

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 441 067**

51 Int. Cl.:

G01T 3/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.07.2010 E 10729922 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.10.2013 EP 2478391**

54 Título: **Recuento de multiplicidad neutrónica**

30 Prioridad:

18.09.2009 EP 09170727

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

31.01.2014

73 Titular/es:

**THE EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY
(EURATOM), REPRESENTED BY THE EUROPEAN
COMMISSION (100.0%)
200, rue de la Loi
1049 Brussels, BE**

72 Inventor/es:

**HOLZLEITNER, LUDWIG y
SWINHOE, MARTYN, T.**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 441 067 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Recuento de multiplicidad neutrónica.

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere en general a un recuento de neutrones, en particular a un procedimiento de recuento de multiplicidad neutrónica.

10 **Antecedentes de la técnica**

15 El recuento de multiplicidad neutrónica es una técnica utilizada para someter a ensayo de manera no destructiva la cantidad de material fisionable tal como, por ejemplo uranio (U), plutonio (Pu), californio (Cf), etc. El recuento de multiplicidad neutrónica se basa en el hecho de que se emiten neutrones de manera sustancialmente simultánea a partir de eventos de fisión espontánea o inducida. Las probabilidades de tener un 0, 1, 3, etc. neutrones en un evento de fisión (denominado a veces la distribución de multiplicidad) proporciona una firma del material que está examinándose.

20 El recuento de multiplicidad neutrónica puede considerarse como generalización del recuento de coincidencias neutrónicas, que busca pares de neutrones que están próximos de manera conjunta en el tiempo, a triples, cuádruples y múltiplos de orden superior de neutrones. Normalmente, un detector de neutrones emite un tren de impulsos, representando cada uno un neutrón detectado. La distribución de los impulsos en el tiempo o la distribución de los intervalos temporales entre los impulsos, cualquiera que sea más conveniente, está provocada por una combinación desconocida *a priori* de reacciones de fisión espontánea, de fisión térmica (α, n) y eventos
25 externos. Mientras que los eventos de fisión producen múltiples neutrones que coinciden en el tiempo, las reacciones (α, n) y los eventos externos producen neutrones que se distribuyen aleatoriamente en el tiempo.

30 Un detector de neutrones comprende normalmente un cuerpo de polietileno que presenta una cavidad en la parte central para albergar una muestra durante la medición. Alrededor de la cavidad, contadores proporcionales de gas, a menudo tubos de ^3He , están incrustados en el cuerpo de polietileno. Si se emite un neutrón desde la muestra, existe una alta probabilidad de que colisione con el hidrógeno en el polietileno. Los neutrones pierden así energía hasta que se alcanza un equilibrio térmico con el material. Una fracción de estos neutrones termalizados eventualmente choca con un átomo del gas en uno de los contadores de proporcionalidad de gas. Si un neutrón choca con un átomo de gas, se libera una carga y se recoge en el electrodo del tubo. Los contadores proporcionales de gas se
35 conectan a preamplificadores, que reciben los impulsos eléctricos procedentes de los contadores proporcionales de gas, los procesa y los emite como un tren de impulsos para su procesamiento adicional. También puede llevarse a cabo una detección de neutrones utilizando contadores de centelleo. Debe observarse que la invención descrita en la presente memoria puede aplicarse al recuento de neutrones en general, independientemente del principio físico utilizado para detectar los neutrones y convertir los eventos de detección en un tren de impulsos.

40 El tiempo a lo largo de un tren de impulsos es continuo pero a continuación se considerarán trenes de impulsos como una secuencia de intervalos temporales discretos de duración uniforme, denominados TIC. Cada uno de estos intervalos temporales puede estar vacío o puede contener un impulso. Dependiendo del instrumento utilizado, el tren de impulsos puede estar previsto en un único canal (sumándose la salida de todos los preamplificadores en este canal) o en una pluralidad de canales sincronizados. El tiempo a lo largo de un tren de impulsos es en principio
45 continuo. La electrónica de análisis funciona con una cierta velocidad de reloj (habitualmente dada en MHz), cortando este tiempo continuo en una secuencia de intervalos temporales discretos de duración uniforme (la duración determinada por la velocidad de reloj), denominados a continuación TIC. La electrónica de análisis sólo puede reconocer si existe un impulso dentro de un intervalo temporal de este tipo en un canal dado o no, en caso de que existan más impulsos dentro del mismo TIC en el mismo canal, sólo se reconoce un impulso en el mismo por la electrónica. Esto justifica considerar el tren de impulsos como una secuencia de intervalos temporales discretos, conteniendo cada TIC para cada canal un impulso o ningún impulso, incluso aunque el tiempo a lo largo del tren de impulsos sea continuo. Se omite la pérdida de reconocimiento de impulsos a partir del hecho de que puede haber
50 más de un impulso dentro del mismo TIC en el mismo canal.

55 El análisis de un tren de impulsos de un detector de neutrones (es decir, la distribución de impulsos en el tiempo) es complejo porque los detectores de neutrones presentan una eficiencia de detección de menos de 1 (lo que significa que se detecta en realidad sólo una fracción de los neutrones procedentes de una muestra), muchas de las coincidencias aparentes se deben a solapamientos accidentales (de eventos de fondo, eventos de fondo y de fisión o eventos de fisión) y neutrones que se originan de un único evento no se registran necesariamente al mismo tiempo (o con un retardo fijo entre ellos). Debe indicarse que la eficiencia de detección afecta no sólo a la tasa de recuento global sino que también presenta un impacto mucho mayor sobre la detección de ráfagas de neutrones (es decir, pares, tripletes, etc. de neutrones procedentes de un evento de fisión común). En otras palabras, el tren de impulsos observado desde un detector de neutrones contiene muchos eventos coincidentes "accidentales" pero relativamente
60 pocos "reales".

65

Para estudiar el tren de impulsos procedente de una fuente de neutrones, ha demostrado su utilidad la distribución de Rossi- α (véase por ejemplo "Passive Non-Destructive Assay of Nuclear Materials" de Reilly, Ensslin y Smith, NUREG/CR-5550 LA-UR-90-732, págs. 457-488). La distribución de Rossi- α es la distribución en el tiempo de eventos que siguen tras un evento inicial arbitrario. La distribución de Rossi- α puede obtenerse fijando un impulso arbitrario del tren de impulsos como impulso inicial y registrando cada impulso posterior en una ubicación que corresponde a la distancia desde el impulso inicial hasta el impulso posterior (hasta una distancia máxima predeterminada). (Los términos "distancia" e "intervalo" se utilizan en la presente memoria para designar la longitud de un intervalo temporal y se expresan de manera conveniente en unidades de TIC). Entonces, el siguiente impulso del tren de impulsos se fija como impulso inicial y se itera el proceso. Cada ubicación de la distribución indica por tanto el recuento de impulsos que se producen a una distancia particular de un impulso inicial. Si el tren de impulsos contiene sólo eventos aleatorios, la distribución de Rossi- α correspondiente es constante con el tiempo. Sin embargo, si están presentes eventos de coincidencia reales, la distribución de Rossi- α puede escribirse como:

$$RoAl(t) = A + R \cdot e^{-t/\tau} \quad , \quad (\text{ec. 1})$$

donde RoAl(t) es la altura de la distribución a la distancia t del impulso inicial, A es el número de coincidencias accidentales, R es el número de coincidencias reales y τ es el denominado tiempo de desaparición del detector.

Sin embargo, una distribución de Rossi- α que se ha determinado de manera experimental tal como se describió anteriormente estará perturbada para distancias cortas desde el impulso inicial. (Es decir, la ecuación 1 es cierta sólo para distancias que superan una cierta distancia mínima). Esto se conoce bien y está provocado por el denominado "efecto de tiempo muerto". Después de la detección de un neutrón, un tubo de contador proporcional requiere cierto tiempo para recuperarse (de manera habitual aproximadamente 1 μ s). Mientras tanto, este tubo de contador no puede generar un impulso adicional, ni siquiera aunque se capture otro neutrón en el mismo. De manera similar, la electrónica del preamplificador requiere de cierto tiempo de recuperación después de tratar un impulso de un tubo de contador. Debido al tiempo de recuperación, existe una probabilidad reducida de registrar un impulso en el plazo de unos cuantos TIC desde un impulso principal. El "tiempo muerto" designa el tiempo durante el cual pueden perderse impulsos debido a este efecto y durante el cual no puede medirse la verdadera tasa de recuento de coincidencias. Cada detector de neutrones presenta su tiempo muerto característico. Los expertos en la materia son conscientes de que el efecto de tiempo muerto es particularmente perjudicial para la detección de eventos correlacionados porque éstos implican neutrones que están próximos de manera conjunta en el tiempo.

En un recuento de multiplicidad neutrónica convencional, se determina, para un impulso dado del tren de impulsos, la multiplicidad (es decir, el número) de impulsos dentro de una primera y una segunda puertas (ventanas temporales) activadas por el impulso dado, véase por ejemplo el documento US6333958. La primera puerta (la "puerta de reales más accidentales" o "puerta R+A") está situada poco después del impulso de activación mientras que la segunda puerta (la "puerta de accidentales" o "puerta A") está situada un retardo largo (normalmente de 1 a 4 ms) después del impulso. Haciendo esto para todos los impulsos del tren de impulsos, se obtiene una distribución de multiplicidades o "vector de multiplicidad" para la puerta R+A y otra distribución o vector de este tipo para la puerta A. El vector o la distribución de multiplicidad R+A indica cuántas veces se determinó en el tren de impulsos cada multiplicidad en la puerta R+A. De manera similar, el vector o la distribución de multiplicidad A indica cuántas veces se determinó en el tren de impulsos cada multiplicidad en la puerta A. El largo retardo entre cada impulso de activación y la puerta A se elige para que ascienda a muchas veces la duración de vida del neutrón en el detector, de modo que no exista ninguna correlación residual entre el impulso de activación y los impulsos en la puerta A correspondiente. Por consiguiente, la distribución de eventos correlacionados corresponde a la diferencia entre la distribución de multiplicidad R+A y la distribución de multiplicidad A. En el procedimiento más extendido, se utilizan distribuciones de multiplicidad R+A y A para calcular los "elementos individuales" (tasa de recuento total), "dobles" (número de pares de impulsos correlacionados en el tren de impulsos), "triples" (número de conjuntos de tres impulsos correlacionados en el tren de impulsos) y "momentos" de orden superior. Una buena visión general de la técnica de recuento de multiplicidad se proporciona en "Application Guide to Multiplicity Counting" de Ensslin, Harper, Krick, Langner, Pickrell y Steward, LA-13422-M, 1998.

Tal como se mencionó anteriormente en la presente memoria, el efecto de tiempo muerto falsifica el número de impulsos durante los primeros TIC después de cada impulso de activación. Estos impulsos perdidos tienen un impacto en las distribuciones de multiplicidad determinadas. Para reducir su impacto, la puerta R+A no se abre normalmente de manera inmediata después del impulso de activación pero sólo después de un corto intervalo temporal (el denominado "retardo previo"). No obstante, cuando se calculan los elementos individuales, dobles, triples, etc. a partir de las distribuciones de multiplicidad, todavía son necesarias correcciones para tener en cuenta el tiempo muerto. Actualmente se utilizan diferentes procedimientos de corrección de tiempo muerto. El más popular comprende la corrección semiempírica para los elementos individuales y los dobles y un procedimiento de Dytlewski (N. Dytlewski *et al.*, "Measurement variances in thermal neutron coincidence counting", Nuclear Instr. Methods, A327, págs. 469-479, 1993) para los triples (véase por ejemplo Harker y Krick: "INCC Software Users Manual", LA-UR-01-6761, septiembre de 2003). Estas correcciones requieren mediciones de calibración dedicadas para determinar ciertos parámetros de corrección. En general, estos procedimientos son adecuados para tasas de recuento menores

que 1 MHz si la exactitud de medición deseada está en el rango de pequeños porcentajes. Otros procedimientos de corrección han tenido escasa utilización en el campo debido a la complejidad de su formulación.

Problema técnico

Los problemas encontrados con la corrección del impacto de tiempo muerto limitan actualmente la utilización práctica del recuento de multiplicidad neutrónica hasta el tercer orden, es decir a elementos individuales, dobles y triples. No se ha perseguido mucho la utilización de “cuádruples” o “quads” (número de conjuntos de cuatro impulsos correlacionados en el tren de impulsos), entre otros motivos, debido a la falta de una corrección de tiempo muerto correspondiente.

Se deduce a partir de lo anterior que existe la necesidad en la comunidad de detección de neutrones de un procedimiento de corrección de tiempo muerto eficiente. Ventajosamente, tal corrección de tiempo muerto debe basarse en los propios datos recogidos, con el fin de reducir la carga de trabajo en relación con la caracterización y calibración del detector al comienzo de cada medición o después de que se haya producido un cambio en la configuración del detector.

Por consiguiente, un objetivo de la presente invención es proporcionar un procedimiento de recuento de neutrones mejorado, en particular con respecto al problema mencionado anteriormente con la corrección de tiempo muerto. Este objetivo se logra mediante un procedimiento tal como se reivindica en la reivindicación 1.

Descripción general de la invención

El procedimiento de recuento de neutrones propuesto comienza con la recepción de una secuencia de impulsos (por ejemplo, una parte del tren de impulsos) desde un detector de neutrones. Debe observarse que la secuencia de impulsos puede proporcionarse al instante, es decir con los impulsos que entran tan pronto como se haya detectado un neutrón por el detector de neutrones, o como archivo de datos que contiene la secuencia de impulsos procedente del detector de neutrones almacenada previamente.

