

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 014 509**

51 Int. Cl.:

H04B 10/2507 (2013.01)

H04J 14/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.11.2020** **PCT/IB2020/060372**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.05.2021** **WO21090205**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.11.2020** **E 20811732 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.01.2025** **EP 4055727**

54 Título: **Sistema óptico que comprende un dispositivo reconfigurable y método de control del sistema óptico**

30 Prioridad:

07.11.2019 IT 201900020554

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
23.04.2025

73 Titular/es:

PHOTONPATH S.R.L. (100.00%)
Via Giovanni Durando, 39
20158 Milano, IT

72 Inventor/es:

MORICHETTI, FRANCESCO;
MELLONI, ANDREA IVANO y
OLIVEIRA MORAIS DE AGUIAR, DOUGLAS

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 3 014 509 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

Sistema óptico que comprende un dispositivo reconfigurable y método de control del sistema óptico

5 **Campo técnico**

Esta invención se refiere a un método de control de dispositivos ópticos reconfigurables que puede utilizarse, por ejemplo, aunque no de forma limitativa, en el sector de las telecomunicaciones en redes ópticas reconfigurables.

10 **Estado de la técnica**

En el documento US-A-6892021 se describe un ejemplo de un dispositivo óptico reconfigurable. Este documento describe un filtro ecualizador de ganancia óptica con un enrutador de rejilla con guía de ondas equipado con atenuadores ópticos ajustables de Mach-Zehnder, cada uno asociado a una longitud de onda relativa de los canales ópticos utilizados.

15 Además, el documento Schiffer, P. M. J., y col. "Smart dynamic wavelength equalizer with on-chip spectrum analyzer, IEEE Photonics Technology Letters 12.8 (2000): 1019-1021, describe un ecualizador de longitud de onda dinámico que utiliza dos WGR y que utiliza un control de retroalimentación a través de un analizador de espectros.

20 Además, el documento Schlupf, T. R., y col. "Design and analysis of a control system for an optical delay-line circuit used as reconfigurable gain equalizer". Journal of lightwave technology 21.9 (2003): 1944, describe un sistema de control de bucle abierto para un ecualizador de ganancia reconfigurable formado por un circuito de línea de retardo óptico en forma de retícula de dos puertos.

25 **Resumen de la invención**

El solicitante ha observado que las técnicas de control de bucle cerrado de la técnica conocida son demasiado complejas, tanto en términos computacionales como en relación con la estructura del circuito de control.

30 La presente invención aborda el problema de proporcionar un sistema óptico que muestre técnicas de control de un dispositivo reconfigurable del propio sistema que no sean especialmente onerosas desde el punto de vista computacional y complejas desde un punto de vista estructural.

35 Según un primer aspecto, un objeto de la presente invención es un sistema óptico tal como se describe en la reivindicación 1 y sus realizaciones preferidas como se definen en las reivindicaciones 2 a 15.

Otro objeto de la presente invención es también el método de control de un sistema óptico como se define en la reivindicación 16.

40 **Breve descripción de los dibujos**

Esta invención se describe en detalle a continuación, a modo de ejemplo y sin limitación, con referencia a los dibujos adjuntos:

45 – la Figura 1 muestra una primera realización de un sistema óptico que incluye un dispositivo óptico reconfigurable y un dispositivo de control;

– la Figura 2 se refiere a una simulación numérica del sistema óptico de la Figura 1 y muestra el espectro de una señal de monitorización y una versión muestreada de la misma;

50 – la Figura 3 se refiere a una simulación numérica del sistema óptico de la Figura 1 y muestra la tendencia de las funciones de transferencia obtenidas con el método de la técnica anterior y con la metodología de la solución descrita;

– la Figura 4 muestra una segunda realización del sistema óptico de la Figura 1;

– la Figura 5 se refiere a una simulación numérica del sistema óptico de la Figura 4;

– la Figura 6 se refiere a una tercera realización del sistema óptico de la Figura 1;

60 – la Figura 7 muestra un ejemplo de un dispositivo reconfigurable que puede utilizarse en ese sistema óptico.

Descripción detallada

65 En esta descripción, se mostrarán en las figuras elementos o componentes similares o idénticos con el mismo símbolo de identificación.

La Figura 1 muestra esquemáticamente una primera realización de un sistema óptico 100 que incluye: un dispositivo óptico reconfigurable 103, un dispositivo 110 de control (CONT-DEV), una fuente óptica 106 (OP-SR) y un dispositivo 200 de conversión óptico-eléctrico.

En particular, el sistema óptico 100 es tal que funciona con radiación electromagnética a longitudes de onda de entre 300 nm y 5000 nm, preferiblemente entre 1480 nm y 1620 nm.

Por ejemplo, el sistema óptico 100 es un sistema que funciona en el campo de las telecomunicaciones ópticas y, en particular, en redes ópticas reconfigurables.

El dispositivo óptico reconfigurable 103 (abreviado dispositivo reconfigurable) es tal que funciona según la técnica WDM (multiplexación por división de longitud de onda) en una pluralidad de M canales ópticos (al menos dos canales ópticos), es decir, con M señales ópticas con portadoras en diferentes longitudes de onda.

En particular, el dispositivo reconfigurable 103 incluye al menos un elemento óptico ajustable G_i (tal como, por ejemplo, una línea de retardo óptico, un acoplador óptico ajustable o un atenuador ajustable) configurado para funcionar en WDM. Como ejemplo, puede utilizarse un único elemento óptico ajustable G_i con M canales o múltiples elementos ópticos ajustables G_i que funcionan en M canales.

El dispositivo reconfigurable 103 también está equipado con una pluralidad de N actuadores A_1-A_N , asociados a los elementos ópticos ajustables G_i y para modificar las características ópticas (por ejemplo, el índice de refracción y/o la atenuación del medio del que está hecho el dispositivo ajustable 103) según las señales de control S_1-S_N correspondientes suministradas por el dispositivo 110 de control. El dispositivo reconfigurable 103 puede asumir un número discreto de estados dependiendo del valor de sus N variables de estado $\theta_1, \dots, \theta_N$ controlados por las N señales de control S_1-S_N .

Obsérvese que el número N de actuadores A_1-A_N define el número de grados de libertad del dispositivo reconfigurable 103, es decir, el número de variables independientes necesarias para determinar completamente el estado del propio dispositivo reconfigurable 103.

De forma ventajosa, el número de grados de libertad N del dispositivo reconfigurable 103 es inferior al número de canales M en los que funciona el propio dispositivo reconfigurable.

Los actuadores A_1-A_N pueden inducir un cambio en los parámetros ópticos (por ejemplo, fase o amplitud) de los elementos ópticos ajustables relevantes G_i . Por ejemplo, los siguientes dispositivos pueden utilizarse como actuadores A_1-A_N : actuadores termoópticos, electroópticos, piezoeléctricos, electroabsorbentes, electromecánicos, electroquímicos o totalmente ópticos (basados o no en efectos ópticos no lineales).

Con respecto al sector de ejemplo de redes ópticas reconfigurables, el dispositivo reconfigurable 103 puede ser, por ejemplo: un filtro óptico, un filtro ecualizador, un filtro compensador de dispersión, un filtro FIR, un filtro IIR, un filtro reticular, un filtro de árbol binario.

Por ejemplo, el dispositivo reconfigurable 103 puede fabricarse utilizando tecnología de guía de ondas integrada en una plataforma óptica (o chip óptico). Algunos ejemplos de plataformas ópticas que pueden utilizarse incluyen: plataformas semiconductoras (por ejemplo, silicio, fosforo de indio, arseniuro de galio), vidrios amorfos (dióxido de silicio, nitruro de silicio, oxifururo de silicio, oxicarbonato de silicio, carburo de silicio), polímeros y cristales (niobato de litio), posiblemente integrados con materiales bidimensionales (grafeno, siliceno) y posibles integraciones híbridas de los mismos.

Según el ejemplo de la Figura 1, el dispositivo óptico reconfigurable 103 es un dispositivo con al menos cuatro puertos ópticos. Más detalladamente, el dispositivo óptico reconfigurable 103 incluye un puerto óptico 101 de entrada y un puerto óptico 102 de salida. El puerto óptico 101 de entrada óptica está configurado para recibir la pluralidad de M señales ópticas de entrada, multiplicadas en una señal de entrada I, y el puerto óptico 102 de salida óptica está configurado para transmitir una señal óptica de salida O, en particular, M señales de salida óptica multiplicadas, como resultado de la acción del dispositivo óptico reconfigurable 103.

Además, el dispositivo óptico reconfigurable 103 está equipado con un puerto óptico 111 de estimulación, conectado a la fuente óptica 106, y un puerto óptico 112 de monitorización, conectado al dispositivo 200 de conversión óptico-eléctrico.

La pluralidad de las M señales ópticas de entrada en la señal de entrada I ocupa una banda global $\Delta\lambda$, que identifica el intervalo de longitud de onda de trabajo para el dispositivo reconfigurable 103.

En particular, con referencia a las aplicaciones en modo lineal, en cada uno de los estados identificados por las variables de estado $\theta_1, \dots, \theta_N$, el dispositivo reconfigurable 103 se comporta, en cada uno de los estados que puede asumir, como un sistema lineal invariante en el tiempo.

La transmisión de la señal de entrada I desde el puerto óptico 101 de entrada al puerto óptico 102 de salida puede describirse a través de la respuesta de frecuencia $H_{12,i}(f)$ del dispositivo reconfigurable 103 o, de forma equivalente, mediante la respuesta de longitud de onda $H_{12,i}(\lambda)$, donde el subíndice “i” indica el estado genérico asumido por el propio dispositivo.

