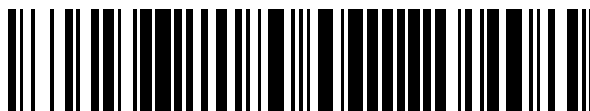


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 885 807**

51 Int. Cl.:

H01Q 3/26

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.04.2014** E 14165478 (0)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.07.2021** EP 2797167

54 Título: **Circuito de alimentación distribuida para red de formación de haces de antena**

30 Prioridad:

26.04.2013 FR 1300972

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

15.12.2021

73 Titular/es:

THALES (50.0%)

Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade Nord

92400 Courbevoie , FR y

DAS PHOTONICS, S.L. (50.0%)

72 Inventor/es:

CAILLE, GÉRARD;

SOTOM, MICHEL;

PIQUERAS RUIPEREZ, MIGUEL ANGEL y

MENGUAL CHULIA, TERESA

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 885 807 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

Circuito de alimentación distribuida para red de formación de haces de antena

La invención se refiere al campo de las redes de formación de haces de antena para sistemas de antenas. En concreto, se trata de un circuito de alimentación distribuida para una red de formación de haces.

5 El campo de la invención es el de los sistemas de antenas, en particular para las antenas de satélites. Los sistemas de antenas de satélite tienen la capacidad de generar múltiples haces de antena en diferentes direcciones de observación. Estas antenas multihaz se utilizan a bordo de un satélite para aplicaciones de telecomunicaciones en diferentes bandas de frecuencia, por ejemplo, la banda Ka para aplicaciones multimedia, la banda Ku o C para enlaces de comunicación punto a punto o incluso las bandas L o S para comunicaciones móviles por satélite. Los sistemas de antenas tienen la ventaja de permitir la reconfiguración de los haces individuales, incluyendo su número y dirección de apuntamiento.

Para ello, una antena multihaz requiere estar acoplada a una red de formación de haces encargada de dirigir la señal de alimentación adecuada a los diferentes elementos de antena del conjunto de antenas para configurar los haces de antena generados por cada uno de dichos elementos.

15 El campo de la invención es, por tanto, también el de las redes de formación de haces de antena. Un subcampo se refiere a las redes de formación de haces matriciales conocidas como matrices de Butler. Una matriz de Butler es un dispositivo de microondas pasivo compuesto por acopladores híbridos y variadores de fase de fase. Dicho dispositivo es conocido en el campo de los sistemas de antenas y se describe en la publicación "Jesse Butler, Ralph Lowe, Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas, Electronic Design, volumen 9, pp. 170-173, 12 de abril de 1961. Para una señal de microondas producida en una de sus entradas, permite obtener una distribución de amplitud equivalente de esta señal en todas las salidas, con un incremento de fase regular entre cada salida consecutiva.

25 Cuando los puertos de salida de una matriz de Butler se conectan a los elementos radiantes de un conjunto de antenas, la señal de microondas inyectada en cada entrada del conjunto es radiada por el conjunto de antenas en una dirección predeterminada y un haz de antena direccional. Todos los haces de la antena generados a través de los distintos elementos radiantes están uniformemente espaciados y son ortogonales. La propiedad de que los haces sean ortogonales es importante para lograr un buen aislamiento de los diferentes canales entre sí.

Una ventaja de la matriz de Butler es que requiere un número mínimo de acopladores, del orden de $N \cdot (\log_2 N) / 2$ en lugar de $2N(N-1)$, para un conjunto convencional de conformación de haces, siendo N el número de salidas de la matriz igual al número de haces de antena a generar.

35 Las matrices de Butler se utilizan generalmente para las señales de microondas o, más generalmente, para las señales eléctricas en la gama de frecuencias de microondas. La tecnología utilizada tradicionalmente para construir un conjunto de Butler es la de guía de ondas, que tiene el inconveniente de ser muy voluminosa. En efecto, para las aplicaciones de a bordo, un problema que hay que resolver es el de la miniaturización de dichos dispositivos, ya que la compacidad de un dispositivo de antena es una ventaja importante, especialmente cuando aumenta el número de elementos de antena y, por tanto, indirectamente, el número de salidas de la matriz de Butler.

40 Una solución conocida al problema de la huella de las matrices de Butler basadas en guías de ondas es convertir la señal eléctrica a una frecuencia de microondas en una señal óptica, de modo que la matriz de Butler pueda implementarse como una disposición de acopladores y líneas de retardo implementadas por un circuito integrado fotónico PIC (photonic integrated circuit). Dado que la longitud de onda de una señal óptica es intrínsecamente mucho menor que la de una señal eléctrica a frecuencia de microondas, esto mejora la compacidad del dispositivo.

45 Las soluciones para implementar matrices de Butler utilizando la tecnología de circuitos integrados fotónicos se describen en la publicación científica « J. T. Gallo, y R. DeSalvo, Experimental Demonstration of Optical Guided-Wave Butler Matrices, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 45, N°8, agosto 1997 " o en la publicación internacional de la solicitud WO 2003/079101.

Además, el estado de la técnica relativo a la invención incluye también las enseñanzas descritas en los siguientes documentos: FR2929764, US6426721, US6337660 y CA2100839.

50 El documento WO 2003/079101 describe un dispositivo del tipo Matriz de Butler basado en un sistema óptico heterodino que recibe una señal óptica como entrada. El dispositivo descrito en este trabajo se basa en variadores de fase de fase de valor fijo que se diseñan en el dominio óptico.

Las arquitecturas propuestas se basan en sistemas ópticos heterodinicos que requieren un control de fase óptica muy preciso y la implementación de complejos bucles de control de fase.

Uno de los problemas de este tipo de arquitectura es la precisión de los variadores de fase de fase necesarios para hacer una matriz de Butler. De hecho, como se ha mencionado anteriormente, una matriz Butler se compone

5 tradicionalmente de acopladores híbridos, pero también de variadores de fase de fase. La disposición de estos acopladores y variadores de fase permite realizar la función de transferencia matricial deseada, que debe ser unitaria o al menos ortogonal, en particular para configurar las fases de las señales de salida de la matriz. Para una matriz con 8 entradas y 8 salidas, los desplazamientos de fase necesarios son múltiplos de $\pi/8$ o $22,5^\circ$. En la práctica, un variador de fase se realiza mediante una línea de retardo. Sin embargo, en el dominio óptico, la longitud de onda (directamente relacionada con el desplazamiento de fase a imprimir) es muy pequeña, normalmente del orden de unos pocos nanómetros. Se puede ver que hay un problema con la precisión de las líneas de retardo para implementar los desplazamientos de fase deseados con la precisión requerida. La precisión de los desplazamientos de fase es importante porque está directamente relacionada con el aislamiento de los canales de salida de la matriz entre sí. Si los desplazamientos de fase no se implementan con suficiente precisión, esto tiene un impacto en la función de transferencia de la matriz que ya no es unitaria.

Por lo tanto, existe un problema para mejorar la precisión de los desplazamientos de fase en una matriz de Butler implementada en tecnología PIC.

15 La presente invención proporciona una respuesta al problema antes mencionado proponiendo un circuito de alimentación distribuida con una huella pequeña, ya que puede implementarse en tecnología PIC, adaptado para recibir una señal eléctrica modulada en una portadora óptica. La principal ventaja de la invención es que las longitudes de las líneas de retardo pueden configurarse para escalar con las frecuencias de microondas de la señal eléctrica, facilitando así en gran medida la implementación de los desplazamientos de fase precisos que debe incluir un circuito de este tipo.

20 El circuito de alimentación distribuida según la invención, cuando se emplea en un conjunto de formación de haces de antena, permite la generación de un haz de antena múltiple en direcciones de apuntamiento cuyo espaciado angular es ajustable.

25 La invención se refiere a un circuito de alimentación distribuida para una red de formación de haces de antena que comprende una pluralidad N de entradas y una pluralidad N de salidas, estando dicho circuito adaptado para recibir, en al menos una entrada, una señal eléctrica a una frecuencia de microondas dada, estando la señal modulada en al menos una portadora óptica, comprendiendo dicho circuito al menos un conjunto de al menos dos divisores ópticos con una única entrada y dos salidas, al menos una línea de retardo de longitud configurada para ser igual a una fracción integral de la longitud de onda de dicha señal a su frecuencia de microondas y dos medios para combinar dos señales ópticas que tengan dos entradas y que tengan una única salida conectada a una salida distinta de dicho circuito, estando dicho conjunto dispuesto y las líneas de retardo configuradas de forma que la función de transferencia teórica de dicho circuito sea una matriz ortogonal.

Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, una línea de retardo está conectada en un primer extremo a una primera salida de un divisor óptico.

35 Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, un divisor óptico está conectado, por su entrada, a una entrada de dicho circuito.

Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, un medio para combinar dos señales ópticas está conectado, por su salida, a una salida de dicho circuito.

40 Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, dicho conjunto comprende dos líneas de retardo cuya longitud es sustancialmente igual a un cuarto de la longitud de onda de dicha señal en su frecuencia de microondas.

Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, dicho conjunto comprende una línea de retardo de longitud sustancialmente igual a la mitad de la longitud de onda de dicha señal a su frecuencia de microondas

45 Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, el número N de entradas y salidas es una potencia de dos.

Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, una segunda salida de un divisor óptico se conecta a una primera entrada de un medio para combinar dos señales ópticas y una línea de retardo se conecta, en un segundo extremo, a una segunda entrada de un medio para combinar dos señales ópticas.

50 Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, dicho circuito comprende un número de conjuntos igual al logaritmo binario del número N de entradas y salidas multiplicado por la mitad de dicho número N.

Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, una salida de un medio para combinar dos señales ópticas de un primer conjunto está conectada a una entrada de un divisor óptico de un segundo conjunto, directamente o a través de una línea de retardo adicional de longitud cero o sustancialmente igual a la mitad

de la longitud de una línea de retardo, de longitud no nula, de uno de dichos conjuntos, estando dicha longitud configurada de manera que la función de transferencia teórica de dicho circuito es una matriz ortogonal.

5 Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, el conjunto formado por un medio de combinación de dos señales ópticas y un divisor óptico, conectado en serie, se sustituye por un acoplador óptico, estando dicha línea de retardo adicional conectada, en un primer extremo, a una salida de un acoplador óptico.

Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, un medio para combinar dos señales ópticas es un combinador óptico de 3 dB.

10 Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, un medio para combinar dos señales ópticas es un multiplexor de al menos dos longitudes de onda ópticas y la función de transferencia teórica de dicho circuito es una matriz unitaria.

15 Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, un acoplador óptico se sustituye por un primer intercalador de longitudes de onda ópticas y un medio, conectado a una salida de dicho circuito, para combinar dos señales ópticas es un segundo intercalador de longitudes de onda ópticas, un intercalador de longitudes de onda ópticas adaptado para recibir a la entrada una pluralidad de longitudes de onda ópticas y emitir las alternativamente en una u otra de sus salidas según un período de intercalación determinado, siendo el período de intercalación de un segundo intercalador igual al doble del período de intercalación de un primer intercalador.