Cada impulso de la secuencia de impulsos se establece como impulso de activación que activa una puerta predefinida (por ejemplo, una puerta de “reales más accidentales” o una puerta de “accidentales”), se determina la multiplicidad de impulsos (es decir, el número de impulsos) dentro de esta puerta, se asigna el impulso que ha activado la puerta a una categoría de multiplicidad que corresponde a esta multiplicidad de impulsos y se determinan las distancias de activación a anterior desde el impulso de activación hasta impulsos que preceden al impulso de activación dentro de un cierto rango en la secuencia de impulsos. El rango dentro del que se buscan los impulsos anteriores de cada impulso de activación supera el tiempo muerto del detector de neutrones.

Para cada categoría de multiplicidad, se determina el número de impulsos de activación asignados a la misma; esto produce la distribución de multiplicidad o el vector de multiplicidad clásicos para la puerta predefinida que esté considerándose.

Además, para cada categoría de multiplicidad, se construye, basándose en los intervalos de activación a anterior determinados, una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a esa categoría de multiplicidad específica. Puede considerarse esta distribución como una clase de distribución de Rossi- α de impulsos de activación asignados a una categoría de multiplicidad particular. Debe observarse que cada una de estas distribuciones específicas de multiplicidad podría dividirse en una pluralidad de “subdistribuciones” (por ejemplo, según los canales en los que se reciben los impulsos de activación). Debido a la simetría de medición de distancia, la distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a esa categoría de multiplicidad específica se calcula ventajosamente fijando un impulso como impulso de activación actual, registrando las distancias desde este impulso de activación hasta sus impulsos anteriores en ubicaciones de distancia correspondientes, estableciendo entonces el siguiente impulso en la secuencia como impulso de activación actual e iterando el proceso.

Basándose en la distribución específica de multiplicidad, se estima, para cada categoría de multiplicidad, el número de impulsos de activación perdidos debido al tiempo muerto de detector de neutrones que se habría asignado a la categoría de multiplicidad. Una manera sencilla de realizar esto sería plantear como hipótesis una distribución teórica en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a esa categoría de multiplicidad y derivar el número de impulsos de activación perdidos a partir de la discrepancia entre las distribuciones reales y las teóricas. Maneras más preferidas para determinar el número de impulsos de activación perdidos para cada categoría de multiplicidad se explican en más detalle a continuación en la presente memoria.

Cuando se conoce el número estimado de impulsos de activación perdidos, se corrige el número de impulsos de activación asignados a cada categoría de multiplicidad en consecuencia.

Según una realización preferida de la invención, la secuencia de impulsos se recibe en por lo menos dos canales de detector de neutrones. Se supone que la presencia de un impulso en uno de los canales da como resultado un

tiempo muerto después de ese impulso sólo en el mismo canal. Según la presente realización, se construye, para cada categoría de multiplicidad, la distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a esa categoría de multiplicidad como una primera subdistribución y una segunda subdistribución. La primera subdistribución es una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a la categoría de multiplicidad que se han recibido en el mismo de dichos por lo menos dos canales que el impulso anterior. La segunda subdistribución es una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a la categoría de multiplicidad que se han recibido en otro de dichos por lo menos dos canales que el impulso anterior. Debe observarse que la suma de las subdistribuciones primera y segunda corresponde a una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a la categoría de multiplicidad que esté considerándose recibida en cualquiera de dichos por lo menos dos canales. Por tanto, es posible construir esta última distribución (primera subdistribución suma) directamente y construir la segunda subdistribución restando la primera subdistribución de la primera subdistribución suma.

Puede estimarse entonces el número de impulsos de activación perdidos en cada categoría de multiplicidad basándose en la diferencia entre las subdistribuciones primera y segunda correspondientes. Para cada categoría de multiplicidad, esto puede realizarse calculando la suma de las subdistribuciones primera y segunda (es decir, la primera subdistribución suma) y modificando a escala la segunda subdistribución de tal manera que se ajuste a la suma de las subdistribuciones primera y segunda. Una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación perdidos puede calcularse entonces basándose en la diferencia entre la segunda subdistribución modificada a escala y la suma de las subdistribuciones primera y segunda; la integración de esta distribución de impulsos de activación perdidos a lo largo del tiempo produce entonces la estimación del número de impulsos de activación perdidos.

Según una variante incluso más preferida de la invención, cada distribución específica de multiplicidad en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de los impulsos de activación se subdivide en una pluralidad de subdistribuciones según los canales en los que se han recibido los impulsos de activación. En otras palabras, también se tiene en cuenta el canal el que se ha recibido cada impulso de activación. Esta variante tiene la ventaja de que el número de impulsos de activación perdidos puede corregirse individualmente para cada canal. La suma a través de todos los canales produce entonces el número total estimado de impulsos de activación perdidos.

Cuando se construyen las subdistribuciones específicas multiplicidad y de canal, preferentemente se tiene en cuenta de nuevo si se ha recibido un impulso de activación en el mismo o un canal diferente que el impulso anterior: para cada categoría de multiplicidad y para cada canal puede construirse por tanto

- o una primera subdistribución, siendo la primera subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación, recibidos en el canal que esté considerándose, asignados a la categoría de multiplicidad que esté considerándose y recibidos en el mismo de dichos por lo menos dos canales que el impulso anterior arbitrario; y
- o una segunda subdistribución, siendo la segunda subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación, recibidos en el canal que esté considerándose, asignados a la categoría de multiplicidad que esté considerándose y recibidos en otro de dichos por lo menos dos canales que el impulso anterior arbitrario.

La suma de las distribuciones primera y segunda (específicas de canal) corresponde a una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario, recibido en cualquiera de dichos por lo menos dos canales, de impulsos de activación asignados a la categoría de multiplicidad que esté considerándose y recibidos en el canal que esté considerándose. Por tanto, es posible construir esta última distribución (primera subdistribución suma específica de canal) directamente y construir la segunda subdistribución específica de canal restando la primera subdistribución específica de canal de la primera subdistribución suma específica de canal.

Utilizando las subdistribuciones primera y segunda, puede calcularse una distribución específica de canal en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación perdidos modificando a escala la segunda subdistribución específica de canal de modo que se ajuste a la suma de las subdistribuciones primera y segunda específicas de canal (es decir, la primera subdistribución suma específica de canal) y calculando la diferencia entre la segunda subdistribución modificada a escala y la suma específica de canal de las subdistribuciones primera y segunda. El número estimado de impulsos de activación perdidos puede calcularse sumando a través de todos los canales e integrando a lo largo del tiempo las distribuciones específicas de canal en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación perdidos.

El procedimiento tal como se ha expuesto hasta ahora proporciona la corrección del número de impulsos de activación asignados a cada categoría de multiplicidad mediante una estimación de los impulsos de activación perdidos en la categoría correspondiente. Sin embargo, los expertos observarán que los impulsos perdidos dentro de las puertas pueden haber provocado que se asignen erróneamente impulsos de activación a su categoría de multiplicidad. Para abordar este problema, el procedimiento de recuento de neutrones comprende preferentemente

etapas, en las que se estima el número de impulsos de activación asignados erróneamente a cada categoría de multiplicidad y se corrige en consecuencia el número de impulsos de activación asignados a cada categoría de multiplicidad.

- 5 Para llevar a cabo esta corrección adicional, se determina preferentemente, para cada impulso de la secuencia de impulsos, cuando se establece como impulso de activación, y para cada impulso dentro de la puerta activada por ese impulso de activación, intervalos de activación a anterior desde el impulso en la puerta hasta impulsos que lo preceden dentro de un cierto rango (preferentemente igual al rango mencionado anteriormente). Para cada categoría de multiplicidad, ahora debe construirse, basándose en los intervalos de activación a anterior determinados, una
10 distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la categoría de multiplicidad que esté considerándose. También puede considerarse esta distribución como una clase de distribución de Rossi- α y debe observarse que esta distribución podría dividirse en una pluralidad de "subdistribuciones". Esta distribución sirve para estimar el número de impulsos de activación asignados erróneamente a la categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos dentro de las
15 puertas activadas por ellos. Una manera sencilla de llevar a cabo esta estimación sería plantear como hipótesis una distribución teórica correspondiente y derivar el número de impulsos de activación asignados erróneamente a partir de la discrepancia entre las distribuciones reales y teóricas.

20 Si la secuencia de impulsos se recibe en por lo menos dos canales, para cada categoría de multiplicidad la construcción de la distribución (específica de multiplicidad) en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la categoría de multiplicidad puede comprender:

- 25 ○ construir una tercera subdistribución, siendo la tercera subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la categoría de multiplicidad y recibido en el mismo de dichos por lo menos dos canales que el impulso anterior;
- 30 ○ construir una cuarta subdistribución, siendo la cuarta subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la categoría de multiplicidad y recibido en otro de dichos por lo menos dos canales que el impulso anterior.

35 La suma de las subdistribuciones tercera y cuarta corresponde a una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la categoría de multiplicidad que esté considerándose y recibido en cualquiera de dichos por lo menos dos canales. Por tanto, es posible construir esta última distribución (segunda subdistribución suma) directamente y calcular la segunda subdistribución restando la tercera subdistribución de la segunda subdistribución suma.

40 La estimación del número de impulsos de activación asignados erróneamente a la categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos comprende entonces ventajosamente:

- 45 ○ modificar a escala la cuarta subdistribución de modo que se ajuste a la suma de las subdistribuciones tercera y cuarta (es decir, la segunda subdistribución suma),
- 50 ○ calcular una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a la categoría de multiplicidad que esté considerándose debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos basándose en una diferencia de la segunda subdistribución modificada a escala y la suma de las subdistribuciones primera y segunda,
- 55 ○ integrar a lo largo del tiempo la distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a la categoría de multiplicidad que esté considerándose debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos; y
- extraer de la distribución integrada la distribución integrada correspondiente de la siguiente categoría de multiplicidad superior.

60 La última etapa mencionada refleja que la corrección para impulsos de activación que se han asignado erróneamente a su categoría de multiplicidad no debe cambiar el número total de impulsos de activación (a diferencia de la corrección para impulsos de activación perdidos). En efecto, si un impulso se ha perdido dentro de una puerta dada, esto hace que el impulso de activación de esa puerta se asigne erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a la correcta; por tanto, este impulso de activación asignado erróneamente hace que el número de impulsos en la categoría de multiplicidad inferior sea una unidad mayor mientras que el número de impulsos en la categoría de multiplicidad superior (a la que no se asignó el impulso de activación) es inferior en una unidad a la que
65

debería ser. Por consiguiente, es necesario que se corrija la distribución de los impulsos de activación entre las categorías de multiplicidad sin que esto implique un cambio en el número total de impulsos de activación asignados.

Preferentemente, cada distribución específica de multiplicidad en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la categoría de multiplicidad se subdivide en una pluralidad de subdistribuciones según los canales en los que se hayan recibido los impulsos de activación. Cuando se construyen las distribuciones específicas multiplicidad y de canal, preferentemente se tiene en cuenta de nuevo si se ha recibido un impulso de activación en el mismo o un canal diferente que el impulso anterior: para cada categoría de multiplicidad y para cada canal puede construirse por tanto

- o una tercera subdistribución, siendo la tercera subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la categoría de multiplicidad y recibido en el mismo de dichos por lo menos dos canales que el impulso anterior;
- o una cuarta subdistribución, siendo la cuarta subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la categoría de multiplicidad y recibido en otro de dichos por lo menos dos canales que el impulso anterior.

La suma de las subdistribuciones tercera y cuarta (específica de canal) corresponde a una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos recibidos en cualquiera de dichos por lo menos dos canales y situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación, asignándose el impulso de activación a la categoría de multiplicidad que esté considerándose y recibándose en el canal que esté considerándose. Por tanto, es posible construir esta última distribución (segunda subdistribución suma específica de canal) directamente y calcular la segunda subdistribución específica de canal restando la tercera subdistribución específica de canal de la segunda subdistribución suma específica de canal.

Para estimar el número de impulsos de activación asignados erróneamente a cada categoría de multiplicidad, puede procederse mediante

- o modificar a escala, para cada canal, la cuarta subdistribución de modo que se ajuste a la suma de las subdistribuciones tercera y cuarta (es decir, de modo que ajuste la segunda subdistribución suma específica de canal);
- o calcular, para cada canal, una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a la categoría de multiplicidad que esté considerándose debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos basándose en una diferencia de la segunda subdistribución modificada a escala y la suma de las subdistribuciones primera y segunda; y
- o sumar a través de todos los canales e integrar a lo largo del tiempo la distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a la categoría de multiplicidad que esté considerándose debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos
- o extraer de la distribución sumada e integrada la distribución sumada e integrada correspondiente de la siguiente categoría de multiplicidad superior.

Los expertos en la materia apreciarán que los procedimientos comentados en la presente memoria pueden implementarse y llevarse a cabo en un ordenador. Por tanto, aspectos de la presente invención son un programa informático que comprende instrucciones de programa para hacer que un ordenador realice cualquiera de los procedimientos dados a conocer en la presente memoria y un soporte (tal como, por ejemplo un medio de registro, una memoria informática, una memoria de sólo lectura, una señal portadora eléctrica, etc.) presentando en los mismos o sobre los mismos instrucciones ejecutables por ordenador para hacer que un ordenador realice cualquiera de los procedimientos dados a conocer en la presente memoria. Otro aspecto de la presente invención es un detector de multiplicidad neutrónica configurado (por ejemplo, mediante un programa informático adecuado) para realizar el procedimiento tal como se da a conocer en la presente memoria. Tal como se apreciará, un instrumento de medición que presenta el presente procedimiento implementado en el mismo, de manera que el instrumento realiza la corrección por sí mismo, puede facilitar en gran medida los procedimientos de medición y evaluación.

