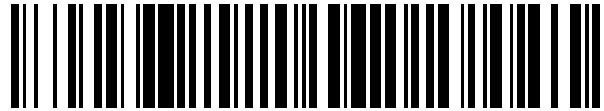


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 418 439**

51 Int. Cl.:

**H04B 10/00** (2013.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.09.2008 E 08803849 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.04.2013 EP 2304911**

54 Título: **Modulación de señal óptica**

30 Prioridad:

**31.07.2008 EP 08161561**

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

**13.08.2013**

73 Titular/es:

**TELEFONAKTIEBOLAGET L M ERICSSON  
(PUBL) (100.0%)  
Torshamnsgaten 23  
16483 Stockholm , SE**

72 Inventor/es:

**SECONDINI, MARCO y  
CAVALIERE, FABIO**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 418 439 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

## Modulación de señal óptica

5 Campo técnico

La invención está relacionada con un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  (QAM), un método de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$ , y un aparato de transmisión de señal óptica que comprende el modulador óptico de  $2^n$ -QAM.

10 Antecedentes

La modulación de amplitud en cuadratura con 16 niveles (16-QAM) es uno de los formatos de modulación candidatos para la transmisión a 100 gigabits/s (Gb/s) en fibra óptica. Codifica cuatro bits de una constelación de dieciséis puntos, con cuatro valores diferentes de amplitud de los componentes en-fase y de cuadratura de la señal transmitida. Cuando se considera un formato de 16-QAM de polarización de diversidad para la transmisión de 100 Gb/s, la velocidad de símbolos necesarios para el transmisor es de 12,5 Gbaudios. Incluso a esta reducida velocidad de símbolos, la generación de señales impulsoras multi-nivel puede ser complicada. Otra complicación surge de la necesidad de aplicar codificación digital diferencial a la señal óptica antes de la modulación óptica, para resolver la ambigüedad de fase  $\pi/2$  de la constelación de QAM que, de otro modo, surgiría cuando se estima la fase de portadora en el receptor.

Hay cuatro esquemas conocidos de transmisor/modulador de 16-QAM, de la siguiente manera. El primero comprende un modulador convencional en-fase/cuadratura (I-Q) en el que cada uno de los componentes en-fase y cuadratura es una señal de cuatro niveles que se puede obtener utilizando un voltaje impulsor de cuatro niveles. A pesar de la simplicidad del esquema óptico, el requisito de la generación de voltajes impulsores de cuatro niveles hace que el transmisor sea menos atractivo para la aplicación de sistemas a 100 Gb/s.

Un segundo esquema comprende un único modulador Mach Zehnder (MZM) de doble impulsión, según se informó en el documento de K.-P. Ho y H.-W. Cui, "Generation of arbitrary quadrature signals using one dual-drive modulator", J. Lightwave Tecnología., vol. 23, nº. 2, Páginas 764-770, febrero de 2005. La señal de salida puede asumir cualquier valor en el plano complejo mediante una correcta elección de los voltajes impulsores para los dos MZM. Este esquema incorpora los componentes ópticos más simples, sin embargo, la generación de la constelación de 16-QAM requiere un esquema de voltaje impulsor muy complejo con hasta señales de 16 niveles.

Una tercera estructura transmisora de 16-QAM, que comprende un modulador de fase y amplitud I-Q, que sólo necesita voltajes impulsores de dos niveles, se ha informado en el documento de M. Seimetz, "Multi-format transmitters for coherent optical M-PSK and M-QAM transmission", en Proc. ICTON'05, 2005, páginas 225-229, papel Th.B1.5. La estructura básica es similar a un modulador I-Q convencional pero cada ramificación también comprende un modulador de fase. En cada brazo, el MZM genera los dos niveles de amplitud  $\{1/3, 1\}$ , y el modulador de fase (PM, *phase modulator*) establece la fase a cero o  $\pi$ , para obtener las señales necesarias de cuatro niveles en cada cuadrante del diagrama de la constelación.

La cuarta estructura transmisora de 16-QAM comprende dos moduladores de desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK) anidados dentro de un interferómetro Mach-Zehnde que tiene una relación de combinación de salida 80:20, como se informó en el documento de J. M. E. Kahn y Ip, "Carrier synchronization for 3- and 4-bit-per-symbol optical transmission", J. Lightwave tecnología, vol. 23, nº. 12, págs. 4110-4114, diciembre de 2005. Este esquema consigue una modulación 16-QAM utilizando señales impulsoras binarias para cada modulador QPSK. Sin embargo, todavía necesita un procesamiento eléctrico de la secuencia de bits aportada para aplicar codificación diferencial por cuadrante.

55 La QAM de orden inferior y superior, tal como la modulación de amplitud cuaternaria (4-QAM) y el 64-QAM, también se conocen para la codificación de datos digitales, y en esta memoria se les hace referencia colectivamente como  $2^n$ -QAM.

Un artículo de Takahide Sakamoto et al ("50-Gb/s 16QAM by a quad-parallel Mach-Zehnder modulator, ACTAS DE LA CONFERENCIA EUROPEA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA, XX, XX, 1 de enero de 2007 (2007-0101), página PD2.8, XP009117340"), describe un modulador de  $\text{LiNbO}_3$  quad-paralelo, en el que se sintetiza una señal 16-QAM mediante la superposición de dos señales QPSK con diferentes amplitudes.

El documento DE 20 2006 000197 U1 describe un transmisor que tiene un modulador IQ en serie en el que un primer modulador de fase se dispone en un brazo en-fase de un modulador IQ, en serie con un modulador Mach-Zehnder. Un segundo modulador de fase se dispone en el brazo de cuadratura, en serie con otro modulador Mach-Zehnder. A los moduladores de fase se les suministran impulsos de control de dos diferentes condiciones eléctricas para la realización de cambios de fase de 0 grado o 180 grados.

#### Compendio

El objetivo es evitar por lo menos algunas de las desventajas mencionadas anteriormente y proporcionar un mejor modulador óptico de  $2^n$ -QAM y un aparato de transmisión de señal óptica.

Según un primer aspecto de la invención se proporciona un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  que comprende:

- una entrada óptica;
- un primer aparato de modulación óptica configurado para aplicar un esquema de modulación en amplitud  $2^{n-2}$  que tiene  $2^{n-2}$  puntos de constelación dispuestos en una constelación en un primer cuadrante de su diagrama de constelación a una señal óptica recibida; y
- un segundo aparato de modulación óptica configurado para rotar de forma selectiva la fase de una señal óptica recibida, en donde la entrada óptica está configurada para entregar una señal óptica que va a ser modulada a uno de entre el primer y el segundo aparato de modulación óptica, el mencionado aparato genera una señal óptica intermedia y además se ha configurado para entregar la señal óptica intermedia al otro de entre el primer y el segundo aparato de modulación óptica, para generar de ese modo una señal óptica modulada de salida que tiene un diagrama cuadrado de constelación que comprende  $2^n$  puntos de constelación distribuidos por los cuatro cuadrantes del diagrama de constelación.

El cuadrante de diagrama de constelación de  $2^n$ -QAM es establecido de ese modo por la rotación de los puntos de constelación en el primer cuadrante, en lugar de trasladarlos como en el esquema transmisor anidado QPSK 16-QAM. Esta rotación es equivalente a la aplicación de una codificación diferencial de cuatro cuadrantes. El modulador óptico de  $2^n$ -QAM realiza de ese modo automáticamente codificación diferencial por cuadrante, sin que sean necesarios componentes ópticos adicionales para aplicar la codificación.

