

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 936 846**

51 Int. Cl.:

H01S 3/094 (2006.01)

G01D 5/353 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.09.2018** **PCT/IL2018/051070**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.04.2019** **WO19064302**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.09.2018** **E 18860412 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.11.2022** **EP 3688847**

54 Título: **Amplificación distribuida a medida para detección por fibra**

30 Prioridad:

29.09.2017 IL 25480317

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

22.03.2023

73 Titular/es:

PRISMA PHOTONICS LTD. (100.0%)

101 Rokach Boulevard

6902068 Tel Aviv, IL

72 Inventor/es:

ROWEN, EITAN y

INBAR, ERAN

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 936 846 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

Amplificación distribuida a medida para detección por fibra

5 Referencia cruzada

Esta solicitud reclama prioridad de la solicitud de patente israelí número 254803 presentada el 29 de septiembre de 2017.

10 Campo de la técnica divulgada

La técnica divulgada se refiere a sistemas de detección por fibra óptica de largo alcance, en general, y a métodos y sistemas para mejorar el alcance de los sistemas de detección por fibra óptica sin amplificación externa, en particular.

15 Antecedentes de la técnica divulgada

En la actualidad, muchos campos de la industria utilizan sensores de fibra óptica (en la presente abreviado como FOS) para aplicaciones que requieren detección a grandes distancias. Esto incluye sistemas de detección acústica distribuida, sistemas de detección de temperatura, sistemas de detección de fugas, sistemas para monitorear la estabilidad estructural de puentes, edificios, vías férreas y similares. Las aplicaciones de detección por fibra óptica de largo alcance pueden incluir sistemas de detección de tuberías para determinar la ubicación precisa de fugas en tuberías que transportan líquidos y gases como gasolina y agua, así como sistemas de detección fronteriza para detectar intrusiones por una frontera.

25 Los sistemas de detección por fibra óptica utilizan cables de fibra óptica (también conocidos y denominados fibras ópticas o fibras de detección) para llevar información a largas distancias desde sensores colocados a lo largo de los cables de fibra óptica. Los sensores pueden ser sensores puntuales, rejillas de Bragg de fibra (en la presente abreviado como FBG) y similares. La información transportada es esencialmente luz y características relacionadas con la luz que se proporciona a un procesador para procesar la información. Las diferencias en las características de la luz que llega al procesador, tales como amplitudes de reflexión de FBG o desplazamientos de resonancia, pueden utilizarse para medir la temperatura o deformación, por ejemplo. En otros sistemas de detección por fibra óptica, en lugar de detectar la luz desde sensores discretos, la información se transporta por la intensidad de dispersión, las resonancias o los patrones de interferencia de la luz dispersada desde toda la longitud de una fibra óptica. En este sentido, el sistema de detección por fibra óptica es un sistema de detección distribuida. En este tipo de sistema de detección, toda la fibra óptica puede servir como una disposición continua de sensores o un sensor distribuido de fibra óptica (en la presente abreviado como DFOS). En los sistemas de DFOS, pueden utilizarse distintos fenómenos físicos de dispersión conocidos, tales como dispersión Rayleigh, dispersión Raman y dispersión Brillouin, para producir una luz de señal que puede medirse con fines de detección. Por ejemplo, puede generarse un mapa de perturbaciones o cambios de fase en el patrón de retrodispersión de Rayleigh a lo largo de la fibra de detección y utilizarlo para detectar una fuga de gas en una tubería, un intruso, la presencia de fuego en un túnel, y similares. Alternativamente, un parámetro físico (tal como temperatura, deformación, presión y similares) puede determinarse mediante cambios en uno de los fenómenos de dispersión mencionados anteriormente a lo largo de la fibra de detección. Puede generarse un mapa de la temperatura a lo largo de la fibra de detección al medir el desplazamiento en la resonancia de dispersión Brillouin de la luz dispersada hacia delante o retrodispersada, o al medir las amplitudes relativas de la dispersión Raman a lo largo de la fibra de detección. En los sistemas de DFOS, la señal recibida debe correlacionarse con la ubicación del evento de dispersión en la fibra de detección, permitiendo así la determinación de la ubicación a lo largo de la fibra de detección. Esto puede hacerse al utilizar pulsos de sonda y al analizar la señal dispersada en el dominio de tiempo. En el caso de señales retrodispersadas, este método se conoce como reflectometría óptica en dominio de tiempo (OTDR). En los casos donde se analiza la señal dispersada hacia delante, el método se conoce como análisis óptico en dominio de tiempo (en la presente abreviado como OTDA). Una forma alternativa de correlacionar la señal con la ubicación en la fibra de detección es mediante el barrido de la señal láser y el análisis de la señal medida en el dominio de frecuencia, como se hace, por ejemplo, en un método denominado reflectometría óptica en dominio de frecuencia (en la presente abreviado como OFDR).

Los sistemas de detección por fibra óptica en los que se analiza la señal dispersada hacia delante, tales como OTDA, deben permitir el acceso a la fibra de detección en ambos cabos, ya sea permitiendo una geometría de bucle o teniendo dos centros de control distintos en ambos cabos de fibra, cada uno requiriendo electricidad y comunicación entre los mismos. Un ejemplo de tal sistema de detección es un sistema de OTDA de Brillouin (en la presente abreviado como BOTDA). Los sistemas de detección por fibra óptica en los que se miden señales retrodispersadas pueden diseñarse de modo que el sistema requiera acceso a un sólo cabo de la fibra de detección, en donde el pulso de sonda o haz de luz se transmite y se recibe desde un primer centro de control. Estos tipos de sistemas son útiles en escenarios donde el segundo cabo de la fibra óptica es ya sea inaccesible o de difícil acceso. Ejemplos de tales escenarios incluyen tuberías, los sistemas de perforación profunda, fronteras y carreteras, en donde resulta imposible, problemático o costoso tender la infraestructura necesaria (tal como sistemas eléctricos y de comunicación) en el segundo cabo de una fibra óptica. También se observa en que tales configuraciones, la distancia entre los centros de control que requieren electricidad y los sistemas de comunicación puede ser el doble de la longitud de la fibra de detección siempre que no se requiera acceso a ambos cabos de la fibra óptica.

La longitud práctica de la fibra de detección está limitada por las señales retrodispersadas y/o dispersadas hacia delante débiles, así como por la atenuación de la luz de sonda o pulso y atenuación de las señales dispersadas. La relación de señal a ruido (en la presente abreviado como SNR) de la señal dispersada detectada debe ser lo suficientemente alta como para diferenciar la señal detectada del ruido en la señal. Para señales suficientemente débiles, el ruido de descarga es la fuente dominante de ruido, lo que hace que la SNR disminuya con la potencia medida. Los sistemas típicos de detección por fibra óptica pueden proporcionar señales de hasta 20-50 kilómetros antes de que la atenuación sea lo suficientemente significativa como para dificultar la detección de señal. Una solución para aumentar la longitud de detección de tal sistema de detección por fibra óptica sería colocar un amplificador óptico cada 40-50 kilómetros, de forma que la señal pueda recorrer distancias de cientos de kilómetros si es necesario. Sin embargo, esta solución tiene sus limitaciones. Requiere acceso a la fibra de detección, la cual puede estar enterrada bajo tierra, por ejemplo, en el caso de una tubería enterrada o un sistema de detección de brecha fronteriza. Por otra parte, requiere de la infraestructura de electricidad y comunicaciones en cada sitio de amplificación. Además, estos sitios podrían necesitar protección contra manipulación y/o sabotaje, aumentando así los costes de mantenimiento de tal sistema. El coste de la configuración y mantenimiento de tal disposición de amplificadores hace que esta solución sea poco práctica para muchos escenarios.

Otra solución para aumentar el alcance de un sistema de FOS sería simplemente enviar un pulso de sonda inicial o haz de luz con mayor potencia. Sin embargo, los efectos y fenómenos no lineales, tales como la dispersión Raman estimulada (en la presente abreviado como SRS), la dispersión Brillouin estimulada (en la presente abreviado como SBS) y la inestabilidad de modulación (en la presente abreviado como MI), limitan la potencia del pulso de sonda o de luz de señal a un intervalo de milivatios individuales hasta cientos de milivatios, dependiendo de la aplicación y configuración del sistema de FOS. Las potencias por encima de ese intervalo provocarán efectos no lineales en la fibra de detección, impidiendo así la detección precisa de cualesquier señales dispersadas. El margen de potencia por encima del cual comienzan a producirse efectos y fenómenos no lineales se denomina en la presente umbral no lineal.

Ahora se hace referencia a la figura 1, la cual es una ilustración esquemática de un sistema de detección por fibra óptica sin amplificación adicional, generalmente referenciado 10, como se conoce en la técnica. El sistema de detección por fibra óptica 10 es un sistema de OTDR de fase que utiliza la detección directa de la luz retrodispersada de una fibra de detección en donde el cabo de la fibra es inaccesible a la electrónica o al bombeo óptico. El sistema de detección por fibra óptica 10 incluye una unidad de interrogación 26 la cual se acopla con una fibra óptica de detección 22 (también denominada fibra de detección, fibra óptica o simplemente fibra). La unidad de interrogación 26 incluye un láser de sonda de ancho de línea estrecho 12, un modulador 14, un circulador 16, un detector 18 y un procesador 20. El modulador 14 se acopla con el láser de sonda 12 y al circulador 16. El detector 18 se acopla con el procesador 20 y se acopla ópticamente con el circulador 16 para recibir y detectar la luz procedente del circulador 16. La fibra óptica 22 se acopla con el circulador 16 y tiene un punto extremo 24. Para fines de simplicidad, se omiten cualesquier etapas de amplificación que podrían utilizarse en el sistema de detección por fibra óptica 10 para amplificar la luz de sonda generada en cualquier lugar entre el láser de sonda 12 y la fibra óptica de detección 22 o para amplificar la luz retrodispersada en cualquier lugar entre la fibra óptica de detección 22 y el detector 18.

El láser de sonda 12 proporciona luz de sonda que es modulada por el modulador 14 para crear un pulso de sonda. El pulso de sonda se envía al circulador 16 que envía el pulso de sonda a lo largo de la longitud de fibra óptica 22. A medida que el pulso de sonda viaja por la fibra óptica 22, es parcialmente retrodispersado hacia el circulador 16. La luz retrodispersada se separa del pulso de sonda mediante el circulador 16, el cual puede ser un circulador óptico o un divisor óptico.

La luz retrodispersada es proporcionada por el circulador 16 al detector 18, que detecta las características de la luz y proporciona las características detectadas al procesador 20. El procesador 20 compara los patrones de interferencia generados por diferentes pulsos y correlaciona el tiempo de la señal recibida con la ubicación de su reflexión a lo largo de la fibra de detección 22. Siempre que la SNR del pulso de sonda sea lo suficientemente alta, el procesador 20 puede determinar a qué distancia de la unidad de interrogación 26 se ha producido un cambio lo suficientemente significativo en la fase del pulso de sonda que podría indicar una fuga, un intruso y similares.

Las características relacionadas con la luz retrodispersada son captadas por el detector 18 y se proporcionan al procesador 20 para extraer información sobre la luz retrodispersada. Ejemplos de tales características pueden incluir frecuencia, fase, intensidad, interferencia y similares. En la figura 1, la resolución espacial viene determinada por el ancho de pulso generado por el modulador 14. La resolución espacial se refiere a la resolución en distancia en donde puede determinarse un cambio en lo que se mide, tal como la temperatura o la deformación, y en la práctica se refiere a la longitud de fibra en la que puede ubicarse una fuga o un intruso. Para asegurar que no exista solapamiento entre las retrodispersiones de pulsos de sonda consecutivos, la tasa de repetición de pulsos (en la presente abreviado como PRR) del láser de sonda debe ser menor que la inversa del tiempo de ida y vuelta que tarda el pulso de sonda en propagarse a lo largo de la fibra óptica 22 hasta el punto extremo 24 y de vuelta al circulador 16. Como se ha mencionado anteriormente, la potencia pico del pulso de sonda debe limitarse para evitar que se produzcan fenómenos no lineales a lo largo de la fibra óptica 22.

Un uso práctico del sistema de detección por fibra óptica 10 es la detección de un intruso a través de un sistema de protección de fronteras utilizando la dispersión Rayleigh. Para evitar fenómenos no lineales en la fibra óptica 22, se supone que la potencia pico que entra en la fibra óptica 22 está limitada a 5 milivatios (en la presente abreviado como mW). El

pulso de sonda proporcionado por el láser de sonda 12 se propaga por la fibra óptica 22 y cualquier luz que se retrodispersa a lo largo de la fibra óptica 22 debido a la dispersión Rayleigh es recibida por el circulador 16 y proporcionada al detector 18. La intensidad de la luz retrodispersada tiene un patrón de tipo moteado que resulta de la interferencia entre diferentes eventos de dispersión que ocurren dentro del pulso de sonda en diferentes ubicaciones a lo largo de la fibra óptica 22, alcanzando el detector 18 simultáneamente. Cualquier cambio local en el índice de refracción cambiará las fases entre los constituyentes retrodispersados de la señal y dará lugar a un cambio en el patrón de tipo moteado de los pulsos consecutivos de sonda. Tal cambio en la medición de luz retrodispersada de sonda es indicativo de la presencia de un intruso y, dado que se conoce el tiempo de ida y vuelta de la luz de sonda que ha provocado el cambio, puede determinarse la ubicación de la brecha del intruso a lo largo de la frontera.

Se hace referencia ahora a la figura 2, la cual es un gráfico de una simulación utilizando el sistema de detección por fibra óptica de la figura 1, que muestra el valor absoluto de la diferencia entre dos mediciones consecutivas de luz de sonda en una escala logarítmica, generalmente referenciada 30, como se conoce en la técnica. El gráfico 30 incluye un eje X 32, que muestra la distancia en kilómetros (en la presente abreviado como km) a lo largo de una fibra de detección (tal como la fibra óptica 22 de la figura 1) y un eje Y 34, que muestra la potencia en decibelios que hace referencia a un milivatio (en la presente abreviado como dBm). La simulación que se muestra se ha diseñado para mostrar perturbaciones entre las mediciones a lo largo de la fibra óptica a las siguientes distancias: 15 km, 40 km, 65 km, 90 km y 115 km. En un sistema de detección como en la figura 1, el ruido de descarga es una fuente dominante de ruido y se muestra en el gráfico 30 mediante una flecha 40. Como puede observarse por una flecha 36, existe una atenuación cuasi lineal natural de aproximadamente 0,2 decibelios (en la presente abreviado como dB) por kilómetro en el nivel de ruido. Este es el resultado de una atenuación de aproximadamente 0,4 dB/km en la señal retrodispersada (0,2 dB/km en cada dirección del viaje de ida y vuelta) y de la dependencia de raíz cuadrada de la potencia de ruido de descarga con respecto a la potencia de señal. La flecha 38 muestra una primera perturbación a 15 km, mientras que la flecha 42 muestra una segunda perturbación a 40 km. En la simulación, el ancho de pulso se fijó en 100 nanosegundos (en la presente abreviado como ns), lo que corresponde a una resolución espacial de aproximadamente 10 metros. Para los parámetros seleccionados, como se muestra, la primera perturbación a 15 km (flecha 38) es fácilmente detectada por un procesador, sin embargo, la segunda perturbación a 40 km (flecha 42) es casi imposible de detectar dada la atenuación a lo largo de la fibra óptica. A 40 km, el ruido de descarga es tan fuerte como la perturbación, el cual no se puede resolver a menos que se utilice cierta forma de amplificación en línea para aumentar la señal de perturbación por encima de la señal de ruido. Las perturbaciones a 65 km, 90 km y 115 km quedan ahogadas por el ruido. De este modo, el sistema de detección que se muestra en la figura 1 puede ser bueno para aplicaciones en las que se desee un alcance de hasta 40 km, sin embargo, para distancias superiores, el sistema de detección de la figura 1 es inadecuado. Tales sistemas de detección se conocen en la técnica anterior y se describen, por ejemplo, en Grattan, K.T.V. y Sun, T., "Fiber optic sensor technology: an overview", Sensors and Actuators A Physical, volumen 82, números 1-3, mayo de 2000, páginas 40-61 y en Santos, J.L. y Farahi, F., Handbook of Optical Sensors, CRC Press, Boca Ratón, 2015.

Como se muestra y explica anteriormente en las figuras 1 y 2, la potencia del pulso o señal de luz retrodispersada captada por el detector es típicamente una pequeña fracción de la potencia del pulso de sonda, que a su vez está limitada. En el caso de los sistemas de detección por fibra óptica que utilizan rejillas de Bragg de fibra (en la presente abreviado como FBGs), la potencia de la señal retrodispersada captada puede ser menor que el 10% de la potencia del pulso de sonda, mientras que en los sistemas de DFOS, la potencia de la señal retrodispersada captada puede ser menor que el 10-3% de la potencia del pulso de sonda. Si a esto agregamos la atenuación natural tanto del pulso de sonda como del pulso de luz retrodispersada, la aplicación de sistemas de DFOS a decenas de kilómetros de longitud no es trivial. Como se muestra en la figura 2, una SNR baja del pulso de luz retrodispersada puede limitar la resolución espacial de un sistema de detección, lo que puede dar lugar a altas tasas de falsas alarmas, clasificaciones incorrectas o eventos omitidos en un sistema de detección de intrusión, y también puede dar lugar a una baja precisión de lo que se mide, tal como la deformación, la temperatura, el flujo y/o la presión en otras aplicaciones de detección.