Breve descripción de los dibujos

Se describirá ahora una realización preferida de la invención, a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

la figura 1 es una vista esquemática de un detector de neutrones convencional;

la figura 2 es una vista esquemática de la cadena electrónica desde los contadores proporcionales de gas hasta un contador de modo de lista multicanal;

la figura 3 es una ilustración de la manera en la que el tiempo muerto asigna el tren de impulsos procedente de un detector de neutrones;

la figura 4 es una ilustración de la manera en la que el tiempo muerto afecta al número de impulsos en una puerta;

la figura 5 muestra las distribuciones de Rossi- α $RoAl_{mismo}$ y $RoAl_{otro}$ medidas para una fuente Cf (tasa de emisión de $6,14 \times 10^4$ neutrones/s);

la figura 6 muestra la distribución estimada de impulsos perdidos basándose en las distribuciones de Rossi- α de la figura 5;

la figura 7 es una ilustración para el cálculo de los números de impulsos de activación tanto asignados a una categoría de multiplicidad específica como que se encuentran a una distancia de impulso de activación a vecino específica desde un impulso anterior;

la figura 8 es una ilustración para el cálculo del “vector de activación perdido” que indica el número total de impulsos de activación perdidos para cada categoría de multiplicidad;

la figura 9 es una ilustración que explica por qué se asigna impulso de activación a una categoría de multiplicidad inferior errónea debido a un impulso perdido dentro de la puerta activada por el mismo;

la figura 10 es una ilustración para el cálculo de las distribuciones específicas de multiplicidad en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la categoría de multiplicidad respectiva;

la figura 11 muestra la distribución de emisiones de neutrones por desintegración utilizada en la simulación para someter a prueba el presente procedimiento.

Descripción de una realización preferida de la invención

Ejemplo de una configuración experimental

El contador de multiplicidad neutrónica 10 mostrado en la figura 1 comprende un tubo grande de polietileno 12 con una cavidad 14 central, en la que la muestra (no mostrada) se dispone para la medición. Contadores proporcionales de gas 16, a menudo tubos de ^3He , están dispuestos en cavidades más pequeñas en el polietileno 12 alrededor de la cavidad 14 central. Si se emite un neutrón desde la muestra, existe una alta probabilidad de que colisione con un átomo de hidrógeno en el polietileno (lo que sirve como moderador). A través de las colisiones con los átomos de hidrógeno, los neutrones de fisión pierden así energía hasta que alcanzan un equilibrio térmico con el material. Entonces, difunden alrededor del polietileno hasta que se pierden o capturan. Durante este proceso de colisiones con otros átomos, los neutrones pierden su información acerca de su origen y dirección original. Una fracción de los neutrones termalizados eventualmente choca con un átomo del gas contenido en los contadores 16. Debido a la trayectoria aleatoria de cada neutrón en el moderador 12 de polietileno, el tubo 16 de contador que detecta finalmente el neutrón también es aleatorio, aunque la probabilidad de recibir un neutrón está distribuida equitativamente entre los tubos de contador.

Si un neutrón choca con un átomo en el gas, se libera una carga y se recoge en los electrodos del tubo 16 de contador. El preamplificador 18 conectado a los electrodos recibe un impulso, lo procesa y emite un impulso digital. Estos impulsos pueden combinarse en un sumador 20 mediante la operación OR lógica en una única línea y enviarse a un contador de multiplicidad 22 para su análisis adicional. Sin embargo, los instrumentos modernos ofrecen la posibilidad de registrar el tren de impulsos procedente de cada preamplificador o cada grupo de preamplificadores en un canal separado, tal como se muestra en la figura 2. Los trenes de impulsos en estos canales se sincronizan temporalmente y pueden introducirse en un contador de modo de lista multicanal 24 y un ordenador para su análisis adicional.

Después de la detección de un neutrón, el tubo de ^3He de detección requiere de cierto tiempo para recuperarse (habitualmente de aproximadamente un microsegundo), durante el cual no puede recibirse ningún impulso adicional desde este tubo, ni siquiera aunque se capture otro neutrón dentro de este tubo. La electrónica del preamplificador también requiere de cierto tiempo para recuperarse tras tratar un impulso procedente de un tubo de ^3He . La combinación de estos efectos es el “efecto de tiempo muerto” mencionado anteriormente, que conduce a la pérdida de impulsos en una cierta ventana temporal (“tiempo muerto”) después de cada impulso detectado.

Tal como se ilustra en la figura 3, sólo los impulsos que proceden del mismo preamplificador pueden estar sujetos a una pérdida de tiempo muerto en el plazo del tiempo muerto. Por tanto, para un tren de impulsos obtenidos desde más de un preamplificador, bien puede haber impulsos registrados poco después de otro impulso si los impulsos procedieran de diferentes preamplificadores. Sin embargo, si el tren de impulsos está previsto de hecho en un conjunto de canales separados, se observará que después de cada impulso, existe un tiempo corto durante el cual no existe ningún impulso posterior en el mismo canal.

En los experimentos prácticos realizados para someter a prueba y validar el procedimiento según la presente invención, se utilizó un contador de multiplicidad neutrónica epitérmico (ENMC) de Los Alamos para experimentos prácticos (para referencia, véase por ejemplo "The Epithermal Neutron Multiplicity Counter Design and Performance Manual: More Rapid Plutonium and Uranium Inventory Verifications by Factors of 5-20", de Steward *et al.*, LA-13743-M, 2000). Este contador de multiplicidad utiliza tubos de ^3He a 10 atm y presenta una eficiencia del 65% y un tiempo de desaparición de 22 μs . El tiempo muerto efectivo de este ENMC es del orden de 40 ns. Si la tasa de recuento total es de 1 MHz, entonces el efecto de tiempo muerto en los elementos individuales es de alrededor del 4%, en los dobles del 16% y superior en los momentos superiores.

Para estimar el número total de impulsos perdidos debido al tiempo muerto (los impulsos perdidos por otros motivos no se considerarán a continuación en la presente memoria), pueden compararse los diferentes canales del contador de modo de lista multicanal entre sí y utilizar el hecho de que la distribución de impulsos entre los canales es aleatoria (aunque no uniforme). Por motivos de simplicidad, se explicará el principio con respecto a un detector de neutrones con dos canales (véase la figura 4).

Supóngase que los dos canales están cableados a dos diferentes preamplificadores, presentando ambos la misma tasa de recuento promedio. Un impulso recibido poco después de otro impulso (que es el "impulso de activación") puede no recibirse en el canal de activación (el canal en el que se detectó el impulso de activación) debido al tiempo muerto pero puede recibirse un impulso en el otro canal. Por tanto, si se activa en un canal, pero se cuenta en el otro canal no debe observarse ningún efecto de tiempo muerto. Sin embargo, la tasa de recuento será aproximadamente la mitad de la tasa de recuento global. Alternativamente, si se activa en un canal y se cuenta exclusivamente en el mismo canal, puede observarse un efecto neto de tiempo muerto. De nuevo la tasa de recuento será aproximadamente la mitad de la tasa de recuento global. Omitiendo los efectos de segundo orden, puede suponerse por tanto que poco después de un impulso de activación, ha debido haber tantos impulsos en el canal de activación como en el otro canal.

Distribuciones de Rossi- α

Una distribución de Rossi- α es una distribución en el tiempo de eventos que siguen tras un evento inicial arbitrario. Una distribución de Rossi- α puede obtenerse iniciando un reloj a $t = 0$ con la llegada de un impulso arbitrario. El reloj continúa ejecutándose, y se registra cada impulso posterior en una ubicación correspondiente a su tiempo de llegada (es decir, el TIC durante el cual se ha detectado el impulso posterior). Después de un cierto intervalo temporal (habitualmente varias veces la duración de vida de un neutrón en el detector) se detiene el reloj. Entonces se itera el proceso con los impulsos tras el primer impulso inicial. A medida que continúa la iteración, cada ubicación está "poblada" de impulsos detectados a la distancia correspondiente desde un impulso inicial. Cada ubicación es de hecho un contador, que está incrementándose cada vez que se detecta un impulso a la distancia correspondiente desde un impulso inicial. En este enfoque, los intervalos temporales durante los que se almacenan impulsos posteriores en ubicaciones se solapan parcialmente. Esto es contrario al registro de distribuciones de Rossi- α clásicas, en el que se reinicia el proceso con el siguiente impulso después del final del intervalo de recuento. Esta distribución, utilizada originariamente para un análisis de ruido de reactor, es plana para una fuente puramente aleatoria; si están presentes eventos correlacionados, la distribución de Rossi- α sigue una curva que puede describirse mediante la ecuación 1.

Puede dividirse la distribución de Rossi- α "RoAl" en subdistribuciones, que pueden registrarse por separado. Por ejemplo, si el tren de impulsos corresponde a la superposición de por lo menos dos canales, puede distinguirse entre impulsos tras un impulso anterior en el mismo canal e impulsos tras un impulso anterior en un canal diferente. Por tanto, puede construirse una primera distribución de Rossi- α ("RoAl_{mismo}") que indica el número de impulsos tras un impulso inicial arbitrario en el canal del impulso inicial en función de la distancia desde el impulso inicial y una segunda distribución de Rossi- α ("RoAl_{otro}") que indica el número de impulsos tras un impulso inicial arbitrario en cualquier canal excepto el canal del impulso inicial en función de la distancia desde el impulso inicial. RoAl_{mismo} puede obtenerse iniciando un reloj a $t = 0$ con la llegada de un impulso arbitrario, registrando cada impulso posterior en el mismo canal que el impulso inicial en una ubicación correspondiente a su TIC de llegada y repitiendo esto para todos los impulsos de la secuencia de impulsos. RoAl_{otro} puede obtenerse en paralelo iniciando un reloj a $t = 0$ con la llegada de un impulso arbitrario, registrando cada impulso posterior en cualquier canal excepto el canal del impulso inicial en una ubicación correspondiente a su tiempo de llegada y repitiendo esto para todos los impulsos de la secuencia de impulsos. Naturalmente, la suma de RoAl_{mismo} y RoAl_{otro} produce la distribución de Rossi-alfa global RoAl. Mientras que para RoAl se observa una ligera disminución en las cuentas hacia el comienzo del intervalo de

registro (unos cuantos TIC después del impulso inicial), no se observa este efecto para $RoAl_{otro}$. Esto refleja el hecho de que $RoAl_{otro}$ no se ve afectada por el tiempo muerto de detector después del impulso inicial.

5 La figura 5 muestra $RoAl_{otro}$ (zona rayada) y $RoAl_{mismo}$ (zona oscura encima de la zona rayada) medida para una fuente Cf (tasa de emisión de $6,14 \times 10^4$ neutrones/s) con el ENMC de Los Alamos, que presenta 27 canales para el recuento. $RoAl_{mismo}$ se ha dibujado encima de $RoAl_{otro}$, de modo que se visualiza la distribución de Rossi- α global ($RoAl = RoAl_{mismo} + RoAl_{otro}$). Puede observarse claramente que $RoAl_{mismo}$ se desvanece cerca del impulso inicial pero $RoAl_{otro}$ no presenta ningún efecto de tiempo muerto.

10 Sin embargo, la distribución de Rossi- α sin impulsos perdidos debido al tiempo muerto no está representada directamente por $RoAl_{otro}$, porque las cuentas de $RoAl_{otro}$ son inferiores a las de $RoAl$. Para proporcionar una estimación de la distribución de Rossi- α sin impulsos perdidos debido al tiempo muerto (" $RoAl_{sin tiempo muerto}$ "), $RoAl_{otro}$ se modifica a escala hasta la tasa de recuento de $RoAl$. Con el fin de tener en cuenta diferentes tasas de recuento en los diferentes canales, esto se realiza mejor canal por canal:

15

$$RoAl_{sin\ tiempo\ muerto, i} = \frac{RoAl_{otro, i}}{totales - totales_i} \cdot totales \quad (ec. 2)$$

donde

20 $totales_i$ es el número total de impulsos en el canal i de preamplificador;

$totales$ es el número total de impulsos: $totales = \sum_i totales_i$;

25 $RoAl_{otro, i}$ es la distribución de Rossi- α de impulsos que llegaron a canales distintos al canal i después de un impulso inicial en el canal i ;

$RoAl_{sin tiempo muerto, i}$ es la distribución de Rossi- α de impulsos que llegaron a canales distintos al canal i después de un impulso inicial en el canal i , modificado a escala hasta la tasa de recuento global.

30 Por tanto, la distribución de Rossi- α estimada sin impulsos perdidos debido al tiempo muerto puede calcularse mediante:

$$RoAl_{sin\ tiempo\ muerto} = \sum_i RoAl_{sin\ tiempo\ muerto, i} \quad (ec. 3)$$

35 La distribución de impulsos perdidos en función de la distancia desde un impulso inicial arbitrario puede calcularse así mediante:

$$D_{perdidos} = RoAl_{sin\ tiempo\ muerto, i} - RoAl \quad (ec. 4)$$

40 La figura 6 muestra esta distribución para las distribuciones de Rossi- α de la figura 5.

Si se está interesado en el número total (" CL ") de impulsos perdidos debido al tiempo muerto después del impulso inicial, pueden sumarse las cuentas de $D_{perdidos}$ en los primeros TIC hasta estar seguros del punto en el que $D_{perdidos}$ es estadísticamente cero (en la figura 6, este punto se alcanza aproximadamente 20 TIC después del impulso inicial), es decir se integra $D_{perdidos}$ a lo largo de este intervalo temporal. A continuación, este punto se denominará " S ". Para conseguir una buena estimación del número total de impulsos perdidos debido al tiempo muerto, el intervalo a lo largo del cual se registran las distribuciones de Rossi- α ha que ser lo suficientemente largo, de modo que cubra todo el tiempo muerto. Por tanto, en la práctica, una buena opción sería hacer que este intervalo sea tan largo como el retardo previo habitual, por ejemplo 4,5 μs .

