个具有从中计算的导出参数,已知所述导出参数随着输入计数率进行缩放;以及

对每个数据集施行从检测到计算的步骤;以及

确认所计算的输入计数率参数与导出参数相对应地进行缩放。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中从每个数据集计算的导出参数是每个数据集的平均检测器信号值。

5. 根据权利要求1至4中任一项所述的方法,其中所述指定检测间隙是最小可靠检测间隙。

6. 根据权利要求1至4中任一项所述的方法,其中所述指定检测间隙是恒定值G。

7. 一种估计辐射脉冲检测器的输入计数率的方法,所述方法包括以下步骤:

(1) 在校准时段内在检测器处从辐射源接收辐射脉冲,每单位时间接收到的辐射脉冲定义了在校准时段期间的输入计数率;

(2) 在校准时段内测量来自检测器的检测器信号,所述检测器信号包括来自每个接收到的辐射脉冲的个体信号脉冲的聚合;以及

(A) 在校准模式下:

(3) 计算从校准时段内采样的检测器信号导出的参数,所述参数是输入计数率的已知函数;

(4) 使用前述权利要求中任一项所述的方法来估计校准时段期间的校准输入计数率,所述方法被应用于在校准时段内采样的检测器信号;以及

(5) 基于在校准时段内计算的参数、校准时段期间的校准输入计数率和已知函数,确定将参数的测量与输入计数率相关的校准函数;以及

(B) 在操作模式下:

(6) 计算在测量时段内从检测器信号导出的参数;

(7) 通过将校准函数应用于在测量时段内从检测器信号导出的参数来估计测量时段期间的输入计数率。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中输入计数率的已知函数是比例,并且校准函数和确定校准函数的步骤包括确定比例常数。

9. 根据权利要求8所述的方法,其中所述参数基于在校准或测量时段内检测器信号的平均样本值。

10. 根据权利要求7-9中任一项所述的方法,其中所述辐射脉冲检测器检测以下中的一个或多个:量子力学粒子,包括光子、亚原子粒子、离子或原子;地震波、声呐或雷达中的脉冲。

11. 根据权利要求10所述的方法,其中所述雷达包括声雷达和激光雷达。

12. 根据权利要求7-9中任一项所述的方法,其中所述方法在包括行李扫描的安全扫描、医学成像、包括矿物处理和分析的材料分析、气象感测、反射地震学或DNA测序中的至少一个中使用。

13. 一种包括实现权利要求1-6中任一项所述的方法的辐射脉冲检测器的装置。

14. 一种包括实现权利要求7-12中任一项所述的方法的辐射脉冲检测器的装置。

## 辐射脉冲检测器中的输入计数率估计

### 技术领域

[0001] 本发明涉及对辐射脉冲检测器中的输入计数率的估计。本发明可以应用于被设计为检测任何种类和任何能量的辐射能脉冲(“辐射脉冲”)的检测器,其包括被设计为检测量子力学粒子(诸如光子、亚原子粒子、离子、原子)的粒子检测器,或被设计为检测经典辐射脉冲(诸如地震波SONAR、SODAR、超声或其它物质振动或经典雷达或光脉冲(包括LiDAR))的检测器。

[0002] 其中辐射脉冲检测器将从本发明受益的应用包括但不限于安全扫描、行李扫描、医学成像、材料分析、气象感测、矿物处理、矿物分析、反射地震学以及DNA测序。如在所公开的国际专利申请PCT/AU2005/001423、PCT/AU2009/000395、PCT/AU2009/001648、PCT/AU2012/000678、PCT/AU2014/050420、PCT/AU2017/050514和PCT/AU2017/050512中更详细描述,当前申请人的先前专利申请描述了适用于当前发明的辐射脉冲检测器的各种应用,所述国际专利申请中的每一个的内容通过引用以其整体并入于此,作为其中可以在适当的软件中实现当前发明剩余实施例的应用和装置的示例。因此,当前发明扩展到用当前发明的方法适当编程的这样的装置以及在上述国际专利申请中描述的那些装置的应用。

### 背景技术

[0003] 在辐射脉冲检测器中,个体辐射脉冲进入检测器并且生成个体信号脉冲。通常,对于粒子检测器而言,个体信号脉冲是从光子的级联得到的电信号,所述光子的级联响应于入射在检测器材料上的辐射粒子。取决于辐射强度,每单位时间进入检测器并与检测器材料相互作用的辐射脉冲数会变化。该参数被称为输入计数率,并且对于取决于应用的原因进行测量很重要。相比之下,输出计数率是由检测电路实际检测到的辐射脉冲数,出于下面所讨论的各种原因,其一般小于输入计数率。估计输入计数率使得能够实现辐射强度的可靠表示,这在准确的定量辐射检测中很重要。例如,在辐射成像中,每个像素通过强度来表示,该强度是个体辐射脉冲(诸如量子粒子)的入射通量。在材料表征设备中,需要该输入计数率来对矿物或由所测量的辐射的特性所标识的其它成分的浓度进行标准化。在X射线衍射应用中,衍射环强度的准确测量对于表征被检查的材料的结构很重要。

