

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 028 984**

51 Int. Cl.:

H03K 5/19 (2006.01)

B60B 23/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.12.2021** **PCT/EP2021/087624**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.06.2022** **WO22136695**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.12.2021** **E 21847499 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.03.2025** **EP 4268370**

54 Título: **Detección de patrones de pulsos**

30 Prioridad:

24.12.2020 NL 2027232

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

23.06.2025

73 Titular/es:

Q*BIRD B.V. (100.00%)

**Lorentzweg 1
2628 CJ Delft, NL**

72 Inventor/es:

VERMEULEN, RAYMOND FRANS LAURENS

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 3 028 984 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

Detección de patrones de pulsos

5 Campo técnico

La invención se refiere a la detección de patrones de pulsos y, en particular, aunque no exclusivamente, a métodos y a sistemas para la detección de patrones de pulsos, a un aparato de medición cuántica, tal como un aparato de medición de estados de Bell, que comprende tal detector de patrones de pulsos y a un producto de programa informático para ejecutar tales métodos.

Antecedentes

Los sistemas de información cuántica son sistemas de procesamiento de datos que usan un sistema cuántico, por ejemplo, un cúbit, como portador de información en vez de los bits clásicos '0' y '1' tal como se usan por un sistema de procesamiento de datos convencional. Los cúbits pueden representarse como superposición de dos estados cuánticos ortogonales $|0\rangle$ y $|1\rangle$: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ en el que α y β son amplitudes complejas y $|\alpha|^2$ y $|\beta|^2$ son las probabilidades de encontrar el cúbit en $|0\rangle$ y $|1\rangle$ respectivamente. Un ejemplo de un sistema de información cuántica es un denominado sistema de distribución cuántica de claves (QKD), que permite a dos o más usuarios en diferentes ubicaciones generar de manera segura claves criptográficas basándose en las leyes de la mecánica cuántica.

Los sistemas ópticos de comunicación cuántica y los sistemas informáticos cuánticos se basan en estaciones de medición cuántica, que pueden comprender un conjunto de detectores de fotones configurados para medir y detectar pulsos ópticos. Por ejemplo, en el dominio de la comunicación cuántica, las redes de repetidores cuánticos y los sistemas de MDI-QKD requieren estaciones de recepción que están configuradas para medir las denominadas mediciones de estado de Bell (BSM). Tales estaciones de recepción pueden estar configuradas para registrar simultáneamente señales de detector de un subconjunto particular de detectores y comprobar que la respuesta de sincronismo de detector específico de ese conjunto (denominado patrón de detección) corresponde a una medición de estado de Bell. En general, se necesita registrar y comprobar simultáneamente numerosos subconjuntos de detectores. Con el fin de facilitar la comunicación o computación de alto rendimiento, la estación de medición debe funcionar a altas frecuencias, por ejemplo, de 200 MHz o más. En ese caso, la información referente a ediciones cuánticas de pulsos tiene que comunicarse a una tasa de 10^8 por segundo. Para evitar la necesidad de grandes sistemas de almacenamiento, los dispositivos que procesan las respuestas de detector deben poder funcionar en tiempo real.

Además, la operación lógica requerida a partir de la estación de medición para comprobar patrones de detección específicos puede depender del algoritmo de computación cuántica o protocolo de comunicación cuántica o medición cuántica específico (por ejemplo, mediciones de estado de Bell, u otras grandes mediciones de proyección de estados entrelazados, etc.). Por tanto, los dispositivos que están configurados para procesar respuestas de detector tendrán de manera ideal flexibilidad para reprogramarse rápidamente para comprobar diferentes patrones de detección, y deben ajustarse fácilmente a escala para muchos sistemas de computación cuántica dentro del conjunto. Además, con el fin de llevar los sistemas de comunicación cuántica y computación cuántica al mercado, una solución que satisfaga los requisitos anteriores también debe ser lo más económica y pequeña posible.

Los dispositivos conocidos que pueden detectar patrones de detección y realizar análisis de patrones de detección o bien son completamente analógicos o bien son completamente digitales. Los primeros dispositivos son difíciles de ajustar a escala para grandes conjuntos de detectores y no pueden reprogramarse fácilmente para diversos patrones de detección. Los segundos normalmente son asignadores de etiquetas de tiempo basados en FPGA y convertidores de tiempo a digital que pueden necesitar una cantidad sustancial de recursos en la estructura de FPGA, generan grandes cantidades de datos superfluos y pueden ser bastante caros. Un ejemplo de un convertidor de tiempo a digital (TDC) basado en FPGA dedicado de este tipo se describe en el artículo de Arabul *et al.* "A precise high count rate FPGA based multi-channel coincidence counting system for quantum photonic applications", IEEE Photonics Journal, vol. 12, n.º 2, abril de 2020. Boso Gianluca *et al.* "High-throughput gated photon counter with two detection windows programmable down to 70 ps width", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, vol. 85, n.º 1, 21 de enero de 2014, describe un fotocontador de compuerta de alto rendimiento que puede contar pulsos eléctricos que se producen dentro de dos ventanas de detección bien definidas y programables.

Por tanto, a partir de lo anterior se desprende que existe una necesidad en la técnica de detección de patrones de pulsos mejorada. En particular, existe una necesidad de métodos y sistema para la detección de patrones de pulsos de alta frecuencia, en tiempo real, que proporcionen una solución ajustable a escala y de bajo coste para determinar un patrón de detección particular asociado con una configuración de medición particular que pueda procesarse fácilmente por un analizador de patrones posterior.

Sumario

Tal como apreciará un experto en la técnica, aspectos de la presente invención pueden implementarse como un

sistema, método o producto de programa informático. Por consiguiente, aspectos de la presente invención pueden adoptar la forma de una realización completamente de hardware, una realización completamente de software (incluyendo firmware, software residente, microcódigo, etc.) o una realización que combina aspectos de software y hardware todos los cuales pueden denominarse generalmente en el presente documento "circuito", "módulo" o "sistema". Funciones descritas en esta divulgación pueden implementarse como un algoritmo ejecutado por un microprocesador de un ordenador. Además, aspectos de la presente invención pueden adoptar la forma de un producto de programa informático implementado en uno o más medios legibles por ordenador que tienen código de programa legible por ordenador implementado, por ejemplo, almacenado, en los mismos.

Los métodos, sistemas, módulos, funciones y/o algoritmos descritos con referencia a las realizaciones en esta solicitud pueden realizarse en hardware, software o una combinación de hardware y software. Los métodos, sistemas, módulos, funciones y/o algoritmos pueden realizarse de una manera centralizada en al menos un sistema informático, o de una manera distribuida en la que diferentes elementos están dispersados a través de varios sistemas informáticos interconectados. Cualquier clase de sistema informático u otro aparato adaptado para llevar a cabo las realizaciones (o partes de las mismas) descritas en esta solicitud resulta adecuado. Una implementación típica puede comprender uno o más circuitos digitales tales como circuitos integrados específicos de aplicación (ASIC), una o más matrices de compuertas programables en el campo (FPGA) y/o uno o más procesadores (por ejemplo, x86, x64, ARM, PIC y/o cualquier otra arquitectura de procesador adecuada) y conjunto de circuitos de apoyo asociado (por ejemplo, almacenamiento, DRAM, FLASH, circuitos de interfaz de bus, etc.). Cada ASIC, FPGA, procesador u otro circuito diferenciado puede denominarse "chip", y múltiples de tales circuitos pueden denominarse "conjunto de chips". En una implementación, los dispositivos lógicos programables pueden estar dotados de RAM rápida, en particular RAM en bloque (BRAM). Otra implementación puede comprender un medio legible por máquina (por ejemplo, legible por ordenador) no transitorio (por ejemplo, memoria FLASH, disco óptico, disco de almacenamiento magnético o similar) que tiene almacenadas en el mismo una o más líneas de código que, cuando se ejecutan por una máquina, hacen que la máquina realice los procedimientos tal como se describen en esta divulgación.

Los diagramas de flujo y diagramas de bloques en las figuras pueden representar arquitectura, funcionalidad y funcionamiento de posibles implementaciones de los métodos, sistemas y/o módulos de diversas realizaciones de la presente invención. Con respecto a esto, cada bloque en un diagrama de flujo o un diagrama de bloques puede representar un módulo, segmento o porción de código, que puede implementarse como software, hardware o una combinación de software y hardware.

También debe observarse que, en algunas implementaciones alternativas, las funciones indicadas en los bloques pueden producirse fuera del orden indicado en las figuras. Por ejemplo, dos bloques mostrados en sucesión pueden ejecutarse, en realidad, de manera sustancialmente simultánea, o algunas veces los bloques pueden ejecutarse en el orden inverso, dependiendo de la funcionalidad implicada. También se indicará que cada bloque de los diagramas de bloques y/o ilustraciones de diagrama de flujo, y combinaciones de bloques en los diagramas de bloques y/o ilustraciones de diagrama de flujo, pueden implementarse mediante sistemas basados en hardware de propósito especial que realizan las funciones o acciones especificadas, o combinaciones de hardware de propósito especial e instrucciones informáticas.

En un primer aspecto, la invención se refiere a un método de determinación de una señal de patrón de detector. El método comprende: recibir una señal de reloj de base y una señal de detector analógica en un ciclo de reloj de una señal de reloj, generándose la señal de detector analógica por un sistema de detección de fotones, en el que la señal de detector analógica comprende uno o más pulsos de detector de una anchura de pulso predeterminada en una o más posiciones temporales respectivamente, representando cada pulso de detector un pulso óptico detectado por el sistema de detección de fotones, definiéndose la una o más posiciones temporales con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base; generar una primera señal de reloj basándose en la señal de reloj de base, incluyendo la generación de la primera señal de reloj aplicar un primer desfase a la señal de reloj de base de modo que el borde ascendente de primera señal de reloj está en una primera posición temporal con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base; generar una primera señal de pulso basándose en la señal de detector analógica, teniendo la primera señal de pulso una primera anchura de pulso que es menor que la anchura de pulso del uno o más pulsos de detector, seleccionándose la primera anchura de pulso entre 10 y 200 ps; incluyendo la generación de la primera señal de pulso: formar una primera señal de detector retardada aplicando un primer retardo a la señal de detector analógica; formar una segunda señal de detector retardada aplicando un segundo retardo a la señal de detector analógica y, determinar la primera señal de pulso basándose en la primera y segunda señales de detector retardadas; y, generar una señal de patrón de detector digital, incluyendo la generación determinar una primera señal digital basándose en la primera señal de pulso y la primera señal de reloj, indicando la primera señal digital si la señal de detector analógica comprende un primer pulso de detección en la primera posición temporal tal como se indica por el borde ascendente de la primera señal de reloj.