50 Debe observarse que cada impulso perdido aparece (estadísticamente) sólo una vez en la distribución de impulsos perdidos $D_{perdidos}$. Existen dos motivos para esto: 1) Un impulso perdido se pierde porque está eclipsado por el tiempo muerto de un impulso detectado, que se convierte eventualmente en un impulso inicial durante el registro de la distribución de Rossi- α , y cada impulso detectado convierte en el impulso inicial exactamente una vez. 2) Aunque los impulsos pueden aparecer múltiples veces en las distribuciones de Rossi- α (también en $RoAl_{mismo}$) porque pueden encontrarse dentro de las ventanas de registro de varios impulsos iniciales, los impulsos perdidos se pierden sólo una vez: ya que un canal puede no recibir ningún impulso hasta que se haya recuperado suficientemente del tiempo muerto previo, un impulso perdido puede no aparecer como perdido en el plazo del tiempo muerto en más de una ventana de registro de un impulso previo en el mismo canal.

60

Correcciones de vector de multiplicidad

Puede pensarse que el procedimiento de recuento de neutrones según la invención es una manera de distribuir los impulsos perdidos a las diferentes componentes de un vector de multiplicidad (denominado a continuación en la

5 presente memoria $\overrightarrow{MD} = (MD_0, MD_1, \dots) = (MD_m)_{m=0,1,\dots}$, donde el índice m representa la categoría de multiplicidad). Se recuerda que un vector de multiplicidad indica, para cada categoría de multiplicidad, cuántos impulsos de activación se asignan a esta categoría de multiplicidad. Esta tarea se divide en dos partes: la corrección para activaciones perdidas (expresadas como vector de activación perdido: $\overrightarrow{LT} = (LT_0, LT_1, \dots) = (LT_m)_{m=0,1,\dots}$) y la corrección para "mejorar" (expresada como $\overrightarrow{UG} = (UG_0, UG_1, \dots) = (UG_m)_{m=0,1,\dots}$) la propia distribución de multiplicidad. Mientras que LT_m significa el cambio en la categoría de multiplicidad m que resultaría si los impulsos perdidos hubieran dado servicio como impulsos de activación, UG_m significa el cambio en la categoría de multiplicidad m que resultaría si los impulsos perdidos se tuvieran en cuenta en puertas activadas por otros impulsos.

15 Corrección para impulsos de activación perdidos

El número de impulsos de activación perdidos corresponde exactamente al número total de impulsos perdidos puesto que cada impulso perdido habría sido eventualmente un impulso de activación en el cálculo del vector de multiplicidad \overrightarrow{MD} si no se hubiera perdido. Por tanto, la corrección para impulsos de activación perdidos aumenta la suma a través de todas las categorías de multiplicidad de impulsos de activación asignados a las diferentes categorías de multiplicidad en una cantidad igual al número total de impulsos perdidos CL. La cuestión restante es cómo se distribuyen los impulsos de activación perdidos dentro de las diferentes componentes del vector de multiplicidad \overrightarrow{MD} (es decir, entre las diferentes categorías de multiplicidad).

25 Puesto que los múltiples neutrones que surgen del mismo evento de fisión entran en ráfagas, es más probable que se pierda el segundo neutrón, tercero, etc. de una ráfaga de este tipo debido al tiempo muerto que neutrones emitidos individuales. Para ser más precisos, la probabilidad de que un neutrón se pierda debido al tiempo muerto depende sólo del número y la distancia a sus impulsos anteriores. Por tanto, existe una correlación clara entre las componentes MD_m del vector de multiplicidad \overrightarrow{MD} , a las que contribuirían los impulsos de activación perdidos (si hubiera una manera de registrarlos) y la distancia hasta sus impulsos anteriores.

30 Sin embargo, una vez que se pierde un impulso de activación no puede determinarse a qué categoría de multiplicidad (elemento de vector) habría contribuido este impulso de activación en \overrightarrow{MD} . Pero puede determinarse las categorías de multiplicidad MD_m a las que los impulsos registrados contribuyen realmente como impulsos de activación, y analizar la distribución entre las diferentes categorías de multiplicidad con respecto a las distancias a los impulsos anteriores. Básicamente, se supone que los impulsos registrados realmente se comportan de la misma manera que los impulsos perdidos debido al tiempo muerto.

40 El vector \overrightarrow{MD} se determina estableciendo cada impulso de la secuencia de impulsos como impulso de activación que activa la puerta R+A, determinando la multiplicidad de impulsos dentro de esta puerta, y asignando este impulso de activación a la categoría de multiplicidad que corresponde a la multiplicidad de impulsos dentro de la puerta incrementado la componente de vector apropiada MD_m en 1. Iniciando el vector \overrightarrow{MD} como vector nulo (0,0,...) y pasando por las etapas anteriores para todos los impulsos de la secuencia, cada componente de vector de multiplicidad MD_m contendrá finalmente el número de impulsos de activación asignados a la categoría de multiplicidad m correspondiente.

45 En paralelo a la construcción del vector de multiplicidad \overrightarrow{MD} , se puebla progresivamente (de manera iterativa) una matriz de datos multidimensional $(RoAl_{j,i,t,m})_{j,i,t,m}$, que representa un conjunto de distribuciones de Rossi- α subdivididas según varios criterios. Para un impulso dado establecido como impulso de activación, se determina un intervalo de activación a anterior (distancias en unidades de TIC) desde ese impulso de activación hasta impulsos que lo preceden dentro de un rango más largo que el tiempo muerto de dicho detector de neutrones.

En " $RoAl_{j,i,t,m}$ ", los índices j, i, t y m presentan el siguiente significado:

- 55 j = 0 si el impulso anterior producido en el mismo canal que el impulso de activación que esté considerándose, j = 1 si no;
i representa el número de canal del impulso de activación;

t representa el intervalo de activación a anterior (en TIC) desde el impulso de activación que esté considerándose hasta el impulso anterior;

m representa la categoría de multiplicidad del impulso de activación.

Para cada intervalo de activación a anterior determinado (es decir, para cada par de un impulso de activación y un impulso anterior) se incrementa el elemento de matriz $RoAl_{j1,i1,t1,m1}$ (en una unidad) si (y sólo si):

la multiplicidad del impulso de activación que esté considerándose es igual a $m1$, y

la distancia de activación a anterior determinada es igual a $t1$, y

el impulso de activación se recibió en el canal $i1$, y

el impulso anterior se recibió en el mismo canal que el impulso de activación (si $j1 = 0$) o el impulso anterior se recibió en un canal diferente que el impulso de activación (si $j1 = 1$).

El registro de impulsos en $RoAl_{j,i,t,m}$ se ilustra en la figura 7, en la que, sin embargo, se han omitido los índices j e i con el fin de mantener la ilustración sencilla. El índice temporal t discurre a lo largo del eje horizontal, mientras que el índice de multiplicidad aumenta desde la parte inferior hasta la parte superior a lo largo del eje vertical. El índice temporal t discurre desde 1 hasta $t_{máx}$ donde $t_{máx}$ se elige mayor que el intervalo temporal afectado por el tiempo muerto. En las figuras, $t_{máx}$ se elige igual al retardo previo clásico.

Tal como apreciarán los expertos, los vectores $(RoAl_{j1,i1,t,m})_{t=1,2,\dots,t_{máx}}$ representan subdistribuciones de la distribución de Rossi- α comentada anteriormente, en las que se ha realizado la subdivisión según el número de canal, la multiplicidad y si los impulsos de activación y los impulsos anteriores se han recibido en el mismo canal o no. En otras palabras, el vector $(RoAl_{j=0,i1,t,m1})_{t=1,2,\dots,t_{máx}}$ corresponde a la distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario en canal $i1$ de impulsos de activación, recibidos también en el canal $i1$ y asignados a la categoría de multiplicidad $m1$. De la misma manera, $(RoAl_{j=0,i1,t,m1})_{t=1,2,\dots,t_{máx}}$ corresponde a la distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario, recibido en cualquier canal excepto el canal $i1$, de impulsos de activación, recibidos en el canal $i1$ y asignados a la categoría de multiplicidad $m1$.

En analogía a lo que se ha comentado en la sección referente a las distribuciones de Rossi- α , las distribuciones en el tiempo $(RoAl_{j=0,i1,t,m1})_{t=1,2,\dots,t_{máx}}$ y $(RoAl_{j=1,i1,t,m1})_{t=1,2,\dots,t_{máx}}$ pueden utilizarse para estimar el número de impulsos de activación que se perdieron en la categoría de multiplicidad $m1$ debido al tiempo muerto de detector de neutrones. Esto se explica a continuación.

Para cada triple (i, t, m) se calcula la suma de $RoAl_{0,i,t,m}$ y $RoAl_{1,i,t,m}$:

$$RoAl_{..i,t,m} = \sum_{j=0}^1 RoAl_{j,i,t,m} \quad (\text{ec. 5})$$

Se calcula una distribución modificada a escala en analogía a la ecuación 2:

$$RoAl_{i,t,m}^{\text{sintiempo muerto}} = \frac{RoAl_{i,t,m}}{\text{Totales} - \text{Totales}_i} * \text{Totales} \quad (\text{ec. 6})$$

En la siguiente etapa, una distribución en el tiempo de los impulsos de activación perdidos en cada canal i y en cada categoría de multiplicidad basándose en la "distribución suma" y la distribución modificada a escala:

$$RoAl_{i,j,m}^{\text{cuentas perdidas}} = RoAl_{i,t,m}^{\text{sintiempo muerto}} - RoAl_{i,t,m} = RoAl_{i,t,m}^{\text{sintiempo muerto}} - \sum_{j=0}^1 RoAl_{j,i,t,m} \quad (\text{ec. 7})$$

Sumando estos resultados a través de todos los canales i e integrando a lo largo del tiempo (es decir, sumando a lo largo de t), se obtiene la distribución de los impulsos de activación perdidos entre las diferentes categorías de multiplicidad:

$$LT_m = \sum_{i=1}^{\text{Canal máximo}} \sum_{t=1}^S RoAl_{i,t,m}^{\text{cuentas perdidas}} \quad (\text{ec. 8})$$

La integración a lo largo del tiempo puede detenerse en el punto de tiempo S, por encima del cual la distribución de impulsos de activación perdidos es estadísticamente cero para cada canal. La realización de la integración no presenta además ningún impacto significativo sobre el número de impulsos de activación perdidos en cada categoría de multiplicidad. La integración a lo largo del tiempo se ilustra en la figura 8. Para garantizar la uniformidad con la figura 7, se ha omitido de nuevo el índice de canal i.

Corrección para mejorar el vector de multiplicidad

Resulta oportuno recordar que “mejorar” en la presente memoria significa la corrección para impulsos perdidos, que habrían aparecido en puertas activadas por otros impulsos. “Mejorar” la distribución de multiplicidad no aumenta el número total de impulsos. De hecho, el número total de impulsos sigue siendo el mismo, puesto que ya se ha tenido en cuenta cada impulso, tal como contribuye con una categoría de multiplicidad incorrecta. En la figura 9, la puerta activada por el impulso de activación contiene 3 impulsos que hacen que el impulso de activación se asigne a la categoría de multiplicidad “3”. Si el impulso perdido hubiera estado presente, el impulso de activación se habría asignado a la categoría de multiplicidad “4” en lugar de “3”. El número de impulsos de activación en la categoría de multiplicidad “4” tendría que aumentarse en este caso en 1 y el número de impulsos de activación en la categoría de multiplicidad “3” tendría que disminuirse en 1, sin cambio en el número total de impulsos de activación.

En paralelo a la construcción del vector de multiplicidad \overrightarrow{MD} y la matriz multidimensional $RoAl_{j,i,t,m}$, se puebla progresivamente (de manera iterativa) una matriz de datos multidimensional adicional (${}^{UG}RoAl_{j,i,t,m}$) $_{j,i,t,m}$, que representa un conjunto de distribuciones de tipo Rossi- α subdivididas según varios criterios. Para cada categoría de multiplicidad, se registra una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a la correspondiente categoría de multiplicidad. Se inicia una matriz (${}^{UG}RoAl_{j,i,t,m}$) $_{j,i,t,m}$ como matriz nula (0, 0, ...). Para cada impulso, cuando se establece como impulso de activación de una puerta, se observan los impulsos dentro de esa puerta y se determinan las distancias de impulso a impulso anterior desde cada uno de estos impulsos “en puerta” hasta impulsos que los preceden dentro de un cierto rango máximo.

Para cada intervalo de impulso a impulso anterior determinado (es decir, para cada triple de a) un impulso de activación, b) un impulso “en puerta” dentro de la puerta activada por el impulso de activación y c) un impulso anterior del impulso “en puerta”) del elemento de matriz ${}^{UG}RoAl_{j_2,i_2,t_2,m_2}$ se incrementa (en una unidad) si (y sólo si):

- la multiplicidad del impulso de activación que esté considerándose es igual a m_2 , y
- la distancia de impulso a impulso anterior, es decir el número de TIC desde el impulso “en puerta” hasta el impulso anterior, es igual a t_2 , y
- el impulso “en puerta” se recibió en el canal i_2 , y
- el impulso anterior se recibió en el mismo canal que el impulso “en puerta” (si $j_2 = 0$) o el impulso anterior se recibió en un canal diferente al del impulso “en puerta” (si $j_2 = 1$).

