

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 391 540**

51 Int. Cl.:
H04B 10/12 (2006.01)
H01S 5/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **10014262 .9**
96 Fecha de presentación: **03.11.2010**
97 Número de publicación de la solicitud: **2326032**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **25.05.2011**

54 Título: **Transmisor óptico para sistemas RoF de ondas mm y método correspondiente**

30 Prioridad:
20.11.2009 US 263124 P
25.02.2010 US 712758

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
27.11.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
27.11.2012

73 Titular/es:
CORNING CABLE SYSTEMS LLC (100.0%)
800 17th Street NW
Hickory NC 28602 , US

72 Inventor/es:
SELDON D, BENJAMIN;
FORTUSINI, DAVIDE, D.;
NG'OMA, ANTHONY y
SAUER, MICHAEL

74 Agente/Representante:
LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 391 540 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

Transmisor óptico para sistemas RoF de ondas mm y método correspondiente

SOLICITUD DE PRIORIDAD

5 Esta solicitud reivindica el beneficio de la solicitud provisional de patente de los EE.UU. N° 61/263.124, presentada el 20 de noviembre de 2009.

ANTECEDENTES

Campo técnico

La presentación se refiere a dispositivos de transmisión óptica, y más particularmente a dispositivos ópticos de láser semiconductor de enganche óptico por inyección para transmisión óptica a alta velocidad.

10 Antecedentes de la técnica

Los láseres semiconductores de enganche óptico por inyección (OIL, del inglés "Optically Injection-Locked") son fuentes ópticas prometedoras para transmisión óptica a alta velocidad debido a que exhiben una respuesta en frecuencia mejorada, y son por lo tanto adecuados para modulación directa. La respuesta en frecuencia mejorada es de particular importancia para sistemas de fibra-inalámbricos multi-Gbps que operan a frecuencias de ondas milimétricas, tales como 60 GHz. En el enganche óptico por inyección, la salida óptica de un láser maestro es inyectada en un láser esclavo. Bajo condiciones particulares, el láser esclavo se "engancha" al maestro, es decir, la emisión láser del láser esclavo está enganchada en frecuencia y fase óptica al campo óptico del láser maestro. Bajo estas condiciones, puede obtenerse una mejora de las características del láser esclavo. Una clase particularmente interesante de fuentes OIL de bajo coste está representada por láseres de cavidad vertical y emisión en superficie (VCSEL, del inglés "Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser") de enganche OIL, en que el láser esclavo es un láser VCSEL.

Para un láser esclavo dado, la respuesta en frecuencia depende de la condición de enganche OIL, que está caracterizada por dos parámetros: 1) la desintonización de frecuencia (diferencia en frecuencia óptica entre el láser maestro y el láser esclavo en operación libre) y 2) la tasa de inyección (relación de potencia óptica del láser maestro a potencia óptica del láser esclavo). Con una elección apropiada de estos parámetros, la respuesta en frecuencia del láser VCSEL de enganche OIL muestra un máximo de resonancia que mejora la respuesta a alta frecuencia. En una condición así, la respuesta en frecuencia del láser VCSEL puede ser sintonizada a paso bajo o paso de banda a una frecuencia más alta. Además, el láser VCSEL de enganche OIL produce una modulación de banda lateral única (SSB, del inglés "Single-SideBand"). La respuesta en frecuencia de paso de banda y la modulación de banda lateral única hacen al láser VCSEL de enganche OIL particularmente adecuado para uso en sistemas de radio-sobre-fibra (RoF, del inglés "Radio-over-Fiber") como transmisor óptico para generar una señal óptica que puede ser transportada a una unidad de antena lejana por medio de una fibra óptica.

Una importante desventaja de los dispositivos de láser VCSEL de enganche OIL conocidos es que la profundidad de modulación alcanzable (es decir, el cociente entre la potencia de señal modulada y la potencia de portadora óptica) es muy pequeña. Esta desventaja surge del hecho de que la salida óptica del láser VCSEL de enganche OIL es espacial y espectralmente coincidente con la potencia óptica del láser maestro, que es reflejada por el propio láser VCSEL. La potencia óptica maestra reflejada no está modulada, y tiene una potencia sustancialmente más alta que la potencia modulada emitida por el láser VCSEL. Consecuentemente, la señal óptica resultante consta de una portadora óptica muy fuerte y una banda lateral modulada mucho más débil. En general, las señales ópticas débilmente moduladas llevan a una eficiencia de enlace pobre porque el desequilibrio entre la portadora óptica y la banda lateral modulada lleva a una relación señal-ruido (SNR, del inglés "Signal-to-Noise Ratio") pobre de la señal eléctrica/RF detectada, causando con ello una elevada tasa de error en bits (BER, del inglés "Bit Error Rate"). Se ha establecido que la mejor eficiencia de enlace se obtiene a menudo cuando la potencia en la portadora y la(s) banda(s) lateral(es) es aproximadamente igual.

45 HYUK-KEE SUNG ET al: "Optical single sideband Modulation using Strong Optical Injection-Locked Semiconductor Lasers", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 19, n° 13, 1 de julio de 2007 (2001-07-01), páginas 1005-1007, XP011185268, ISSN: 1041-1135, DOI: DOI:10.1109/LPT.2007.898760, informa sobre la demostración experimental de modulación de banda lateral única (SSB) óptica usando un láser semiconductor modulado directamente bajo enganche óptico por inyección fuerte. Se han descrito bandas laterales de modulación con una relación de potencia de 15 dB entre las bandas laterales inferiores y superiores. La banda lateral de longitud de onda más larga es amplificada por resonancia por el modo de cavidad láser con enganche por inyección.

BO ZHANG ET AL: "Reconfigurable Multifunctional Operating Using Optical injection-Locked Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol.

PP, nº 15, 1 de agosto de 2009 (2009-08-01), páginas 2958-2963, XP011256281, ISSN: 0733-8724 informa además sobre una extensión de la aplicación del sistema de láseres de cavidad vertical y emisión en superficie (VCSEL) de enganche óptico por inyección (OIL) a redes ópticas futuras realizando operación multifuncional usando un esquema VCSEL-OIL asistido por filtro que puede ser reconfigurado. Usando un láser VCSEL de enganche por inyección de
 5 chirp ajustable único, seguido por un interferómetro de línea de retardo sintonizable, tres funciones que muestran generación monocíclica de banda ultra-ancha, conversión de formato de datos desde no retorno a cero (NRZ, del inglés "NonReturn-to-Zero") a pseudoretorno a cero (PRZ, del inglés "PseudoReturn-to-Zero"), y reloj de datos NRZ, se demuestra experimentalmente recuperación a 10 Gb/s.

En sistemas con modulación Mach-Zehnder, que son los sistemas RoF más ampliamente empleados para operación a alta frecuencia, las potencias ópticas relativas entre la portadora y la(s) banda(s) lateral(es) son controladas a menudo sintonizando la tensión de polarización (electrónica) del modulador. Sin embargo, en dispositivos de enganche OIL, esta limitación no puede ser superada reduciendo la potencia del láser maestro o incrementando la potencia de salida del láser VCSEL, debido a que hacerlo así modificaría la tasa de inyección apartándola del valor necesario para obtener la deseada respuesta en frecuencia.

En vista de lo anterior, es deseable proporcionar dispositivos de transmisión óptica de láser VCSEL de enganche OIL que optimicen la relación de potencia de portadora óptica a potencia de banda lateral de láser esclavo sin cambiar la tasa de inyección de los dispositivos.

SUMARIO

Una realización es un dispositivo de transmisión óptica que comprende un láser maestro configurado para generar una señal maestra, un láser VCSEL configurado para enganche óptico por inyección al láser maestro, y una unidad de ecualización. El láser VCSEL está configurado para generar una señal de salida de láser VCSEL que comprende un componente de portadora y un componente de banda lateral modulado. La unidad de ecualización está configurada para recibir la señal de salida del láser VCSEL y proporcionar una señal de salida ecualizada que tiene una relación reducida de potencia de componente de portadora a potencia de componente de banda lateral modulado en comparación con la señal de salida del láser VCSEL.
 20
 25

Otra realización es un dispositivo de transmisión óptica que comprende un láser maestro configurado para generar una señal maestra, un primer láser VCSEL configurado para enganche óptico por inyección al láser maestro, un primer filtro óptico de tres puertos, un segundo láser VCSEL configurado para enganche óptico por inyección al láser maestro, y un segundo filtro óptico de tres puertos. El primer láser VCSEL está configurado para generar una primera señal de salida de láser VCSEL que comprende un primer componente de portadora y un primer componente de banda lateral modulado. El primer filtro óptico de tres puertos está configurado para recibir la primera señal de salida de láser VCSEL desde el primer láser VCSEL, separar el primer componente de portadora y el primer componente de banda lateral modulado, y transmitir separadamente el primer componente de portadora y el primer componente de banda lateral modulado. El segundo láser VCSEL está configurado para recibir el primer componente de portadora desde el primer filtro óptico de tres puertos y generar una segunda señal de salida de láser VCSEL que comprende un segundo componente de portadora y un segundo componente de banda lateral modulado. El segundo filtro óptico de tres puertos está configurado para recibir la segunda señal de salida de láser VCSEL desde el segundo láser VCSEL, separar el segundo componente de portadora y el segundo componente de banda lateral modulado, y transmitir separadamente el segundo componente de portadora y el segundo componente de banda lateral modulado.
 30
 35
 40

Una realización adicional es un método de transmisión óptica que comprende enganchar por inyección un láser VCSEL a un láser maestro, hacer funcionar el láser VCSEL para generar una señal de salida de láser VCSEL que comprende un componente de portadora y un componente de banda lateral modulado, transmitir la señal de salida de láser VCSEL a una unidad de ecualización, formar una señal de salida ecualizada en la unidad de ecualización, y proporcionar de salida la señal de salida ecualizada. La señal de salida ecualizada comprende una relación reducida de potencia de componente de portadora a potencia de componente de banda lateral modulado en comparación con la señal de salida del láser VCSEL.
 45

Una realización adicional es un método de transmisión óptica que comprende: enganchar por inyección un primer láser VCSEL a un láser maestro; hacer funcionar el primer láser VCSEL para generar una primera señal de salida de láser VCSEL que comprende un primer componente de portadora y un primer componente de banda lateral modulado; encaminar la primera señal de salida de láser VCSEL hacia un primer filtro óptico de tres puertos; separar el primer componente de portadora y el primer componente de banda lateral modulado con el primer filtro óptico de tres puertos; y transmitir separadamente el primer componente de portadora y el primer componente de banda lateral modulado con el primer filtro óptico de tres puertos. El método comprende además: enganchar por inyección un segundo láser VCSEL para generar una segunda señal de salida de láser VCSEL que comprende un segundo componente de portadora y un segundo componente de banda lateral modulado; encaminar la segunda señal de salida de láser VCSEL hacia un segundo filtro óptico de tres puertos; separar el segundo componente de portadora y el segundo componente de banda lateral modulado con el segundo filtro óptico de tres puertos; y transmitir
 50
 55

separadamente el segundo componente de portadora y el segundo componente de banda lateral modulado procedentes del segundo filtro óptico de tres puertos.

5 Los dispositivos y métodos presentados aquí permiten una eficiencia de enlace óptico más alta, una eficiencia espectral más alta, una velocidad de bits más alta, enlaces RoF extendidos y distancias de transmisión inalámbrica más largas en sistemas de transmisión óptica. Adicionalmente, los dispositivos y métodos presentados proporcionan medios de coste relativamente bajo para conseguir los atributos anteriormente mencionados.

10 Características y ventajas adicionales serán expuestas en la descripción detallada que sigue, y en parte se pondrán fácilmente de manifiesto para aquéllos con experiencia en la técnica a partir de esa descripción o serán reconocidas mediante la práctica de las realizaciones aquí descritas, incluyendo la descripción detallada que sigue, las reivindicaciones, así como los dibujos adjuntos.

Debe entenderse que tanto la descripción general antecedente como la descripción detallada siguiente se proporcionan meramente a modo de ejemplo, y están destinadas a proporcionar una visión general o marco para entender la naturaleza y el carácter de las reivindicaciones. Los dibujos ilustran una o más realizaciones, y junto con la descripción sirven para explicar principios y la operación de las diversas realizaciones.

15 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

20 La figura 1 es una representación esquemática de un dispositivo de transmisión óptica de acuerdo con una realización, que incluye un circulador óptico configurado para encaminar la salida de un láser maestro hacia un láser esclavo y encaminar la salida del láser esclavo hacia un canal de transmisión óptica, y que incluye un filtro óptico entre el circulador óptico y el canal de transmisión óptica;

la figura 2 es una representación esquemática de un dispositivo de transmisión óptica de acuerdo con otra realización similar a la realización de la figura 1, pero que incluye un amplificador óptico entre el filtro óptico y el canal de transmisión;

25 la figura 3 es una representación esquemática de un dispositivo de transmisión óptica de acuerdo con otra realización, que incluye dos filtros ópticos y un atenuador óptico variable configurado para proporcionar una pérdida óptica variable para el componente de portadora de una salida de señal óptica por el dispositivo;

30 la figura 4 es una representación esquemática de un dispositivo de transmisión óptica de acuerdo con otra realización, que incluye un filtro óptico configurado para encaminar la salida de un láser maestro hacia un láser esclavo y encaminar la salida del láser esclavo hacia un canal de transmisión óptica;

35 la figura 5 es una representación esquemática de un dispositivo de transmisión óptica de acuerdo con otra realización similar a la realización de la figura 4 y que incluye un aislador óptico configurado para proteger el láser maestro respecto a un componente de portadora reflejado de la salida del láser maestro;

40 la figura 6 es una representación esquemática de un dispositivo de transmisión óptica de acuerdo con otra realización, en que el dispositivo está configurado para enganchar por inyección un primer láser esclavo y un segundo láser esclavo reutilizando la potencia de portadora óptica emitida por un primer filtro óptico como potencia maestra para el segundo láser esclavo;

la figura 7 es una representación esquemática de un dispositivo de transmisión óptica de acuerdo con otra realización, que incluye dos filtros ópticos y un amplificador configurados para amplificar un componente de banda lateral de una salida de señal óptica por un láser esclavo;

45 la figura 8 es una representación esquemática de un montaje experimental convencional de láser VCSEL de enganche OIL;

la figura 9 muestra gráficos de respuesta en frecuencia para el montaje experimental de la figura 8 con el láser VCSEL operando en modos libre y de enganche OIL;

50 la figura 10 muestra una gráfica de los espectros ópticos del montaje experimental de la figura 8 modulados con portadoras RF de longitud de onda constante a diferentes frecuencias;

la figura 11 muestra la respuesta en frecuencia de un enlace OIL-RoF establecido por el montaje experimental de la figura 8 para diferentes longitudes de fibra;

- la figura 12 muestra curvas de tasa de error en bits (BER) frente a potencia óptica recibida para el montaje experimental de la figura 8 operando en modo de enganche por inyección con una modulación de banda base por codificación por desplazamiento de amplitud (ASK, del inglés "Amplitude Shift Key") de 2 Gbps sobre una portadora de 60,5 GHz;
- 5 la figura 13 muestra el espectro óptico para el montaje experimental de la figura 8 modulado con una señal ASK de 2 Gbps a 60,5 GHz;
- la figura 14 es una representación esquemática de un montaje experimental novedoso de láser VCSEL de enganche OIL configurado para filtrar/ecualizar la salida de un láser VCSEL de enganche OIL;
- 10 la figura 15 muestra el espectro óptico del montaje experimental de la figura 14 modulado con una señal ASK de 2 Gbps a 60,5 GHz;
- la figura 16 muestra gráficos de respuesta en frecuencia del montaje experimental de la figura 14 con el láser VCSEL operando en modos libre y de enganche OIL;
- 15 la figura 17 muestra el espectro eléctrico de una señal de banda base recuperada procedente del montaje experimental de la figura 14, que emplea modulación directa, tras la conversión descendente en un receptor inalámbrico;
- la figura 18 muestra curvas de tasa BER frente a potencia óptica recibida para los montajes experimentales de la figura 8 (sin filtrado/ecualización) y la figura 14 (con filtrado/ecualización) con modulación con una señal ASK de 2 Gbps a 60,5 GHz;
- 20 las figuras 19 y 20 muestran curvas de tasa BER frente a potencia óptica recibida para el montaje experimental de la figura 14 con modulación con una señal ASK de 2 Gbps a 60,5 GHz y una señal ASK de 3 Gbps a 60,5 GHz, respectivamente.
- la figura 21 muestra diagramas de ojo de datos ASK recibidos antes y después de la transmisión sobre una distancia de 20 km de fibra monomodo estándar y de 3 m inalámbrica;
- 25 la figura 22 muestra el espectro eléctrico de una señal RF recuperada procedente del montaje experimental de la figura 14, que emplea una modulación QPSK (del inglés "Quadrature Phase Shift Keying", modulación por desplazamiento de fase en cuadratura) de 2 Gbps a una frecuencia de sub-portadora de 1,5 GHz;
- 30 la figura 23 muestra el rendimiento en cuanto a relación señal-ruido (SNR) del montaje experimental de la figura 14, con modulación con datos QPSK de 2 Gbps, después de la transmisión sobre una distancia de hasta 20 km de fibra monomodo estándar y de 3 m inalámbrica; y
- la figura 24 muestra diagramas de constelación para el montaje experimental de la figura 14, con modulación con datos QPSK de 2 Gbps, después de la transmisión sobre una distancia de 20 km de fibra monomodo estándar y de 3 m inalámbrica.

