

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 773 441**

51 Int. Cl.:

G01L 11/02 (2006.01)

G01L 1/24 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.10.2015 PCT/GB2015/052940**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.04.2016 WO16055787**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.10.2015 E 15784439 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.12.2019 EP 3204747**

54 Título: **Cable óptico de fibra con sensibilidad transversal ajustada**

30 Prioridad:

08.10.2014 GB 201417836

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

13.07.2020

73 Titular/es:

**OPTASENSE HOLDINGS LIMITED (100.0%)
Cody Technology Park Ively Road Farnborough
Hampshire GU14 0LX, GB**

72 Inventor/es:

GODFREY, ALASTAIR

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 773 441 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

Cable óptico de fibra con sensibilidad transversal ajustada

5 Esta solicitud se refiere a cables de fibra óptica y a métodos de fabricación de los mismos que son adecuados para su uso en la detección por fibra óptica, especialmente para detección acústica distribuida por fibra óptica, y en particular a una estructura de cable de fibra óptica con una sensibilidad ajustada a las deformaciones transversales.

10 La detección acústica distribuida (DAS) es un tipo conocido de detección en el que una fibra óptica se despliega como una fibra de detección y es examinada con radiación electromagnética para proporcionar detección de actividad acústica a lo largo de su longitud, es decir, deformaciones dinámicas que actúan sobre la fibra de detección. Al analizar la radiación retrodispersada desde el interior de la fibra, la fibra se puede dividir de forma efectiva en una pluralidad de partes de detección discretas que pueden ser (pero no tienen que ser) contiguas. Dentro de cada parte de detección discreta, las perturbaciones mecánicas de la fibra, por ejemplo, las deformaciones dinámicas debidas a las ondas acústicas incidentes, causan una variación en las propiedades de la radiación que se retrodispersa desde esa parte. Esta variación se puede detectar y analizar y utilizar para medir la intensidad de la perturbación de la fibra en esa parte de detección. Por lo tanto, el sensor DAS actúa de manera efectiva como una matriz de detección lineal de partes de detección acústica de la fibra óptica.

15 Algunos sensores basados en fibra óptica se basan en elementos introducidas deliberadamente dentro de la fibra, p. ej. rejillas de Bragg de fibra o similares, para inducir la reflexión desde un punto en la fibra. Sin embargo, en un sensor acústico distribuido de fibra óptica se detecta la radiación que se retrodispersa desde los puntos de dispersión inherentes dentro de la fibra. La función de detección se distribuye así por toda la fibra y la resolución espacial y la disposición de las diversas partes de detección dependen de las características de la radiación de examen y del procesamiento aplicado.

20 Varios tipos de sensores DAS, incluidos los sensores basados en la dispersión de Rayleigh de luz coherente desde la fibra de detección, han sido probados. La luz transmitida a una fibra óptica sufrirá la dispersión de Rayleigh desde varios puntos de dispersión inherentes, es decir, intrínsecos, dentro de una fibra óptica. Una vibración mecánica o una deformación dinámica que actúa sobre la fibra, tal como la causada por una onda acústica incidente, alterará efectivamente la distribución de los puntos de dispersión, lo que provocará un cambio detectable en las propiedades de la luz retrodispersada por efecto Rayleigh. El análisis de dichos cambios permite detectar vibraciones / estímulos acústicos que actúan sobre las partes detectoras de la fibra óptica.

25 Por lo tanto, tales sensores DAS típicamente realizan exámenes repetidos de la fibra detectora donde cada examen implica transmitir al menos un pulso de radiación óptica coherente a la fibra óptica y detectar la intensidad de la luz retrodispersada desde cada una de varias partes de detección de la fibra de detección, también llamados canales, del sensor DAS. En un tipo de sensor DAS, la intensidad de la retrodispersión por efecto Rayleigh desde un canal dado en respuesta a los distintos exámenes de la fibra de detección se controla para determinar cualquier estímulo acústico que actúe sobre la fibra y en un ejemplo cada examen implica el lanzamiento de un único pulso continuo de radiación coherente de examen. Como se mencionó anteriormente, la retrodispersión desde la fibra dependerá de la distribución de los puntos de dispersión inherentes dentro de la fibra, que variarán efectivamente de manera aleatoria a lo largo de la longitud de la fibra. Por lo tanto, la intensidad de retrodispersión desde cualquier pulso de interrogación dado exhibirá una variación aleatoria de una parte de detección a la siguiente, pero, en ausencia de cualquier estímulo ambiental, la intensidad de retrodispersión de cualquier parte de detección dada debería permanecer igual para cada examen repetido (siempre que las características del pulso de interrogación sigan siendo las mismas). Sin embargo, un estímulo ambiental que actúa sobre la parte de detección relevante de la fibra dará como resultado un cambio en la longitud de la trayectoria óptica en esa sección de fibra, p. ej. a través del estiramiento/compresión de la sección relevante de fibra y/o una modulación del índice de refracción. Como la retrodispersión de los diversos puntos de dispersión dentro de la parte de detección de fibra interferirá para producir la intensidad resultante, un cambio en la longitud de la trayectoria óptica variará el grado de interferencia y, por lo tanto, dará como resultado un cambio en la intensidad de la retrodispersión. Este cambio de intensidad se puede detectar y utilizar como una indicación de una perturbación que actúa sobre la fibra, tal como una onda acústica incidente.