Según un aspecto particular del circuito de alimentación distribuida según la invención, dicho circuito es un circuito integrado óptico o un circuito realizado mediante fibras ópticas.

20 La invención también se refiere a una red de formación de haces de antena que comprende medios para modular al menos una señal eléctrica a una frecuencia de microondas en una portadora óptica, un circuito de alimentación distribuida según la invención para recibir dicha al menos una señal eléctrica en la portadora óptica y medios para convertir dicha señal eléctrica en la portadora óptica en una señal eléctrica para alimentar al menos un elemento de antena de un conjunto de antenas.

25 Según un aspecto particular de la red de formación de haz de antena según la invención, dichos medios para modular una señal eléctrica sobre portadora óptica están adaptados para modular las señales eléctricas que se inyectan en las entradas de dicho circuito de alimentación distribuida sobre portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda.

30 Es también un objeto de la invención utilizar un circuito de alimentación distribuida según la invención o una red de conformación de haz de antena según la invención que consiste en inyectar, en las entradas de dicho circuito de alimentación distribuida, una pluralidad de señales eléctricas sobre portadora óptica según una disposición creciente de los valores de las longitudes de onda ópticas de dichas señales o según una disposición que alterna los valores pares e impares de las longitudes de onda ópticas de dichas señales.

35 La invención también se refiere a un receptor que comprende una pluralidad de elementos de antena que suministran una señal eléctrica, medios para modular dicha señal eléctrica a una frecuencia de microondas en una portadora óptica, un circuito de alimentación distribuida según la invención para recibir dicha señal eléctrica en una portadora óptica y medios para convertir dicha señal eléctrica en una portadora óptica en una señal eléctrica.

40 La invención también se refiere a un dispositivo de amplificación multipuerto que comprende medios para modular al menos una señal eléctrica a una frecuencia de microondas en una portadora óptica, un primer circuito de alimentación distribuida según la invención para recibir dicha señal eléctrica en la portadora óptica, medios para convertir dicha señal eléctrica en la portadora óptica en una señal eléctrica, y un segundo circuito de alimentación distribuida dispuesto para recibir la salida de la señal eléctrica de los medios de conversión.

Otras características y ventajas de la presente invención se harán evidentes a partir de la siguiente descripción en relación con los dibujos adjuntos que muestran:

- La figura 1 es un esquema de un acoplador de 90° de dos entradas y dos salidas según la invención,
- 45 – La figura 2 es un esquema de un circuito de alimentación distribuida de cuatro entradas y cuatro salidas según la invención,
- La figura 3 es un esquema de una realización alternativa del circuito de alimentación 4x4 de la figura 2,
- La figura 4 es un esquema de un circuito de alimentación distribuida de ocho entradas y ocho salidas según la invención,
- 50 – La figura 4bis es la matriz ortogonal correspondiente a la función de transferencia teórica del circuito de la figura 4,
- La figura 5 es un esquema de una implementación alternativa del circuito de alimentación 8x8 de la figura 4,

- La figura 5bis es un esquema que ilustra el funcionamiento de un multiplexor intercalador de longitudes de onda empleado en el circuito de la figura 5,
- La figura 5ter muestra otros dos ejemplos de funciones de transferencia matriciales para la realización de otra variante del circuito de alimentación según la invención, para 4 entradas/salidas y 8 entradas/salidas respectivamente, de un acoplador de 180°,
- La figura 6 es un esquema de una red de formación de haces según la invención,
- La figura 7 es un esquema que muestra las formas de haz de la antena obtenidas con una red de formación de haz de acuerdo con cualquiera de las formas de realización del acoplador de dos entradas y dos salidas según la invención,
- La figura 8 es un esquema de otra realización de un circuito de alimentación según la invención con cuatro entradas y cuatro salidas,
- La figura 9 es un esquema de un dispositivo de antena que funciona en modo de recepción, dicho dispositivo comprende un circuito de alimentación distribuida según la invención,
- La figura 10 muestra una variante de la red de formación de haces descrita en la figura 6,
- La figura 11 es un esquema de un dispositivo amplificador multipuerto que comprende dos circuitos de alimentación distribuida según la invención,

La figura 1 muestra un esquema de un ejemplo de una primera realización de un circuito de alimentación distribuida según la invención. El ejemplo se refiere a un circuito con dos entradas y dos salidas, pero puede ampliarse, como se explica a continuación, a un circuito con N entradas y N salidas, siendo N un número entero igual a una potencia de dos. Cuando el número N de entradas y salidas es igual a dos, como en el ejemplo de la figura 1, el circuito de alimentación distribuida es equivalente a un acoplador, por ejemplo un acoplador híbrido.

El circuito alimentador 100 de la figura 1 está compuesto por un conjunto de dos divisores ópticos DI1,DI2, dos combinadores ópticos CO1,CO2 y dos líneas de retardo LR1,LR2. Una entrada de un divisor óptico DI1,DI2 se conecta a una entrada I1,I2 del circuito de alimentación 100. Una salida de un combinador óptico CO1,CO2 se conecta a una salida O1,O2 del circuito de alimentación 100. Una línea de retardo LR1,LR2 está conectada en un primer extremo a la salida de un divisor óptico DI1,DI2 y en un segundo extremo a la entrada de un combinador óptico CO1,CO2. La segunda salida de un divisor óptico DI1 está conectada a la segunda entrada del combinador óptico CO1, cuya primera entrada está conectada al otro divisor óptico DI2 a través de la línea de retardo LR2.

Las dos líneas de retardo LR1, LR2 tienen una longitud igual a un cuarto de la longitud de onda de la señal de frecuencia de microondas. Como la señal inyectada en las entradas I1,I2 del circuito 100 según la invención es una señal eléctrica sobre una portadora óptica, la longitud de las líneas de retardo LR1,LR2 está configurada para obtener un desplazamiento de fase de $\pi/2$ o 90° en el dominio de la frecuencia de la señal eléctrica, es decir, en el dominio de la frecuencia de microondas. De este modo, es más fácil obtener la precisión requerida del desplazamiento de fase porque la longitud de onda en la gama de frecuencias de microondas es del orden de diez milímetros, mientras que en la gama de frecuencias ópticas es sólo del orden de un micrómetro.

Los divisores ópticos DI1,DI2 y los combinadores ópticos CO1,CO2 son dispositivos de acoplamiento óptico capaces de dividir una señal en potencia o combinar dos señales para obtener una señal de doble potencia. Las señales de salida de un divisor óptico DI1,DI2 están en fase.

La disposición de los divisores, combinadores y líneas de retardo es tal que la función de transferencia teórica del circuito de alimentación 100 según la invención es igual a

$$T = \frac{1}{p\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{pmatrix},$$

donde j es la unidad imaginaria, es decir, el número complejo cuyo cuadrado es igual a -1 y p es un factor de pérdida de amplitud, siendo p^2 el correspondiente factor de pérdida de potencia.

El factor de pérdida de amplitud p es igual a uno en el caso de que los combinadores ópticos CO1, CO2, sean implementados por dispositivos que no induzcan pérdidas de amplitud en la señal de salida. Este es el caso, en particular, de los multiplexores de diferentes subbandas de frecuencia, como se explicará más adelante.

El factor de pérdida p es inferior a 1 si los combinadores ópticos CO1, CO2 están implementados por dispositivos que inducen pérdidas de amplitud en la señal de salida. Esto es especialmente cierto en el caso de los dispositivos de suma óptica o sumadores ópticos. De hecho, un dispositivo de suma sólo puede ser sin pérdidas para una relación de

fase precisa entre las señales de entrada, por ejemplo, una diferencia de fase cero para un dispositivo de suma llamado "en fase". Dado que las señales de cada entrada son diferentes, en la práctica decorrelacionadas, esta condición de fase no puede cumplirse, y es bien sabido por el experto que un dispositivo sumador induce una pérdida de 3dB de amplitud entre cualquiera de las entradas y su salida. El valor del factor de pérdida en este caso es igual a $1/\sqrt{2}$ y proviene del hecho de que $20\log(1/\sqrt{2}) = -3\text{dB}$.

Cualquiera que sea el valor del factor de pérdida p , la función de transferencia teórica del circuito de alimentación 100 según la invención es una matriz ortogonal, es decir, satisface la relación $\mathbf{V}01.\mathbf{V}02^*\mathbf{V}02.\mathbf{V}01^*=0$, donde $\mathbf{V}01$ y $\mathbf{V}02$ son los vectores columna (en el ejemplo de la figura 1, estos vectores sólo tienen dos términos) compuestos por los valores de las amplitudes complejas de las dos señales de salida del circuito de alimentación 100. El operador $*$ es el operador transconjugado. \mathbf{V}^* es una matriz de filas compuesta por los números complejos conjugados a los valores del vector \mathbf{V} .

En el caso de que el factor de pérdida p sea igual a 1, es decir, cuando el circuito de alimentación según la invención no tiene pérdidas, entonces su función de transferencia teórica es también una matriz unitaria, es decir, verifica la siguiente relación $\mathbf{T}.\mathbf{T}^* = \mathbf{T}^*.\mathbf{T}=\text{Id}$, siendo Id la matriz identidad y \mathbf{T}^* la matriz transconjugada, también conocida como conjugada hermitiana de la matriz \mathbf{T} . En el caso de que el factor de pérdida sea diferente de 1, la relación anterior se convierte en $\mathbf{T}.\mathbf{T}^* = \mathbf{T}^*.\mathbf{T}=(1/p^2).\text{Id}$, la matriz \mathbf{T} es entonces sólo ortogonal.

El hecho de que la función de transferencia del circuito de alimentación 100 sea una matriz ortogonal es una propiedad esencial ya que proporciona un perfecto aislamiento de los canales de salida del circuito entre sí y un espaciado uniforme de los haces generados por la antena alimentada por este dispositivo. Si la matriz no es unitaria, las pérdidas hacen que se refleje una cantidad importante de la potencia de la señal de entrada.

Las señales de salida del circuito de alimentación 100 vienen así dadas, en notación compleja, por las siguientes relaciones, en función de las señales de entrada

$$O1 = 1/(p\sqrt{2}) (I1-j.I2)$$

$$O2 = 1/(p\sqrt{2}) (-j.I1+I2)$$

En otras palabras, cuando se produce una señal en la primera entrada $I1$, la señal resultante en la primera salida $O1$ está en fase con la señal de entrada y la señal resultante en la segunda salida $O2$ está desfasada $-\pi/2$. Cuando se produce una señal en la segunda entrada $I2$, la señal resultante en la segunda salida $O2$ está en fase con la señal de entrada y la señal resultante en la primera salida $O1$ está desfasada en $-\pi/2$.

El circuito de alimentación 100 según la invención permite así obtener el desfase requerido de más o menos $\pi/2$ entre las dos salidas del circuito. No es posible obtener dicho desplazamiento de fase, calculado a la frecuencia de microondas, con un simple acoplador óptico, ya que éste sólo puede imprimir desplazamientos de fase realizados a frecuencias ópticas, que son mucho más altas que las de microondas.

