

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 384 833**

51 Int. Cl.:
G02F 1/01 (2006.01)
G02F 1/225 (2006.01)
H04B 10/08 (2006.01)
H04B 10/155 (2006.01)
H04Q 3/52 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **08762563 .8**
96 Fecha de presentación: **17.06.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2174181**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **14.04.2010**

54 Título: **Conmutador óptico que comprende una pluralidad de moduladores electroópticos de salida doble y un controlador de polarización**

30 Prioridad:
25.06.2007 GB 0712190
25.06.2007 EP 07270033

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
12.07.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
12.07.2012

73 Titular/es:
BAE Systems PLC
6 Carlton Gardens
London SW1Y 5AD, GB

72 Inventor/es:
SMITH, Andrew James y
PESCOD, Christopher Ralph

74 Agente/Representante:
González Palmero, Fe

ES 2 384 833 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

Conmutador óptico que comprende una pluralidad de moduladores electroópticos de salida doble y un controlador de polarización

5 Esta invención se refiere a un conmutador de dirección óptico que comprende moduladores electroópticos dispuestos en una estructura escalonada y que incluye además un controlador de polarización para realizar el control de polarización de los moduladores electroópticos y en particular, proporcionar control de polarización dinámico de una pluralidad de moduladores electroópticos de salida doble.

10 Los moduladores electroópticos, por ejemplo, los moduladores electroópticos de interferómetro Mach-Zehnder de salida doble, se utilizan ampliamente en sistemas ópticos de comunicación, incluyendo sistemas de transmisión de TV por cable. Hay varios enfoques conocidos para el control de polarización en moduladores Mach-Zehnder en particular, que varían desde ajustes de polarización únicos a control dinámico de polarización. En el campo analógico en particular, un enfoque conocido para el control de polarización dinámico de moduladores electroópticos Mach-Zehnder implica la aplicación de un tono piloto (por ejemplo un tono de 10kHz para una señal de comunicaciones de interés de 1 GHz) al electrodo de modulación, la monitorización de la salida del modulador y el ajuste de la tensión de polarización basándose en esa salida. Por ejemplo, dado que la amplitud del segundo armónico del tono piloto habitualmente tiende a cero en o alrededor del punto de cuadratura en funcionamiento de un modulador Mach-Zehnder, un enfoque propuesto anteriormente monitoriza este segundo armónico y ajusta la tensión de polarización de CC aplicada para conducir el segundo armónico a cero. Se ha propuesto un enfoque equivalente para el campo digital; siendo la señal aplicada normalmente una señal de onda cuadrada de pequeña amplitud, y estando monitorizada la salida utilizando un procesador de señal digital.

25 Aunque cada uno de estos enfoques conocidos permite proporcionar una forma de control de polarización dinámico, cada uno de ellos tiene desventajas implícitas. Por ejemplo, la aplicación de un tono piloto necesariamente da lugar a productos de modulación (por ejemplo bandas laterales) que limitan el intervalo dinámico alcanzable del sistema, y para enlaces ópticos de alta fidelidad esta reducción en el intervalo dinámico es generalmente inaceptable. En enlaces de muy alta velocidad (por ejemplo, enlaces digitales con velocidades de hasta 100 GBit/s y enlaces analógicos con frecuencias de hasta 60 GHz), la aplicación de una oscilación de pequeña amplitud puede afectar desfavorablemente a la tasa de transferencia de datos y a la longitud de enlace alcanzables. Otra desventaja surge en particular cuando se requieren múltiples canales, por ejemplo en un sistema de antena de disposición en fase, porque el hardware de control de polarización necesita reproducirse por completo para todos y cada uno de los moduladores. Esto aumenta el volumen, la complejidad y el coste del sistema.

35 El documento JP4294318 describe un circuito de control automático para la polarización de modulador óptico, siendo con el fin de ofrecer un circuito que ajuste automáticamente la polarización de modo que el punto de funcionamiento de un modulador óptico Mach-Zehnder se mantiene en un punto óptimo en todo momento.

40 El documento GB2293022 describe el control de moduladores ópticos en el que, para controlar la tensión de polarización de un modulador óptico externo de tipo de interferencia, un generador de baja frecuencia suministra una señal a un modulador de AM, modulador que superpone la señal de baja frecuencia a la señal de modulación principal.

45 El documento EP1168039 describe un aparato de transmisión óptica y un método de control de estabilización de salida para un modulador óptico utilizado en el aparato de transmisión óptica. El aparato proporciona un aparato de transmisión óptica que puede evitar la degradación de la calidad de una señal óptica de salida llevando a cabo un control de estabilización de una tensión de polarización.

50 Un conmutador de dirección óptico que comprende varios moduladores electroópticos de salida doble en una estructura escalonada según se define en el preámbulo de la reivindicación 1 se conoce del artículo "1x16 Lithium Niobate Optical Switch Matrix with Integral TTL Compatible Drive Electronics" de A.C. Donnell et al. (Electronics Letters, vol. 27, n.º 25). A partir de un primer aspecto, la presente invención radica en un conmutador de dirección óptico según la reivindicación 1.

55 Realizaciones preferidas de la presente invención están dispuestas para controlar el punto de polarización de moduladores de salida doble dispuestos en una estructura escalonada según la reivindicación 1 adjunta evaluando la potencia óptica promedio de las salidas. En la cuadratura, la potencia de salida óptica promedio de las dos salidas de cada modulador será nominalmente igual. El punto de polarización de cada modulador puede controlarse ajustando la tensión en un electrodo de polarización de CC (o aplicando una desviación de CC a un electrodo de modulación). La polarización de cuadratura puede así lograrse generando una señal de control de polarización de la tensión apropiada y aplicándola para igualar la potencia en las dos salidas. Este enfoque se aplica a una arquitectura de conmutador según la reivindicación 1 examinando tanto las salidas individuales como las sumas de las salidas de cada modulador.

65 Según este primer aspecto de la presente invención, los medios de control están dispuestos para determinar, en

particular, una tensión de control de polarización que va a aplicarse a cada modulador. En una realización preferida, los medios de control pueden hacerse funcionar para controlar el punto de polarización de cada modulador por medio de un proceso de ajuste iterativo o cíclico por lo que la tensión de control de polarización se ajusta, según se requiera, de un ciclo al siguiente hasta que se logra un punto de polarización deseado, y para mantener el punto de polarización deseado durante el funcionamiento de cada modulador.

Preferiblemente, los medios de control están dispuestos para determinar el intervalo de tiempo entre ajustes sucesivos de la tensión de control de polarización. Esto es ventajoso ya que algunos tipos de moduladores electroópticos responden de manera relativamente lenta a cambios en la tensión de control de polarización. Los medios de control están dispuestos para determinar el tamaño más apropiado de ajuste de tensión de control de polarización y el intervalo de tiempo hasta el siguiente ajuste para el tipo particular de modulador que se controla para garantizar que se deja suficiente tiempo a cada modulador para responder a cada ajuste antes de aplicar el siguiente.

Cuando se requiere que un modulador electroóptico, en particular un modulador electroóptico Mach-Zehnder, funcione sustancialmente en un punto de polarización de cuadratura, entonces la potencia promedio de las señales ópticas que se emiten a partir de cada una de las salidas debería permanecer sustancialmente igual. En una realización preferida, los medios de control están dispuestos para determinar las características de una señal de control de polarización necesarias para lograr una potencia de salida óptica promedio sustancialmente igual en las salidas como un método para lograr y mantener el funcionamiento de cada modulador en un conmutador de dirección según la reivindicación 1 en un punto de cuadratura.