30 En otro tipo de sensor DAS, la señal de retrodispersión se procesa para determinar un cambio de fase. En un ejemplo, cada examen implica lanzar dos pulsos de radiación coherente de diferentes frecuencias ópticas a la fibra. Esto significa que la retrodispersión por efecto Rayleigh recibida en el detector comprende la retrodispersión de ambos pulsos, lo que interferirá y, por lo tanto, habrá un componente de señal en la diferencia de frecuencia entre los pulsos. Si los dos pulsos están separados espacialmente en la fibra, entonces una perturbación ambiental que actúa sobre la fibra, entre las partes de la fibra desde donde se reflejan los pulsos, puede conducir a un cambio en la longitud de la trayectoria óptica. Esto a su vez producirá un cambio de fase en la señal a esta frecuencia de diferencia, que puede considerarse como una señal a una frecuencia portadora. Mediante una elección adecuada de la frecuencia portadora y el procesamiento de la señal detectada, se puede relacionar este cambio de fase con la amplitud de la perturbación que actúa sobre la fibra. Nuevamente, las características de la radiación de examen, es decir, las frecuencias y duraciones de los dos pulsos, serían típicamente las mismas en cada examen. Tal sistema

DAS basado en fases puede proporcionar una indicación de la cantidad real de cambio de fase causada por un estímulo incidente y, por lo tanto, proporcionar una medida cuantitativa de la amplitud de cualquier perturbación.

Como la respuesta de detección de tales sensores DAS es a los cambios en la longitud efectiva de la trayectoria óptica de la fibra detectora, la fibra detectora generalmente será más sensible a las deformaciones longitudinales que actúan sobre la fibra óptica. En una fibra óptica de detección desplegada en un medio a lo largo de una trayectoria generalmente recta, la fibra de detección será así más sensible a las ondas de presión en el medio que se propagan en una dirección longitudinal a lo largo de la fibra. Con tales ondas longitudinales, la longitud de la fibra se ve directamente afectada por el cambio de presión a medida que el medio se comprime y se expande al propagarse la onda. Con las ondas que viajan perpendicularmente a la fibra óptica, la sensibilidad es menor ya que la fibra se moverá en gran medida de un lado a otro con el medio. Habrá cierta deformación longitudinal debido al desplazamiento de la fibra y también por el cambio de diámetro de la fibra a medida que pasa la onda de presión, pero el efecto será mucho menor que para una onda equivalente que se desplaza longitudinalmente.

Los sensores DAS del tipo descrito anteriormente se han propuesto útilmente para una serie de aplicaciones, tales como la supervisión de perímetros o bordes o bienes lineales, tales como tuberías o similares, para la detección de intrusos o de manipulación. Para muchas de dichas aplicaciones, un sensor DAS que utiliza una fibra óptica convencional es lo suficientemente sensible como para detectar los sucesos de interés. Por ejemplo, en una fibra desplegada para detectar excavaciones cerca de un bien, tal como una tubería enterrada o una valla fronteriza, se esperaría una perturbación significativa del suelo durante el suceso de interés y se podría usar un sensor DAS que usa una fibra óptica convencional para detectar tal perturbación. Debido a la proximidad del origen de la perturbación en tales aplicaciones, típicamente habrá señales de presión transversal y longitudinal significativas a partir de tal perturbación. Por lo tanto, la sensibilidad en una dirección es suficiente para permitir la detección.

Además o alternativamente, en algunas aplicaciones, el cable de fibra óptica puede desplegarse en una trayectoria tal que las ondas de presión desde una dirección de interés incidan con un componente longitudinal sustancial al menos en algunas partes de la fibra. Por ejemplo, considere una fibra de detección enterrada a lo largo de la trayectoria de un bien, tal como una tubería donde se desea detectar señales de incidentes desde cualquier lado de la tubería. La fibra de detección podría enterrarse para extenderse a lo largo de la tubería pero con una trayectoria de meandro o serpenteante. Las ondas de presión que se propagan en una dirección que generalmente es perpendicular a la trayectoria de la tubería serán, por tanto, incidentes como ondas sustancialmente transversales para partes de la fibra, pero para otras partes de la fibra habrá una componente longitudinal significativa. La resolución espacial de una fibra de detección desplegada de tal manera dependerá, al menos en parte, del paso de los meandros. Idealmente, el paso de los meandros debe ser menor que la longitud de un canal individual de parte de detección. Tal disposición es difícil de instalar en la práctica.