El circuito de alimentación 100 según la invención se implementa ventajosamente mediante un circuito integrado óptico o PIC (circuito integrado fotónico) y se implementa generalmente mediante tecnología óptica integrada. Una ventaja de esta tecnología es la miniaturización del dispositivo producido.

Alternativamente, en particular si las frecuencias de microondas son bajas, el circuito alimentador 100 según la invención también puede estar hecho de fibras ópticas.

El circuito 100 descrito en la figura 1 puede generalizarse a un circuito de alimentación distribuida que comprende N entradas y N salidas, siendo N un número entero igual a una potencia de dos.

La figura 2 describe un circuito de alimentación 200 con cuatro entradas $I1, I2, I3, I4$ y cuatro salidas $O1, O2, O3, O4$.

El circuito 200 de la figura 2 comprende cuatro conjuntos 201, 202, 203, 204 de dos divisores, dos combinadores y dos líneas de retardo dispuestos de la misma manera que el circuito 100 de dos entradas y dos salidas de la figura 1.

Los cuatro conjuntos 201, 202, 203, 204 están conectados entre sí de la siguiente manera. La salida de un combinador $CO_{1,1}$ del primer conjunto 201 se conecta a la entrada de un divisor $DI_{3,1}$ del tercer conjunto 203 a través de una línea de retardo $LR5$ de longitud igual a un octavo de la longitud de onda de la señal a la frecuencia de microondas. La salida de un combinador $CO_{2,2}$ del segundo conjunto 202 se conecta a la entrada de un divisor $DI_{4,2}$ del cuarto conjunto 204 a través de una línea de retardo $LR6$ de longitud igual a un octavo de la longitud de onda de la señal a la frecuencia de microondas. La salida de un combinador $CO_{1,2}$ del primer conjunto 201 se conecta directamente a la entrada de un divisor $DI_{4,1}$ del cuarto conjunto. La salida de un combinador $CO_{2,1}$ del segundo conjunto 202 se conecta directamente a la entrada de un divisor $DI_{3,2}$ del tercer conjunto.

Los cuatro conjuntos 201, 202, 203, 204 están dispuestos de tal manera que la función de transferencia del circuito de alimentación 200 según la invención es igual a la matriz ortogonal

$$T = \frac{1}{2p} \begin{pmatrix} 1 & e^{-\frac{j3\pi}{4}} & e^{-\frac{j\pi}{2}} & e^{-\frac{j3\pi}{4}} \\ e^{-\frac{j\pi}{4}} & 1 & e^{-\frac{j5\pi}{4}} & e^{-\frac{j\pi}{2}} \\ e^{-\frac{j\pi}{2}} & e^{-\frac{j5\pi}{4}} & 1 & e^{-\frac{j\pi}{4}} \\ e^{-\frac{j3\pi}{4}} & e^{-\frac{j\pi}{2}} & e^{-\frac{j3\pi}{4}} & 1 \end{pmatrix},$$

donde p es el factor de pérdida de amplitud introducido anteriormente.

5 En función de la entrada 11,12,13,14 activada, es decir, de la entrada inyectada con una señal, las señales obtenidas en las cuatro salidas 01,02,03,04 tienen la misma potencia y están regularmente desfasadas entre ellas por un desplazamiento de fase constante múltiplo de $\pi/4$.

10 El circuito mostrado en la figura 2 puede generalizarse a cualquier circuito de alimentación distribuida con N entradas y N salidas, donde N es una potencia de 2, aumentando el número de conjuntos 201,202,203,204 a un número igual a $(N/2)\log_2(N)$ e interconectándolos entre sí mediante líneas de retardo de longitud igual a un múltiplo de la longitud de onda de la señal a una frecuencia de microondas dividida por 2N.

La figura 3 muestra un esquema de una realización alternativa del circuito de alimentación 200 de la figura 2.

Para mejorar aún más la compacidad del circuito según la invención reduciendo el número de componentes necesarios, el conjunto formado por un combinador y un divisor conectados en serie se sustituye por un acoplador con dos entradas y dos salidas.

15 Por ejemplo, la combinación del combinador $CO_{1,2}$ y el divisor $DI_{4,1}$ conectados en serie se sustituye por un único acoplador $CP_{1,2}$. Del mismo modo, el combinador $CO_{2,1}$ y el divisor $DI_{3,2}$ conectados en serie se sustituyen por un único acoplador $CP_{2,1}$. El conjunto formado por el combinador $CO_{1,1}$ y el divisor $DI_{3,1}$ conectados en serie a través de una línea de retardo LR_5 se sustituye por un único acoplador $CP_{1,1}$ cuyas dos salidas se conectan a dos líneas de retardo $LR_{5,1}$ y $LR_{5,2}$ de la misma longitud igual a un octavo de la longitud de onda de la señal en frecuencia de microondas. El conjunto formado por el combinador $CO_{2,2}$ y el divisor $DI_{4,2}$ conectados en serie a través de una línea de retardo LR_6 se sustituye por un único acoplador $CP_{2,2}$ cuyas dos salidas se conectan a dos líneas de retardo $LR_{6,1}$ y $LR_{6,2}$ de la misma longitud igual a un octavo de la longitud de onda de la señal a frecuencia de microondas.

25 Los acopladores $CP_{1,1}$, $CP_{1,2}$, $CP_{2,1}$, $CP_{2,2}$ utilizados son acopladores ópticos que no introducen ningún desplazamiento de fase significativo, en el dominio de la frecuencia de microondas, entre las dos señales entregadas por sus dos salidas respectivas.

Dos líneas de retardo $LR_{5,2}$, $LR_{3,2}$ conectadas en serie pueden ser sustituidas por una sola línea de retardo de longitud igual a la suma de las longitudes de las dos líneas.

Otra ventaja de esta realización es que al eliminar los combinadores $CO_{1,1}$, $CO_{1,2}$, $CO_{2,1}$, $CO_{2,2}$ se evitan las pérdidas de potencia cuando las señales de entrada a los combinadores no son coherentes en fase.

30 La figura 4 muestra un esquema de un circuito de alimentación de ocho entradas y ocho salidas 400 según la invención.

El circuito 400 descrito en la figura 4 se deriva del circuito 300 descrito en la figura 3 duplicando el número de entradas y salidas.

35 El circuito 400 comprende ocho divisores ópticos, cada uno conectado a una entrada I1, ..., I8 del circuito 400 y ocho combinadores ópticos, cada uno conectado a una salida O1, ..., O8 del circuito 400. El circuito 400 también incluye dos etapas de ocho acopladores ópticos de doble entrada y doble salida. Los distintos componentes del circuito 400 están conectados entre sí, directamente o mediante líneas de retardo de longitud igual a un múltiplo de la distancia $d' = \lambda_{RF}/16$ donde λ_{RF} es la longitud de onda de la señal a la frecuencia de microondas. La figura 4 muestra los valores precisos de las longitudes de las diferentes líneas de retardo como múltiplo de la longitud d' .

40 Todos los componentes del circuito 400 están dispuestos de manera que la función de transferencia teórica T del circuito es la matriz ortogonal mostrada en la Figura 4bis, donde p es el factor de pérdida de amplitud.

Un objetivo es que las señales de salida del circuito 400 estén regularmente desfasadas entre sí por un incremento de fase constante igual a un múltiplo de $\pi/8$. El valor del incremento de fase depende de la entrada activada I1, ..., I8.

45 La figura 4 muestra un ejemplo de un circuito de alimentación distribuida de ocho entradas y ocho salidas según la invención. Se utilizan acopladores de doble entrada y doble salida, como se muestra en el ejemplo de la figura 3, para reducir el número de componentes necesarios. Sin ir más allá del alcance de la invención, pueden sustituirse, como se explica para el ejemplo de la figura 2, por un conjunto formado por un combinador óptico y un divisor óptico conectados en serie.

Los ejemplos de las figuras 1, 2, 3 y 4 se dan a modo de ilustración, para la correcta comprensión de la invención, pero no deben interpretarse como una limitación del objeto de la invención a estos ejemplos únicamente. En particular, la invención puede extenderse a cualquier circuito de alimentación distribuida que comprenda un número N de entradas y salidas, siendo N una potencia de dos, y cuya función de transferencia sea una matriz ortogonal o unitaria cuando el factor de pérdida sea igual a 1. En una primera realización, el circuito de alimentación según la invención está compuesto por una pluralidad de conjuntos, como se describe en la figura 1, interconectados entre sí directamente o a través de líneas de retardo de longitud igual a un múltiplo de la distancia $d'=\lambda_{RF}/(2N)$ donde λ_{RF} es la longitud de onda de la señal a la frecuencia de microondas. En una segunda realización, el conjunto de combinador óptico y divisor óptico conectado en serie puede ser sustituido por un acoplador óptico de doble entrada y doble salida, como se muestra en las figuras 3 y 4.

La figura 5 muestra otra realización del circuito de alimentación de la figura 4.

Los combinadores ópticos que forman la última etapa de los componentes del circuito de alimentación según la invención pueden presentar pérdidas debido a que las señales que reciben a la entrada no son coherentes en fase. En otras palabras, un combinador óptico no puede realizar una recombinación coherente de dos señales si éstas no son coherentes en fase.

Una forma de resolver este problema es sustituir cada combinador óptico por un multiplexor de frecuencia óptica o, más generalmente, por un medio selectivo de frecuencia para combinar dos señales en dos portadoras ópticas diferentes. Por ejemplo, dicho medio puede adoptar la forma de un intercalador de longitudes de onda, un interferómetro Mach-Zehnder o cualquier dispositivo equivalente capaz de multiplexar varias frecuencias ópticas.

Las señales producidas en las diferentes entradas I1,...I8 del circuito 500 según la invención se modulan sobre diferentes portadoras ópticas. Denotando $\lambda_1, \dots, \lambda_8$, las longitudes de onda asociadas a las frecuencias portadoras ópticas de cada una de las ocho señales de entrada al circuito 500, es posible realizar diferentes asociaciones entre las frecuencias portadoras ópticas y las entradas al circuito. Suponiendo que $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \lambda_4 > \lambda_5 > \lambda_6 > \lambda_7 > \lambda_8$, una opción posible es asignar las frecuencias portadoras ópticas a las entradas I1,...I8 en orden ascendente de su valor. La siguiente tabla ilustra la asignación de las portadoras ópticas a las diferentes entradas:

| | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| I1 | I2 | I3 | I4 | I5 | I6 | I7 | I8 |
| λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 | λ_6 | λ_7 | λ_8 |

Al hacer esta elección, las señales obtenidas en cada salida O1,...O8 del circuito 500 se derivarán de la combinación de una frecuencia óptica baja y una frecuencia óptica alta.