En una realización preferida, los medios de control comprenden un procesador digital y las señales de potencia comprenden representaciones digitales de la potencia óptica en cada salida de cada modulador.

En una realización preferida adicional, los medios para generar señales de potencia comprenden fotodiodos que tienen una respuesta de frecuencia suficientemente baja para permitir la detección directa de la potencia óptica promedio en una salida respectiva durante un periodo. Esto tiene la ventaja de que la medición de potencia óptica promedio en una señal óptica modulada se simplifica en comparación con una disposición en la que se utilizan fotodiodos que pueden responder a todos los cambios de intensidad debidos a la modulación. En el último caso, se requerirían medios para sumar las potencias de señal indicadas por los fotodiodos durante un periodo de tiempo. Un fotodiodo que tiene una respuesta de frecuencia suficientemente baja en comparación con la frecuencia de modulación indicaría directamente el nivel de potencia óptica promedio.

El controlador de polarización según este primer aspecto de la presente invención está dispuesto para controlar la polarización de varios moduladores electroópticos en un conmutador de dirección según la reivindicación 1, por ejemplo, de una manera entrelazada en el tiempo. Para lograr esto, los medios para generar las señales de potencia y los medios para generar las señales de control de polarización están dispuestos para funcionar para cada uno de la pluralidad de moduladores electroópticos y los medios de control pueden hacerse funcionar para controlar el punto de polarización de cada uno de la pluralidad de moduladores.

En funcionamiento, puede implementarse una fase de configuración inicial en la que el punto de polarización del modulador en el primer escalón se ajusta lo primero de todo para garantizar que todos los moduladores están recibiendo luz antes de que comience el funcionamiento del conmutador.

En cuanto a un segundo aspecto, la presente invención radica en un método para controlar la polarización de cada uno de una pluralidad de moduladores electroópticos en un conmutador de dirección óptico según la reivindicación 9 adjunta.

Preferiblemente, como se comentó anteriormente, para permitir el control dinámico de polarización, el método según este segundo aspecto de la presente invención comprende la etapa adicional de:

(v) repetir las etapas (i) a (iv) para lograr o mantener un punto de polarización predeterminado durante funcionamiento de cada modulador.

Cada funcionamiento de las etapas (i) a (iv) del método, o cada funcionamiento sucesivo según la etapa (v) del método, representa un ciclo de ajuste. Ventajosamente, para permitir la adecuación de los ajustes al tipo particular de moduladores cuya polarización se está controlando, la etapa (iii) comprende además determinar el tamaño de un ajuste de tensión de polarización que va a aplicarse en cada funcionamiento sucesivo de la etapa (v). En una mejora adicional, la etapa (iii) comprende además determinar el intervalo de tiempo entre funcionamientos sucesivos de la etapa (v).

En una aplicación preferida del método según este segundo aspecto de la presente invención, cuando el punto de polarización predeterminado es el punto de polarización de cuadratura de cada modulador en un conmutador de dirección óptico según la reivindicación 9, entonces en la etapa (iii), las características determinadas de una señal de control de polarización son de tal manera que se minimiza la diferencia en la potencia óptica promedio entre las dos

salidas de cada modulador. Esta técnica se aplica al tipo Mach-Zehnder de modulador electroóptico de salida doble para el que los niveles de potencia óptica en las salidas son sustancialmente iguales cuando el modulador está funcionando en su punto de polarización de cuadratura.

5 En disposiciones de moduladores electroópticos según esta invención, no es necesario enlazar a cada salida de modulador con el controlador de polarización para determinar la potencia óptica que se emite. Por ejemplo, cuando una salida de un primer modulador se acopla a la entrada de un segundo modulador, entonces si se conoce la potencia óptica en cada una de las salidas del segundo modulador, la suma de las potencias ópticas emitidas por el segundo modulador proporciona una medida de la potencia óptica emitida por la respectiva salida del primer modulador, menos alguna pérdida fija. Este es el caso en particular de una disposición para un conmutador de dirección óptico según la reivindicación 1.

15 La presente invención según la reivindicación 1 radica en un conmutador de dirección óptico que comprende una pluralidad de moduladores electroópticos interconectados en una disposición escalonada para proporcionar, a partir de una única entrada óptica, una pluralidad de salidas ópticas entrelazadas en el tiempo, comprendiendo además un controlador de polarización para controlar la polarización de cada uno de la pluralidad de moduladores para funcionar en cuadratura.

20 La patente británica número GB 2.259.621 describe un conmutador de dirección óptico que comprende una disposición de clasificación jerárquica de conmutadores electroópticos, teniendo cada conmutador una única entrada y N salidas, en el que cada salida de un conmutador en un rango se conecta a la entrada de un conmutador en el rango de orden superior adyacente. Los conmutadores en el rango de orden más alto final, el que tiene el mayor número de conmutadores y proporciona las salidas del conmutador, se conducen entre estados por un oscilador de frecuencia f, mientras que los conmutadores en cada rango de orden inferior sucesivo se conducen a una frecuencia que es el doble de la frecuencia utilizada en el rango de orden superior adyacente de modo que la frecuencia más alta conduce el modulador de rango de orden más bajo.

25 Un conmutador de dirección óptico tal como el descrito en la patente referida anteriormente puede implementarse convenientemente utilizando moduladores electroópticos Mach-Zehnder que tienen cada uno dos salidas. Sin embargo, los moduladores Mach-Zehnder, en común con tipos similares de modulador electroóptico, son propensos al desplazamiento del punto de polarización. En un conmutador de dirección óptico que comprende múltiples moduladores electroópticos, el desplazamiento del punto de polarización en uno o más moduladores puede hacer que el conmutador de dirección no pueda funcionar. El ajuste independiente a las tensiones de polarización de un gran número de moduladores mediante técnicas manuales, en la medida requerida para mantener un funcionamiento fiable, se considera generalmente poco práctica.

30 Hay diversas ventajas en el método de tensión de control de polarización según se implementa en los controladores de polarización según realizaciones preferidas de la presente invención respecto a los métodos conocidos de control de polarización. Una selección de ventajas incluye:

40 (1) La presencia de una señal de radiofrecuencia (RF) en el electrodo de modulación no afecta a la potencia de salida óptica promedio de cada modulador y por consiguiente el control de polarización puede realizarse en teoría en cualquier momento durante el funcionamiento del modulador que se está controlado.

45 (2) El controlador de polarización es completamente digital en su funcionamiento, permitiendo fácilmente ajustarlo a escala para el control de cualquier número de moduladores y permitiendo la reutilización de gran parte del hardware.

50 (3) El controlador de polarización no se ve afectado por variaciones en la potencia de entrada óptica a los moduladores/ conmutador ya que sólo examina la relación de una salida de un modulador con respecto al otro.

55 (4) La técnica de control de polarización no interfiere con una señal modulada, a excepción de cuando se ajusta el punto de polarización. Sin embargo, siendo una implementación digital, los ajustes de control de polarización pueden programarse para concordar con el patrón de funcionamiento de un sistema anfitrión, por ejemplo reservando tiempo para una fase de calibración de sistema, o asignando ranuras temporales para el ajuste durante el funcionamiento normal.