Como se ha mencionado anteriormente, una forma de ampliar el alcance de un sistema de detección por fibra óptica, por ejemplo para ampliar el alcance del sistema de la figura 1 simulado en la figura 2, es colocar amplificadores a lo largo de la fibra óptica para superar la atenuación dentro de la fibra. Tal procedimiento se conoce en la técnica y se describe en Lai, M. et al., "Ultra-long Distance Distributed Intrusion Detecting System Assisted With In-line Amplification," IEEE Photonics Journal, volumen 9, número 2, abril de 2017, páginas 1-10. Aunque este procedimiento puede aumentar el alcance de un sistema de detección por fibra óptica, requiere llevar electricidad y comunicaciones a múltiples centros de control o puntos de control a lo largo de la fibra óptica. Esto puede implicar llevar la luz de bombeo a amplificadores adicionales colocados a lo largo de la fibra óptica y también a agregar puntos de mantenimiento, con lo que se pierden algunas de las ventajas del FOS de larga distancia.

Un método para aumentar el alcance de un sistema de detección por fibra óptica sin utilizar amplificadores externos es la amplificación Raman en línea del pulso de sonda, la señal retrodispersada o ambas. Se hace referencia ahora a la figura 3, la cual es una ilustración esquemática de un sistema de detección por fibra óptica que utiliza amplificación Raman en línea, generalmente referenciada 50, como se conoce en la técnica. El sistema de detección por fibra óptica 50 incluye una unidad de interrogación 70, la cual se acopla con una fibra óptica de detección 68. La unidad de interrogación 70 incluye un láser de sonda de ancho de línea estrecho 52, un modulador 54, un circulador 56, un detector 58, un procesador 60, un filtro de multiplexor por división de longitud de onda (en la presente abreviado como WDM) 62 y un láser de bombeo Raman 64. El modulador 54 se acopla con el láser de sonda 52 y al circulador 56. El detector 58 se acopla con el

procesador 60 y se acopla ópticamente con el circulador 56 para recibir y detectar la luz procedente del circulador 56. El filtro de WDM 62 acopla la luz del láser de bombeo Raman 64 con la fibra de detección 68. La fibra óptica 68 se acopla con el circulador 56 a través del filtro de WDM 62 y tiene un punto extremo 66. Para fines de simplicidad, se omiten cualesquier etapas de amplificación que podrían utilizarse en el sistema de detección por fibra óptica 50 para amplificar una luz de sonda en cualquier lugar entre el láser de sonda 52 y la fibra óptica de detección 68 o para amplificar la luz retrodispersada entre la fibra óptica de detección 68 y el detector 58.

El sistema de detección mostrado en la figura 3 opera de manera similar al sistema de detección mostrado en la figura 1, sin embargo, difiere en que el sistema de detección por fibra óptica 50 emplea amplificación Raman de primer orden. El láser de bombeo Raman 64 produce luz de bombeo que se combina con el pulso de sonda producido por el modulador 54 (a partir de la luz generada por el láser de sonda 52). La luz de bombeo se combina con la fibra óptica 68 mediante el filtro de WDM 62 y puede proporcionar amplificación en línea tanto al pulso de sonda que viaja por la fibra óptica 68 como a la luz retrodispersada generada en la fibra de detección 68 y que se propaga hacia el circulador 56. En general, la longitud de onda de la luz de bombeo generada por el láser de bombeo Raman 64 se selecciona de forma que esté cerca del pico del espectro de dispersión Raman. Al igual que el pulso de sonda, la luz de bombeo proporcionada por el láser de bombeo Raman 64 también se atenúa a medida que se propaga por la fibra óptica 68. La luz de bombeo se atenúa y decae exponencialmente a lo largo de la distancia de la fibra óptica 68. Por lo tanto, la ganancia Raman máxima se encuentra en el cabo de la fibra óptica 68 más cercano a la unidad de interrogador 70. La potencia del láser de bombeo Raman 64 debe limitarse para evitar fenómenos no lineales no deseados, tales como dispersión Raman espontánea que se produce a lo largo de la fibra óptica 68, que puede enmascarar cualesquier señales retrodispersadas y deteriorar la SNR de señal. De este modo, la potencia de bombeo de láser Raman se mantiene por debajo de un umbral para la dispersión Raman espontánea en todas las ubicaciones a lo largo de la fibra óptica 68. La atenuación de la luz de bombeo a medida que se propaga a lo largo de la fibra óptica 68 limita la amplificación en línea del pulso de sonda a una distancia que es proporcional a la longitud de atenuación de la longitud de onda del láser de bombeo Raman 64. Suele ser de alrededor de 10 km.

Como se ha mencionado anteriormente, la luz generada por el láser de bombeo Raman 64 amplifica tanto la luz retrodispersada como el propio pulso de sonda. A fin de mantener la potencia de pulso de sonda por debajo del umbral para que se muestren fenómenos no lineales, debe limitarse la potencia de láser Raman que se solapa con el pulso de sonda para conseguir una amplificación muy baja o bien debe limitarse la potencia de pulso de sonda, lo que en última instancia puede reducir la SNR del pulso de sonda. Por lo tanto, cuando el modulador 54 genera un pulso de sonda, la potencia de láser de bombeo Raman 64 puede reducirse o incluso establecerse en cero.

En una variación del sistema de sensores de fibra óptica 50, la luz de bombeo generada por el láser de bombeo Raman puede acoplarse al cabo de la fibra de detección y contrapropagarse al pulso de sonda generado por el láser de sonda (no mostrado en la figura 3).

Se hace referencia ahora a la figura 4, la cual es un gráfico de una simulación utilizando el sistema de detección por fibra óptica de la figura 3, que muestra el valor absoluto de la diferencia entre dos mediciones consecutivas de luz de sonda en una escala logarítmica, generalmente referenciada 80, como se conoce en la técnica. El gráfico 80 incluye un eje X 82, que muestra la distancia en kilómetros a lo largo de una fibra óptica (por ejemplo, la fibra de detección 68 de la figura 3), y un eje Y 84, que muestra la potencia en dBm. La simulación que se muestra se ha diseñado para mostrar perturbaciones entre las mediciones a lo largo de la fibra óptica a las siguientes distancias: 15 km, 40 km, 65 km, 90 km y 115 km. En cuanto a los parámetros del sistema de sensores de la figura 3, el láser de bombeo Raman se establece en cero cuando se generan los pulsos de sonda. El resto del tiempo, la potencia de láser Raman es de 400 mW, justo por debajo del umbral para la dispersión Raman espontánea. Todos los demás parámetros descritos anteriormente con respecto a la figura 2 son los mismos. El ruido de descarga se muestra mediante una flecha 90. La luz de bombeo Raman y la ganancia que suministra a la luz retrodispersada se atenúan exponencialmente a medida que se propaga por la fibra. Desde ubicaciones relativamente cercanas, por ejemplo hasta alrededor de 17 km, esta ganancia es mayor que la atenuación del pulso de sonda y la luz retrodispersada, por lo que la señal devuelta desde esta región es realmente mayor que en ubicaciones más alejadas a lo largo de la fibra de detección. Puesto que el ruido de descarga 90 y la SNR crecen con la potencia, inicialmente el ruido de descarga 90 y la SNR de luz retrodispersada aumentan, mostrándose como una sección 86A. Después de aproximadamente 17 km, la amplificación proporcionada es menor que la atenuación combinada del pulso de sonda y de la luz retrodispersada. De este modo, después de alrededor de 20 km, la amplificación Raman en línea es insignificante y la tasa de decaimiento de la señal, mostrada como sección 86B, es similar a la de la figura 2. Tres flechas separadas 88A, 88B y 88C muestran respectivamente la potencia recibida de las perturbaciones a 15 km, 40 km y 65 km respectivamente. Como se muestra en el gráfico, la distancia a lo largo de la fibra óptica que produce la señal de pulso de sonda más intensa es alrededor de 20 km. Las perturbaciones a 15 km y 40 km son claramente visibles y discernibles, mientras que la perturbación a 65 km, mostrada por la flecha 88C, es comparable en potencia con la potencia de ruido de descarga. Sin embargo, las perturbaciones a 90 km y 115 km quedan enmascaradas por el ruido de descarga y no son detectables con el sistema de sensores de la figura 3. El sistema de sensores de la figura 3 mejora el alcance de un FOS con respecto al sistema de sensores de la figura 1; sin embargo, las distancias utilizables de tal sistema de sensores siguen siendo limitadas.

Los sistemas de detección como se describe en la figura 3 se conocen en la técnica y se describen, por ejemplo, en la patente estadounidense número 8,989,526, concedida a Hartog, titulada "Amplificación Raman en Sistemas de Detección

de Fibra Óptica Distribuida" y Martins, H.F. Et al., "Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer Assisted by First-order Raman Amplification for Distributed Vibration Sensing Over >100 km", Journal of Lightwave Technology, volumen 32, número 8, abril de 2014, páginas 1510-1518.

- 5 Las limitaciones del sistema de sensores de la figura 3 pueden superarse parcialmente utilizando un sistema de sensores que emplee amplificación Raman de segundo orden. En la figura 5 se muestra tal sistema de sensores. Se hace referencia ahora a la figura 5, la cual es una ilustración esquemática de un sistema de detección por fibra óptica que utiliza amplificación Raman en línea de segundo orden, generalmente referenciada 100, como se conoce en la técnica. El sistema de detección por fibra óptica 100 incluye una unidad de interrogación 102 y una fibra de detección óptica 126. La
- 10 unidad de interrogación 102 incluye un láser de sonda 106, un modulador 108, un circulador 110, un detector 112, un procesador 114, un primer filtro de WDM 116, un láser Raman 118, una primera FBG 120A, una segunda FBG 120B y un segundo filtro de WDM 122. La unidad de interrogación 102 se acopla con la fibra óptica 126 en ambos cabos, formando así un bucle de fibra óptica 124. El segundo WDM 122 se acopla con el láser Raman 118 y la segunda FBG 120B acopla el segundo WDM 122 con la fibra óptica 126. El modulador 108 se acopla con el láser de sonda 106 y al circulador 110. El detector 112 se acopla con el procesador 114 y se acopla ópticamente con el circulador 110 para recibir y detectar las
- 15 señales procedentes del circulador 110. El primer filtro de WDM 116 se acopla con el circulador 110, el láser Raman 118 y la primera FBG 120A. La unidad de interrogación 102 representa sustancialmente un centro de control respectivo que requiere energía para operar el láser de sonda y el láser Raman. El láser Raman 118 puede proporcionar una luz de bombeo de propagación hacia delante a través del primer WDM 116 y la primera FBG 120A, una luz de bombeo de contrapropagación mediante el segundo WDM 122 y la segunda FBG 120B, o ambas. Para fines de simplicidad, se omiten cualesquier etapas de amplificación que podrían utilizarse en el sistema de detección por fibra de óptica 100 para
- 20 amplificar una luz de sonda en cualquier lugar entre el láser de sonda 106 y la fibra óptica 126 o para amplificar la luz retrodispersada entre la fibra óptica 126 y el detector 112.
- 25 El sistema de sensores mostrado en la figura 5 es un ejemplo de luz de bombeo contrapropagada, ya que el láser Raman 118 puede proporcionar una luz de bombeo Raman contrapropagada mediante el segundo WDM 122. Sin embargo, el sistema de sensores de la figura 5 requiere que ambos cabos de la fibra óptica 126 sean accesibles por la unidad de interrogador 102, permitiendo únicamente una geometría de bucle para la fibra de detección 126 (es decir, el bucle de fibra óptica 124). El alcance máximo a lo largo de la fibra de detección para las mediciones entonces sólo es la mitad de la longitud de la fibra de detección 126 debido a la geometría de bucle. De este modo, este sistema de sensores no puede utilizarse en escenarios donde uno cabo de fibra debe estar libre e inaccesible y, además, reduce a la mitad la distancia máxima entre puntos de control en escenarios de larga distancia. En escenarios donde la fibra de detección 126 sí forma un bucle, es posible utilizar un sistema similar al sistema de detección por fibra óptica 50 (figura 3) con dos fibras de detección de cabo libre (cada una en dirección opuesta), formando así un bucle con una longitud total del doble de la
- 30 longitud de una sola fibra de detección (como se muestra en la figura 5). Con la finalidad de comparar el rendimiento del sistema de la figura 5 con otros sistemas de la técnica anterior, se presenta a continuación una simulación de la figura 5, como se muestra en la figura 6, en donde la luz de bombeo del láser Raman sólo se copropaga, es decir, un sistema en el que el segundo WDM 122 no está presente y, aparte de la segunda FBG 120B, la fibra de detección 126 tiene un cabo libre.
- 35 El sistema de sensores mostrado en la figura 5 también es un ejemplo de configuración de amplificación Raman en línea de segundo orden que permite ampliar aún más el alcance de amplificación en la fibra óptica en comparación con el sistema de sensores de la figura 3. Un ejemplo de esto se describe en Martín-Lopez, S. et al., "Brillouin optical time-domain analysis assisted by second-order Raman amplification", Optics Express, volumen 18, número 18, agosto de 2010, páginas 18769-18778. En el sistema de Martín-Lopez et al., las FBGs y los láseres de diodo de bombeo se colocan en ambos cabos de una fibra óptica como parte de un sistema de detección por fibra óptica, creando así un láser Raman de fibra ultralarga (abreviado en la presente como URFL).
- 40 En el sistema de detección de la figura 5, la ganancia Raman para el pulso de sonda y la luz retrodispersada es suministrada por el modo del URFL. La dinámica del URFL requiere varias idas y vueltas de este modo para que se acumule y proporcione una ganancia Raman sustancial. En tal configuración, es imposible modular significativamente la ganancia Raman de acuerdo con un perfil de ganancia temporal deseado, como ocurría en un sistema de detección por fibra óptica 50 (figura 3). Específicamente, en el sistema de detección de la figura 5, la ganancia Raman no puede reducirse durante el tiempo del pulso de sonda. Para evitar que la potencia de pulso de sonda supere el umbral no lineal, es necesario reducir la potencia de pulso de sonda que se acopla a la fibra óptica 126, de modo que después de la amplificación Raman, la potencia de pulso de sonda alcance la potencia máxima permitida (es decir, el umbral no lineal) sólo a cierta distancia a lo largo de la fibra de detección.
- 45 Se hace referencia ahora a la figura 6, la cual es un gráfico de una simulación utilizando el sistema de detección por fibra óptica de la figura 5, que muestra el valor absoluto de la diferencia entre dos mediciones consecutivas de luz de sonda en una escala logarítmica, generalmente referenciada 140, como se conoce en la técnica. El gráfico 140 incluye un eje X 142, que muestra la distancia en kilómetros a lo largo de una fibra óptica (tal como la fibra óptica 126 de la figura 5), y un eje Y 144, que muestra la potencia en dBm. La simulación que se muestra se ha diseñado para mostrar perturbaciones entre las mediciones a lo largo de la fibra óptica a las siguientes distancias: 15 km, 40 km, 65 km, 90 km y 115 km. En cuanto a los parámetros del sistema de sensores de la figura 5, para mantenerse dentro del umbral de prevención de fenómenos no lineales, la potencia pico del pulso de sonda se redujo a 100 microvatios. La potencia de bombeo Raman
- 50
- 55
- 60
- 65

hacia delante de segundo orden para la luz de bombeo de propagación hacia delante se fijó en 1,45 vatios y, con la finalidad de permitir una operación de un solo cabo (para efectos de comparación, como se ha explicado anteriormente), la potencia de bombeo Raman hacia atrás para la luz de bombeo de contrapropagación se fijó en cero. Este conjunto de parámetros garantiza que el pulso de sonda no superará el umbral no lineal de potencia de 5 mW y también mantiene la potencia de modo URFL por debajo del umbral de 400 mW para la dispersión Raman espontánea.

Se muestra una envolvente 146 de la potencia de ruido, que muestra una disminución inicial en los primeros 10-15 km, mostrada por una flecha 150, y luego un aumento significativo de la potencia que alcanza su punto máximo alrededor de 40 km, tras lo cual se produce una atenuación lenta en los siguientes 100 km. El ruido de descarga 152 presente en la fibra óptica se muestra junto con una pluralidad de flechas 148A, 148B, 148C y 148D que muestran perturbaciones a 40 km, 65 km, 90 km y 115 km respectivamente. Sin embargo, la perturbación a 15 km queda enmascarada por el ruido de descarga y no es detectable utilizando el sistema de sensores de la figura 5.

Cabe señalar que la baja potencia del pulso de sonda podría introducir ruido adicional en la fibra óptica que no se considera en la simulación de la figura 6. La simulación del sistema de la figura 5, como se muestra en la figura 6, no considera la luz de bombeo Raman de propagación hacia delante ni la de propagación hacia atrás, sin embargo, no obstante, el sistema de la figura 5 requiere acceso a ambos cabos de la fibra óptica para instalar las dos FBGs, lo que podría ser un inconveniente importante e impedir la instalación de tal sistema en un cable de fibra óptica enterrado existente, por ejemplo. Aunque utilizar la amplificación Raman en línea de segundo orden aumenta la ganancia más hacia el interior de la fibra, lo que ahora alcanza de alrededor de 40 km, la configuración sigue experimentando una falta de control temporal total sobre la amplificación. El hecho de que la potencia de modo Raman de primer orden esté determinada por las FBGs hace imposible controlar la potencia de la ganancia Raman en una escala de tiempo inferior a un tiempo de ida y vuelta, que era el caso de la simulación mostrada en la figura 4. Un resultado de esta falta de control sobre la potencia de la ganancia Raman es la baja potencia de entrada del pulso de sonda, como implica la flecha 150 que conduce a la SNR deficiente mostrada al principio de la fibra óptica antes de que el pulso de sonda se amplifique a 5 mW. Como se ha mencionado, esto es muy notable en el pulso de sonda a 15 km, en donde la potencia de señal es comparable con el límite de ruido de descarga, lo que hace que la perturbación a 15 km sea prácticamente imperceptible e indetectable.