Otra opción posible es intercalar las portadoras ópticas antes de asignarlas a las diferentes entradas I1,...I8 del circuito 500. La siguiente tabla ilustra la asignación de las portadoras ópticas a las diferentes entradas para esta segunda opción:

| | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| I1 | I2 | I3 | I4 | I5 | I6 | I7 | I8 |
| λ_1 | λ_3 | λ_5 | λ_7 | λ_2 | λ_4 | λ_6 | λ_8 |

Tomando esta segunda opción, las señales obtenidas en cada salida O1,...O8 del circuito 500 se derivarán de la combinación de dos frecuencias ópticas adyacentes.

Otras opciones son posibles para el orden de asignación de las longitudes de onda ópticas a las entradas del circuito, pero los dos ejemplos mencionados tienen la ventaja de facilitar la realización de los multiplexores colocados a la salida del circuito de alimentación.

En efecto, se puede observar siguiendo el recorrido de la señal en el ejemplo de la figura 5 que para el primer caso de asignación de las portadoras ópticas según un orden creciente de sus valores, cada multiplexor recibe en su entrada superior una señal transportada por una longitud de onda óptica λ_1 a λ_4 , y en su entrada inferior una señal transportada por una longitud de onda óptica λ_5 a λ_8 . Los ocho multiplexores M1,...M8 pueden ser, por tanto, multiplexores idénticos de dos subbandas adyacentes, también conocidos como "diplexores",

Para el segundo caso de asignación de las portadoras ópticas según un intercalado previo, los ocho multiplexores M1,...M8 pueden ser multiplexores de función de transferencia periódica, conocidos como "wavelengths interleaver" o intercaladores de longitudes de onda. Dicho dispositivo puede realizarse como un componente discreto o implementarse en el mismo PIC que el circuito según la invención.

La figura 5bis ilustra el principio de funcionamiento de un multiplexor intercalador de longitudes de onda 501. En la parte derecha de la figura 5bis se muestra un diagrama del espectro de salida de los ocho multiplexores M1,...M8.

Este espectro consta de dos conjuntos de 510,520 portadoras ópticas intercaladas. El primer conjunto 510 corresponde a las longitudes de onda impares y el segundo conjunto 520 corresponde a las longitudes de onda pares.

Las realizaciones de ejemplo de la invención descritas anteriormente en apoyo de las Figuras 1 a 5 se basan todas en un circuito de alimentación según la invención con dos entradas y dos salidas, una de las cuales está desfasada con respecto a la otra salida en +/- 90° y cuya función de transferencia viene dada por la matriz

$$T = \frac{1}{p\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{pmatrix}$$

y en la Figura 1 se da un ejemplo de realización. Este circuito se denomina convencionalmente acoplador de 90°.

10 Sin ir más allá del alcance de la invención, el acoplador de 90° de la figura 1 puede ser sustituido por cualquier otro dispositivo que realice la función de un acoplador y cuya función de transferencia sea ortogonal o unitaria (cuando los combinadores utilizados son sin pérdidas).

Por ejemplo, otro posible dispositivo básico es un acoplador híbrido de 180° cuya función de transferencia viene dada

15 por la matriz $T' = \frac{1}{p\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$.

y que proporciona dos señales de igual amplitud a la salida que están en fase o en oposición de fase (es decir, 180° fuera de fase) en lugar de +/- 90° fuera de fase como en el dispositivo de la figura 1.

20 Dicho dispositivo puede ser implementado de la misma manera que se muestra en la Figura 1 con la diferencia de que las dos líneas de retardo LR1, LR2 tienen una longitud diferente. La primera línea de retardo LR1 tiene una longitud igual a la mitad de la longitud de onda de la señal a la frecuencia de microondas. La segunda línea de retardo LR2 tiene una longitud de cero, es decir, esta segunda línea de retardo puede ser eliminada.

25 A partir de esta variante del dispositivo básico según la invención con dos entradas y dos salidas, es posible construir, como se muestra en las figuras 2 a 5, circuitos de potencia distribuida según la invención con un número par de entradas y salidas mayor que dos.

Las únicas modificaciones de los circuitos descritos en las figuras 2 a 5 son las longitudes de las líneas de retardo, que se configuran de manera que la función de transferencia del circuito de alimentación distribuida resultante viene dada por las matrices mostradas en la figura 5ter.

30 La matriz T'_4 es la función de transferencia teórica de un circuito de alimentación según la invención con 4 entradas y 4 salidas compuesto por 4 acopladores híbridos básicos cuyas funciones de transferencia teóricas son iguales a T' .

35 El esquema de un circuito de alimentación distribuida con una función de transferencia teórica igual a T'_4 es idéntico al esquema de la figura 2 con las diferencias de que los cuatro conjuntos 201,202,203,204 están constituidos por acopladores híbridos de 180° según la segunda variante de la invención, una de las dos líneas de retardo adicionales LR5,LR6 tiene una longitud igual a un cuarto de la longitud de onda de la señal a la frecuencia de microondas (es decir, la mitad de la longitud de una línea de retardo del acoplador híbrido básico de 180°) y la otra línea de retardo adicional LR5,LR6 tiene una longitud nula.

Por lo tanto, se observa que el diseño, según la invención, de un circuito de 4 entradas y 4 salidas basado en un acoplador híbrido de 180° es equivalente al del circuito de la figura 2 obtenido a partir de un acoplador de 90°.

40 Del mismo modo, también es posible diseñar un circuito de alimentación distribuida de ocho entradas y ocho salidas cuya función de transferencia teórica es la matriz T'_8 y que se diseña a partir de un número de acopladores híbridos de 180° según el mismo principio que el descrito en las figuras 4 y 5.

Observando la matriz T'_8 , se puede ver que para cada columna se utiliza un gradiente de fase para pasar de una fila a otra:

45 $-2\pi/8, 6\pi/8, -6\pi/8, 2\pi/8, -4\pi/8, 4\pi/8, -8\pi/8, 1$ Los valores de los desfases obtenidos a la salida del circuito 8x8 son, pues, múltiplos pares de $\pi/8$ y se produce una alternancia de signos entre dos salidas adyacentes.

La figura 6 muestra un esquema de una red de formación de haces de antena 600 que comprende un circuito de alimentación distribuida 601 según la invención.

A modo de ilustración, la red de formación de haces de antena 600 descrita en la figura 6 está adaptada para alimentar ocho elementos de antena 632,642 y comprende un circuito de alimentación distribuida 601 según la invención con ocho entradas y ocho salidas.

5 Cada entrada I_1, \dots, I_8 está conectada a un modulador óptico 612,622, por ejemplo, un modulador Mach-Zehnder, que recibe en una entrada una señal eléctrica o de microondas 610,620, posiblemente amplificada previamente mediante un amplificador 611,621. La segunda entrada de cada modulador óptico 612,622 está conectada a un generador de portadora óptica 602 adecuado para generar al menos una portadora óptica de longitud de onda λ_1 . Ventajosamente, el generador 602 es capaz de generar tantas portadoras ópticas como entradas tenga el circuito de alimentación distribuida 601. Por ejemplo, el generador 602 puede ser capaz de implementar una técnica de multiplexación por división de longitud de onda para generar, en el ejemplo de la figura 6, ocho portadoras a ocho longitudes de onda $\lambda_1, \dots, \lambda_8$. Cada portadora óptica modula así la señal de microondas producida en una de las entradas del circuito 601.

10 La señal obtenida en cada una de las salidas O_1, \dots, O_8 del circuito 601 es entonces demodulada por medio de un detector óptico 630,640, por ejemplo un fotodetector, capaz de convertir la señal óptica en una señal eléctrica que es entonces eventualmente amplificada por medio de amplificadores 631,641 antes de ser transportada a los elementos radiantes 632,642 del conjunto de antenas a alimentar.

La figura 7 muestra el diagrama de radiación de antena obtenido para una red de formación de haces de antena del tipo mostrado en la figura 6.

En la figura 7, se muestran dos diagramas, el primero, en línea continua, corresponde a la utilización de un acoplador de base de 90° descrito en la figura 1, el segundo, en línea de puntos, corresponde a la utilización de un acoplador de base de 180° como se explica en la descripción anterior

Junto a cada haz generado, el número (que va de 0 a 8) indica el coeficiente multiplicador $\pi/8$ correspondiente al desplazamiento de fase entre dos salidas adyacentes del dispositivo. La letra (L o R) indica la orientación (izquierda o derecha) del haz.

Se puede observar que las dos variantes básicas de acopladores según la invención permiten el diseño de dos redes de formación de haz complementarias.

La figura 8 muestra otra realización alternativa del circuito de alimentación distribuida de cuatro entradas y cuatro salidas descrito anteriormente en apoyo de la figura 3.

Los elementos comunes de los circuitos descritos en las figuras 3 y 8 tienen las mismas referencias.

30 En esta nueva variante, los acopladores ópticos $CP_{1,1}, CP_{1,2}, CP_{2,1}, CP_{2,2}$ se sustituyen por un primer conjunto de intercaladores ópticos $INT_{1,1}, INT_{1,2}, INT_{2,1}, INT_{2,2}$, y los combinadores ópticos $CO_{3,1}, CO_{3,2}, CO_{4,1}, CO_{4,2}$ se sustituyen por un segundo conjunto de intercaladores ópticos $INT_{3,1}, INT_{3,2}, INT_{4,1}, INT_{4,2}$. Los intercaladores ópticos son componentes de cuatro puertos, dos de entrada y dos de salida. Su funcionamiento se ilustra en los diagramas 801 y 802.

35 Para un conjunto de ocho longitudes de onda ópticas regularmente espaciadas $\lambda_1, \dots, \lambda_8$ uniformemente espaciados, un intercalador óptico $INT_{1,1}$ de la primera serie está configurado para dirigir una de cada dos longitudes de onda al primer puerto de salida y la otra longitud de onda al segundo puerto de salida. Este principio se ilustra en el diagrama 801, las longitudes de onda $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_5, \lambda_7$, mostradas como líneas punteadas se dirigen al puerto de salida opuesto al puerto de entrada al que se inyecta la señal. Por el contrario, las longitudes de onda $\lambda_2, \lambda_4, \lambda_6, \lambda_8$, representadas en línea continua se dirigen al puerto de salida directa con respecto al puerto de entrada en el que se inyecta la señal.

40 Los intercaladores ópticos de la segunda serie funcionan según el mismo principio que los de la primera serie, salvo que el período de intercalación es el doble que el de la primera serie. La operación se ilustra en el diagrama 802. Las cuatro primeras longitudes de onda ópticas $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, se dirigen al puerto de salida opuesto y las cuatro siguientes longitudes de onda ópticas $\lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8$ se dirigen al puerto de salida directo.

45 El uso de intercaladores ópticos en lugar de acopladores o combinadores evita posibles pérdidas por recombinación de las señales de salida.