Preferiblemente,  $n$  es un número par y es por lo menos 4, más preferiblemente 4 o 6, los puntos de constelación del primer aparato de modulación óptica se disponen en una constelación sustancialmente cuadrada. Por lo tanto se proporciona un modulador óptico 16-QAM o 64-QAM que tiene codificación diferencial inherente por cuadrante.

El primer cuadrante es preferiblemente el cuadrante I.

El primer aparato de modulación óptica comprende preferiblemente:

- un modulador óptico en-fase/cuadratura que comprende una entrada óptica configurada para recibir una señal óptica que va a ser modulada, una ramificación en-fase que comprende un primer modulador óptico, una ramificación de cuadratura que comprende un segundo modulador óptico y un desfasador  $\pi/2$ , y una salida óptica; y
- un aparato impulsor configurado para entregar señales eléctricas impulsoras de  $\sqrt{2^{n-2}}$  niveles al primer y al segundo modulador óptico, de tal manera que el modulador óptico en-fase/cuadratura puede funcionar para aplicar el esquema de modulación de amplitud  $2^{n-2}$ .

Un modulador óptico de 16-QAM requiere, por lo tanto, solo señales eléctricas impulsoras de dos niveles (binarias), y realiza codificación diferencial por cuadrante sin necesidad de componentes ópticos adicionales. Además, el uso de señales eléctricas impulsoras binarias evita sustancialmente la pesada distorsión que pueden experimentar las señales impulsoras multi-nivel, debido a las limitaciones de ancho de banda del modulador y la no linealidad en aplicaciones de alta velocidad de transmisión.

Un modulador óptico de 64-QAM sólo necesitaría señales eléctricas impulsoras de cuatro niveles, y, por tanto, requiere señales impulsoras más simples que las necesarias para los moduladores de 64-QAM conocidos.

El primer y el segundo modulador óptico comprenden preferiblemente moduladores Mach-Zehnder. Cualquier ruido en las señales eléctricas impulsoras, por lo tanto, será absorbido substancialmente por la función de transferencia  $\sin^2$  de los moduladores Mach-Zehnder. El modulador óptico de  $2^n$ -QAM también produce generalmente transiciones rectas entre los símbolos de señal de salida que ofrece la ventaja de crear puntos estables de decisión para todas las combinaciones de símbolos.

Preferiblemente,  $n$  es 4 y las señales eléctricas impulsoras de dos niveles comprenden aproximadamente  $0,39 V_\pi$ , donde  $V_\pi$  es el voltaje de conmutación del respectivo modulador Mach-Zehnder, y cero voltios. Los moduladores Mach-Zehnder generan de ese modo los niveles de amplitud  $1/3$  y  $1$  de la señal de salida, dando al modulador óptico en-fase/cuadratura una constelación de símbolos de señal de salida que tiene puntos en el cuadrante I en las ubicaciones  $I_1$  (eje en-fase),  $Q_1$  (eje de cuadratura):  $1/3, 1/3$ ;  $1, 1/3$ ;  $1/3, 1$ ; y  $1, 1$ .

Preferiblemente, el aparato de modulación óptica secundaria se configura para aplicar un esquema de modulación de desplazamiento de fase cuaternaria que tiene cuatro niveles de modulación de sustancialmente igual amplitud y fases separadas 90 grados, dando el esquema de modulación un diagrama de constelación cuadrada que tiene un punto de constelación en cada cuadrante, a la señal óptica recibida para rotar de forma selectiva la fase de la señal óptica recibida.

Preferiblemente, el segundo aparato de modulación óptica comprende:

- un segundo modulador óptico en-fase/cuadratura que comprende una entrada óptica, una ramificación en-fase que comprende un tercer modulador óptico, una ramificación de cuadratura que comprende un cuarto modulador óptico y un desfasador  $\pi/2$ , y una salida óptica; y
- un segundo aparato impulsor configurado para entregar señales eléctricas impulsoras de dos niveles al tercer y el cuarto modulador, las señales eléctricas impulsoras son de diferentes voltajes a las señales eléctricas impulsoras al primer y el segundo modulador óptico, de tal manera que el segundo aparato de modulación óptica aplica un esquema de modulación de desplazamiento de fase cuaternaria que tiene cuatro niveles de modulación de amplitud sustancialmente igual y fases separadas 90 grados, dando al esquema de modulación un diagrama de constelación cuadrada que tiene un punto de constelación en cada cuadrante, a la señal óptica modulada recibida.

Los símbolos de señal de salida en los puntos de constelación en el cuadrante I se dejan respectivamente, por lo tanto, en el cuadrante I o se rotan al cuadrante II, III o IV del diagrama de constelación.

El tercer y el cuarto modulador óptico comprenden preferiblemente moduladores Mach-Zehnder.

Las señales eléctricas impulsoras de dos niveles al tercer y al cuarto modulador comprenden preferiblemente  $V_\pi$ , donde  $V_\pi$  es el voltaje de conmutación del respectivo modulador Mach-Zehnder, y cero voltios. El tercer y el cuarto modulador generan de ese modo niveles de amplitud de señal de salida de  $-1$  y  $1$ , dando al segundo modulador óptico en-fase/cuadratura un diagrama de constelación que comprende cuatro puntos de constelación en las ubicaciones  $I_2$  (eje en-fase),  $Q_2$  (eje de cuadratura):  $1, 1$ ;  $1, -1$ ;  $-1, -1$ ;  $-1, 1$ .

Esta rotación es equivalente a la aplicación de una codificación diferencial de cuatro cuadrantes. El segundo modulador óptico en-fase/cuadratura aplica de ese modo de manera inherente codificación diferencial por cuadrante a la señal óptica modulada.

Preferiblemente, la salida óptica del modulador óptico en-fase/cuadratura se acopla a la entrada óptica del segundo modulador óptico en-fase/cuadratura, poniendo de ese modo los moduladores ópticos en cascada.

5 Cada uno del primer y el segundo aparato impulsor comprende preferiblemente un primer y un segundo impulsor respectivamente, impulsando cada uno un modulador Mach-Zehnder. Como alternativa, el primer y el segundo aparato impulsor pueden proporcionarse como un solo dispositivo.

10 El segundo aparato de modulación óptica puede comprender como alternativa un modulador de fase configurado para rotar de forma selectiva la fase de la señal recibida cero grados, 90 grados, 180 grados o 270 grados. Esta rotación es equivalente a la aplicación de una codificación diferencial de cuatro cuadrantes. El modulador de fase aplica de ese modo de manera inherente codificación diferencial por cuadrante a la señal óptica modulada.

15 El modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  puede comprender además un codificador diferencial que puede funcionar para aplicar codificación diferencial a los dos primeros bits de los  $n$  bits de un símbolo de datos generado por el modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$ .

20 Según un segundo aspecto de la invención se proporciona un aparato de transmisión de señales ópticas que comprende:

25 una fuente óptica que tiene una salida óptica y que puede funcionar para generar una señal óptica de datos; y  
un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según el primer aspecto de la invención,  
la salida óptica de la fuente óptica está acoplada al primer aparato de modulación óptica.

30 El aparato de transmisión de señal óptica aplica de ese modo de manera inherente codificación diferencial por cuadrante a una señal óptica transmitida, sin operaciones adicionales necesarias para lograr la codificación.