5 La fuente óptica 106 está configurada para generar una señal óptica de estimulación S_i que se suministra al puerto 111 de estimulación. La fuente óptica 106 está configurada para emitir radiación óptica en un intervalo de longitud de onda mayor o igual al intervalo de longitud de onda operativa $\Delta\lambda$ del dispositivo reconfigurable 103. El puerto óptico 112 de monitorización está configurado para proporcionar una señal óptica de monitorización S_{salida} como salida correspondiente a la señal óptica de estimulación $S_{entrada}$.

10 En el caso de dispositivos ópticos integrados, la fuente óptica 106 puede integrarse en la misma plataforma óptica (es decir, un chip óptico) que el dispositivo reconfigurable 103 o puede ser externa a esa plataforma y conectarse al dispositivo reconfigurable 103 a través de una fibra óptica.

15 Preferiblemente, la fuente óptica 106 incluye un diodo superluminiscente (SLD), pero pueden utilizarse otras fuentes de banda ancha, como, por ejemplo, el ruido de “emisión espontánea amplificada” (ruido ASE) de un amplificador de fibra (por ejemplo, un amplificador de fibra dopada con erbio, EDFA) o un amplificador semiconductor de semiconductores ópticos (SOA), de una fuente de tipo “láser supercontinuo”, de una matriz de láser (por ejemplo, retroalimentación láser distribuida, DFB), una matriz espectral en forma de peine (comb) generada por un generador de peine de fibra o integrada en un chip óptico.

20 El dispositivo 200 de conversión óptico a eléctrico está configurado para recibir la señal óptica de monitorización S_{salida} y proporcionar (por ejemplo, en terminales eléctricos 108) un conjunto de señales de intensidad eléctrica $S_{EL1}-S_{ELN}$, cada una representativa de una intensidad de la señal de monitorización S_{salida} evaluada a una longitud de onda relativa. Obsérvese que el conjunto de señales eléctricas de intensidad $S_{EL1}-S_{ELK}$ tiene una cardinalidad igual a K . Preferiblemente, esta cardinalidad K es igual a N , es decir, el grupo de señales eléctricas de intensidad $S_{EL1}-S_{ELK}$ tiene una cardinalidad igual al número de grados de libertad del dispositivo reconfigurable 103.

30 Según el ejemplo particular mostrado de nuevo en la Figura 1, el dispositivo 200 de conversión óptico-eléctrico incluye un selector de intervalo espectral 105 (SP-SL), a continuación en la memoria también un divisor espectral, y un convertidor óptico-eléctrico 104 (DET-ARR). El divisor espectral 105 está equipado con un puerto de entrada óptica correspondiente conectado al puerto óptico 112 de monitorización para recibir la señal de monitorización S_{salida} y una pluralidad de puertos ópticos 109 de salida (un número K de puertos ópticos 109, donde preferiblemente $K = N$ número de grados de libertad).

35 El divisor espectral 105 está configurado para transmitir a su k -ésimo puerto de salida genérico una señal óptica seleccionada $S_{salida,k}$, correspondiente a una parte de la señal de monitorización S_{salida} centrada alrededor de una k -ésima longitud de onda λ_k .

40 El divisor espectral 105, utilizado para seleccionar las K longitudes de onda k a monitorizar, puede realizarse según diferentes soluciones tecnológicas y arquitectónicas. Por ejemplo, el divisor espectral 105 es un dispositivo pasivo que, es decir, no necesita un control activo externo para seleccionar las longitudes de onda λ_k .

45 Las posibles arquitecturas que pueden utilizarse para el divisor espectral 105 incluyen las “rejillas de guía de ondas” (AWG) en matriz, las rejillas escalares y otros tipos de filtros interferométricos, como interferómetros de Mach Zehnder, rejillas de Bragg, resonadores de anillo y cualquier combinación de los mismos.

50 El divisor espectral 105 se fabrica preferiblemente en una guía de ondas y, por ejemplo, está integrada en la misma plataforma óptica que el dispositivo óptico reconfigurable 103. El divisor espectral 105 también puede realizarse con tecnologías alternativas, utilizando, por ejemplo, componentes ópticos discretos en el espacio libre, componentes de fibra óptica y combinaciones de los mismos.

Según este ejemplo, el convertidor óptico-eléctrico 104 comprende una pluralidad de detectores fotográficos configurados para convertir las K señales ópticas muestreadas $S_{salida}(\lambda_k)$ en las K señales eléctricas de intensidad $S_{EL1}-S_{ELK}$.

55 El dispositivo 110 de control está configurado para controlar la pluralidad de actuadores A_1-A_N según dicho conjunto de señales eléctricas de intensidad $S_{EL1}-S_{ELK}$, generando las N señales de control S_1-S_N , según la ley de control preestablecida.

60 Con respecto a la ley de control, para fines de reconfigurabilidad, el dispositivo 110 de control funciona de modo que el estado i -ésimo asumido por el dispositivo reconfigurable 103, en condiciones de funcionamiento, sea lo más parecido posible al i -ésimo estado “deseado”. Por ejemplo, el dispositivo 110 de control es tal que define la pluralidad de señales de control S_1-S_N usando el método de minimizar el error cuadrático medio entre una función de transferencia real del dispositivo reconfigurable 103 y una función de transferencia deseada del dispositivo reconfigurable 103.

65 El dispositivo 110 de control puede realizarse, por ejemplo, por medio de un microcontrolador, una CPU (unidad central de procesamiento), una FPGA (matriz de puertas programables en campo) o un DSP (procesador de señales digitales), programados según la metodología de control que se describe a continuación.

Obsérvese que el sistema óptico 100 también puede incluir un aparato óptico 300 (APP) asociado operativamente con el dispositivo óptico reconfigurable 103. Por ejemplo, el aparato óptico 300 puede ser un amplificador óptico (en particular, del tipo de fibra dopada) que permite la transmisión a larga distancia de señales ópticas sin conversión y regeneración optoelectrónicas. Los amplificadores ópticos funcionan habitualmente en un gran número de señales ópticas, por ejemplo, en más de cien señales.

Según este ejemplo, el dispositivo óptico reconfigurable 103 puede ser un filtro ecualizador configurado para ecualizar la banda de ganancia de las fibras dopadas con erbio del amplificador óptico 300 que no tienen una ganancia constante en todo el intervalo de frecuencias ocupado por las señales.

El uso del filtro ecualizador reconfigurable 103 permite adaptar el amplificador óptico 300 a las necesidades de una red óptica reconfigurable. Por ejemplo, para el amplificador 300 de fibra óptica dopada con erbio, el filtro ecualizador reconfigurable 103 puede tener varios grados de libertad $N = 20$ y funcionar en varios canales ópticos $M = 100$.

A continuación, se describirá un ejemplo de un método de control que puede utilizar el sistema óptico 100 para reconfigurar el dispositivo reconfigurable 103.

Con referencia al dominio de longitud de onda, la señal de salida óptica $O(\lambda)$ suministrada al puerto óptico 102 de salida viene dada por la siguiente expresión:

$$O(\lambda) = H_{12,i}(\lambda) I(\lambda) \quad (1)$$

donde $I(\lambda)$ es la señal de entrada I , expresada en el dominio de longitud de onda y $H_{12,i}(\lambda)$ es la respuesta de longitud de onda ya definida del dispositivo reconfigurable 103; el subíndice “ i ” indica el estado genérico asumido por el propio dispositivo, en relación con la transmisión de la señal de entrada I desde el puerto óptico 101 de entrada al puerto óptico 102 de salida.

Para facilitar la comprensión de las siguientes notaciones matemáticas, en la Figura 1 se han añadido los números 1, 2, 3 y 4 entre corchetes en los puertos ópticos pertinentes del dispositivo reconfigurable 103.

El método de control comienza cuando hay una solicitud para reconfigurar el sistema óptico 100 y, en particular, el dispositivo reconfigurable 103.

Como ya se ha mencionado, el método de control descrito monitoriza y controla la respuesta en la longitud de onda $H_{12,i}(\lambda)$ de modo que un estado “efectivo” de enésimo grado, definido por una respuesta de longitud de onda efectiva $H_{12,i}(\lambda)$, asumido por el dispositivo reconfigurable 103 en condiciones de funcionamiento, sea lo más parecido posible a un estado “deseado” de enésima vez, definido por una respuesta en $H_{12,i}(\lambda)$.

La señal de estimulación óptica $S_{entrada}$, generada por la fuente óptica 106, se suministra a la entrada del puerto 111 de estimulación del dispositivo reconfigurable 103 para medir en tiempo real el estado real $H_{i,e}(\lambda)$ y evaluar la desviación (es decir, la distancia) con respecto al estado deseado $H_{i,d}(\lambda)$.

Obsérvese que los estados $H_{i,d}(\lambda)$ deseados se identifican de antemano y se almacenan, por ejemplo en una tabla de consulta, en una memoria 110 del dispositivo de control, pero también pueden actualizarse y modificarse dinámicamente durante el funcionamiento del dispositivo reconfigurable 103.