35 DESCRIPCIÓN DETALLADA

Se hará ahora referencia en detalle a las realizaciones preferidas presentes, ejemplos de las cuales se ilustran en los dibujos adjuntos. Siempre que sea posible, se usarán los mismos números y caracteres de referencia en todos los dibujos para referirse a las mismas o similares partes. La presentación está dirigida a dispositivos de transmisión óptica para sistemas de radio sobre fibra (RoF) y particularmente a sistemas de fibra-inalámbricos multi-Gbps que operan a frecuencias de ondas milimétricas, tales como 60 GHz. Una realización de un dispositivo de transmisión óptica se muestra en la figura 1, y está designado generalmente en lo que sigue por el número de referencia 10.

40 Como se muestra en la figura 1, el dispositivo de transmisión óptica 10 incluye un láser maestro 20, un circulador óptico 70 acoplado al láser maestro 20 por un enlace óptico 30, un láser esclavo 80 acoplado al circulador óptico 70 por un enlace óptico 32, y una unidad de filtro o unidad de ecualización 90 acoplada al circulador óptico 70 por un enlace óptico 34. La unidad de filtro/unidad de ecualización 90 está acoplada a un canal de transmisión óptica 100 por un enlace óptico 36. Los enlaces ópticos 30, 32, 34, 36 pueden ser fibras ópticas u otras conexiones ópticas tales como, por ejemplo, guías de ondas ópticas o conexiones ópticas de espacio libre.

50 El láser maestro 20 puede ser un láser de retroalimentación distribuida de onda continua (CW, del inglés "Continuous-Wave") y alta potencia, por ejemplo. Dispositivos adecuados para el láser maestro 20 incluyen el, pero no están limitados al, modelo AA1401 de EM4 fabricado por la compañía EM4 Incorporated. Debe entenderse, sin embargo, que pueden usarse otros tipos y modelos de láser. El láser maestro 20 está configurado para proporcionar de salida una señal óptica maestra S1, que incluye un componente de señal de portadora óptica no modulada.

El láser esclavo 80 puede ser, por ejemplo, un láser de cavidad vertical y emisión en superficie (VCSEL), tal como un láser VCSEL monomodo de unión de túnel sepultada (BTJ, del inglés "Buried Tunnel Junction") de 1540 nm con una salida de potencia máxima de alrededor de 3 mW y un 70% de eficiencia de acoplamiento a una fibra con lentes. El láser esclavo 80 está enganchado por inyección al láser maestro 20, de modo que el láser esclavo 80 está configurado para proporcionar de salida una señal óptica S2 que está enganchada en frecuencia y fase a la señal de portadora S1 del láser maestro 20. El láser esclavo 80 está modulado de modo que la señal S2 es una señal modulada que tiene un componente de señal de portadora y un componente de señal de banda lateral única. El láser esclavo 80 puede ser modulado por un flujo de datos D1, que puede incluir datos modulados por codificación por desplazamiento de amplitud (ASK), datos modulados por codificación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), o multiplexación por división en frecuencias ortogonales (OFDM, del inglés "Orthogonal Frequency Division Multiplexing"), por ejemplo. Otros formatos de modulación son posibles, igualmente.

El circulador óptico 70 incluye un primer puerto 72 en comunicación óptica con el láser maestro 20 a través del enlace óptico 30, un segundo puerto 74 en comunicación óptica con el láser esclavo 80 a través del enlace óptico 32 y un tercer puerto 76 en comunicación óptica con la unidad de filtro/unidad de ecualización 90 a través del enlace óptico 34. Como se ilustra en la figura 1, el circulador óptico 70 está configurado para encaminar la señal S1 del láser maestro 20 hacia el láser esclavo 80 y para encaminar la señal de salida S2 del láser esclavo 80 hacia la unidad de filtro/unidad de ecualización 90. El circulador óptico 70 puede ser un circulador óptico de tres puertos, tal como un modelo CIR-330011000 de JDSU fabricado por la compañía JDS Uniphase Corporation, por ejemplo.

La unidad de filtro/unidad de ecualización 90 puede ser un filtro de paso de banda óptico con una transmisión dependiente de la longitud de onda. Ejemplos de filtros de paso de banda adecuados son los modelos TB9226 o MTBF-A1CS0 de JDSU fabricados por la compañía JDS Uniphase Corporation, pero pueden usarse otros filtros de paso de banda. El filtro de paso de banda 90 está configurado para atenuar el componente de señal de portadora y transmitir una señal de salida ecualizada S3 al canal de transmisión óptica 100. En otras palabras, el filtro 90 está configurado de forma que la longitud de onda del componente de señal de banda lateral está situada en el paso de banda del filtro 90. La señal de salida S3 incluye un componente de señal de portadora atenuado (con una pérdida de inserción elevada a través del filtro 90) y un componente de señal de banda lateral menos atenuado o sustancialmente no atenuado (con una pérdida de inserción mínima a través del filtro 90). La señal de salida S3 es denominada señal "ecualizada" debido a que la relación de potencia óptica del componente de señal de portadora a potencia óptica del componente de señal de banda lateral en la señal S3 es reducida en comparación con la salida de señal S2 por el láser esclavo 80. Hablando en general, es deseable que la relación de potencia del componente de señal de portadora a potencia del componente de señal de banda lateral en la señal S3 sea cercana a 0 dB (es decir, que haya aproximadamente la misma potencia en los componentes de señal de portadora y de banda lateral), y que el filtro 90 pueda ser sintonizado de acuerdo con ello. Un método para sintonizar el filtro 90 es colocar el componente de señal de portadora de la señal S2 en uno de los bordes de la curva de respuesta del filtro 90, y luego ajustar la potencia del componente de señal de portadora hacia arriba o hacia abajo sintonizando la frecuencia central del filtro 90 por la izquierda o por la derecha. Si las características de transmisión del filtro 90 son aproximadamente uniformes sobre su banda de paso, la potencia de la banda lateral modulada se mantendrá constante durante la sintonización del filtro.

Durante la operación del dispositivo 10, el láser maestro 10 genera la señal maestra S1, que es encaminada a través del circulador óptico 70 hacia el láser esclavo 80. El láser esclavo 80 es enganchado por inyección al láser maestro 20, y como resultado proporciona de salida la señal modulada S2 que incluye el componente de señal de portadora procedente del láser maestro 20 y un componente de señal de banda lateral de modulación. La señal S2 es encaminada a través del circulador óptico 70 hacia la unidad de filtro/unidad de ecualización 90. La unidad de filtro/unidad de ecualización 90 atenúa el componente de señal de portadora en un mayor grado que en el que atenúa el componente de señal de banda lateral de modulación o, alternativamente, atenúa el componente de señal de portadora al tiempo que deja pasar el componente de señal de banda lateral de modulación sustancialmente sin atenuar para formar la señal de salida ecualizada S3. La señal de salida S3, que incluye el componente de señal de portadora atenuado y el componente de señal de banda lateral menos atenuado/sustancialmente no atenuado, es transmitida al canal de transmisión óptica 100.

Aunque la unidad de filtro/unidad de ecualización 90 se ha descrito como un filtro de paso de banda, debe entenderse que pueden usarse otros tipos de filtros tales como filtros de paso bajo y filtros de eliminación de banda (por ejemplo filtros de rejilla de Bragg en fibra (FBG, del inglés "Fiber Bragg Grating")).

Otra realización de un dispositivo de transmisión óptica se muestra en la figura 2, y es designada por el número de referencia 110. El dispositivo 110 es similar al dispositivo 10 de la figura 1 con la excepción de que, en vez de que la unidad de filtro/unidad de ecualización 90 esté acoplada directamente al canal de transmisión óptica 100, el dispositivo 110 incluye un amplificador óptico 120 acoplado a la unidad de filtro/unidad de ecualización 90 mediante un enlace óptico 38 y acoplado al canal de transmisión óptica 100 mediante un enlace óptico 40. Los enlaces ópticos 38, 40 pueden ser fibras ópticas u otras conexiones ópticas tales como, por ejemplo, guías de ondas ópticas o conexiones ópticas de espacio libre.

El amplificador óptico 120 puede ser un amplificador de guía de ondas dopada con erbio (EDFA, del inglés “Erbium-Doped Fiber Amplifier”), por ejemplo, tal como los modelos PureGain PG1000 o PureGain PG1600 de Oclaro, fabricados por la compañía Oclaro, Incorporated. Sin embargo, pueden usarse otros tipos de amplificadores. El amplificador óptico 120 está configurado para amplificar la señal de salida ecualizada S3 procedente de la unidad de filtro/unidad de ecualización 90 y transmitir una señal de salida ecualizada y amplificada S4 al canal de transmisión óptica 100. Al transmitir la señal de salida ecualizada y amplificada S4, el dispositivo 110 proporciona relaciones señal-ruido (SNR) incrementadas y permite un rango de transmisión por fibra e inalámbrico más largo, en que el uso de formatos de modulación de señales con eficiencia espectral más alta (por ejemplo QPSK) lleva a velocidades de bits más altas en comparación con la realización de la figura 1.

De acuerdo con una variación de la realización de la figura 2, el amplificador óptico 120 puede ser configurado para proporcionar una ganancia óptica más alta al componente de señal de banda lateral de la señal S3 en comparación con la ganancia óptica proporcionada al componente de señal de portadora de la señal S3. Por ejemplo, el amplificador óptico 120 puede incluir un componente que proporciona una ganancia óptica dependiente de la longitud de onda o pérdida óptica dependiente de la longitud de onda. En una variación así, el amplificador óptico 120 también realiza la función de un filtro óptico, y la unidad de filtro/unidad de ecualización 90 puede ser por lo tanto eliminada.

Otra realización de un dispositivo de transmisión óptica se muestra en la figura 3, y está designada por el número de referencia 130. El dispositivo 130 es similar al dispositivo 10 de la figura 1, excepto que el dispositivo 130 incluye una unidad de filtro/unidad de ecualización 140 en vez de la unidad de filtro/unidad de ecualización 90. La unidad de filtro/unidad de ecualización 140 está acoplada al circulador óptico 70 mediante un enlace óptico 42 y está acoplada al canal de transmisión óptica 100 mediante un enlace óptico 48. La unidad de filtro/unidad de ecualización 140 incluye un primer filtro óptico de tres puertos 150, un segundo filtro óptico de tres puertos 160 y un atenuador óptico variable 170. Los filtros ópticos de tres puertos 150, 160 pueden ser el modelo DWS-1 Fxxx3L20 de JDSU, fabricado por la compañía JDS Uniphase Corporation, por ejemplo. El atenuador óptico variable 170 puede ser el modelo MVOA-A2SS0-M100-MFA de JDSU, fabricado por la compañía JDS Uniphase Corporation, por ejemplo. Sin embargo, pueden usarse otros tipos de filtros y atenuadores.

El primer filtro óptico de tres puertos 150 incluye un primer puerto 152 acoplado al circulador óptico 70 mediante el enlace óptico 42, un segundo puerto 154 acoplado al segundo filtro óptico de tres puertos 160 mediante el enlace óptico 44, y un tercer puerto 156 acoplado al atenuador óptico variable 170 mediante un enlace óptico 46. El segundo filtro óptico de tres puertos 160 incluye un primer puerto 162 acoplado al segundo puerto 154 del primer filtro óptico de tres puertos 150 mediante el enlace óptico 44, un segundo puerto 164 acoplado al atenuador óptico variable 170 mediante un enlace óptico 47, y un tercer puerto 166 acoplado al canal de transmisión óptica 100 mediante el enlace óptico 48. Los enlaces ópticos 42, 44, 46, 47, 48 pueden ser fibras ópticas u otras conexiones ópticas tales como, por ejemplo, guías de ondas ópticas o conexiones ópticas de espacio libre.

El primer filtro óptico de tres puertos 150 está configurado para recibir la señal S2 procedente del láser esclavo 80 a través del primer puerto 152 y separar el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora S_{2c} de la señal S2 uno de otro sobre la base de la diferencia en longitud de onda entre el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora S_{2c} . El primer filtro óptico de tres puertos 150 está configurado para proporcionar de salida el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora S_{2c} procedentes de sus puertos segundo y tercero 154, 156, respectivamente, con una atenuación mínima de los componentes S_{2s} , S_{2c} . El atenuador óptico variable 170 está configurado para atenuar el componente de señal de portadora S_{2c} para formar un componente de señal de portadora atenuado S_{2c}' y proporcionar de salida el componente de señal de portadora atenuado S_{2c}' . El segundo filtro óptico de tres puertos 160 está configurado para recibir el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora atenuado S_{2c}' a través de los puertos primero y segundo 162, 164, respectivamente, y combinar el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora en una única señal de salida ecualizada S3. El segundo filtro óptico de tres puertos 160 está configurado para proporcionar de salida la señal S3 a través del tercer puerto 166 al enlace óptico 48.

Durante la operación del dispositivo 130, el primer filtro óptico 150 recibe la señal S2 y filtra la señal S2 de modo que el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora S_{2c} son separados uno de otro en el filtro 150 con poca o ninguna atenuación de ambos componentes S_{2s} , S_{2c} . El primer filtro óptico 150 proporciona entonces de salida el componente de señal de banda lateral S_{2s} al segundo filtro óptico de tres puertos 160 y proporciona de salida el componente de señal de portadora S_{2c} al atenuador óptico variable 170. El atenuador óptico variable 170 atenúa entonces el componente de señal de portadora S_{2c} para formar el componente de señal de portadora atenuado S_{2c}' y proporciona de salida el componente de señal de portadora atenuado S_{2c}' al segundo filtro óptico de tres puertos 160. El segundo filtro óptico de tres puertos 160 combina entonces el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora atenuado S_{2c}' para formar la señal de salida ecualizada S3 y proporciona de salida la señal S3 al canal de transmisión óptica 100 a través del enlace óptico 48. La cantidad de atenuación realizada por el atenuador óptico variable 170 puede ser variada sobre la base de la

relación deseada de potencia de componente de señal de portadora a potencia de componente de señal de banda lateral en la señal S3.