Realizaciones preferidas de la presente invención se describirán ahora en más detalle y con referencia a los dibujos adjuntos, de los que:

60 la figura 1 es una vista en planta de un modulador Mach Zehnder de salida doble conocido;

la figura 2 es una gráfica que muestra la característica de transferencia de potencia óptica para cada salida del modulador Mach-Zehnder mostrado en la figura 1;

65 la figura 3 es un diagrama que muestra un controlador de polarización según un ejemplo útil para entender la presente invención, aplicado para controlar la tensión de polarización de un modulador Mach Zehnder de salida

doble mostrado en la figura 1;

la figura 4 es un diagrama de flujo que muestra etapas preferidas en funcionamiento del controlador de polarización mostrado en la figura 3; y

5 la figura 5 es un diagrama que muestra un controlador de polarización según una realización preferida de la presente invención aplicado para controlar las tensiones de polarización en varios moduladores Mach-Zehnder dispuestos como un conmutador de dirección óptico.

10 Realizaciones preferidas de la presente invención se describirán a continuación en el presente documento con referencia particular a un controlador de polarización para un conmutador de dirección óptico que comprende más moduladores Mach-Zehnder (MZ) según la reivindicación 1. Varios moduladores MZ se utilizan para implementar un conmutador de dirección óptico y el controlador de polarización está dispuesto para controlar la polarización de todos los moduladores MZ que constituyen el conmutador.

15 Un modulador MZ de salida doble conocido que puede utilizarse como un modulador electroóptico se describirá ahora brevemente con referencia a la figura 1.

20 Con referencia a la figura 1, el modulador 100 MZ comprende un par de guías 110, 115 de onda ópticas, formadas en un sustrato adecuado (no mostrado en la figura 1) dividiendo una guía 105 de onda óptica de entrada en dos bifurcaciones 110 y 115. El material de sustrato, preferiblemente niobato de litio (LiNbO_3), arseniuro de galio (GaAs) o fosfuro de indio (InP), presenta un efecto electroóptico, es decir cambia su índice de refracción óptica cuando se le aplica un campo eléctrico. Se incluye una pequeña asimetría 120 en una de las bifurcaciones 110 del modulador para introducir un desplazamiento de fase a la luz que recorre esa bifurcación 110 en comparación con la luz que recorre la otra bifurcación 115. El desplazamiento de fase introducido por la asimetría 120 se establece normalmente en 90° en la longitud de onda de funcionamiento deseada (nominalmente 1300 o 1550 nm).

25 Las bifurcaciones 110, 115 se juntan en un acoplador 135 direccional que genera las salidas 140, 145 ópticas dobles. El acoplador 135 es una estructura simétrica, formada colocando dos guías de ondas próximas entre sí de manera que la potencia de entrada pueda transferirse entre ellos. Un electrodo 150 de polarización y un plano 155 de tierra están presentes por toda la longitud del acoplador 135 direccional. Éstos se utilizan para aplicar un campo eléctrico de corriente continua (CC) que tiene el efecto de ajustar la longitud efectiva del acoplador 135 y puede utilizarse para ajustar el patrón de acoplamiento, por ejemplo, para igualar la amplitud de las señales luminosas en las dos salidas, para corregir las variaciones de fabricación. En la arquitectura de modulador MZ descrita en este caso, la relación de fase en las entradas (110, 115) al acoplador 135 determina el comportamiento en las salidas 140, 145 de acoplador. En un modulador de salida individual, no se utiliza una salida del acoplador.

30 El modulador 100 MZ está dotado de un electrodo 125 de modulación, ubicado entre las dos bifurcaciones 110, 115 de guía de onda, y un plano 130 de tierra en una o más secciones. El electrodo 125 de modulación y el plano 130 de tierra están situados de modo que cuando se aplica una tensión al electrodo 125 de modulación se establece un campo eléctrico entre el electrodo 125 de modulación y el plano 130 de tierra a través de zonas del sustrato que contienen las bifurcaciones 110, 115 de guía de onda. Preferiblemente, la estructura de modulador MZ está diseñada para permitir que una bifurcación del modulador vea un campo eléctrico 'positivo' (por consiguiente que aumenta su índice de refracción) mientras que la otra bifurcación ve un campo eléctrico 'negativo' (por consiguiente que reduce su índice de refracción). El efecto neto de aplicar una tensión al electrodo 125 de modulación es cambiar la relación de fase entre señales luminosas que pasan a través de las diferentes bifurcaciones 110, 115 en el acoplador 135 de salida, y por consiguiente cambiar los niveles de salida óptica en las respectivas salidas 140, 145 ópticas. Para una entrada (105) de señal portadora óptica dada para el modulador 100 MZ, los niveles de potencia de salida óptica siguen una característica de transferencia sinusoidal con aumento o disminución de tensión en el electrodo 125 de modulación, como se muestra en la figura 2. El electrodo 125 de modulación está diseñado como una línea de transmisión, de modo que una señal de modulación se desplaza con la luz a través del dispositivo. Esto permite lograr altas frecuencias de modulación.

35 Con referencia a la figura 2, se proporcionan dos gráficas 200 y 205 para mostrar las características de transferencia de potencia de salida óptica en cada una de las salidas 140 y 145 ópticas respectivamente a medida que se varía la tensión aplicada al electrodo 125 de modulación. Como puede verse, la potencia de salida óptica varía sinusoidalmente a medida que se varía la tensión aplicada, con una diferencia de fase de 180° entre las gráficas 200, 205. Cuando la tensión aplicada es tal que la potencia de salida óptica está en el punto central de su característica de transferencia, es decir en los puntos 210 en las gráficas 200, 205 de la figura 2, se dice que el modulador está en un punto de cuadratura, o simplemente "funcionando en cuadratura", y los niveles de potencia de salida óptica en las salidas 140, 145 son sustancialmente iguales. Éstas son las zonas más lineales de la característica de transferencia. Éstos son también los puntos en los que hay una relación de fase de 90° entre la luz que se desplaza a través de las respectivas bifurcaciones de la guía de onda.

60 Como puede verse en la figura 2, la función 200, 205 de transferencia es una función de repetición y como tal hay muchos puntos 210 de cuadratura a diferentes tensiones de polarización pero todos con la misma salida de

potencia. Un punto de cuadratura, en cuya zona está aumentando la potencia de salida, en una salida particular, con tensión de polarización en aumento se denomina "punto de polarización de cuadratura de pendiente positiva" para esa salida. Cuando la potencia de salida está disminuyendo en esa salida con tensión de polarización en aumento, los respectivos puntos de cuadratura se denominan "puntos de polarización de cuadratura de pendiente negativa" para esa salida.

En la práctica, el desplazamiento de fase de 90° en las bifurcaciones de modulador raramente se logra (si es que se logra), por lo que necesita aplicarse una tensión de polarización de CC al modulador para corregir esto. Para ello puede proporcionarse un electrodo 160 de polarización. Debido a diversos procesos que incluyen variar la temperatura y la carga retenida, el punto de polarización se desplazará a una tasa de entre unos pocos mV por hora y varios voltios por hora, dependiendo de la construcción de modulador. Por consiguiente, una solución de tensión de polarización fija (que se establece una única vez) rara vez es adecuada. Esto es especialmente cierto en una disposición de moduladores MZ que forman un conmutador de dirección de alta velocidad en el que un desplazamiento significativo del punto de cuadratura por cualquier modulador MZ puede hacer que todo el conmutador deje de funcionar.

Según un ejemplo para entender la presente invención, se proporcionan un aparato y un método para monitorizar y controlar el punto de polarización de un modulador MZ de salida doble. En este ejemplo en particular, el punto de polarización para un modulador MZ de salida doble se determina monitorizando la potencia de salida óptica en cada una de las salidas ópticas y determinando la potencia de salida promedio de cada salida durante un periodo de tiempo. Si el modulador MZ está en cuadratura, entonces la potencia de salida óptica promedio de las dos salidas será nominalmente igual. Entonces, la polarización de cuadratura se logra y se mantiene ajustando una tensión de polarización que se aplica al electrodo 160 de polarización, o alternativamente al electrodo 125 de modulación como una desviación de CC, para equilibrar la potencia óptica en dos salidas. Un aparato para implementar este método general de control de polarización se describirá ahora con referencia a la figura 3.