El funcionamiento global del circuito de potencia distribuida 800 según la invención se describe en la figura 8. En cada una de las entradas 11,12,13,14 del circuito 800 se produce una señal eléctrica que modula dos longitudes de onda ópticas diferentes. En la figura 8 se ilustra el encaminamiento de las longitudes de onda ópticas hacia las salidas del circuito 800. Las dos primeras salidas 01,02 pueden recibir las longitudes de onda $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_6, \lambda_7$. Las dos últimas salidas 03,04 pueden recibir las longitudes de onda $\lambda_1, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_8$.

El circuito según la invención descrito en la figura 8 puede generalizarse, sin ir más allá del alcance de la invención, a cualquier circuito con N entradas y N salidas, donde N es una potencia de dos.

La figura 9 muestra un esquema de un dispositivo de antena 900 que funciona en recepción.

Dicho dispositivo 900 comprende un circuito de alimentación distribuida 901 según la invención y funciona según un principio similar al descrito en la figura 6 con la diferencia de que el dispositivo de la figura 6 se refiere a un sistema de antena que funciona en transmisión.

5 El circuito de alimentación distribuida 901 es idéntico al circuito de alimentación distribuida 601 utilizado para la red de formación de haces descrita en la figura 6, con la diferencia de que es simétrico a la disposición del circuito 601 de la figura 6. Es decir, sus entradas I1,...I8 y sus salidas O1,...O8 están invertidas.

10 En efecto, en el circuito 601 utilizado para el dispositivo transmisor de la figura 6, se obtienen leyes de fase lineales en las salidas Oi alimentando las entradas Ij; pero lo contrario no es cierto. Para una antena receptora, como la descrita en la figura 9, las leyes de fase lineal deben estar en el lado de los elementos radiantes, es decir, en el lado de las entradas Ij. El circuito 901 obtenido por simetría de espejo a partir del circuito 601 de la figura 6 cumple esta función, ya que todos los acopladores que lo componen son dispositivos recíprocos. Se alimenta a través de los puertos Ij con leyes de fase lineales (generadas a partir de los ejes de los 8 haces nominales de la antena) y la energía converge a una de las 8 salidas respectivamente. La disposición del circuito 901 corresponde al uso del circuito 601 de la figura 6 en sentido inverso, en el que las señales se propagarían de derecha a izquierda.

15 Cada entrada I1,...I8 está conectada a un modulador óptico 912,922, por ejemplo un modulador Mach-Zehnder, que recibe en una entrada una señal eléctrica o de microondas 610,620 recibida a través de un elemento de antena 932,942 y previamente amplificada eventualmente a través de un amplificador 911,921. La segunda entrada de cada modulador óptico 912,922 está conectada a un generador de portadora óptica 902 adecuado para generar al menos una portadora óptica de longitud de onda λ_1 .

20 La señal obtenida en cada una de las salidas O1,...O8 del circuito 901 es entonces demodulada por medio de un detector óptico 930, 940, por ejemplo un fotodetector, capaz de convertir la señal óptica en una señal eléctrica que es entonces eventualmente amplificada por medio de amplificadores 931, 941.

La figura 10 muestra una realización alternativa de la red de formación de haces descrita en la figura 6.

25 El dispositivo 600* mostrado en la Figura 10 es idéntico al mostrado en la Figura 6 con las siguientes diferencias dispuestas.

30 Cada modulador óptico 612,622 es alimentado no por portadoras ópticas continuas, sino por portadoras ópticas mismas moduladas por una frecuencia de oscilador local de microondas, o pulsación, ω_{OL} y generada por el generador 602. Los moduladores ópticos 612,622 actúan entonces como mezcladores optoelectrónicos recibiendo, en una primera entrada, una señal eléctrica o de microondas 610,620 a una frecuencia intermedia, o de pulsación, ω_{FI} y en una segunda entrada la señal optoelectrónica generada por el generador 602. El principio de implementación de una función de mezcla optoelectrónica mediante un modulador óptico es de por sí conocido, por ejemplo descrito en la publicación " G. K. Gopalakrishnan et al, A LiNbO3 microwave-optoelectronic mixer with linear performance, IEEE MTT-S Dig, 1993, pp. 1055-1058 ».

35 El dispositivo 600* de la figura 10 comprende además, para cada canal de salida, un filtro 633,643, del tipo de filtro de paso de banda, para extraer la componente de frecuencia $\omega_{RF}=\omega_{FI}+\omega_{OL}$ de la señal de salida del circuito de alimentación 601.

La figura 11 muestra un esquema de un dispositivo amplificador multipuerto que comprende dos circuitos de alimentación distribuida según la invención.

40 Se sabe que un circuito de alimentación distribuida, del tipo de la matriz de Butler, puede utilizarse para alimentar, no un conjunto de antenas, sino un conjunto de amplificadores de potencia, a fin de promediar la potencia instantánea que fluye a través de ellos.

Dicho dispositivo amplificador multipuerto 1000 puede diseñarse utilizando un circuito de alimentación distribuida 1001 según la invención, tal como se esquematiza en la figura 11.

45 El dispositivo amplificador multipuerto 1000 comprende un primer circuito de alimentación distribuida 1001 según la invención que comprende ocho entradas y ocho salidas (entendiéndose que este número puede ampliarse a otros valores como ya se ha explicado en la descripción).

50 Cada entrada I1,...I8 está conectada a un modulador óptico 1012,1022, por ejemplo un modulador Mach-Zehnder, que recibe en una entrada una señal eléctrica o de microondas 1010,1020 posiblemente amplificada previamente mediante un amplificador 1011,1021. La segunda entrada de cada modulador óptico 1012,1022 está conectada a un generador de portadora óptica 1002 adecuado para generar al menos una portadora óptica de longitud de onda λ_1 . Ventajosamente, el generador 1002 es capaz de generar tantas portadoras ópticas como entradas tenga el circuito de alimentación distribuida 1001. Por ejemplo, el generador 1002 puede ser capaz de implementar una técnica de multiplexación por división de longitud de onda para generar, en el ejemplo de la figura 11, ocho portadoras a ocho longitudes de onda $\lambda_1, \dots, \lambda_8$. Cada portadora óptica modula así la señal de microondas producida en una de las entradas del circuito 1001.

55

- 5 La señal obtenida en cada una de las salidas 01,...08 del circuito 1001 es entonces demodulada a través de un detector óptico 1030, 1040, por ejemplo un fotodetector, capaz de convertir la señal óptica en una señal eléctrica que es entonces eventualmente amplificada a través de amplificadores 1031, 1041 antes de ser encaminada hacia las entradas I^*1, \dots, I^*8 de un segundo circuito de alimentación distribuida 1003 cuya función de transferencia es la inversa M^{-1} de aquella, M , del primer circuito 1001.
- Las leyes de fase generadas a la salida del primer circuito 1001 no son necesariamente lineales equidistantes, sino sólo ortogonales entre sí.
- 10 La ganancia de potencia teórica total del dispositivo de amplificación 1000, medida entre una entrada $S1, S8$ y una salida correspondiente $S'1, S'8$, es igual a la ganancia proporcionada por el subconjunto de un detector óptico 1030, 1040 concatenado con un amplificador 1031, 1041.
- Esta ganancia debe ser ponderada por cualquier pérdida que se produzca en los primeros y segundos circuitos 1001, 1003, así como por las que surjan de cualquier imperfección de implementación que resulte en que las funciones de transferencia M y M^{-1} de los primeros y segundos circuitos 1001, 1003 no sean perfectamente inversas.
- 15 Son posibles otros usos de un circuito de alimentación distribuida según la invención. En particular, se pueden conectar en cascada varios circuitos para proporcionar un formador de haz adecuado para alimentar una red de antenas bidimensionales, por ejemplo, una red plana o conformada.

REIVINDICACIONES

1. Circuito de alimentación distribuida (100, 200, 300, 400, 500) para una red de formación de haces de antena que comprende una pluralidad N de entradas (I1, I2) y una pluralidad N de salidas (O1, O2), **caracterizado porque** dicho circuito está adaptado para recibir, en al menos una entrada una señal eléctrica a una frecuencia de microondas determinada, estando la señal modulada sobre al menos una portadora óptica, comprendiendo dicho circuito al menos un conjunto (201, 202, 203, 204) de al menos dos divisores ópticos (DI1, DI2) con una sola entrada y dos salidas al menos una línea de retardo (LR1, LR2) de longitud configurada para ser igual a una fracción entera de la longitud de onda de dicha señal a su frecuencia de microondas y dos medios (CO1, CO2, M1, M2) para combinar dos señales ópticas que tienen dos entradas y que tienen una única salida conectada a una salida distinta de dicho circuito, estando dicho conjunto dispuesto y estando las líneas de retardo (LR1, LR2) configuradas de forma que la función de transferencia teórica (T) de dicho circuito es una matriz ortogonal.
2. Circuito de alimentación distribuida (100) según la reivindicación 1, en el que una línea de retardo (LR1,LR2) está conectada, en un primer extremo, a una primera salida de un divisor óptico.
3. Circuito de alimentación distribuida (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que un divisor óptico (DI1, DI2) está conectado, en su entrada, a una entrada (I1, I2) de dicho circuito.
4. Circuito de alimentación distribuida (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que un medio (CO1,CO2,M1,M2) para combinar dos señales ópticas está conectado, en su salida, a una salida (O1,O2) de dicho circuito.
5. Circuito de alimentación distribuida (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho conjunto (201,202,203,204) comprende dos líneas de retardo (LR1,LR2) cuya longitud es sustancialmente igual a un cuarto de la longitud de onda de dicha señal a su frecuencia de microondas.
6. Circuito de alimentación distribuida (100) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicho conjunto (201,202,203,204) comprende una línea de retardo (LR1) de longitud sustancialmente igual a la mitad de la longitud de onda de dicha señal a su frecuencia de microondas.
7. Circuito de alimentación distribuida (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el número N de entradas y salidas es una potencia de dos.
8. Circuito de alimentación distribuida (100) según la reivindicación 7, en el que una segunda salida de un divisor óptico (DI1,DI2) está conectada a una primera entrada de un medio (CO1,CO2,M1,M2) para combinar dos señales ópticas y una línea de retardo (LR1,LR2) está conectada en un segundo extremo a una segunda entrada de un medio (CO1,CO2,M1,M2) para combinar dos señales ópticas.
9. Circuito de alimentación distribuida (100,200,300,400,500) según la reivindicación 8, en el que dicho circuito comprende un número de conjuntos (201,202,203,204) igual al logaritmo binario del número N de entradas y salidas multiplicado por la mitad de dicho número N.
10. Circuito de alimentación distribuida (200) según la reivindicación 9, en el que una salida de un medio (CO_{1,2},CO_{2,1}, CO_{1,1}, CO_{2,2}) para combinar dos señales ópticas de un primer conjunto (201,202) está conectada a una entrada de un divisor óptico (DI_{3,2}, DI_{4,1}, DI_{3,1}, DI_{4,2}) de un segundo conjunto (203,204), directamente o a través de una línea de retardo adicional (LR5, LR6) de longitud cero o sustancialmente igual a la mitad de la longitud de una línea de retardo (LR1, LR2), de longitud no nula, de uno de dichos conjuntos (201, 202, 203, 204), estando dicha longitud configurada de forma que la función de transferencia teórica (T) de dicho circuito es una matriz ortogonal.
11. Circuito de alimentación distribuida (300) según la reivindicación 10, en el que el conjunto formado por un medio (CO_{1,2},CO_{2,1}, CO_{1,1}, CO_{2,2}) para combinar dos señales ópticas y un divisor óptico (DI_{3,2}, DI_{4,1}, DI_{3,1}, DI_{4,2}), conectados en serie, se sustituye por un acoplador óptico (CP_{1,1}, CP_{1,2}, CP_{2,1}, CP_{2,2}), estando dicha línea de retardo adicional (LR_{5,1}, LR_{5,2}, LR_{6,1}, LR_{6,2}) conectada en un primer extremo a una salida de un acoplador óptico (CP_{1,1}, CP_{1,2}, CP_{2,1}, CP_{2,2}).
12. Circuito de alimentación distribuida (100,200,300,400,500) según una de las reivindicaciones anteriores, en el que un medio para combinar dos señales ópticas es un combinador óptico de 3 dB (CO1,CO2).
13. Circuito de alimentación distribuida (100,200,300,400,500) según una de las reivindicaciones 1 a 11, en el que un medio para combinar dos señales ópticas es un multiplexor (M1,...,M8) de al menos dos longitudes de onda ópticas y la función de transferencia teórica (T) de dicho circuito es una matriz unitaria.