De acuerdo con una variación de la realización de la figura 3, el segundo filtro óptico de tres puertos 160 puede ser sustituido por un acoplador de potencia óptica de tres puertos configurado para recibir el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora atenuado S_{2c}' procedentes del primer filtro óptico de tres puertos 150 y del atenuador óptico variable 170, respectivamente, y combinar el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora atenuado S_{2c}' para formar la señal de salida ecualizada S3. Un ejemplo de un acoplador de potencia óptica de tres puertos adecuado es el modelo FFCHCKS1AB100 de JDSU fabricado por JDS Uniphase Corporation, por ejemplo.

- 10 Otra realización de un dispositivo de transmisión óptica se muestra en la figura 4, y es designado por el número de referencia 180. El dispositivo 180 incluye un láser maestro 20, una unidad de filtro/unidad de ecualización 190 acoplada al láser maestro 20 mediante un enlace óptico 50, y un láser esclavo 80 acoplado a la unidad de filtro/unidad de ecualización 190 mediante un enlace óptico 52. La unidad de filtro/unidad de ecualización 190 está acoplada a un canal de transmisión óptica 100 mediante un enlace óptico 54. Los enlaces ópticos 50, 52, 54 pueden ser fibras ópticas u otras conexiones ópticas tales como, por ejemplo, guías de ondas ópticas o conexiones ópticas de espacio libre.

- 15 La unidad de filtro/unidad de ecualización 190 puede ser un filtro óptico de tres puertos que tiene un primer puerto 192 acoplado al láser maestro 20 mediante el enlace óptico 50, un segundo puerto 194 acoplado al láser esclavo 80 mediante el enlace óptico 52, y un tercer puerto 196 acoplado al canal de transmisión óptica 100 mediante el enlace 20 54. El filtro óptico de tres puertos 190 puede ser un filtro de interferencia, tal como el modelo DWS-1Fxxx3L20 de JDSU fabricado por JDS Uniphase Corporation, por ejemplo.

- Como en las realizaciones previas, el láser maestro 20 está configurado para proporcionar de salida una señal S1 que incluye un componente de señal de portadora. El filtro óptico de tres puertos 190 está configurado de modo que luz de la longitud de onda de la señal S1 puede pasar desde el primer puerto 192 al segundo puerto 194 con poca pérdida (atenuación insustancial), y está configurado por lo tanto para encaminar la señal S1 hacia el láser esclavo 80 con poca pérdida. El láser esclavo 80 puede ser por lo tanto enganchado por inyección al láser maestro 20, de modo que el láser esclavo 80 está configurado para proporcionar de salida una señal óptica S2 que tiene un componente de señal de portadora S_{2c} y un componente de señal de banda lateral única S_{2s} . El filtro óptico de tres puertos 190 está configurado de modo que el componente de señal de banda lateral de la señal S_{2s} puede pasar desde el segundo puerto 194 al tercer puerto 196 con poca pérdida, y el componente de señal de portadora S_{2c} puede pasara desde el segundo puerto 194 al tercer puerto 196 con alta pérdida (al menos atenuación parcial) de modo que una gran parte del componente de señal de portadora S_{2c}' es reflejada hacia el láser maestro 20. De este modo, el filtro óptico de tres puertos 190 está configurado para proporcionar de salida una señal de salida ecualizada S3 al canal de transmisión óptica 100 a través del enlace óptico 54 que incluye el componente de señal de banda lateral S_{2s} de la señal S2 y un componente de señal de portadora parcialmente atenuado S_{2c}'' derivado de la señal S2.

- 40 Durante la operación del dispositivo 180, el láser maestro 20 proporciona de salida la señal S1 al filtro óptico de tres puertos 190. El filtro óptico de tres puertos 190 encamina entonces la señal S1 al láser esclavo 80, que, en respuesta, proporciona de salida la señal S2 al filtro óptico de tres puertos 190. El filtro óptico de tres puertos 190 refleja entonces la parte S_{2c}' del componente de señal de portadora hacia el láser maestro 20 a través del primer puerto 192 y proporciona de salida la señal de salida ecualizada S3, que incluye el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora parcialmente atenuado S_{2c}'' , a través del tercer puerto 196. De este modo, puede apreciarse que el filtro óptico de tres puertos 190 realiza las funciones de encaminar las señales S1, S2 y filtrar la señal S2.

- 45 De acuerdo con una variación de la realización de la figura 4, el filtro óptico de tres puertos 190 puede ser configurado para absorber, antes que reflejar, la parte S_{2c}' del componente de señal de portadora S_{2c} .

- Otra realización de un dispositivo de transmisión óptica se muestra en la figura 5, y es designada por el número de referencia 200. El dispositivo 200 es similar al dispositivo 180 de la figura 4, excepto que el dispositivo 200 incluye un aislador óptico 210 dispuesto en el camino entre el láser maestro 20 y el filtro óptico de tres puertos 190 para proteger el láser maestro 20 de la parte reflejada del componente de señal de portadora S_{2c}' . Específicamente, el aislador óptico 210 puede ser acoplado al láser maestro 20 mediante un enlace óptico 56 y acoplado al primer puerto 192 del filtro óptico de tres puertos 190 mediante un enlace óptico 58. Los enlaces ópticos 56, 58 pueden ser fibras ópticas u otras conexiones ópticas tales como, por ejemplo, guías de ondas ópticas o conexiones ópticas de espacio libre. Alternativamente, el aislador óptico 210 puede estar conformado de forma integrada con el láser maestro 20.

El aislador óptico 210 está configurado para absorber el componente de señal de portadora S_{2c} que viaja hacia atrás para evitar que la parte reflejada del componente de señal de portadora S_{2c}' interfiera con la operación del

láser maestro 20 o incluso lo dañe. El aislador óptico 210 puede ser el modelo KISO-S-A-250S-1550-NN de Photop fabricado por Photop Technologies, Incorporated, por ejemplo.

Otra realización de un dispositivo de transmisión óptica se muestra en la figura 6, y es designada por el número de referencia 220. El dispositivo de transmisión óptica 220, de forma similar a la realización de la figura 1, incluye un láser maestro 20, un circulador óptico 70 acoplado al láser maestro 20 mediante un enlace óptico 30, y un primer láser esclavo 80 acoplado al circulador óptico 70 mediante un enlace óptico 32. El dispositivo 220 incluye una unidad de filtro/unidad de ecualización 230 acoplada al primer circulador óptico 70 mediante un enlace óptico 60, un segundo circulador óptico 260 que incluye un primer puerto 262, un segundo puerto 264 y un tercer puerto 266, y está acoplado a la unidad de filtro/unidad de ecualización 230 mediante enlaces ópticos 62, 64, y un segundo láser esclavo 270 acoplado al segundo circulador óptico 260 mediante un enlace óptico 63. La unidad de filtro/unidad de ecualización 230 está acoplada a un primer canal de transmisión óptica 100 mediante un enlace óptico 61 y a un segundo canal de transmisión óptica 280 mediante un enlace óptico 66. Los enlaces ópticos 60, 61, 62, 63, 64, 66 pueden ser fibras ópticas u otras conexiones ópticas tales como, por ejemplo, guías de ondas ópticas o conexiones ópticas de espacio libre.

La unidad de filtro/unidad de ecualización 230 incluye un primer filtro óptico de tres puertos 240 que tiene un primer puerto 242 acoplado al tercer puerto 76 del primer circulador óptico 70 mediante el enlace óptico 60, un segundo puerto 244 acoplado al primer canal de transmisión óptica 100 mediante el enlace óptico 61, y un tercer puerto 246 acoplado al primer puerto 262 del segundo circulador óptico 260 mediante el enlace óptico 62. La unidad de filtro/unidad de ecualización 230 también incluye un segundo filtro óptico de tres puertos 250 que tiene un primer puerto 252 acoplado al tercer puerto 266 del segundo circulador óptico, un segundo puerto 254 acoplado al segundo canal de transmisión óptica 280 mediante el enlace óptico 66 y un tercer puerto 256 opcionalmente conectado a un dispositivo o componente adicional, tal como otro filtro o circulador (no mostrado). Los filtros ópticos de tres puertos 240, 250 son similares al filtro óptico de tres puertos 150 empleado en la realización de la figura 3.

El láser maestro 20 está configurado para proporcionar de salida una señal óptica maestra S1 y el primer láser esclavo 80 puede ser enganchado por inyección al láser maestro 20, de modo que el primer láser esclavo 80 está configurado para proporcionar de salida una señal óptica S2. El láser esclavo 80 está modulado por un primer flujo de datos D1 de modo que la señal S2 tiene un componente de señal de portadora S2_C y un componente de señal de banda lateral única S2_S que incluye datos procedentes del primer flujo de datos D1. El primer flujo de datos D1 puede incluir datos con modulación ASK, datos con modulación QPSK, o datos con modulación OFDM, por ejemplo.

El primer filtro óptico de tres puertos 240 está configurado para recibir la señal S2 procedente del primer láser esclavo 80 a través del primer puerto 242 y separar el componente de señal de banda lateral S2_S y el componente de señal de portadora S2_C de la señal S2 uno de otro sobre la base de la diferencia en longitud de onda entre el componente de señal de banda lateral S2_S y el componente de señal de portadora S2_C. El primer filtro óptico de tres puertos 240 está configurado para proporcionar de salida el componente de señal de banda lateral S2_S y el componente de señal de portadora S2_C procedentes de sus puertos segundo y tercero 244, 246, respectivamente, con atenuación mínima de los componentes S2_S, S2_C. El componente de señal de banda lateral S2_S es transmitido al primer canal de transmisión óptica 100 a través del enlace óptico 61.

El segundo circulador óptico 260 está configurado para encaminar el componente de señal de portadora S2_C al segundo láser esclavo 270, y el segundo láser esclavo 270 puede por lo tanto ser también enganchado por inyección al láser maestro 20. El segundo láser esclavo 270 es modulado con datos por un segundo flujo de datos D2 de modo que el segundo láser esclavo 270 proporciona de salida una señal S3 que tiene un componente de señal de portadora S3_C y un componente de señal de banda lateral única S3_S que incluye datos procedentes del segundo flujo de datos D2. El segundo flujo de datos D2 puede incluir datos con modulación ASK, datos con modulación QPSK, o datos con modulación OFDM, por ejemplo.

El segundo circulador óptico 260 está configurado para encaminar la señal S3 al segundo filtro óptico de tres puertos 250. El segundo filtro óptico de tres puertos 250 está configurado para recibir la señal S3 procedente del segundo láser esclavo 270 a través del primer puerto 252 y separar el componente de señal de banda lateral S3_S y el componente de señal de portadora S3_C de la señal S3 uno de otro sobre la base de la diferencia en longitud de onda entre el componente de señal de banda lateral S3_S y el componente de señal de portadora S3_C. El segundo filtro óptico de tres puertos 250 está configurado para proporcionar de salida el componente de señal de banda lateral S3_S y el componente de señal de portadora S3_C desde sus puertos segundo y tercero 254, 256, respectivamente, con atenuación mínima de los componentes S3_S, S3_C. El componente de señal de banda lateral S3_S es transmitido al segundo canal de transmisión óptica 280 a través del enlace óptico 66. El componente de señal de portadora S3_C puede ser transmitido opcionalmente a componentes o dispositivos adicionales (no mostrados) a través del enlace óptico 68.

En operación, el láser maestro 20 proporciona de salida la señal S1, que es encaminada a través del primer circulador óptico 70 al primer láser esclavo 80. En respuesta a la señal S1, el primer láser esclavo 80 proporciona de salida la señal S2, que es encaminada a través del primer circulador óptico 70 al primer filtro óptico de tres puertos

240. El primer filtro óptico de tres puertos 240 separa el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora S_{2c} de la señal S_2 uno de otro sobre la base de la diferencia en longitud de onda entre el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora S_{2c} , y proporciona de salida el componente de señal de banda lateral S_{2s} y el componente de señal de portadora S_{2c} desde sus puertos segundo y tercero 244, 246, respectivamente. Hay una atenuación mínima de los componentes S_{2s} , S_{2c} en el filtro 240. El componente de señal de banda lateral S_{2s} es transmitido al primer canal de transmisión óptica 100 a través del enlace óptico 61, y el componente de señal de portadora S_{2c} es transmitido al segundo circulador óptico 260. El segundo circulador óptico 260 encamina el componente de señal de portadora S_{2c} al segundo láser esclavo 270, y el segundo láser esclavo 270 es por lo tanto enganchado por inyección al láser maestro 20. En respuesta al componente de señal de portadora S_{2c} , el segundo láser esclavo 270 proporciona de salida la señal S_3 . El segundo circulador óptico 260 encamina la señal S_3 procedente del segundo láser esclavo 270 hacia el segundo filtro óptico de tres puertos 250, que separa el componente de señal de banda lateral S_{3s} y el componente de señal de portadora S_{3c} de la señal S_3 uno de otro sobre la base de la diferencia en longitud de onda entre el componente de señal de banda lateral S_{3s} y el componente de señal de portadora S_{3c} . El segundo filtro óptico de tres puertos 250 proporciona entonces de salida el componente de señal de banda lateral S_{3s} y el componente de señal de portadora S_{3c} desde sus puertos segundo y tercero 254, 256, respectivamente. Hay una atenuación mínima de los componentes S_{3s} , S_{3c} en el filtro 250. El componente de señal de banda lateral S_{3s} es transmitido al segundo canal de transmisión óptica 280 a través del enlace óptico 66, y el componente de señal de portadora S_{2c} es transmitido opcionalmente a otros componentes o dispositivos a través del enlace óptico 68.

Puede apreciarse que la realización de la figura 6 permite que múltiples láseres esclavos sean enganchados por inyección a un único láser maestro y hace uso de potencia óptica que en otro caso se perdería. Específicamente, la potencia de portadora óptica emitida por el primer láser esclavo 80 es usada como potencia maestra para el segundo láser esclavo 270. A diferencia de dispositivos convencionales que incluye dos láseres esclavos enganchados por inyección a un láser maestro a través de un divisor, la potencia del láser maestro 20 en la realización de la figura 6 no tiene que ser dos veces la potencia necesaria para engancher por inyección un único láser esclavo.

Otra realización de un dispositivo de transmisión óptica se muestra en la figura 7, y es designada por el número de referencia 290. El dispositivo 290 es similar al dispositivo 130 de la figura 3, con la excepción de que un amplificador óptico de ganancia variable 300 está situado entre los filtros ópticos de tres puertos primero y segundo 150, 160, y el atenuador óptico variable 170 está eliminado. Un ejemplo de un amplificador óptico de ganancia variable adecuado es el modelo PureGain PG2800 de Oclaro fabricado por Oclaro Incorporated, por ejemplo. Específicamente, en esta realización, el amplificador óptico 300 está acoplado al segundo puerto 154 del primer filtro óptico de tres puertos 150 mediante un enlace óptico 43 (por ejemplo, fibra óptica, guía de ondas óptica o conexión de espacio libre) y está acoplado al primer puerto 162 del segundo filtro óptico de tres puertos 160 mediante un enlace óptico 45 (por ejemplo, fibra óptica, guía de ondas óptica o conexión de espacio libre). El tercer puerto 156 del primer filtro óptico de tres puertos 150 está acoplado al segundo puerto 164 del segundo filtro óptico de tres puertos o acoplador de potencia óptica 160 mediante un enlace óptico 49 (por ejemplo, fibra óptica, guía de ondas óptica o conexión de espacio libre).

