



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 362 267**

51 Int. Cl.:  
**H04B 10/18** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **01965870 .7**

96 Fecha de presentación : **10.08.2001**

97 Número de publicación de la solicitud: **1323250**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **02.07.2003**

54 Título: **Método y sistema que permiten transmitir señales con impulsos ópticos enriquecidos espectralmente.**

30 Prioridad: **18.08.2000 US 642033**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**30.06.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**30.06.2011**

73 Titular/es: **Futurewei Technologies, Inc.**  
**1700 Alma Drive, Suite 500**  
**Plano, Texas 75070, US**

72 Inventor/es: **Bai, Yu, Sheng;**  
**Kan, Clarence;**  
**Khaydarov, Dzhakhangir V.;**  
**Brogie, Robert;**  
**Rossin, Tatiana V. y**  
**Fishman, Ilya, M.**

74 Agente: **Lehmann Novo, María Isabel**

ES 2 362 267 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

Método y sistema que permiten transmitir señales con impulsos ópticos enriquecidos espectralmente

## 5 CAMPO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un método y sistema de transmisión óptica para red de comunicación de fibra óptica y más en particular, a un método de transmisión de fibra óptica de Multiplexión por División de Longitud de Onda (WDM) y sistema para transmitir señales de impulsos de corta duración.

10

## ANTECEDENTES DE LA INVENCION

En la historia del desarrollo comercial de las redes de fibras, la tendencia dominante fue reducir al mínimo la anchura espectral de las señales transmitidas. Hubo al menos dos motivaciones para tener como objetivo la minimización espectral: reducir la dispersión de la señal dentro de la línea de transmisión y simplificar el equipo para la transmisión de la señal en el formato de No Retorno a Cero (NRZ).

15

La mayor parte de los sistemas de transmisión WDM modernos operan con una velocidad de transmisión de datos de 2,5 Gb/s (OC-48) y utilizan la fibra monomodo estándar (SMF) con una dispersión cromática D de aproximadamente 17 ps/nm por km. En estos sistemas, la distancia de transmisión está limitada a aproximadamente 600 km y no requiere compensación de la dispersión. Para los sistemas de WDM de más altas tasas de bits (10 y 40 Gbits/s) y un alcance similar, se requiere una compensación de la dispersión. El desarrollo de medios de compensación de la dispersión, tales como fibras compensadoras de la dispersión o redes de difracción de fibras, elimina el indeseable impedimento de la dispersión lineal [A.H. Gnauck y R.M. Jonson, "Compensación de la dispersión para sistemas de fibra óptica", Capítulo 7 en *Optical Fiber Communication Systems*, Vol IIIA, Ed. I.P. Kaminow y T.L. Koch, Academic Press, San Diego, 1997].

20

25

El rendimiento de los sistemas de dispersión compensada, con amplificación óptica periódica, está limitado por la acumulación de ruido de emisión espontáneo y la falta de linealidad de las fibras. Para optimizar el rendimiento del sistema de formato NRZ, es preciso conseguir un excelente equilibrio entre la maximización de la relación señal a ruido óptica y la minimización de los efectos no lineales, tales como la modulación de autofase (SPM), la modulación de fases cruzadas (XPM) y la mezcla de cuatro ondas (FWM). La potencia convencional, por canal individual, a la entrada de cada intervalo de fibras es aproximadamente 1 mW (0 dBm) que da lugar a una distancia de propagación máxima de varios centenares de kilómetros. Para la transmisión de canal único, y para la transmisión multicanal en WDM en fibras sin dispersión desplazada, la modulación SPM es el efecto no lineal dominante. Una señal óptica que se propaga en la fibra experimenta un desplazamiento de fase dependiente de la intensidad  $\phi_{NL}(t,z)$  dado por [G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Capítulo 4, Academic Press, San Diego, 1989]:

30

35

$$\phi_{NL}(t,z) = \gamma P(t) z, \quad (1)$$

donde  $\gamma$  es el coeficiente no lineal de la fibra, P es la potencia óptica y z es la longitud de propagación efectiva. Puesto que la intensidad de la señal depende del tiempo, se obtienen nuevas componentes espectrales (frecuencia):

40

$$\Delta\omega = -d\phi_{NL}/dt. \quad (2)$$

Cuando se acoplan con la dispersión, estas nuevas componentes espectrales interfieren con las componentes originales y distorsionan la forma temporal de la señal. El flujo de datos de NRZ es una configuración temporal complicada, en la que cada bit individual se distorsiona de forma distinta que los demás bits y por lo tanto, no se puede reestablecer globalmente. Como resultado, los sistemas de transmisión de formato NRZ están diseñados para funcionar en el régimen lineal con un pequeño desplazamiento de fase no lineal,  $\phi_{NL}(t,z) \ll 1$ . En general, la utilización del formato NRZ y la minimización del contenido espectral limita todavía más el desarrollo de la tecnología de la transmisión.

45

Se desarrollaron varios métodos para resolver el problema de la distorsión no lineal, todos ellos basados en la transmisión de impulsos ópticos de corta duración o la utilización de un formato de retorno a cero (RZ). La importante ventaja del formato RZ es que la distorsión causada por SPM es independiente de la configuración. En el formato RZ, cada bit único que representa un '1' es un impulso único idéntico a los demás impulsos. Si un impulso único es compensado para la distorsión de SPM, en tal caso el flujo de datos total será compensado de forma automática.

50

55

En retrospectiva, el primer método de compensación de la distorsión no lineal fue la propagación de solitones ópticos [L.F. Mollenauer, J.P. Gordon y P.V. Mamyshev, "Solitons in High Bit-Rate, Long-Distance Transmission", Capítulo 12 en *Optical Fiber Communication Systems*, vol. IIIA, Ed. I.P. Kaminow y T.L. Koch, Academic Press, San Diego, 1997]. Para crear un solitón óptico, un impulso óptico limitado por la Transformada de Fourier, que presenta una potencia máxima de varios dBm, se propaga en la fibra óptica con una pequeña dispersión positiva. La idea general de la propagación de solitones es que la forma del impulso resulta afectada por la dispersión cromática y la no linealidad en una manera que estos dos factores se contra-equilibren entre sí. Para un determinado margen de duración de los impulsos y de la

60

potencia óptica, la forma del impulso se mantiene constante a lo largo de la fibra. La tendencia del impulso a expandirse, debido a la dispersión lineal, se compensa por la contracción debida a la modulación de autofase, de modo que el impulso se mantenga intacto durante su propagación. Dicho de otro modo, el efecto combinado de la dispersión lineal y SPM, en la propagación de los impulsos, se compensa continuamente en cada punto en la fibra. Utilizando la tecnología de transmisión de solitones, los impulsos de luz limitados por la Transformada de Fourier de duración aproximada de 10 a 30 ps y la potencia máxima de varios dBm se puede propagar a lo largo de los intervalos de fibras de muchos miles de kilómetros sin degradación de la forma significativa.