Con referencia a la figura 3, el aparato comprende un modulador 300 MZ que tiene una entrada 305 óptica para recibir una señal portadora óptica y un par de salidas 310, 315 ópticas etiquetadas A y B respectivamente. El modulador 300 MZ está también dotado de una entrada 320 de tensión de polarización para recibir una señal de tensión de polarización.

Para permitir la monitorización de la potencia de salida óptica desde el modulador 300, se proporcionan acopladores 325 y 330 de derivación óptica en las salidas 310 y 315 ópticas respectivamente para derivar hasta el 5% de la potencia de las señales ópticas de salida. Las señales ópticas derivadas se alimentan a respectivos fotodiodos 335 y 340, elegidos preferiblemente para tener una respuesta de frecuencia baja. El uso de fotodiodos 335, 340 con una respuesta de frecuencia baja es ventajoso porque los fotodiodos 335, 340 son por tanto insensibles a la rápida conmutación de encendido/apagado de las señales luminosas de salida moduladas y pueden utilizarse directamente para medir niveles potencia óptica promedio en las salidas 310, 315. Si se utilizaran fotodiodos 335, 340 con una respuesta de frecuencia alta, entonces se requeriría una disposición más compleja para medir la potencia de salida óptica promedio basándose en un detector de integración que pueda sumar los niveles de potencia óptica fluctuantes durante un periodo de tiempo.

Las señales eléctricas emitidas por los fotodiodos 335 y 340 se amplifican en respectivos amplificadores 345 y 350 que tienen ganancias ajustables y las tensiones de salida, V_A y V_B respectivamente, indicativas de la potencia de salida óptica en las respectivas salidas 310, 315 ópticas, se digitalizan en un convertidor 355 analógico a digital como salida para un procesador 360. El empleo de ganancias ajustables en los amplificadores 345, 350 permite compensar los errores diferenciales en el sistema, por ejemplo entre las derivaciones 325, 330 ópticas, entre los fotodiodos 335, 340 o debido a un modulador 300 no ideal.

El procesador 360, que puede ser de cualquier tipo conveniente tal como un procesador de señal digital (DSP), microcontrolador, disposición de puertas programables en campo (FPGA) o un ordenador personal (PC), está dispuesto para implementar un algoritmo, que va a describirse más adelante, para determinar qué nivel de tensión de polarización es necesario aplicar a la entrada 320 de tensión de polarización basándose en las indicaciones recibidas de potencia de señal de salida óptica. El procesador 360 está dispuesto para emitir, en forma digital, una señal de tensión de polarización apropiada. La señal de tensión de polarización digital se convierte en una tensión de polarización analógica en un convertidor 365 digital a analógico y, tras la amplificación (370) la tensión de polarización resultante V_{POL} se introduce en el modulador 300 MZ en la entrada 320 de tensión de polarización. La entrada 320 de tensión de polarización puede ser una conexión a un electrodo 160 de polarización en el ejemplo del modulador 100 MZ descrito anteriormente con referencia a la figura 1. Alternativamente, la entrada 320 de tensión de polarización puede acoplarse a un electrodo de modulación (125 en la figura 1) por medio de una denominada T de polarización. En una disposición de este tipo, se acopla una tensión de polarización de CC al electrodo 125 de modulación por medio de un inductor, y se acopla una señal de modulación aplicada (por ejemplo una señal de comunicaciones RF) al electrodo 125 por medio de un condensador.

Un algoritmo para generar las tensiones de polarización que van a aplicarse al modulador 300 MZ según este ejemplo se describirá ahora con referencia a la figura 4. Como se presenta en la figura 4, este algoritmo está

- diseñado para el ajuste de la tensión de polarización para un punto de cuadratura de pendiente positiva. En resumen, el algoritmo permite al procesador 360 evaluar los niveles relativos de potencia óptica medida, representados por V_A y V_B , en las salidas 310, 315 y si es necesario ajustar la tensión de polarización V_{POL} con el objetivo de mantener el nivel promedio de las dos entradas de tensión digitalizadas (V_A y V_B) sustancialmente igual.
- 5 Preferiblemente, el algoritmo funciona de manera continua mientras que el modulador 300 MZ está en funcionamiento. Sin embargo, el algoritmo también puede estar dispuesto para funcionar de manera intermitente con respecto al modulador 300 MZ, por ejemplo a intervalos predefinidos, particularmente cuando va a controlarse más de un modulador MZ en un modo entrelazado en el tiempo por el procesador 360.
- 10 Con referencia a la figura 4, se proporciona un diagrama de flujo para mostrar las etapas en funcionamiento del algoritmo utilizado en el ejemplo mencionado anteriormente. Comenzando en la ETAPA 400, se establece un valor inicial para la tensión de polarización a cero voltios (0 V). En la ETAPA 405, se leen las representaciones digitales de las tensiones V_A y V_B y se comparan en la ETAPA 410. Si V_A es mayor que V_B , entonces en la ETAPA 415 el procesador 360 se dispone para reducir la tensión de polarización V_{POL} en un decremento predeterminado. Si V_A es menor que V_B , entonces en la ETAPA 420 el procesador 360 se dispone para aumentar la tensión de polarización V_{POL} en el incremento predeterminado. Si V_A es sustancialmente igual a V_B , entonces no se realiza ningún ajuste a la tensión de polarización V_{POL} . Cuando se ajusta para un punto de cuadratura de pendiente negativa, las pruebas en la ETAPA 410 se invierten de modo que las acciones en la ETAPA 415 y 420 se llevan a cabo en el caso de que V_A sea menor que V_B y V_A sea mayor que V_B respectivamente.
- 15
- 20 Tras realizar todos los ajustes requeridos a la tensión de polarización V_{POL} , en la ETAPA 425, el procesador 360 se dispone para esperara durante un periodo de tiempo predeterminado, por ejemplo 10 ms, antes de volver a la ETAPA 405 y comenzar un nuevo ciclo de ajuste. El algoritmo debe esperar entre ajustes dado que la respuesta del modulador 300 a los cambios de tensión de polarización no es instantánea, en particular con moduladores de
- 25 $LiNbO_3$. Preferiblemente, la longitud del periodo de espera se establece en combinación con la magnitud del incremento o decremento predeterminado en la tensión de polarización en la ETAPA 415 y la ETAPA 420. Preferiblemente, se requiere un periodo de espera de entre 10ms y 1s, dependiendo de la magnitud del incremento o decremento predeterminado. En la práctica, si el procesador 360 determina que se requiere un gran ajuste de la tensión de polarización V_{POL} , entonces el algoritmo de la figura 4 garantiza que, eligiendo apropiadamente el incremento o decremento de tensión y el periodo de espera, el ajuste se realiza a una tasa alcanzable por el modulador 300 particular.
- 30
- Como se mencionó anteriormente, los fotodiodos 335, 340 son preferiblemente de respuesta de frecuencia baja, permitiendo utilizar los niveles de tensión amplificada V_A y V_B directamente por el procesador 360 como
- 35 representativos de la potencia óptica promedio en las salidas 310, 315. En una disposición alternativa, el procesador puede disponerse en la ETAPA 405 para monitorizar los niveles de tensión V_A y V_B tal como se generan por los fotodiodos 335, 340 de respuesta de frecuencia alta durante un periodo de tiempo predeterminado dentro de un ciclo de ajuste para determinar la potencia óptica promedio en cada una de las salidas 310, 315 para ese ciclo. Por supuesto hay otras técnicas disponibles para integrar las mediciones de tensión V_A y V_B para proporcionar
- 40 mediciones de potencia de salida óptica promedio, por ejemplo utilizando las tensiones V_A y V_B para cargar los condensadores respectivos durante un periodo de tiempo dentro de cada ciclo de ajuste de modo que el procesador 360 puede medir las tensiones a través de cada uno de los condensadores tras ese periodo de tiempo en la ETAPA 405 para determinar las potencias ópticas promedio para cada salida 310, 315.
- 45
- Mientras que un modulador MZ de salida doble tal como el descrito anteriormente con referencia a la figura 1 se utiliza a menudo en sistemas de distribución de señal analógica (por ejemplo televisión por cable (CATV)), otra aplicación está en la conmutación. Con el modulador polarizado en cuadratura, si una señal RF de potencia apropiada se aplica al electrodo 125 de modulación, una entrada (105) óptica conmutará de manera alterna entre las salidas 140, 145 ópticas. La capacidad de un modulador MZ para funcionar como un conmutador puede
- 50 aprovecharse para realizar un conmutador de dirección óptico de alta velocidad, como se describe por ejemplo en la patente británica de número GB 2.259.621, colocando en cascada moduladores MZ en una disposición jerárquica de dos o más rangos. Cada rango de moduladores puede conducirse a través de sus electrodos de modulación con una señal RF sinusoidal apropiada para dar una secuencia de salida requerida desde el conmutador.
- 55
- Según una primera realización de la presente invención, se proporciona un controlador de polarización para controlar las tensiones de polarización para varios moduladores electroópticos dispuestos en un conmutador según la reivindicación 1. En particular, un controlador de polarización se describirá ahora con referencia a la figura 5, aplicado al control de tensiones de polarización para un conmutador de dirección óptico del tipo al que se hizo referencia anteriormente, que comprende siete moduladores MZ de salida doble. Sin embargo, cualquier disposición
- 60 de modulador múltiple puede tener control de polarización proporcionado convenientemente por un controlador de polarización según la primera realización de la presente invención. El control de polarización para cualquier modulador puede proporcionarse independientemente del de para cualquier otro en la disposición.
- 65 Con referencia a la figura 5, el conmutador 500 de dirección óptico se muestra en combinación con un controlador 505 de polarización según esta primera realización de la presente invención. El conmutador 500 de dirección comprende una disposición jerárquica de moduladores MZ de salida doble, en este ejemplo dispuestos en tres