Por tanto, la invención se refiere a un método de determinación de una señal de patrón de detección de pulsos asociada con una señal de detector analógica que puede comprender diferentes pulsos que representan diferentes intervalos de tiempo en una señal óptica que se detecta por un detector. Se necesita detectar estos pulsos y se necesita analizar el patrón de pulsos formado por los pulsos, normalmente en tiempo real.

Para determinar una posición temporal del borde ascendente de un pulso en la señal de pulso analógica con respecto al reloj, puede copiarse una señal de reloj en una o más señales de reloj desfasadas. Cada señal de reloj individual puede desfasarse para seleccionar como objetivo un intervalo temporal diferente en la señal de pulso analógica (separada como máximo por 2 ns). Además, la anchura de uno o más pulsos en la señal de pulso analógica puede reducirse hasta pulsos más estrechos (por ejemplo, hasta 100 ps). Posteriormente, pueden alimentarse tales pulsos estrechos a un circuito biestable D que se sincroniza mediante una de las señales de reloj desfasadas, logrando por tanto un filtrado en el tiempo, es decir filtrado en el dominio de tiempo. Si la señal de pulso analógica comprende un intervalo de tiempo en la posición temporal, puede generarse una señal digital que indica que se ha detectado un intervalo de tiempo en una determinada posición temporal.

La invención puede ajustarse a escala ya que el número de detectores de patrones de pulsos pueden apilarse al tiempo que se proporciona la entrada para el analizador de patrones de FPGA. El detector de patrones de pulsos puede actuar como sistema de filtrado en el tiempo ya que únicamente propaga pulsos digitales en su salida, si se producen pulsos analógicos en su entrada dentro de una de las ventanas temporales definidas por el reloj y los circuitos biestables D. El analizador de patrones de pulsos puede programarse buscar cualquier patrón de detección particular de modo que puede usarse en un sistema de recuento de pulsos, un sistema de recuento de coincidencias sensible al tiempo, un sistema de medición de estados de Bell, un sistema configurado para realizar grandes mediciones de proyección de estados entrelazados, etc.

En una realización, la primera señal de pulso puede determinarse combinando de manera lógica la señal de detector analógica y una versión invertida de la señal de detector analógica.

En una realización, el borde ascendente de la primera señal de pulso puede determinarse mediante el borde ascendente de la señal de detección analógica y el borde descendente de la primera señal de pulso puede determinarse mediante la señal de detección analógica invertida.

En una realización, la primera señal digital puede generarse mediante un primer bloque lógico configurado para recibir la primera señal de pulso y la primera señal de reloj como entrada y para generar la primera señal digital como salida, preferiblemente incluyendo el primer bloque lógico un primer circuito biestable D sincronizado mediante la primera señal de reloj.

En una realización, el método puede comprender además: generar una segunda señal de reloj basándose en la señal de reloj de base, incluyendo la determinación copiar la señal de reloj de base y aplicar un segundo desfase a la señal de reloj de base copiada de modo que el borde ascendente de la segunda señal de reloj ajustada está en una segunda posición temporal con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base; generar una segunda señal de pulso basándose en la señal de detector analógica, teniendo la segunda señal de pulso una anchura de pulso que es sustancialmente menor que la anchura de pulso del uno o más pulsos de detector; y, generar una señal de patrón de detector digital, incluyendo la determinación además: determinar una segunda señal digital basándose en la segunda señal de pulso y la segunda señal de reloj, siendo la segunda señal digital indicativa de si la señal de detección analógica comprende un segundo pulso de detección en la segunda posición temporal.

En una realización, la segunda señal digital puede generarse mediante un segundo bloque lógico configurado para recibir la segunda señal de pulso y la segunda señal de reloj como entrada y para generar la segunda señal digital como salida, preferiblemente incluyendo el segundo bloque lógico un segundo circuito biestable D sincronizado mediante la segunda señal de reloj.

En una realización, la fase de la primera señal digital y la fase de la segunda señal digital pueden realinearse.

Siguiendo con un segundo circuito biestable D que está sincronizado con la misma señal de reloj en ambos canales, los pulsos digitales resultantes pueden interconectarse fácilmente con un sistema de análisis de patrones basado en FPGA que puede sincronizarse basándose en la misma señal de reloj que el detector de patrones de pulsos. La lógica de FPGA puede programarse para analizar el patrón de detección de cada conjunto de pulsos digitales, buscar correlaciones temporales entre cada entrada (por tanto, cada detector) y emite resultados digitales.

En una realización, la señal de detector analógica puede generarse por un sistema de detección de pulsos, preferiblemente un sistema de detección de pulsos ópticos tal como un sistema de medición de estados de Bell, incluyendo el sistema de detección de pulsos uno o más detectores de fotones, estando cada detector de fotones acoplado a un transformador, por ejemplo, un comparador, para transformar una señal de detector analógica del detector de fotones en la señal de detector analógica, que puede comprender uno o más pulsos de detección de una anchura de pulso predeterminada en la una o más posiciones temporales.

En una realización, la frecuencia de la señal de reloj de base puede seleccionarse entre 50 y 500 MHz, preferiblemente entre 100 y 400 MHz.

En un aspecto adicional, la invención se refiere a un sistema para determinar una señal de patrón de detector en el que el sistema comprende: un reloj configurado para generar una señal de reloj de base; un módulo de ajuste de fase

que comprende uno o más bloques lógicos configurados para recibir la señal de reloj de base y para generar una primera señal de reloj basándose en la señal de reloj de base, incluyendo la generación aplicar un primer desfase a la señal de reloj de base de modo que el borde ascendente de primera señal de reloj ajustada está en una primera posición temporal definida con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base; un generador de pulsos que comprende uno o más bloques lógicos configurados para recibir al menos una señal de detección analógica generada por un sistema de detección de fotones en un primer ciclo de reloj de la señal de reloj de base, en el que la señal de detector analógica comprende uno o más pulsos de detector de una anchura de pulso predeterminada en una o más posiciones temporales respectivamente, representando cada pulso de detector un pulso óptico detectado por el sistema de detección de pulsos ópticos, definiéndose la una o más posiciones temporales con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base; y configurado para generar una primera señal de pulso basándose en la señal de detección analógica, teniendo la primera señal de pulso una anchura de pulso que es menor que la anchura de pulso del uno o más pulsos de detección, seleccionándose la primera anchura de pulso entre 10 y 200 ps, incluyendo la generación de la primera señal de pulso: formar una primera señal de detector retardada aplicando un primer retardo a la señal de detector analógica; formar una segunda señal de detector retardada aplicando un segundo retardo a la señal de detector analógica y, determinar la primera señal de pulso basándose en la primera y segunda señales de detector retardadas; y, un detector de pulsos sensible a borde de reloj que comprende uno o más bloques lógicos configurados para recibir la primera señal de pulso y la primera señal de reloj y para determinar una señal de patrón de detector digital basándose en la primera señal de pulso y la primera señal de reloj de fase, incluyendo la señal de patrón de detector digital una primera señal digital, indicando la primera señal digital si la señal de detector analógica comprende un primer pulso de detección en la primera posición temporal tal como se indica por el borde ascendente de la primera señal de reloj.

En una realización, la primera señal de pulso puede determinarse combinando de manera lógica la señal de detector analógica y una versión invertida de la señal de detector analógica.

En una realización, el borde ascendente de la primera señal de pulso puede determinarse mediante el borde ascendente de la señal de detección analógica y en la que el borde descendente de la primera señal de pulso se determina mediante la señal de detección analógica invertida.

En una realización, la primera señal digital puede generarse mediante un primer bloque lógico configurado para recibir la primera señal de pulso y la primera señal de reloj como entrada y para generar la primera señal digital como salida, preferiblemente incluyendo el primer bloque lógico un primer circuito biestable D sincronizado mediante la primera señal de reloj.

En una realización, la señal de detector analógica puede generarse por un sistema de detección de pulsos, preferiblemente un sistema de detección de pulsos ópticos tal como un sistema de medición de estados de Bell, incluyendo el sistema de detección de pulsos uno o más detectores de fotones, estando cada detector de fotones acoplado a un transformador, por ejemplo, un comparador, para transformar una señal de detector analógica del detector de fotones en la señal de detector analógica, que puede comprender uno o más pulsos de detección de una anchura de pulso predeterminada en la una o más posiciones temporales.

En una realización, la anchura de la primera señal de pulso puede seleccionarse de 10 y 200 ps, preferiblemente entre 20 y 100 ps; y/o, en la que la frecuencia de la señal de reloj de base se selecciona entre 50 y 500 MHz, preferiblemente entre 100 y 400 MHz.

En un aspecto adicional, la invención puede referirse a un sistema de recepción, preferiblemente un sistema de recepción para un sistema de distribución cuántica de claves o un sistema de comunicación cuántica, en el que el sistema de recepción comprende como sistema para determinar una señal de patrón de detector según cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente.

La invención también puede referirse a un producto de programa informático que comprende porciones de código de software configuradas para, cuando se ejecutan en la memoria de un ordenador, ejecutar las etapas de método según cualquiera de las etapas de procedimiento anteriormente descritas.

La invención se ilustrará adicionalmente haciendo referencia a los dibujos adjuntos, que mostrarán esquemáticamente realizaciones según la invención. Se entenderá que la invención no se restringe de ninguna manera a estas realizaciones específicas.

Breve descripción de los dibujos

Las figuras 1A y 1B ilustran un sistema de procesamiento de patrones de pulsos según una realización de la invención.

La figura 2 ilustra un sistema de procesamiento de patrones de pulsos según una realización de la invención;

la figura 3 representa una implementación de un sistema de procesamiento de patrones de pulsos según una realización de la invención;

la figura 4 representa parte de un procedimiento de detección de pulsos usando un sistema de procesamiento de patrones de pulsos según una realización de la invención;

5 la figura 5 representa parte de un procedimiento de detección de pulsos usando un sistema de procesamiento de patrones de pulsos según una realización de la invención;

la figura 6 representa parte de un procedimiento de detección de pulsos usando un sistema de procesamiento de patrones de pulsos según una realización de la invención;

10 la figura 7 representa un diagrama de flujo de método de determinación de una señal de patrón de pulsos según una realización de la invención;

15 la figura 8 representa un ejemplo de un sistema de QKD que comprende un detector de patrones de pulsos según una realización de la invención.

