

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la  
Propiedad Intelectual  
Oficina internacional



(10) Número de publicación internacional

WO 2021/255312 A1

(43) Fecha de publicación internacional  
23 de diciembre de 2021 (23.12.2021) WIPO | PCT

(51) Clasificación internacional de patentes:  
H04L 9/08 (2006.01) H04B 10/70 (2013.01)

RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(21) Número de la solicitud internacional:  
PCT/ES2021/070441

(84) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(22) Fecha de presentación internacional:  
16 de junio de 2021 (16.06.2021)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:  
P202030592 18 de junio de 2020 (18.06.2020) ES

Publicada:  
— con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))

(71) Solicitante: CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC) [ES/ES]; Serrano, 117, 28006 MADRID (ES).

(72) Inventores: DENISENKO, Natalia; INSTITUTO DE TECNOLOGIAS FISICAS Y DE LA INFORMACION LEONARDO TORRES QUEVEDO (ITEFI), c/ Serrano, 144, 28006 MADRID (ES). FERNÁNDEZ MÁRMOL, Verónica; INSTITUTO DE TECNOLOGIAS FISICAS Y DE LA INFORMACION LEONARDO TORRES QUEVEDO (ITEFI), c/ Serrano, 144, 28006 MADRID (ES).

(74) Mandatario: PONS ARIÑO, Angel; Glorieta Rubén Darío, 4, 28010 Madrid (ES).

(81) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO,

(54) Title: DEVICE AND PROCEDURE FOR AUTOMATIC POLARISATION MONITORING

(54) Título: DISPOSITIVO Y PROCEDIMIENTO DE SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO DE POLARIZACIÓN

(57) Abstract: A device and procedure which, by means of an active control, enables the determination of the inclination of the polarisation received from an emitter (1) by a receiver (2), between which a quantum key distribution is taking place, enabling the reorientation of said polarisation to a predetermined state of optimal alignment between the axes of the emitter (1) and the receiver (2). The device comprises a dichroic mirror (31) configured to separate a reference signal from a sent signal, a detector block (32) configured to analyse the polarization of the reference signal with a beam-splitter (321), a balanced detector (322) and an electro-mechanical module (5) that rotates the polarization of the incident beam, both for the reference signal and for the sent signal.

(57) Resumen: Dispositivo y procedimiento que mediante un control activo permite determinar la inclinación de la polarización recibida desde un emisor (1) en un receptor (2) entre los cuales se realiza una distribución cuántica de clave, permitiendo la reorientación de dicha polarización a un estado predeterminado de óptima alineación entre los ejes de emisor (1) y receptor (2). El dispositivo comprende un espejo dicróico (31) configurado para separar una señal de referencia de una señal de envío, un bloque detector (32), configurado para analizar la polarización de la señal de referencia con un divisor de haz (321) y un detector balanceado (322), y un módulo electro-mecánico (5), que rota la polarización del haz incidente, tanto de la señal de referencia como de la señal de envío.



WO 2021/255312 A1

**DISPOSITIVO Y PROCEDIMIENTO DE SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO DE  
POLARIZACIÓN**

**DESCRIPCIÓN**

5

**OBJETO DE LA INVENCION**

El objeto de la invención pertenece al campo de las comunicaciones cuánticas y describe un dispositivo y procedimiento que, mediante un control activo, permiten determinar la inclinación de la polarización recibida desde un emisor en un receptor entre los cuales se realiza una distribución cuántica de clave, permitiendo la reorientación de dicha polarización a un estado predeterminado de óptima alineación entre los ejes de emisor y receptor.

10

**ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

15

En la actualidad, en un mundo en el que el flujo de datos por Internet es constante, la seguridad de la información que circula por él ha cobrado una especial relevancia. En este contexto, es especialmente preocupante la aparición del ordenador cuántico, que amenaza los protocolos de cifrado tradicionales, que protegen, por ejemplo, las operaciones online del día a día. Ya sean transacciones bancarias, comercio electrónico, o la confidencialidad de las comunicaciones, los futuros avances tecnológicos en computación ponen en jaque la manera actual de proteger la información.

20

Una solución ante este escenario es la llamada distribución cuántica de claves (QKD, Quantum Key Distribution), un protocolo de comunicación que, utilizando principios cuánticos, ofrece una forma verificablemente segura de transmitir una clave de cifrado a través de un canal inseguro, entre dos usuarios. Concretamente, la seguridad de la QKD se basa en dos propiedades de la física cuántica: el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, que postula que si el bit cuántico o qubit no es leído con la base de medidas correcta su información se altera, y el Teorema de la No Clonación, por el que no se puede copiar un estado cuántico desconocido.

30

En lo protocolos más utilizados, el qubit se codifica a través de estados de fase o polarización de fotones individuales sujetos a un Principio de Incertidumbre, que luego son transmitidos por fibra óptica o espacio libre. Aunque la transmisión por fibra óptica haya

35

experimentado un mayor crecimiento, debido a la absorción del medio, posee un rango máximo de unos 400 km.

5 Sin embargo, la transmisión a través de espacio libre ofrece la posibilidad de una comunicación cuántica global mediante redes de satélites o estaciones auxiliares en vuelo como pueden ser vehículos no tripulados, plataformas de gran altitud, etc. La transmisión a través de espacio libre también resulta de utilidad donde la instalación de fibra óptica es imposible por el entorno o en lugares donde su instalación no es viable, como escenarios militares, entre plataformas móviles o de utilización temporal; o cuando la infraestructura de  
10 fibra óptica se ha dañado, debido, por ejemplo, a catástrofes naturales.