El amplificador óptico 300 está configurado para amplificar el componente de señal de banda lateral S_{2s} para formar un componente de señal de banda lateral amplificado S_{2s}' y proporcionar de salida el componente de señal de banda lateral amplificado S_{2s}' al segundo filtro óptico de tres puertos 160. La cantidad de amplificación puede ser ajustada como se desee. El primer filtro óptico de tres puertos 150 está configurado para proporcionar de salida el componente de señal de portadora S_{2c} al segundo filtro óptico de tres puertos 160. El segundo filtro óptico de tres puertos o acoplador de potencia óptica 160 está configurado para combinar el componente de señal de banda lateral amplificado S_{2s}' y el componente de señal de portadora S_{2c} para formar una señal de salida ecualizada S_3 , y proporcionar de salida la señal S_3 al canal de de transmisión óptica 100. De este modo, el dispositivo 290 proporciona otra forma para usar los filtros ópticos de tres puertos para separar, ecualizar y recombinar los componentes de señal de portadora y de banda lateral en una señal óptica.

Diversas realizaciones serán aclaradas adicionalmente por los ejemplos siguientes.

50 EJEMPLOS

Ejemplo 1. (Transmisor convencional sin ecualización de salida de láser VCSEL)

Un montaje experimental de un sistema de transmisión RoF de láser VCSEL de enganche OIL convencional fue construido como se muestra en la figura 8. En este montaje, una unidad de cabecera o HEU (del inglés "Head-End Unit") 500 fue acoplada a una unidad de antena lejana o RAU (del inglés "Remote Antenna Unit") 510 mediante fibra óptica 520. La unidad HEU 500 consta de un generador de patrones de impulsos PPG (del inglés "Pulse Pattern Generator"), un filtro de paso bajo (LPF, del inglés "Low Pass Filter"), una T de polarización (electrónica) (B-T, del inglés "Bias T"), un láser VCSEL esclavo, un láser maestro de alta potencia, y un convertidor ascendente eléctrico de 60 GHz de un paso y hecho a medida. La unidad de antena lejana 510 incluyó un convertidor óptico-eléctrico O/E,

un amplificador de ruido bajo LNA (del inglés “Low Noise Amplifier”) y un filtro de paso de banda BPF (del inglés “BandPass Filter”). La señal procedente de la unidad de antena lejana 510 fue convertida en sentido descendente a banda base por un convertidor descendente de 60 GHz de un paso, y fue introducida en un medidor de tasa de error en bits (BERT, del inglés “Bit Error Rate Tester”) 560. El láser VCSEL fue un láser VCSEL monomodo de unión de túnel sepultada (BTJ) de 1540 nm con una potencia de salida máxima de ~ 3 mW, y $\sim 70\%$ de eficiencia de acoplamiento a una fibra con lentes. El láser maestro (ML, del inglés “Master Laser”) fue un láser de retroalimentación distribuida (DFB, del inglés “Distributed FeedBack”) de alta potencia, que se hizo funcionar en modo de onda continua (CW). El láser VCSEL fue enganchado por inyección mediante acoplamiento de una señal óptica de 40,7 mW procedente del láser ML de alta potencia al láser VCSEL a través del circulador como se muestra. Un controlador de polarización (óptica) fue usado para maximizar la eficiencia de tasa de inyección haciendo coincidir la polarización (óptica) del láser ML con la del láser VCSEL. La corriente de polarización (electrónica) del láser VCSEL que emite ~ 1 mW de potencia óptica fue establecida en 4,7 mA. El láser ML fue polarizado (electrónicamente) a 218,9 mA con una potencia de salida de 40,7 mW con el fin de conseguir una respuesta en frecuencia (plana) a 61 GHz como se muestra en la figura 9, que ilustra una mejora de ancho de banda de modulación de láser VCSEL a través de enganche óptico por inyección.

Para investigar las características de la modulación SSB bajo diferentes frecuencias de señal, una señal RF no modulada (CW) fue aplicada al láser VCSEL bajo enganche OIL. La frecuencia de señal fue variada de 5 GHz a 65 GHz y la señal óptica modulada fue observada en un analizador de espectros ópticos (OSA, del inglés “Optical Spectrum Analyzer”). La figura 10 muestra los espectros ópticos procedentes del transmisor de enganche OIL modulado con portadoras RF de tono único (no moduladas) a frecuencias RF seleccionadas observados con la resolución del analizador OSA establecida en 0,02 nm. Puede verse que a frecuencias de modulación menores las dos bandas laterales de modulación estaban más cercanas en intensidad que a frecuencias mayores. Por ejemplo, a 15 GHz la diferencia de potencia entre la banda lateral superior (USB, del inglés “Upper SideBand”) y la banda lateral inferior (LSB, del inglés “Lower SideBand”) fue de sólo 4,3 dB. Esta diferencia de potencia creció a 10,7 a la frecuencia de modulación RF de 30 GHz. A 60 GHz la diferencia de potencia fue incluso mayor con 21,4 dB – con la banda LSB que experimentaba una amplificación significativa estando cercana al modo de cavidad del láser VCSEL, y la banda USB siendo atenuada como se muestra.

Para examinar el impacto de la dispersión cromática de fibra sobre el desvanecimiento de la señal RF, la función de transferencia de la fibra monomodo estándar a diversas longitudes fue medida con un analizador de componentes de ondas de luz. La potencia de lanzamiento de la fibra fue mantenida constante a +5,2 dBm en todos los casos, para asegurar que la dispersión estimulada de Brillouin (SBS, del inglés “Stimulated Brillouin Scattering”) no afectara a los resultados. Los resultados se muestran en la figura 11, en que las respuestas de las diversas longitudes de fibra están normalizadas a la respuesta en frecuencia en condiciones de adosamiento (B2B, del inglés “Back-to-Back”). Se observaron cambios de amplitud de señal mucho mayores a frecuencias menores que a frecuencias mayores. Por ejemplo, con la transmisión por fibra de 20 km, el cambio de amplitud de señal fue de 19,1 dB entre 5 y 18 GHz, mientras que fue de sólo 1,3 dB en torno a 60 GHz. Los cambios de amplitud de señal fueron causados por bandas laterales de modulación que se interfieren debido a sus variaciones de fase relativas causadas por la dispersión cromática de la fibra. Este resultado implica que el desvanecimiento inducido por dispersión en un sistema RoF de modulación de intensidad y detección directa (IMDD, del inglés “Intensity Modulation Direct-Detection”) que emplea un láser VCSEL de enganche OIL es fuertemente dependiente de la frecuencia. Como la dispersión cromática es esencialmente constante sobre las frecuencias RF consideradas, el desvanecimiento de señal reducido observado a 60 GHz es debido a una modulación SSB fuerte. Este resultado es consistente con el resultado de la figura 10, que muestra que la señal modulada de un láser VCSEL de enganche OIL es esencialmente de modulación DSB (del inglés “Double SideBand”, banda lateral doble) a bajas frecuencias pasando a modulación SSB sólo a frecuencias mayores (de ondas mm). Esto es una importante ventaja de usar enganche OIL para transmitir señales de ondas mm dado que de hecho son afectadas más severamente por el desvanecimiento de señal inducido por dispersión cromática que las señales de baja frecuencia.

La respuesta en frecuencia positiva a menores frecuencias observada en la figura 11 es debida a conversión de modulación de frecuencia a modulación de intensidad (FM-IM, del inglés “Frequency Modulation to Intensity Modulation”) del chirp del láser VCSEL de enganche OIL sobre la fibra dispersiva.

Sistema RoF IMDD a 60 GHz con tolerancia inherente a la dispersión

Usando un sencillo convertidor ascendente eléctrico de un paso, datos de secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS, del inglés “Pseudo Random Binary Sequence”) a banda base fueron convertidos en sentido ascendente directamente a la frecuencia central de 60,5 GHz en un único paso. La longitud del patrón de secuencia PRBS fue $2^{31}-1$. Para simplificar adicionalmente el sistema RoF, ambas bandas laterales de la señal convertida en sentido ascendente fueron devueltas para transmisión. Por lo tanto, la señal de 60,5 GHz transmitida fue modulada por DSB con el ancho de banda de ~ 4 GHz de 3 dB ocupado para la velocidad de datos de banda base de 2 Gbps.

La señal convertida en sentido ascendente fue amplificada por un amplificador de potencia (22 dB) a una potencia RF media de +0,5 dBm y fue introducida en el láser VCSEL a través de una T de polarización (electrónica),

resultando en una modulación de intensidad directa de la señal óptica del láser VCSEL a 60,5 GHz. La señal óptica modulada en intensidad fue entonces transmitida por fibras ópticas monomodo estándar de diversas longitudes a la unidad de antena lejana (RAU). La potencia de lanzamiento de fibra fue ajustada a +10 dBm.

5 En la unidad RAU la señal óptica transmitida fue detectada por un fotodiodo de 70 GHz resultando en la generación de una señal de ondas mm modulada por ASK a 60,5 GHz. La señal generada fue amplificada por un amplificador de ruido bajo (LNA) con una ganancia de alrededor de 38 dB. Tras filtrar en un filtro BPF de 7 GHz, la señal de ondas mm de 60,5 GHz fue convertida en sentido descendente directamente a banda base. Dos amplificadores de potencia de baja frecuencia en cascada (24 dB + 19 dB) amplificaron la señal recuperada previamente al análisis por el detector de error (ED, del inglés "Error Detector").

10 La tasa BER medida para extensiones de fibra de 0 km (B2B), 500 m, 1 km y 10 km se muestra en la figura 12. Se observó que no hay diferencia significativa en la sensibilidad del sistema para todas las extensiones de fibra probadas. Por ejemplo, a una tasa BER de 1×10^{-5} , la diferencia en sensibilidades de potencia óptica para todas las extensiones de fibra fue menor que 0,5 dB. En un sistema RoF modulado por DSB, se produce desvanecimiento severo de señal a 60,5 GHz tras 1 km de transmisión por fibra. Esto resulta en una interferencia entre símbolos (ISI, del inglés "InterSymbol Interference") grave, un diagrama de ojo severamente distorsionado, y una tasa BER muy alta. Por lo tanto, este resultado muestra que el sistema RoF de 60 GHz que emplea un láser VCSEL de enganche OIL para modulación con datos ASK de 2 Gbps sobre fibras monomodo (de diversas longitudes) no sufrió el severo desvanecimiento cromático de fibra inducido por dispersión que limita la máxima distancia de transmisión por fibra de sistemas modulados por DSB a menos de 1 km. Esto se atribuye a la fuerte modulación por SSB inherente presente en transmisores de enganche OIL, como se ha discutido anteriormente.

La figura 12 revela no linealidad en el sistema RoF a potencias ópticas recibidas más altas que exceden de +4 dBm llevando a un suelo de error cercano a la tasa BER de 1×10^{-8} . Sin embargo, como los valores de tasa BER medidos están claramente por debajo del umbral de corrección de errores en destino (FEC, del inglés "Forward Error Correction"), la transmisión libre de errores es posible con corrección FEC. Alternativamente, puede aplicarse una ecualización de alimentación previa (FFE, del inglés "Feed-Forward Equalization") lineal simple a la señal de banda base recuperada para revertir efectos ISI y conseguir una transmisión libre de errores.

Una observación importante a partir de la figura 12 es que la sensibilidad del sistema RoF fue muy pobre. El sistema requirió > 0 dBm de potencia óptica recibida para cumplir con el umbral de corrección FEC (1×10^{-3}). Esto puede explicarse considerando el espectro óptico de la señal óptica transmitida, mostrado en la figura 13. La figura 13 ilustra el espectro óptico de la señal de sistema RoF de enganche OIL transmitida tras modulación directa del láser VCSEL con una señal ASK de 2 Gbps a 60,5 GHz. A partir del espectro óptico, queda claro que la pobre sensibilidad del sistema es debida a la relación de potencia de portadora a banda lateral (CSR, del inglés "Carrier-to-Sideband power Ratio") extremadamente alta. La diferencia en la potencia óptica máxima de portadora a alrededor de 1540 nm y la potencia óptica máxima de banda lateral a alrededor de 1540,5 nm tiene un valor mostrado de 42,6 dB. La elevada relación CSR es causada por la gran potencia del láser ML, que es necesaria para el enganche OIL, y es transmitida conjuntamente con la señal óptica modulada del láser VCSEL. Debido a la pobre sensibilidad del sistema, las distancias máximas de transmisión por fibra de este sistema RoF están limitadas por el umbral de dispersión SBS, que limita la potencia máxima de lanzamiento de fibra en la unidad HEU, y la pérdida en fibra, que limita la potencia recibida. Con este sistema, la transmisión sobre 10 km de fibra fue conseguida limitando la potencia óptica de lanzamiento +10 dBm para evitar la dispersión SBS.

Ejemplo 2. (Transmisor con filtrado de paso de banda/ecualización de la salida de láser VCSEL)

Montaje experimental

Para mejorar la sensibilidad del sistema RoF del ejemplo 1 anterior, fue necesario reducir la elevada relación CSR anteriormente observada. Así fue construido el montaje experimental de la figura 14. El montaje está organizado en general como una unidad de cabecera 600 conectada a una unidad de antena lejana 610 mediante fibra óptica 620, que se comunica con un receptor inalámbrico 650 a 60 GHz. La disposición incluía un generador de patrones de impulsos PPG, un generador de formas de onda arbitrarias AWG (del inglés "Arbitrary Waveform Generator"), un filtro de paso bajo LPF, una T de polarización (electrónica) B-T, un filtro de paso de banda BPF, filtros ópticos de paso de banda OBPF (del inglés "Optical BandPass Filter") 1, OBPF 2 y OBPF 3, amplificadores de guía de ondas dopada con erbio EDFA, un medidor de la tasa de error en bits (BERT) 660, y un analizador vectorial de señales (VSA, del inglés "Vector Signal Analyzer") 670. En este montaje, se usó un filtro sintonizable para reducir la potencia de portadora maestra. Dado que la elevada relación CSR observada anteriormente fue similar en valor a la tasa de contraste de filtros ópticos sintonizables típicos, colocar la banda de paso de un único filtro óptico de paso de banda (OBPF) (ancho de banda BW (del inglés "BandWidth") = 0,25 nm) en torno a la longitud de onda de banda lateral de modulación (de modo que la longitud de onda del láser ML estuviera fuera de la banda de paso del filtro) fue suficiente para ecualizar la relación CSR. Los requisitos de ancho de banda del filtro fueron relajados significativamente por la considerable separación de frecuencia (0,5 nm) entre la longitud de onda del láser ML y la banda lateral del láser VCSEL debido a la alta frecuencia de la portadora de 60 GHz usada. Un preamplificador

EDFA y un amplificador EDFA potenciador fueron usados entonces para potenciar la señal óptica ecualizada, seguido por filtrado de ruido ASE (del inglés “Amplified Spontaneous Emission”, emisión espontánea amplificada) (0,6 nm, y 3 nm), como se muestra en la figura 14. Para realizar la transmisión de señales inalámbrica, la señal que sale del amplificador LNA en la unidad RAU fue introducida en una antena de bocina de ganancia estándar (ganancia = 23 dBi) y radiada al aire. Tras la transmisión inalámbrica sobre 3 m, la señal fue recibida por un receptor inalámbrico a 60 GHz usando otra antena de bocina de ganancia estándar. La señal recibida fue amplificada entonces por un amplificador LNA (ganancia = 22 dB), y filtrada por un filtro de paso de banda (BPF; frecuencia central = 60,5 GHz, ancho de banda = 7 GHz) antes de ser convertida en sentido descendente a banda base, como se muestra en la figura 14.