El registro de impulsos en ${}^{UG}RoAl_{j,i,t,m}$ se ilustra en la figura 10 (de nuevo se han omitido los índices j e i). El índice temporal t discurre a lo largo del eje horizontal, mientras que el índice de multiplicidad m discurre a lo largo del eje vertical. En la figura 10, como la puerta contiene tres impulsos, ${}^{UG}RoAl_{j_2=0,i_2,t_2,m_2=3}$ se incrementa en 1 cada vez que un par de un impulso “en puerta” y un impulso anterior de ese impulso “en puerta” se encuentra donde el intervalo desde el impulso “en puerta” y el impulso anterior asciende a t_2 , el impulso en puerta se recibió en el canal i_2 , y el impulso anterior también se recibió en el canal i_2 . Asimismo, ${}^{UG}RoAl_{j_2=1,i_2,t_2,m_2=3}$ se incrementa en 1 cada vez que un par de un impulso “en puerta” y un impulso anterior de ese impulso “en puerta” se encuentra donde el intervalo desde el impulso “en puerta” y el impulso anterior asciende a t_2 , el impulso “en puerta” se recibió en el canal i_2 , y el impulso anterior se recibió en cualquier canal excepto el canal i_2 .

Para cada triple (i, t, m) se calcula la suma de ${}^{UG}RoAl_{0,i,t,m}$ y ${}^{UG}RoAl_{1,i,t,m}$:

$${}^{UG}RoAl_{..i,t,m} = \sum_{j=0}^1 {}^{UG}RoAl_{j,i,t,m} \quad (ec. 9)$$

Una distribución modificada a escala se calcula en analogía a las ecuaciones 2 y 6:

$${}^{UG}RoAl_{i,t,m}^{sintiempo\ muerto} = \frac{{}^{UG}RoAl_{i,t,m}}{Totales - Totales_i} * Totales \quad (ec. 10)$$

En la siguiente etapa, se calcula una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a la categoría de multiplicidad que esté considerándose debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por estos impulsos de activación basándose en la diferencia entre la “distribución suma” y la distribución modificada a escala de las ecuaciones 9 y 10, respectivamente:

$${}^{UG}RoAl_{i,t,m}^{cuentas\ perdid} = {}^{UG}RoAl_{i,t,m}^{sintiem\ po\ muerto} - {}^{UG}RoAl_{i,t,m} = {}^{UG}RoAl_{i,t,m}^{sintiem\ po\ muerto} - \sum_{j=0}^1 {}^{UG}RoAl_{j,i,t,m} \quad (ec. 11)$$

Sumando estos resultados a través de todos los canales i e integrando a lo largo del tiempo (es decir, sumando a lo largo de t), se obtiene, para cada categoría de multiplicidad, una estimación del número de impulsos de activación que se han asignado erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior:

$$UP_m = \sum_{i=1}^{Canal\ m\ a\ ximo} \sum_{t=1}^S {}^{UG}RoAl_{i,t,m}^{cuentas\ perdid} \quad (ec. 12)$$

Debe observarse que, mediante la construcción, el $UP_0 = 0$. Esto es evidente por sí mismo, puesto que para la categoría de multiplicidad 0, no existe ninguna categoría de multiplicidad inferior a la que pudieran haberse asignado erróneamente los impulsos de activación.

No puede sumarse simplemente $\overrightarrow{UP} = (UP_m)_{m=0,1,\dots}$ a \overrightarrow{MD} , porque esto cambiaría el número total de impulsos de activación (y los impulsos de activación perdidos ya se han tenido en cuenta de anteriormente en la presente memoria). Se supone ahora que como máximo se pierde un impulso dentro de una puerta debido al tiempo muerto. Puesto que para tasas de recuento normales, los impulsos perdidos representan un pequeño porcentaje del número total de impulsos, la probabilidad de tener dos o incluso más impulsos perdidos dentro de una puerta debido al tiempo muerto es pequeña y se omitirá.

Con esta suposición, UP_m no sólo proporciona una estimación del número de impulsos perdidos que habrían contribuido a esa categoría de multiplicidad si estos impulsos perdidos no se hubieran perdido en realidad, sino también el número de impulsos de activación que por este motivo se habían tenido en cuenta en la siguiente categoría de multiplicidad inferior. Por tanto, para cada categoría de multiplicidad $m = 0, 1, 2, \dots$, el número total neto de impulsos de activación asignados erróneamente a esa categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos viene dado por $UP_m - UP_{m+1}$.

Si se define el vector $UP^{-1cambio}$ mediante

$$UP_m^{-1cambio} = UP_{m+1} \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots, \quad (ec. 13)$$

la distribución de multiplicidad corregida para impulsos de activación perdidos y “mejorados” puede expresarse como:

$$\overrightarrow{MD}^{corr} = \overrightarrow{MD} + \overrightarrow{LT} + \overrightarrow{UP} - \overrightarrow{UP}^{-1cambio} \quad (ec. 14)$$

donde $\overrightarrow{MD}^{corr}$ es el vector de multiplicidad corregido.

Utilizando

$$\overrightarrow{UG} = \overrightarrow{UP} - \overrightarrow{UP}^{-1cambio}, \quad (ec. 15)$$

se obtiene finalmente:

$$\overrightarrow{MD}^{corr} = \overrightarrow{MD} + \overrightarrow{LT} + \overrightarrow{UG} \quad (ec. 16)$$

El procedimiento según la invención puede aplicarse para la corrección de un vector de multiplicidad de puerta R+A (denominado a continuación en la presente memoria “ \overrightarrow{RA} ”) así como para la corrección de un vector de

multiplicidad de puerta A (denominado a continuación en la presente memoria \vec{A} , sustituyendo RA y A por MD, respectivamente, en las ecuaciones anteriores.

5 En el ejemplo anterior, se construyen las distribuciones en el tiempo $(RoAl_j = 0, i1, t, m1)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$ y $(RoAl_j = 1, i1, t, m1)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$. Entonces se calcula la suma de $RoAl_{0,i,t,m}$ y $RoAl_{1,i,t,m}$ para cada triple (i, t, m) según la ecuación 5. Obsérvese que pueden construirse alternativamente $(RoAl_j = 0, i1, t, m1)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$ y $(RoAl_j = 0 \text{ ó } 1, i1, t, m1)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$. En este caso, $(RoAl_j = 0, i1, t, m1)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$ se construye exactamente de la misma manera tal como se explicó anteriormente. Para cada par de un impulso de activación y un impulso anterior, el elemento de matriz $RoAl_j = 0 \text{ ó } 1, i1, t, m1$ (iniciado como 0) se incrementa (en una unidad) si (y sólo si):

10

la multiplicidad del impulso de activación que esté considerándose es igual a m1, y

la distancia de impulso de activación a impulso anterior determinada es igual a t1, y

15

el impulso de activación se recibió en el canal i1.

Se obtiene $(RoAl_j = 1, i1, t, m1)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$ utilizando:

$$RoAl_{j=1,i,t,m} = RoAl_{j=0 \text{ or } 1,i,t,m} - RoAl_{j=0,i,t,m} = \sum_{j=0}^1 RoAl_{j,i,t,m} - RoAl_{j=0,i,t,m} \quad (\text{ec. 5'})$$

25

De manera similar, pueden construirse $({}^{UG}RoAl_j = 0, i2, t, m2)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$ y $({}^{UG}RoAl_j = 0 \text{ ó } 1, i2, t, m2)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$ en lugar de $({}^{UG}RoAl_j = 0, i2, t, m2)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$ y $({}^{UG}RoAl_j = 1, i2, t, m2)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$. En este caso, $({}^{UG}RoAl_j = 0, i2, t, m2)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$ se construye de la misma manera tal como se explicó anteriormente. Para cada triple de a) un impulso de activación, b) un impulso "en puerta" dentro de la puerta activada por el impulso de activación y c) un impulso anterior del elemento de matriz de impulso "en puerta" ${}^{UG}RoAl_j = 0 \text{ ó } 1, i2, t, m2$ (iniciado como 0) se incrementa (en una unidad) si (y sólo si):

30

la multiplicidad del impulso de activación que esté considerándose es igual a m2, y

la distancia de impulso a impulso anterior, es decir el número de TIC desde el impulso "en puerta" hasta el impulso anterior, es igual a t2, y

35

el impulso "en puerta" se recibió en el canal i2.

Se obtiene $({}^{UG}RoAl_j = 1, i2, t, m2)_{t=1,2,\dots,tm\acute{a}x}$ utilizando:

$${}^{UG}RoAl_{j=1,i,t,m} = {}^{UG}RoAl_{j=0 \text{ or } 1,i,t,m} - {}^{UG}RoAl_{j=0,i,t,m} = \sum_{j=0}^1 {}^{UG}RoAl_{j,i,t,m} - {}^{UG}RoAl_{j=0,i,t,m} \quad (\text{ec. 9'})$$

40

Puede ser más eficaz, desde el punto de vista computacional, calcular los elementos de matriz $RoAl_j = 0 \text{ ó } 1, i1, t1, m1$ y ${}^{UG}RoAl_j = 0 \text{ ó } 1, i2, t2, m2$ que $RoAl_j = 1, i1, t1, m1$ y ${}^{UG}RoAl_j = 1, i2, t2, m2$. Obviamente, también podrían construirse $RoAl_j = 0 \text{ ó } 1, i1, t1, m1$ y $RoAl_j = 1, i1, t1, m1$ para derivar $RoAl_j = 0, i1, t1, m1$, o construirse ${}^{UG}RoAl_j = 0 \text{ ó } 1, i1, t1, m1$ y ${}^{UG}RoAl_j = 1, i1, t1, m1$ para derivar ${}^{UG}RoAl_j = 0, i2, t2, m2$. Sin embargo, esto último es una alternativa menos preferida.

45

Simulación numérica

50

En la vida real, nunca puede observarse el tren de impulsos verdadero (es decir, completo) procedente de una fuente de neutrones. Por tanto, para validar el procedimiento según la presente invención, la única posibilidad es llevar a cabo simulaciones numéricas. El modelado del proceso de emisión de neutrones, captura y aplicación de un tiempo muerto lo suficientemente próximo a la realidad proporciona un tren de impulsos "verdadero", aunque no observable, que no tiene el defecto del tiempo muerto ni el tren de impulsos observable, pero afectado por el tiempo muerto, correspondiente. El análisis de multiplicidad llevado a cabo para ambos de estos trenes de impulsos permite comparar cómo de bien funciona la corrección del presente procedimiento.

55

Para las pruebas, se simuló un tren de impulsos procedente de un contador de modo de lista multicanal mediante la simulación de Monte Carlo utilizando un generador de números aleatorios. Las características de este contador simulado eran:

60

- o resolución temporal 1 TIC = 100 ns = 10^{-7} s;
- o se simulan desintegraciones en intervalos temporales exponencialmente distribuidos aleatorios;

- o cada disminución produce uno o varios neutrones según una distribución predefinida del número de neutrones por desintegración;
- o lleva 10 TIC hasta que se termaliza un neutrón y está listo para la captura por un tubo de ^3He ;
- o se captura cada neutrón en un tubo de ^3He con una probabilidad exponencialmente distribuida;
- o se registra aleatoriamente el tiempo de captura en uno de 32 canales (siendo en este ejemplo cada canal igualmente probable).

Con estos parámetros, se obtiene un tren de impulsos (distribuido en 32 canales sincronizados) de un contador multicanal simulado que presenta una eficiencia del 100% (no se pierde ningún impulso) y no se experimenta ningún tiempo muerto. Utilizando este tren de impulsos, pueden determinarse los vectores de multiplicidad “verdaderos” para la puerta de “reales más accidentales” R+A y la puerta de “accidentales” A.

Se produce un segundo tren de impulsos afectado por el tiempo muerto de la siguiente manera:

- o se eliminan los impulsos que aparecen en un plazo de 1-5 TIC después de un impulso en el mismo canal;
- o se eliminan los impulsos que aparecen en un plazo de 6 TIC después de un impulso en el mismo canal, con una probabilidad del 75%;
- o se eliminan los impulsos que aparecen en un plazo de 7 TIC después de un impulso en el mismo canal, con una probabilidad del 50%;
- o se eliminan los impulsos que aparecen en un plazo de 8 TIC después de un impulso en el mismo canal, con una probabilidad del 25%;
- o todos los demás impulsos permanecen sin cambios.

A partir de este tren de impulsos, las distribuciones de multiplicidad afectadas por el tiempo muerto \overrightarrow{RA} y \overrightarrow{A} pueden determinarse una vez según el procedimiento convencional y una vez utilizando la corrección según la presente invención. Esto permite evaluar el rendimiento del presente procedimiento en comparación con el convencional.

A continuación, se considerará una simulación con 27192 neutrones por segundo, en la que se establece la distribución de emisiones de neutrones por desintegración tal como se muestra en la figura 11. Esto significa que la fuente simulada experimenta aproximadamente 8650 fisiones espontáneas por segundo. El tiempo de registro fue de aproximadamente 100 s, se utilizó un ancho de puerta de 24,5 μs , los neutrones se distribuyeron aleatoriamente, de manera equitativa en 32 canales. No hubo ningún “retardo previo clásico” entre el impulso de activación y la puerta R+A (es decir, la puerta R+A se abre con el TIC directamente siguiente detrás del TIC que contiene el impulso de activación).

La tabla 1 muestra el vector de multiplicidad “verdadero” ($\overrightarrow{RA}^{\text{tr}}$), el vector de multiplicidad corregido $\overrightarrow{RA}^{\text{corr}}$, la diferencia entre el vector de multiplicidad “verdadero” y corregido, el vector de multiplicidad no corregido \overrightarrow{RA} , así como la diferencia entre el vector de multiplicidad “verdadero” y no corregido para la puerta R+A. La tabla 2 muestra lo mismo para la puerta A. Las categorías de multiplicidad se indican en la primera columna ($n = 0, 1, \dots, 23$). Tal como puede observarse, para cada categoría de multiplicidad, las diferencias entre los vectores de multiplicidad “verdaderos” y corregidos son aproximadamente cero dentro de los límites estadísticos esperados.