- 5 14. Circuito de alimentación distribuida (800) según la reivindicación 11, en el que un acoplador óptico (CP_{1,1}, CP_{1,2}, CP_{2,1}, CP_{2,2}) se sustituye por un primer intercalador de longitudes de onda ópticas (INT_{1,1}, INT_{1,2}, INT_{2,1}, INT_{2,2}) y medios (INT_{3,1}, INT_{3,2}, INT_{4,1}, INT_{4,2}), conectados a una salida (01,02,03,04) de dicho circuito, para intercalar longitudes de onda ópticas, INT_{2,1}, INT_{2,2}) y un medio (INT_{3,1}, INT_{3,2}, INT_{4,1}, INT_{4,2}), conectado a una salida (01,02,03,04) de dicho circuito (800), para combinar dos señales ópticas es un segundo intercalador de longitud de onda óptica (INT_{3,1}, INT_{3,2}, INT_{4,1}, INT_{4,2}), siendo un intercalador de longitudes de onda ópticas capaz de recibir una pluralidad de longitudes de onda ópticas en una entrada y emitir las alternativamente en una u otra de sus salidas según un período de intercalación determinado, siendo el período de intercalación de un segundo intercalador igual al doble del período de intercalación de un primer intercalador.
- 10 15. Circuito de alimentación distribuida (100,200,300,400,500,800) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho circuito es un circuito integrado óptico o un circuito realizado mediante fibras ópticas.
- 15 16. Red de formación de haces de antena (600) que comprende medios (602,612,622) para modular al menos una señal eléctrica a una frecuencia de microondas en una portadora óptica, un circuito de alimentación distribuida (601) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores para recibir dicha al menos una señal eléctrica en la portadora óptica y medios (630,640) para convertir dicha señal eléctrica en la portadora óptica en una señal eléctrica para alimentar al menos un elemento de antena (632,642) de una red de antenas.
- 20 17. La red de formación de haces de antena (600) según la reivindicación 16, en la que dichos medios (602,612,622) para modular una señal eléctrica en portadoras ópticas están adaptados para modular las señales eléctricas que se inyectan en las entradas de dicho circuito de alimentación distribuida (601) en portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda.
- 25 18. Utilización de un circuito de alimentación distribuida (500,601) según una de las reivindicaciones 1 a 13 o de una red de formación de haces de antena (600) según una de las reivindicaciones 16 o 17 que comprende inyectar, en las entradas de dicho circuito de alimentación distribuida (500,601), una pluralidad de señales eléctricas portadoras ópticas en una disposición ascendente de los valores de las longitudes de onda ópticas de dichas señales o en una disposición alternante de los valores pares e impares de las longitudes de onda ópticas de dichas señales.
- 30 19. Un receptor (900) que comprende una pluralidad de elementos de antena (932,942) que proporcionan una señal eléctrica (910,920), medios (902,912,922) para modular dicha señal eléctrica (910,920) a una frecuencia de microondas en una portadora óptica, un circuito de alimentación distribuida (901) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15 para recibir dicha señal eléctrica en la portadora óptica y medios (930,940) para convertir dicha señal eléctrica en la portadora óptica en una señal eléctrica.
- 35 20. Dispositivo amplificador multipuerto (1000) que comprende medios (1002, 1012, 1022) para modular al menos una señal eléctrica a una frecuencia de microondas sobre una portadora óptica, un primer circuito de alimentación distribuida (1001) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15 para recibir dicha señal eléctrica sobre la portadora óptica, medios (1030, 1040) para convertir dicha señal eléctrica sobre la portadora óptica en una señal eléctrica, y un segundo circuito de alimentación distribuida (1003) dispuesto para recibir la salida de la señal eléctrica de los medios de conversión (1030, 1040).

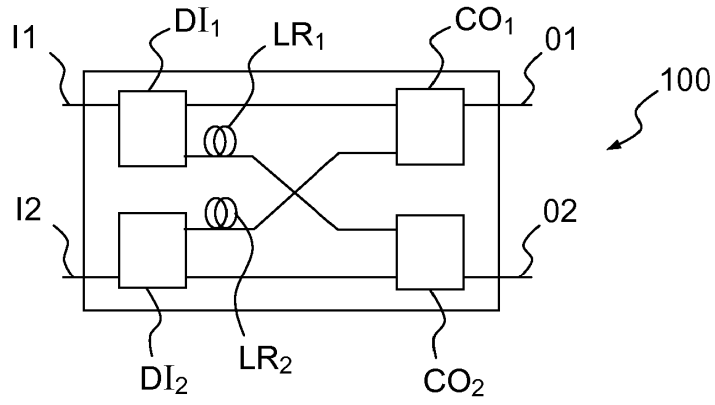


FIG.1

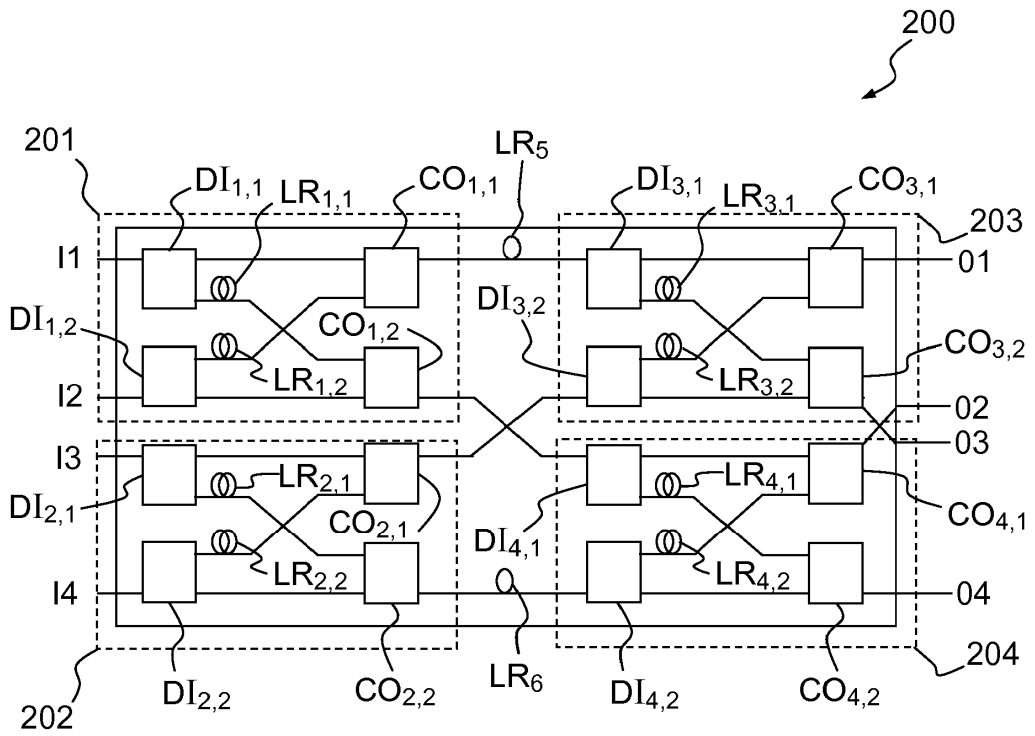
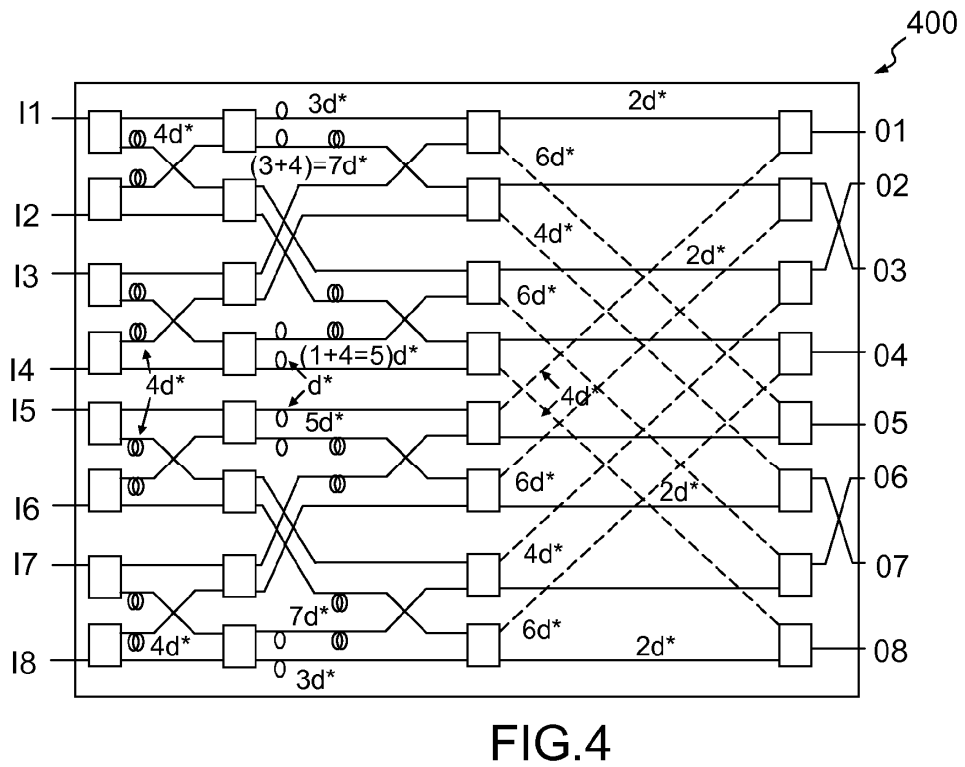
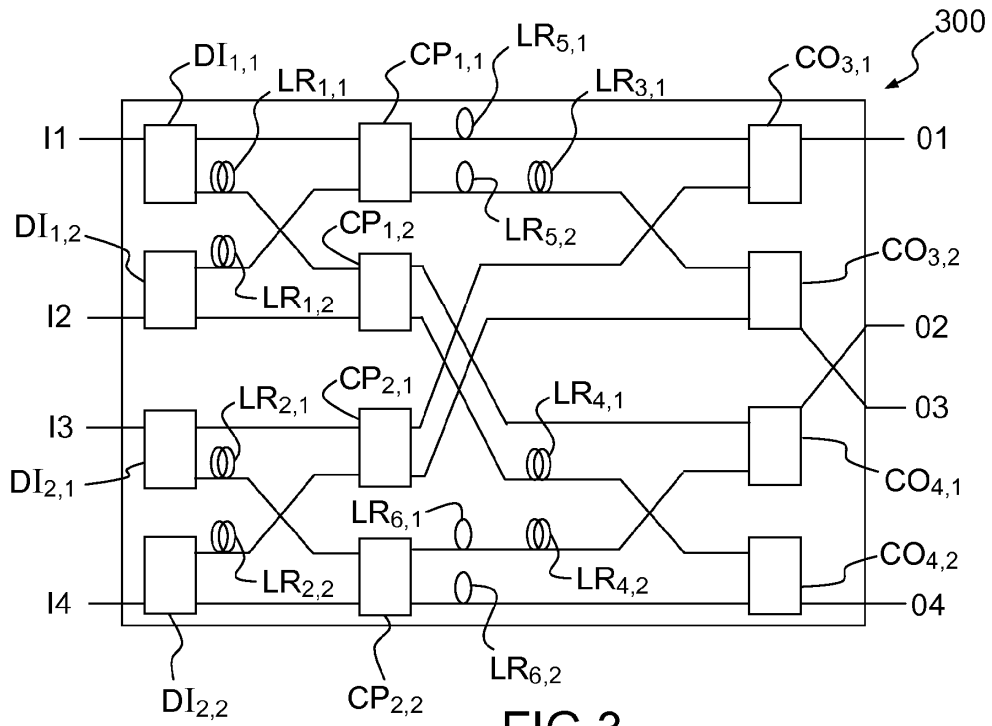