Descripción de las realizaciones

20 Las figuras 1A y 1B ilustran un sistema de procesamiento de patrones de pulsos según una realización de la invención. Tal como se muestra en la figura 1A, el sistema puede incluir un sistema de detección de pulsos ópticos 102 para detectar pulsos ópticos que se originan en codificadores ópticos. El sistema de detección de pulsos ópticos puede comprender uno o más detectores ópticos, por ejemplo, detectores de fotones, que están configurados para detectar pulsos de fotones. Tal detector de fotones puede transformar un pulso óptico en un pulso electrónico. Por tanto, el resultado de una medición puede ser una señal de detector analógica que representa una secuencia de pulsos analógicos 109_{1,2} que forma un determinado patrón de pulsos. Un detector de patrones de pulsos 104 puede recibir una señal de pulso analógica que comprende uno o más pulsos analógicos que pueden convertirse en una señal digital que puede procesarse fácilmente por un analizador de patrones de pulsos 106.

30 El sistema de detección de pulsos ópticos puede ser, por ejemplo, una configuración de medición de estados de Bell (BSM) que comprende un divisor de haces 110 y un primer y segundo detectores de fotones 108_{1,2} para detectar cúbits de intervalos de tiempo 112_{1,2} que pueden generarse por dos generadores de cúbits ópticos diferentes. Un cúbit de intervalo de tiempo óptico puede considerarse como una superposición coherente de dos modos temporales de una excitación de un único fotón. Tales cúbits de intervalos de tiempo ópticos pueden generarse usando un interferómetro de Mach Zehnder o enviando un único fotón largo con un tiempo de coherencia prolongado a través de un modulador de intensidad óptica para extraer dos modos temporales diferentes. Estos modos pueden incluir un modo "temprano"

35 $|e\rangle$ y un "modo tardío" $|l\rangle$ de modo que $|\Psi\rangle = (|e\rangle + e^{i\phi}|l\rangle)/\sqrt{2}$.

La BSM puede considerarse como una medición de proyección sobre uno de los cuatro estados de Bell entrelazados al máximo $|\Psi^{\pm}\rangle$, $|\Phi^{\pm}\rangle$. Los detectores de fotones de la figura 1A pueden detectar fotones con suficiente resolución temporal de tal manera que es posible distinguir entre fotones tempranos y tardíos. Por tanto, dependiendo del patrón de detección en la salida de los detectores, pueden distinguirse diferentes estados de Bell. Por ejemplo, tal como se muestra en la figura 1B, la detección de una detección de pulso temprano y uno tardío en un detector se refiere a una proyección en el estado $|\Psi^+\rangle$. De manera similar, un pulso (temprano o tardío) en cada detector se refiere a una proyección en el estado $|\Psi^-\rangle$. La medición de BSM ilustrada puede ejecutarse basándose en una señal de reloj, dando como resultado un resultado de BSM en cada ciclo de reloj. Ejecutar la medición a altas frecuencias, por ejemplo, 200 MHz o más, requiere una detección de patrones de pulsos y análisis en tiempo real a alta frecuencia basados en un esquema tal como se representa en la figura 1A. Más generalmente, muchos esquemas de computación cuántica requieren detección y análisis en tiempo real de un conjunto de pulsos analógicos entrantes para encontrar correlaciones sensibles al tiempo entre esos pulsos. Adicionalmente, el esquema de medición debe poder ajustarse a escala en cuanto a pulsos de entrada y se requiere que sea flexible en cuanto a la (re)programación de la búsqueda de diferentes patrones/correlaciones de detección.

La figura 2 ilustra un sistema de procesamiento de patrones de pulsos según una realización de la invención. En particular, esta figura representa un sistema de procesamiento de patrones de pulsos 200 que comprende un sistema de detección que puede comprender uno o más detectores ópticos 202_{1-n} y uno o más detectores de patrones de pulsos 206_{1-n} configurados para detectar patrones de pulsos en señales de detector analógicas generadas por los detectores. Los detectores 202_{1-n} pueden estar configurados para generar pulsos no lineales, ultrarrápidos, en respuesta a la aparición de un acontecimiento óptico 201_{1-n} tal como la llegada de señales de pulso óptico tales como intervalos de tiempo ópticos. Normalmente, el detector tiene una respuesta en forma de pulso no lineal. Para hacer que la señal sea adecuada para introducirse en un detector de patrones de pulsos, puede ser necesario alimentar en primer lugar la respuesta de detector analógica no lineal a la entrada de un primer bloque lógico 204_{1-n} que está configurado para transformar la señal de forma no lineal en una señal de detector analógica que comprende uno o más pulsos de una anchura y amplitud predeterminadas. En una realización, el primer bloque lógico puede incluir un comparador o un circuito electrónico equivalente a un comparador.

Cada uno del uno o más detectores de patrones de pulsos puede estar configurado para detectar un patrón de pulsos en una señal de detector analógica que se origina a partir del detector y para transformar información sobre el patrón detectado en una señal de salida digital. La una o más señales de salida digitales generadas por el uno o más detectores de patrones de pulsos pueden reenviarse respectivamente a un analizador de patrones de pulsos 208, por ejemplo, un analizador de patrones de pulsos basado en FPGA que puede procesar de manera colectiva las salidas digitales de los detectores de patrones de pulsos. El procedimiento de generar un patrón de pulsos ópticos 201₁ y la detección de patrones de pulsos en una señal de detector analógica por el detector de patrones de pulsos y análisis del patrón de pulsos por el analizador de patrones de pulsos pueden sincronizarse basándose en una señal de reloj de base de un reloj 210 de modo que el procesamiento de diferentes patrones de pulsos ópticos puede ejecutarse a altas frecuencias, por ejemplo, de 100 MHz o más.

Un detector de patrones de pulsos puede incluir un módulo de ajuste de fase de reloj 212₁. Para determinar una posición temporal de un pulso, por ejemplo, un borde ascendente de un pulso, en una señal de detector analógica con respecto a (un borde ascendente de) la señal de reloj, puede copiarse una señal de reloj y desfasarse mediante módulo de ajuste de fase de reloj para dar una o más señales de reloj desfasadas, por ejemplo, una primera señal de reloj 220₁ y una segunda señal de reloj 222₁. Un borde ascendente de la señal de reloj puede desfasarse para seleccionar como objetivo diferentes intervalos temporales en la señal de detector analógica. El detector de patrones de pulsos puede incluir además un generador de pulsos 214₁, que puede estar configurado para recibir la señal de detector analógica que puede comprender uno o más pulsos de una primera anchura de pulso y para modificar (reducir) la anchura del uno o más pulsos. De esta manera, el generador de pulsos puede generar una señal de pulso analógica que comprende pulsos de una segunda anchura de pulso, que es sustancialmente menor que la primera anchura de pulso. De esta manera, el uno o más pulsos en la señal de pulso analógica pueden ser pulsos muy estrechos que tienen una anchura de aproximadamente 100 ps o menor.

La señal de pulso analógica y la una o más señales de reloj desfasadas pueden alimentarse a la entrada de un detector de pulsos sensible a borde 216₁. Si la señal de pulso comprende un intervalo de tiempo en la posición temporal del borde ascendente de la señal de reloj desfasada, puede generarse una señal de salida digital por el detector de pulsos, indicando que se ha identificado un intervalo de tiempo en una determinada posición temporal con respecto a la señal de reloj de base.

Por tanto, las diferentes señales de reloj desfasadas pueden usarse para determinar si la señal de pulso analógica puede comprender diferentes pulsos en diferentes posiciones temporales. Para cada una de estas posiciones temporales, puede generarse una señal de salida digital de modo que las señales de salida digitales juntas pueden representar una representación digital de un determinado patrón de pulsos. Debido a la fase de la señal de reloj de fase retardada, puede estar presente una diferencia de fase entre las diferentes señales de salida digitales. Para eliminar estas diferencias de fase, el detector de patrones de pulsos puede comprender además un módulo de realineación de fase de datos 218₁, que puede estar configurado para realinear las diferentes señales de salida digitales del detector de pulsos. Después de eso, las señales de salida digitales de fase realineada pueden proporcionarse como señal digital que representa un patrón de pulsos al analizador de patrones de pulsos, por ejemplo, un sistema de procesamiento de datos basado en FPGA, que se sincroniza basándose en la señal de reloj.

Por tanto, tal como se muestra en la figura, invención se refiere a un sistema de procesamiento de patrones de pulsos y a un detector de patrones de pulsos usado en tal sistema de procesamiento de patrones de pulsos. El detector de patrones de pulsos puede estar configurado para detectar una señal de patrón de detección asociada con una señal de detector analógica que puede comprender diferentes pulsos. Los pulsos pueden representar diferentes intervalos de tiempo en una señal óptica que se detecta por un detector, por ejemplo, un detector de BSM. Se necesita detectar estos pulsos y se necesita analizar el patrón de pulsos formado por los pulsos, normalmente en tiempo real. Para ello, un detector de patrones de pulsos puede estar configurado para recibir (al menos) dos entradas: una señal de reloj y una señal de detector analógica que puede comprender diferentes pulsos en determinadas posiciones temporales en un ciclo de reloj. En este caso, las posiciones temporales en la señal pueden determinarse con respecto al inicio de un ciclo de reloj, por ejemplo, el borde ascendente de una señal de reloj.

La invención puede ajustarse a escala dado que el número de detectores de patrones de pulsos pueden apilarse al tiempo que se proporciona una entrada para el analizador de patrones de FPGA. El detector de patrones de pulsos puede actuar como sistema de filtrado en el tiempo ya que únicamente propaga pulsos digitales si se producen pulsos analógicos dentro de una de las ventanas temporales definidas por el reloj y los circuitos biestables D. El analizador de patrones de pulsos puede programarse para buscar cualquier patrón de detección particular, por ejemplo, contadores de pulsos, contadores de coincidencias sensibles al tiempo, mediciones de estados de Bell, grandes mediciones de proyección de estados entrelazados, etc.