El equilibrio entre las contribuciones lineales y no lineales, sin embargo, se podría mantener solamente dentro de determinados márgenes de potencia de impulsos y de la dispersión ( $D < -1$  ps/nm por km). El requisito de baja dispersión limita la aplicabilidad de la transmisión de solitones a tipos especiales de fibra tal como fibras de dispersión desplazada (DSF), en donde la longitud de onda de dispersión 0 es de 1,5 micrones. El requisito de margen de potencia significa que los amplificadores ópticos en línea deben estar espaciados mucho más próximos que la longitud de intervalo habitual para las redes de larga distancia terrestres comerciales. Una complicación adicional es causada por la fluctuación de retardos de solitones (conocida como el efecto de Gordon-Haus) inducida por el acoplamiento de solitones con el ruido del amplificador acumulado. Sistemas de filtrado especiales se desarrollaron para reducir la fluctuación de retardos y permitir una propagación extra larga de las señales. Sin embargo, estos sistemas suelen ser demasiado complicados para su desarrollo en sistemas de transmisión comerciales. Como resultado, la transmisión de solitones, aunque haya sido estudiada durante casi 20 años, no ha encontrado aplicaciones comerciales.

En los últimos años, se ha desarrollado un nuevo método para la transmisión de RZ, denominado como solitones gestionados por la dispersión o cuasi-solitones (M. Suzuki et al., Electronics Lett., Vol 31, p 2027, 1995; J.H.B. Nijhof et al., Opt Lett., Vol 23, p. 1674, 1998; F. Favre et al, Jour. Lightwave Tech., vol 17, p. 1032, 1999). Según este método, la dispersión no lineal se compensa dentro de cada intervalo de fibra en una línea de transmisión de fibra con amplificación óptica periódica, en lugar de compensarse continuamente, en cada punto de la fibra, como en la transmisión de solitones estándar. Está basado en un fenómeno básico de propagación de impulsos con barridos de frecuencias lineales en medios de soporte no lineales: cuando el barrido lineal y el barrido inducido por no linealidad del impulso están en la misma dirección aumenta el ancho de banda espectral del impulso; cuando están en las direcciones opuestas, disminuye el ancho de banda espectral. Si la dispersión lineal de los medios de soporte cambia de signo, periódicamente, en una forma adecuadamente diseñada, el contenido espectral del impulso de propagación y su forma variarían también periódicamente. Utilizando una pre-dispersión adecuada y la disposición de fibras de dispersiones positivas y negativas, que suelen referirse como "mapa de dispersión" se podría reconstruir periódicamente los impulsos originales, tanto en términos de duración como de ancho de banda espectral, en cada emplazamiento de amplificador óptico a lo largo de la línea de transmisión. Sin embargo, para conseguir este modo oscilatorio indefinido, la gestión de la dispersión ha de ser muy precisa (con tolerancias muy pequeñas) lo que es difícil de conseguir en la práctica.

El documento EP 0375253A da a conocer un método para generar barridos de impulsos ópticos limitados por la Transformada de Fourier de modo que, cuando los impulsos se desplazan a lo largo de una fibra óptica, son inicialmente comprimidos y luego expandidos a su anchura original siendo entonces objeto de una expansión adicional. En esta última expansión, la forma temporal de los impulsos es sustancialmente degradada, de modo que los impulsos deben recibirse antes de que se hagan completamente irreconocibles. Debido a la presencia de esta distorsión temporal, resulta necesario utilizar comparadores para formar impulsos limpios entre cada intervalo de la fibra óptica.

Por lo tanto, el sector de las telecomunicaciones tiene necesidad de nuevos métodos y sistemas para transmitir señales a través de múltiples intervalos de fibra óptica sin distorsiones lineales o no lineales considerables.

#### SUMARIO DE LA INVENCIÓN

Según la presente invención, se da a conocer un sistema de comunicación multicanal que comprende primeros y segundos láseres, cada uno seleccionado de entre el grupo constituido por un láser de diodos directamente modulado, un láser de diodos de onda continua y un láser de modo bloqueado, presentando dichos primeros y segundos láseres unas primeras y segundas salidas, respectivamente, con primeros y segundos moduladores acoplados a dichos primeros y segundos láseres, respectivamente, y dispuestos para modular primeras y segundas salidas de dichos primeros y segundos láseres en primeras y segundas series de impulsos de datos barridos caracterizados por espectros de frecuencias que son sustancialmente más amplios que los espectros limitados por la Transformada de Fourier, presentando un primer multiplexor por división de longitud de onda unas primeras y segundas entradas y una salida, estando dichas primeras y segundas entradas de dicho multiplexor conectadas, por medios ópticos, a dichas primeras y segundas salidas de dichos primeros y segundos láseres, respectivamente, con un primer intervalo de fibra de transmisión óptica de dispersión compensada que presenta un primer extremo ópticamente conectado a dicha salida de dicho multiplexor, una primera unidad de compensación de la dispersión caracterizada por una dispersión opuesta a la de dicho primer intervalo y que presenta una entrada ópticamente conectada a un segundo extremo de dicho primer intervalo, con un segundo intervalo de dicha fibra de transmisión óptica de dispersión compensada caracterizado por una dispersión opuesta a la de dicha primera unidad de compensación de la dispersión y presentando un primer extremo ópticamente conectado a una salida de dicha primera unidad de compensación de la dispersión, una segunda unidad de compensación de la dispersión caracterizada por una dirección opuesta a la de dicho segundo intervalo y que presenta una entrada ópticamente conectada a un segundo extremo de dicho segundo intervalo, un demultiplexor por división de

longitud de onda que presenta una entrada y primeras y segundas salidas, estando dicha entrada de dicho demultiplexor ópticamente conectada a una salida de dicha segunda unidad de compensación de la dispersión, primeros y segundos receptores ópticos ópticamente conectados a dichas primeras y segundas salidas, respectivamente, de dicho demultiplexor a una distancia en, o más allá de, una zona de propagación libre de errores desde dichos primeros y segundos láseres, en donde dichos espectros de frecuencias se agotan cuando dichas primeras y segundas series de impulsos se propagan a través de dicha zona de propagación libre de errores, mientras que las formas temporales de dichas primeras y segundas series de impulsos permanecen sustancialmente invariables.

Varios tipos de fuente de láser se pueden utilizar en el transmisor óptico. Un láser de diodos directamente modulado es preferible para numerosas aplicaciones comerciales. El transmisor óptico, con el láser de diodos directamente modulado, puede comprender un generador de reloj para excitar el láser de diodos directamente modulado con el fin de proporcionar a los impulsos ópticos un barrido de frecuencias. Con la tensión de polarización adecuada y la correspondiente potencia de RF, el barrido de frecuencias del láser de diodos directamente modulado presenta una forma funcional similar a la forma funcional de un barrido inducido por SPM dentro de la fibra óptica, pero con el signo opuesto. Para cargar datos en un flujo de impulsos ópticos con barridos de frecuencias, se puede utilizar un modulador de datos exterior que se excita por un generador de datos.

Según otra forma de realización que utiliza el láser de diodos directamente modulado, se proporciona una unidad integral optoelectrónica en la que el láser está directamente modulado por un generador de reloj y por un generador de señal de datos.