rangos. En el primer rango, un único modulador 510 MZ, designado "MZM11", recibe una señal portadora óptica en una entrada 515 óptica. Cada una de las salidas 520, 525 está enlazada a la entrada 530, 535 óptica de uno respectivo diferente de los dos moduladores 540 MZ (MZM21 y MZM22) en el segundo rango. Cada una de las salidas 545 de los moduladores 540 en el segundo rango enlaza con entradas 550 ópticas de moduladores respectivos diferentes de los cuatro moduladores 555 MZ (MZM31, MZM32, MZM33, MZM34) en el tercer rango. Las salidas 560 de los moduladores 555 MZ en el tercer rango son las salidas ópticas del conmutador 500 de dirección. Cuando los moduladores 510, 540, 555 MZ se conducen a través de sus electrodos de modulación (no mostrados en la figura 5) por señales de radiofrecuencia (RF) apropiadamente en fase, las salidas de los moduladores 510, 540, 555 pueden conmutarse entre los estados encendido y apagado en una secuencia predeterminada de manera que un conjunto de señales ópticas entrelazadas en el tiempo emerge de las salidas 560 del conmutador 500.

Para que el conmutador 500 funcione correctamente, es importante que cada uno de los moduladores MZ esté polarizado con exactitud para funcionar en o cerca de su punto de cuadratura. También es importante que los moduladores se polaricen para funcionar en la zona del punto de cuadratura correcto (pendiente positiva o negativa, según se requiera, con respecto a una salida dada) en la característica de transferencia (véase la figura 2), ya que la polarización en la pendiente equivocada da como resultado una conmutación "al revés".

Sin embargo, como se comentó anteriormente, el desplazamiento del punto de polarización surge de varias razones y se requiere alguna forma de control dinámico de polarización. Para ello, el controlador 505 de polarización captura, por medio de un acoplador 565 de derivación óptica previsto en cada una de las ocho salidas 560 de los moduladores 555 MZ de tercer rango, aproximadamente el 5% de la potencia de las señales ópticas de cada una de esas salidas 560. Las señales capturadas se pasan a través de fibras 570 ópticas separadas (sólo se muestra una en la figura 5) a los respectivos fotodiodos 575. La salida de las señales analógicas de cada fotodiodo 575 se amplifica en amplificadores 580 con ganancia ajustable y las tensiones de salida, V_1 a V_8 , representativas de la potencia de salida óptica en las respectivas salidas 560 de los moduladores 555 MZ, se introducen en un convertidor 582 analógico a digital para su conversión en señales de tensión digitales. Un procesador 585 recibe las señales de tensión digitales y las procesa según un algoritmo que va a describirse más adelante para determinar las tensiones de polarización apropiadas V_{POL11} , V_{POL21} , V_{POL22} , ..., V_{POL34} que hay que generar para mantener el funcionamiento en el punto de cuadratura de cada uno de los respectivos moduladores 510, 540, 555 MZ en el conmutador 500. Las señales de tensión de polarización determinadas se emiten en forma digital hacia un convertidor 587 digital a analógico y las tensiones de polarización V_{POL11} a V_{POL34} para los moduladores "MZM11" a "MZM34" respectivamente se emiten individualmente (592), tras la amplificación (590), y se pasan a las entradas 595 de tensión de polarización de los respectivos moduladores.

Un algoritmo preferido para la implementación por el procesador 585 se basa en el algoritmo descrito anteriormente con referencia a la figura 4. Se fundamenta en la comprensión de que no es necesario monitorizar todas las salidas de los moduladores MZ individuales en el conmutador 500 de dirección para determinar las tensiones de polarización correctas que hay que aplicar. Sólo es necesario monitorizar las salidas 560 de los moduladores 555 en el tercer rango y a partir de estas salidas 560 pueden derivarse las tensiones de polarización requeridas para los demás moduladores 510, 540. Esto es una ventaja particular con la disposición jerárquica de moduladores en el conmutador 500 de dirección óptico. En otras disposiciones de moduladores múltiples, puede ser necesario monitorizar las salidas de cada modulador por separado para derivar las tensiones de control de polarización correctas que hay que aplicar.

Considerando, en primer lugar, los moduladores 555 del tercer rango del conmutador 500 de dirección, el algoritmo de la figura 4 puede aplicarse sin modificación para determinar las tensiones de polarización requeridas para cada modulador 555 por separado utilizando las señales ópticas capturadas de los respectivos acopladores 565 de derivación.