En la figura 5 se muestra el uso de la técnica anterior de la amplificación Raman de segundo orden. Este sistema de sensores difiere del sistema de sensores de las figuras 1 y 3 en algunos aspectos. Uno es que la fibra óptica está empalmada a una FBG en cada cabo. Las FBGs forman una cavidad a una longitud de onda para la que la longitud de onda de pulso de sonda está cerca del pico espectral de dispersión Raman. La cavidad se bombea en ambos cabos para formar un URFL. La longitud de onda del láser de diodo de bombeo se elige de forma que la longitud de onda de cavidad esté cerca del pico de dispersión Raman. Como ya se ha mencionado, esta arquitectura tiene algunos inconvenientes. En primer lugar, hay que acceder a la fibra óptica por ambos cabos. Esto elimina el uso de este sistema de detección en entornos difíciles donde no puede utilizarse la electrónica, ya sea debido a ruido electromagnético, calor, frío extremo u otras razones. En aplicaciones que requieren varias unidades de control, tales como tuberías largas y fronteras que pueden tener cientos, si no miles, de kilómetros de longitud, el sistema de sensores de la figura 5 reduce a la mitad la distancia entre las estaciones de control o puntos de control donde deben instalarse los detectores. Además, en el sistema de sensores de la figura 5, el modo Raman de primer orden no puede controlarse independientemente del modo Raman de segundo orden, por lo que el perfil de ganancia viene determinado por el diseño y no puede alterarse en caso de variación de fabricación. Además, el perfil de ganancia no puede modificarse dinámicamente para ajustarse a las condiciones ambientales, las regiones de interés o las variaciones en la potencia de los pulsos de sonda y las señales retrodispersadas.

Compendio de la presente técnica divulgada

Es un objeto de la técnica divulgada proporcionar un método y sistema novedosos para la amplificación Raman en línea de alto orden en un sistema de detección por fibra óptica para ampliar el alcance de amplificación del sistema de detección sin necesidad de tener acceso a ambos cabos de la fibra óptica y teniendo control dinámico sobre la ganancia Raman.

De acuerdo con la técnica divulgada, de este modo se proporciona un método para proporcionar amplificación Raman en línea en un sistema de detección por fibra óptica. El método incluye los procedimientos de generar una luz de sonda que tiene una longitud de onda de sonda, transmitir la luz de sonda a una fibra óptica y generar al menos una luz de bombeo Raman con una longitud de onda y una potencia de bombeo respectivas. La longitud de onda de bombeo respectiva es más corta que la longitud de onda de sonda, de manera que una diferencia de frecuencia correspondiente entre la longitud de onda de bombeo respectiva y la longitud de onda de sonda es un múltiplo de un desplazamiento de frecuencia para el que un coeficiente de dispersión Raman es al menos el 25% de un coeficiente de dispersión Raman resonante. El método además comprende los procedimientos de generar al menos una luz inicial Raman a una longitud de onda inicial y una potencia inicial respectivas, la longitud de onda inicial respectiva se encuentra entre la longitud de onda de bombeo respectiva y la longitud de onda de sonda, transmitir la luz de bombeo Raman a la fibra óptica y transmitir la luz inicial Raman a la fibra óptica. El método también comprende el procedimiento de propagar la luz de bombeo Raman, la luz inicial Raman y la luz de sonda a lo largo de la fibra óptica para lograr la amplificación Raman distribuida de la luz de señal producida por la luz de sonda a medida que se propaga a lo largo de la fibra óptica.

De acuerdo con otro aspecto de la técnica divulgada, se proporciona un sistema de detección por fibra óptica que explota la amplificación Raman de alto orden en línea. El sistema de detección incluye una fuente de sonda, una fibra óptica, un separador, un detector, un procesador, al menos un láser inicial Raman, al menos un láser de bombeo Raman y al menos un acoplador. El detector se acopla ópticamente con el separador y el procesador se acopla con el detector. La fuente de sonda incluye un láser de sonda para generar una luz de sonda que tiene una longitud de onda de sonda. La luz de sonda se acopla ópticamente con la fibra óptica. El separador sirve para separar la luz de señal que se origina en la fibra óptica de la luz acoplada con la fibra óptica. El detector sirve para detectar la luz de señal y el procesador sirve para analizar la señal detectada. El láser inicial Raman sirve para generar una luz inicial Raman con una longitud de onda inicial y una potencia inicial respectivas, y el láser de bombeo Raman sirve para generar una luz de bombeo Raman con una longitud de onda de bombeo y una potencia de bombeo respectivas. El acoplador sirve para acoplar el láser de bombeo Raman y el láser inicial Raman con la fibra óptica. La longitud de onda inicial se encuentra entre la longitud de onda de bombeo y la longitud de onda de sonda. La luz de bombeo Raman, tal luz inicial Raman y tal luz de sonda se propagan a lo largo de la fibra óptica para lograr una amplificación Raman distribuida de la luz de señal producida por la luz de sonda a medida que se propaga a lo largo de la fibra óptica.

De acuerdo con un aspecto adicional de la técnica divulgada, el sistema de detección por fibra óptica además puede incluir un láser de bombeo, acoplado con un cabo de la fibra óptica opuesto a un cabo con el que la fuente de sonda se acopla a la fibra óptica. El láser de bombeo genera una luz de bombeo con una longitud de onda de bombeo y el separador acopla la luz de bombeo con la fibra óptica. La luz de señal es la luz de sonda amplificada por la luz de bombeo y al menos una de la fuente de sonda y el láser de bombeo es pulsado para tener resolución espacial.

Breve descripción de los dibujos

La técnica divulgada se entenderá y apreciará más plenamente a partir de la siguiente descripción detallada tomada junto con los dibujos en los que:

La figura 1 es una ilustración esquemática de un sistema de detección por fibra óptica sin amplificación adicional, como se conoce en la técnica;

La figura 2 es un gráfico de una simulación en la que se utiliza el sistema de detección por fibra óptica de la figura 1, que muestra el valor absoluto de la diferencia entre dos mediciones consecutivas de la luz de sonda en una escala logarítmica, como se conoce en la técnica;

La figura 3 es una ilustración esquemática de un sistema de detección por fibra óptica que utiliza amplificación Raman en línea, como se conoce en la técnica;

La figura 4 es un gráfico de una simulación en la que se utiliza el sistema de detección por fibra óptica de la figura 3, que muestra el valor absoluto de la diferencia entre dos mediciones consecutivas de la luz de sonda en una escala logarítmica, como se conoce en la técnica;

La figura 5 es una ilustración esquemática de un sistema de detección por fibra óptica que utiliza amplificación Raman en línea de segundo orden, como se conoce en la técnica;

La figura 6 es un gráfico de una simulación en la que se utiliza el sistema de detección por fibra óptica de la figura 5, que muestra el valor absoluto de la diferencia entre dos mediciones consecutivas de la luz de sonda en una escala logarítmica, como se conoce en la técnica;

La figura 7 es una ilustración esquemática de un sistema de detección por fibra óptica que utiliza amplificación Raman en línea de segundo orden que requiere acceso a un solo cabo de una fibra óptica, construido y operativo de acuerdo con una realización de la técnica divulgada; La figura 8 es un gráfico de una simulación que utiliza el sistema de detección por fibra óptica de la figura 7 de la técnica divulgada, que muestra el valor absoluto de la diferencia entre dos mediciones consecutivas de la luz de sonda en una escala logarítmica, construido y operativo de acuerdo con otra realización de la técnica divulgada;

La figura 9 es un gráfico que muestra los cambios en la potencia de los diferentes modos Raman a lo largo de la longitud de una fibra óptica que utiliza el sistema de detección descrito en la figura 7 y el sistema de detección de la técnica anterior descrito en la figura 3, construido y operativo de acuerdo con otra realización de la técnica divulgada;

La figura 10 es un gráfico que muestra la amplificación de un pulso de sonda a lo largo de una fibra óptica que utiliza la amplificación Raman descrita anteriormente en las figuras 7-9, construido y operativo de acuerdo con otra realización de la técnica divulgada; y la figura 11 es un gráfico que muestra la potencia promedio teórica de las señales retrodispersadas que alcanzan un detector considerando la potencia de pulso de sonda mostrada en la figura 10 y la ganancia retrodispersada mostrada en la figura 9 en función de la ubicación de la señal retrodispersada en la fibra óptica en comparación con la técnica anterior, construido y operativo de acuerdo con otra realización de la técnica divulgada.

Descripción detallada de las realizaciones

La técnica divulgada supera las desventajas de la técnica anterior al proporcionar un sistema de detección por fibra óptica y un método que utiliza amplificación Raman en línea de segundo orden para ampliar el alcance de amplificación de un sistema de detección sin necesidad de tener acceso a ambos cabos de la fibra óptica y teniendo un control dinámico sobre la ganancia Raman. De este modo, se proporciona un sistema de detección por fibra óptica para explotar la amplificación Raman de alto orden en línea y un método para explotar la amplificación Raman de alto orden en línea en sistemas de sensores de fibra óptica. Esto se consigue mediante una novedosa configuración de sistema de detección por fibra óptica que utiliza dos láseres Raman colocados en una única unidad o alojamiento de control. La técnica divulgada proporciona un control de potencia independiente de la luz de bombeo Raman de segundo orden y de la luz inicial Raman de primer

orden, permitiendo así controlar la ganancia del pulso de sonda y la luz de señal y adaptarla a una aplicación particular de un sistema de detección por fibra óptica. De acuerdo con la técnica divulgada, al bombear la fibra óptica con luz de bombeo que es desplazada por múltiples órdenes de dispersión Raman, es posible aumentar la potencia de bombeo de entrada y la distancia en donde se produce la ganancia Raman por la fibra óptica, ya que, de acuerdo con la técnica divulgada, el factor limitante ya no es la dispersión Raman espontánea de primer orden de la luz de bombeo de entrada. Esto se debe a que la dispersión Raman espontánea de la luz de bombeo se produce a una longitud de onda que difiere significativamente de la longitud de onda de luz de sonda y de la longitud de onda de luz de señal, por lo que puede filtrarse antes de la detección. De acuerdo con la técnica divulgada, la longitud de onda de la luz de bombeo es más corta que la longitud de onda de la luz de sonda, de manera que una diferencia de frecuencia correspondiente entre la longitud de onda de bombeo y la longitud de onda de sonda es un múltiplo de un desplazamiento de frecuencia para el que un coeficiente de dispersión Raman es al menos el 25% de un coeficiente de dispersión Raman resonante.

Además, la técnica divulgada permite el control temporal sobre la ganancia Raman, permitiendo diferentes amplificaciones a los pulsos de sonda y la señal medida en el caso donde la señal medida es contra-propagación de los pulsos de sonda, tal como en el caso de la luz retrodispersada o luz reflejada de Rayleigh o Brillouin a partir de una FBG.

La potencia de bombeo de láser Raman de segundo orden produce por sí sola muy poca ganancia en el pulso de sonda y en la señal retrodispersada. Así pues, la técnica divulgada incluye un láser inicial Raman y un láser de bombeo Raman. El láser inicial Raman estimula la dispersión Raman estimulada (SRS) de la luz de bombeo Raman en el modo Raman de primer orden y, de este modo, actúa como control y ajuste fino para la amplificación Raman de la luz de sonda y la luz de señal.

El modo de láser inicial Raman (también denominado en la presente modo Raman de primer orden) es amplificado por el láser de bombeo Raman mediante SRS a medida que la luz de ambos láseres se propaga a lo largo de la fibra óptica de detección. Ya que el modo Raman de primer orden del láser inicial Raman se amplifica, proporciona amplificación al pulso de sonda y a cualquier señal retrodispersada. La distancia a lo largo de la fibra óptica donde hay una potencia significativa en el modo Raman de primer orden viene determinada por la potencia de bombeo del modo Raman de segundo orden, así como por la potencia inicial del modo Raman de primer orden. Al variar la cantidad de potencia de bombeo del modo Raman de segundo orden y la potencia de láser inicial Raman, de acuerdo con la técnica divulgada, es posible establecer tanto la potencia más alta del modo Raman de primer orden en la fibra óptica como la ubicación a lo largo de la fibra óptica en la que se alcanza esta potencia y, de este modo, la ganancia. De este modo, la cantidad de amplificación distribuida en un sistema de detección por fibra óptica puede adaptarse dinámicamente a un uso particular o específico sin necesidad de acceder a ambos cabos de la fibra óptica. El aumento de la potencia del láser de bombeo Raman o del láser inicial Raman, o el ajuste de su longitud de onda más cerca de la resonancia de dispersión Raman, aumenta la potencia máxima de los pulsos iniciales de modo Raman de primer orden. La ubicación de esta distancia máxima a lo largo de la fibra óptica puede aumentarse al aumentar la potencia de láser de bombeo Raman y al disminuir la potencia de láser inicial Raman (o al ajustar la diferencia de longitud de onda entre los láseres de bombeo Raman e inicial Raman para alejarlos de la resonancia de dispersión Raman). Al utilizar la técnica divulgada, es posible llevar la amplificación pico a cualquier distancia deseable a lo largo de la fibra óptica hasta una distancia de más de 20 km para el bombeo Raman de segundo orden. Esta distancia máxima depende de las longitudes de atenuación tanto de las longitudes de onda del láser de bombeo Raman como del láser inicial Raman, así como del orden Raman utilizado, y puede ampliarse aún más al utilizar un bombeo Raman de orden superior. De este modo, puede optimizarse una característica de la luz inicial Raman para obtener la amplificación de la luz de señal retrodispersada desde una ubicación específica a lo largo de la fibra óptica 222. La característica puede ser la potencia y/o la longitud de onda de la luz inicial Raman. Como se ha mencionado anteriormente, la potencia y/o la longitud de onda del láser de bombeo Raman y/o del láser inicial Raman pueden utilizarse para ajustar con precisión el sistema de detección y la naturaleza de la amplificación Raman en línea proporcionada de acuerdo con la técnica divulgada. Ejemplos de ajuste de la longitud de onda de acuerdo con la técnica divulgada pueden incluir el ajuste de la longitud de onda de bombeo para optimizar un coeficiente de dispersión Raman desde la longitud de onda de bombeo hasta la longitud de onda inicial, el ajuste de la longitud de onda inicial para optimizar el coeficiente de dispersión Raman desde la longitud de onda de bombeo hasta la longitud de onda inicial, desde la longitud de onda de bombeo hasta entre diferentes longitudes de onda iniciales (en un caso donde se utiliza más de un láser inicial Raman) y desde la longitud de onda inicial hasta la longitud de onda de sonda. Por ejemplo, con una bomba Raman de 5 vatios que utiliza potencias de bombeo Raman de tercer orden e inicial Raman de 20 nanovatios y 10 nanovatios respectivamente en los láseres iniciales Raman de segundo orden y primer orden, es posible alcanzar un modo Raman de primer orden máximo de 400 mW a una distancia de 30 km a lo largo de la fibra de detección.

Este control puede lograrse sin exceder el umbral para dispersión Raman espontánea que se solapará de manera espectral con los modos de sonda o de señal, controlando simultáneamente la ganancia pico en el pulso de sonda para garantizar que el nivel de potencia de pulso de sonda se mantenga por debajo del umbral en el que comienzan a aparecer fenómenos no lineales. Esto contrasta con los sistemas de detección de amplificación Raman en línea de primer orden de la técnica anterior, donde la ganancia máxima del pulso de sonda se encuentra necesariamente en el punto donde el láser de bombeo Raman se acopla con la fibra óptica y, de este modo, se acorta el alcance de ganancia de la luz de sonda.

De acuerdo con la técnica divulgada, el mayor alcance de ganancia a lo largo de la longitud de la fibra óptica permite lograr señales retrodispersadas de potencia superior que pueden utilizarse para uno o más de los siguientes:

1. Aumentar la longitud de la fibra óptica a partir de la cual pueden diferenciarse las señales retrodispersadas del ruido de descarga;
2. Mejorar la resolución espacial del pulso de sonda al acortar la longitud de pulso de sonda;
3. Aumentar la SNR general de las señales retrodispersadas para obtener mediciones más precisas de lo que se mide; y
4. Reducir el tiempo de adquisición de las señales retrodispersadas, ya que es necesario promediar menos o incluso no promediar, aumentando así el ancho de banda de la medición de pulso de sonda.

Cabe señalar que la técnica divulgada se describe utilizando un ejemplo de un láser inicial Raman de segundo orden; sin embargo, la configuración de láser de fibra del sistema de detección por fibra óptica puede ampliarse a la dispersión de modo Raman de orden superior con potencias de láser de bombeo Raman superiores. Como se describe a continuación, esto puede lograrse, de acuerdo con la técnica divulgada, con el uso de múltiples láseres iniciales Raman para el control de dispersión Raman de orden múltiple. El control ofrecido por los láseres iniciales Raman juntos puede utilizarse para aumentar la distancia de la potencia de modo Raman de primer orden a lo largo de la fibra óptica desde donde los láseres Raman se acoplan con la fibra óptica.

Con la finalidad de permitir una comparación del rendimiento de la técnica divulgada con la técnica anterior descrita, la técnica divulgada también se describe en el contexto de un sistema de OTDR de fase de detección directa, en el que un cabo de la fibra óptica es inaccesible a la electrónica, el bombeo óptico, las comunicaciones y/o el mantenimiento. Sin embargo, la técnica divulgada no se limita a tales sistemas y puede utilizarse en otros tipos de sistemas de detección por fibra óptica y sistemas de detección. Como se ha mencionado anteriormente, un uso de la técnica divulgada se encuentra en situaciones y escenarios donde un cabo de una fibra óptica es inaccesible, tal como en perforación profunda en la superficie terrestre. Otro uso es en el monitoreo de fronteras, donde hay que minimizar el número de centros o estaciones de control. La técnica divulgada puede utilizarse en otros escenarios donde un amplificador no deba o no pueda colocarse en algún lugar a lo largo de la fibra óptica para aumentar el alcance de amplificación.