La fuente óptica puede ser también un láser de diodos de onda continua (CW). Según esta forma de realización, el sistema comprende un modulador de impulsos para modular la luz generada por el láser de diodos de onda continua CW y un generador de reloj está conectado al modulador de impulsos para generar impulsos ópticos de corta duración. El sistema comprende, además, un modulador de fase que está conectado al modulador de impulsos para la modulación en fase de la salida del modulador de impulsos y que proporciona a los impulsos ópticos enriquecidos espectralmente un barrido de frecuencias. La forma temporal del barrido de frecuencias de los impulsos ópticos enriquecidos espectralmente debe ser similar a la forma temporal del barrido inducido por SPM en el interior de la fibra óptica, pero presentando el signo opuesto.

Un láser de modo bloqueado se puede utilizar en el transmisor óptico como otro tipo de fuente óptica, en cuyo caso, el láser de modo bloqueado está conectado a, y excitado por, un generador de reloj y un modulador de datos, conectado a la salida del láser de modo bloqueado, se excita por un generador de datos para modular la salida del láser de modo bloqueado. Además, un dispositivo de dispersión está conectado a la salida del modulador de datos para introducir un barrido de frecuencias en los impulsos ópticos emitidos por el láser de modo bloqueado.

Los sistemas de comunicación por WDM multicanales constituyen un número importante de sistemas de transmisión de fibra óptica. En un desarrollo de la presente invención, un sistema de comunicación por WDM multicanal propaga impulsos ópticos enriquecidos espectralmente a través de una fibra óptica y comprende una pluralidad de transmisores ópticos por WDM para generar impulsos ópticos modulados de datos, enriquecidos espectralmente, dentro de la correspondiente pluralidad de canales ópticos individuales. En cada canal individual, los impulsos ópticos son objeto de barridos de frecuencias y presentan un espectro óptico que es sustancialmente más amplio que el espectro de impulsos limitados por la Transformada de Fourier de la misma duración. Un multiplexor de WDM combina las salidas de los transmisores ópticos de WDM en una señal óptica multiplexada. La señal óptica multiplexada se transmite a través de la fibra óptica que comprende una pluralidad de intervalos. Una unidad de compensación de la dispersión y amplificación óptica está situada entre cada par de intervalos adyacentes. Un demultiplexor de WDM separa la señal óptica multiplexada en WDM en una pluralidad de canales ópticos individuales, que presentan cada uno un espectro comparable con el límite de la Transformada de Fourier para impulsos de la misma duración. Una pluralidad de receptores ópticos, correspondiente a la pluralidad de los transmisores ópticos WDM, reciben los impulsos ópticos con espectros enriquecidos. Los receptores ópticos están situados dentro del enlace de fibra óptica en, o más allá de, una distancia de propagación libre de errores desde los transmisores ópticos.

Un método de transmisión de señales, utilizando impulsos ópticos enriquecidos espectralmente, a través de una fibra óptica, puede utilizar transmisores ópticos con diferentes tipos de fuente óptica. Impulsos ópticos, que presentan espectros ópticos enriquecidos, que son sustancialmente más anchos que el espectro de impulsos limitados por la Transformada de Fourier de la misma duración, se generan por la fuente óptica. Los impulsos ópticos enriquecidos espectralmente, en una forma de realización preferida, presentan una duración aproximada del 20% al 50% del periodo de bits y un ancho de banda respectivo que supera el límite de la Transformada de Fourier en un 50% a 200%. Los impulsos ópticos enriquecidos espectralmente están preferentemente modulados por datos digitales y transmitidos a través de la fibra óptica. Mientras se propaga a través de una zona de propagación libre de errores de la fibra óptica, no varía la forma temporal de cada impulso; sin embargo, el espectro se agota desde su ancho de banda amplio inicial hasta cerca del límite de la Transformada de Fourier. La zona de propagación libre de errores comprende una pluralidad de intervalos de fibras. La intensidad y las formas temporales de los impulsos ópticos, distorsionados por la dispersión, inducidos por la fibra óptica, se pueden restablecer después de cada intervalo por amplificadores ópticos y dispositivos compensadores de la dispersión.

La presente invención da a conocer, además, un método de transmisión de impulsos ópticos limitados por una quasi-aleatoria Transformada de Fourier, con un barrido de frecuencias a través de una fibra óptica de dispersión compensada, de modo que se realiza la compresión de los impulsos ópticos a medida que los impulsos ópticos se propagan a lo largo de la fibra óptica;

5 caracterizado por generar impulsos ópticos modulados por datos y fases, que presentan un espectro óptico sustancialmente más amplio que el espectro de los impulsos limitados por Transformada de Fourier de la misma duración y

10 la transmisión de dichos impulsos ópticos a través de una zona de propagación libre de errores de la fibra óptica, de modo que el espectro de dichos impulsos ópticos se agote a lo largo de dicha zona de propagación libres de errores, desde dicho espectro sustancialmente más ancho que el espectro de los impulsos limitados por la Transformada de Fourier a un espectro comparable con el espectro de los impulsos limitados por la Transformada de Fourier y la forma temporal de cada uno de dichos impulsos ópticos sea sustancialmente la misma en una entrada y en una salida de dicha zona de propagación libre de errores;

15 en donde dicha zona de propagación libre de errores comprende una pluralidad de intervalos de la fibra óptica,

en donde la longitud  $L_{ipr}$  de dicha zona de propagación libre de errores es proporcional al número de dichos intervalos

20  $N_{SP} = \frac{|\Delta\Omega|}{|\Delta\omega|}$  de la fibra óptica dentro de dicha zona de propagación libre de errores y la longitud de un intervalo  $L_{SP}$ , en

donde  $\Delta\Omega$  es una parte de la anchura espectral de dichos impulsos ópticos, que superan el límite de la Transformada de Fourier y  $\Delta\omega$  es la pérdida de anchura espectral en  $L_{SP}$ .

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

25 Los dibujos adjuntos, que se incorporan en, y forman parte de, esta memoria descriptiva, ilustran formas de realización de la invención y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención a modo de ejemplo. En los dibujos:

30 La Figura 1 representa un diagrama esquemático de un sistema para transmitir impulsos ópticos enriquecidos espectralmente, modulados por datos y fases, a través de una línea de transmisión de dispersión compensada, según la presente invención.

35 La Figura 2 representa un diagrama esquemático de un intervalo de la fibra óptica de dispersión compensada para transmitir los impulsos ópticos modulados por datos, enriquecidos espectralmente, según la presente invención.

La Figura 3 representa una simulación numérica del agotamiento espectral a lo largo de una zona de propagación libre de errores, que comprende una pluralidad de intervalos de la fibra óptica, según la presente invención.

40 La Figura 4 ilustra una simulación numérica de espectros de potencia de la señal en una entrada y una salida de la zona de propagación libre de errores, según la presente invención.

45 La Figura 5 representa datos experimentales de espectros de potencia de la señal a la entrada y la salida de la zona de propagación libre de errores según la presente invención.

La Figura 6 representa un diagrama esquemático de un transmisor óptico que comprende un láser de diodos directamente modulado con un modulador de datos externo, según la presente invención.