Para determinar la tensión de polarización requerida para uno de los moduladores 540 en el segundo rango, V_{POL21} para el modulador "MZM21" por ejemplo, la potencia de salida óptica en cada una de las salidas 545 de ese modulador se deriva de la suma de las potencias de salida en el respectivo modulador 555 de tercer rango que alimenta la salida, menos alguna pérdida fija. Esta suma está representada por la suma de las tensiones emitidas a partir de los respectivos amplificadores 580. En la práctica la "pérdida fija" se supone que es la misma para todos los moduladores en el conmutador 500 y el algoritmo preferido para el ajuste de tensión de polarización, según se describió anteriormente con referencia a la figura 4, permite ignorar la pérdida fija en realizaciones preferidas de la presente invención. Así la potencia de salida de la salida 545 superior en la figura 5 del modulador "MZM21" se determina a partir de la suma de las potencias de salida de las salidas 560 del modulador "MZM31", representada por V_1+V_2 . De manera similar, la potencia de salida en las más bajas de las salidas del modulador "MZM21" se determina a partir de la suma de las potencias de salida procedentes de las salidas 560 del modulador "MZM32", representada por V_3+V_4 . Ventajosamente, no es necesario polarizar correctamente ninguno de los moduladores de tercer rango "MZM31" y "MZM32" para derivar las potencias de salida del modulador de segundo rango "MZM21". El algoritmo de la figura 4 puede hacerse funcionar, por tanto, utilizando respectivas sumas de tensiones que representan la potencia óptica de salida procedente de las salidas 560 de los respectivos moduladores 555 de tercer rango, para determinar las tensiones de polarización V_{POL21} y V_{POL22} que van a aplicarse a los moduladores 540 de segundo rango.

5 Para determinar la tensión de polarización V_{POL11} requerida para el modulador 510 de primer rango, designado "MZM11" en la figura 5, se aplica un proceso similar en el que la potencia óptica de salida en cada una de las salidas 520, 525 del modulador "MZM11" es igual a la suma de las potencias ópticas en las cuatro salidas 560 de los dos moduladores 555 de tercer rango que cada salida 520, 525 eventualmente alimenta. En particular, la potencia óptica en la salida 520 del modulador 510 se determina a partir de la suma de las potencias de salida para los dos moduladores "MZM31" y "MZM32", representada por $V_1+V_2+V_3+V_4$. La potencia óptica para la salida 525 del modulador 510 se determina a partir de la suma de la potencias de salida para los dos moduladores "MZM33" y "MZM34", representada por $V_5+V_6+V_7+V_8$. El algoritmo de la figura 4 se aplica por tanto para determinar la tensión de polarización V_{POL11} requerida para el modulador 510 de primer rango utilizando las sumas correspondientes de tensiones de las señales (565) ópticas de salida capturadas.

15 Preferiblemente, en la práctica, el algoritmo debe llevar a cabo una fase de configuración inicial que comprende establecer la tensión de polarización para el primer modulador 510 ("MZM11") en la estructura y a continuación establecer las tensiones de polarización para los moduladores desde el rango más bajo hasta el más alto. Si el algoritmo tratara de establecer las tensiones de polarización para los moduladores 555 con el rango más alto inicialmente, existe el riesgo de que algunos de esos moduladores 555 pudieran no estar recibiendo inicialmente nada de luz (si, por ejemplo, "MZM11" estuviera sacando toda su potencia óptica por una salida), haciendo imposible la configuración.

20 Una vez completada la fase de configuración inicial (es decir todos los moduladores están viendo luz), los ajustes pueden o bien hacerse en cualquier combinación concebible, por ejemplo un modulador cada vez, todos a la vez o bien un rango cada vez. Esto puede lograrse en teoría ya que la información procedente de un único conjunto capturado de niveles de potencia de salida proporciona toda la información requerida para determinar los estados de polarización de cada modulador en el conmutador 500 de dirección. Sin embargo, en la práctica, el ajuste de, por ejemplo, un rango de moduladores cada vez ayuda a evitar oscilaciones lentas en el estado de polarización a través del conmutador provocadas por la respuesta generalmente lenta de los moduladores a los cambios de tensión de polarización.

30 El ajuste a las tensiones de polarización puede realizarse (1) de forma continua, (2) periódicamente bajo el control del procesador 585, (3) periódicamente a petición del procesador 585, o (4) periódicamente a petición de un sistema anfitrión. Además de ejecutar el algoritmo de control de polarización, el procesador 585 también puede interconectarse con otro equipo (el 'sistema anfitrión') para indicar la condición de polarización del conmutador 500, suministrar información de diagnóstico, y detener/ iniciar el ajuste.

REIVINDICACIONES

1. Conmutador (500) de dirección óptico que comprende

5 una pluralidad de moduladores (510, 540, 555) electroópticos de salida doble interconectados en una disposición escalonada en el que un primer escalón, que tiene un único modulador (510) dispuesto para recibir una señal (515) de entrada óptica, está acoplado ópticamente a un escalón final que tiene al menos dos moduladores (555) de escalón final dispuestos para emitir una pluralidad de señales (560) ópticas derivadas de dicha señal (515) de entrada óptica, de manera que la pluralidad de moduladores (510, 540, 10 555) electroópticos comprende al menos un primer (540 - MZM 21), un segundo (555 - MZM 31) y un tercer (555 - MZM 32) modulador de salida doble, estando dispuesto el primer modulador (540 - MZM 21) en dicho primer escalón para recibir la señal (515) de entrada óptica y teniendo una primera salida (545) óptica acoplada a una entrada del segundo modulador (555 - MZM 31) y una segunda salida (545) óptica acoplada a una entrada del tercer modulador (555 - MZM 32),

15 caracterizado porque el conmutador (500) de dirección óptico comprende además un controlador (505) de polarización que tiene:

20 medios dispuestos para llevar a cabo mediciones de la potencia óptica de cada una de dicha pluralidad de señales (560) ópticas emitidas por los moduladores (555) de dicho escalón final;

medios de control dispuestos para derivar, a partir de sólo dichas mediciones de potencia óptica de cada una de dicha pluralidad de señales (560) ópticas emitidas por los moduladores (555) de dicho escalón final, la potencia óptica promedio de señales (530, 535, 545) emitidas a partir de cada uno de dicha pluralidad de moduladores (510, 540, 555) y para determinar señales (595) de control de polarización respectivas para lograr y mantener el funcionamiento de cada uno de dicha pluralidad de moduladores (510, 540, 555) en su punto de polarización de cuadratura; y

25 medios dispuestos para generar dichas señales (595) de control de polarización respectivas y para aplicarlas a los respectivos moduladores (510, 540, 555).
- 35 2. Conmutador (500) de dirección óptico según la reivindicación 1, en el que dichos medios de control están dispuestos para determinar tensiones de polarización que van a aplicarse como las señales (595) de control de polarización respectivas a cada uno de dicha pluralidad de moduladores electroópticos de salida doble.
- 40 3. Conmutador (500) de dirección óptico según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que dichos medios de control están dispuestos para ajustar el punto de polarización de cada uno de dicha pluralidad de moduladores electroópticos de salida doble por medio de un proceso iterativo que comprende una pluralidad de ciclos de ajuste.
- 45 4. Conmutador (500) de dirección óptico según la reivindicación 3, en el que dichos medios de control están dispuestos para determinar el tamaño de un ajuste a las señales (595) de control de polarización para un ciclo de ajuste dado.
- 50 5. Conmutador (500) de dirección óptico según la reivindicación 4, en el que dichos medios de control están dispuestos para determinar el intervalo de tiempo entre ajustes sucesivos a dichas señales (595) de control de polarización.
- 55 6. Conmutador (500) de dirección óptico según una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, en el que dichos medios de control están dispuestos para determinar ajustes que van a realizarse a la señal de control de polarización de cada modulador de modo que las señales (560) ópticas en las dos salidas de cada modulador son de igual potencia óptica promedio y cada modulador está funcionando en su punto de cuadratura.
- 60 7. Conmutador (500) de dirección óptico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichos medios de control comprenden un procesador (585) digital y dichas mediciones de potencia óptica de las señales (560) emitidas a partir de cada uno de dicha pluralidad de moduladores (555) de dicho escalón final comprende representaciones digitales de la potencia óptica en cada salida de cada modulador.
- 65 8. Conmutador (500) de dirección óptico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichos medios para medir la potencia óptica de las señales (560) emitidas por los moduladores (555) de dicho escalón final comprenden fotodiodos (575) que tienen una respuesta de frecuencia suficientemente baja en comparación con la frecuencia de la conmutación de encendido/apagado de las señales (560) ópticas de salida moduladas para permitir la detección directa de la potencia óptica promedio en una salida respectiva durante un periodo.