En algunas aplicaciones, puede no ser práctico o conveniente instalar un cable de fibra óptica en un emplazamiento de interés con una trayectoria tal que las ondas incidentes desde una dirección de interés incidan en el cable con una componente longitudinal sustancial.

Por ejemplo, se han considerado sensores DAS para levantamientos geofísicos tales como levantamientos sísmicos de depósitos o formaciones geológicas o similares. En una forma de dichos levantamientos sísmicos, el perfilado sísmico vertical (VSP), una serie de sensores generalmente se sitúan en un pozo y se utilizan para detectar señales sísmicas que viajan a los sensores desde la formación geológica circundante. El VSP convencional se basa en una serie de sensores, tales como una cadena de geófonos y/o de hidrófonos situados en un pozo. Sin embargo, se ha propuesto utilizar DAS con una fibra de detección desplegada por el pozo. En tal aplicación, se desea sensibilidad a las ondas de presión que viajan transversalmente desde la formación de tierra circundante hasta el pozo.

Si la fibra óptica se desplegara para funcionar en una trayectoria generalmente recta por el pozo, entonces el sensor DAS puede ser relativamente insensible a las señales transversales de interés incidentes. La sensibilidad del sensor DAS podría mejorarse colocando el cable de fibra óptica en una disposición enrollada o helicoidal por el pozo, pero en general las estructuras de cable utilizadas para aplicaciones de fondo de pozo son relativamente rígidas y no se enrollan fácilmente. Esto generalmente también requiere algún elemento para enrollar el cable y aumenta la complejidad y el costo del despliegue del cable.

Otro enfoque que se ha propuesto es enrollar la fibra óptica dentro de la propia estructura del cable, por ejemplo devanando la fibra óptica alrededor de un núcleo central compatible. Por lo tanto, el cable resultante puede desplegarse para extenderse con una trayectoria generalmente recta, tal como por un pozo, con la fibra óptica dentro del cable describiendo una trayectoria helicoidal. Las ondas de presión que se propagan transversalmente al cable tienen, por lo tanto, una componente longitudinal para partes de la fibra óptica dentro de la estructura del cable. Sin embargo, el diámetro del núcleo central, que define el radio de devanado de la fibra óptica, no debe ser demasiado pequeño o la fibra óptica puede sufrir pérdidas por flexión. Esto da como resultado un cable de gran diámetro que puede no ser apropiado para algunas aplicaciones. La producción de un cable de fibra óptica con una fibra óptica devanada helicoidal también implica una fabricación de cable a medida relativamente difícil, y típicamente da como resultado un cable relativamente frágil que requiere un gran cuidado en la instalación. También devanar la fibra óptica de esta manera significa que una longitud dada de cable contendrá una mayor longitud de fibra óptica que un cable donde la fibra óptica no está tan devanada, y potencialmente mucho mayor. En otras

palabras, si se va a utilizar una longitud determinada de fibra óptica como fibra de detección, la longitud de la estructura del cable resultante es potencialmente mucho más corta debido al uso de devanado helicoidal, con una posible reducción en el espectro que un cable de detección puede monitorear.

5 Problemas similares surgen con la detección sísmica de superficie que convencionalmente se ha llevado a cabo utilizando una matriz de geófonos desplegados en una matriz sobre la superficie de un área a estudiar. Se ha propuesto utilizar DAS con una fibra de detección enterrada en trincheras poco profundas en el área de interés. En tal disposición, el cable de fibra óptica se desplegaría en una trayectoria que sería en gran medida casi horizontal, pero las señales de interés viajarían con una gran componente vertical y, por lo tanto, serían incidentes transversalmente al cable de fibra óptica.

10 Por lo tanto, sería deseable, para algunas aplicaciones, proporcionar una estructura de cable de fibra óptica que se pueda utilizar como fibra de detección para DAS que tenga una sensibilidad mejorada a las ondas transversales y/o que mitigue al menos algunas de las desventajas mencionadas encima.