[0004] 在辐射粒子检测器中,个体信号脉冲可以经过电子预处理,诸如将斜坡信号转换成脉冲信号,并且这样可能涉及模拟和数字级或组件。

[0005] 因为每个个体信号脉冲具有有限持续时间,并且每个个体信号脉冲的到达时间是随机且独立的,所以通常多于一个个体信号脉冲可以在该有限持续时间内到达检测器,从而导致“脉冲堆积”,由此信号是由两个或更多个紧密到达的个体信号脉冲的叠加引起的。在辐射通量非常高的情况下,或者在具有长个体信号脉冲持续时间的检测器中,可能的是聚合检测器信号持续在基线水平以上。

[0006] 脉冲堆积本身不会防止对所有多个重叠脉冲的区分,并且因此仍然有可能在堆积信号中检测到许多多个个体信号脉冲到达。存在许多信号处理技术来可靠地计数堆积信号内的一些或许多个体信号脉冲。简单的技术可能涉及时间差异,以通过检测信号中在阈值

以上的快速增加来定义每个脉冲的开始,从而检测每个个体信号脉冲到达。如果需要解析每个脉冲的能量,则需要更复杂的技术。例如,当前申请人已经发明了若干这样的技术,其中大多数依靠每个个体脉冲的测量或假定脉冲形状以及数学技术来解开个体脉冲,并且为每个个体脉冲分配到达时间和能量(振幅)。

[0007] 在所公开的国际专利申请PCT/AU2005/001423、PCT/AU2009/000395、PCT/AU2009/001648、PCT/AU2012/000678、PCT/AU2014/050420中更详细地描述了当前申请人的个体信号脉冲识别技术,所述国际专利申请通过引用并入上文。

[0008] 尽管事实是有可能在堆积信号中解开许多个体信号脉冲,甚至用复杂的算法,但是不可避免的情况是个体信号脉冲偶尔会同时有效地到达,使得由来自能量为 $E_1$ 的个体信号脉冲个体信号脉冲的个体信号脉冲与来自能量为 $E_2$ 的粒子的个体信号脉冲的总和形成的脉冲形状与来自近似能量为 $E_1+E_2$ 的单个个体信号脉冲的个体信号脉冲是无法区分的。

[0009] 另外,在一些粒子检测器中,粒子检测的物理学可能更一般涉及在每个检测事件之后没有或降低灵敏度的时段,由此在没有或降低灵敏度的时段内到达的随后粒子到达不能够或不太能够产生预期的个体信号脉冲。

[0010] 在高计数率下,由于计数之间的平均间隔降低了未检测到的个体信号脉冲数,因此到达增加,从而使得每秒到达的检测到的个体信号脉冲到达数越来越差地低估了实际输入计数率。

[0011] 输入计数率的倒数是个体信号脉冲到达  $\mu$  之间的平均时间,其被检测到的个体信号脉冲到达之间的平均时间高估。

[0012] 参考图1,示出了六个个体信号脉冲101-106在不同的时间到达。脉冲104和105紧密间隔,并且重叠以形成堆积信号110,并且在该示例中假定过于紧密间隔以至于不能被检测为单独的个体信号脉冲到达。因此,检测到的到达时间为 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ 。

[0013] 考虑到在测量时段 $T$ 中检测到的个体信号脉冲到达的总数为 $N$ ,其中到达时间为 $t_1 \cdots t_N$ ,其中 $T=t_N-t_1$ 。然后,检测到的个体信号脉冲到达之间的平均时间为 $\sum_n \frac{y_n}{N}$ ,其中 $y_n = t_n - t_{n-1}$ 是毗邻到达之间的间隔,并且评估为 $T/N$ 。这是  $\mu$  的高估和输入计数率  $1/\mu$  的低估,因为检测到的个体信号脉冲到达的总数 $N$ 低估了个体信号脉冲到达的总实际数 $N_p$ ,并且  $\mu = T/N_p$ 。

[0014] 解决该问题(有时被称为“停滞时间校正问题”)的常规方法是估计被称为“停滞时间”的参数 $T_{\text{停滞}}$ ,其对应于检测到每个脉冲之后的固定时间段,在该时间段中检测器被认为完全不能够进行检测或区分另一脉冲,并且在每个检测到的脉冲之后的停滞时间量内有效地停止时钟。这将时间段 $T$ 向下调整了停滞时间乘以检测到的脉冲数,即调整为校正时间段 $T_{\text{校正}}$ 。这种方法的问题在于停滞时间的概念过分简单化,并且之前对改进该方法的尝试已经聚焦于在更好地对停滞时间进行建模方面增加停滞时间概念的复杂性,从而改进了公式

$$\mu = T_{\text{校正}} / N$$

中时间段的向下调整。

[0015] 当前发明的目的是通过替代的方法来提供一种改进的输入计数率估计的方法。当前发明人已经开发了一种方法,该方法通过代替地聚焦于不允许将所有 $N$ 个检测到的计数

都用于输入计数率的计算中的方法上,避免了对“停滞时间”进行更好建模的需要。

[0016] Barat专栏8的美国专利7,728,307(第13-29行)公开了一种通过以下方法估计输入计数率的方法:仅聚焦于在个体信号脉冲的群集之间的、在其期间检测器信号处于基线的时间段,群集被定义为检测器信号在基线以上的连续时段。在尝试利用脉冲区分算法之前,将Barat的方法作为初步步骤来施行,以检测每个群集内潜在地多个个体信号脉冲到达。Barat指出,在一个集群的个体信号脉冲的结束和下一个的开始之间的时间段(在其期间信号处于基线或在基线以下)是泊松过程,其使得能够计算输入计数率作为集群之间的所有间隔的平均值。然而,当脉冲总是堆积时,由于信号永远不会降低到基线,因此无法在高计数率下使用此方法。此外,在中等计数率下,其中检测器信号周期性地下降到基线,但是每个集群内存在许多个体信号脉冲到达,大多数接收到的计数将被不必要地拒绝,并且检测器在其测量输入计数率程度的灵敏度严重受损,从而需要延长的计数时间,这是不合期望的,并且在动态改变的通量环境中可能不可用。