Durante las dos últimas décadas se ha demostrado la fiabilidad de distintos protocolos a través de fibra óptica. Sin embargo, su implementación en espacio libre supone tantas ventajas como retos, siendo una de estas ventajas la posibilidad de intercambiar las claves  
15 entre dos puntos cualesquiera del planeta utilizando un nodo auxiliar, como un satélite, para conseguir redes de gran alcance, o un vehículo aerotransportado móvil, como puede ser un dron, en el caso de redes de comunicación inalámbrica de menor alcance. Sin embargo, como principal reto se tiene que, debido al movimiento relativo entre las plataformas móviles, desde el punto de vista del receptor se produce un desalineamiento de la polarización enviada respecto a los ejes de referencia de recepción.  
20

Por lo tanto, uno de los retos para lograr enlaces de QKD entre emisor y receptor entre los que al menos uno de ellos es móvil y en espacio libre es lograr corregir el desajuste relativo que se puede producir entre ambos, compensando la diferencia angular entre los ejes de  
25 coordenadas de ambos sistemas de referencia, con el objetivo de que se mantengan alineados durante toda la distribución de clave.

Según lo anterior, es necesario un dispositivo activo que pueda mantener la alineación entre ambos sistemas de referencia en cuanto a la polarización para que la orientación relativa  
30 entre ambas plataformas siempre coincida. Hasta el momento, se ha realizado un dispositivo de seguimiento de polarización por la agencia espacial japonesa (JAXA), basado en la emisión de dos estados de polarización alternantes. Elegir este tipo de implementación implica la necesidad del uso de un modulador de polarización, que necesita estar montado en el emisor, lo que aumenta el peso y la complejidad de la plataforma que  
35 suele ser móvil (satélite, dron, etc.).

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

5 El objeto de invención es un dispositivo y procedimiento de seguimiento de polarización que permite dar respuesta al problema del desalineamiento de la polarización enviada respecto a los ejes de referencia de un emisor y un receptor, entre los que se realiza una distribución cuántica de claves.

10 Para ello, el dispositivo objeto de invención se asocia a un emisor configurado para emitir una señal de envío cuántica, compuesta por fotones individuales y que contiene una información que se desea transmitir, y una señal de referencia, con una polarización paralela a uno de los estados del protocolo de distribución cuántica de claves. La señal de referencia es una señal brillante emitida por un láser en continua. Ambas señales se reciben en el dispositivo y, mediante un control activo, se determina la inclinación de la polarización  
15 recibida, y se reorienta a un estado predeterminado de óptima alineación entre los sistemas de referencia de emisor y receptor. Por lo tanto, permite corregir la orientación relativa del emisor sin información previa de éste, y llevarla al punto de óptima alineación con respecto al receptor.

20 La inclinación de la polarización recibida viene determinada por el ángulo relativo  $\Delta\psi$  entre emisor y receptor, concretamente entre sus sistemas de coordenadas, y es el que conduce a errores en la transmisión de clave cuántica. Para corregir estos errores habrá que detectar el ángulo  $\Delta\psi$  y de alguna forma girar (rotar) los estados de polarización de la señal de envío llegados desde el emisor para hacerlos coincidir con el sistema de  
25 coordenadas del receptor.

Concretamente, el dispositivo de seguimiento de polarización, primer objeto de invención, está asociado al receptor, recibiendo una señal de envío de información que envía el emisor, de longitud de onda  $\lambda_s$  hacia el receptor, y un haz o señal de  
30 referencia, polarizada en la misma dirección que uno de los estados cuánticos y con una longitud de onda  $\lambda_r$  distinta de  $\lambda_s$ . La señal de referencia será un haz linealmente polarizado, cuyo campo eléctrico se define en función del tiempo como:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_o \cdot e^{-j\omega t}$$

Donde  $\mathcal{E}_o$  es la amplitud del campo,  $\omega$  es la frecuencia angular de la onda, siendo  $\omega =$   
35  $2\pi c/\lambda_r$ , donde c es la velocidad de la luz en el vacío y  $\lambda_r$  es la longitud de onda.

El dispositivo de seguimiento de polarización comprende, en primer lugar, un módulo electro-óptico, asociado al receptor, que es el encargado de separar la señal de referencia de la señal de envío, que llega hasta el receptor, así como de analizar la polarización de la señal de referencia.

Preferentemente, el módulo electro-óptico comprende un espejo dicroico (DM, Dichroic Mirror) que separa la señal de referencia de la señal de envío y un bloque detector, donde se analiza la polarización de la señal de referencia.

A continuación del espejo, el módulo electro-óptico puede comprender un divisor de haz sensible a la polarización (PBS, Polarizing Beam Splitter), que divide el campo óptico de la señal de referencia en sus componentes perpendiculares.

Seguidamente, el módulo electro-óptico puede comprender un detector balanceado (DB) formado por dos fotodetectores, que reciben las componentes del campo y que generan una señal eléctrica proporcional a la diferencia de potencia óptica de las señales.

Por último, el módulo electro-óptico puede comprender un dispositivo de acondicionamiento de señales, configurado para realizar los ajustes necesarios sobre la señal eléctrica producida.

En segundo lugar, el dispositivo comprende un módulo de control, conectado al módulo electro-óptico y encargado de obtener y analizar la señal que proporciona el detector balanceado en el módulo electro-óptico.

En tercer lugar, el dispositivo comprende un módulo electro-mecánico, situado en el receptor, antes del espejo dicroico, conectado al módulo electro-óptico y que es el encargado de girar la polarización del haz incidente, es decir, de la señal de referencia y de la señal de envío, de manera que la comunicación entre emisor y receptor sea óptima.