50 La Figura 7 ilustra un barrido de frecuencias de los impulsos ópticos emitidos por el láser directamente modulado.

La Figura 8 representa un diagrama esquemático de un transmisor óptico que comprende un láser de diodos directamente modulado con modulación de datos interna, según la presente invención.

55 La Figura 9 representa un diagrama esquemático de un transmisor óptico que comprende un láser de diodos de onda continua (CW) con modulación de datos y de fase externa, según la presente invención.

La Figura 10 representa un diagrama esquemático de un transmisor óptico que comprende un láser de modo bloqueado con un modulador de datos exterior y un dispositivo de dispersión según la presente invención.

60 La Figura 11 representa un diagrama esquemático de un sistema de comunicación por WDM multicanal para propagar impulsos ópticos modulados por datos y fases, enriquecidos espectralmente, a través de una línea de transmisión de dispersión compensada, según la presente invención.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a una transmisión de impulsos ópticos modulados por datos y fases, que presenta un espectro enriquecido en comparación con el espectro de impulsos ópticos limitados por la Transformada de Fourier, de la misma duración, a través de una fibra óptica según se representa en la Figura 1. Los impulsos ópticos modulados por datos y fases de espectro enriquecido generados por un transmisor óptico 11 se propagan a través de la línea de transmisión de dispersión compensada 12. En la línea de transmisión 12, los impulsos ópticos son afectados por la modulación de auto fase SPM no lineal y de dispersión lineal que da lugar a la distorsión de los impulsos. Cada intervalo de fibra óptica SM 21 (Figura 2), se suministra con un compensador de la dispersión 22 seguido por un amplificador óptico 23 para la compensación de la dispersión lineal y mantenimiento de la intensidad de los impulsos ópticos. La distorsión en fase del impulso óptico, inducido por SPM, sigue el perfil de intensidad del impulso. Esta distorsión de fase genera un barrido de frecuencias que se acumula a lo largo de la línea de transmisión 12. Si el transmisor óptico 11 genera impulsos limitados por la Transformada de Fourier que no presentan ningún barrido de frecuencias, la acumulación de la distorsión relacionada con SPM no se puede compensar a no ser que se disponga una transmisión de cuasi-solitonos. La acumulación o agotamiento del espectro de impulsos da lugar, de forma inevitable, a la distorsión de formas de impulsos.

En la presente invención, los impulsos ópticos, lanzados en la fibra óptica, presentan un espectro enriquecido y barrido de frecuencias posterior que es opuesto al barrido inducido por SPM. El barrido de frecuencias inducido por SPM está acumulado, de forma monótonica, a lo largo del intervalo de la fibra y se sustrae del barrido de impulsos inicial introducido por el transmisor. Respectivamente, el contenido espectral del impulso se agota y el espectro se estrecha hacia la anchura espectral del límite por la Transformada de Fourier para un impulso de la misma duración. Mientras el espectro de impulsos permanezca enriquecido, la forma temporal del impulso cambia solo ligeramente y la transmisión permanece libre de errores. Con la anchura espectral comparable al límite de la Transformada de Fourier, la distorsión de los impulsos se hace significativa. En este punto, el impulso alcanza su longitud de propagación libre de errores máxima y debe recibirse.

Esta descripción cualitativa es completamente soportada por los cálculos analíticos y numéricos. En la trama temporal retardada que se desplaza junto con el impulso, su propagación se describe por una denominada Ecuación de Shrodinger no lineal (NSE):

$$-i \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \varepsilon |u_0|^2 u \tag{3}$$

en donde  $u$  es la amplitud del campo,  $z$  y  $t$  son coordenadas y tiempo en la trama retardada y  $\varepsilon \ll 1$ . En el caso de no dispersión ( $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$ ), la evolución del barrido de frecuencias inducido por SPM es [L.F. Mollenauer, J.P. Gordon y P.V.

Mamyshev, "Solitons in High Bit-Rate, Lon-Distance Transmission", Capítulo 12 en *Optical Fiber Communication Systems*, vol. IIIA, Ed. I.P. Kaminow y T.L. Koch, Academic Press, San Diego, 1997]:

$$u(z, t) = u(0, t) \exp(i\varepsilon |u(0, t)|^2 z)$$

o para  $z \ll 1$

$$u(z, t) \approx u(0, t) (1 + i\varepsilon |u(0, t)|^2 z) \tag{4}$$

en donde  $u(0, t)$  es el campo fundamental en la entrada de la fibra. Con la dispersión no nula, la solución se puede presentar como:

$$u(z, t) \approx u_0(z, t) (1 + \varepsilon u_1(z, t)) \tag{5}$$

la inserción de (5) en (3) proporciona un sistema de dos ecuaciones:

$$-i \frac{\partial u_0}{\partial z} = \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \tag{6}$$

$$-i \frac{\partial u_1}{\partial z} = \frac{2}{u_0} \frac{\partial u_0}{\partial t} \frac{\partial u_1}{\partial t} + |u_0|^2 u_1 \tag{7}$$

La ecuación (7) es equivalente a un sistema de dos ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden:

$$\frac{du_1}{dz} = i|u_0(z, t(z))|^2 \quad (8)$$

$$\frac{dt}{dz} = -2i \frac{\partial(\ln u_0)}{\partial t} \quad (9)$$

10

5 en donde la ecuación (9) es una ecuación característica para la ecuación diferencial parcial (7). La ecuación (8) demuestra que el efecto de SPM se acumula a lo largo de la fibra y ambas componentes  $u_0$  y  $u_1$  son funciones de  $z$ . Con la dispersión no nula, no se puede conseguir ninguna compensación de SPM exacta porque el barrido inicial de impulsos ópticos se define a la entrada de la fibra. Sin embargo, la compensación de SPM es pertinente cuando la potencia del impulso es alta, lo que sucede a la entrada del intervalo de la fibra. La creación del barrido de frecuencias inicial de la misma forma y de signo opuesto a (8) a la entrada del intervalo de la fibra reduce, en gran medida, el impacto de SPM.

15 Los resultados experimentales y de simulaciones numéricas, que ilustran las anteriores consideraciones, se presentan en las Figuras 3 a 5. La Figura 3 representa la anchura espectral de impulsos calculada para impulsos de datos de PRBS (Secuencia binaria pseudo-aleatoria) con el barrido de frecuencias, como una función del número de intervalos proporcional a la longitud de una línea de transmisión realista, con una longitud de intervalo de 80 km. Según los datos presentados en la Figura 3, la longitud de transmisión libre de errores máxima está dentro de varios miles de kilómetros (4.000 km para los parámetros utilizados para cálculos de la Figura 3). En la Figura 4, los espectros calculados se presentan para la entrada y salida de los impulsos de PRBS que utilizan los mismos parámetros que en la Figura 3. La Figura 5 representa espectros experimentalmente observados para la transmisión a través de 4.000 km de fibra monomodo SMF-28 en una configuración en anillo. Los impulsos de PRBS, con barrido de frecuencias generados por un láser directamente modulado se enviaron a través del canal centrado en 1554,1 nm. Estos impulsos fueron enriquecidos espectralmente a la entrada de la línea de transmisión a 35 GHz; a la salida, la anchura espectral es de 25 GHz. Otros tres canales centrados en 1553,3 nm, 1554,9 nm y 1555,7 nm son cargados por láser de onda continua CW.