35 Según un tercer aspecto de la invención se proporciona un método para la modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  que comprende las etapas:

a) recibir una señal óptica que va a ser modulada;  
b) generar una señal óptica intermedia aplicando a la señal óptica recibida uno de entre:  
40 a. un esquema de modulación en amplitud  $2^{n-2}$  que tiene  $2^{n-2}$  puntos de constelación dispuestos en una constelación en un primer cuadrante de su diagrama de constelación a la señal óptica; y  
b. una rotación selectiva de fase a la señal óptica para rotar de forma selectiva la fase de la señal óptica; y  
45 c) aplicar a la señal óptica intermedia el otro de los puntos a. y b., para generar de ese modo una señal óptica de salida que tiene un diagrama de constelación que comprende  $2^n$  puntos de constelación distribuidos por los cuatro cuadrantes del diagrama de la constelación.

50 El método aplica de manera inherente codificación diferencial por cuadrante durante la modulación de una señal óptica, sin etapas adicionales de procesamiento necesarias para lograr la codificación necesaria.

Preferiblemente,  $n$  es un número par y es por lo menos 4, más preferiblemente 4 o 6, los puntos de constelación se disponen en una constelación sustancialmente cuadrada.

55 Preferiblemente, aplicar a. comprende:

I. entregar la señal óptica a un modulador óptico en-fase/cuadratura que comprende una entrada óptica configurada para recibir una señal óptica que va a ser modulada, una ramificación en-fase

que comprende un primer modulador óptico, una ramificación de cuadratura que comprende un segundo modulador óptico y un desfaseador  $\pi/2$ , y una salida óptica; y

- 5 II. entregar señales eléctricas impulsoras de  $\sqrt{2^{n-2}}$  niveles al primer y al segundo modulador óptico, de tal manera que el modulador óptico en-fase/cuadratura aplica un esquema de modulación de amplitud  $2^{n-2}$  que tiene  $2^{n-2}$  puntos de constelación dispuestos en una constelación cuadrada en el primer cuadrante de su diagrama de constelación de la señal óptica recibida.

10 la modulación óptica 16-QAM requiere, por lo tanto, el uso solo de señales eléctricas impulsoras de dos niveles (binarias), realizando de ese modo codificación diferencial por cuadrante sin necesidad de etapas adicionales de procesamiento. Además, el impulso de la primera y la segunda modulación óptica con señales eléctricas binarias impulsoras evita sustancialmente la pesada distorsión que pueden experimentar las señales impulsoras multi-nivel, debido a las limitaciones de ancho de banda del modulador y la no linealidad en aplicaciones de alta velocidad de transmisión. La modulación óptica 64-QAM que utiliza el presente método requiere sólo señales eléctricas impulsoras de cuatro niveles, y 15 similarmente realiza de manera inherente codificación diferencial por cuadrante.

Preferiblemente, el primer y el segundo modulador óptico comprende moduladores Mach-Zehnder,  $n$  es 4 y la etapa II. comprende entregar señales eléctricas impulsoras de dos niveles de aproximadamente  $0,39 V_{\pi}$ , donde  $V_{\pi}$  es el voltaje de conmutación del respectivo modulador Mach-Zehnder, y cero voltios a 20 cada uno de los moduladores Mach-Zehnder.

Cualquier ruido en las señales eléctricas impulsoras, por lo tanto, será absorbido sustancialmente por la función de transferencia  $\sin^2$  de los moduladores Mach-Zehnder. El método de  $2^n$ -QAM también produce 25 generalmente transiciones rectas entre los símbolos de señal de salida que ofrece la ventaja de crear puntos estables de decisión para todas las combinaciones de símbolos.

Preferiblemente, b. comprende aplicar un esquema de modulación de desplazamiento de fase cuaternaria que tiene cuatro niveles de modulación de amplitud sustancialmente igual y fases separadas 90 grados, dando al esquema de modulación un diagrama de constelación cuadrada que tiene un punto 30 de constelación en cada cuadrante.

Aplicar el esquema de modulación QPSK deja selectivamente los símbolos de señal de salida en puntos de constelación en el cuadrante I o los rota una cantidad deseada al cuadrante II, III o IV del diagrama de 35 constelación.

Preferiblemente, aplicar b. comprende:

- 40 I. entregar la señal óptica a un segundo modulador óptico en-fase/cuadratura que comprende una entrada óptica configurada para recibir una señal óptica que va a ser modulada, una ramificación en-fase que comprende un tercer modulador óptico, una ramificación de cuadratura que comprende un cuarto modulador óptico y un desfaseador  $\pi/2$ , y una salida óptica; y  
 45 II. entregar señales eléctricas impulsoras de dos niveles al tercer y cuarto modulador, de tal manera que el modulador óptico en-fase/cuadratura aplica un esquema de modulación de desplazamiento de fase que tiene cuatro niveles de modulación de amplitud sustancialmente igual y fases separadas 90 grados, dando al esquema de modulación una diagrama de constelación cuadrada que tiene un punto de constelación en cada cuadrante.

Rotar selectivamente la fase de la señal óptica es equivalente a aplicar una codificación diferencial en cuatro cuadrantes. Aplicar el esquema de modulación QPSK aplica de ese modo de manera inherente 50 codificación diferencial por cuadrante durante la modulación de la señal óptica.

Preferiblemente, el tercer y el cuarto modulador óptico comprenden moduladores Mach-Zehnder y la etapa ii. comprende entregar señales eléctricas impulsoras de dos niveles de aproximadamente  $V_{\pi}$ , donde  $V_{\pi}$  es el voltaje de conmutación del respectivo modulador Mach-Zehnder, y cero voltios a 55 cada uno de los moduladores Mach-Zehnder.

Aplicar b. puede comprender como alternativa entregar la señal óptica a un modulador de fase y aplicar selectivamente una rotación de fase de cero grados, 90 grados, 180 grados o 270 grados a la señal 60 óptica.

Aplicar la rotación de fase es equivalente a la aplicación de una codificación diferencial de cuatro cuadrantes. El método de modulación  $2^n$ -QAM aplica de ese modo de manera inherente codificación diferencial por cuadrante durante la modulación de la señal óptica.

5 El método de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  también puede comprender al aplicación de codificación diferencial a los dos primeros bits de los n bits de un símbolo de datos generados utilizando dicho método.

10 Ahora se describirá con detalle una realización de la invención, solo a modo de ejemplo, haciendo referencia a los dibujos acompañantes.

#### Breve descripción de los dibujos

15 La Figura 1 es una representación esquemática de un modulador óptico de 16-QAM según una primera realización de la invención;

La Figura 2, es el diagrama de constelación del primer modulador óptico en-fase/cuadratura (primer aparato de modulación) del modulador óptico de 16-QAM de la Figura 1;

La Figura 3, es el diagrama de constelación del segundo modulador óptico en-fase/cuadratura (segundo aparato de modulación) del modulador óptico de 16-QAM de la Figura 1;

20 La Figura 4 ilustra que el producto de los diagramas de constelación de las Figuras 2 y 3 produce un diagrama de constelación para un esquema de modulación óptica 16-QAM cuadrado;

La Figura 5 ilustra el esquema general para un QPSK o transmisor de 16-QAM de la técnica anterior;

25 La Figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra las etapas de un método de 16-QAM según una segunda realización de la invención, implementada utilizando el modulador óptico de 16-QAM de la Figura 1;

La Figura 7 es una representación esquemática de un modulador óptico de 16-QAM según una tercera realización de la invención;

30 La Figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra las etapas de un método de 16-QAM según una cuarta realización de la invención, implementada utilizando el modulador óptico de 16-QAM de la Figura 7; y

La Figura 9 es una representación esquemática de un aparato de transmisión de señal óptica según una quinta realización de la invención.