En el caso del control de fronteras, no es deseable tener que levantar edificios cada par de kilómetros o incluso decenas de kilómetros a los que suministrar electricidad para amplificar una señal y luego requerir también protección adicional a lo largo de la frontera para proteger un edificio que albergue un amplificador. De acuerdo con la técnica divulgada, puede colocarse un cable de fibra óptica normal a lo largo de una frontera, es decir, un cableado de telecomunicación normal, no fuera de lo común, sin necesidad de colocar muchos amplificadores a lo largo de la frontera. Si se coloca un amplificador en algún lugar a lo largo de la fibra óptica, se necesita energía para el amplificador, por lo tanto, incluso si se compromete la capacidad de mantenimiento y estos amplificadores se colocan bajo tierra para evitar la necesidad de proporcionar seguridad a un edificio visible, cada amplificador colocado a lo largo de una fibra óptica aumenta el coste del sistema de detección debido a que sigue siendo necesario llevar energía a los amplificadores.

Otros usos de la técnica divulgada pueden incluir comprobación de temperatura a lo largo de una gran distancia, monitoreo de vías férreas, carreteras, tuberías y otras infraestructuras, incluyendo el monitoreo de la estabilidad de edificios, puentes y otras grandes estructuras, la comprobación de presión a lo largo de una gran distancia, así como el flujo de petróleo u otros líquidos en una tubería a lo largo de una gran distancia. En este contexto, una gran distancia puede ser de cientos a miles de kilómetros. De acuerdo con la técnica divulgada, pueden utilizarse otros tipos de señales retrodispersadas además de la dispersión Raman para determinar lo que se mide a lo largo de una fibra óptica o pueden utilizarse para extraer información sobre una perturbación a lo largo de una fibra óptica. La técnica divulgada puede representarse utilizando la dispersión de Rayleigh en OTDR, así como en sistemas de reflectometría óptica en dominio de frecuencia (en la presente abreviado como OFDR). Como se ha mencionado anteriormente, una perturbación representa un cambio en el patrón de dispersión analizado en un procesador y puede ser causada por un cambio en temperatura, un cambio en presión o un cambio en otros fenómenos físicos que pueden causar un cambio local en el índice de refracción de la fibra o pueden afectar a un patrón de dispersión. La técnica divulgada también puede representarse utilizando la dispersión Brillouin en sistemas de OTDR. Por ejemplo, los desplazamientos por dispersión Brillouin miden un cambio en la temperatura o deformación, por lo que este fenómeno es adecuado para usos donde lo que se mide es la temperatura o la deformación. En tales realizaciones de la técnica divulgada, la señal medida no necesita propagarse hacia atrás a partir del punto de medición. En BOTDA (análisis óptico de Brillouin en dominio de tiempo), la señal medida es la luz de sonda que se propaga hacia delante y se amplifica mediante una luz de bombeo Brillouin que se contrapropaga. En esta realización, al menos uno del láser de sonda y el láser de bombeo (que genera la luz de bombeo Brillouin) puede ser pulsado para tener resolución espacial. Ambos pueden ser amplificados por la técnica divulgada. Cabe señalar asimismo que, de acuerdo con la técnica divulgada, un procesador puede analizar diferentes patrones de dispersión recibidos y categorizarlos de acuerdo con el tipo de objeto que haya causado la perturbación y el cambio en el patrón de dispersión. Por ejemplo, en un sistema de detección de cruce de fronteras, pueden identificarse diferentes patrones de dispersión que representan automóviles, animales, personas y similares.

Se hace referencia ahora a la figura 7, la cual es una ilustración esquemática de un sistema de detección por fibra óptica que utiliza amplificación Raman en línea de segundo orden que requiere acceso sólo a un cabo de una fibra óptica, generalmente referenciado 200, construido y operativo de acuerdo con una realización de la técnica divulgada. El sistema de detección por fibra óptica 200 incluye una unidad de interrogación 202 y una fibra óptica 222. La unidad de interrogación 202 incluye una fuente de sonda 203, un separador 208, un detector 210, un procesador 212, un acoplador 214, un láser inicial Raman 216 y un láser de bombeo Raman 218. La fuente de sonda 203 incluye un láser de sonda 204 y un modulador

206. El modulador 206 es un componente opcional. La fibra óptica 222 incluye un cabo de fibra 220, el cual puede ser inaccesible. La fuente de sonda 203 se acopla con el separador 208. En una realización (como se muestra) el modulador 206 se acopla con el láser de sonda 204 y con el separador 208. El detector 210 se acopla con el procesador 212 y se acopla ópticamente con el separador 208 para recibir y detectar señales procedentes del separador 208. El acoplador 214 se acopla con el separador 208, el láser inicial Raman 216, el láser de bombeo Raman 218 y la fibra óptica 222. La unidad de interrogación 202 representa un punto de control, un centro de control o un punto de acceso para la instalación del sistema de detección de la técnica divulgada. Para fines de simplicidad, se omite cualquier etapa de amplificación que pudiera utilizarse en el sistema de detección por fibra óptica 200 antes de suministrar la luz de sonda a la fibra óptica 222 o antes de proporcionar la luz retrodispersada al detector 210.

El láser de sonda 204 puede ser cualquier tipo de láser de ancho de línea estrecho. El láser de sonda 204 puede ser un láser de fase barrida, un láser de fase modulada, un láser de frecuencia modulada o un láser de amplitud modulada. El láser de sonda 204 genera una luz de sonda que viaja a lo largo de la fibra óptica 222 y que produce señales de luz retrodispersadas que finalmente son recibidas por el detector 210. La luz de sonda puede ser una luz de onda continua o un pulso de luz. El modulador 206 es un componente opcional y no es esencial para la configuración mostrada en la figura 7. El modulador 206 puede ser cualquier modulador conocido para modular la luz láser, tal como un modulador acústico-óptico, un modulador de electroabsorción o un modulador electroóptico, y su uso depende del esquema de medición deseado. Por ejemplo, en los sistemas de OTDR, el modulador crea un pulso de sonda y determina la resolución espacial. A continuación, la señal medida se correlaciona con una ubicación del evento de dispersión mediante una determinación de tiempo de vuelo. En los sistemas de OFDR, no se utiliza el modulador y la correlación espacial se determina de acuerdo con el patrón de pulsación de la señal y el láser de sonda 204, que en este caso es un láser de barrido de frecuencia. El separador 208 se utiliza para separar el pulso de sonda que se propaga hacia delante de cualquier luz retrodispersada procedente de la fibra óptica 222. El separador 208 puede ser un circulador, un acoplador, un filtro de WDM o cualquier otro elemento conocido que pueda separar los haces de luz que se propagan hacia delante de los que se propagan hacia atrás. El detector 210 puede ser cualquier detector de luz conocido con un ancho de banda que oscile de unos pocos megahercios (en la presente abreviado como MHz) a decenas de gigahercios (en la presente abreviado como GHz). El tipo de detector utilizado para el detector 210 puede ser, entre otros, un fotodiodo, un fotodiodo de avalancha y un tubo de fotomultiplicador. El acoplador 214 acopla los pulsos de luz producidos por el láser inicial Raman 216 y el láser de bombeo Raman 218 a la fibra óptica 222 y puede ser incorporado como cualquier tipo de acoplador de luz. Por ejemplo, el acoplador 214 puede ser un WDM, un acoplador 2x2 y similares. El láser inicial Raman 216 y el láser de bombeo Raman 218 pueden ser láseres de diodo, láseres de fibra Raman y similares. En una realización, el láser inicial Raman 216 puede ser un diodo láser, mientras que el láser de bombeo Raman 218 puede ser un láser de fibra, un diodo láser o un láser de fibra Raman. El láser de bombeo Raman 218 puede operar en un modo de onda continua (en la presente abreviado como CW) o en un modo pulsado. En las realizaciones mostradas, el láser inicial Raman 216 es modulado y no pulsado, sin embargo, en otras realizaciones, puede ser pulsado. Como se muestra, la unidad de interrogación 202 incluye un único láser de bombeo Raman y un único láser inicial Raman, sin embargo, en otras realizaciones de la técnica divulgada, como se describe a continuación, la unidad de interrogación 202 puede incluir una pluralidad de láseres iniciales Raman y/o láseres de bombeo Raman, si se desea una amplificación Raman de orden superior. En la realización mostrada, tanto el láser inicial Raman 216 como el láser de bombeo Raman 218 se acoplan con el acoplador 214 después del separador 208. En otras realizaciones de las técnicas divulgadas, el láser inicial Raman 216 y el láser de bombeo Raman 218 pueden acoplarse entre el separador 208 y el modulador 206 (no mostrado). El láser inicial Raman 216 y el láser de bombeo Raman 218 también pueden acoplarse por separado con la fibra óptica 222 (no mostrada), con cada uno del láser inicial Raman 216 y el láser de bombeo Raman 218 siendo acoplado mediante un acoplador separado (no mostrado). Además, en la configuración mostrada en la figura 7, el láser inicial Raman 216 y el láser de bombeo Raman 218 se acoplan con un cabo de la fibra óptica 222 de tal forma que el cabo de fibra 220 pueda permanecer inaccesible. En otras realizaciones de la técnica divulgada, uno del láser inicial Raman 216 o láser de bombeo Raman 218 puede acoplarse con el cabo de fibra 220 (no mostrado). Aunque tal configuración pierde la ventaja de requerir únicamente el acceso a un cabo de la fibra óptica 222, tal configuración tiene la ventaja de lograr un alcance aún mayor a lo largo de la fibra óptica en comparación con la configuración mostrada en la figura 7. La configuración mostrada en la figura 7 utiliza la detección directa de la señal (es decir, luz retrodispersada). En otras realizaciones de la técnica divulgada, la señal se combina con la salida del láser de sonda 204 para permitir la detección coherente en un único detector o detector equilibrado (mostrado como detector 210). Esta señal es la señal separada por el separador 208. En general, la detección puede ser detección homodina o detección heterodina. También, la luz de señal detectada por el detector 210, dependiendo del uso particular del sistema de detección de la figura 7, puede ser luz reflejada, luz amplificada, luz retrodispersada, luz dispersada hacia adelante, luz dispersada Raman, luz dispersada Brillouin o luz dispersada Rayleigh generada a partir de la luz de sonda producida por el láser de sonda 204. La señal detectada se proporciona desde el detector 210 al procesador 212, que puede analizar la señal de luz detectada para obtener información con respecto a la fibra óptica 222, un entorno donde se coloca la fibra óptica 222 o ambos. Cabe señalar asimismo que la señal detectada puede correlacionarse con la luz de sonda o el pulso de sonda. Esto se hace para reducir el tiempo entre los pulsos de sonda y puede plasmarse codificando cada pulso de sonda con un patrón. De este modo, pueden transmitirse varios pulsos de sonda en un solo tiempo de ida y vuelta. La ambigüedad de la luz de señal entre los distintos pulsos de sonda transmitidos en un mismo tiempo de ida y vuelta puede eliminarse mediante la correlación de la luz de señal recibida con los diferentes patrones.

De acuerdo con la técnica divulgada, la luz láser a dos longitudes de onda diferentes se acopla con la fibra óptica 222 mientras que el láser de sonda 204 proporciona luz de sonda a la fibra óptica 222 que puede convertirse en pulsos de sonda mediante el modulador 206. El láser de bombeo Raman 218 proporciona luz de bombeo, mientras que el láser

inicial Raman 216 proporciona luz inicial. El láser de bombeo Raman 218 proporciona luz de alta potencia, mientras que el láser inicial Raman 216 proporciona luz de menor potencia. En una realización, el láser de bombeo Raman proporciona luz de bombeo durante todo el ciclo de medición y el láser inicial Raman sólo proporciona pulsos iniciales entre los pulsos de sonda. En otra realización, la potencia de luz inicial Raman disminuye durante los pulsos de sonda, pero no hasta cero.

5 Esto se hace para evitar que los pulsos iniciales aumenten la potencia de los pulsos de sonda por encima de un umbral en el que puedan producirse fenómenos no lineales dentro de la fibra óptica 222. En una realización, el láser de bombeo Raman 218 proporciona pulsos de luz que tienen una potencia de entre 50 mW y 10 vatios, mientras que el láser inicial Raman 216 proporciona pulsos de luz que tienen una potencia de menos de 10 mW. En general, una característica de la luz inicial producida por el láser inicial Raman 216 y/o la luz de bombeo producida por el láser de bombeo Raman 218

10 puede modularse en correlación con los cambios en la potencia en la luz de sonda. La característica puede ser la potencia y/o la longitud de onda del láser inicial Raman y/o del láser de bombeo Raman. Esto se hace con la finalidad de evitar una alta potencia en la luz de sonda que puede causar la aparición de fenómenos no lineales en cualquier lugar a lo largo de la fibra óptica 222. La luz de alta potencia proporcionada por el láser de bombeo Raman 218 se proporciona con un desplazamiento de longitud de onda de casi el doble del desplazamiento Raman de la luz de sonda. Por ejemplo, si el láser de sonda 204 produce luz que tiene una longitud de onda de 1550 nanómetros (en la presente abreviado como nm),

15 entonces el láser de bombeo Raman 218 puede generar luz de bombeo que tiene una longitud de onda de 1340-1400 nm con un desplazamiento Raman de 150-210 nm (equivalente a un desplazamiento de frecuencia de entre 20-30 terahercios (en la presente abreviado como THz)). El láser de bombeo Raman 218 entonces podría tener una potencia que oscila de 50 milivatios a 10 vatios. La luz de baja potencia proporcionada por el láser inicial Raman 216 se proporciona con una longitud de onda cercana al pico Raman Stokes de la luz de bombeo y un desplazamiento de longitud de onda Raman Stokes cercano a la longitud de onda de la luz de sonda. Por ejemplo, si el láser de sonda 204 produce luz de sonda que tiene una longitud de onda de 1550 nm, el láser inicial Raman 216 puede generar luz inicial que tiene una longitud de onda de 1430-1500 nm con un desplazamiento Raman de 50-120 nm (equivalente a un desplazamiento de frecuencia de entre 7-16 THz). El láser inicial Raman 216 entonces podría tener una potencia de menos de 10 milivatios. En general, la

25 longitud de onda de la luz inicial debe estar entre la longitud de onda de la luz de bombeo y la longitud de onda de la luz de sonda. Como se menciona anteriormente, las longitudes de onda de la luz de sonda, la luz de bombeo Raman y la luz inicial Raman deben seleccionarse dentro de un intervalo y una relación particulares para que la técnica divulgada consiga la amplificación Raman en línea de segundo orden requerida. En general, de acuerdo con la técnica divulgada, la longitud de onda de la luz de bombeo es más corta que la longitud de onda de la luz de sonda, de manera que una diferencia de frecuencia correspondiente entre la longitud de onda de bombeo y la longitud de onda de sonda es un múltiplo de un desplazamiento de frecuencia para el que un coeficiente de dispersión Raman es al menos el 25% de un coeficiente de dispersión Raman resonante. En una realización de la técnica divulgada, la longitud de onda de bombeo, la longitud de onda inicial y la longitud de onda de sonda se seleccionan de forma que una diferencia de frecuencia correspondiente entre la longitud de onda de bombeo y la longitud de onda de sonda sea el doble de un desplazamiento de frecuencia para el que un coeficiente de dispersión Raman (o un coeficiente de dispersión Raman de orden único) sea al menos el 25% del coeficiente de dispersión Raman resonante. En esta realización, las longitudes de onda también se eligen de tal manera que la diferencia de frecuencia entre la longitud de onda inicial y la longitud de onda de sonda y entre la longitud de onda inicial y la longitud de onda de bombeo es un desplazamiento de frecuencia para el que el coeficiente de dispersión Raman es de al menos 25% en comparación con un desplazamiento de frecuencia de dispersión Raman resonante. Se observa que en una realización de la técnica divulgada, la potencia de láser de sonda 204 no debe exceder 1 vatio.

Es deseable tener una ganancia bien distribuida por toda la fibra óptica para superar la atenuación tanto de los pulsos de sonda como de la luz retrodispersada. De acuerdo con la técnica divulgada, la luz de bombeo Raman y la luz inicial Raman interactúan junto con la fibra de detección para lograr la amplificación Raman distribuida de la luz retrodispersada (es decir, la luz de señal) generada a partir de la luz de sonda a medida que se propaga a lo largo de la fibra de detección. Utilizando el láser de bombeo Raman 218 y el láser inicial Raman 216, la ganancia proporcionada a la fibra óptica 222 puede ajustarse y adaptarse dependiendo del uso del sistema de detección por fibra óptica 200. Por ejemplo, al aumentar la potencia de luz de bombeo y al disminuir la potencia de la luz inicial, la ganancia puede avanzar a lo largo de la fibra

50 óptica. Sin embargo, al disminuir la potencia de la luz de bombeo y al aumentar la potencia de la luz inicial, la ganancia puede desplazarse hacia atrás a lo largo de la fibra óptica más cerca del acoplador 214. Se observa que en una realización de la técnica divulgada, la longitud de la fibra óptica 222 debe ser mayor que 10 km y la fibra óptica 222 debe estar incorporada como una fibra óptica de un solo modo.

55 Se observa que en el sistema de detección de la figura 7, el láser inicial Raman 216 y el láser de bombeo Raman 218 se copropagan con la luz generada por el láser de sonda 204. Como se menciona anteriormente, en otras realizaciones de la técnica divulgada, al menos uno del láser inicial Raman 216 y el láser de bombeo Raman 218 (o ambos) también se acoplan con el cabo de fibra 220. En tal realización, la luz inicial y/o la luz de bombeo pueden copropagarse con la luz de sonda, contrapropagarse con la luz de sonda o propagarse bidireccionalmente con la luz de sonda.