25 El concepto de propagación de impulsos ópticos enriquecidos espectralmente, con agotamiento espectral a lo largo de la línea de transmisión, es un método de transmisión de señales ópticas, según la presente invención. Este concepto se puede poner en práctica en varias formas de realización. Cada una de estas formas de realización utiliza la línea de transmisión de dispersión compensada que comprende una pluralidad de intervalos de la fibra óptica. Los intervalos comercialmente adecuados presentan una longitud en un margen entre aproximadamente 50 km a 120 km, con la respectiva dispersión en un margen  $(2-17) \frac{ps}{nm * km}$ . Para obtener la compensación de la dispersión y el restablecimiento

30 de la potencia, cada intervalo 21 se suministra con un compensador de la dispersión 22 y al menos un amplificador óptico 23. El compensador de la dispersión 22 introduce una dispersión opuesta a la dispersión de la fibra óptica y sirve para compensar la dispersión de la fibra. El compensador de la dispersión 22 se puede obtener a partir de un segmento de fibra compensadora de la dispersión o una red de difracción de Bragg. El amplificador óptico 23 reestablece la intensidad de una señal óptica que se propaga a través del intervalo de SM 21 a su valor inicial.

35 En una forma de realización preferida, los impulsos ópticos generados por el transmisor óptico presentan una duración aproximada del 20% al 50% del periodo de bits. El ancho de banda de los impulsos ópticos enriquecidos espectralmente, a la entrada de la línea de transmisión de dispersión compensada, supera el límite de la Transformada de Fourier de esta duración, respectivamente en un 50% al 200%. El barrido de frecuencias de impulsos, introducido a las señales ópticas enriquecidas espectralmente, es similar a la frecuencia del barrido introducida por SPM, pero que presenta el signo opuesto. Como resultado, la distorsión no lineal, inducida por SPM, en una línea de transmisión de dispersión compensada y con amplificación periódica da lugar a un agotamiento incremental del barrido de frecuencias de los impulsos enriquecidos espectralmente. Si la dependencia temporal del barrido de frecuencias se elige adecuadamente, entonces la propagación del impulso óptico enriquecido espectralmente causa un agotamiento gradual de su barrido de frecuencias, mientras que la forma temporal del impulso no cambia significativamente.

45 El transmisor óptico utiliza una fuente óptica para generar impulsos ópticos. Diferentes tipos de fuentes ópticas se pueden utilizar dependiendo de la aplicación comercial. En la Figura 6, un diodo láser directamente modulado 61 se utiliza como una fuente óptica de impulsos ópticos con barrido de frecuencias. Tradicionalmente, los diseñadores de sistemas evitan la modulación directa o la conmutación de ganancias de diodos láser porque los impulsos lásericos presentan una acción de láser dinámica de frecuencias (barrido de frecuencias) que se considera, tradicionalmente, como perjudicial para la transmisión. El barrido de frecuencias proporcional al tiempo derivado de la fase modulada se relaciona con la dependencia temporal de la densidad de portadoras (G.P. Agrawal y N.K. Dutta, "Semiconductor Lasers", New York, 1993). Con la más alta densidad de portadoras libres (en el frente del impulso), la frecuencia emitida es más

alta y con el agotamiento de las portadoras libres a la salida del impulso, la frecuencia emitida es más baja que la emitida por el láser que opera en el modo de onda continua CW.

5 En las formas de realización de la presente invención, la modulación directa de los diodos láser fue descubierta como una aplicación útil de un fenómeno físico habitualmente considerado como perjudicial para la transmisión de la señal. Un generador de reloj 62 se utiliza para excitar el láser de diodos. El barrido de frecuencias de los impulsos ópticos emitidos por el láser 61 depende, en gran medida, de la tensión de excitación del generador de reloj 62. Un dispositivo desplazador de fases 63 proporciona un ajuste del retardo entre el generador de reloj 62 y un generador de datos 65. Un modulador de datos 64, excitado por el generador de datos 65 modula externamente la secuencia de impulsos ópticos emitidos por el láser 61.

15 En la Figura 7, una forma típica del impulso óptico (curva 1) se ilustra para un diodo láser directamente modulado, junto con el barrido de frecuencias experimentalmente medido (curva 2). El barrido de frecuencias de algunas decenas de GHz se suele obtener, en la práctica moderna, lo que hace a esta forma de realización especialmente adecuada para la transmisión de datos OC-192 (10 Gb/s). Cuando el diodo láser se modula a una frecuencia comparable con su frecuencia de relajación (normalmente en torno a 5-10 GHz), el barrido de frecuencias presenta una forma opuesta al barrido de frecuencias inducido por SPM.

20 La Figura 8 ilustra un láser de diodos directamente modulado 81 excitado por una unidad electrónica 82 que combina funciones de reloj y modulación de datos. Éste es otro ejemplo del diodo de láser directamente modulado que proporciona a la salida impulsos que presentan un desplazamiento de frecuencias dinámico (barrido) debido a los cambios de la concentración de portadoras libres. La modulación de láser, en este caso, no es periódica, sino que el comportamiento en la frecuencia, en los impulsos de este láser, es muy similar a la anteriormente descrita: más altas frecuencias en el flanco de entrada del impulso y más bajas frecuencias en su flanco de salida. En esta forma de realización, no se necesita la modulación externa de la salida del láser. Un alto grado de integración de las funciones eléctrica y óptica proporciona ventajas importantes de esta forma de realización para aplicaciones comerciales.

30 En otra forma de realización, ilustrada en la Figura 9, el transmisor óptico puede utilizar un láser de diodos de semiconductores de onda continua CW 91 como fuente de luz. Para proporcionar las funciones del transmisor, esta forma de realización utiliza tres moduladores: modulador de impulsos 92, modulador de fase 96 y modulador de datos 97 excitados por el generador de reloj 94 y el generador de datos 98, respectivamente. El modulador de impulsos 92 es excitado por el generador de reloj 94 a través del dispositivo desplazador de fases 93 y funciona en un régimen lineal. El modulador de fase 96 es excitado por el generador de reloj 94 a través del dispositivo desplazador de fases 95 y el modulador de datos 97 es excitado por el generador de datos 98. La secuencia de tres moduladores se utiliza para generar impulsos ópticos, enriquecidos espectralmente, modulados por los datos. Una reducción importante de la distorsión no lineal, dentro de la línea de transmisión, se puede conseguir ajustando la tensión aplicada al modulador de fase 96 y obteniendo el barrido de frecuencias de los impulsos ópticos similar al barrido de frecuencias inducido por SPM, pero con el signo opuesto.