10 *Impacto del filtro de ecualización*

El impacto del filtro de ecualización en el montaje de la figura 14 se muestra en la figura 15. La figura 15 ilustra el espectro óptico de la señal con ecualización de relación de potencia de portadora a banda lateral con el láser VCSEL de enganche OIL modulado directamente con una señal ASK de 2 Gbps a 60,5 GHz. Como se muestra en la figura 15, la diferencia en la potencia óptica máxima entre la portadora maestra a justamente debajo de 1539,5 nm y la potencia óptica máxima de banda lateral modulada del láser VCSEL a justamente debajo de 1540 nm fue reducida dramáticamente desde 42,6 dB (mostrado en la figura 13) a 1,5 dB. Aunque la definición precisa de la relación CSR es la relación entre las potencias de la portadora óptica y la banda lateral calculada en un ancho de banda especificado en vez de la relación simple entre las potencias máximas, resulta obvio a partir de la figura 15 que la relación CSR estuvo significativamente más cercana a la óptima (~ 0 dB para modulación de portadora única) que en el caso sin filtrado. La respuesta en frecuencia del láser VCSEL de enganche OIL ecualizado con las mismas condiciones de polarización (electrónica) de láser ML y láser VCSEL que las usadas para obtener la figura 9 se muestra en la figura 16. La figura 16 ilustra la respuesta en frecuencia de la relación de potencia de portadora a banda lateral en un sistema RoF ecualizado que emplea modulación directa de láser VCSEL de enganche OIL. Puede verse que, en comparación con el sistema no ecualizado, la respuesta en frecuencia estuvo entonces fuertemente inclinada en favor de las frecuencias más altas. A diferencia del caso no ecualizado, la respuesta en torno a la banda de 60 GHz fue ahora mucho mayor que a las frecuencias más bajas por debajo de 30 GHz. Esto fue debido al filtro BPF óptico de banda estrecha usado, que tendía a atenuar bandas laterales de modulación a las frecuencias de modulación más bajas, dado que el paso de banda del filtro fue sintonizado a la longitud de onda central de la banda lateral modulada del láser VCSEL (es decir optimizado para señales con modulación de 60 GHz). La figura 16 también muestra que el sistema ecualizado tenía una respuesta relativamente plana (dentro de 3 dB) sobre una banda de frecuencia ancha igual a 18 GHz.

La figura 16 también muestra que la nueva respuesta en frecuencia a 60 GHz estuvo ahora dentro de 5 dB de la respuesta en frecuencia del láser VCSEL en operación libre – lo que significa aproximadamente 13 dB de mejora en la respuesta del sistema ecualizado. Esto fue un resultado de la amplificación de ecualización post-CSR, lo que fue hecho posible sólo por la ecualización de la relación CSR. Aparte de mejorar la sensibilidad del sistema, la mayor respuesta en frecuencia también proporcionó el balance de potencia crítico del sistema, que se necesitaba para superar la elevada pérdida en camino a 60 GHz con el fin de realizar una transmisión inalámbrica de señales exitosa. La respuesta en frecuencia significativamente mejorada también resultó en una relación SNR más alta para la señal recibida, haciendo posible usar formatos de modulación más eficientes espectralmente tales como QPSK, que requieren una relación SNR más alta que la modulación ASK.

40 *Resultado para la modulación con datos ASK*

La figura 17 ilustra el espectro eléctrico de una señal ASK PRBS-31 de 3 Gbps convertida en sentido descendente tras la transmisión sobre 20 km de fibra monomodo estándar y 3 m de distancia inalámbrica. El impacto de la ecualización de la relación CSR sobre la sensibilidad del sistema RoF modulado por ASK se muestra en la figura 18. La figura 18 ilustra la mejora en la sensibilidad del receptor en el sistema RoF debido a la ecualización de la relación de potencia de portadora a banda lateral para modulación con datos ASK de 2 Gbps sin transmisión por fibra e inalámbrica. Hay una mejora muy significativa en la sensibilidad del sistema en 18 dB para modulación con datos ASK de 2 Gbps, como se muestra. La sensibilidad mejorada indicó que serían factibles distancias de transmisión por fibra mucho más largas que los 10 km conseguidas en el sistema RoF sin ecualizar. Esto fue confirmado por los resultados de rendimiento en cuanto a tasa BER del sistema RoF con ecualización de la relación CSR mostrados en la figura 19 y la figura 20 para transmisión de datos ASK de 2 Gbps y 3 Gbps, respectivamente. En ambos casos, la distancia de transmisión por fibra de 20 km fue conseguida con muy buenas sensibilidades y penalizaciones de potencia despreciables con respecto al rendimiento del sistema B2B. Con referencia a la figura 19, para modulación (PRBS -31) con datos ASK de 2 Gbps y distancia de transmisión por fibra de 20 km, las sensibilidades fueron de -14,0 dBm y -10,5 dBm para las tasas BER de 1×10^{-4} y 1×10^{-8} , respectivamente. Con referencia a la figura 20, para 3 Gbps, las sensibilidades correspondientes fueron de -13,0 dBm y -9,5 dBm, respectivamente. Por lo tanto, la diferencia en las sensibilidades de sistema para las dos velocidades de datos fue de 1 dB. La figura 19 y la figura 20 muestran cierto suelo de error, pero a tasas BER mucho menores cercanas a la transmisión sin errores (1×10^{-9}). En ambos casos, la fluctuación en sensibilidad para las diferentes distancias de transmisión por fibra fue menor de 0,5 dB, que fue atribuida a la interacción entre chirp de señal y dispersión de fibra. Los diagramas de ojo de los datos

ASK recibidos antes y después de la transmisión sobre 20 km de fibra monomodo estándar y 3 m de distancia inalámbrica se muestran en la figura 21. Claramente, se observaron diagramas de ojo abiertos después de 20 km de transmisión por fibra como se muestra en la figura 21.

Resultados para modulación con datos QPSK

- 5 Para probar el rendimiento del sistema RoF de enganche OIL con ecualización de la relación CSR, con formatos de modulación multi-nivel, el generador PPG de la figura 14 fue sustituido por un generador de formas de onda arbitrarias (AWG), que se usó para generar señales QPSK de banda ancha. Después de la transmisión sobre fibra y una distancia inalámbrica de 3 m, la señal recuperada fue analizada por un analizador vectorial de señales. La figura 22 muestra el espectro de la señal QPSK de 2 Gbps recuperada (PRBS-9) modulada sobre una sub-portadora de 1,5 GHz. La potencia óptica recibida fue de -8 dBm con la magnitud de vector de error (EVM, del inglés "Error Vector Magnitude") y la relación SNR correspondientes iguales a 15,0% y 16,4 dB, respectivamente. La pequeña bajada (~ 2 dB) observada en el centro del espectro viene de la respuesta en frecuencia del enlace RoF de extremo a extremo. Debido al espectro ancho de la señal transmitida (~ 1 GHz), se usó modulación/demodulación DSB en los convertidores ascendente/descendente de 60 GHz. Usar modulación SSB en los convertidores ascendente/descendente eléctricos resultaría en un espectro menos aplanado, y, consecuentemente interferencia ISI, lo que requeriría ecualización (por ejemplo FFE) para conseguir un buen rendimiento de sistema.

- Los resultados de medición para experimentos de transmisión por fibra se resumen en la figura 23, que ilustra el rendimiento en cuanto a relación SNR medida del sistema RoF de 60 GHz modulado con datos QPSK de 2 Gbps tras la transmisión sobre una distancia de hasta 20 km de fibra monomodo estándar y de 3 m inalámbrica. Como fue el caso en los experimentos con modulación ASK, no se observó ninguna penalización por dispersión para datos modulados por QPSK sobre distancias de transmisión por fibra de hasta 20 km (incluyendo la distancia inalámbrica de 3 m), como se muestra. Esto fue debido a la modulación SSB óptica empleada, que en el caso de ecualización de la relación CSR fue auxiliada por el filtrado. Se obtuvieron diagramas de constelación muy claros como se muestra en la figura 24. Los diagramas de constelación son de señal QPSK de 2 Gbps recuperada del sistema RoF tras la transmisión sobre una distancia de 20 km de fibra monomodo estándar y de 3 m inalámbrica. La magnitud EVM fue de 27% y 15% a -15 dBm (arriba) y -8 dBm (abajo) de potencia óptica recibida, respectivamente.

- Como se muestra en la figura 23, la sensibilidad del sistema modulado por QPSK de 2 Gbps para la tasa BER de 1×10^{-3} correspondiente a una relación SNR de 10 dB fue menor de -15 dBm. Ésta es similar a la sensibilidad del sistema modulado por ASK para la misma velocidad de datos. Cuando se usó una menor velocidad de datos de 1 Gbps, la relación SNR medida fue mucho más alta (es decir 20,7 dB para una potencia óptica recibida de -10,0 dBm, y 20 km de transmisión por fibra) y la sensibilidad fue mucho mayor. Estos resultados para transmisión con modulación QPSK fueron hechos posibles por la eficiencia de enlace mejorada debido a la ecualización de la relación CSR empleada. Estos resultados demuestran que el sistema RoF con ecualización de la relación CSR puede soportar longitudes de fibra mucho más largas de 20 km y velocidades de datos mucho más altas a través del uso de formatos de modulación de orden mucho mayor tales como 8-QAM (del inglés "Quadrature Amplitude Modulation", modulación de amplitud en cuadratura), y 16-QAM, que son más eficientes espectralmente que los formatos de modulación ASK y QPSK.

- Los dispositivos y métodos presentados aquí son ventajosos en el sentido de que permiten que la relación de potencia óptica entre el componente de señal de portadora y el componente de señal de banda lateral sea ajustada independientemente de la tasa de inyección (relación de la potencia óptica del láser maestro a la potencia óptica del láser esclavo). Como resultado de ello, la relación de potencia óptica entre el componente de señal de portadora y el componente de señal de banda lateral puede ser optimizada al tiempo que se mantiene también una tasa de inyección optimizada. Además, los dispositivos y métodos proporcionan una eficiencia de enlace óptico más alta proporcionando una potencia RF recibida más alta, lo que permite una potencia inalámbrica transmitida más alta para una potencia óptica transmitida dada. También se permiten velocidades de bits más altas debido a que ecualizar la relación de potencia óptica entre el componente de señal de portadora y el componente de señal de banda lateral resulta en una relación SNR más alta, que hace posible emplear formatos de modulación complejos espectralmente eficientes (por ejemplo, QPSK, modulación de amplitud en cuadratura (xQAM), multiplexación por división en frecuencias ópticas (OFDM)). Adicionalmente, reduciendo la potencia del componente de señal de portadora mediante filtrado, los dispositivos reducen significativamente la potencia lanzada hacia el canal de transmisión hasta claramente por debajo del umbral de dispersión estimulada de Brillouin (SBS) de extensiones largas de fibra. Además, atenuando el componente de señal de portadora, es posible usar amplificadores para extender el alcance del enlace óptico entre el dispositivo y componentes que reciben transmisiones del dispositivo. Distancias de transmisión inalámbrica más largas son también posibles debido a la combinación de alta eficiencia de enlace, alta potencia RF generada y alta relación SNR de señal RF.

Los dispositivos y métodos presentados aquí también proporcionan una solución de bajo coste, baja complejidad y fiable para obtener los beneficios anteriores. Por ejemplo, en las realizaciones de las figuras 1 y 2, el filtro de paso de banda es barato y menos sensible a condiciones ambientales, tales como temperatura, en comparación con los filtros de muesca (por ejemplo filtros de rejilla de Bragg en fibra (FBG)) y otros filtros de banda estrecha

habitualmente usados en dispositivos de transmisión óptica convencionales. En las realizaciones de las figuras 4 y 5, el coste y la complejidad son reducidos empleando un único elemento óptico para realizar las funciones de encaminar las señales ópticas y optimizar la relación de potencia óptica entre el componente de señal de portadora y el componente de señal de banda lateral. La realización de la figura 6 reduce el coste de un sistema que emplea múltiples transmisores usando un único láser maestro para enganchar múltiples láseres esclavos sin tener que dividir la potencia procedente del láser maestro.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo de transmisión óptica que comprende:

un láser maestro (20) configurado para generar una señal maestra (S1);

5 un láser de cavidad vertical y emisión en superficie (VCSEL) (80; 270) configurado para enganche óptico por inyección al láser maestro (20), y configurado para generar una señal de salida de láser VCSEL que comprende un componente de portadora y un componente de banda lateral modulado; y caracterizado por

una unidad de ecualización (90; 140; 190; 230) configurada para recibir la señal de salida del láser VCSEL y proporcionar una señal de salida ecualizada que tiene una relación reducida de potencia de componente de portadora a potencia de componente de banda lateral modulado en comparación con la señal de salida del láser VCSEL.

2. El dispositivo de transmisión óptica según la reivindicación 1, en que:

la unidad de ecualización (90; 140; 190; 230) comprende un filtro óptico (140, 160; 240, 250) configurado para atenuar el primer componente de portadora para proporcionar de salida la señal de salida ecualizada, en que el filtro óptico (140, 160; 240, 250) comprende un filtro de paso de banda, un filtro de paso bajo o un filtro de eliminación de banda; y

el dispositivo de transmisión óptica comprende un circulador óptico (70; 260) acoplado al láser maestro (20) y al láser VCSEL (80; 270), en que el circulador óptico (70; 260) está configurado para encaminar la señal maestra hacia el láser VCSEL (80; 270) y encaminar la señal de salida del láser VCSEL hacia el filtro óptico (140, 160; 240, 250).

3. El dispositivo de transmisión óptica según las reivindicaciones 1-2, que comprende un amplificador óptico (120; 300) configurado para amplificar la señal de salida ecualizada.

4. El dispositivo de transmisión óptica según la reivindicación 1, en que:

la unidad de ecualización (140; 190; 230) comprende un primer filtro óptico de tres puertos (150; 240), en que el primer filtro óptico de tres puertos (150; 240) está configurado para

25 recibir la señal de salida de láser VCSEL procedente del láser VCSEL (80; 270),

separar el componente de portadora y el componente de banda lateral modulado, y

transmitir separadamente el componente de portadora y el componente de banda lateral modulado; y

el dispositivo de transmisión óptica comprende un primer circulador óptico (70; 260) configurado para encaminar la señal maestra hacia el primer láser VCSEL (80) y encaminar la señal de salida del láser VCSEL hacia el primer filtro óptico de tres puertos (150; 240).

5. El dispositivo de transmisión óptica según la reivindicación 4, en que la unidad de ecualización (140) comprende:

un atenuador óptico variable (170) configurado para recibir el componente de portadora procedente del primer filtro óptico de tres puertos (70) y atenuar el componente de portadora para formar un componente de portadora atenuado; y

35 un segundo filtro óptico de tres puertos (160) o un acoplador de potencia óptica de tres puertos, en que el segundo filtro óptico de tres puertos (160) o el acoplador de potencia óptica de tres puertos está configurado para combinar el componente de portadora atenuado y el componente de banda lateral modulado para proporcionar de salida la señal de salida ecualizada.

6. El dispositivo de transmisión óptica según la reivindicación 4, en que la unidad de ecualización (140) comprende:

40 un amplificador óptico configurado para recibir el componente de banda lateral modulado procedente del primer filtro óptico de tres puertos (150) y amplificar el componente de banda lateral modulado para formar un componente de banda lateral amplificado; y

un segundo filtro óptico de tres puertos (160) o un acoplador de potencia óptica de tres puertos, en que el segundo filtro óptico de tres puertos (160) o el acoplador de potencia óptica de tres puertos está configurado para combinar el componente de portadora y el componente de banda lateral amplificado para proporcionar de salida la señal de salida ecualizada.