60 Se hace referencia ahora a la figura 8, la cual es un gráfico de una simulación utilizando el sistema de detección por fibra óptica de la figura 7 de la técnica divulgada, que muestra el valor absoluto de la diferencia entre dos mediciones de luz de sonda consecutivas en una escala logarítmica, generalmente referenciado 240, construido y operativo de acuerdo con otra realización de la técnica divulgada. El gráfico 240 incluye un eje X 242, que muestra la distancia en kilómetros a lo largo de una fibra óptica (por ejemplo, la fibra óptica 222 de la figura 7), y un eje Y 244, que muestra la potencia en dBm. La simulación que se muestra se ha diseñado para mostrar perturbaciones entre las mediciones a lo largo de la fibra

óptica a las siguientes distancias: 15 km, 40 km, 65 km, 90 km y 115 km. La simulación mostrada en la figura 8 utiliza los mismos parámetros que la simulación mostrada anteriormente en la figura 2, aunque con los siguientes parámetros adicionales. La potencia del láser de bombeo Raman se fijó en 1,9 vatios, produciendo luz de bombeo Raman de segundo orden, la potencia del láser inicial Raman se fijó en 22 nanovatios cuando se generan los pulsos de sonda y en 1 microvatio en otros momentos, produciendo luz de modo Raman de primer orden. Estas potencias de bombeo se eligieron para evitar que la luz de modo Raman de primer orden superara el límite de 400 mW para la dispersión Raman espontánea en todas las ubicaciones a lo largo de la fibra óptica y para evitar que la potencia de pulso de sonda superara el límite de 5 mW por encima del cual comenzarían a producirse fenómenos no lineales.

Como puede verse, una envolvente 246 muestra un nivel de potencia relativamente plano del ruido (que muestra una variación de aproximadamente 10 dB), lo que indica un nivel de potencia relativamente plano (que muestra una variación de aproximadamente 20 dB) en comparación con las envolventes mostradas en las figuras 2, 4 y 6 anteriores, que representan la técnica anterior. La envolvente 246 también se atenúa finalmente hasta niveles en los que el ruido de descarga es comparable con el nivel de señal, aunque esto ocurre a distancias cercanas a 150 km. Los picos de perturbación en las distancias designadas de 15 km, 40 km, 65 km, 90 km y 115 km son claramente visibles, mostrados por las flechas 248A, 248B, 248C, 248D y 248E. La flecha 250 indica una disminución en la potencia de retrodispersión, mientras que la flecha 252 indica un máximo en la potencia de retrodispersión. Esta caída y este máximo son ajustables y regulables de acuerdo con la técnica divulgada al ajustar los niveles de potencia de la potencia inicial de modo Raman de primer orden y la potencia de bombeo Raman de segundo orden. El aumento de la potencia de luz de bombeo y la disminución de la potencia de luz inicial se desplaza al máximo en la potencia de pulso de sonda (mostrada por la flecha 252) hacia adelante a lo largo de la fibra óptica, mientras que la disminución de la potencia de luz de bombeo y el aumento de la potencia de luz inicial se desplaza al máximo en la potencia de pulso de sonda (mostrada por la flecha 252) hacia atrás a lo largo de la fibra óptica y disminuye la caída mostrada por la flecha 250. Como se explica anteriormente, la técnica divulgada utiliza la dispersión Raman de segundo orden controlable para crear una ganancia bien distribuida que llega hasta lo más profundo de la fibra óptica. El control tanto de la potencia de luz de bombeo Raman como de la potencia de pulso inicial Raman permite ajustar dinámicamente la distribución de la ganancia para una amplificación óptima del pulso de sonda y de la señal de luz retrodispersada.

Se hace referencia ahora a la figura 9, la cual es un gráfico que muestra los cambios en la potencia de los diferentes modos Raman a lo largo de la longitud de una fibra óptica utilizando el sistema de detección descrito en la figura 7 y el sistema de detección de la técnica anterior descrito en la figura 3, generalmente referenciado 270, construido y operativo de acuerdo con una realización adicional de la técnica divulgada. La figura 9 describe los cambios en la potencia de los diferentes modos Raman a medida que se propagan por la fibra óptica utilizando el sistema de detección de la figura 7, suponiendo que la potencia de señal retrodispersada es relativamente pequeña (como se muestra en la figura 8) y no agota la potencia de modo Raman de primer orden. Para fines de comparación, la figura 9 también muestra la distribución de potencia de la luz de bombeo Raman para la amplificación Raman en línea utilizando el sistema de detección de la técnica anterior de la figura 3.

El gráfico 270 incluye un eje X 272 que muestra la distancia a lo largo de una fibra óptica en kilómetros y un eje Y 274 que muestra la potencia en vatios. La línea 276 muestra un umbral para la dispersión Raman espontánea de 400 mW por encima del cual la dispersión Raman espontánea del modo Raman de primer orden puede disminuir la SNR. Una línea 278 representa la potencia de una potencia de modo Raman de primer orden de la técnica anterior, una línea 280 representa la potencia de la potencia de modo Raman de primer orden de la técnica divulgada como se muestra en la figura 7 y una línea 282 representa la potencia del bombeo de modo Raman de segundo orden de la técnica divulgada como se muestra en la figura 7. Como se muestra en la línea 282, se permite que la potencia inicial de la luz de bombeo de modo Raman de segundo orden supere el umbral de 400 mW mostrado por la línea 276 por un factor de cinco (cerca de 2 vatios), ya que la dispersión Raman espontánea debe seguir siendo pequeña en comparación con el modo Raman de primer orden, en lugar de la baja potencia de las señales retrodispersadas. La línea 282 muestra la atenuación de la luz de bombeo de modo Raman de segundo orden con una constante de atenuación de 0,3 dB/km debido a SRS. Además, utilizando SRS, la potencia se transfiere desde la luz de bombeo Raman de segundo orden hasta la luz inicial Raman de primer orden, como se muestra por el máximo de la línea 280, mostrada como flecha 284. La máxima de la potencia de modo inicial Raman de primer orden se limita a la potencia mostrada por la línea 276 para evitar la dispersión Raman espontánea. Las potencias iniciales del modo inicial Raman (línea 280) y del modo de bombeo Raman (línea 282) determinan la ubicación y la amplitud de la potencia pico (flecha 284) del modo inicial Raman de primer orden. En la figura 9, se eligió una potencia inicial Raman de 1 microvatio para que la potencia de modo inicial Raman de primer orden alcance una potencia máxima de 400 mW a una distancia de poco más de 20 km a lo largo de la fibra óptica. Como se menciona anteriormente, para fines de comparación, la potencia de una potencia de modo Raman de primer orden para la amplificación en línea, como se muestra en el sistema de detección de la técnica anterior de la figura 3, se muestra como una línea 278, que tiene la misma potencia de pico de 400 mW que la potencia pico máxima de la luz inicial de la invención divulgada y se atenúa a lo largo de la longitud de la fibra óptica. La ganancia Raman proporcionada al pulso de sonda es proporcional a la potencia de las luces de bombeo de modo Raman de primer orden, mostradas como líneas 278 (en el caso de la técnica anterior) y 280 (en el caso de la técnica divulgada). Como se ve en la figura 9, la invención divulgada tiene las siguientes ventajas sobre la técnica anterior. En primer lugar, la ganancia pico del modo Raman de primer orden es más profunda en la fibra óptica. En segundo lugar, la curva de ganancia tiene una larga cola en la fibra óptica. Como referencia, la potencia a la que la amplificación Raman anula exactamente la atenuación a lo largo de la fibra óptica de 0,2 dB/km es de 60 mW. Aunque este nivel de potencia se alcanza en alrededor de 30 km con los sistemas

de detección de amplificación Raman en línea de la técnica anterior, la técnica y el esquema de amplificación divulgados permiten alcanzar esta ganancia a más de 50 km. La ganancia total proporcionada al pulso de sonda en cada punto a partir de 15 km y más es mayor utilizando la amplificación de luz inicial de modo Raman de segundo orden de la técnica divulgada. Incluso la menor amplificación de la técnica divulgada comparada con el bombeo de modo Raman de primer orden de la técnica anterior más cercano al detector del sistema de detección, mostrado por una flecha 288, tiene una ventaja. Puesto que la potencia de luz de bombeo inicial (línea 280) es muy baja y no se amplifica cerca del cabo de fibra más cercano a un acoplador (no mostrado), la amplificación del pulso de sonda es posible sin reducir la potencia pico inicial del pulso de sonda.

Se hace referencia ahora a la figura 10, la cual es un gráfico que muestra la amplificación de un pulso de sonda a lo largo de una fibra óptica utilizando la amplificación Raman descrita anteriormente en las figuras 7-9, generalmente referenciada 300, construida y operativa de acuerdo con otra realización de la técnica divulgada. El gráfico 300 se generó utilizando los mismos parámetros para el sistema de detección por fibra óptica 200 (figura 7) que se utilizaron en la simulación mostrada anteriormente en la figura 8. El gráfico 300 incluye un eje X 302 que muestra la distancia a lo largo de una fibra óptica en kilómetros y un eje Y 304 que muestra la potencia en milivatios. Una línea 306 muestra la potencia de un pulso de sonda a medida que se propaga a lo largo de una fibra óptica sin amplificación, tal como se describe anteriormente en el sistema de detección de la técnica anterior de la figura 1. Una línea 308 muestra la potencia de un pulso de sonda amplificado por una luz inicial de modo Raman de primer orden (no mostrada) que tiene una potencia de entrada de 22,5 nanovatios de modo que la potencia del pulso de sonda no exceda un umbral de 5 mW. De forma similar a la línea 306, la potencia de la línea 308 se atenúa con la distancia, como se muestra por una flecha 310, sin embargo, puesto que la amplificación de acuerdo con la técnica divulgada empuja la ganancia a lo largo de la fibra óptica, la potencia del pulso de sonda se amplifica a cierta distancia a lo largo de la fibra óptica, como se muestra por una flecha 312, alcanzando su máximo a alrededor de 50 km a lo largo de la fibra óptica. Aunque que la potencia del pulso de sonda se atenúa por aproximadamente 0,3 dB/km en la técnica anterior (línea 306), la técnica divulgada permite que la potencia del pulso de sonda se mantenga por encima del 10% del valor umbral (alrededor de 0,5 mW) hasta una distancia de más de 100 km. Esta amplificación diferencial a medida del pulso de sonda y de la señal retrodispersada no es posible utilizando las técnicas del arte anterior. El sistema de la técnica anterior de la figura 3 no tiene el alcance de amplificación que se muestra, mientras que el sistema de la técnica anterior de la figura 5 carece de la libertad de control temporal sobre el modo inicial Raman necesaria para la amplificación diferencial.

Se hace referencia ahora a la figura 11, la cual es un gráfico que muestra la potencia promedio teórica de las señales retrodispersadas que alcanzan un detector considerando la potencia de pulso de sonda mostrada en la figura 10 y la ganancia retrodispersada mostrada en la figura 9 en función de la ubicación de la señal retrodispersada en la fibra óptica en comparación con la técnica anterior, generalmente referenciada 320, construida y operativa de acuerdo con otra realización de la técnica divulgada. El gráfico 320 incluye un eje X 322 que representa una distancia a lo largo de una fibra óptica desde la cual la señal retrodispersada se propaga hacia un detector (no mostrado) en un sistema de detección y un eje Y 324 que representa la potencia con respecto a una potencia de referencia común. Una línea 326 representa la potencia promedio de una señal retrodispersada que llega al detector sin ninguna amplificación (tal como en el sistema de detección de la técnica anterior de la figura 1). Una línea 328 representa la potencia promedio de una señal retrodispersada que llega al detector utilizando sólo amplificación Raman de primer orden (tal como en el sistema de detección de la técnica anterior de la figura 3). Una línea 330 representa la potencia promedio de una señal retrodispersada que llega al detector utilizando amplificación Raman de segundo orden en donde el modo inicial Raman es generado por FBGs que forman un UFRL (tal como en el sistema de detección de la técnica anterior de la figura 5) y sólo se bombea el cabo de la fibra óptica. Una línea 332 representa la potencia promedio de una señal retrodispersada que llega al detector utilizando el esquema de amplificación de la técnica divulgada, en donde la potencia de la luz de bombeo y el pulso inicial se controlan independientemente (tal como en el sistema de detección de la figura 7).

Las líneas 326, 328, 330 y 332 representadas en la figura 11 se muestran en una escala logarítmica dividida por la señal retrodispersada que resulta de un pulso de sonda de 5 mW en el punto de la fibra óptica más cercano a la unidad de interrogador (no mostrada). En el caso de sin amplificación Raman (línea 326), la señal retrodispersada decae a lo largo de la fibra óptica con una atenuación de 0,4 dB/km, lo cual se debe a una atenuación de 0,2 dB/km para cada uno del pulso de sonda y la señal retrodispersada. En el caso de la amplificación Raman de primer orden (línea 328), hay un aumento inicial de la señal retrodispersada de hasta aproximadamente 17 km, mostrado por una flecha 340, en cuyo punto la señal empieza a decaer. En el caso de la amplificación Raman de segundo orden de la técnica anterior (línea 330), la potencia relativa es sustancialmente menor que incluso el caso de sin amplificación debido a la baja potencia de pulso de sonda requerida para evitar el umbral no lineal con amplificación en línea, sin embargo, un fuerte aumento comienza alrededor de 20 km y supera la señal retrodispersada de la amplificación de primer orden de alrededor de 30 km (mostrado por una flecha 335). En la técnica divulgada (línea 332), la señal retrodispersada disminuye inicialmente pero alrededor de los 15 km aumenta, mostrado por una flecha 334 y alcanza un pico alrededor de los 50 km, mostrado por una flecha 336. La línea 338 muestra la potencia máxima de señal retrodispersada utilizando sólo amplificación Raman de primer orden. Como se muestra por la línea 338, la potencia de señal retrodispersada utilizando la amplificación Raman de la técnica divulgada sigue siendo mayor que la potencia máxima de señal retrodispersada de la amplificación Raman de primer orden hasta alrededor de 90 km. Después de la amplificación Raman, todas las señales retrodispersadas decaen a una tasa de 0,4 dB/km, sin embargo, la potencia de señal global de la señal retrodispersada de la técnica divulgada sigue siendo más de 8 dB más grande a lo largo de la fibra óptica, incluso cuando la señal retrodispersada se atenúa, en comparación con los esquemas de amplificación Raman de la técnica anterior. Los parámetros elegidos para

la simulación mostrada en la figura 11 son valores típicos, presentando así los beneficios de la técnica divulgada con respecto a la técnica anterior.

Cabe señalar que la técnica divulgada no se limita a los parámetros elegidos para la generación del gráfico 320, incluyendo las potencias seleccionadas del láser de sonda, el láser de bombeo Raman y el láser inicial Raman. Los gráficos mostrados en las figuras 8-11 se trajeron meramente como ejemplos de los beneficios y usos de la técnica divulgada. De acuerdo con la técnica divulgada, la amplificación Raman que utiliza amplificación de orden N se utiliza para controlar la ganancia proporcionada a un pulso de sonda en un sistema de detección por fibra óptica, donde N es dos o más. En general, de acuerdo con la técnica divulgada, se utiliza un láser de bombeo Raman que tiene una longitud de onda tal que la enésima resonancia de dispersión Raman coincide con la longitud de onda de la luz de sonda. Los láseres iniciales Raman se utilizan con longitudes de onda cercanas a todas las resonancias de dispersión Raman N-1 intermedias de la luz de bombeo Raman. Los láseres de bombeo Raman pueden acoplarse con uno o ambos cabos de la fibra óptica de detección. La potencia en los láseres iniciales Raman puede modificarse de acuerdo con la potencia de pulso de sonda, optimizando así la amplitud y distribución de la ganancia tanto para el pulso de sonda como para la señal retrodispersada. Como se ha mencionado anteriormente, por ejemplo, los láseres iniciales de orden superior (que pueden ser un láser inicial o más) pueden apagarse durante la transmisión del pulso de sonda para evitar la amplificación Raman del pulso de sonda. Alternativamente, las potencias de luz inicial de orden superior pueden fijarse de forma que proporcionen una ganancia sustancial sólo a una distancia donde la potencia del pulso de sonda esté significativamente atenuada. En una realización, el láser de bombeo Raman y los láseres iniciales Raman se copropagan con el láser de sonda. En otras realizaciones en las que el cabo más alejado de la fibra de detección es accesible, el láser de bombeo Raman y los láseres iniciales Raman pueden acoplarse con ambos cabos de la fibra de detección. Es posible controlar la ganancia diferencial del pulso de sonda y la luz retrodispersada al cambiar dinámicamente la potencia de la luz inicial Raman, desplazada por una resonancia Raman desde la luz de sonda. Por lo tanto, en una realización de la técnica divulgada es posible sustituir todos los láseres iniciales Raman menos uno o sustituir algunos de los láseres iniciales Raman utilizando al menos un par de FBG colocado en ambos cabos (uno en cada cabo) de la fibra de detección (siempre que sean accesibles), formando así un URFL de orden múltiple de acuerdo con la técnica divulgada. En tal realización, cada FBG en cada par FBG debe tener una alta reflectividad en longitudes de onda con al menos 25% de eficiencia de dispersión Raman de una dispersión Raman resonante en órdenes en las que no se genera la luz inicial Raman generada por un láser inicial Raman.

Como se menciona anteriormente, puede utilizarse una amplificación Raman de orden superior (es decir, de tercer orden y más) si el alcance de la ganancia debe extenderse más allá de 50 km. Por ejemplo, la amplificación Raman de tercer orden es posible con un diodo de bombeo que tenga una longitud de onda tal que la resonancia de dispersión Raman de tercer orden coincida con la longitud de onda del pulso de sonda. Como se ha mencionado, en este caso pueden utilizarse dos láseres iniciales Raman (no mostrados), con el primero cerca de la primera resonancia de dispersión Raman del diodo de bombeo y con el segundo cerca de la segunda resonancia de dispersión Raman del diodo de bombeo. En otra realización de amplificación Raman de orden superior de la técnica divulgada, uno de los láseres iniciales Raman puede sustituirse por un par de FBG en los cabos de fibra óptica, utilizando así los niveles de potencia del láser de bombeo Raman de tercer orden y del láser inicial Raman para controlar la potencia máxima y la ubicación de la ganancia Raman para el pulso de sonda y/o la señal retrodispersada. Sin embargo, en esta realización, se requiere acceso a ambos cabos de la fibra óptica.