40 En la Figura 10, se representa otra forma de realización que utiliza un láser de diodos de modo bloqueado 101 como una fuente de impulsos ópticos. Una secuencia de impulsos ópticos cortos, emitidos por el láser de diodos 101, se modula por un modulador de datos 105 y es objeto de estirado y barrido por un dispositivo de dispersión 106. El láser de modo bloqueado 101 y el modulador de datos 104 se excitan por un generador de reloj 103 y un generador de datos 104, respectivamente sincronizados entre sí. Un dispositivo desplazador de fases 102 se utiliza para ajustar el retardo de fase entre las tensiones excitadoras para el láser de modo bloqueado 101 y el modulador de datos 105. El láser de modo bloqueado 101 proporciona impulsos ópticos cortos de aproximadamente del 5% al 15% del periodo de bits que presenta un efecto óptico adecuado para la compensación de productos espectrales no lineales inducidos por SPM. El modulador de datos 105 se utiliza para la carga de datos digitales en esta secuencia de impulsos ópticos cortos. El dispositivo de dispersión 106, conectado a una salida del modulador de datos 105, realiza un estirado de la duración de estos impulsos a aproximadamente del 20% al 50% del periodo de bits e introduce un barrido de frecuencias que opera con respecto al barrido de frecuencias inducido por SPM.

55 Un número importante de los sistemas de fibra óptica, desarrollados en este campo, son sistemas de WDM multicanal. La Figura 11 ilustra un sistema de comunicación por WDM multicanal para la propagación de impulsos ópticos modulados por datos, enriquecidos espectralmente, a través de una línea de transmisión de dispersión compensada. El sistema WDM comprende una pluralidad de transmisores ópticos WDM 111 para generar impulsos ópticos, enriquecidos espectralmente, modulados por datos. Los impulsos generados, en cada canal, presentan un espectro que es sustancialmente más ancho que el espectro de los impulsos limitados por la Transformada de Fourier de la misma dirección. Un multiplexor de WDM 112 combina salidas de los transmisores ópticos de WDM 111 en una señal óptica multiplexada. La señal óptica multiplexada se transmite a través de una línea de transmisión de dispersión compensada 133 que comprende una pluralidad de intervalos y una pluralidad de unidades de compensación de la dispersión 114. Cada unidad de compensación de la dispersión está situada entre cada par de intervalos adyacentes. Un demultiplexor de WDM 115 efectúa la demultiplexión de la señal óptica multiplexada por WDM en una pluralidad de señales ópticas individuales. Una pluralidad de receptores ópticos 116, correspondientes a la pluralidad de los transmisores ópticos por WDM 111, recibe respectivas pluralidades de impulsos ópticos que presentan espectros comparables al límite de la Transformada de Fourier. La distancia de propagación, libre de errores, es la longitud máxima de la línea de transmisión

dispersión compensada dentro de la cual la forma temporal de cada impulso es invariable (aunque el espectro de pulsos se hubiera agotado para el límite de la Transformada de Fourier).

5 La invención ha sido descrita anteriormente a modo de ejemplos y estos ejemplos no están previstos para limitar el alcance de la invención según se define por las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema de comunicaciones multicanal, que comprende:

- 5 primero y segundo láseres cada uno seleccionado de entre el grupo constituido por un láser de diodos directamente modulado (61), un láser de diodos de onda continua (91) y un láser de modo bloqueado (101), presentando dichos primeros y segundos láseres primeras y segundas salidas, respectivamente;
- 10 primeros y segundos moduladores (64, 97, 105) acoplados a dichos primeros y segundos láseres, respectivamente y dispuestos para modular primeras y segundas salidas de dichos primeros y segundos láseres en primeras y segundas series de impulsos de datos barridos, caracterizados por espectros de frecuencias que son sustancialmente más anchos que los espectros con limitación de la Transformada de Fourier;
- 15 un primer multiplexor por división de longitud de onda (112), que presenta primeras y segundas entradas y una salida, estando dichas primeras y segundas entradas de dicho multiplexor ópticamente conectadas a dichas primeras y segundas salidas de dichos primeros y segundos láseres, respectivamente;
- 20 un primer intervalo de fibra de transmisión óptica de dispersión compensada (113), que presenta un primer extremo ópticamente conectado a dicha salida de dicho multiplexor;
- una primera unidad de compensación de la dispersión (114) caracterizada por una dispersión opuesta a la de dicho primer intervalo y que presenta una entrada ópticamente conectada a un segundo extremo de dicho primer intervalo;
- 25 un segundo intervalo de dicha fibra de transmisión óptica de dispersión compensada (113) caracterizada por una dispersión opuesta a la de dicha primera unidad de compensación de la dispersión y que presenta un primer extremo conectado, por medios ópticos, a una salida de dicha primera unidad de compensación de la dispersión;
- 30 una segunda unidad de compensación de la dispersión (114) caracterizada por una dispersión opuesta a la de dicho segundo intervalo y que presenta una entrada ópticamente conectada a un segundo extremo de dicho segundo intervalo;
- un demultiplexor por división de longitud de onda (115) que presenta una entrada y primeras y segundas salidas, estando dicha entrada de dicho demultiplexor conectada, por medios ópticos, a una salida de dicha segunda unidad de compensación de la dispersión;
- 35 primeros y segundos receptores ópticos ópticamente conectados a dichas primeras y segundas salidas, respectivamente, de dicho demultiplexor (115) a una distancia en o más allá de una zona de propagación libre de errores desde dichos primeros y segundos láseres, en donde dichos espectros de frecuencias se agotan cuando dichas primeras y segundas series de impulsos se propagan a través de dicha zona de propagación libre de errores, mientras que las formas temporales de dichas primeras y segundas series de impulsos permanecen sustancialmente invariables.
- 40 2. El sistema, según la reivindicación 1, en donde dichas primeras y segundas unidades de compensación de la dispersión son primeras y segundas redes de difracción de Bragg, respectivamente.