Tabla 1: Vectores de multiplicidad para la puerta R+A

m	$\overrightarrow{RA}^{\text{tr}}$	$\overrightarrow{RA}^{\text{corr}}$	$\overrightarrow{RA}^{\text{tr}} - \overrightarrow{RA}^{\text{corr}}$	\overrightarrow{RA}	$\overrightarrow{RA}^{\text{tr}} - \overrightarrow{RA}$
0	666888	666875,9	12,1	666893	-5
1	636375	636393	-18	636204	171
2	512862	512904,2	-42,2	511750	1112
3	342718	342701,2	16,8	341219	1499
4	230918	230807,6	110,4	228909	2009
5	145926	145942,6	-16,6	143965	1961
6	87484	87442,3	41,7	85332	2152
7	42636	42633,9	2,1	41673	963
8	24833	24809,2	23,8	24045	788

m	\overrightarrow{RA}^{tr}	$\overrightarrow{RA}^{corr}$	$\overrightarrow{RA}^{tr} - \overrightarrow{RA}^{corr}$	\overrightarrow{RA}	$\overrightarrow{RA}^{tr} - \overrightarrow{RA}$
9	13873	13870,5	2,5	13307	566
10	7265	7241,2	23,8	6895	370
11	3865	3874,5	-9,5	3648	217
12	1952	1965,2	-13,2	1814	138
13	915	922,7	-7,7	851	64
14	469	464,4	4,6	427	42
15	250	250,7	-0,7	225	25
16	129	128,4	0,6	112	17
17	59	55,7	3,3	50	9
18	36	38,9	-2,9	33	3
19	21	22,2	-1,2	18	3
20	8	7,4	0,6	6	2
21	1	1	0	1	0
22	1	1,4	-0,4	1	0
23	0	0	0	0	0

Tabla 2: Vectores de multiplicidad para la puerta A

m	\overrightarrow{A}^{tr}	$\overrightarrow{A}^{corr}$	$\overrightarrow{A}^{tr} - \overrightarrow{A}^{corr}$	\overrightarrow{A}	$\overrightarrow{A}^{tr} - \overrightarrow{A}$
0	2024923	2024813	109,9	2015925	8998
1	227255	227227,8	27,2	226931	324
2	172530	172563,4	-33,4	172482	48
3	128931	128998,3	-67,3	128448	483
4	70956	71017,2	-61,2	70656	300
5	44089	43965,9	123,1	43498	591
6	25289	25251,9	37,1	24875	414
7	14587	14604,8	-17,8	14061	526
8	5241	5265,1	-24,1	5117	124
9	2859	2819,7	39,3	2715	144
10	1419	1428,1	-9,1	1366	53
11	737	719,9	17,1	682	55
12	370	393	-23	361	9
13	154	141,8	12,2	131	23
14	74	74,6	-0,6	69	5
15	42	45,3	-3,3	39	3
16	17	12,5	4,5	12	5
17	6	5	1	5	1
18	6	8,6	-2,6	7	-1
19	3	1,7	1,3	2	1
20	3	3	0	3	0
21	3	2,4	0,6	2	1
22	1	1,4	-0,4	1	0
23	0	0	0	0	0

5 La tabla 2 muestra una gran diferencia entre el vector de multiplicidad verdadero \overrightarrow{A}^{tr} y el no corregido \overrightarrow{A} en la categoría de multiplicidad "0". Esto se debe a los impulsos de activación perdidos, puesto que en el caso de puertas seleccionadas aleatoriamente la probabilidad de hallar 0 impulsos en las mismas es alta a esta tasa de recuento. En cambio, la diferencia entre el vector de multiplicidad verdadero \overrightarrow{RA}^{tr} y el no corregido \overrightarrow{RA} de R+A ($\overrightarrow{RA}^{tr} - \overrightarrow{RA}$) es próxima a 0 en la categoría de multiplicidad "0". Los expertos en este campo técnico conocen que éste es siempre el caso si no se utiliza ningún retardo previo. La explicación es que un cierto número de puertas que no contienen ningún impulso cuando se someten a un tiempo muerto son en efecto puertas con 1 impulso que se ha perdido debido al tiempo muerto. Sin embargo, este impulso perdido está eclipsado por el tiempo muerto de su impulso de activación y por tanto sólo alejado unos cuantos TIC del mismo. Sería un propio impulso de activación (si no se hubiera perdido) y debido a que está tan próximo al impulso de activación previo, la posible puerta del impulso perdido y la puerta del impulso de activación previo se superponen en gran medida. Este impulso de activación previo mostró originariamente 0 impulsos en su puerta, de modo que la probabilidad de que el impulso perdido tuviera más de 0 impulsos en su posible puerta (que difiere sólo en unos cuantos TIC de la puerta previa) extremadamente pequeña. Por tanto, durante la corrección, es necesario que se adquiriera de nuevo aproximadamente el mismo número de puertas "0" que se perdieron debido a la mejora a puertas "1" (y de hecho se adquieren de nuevo) mediante la corrección de los impulsos de activación perdidos. Debe observarse que la utilización de un retado previo en el sentido clásico destruiría este efecto.

10

15

20

La simulación demostró que la corrección prevista en el procedimiento propuesto proporciona buenos para tasas de recuento bajas y medias. Sin embargo, para altas tasas de recuento, no se cumplen ciertas suposiciones realizadas en la presente memoria, por tanto los resultados se volverán menos precisos para altas tasas de recuento. Si la tasa de recuento aumenta, las pérdidas de impulsos debidas a un tiempo muerto aumentarán en número, puesto que crece la probabilidad de que lleguen impulsos en el mismo canal. También debe observarse que la longitud de puerta pueda tener un impacto sobre la precisión de las correcciones: aunque la longitud de puerta no influye en la cantidad de impulsos perdidos, el número de impulsos perdidos dentro de una puerta crecerá a medida que aumenta la longitud de puerta. Por tanto, ya no se cumplirá especialmente la suposición de que se pierde como máximo un impulso en una puerta y puede ser necesaria una corrección más elaborada para impulsos de activación asignados a la categoría de multiplicidad errónea.

Variantes

Los expertos apreciarán que puede ser innecesario, en ciertas condiciones, subdividir las matrices de distribución ($RoAl_{i,t,m}$) y (${}^{UG}RoAl_{i,t,m}$) según los canales. En este caso, se dispone de las matrices de distribución ($RoAl_{i,t,m}$) y (${}^{UG}RoAl_{i,t,m}$). Las distribuciones modificadas a escala (en analogías a ecuaciones 6 y 10) pueden calcularse entonces mediante

$$RoAl_{t,m}^{nomuerta} = \text{Ampliación} * RoAl_{i,t,m} \quad (\text{ec. 17})$$

y ${}^{UG}RoAl_{t,m}^{\text{sintiempo muerto}} = \text{Ampliación} * {}^{UG}RoAl_{i,t,m} \quad (\text{ec. 18})$

donde el factor de “ampliación” se define como:

$$\text{Ampliación} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\text{Canal máximo}} \text{Totales}_i * (\text{Totales} - \text{Totales}_i)} \quad (\text{ec. 19})$$

Para calcular los vectores de corrección, en lugar de las ecuaciones 8 y 12, se utilizan:

$$LT_m = \sum_{t=1}^S RoAl_{t,m}^{\text{cuentas perdidas}} \quad (\text{ec. 20})$$

$$UP_m = \sum_{t=1}^S {}^{UG}RoAl_{t,m}^{\text{cuentas perdidas}} \quad (\text{ec. 21})$$

El resto de los cálculos sigue siendo igual. La distinción entre los diferentes canales puede ser innecesaria en particular si los canales se ven afectados equitativamente por el tiempo muerto.

Según otra variante del procedimiento de corrección, puede omitirse el almacenamiento de la información (codificada utilizando el índice j) si se ha recibido un impulso en el mismo canal que su impulso anterior. En este caso, se dispone de las matrices de distribuciones:

- o ($RoAl_{t,m}$) y (${}^{UG}RoAl_{t,m}$) si no se realiza ninguna distinción entre los canales, o
- o ($RoAl_{i,t,m}$) y (${}^{UG}RoAl_{i,t,m}$) si se realiza esa distinción.

Entonces pueden estimarse que las distribuciones no afectadas por el tiempo muerto, $RoAl_{t,m}^{\text{sintiempo muerto}}$ y ${}^{UG}RoAl_{t,m}^{\text{sintiempo muerto}}$ (o $RoAl_{i,t,m}^{\text{sintiempo muerto}}$ y ${}^{UG}RoAl_{i,t,m}^{\text{sintiempo muerto}}$), ajustando la distribución de Rossi- α teórica (dada en la ecuación 1) a las distribuciones reales en las que éstas no se ven afectadas por el tiempo muerto (es decir, por encima del punto S) y extrapolando la distribución teórica en el rango afectado por el tiempo muerto. Podrían utilizarse funciones de extrapolación alternativas (por ejemplo, extrapolación polinómica; extrapolación utilizando curvas por trozos (*splines*)) en lugar de la distribución de Rossi- α .

Debe observarse que, en las figuras, la puerta sigue después del impulso de activación. Sin embargo, en una aplicación práctica, puede ser el caso que la puerta preceda al impulso de activación. El procedimiento según la invención puede aplicarse cualquiera que sea la posición del impulso de activación en relación con la puerta.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de recuento de neutrones, que comprende:

5 recibir una secuencia de impulsos desde un detector de neutrones;

para cada impulso de dicha secuencia de impulsos:

10 establecer dicho impulso como impulso de activación que activa una puerta,

asignar dicho impulso de activación a una categoría de multiplicidad que corresponde a la multiplicidad de impulsos dentro de dicha puerta,

15 determinar unos intervalos de activación a anterior desde dicho impulso de activación hasta impulsos que preceden a dicho impulso de activación dentro de un rango más largo que un tiempo muerto de dicho detector de neutrones;

para cada categoría de multiplicidad:

20 determinar el número de impulsos de activación asignados a dicha categoría de multiplicidad;

construir, basándose en los intervalos de activación a anterior determinados, una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a dicha categoría de multiplicidad;

25 estimar, basándose en dicha distribución, varios impulsos de activación perdidos debido al tiempo muerto de detector de neutrones que se habría asignado a dicha categoría de multiplicidad; y

30 corregir el número de impulsos de activación asignados a dicha categoría de multiplicidad mediante dicho número estimado de impulsos de activación perdidos.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que, para cada categoría de multiplicidad, el número de impulsos de activación perdidos debido al tiempo muerto del detector de neutrones que se habría asignado a dicha categoría de multiplicidad se estima, basándose en una comparación de dicha distribución construida con una distribución teórica hipotética.

3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha secuencia de impulsos es recibida en por lo menos dos canales,

40 en el que, para cada categoría de multiplicidad,

dicha construcción de dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a dicha categoría de multiplicidad comprende:

45 construir una primera subdistribución, siendo dicha primera subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a dicha categoría de multiplicidad y recibidos en el mismo de dichos por lo menos dos canales que dicho impulso anterior;

50 construir una segunda subdistribución, siendo dicha segunda subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a dicha categoría de multiplicidad, recibidos en otro de dichos por lo menos dos canales como dicho impulso anterior; y construir una primera subdistribución suma, siendo dicha primera subdistribución suma una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a dicha categoría de multiplicidad, recibidos en cualquiera de dichos por lo menos dos canales;

55 siendo dicha segunda subdistribución construida restando dicha primera subdistribución de dicha primera subdistribución suma o siendo dicha primera subdistribución suma construida sumando dicha primera y segunda subdistribuciones.

60 4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que

para cada categoría de multiplicidad,

65 dicha estimación de dicho número de impulsos de activación perdidos debido al tiempo muerto de detector de neutrones que se habría asignado a dicha categoría de multiplicidad comprende:

modificar a escala dicha segunda subdistribución, de modo que se ajuste a la primera subdistribución suma;

5 calcular una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación perdidos, basándose en una diferencia de dicha segunda subdistribución modificada a escala y la primera subdistribución suma; e

10 integrar a lo largo del tiempo dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación perdidos.

5. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha secuencia de impulsos se recibe en por lo menos dos canales,

15 en el que, para cada categoría de multiplicidad,

dicha construcción de dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados a dicha categoría de multiplicidad comprende:

20 construir, para cada canal, una primera subdistribución, siendo dicha primera subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación, recibidos en dicho canal, asignados a dicha categoría de multiplicidad y recibidos en el mismo de dichos por lo menos dos canales que dicho impulso anterior arbitrario;

25 construir, para cada canal, una segunda subdistribución, siendo dicha segunda subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación, recibidos en dicho canal, asignados a dicha categoría de multiplicidad y recibidos en otro de dichos por lo menos dos canales como dicho impulso anterior arbitrario; y

30 construir, para cada canal, una primera subdistribución suma, siendo dicha primera subdistribución suma una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación, recibidos en dicho canal, asignados a dicha categoría de multiplicidad, recibidos en cualquiera de dichos por lo menos dos canales,

35 siendo dicha segunda subdistribución, para cada canal, construida restando dicha primera subdistribución de dicha primera subdistribución suma o siendo dicha primera subdistribución suma, para cada canal, construida sumando dichas subdistribuciones primera y segunda.

6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que

40 en el que, para cada categoría de multiplicidad,

dicha estimación de dicho número de impulsos de activación perdidos debido al tiempo muerto de detector de neutrones que se habría asignado a dicha categoría de multiplicidad comprende:

45 modificar a escala, para cada canal, dicha segunda subdistribución, de modo que se ajuste a la primera subdistribución suma;

50 calcular, para cada canal, una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación perdidos, basándose en una diferencia de dicha segunda subdistribución modificada a escala y la primera subdistribución suma; y

sumar a través de todos los canales e integrar a lo largo del tiempo dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación perdidos.