Para ello, el módulo electro-mecánico comprende preferentemente una lámina retardadora de media onda (HWP, Half Wave Plate), posicionada entre el emisor y el espejo dicroico, que rota la polarización del haz incidente, tanto de la señal de referencia

como de la señal de envío. Conectado a la lámina retardadora, el módulo electro mecánico puede comprender un actuador, asociado al módulo de control y configurado para poder ajustar la posición angular de la lámina.

- 5 Un segundo objeto de invención es un procedimiento de seguimiento de polarización, que puede hacer uso del dispositivo anterior. Una primera etapa del procedimiento es el envío desde el emisor de la señal de referencia espacial y temporalmente coincidente con la señal de envío cuántica, de distinta (aunque muy cercana) longitud de onda con una polarización lineal que coincida con uno de los estados del protocolo QKD  
10 implementado.

Al ser el aire un medio no birrefringente, la polarización de la señal de referencia se ve modificada solamente por el movimiento relativo entre las plataformas de emisor y receptor, y dicha modificación es la misma para la señal de envío y la señal de referencia  
15 para el seguimiento de polarización. La señal de referencia es un haz linealmente polarizado, cuyo campo eléctrico se define en función del tiempo como:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cdot e^{-j\omega t}$$

- 20 Una segunda etapa consiste en la separación, preferentemente en el módulo electro-óptico, particularmente en el espejo dicróico, de la señal de envío y la señal de referencia, llegando la señal de envío al receptor.

En una tercera etapa se realiza la separación de las componentes del campo eléctrico del haz de referencia en su componente vertical y horizontal. Esta tercera etapa se  
25 realiza preferentemente en el divisor de haz, dando lugar a dos campos ópticos  $\mathcal{E}_x$  y  $\mathcal{E}_y$ . La relación entre ambas componentes viene dada por el ángulo de polarización que forma el campo eléctrico en su proyección sobre el eje horizontal x.

- 30 En la cuarta etapa se procede al análisis, en el módulo de control, de las intensidades de la luz que dependerán del ángulo de polarización de llegada y, en función de éste, se generará una señal para girar la lámina de media onda necesaria para realinear la polarización de llegada de la señal de referencia con respecto al receptor.

Finalmente, en una última etapa del procedimiento, se realiza la rotación del estado de referencia, así como del estado cuántico coincidente con él por medio del módulo electro-mecánico preferentemente.

### DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

5

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

10

Figura 1.- Muestra una vista del ángulo relativo entre los sistemas de referencia de emisor y receptor.

15

Figura 2.- Muestra una representación esquemática general del dispositivo de seguimiento asociado al receptor.

Figura 3.- Muestra una representación esquemática detallada del dispositivo de seguimiento.

20

Figura 4.- Muestra la relación entre ambos componentes del campo eléctrico  $\varepsilon_x$  y  $\varepsilon_y$ .

Figura 5.- Muestra la tensión  $V_{DB}$  en función del ángulo de polarización para dos intensidades de luz diferentes.

25

### REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

Se describe a continuación, con ayuda de las figuras 1 a 5, una realización preferente del dispositivo y procedimiento de seguimiento de polarización, objeto de la presente invención.

30

En la figura 1 se muestra un emisor (1) y un receptor (2) entre los que se lleva a cabo una distribución cuántica de claves (QKD). Asociado tanto a emisor (1) como a receptor (2) se muestra un sistema de referencia. Además, en la figura 1 se representa un ángulo

35

relativo  $\Delta\psi$  entre ambos sistemas de coordenadas, que es el que conduce a errores en la transmisión de clave cuántica, al ser al menos el emisor (1) o el receptor (2) móviles.

5 El dispositivo de seguimiento de polarización, primer objeto de invención y representado esquemáticamente en la figura 2, está asociado al receptor (2), que recibe una señal de envío del emisor (1), de longitud de onda  $\lambda_s$ , y un haz o señal de referencia, polarizada en la misma dirección que uno de los estados cuánticos y con una longitud de onda  $\lambda_r$ , distinta de  $\lambda_s$ . La señal de referencia será un haz linealmente polarizado, cuyo campo eléctrico se define en función del tiempo como:

10

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_o \cdot e^{-j\omega t} \quad (10)$$

Donde  $\mathcal{E}_o$  es la amplitud del campo,  $\omega$  es la frecuencia angular de la onda. La irradiancia (o la intensidad de la onda óptica) se mide en vatios por metro cuadrado [ $W/m^2$ ] y se calcula como:

15

$$I = \frac{1}{2 \cdot Z} \mathcal{E} \cdot \mathcal{E}^* \quad (20)$$

Donde  $\mathcal{E} \cdot \mathcal{E}^*$  es el producto de campo eléctrico por el conjugado del mismo y  $Z$  es la impedancia de la onda que se expresa en ohmios y en el caso de la propagación en el aire es aproximadamente igual a  $377 \Omega$ .

20

Introduciendo (10) en (20) se puede ver que la irradiancia es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico:

25

$$I = \frac{1}{2Z} \mathcal{E} \cdot \mathcal{E}^* = \frac{1}{2Z} \mathcal{E}_o^2 \quad (30)$$

El dispositivo, que se muestra más detalladamente en la figura 3 comprende, en primer lugar, un módulo electro-óptico (3) asociado al receptor (2), que comprende a su vez un espejo dicróico (31) (DM, Dichroic Mirror) al que llegan la señal de envío y la señal de referencia, y en el que se refleja esta última, separándose la señal de referencia de la señal de envío, que llega al receptor (2), como se muestra en la figura 3. El módulo electro-óptico comprende también un bloque detector (32), posicionado a continuación

30



del espejo dicróico (31), donde se genera una señal que es función del ángulo de polarización de la señal de referencia.