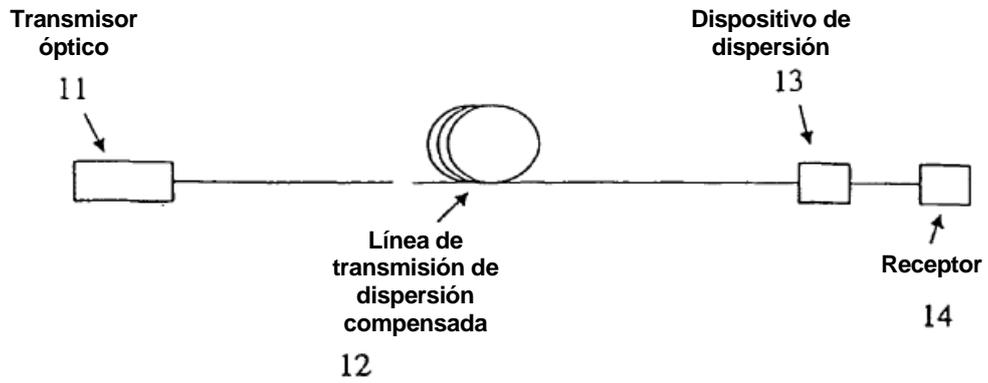


FIG. 1

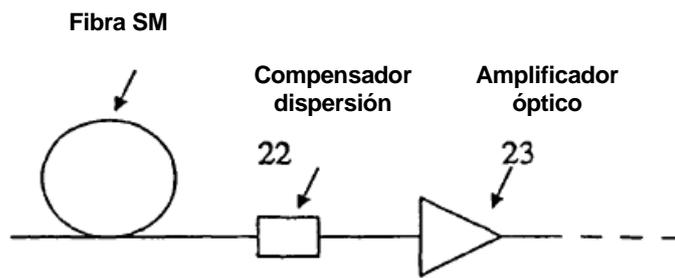
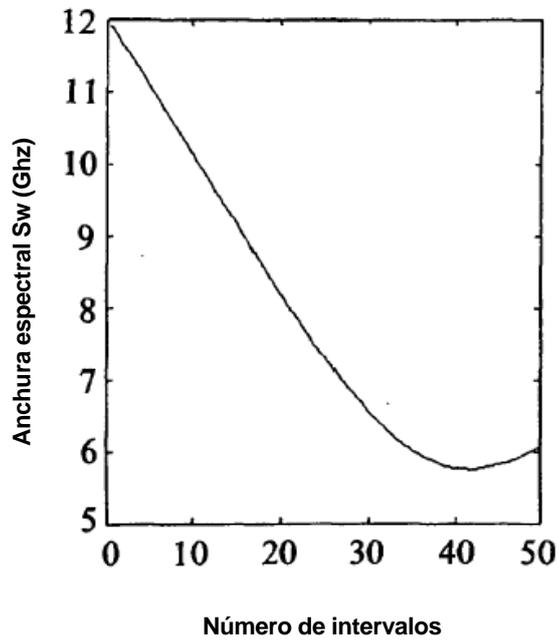
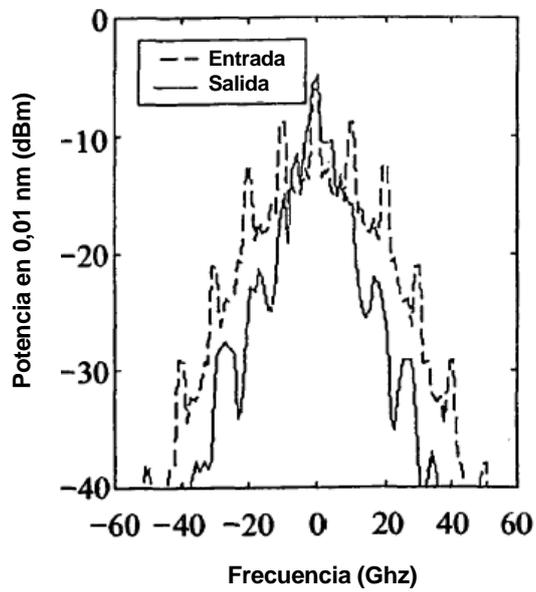


FIG. 2



**FIG. 3**



**FIG. 4**

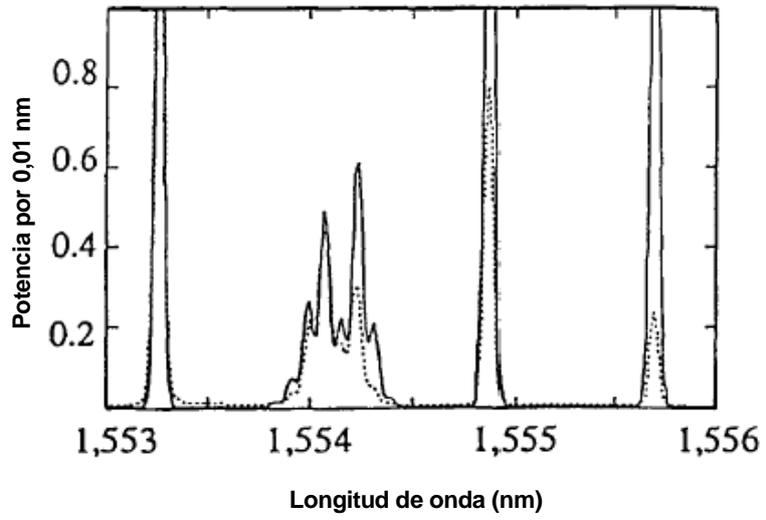


FIG. 5.