7. El dispositivo de transmisión óptica según la reivindicación 1, en que la unidad de ecualización (140; 190; 230) comprende un filtro óptico de tres puertos (150; 240) configurado para:
- recibir la señal maestra;
 - encaminar la señal maestra hacia el láser VCSEL (80; 270);
- 5 recibir la señal de salida de láser VCSEL procedente del láser VCSEL (80; 270);
reflejar o absorber una primera parte del componente de portadora; y
proporcionar de salida el componente de banda lateral modulado y una segunda parte del componente de portadora para formar la señal de salida ecualizada.
8. El dispositivo de transmisión óptica según la reivindicación 7, que comprende un aislador óptico (210) configurado para:
- 10 recibir la señal maestra procedente del láser maestro (20);
transmitir la señal maestra al filtro óptico de tres puertos (190); y
absorber la primera parte del componente de portadora.
9. El dispositivo de transmisión óptica según la reivindicación 1, en que la unidad de ecualización (90) comprende un amplificador óptico (120; 300) configurado para proporcionar una ganancia óptica dependiente de la longitud de onda o una pérdida óptica dependiente de la longitud de onda, y en que el amplificador (90, 300) está configurado para recibir la señal de salida del láser VCSEL y o bien amplificar el componente de banda lateral modulado o atenuar el componente de portadora para proporcionar de salida la señal de salida ecualizada.
10. Un método de transmisión óptica que comprende:
- 20 enganchar por inyección un láser de cavidad vertical y emisión en superficie (VCSEL) (80; 270) a un láser maestro (20);
hacer funcionar el láser VCSEL (80; 270) para generar una señal de salida de láser VCSEL que comprende un componente de portadora y un componente de banda lateral modulado; caracterizado por
transmitir la señal de salida del láser VCSEL a una unidad de ecualización (90; 140; 190; 230);
- 25 formar una señal de salida ecualizada en la unidad de ecualización (90; 140; 190; 230), en que la señal de salida ecualizada comprende una relación reducida de potencia de componente de portadora a potencia de componente de banda lateral modulado en comparación con la señal de salida del láser VCSEL; y
proporcionar de salida la señal de salida ecualizada.
11. El método según la reivindicación 10, que comprende:
- 30 encaminar una señal maestra procedente del láser maestro (20) hacia el láser VCSEL (80; 270) a través de un circulador óptico (70; 260);
encaminar la señal de salida de láser VCSEL procedente del láser VCSEL (80; 270) hacia un filtro óptico (150, 160; 230, 240) en la unidad de ecualización (90; 140; 190; 230) a través del circulador óptico (70; 260), en que el filtro óptico (150, 160; 230, 240) comprende un filtro de paso de banda, un filtro de paso bajo o un filtro de eliminación de banda;
- 35 atenuar el componente de portadora en el filtro óptico (150, 160; 230, 240) para formar la señal de salida ecualizada; y
proporcionar de salida la señal de salida ecualizada procedente del filtro óptico (150, 160; 230, 240).
12. El método según la reivindicación 11, que comprende amplificar la señal de salida ecualizada con un amplificador óptico (120; 300).
- 40
13. El método según la reivindicación 10, que comprende:
- encaminar la señal maestra hacia el láser VCSEL (80) a través de un primer circulador óptico (70);
 - encaminar la señal de salida del láser VCSEL hacia un primer filtro óptico de tres puertos (150) en la unidad de ecualización (140) a través del primer circulador óptico (70);

separar el componente de portadora y el componente de banda lateral modulado con el primer filtro óptico de tres puertos (150); y

transmitir separadamente el componente de portadora y el componente de banda lateral modulado procedentes del primer filtro óptico de tres puertos (150).

5 14. El método según la reivindicación 13, que comprende:

pasar el componente de portadora a través de un atenuador óptico variable (170) en la unidad de ecualización (140) para formar un componente de portadora atenuado;

transmitir el componente de portadora atenuado a un segundo filtro óptico de tres puertos (160) o a un acoplador de potencia óptica de tres puertos en la unidad de ecualización (140);

10 combinar el componente de portadora atenuado y el componente de banda lateral modulado en el segundo filtro óptico de tres puertos (160) o en el acoplador de potencia óptica de tres puertos para formar la señal de salida ecualizada; y

proporcionar de salida la señal de salida ecualizada procedente del segundo filtro óptico de tres puertos (160) o del acoplador de potencia óptica de tres puertos.

15 15. El método según la reivindicación 13, que comprende:

transmitir el componente de portadora a un segundo filtro óptico de tres puertos (160) o a un acoplador de potencia óptica de tres puertos en la unidad de ecualización;

amplificar el componente de banda lateral modulado en la unidad de ecualización (140) con un amplificador óptico (300) para formar un componente de banda lateral amplificado;

20 transmitir el componente de banda lateral amplificado al segundo filtro óptico de tres puertos (160) o al acoplador de potencia óptica de tres puertos;

combinar el componente de portadora y el componente de banda lateral amplificado en el segundo filtro óptico de tres puertos (160) o en el acoplador de potencia óptica de tres puertos para formar la señal de salida ecualizada; y

25 proporcionar de salida la señal de salida ecualizada procedente del segundo filtro óptico de tres puertos (160) o del acoplador de potencia óptica de tres puertos.

16. El método según la reivindicación 10, que comprende:

encaminar una señal maestra procedente del láser maestro (20) hacia el láser VCSEL (80) a través de un filtro óptico de tres puertos (190);

encaminar la señal de salida del láser VCSEL hacia el filtro óptico de tres puertos (190);

30 reflejar o absorber una primera parte del componente de portadora en el filtro óptico de tres puertos (190); y

proporcionar de salida el componente de banda lateral modulado y una segunda parte del componente de portadora procedentes del filtro óptico de tres puertos (190) para formar la señal de salida ecualizada.

35 17. El método según la reivindicación 16, en que encaminar la señal maestra procedente del láser maestro (20) hacia el láser VCSEL (80) comprende encaminar la señal maestra a través de un aislador óptico (210), y en que el método comprende:

dirigir la primera parte del componente de portadora hacia el aislador óptico (210); y

absorber la primera parte del componente de portadora en el aislador óptico (210).