El dispositivo reconfigurable 103 recibe la señal de estimulación $S_{entrada}$ y devuelve la señal de monitorización $S_{salida}(\lambda)$ al puerto óptico 112 de monitorización; la señal óptica de monitorización $S_{salida}(\lambda)$ se describe en la siguiente relación:

$$S_{salida}(\lambda) = H_{34,i}(\lambda) S_{entrada}(\lambda) \quad (2)$$

La función $H_{34,i}(\lambda)$ identifica la función de transferencia del dispositivo reconfigurable 103 desde el puerto 111 de estimulación al puerto óptico 112 de monitorización, cuando el propio dispositivo está en el estado i -ésimo al que está asociada la función de transferencia $H_{12,i}(\lambda)$, en relación con la transmisión desde el puerto óptico 101 de entrada al puerto óptico 102 de salida.

Cabe señalar que, para los fines de la siguiente descripción, se considera que el dispositivo reconfigurable 103 tiene las siguientes propiedades, definidas a continuación según las funciones de transferencia entre los puertos ópticos del propio dispositivo:

- reciprocidad: $H_{mn,i}(\lambda) = H_{nm,i}(\lambda)$;
- ausencia de retrorreflexiones en todos los puertos ópticos (101, 102, 111, 112): $H_{11,1}(\lambda) = H_{22,i}(\lambda) = H_{33,i}(\lambda) = H_{44,i}(\lambda) = 0$;

- sin acoplamiento entre los puertos 1-4 ($H_{14,i}(\lambda)=H_{41,i}(\lambda)=0$) y entre los puertos 2-3 ($H_{23,i}(\lambda)=H_{32,i}(\lambda)=0$);
- ausencia de fugas.

5 En las propiedades indicadas anteriormente, el término “ausencia” debe entenderse en el sentido de que la retrorreflexión, el acoplamiento o las pérdidas indicadas anteriormente son nulas o insignificantes a los efectos de la siguiente discusión.

Como reconoce el experto en la materia, las propiedades mencionadas anteriormente se aplican a las relaciones:

$$10 \quad |H_{12,i}(\lambda)|^2 + |H_{13,i}(\lambda)|^2 = 1$$

$$|H_{31,i}(\lambda)|^2 + |H_{34,i}(\lambda)|^2 = 1$$

15 de lo que se deduce que:

$$|H_{12,i}(\lambda)|^2 = |H_{34,i}(\lambda)|^2 \quad (3)$$

20 La relación (3) muestra cómo la monitorización de la señal óptica de monitorización $S_{salida}(\lambda)$, asociada con la función de transferencia $|H_{34,i}(\lambda)|^2$, proporciona la misma información que la monitorización directa de la señal óptica de salida $O(\lambda)$, asociada con la función de transferencia $|H_{12,i}(\lambda)|^2$.

25 Dada la reciprocidad del dispositivo reconfigurable 103, las funciones de transferencia $|H_{34,i}(\lambda)|^2$ y $|H_{43,i}(\lambda)|^2$ son teóricamente idénticas y ambas podrían monitorizarse. Sin embargo, en casos prácticos es conveniente utilizar una señal de estimulación que se propague en la dirección opuesta (contrapropagante) a la señal de interés. De hecho, en el caso de señales que se copropagan, el dispositivo reconfigurable 103 podría ser responsable de los fenómenos de diafonía y transferir parte de la señal de estimulación de entrada al puerto 4 hacia el puerto 2. Por lo tanto, es preferible una configuración de contrapropagación incluso si no es la única posible.

30 Dado que se conoce el espectro de la señal de estimulación de $Sen(\lambda)$, la función de transferencia $H_{34,i}(\lambda)$ puede obtenerse directamente de la señal de monitorización $S_{salida}(\lambda)$ (en el puerto de monitorización 112) a través de la relación (2).

35 Obsérvese también que el sistema 100 funciona sobre la base del conocimiento del espectro de la señal $S_{salida}(\lambda)$ solo para un número K de longitudes de onda, preferiblemente equidistantes y preferiblemente igual al número de grados de libertad N del dispositivo 103 ($K = N$).

40 Debe tenerse en cuenta que el número K de las longitudes de onda en las que se considera el espectro de la señal $S_{salida}(\lambda)$ también puede elegirse para que sea mayor que el número de grados de libertad N: $K > N$. En este caso, el sistema 100 es especialmente robusto frente al ruido, pero es más complejo que si K es igual a N.

Por otra parte, al elegir el número K menor que el número de grados de libertad ($K < N$), el sistema 100 funciona peor que $K \geq N$.

45 El número K puede estar entre un valor mínimo de K_{min} y un valor máximo de K_{max} . Por ejemplo, el valor mínimo puede venir dado por $K_{min} = N - 20 \% N$, o $K_{min} = N - 5 \% N$. Por ejemplo, con respecto al valor máximo, $K_{max} = N + 100 \% N$, o $K_{max} = N + 50 \% N$, o $K_{max} = N + 20 \% N$.

50 Respecto a la elección del número K, hay que tener en cuenta que en el sistema 100 no es necesario que sea igual al número de canales ópticos M, sino que también puede ser menor o mucho menor que el número de canales ópticos M ($K < M$). Por ejemplo, cuando el dispositivo reconfigurable 103 se utiliza en un sistema de amplificación con $M = 130$ canales, el número de longitudes de onda monitorizadas K puede ser menor que 15 %, es decir, $K < 15 \% M$. Otros posibles valores de ejemplo son, $K < 50 \% M$ y $K < 30 \% M$.

55 El número K se elige, dependiendo de la aplicación, combinando de forma apropiada tanto las relaciones anteriormente mencionadas con respecto al número de grados de libertad N como las relaciones mencionadas anteriormente con respecto al número de canales ópticos M, considerando un compromiso entre robustez y complejidad.

60 Además, cabe señalar que, para el método de control, basta con conocer solo la intensidad de la señal de monitorización óptica $|S_{salida}(\lambda)|^2$ y no su fase en varias longitudes de onda.

Por lo tanto, la información que utiliza el dispositivo 110 de control es la intensidad de la señal de monitorización óptica:

$$65 \quad |S_{salida}(\lambda_k)|^2 \quad (4)$$

donde el subíndice $k=1,2,...,K$ indica la frecuencia discreta a la que se muestrea la densidad de potencia espectral $|S_{salida}(\lambda)|^2$.

El divisor espectral 105 recibe la señal óptica de monitorización $S_{salida}(\lambda)$ y transmite a cada puerto de salida relevante 109 una señal óptica muestreada $S_{salida}(\lambda_k)$ correspondiente a una parte de la señal óptica monitorizada $S_{salida}(\lambda)$ centrada alrededor de la k -ésima longitud de onda λ_k . En particular, el divisor espectral 105 proporciona en sus puertos de salida 109 una pluralidad de señales ópticas muestreadas $S_{S1}-S_{SK}$ en modo paralelo.

La Figura 2 se refiere a una simulación numérica y muestra, por ejemplo, un espectro 702 de la señal $S_{salida}(\lambda)$ para una posible configuración del dispositivo reconfigurable 103 y también la versión en porciones 701 de la misma señal y sus subbandas $S_{salida}(\lambda_k)$, cada una con su propia banda $B_{\lambda,k}$.

Cada salida óptica 109 del divisor espectral 105 está ópticamente conectada a un detector fotográfico del convertidor óptico-eléctrico 104 que mide la intensidad óptica de entrada y proporciona en un terminal 108 relacionado una señal eléctrica S_{ELj} que tiene una corriente o tensión eléctrica proporcional a la intensidad $|S_{salida}(\lambda_k)|^2$ de la señal de monitorización óptica $S_{salida}(\lambda_k)$ integrada en su propia subbanda $B_{\lambda,k}$. El convertidor óptico-eléctrico 104 genera N señales eléctricas $S_{EL1}-S_{ELN}$, en paralelo en la pluralidad de terminales 108.

La pluralidad de señales eléctricas $S_{EL1}-S_{ELN}$ se envía al dispositivo 110 de control que monitoriza en tiempo real la respuesta de frecuencia efectiva $|\tilde{H}_{34,i}(\lambda_k)|^2 = |\tilde{H}_{12,i}(\lambda_k)|^2$ asumida por el dispositivo reconfigurable 103 bajo condiciones de funcionamiento en la k -ésima longitud de onda λ_k resolviendo la ecuación:

$$|\tilde{H}_{34,i}(\lambda_k)|^2 = |S_{34,i}(\lambda_k)|^2 / |S_{entrada}(\lambda_k)|^2.$$

El dispositivo 110 de control compara el estado actual $\tilde{H}_{12,i}(\lambda)$ con el estado deseado $H_{12,i}(\lambda)$ e identifica las señales de control S_1-S_N a aplicar, a través de los terminales 107 de control, a los actuadores A_1-A_N del dispositivo reconfigurable 103 para llevarlo y mantenerlo en el estado deseado.

Por ejemplo, la determinación de las señales de control S_1-S_N puede llevarse a cabo, sobre la base del estado actual $\tilde{H}_{12,i}(\lambda)$ y el estado deseado $H_{12,i}(\lambda)$ según el método de minimizar el error cuadrático medio; Sin embargo, debe tenerse en cuenta que también pueden utilizarse otros métodos. Se describe más adelante un ejemplo del método para minimizar el error cuadrático medio con referencia a una simulación del método de control.

Debe tenerse en cuenta que durante una fase de inicialización del sistema óptico 100, los valores de las señales de control S_1-S_N a aplicar pueden tomarse de una tabla de consulta obtenida de simulaciones numéricas del dispositivo reconfigurable 103. Una vez que se aplican estos valores al dispositivo reconfigurable 103, se procede a aplicar el método descrito anteriormente para llevarlo al estado deseado indicado por la tabla de consulta.