El bloque detector (32) comprende un divisor de haz (321) sensible a la polarización (PBS, Polarizing Beam Splitter), que divide el campo óptico de la señal de referencia en sus componentes perpendiculares, una componente horizontal y una componente vertical, dando lugar a dos campos ópticos, denominados  $\mathcal{E}_x$  y  $\mathcal{E}_y$ . La relación entre ambos componentes viene dada por el ángulo  $\psi$ , que indica el ángulo de polarización del campo eléctrico en su proyección sobre el eje horizontal x, tal y como se muestra en la figura 4. Por lo tanto, a la salida del divisor de haz (321) se tendrá:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_o \cdot \cos(\psi) \cdot e^{-j\omega t} \quad (40)$$

$$\mathcal{E}_y = \mathcal{E}_o \cdot \sin(\psi) \cdot e^{-j\omega t} \quad (50)$$

Y las intensidades de la luz en las dos salidas del divisor de luz dependerán del ángulo de polarización del haz incidente, de la siguiente forma:

$$I_x = \frac{\mathcal{E}_x \cdot \mathcal{E}_x^*}{2Z} = \frac{\mathcal{E}_o^2}{2Z} \cdot \cos^2(\psi) \quad (60)$$

$$I_y = \frac{\mathcal{E}_y \cdot \mathcal{E}_y^*}{2Z} = \frac{\mathcal{E}_o^2}{2Z} \cdot \sin^2(\psi) \quad (70)$$

Estas dos señales serán medidas en el propio bloque detector (32), concretamente en un detector balanceado (322) (DB), posicionado a continuación del divisor de haz (321), y que comprende dos fotodetectores de mismas características y un circuito electrónico que convierte en tensión las corrientes generadas por los fotodetectores, de manera que se genera una señal eléctrica proporcional a la diferencia de potencias del campo óptico incidente.

A continuación, en el detector balanceado (322), ambas señales de corriente se restan y el resultado de la resta se convierte en tensión mediante un amplificador de transimpedancia interno, dando como resultado una señal de tensión,  $V_{DB}$ , proporcional a la resta de potencias medidas por cada detector:

$$V_{DB} = G \cdot (P_x - P_y) \quad (80)$$

En esta fórmula  $P_x$  y  $P_y$  son las potencias de la luz medidas por cada detector del detector balanceado (322) y  $G$  es la ganancia que se expresa en voltios por vatio [ $V/W$ ].

5 Otras dos salidas del detector balanceado (322) permiten monitorizar el nivel de potencia óptica de entrada en cada fotodetector por separado. Las tensiones medidas en estas salidas responden a las ecuaciones:

$$V_{M+} = G \cdot P_x \quad (90)$$

$$V_{M-} = G \cdot P_y \quad (100)$$

10

Las potencias  $P_x$  y  $P_y$  se calculan integrando la intensidad de la luz sobre la superficie de cada fotodetector. En el caso de distribución uniforme de la intensidad, la potencia medida con un fotodetector es igual a la irradiancia multiplicada por el área activa  $S_{det}$  del fotodetector. Ahora, si calculamos  $P_x$  y  $P_y$  usando las fórmulas (60) y (70), obtenemos las siguientes expresiones para la suma (110) y la resta (120) de estas potencias:

15

$$P_x + P_y = I_x \cdot S_{det} + I_y \cdot S_{det} = S_{det} \cdot \frac{\mathcal{E}_o^2}{2Z} \quad (110)$$

$$\begin{aligned} P_x - P_y &= I_x \cdot S_{det} - I_y \cdot S_{det} = S_{det} \cdot \frac{\mathcal{E}_o^2}{2Z} \cdot (\cos^2\psi - \sin^2\psi) \\ &= S_{det} \cdot \frac{\mathcal{E}_o^2}{2Z} \cdot \cos(2\psi) \quad (120) \end{aligned}$$

20

Comparando (110) y (120) se puede deducir que:

$$P_x - P_y = (P_x + P_y) \cdot \cos(2\psi) \quad (130)$$

25 Si se multiplica por  $G$  ambos lados de esta ecuación, se obtiene la expresión que relaciona  $V_{DB}$  con el ángulo  $\psi$ :

$$V_{DB} = (V_{M-} + V_{M+}) \cdot \cos(2\psi) \quad (140)$$

30 La ecuación (140) indica que la tensión en la salida del detector balanceado (322) cambia en función del ángulo de polarización y la amplitud de este cambio es igual a la suma de tensiones  $V_{M-}$  y  $V_{M+}$ . Por lo tanto  $V_{DB}$  es directamente proporcional a la suma de potencias medidas por los dos fotodetectores del detector balanceado (322).

En la figura 5 se ha representado la tensión  $V_{DB}$  de la ecuación (140) en función del ángulo  $\psi$  para dos casos diferentes de intensidad de la luz recibida. Los máximos y mínimos de las curvas de tensión corresponden a las polarizaciones horizontal ( $\psi = 0^\circ$ ) y vertical ( $\psi = 90^\circ$ ) respectivamente.

5

A su vez cuando la función  $V_{DB}(\psi)$  cruza el eje de abscisas, esto corresponde a dos ángulos de polarización diagonal:  $+45^\circ$  o  $-45^\circ$ . En estos puntos la función es prácticamente lineal y cambia de signo al cruzar el eje horizontal. Podemos elegir uno de estos dos ángulos como ángulo de referencia para realizar el seguimiento de la polarización. Esto significa que la polarización de referencia enviada por el emisor (1) debe ser diagonal con, por ejemplo, el ángulo de polarización  $\psi = +45^\circ$ .