9. Método para controlar la polarización de cada uno de una pluralidad de moduladores (510, 540, 555) electroópticos dispuestos para formar un conmutador (500) de dirección óptico, en el que el conmutador de dirección óptico comprende al menos un primer (540 - MZM 21), un segundo (555 - MZM 31) y un tercer (555 - MZM 32) modulador de salida doble, teniendo el primer modulador (540 - MZM 21) una primera salida (545) óptica acoplada a una entrada del segundo modulador (555 - MZM 31) y una segunda salida (545) óptica acoplada a una entrada del tercer modulador (555 - MZM 32), comprendiendo el método las etapas de:
- 5
- (i) medir la potencia óptica en cada una de las salidas (545) de los moduladores segundo (555 - MZM 31) y tercero (555 - MZM 32) y derivar a partir de los mismos la potencia de salida en cada una de las salidas (545) primera y segunda del primer modulador (540 - MZM 21) sumando las potencias ópticas medidas en las salidas (560 - salidas 1, 2, 3, 4) del segundo modulador (555 - MZM 31) y el tercer modulador respectivamente;
- 10
- (ii) determinar las potencias ópticas promedio respectivas para las salidas de los moduladores primero (540 - MZM 21), segundo (555 - MZM 31) y tercero (555 - MZM 32) durante un periodo utilizando las potencias medidas y derivadas de la etapa (i);
- 15
- (iii) determinar dichas señales de control de polarización para cada uno de dichos moduladores primero (540 - MZM 21), segundo (555 - MZM 31) y tercero (555 - MZM 32); y
- 20
- (iv) generar dichas señales de control de polarización respectivas para emitir al primer (540 - MZM 21), segundo (555 - MZM 31) y tercer (555 - MZM 32) modulador.
- 25
10. Método según la reivindicación 9, que además comprende la etapa de:
- (v) repetir las etapas (i) a (iv) para lograr o mantener un punto de polarización predeterminado durante el funcionamiento de cada modulador (540 - MZM 21).
- 30
11. Método según la reivindicación 10, en el que etapa (iii) comprende además determinar el tamaño de un ajuste de señal (595) de control de polarización que va a aplicarse a cada funcionamiento sucesivo de la etapa (v).
- 35
12. Método según la reivindicación 10 o la reivindicación 11, en el que etapa (iii) comprende además determinar el intervalo de tiempo entre funcionamientos sucesivos de la etapa (v).
- 40
13. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en el que dicho punto de polarización predeterminado es el punto de polarización de cuadratura de cada modulador y en el que, en la etapa (iii), la señal (595) de control de polarización se determina de modo que se minimiza o reduce la diferencia en la potencia óptica promedio entre las dos salidas de cada modulador.