Simulación

La Figura 3 se refiere a una simulación numérica que muestra la eficacia del sistema óptico 100. Considérese un dispositivo reconfigurable genérico 103 que tiene grados de libertad $N = 15$. En la simulación, se ha considerado una reconfiguración del dispositivo 103 para que su respuesta de frecuencia, en el intervalo de longitud de onda entre 1528 nm y 1568 nm, pueda asumir tres tendencias predefinidas (301, 302, 303). Partiendo de una configuración inicial arbitraria y deseando que el dispositivo reconfigurable 103 funcione en el estado i -ésimo (301, 302 o 303), se calcula el error cuadrático medio:

$$\sum_{k=1}^K [|\tilde{H}_{12,i}(\lambda_k)|^2 - |H_{12,i}(\lambda_k)|^2]^2 \quad (5)$$

entre la función de transferencia actual $\tilde{H}_{12,i}(\lambda)$ y la función de transferencia deseada $H_{12,i}(\lambda)$ para el estado genérico i . Para la optimización de la función de transferencia del dispositivo reconfigurable 103 pueden utilizarse funciones de coste alternativas a las expresadas en la ecuación (5), así como otros algoritmos de optimización, como optimización no lineal, algoritmos genéticos, optimización por enjambres de partículas, aprendizaje automático, redes neuronales y otros conocidos en la literatura.

En esta simulación aplicamos primero el método de la técnica conocida, según el cual se tuvieron en cuenta las funciones de transferencia $|H_{12,i}(\lambda_k)|^2$ en los tres estados diferentes (301, 302 y 303) medidas en un elevado número de longitudes de onda (círculos abiertos), igual al número de canales ópticos utilizados en el intervalo de longitud de onda de interés ($K = M = 130$). Aplicando este método convencional, se han obtenido las curvas mostradas en la Figura 3 con líneas discontinuas.

Aplicando en cambio la metodología de control descrita con referencia al sistema óptico 100, las funciones de transferencia $|H_{12,i}(\lambda_k)|^2$ se miden en un número limitado de longitudes de onda ($K = N = 15$) igual al número de grados de libertad del dispositivo reconfigurable 103 (círculos completos). Aplicando el método descrito con referencia al sistema 100, obtuvimos las curvas que se muestran en la Figura 3 con las líneas continuas.

La Figura 3 ilustra cómo la diferencia entre las curvas discontinuas (método convencional) y las curvas continuas (método del sistema 100) es inferior a 0,2 dB en toda la banda de operación, lo que confirma la eficacia del método descrito.

Según otra forma de realización del sistema óptico 100, mostrada esquemáticamente en la Figura 4, el dispositivo 200 de conversión óptico-eléctrico se realiza mediante un monitor sintonizable configurado para suministrar al dispositivo 110 de control el conjunto de señales eléctricas de intensidad S_{EL1} - S_{ELN} de forma secuencial en el tiempo (es decir en modo serie), a partir de la señal de monitorización óptica S_{salida} .

Este detector sintonizable 200 incluye, según un ejemplo, un filtro óptico sintonizable 205 (TUN-FIL) con una única salida óptica 209 seguido de un fotodetector 204 (DET) con una única salida eléctrica 208. El detector sintonizable 200 es un dispositivo activo que recibe un control activo externo (una señal de control S_{CR}) para seleccionar longitudes de onda λ_k .

La salida óptica 209 del filtro óptico sintonizable 205 está conectada ópticamente al fotodetector 204 que mide la intensidad óptica de entrada y proporciona una señal eléctrica S_{ELk} con una corriente o tensión proporcional a la intensidad $|S_{salida}(\lambda_k)|^2$.

Al ajustar secuencialmente el detector sintonizable 200 a lo largo del tiempo, es posible obtener información sobre la función de transferencia de corriente $\tilde{H}_{12,i}(\lambda)$ del dispositivo reconfigurable 10, alrededor de todas las frecuencias de interés.

Las señales eléctricas S_{EL1} - S_{ELK} emitidas secuencialmente desde el fotodetector 204 se envían al dispositivo 110 de control y proporcionan una monitorización de la respuesta de frecuencia real $\tilde{H}_{12,i}(\lambda)$ del dispositivo reconfigurable 103, en condiciones de funcionamiento.

Las posibles arquitecturas que pueden utilizarse para el filtro óptico ajustable 205 incluyen: resonadores de anillo óptico, interferómetros Mach Zehnder, rejillas de Bragg y posibles combinaciones de estos.

El detector sintonizable 200 se realiza preferiblemente en guía de ondas y se integra preferiblemente en la misma plataforma fotónica que el dispositivo óptico reconfigurable 103, ya descrito, o puede realizarse con componentes ópticos discretos en el espacio libre, componentes de fibra óptica y combinaciones de los mismos.

Por ejemplo, para ajustar el filtro óptico ajustable 205, puede utilizarse la señal de control eléctrico S_{CR} (generada por el dispositivo 110 de control), que actúa sobre los actuadores (no mostrados) integrados en el filtro óptico sintonizable 205. Estos actuadores modifican el comportamiento del filtro ajustable 205 modificando los parámetros ópticos del medio material en el que se propaga la radiación luminosa aprovechando, por ejemplo, el efecto termoóptico, el efecto electroóptico o el efecto elastoóptico; de forma alternativa, pueden utilizarse actuadores micromecánicos (MEMS) que modifican la trayectoria de la radiación luminosa en el dispositivo.

La Figura 5 se refiere a una simulación numérica de un sistema óptico 100 similar al descrito en la Figura 4, que incluye el filtro óptico ajustable 205.

La curva 802 de la Figura 5 muestra el espectro de la señal de monitorización óptica $S_{salida}(\lambda)$ para una configuración particular del dispositivo óptico reconfigurable 103. La Figura 5 también muestra (curva 801) la versión "muestreada" de la señal de monitorización óptica y su subbanda, con su banda $B_{\lambda,k}$ obtenida a través del filtro sintonizable 205, capaz de sintonizarse en toda la banda de funcionamiento.

La Figura 6 muestra esquemáticamente otro sistema óptico 400, similar al sistema óptico 100 ya descrito con referencia a la Figura 1, pero que utiliza un dispositivo óptico reconfigurable 103 con dos puertos (el puerto óptico 101 de entrada y el puerto óptico 102 de salida).

El sistema óptico adicional 400 comprende un primer circulador 401 y un segundo circulador óptico 402. El primer circulador óptico 401 está equipado con un primer puerto 403 para la señal de entrada I y un segundo puerto 404, conectado al puerto de entrada óptica 101 del dispositivo reconfigurable 103 al que puede suministrarse la señal de entrada I. El puerto de entrada óptica 101 del dispositivo reconfigurable 103 también es tal que alimenta el segundo puerto 404 del primer circulador óptico 401 con la señal óptica de monitorización S_{salida} . El primer 401 circulador está equipado con un tercer puerto 405 conectado al divisor espectral 105 para suministrar a este último la señal óptica de monitorización S_{salida} .

El segundo circulador óptico 402 incluye un primer puerto relativo 406 conectado al puerto de salida 102 del dispositivo reconfigurable 103. El puerto de salida óptica 102 sirve para suministrar la señal de salida O al segundo circulador óptico 406 y también para recibir la señal de estimulación $S_{entrada}$.

El segundo circulador óptico 402 también está equipado con un segundo puerto relativo 407, configurado para suministrar la señal de salida O, y un tercer puerto relativo 408, configurado para recibir la señal de estimulación $S_{entrada}$ generada por la fuente óptica 106 y a transmitir al primer puerto 406 correspondiente, y a continuación al dispositivo reconfigurable 103 (a través del puerto de salida 102).

Si resulta que el dispositivo óptico de dos puertos reconfigurable 103 es recíproco, la función de transferencia H_{21} es igual a la función de transferencia H_{12} .

Cabe señalar que la estructura que tiene el dispositivo óptico de dos puertos reconfigurable 103, equipado con los dos circuladores ópticos 401 y 402, también es aplicable a la forma de construcción de la Figura 4.

5 La Figura 7 es una representación esquemática de un filtro 203 de retícula óptica, indicativo de un ejemplo de un dispositivo reconfigurable 103.

10 El filtro 103 de retícula óptica comprende una pluralidad de acopladores ópticos K1-K14 y una pluralidad de actuadores Bal 1, 2... 7 y Unbal 1, 2, ..., 6, adecuado para introducir retrasos o desequilibrios en los canales ópticos, para un total de trece actuadores.

15 El filtro reticular 103 de la Figura 7 tiene un número de grados de libertad N igual a 13, es decir, igual al número de actuadores utilizados, y puede gestionar hasta un número M de canales ópticos igual a 96. Es posible gestionar la reconfigurabilidad del filtro reticular 103 monitorizando solo un número K de longitudes de onda igual a $N = 13$.

Los acopladores ópticos K1-K14 son un ejemplo de los elementos ópticos Gi descritos con referencia a la Figura 1 y a la pluralidad de actuadores Bal 1, 2... 7 y Unbal 1, 2, ..., 6 son un ejemplo de los actuadores A_1-A_N descritos con referencia a la Figura 1.

20 Debe tenerse en cuenta que cada uno de los actuadores Bal 1, 2, ..., 7 y Unbal 1, 2, ..., 6 actúa sobre el comportamiento óptico de un acoplador óptico K_j correspondiente que funciona en modo WDM, es decir, permite la propagación de varios canales ópticos.