La figura 3 representa una implementación de sistema de detección de pulsos según una realización de la invención. En particular, la figura representa una implementación de un sistema de procesamiento de patrones de pulsos tal como se describe con referencia a la figura 2. El sistema de detección de pulsos puede incluir uno o más detectores ópticos 302_{1-n} y uno o más detectores de patrones de pulsos 306_{1-n} configurados para detectar patrones de pulsos en señales de detector analógicas generadas por los detectores, un patrón de pulsos ópticos 301₁, un primer bloque lógico 304_{1-n} que está configurado para transformar la señal de forma no lineal en una señal de detector analógica que

comprende uno o más pulsos de una anchura y amplitud predeterminadas. De manera similar al descrito con referencia a la figura 2, el detector de patrones de pulsos 306₁ puede comprender un módulo de ajuste de fase de reloj 312₁, un generador de pulsos 314₁, un detector de pulsos sensible a borde 316₁ y un módulo de realineación de fase de datos 318₁. Además, el procedimiento de generar un patrón de pulsos ópticos 301₁ y la detección de patrones de pulsos en una señal de detector analógica por el detector de patrones de pulsos y análisis del patrón de pulsos por el analizador de patrones de pulsos pueden sincronizarse basándose en una señal de reloj de base de un reloj 310. A continuación en el presente documento se describirá con más detalle un método de detección de patrones de pulsos ejecutado por el sistema de detección de pulsos con referencia a las señales ilustradas en las figuras 4-6.

Tal como se muestra en la figura 3, un ciclo de detección puede empezar con la generación de un patrón de pulsos ópticos 301₁, que se detecta por un detector de fotones 302₁, que, en respuesta, genera una señal de detector no lineal analógica. Un ejemplo de tal señal de detector 402 se ilustra en la figura 4. Los detectores que pueden generar tales señales de detector incluyen detectores de fotones individuales de nanoalambres superconductores (SNSPD). La señal puede incluir un borde ascendente muy pronunciado 406₁ seguido por un flanco descendente 406₂. Cada vez que se absorbe un fotón por el SNSPD, se generará una respuesta de detector tal como se muestra en esta figura. Para preparar esta señal altamente no lineal para la entrada en un detector de patrones de pulsos, la señal de detector puede transformarse en una señal de pulso analógica de una amplitud predeterminada usando un primer circuito lógico 304₁ tal como se representa en la figura 3.

Por ejemplo, en una realización, la respuesta de detector puede introducirse en un comparador que puede generar una señal en forma de pulso que es adecuada para el detector de patrones de pulsos. La figura 4 representa un ejemplo de una señal en forma de pulso 404 que tiene un borde ascendente que coincide con el borde ascendente de la señal de detector 402. Esta señal puede denominarse señal de detector analógica. Dependiendo de la señal de fotón que se detecta, la señal de detector analógica incluye uno o múltiples pulsos. Por ejemplo, en el caso de una medición de BSM, dentro de un ciclo de reloj la señal de detector analógica puede comprender ninguno, uno o dos pulsos. En el caso de un pulso, el pulso puede ser o bien un pulso temprano ubicado en una primera posición temporal en el ciclo de reloj o bien un pulso tardío ubicado en una segunda posición temporal.

La señal de detector analógica puede alimentarse a la entrada del generador de pulsos 314₁ que forma parte del detector de patrones de pulsos 306₁, que puede estar configurada para modificar la anchura de pulso del uno o más pulsos en la señal de detector analógica en la entrada del generador de pulsos. De esta manera, el generador de pulsos puede generar una señal de pulso analógica que comprende uno o más pulsos de una segunda anchura de pulso, que es sustancialmente menor que la primera anchura de pulso. Para ello, la señal de detector analógica y una versión invertida de la señal de detector analógica pueden proporcionarse a la entrada de un circuito de retardo 313₁ que generará una primera señal de detector retardada basándose en un primer valor de retardo y una segunda señal de detector retardada invertida basándose en un segundo valor de retardo, que posteriormente se combinan usando un bloque lógico, por ejemplo, un bloque lógico de NAND 315.

La figura 5 representa este procedimiento en cuanto a señales, incluyendo la señal de detector analógica 502, la primera señal de detector retardada 504 y la segunda señal de detector retardada invertida 506. Tal como se muestra en la figura, el primer y segundo valores de retardo pueden seleccionarse de tal manera que el borde ascendente de la primera señal de detector retardada 504 está posicionado antes que el borde descendente de la segunda señal de detector invertida 506 de modo que se forma un pulso estrecho 508 cuando se combinan ambas señales, en el que la anchura de pulso del pulso estrecho se determina mediante el primer y segundo valores de retardo.

Además, un módulo de ajuste de fase de reloj 312₁ puede recibir una señal de reloj de base y producir una o más señales de reloj de fase retardada, incluyendo una primera señal de reloj (de fase retardada) y una segunda señal de reloj (de fase retardada). Después, tanto la una o más señales de reloj de fase retardada como la señal de pulso analógica (la salida del generador de pulsos 314₁) que pueden alimentarse a la entrada del detector de pulsos sensible a borde 316₁, que puede incluir uno o más circuitos biestables D 317_{1,2}, por ejemplo, un primer circuito biestable D y un segundo circuito biestable D. Por tanto, la señal de pulso puede alimentarse a la entrada del primer circuito biestable D que se sincroniza basándose en la primera señal de reloj. Por tanto, si la señal de pulso analógica comprende un primer intervalo de tiempo en una primera posición temporal del borde ascendente de la primera señal de reloj, el detector de pulsos generará una primera señal digital que indica un intervalo de tiempo en la primera posición temporal. De manera similar, la señal de pulso también puede alimentarse a la entrada del segundo circuito biestable D que se sincroniza basándose en la segunda señal de reloj, de modo que si la señal de pulso analógica comprende un segundo intervalo de tiempo en una segunda posición temporal del borde ascendente de la segunda señal de reloj, el detector de pulsos generará una segunda señal digital. De esta manera, el detector de pulsos generará un patrón de detección de pulsos que representa la detección de una pluralidad de intervalos de tiempo, por ejemplo, un intervalo de tiempo temprano y/o uno tardío.

Las señales procesadas por el detector de pulsos sensible a borde se ilustran en la figura 6. Esta figura representa una señal de pulso analógica 602 y la primera y segunda señales de reloj 604, 606 con un primer borde ascendente en una primera posición temporal t_0 y un segundo borde ascendente en una segunda posición temporal t_1 . Dado que la señal de pulso analógica 602 comprende un primer pulso 601 (que representa un primer intervalo de tiempo) en una primera posición temporal del borde ascendente de la primera señal de reloj, el detector de pulsos establecerá la

primera señal digital D0 606 en un punto alto lógico que indica un intervalo de tiempo en la primera posición temporal. De manera similar, dado que la señal de pulso analógica 602 no comprende un segundo pulso (que representa un segundo intervalo de tiempo) en una segunda posición temporal del borde ascendente de la segunda señal de reloj, el detector de pulsos mantendrá la señal digital D1 606 en un punto bajo lógico que indica un intervalo de tiempo en la primera posición temporal.

Esta figura ilustra por qué se usa una señal de pulso muy estrecha para el detector de pulsos. En particular, muestra que un pulso estrecho reducirá la probabilidad de que señales no correlacionadas en la señal de pulso analógica puedan influir en la determinación de las señales digitales en la salida del detector de pulsos. Una señal de pulso estrecha reducirá la probabilidad de errores.

Esta figura ilustra además que, si tanto la primera como la segunda señales digitales se establecen a un punto alto lógico, ambas señales tendrán una diferencia de fase que está provocada por la diferencia de fase entre la primera y segunda señales de reloj. Para hacer que las señales digitales sean adecuadas para su entrada al analizador de patrones de pulsos basado en FPGA 308, pueden realinearse las señales basándose en un módulo de realineación de fase de datos 3181, que puede incluir dos circuitos biestables D 319_{1,2} que están sincronizados basándose en la segunda señal de reloj (tardía) de modo que se alinean ambas señales y pueden alimentarse a la entrada del analizador de patrones de pulsos. Por tanto, un segundo circuito biestable D que está sincronizado con la misma señal de reloj en ambos canales, los pulsos digitales resultantes pueden interconectarse fácilmente con un sistema de análisis de patrones basado en FPGA que puede sincronizarse basándose en la misma señal de reloj que el detector de patrones de pulsos. La lógica de FPGA puede programarse para analizar el patrón de detección de cada conjunto de pulsos digitales, buscando correlaciones temporales entre cada entrada (por tanto, cada detector) y emite resultados digitales.

La figura 7 representa un diagrama de flujo de determinación de una señal de patrón de pulsos según una realización de la invención. Tal como se muestra en la figura, el método puede incluir una etapa de recibir una señal de reloj de base y una señal de detector analógica (etapa 702). La recepción de nuevas señales de detector analógicas puede tener lugar en cada ciclo de reloj de la señal de reloj. La señal de detector analógica puede comprender uno o más pulsos, es decir pulsos analógicos, de una anchura de pulso predeterminada en una o más posiciones temporales respectivamente con respecto al inicio del ciclo de reloj, por ejemplo, un borde ascendente de la señal de reloj. Por tanto, la una o más posiciones temporales del uno o más pulsos pueden definirse con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base.

En una etapa 704 adicional, una primera señal de reloj puede determinarse basándose en la señal de reloj de base, en la que la determinación puede incluir copiar la señal de reloj de base y aplicar un primer desfase a la señal de reloj de base copiada de modo que el borde ascendente de primera señal de reloj está en una primera posición temporal con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base. Después, puede determinarse una primera señal de pulso basándose en la señal de detector analógica, en la que la primera señal de pulso puede tener una anchura de pulso que es sustancialmente menor que la anchura de pulso del uno o más pulsos de detector (etapa 706). Después, puede determinarse una señal de patrón de pulsos digital. Esta etapa puede incluir determinar una primera señal digital basándose en la primera señal de pulso y la primera señal de reloj, en la que la primera señal digital puede ser indicativa de si la señal de detector analógica comprende un primer pulso de detección en la primera posición temporal tal como se indica por el borde ascendente de la primera señal de reloj (etapa 708).

Este método puede ejecutarse por un detector de patrones de pulsos que funciona eficazmente como sistema de filtrado en el tiempo de analógico a digital ya que únicamente propaga un patrón de pulsos digitales si se producen pulsos analógicos dentro de una de las ventanas temporales definidas por una de las señales de reloj desfasadas.