#### Descripción detallada

Haciendo referencia a las Figuras 1 a 4, una primera realización de la invención proporciona un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  (QAM) en forma de un modulador óptico de 16-QAM 10 que comprende una entrada óptica 11, un primer aparato de modulación óptica 12, y un segundo aparato de modulación óptica 20. En esta realización, una señal óptica que va a ser modulada es recibida por la entrada óptica 11 y se acopla al primer aparato de modulación óptica 12, que aplica un esquema de modulación de aptitud cuaternaria a la señal óptica, generando una señal óptica intermedia. La señal óptica intermedia se entrega entonces al segundo aparato de modulación óptica 20, que está configurado para rotar de manera selectiva la fase de la señal óptica intermedia. Una señal óptica modulada por 16-QAM es, por lo tanto, sacada del modulador óptico 10 que tiene un diagrama de constelación cuadrada 19, como se muestra en la figura 4, que comprende 16 puntos de constelación 16 distribuidos por los 4 cuadrantes del diagrama de constelación.

El primer aparato de modulación óptica 12 comprende un modulador óptico en-fase/cuadratura (I-Q) 22, que comprende una entrada óptica 24 configurada para recibir una señal óptica que va a ser modulada, una ramificación en-fase 26 y una ramificación de cuadratura 30. La ramificación en-fase 26 comprende un primer modulador óptico en forma de un modulador Mach-Zehnder (MZM) 28 impulsado por una primera unidad impulsora (no se muestra). La ramificación de cuadratura comprende un segundo modulador óptico en forma de un segundo modulador Mach-Zehnder 32 impulsado por una segunda unidad impulsora (no se muestra), y un desfásador $_{\pi}$  34. La ramificación en-fase 26 y la ramificación de cuadratura 30 están acopladas en sus extremos de salida para formar la salida óptica 36 del modulador de I-Q 22.

El primer modulador Mach-Zehnder 28 es impulsado con voltajes impulsores binarios ( $V_{x1}$ ) de aproximadamente  $0,39 V_{\pi}$ , donde  $V_{\pi}$  es el voltaje de conmutación del modulador Mach-Zehnder 28, y

cero voltios. El segundo modulador Mach-Zehnder 32 es impulsado de forma similar con los mismos niveles de voltaje binario ( $V_{y1}$ ). Los moduladores Mach-Zehnder 28, 32, generan de ese modo niveles de amplitud de señal de salida de  $\frac{1}{3}$  y 1 dando al modulador óptico I-Q 22 una constelación 14 de símbolos de señal de salida que tiene cuatro puntos de constelación 16 en el cuadrante I en las ubicaciones de eje en-fase (x1) y eje de cuadratura (y1):  $\frac{1}{3}, \frac{1}{3}; 1, \frac{1}{3}; \frac{1}{3}, 1; y 1, 1$ , como se muestra en la figura 2.

En esta realización, el segundo aparato de modulación óptica 20, comprende un segundo modulador óptico I-Q 38, que comprende una entrada óptica 40, en una ramificación en-fase 42 y una ramificación de cuadratura 46. La ramificación en-fase comprende un tercer modulador Mach-Zehnder 44. La ramificación de cuadratura 46 comprende de un cuarto modulador Mach-Zehnder 48 y un segundo desfasador  $\pi/2$  50. Los extremos de salida óptica de las ramificaciones en-fase y de cuadratura 42, 46 están acoplados entre sí para formar la salida 52 del segundo modulador I-Q 38, que forma la salida del modulador óptico 16-QAM 10.

El tercer modulador Mach-Zehnder 44 es impulsado con los voltajes impulsores eléctricos binarios ( $V_{x2}$ ) de  $V_{\pi}$  y cero voltios, y el cuarto modulador Mach-Zehnder 48 es impulsado similarmente con señales impulsoras eléctricas binarias ( $V_{y2}$ ) de  $V_{\pi}$  y cero voltios. El tercer y el cuarto modulador Mach-Zehnder son impulsados por lo tanto con diferentes voltajes que el primer y el segundo modulador Mach-Zehnder 28, 32. Las señales eléctricas impulsoras binarias aplicadas dan al segundo modulador I-Q 38 un esquema de modulación de desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK) que tiene 4 niveles de modulación de amplitud sustancialmente igual y  $90^{\circ}$  de separación en-fase. El segundo modulador I-Q 38, por lo tanto, aplica un esquema de modulación que tiene un diagrama de constelación cuadrada 39 que comprende 16 puntos de constelación situados en cada cuadrante, como se muestra en la figura 3.

El esquema general de un conocido transmisor óptico diferencial se muestra en la Figura 5. Debido a la simetría de rotación de 4 pliegues, los formatos de QAM sufren de una ambigüedad de fase 4 pliegues (múltiplos de  $\pi/2$ ) en la estimación de la fase de portadora. La codificación óptima para resolver el problema de ambigüedad de fase en QAM con una mínima penalización de la codificación es la codificación diferencial por cuadrante. Dado un formato de  $2^n$ -QAM, con n par, cada símbolo está representado por  $2^n$  bits. Los primeros 2 bits son codificados diferencialmente, como en el formato diferencial QPSK, y representan el cambio en el cuadrante, mientras que los bits restantes son codificados por Grey en cada cuadrante.

En los moduladores conocidos de Fase y Amplitud I-Q y QPSK anidados, dos voltajes impulsores determinan el cuadrante, mientras que los otros dos determinan el punto dentro del cuadrante. Por lo tanto, el codificador puede realizarse por codificación diferencial de los dos primeros bits a través de las mismas operaciones lógicas dadas para un DQPSK:

$$b_{1,k} = \overline{(a_{1,k} \oplus a_{2,k})} \cdot (a_{1,k} \oplus b_{1,k-1}) + (a_{1,k} \oplus a_{2,k}) \cdot (a_{2,k} \oplus b_{2,k-1})$$

$$b_{2,k} = \overline{(a_{1,k} \oplus a_{2,k})} \cdot (a_{2,k} \oplus b_{2,k-1}) + (a_{1,k} \oplus a_{2,k}) \cdot (a_{1,k} \oplus b_{1,k-1})$$

Los cuatro puntos en cada uno de los cuadrantes de estos moduladores se obtienen respectivamente por una reflexión o traslación de los puntos en el cuadrante I. La codificación diferencial por cuadrante requiere que los dos últimos bits sean codificados por Grey en cada cuadrante, con un patrón que es rotado de acuerdo con el propio cuadrante. Por lo que se refiere al modulador de Fase y Amplitud I-Q, la reflexión se puede convertir en una rotación al observar que la doble reflexión del cuadrante I al cuadrante III es equivalente a una rotación, mientras que la reflexión al cuadrante II o IV se puede convertir en una rotación simplemente intercambiando los dos bits. Las correspondientes operaciones lógicas son:

$$b_{3,k} = \overline{(b_{1,k} \oplus b_{2,k})} \cdot a_{3,k} + (b_{1,k} \oplus b_{2,k}) \cdot a_{4,k}$$

$$b_{4,k} = \overline{(b_{1,k} \oplus b_{2,k})} \cdot a_{4,k} + (b_{1,k} \oplus b_{2,k}) \cdot a_{3,k}$$