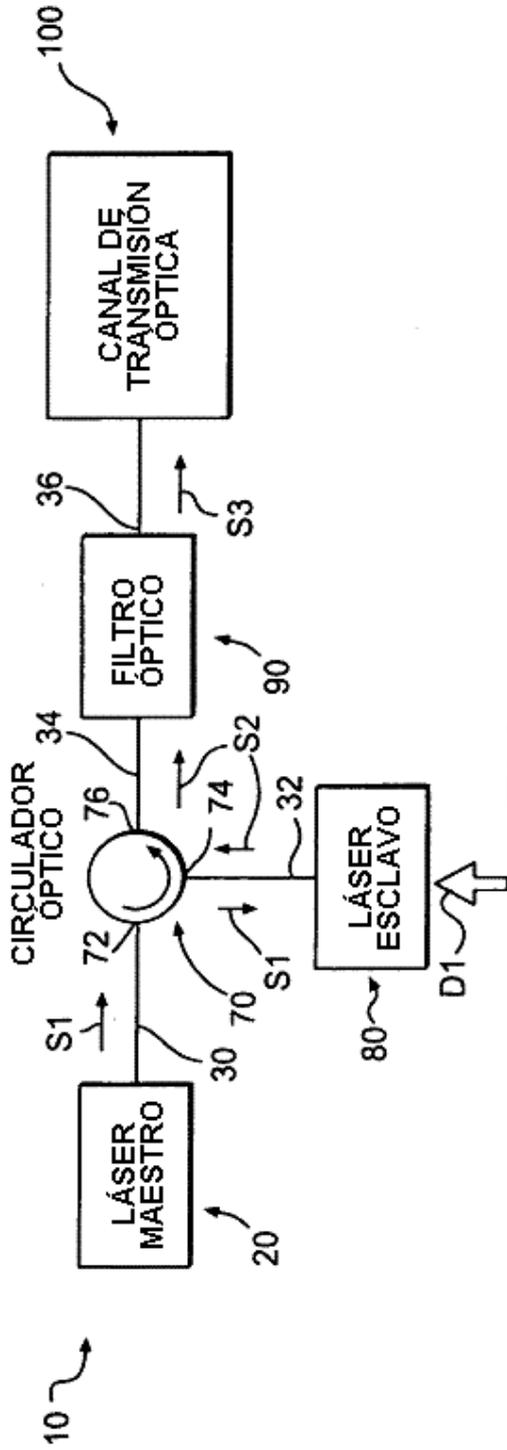


FIG. 1

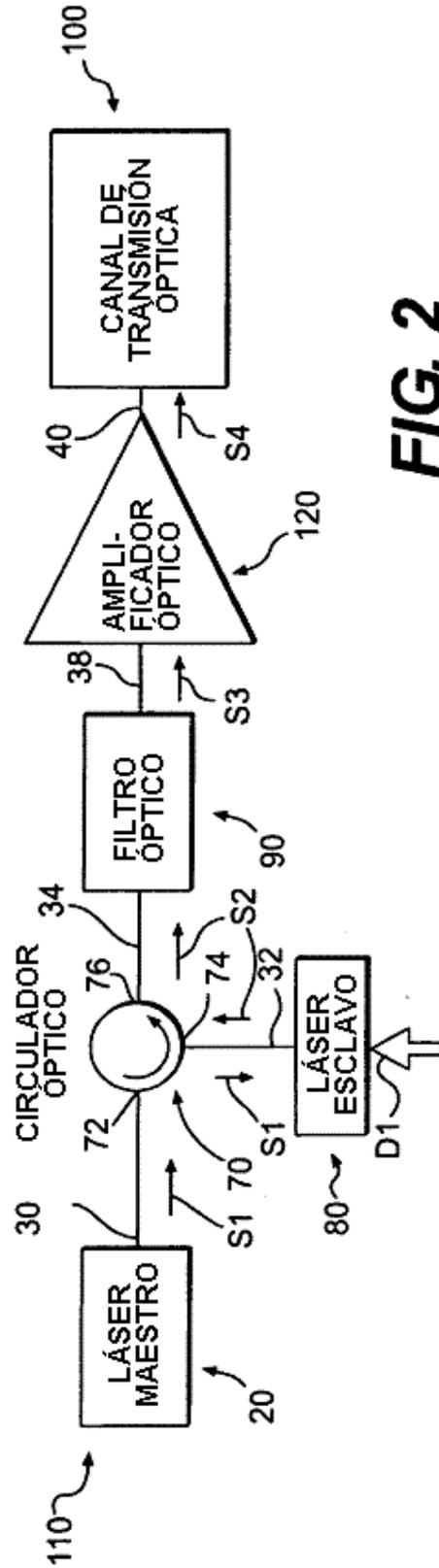


FIG. 2

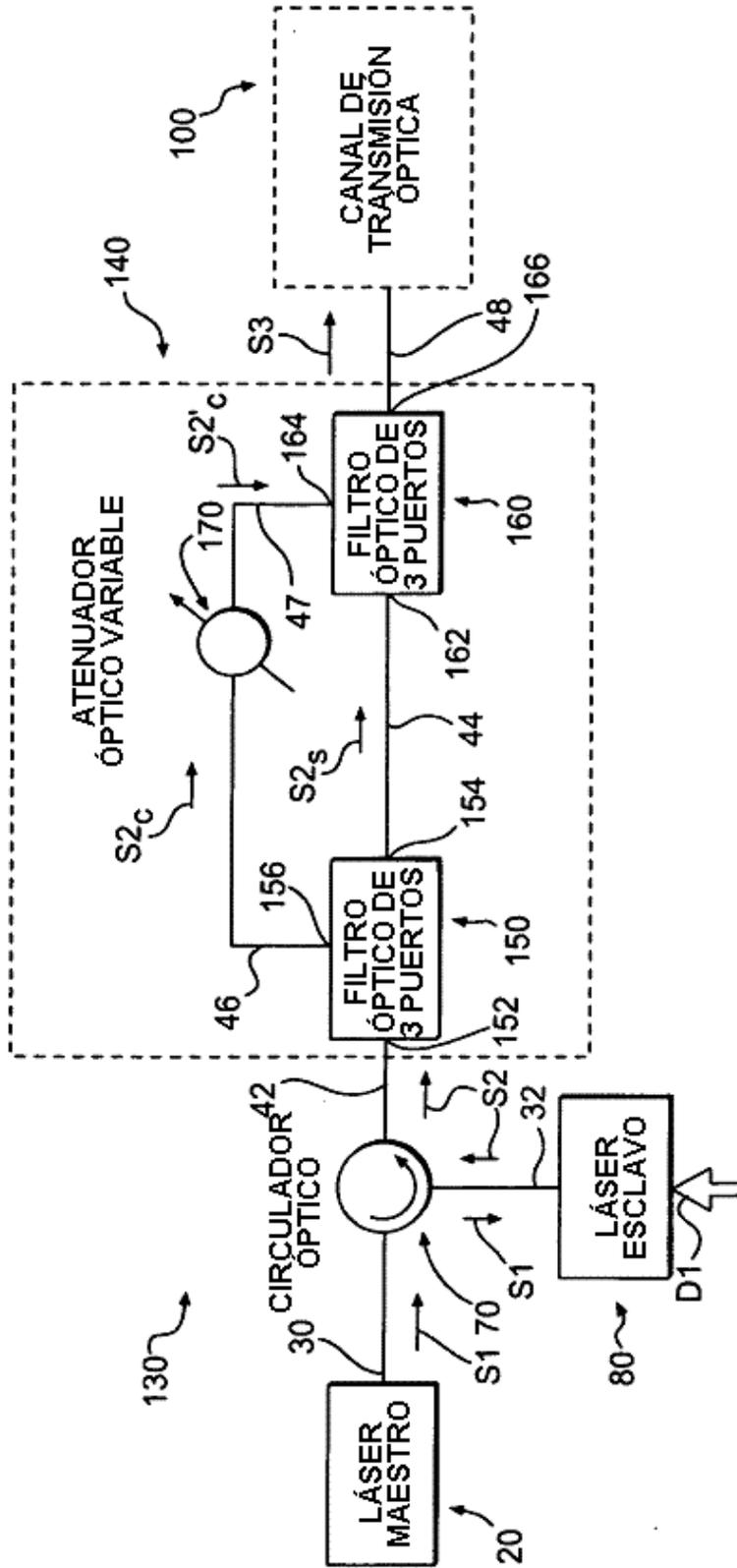


FIG. 3

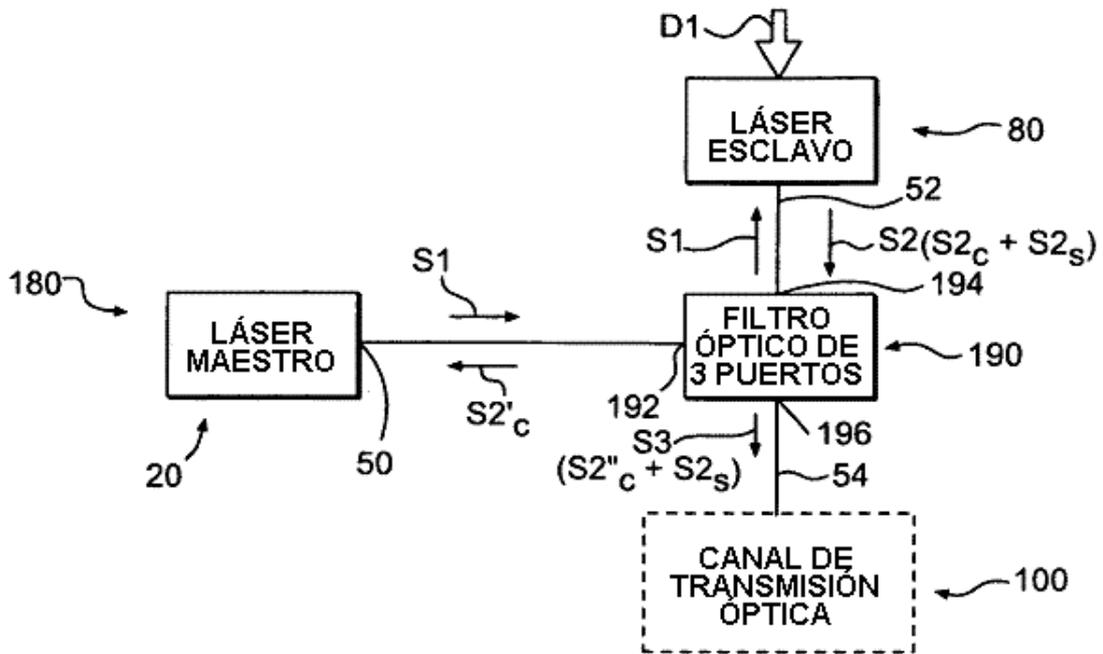


FIG. 4

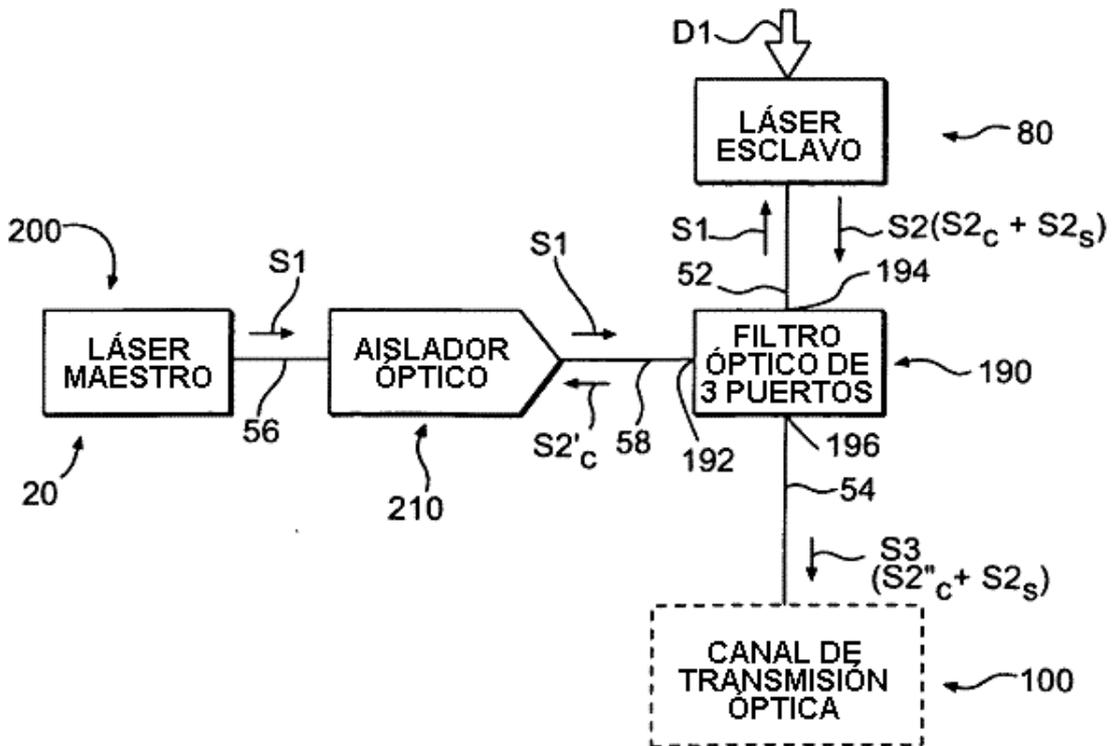


FIG. 5

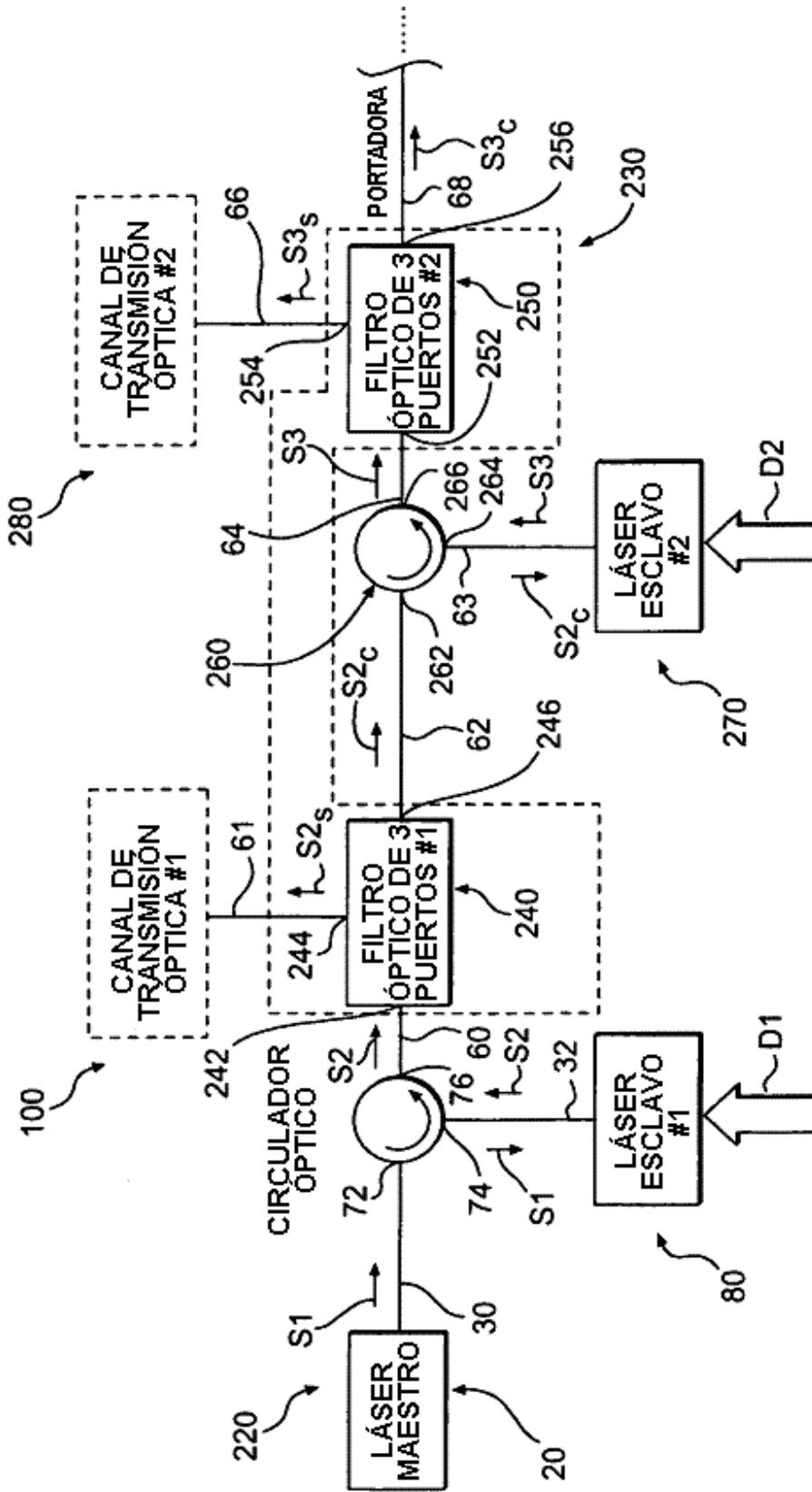


FIG. 6

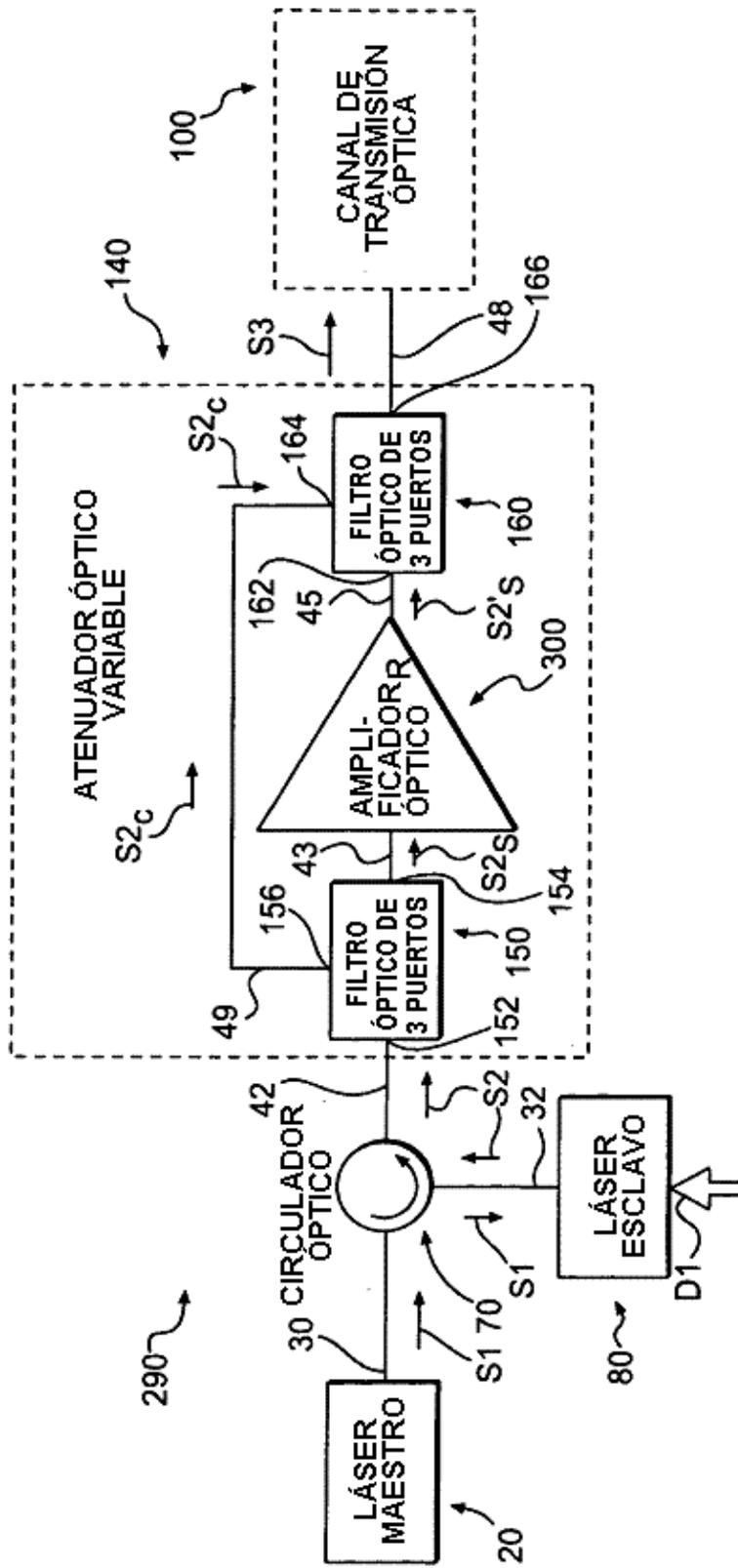


FIG. 7

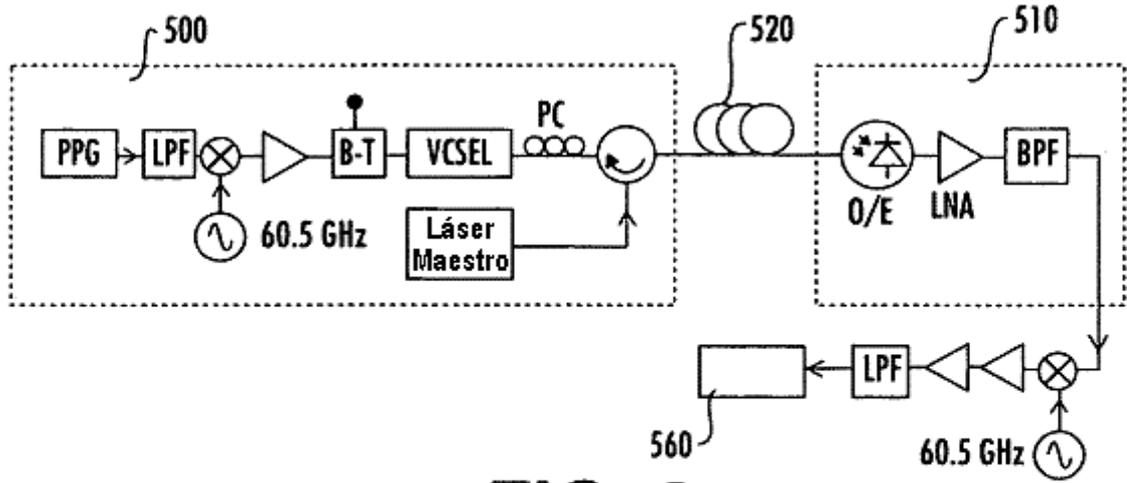


FIG. 8

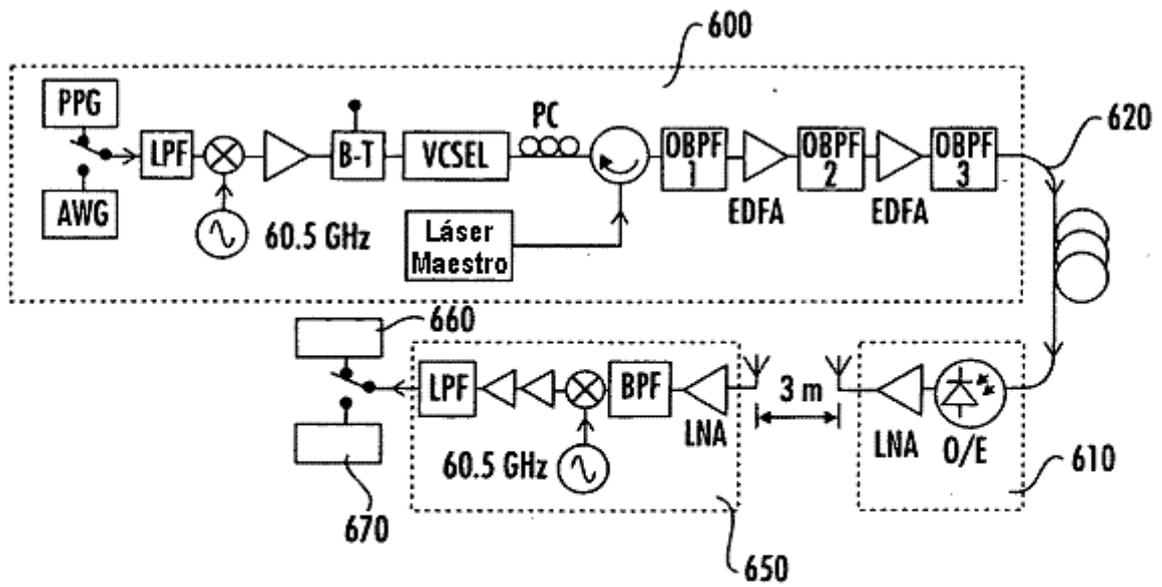


FIG. 14

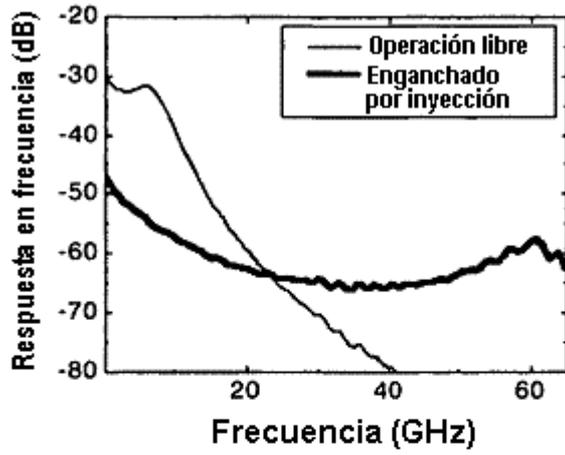


FIG. 9

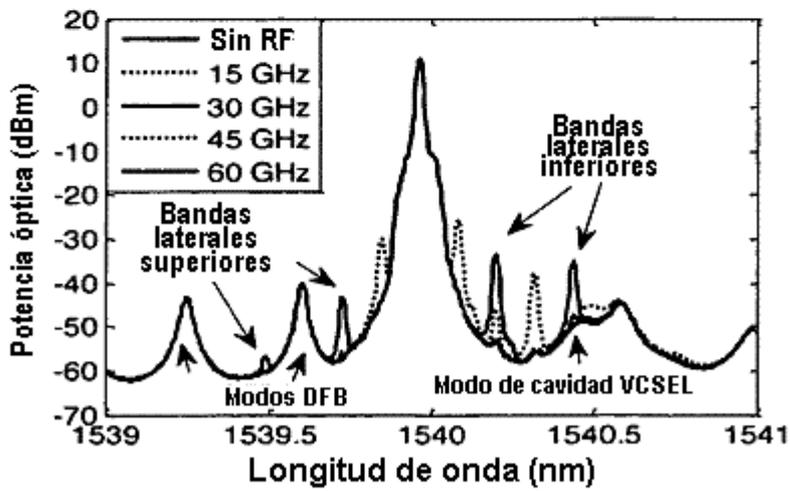


FIG. 10

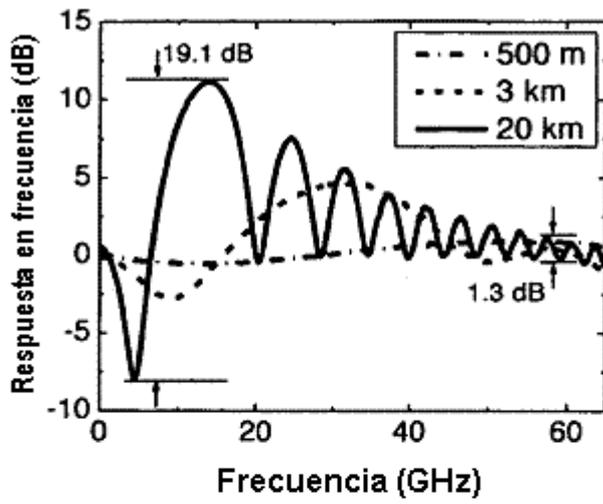


FIG. 11