La figura 8 representa un ejemplo de un sistema de QKD que comprende un codificador óptico según una realización de la invención. En particular, la figura ilustra un diseño de MDI-QKD conocido a partir del artículo de Valivarthi *et al*, A cost-effective measurement-independent quantum key distribution system for quantum networks, Quantum Sic. Technol. 2 (2017) que incluye uno o más codificadores ópticos tal como se describe con las realizaciones en esta solicitud. El sistema 800 puede incluir un primer y segundo módulos de generación de cúbits 802, 804. Ambos módulos de generación de cúbits pueden estar configurados para preparar cúbits y enviarlos mediante fibras ópticas 806_{1,2}, 808_{1,2} a una estación de medición central 810, que puede incluir un denominado módulo de medición de estados de Bell (BSM), que puede comprender un detector de patrones de pulsos tal como se describe con referencia a las realizaciones en esta solicitud.

Estas fibras ópticas pueden formar parte de una red de comunicación por fibra óptica estándar convencional. Cada módulo de generación de cúbits puede incluir un controlador óptico 812 para controlar un sistema de láser 814, tal como un láser de onda continua, para generar pulsos ópticos coherentes. En una realización, el controlador óptico 812 puede comprender un sistema de generación de pulsos tal como se describe, por ejemplo, con referencia a las figuras 2-5 para generar cada ciclo de reloj una señal de pulso en el que la señal de pulso puede incluir cero, uno o dos pulsos. Los pulsos ópticos generados por el sistema de láser pueden procesarse por un primer modulador de intensidad IM1 816, que se controla mediante las señales de pulso del sistema de generación de pulsos. En particular, basándose en la señal de pulso, el primer modulador de intensidad puede "extraer" modos ópticos de intervalos de

- tiempo, intervalos de tiempo tempranos y/o tardíos, para definir un cúbit fotónico. Los modos ópticos de intervalos de tiempo pueden procesarse por un modulador de fase PM 818 para controlar una fase entre modos ópticos. Un segundo modulador de intensidad IM2 820 adicional puede usarse para controlar el número promedio de fotones asociados con el cúbit. De esta manera, ambos módulos de generación de cúbits (Alice y Bob) pueden generar cúbits de intervalos de tiempo de una manera sincronizada que se transmiten mediante conexiones de fibra 806₂, 808₂ a una estación de medición central 810. Para un rendimiento satisfactorio del módulo de BSM, los modos ópticos transmitidos por el módulo de generación de cúbits deben ser indistinguibles en todos los grados de libertad (espacial, espectral, polarización y temporal).
- La estación de medición central 810, habitualmente denominada Charlie, puede incluir un sistema de distribución de reloj, que incluye un 822 conectado a un sistema de láseres 824 para producir una señal de reloj óptica para los generadores de cúbits. Esta señal de reloj puede transmitirse mediante las fibras ópticas 806₁, 808₁ a los módulos de generación de cúbits, que usan esta señal de reloj de alta calidad tanto para sincronizar la generación de cúbits como para producir una señal de reloj de alta calidad para generar los pulsos que impulsan el modulador óptico. Además, la estación de medición central puede comprender además divisores de haces de polarización (BS) 830_{1,2} y un divisor de haces de mantenimiento de la polarización 832 y detectores de fotones individuales de nanoalambres superconductores (SNSPD) 834_{1,2} para formar una configuración de medición de BSM, en la que los detectores están configurados para generar señales de detector analógicas que el módulo de medición de estados de Bell (BSM), que puede comprender detectores de patrones de pulsos configurados para detectar patrones de pulsos en las señales de detector analógicas y producir una representación de señales digitales del patrón de pulsos detectado. La estación de medición puede incluir además una denominada medición de zanja de Hong-Ou-Mandel (HOM) 832 para determinar la indistinguibilidad de los intervalos de tiempo y un módulo de analizador de BSM 836 que está configurado para analizar las señales eléctricas producidas por los SNSPD para la generación de una clave secreta.
- Aunque los sistemas de generación de pulsos según las realizaciones en esta solicitud son particularmente adecuados para un sistema de QKD de MDI-QKD, también pueden usarse ventajosamente en otros sistemas de QKD, sistemas de comunicación óptica (cuántica), sistemas de procesamiento de señales cuánticas así como un generador de señales para generar señales de estímulo y de reloj para analizar y someter a prueba dispositivos eléctricos.
- Las técnicas de esta divulgación pueden implementarse en una amplia variedad de dispositivos o aparatos, incluyendo un teléfono inalámbrico, un circuito integrado (IC) o un conjunto de IC (por ejemplo, un conjunto de chips). En esta divulgación se describen diversos componentes, módulos o unidades para enfatizar aspectos funcionales de dispositivos configurados para realizar las técnicas dadas a conocer, pero no requieren necesariamente la realización por diferentes unidades de hardware. En vez de eso, tal como se describió anteriormente, pueden combinarse diversas unidades en una unidad de hardware de códec o proporcionarse por una colección de unidades de hardware interoperativas, incluyendo uno o más procesadores tal como se describió anteriormente, junto con software y/o firmware adecuados.
- La terminología usada en el presente documento es únicamente con el fin de describir realizaciones particulares y no se pretende que sea limitativa de la invención. Tal como se usan en el presente documento, se pretende que las formas en singular "un", "una" y "el/la" incluyan también las formas en plural, a menos que el contexto indique claramente lo contrario. Se entenderá además que los términos "comprende" y/o "que comprende", cuando se usan en esta memoria descriptiva, especifican la presencia de características, números enteros, etapas, operaciones, elementos y/o componentes mencionados, pero no excluyen la presencia o adición de una o más de otras características, números enteros, etapas, operaciones, elementos, componentes y/o grupos de los mismos.
- Se pretende que las estructuras, materiales, acciones y equivalentes correspondientes de todos los medios o elementos de etapa más función en las siguientes reivindicaciones incluyan cualquier estructura, material o acción para realizar la función en combinación con otros elementos reivindicados tal como se reivindica específicamente. La descripción de la presente invención se ha presentado con fines de ilustración y descripción, pero no se pretende que sea exhaustiva o se limite a la invención en la forma dada a conocer. Muchas modificaciones y variaciones resultarán evidentes para los expertos habituales en la técnica sin alejarse del alcance de las reivindicaciones. La realización se eligió y describió con el fin de explicar mejor los principios de la invención y la aplicación práctica, y para permitir a otros expertos habituales en la técnica entender la invención para diversas realizaciones con diversas modificaciones tal como resultan adecuadas para el uso particular previsto.

REIVINDICACIONES

1. Método de determinación de una señal de patrón de detección que comprende:

recibir una señal de reloj de base y una señal de detector analógica (404) en un ciclo de reloj de una señal de reloj, generándose la señal de detector analógica por un sistema de detección de fotones (202), en el que la señal de detector analógica comprende uno o más pulsos de detector de una anchura de pulso predeterminada en una o más posiciones temporales respectivamente, representando cada pulso de detector un pulso óptico detectado por el sistema de detección de fotones (202), definiéndose la una o más posiciones temporales con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base;

generar una primera señal de reloj (604) basándose en la señal de reloj de base, incluyendo la generación de la primera señal de reloj aplicar un primer desfase a la señal de reloj de base de modo que el borde ascendente de la primera señal de reloj está en una primera posición temporal con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base;

generar una primera señal de pulso (508) basándose en la señal de detector analógica, teniendo la primera señal de pulso una primera anchura de pulso que es menor que la anchura de pulso del uno o más pulsos de detector, seleccionándose la primera anchura de pulso entre 10 y 200 ps; incluyendo la generación de la primera señal de pulso: formar una primera señal de detector retardada (504) aplicando un primer retardo a la señal de detector analógica; formar una segunda señal de detector retardada (508) aplicando un segundo retardo a la señal de detector analógica y, determinar la primera señal de pulso basándose en la primera y segunda señales de detector retardadas; y

generar una señal de patrón de detector digital, incluyendo la generación determinar una primera señal digital (606) basándose en la primera señal de pulso y la primera señal de reloj, indicando la primera señal digital si la señal de detector analógica comprende un primer pulso de detección en la primera posición temporal tal como se indica por el borde ascendente de la primera señal de reloj.

2. Método según la reivindicación 1, en el que la primera señal de pulso se genera combinando de manera lógica la señal de detector analógica y una versión invertida de la señal de detector analógica.

3. Método según las reivindicaciones 1 o 2, en el que el borde ascendente de la primera señal de pulso se determina mediante el borde ascendente de la señal de detección analógica y en el que el borde descendente de la primera señal de pulso se determina mediante la señal de detección analógica invertida.

4. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en el que la primera señal digital se genera mediante un primer bloque lógico configurado para recibir la primera señal de pulso y la primera señal de reloj como entrada y para generar la primera señal digital como salida, preferiblemente incluyendo el primer bloque lógico un primer circuito biestable D sincronizado mediante la primera señal de reloj.

5. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-4, que comprende además:

generar una segunda señal de reloj basándose en la señal de reloj de base, incluyendo la determinación aplicar un segundo desfase a la señal de reloj de base de modo que el borde ascendente de la segunda señal de reloj ajustada está en una segunda posición temporal con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base;

generar una segunda señal de pulso basándose en la señal de detector analógica, teniendo la segunda señal de pulso una anchura de pulso que es sustancialmente menor que la anchura de pulso del uno o más pulsos de detector; y,

generar una señal de patrón de detector digital, incluyendo la determinación además: determinar una segunda señal digital basándose en la segunda señal de pulso y la segunda señal de reloj, siendo la segunda señal digital indicativa de si la señal de detección analógica comprende un segundo pulso de detección en la segunda posición temporal.

6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-5, en el que la segunda señal digital se genera mediante un segundo bloque lógico configurado para recibir la segunda señal de pulso y la segunda señal de reloj como entrada y para generar la segunda señal digital como salida, preferiblemente incluyendo el segundo bloque lógico un segundo circuito biestable D sincronizado mediante la segunda señal de reloj.

7. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-6, en el que se realinean la fase de la primera señal digital y la fase de la segunda señal digital; y/o, en el que la frecuencia de la señal de reloj de base se selecciona entre 50 y 500 MHz, preferiblemente entre 100 y 400 MHz.

8. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-7, en el que el sistema de detección de pulsos incluye uno o más detectores de fotones, estando cada detector de fotones acoplado a un transformador, por ejemplo, un comparador, para transformar una señal de detector analógica del detector de fotones en la señal de detector analógica, que puede comprender uno o más pulsos de detección de una anchura de pulso predeterminada en la una o más posiciones temporales.
9. Un sistema para determinar una señal de patrón de detector que comprende:
un reloj (210) configurado para generar una señal de reloj de base;
un módulo de ajuste de fase (212) que comprende uno o más bloques lógicos configurados para recibir la señal de reloj de base y para generar una primera señal de reloj basándose en la señal de reloj de base, incluyendo la generación aplicar un primer desfase a la señal de reloj de base de modo que el borde ascendente de la primera señal de reloj ajustada está en una primera posición temporal definida con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base;
un generador de pulsos (214) que comprende uno o más bloques lógicos configurados para recibir al menos una señal de detección analógica generada por un sistema de detección de fotones (202) en un primer ciclo de reloj de la señal de reloj de base, en el que la señal de detector analógica comprende uno o más pulsos de detector de una anchura de pulso predeterminada en una o más posiciones temporales respectivamente, representando cada pulso de detector un pulso óptico detectado por el sistema de detección de pulsos ópticos, definiéndose la una o más posiciones temporales con respecto al borde ascendente de la señal de reloj de base; y configurado para generar una primera señal de pulso basándose en la señal de detección analógica, teniendo la primera señal de pulso una anchura de pulso que es menor que la anchura de pulso del uno o más pulsos de detección, seleccionándose la primera anchura de pulso entre 10 y 200 ps, incluyendo la generación de la primera señal de pulso: formar una primera señal de detector retardada aplicando un primer retardo a la señal de detector analógica; formar una segunda señal de detector retardada aplicando un segundo retardo a la señal de detector analógica y, determinar la primera señal de pulso basándose en la primera y segunda señales de detector retardadas; y
un detector de pulsos sensible a borde de reloj (216) que comprende uno o más bloques lógicos configurados para recibir la primera señal de pulso y la primera señal de reloj y para determinar una señal de patrón de detector digital basándose en la primera señal de pulso y la primera señal de reloj de fase, incluyendo la señal de patrón de detector digital una primera señal digital, indicando la primera señal digital si la señal de detector analógica comprende un primer pulso de detección en la primera posición temporal tal como se indica por el borde ascendente de la primera señal de reloj.
10. Sistema según la reivindicación 9, en el que la primera señal de pulso se genera combinando de manera lógica la señal de detector analógica y una versión invertida de la señal de detector analógica.
11. Sistema según las reivindicaciones 9 o 10, en el que el borde ascendente de la primera señal de pulso se determina mediante el borde ascendente de la señal de detección analógica y en el que el borde descendente de la primera señal de pulso se determina mediante la señal de detección analógica invertida.
12. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 9-12, en el que la primera señal digital se genera mediante un primer bloque lógico configurado para recibir la primera señal de pulso y la primera señal de reloj como entrada y para generar la primera señal digital como salida, preferiblemente incluyendo el primer bloque lógico un primer circuito biestable D sincronizado mediante la primera señal de reloj; y/o, en el que la frecuencia de la señal de reloj de base se selecciona entre 50 y 500 MHz, preferiblemente entre 100 y 400 MHz.
13. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 9-12, en el que el sistema de detección de pulsos incluye uno o más detectores de fotones, estando cada detector de fotones acoplado a un transformador, por ejemplo, un comparador, para transformar una señal de detector analógica del detector de fotones en la señal de detector analógica, que puede comprender uno o más pulsos de detección de una anchura de pulso predeterminada en la una o más posiciones temporales.
14. Sistema de recepción, preferiblemente sistema de recepción para un sistema de distribución cuántica de claves o un sistema de comunicación cuántica, en el que el sistema de recepción comprende como sistema para determinar una señal de patrón de detector según cualquiera de las reivindicaciones 9-13.
15. Producto de programa informático que comprende porciones de código de software configuradas para, cuando se ejecutan en la memoria de un ordenador, ejecutar las etapas de método según cualquiera de las reivindicaciones 1-8.