FIG.2



$$T = \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & e^{-j7\pi/8} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j9\pi/8} & e^{-j\pi/2} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j\pi/8} & e^{-j4\pi/8} \\ e^{-j\pi/8} & 1 & e^{-j11\pi/8} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j7\pi/8} & e^{-j3\pi/8} & e^{-j\pi/2} & e^{-j3\pi/4} \\ e^{-j\pi/4} & e^{-j9\pi/8} & 1 & e^{-j3\pi/8} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j\pi/2} & e^{-j13\pi/8} & e^{-j5\pi/8} \\ e^{-j3\pi/8} & e^{-j\pi/4} & e^{-j5\pi/8} & 1 & e^{-j13\pi/8} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j11\pi/8} & e^{-j2\pi/4} \\ e^{-j\pi/2} & e^{-j11\pi/8} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j13\pi/8} & 1 & e^{-j5\pi/8} & e^{-j\pi/4} & e^{-j3\pi/8} \\ e^{-j5\pi/8} & e^{-j\pi/2} & e^{-j15\pi/8} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j3\pi/8} & 1 & e^{-j9\pi/8} & e^{-j\pi/4} \\ e^{-j3\pi/4} & e^{-j13\pi/8} & e^{-j\pi/2} & e^{-j7\pi/8} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j11\pi/8} & 1 & e^{-j\pi/8} \\ e^{-j7\pi/8} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j9\pi/8} & e^{-j\pi/2} & e^{-j9\pi/8} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j7\pi/8} & 1 \end{bmatrix}$$

FIG.4bis

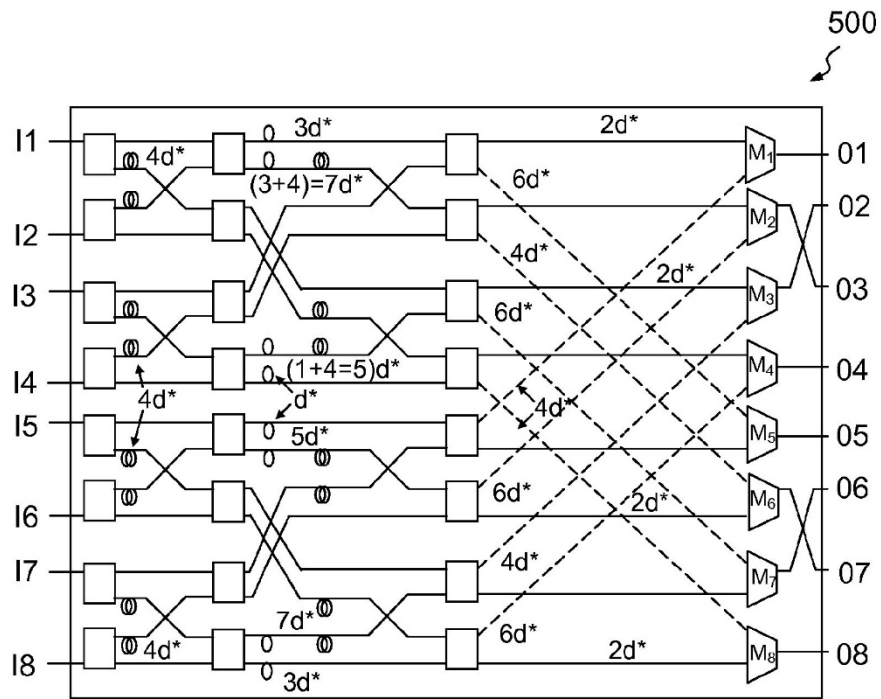


FIG.5

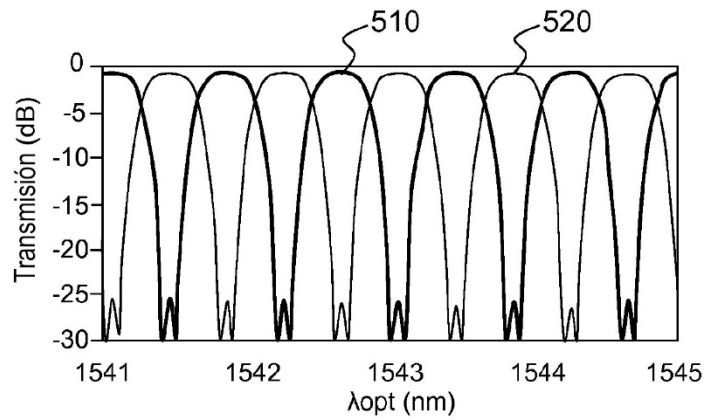
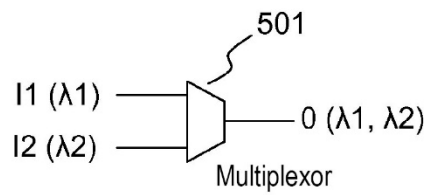


FIG.5bis

$$T^4 = \frac{1}{2^p} \begin{bmatrix} j & j & -j & -j & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -j & -j & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -j & j & -j & -j & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T^8 = \frac{1}{2^p \sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ e^{-j7\pi/4} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j4\pi/4} & e^{-j8\pi/4} & e^{-j\pi} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j4\pi/4} & e^{-j8\pi/4} \\ e^{-j6\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j\pi} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j2\pi/4} & e^{-j6\pi/4} \\ e^{-j5\pi/4} & e^{-j9\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j9\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j9\pi/4} & e^{-j\pi} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j9\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j9\pi/4} \\ e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} & e^{-j\pi} \\ e^{-j3\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j9\pi/4} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j9\pi/4} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j\pi} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j\pi} & e^{-j5\pi/4} & e^{-j7\pi/4} \\ e^{-j2\pi/4} & e^{-j10\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j10\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j10\pi/4} & e^{-j\pi} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j10\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j6\pi/4} & e^{-j10\pi/4} & e^{-j6\pi/4} \\ e^{-j\pi/4} & e^{-j13\pi/4} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j13\pi/4} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j13\pi/4} & e^{-j\pi} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j13\pi/4} & e^{-j3\pi/4} & e^{-j7\pi/4} & e^{-j13\pi/4} & e^{-j3\pi/4} \end{bmatrix}$$