[0017] 当前发明使得能够在不对停滞时间进行详细建模的情况下对计数率进行无偏测量,同时维持高检测器灵敏度。

### 发明内容

[0018] 每个辐射脉冲到达均是独立于所有其它辐射脉冲到达的随机事件,其中每单位时间具有恒定的到达概率,而不考虑先前的到达历史。这引起从任意时间到下一个到达的间隔的平均值  $\mu$  的泊松分布,所述间隔不仅仅是如上面所描述的当前计数率估计方法中从一个到达到下一个到达的间隔,或者如上面的Barat参考中的那样从处于基线的每个个体信号脉冲集群的结束到下一个的开始的间隔。

[0019] 本发明通过利用开始时间的任意性以选择性地仅包括来自检测到的个体脉冲到达时间集的可靠间隔来工作。我们可以选取任何开始时间(表示为 $s_k$ ),而不是使用每个检测到的个体信号脉冲到达 $t_{n-1}$ 作为朴素方法的开始时间,或者使用每个集群的结束作为Barat的方法的开始时间。只要每个选取的开始时间 $s_k$ 至少是在最近的个体信号脉冲到达之后的最小可靠检测间隔,使用这样的开始时间的计算间隔就将是无偏的。如果是本文中所公开的方法所期望的,则可以确定最小的可靠检测间隔。用以这种方式选取的开始时间 $s_k$ ,当在 $t_k$ 检测到 $s_k$ 之后的下一个个体信号脉冲到达时,我们可以始终确保这是自开始时间 $s_k$ 以来的第一个个体信号脉冲到达,并且在该间隔中不存在未检测到的到达。然后,我们重复该过程,并且选取 $t_k$ 之后的下一个开始时间 $s_{k+1}$ ,其至少是任何先前检测到的个体信号脉冲到达之后的最小检测间隔,并且记录  $t_{k+1} - s_{k+1}$ 。因此,所获取的值集的平均值  $t_k - s_k$  是  $\mu$  的无偏估计量,因为在那些间隔内不存在未检测到的到达,并且因此它的倒数是输入计数率  $1 / \mu$  的无偏估计量。因此,有选择地选取开始时间和检测到的个体信号脉冲到达,以包括在平均间隔的计算中,该平均间隔是可靠地表示直到下一个实际个体信号脉冲到达为止的时间的间隔,并且不包含隐藏的附加个体信号脉冲到达。

[0020] 根据本发明的第一宽泛方面,提供了一种测量辐射脉冲检测器的输入计数率的方法,所述方法包括以下步骤:

[0021] (1) 在检测器处从辐射源接收辐射脉冲;

[0022] (2) 从检测器接收检测器信号,所述检测器信号包括来自每个接收到的辐射脉冲的个体信号脉冲的聚合;

[0023] (3) 在检测器信号中检测个体信号脉冲,并且确定对应的检测到的个体信号脉冲到达时间,其中一些被分开小于最小可靠检测间隙;

[0024] (4) 定义多个间隔开始时间,其每个相邻对被插入有检测到的个体信号脉冲到达时间中的至少一个,每个间隔开始时间比对应的最近检测到的个体信号脉冲到达时间晚发生至少最小可靠检测间隙;

[0025] (5) 计算每个间隔开始时间与对应的下一个检测到的个体信号脉冲到达时间之间的对应的多个个体信号脉冲到达间隔;

[0026] (6) 基于个体信号脉冲到达间隔,计算输入计数率参数;

[0027] 其中,最小可靠检测间隙是最小时段,所述最小时段将未检测到的个体信号脉冲到达排除于在每个个体信号脉冲到达间隔内发生之外。

[0028] 根据本发明的第二宽泛方面,提供了一种测量辐射脉冲检测器的输入计数率的方法,所述方法包括以下步骤:

[0029] (1) 在检测器处从辐射源接收辐射脉冲;

[0030] (2) 从检测器接收检测器信号,所述检测器信号包括来自每个接收到的辐射脉冲的个体信号脉冲的聚合;

[0031] (3) 在检测器信号中检测个体信号脉冲,并且确定对应的检测到的个体信号脉冲到达时间,其中一些被分开小于最小可靠检测间隙;以及

[0032] (4) 仅基于大于指定检测间隙的相邻检测到的个体信号脉冲到达时间之间所选择的间隔,并且在它们大于指定检测间隙的程度上,计算输入计数率参数,所述指定检测间隙大于最小可靠检测间隙;

[0033] 其中最小可靠检测间隙是最小时段,所述最小时段将未检测到的个体信号脉冲到达排除于在每个个体信号脉冲到达间隔内发生之外。

[0034] 根据本发明的第三宽泛方面,提供了一种估计辐射脉冲检测器的输入计数率的方法,所述方法包括以下步骤:

[0035] (1) 在校准时段内在检测器处从辐射源接收辐射脉冲,每单位时间接收到的辐射脉冲定义了在校准时段期间的输入计数率;

[0036] (2) 在校准时段内测量来自检测器的检测器信号,所述检测器信号包括来自每个接收到的辐射脉冲的个体信号脉冲的聚合;以及

[0037] (A) 在校准模式下:

[0038] (3) 计算从校准时段内采样的检测器信号导出的参数,所述参数是输入计数率的已知函数;

[0039] (4) 使用所选取的输入计数率估计方法来估计校准时段期间的校准输入计数率,所述方法被应用于在校准时段内采样的检测器信号,已知所述检测器信号在估计的校准输入计数率下是可靠的;以及

[0040] (5) 基于在校准时段内计算的参数、校准时段期间的校准输入计数率和已知函数,确定将参数的测量与输入计数率相关的校准函数;以及

[0041] (B) 在操作模式下:

[0042] (6) 计算在测量时段内从检测器信号导出的参数；

[0043] (7) 通过将校准函数应用于在测量时段内从检测器信号导出的参数来估计测量时段期间的输入计数率。

[0044] 在一个实施例中，输入计数率的已知函数是比例，并且校准函数和确定校准函数的步骤包括确定比例常数。该参数可以基于校准或测量时段内检测器信号的平均样本值。

[0045] 在一个实施例中，所选取的输入计数率估计方法是权利要求1至16中任一项的方法之一。

[0046] 本发明的进一步实施例和方面的特征可以从说明书和所附权利要求中确定。

## 附图说明

[0047] 图1是根据实施例的图示本发明的操作的示例检测器信号波形；

[0048] 图2是经受脉冲堆积的多个脉冲的另一示例检测器信号波形；

[0049] 图3是示出本发明实施例的性能的数字仿真。

## 具体实施方式

[0050] 现在将描述当前发明的实施例。

[0051] 在上面第一和第二方面中提到的检测检测器信号中的个体信号脉冲并且确定检测到的个体信号脉冲到达时间(以及可选地确定对应的检测到的个体信号脉冲能量)的步骤可以通过本领域已知的任何脉冲检测算法来施行，包括上面提到的申请人的那些方法和将来的这样的方法，并且在此无需进一步阐明。在下文中，假定从这样的脉冲检测算法可获得检测到的个体信号脉冲到达时间 $t_k$ 的流。

[0052] 首先参考图1，本发明的实施例利用了开始时间 $s_k$ 的选择，其是在 $t_{k-1}$ 处最近检测到的个体信号脉冲到达之后的间隙 $G$ 。将间隙 $G$ 选取为接近但大于最小可靠检测间隙的恒定值。选取所有这样的可用开始时间 $s_k$ 将可用的可靠计数数据最大化，以用于确定输入计数率，其可以按照平均间隔 $\mu$ 而被表达为

$$[0053] \quad \mu = \sum_{k: y_k > G} \frac{y_k - G}{N_G} \quad (\text{等式1})$$

[0054] 其中 $N_G$ 是满足准则 $y_k > G$ 的样本数。该数量有效地并且在毗邻检测到的个体信号脉冲到达 $y_k$ 大于 $G$ (即 $y_k - G$ )的程度上，取大于 $G$ 的毗邻检测到的个体信号脉冲到达 $y_k$ 之间的所有间隔的平均值。在图1中，可以看到该序列中使用了所有五个检测到的个体信号脉冲到达时间。

[0055] 上面的等式1仅对数字采样间隔的不连续影响不显著的连续数量严格有效，在间隙 $G$ 是数字时间采样间隔 $\Delta$ 的大倍数的情况下，或者在记录的到达时间 $t_k$ 以子样本准确度来计算的情况下发生，前一种情况或后一种情况取决于上面讨论的和现有技术中已知的特定脉冲识别算法而适用。在数字采样间隔的不连续影响显著的情况下，必须应用校正，该校正容易确定。例如，如果记录的到达时间 $t_k$ 仅计算到最近的数字时间采样点，则启发式推理通知，由于舍入误差，准则 $y_k > G$ 事实上是 $y_k > G - \frac{1}{2}\Delta$ ，并且因此适用以下校正的公式：

$$[0056] \quad \mu = \sum_{k: y_k > G} \frac{y_k - G + \frac{1}{2}\Delta}{N_G} \quad (\text{等式2})$$

[0057] 启发式论点可以通过形式推导来验证。

[0058] 图2是其中个体信号脉冲到达全部堆积在一起的示例,并且其中信号200没有返回到基线。这是在两种场景中考虑的,其中检测到或没有检测到 $t_d$ 处的个体信号脉冲到达,因为其只能通过201处略有畸形的峰值证明,以及取决于可能检测到或可能没有检测到到达检测算法的复杂程度。我们还假定 $G$ 仅仅大于 $t_d - t_c$ 。总和中的前两项将根据上面的算法 $t_b - t_a - G$ 和 $t_c - t_b - G$ 。如果检测到 $t_d$ 处的个体信号脉冲到达,则总和中的下一项将是 $t_e - t_d - G$ 。总和中的这些项在图2中被表示为沿轴线的阴影线部分,并且被对应排除的时间段用每个检测到的个体信号脉冲到达之后的持续时间 $G$ 的受阻部分图示。如果没有检测到 $t_d$ 处的个体信号脉冲到达,则总和中的下一项将是 $t_e - t_c - G$ 。