En cuanto al modulador QPSK anidado, la traslación puede convertirse en una rotación mediante la rotación de los dos bits según el cuadrante elegido. Una operación similar se realiza para un DQPSK, en el que los bits codificados precedentes,  $b_{1,k-1}$  y  $b_{2,k-1}$ , son rotados de acuerdo con los bits de información real,  $a_{1,k}$  y  $a_{2,k}$ . Por lo tanto, las operaciones lógicas necesarias para este modulador pueden obtenerse por:

$$b_{3,k} = \overline{(b_{1,k} \oplus b_{2,k})} \cdot (b_{1,k} \oplus a_{3,k}) + (b_{1,k} \oplus b_{2,k}) \cdot (b_{2,k} \oplus a_{4,k})$$

$$b_{4,k} = (b_{1,k} \oplus b_{2,k}) \cdot (b_{2,k} \oplus a_{4,k}) + (b_{1,k} \oplus b_{2,k}) \cdot (b_{1,k} \oplus a_{3,k})$$

En el modulador óptico de 16-QAM 10 de esta realización, se aplica codificación diferencial a los dos primeros bits ( $b_1, b_2$ ) a través de los voltajes impulsores (como  $V_{x1}, V_{y1}$ ) aplicados al primer y al segundo modulador Mach-Zehnder 28, 32, según las operaciones lógicas descritas anteriormente. Sin embargo, la rotación eficaz de los puntos 16 de diagrama de constelación desde el cuadrante 118 del diagrama de constelación 14 del primer modulador I-Q 22 por el esquema de modulación QPSK del segundo modulador I-Q 38 es equivalente a una codificación diferencial de cuatro cuadrantes. El modulador óptico de 16-QAM 10, por lo tanto, aplica codificación diferencial de cuatro cuadrantes sin necesidad de realizar ninguna operación adicional en la señal óptica, es decir:

$$b_{3,k} = a_{3,k}$$

$$b_{4,k} = a_{4,k}$$

En uso, se implementa un método de modulación 16-QAM según una segunda realización de la invención mediante el modulador óptico de 16-QAM 10, como se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 6. Una señal óptica que va a ser modulada es recibida por la entrada óptica 11 del modulador óptico de 16-QAM 10, y se acopla a la entrada óptica 24 del primer modulador I-Q 22, que aplica un esquema de modulación de amplitud cuaternaria (4-QAM) que tiene el diagrama de constelación 14 mostrado en la figura 2. Se aplica codificación diferencial a los dos primeros bits a través de voltajes impulsores ( $V_{x1}, V_{y1}$ ) aplicado al primer y segundo modulador Mach-Zehnde 28, 32. La salida de señal óptica intermedia resultante del primer modulador I-Q 22 se acopla a la entrada 40 del segundo modulador I-Q 38, que aplica una modulación QPSK que tiene el diagrama de constelación 39 según se muestra en la figura 3. La fase de la señal óptica intermedia es rotada de ese modo de manera selectiva, lo que provoca que los puntos de constelación de la señal óptica intermedia, según se muestra en la figura 2, sean rotados de forma selectiva en cada uno de los restantes 4 cuadrantes, para producir, por lo tanto, una señal óptica de salida modulada 16-QAM que tiene un diagrama de constelación 19, según se muestra en la figura 4.

La cascada de los dos moduladores I-Q 22, 38, por lo tanto resulta en un esquema de modulación óptica que tiene un diagrama de constelación 19, que es equivalente al producto del diagrama de constelación 14 del primer modulador I-Q 22 y el diagrama de constelación 39 del segundo modulador I-Q 38. El primer modulador I-Q 22 genera los puntos de cuadrado pequeño 14 que se encuentran en el cuadrante 118, mientras que el segundo modulador I-Q 38 genera los puntos de cuadrado grande 39, que, aparte de una irrelevante rotación de fase general de  $\pi/4$ , corresponden a las rotaciones de fase necesarias para obtener los restantes puntos de constelaciones 16-QAM en los cuadrantes II, III o IV. Incluyendo la rotación de fase de  $\pi/4$ , el equivalente de paso bajo de la señal de salida es:

$$z = x + jy = (x_1 + jy_1)(x_2 + jy_2)e^{j\pi/4}$$

donde se omite la dependencia temporal de la señal por la sencillez de notación.

En referencia a la Figura 7, una tercera realización de la invención proporciona un modulador óptico de 16-QAM 60, que es substancialmente el mismo que el modulador óptico de 16-QAM 10 de la figura 1, con las siguientes modificaciones. Los mismos números de referencia se conservan para funciones correspondientes.

En esta realización, el segundo aparato de modulación óptica 20 comprende un modulador de fase 62 que puede funcionar para aplicar de forma selectiva una rotación de fase de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$  a la salida de señal óptica intermedia del primer modulador óptico I-Q 22. La rotación de fase proporcionada por el modulador de fase 62 aplica similarmente de manera inherente codificación diferencial de cuatro cuadrantes a la señal óptica modulada.

Una cuarta realización de la invención proporciona un método de 16-QAM implementado utilizando el modulador óptico 16-QAM de la Figura 7, e ilustrado en el diagrama de flujo de la Figura 8. El método de esta realización es sustancialmente el mismo que el método mostrado en la Figura 6, con la modificación de que la rotación de fase es aplicada por el modulador de fase 62 en lugar de por el QPSK implementado por el segundo modulador óptico I-Q 38.

En referencia a la Figura 9, una quinta realización de la invención proporciona un aparato 70 de transmisión de señal óptica que comprende el modulador óptico de 16-QAM 10 de la primera realización y una fuente de señal de datos en forma de un diodo láser 72 que puede funcionar para generar un flujo de datos 74 de señales ópticas, que está acoplado a la entrada óptica 24 del primer modulador óptico I-Q 22. El modulador óptico de 16-QAM 10 funciona como se ha descrito anteriormente para implementar el método mostrado en el diagrama de flujo de la Figura 6 a la señal óptica de datos.

En las realizaciones descritas pueden hacerse diversas modificaciones sin necesidad de salir del alcance de la presente invención, de la siguiente manera. Los moduladores ópticos I-Q de la primera realización se pueden invertir, de manera que la modulación óptica QPSK se aplica primero a la señal óptica seguida por la modulación óptica 4-QAM, similarmente para el aparato de transmisión de señales ópticas de la quinta realización. El modulador I-Q 22 y el modulador de fase 62 de la tercera realización de la invención pueden ser invertidos similarmente, de modo que el modulador de fase aplica primero la modulación de fase a la señal óptica seguida por el modulador I-Q que aplica la modulación óptica 4-QAM. Es evidente que los moduladores ópticos I-Q pueden ser sustituidos por un tipo diferente de modulador óptico que pueda funcionar para aplicar el esquema de modulación óptica 4-QAM que tenga el diagrama de constelación que se muestra en la Figura 2.