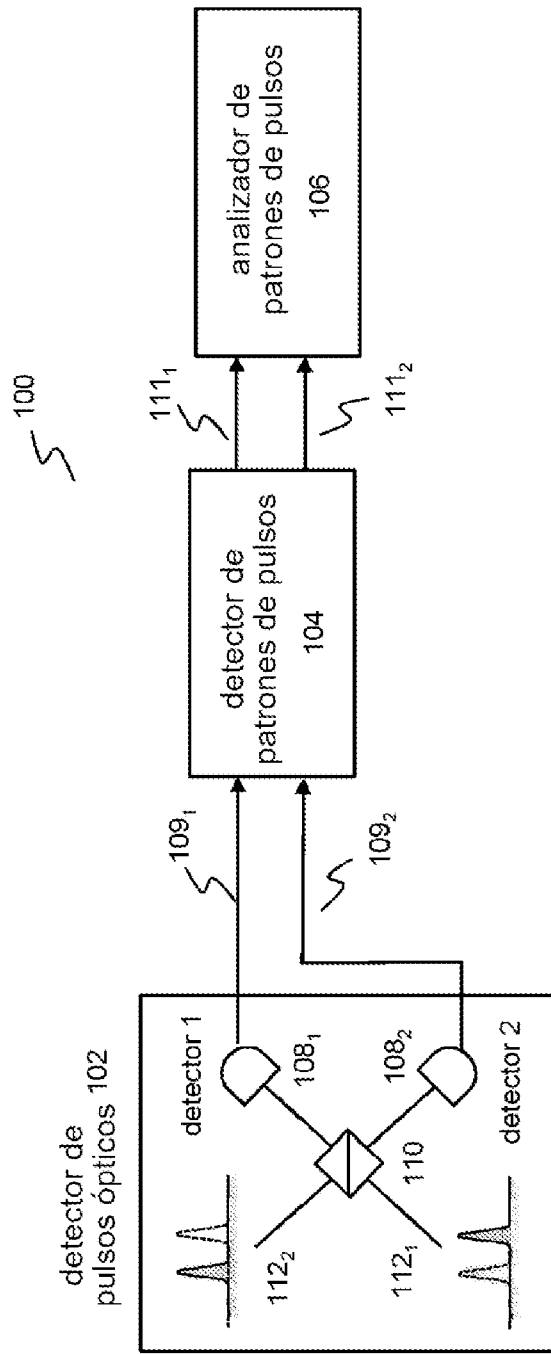


FIG. 1A

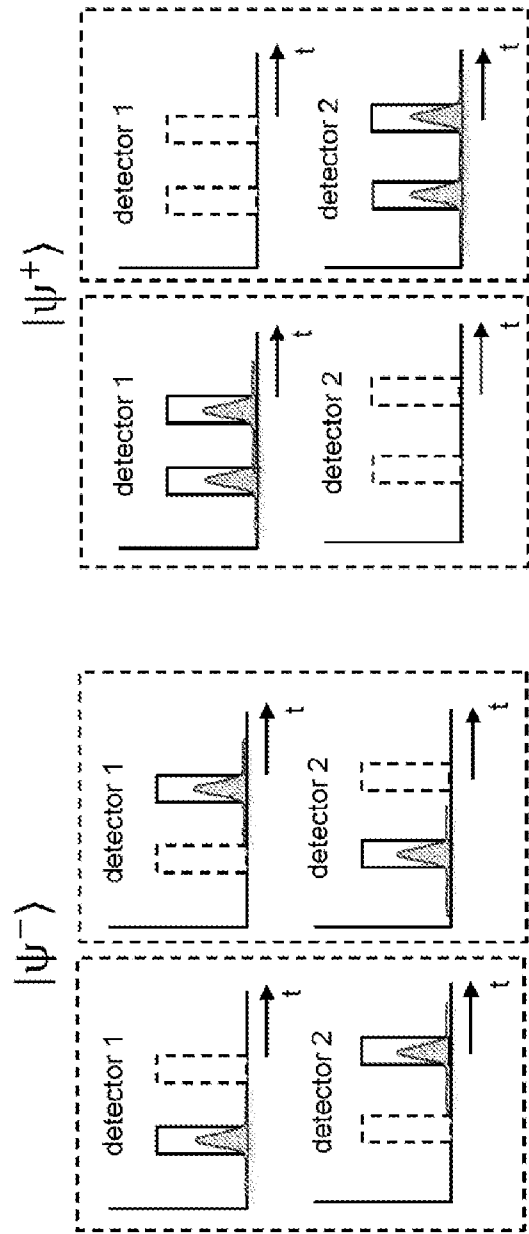


FIG. 1B

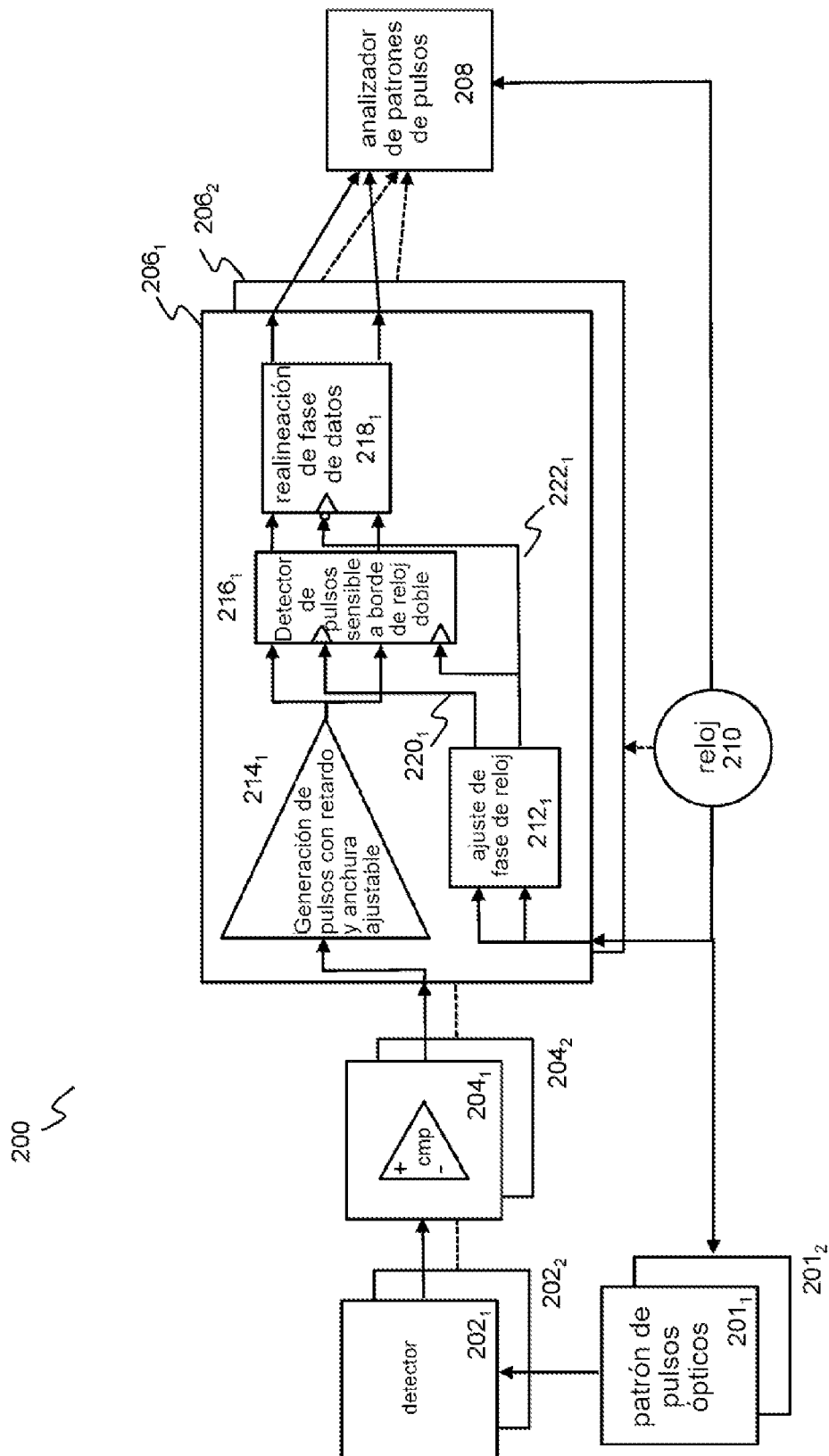


FIG. 2

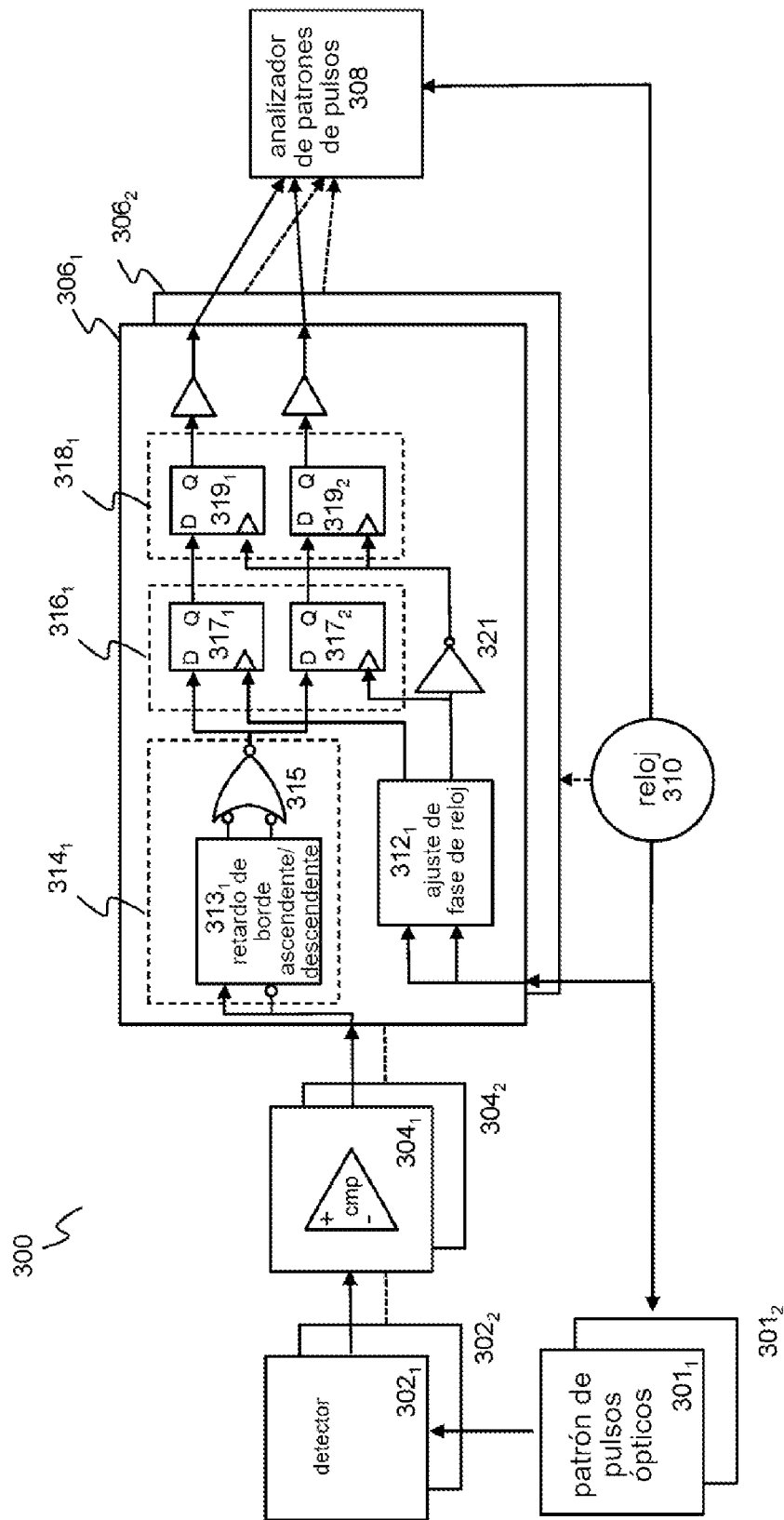


FIG. 3

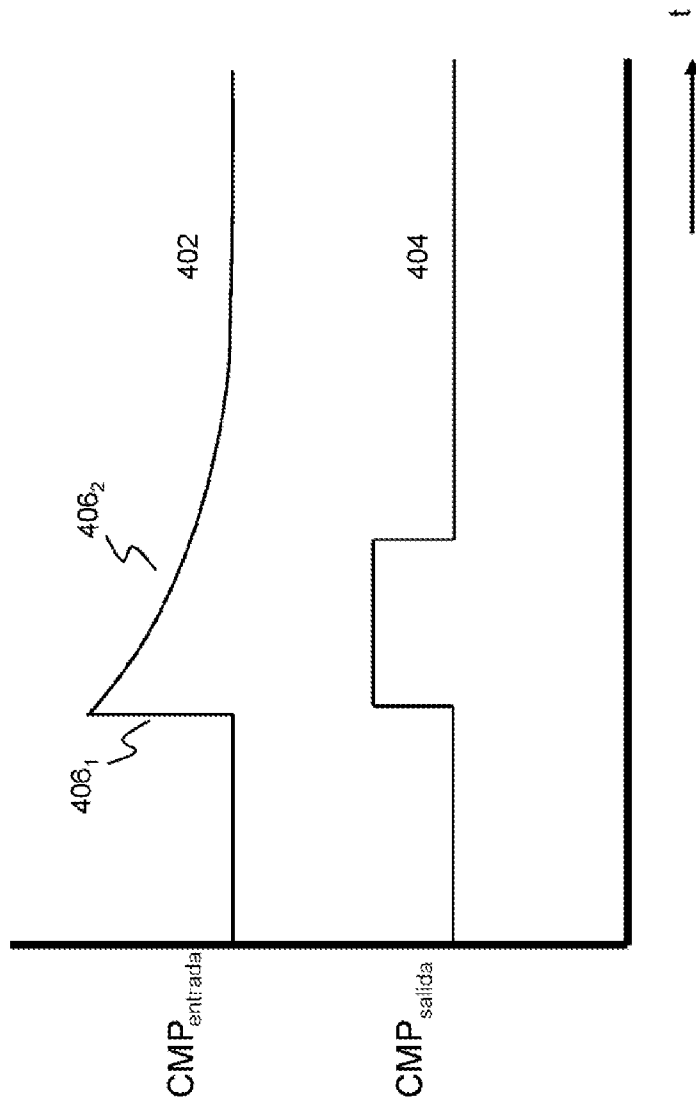