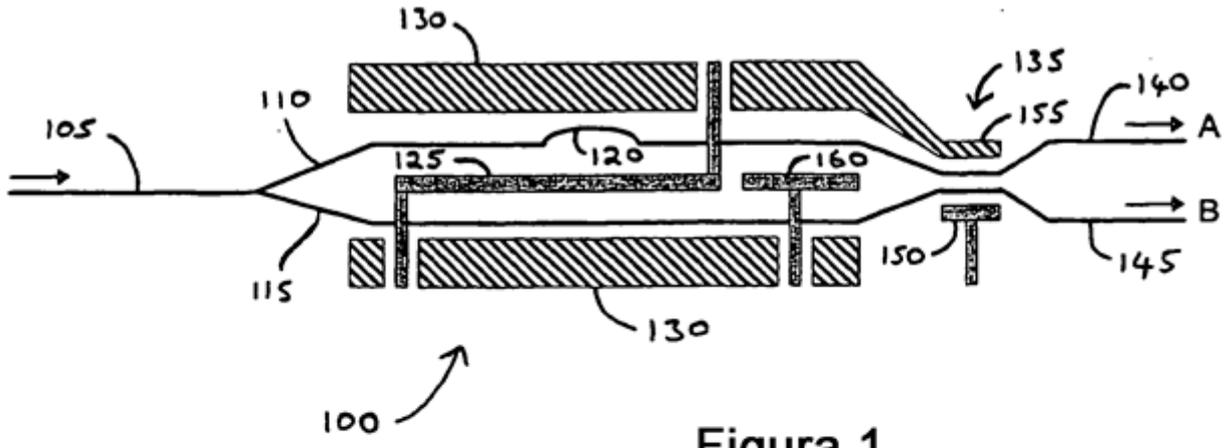


Figura 1

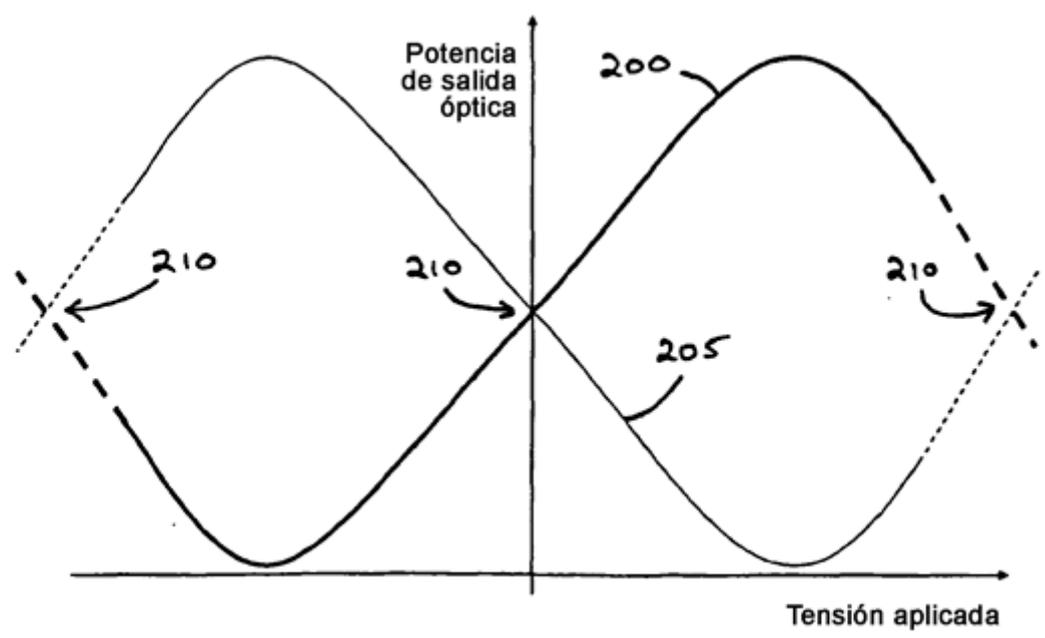


Figura 2

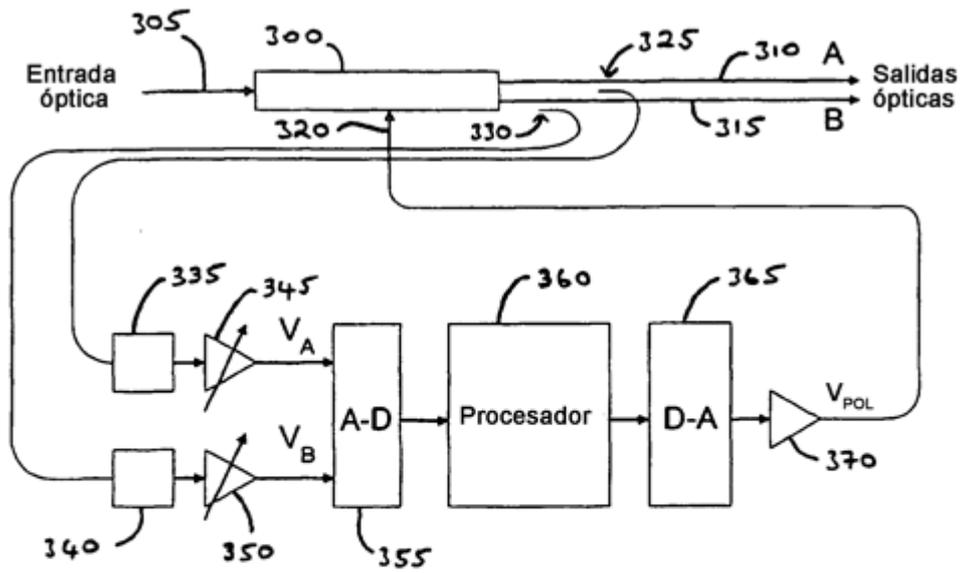


Figura 3

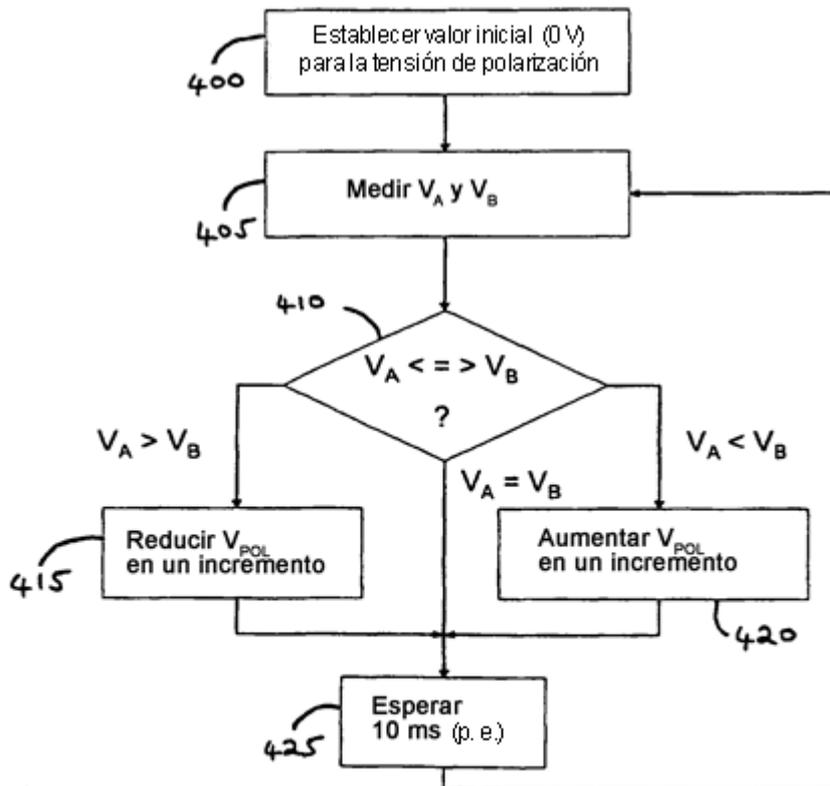


Figura 4

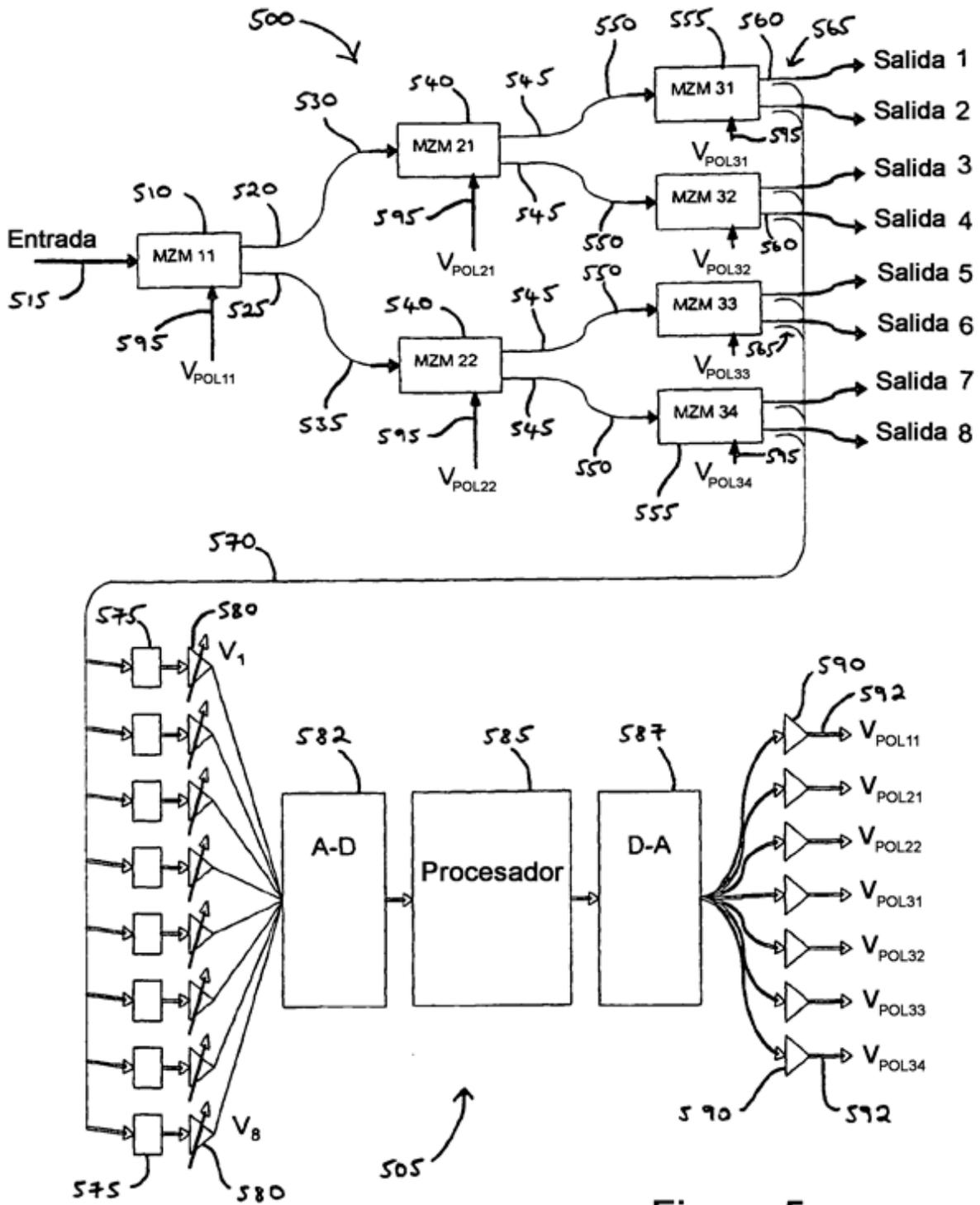


Figura 5