A pesar de que las realizaciones descritas están relacionadas con moduladores ópticos de 16-QAM y métodos de modulación óptica 16-QAM, se apreciará que el primer aparato de modulación óptica puede ser sustituido por un aparato de modulación óptica que pueda funcionar para aplicar un esquema diferente de modulación óptica  $2^n$ -QAM, tal como un modulador óptico y un método de modulación 64-QAM. Las señales eléctricas impulsoras a los moduladores Mach-Zehnder serían cambiadas correspondientemente, por ejemplo a señales impulsoras de 4 niveles en el ejemplo de modulación óptica 64-QAM.

16-QAM es uno de los formatos candidatos de modulación para transmisión a 100 Gb/s en fibra óptica. Es una señal multi-nivel, y no es de generación trivial utilizando moduladores ópticos convencionales. Por otra parte, la codificación diferencial por cuadrantes es útil para resolver la ambigüedad de fase  $\pi/2$  en el receptor pero requiere procesamiento digital de alta velocidad de la secuencia de bits transmitidos. El modulador óptico de  $2^n$ -QAM de la presente invención permite que se proporcione un modulador de 16-QAM que sólo requiere señales eléctricas de dos niveles, que proporcionan una ventaja sobre las señales eléctricas multi-nivel que pueden ser fuertemente distorsionadas, debido a las limitaciones de ancho de banda y la no linealidad del modulador. Además, el modulador óptico de  $2^n$ -QAM no requiere un procesamiento adicional de la secuencia de bits con el fin de aplicar codificación diferencial por cuadrante, que es implementada de forma automática por el modulador y el método de la presente invención.

## REIVINDICACIONES

1. Un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  que comprende:

5 una entrada óptica;  
 un primer aparato de modulación óptica configurado para aplicar un esquema de modulación en amplitud  $2^{n-2}$  que tiene  $2^{n-2}$  puntos de constelación dispuestos en una constelación en un primer cuadrante de su diagrama de constelación a una señal óptica recibida; y  
 10 un segundo aparato de modulación óptica configurado para rotar de forma selectiva la fase de una señal óptica recibida,  
 en donde la entrada óptica está configurada para entregar una señal óptica que va a ser modulada a uno de entre el primer y el segundo aparato de modulación óptica, el mencionado aparato genera una señal óptica intermedia y además se ha configurado para entregar la señal óptica intermedia al otro de entre el primer y el segundo aparato de modulación óptica,  
 15 para generar de ese modo una señal óptica modulada de salida que tiene un diagrama cuadrado de constelación que comprende  $2^n$  puntos de constelación distribuidos por los cuatro cuadrantes del diagrama de constelación.

2. Un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según la reivindicación 1, en donde  $n$  es un número par y es por lo menos 4, los puntos de constelación del primer aparato de modulación óptica se disponen en una constelación sustancialmente cuadrada.

3. Un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según la reivindicación 2, en donde  $n$  es 4 o 6.

4. Un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según la reivindicación 3, en donde el primer aparato de modulación óptica comprende:

30 un modulador óptico en-fase/cuadratura que comprende una entrada óptica configurada para recibir una señal óptica que va a ser modulada, una ramificación en-fase que comprende un primer modulador óptico, una ramificación de cuadratura que comprende un segundo modulador óptico y un desfasador  $\pi/2$ , y una salida óptica; y  
 un aparato impulsor configurado para entregar señales eléctricas impulsoras de  $\sqrt{2^{n-2}}$  niveles al primer y al segundo modulador óptico, de tal manera que el modulador óptico en-fase/cuadratura puede funcionar para aplicar el esquema de modulación de amplitud  $2^{n-2}$ .

5. Un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según la reivindicación 4, en donde el primer y el segundo modulador óptico comprenden moduladores Mach-Zehnder.

40 6. Un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según la reivindicación 5, en donde  $n$  es 4 y las señales eléctricas impulsoras de dos niveles comprenden aproximadamente  $0,39 V_{\pi}$ , donde  $V_{\pi}$  es el voltaje de conmutación del respectivo modulador Mach-Zehnder, y cero voltios.

45 7. Un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según cualquier reivindicación precedente, en donde el segundo aparato de modulación óptica se configura para aplicar un esquema de modulación de desplazamiento de fase cuaternaria que tiene cuatro niveles de modulación de sustancialmente igual amplitud y fases separadas 90 grados, dando el esquema de modulación un diagrama cuadrado constelación que tiene un punto de constelación en cada cuadrante, a la señal óptica recibida para rotar de forma selectiva la fase de la señal óptica recibida.

50 8. Un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en donde el segundo aparato de modulación comprende un modulador de fase configurado para rotar de forma selectiva la fase de la señal recibida cero grados, 90 grados, 180 grados o 270 grados.

55 9. Aparato de transmisión de señal que comprende:

Una fuente óptica que tiene una salida óptica y que puede funcionar para generar una señal óptica; y

un modulador óptico de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según cualquier reivindicación precedente,  
la salida óptica de la fuente óptica está acoplada al primer aparato de modulación óptica.

- 5 10.Un método de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  que comprende las etapas:
- a) recibir una señal óptica que va a ser modulada;  
b) generar una señal óptica intermedia aplicando a la señal óptica recibida uno de entre:
- 10 a. un esquema de modulación en amplitud  $2^{n-2}$  que tiene  $2^{n-2}$  puntos de constelación dispuestos en una constelación en un primer cuadrante de su diagrama de constelación a la señal óptica; y  
b. una rotación selectiva de fase a la señal óptica para rotar de forma selectiva la fase de la señal óptica; y
- 15 c) aplicar a la señal óptica intermedia el otro de los puntos a. y b., para generar de ese modo una señal óptica de salida que tiene un diagrama de constelación que comprende  $2^n$  puntos de constelación distribuidos por los cuatro cuadrantes del diagrama de la constelación.
- 20 11.Un método de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según la reivindicación 10, en donde n es un número par y es por lo menos 4 puntos, los puntos de constelación se disponen en una constelación sustancialmente cuadrada.
- 25 12.Un método de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según la reivindicación 11, en donde n es 4 o 6.
- 30 13.Un método de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según la reivindicación 12, en donde aplicar a. comprende:
- I. entregar la señal óptica a un modulador óptico en-fase/cuadratura que comprende una entrada óptica configurada para recibir una señal óptica que va a ser modulada, una ramificación en-fase que comprende un primer modulador óptico, una ramificación de cuadratura que comprende un segundo modulador óptico y un desfasador  $\pi/2$ , y una salida óptica; y
- 35 II. entregar señales eléctricas impulsoras de  $\sqrt{2^{n-2}}$  niveles al primer y al segundo modulador óptico, de tal manera que el modulador óptico en-fase/cuadratura aplica un esquema de modulación de amplitud  $2^{n-2}$  que tiene  $2^{n-2}$  puntos de constelación dispuestos en una constelación cuadrada en el primer cuadrante de su diagrama de constelación de la señal óptica recibida.
- 40 14.Un método de modulación de amplitud en cuadratura  $2n$  según cualquiera de las reivindicaciones 10 a 13, en donde b. comprende aplicar un esquema de modulación de desplazamiento de fase que tiene cuatro niveles de modulación de amplitud sustancialmente igual y fases separadas 90 grados, dando al esquema de modulación una diagrama de constelación cuadrada que tiene un punto de constelación en cada cuadrante.
- 45 15. Un método de modulación de amplitud en cuadratura  $2^n$  según una de las reivindicaciones 13 y 14, en donde aplicar b. comprende entregar la señal óptica a un modulador de fase y aplicar selectivamente una rotación de fase de cero grados, 90 grados, 180 grados o 270 grados a la señal óptica.