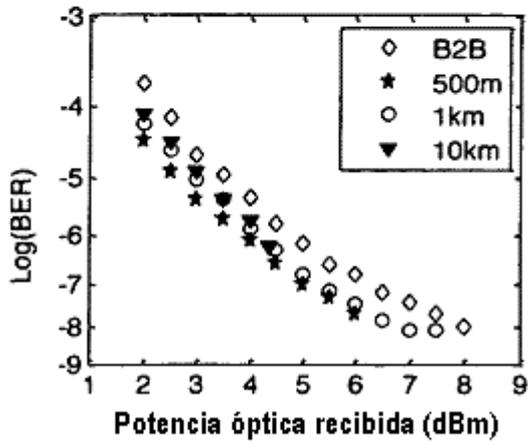


FIG. 12

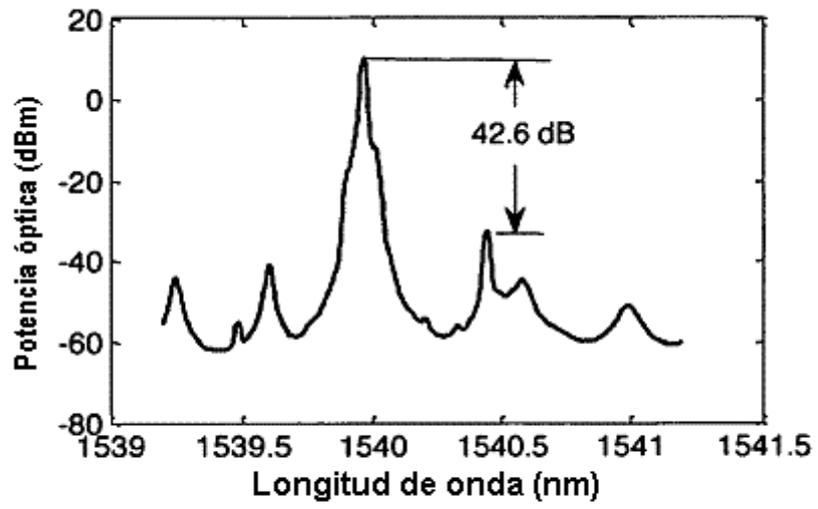


FIG. 13

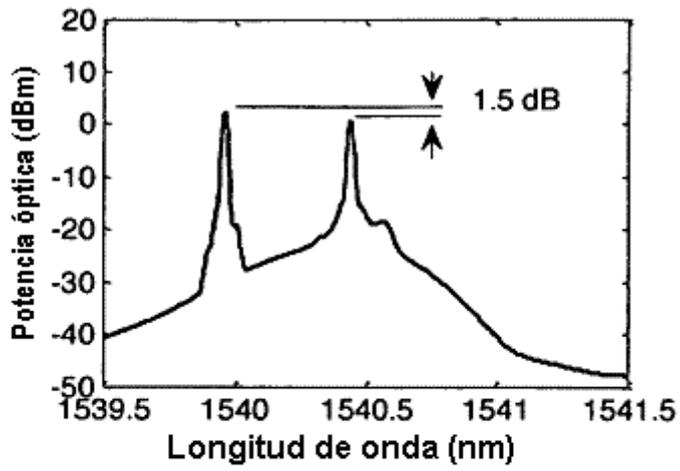


FIG. 15

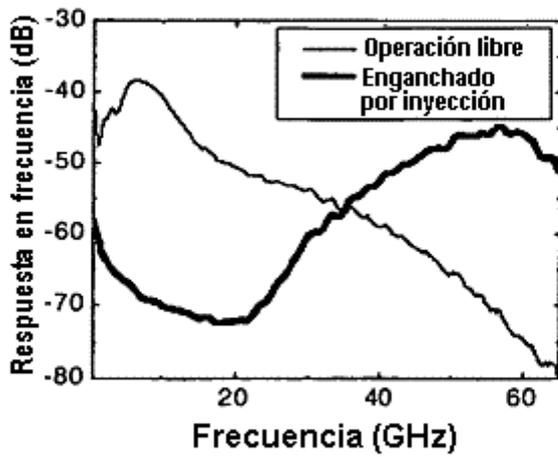


FIG. 16

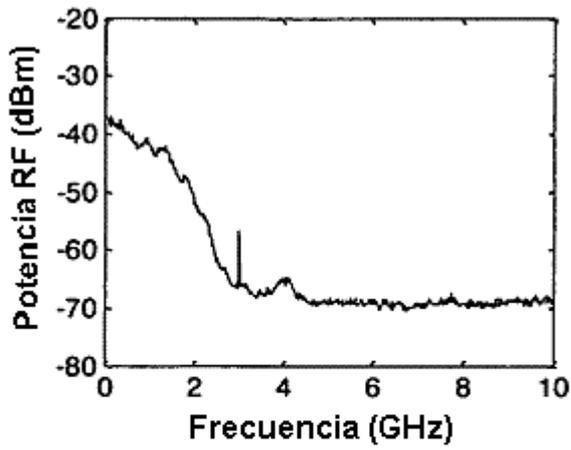


FIG. 17



FIG. 18

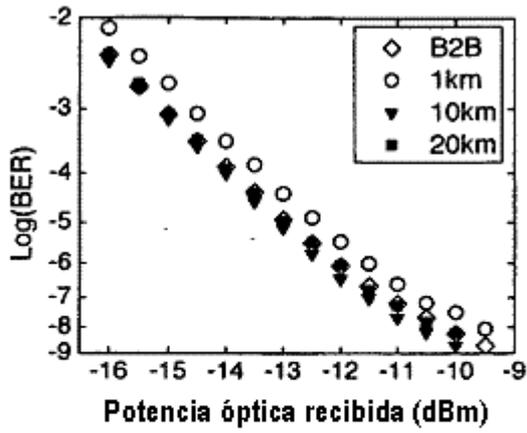


FIG. 19

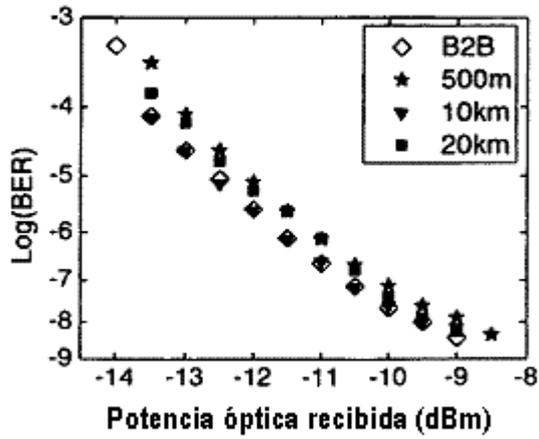


FIG. 20

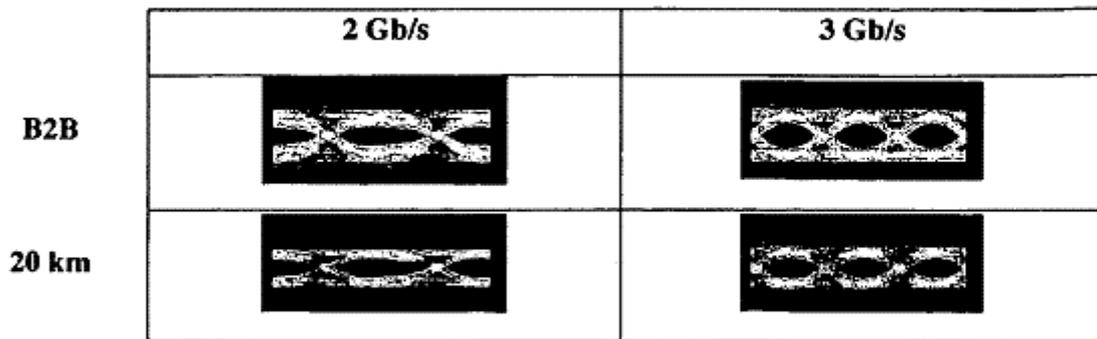


FIG. 21

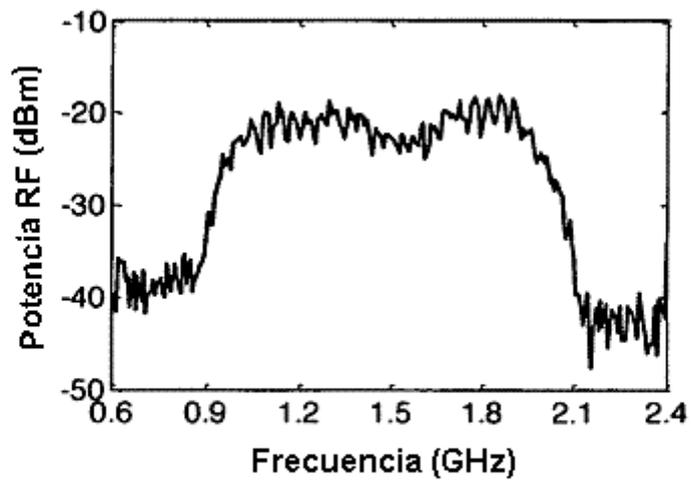


FIG. 22

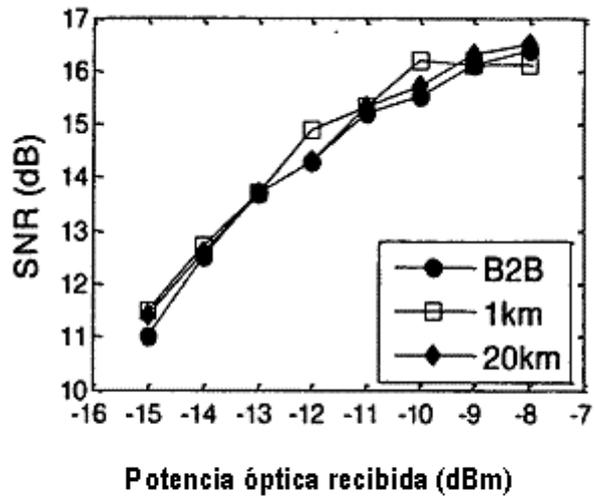


FIG. 23

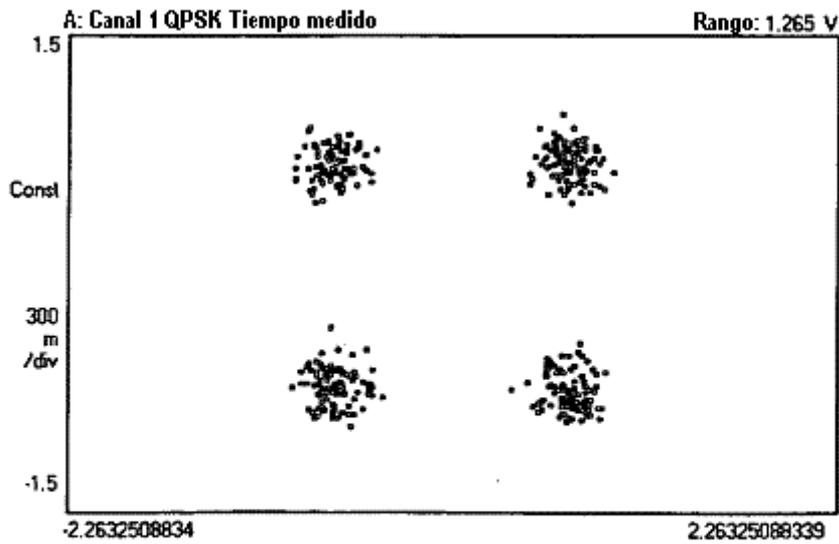
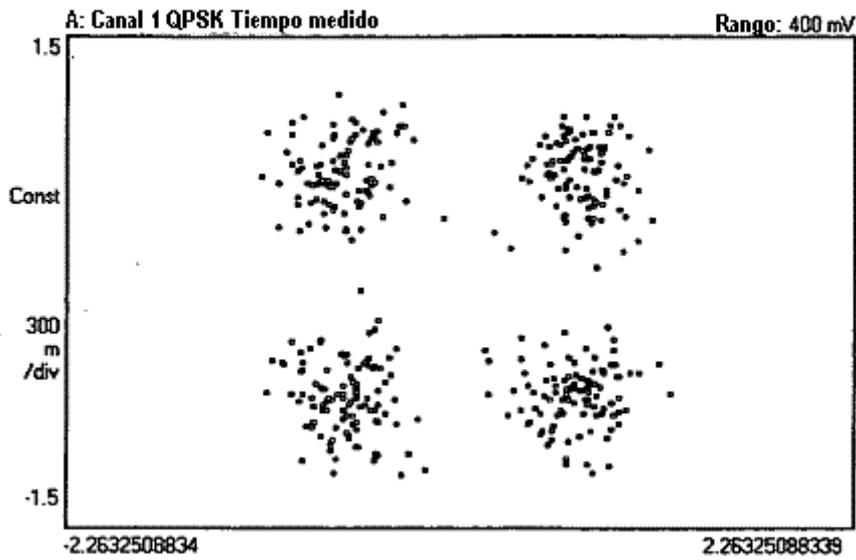


FIG. 24