Como se entiende, la técnica divulgada puede utilizarse en sistemas de OTDR, sistemas de OFDR, sistemas de BOTDA, sistemas de BOTDR, sistemas de detección de propagación hacia delante y sistemas de detección de propagación hacia atrás.

Como se muestra en la figura 11, la ganancia de la amplificación Raman de segundo orden, ya sea por la técnica anterior (línea 330) o de acuerdo con la técnica divulgada (línea 332), es menor que la de la amplificación Raman de primer orden (línea 328) para los primeros 25 km aproximadamente de la fibra óptica. De acuerdo con la técnica divulgada, la amplificación en esta región es posible de la siguiente manera. Puesto que esta sección de la fibra óptica es la más cercana al detector del sistema de detección (no mostrado), es posible agregar un láser de bombeo adicional al sistema de detección por fibra óptica 200 (figura 7), acoplado con el acoplador 214 (figura 7) para actuar como amplificación adicional para suministrar ganancia al cabo de la fibra óptica 222 (figura 7) más cercano al acoplador 214. En una realización, este láser de bombeo adicional puede ser un láser de bombeo Brillouin con un desplazamiento de longitud de onda de aproximadamente 10 gigahercios (en la presente abreviado como GHz) en comparación con la longitud de onda del láser de sonda 204 (figura 7). Este láser de bombeo Brillouin forma un amplificador distribuido para la señal de retropropagación en la fibra de detección 222. La coincidencia de fase de SBS provoca la amplificación del modo de señal que se propaga en dirección opuesta a la dirección del láser de bombeo Brillouin. En esta realización, el láser de bombeo Brillouin puede amplificar la señal retrodispersada en la región cercana al cabo de fibra óptica más cercano al detector 210 (figura 7). En otra realización de la técnica divulgada, en lugar de utilizar un láser de bombeo Brillouin, si se requiere una mejor SNR en la región más cercana al detector 210, por ejemplo, hasta alrededor de 25 km a lo largo de la fibra óptica desde el detector, el ajuste adecuado de los parámetros del láser inicial de modo Raman de primer orden y del láser de bombeo de modo Raman de segundo orden puede dar lugar a una ganancia pico más cercana al detector. Como se describe anteriormente, el aumento de la potencia de pulso inicial y la disminución de la potencia de luz de bombeo mueve la ganancia pico hacia atrás a lo largo de la fibra óptica más cercana al detector. Estos parámetros de potencia pueden cambiarse dinámicamente para aumentar la SNR en diferentes regiones a lo largo de la fibra óptica. En una realización, estos parámetros de potencia pueden cambiarse periódicamente con la finalidad de tener una medición

precisa de lo que se mide a lo largo de toda la longitud de la fibra óptica. En otra realización, estos parámetros de potencia pueden cambiarse a demanda, tal como en el caso de un posible evento o perturbación.

Como se muestra en las figuras 8-11, las perturbaciones pueden detectarse hasta un alcance de aproximadamente 150 km utilizando la técnica divulgada sin el uso de unidades de amplificación externas y requiriendo únicamente el acceso a un cabo de una fibra óptica. Al colocar dos sistemas de detección por fibra óptica como se muestra en la figura 7 espalda con espalda, cada uno orientado en una dirección diferente, en aplicaciones de ultra larga distancia, los centros de control o puntos de control que alojan el sistema de detección de la figura 7 pueden colocarse sólo una vez cada 300 km sin necesidad de amplificación, mantenimiento o centros de comunicación intermedios.

En una realización de la técnica divulgada, como se describe anteriormente en las figuras 7-11, puesto que se utiliza un láser inicial Raman, la técnica divulgada no depende de reflexiones desde el cabo de la fibra óptica a longitudes de onda dentro del desplazamiento Raman de primer orden, como lo hace la técnica anterior, tal como en sistemas de URFL. En esta realización, el acceso a ambos cabos de la fibra óptica no es necesario y es posible utilizar la técnica divulgada para aumentar el alcance de ganancia a lo largo de la fibra óptica desde un solo cabo. Sin embargo, en otra realización de la técnica divulgada, las FBGs pueden colocarse en cualquiera de los cabos de la fibra óptica. En esta realización, se requiere acceso a ambos cabos de la fibra óptica. La ventaja de esta realización es que el coste total de los elementos del sistema de detección por fibra óptica puede ser más rentable que el sistema de detección mostrado en la figura 7, aunque se requiere acceso a ambos cabos de la fibra óptica.

Como se ha explicado anteriormente, la técnica divulgada permite el control dinámico de la ubicación de ganancia pico a lo largo de una fibra de detección utilizando amplificación Raman de orden N. Cabe señalar, sin embargo, que la cantidad detectada de la técnica divulgada no se limita a una señal retrodispersada detectada por el detector y analizada por el procesador. Por ejemplo, el detector y el procesador pueden analizar la señal retrodispersada detectada para la dispersión Rayleigh, la dispersión Raman o la dispersión Brillouin para determinar si se ha producido una perturbación o un evento a lo largo de la fibra óptica, o para medir una propiedad de la fibra o del entorno circundante, tal como temperatura, ondas de presión, ondas acústicas u ondas ultrasónicas. El procesador puede analizar el patrón de intensidad recibido, la fase o la frecuencia de la luz medida, o una combinación de estos atributos y cantidades. La señal analizada no tiene por qué ser la luz dispersada de la luz de sonda y podría ser la propia potencia de sonda que se transmite a través de la fibra de detección. Por ejemplo, en el OTDA de Brillouin, la señal es la propia luz de sonda. En tales usos de la técnica divulgada, el procesador analiza la respuesta pico en la dispersión Brillouin estimulada de un láser de bombeo Brillouin en el modo de sonda, en función de la frecuencia de láser de sonda. De acuerdo con la técnica divulgada, las características del láser de sonda 204 (figura 7) deben seleccionarse de acuerdo con la característica o cantidad que ha de detectarse y el tipo de dispersión que ha de detectarse por el detector 210 (figura 7). Por ejemplo, en el caso de la dispersión Brillouin, tal como en sistemas de OTDR de Brillouin, el láser de sonda 204 puede proporcionar pulsos y el detector puede detectar pulsos o puede explorar la frecuencia de los pulsos recibidos. En la dispersión Rayleigh, tal como en sistemas de OTDR y de OFDR de Rayleigh, para la detección coherente, el ancho de línea del láser de sonda 204 debe estar en el intervalo de kilohercios o menos, mientras que para la detección no coherente, el ancho de línea del láser de sonda 204 debe estar en el intervalo de megahercios o menos. El láser de sonda 204 en estos casos puede ser un láser pulsado o un láser de CW con un modulador (como se muestra en la figura 7) habilitado para regular el láser de sonda 204. De acuerdo con la técnica divulgada, la amplificación Raman de segundo orden puede utilizarse para desplazar la ganancia pico más allá a lo largo de una fibra óptica y crear una ganancia distribuida más uniformemente y proporciona una mejora sobre la ganancia distribuida de última generación en sistemas de detección por fibra óptica distribuida o cuasi distribuida. De este modo, la técnica descrita puede aplicarse en una amplia gama de sistemas. Es aplicable en sistemas de sensores en los que la señal detectada es luz reflejada procedente de un único sensor o en un sistema de sensores múltiples cuasi distribuidos, como en una matriz de FBG. Puede implementarse a dispersiones distribuidas de distintos orígenes, tales como dispersión Rayleigh y dispersión Brillouin. También puede implementarse en configuraciones en las que se miden señales retrodispersadas, señales reflejadas o señales dispersadas hacia delante. Puesto que la técnica divulgada se refiere a la amplificación en línea en una fibra óptica, puede utilizarse junto con la medición de diferentes propiedades de la luz, tales como amplitud, fase y frecuencia. La técnica divulgada no se limita a ningún método de correlación de la medición con la ubicación. Como se ha descrito anteriormente, la luz de sonda puede ser pulsada, como en un sistema de OTDR, barrida en frecuencia como en un sistema de OFDR o codificada por otros métodos conocidos. La técnica divulgada no depende del método de detección utilizado y puede funcionar con detección coherente, detección incoherente así como con detección directa. En algunas realizaciones, la técnica divulgada puede configurarse para amplificar un pulso de sonda al bombear desde cualquier cabo de una fibra óptica, mientras que en otras realizaciones, la técnica divulgada puede configurarse para amplificar un pulso de sonda al bombear desde ambos cabos de la fibra óptica. En la técnica divulgada, las tasas de dispersión Raman son controladas por la potencia de un láser de bombeo Raman y un láser inicial Raman. Como también se ha descrito anteriormente, puesto que cada modo Raman está controlado por un láser separado, de acuerdo con la técnica divulgada, es posible alterar las longitudes de onda de uno o ambos del láser de bombeo Raman y el láser inicial Raman para aumentar o disminuir la dispersión Raman entre los modos de primer orden y de segundo orden independientemente de la potencia en cada uno de los modos.

Los expertos en la técnica apreciarán que la técnica divulgada no se limita a lo que se ha mostrado y descrito particularmente en la presente. Más bien, el alcance de la técnica divulgada queda definido únicamente por las reivindicaciones, que figuran a continuación.

REIVINDICACIONES

1. Un método para proporcionar amplificación Raman en línea en un sistema de detección por fibra óptica (200), que comprende los procedimientos de:
5 generar una luz de sonda que tenga una longitud de onda de sonda;
transmitir tal luz de sonda hacia una fibra óptica (222);
generar al menos una luz de bombeo Raman con una longitud de onda de bombeo y potencia de bombeo respectivas, en donde la longitud de onda de bombeo respectiva es más corta que tal longitud de onda de sonda;
10 generar al menos una luz inicial Raman a una longitud de onda inicial y potencia inicial respectivas, tal longitud de onda inicial respectiva se encuentra entre tal longitud de onda de bombeo y tal longitud de onda de sonda respectivas;
transmitir al menos tal luz de bombeo Raman hacia tal fibra óptica;
transmitir al menos tal luz inicial Raman hacia tal fibra óptica; y
propagar al menos tal luz de bombeo Raman, al menos tal luz inicial Raman y tal luz de sonda a lo largo de tal fibra óptica para lograr una amplificación Raman distribuida de la luz de señal producida por tal luz de sonda a medida que se propaga
15 a lo largo de tal fibra óptica,
en donde cada una de tal luz de sonda, al menos tal luz de bombeo Raman y al menos tal luz inicial Raman es luz láser.
2. El método de acuerdo con la reivindicación 1,
en donde tal luz de señal se selecciona a partir de la lista que consiste en:
20 luz reflejada;
luz amplificada;
luz retrodispersada;
luz dispersada hacia delante;
luz dispersada Raman; luz dispersada Brillouin; y luz dispersada Rayleigh, y
25 en donde tal luz de sonda se selecciona a partir de la lista que consiste en:
luz de onda continua; y luz pulsada.
3. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde una diferencia de frecuencia correspondiente entre tal longitud de onda de bombeo respectiva y tal longitud de onda de sonda es un múltiplo de un desplazamiento de frecuencia para el que un coeficiente de dispersión Raman es al menos el 25% de un coeficiente de dispersión Raman resonante.
30
4. El método de acuerdo con la reivindicación 3, en donde tal diferencia de frecuencia correspondiente entre tal longitud de onda de bombeo respectiva y tal longitud de onda de sonda es el doble de un desplazamiento de frecuencia para el que tal coeficiente de dispersión Raman es al menos el 25% de tal coeficiente de dispersión Raman resonante y tal coeficiente de dispersión Raman es un coeficiente de orden único;
35 en donde una diferencia de frecuencia correspondiente entre tal longitud de onda inicial respectiva y tal longitud de onda de sonda es un desplazamiento de frecuencia para el que tal coeficiente de dispersión Raman es de al menos el 25% en comparación con un desplazamiento de frecuencia de dispersión Raman resonante; y
en donde una diferencia de frecuencia correspondiente entre tal longitud de onda inicial respectiva y tal longitud de onda de bombeo respectiva es un desplazamiento de frecuencia para el que tal coeficiente de dispersión Raman es de al menos el 25% en comparación con tal desplazamiento de frecuencia de dispersión Raman resonante.
40
5. El método de acuerdo con la reivindicación 1, además comprende al menos uno de los siguientes procedimientos:
45 copropagar al menos una de tal luz de bombeo Raman y tal luz inicial Raman con tal luz de sonda;
contrapropagar al menos una de tal luz de bombeo Raman y tal luz inicial Raman con tal luz de sonda;
propagar bidireccionalmente al menos una de tal luz de bombeo Raman y al menos tal luz inicial Raman con la luz de sonda.
6. El método de acuerdo con la reivindicación 1, además comprende el procedimiento de modular una característica de al menos una de al menos tal luz inicial Raman y al menos tal luz de bombeo Raman en correlación con cambios en una potencia de tal luz de sonda,
50 en donde tal característica se selecciona a partir de la lista que consiste en:
potencia; y longitud de onda, y
en donde tal procedimiento de modular se utiliza para evitar una potencia elevada en tal luz de sonda que pueda provocar la aparición de al menos un fenómeno no lineal en al menos una ubicación de tal fibra óptica.
55
7. El método de acuerdo con la reivindicación 1, además comprende el procedimiento de optimizar una característica de al menos tal luz inicial Raman para obtener la amplificación de tal luz de señal desde una ubicación específica a lo largo de tal fibra óptica, en donde tal característica se selecciona a partir de la lista que consiste en:
60 potencia; y longitud de onda.
8. El método de acuerdo con la reivindicación 1, además comprende los procedimientos de:
detectar tal luz de señal de tal fibra óptica; y
analizar tal luz de señal detectada para obtener información con respecto al menos a una fibra óptica y a un entorno en
65 donde se ubica tal fibra óptica.

9. El método de acuerdo con la reivindicación 1, además comprende el procedimiento de propagar al menos tal luz de bombeo Raman, al menos tal luz inicial Raman y tal luz de sonda a lo largo de tal fibra óptica mediante al menos tal rejilla de Bragg de fibra (FBG), acoplada en cada cabo de tal fibra óptica, cada una de al menos tal FBG tiene una alta reflectividad en longitudes de onda con al menos 25% de eficiencia de dispersión Raman de una dispersión Raman resonante, en órdenes en los que no se genera al menos tal luz inicial Raman.

10. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde al menos tal luz de bombeo Raman tiene una potencia que varía de 50 milivatios a 10 vatios y una longitud de onda desplazada Raman entre 20 a 30 terahercios a partir de tal longitud de onda de sonda y en donde al menos tal luz inicial Raman tiene una potencia de menos de 10 milivatios y una longitud de onda desplazada Raman entre 7 a 16 terahercios a partir de tal longitud de onda de sonda.

11. Sistema de detección por fibra óptica (200) que explota la amplificación Raman de alto orden en línea, que comprende:
una fuente de sonda, que comprende un láser de sonda (203), para generar una luz de sonda que tiene una longitud de onda de sonda;
una fibra óptica (222), en la que se acopla ópticamente tal luz de sonda;
un separador (208), para separar la luz de señal que se origina en tal fibra óptica de la luz acoplada en tal fibra óptica;
un detector (210), acoplado ópticamente con tal separador, para detectar tal luz de señal;
un procesador (212), acoplado con tal detector, para analizar tal luz de señal detectada;
al menos un láser inicial Raman (216), para generar una luz inicial Raman respectiva que tenga una longitud de onda inicial y una potencia inicial respectivas;
al menos un láser de bombeo Raman (218), para generar una luz de bombeo Raman respectiva que tiene una longitud de onda de bombeo y una potencia de bombeo respectivas; y
al menos un acoplador (214), para acoplar al menos tal láser de bombeo Raman y al menos tal láser inicial Raman con tal fibra óptica, en donde tal longitud de onda inicial respectiva se encuentra entre tal longitud de onda de bombeo y tal longitud de onda de sonda respectivas; y
en donde tal luz de bombeo Raman, tal luz inicial Raman y tal luz de sonda se propagan a lo largo de tal fibra óptica para lograr una amplificación Raman distribuida de tal luz de señal producida por tal luz de sonda a medida que se propaga a lo largo de tal fibra óptica.

12. El sistema de detección por fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 11, además comprende al menos una característica seleccionada a partir de la lista que consiste en:
en donde la luz de sonda se acopla con tal fibra óptica mediante tal separador y al menos tal acoplador;
en donde tal luz de señal separada por tal separador se combina ópticamente con tal luz de sonda para permitir una detección coherente;
en donde tal luz de señal se correlaciona con tal luz de sonda; y
en donde al menos tal láser de bombeo Raman y al menos tal láser inicial Raman se acoplan con ambos cabos de tal fibra óptica.