FIG.5ter

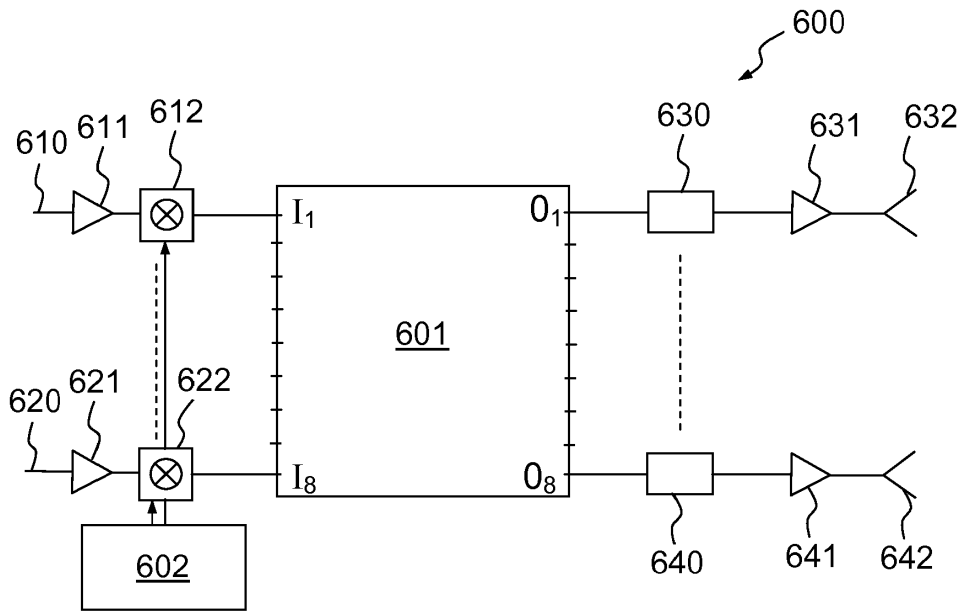


FIG.6

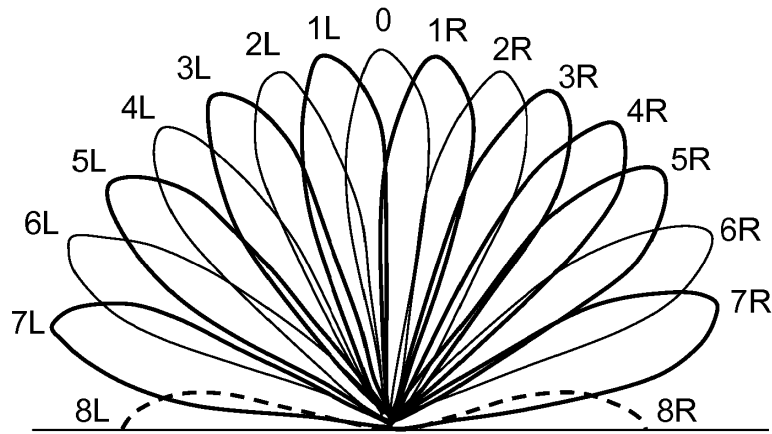


FIG.7

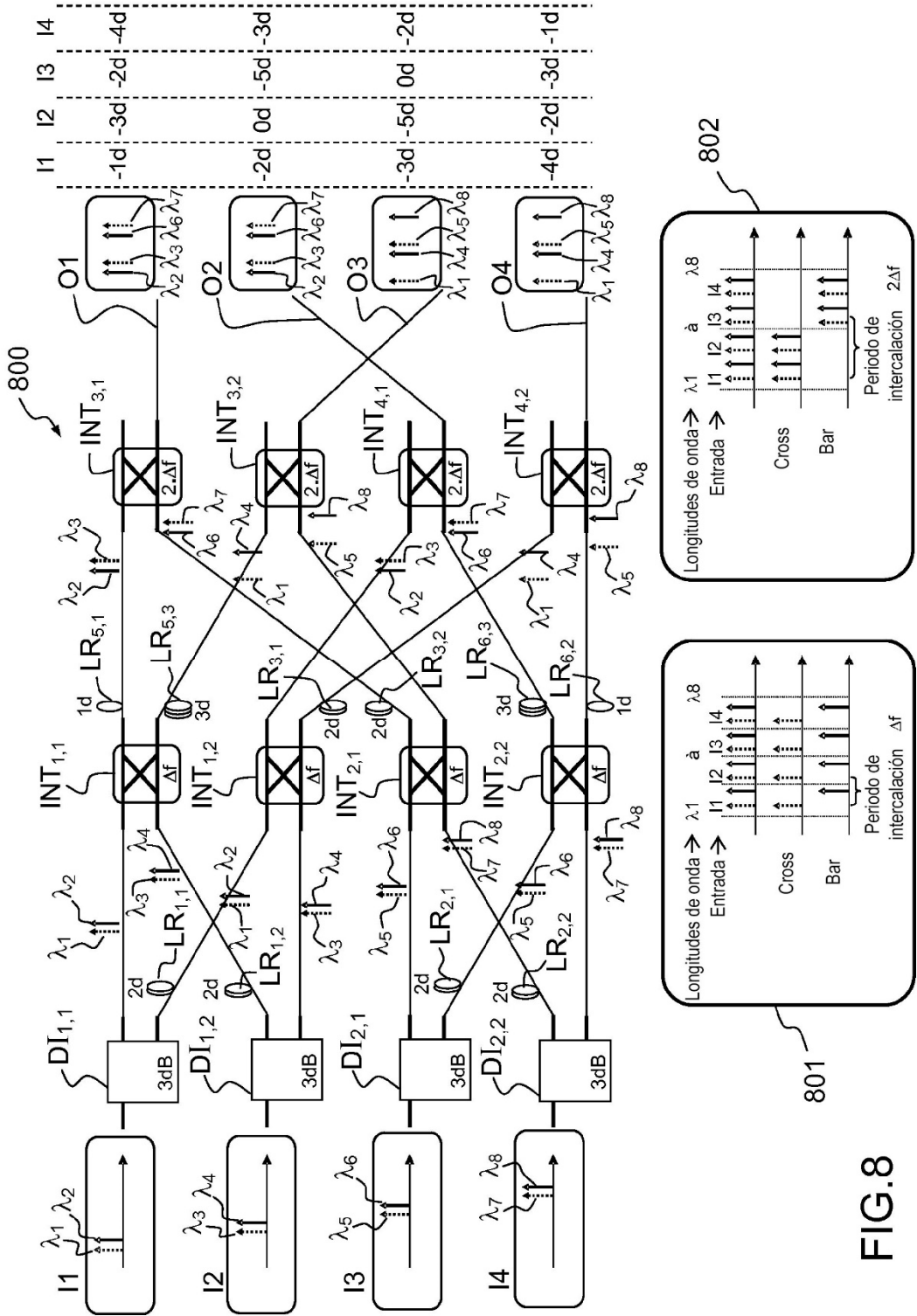


FIG.8

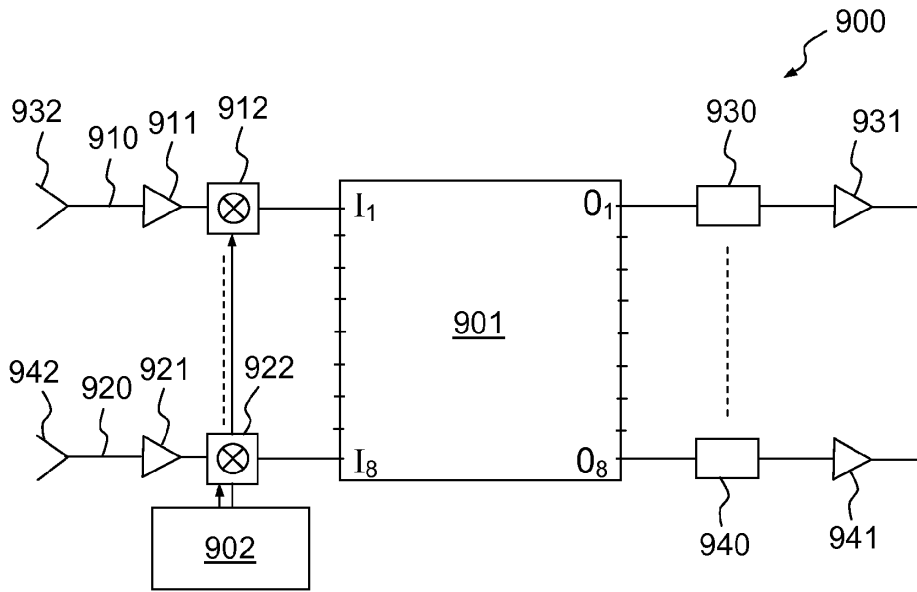


FIG.9

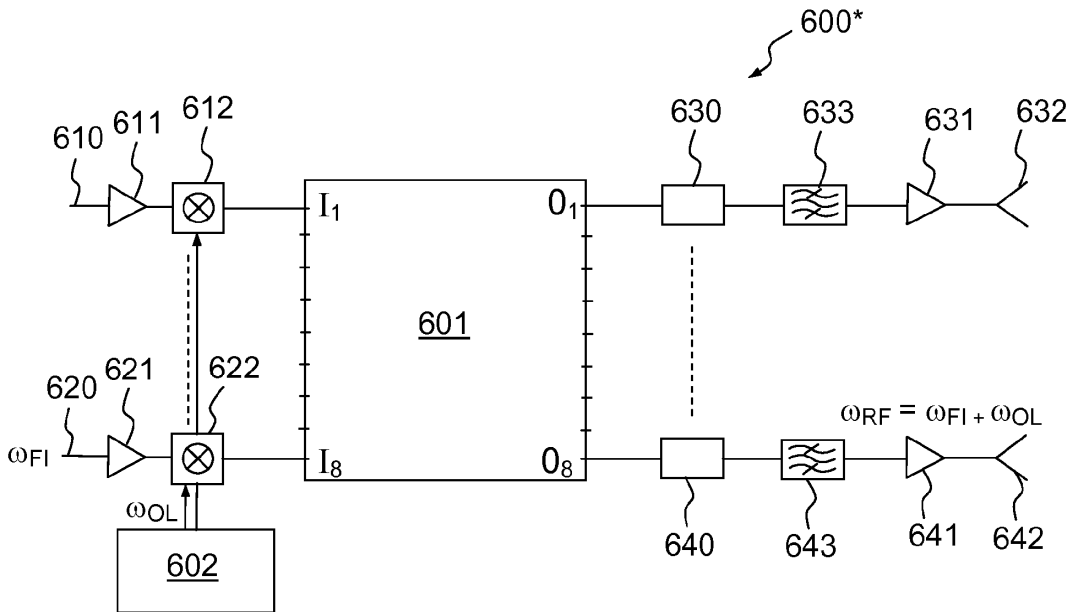


FIG.10

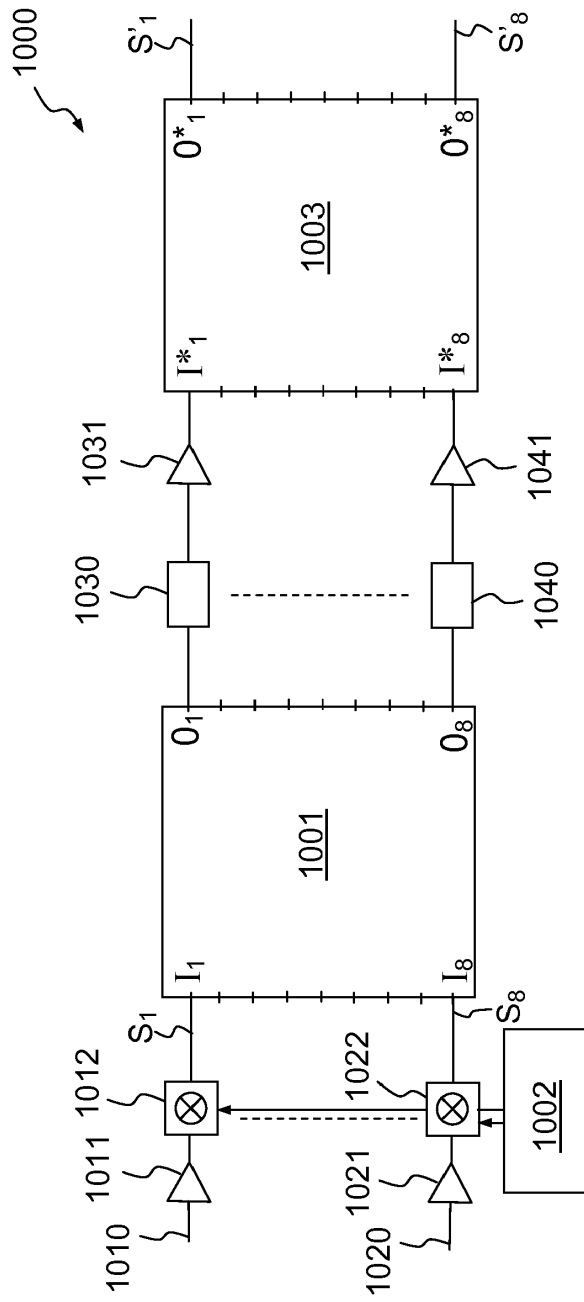


FIG.11