25 En general, el dispositivo reconfigurable 103 puede ser un filtro óptico que incluye como elementos ópticos Gi: interferómetros binarios de árbol o retícula, AWG (rejillas de guía de ondas en matriz) o estructuras similares que se utilizan como divisores de potencia, por ejemplo, interferómetros multimodo (MMI), acopladores direccionales o ramificaciones en y o similares.

30 Debe tenerse en cuenta que la solución descrita anteriormente se aplica principalmente, pero no exclusivamente, en la industria de las telecomunicaciones, específicamente en el campo de las redes ópticas reconfigurables. Algunos ejemplos de otras posibles aplicaciones de los principios descritos son:

1) dispositivos ópticos para sensores de fibra y de guía de ondas, que requieren la estabilización de los circuitos ópticos para procesar las lecturas de los sensores,

35 2) dispositivos ópticos para mediciones de distancias, como los LIDAR, que requieren un intervalo de temperatura de funcionamiento muy amplio y pueden aprovechar la estabilización obtenida con la invención,

40 3) circuitos ópticos para redes inalámbricas 5G, que pueden aprovechar los circuitos fotónicos para mejorar el rendimiento de la cobertura de la red móvil utilizando, por ejemplo, redes de formación de haces con circuitos fotónicos integrados controlados por el método descrito en la invención.

45 4) circuitos ópticos reconfigurables que pueden introducir un tiempo de retardo ajustable, utilizados, por ejemplo, en interferometría óptica, tomografía óptica y otras aplicaciones en las que sea necesario sincronizar los retardos relativos entre dos o más señales ópticas;

50 Los sistemas ópticos descritos anteriormente son especialmente ventajosos en términos de simplicidad y rendimiento. De hecho, estos sistemas ópticos permiten gestionar su reconfiguración monitorizando un número de señales (es decir, señales ópticas muestreadas $S_{S1}-S_{SK}$) inferior al número de canales ópticos en los que funciona el propio sistema, manteniendo el rendimiento deseado.

Además, los sistemas ópticos descritos tienen las ventajas que ofrece el control de circuito cerrado sin requerir una alta complejidad del sistema de accionamiento controlado por el dispositivo de control.

55 El menor número de señales a monitorizar implica una reducción en los costes relacionados con los componentes necesarios, con las dimensiones físicas del sistema de control, y facilita las operaciones de empaquetado.

60

65

REIVINDICACIONES

1. Sistema óptico (100; 400) que comprende:

un dispositivo óptico (103) de multiplexación por división de longitud de onda reconfigurable que comprende una pluralidad de actuadores (A_1-A_N) y que tiene un número asociado M de canales ópticos M y un número N de grados de libertad definidos por el número de dichos actuadores (A_1-A_N) y menos de dicho número M de canales ópticos;
una fuente óptica (106) de estimulación conectada a dicho dispositivo óptico reconfigurable (103) para proporcionar una señal óptica de estimulación ($S_{entrada}$) que tiene una banda de longitud de onda que incluye una pluralidad de longitudes de onda asociadas a los canales ópticos;
un dispositivo (200) de conversión óptico-eléctrico configurado para recibir desde dicho dispositivo óptico reconfigurable (103) una señal de monitorización óptica (S_{salida}) producida en respuesta a la señal óptica de estimulación ($S_{entrada}$) y para proporcionar un grupo de señales eléctricas de intensidad ($S_{EL1}-S_{ELK}$), cada una representativa de una intensidad de la señal óptica de monitorización (S_{salida}) evaluada en una longitud de onda respectiva incluida en dicha banda;
un dispositivo (110) de control configurado para controlar la pluralidad de actuadores (A_1-A_N) en función de dicho grupo de señales eléctricas ($S_{EL1}-S_{ELK}$) y según una ley de control, en donde: el grupo de señales eléctricas ($S_{EL1}-S_{ELK}$) tiene una cardinalidad K seleccionada sobre la base de dicho número de grados de libertad N y comprendiendo entre un primer valor mínimo $K1_{min} = N - 20 \% N$ y un primer valor máximo $K1_{max} = N + 100 \% N$.

2. Sistema (100; 400) según la reivindicación 1, en donde:

la cardinalidad K está comprendida entre un segundo valor mínimo $K2_{min} = N - 5 \% N$ y un segundo valor máximo $K2_{max} = N + 50 \% N$;
o
la cardinalidad K está comprendida entre dicho segundo valor mínimo $K2_{min}$ y un tercer valor máximo $K3_{max} = N + 20 \% N$.

3. Sistema (100, 400) según la reivindicación 1, en donde la cardinalidad K es igual al número de grados de libertad N.

4. Sistema (100, 400) según la reivindicación 1, en donde el dispositivo (110) de control está configurado para:

evaluar mediante el grupo de señales eléctricas de intensidad ($S_{EL1}-S_{ELK}$) y la señal óptica de estimulación ($S_{entrada}$) una función de transferencia efectiva del dispositivo óptico reconfigurable (103);
comparar la función de transferencia efectiva del dispositivo óptico reconfigurable (103) con una función de transferencia deseada;
generar una pluralidad de señales de control (S_1-S_N) de la pluralidad de actuadores (A_1-A_N) para hacer que el dispositivo reconfigurable (103) tenga la función de transferencia deseada.

5. Sistema (100; 400) según la reivindicación 4, en donde el dispositivo (110) de control está configurado para definir la pluralidad de señales de control (S_1-S_N) mediante el uso de uno de los siguientes métodos aplicados a la función de transferencia efectiva y a la función de transferencia deseada: método para minimizar el error cuadrático medio; optimización no lineal, algoritmo genético, optimización de enjambres de partículas, aprendizaje automático, red neuronal.

6. Sistema (100; 400) según la reivindicación 1, en donde el dispositivo reconfigurable (103) comprende:

-una entrada operativa (101; 403) para una señal óptica de entrada (I),
-una salida operativa (102; 402) para una señal óptica de salida (O) correspondiente a la señal óptica de entrada (I);
-una entrada (111; 408) de estimulación para recibir dicha señal de estimulación ($S_{entrada}$);
-una salida (112; 405) de monitorización para proporcionar la señal óptica de monitorización (S_{salida}) al dispositivo (200) de conversión óptico-eléctrico.

7. Sistema (100; 400) según la reivindicación 1, en donde el dispositivo (200) de conversión óptico-eléctrico comprende:

un segmentador espectral (105) que comprende una pluralidad de puertos ópticos (109) de salida y configurado para recibir la señal óptica de monitorización (S_{salida}) y para entregar a dicha pluralidad de puertos ópticos de salida (109) una pluralidad de señales ópticas muestreadas ($S_{S1}-S_{SK}$) cada una correspondiente a dicha porción de la señal óptica de monitorización (S_{salida});

un convertidor óptico-eléctrico (104) conectado a la pluralidad de puertos ópticos (109) de salida para recibir la pluralidad de señales ópticas muestreadas ($S_{S1-S_{SK}}$) y que comprende una pluralidad de terminales eléctricos (108) configurados para transmitir la pluralidad de señales eléctricas de intensidad ($S_{EL1-S_{ELK}}$) al dispositivo (110) de control.

8. Sistema (100; 400) según la reivindicación 1, en donde el dispositivo (200) de conversión óptico-eléctrico comprende:

un filtro sintonizable (205) configurado para recibir la señal óptica de monitorización (S_{salida}) y entregar, mediante una transmisión en serie a un puerto óptico (109) de salida, la pluralidad de señales ópticas muestreadas ($S_{S1-S_{SK}}$) cada una correspondiente a dicha porción de la señal óptica de monitorización (S_{salida});

un detector óptico (204) conectado al puerto óptico (109) de salida para recibir la pluralidad de señales ópticas muestreadas ($S_{S1-S_{SK}}$) y que comprende un terminal eléctrico (108) configurado para transmitir, mediante una transmisión en serie, la pluralidad de las señales eléctricas de intensidad ($S_{EL1-S_{ELK}}$) al dispositivo (110) de control.

9. Sistema (400) según la reivindicación 1, en donde el dispositivo reconfigurable (103) es un dispositivo de dos puertos que comprende una entrada operativa (101) para una señal óptica de entrada (I) y una salida operativa (102) para una señal óptica de salida (O); comprendiendo además el sistema:

un primer circulador óptico (401) que tiene: un primer puerto óptico (403) para recibir la señal óptica de entrada (I) desde el exterior, un segundo puerto óptico (404) conectado a la entrada operativa (101) para entregar al dispositivo reconfigurable (103) la señal óptica de entrada (I) y para recibir la señal óptica de monitorización (S_{salida}) desde el dispositivo reconfigurable (103); un tercer puerto óptico (405) para entregar la señal óptica de monitorización (S_{salida}) al dispositivo (200) de conversión óptico-eléctrico;

un segundo circulador óptico (402) que tiene: un primer puerto óptico (406) respectivo conectado a la salida operativa (102), un segundo puerto óptico (407) respectivo para proporcionar al exterior la señal óptica de salida (O); un tercer puerto óptico (408) respectivo para recibir la señal óptica de estimulación ($S_{entrada}$) y para transmitirla al dispositivo óptico reconfigurable (103) mediante dicha salida operativa (102).

10. Sistema (100, 400) según la reivindicación 1, en donde el dispositivo reconfigurable (103) es un dispositivo que pertenece al grupo de: un filtro óptico, un filtro ecualizador, un filtro compensador de dispersión, un filtro FIR, un filtro IIR, un filtro reticular, un filtro de árbol.