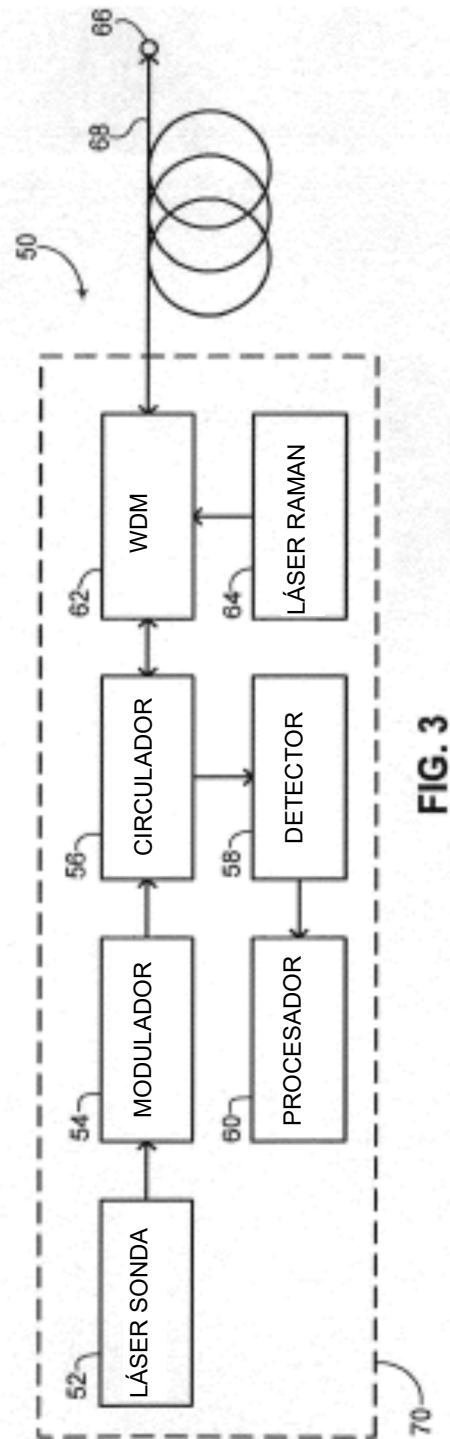
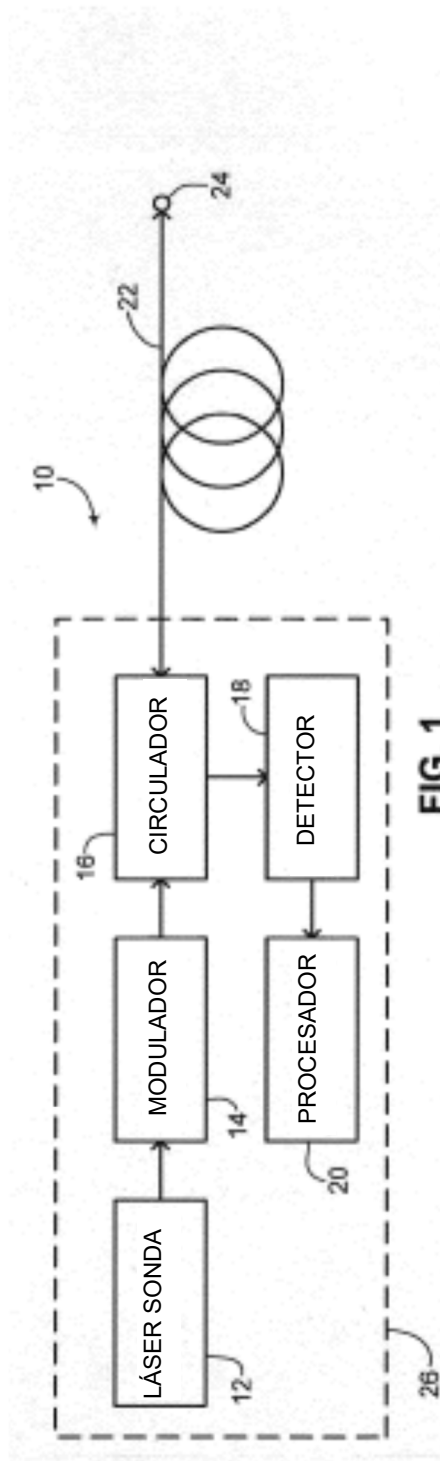
13. El sistema de detección por fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 11, tal fuente de sonda además comprende al menos uno de:
un modulador (206), acoplado con tal láser de sonda, para modular tal luz de sonda; y
al menos una rejilla de Bragg de fibra (FBG), acoplada con cada cabo de tal fibra óptica, cada una de al menos una FBG tiene una alta reflectividad en longitudes de onda con al menos un 25% de eficiencia de dispersión Raman de una dispersión Raman resonante, en los órdenes en los que no se genera tal luz inicial Raman respectiva.

14. El sistema de detección por fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 11,
en donde tal separador se selecciona a partir de la lista que consiste en:
un circulador;
un acoplador; y
un filtro de multiplexor por división de longitud de onda (WDM), y
en donde al menos tal acoplador es un filtro de multiplexor por división de longitud de onda (WDM).

15. El sistema de detección por fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 11, en donde tal longitud de onda de bombeo respectiva es tal que una diferencia de frecuencia correspondiente entre tal longitud de onda de bombeo respectiva y tal longitud de onda de sonda es dos veces un desplazamiento de frecuencia para el que un coeficiente de dispersión Raman es al menos el 25% de un coeficiente de dispersión Raman resonante; y en donde tal longitud de onda inicial respectiva es tal que una diferencia de frecuencia correspondiente entre tal longitud de onda inicial respectiva y tal longitud de onda de sonda y una diferencia de frecuencia correspondiente entre tal longitud de onda de bombeo respectiva y tal longitud de onda inicial respectiva son ambas un desplazamiento de frecuencia para el que tal coeficiente de dispersión Raman es al menos el 25% de tal coeficiente de dispersión Raman resonante.

16. El sistema de detección por fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 11, además comprende al menos uno de:
un láser de bombeo, acoplado con un cabo (220) de tal fibra óptica opuesto a un cabo en el que tal fuente de sonda se acopla con tal fibra óptica, para generar una luz de bombeo con una longitud de onda de bombeo; y un amplificador distribuido adicional, acoplado con al menos tal acoplador, para suministrar ganancia en un cabo de tal fibra óptica,

en donde tal separador además sirve para acoplar tal luz de bombeo en tal fibra óptica;
donde tal luz de señal es tal luz de sonda que se amplifica por tal luz de bombeo; y
en donde al menos uno de tal fuente de sonda y
tal láser de bombeo es pulsado para tener resolución espacial.



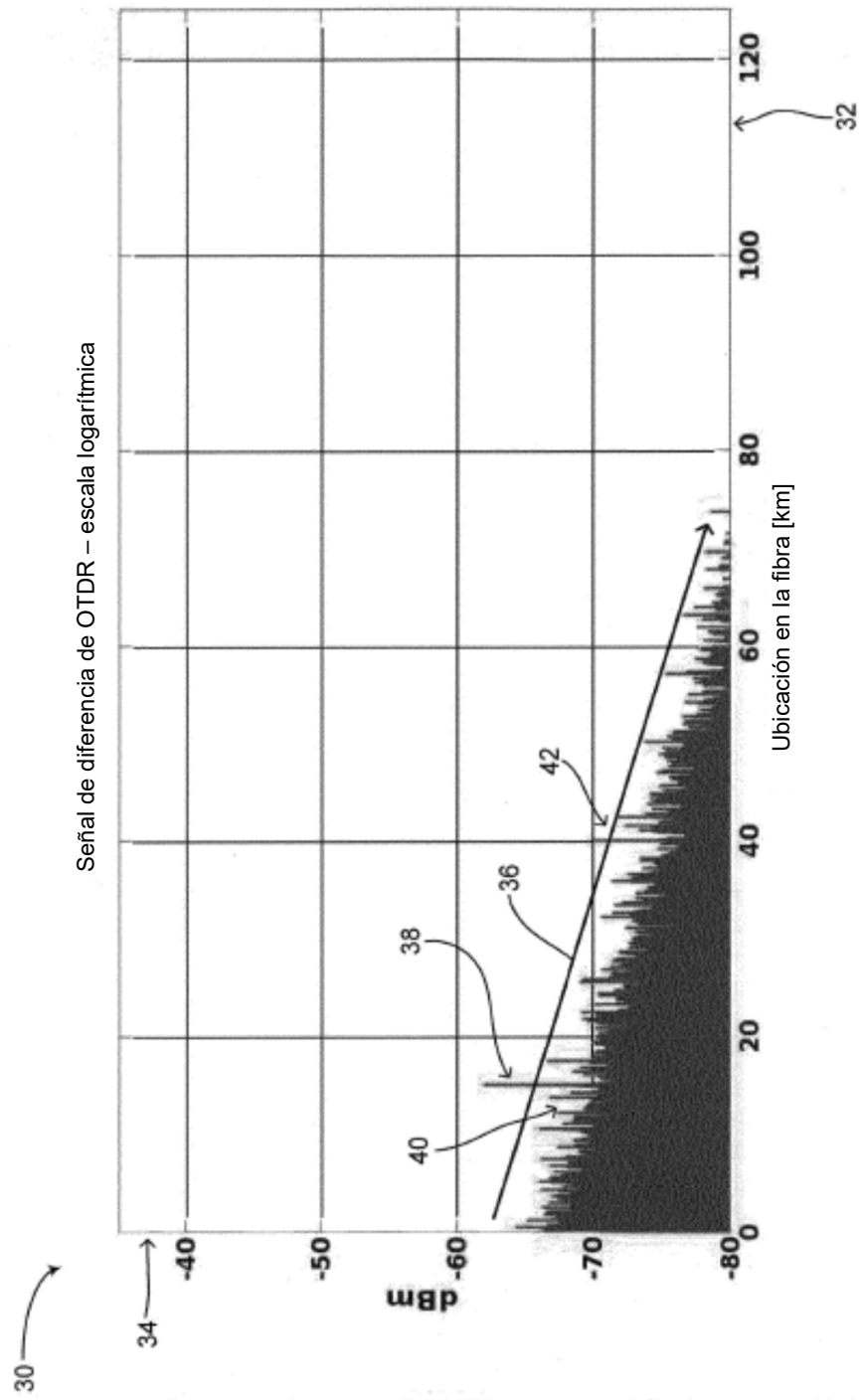
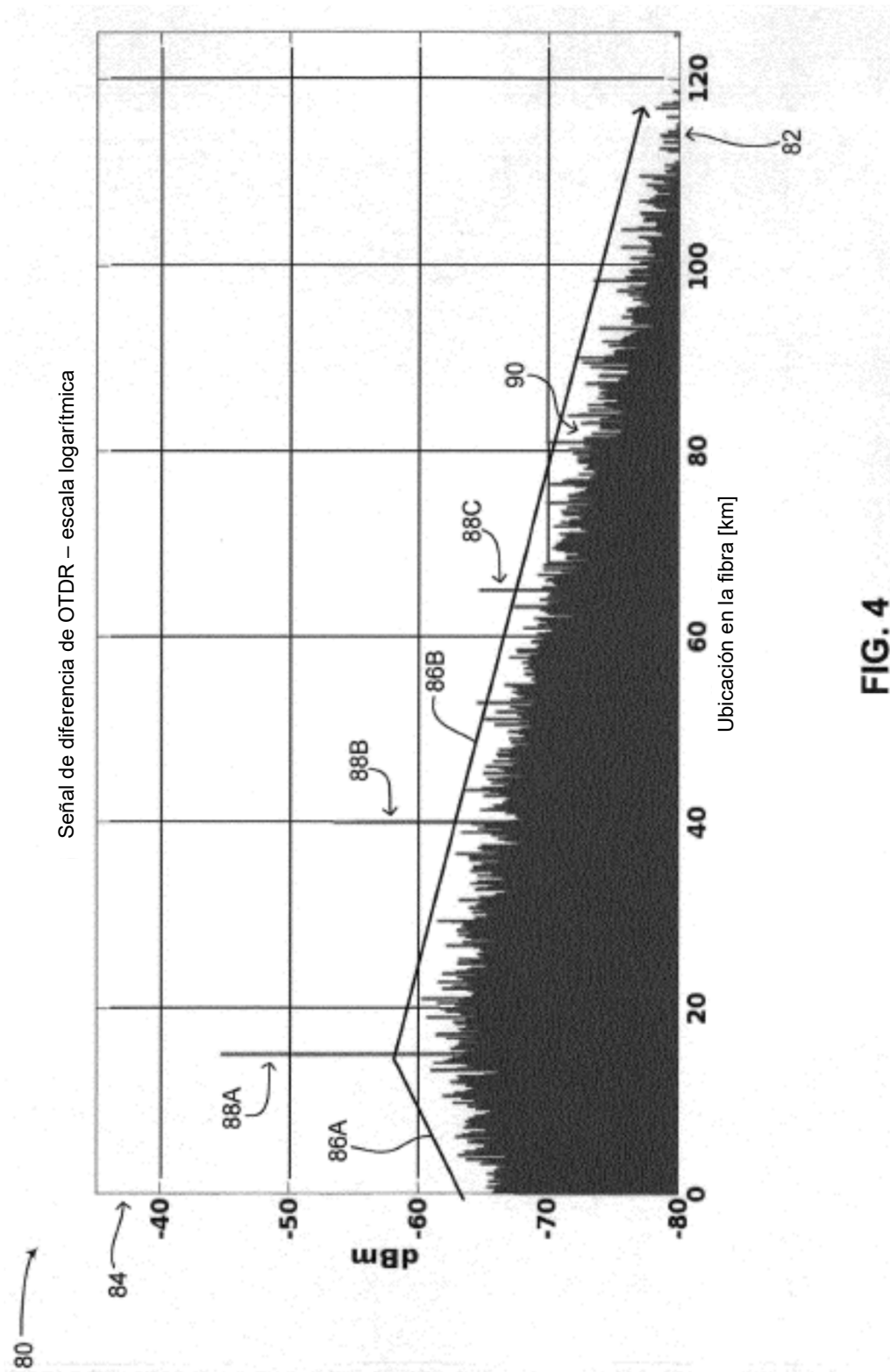