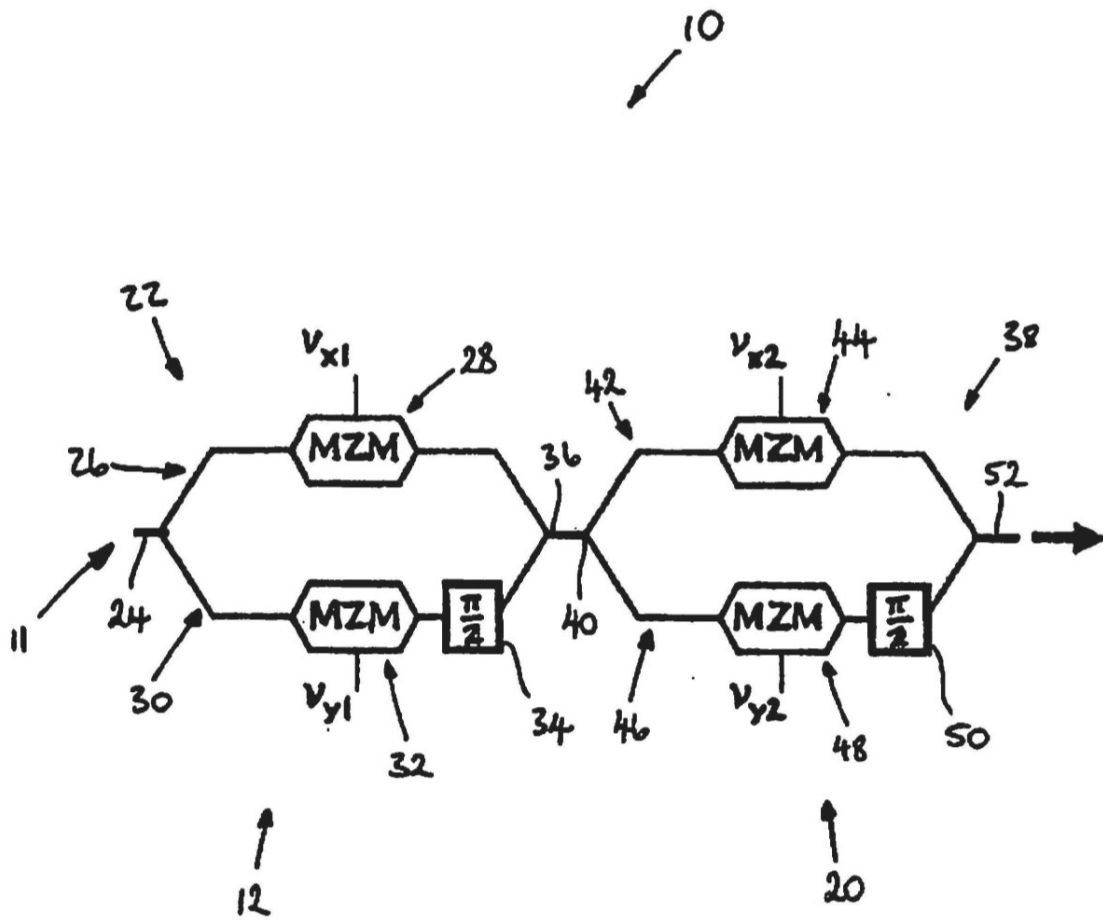


Fig. 1

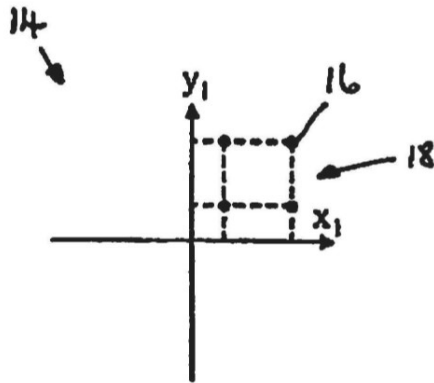


Fig. 2

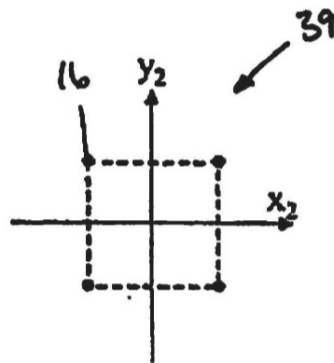


Fig. 3

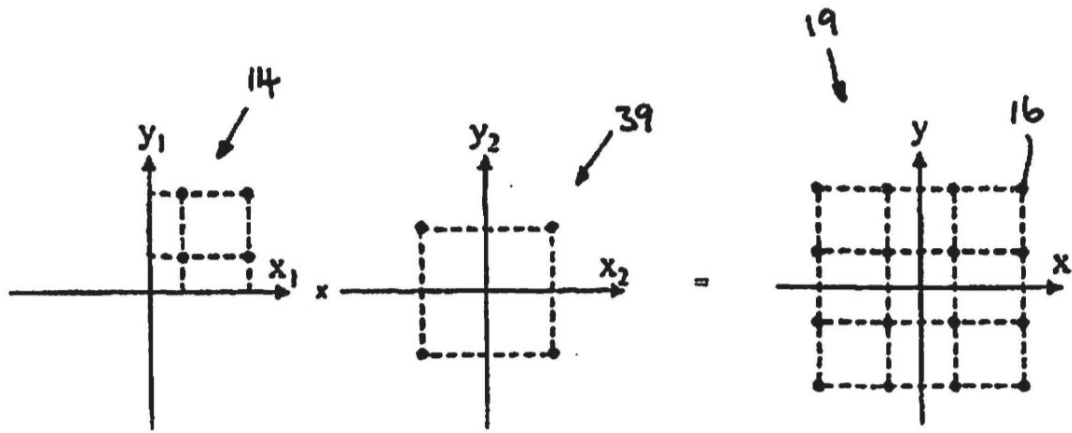
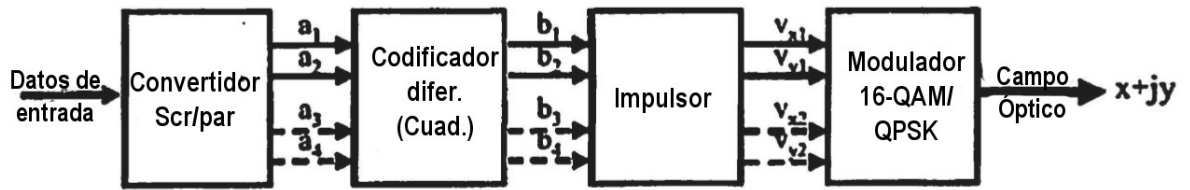