10

Si el emisor (1) envía esta polarización y los sistemas de coordenadas de emisor (1) y receptor (2) coinciden, entonces en la salida del detector balanceado (322) mediremos  $V_{DB} = 0V$ . Si el ángulo de polarización de llegada es mayor o menor de  $45^\circ$ , entonces  $V_{DB}$  va a ser menor o mayor de cero y habrá que corregir la posición angular de la lámina retardadora (51) de media onda para que  $V_{DB}$  vuelva a ser cero.

15

Como se puede observar en la figura 5, la pendiente de la función  $V_{DB}(\psi)$  en su cruce por cero es prácticamente una constante y el valor de esta pendiente depende de la amplitud de la función y baja al bajar esta.

20

Si queremos obtener una señal independiente de la intensidad de la luz que llega al receptor, lo que equivale a mantener la pendiente fija, hay que normalizar la tensión de salida del detector balanceado (322) en un módulo de acondicionamiento de señales (323), dividiendo la ecuación (140) por  $(V_{M-} + V_{M+})$ :

25

$$V_{DB}(norm.) = \frac{V_{DB}}{V_{M-} + V_{M+}} = \cos(2\psi) \quad (150)$$

30

Asociado al módulo electro-óptico (3), el dispositivo comprende un módulo de control (4), que, en función de la señal de tensión  $V_{DB}$  del dispositivo de acondicionamiento de señales (323) manda una señal a un actuador (52) para que gire la lámina retardadora (51) de media onda hasta que  $V_{DB}$  sea igual a 0.

El actuador (52) se localiza en un módulo electro-mecánico (5), asociado al módulo de control y posicionado antes del espejo dicróico (31), entre este y el emisor (1). El módulo electro-mecánico es, por tanto, el que permitirá corregir el ángulo relativo entre los sistemas de referencia de emisor (1) y receptor (2), y comprende a su vez una lámina retardadora (51) de media onda (HWP, Half Wave Plate) que rota la polarización del haz incidente, tanto de la señal de referencia como de la señal de envío, y un actuador (52), asociado al módulo de control y conectado a la lámina retardadora (51) para poder ajustar su posición.

El resultado de la división (150) nos da una señal que sólo depende del ángulo  $\psi$  y se podría utilizar para corregirlo girando de forma adecuada la lámina retardadora (51).

Por otra parte, un segundo objeto de invención es un procedimiento de seguimiento de polarización, que puede hacer uso del dispositivo anterior, y que comprende una primera etapa de envío desde el emisor (1) de una señal de referencia coincidente con la señal de envío cuántica, de distinta (aunque muy cercada) longitud de onda con una polarización lineal que coincida con uno de los estados del protocolo QKD implementado, estableciendo éste como el eje de referencia para un dispositivo inercial compartido por emisor (1) y receptor (2).

Al ser el aire un medio no birrefringente, la polarización de la señal de referencia se ve modificada solamente por el movimiento relativo entre las plataformas de emisor (1) y receptor (2), y es la misma para la señal de envío y la señal de referencia para el seguimiento de polarización. La señal de referencia es un haz linealmente polarizado, cuyo campo eléctrico se define en función del tiempo como:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cdot e^{-j\omega t}$$

Una segunda etapa consiste en la separación, en el espejo dicróico (31), de la señal de envío y la señal de referencia.

En una tercera etapa se lleva a cabo la separación de las componentes del campo eléctrico de la señal de referencia en su componente vertical y horizontal en el divisor de haz (321), dando lugar a dos campos ópticos  $\mathcal{E}_x$  y  $\mathcal{E}_y$ . La relación entre ambas

componentes viene dada por el ángulo de polarización del campo eléctrico en su proyección sobre el eje horizontal x.

5 Durante una cuarta etapa se obtiene la señal  $V_{DB}$ , en el detector balanceado (322), que dependerá del ángulo con el que la polarización de referencia llega al sistema receptor (2). En el módulo de control (4) se analizará dicha tensión  $V_{DB}$  y se enviará una señal al actuador (52) para que gire la lámina retardadora (51) lambda medios hasta anular  $V_{DB}$  y de esa manera realinear la polarización de la señal de referencia correctamente respecto al sistema de referencia del receptor (2).

10

15

## **REIVINDICACIONES**

- 1.- Dispositivo de seguimiento automático de polarización para un sistema de distribución cuántica de claves entre un emisor (1) y un receptor (2) cada uno con un sistema de referencia asociado y siendo al menos uno de ellos móvil, en el que el emisor (1) está configurado para emitir una señal de envío de información de longitud de onda  $\lambda_s$  y una señal de referencia coincidente con la señal de envío, con un campo eléctrico  $\varepsilon$  y una longitud de onda  $\lambda_r$ , distinta de  $\lambda_s$ , y en el que el dispositivo está asociado al receptor y comprende:
- 10           - un espejo dicroico (31) configurado para separar la señal de referencia de la señal de envío que llega al receptor (2) desde el emisor (1),
  - un bloque detector (32), que recibe la señal de referencia del espejo dicroico (31), y configurado para separar su campo eléctrico  $\varepsilon$  en una componente horizontal  $\varepsilon_x$  y una componente vertical  $\varepsilon_y$ ,
  - 15           - un módulo de control (4), asociado al bloque detector (32) y configurado para calcular un ángulo de rotación necesario para realinear los sistemas de referencia de emisor (1) y receptor (2) a partir de las componentes del campo  $\varepsilon$ ,
  - un módulo electro-mecánico (5), posicionado ante el espejo dicroico (31), entre éste y el emisor (1) y conectado al módulo de control (4), configurado para rotar
  - 20           la polarización de la señal de referencia y la señal de envío del emisor (1) de manera que queden alineadas con el sistema de referencia del receptor (2).
- 2.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el bloque detector (32) comprende un divisor de haz (321) sensible a la polarización para separar el campo eléctrico  $\varepsilon$  de la señal de referencia y dividirlo en una componente horizontal  $\varepsilon_x$  y una componente vertical  $\varepsilon_y$  que se corresponden con el sistema de referencia del receptor (2).
- 25
- 3.- El dispositivo de la reivindicación 2, en el que el bloque detector (32) comprende adicionalmente un detector balanceado (322), configurado para recibir las componentes ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ ) del campo eléctrico de la señal de referencia y obtener una tensión dependiente del ángulo de polarización de la señal de referencia.
- 30
- 4.- El dispositivo de la reivindicación 3, que comprende adicionalmente un dispositivo de acondicionamiento de señales (323) asociado al detector balanceado (322).
- 35