11. Sistema (100, 400) según la reivindicación 10, en donde el dispositivo reconfigurable (103) comprende al menos uno de los siguientes componentes ópticos (G_i): un interferómetro de árbol, un interferómetro reticular, AWG (rejillas de guía de ondas en matriz), un divisor de potencia, un interferómetro multimodo, acopladores direccionales, bifurcación en Y.

12. Sistema óptico (100, 400) según la reivindicación 1, en donde la pluralidad de actuadores (A_1-A_N) comprende al menos uno de los siguientes actuadores: actuador termo-óptico, actuador electro-óptico, actuador piezoelectrico, actuador electro-absortivo, actuador electro-mecánico, actuador electro-químico, un actuador completamente óptico basado en efectos ópticos lineales, un actuador completamente óptico basado en efectos ópticos no lineales.

13. Sistema óptico (100, 400) según la reivindicación 1, en donde al menos el dispositivo reconfigurable (103) y el dispositivo (200) de conversión óptico-eléctrico se fabrican mediante técnicas ópticas integradas.

14. Sistema óptico (100, 400) según la reivindicación 1, en donde el dispositivo reconfigurable comprende una pluralidad de elementos ópticos (G_i) ajustables mediante dicha pluralidad de actuadores (A_1-A_N), estando cada elemento óptico configurado para funcionar según la técnica de multiplexación de longitudes de onda.

15. Sistema óptico (100, 400) según la reivindicación 1, en donde dicha fuente óptica (106) de estimulación se selecciona del grupo que comprende: un diodo superluminiscente (SLD), un ruido ASE de un amplificador de fibra, un ruido ASE de un amplificador óptico semiconductor, una fuente de tipo "láser supercontinuo", una matriz de láser, un láser de retroalimentación distribuida DFB, un generador de peines de fibra, un generador de peines integrados en un chip óptico.

16. Método de reconfiguración de un dispositivo óptico, que comprende:

-proporcionar un dispositivo óptico reconfigurable de multiplexación por división de longitud de onda (103), que comprende una pluralidad de actuadores (A_1-A_N) y que tiene un número asociado M de canales ópticos y un número N de grados de libertad N definidos por el número de dichos actuadores (A_1-A_N) e inferior a dicho número M de canales ópticos;

-entregar a dicho dispositivo óptico reconfigurable (103) una señal óptica de estimulación ($S_{entrada}$) que tiene una banda de longitud de onda que incluye una pluralidad de longitudes de onda asociadas a los canales ópticos;

-recibir desde dicho dispositivo óptico reconfigurable (103) una señal óptica de monitorización (S_{salida}) producida en respuesta a la señal óptica de estimulación ($S_{entrada}$) y realizar una conversión óptico-eléctrica proporcionando un grupo de señales eléctricas de intensidad (S_{EL1} - S_{ELK}) cada una representativa de una intensidad de la señal óptica de monitorización (S_{salida}) evaluada en una longitud de onda respectiva incluida en dicha banda;

-controlar la pluralidad de actuadores (A_1 - A_N) en función de dicho grupo de señales eléctricas (S_{EL1} - S_{ELK}) y según una ley de control;

en donde:

el grupo de señales eléctricas de intensidad (S_{EL1} - S_{ELK}) tiene una cardinalidad K seleccionada sobre la base de dicho número de grados de libertad N y comprendida entre un primer valor mínimo $K_{1min} = N - 20 \% N$ y un primer valor máximo $K_{1max} = N + 100 \% N$.

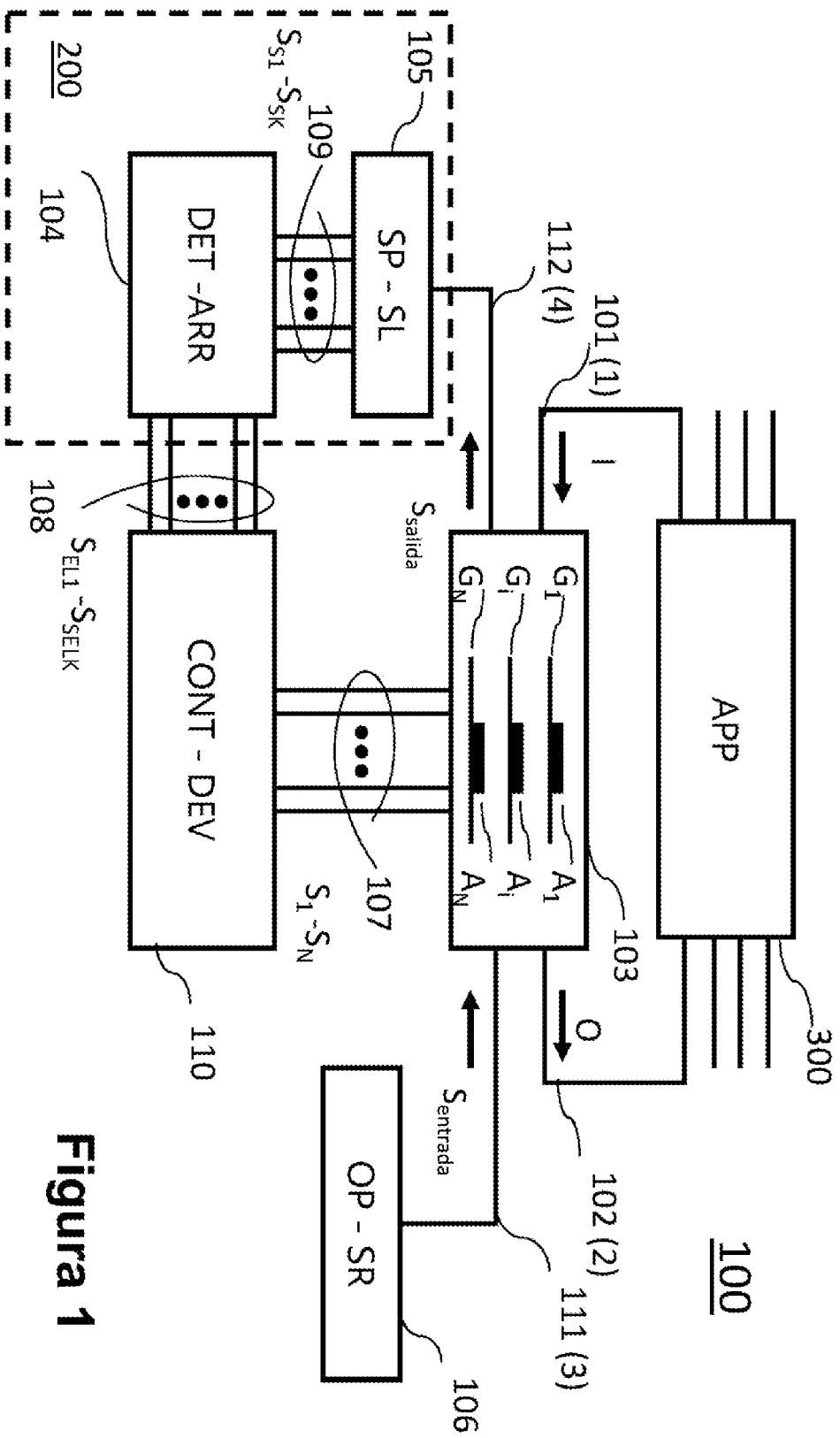
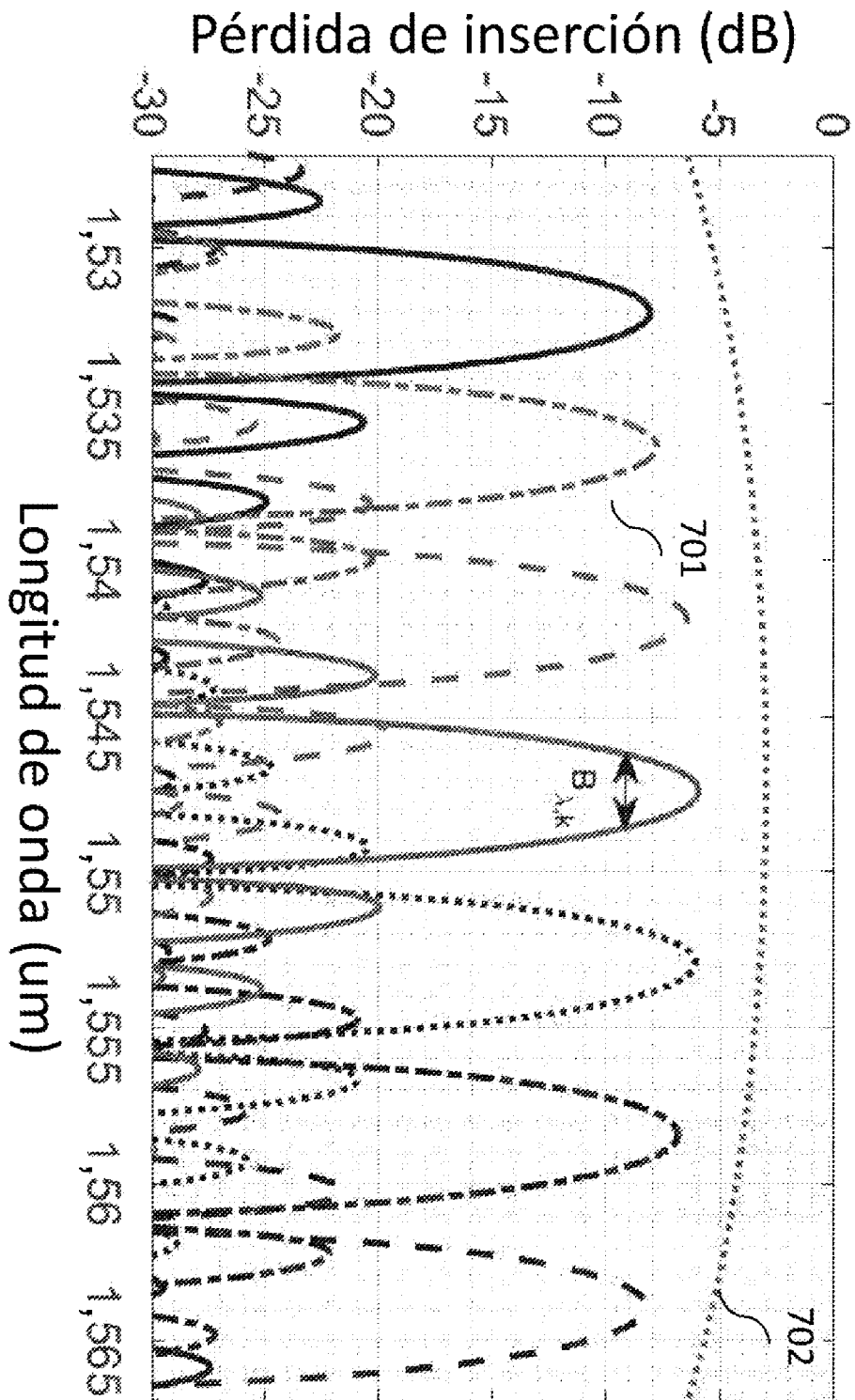