Fig. 4



TÉCNICA ANTERIOR

**Fig. 5**



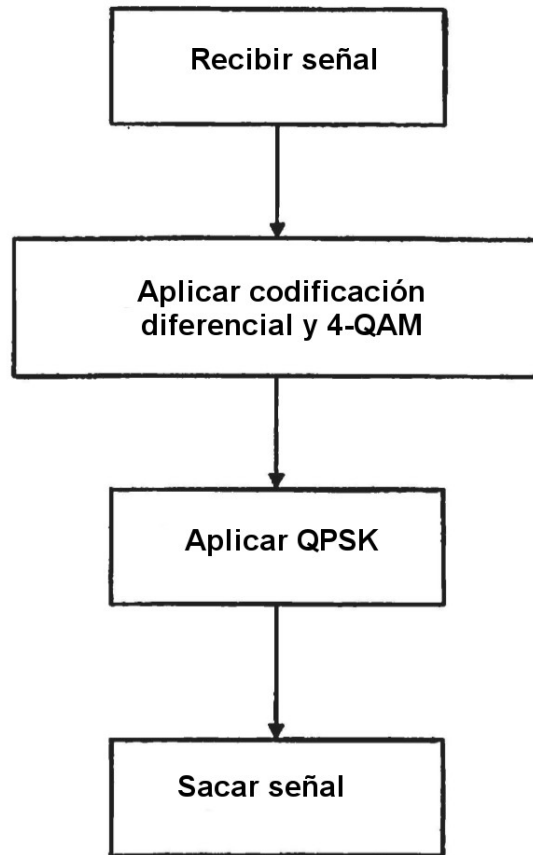


Fig. 6

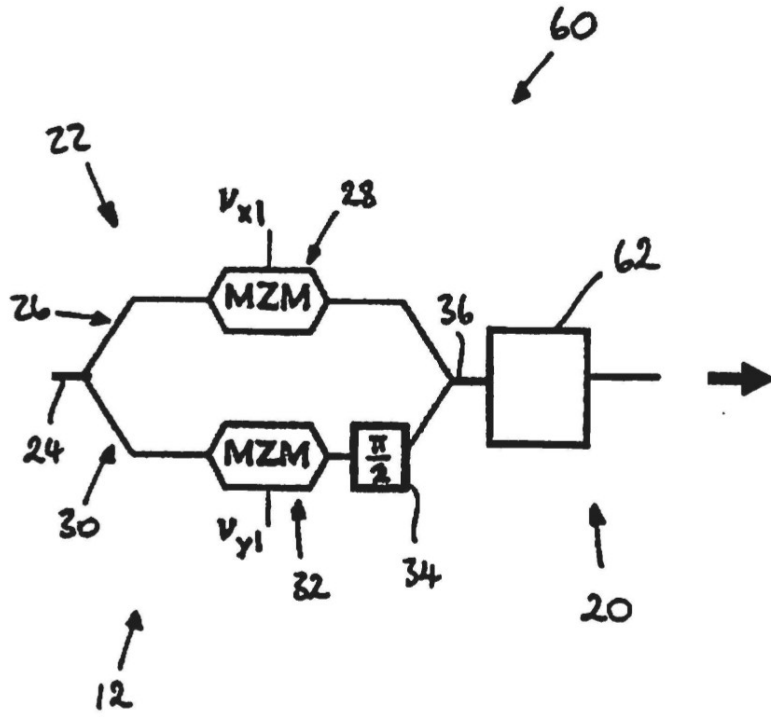
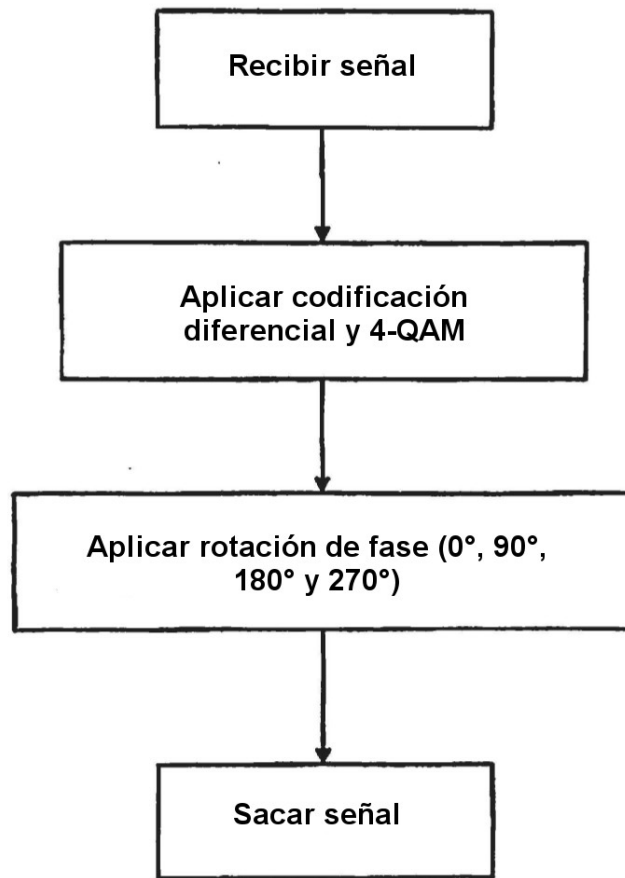


Fig. 7



**Fig. 8**

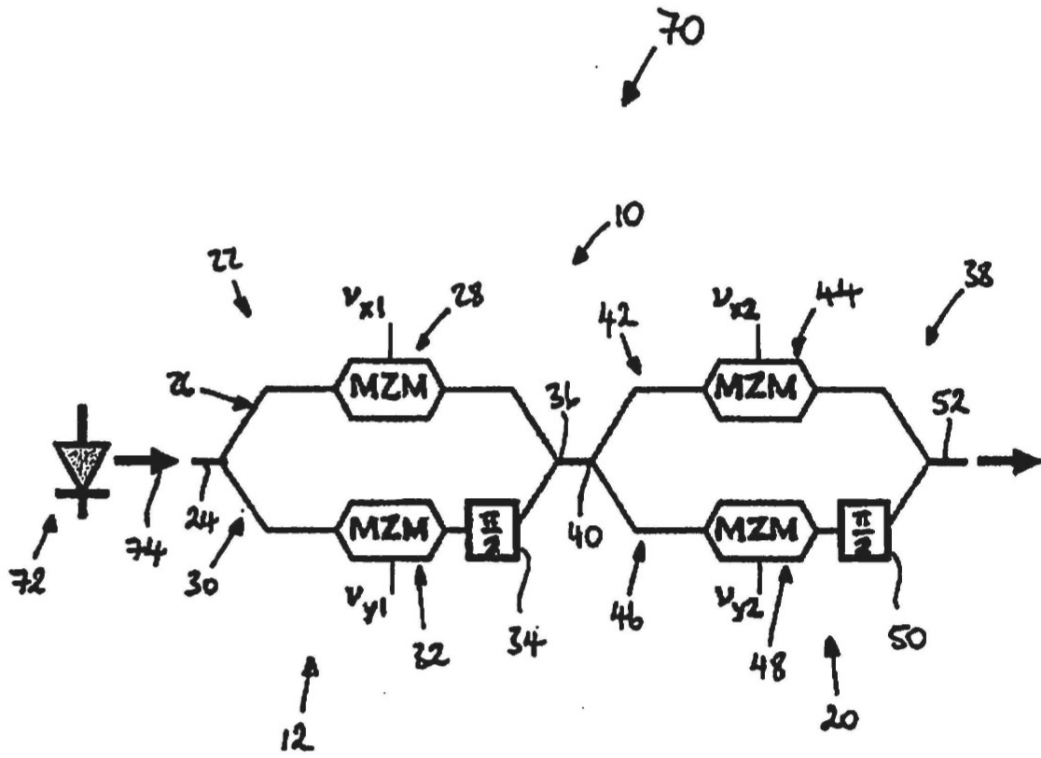


Fig. 9