FIG. 2



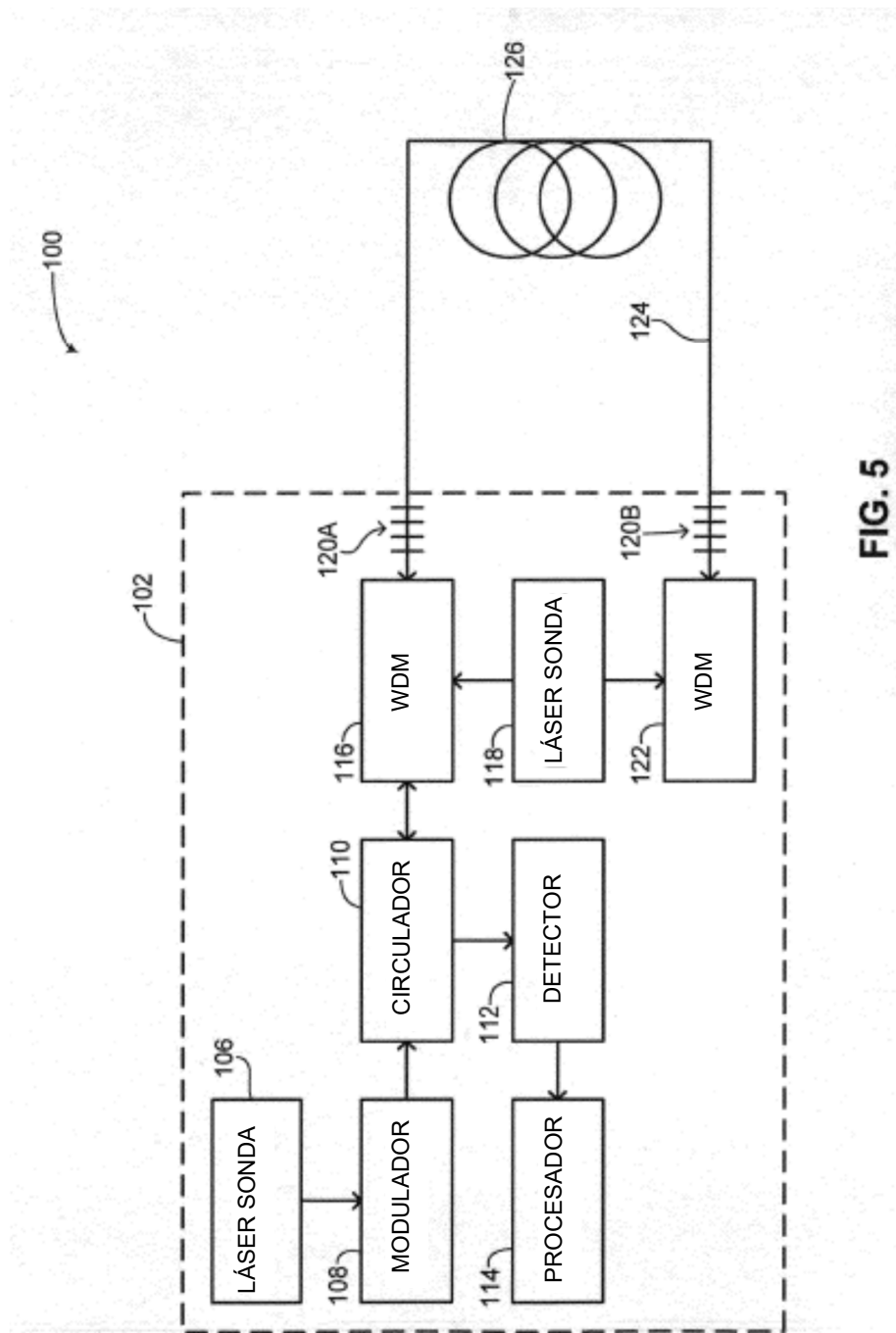
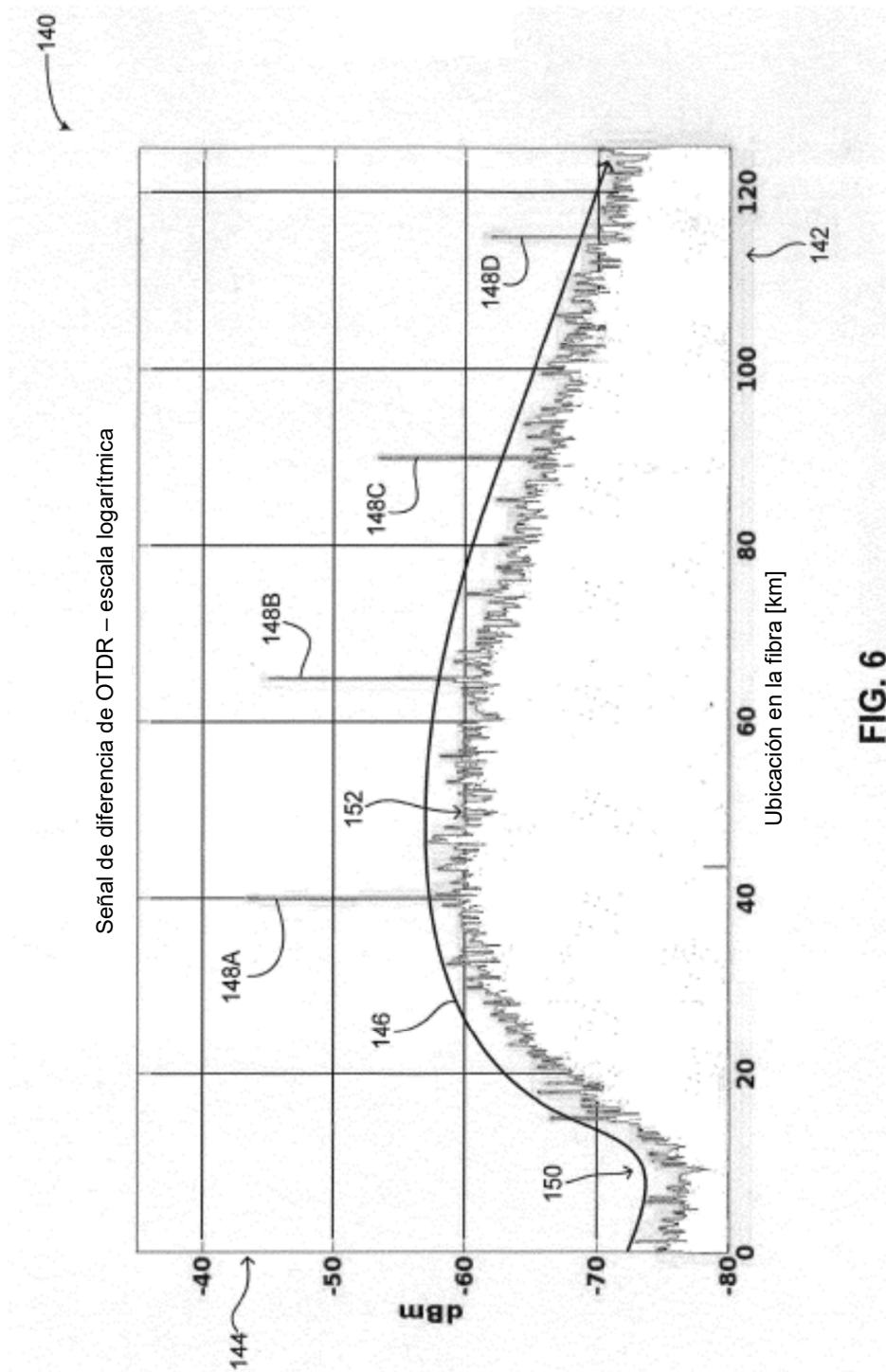
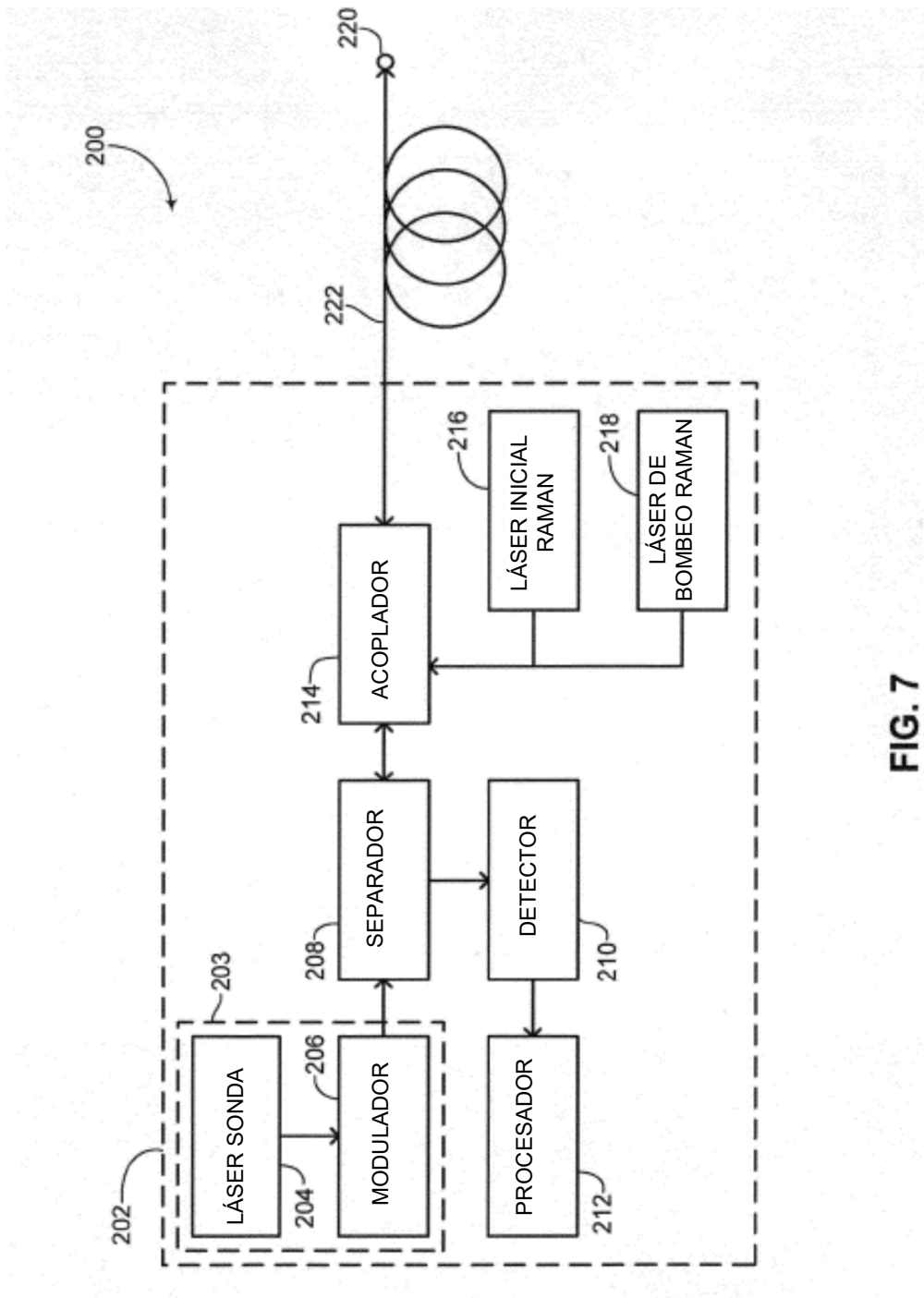


FIG. 5





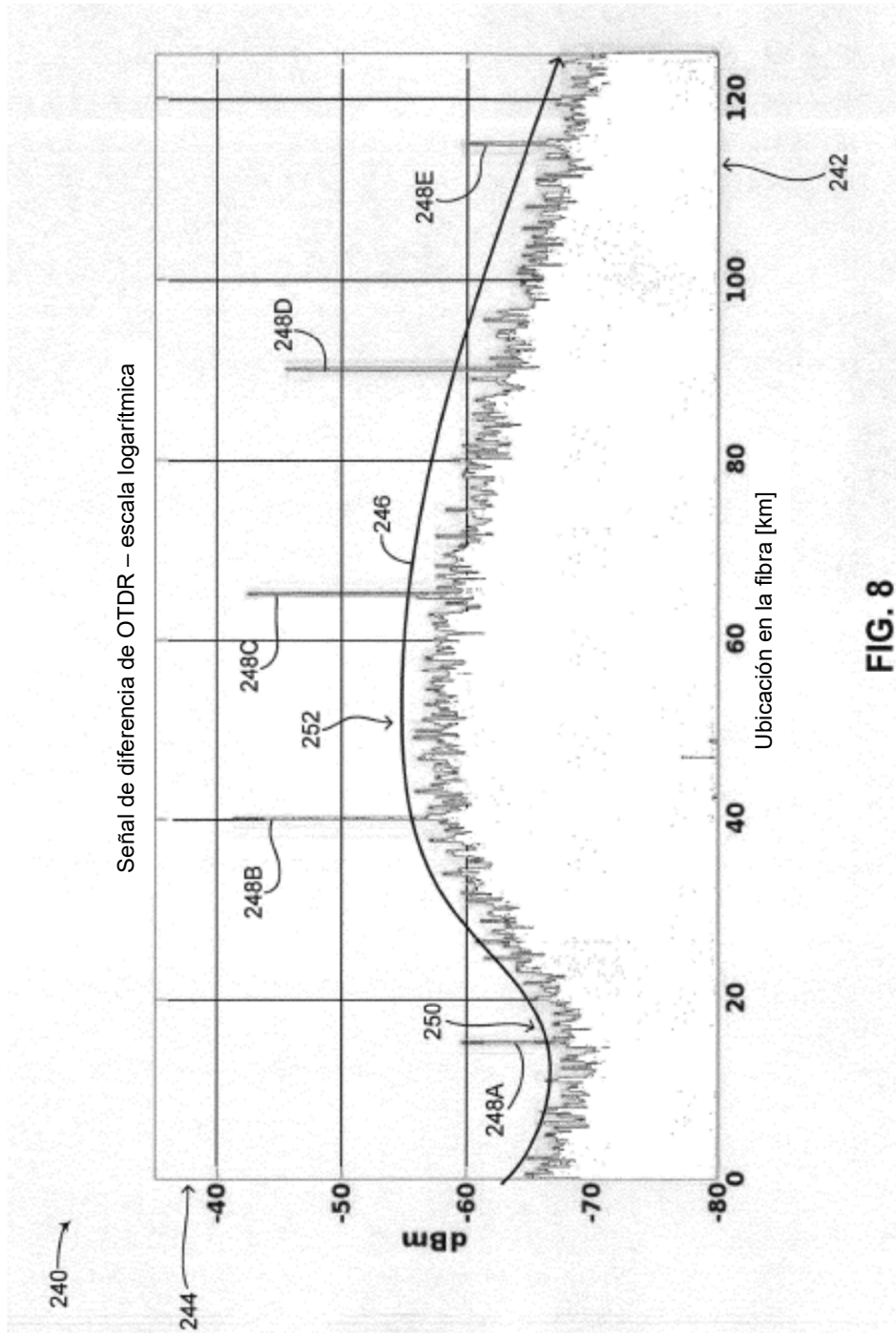
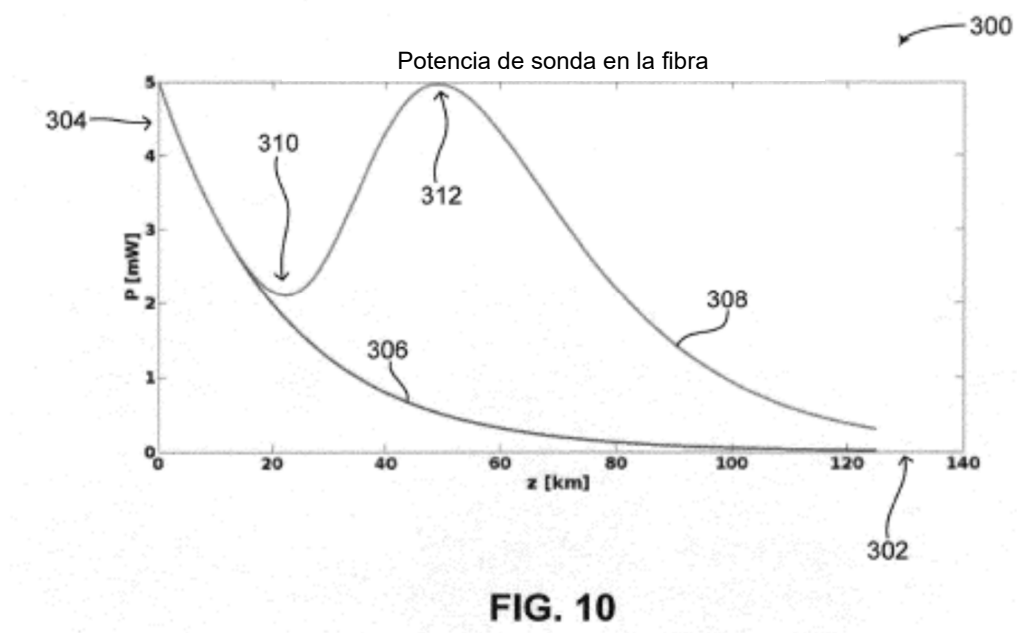
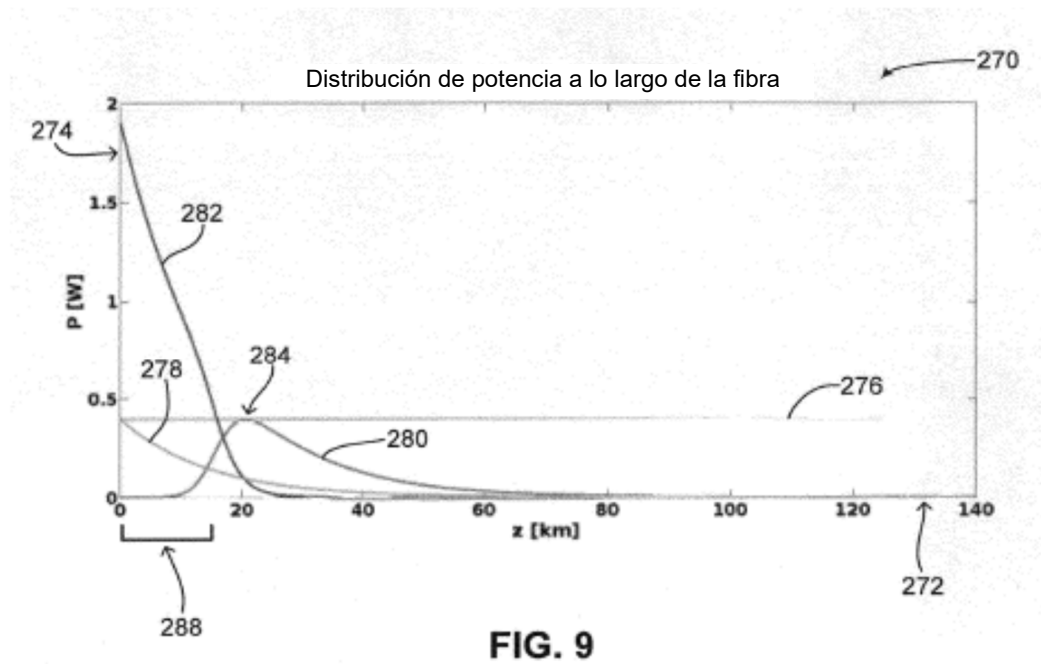


FIG. 8



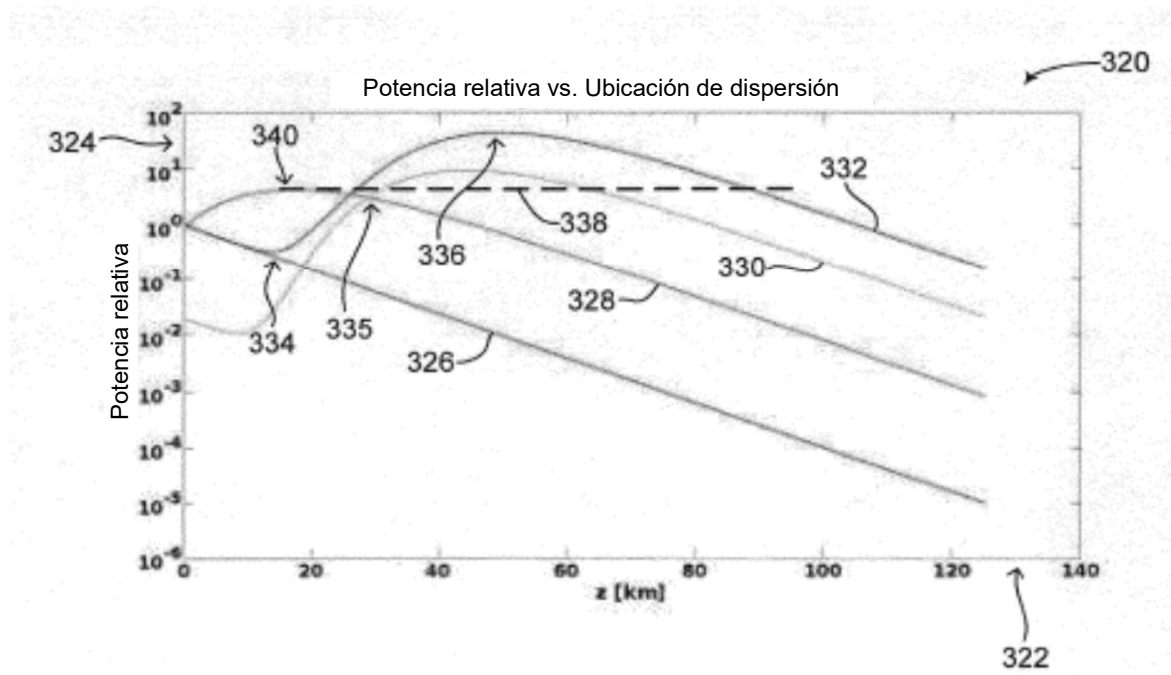


FIG. 11