55 7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que comprende

para cada impulso de dicha secuencia de impulsos, cuando se establece como impulso de activación,

60 para cada impulso dentro de la puerta activada por dicho impulso de activación:

determinar intervalos de impulso a anterior desde dicho impulso en la puerta hasta impulsos que lo preceden; y

65 para cada categoría de multiplicidad:

construir, basándose en dichos intervalos de impulso a anterior, una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad;

5 estimar, basándose en dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad, varios impulsos de activación asignados erróneamente a dicha categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos; y

10 corregir el número de impulsos de activación asignados a dicha categoría de multiplicidad mediante dicho número estimado de impulsos de activación asignados erróneamente.

8. Procedimiento según la reivindicación 7, en el que dicha secuencia de impulsos se recibe en por lo menos dos canales,

15 en el que, para cada categoría de multiplicidad,

dicha construcción de dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad comprende:

20 construir una tercera subdistribución, siendo dicha tercera subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad y recibido en el mismo de dichos por lo menos dos canales que dicho impulso anterior;

30 construir una cuarta subdistribución, siendo dicha cuarta subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad y recibido en otro de dichos por lo menos dos canales que dicho impulso anterior; y

35 construir una segunda subdistribución suma, siendo dicha segunda subdistribución suma una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad y recibido en cualquiera de dichos por lo menos dos canales;

40 siendo dicha cuarta subdistribución construida restando dicha tercera subdistribución de dicha segunda subdistribución suma o siendo dicha segunda subdistribución suma construida sumando dichas subdistribuciones tercera y cuarta.

9. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que

para cada categoría de multiplicidad,

45 se estima, basándose en dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad, varios impulsos de activación asignados erróneamente a dicha categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos comprende:

50 modificar a escala dicha cuarta subdistribución, de modo que se ajuste a la segunda subdistribución suma;

55 calcular una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a dicha categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos basándose en una diferencia de dicha segunda subdistribución modificada a escala y la segunda subdistribución suma; e

60 integrar a lo largo del tiempo dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a dicha categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos; y

extraer de dicha distribución integrada la distribución integrada correspondiente de la siguiente categoría de multiplicidad superior.

65

10. Procedimiento según la reivindicación 7, en el que dicha secuencia de impulsos se recibe en por lo menos dos canales,

5 en el que, para cada categoría de multiplicidad,

dicha construcción de dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad comprende:

10 construir, para cada canal, una tercera subdistribución, siendo dicha tercera subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario, recibido en dicho canal, de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad y recibido en el mismo de dichos por lo menos dos canales que dicho impulso anterior;

15 construir, para cada canal, una cuarta subdistribución, siendo dicha cuarta subdistribución una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario, recibido en dicho canal, de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad y recibido en otro de dichos por lo menos dos canales que dicho impulso anterior; y

20 construir, para cada canal, una segunda subdistribución suma, siendo dicha segunda subdistribución suma una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario, recibido en dicho canal, de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad y recibido en cualquiera de dichos por lo menos dos canales;

25 siendo dicha cuarta subdistribución construida restando dicha tercera subdistribución de dicha segunda subdistribución suma o siendo dicha segunda subdistribución suma construida sumando dichas subdistribuciones tercera y cuarta.

11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que

30 para cada categoría de multiplicidad,

se estima, basándose en dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos situados en cualquier puerta activada por un impulso de activación asignado a dicha categoría de multiplicidad, varios impulsos de activación asignados erróneamente a dicha categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos comprende:

40 modificar a escala, para cada canal, dicha cuarta subdistribución, de modo que se ajuste a la segunda subdistribución suma;

45 calcular, para cada canal, una distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a dicha categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos, basándose en una diferencia de dicha segunda subdistribución modificada a escala y la segunda subdistribución suma; y

50 sumar a través de todos los canales e integrar a lo largo del tiempo dicha distribución en el tiempo después de un impulso anterior arbitrario de impulsos de activación asignados erróneamente a una categoría de multiplicidad inferior a dicha categoría de multiplicidad debido a impulsos perdidos dentro de las puertas activadas por ellos

extraer de dicha distribución sumada e integrada la distribución sumada e integrada correspondiente de la siguiente categoría de multiplicidad superior.

12. Programa informático que comprende instrucciones de programa para hacer que un ordenador realice el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11.

13. Soporte que presenta en el mismo un programa informático que comprende instrucciones ejecutables por ordenador para hacer que un ordenador realice el procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

14. Detector de multiplicidad neutrónica configurado para realizar el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11.