[0059] 在上面的示例中,存在其中一些检测到的个体信号脉冲到达时间没有出现在总和中的实例,因为它们在下一个检测到的个体信号脉冲到达的 $G$ 内发生。这是本发明的操作原理:排除可能隐藏未检测到的个体信号脉冲的不可靠间隔。虽然原则上对 $G$ 不存在上限,但是值越大,就拒绝越多检测到的个体信号脉冲到达,并且积累足够的样本以用于准确评估平均到达间隔所花费的时间也就越长,所述平均到达间隔的标准误差与样本数的平方根成反比。因此,高于 $G$ 的必要值有效地降低了检测器的灵敏度。

[0060] 在计算中拒绝某些检测到的个体信号脉冲到达时间是本发明的重要优点,与试图计算准确的停滞时间并且利用所有可用的检测到的个体信号脉冲到达的现有技术方法相比,本发明使得能够实现鲁棒的性能。

[0061] 信号的数字仿真可以被用来验证本发明的实施方式,并且提供一种确定 $G$ 的最佳值的机制。图3示出了对检测器信号进行数字仿真得到的结果,所述检测器信号由硅漂移二极管(SDD)检测器典型的个体辐射脉冲在每秒高达1000万计数的不同仿真实际输入计数率下形成。在每个仿真的实际输入计数率下,用间隙参数 $G$ 的不同值来施行输入计数率估计算法。所使用的个体信号脉冲检测算法是PCT/AU2014/050420中所公开的方法。 $G$ 的零值表示朴素计算,如预期地示出,随着实际计数率上升和未检测到的个体信号脉冲到达的百分比增加,估计的输入计数率越来越被低估。随着 $G$ 值增加,百分比误差会降低,直到达到120 ns的值为止,该误差在每秒高达1000万计数的所有实际计数率下基本上为零。仿真中的模拟到数字采样率为250 MHz,因此 $G$ 值为120 ns表示30个样本。较高的 $G$ 值(未示出)也示出了基本上为零的误差率,并且随着更多检测到的到达被拒绝,统计准确度所需的时间增加。

[0062] 因此,仿真可以被用来通知特定的指定检测间隙是否是足够的,并且通过使指定检测间隙变化,确定最小可靠检测间隙的估计。因此,在该示例中,120 ns是最小可靠检测间隙的估计。

[0063] 因此,根据本发明的方法的特定实施方式的仿真也可以被用来验证该实施方式产生输入计数率的无偏估计,而不必确定什么是最小可靠检测间隙。这通过简单地在输入计数率的期望范围内对方法进行仿真并且验证估计计数率的误差保持在期望的限制内来施

行。

[0064] 真实数据还可以被用来提供用于确定适当的G值的机制。一种技术是处理数据集的集合,所有数据集都具有相同的频谱但具有不同的计数率。这样的数据集的集合可以通过使用相同的辐射源,并且用在距检测器不同距离处的源测量检测器信号来形成,由此使实际计数率变化。如果 $x(t)$ 是每个时间样本点 $t$ 处的检测器信号值,则 $T$ 个样本的平均样本值 $\frac{1}{T}\sum_{t=1}^T x(t)$ 具有随着实际输入计数率线性缩放的预期值。检查根据本发明的算法计算的输入计数率与每个数据集的平均样本值具有恒定比率,提供了以下确认:算法中使用的G值在数据集中的计数率的范围内提供了输入计数率的无偏估计量。非恒定比率表明G值过低。相似地,真实数据可以被用于根据本发明的方法的任何特定实施方式,无论是否使用固定间隙G。

[0065] 将领会到,只要每个开始时间 $s_k$ 至少是最小的可靠检测间隙,该方法就保持无偏,在通过其选取每个开始时间 $s_k$ 的精确算法中存在相当大的自由度。例如,在上面的示例中,在最近的检测到的个体信号脉冲到达之后留下了恒定间隙G,但是间隙也可以在每个样本处随机变化,只要它保持在最小可靠检测间隙以上,或者还可以包括取决于其它参数的附加值。例如,用识别脉冲的开始时间和脉冲宽度二者的个体信号脉冲检测算法,可以将最近的脉冲的宽度添加到间隙中。因此,权利要求中的术语“指定检测间隙”意图足够宽泛以涵盖不一定恒定但是随机地或根据其它参数的公式变化的指定检测间隙,除非相反的意图是显而易见的。

[0066] 另外,在检测到的个体信号脉冲到达时间的定义上有相当大的自由度。只要个体信号脉冲到达时间与脉冲上的某处相关,而不必与如图中所示出的上升时间的开始相关,该算法就可以成功操作,因为最小可靠检测间隙简单地向上调整以补偿任何差异。可能甚至是逐个样本的脉冲上的不一致位置也通过算法鲁棒地处置,根据上面所描述的技术容易验证这一点。

[0067] 还将领会到,在本发明的一些实施方式中,不需要直接知道最小可靠检测间隙,因为仅必要的是该检测间隙始终足以提供输入计数率的无偏估计,以便确保检测间隙大于最小可靠检测间隙。在本发明的实施例中,可以选取特定的指定检测间隙,并且再次足以验证该指定检测间隙提供了输入计数率的无偏估计,以便确保指定检测间隙大于最小可靠检测间隙。在本发明的实施例中,直接知道最小可靠检测间隙对优化检测器灵敏度和最大限度地使用检测到的个体信号脉冲到达时间很有用。