5.- El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el módulo electro-mecánico (5) comprende una lámina retardadora (51) de posición ajustable posicionada entre el emisor (1) y el espejo dicróico (31).

5

6.- El dispositivo de la reivindicación 5, en el que el módulo electro-mecánico (5) comprende adicionalmente un actuador (52), conectado a la lámina retardadora (51) para ajustar su posición angular.

10

7.- Procedimiento de seguimiento automático de polarización que comprende las etapas de:

15

- envío desde un emisor (1) hacia un receptor (2) de una señal de envío de información y una señal de referencia, de campo eléctrico  $\varepsilon$ , coincidente con la señal de envío de información, de distinta longitud de onda, y en el que tanto emisor (1) como receptor (2) tienen un sistema de referencia propio asociado,

- separación, de la señal de envío y la señal de referencia, llegando la señal de envío al receptor (2),

20

- separación de las componentes del campo eléctrico  $\varepsilon$  del haz de referencia en una componente horizontal y una componente vertical  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ ,

- determinación del ángulo de rotación necesario para realinear los sistemas de referencia de emisor (1) y receptor (2), y

- rotación de la señal de envío y la señal de referencia haciéndolas coincidir con el sistema de referencia del receptor (2).

25

30

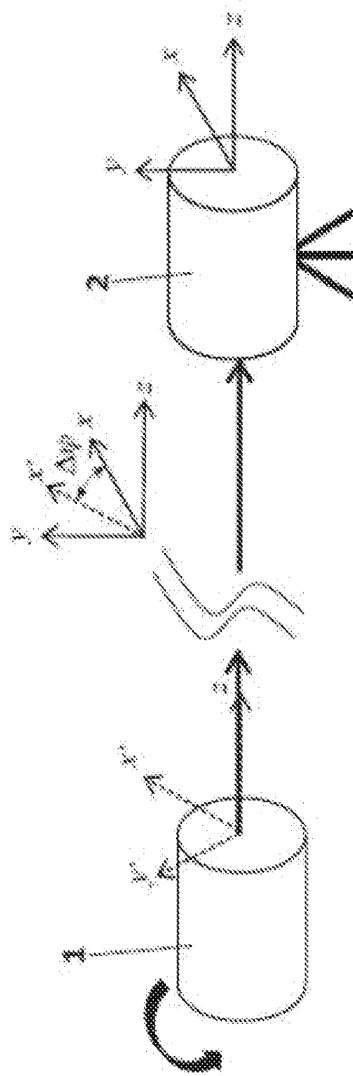


FIG. 1



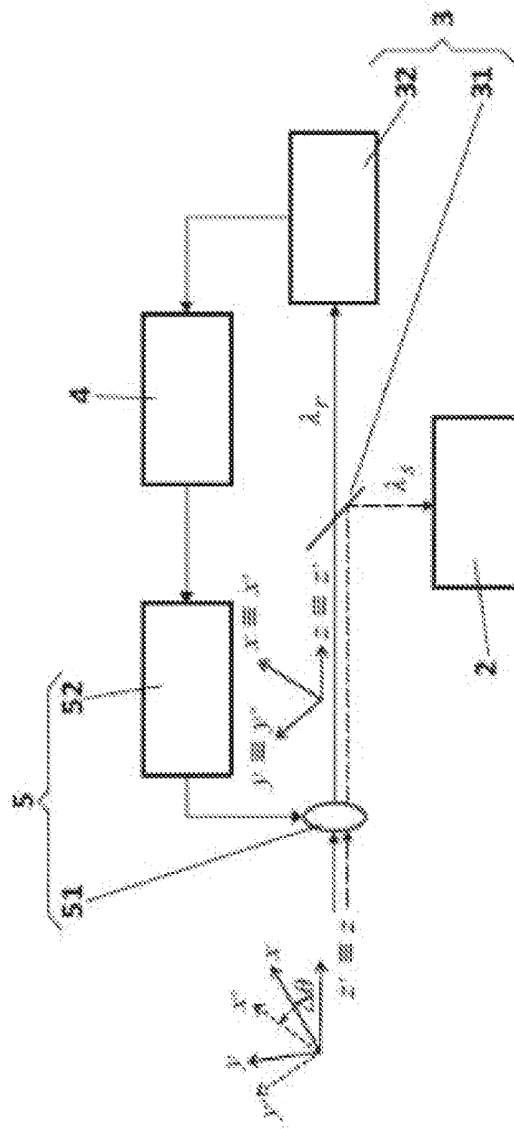


FIG. 2

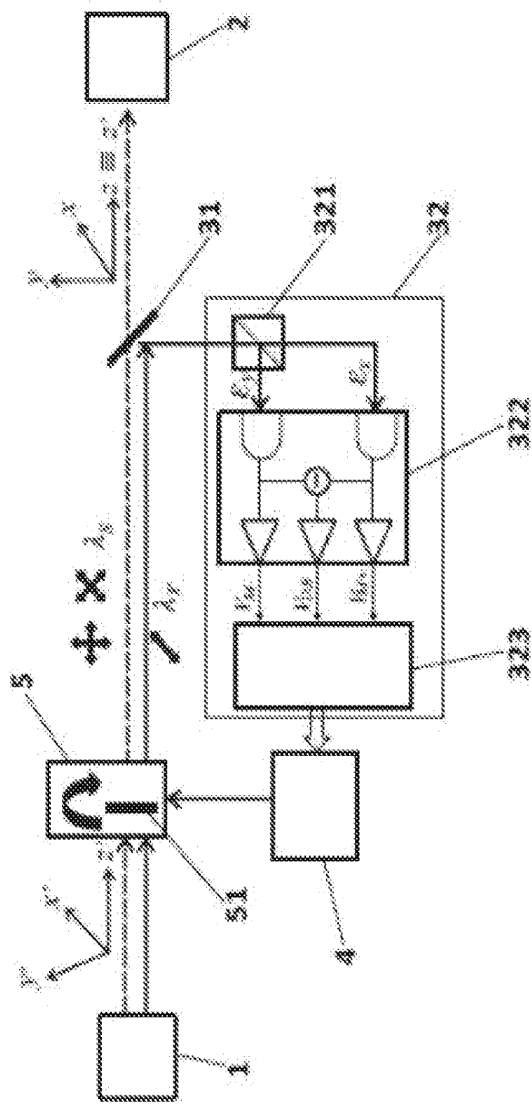


FIG. 3

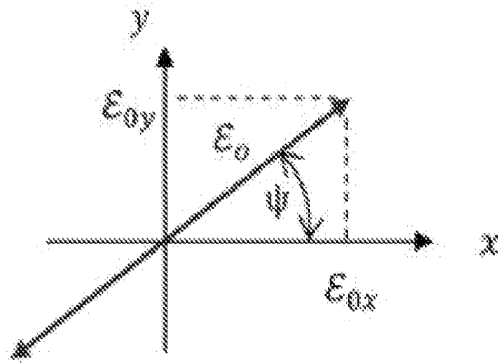


Fig. 4

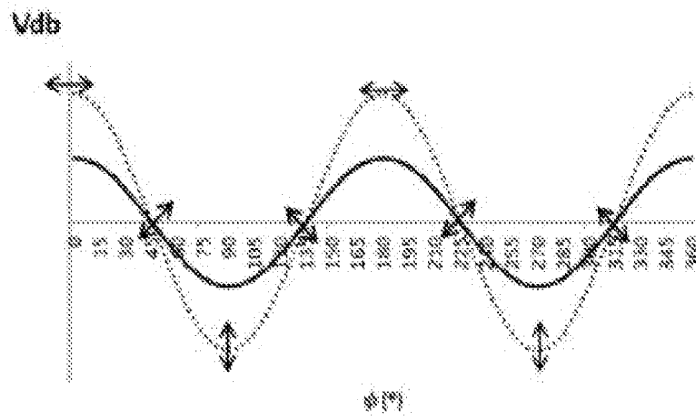


Fig. 5

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2021/070441

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

**H04L9/08** (2006.01)

**H04B10/70** (2013.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H04L, H04B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, INVENES, WPI, NPL, XPIEE, XPI3E

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	MORIO TOYOSHIMA, HIDEKI TAKENAKA, YOZO SHOJI, YOSHIHISA TAKAYAMA, Polarization-Basis Tracking Scheme in Satellite Quantum Key Distribution. International Journal of Optics,, Vol. 2011, N° ID: 254154, Pages: 1-8 Retrieved from Internet <URL: <a href="https://doi.org/10.1155/2011/254154">https://doi.org/10.1155/2011/254154</a> >, <DOI: 10.1155/2011/254154>. . 02/06/2011 The whole document.	1-7