Fig. 1

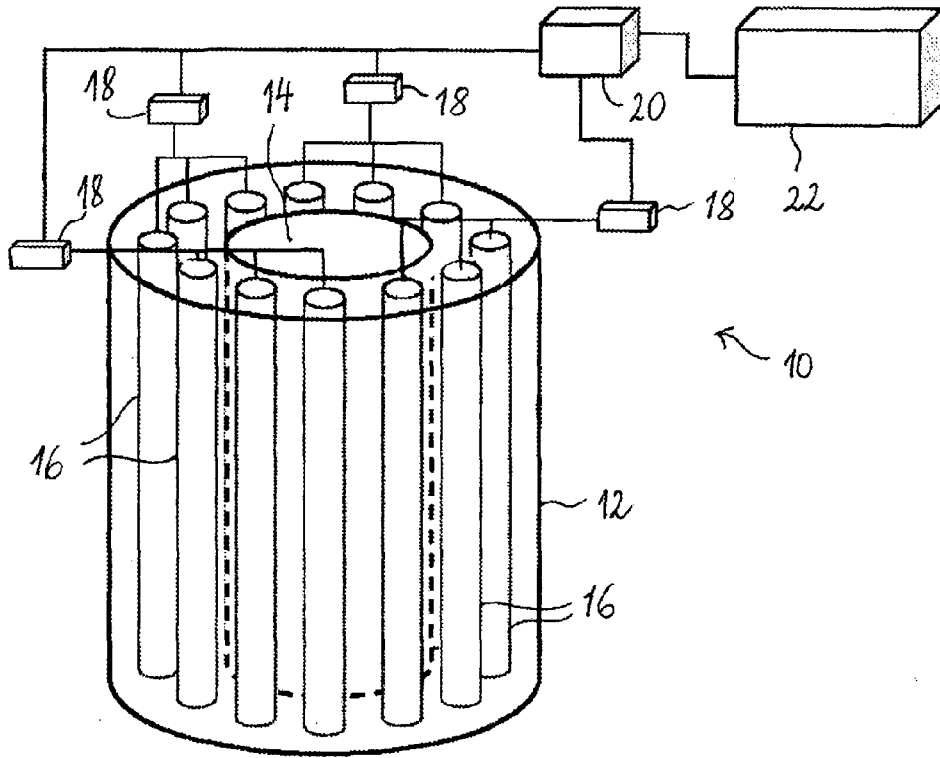


Fig. 2

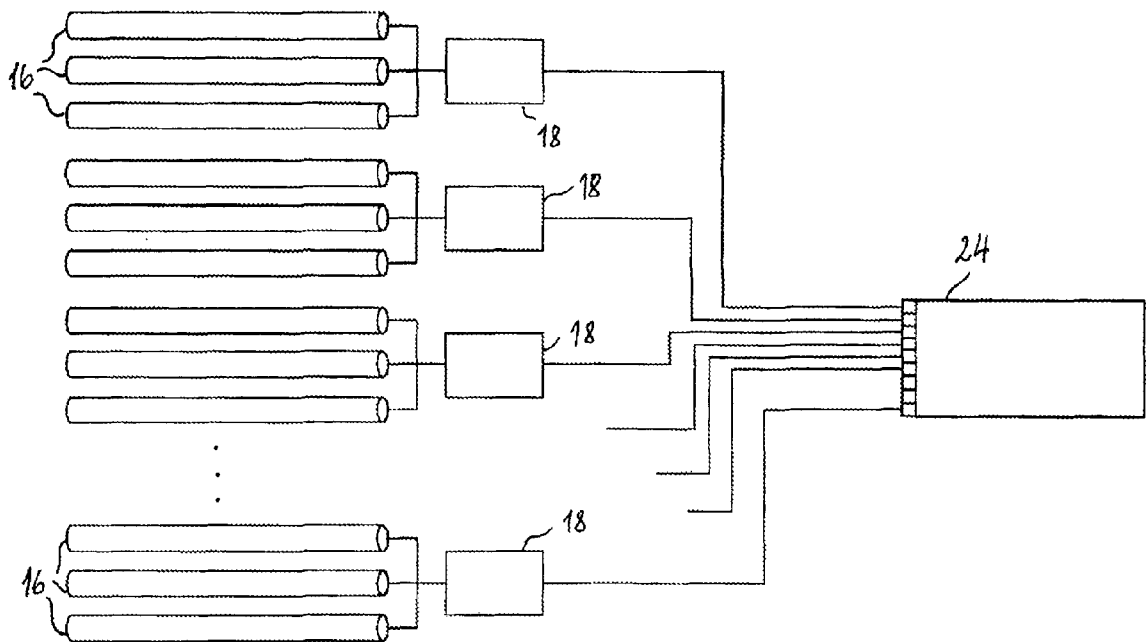


Fig. 3

Múltiples canales Tiempo muerto

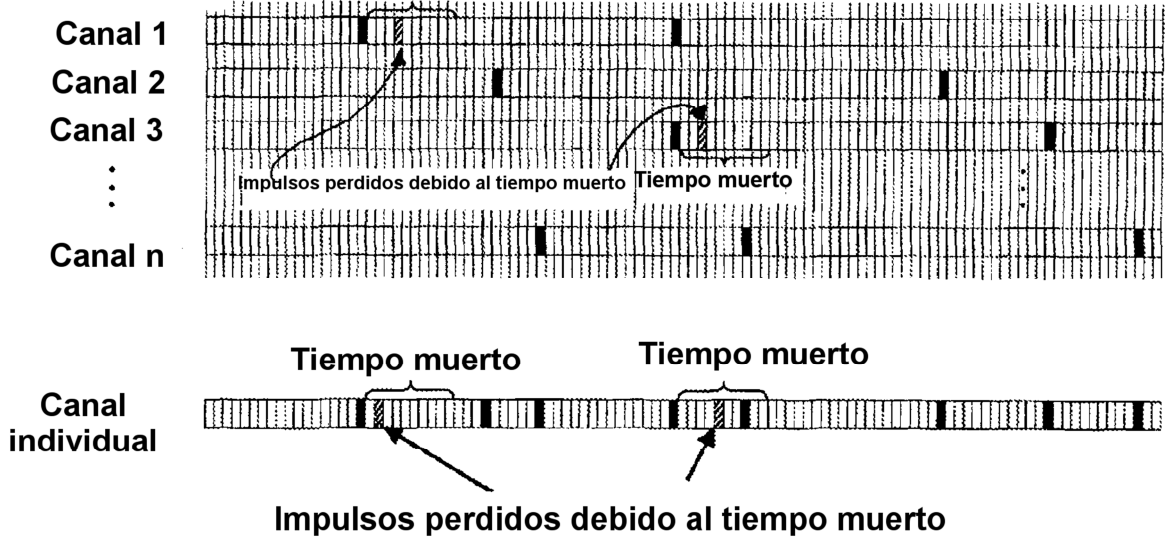


Fig. 4

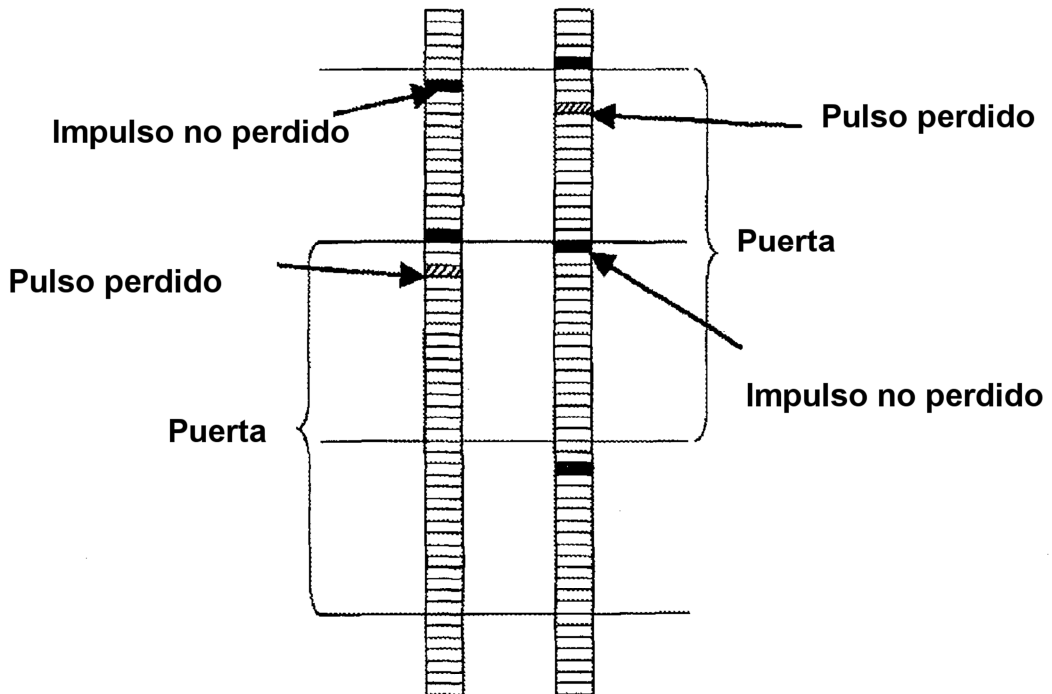


Fig. 5

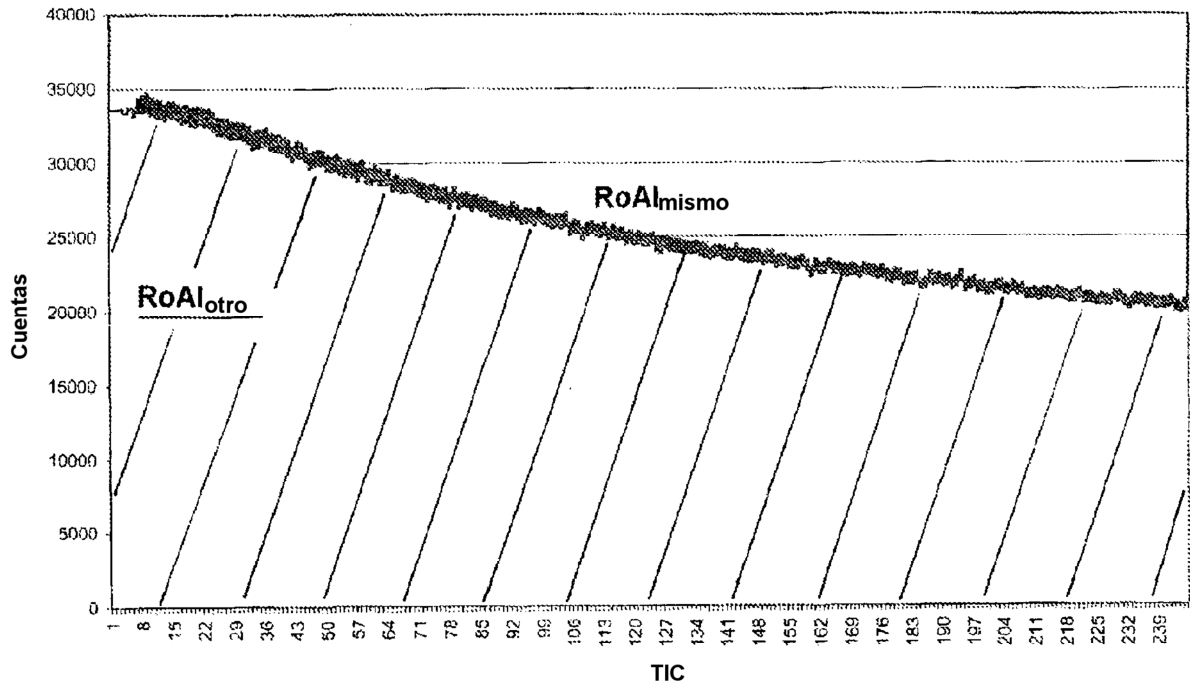


Fig. 6

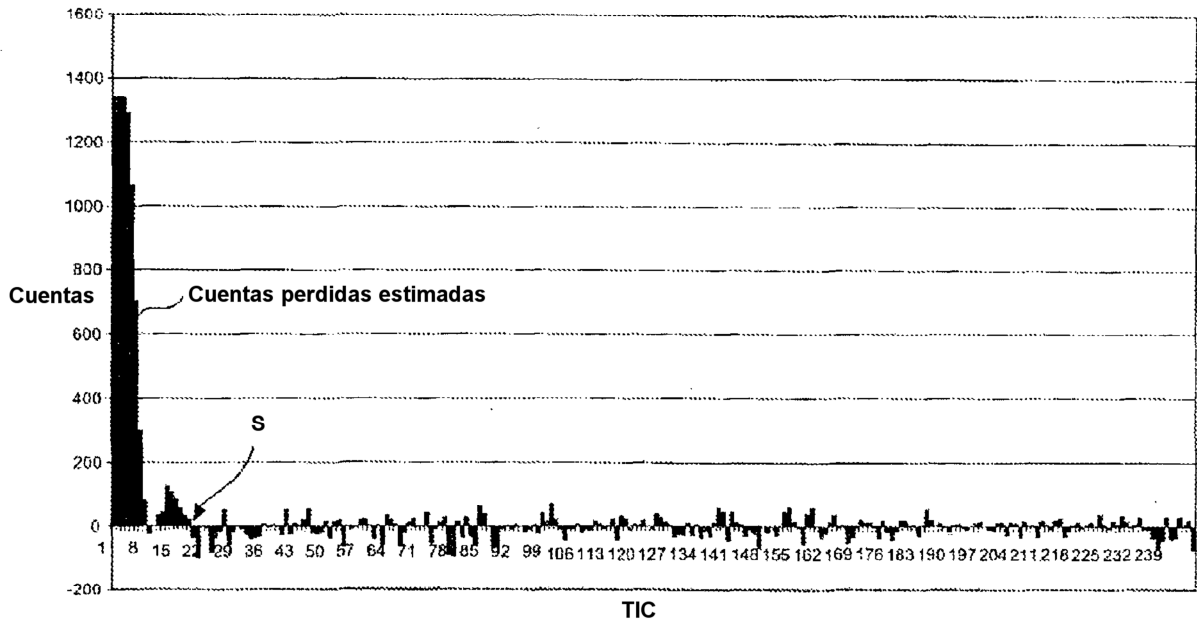


Fig. 7

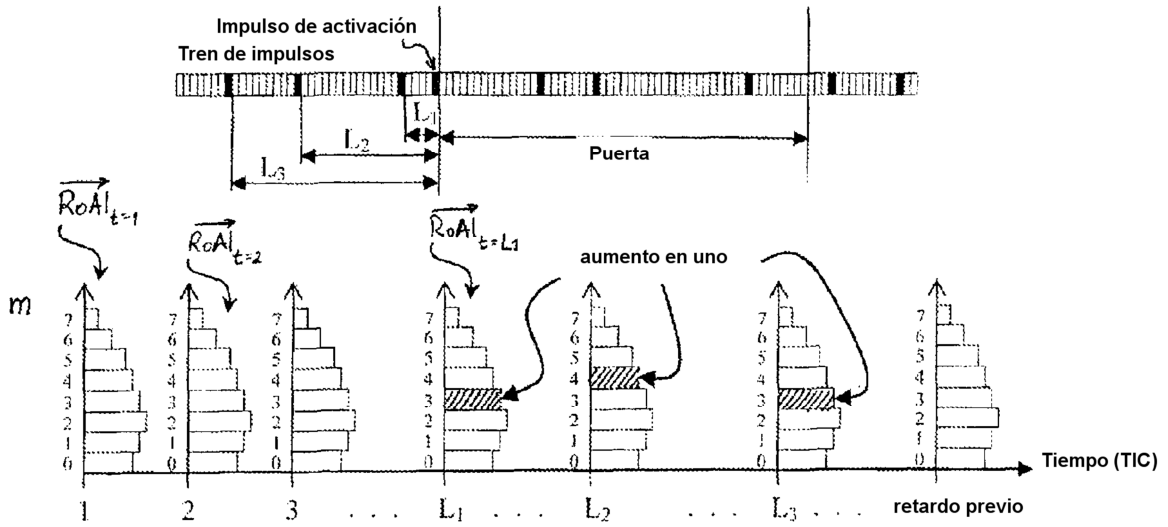


Fig. 8

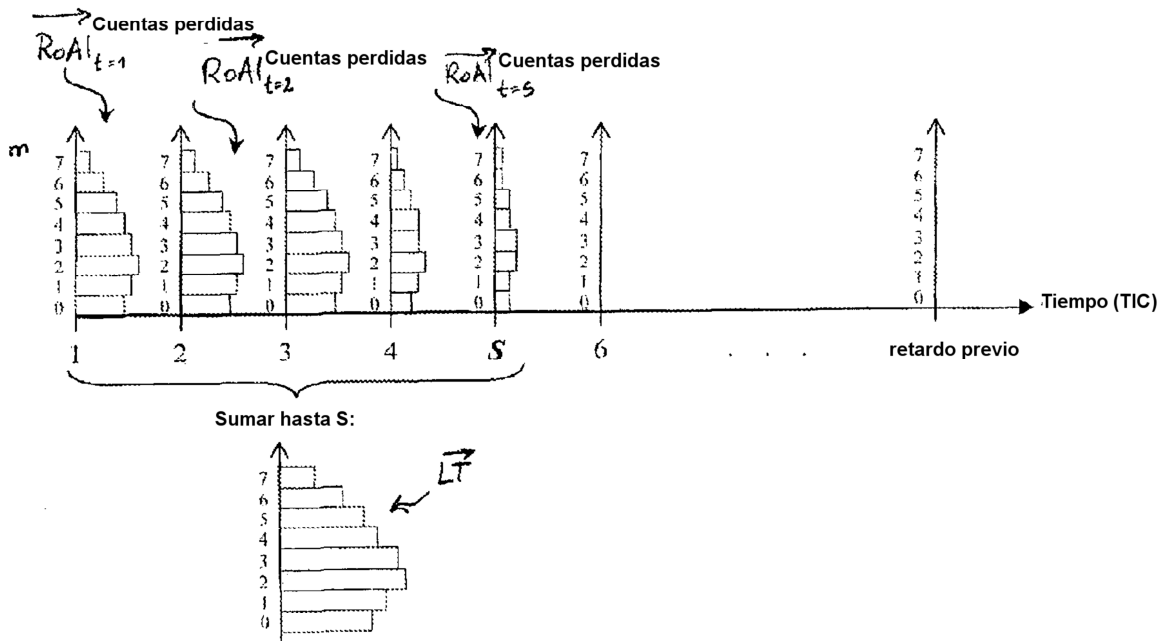


Fig. 9

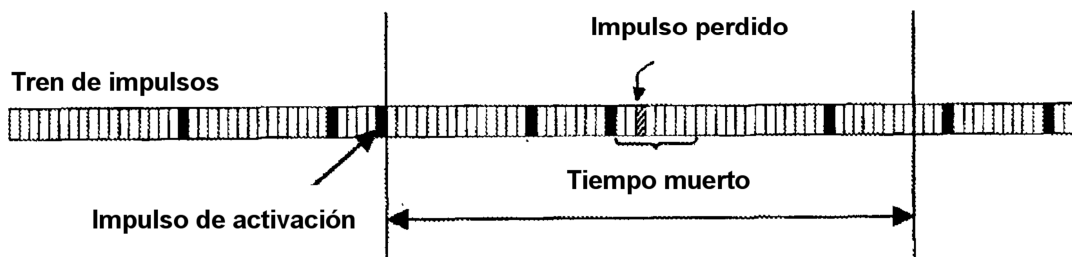


Fig. 10

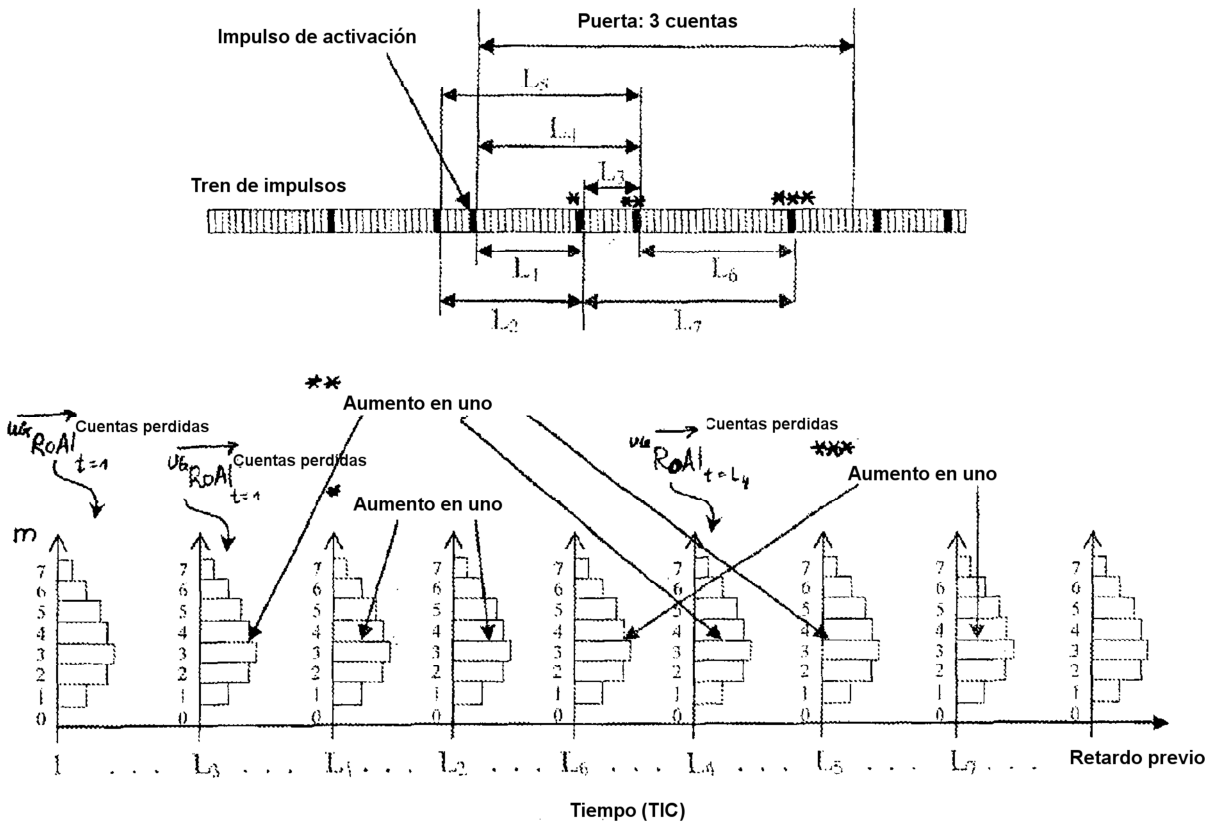


Fig. 11