[0068] 在本发明的第三宽泛方面的实施例中,确定适当的G值的上述真实数据方法也可以被用作估计输入计数率的另一方法。在简单的实施例中,在操作模式下,在每个输入计数率估计时间 $t_e$ 处,平均样本值 $X_e = \frac{1}{T}\sum_{t=t_e}^{T+t_e} x(t)$ 可以乘以校准常数 $C$ 。通过在校准时间段 $t_e$ 到 $t_e+T$ 内的检测器信号上施行所选取的输入计数率确定方法以产生校准计数率 $R_c$ ,并且在相同的校准时间段内计算平均样本值 $\frac{1}{T}\sum_{t=t_e}^{t_e+T} x(t)$ 以产生校准平均样本值 $X_c$ ,在校准模式下确定校准常数 $C$ 。校准常数则为比率 $R_c/X_c$ 。在校准时间段期间,如果必要的话,则调整辐射源或检测器位置,使得测量计数率处于所选取的输入计数率估计方法的可靠区域中(通常

为足够低的测量计数率)。用于校准的所选取的输入计数率估计方法可以是本文中在第一和第二宽泛方面中所描述的方法,在这种情况下,可靠区域是宽的,或现有技术方法,在这种情况下,可靠区域不太宽。可以在期望较低计算负荷的情况下使用该平均值采样方法,并且本文中所描述的基于间隙的方法仅可以用于偶尔的校准。可以将上面所描述的方法一般化为从检测器信号导出的任何参数,该参数是输入计数率的已知函数。可以用本文中以及在第一和第二宽泛方面中所描述的经验证的无偏估计量方法来发现新参数和函数。

[0069] 通过本发明的方法,提供了一种更准确的辐射脉冲检测器和检测方法。还将领会到的是,使用在标准计算机处理器或数字信号处理器硬件中实现该方法的软件可以容易地应用本发明的方法。这样的硬件已经是众所周知的,并且通常存在于辐射脉冲检测器系统中。

[0070] 本领域技术人员还将领会到,在不脱离本发明的范围的情况下,可以对本发明做出许多其它变型,所述本发明的范围由最宽泛的范围以及权利要求来确定。

[0071] 例如,虽然在上面的示例中检测器信号是在恒定采样率下采样的数字信号,但是权利要求中所限定的检测器信号一般扩展到包括模拟信号的任何时间筒档检测器信号。

[0072] 例如,本发明扩展到与输入计数率相关的任何参数的计算,或者可以从中推导出输入计数率的任何参数的计算,包括其倒数、平均个体信号脉冲到达间隔  $\mu$  或其任何函数。权利要求中的术语“输入计数率参数”意图扩展到这样的变型。

[0073] 将理解的是,在输入计数率估计的计算中使用的脉冲到达间隔数  $N_G$  取决于所需的准确度是可变的,这可以通过平均个体信号脉冲到达间隔  $\mu$  除以  $\sqrt{N_G}$  的泊松分布的平均值的标准误差来容易地预测。

[0074] 另外,虽然图示全部与其中信号在基线以上的脉冲堆积情况相关,并且脉冲堆积是一些检测到的个体信号到达时间被分开小于最小可靠检测间隙的原因,但是本发明扩展到其中这样的不可靠间隔存在的原因与脉冲堆积是否发生或是否是原因无关的可预见情况。

[0075] 还另外,虽然本文中提供的等式计算了数字集的算术平均值以导出  $\mu$ ,但是其它统计参数的计算在最宽泛的范围内,所述其它统计参数等于或固定为泊松分布的算术平均值的函数,并且因此使得能够实现其推导,诸如中位数、众数、方差、偏度、峰度或熵。

[0076] 在所附权利要求中以及在本发明的前面描述中,除非上下文由于表达语言或必要的暗示而另外需要,否则词语“包括”或诸如“包括”或“包含”之类的变型以包括性意义使用,即在本发明的各种实施例中,用于指定所述特征的存在,但不排除另外特征的存在或添加。另外,除非上下文要求,否则权利要求中记载的任何方法步骤不一定意图在时间上以所写入的顺序施行,或者一旦开始就没有暂停地施行。