A	US 2007025551 A1 (HARRISON KEITH A ET AL.) 01/02/2007, The whole document	1-7
A	US 2006290941 A1 (KESLER MORRIS P ET AL.) 28/12/2006, The whole document	1-7

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents , such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&amp;" document member of the same patent family</p>
--	---

Date of the actual completion of the international search  
27/09/2021

Date of mailing of the international search report  
(30/09/2021)

Name and mailing address of the ISA/

Authorized officer  
M. Muñoz Sanchez

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS  
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)  
Facsimile No.: 91 349 53 04

Telephone No. 91 3495349

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2021/070441

C (continuation).		DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT
Category *	Citation of documents, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	MAILLOUX LOGAN O et al.. A Modeling Framework for Studying Quantum Key Distribution System Implementation Nonidealities. Ieee Access Ieee, Usa., 30/11/0002, Vol. 3, pages 110 - 130, <DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2399101> The whole document.	1-7
A	CN 110519043 A (QUANTUMCTEK CO LTD) 29/11/2019, the whole document.	1-7
A	ZHANG GUANGYU et al.. Dynamic polarization-basis compensation for free-space quantum communications. China Communications, 20130201 China Institute of Communications, Piscataway, Nj, Usa., 01/02/2013, Vol. 10, N° 2, pages 27 - 32, ISSN 1673-5447, <DOI: 10.1109/CC.2013.6472856> The whole document.	1-7
A	PRAMANIK TANUMOY et al.. Robustness of reference-frame-independent quantum key distribution against the relative motion of the reference frames. Physics Letters A, 20170606 North-holland Publishing Co., Amsterdam, Nl., 06/06/2017, Vol. 381, N° 31, pages 2497 - 2501, ISSN 0375-9601, <DOI: 10.1016/j.physleta.2017.06.002> The whole document.	1-7