Figura 1

Figura 2



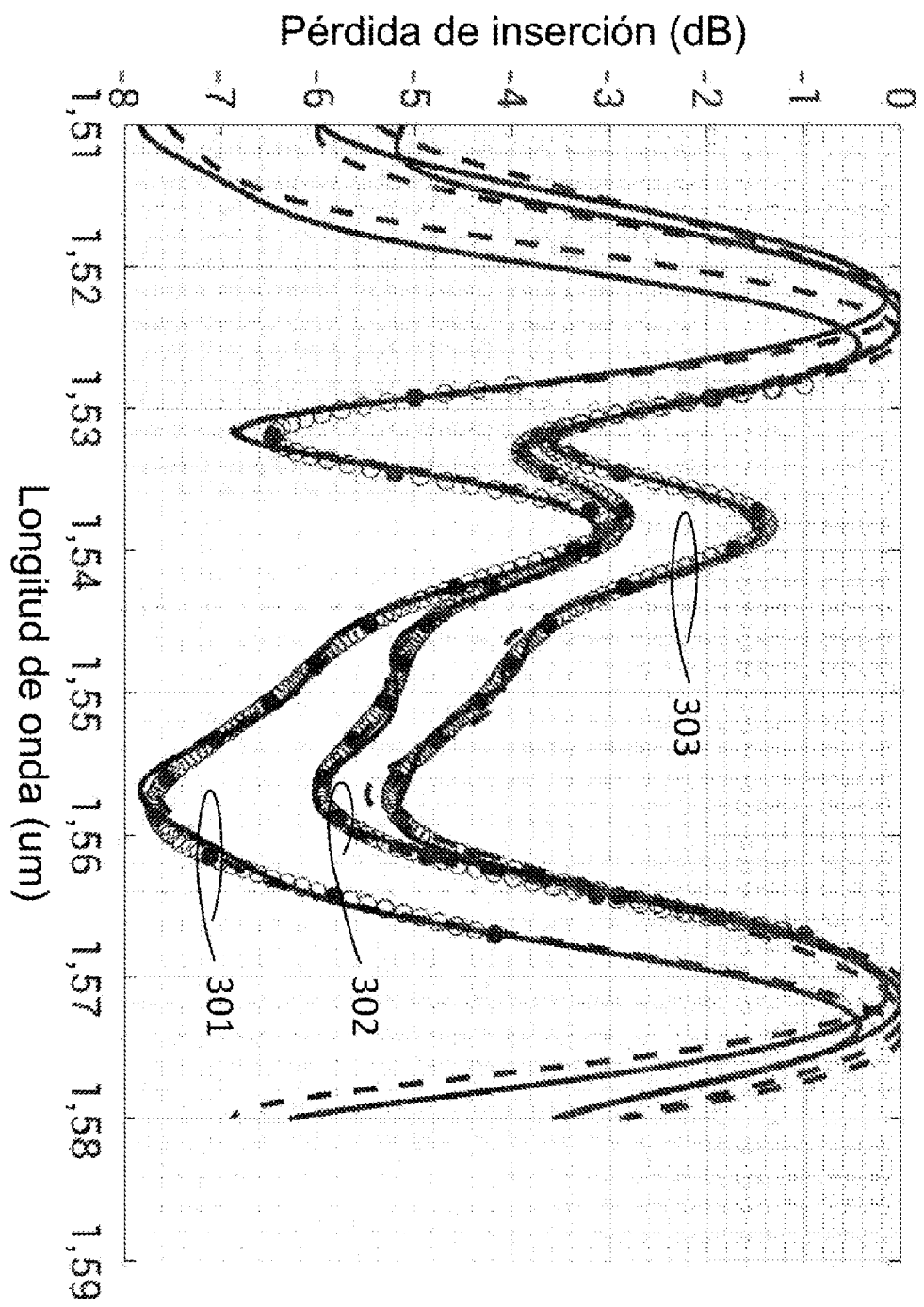


Figura 3

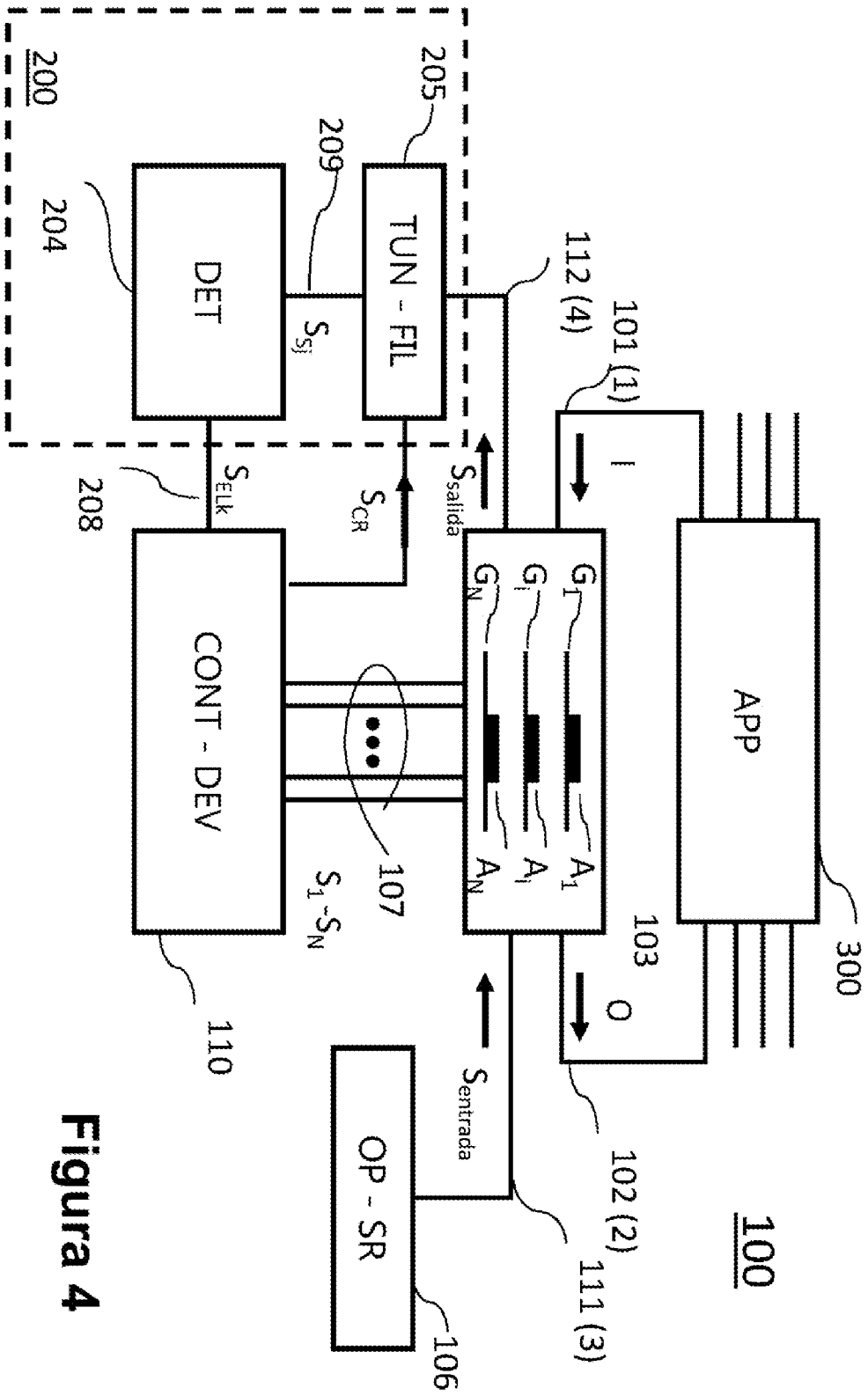
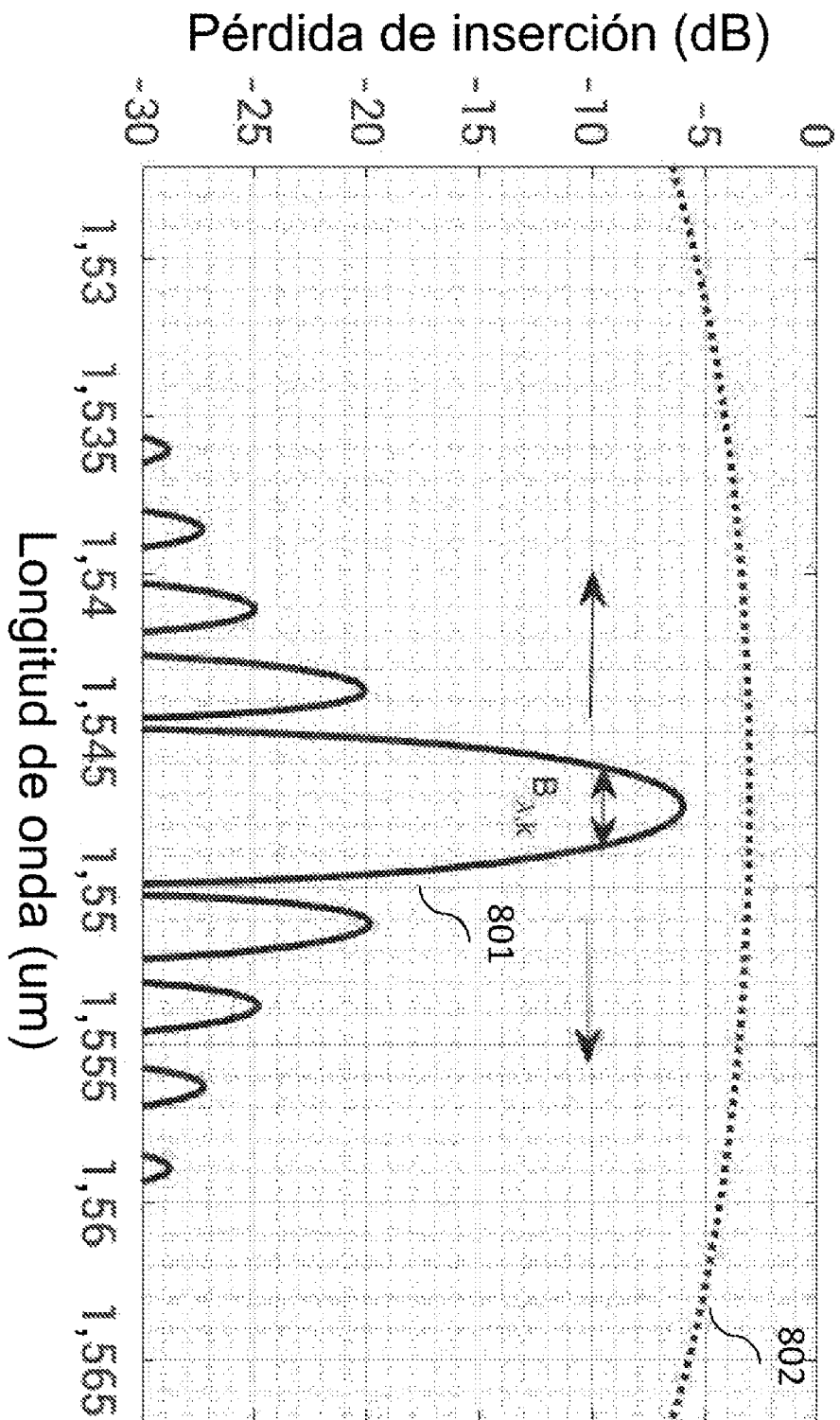