[0077] 在数字采样效果的情况下,由等式2提供的类型的校正意图在所附权利要求的范围内。

[0078] 要理解的是,如果在本文中提及任何现有技术公开,则这样的参考文献并不构成承认该公开在澳大利亚或任何其它国家中形成了本领域公知常识的一部分。

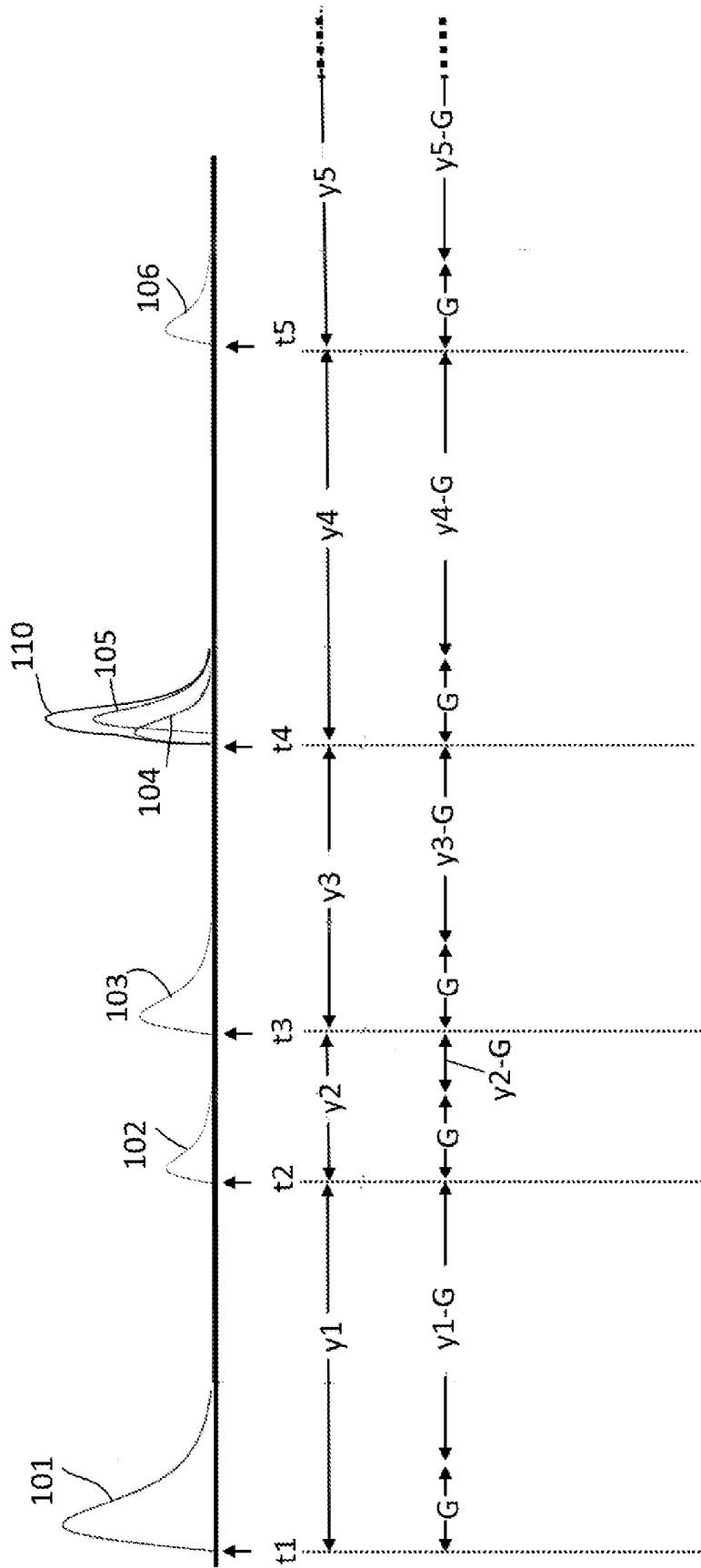


图 1

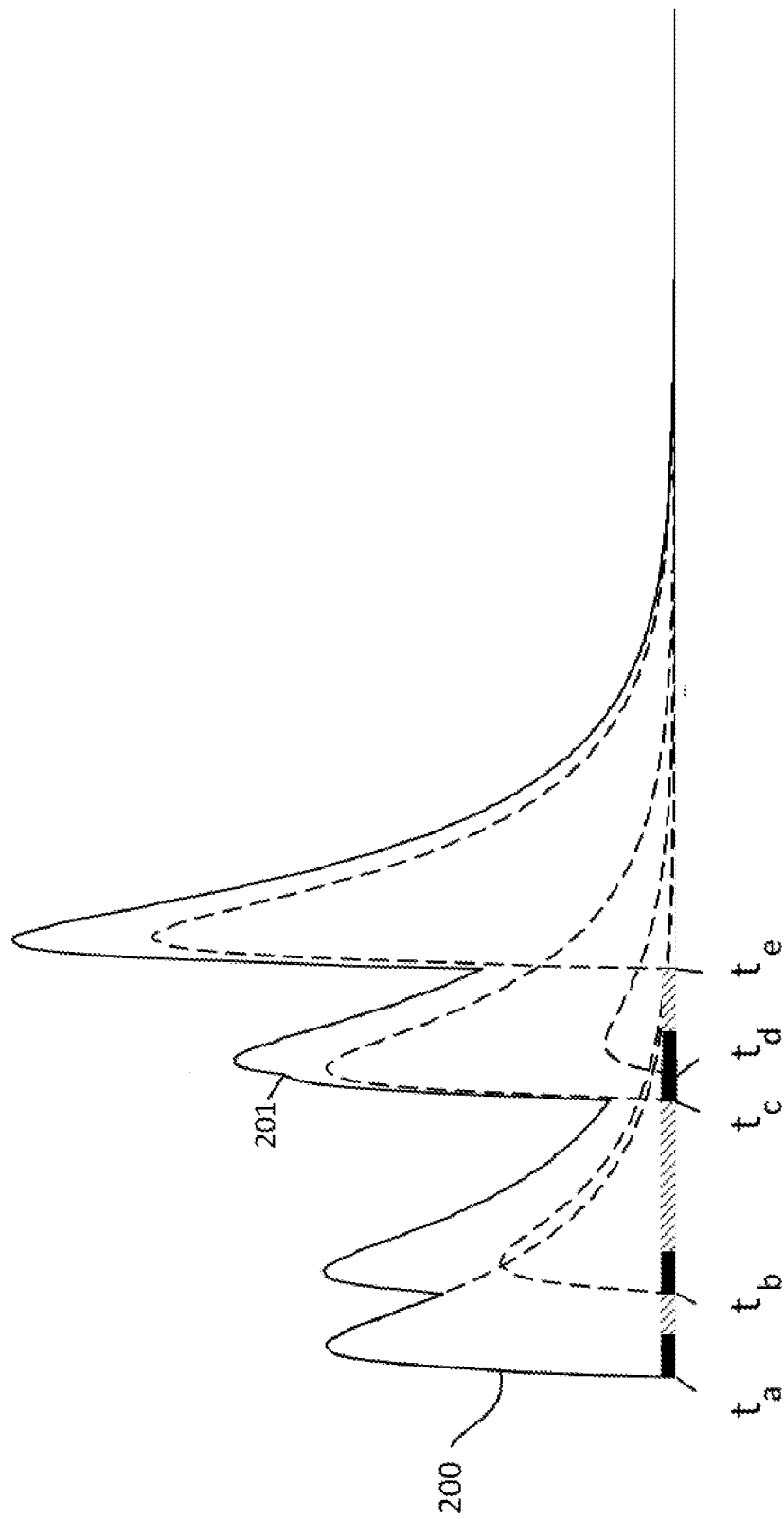


图 2

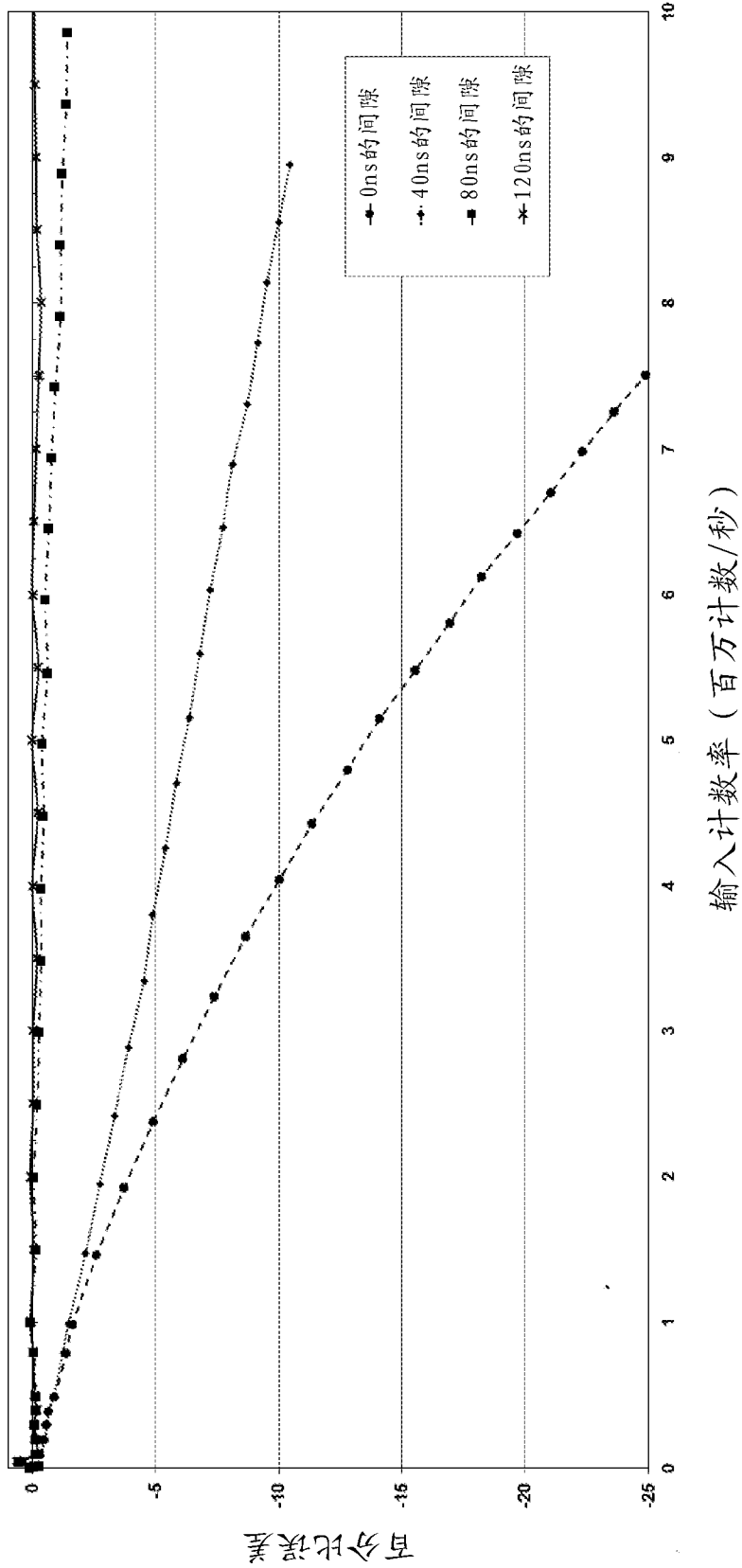


图 3