FIG. 4

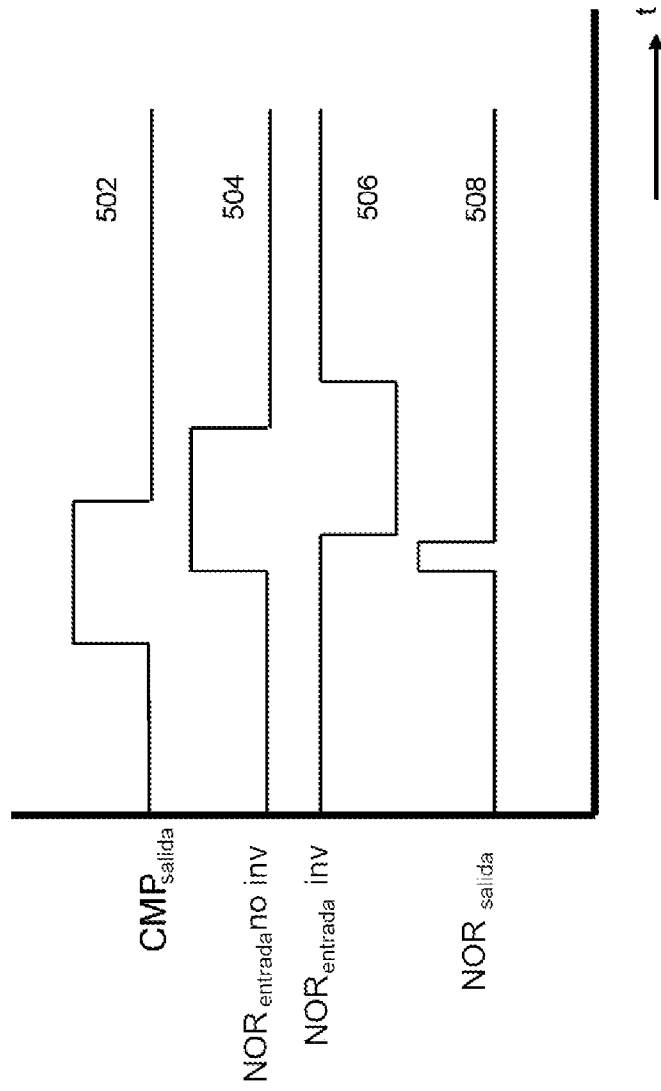


FIG. 5

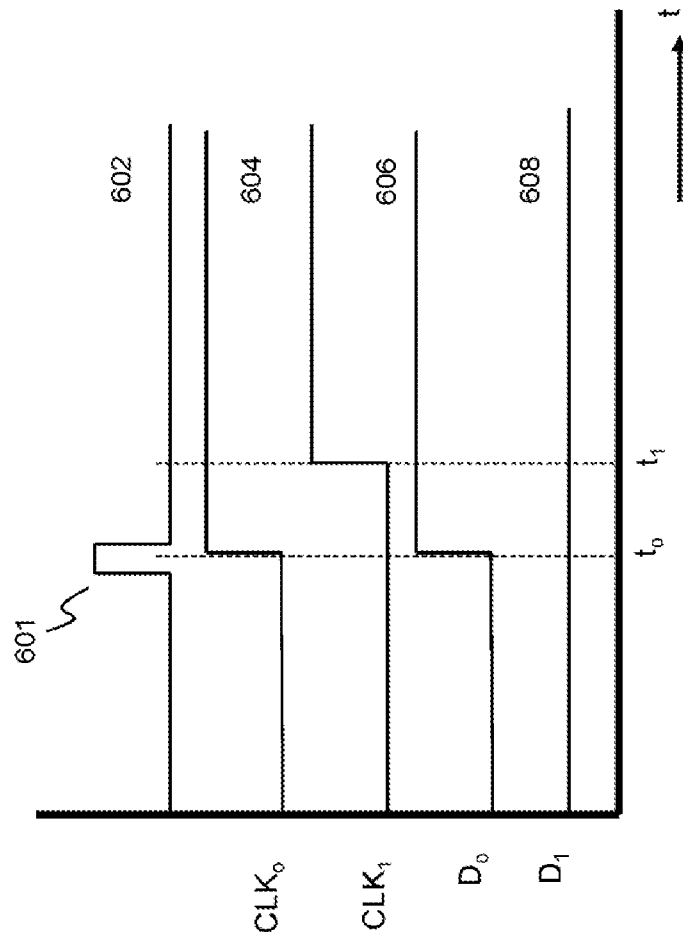


FIG. 6

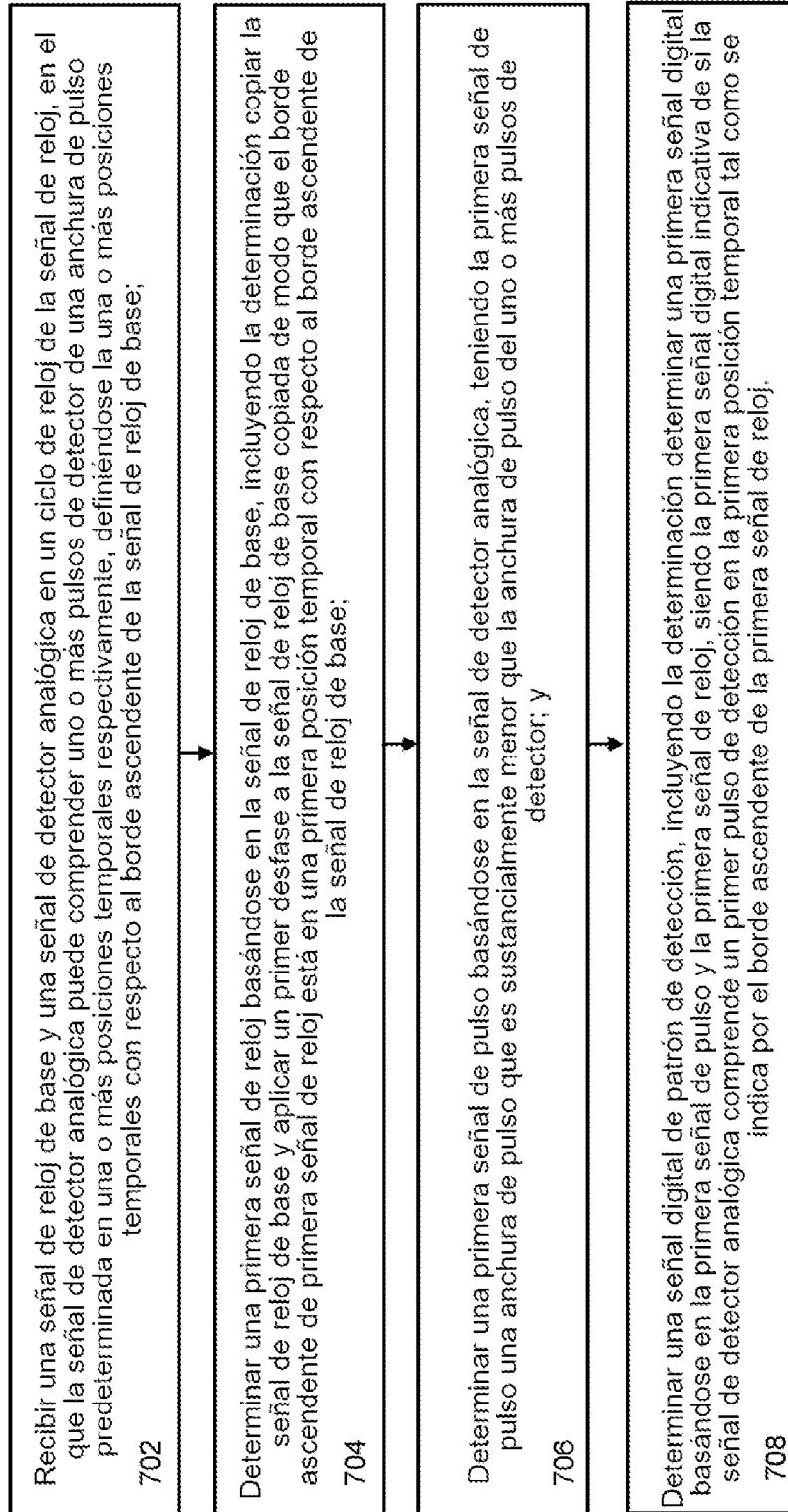


FIG. 7

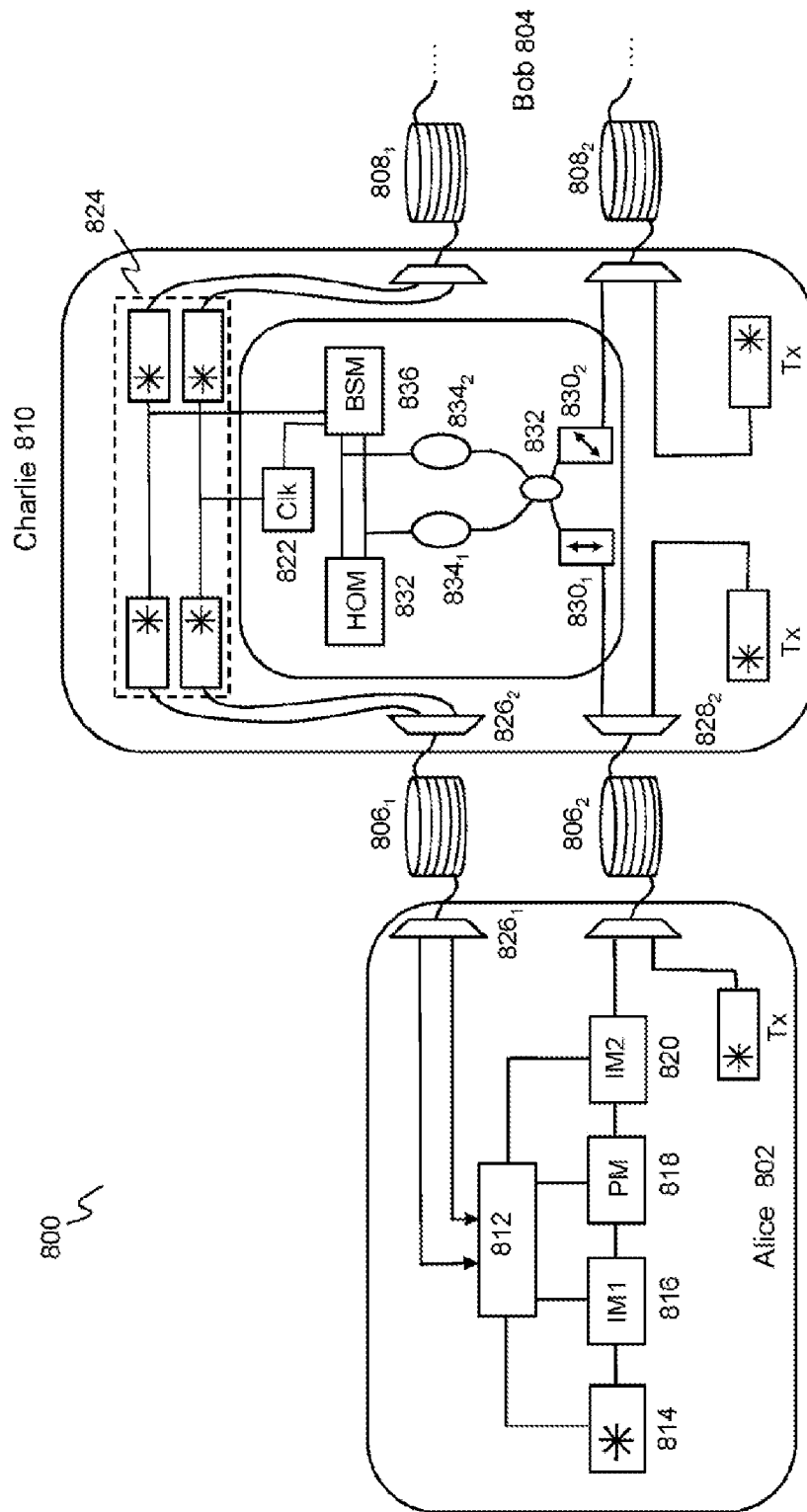


FIG. 8