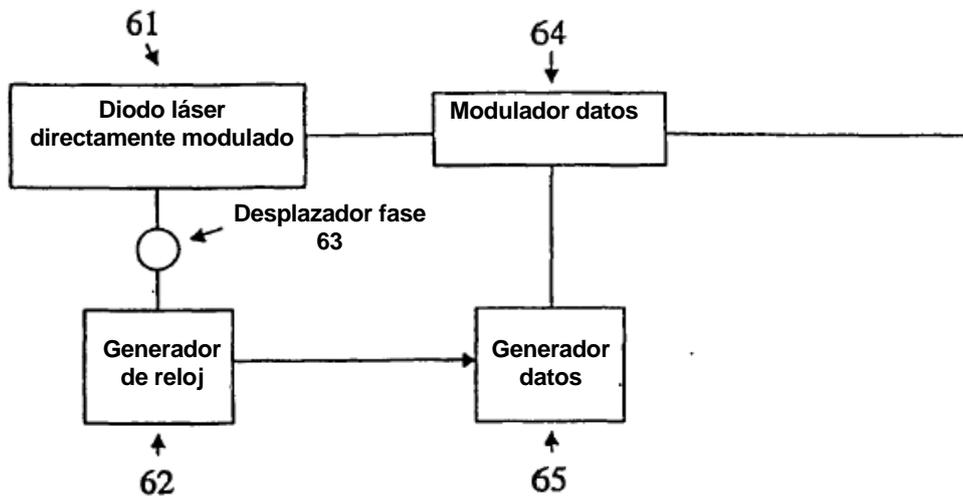


FIG. 6

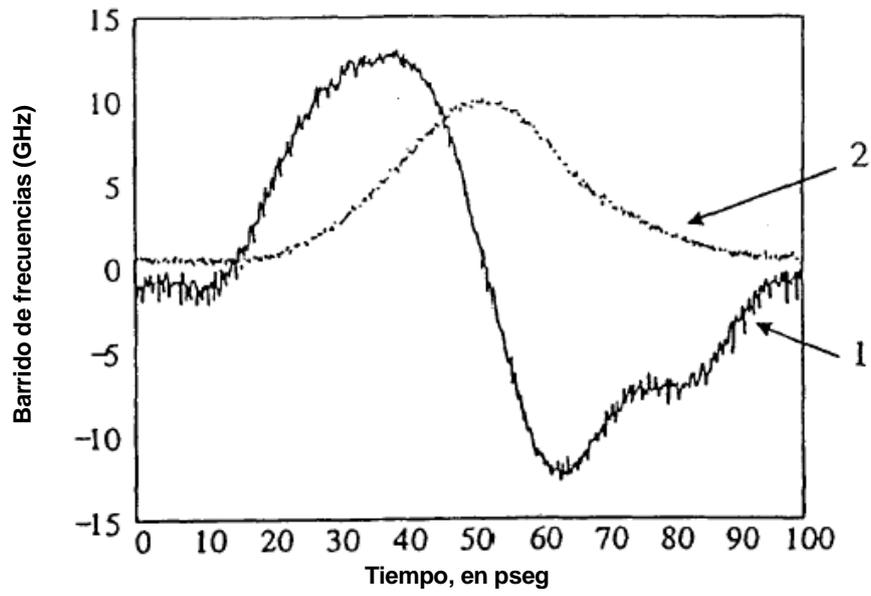


FIG. 7

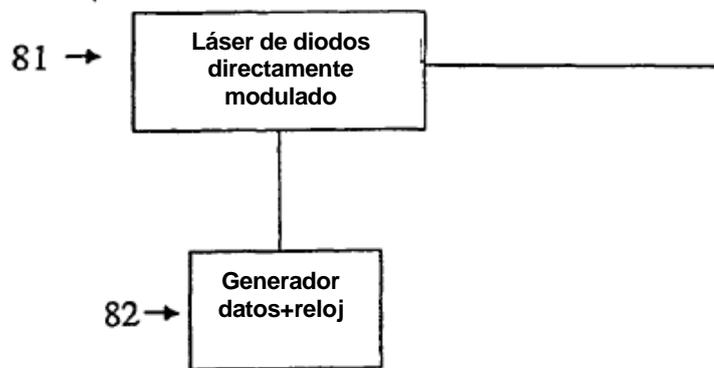


FIG. 8

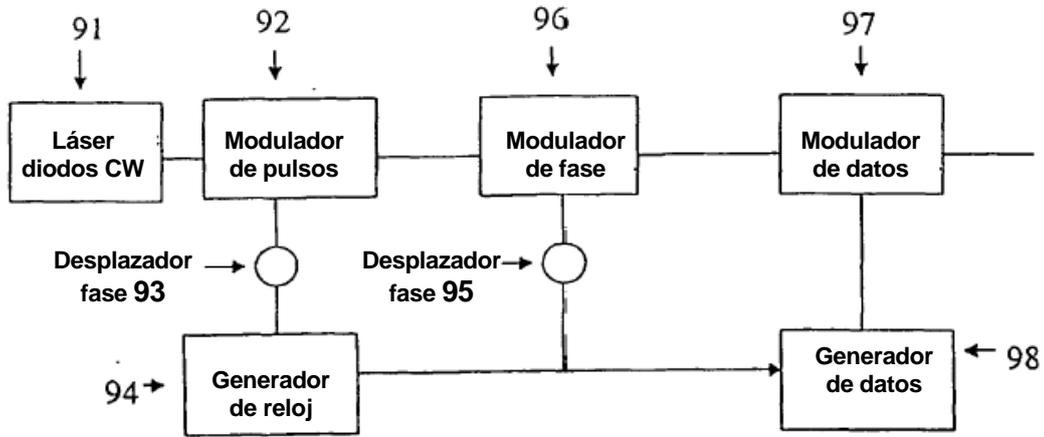


FIG. 9

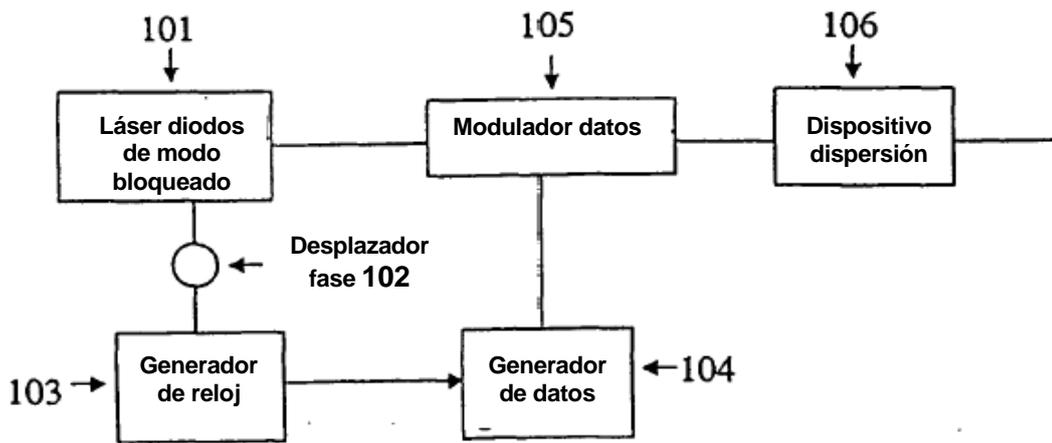


FIG. 10

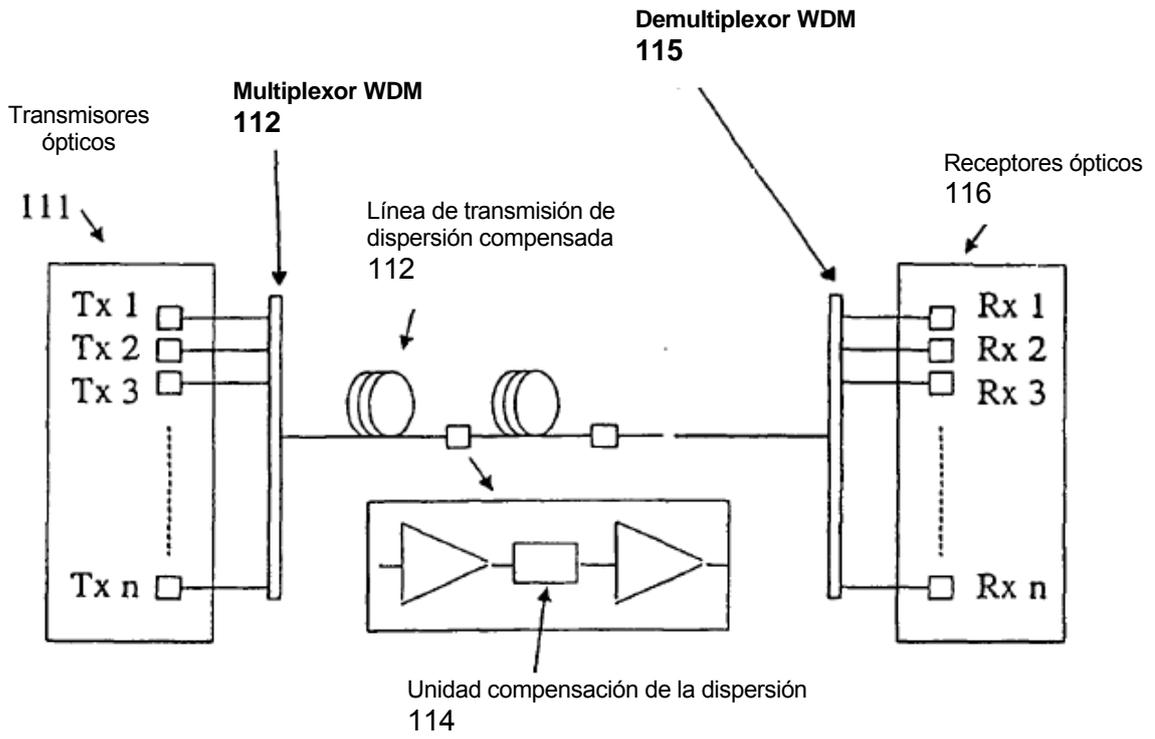


FIG. 11