Figura 4

Figura 5



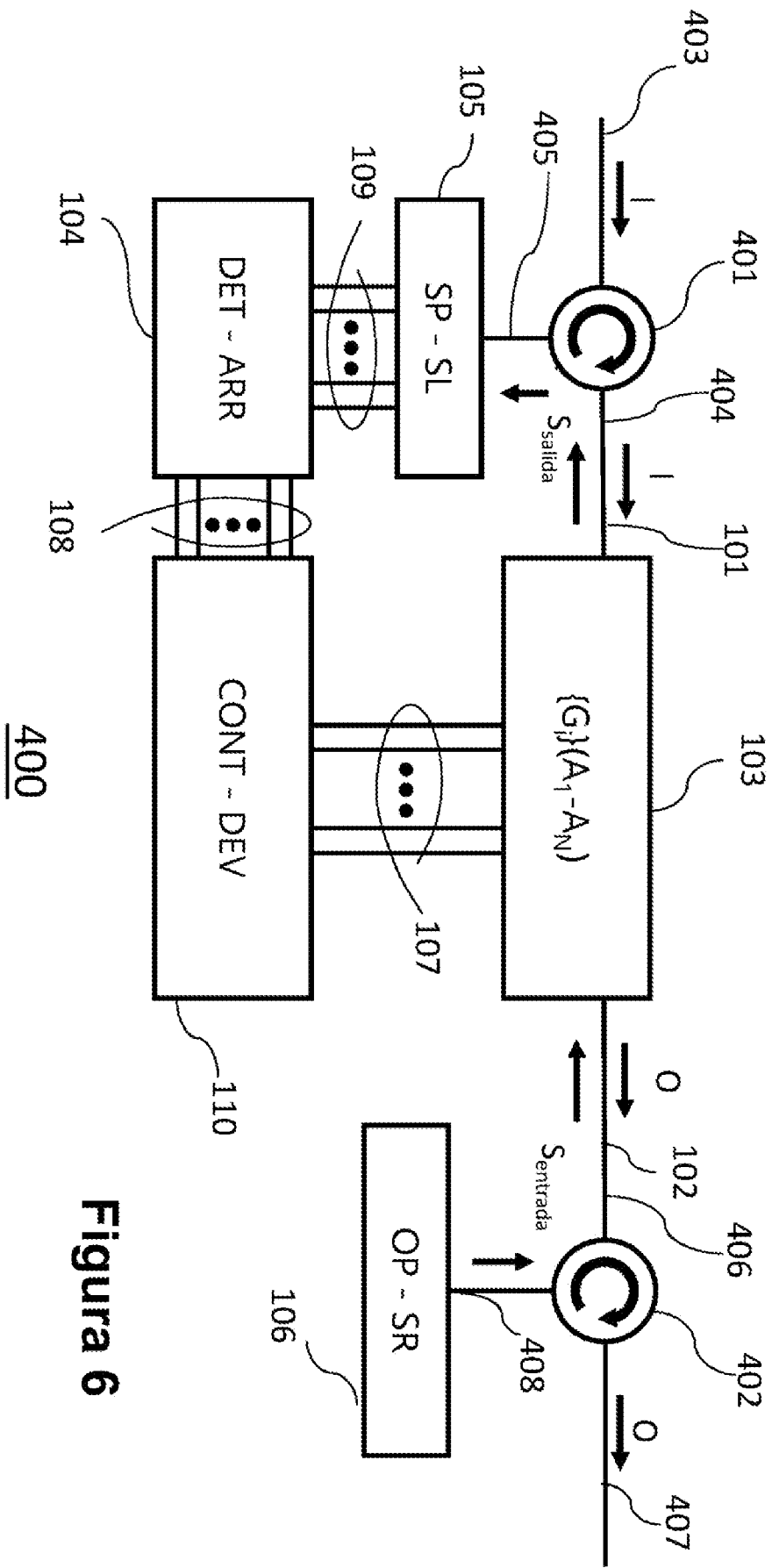


Figura 6

103

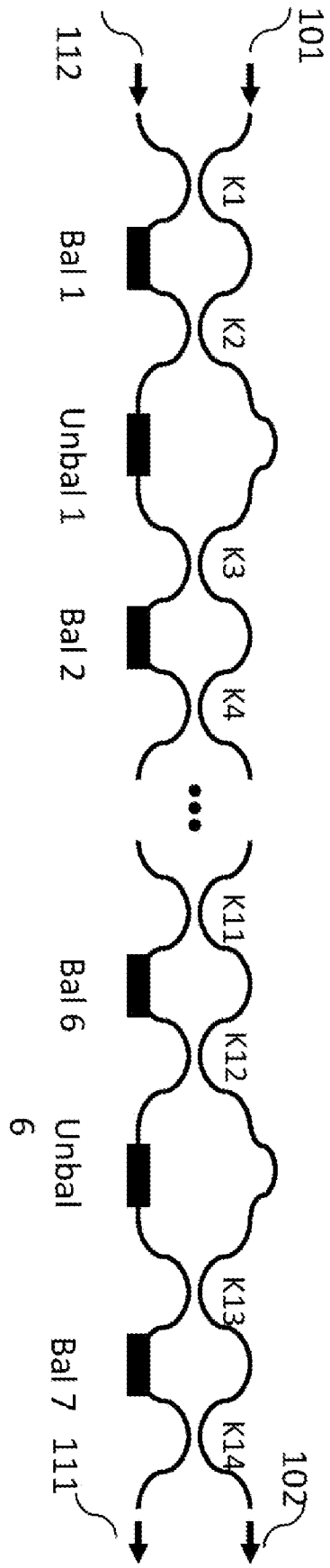


Figura 7