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

Information on patent family members

PCT/ES2021/070441

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US2007025551 A1	01.02.2007	US2007101410 A1	03.05.2007
		US2008031456 A1	07.02.2008
		US8842839 B2	23.09.2014
		US2007074277 A1	29.03.2007
		US8250363 B2	21.08.2012
		US2007074276 A1	29.03.2007
		US2007172054 A1	26.07.2007
		US8050411 B2	01.11.2011
		US2007177424 A1	02.08.2007
		US2007016534 A1	18.01.2007
		US7721955 B2	25.05.2010
		US2007016794 A1	18.01.2007
		US9191198 B2	17.11.2015
		US2007014415 A1	18.01.2007
		US7864958 B2	04.01.2011
		US8054976 B2	08.11.2011
		GB2427337 A	20.12.2006
		GB2427337 B	20.01.2010
GB2427336 A	20.12.2006		
GB2427336 B	20.01.2010		
GB2427317 A	20.12.2006		
GB2427317 A8	30.12.2009		
GB2427333 A	20.12.2006		
US2006290941 A1	28.12.2006	NONE	
CN110519043 A	29.11.2019	NONE	

# INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2021/070441

**A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD**

**H04L9/08** (2006.01)

**H04B10/70** (2013.01)

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

**B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA**

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

**H04L, H04B**

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda internacional (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

**EPODOC, INVENES, WPI, NPL, XPIEE, XPI3E**

**C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES**

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	MORIO TOYOSHIMA, HIDEKI TAKENAKA, YOZO SHOJI, YOSHIHISA TAKAYAMA, Polarization-Basis Tracking Scheme in Satellite Quantum Key Distribution. International Journal of Optics, Vol. 2011, Nº ID: 254154, Páginas 1-8. Recuperado de Internet <URL: <a href="https://doi.org/10.1155/2011/254154">https://doi.org/10.1155/2011/254154</a> >, <DOI: 10.1155/2011/254154>.. 02/06/2011 Todo el documento	1-7
A	US 2007025551 A1 (HARRISON KEITH A ET AL.) 01/02/2007, Todo el documento	1-7
A	US 2006290941 A1 (KESLER MORRIS P ET AL.) 28/12/2006, Todo el documento	1-7

En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos  Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

<p>* Categorías especiales de documentos citados:</p> <p>"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.</p> <p>"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.</p> <p>"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).</p> <p>"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.</p> <p>"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.</p>	<p>"T" documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.</p> <p>"X" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.</p> <p>"Y" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.</p> <p>"&amp;" documento que forma parte de la misma familia de patentes.</p>
--	--

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.  
**27/09/2021**

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.  
**30 de septiembre de 2021 (30/09/2021)**

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional  
OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS  
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)  
Nº de fax: 91 349 53 04

Funcionario autorizado  
M. Muñoz Sanchez  
Nº de teléfono 91 3495349

# INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2021/070441

C (Continuación).		DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES
Categoría *	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	MAILLOUX LOGAN O et al.. A Modeling Framework for Studying Quantum Key Distribution System Implementation Nonidealities. Ieee Access Ieee, Usa., 30/11/0002, Vol. 3, páginas 110 - 130, <DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2399101> Todo el documento.	1-7
A	CN 110519043 A (QUANTUMCTEK CO LTD) 29/11/2019, Todo el documento	1-7
A	ZHANG GUANGYU et al.. Dynamic polarization-basis compensation for free-space quantum communications. China Communications, 20130201 China Institute of Communications, Piscataway, Nj, Usa., 01/02/2013, Vol. 10, Nº 2, páginas 27 - 32, ISSN 1673-5447, <DOI: 10.1109/CC.2013.6472856> Todo el documento	1-7
A	PRAMANIK TANUMOY et al.. Robustness of reference-frame-independent quantum key distribution against the relative motion of the reference frames. Physics Letters A, 20170606 North-holland Publishing Co., Amsterdam, Nl., 06/06/2017, Vol. 381, Nº 31, páginas 2497 - 2501, ISSN 0375-9601, <DOI: 10.1016/j.physleta.2017.06.002> Todo el documento	1-7



# INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

PCT/ES2021/070441

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
US2007025551 A1	01.02.2007	US2007101410 A1 US2008031456 A1 US8842839 B2 US2007074277 A1 US8250363 B2 US2007074276 A1 US2007172054 A1 US8050411 B2 US2007177424 A1 US2007016534 A1 US7721955 B2 US2007016794 A1 US9191198 B2 US2007014415 A1 US7864958 B2 US8054976 B2 GB2427337 A GB2427337 B GB2427336 A GB2427336 B GB2427317 A GB2427317 A8 GB2427333 A	03.05.2007 07.02.2008 23.09.2014 29.03.2007 21.08.2012 29.03.2007 26.07.2007 01.11.2011 02.08.2007 18.01.2007 25.05.2010 18.01.2007 17.11.2015 18.01.2007 04.01.2011 08.11.2011 20.12.2006 20.01.2010 20.12.2006 20.01.2010 20.12.2006 30.12.2009 20.12.2006
----- US2006290941 A1	----- 28.12.2006	----- NINGUNO	-----
----- CN110519043 A	----- 29.11.2019	----- NINGUNO	-----