15 Los principios de la detección por fibra óptica distribuida basada en el efecto Rayleigh también se han aplicado a otras aplicaciones de detección. Por ejemplo, se ha propuesto utilizar una fibra óptica sensibilizada magnéticamente para proporcionar un sensor de fibra óptica distribuido para variaciones de campo magnético. La fibra óptica sensibilizada magnéticamente puede acoplarse mecánicamente a un material magnetostrictivo cuyas dimensiones varían de acuerdo con la intensidad del campo magnético aplicado. Las variaciones en el campo magnético dan como resultado variaciones en las dimensiones del material magnetostrictivo que se traducen en tensiones dinámicas que se aplican a la fibra óptica. Tales deformaciones dinámicas pueden detectarse utilizando los
20 principios de DAS y utilizarse para proporcionar una indicación de cualquier variación en el campo magnético a lo largo de la longitud de la fibra. Sin embargo, se apreciará que los cambios efectivos en la longitud de la trayectoria óptica debido a ondas de presión incidentes también darán lugar a variaciones en la retrodispersión detectada de la fibra de detección y pueden enmascarar la detección de cualquier cambio debido únicamente a una variación del campo magnético. Del mismo modo, se ha propuesto utilizar la detección por fibra óptica distribuida basada en la retrodispersión por efecto Rayleigh para proporcionar una indicación de cualquier variación dinámica de temperatura a lo largo de la fibra, pero nuevamente puede ser difícil discriminar en la señal de retrodispersión detectada entre los
25 efectos debido a un cambio de temperatura y efectos debidos a ondas de presión incidentes. En tales aplicaciones, por lo tanto, puede ser deseable utilizar una fibra óptica de detección que está sensibilizada al mensurando de interés pero que sea relativamente insensible a las ondas de presión incidentes.

30 El documento WO2013/098321 describe un método y sistema inteligente de producción de fluidos de hidrocarburos para monitorear acontecimientos sísmicos y otros acontecimientos acústicos utilizando un conjunto de resorte de arco que convierte las ondas acústicas laterales que viajan en una dirección no axial con respecto a un eje longitudinal de un sensor óptico de fibra alargado en vibraciones sustancialmente longitudinales.

35 El documento WO2010/034321 describe un rodillo industrial que comprende un sensor Bragg de fibra transductor de fuerza transversal integrado en la cubierta del rodillo.

El documento WO95/30926 describe un método para variar las características de un dispositivo de transmisión de luz tal como una rejilla Bragg en fibra.

El documento WO02/097503 describe una fibra óptica que comprende un componente polimérico, en particular se describe un tubo de protección, adecuado tanto para usos terrestres como submarinos.

40 Por lo tanto, de acuerdo con una realización de la presente invención, se proporciona un cable de fibra óptica que tiene un eje de cable longitudinal que comprende;

al menos una fibra óptica;

45 un material de núcleo compatible acoplado mecánicamente a la -al menos una- fibra óptica de manera que una fuerza longitudinal que actúa sobre el material de núcleo compatible induce una tensión longitudinal en la -al menos una- fibra óptica; y

al menos un transformador de deformaciones deformable acoplado al material de núcleo compatible y configurado de tal manera que una fuerza que actúa sobre el transformador de deformaciones en una dirección transversal al eje del cable da como resultado una deformación del transformador de deformaciones aplicando así una fuerza longitudinal al material de núcleo compatible;

50 en donde el -al menos un- transformador de deformaciones comprende al menos un elemento helicoidalmente enrollado.

La -al menos una- fibra óptica puede desplegarse dentro del cable para extenderse generalmente paralela al eje del cable. La -al menos una- fibra óptica puede estar estrechamente acoplada a un material amortiguador y el material amortiguador puede estar acoplado al material de núcleo compatible.

5 En algunas realizaciones, al menos una parte del transformador de deformaciones tiene una forma con una longitud longitudinal en reposo en ausencia de cualquier fuerza externa aplicada al cable y está configurada de tal manera que la deformación del transformador de deformaciones en respuesta a una fuerza transversal al eje del cable sobre una primera parte del cable provoca un cambio en la longitud longitudinal del transformador de deformaciones. Por longitud longitudinal se entiende una dimensión del transformador de deformaciones a lo largo del eje del cable.

En algunas realizaciones, al menos una parte del transformador de deformaciones tiene una forma convexa con respecto al eje del cable cuando se ve desde una dirección perpendicular al eje del cable.

10 El -al menos uno- transformador de deformaciones puede estar firmemente unido al material de núcleo compatible y/o anclado al material de núcleo compatible en una pluralidad de puntos de anclaje. En algunas realizaciones, al menos un transformador de deformaciones está al menos parcialmente integrado en el material de núcleo compatible.

El elemento helicoidalmente enrollado puede enrollarse alrededor del elemento de núcleo compatible. El ángulo de hélice del elemento enrollado helicoidalmente puede ser inferior a 45 grados y/o superior a 5 grados. El diámetro del elemento enrollado helicoidalmente puede estar en el intervalo de 3 a 10 mm.

15 Al menos una parte del cable de fibra óptica puede comprender una pluralidad de transformadores de deformación, comprendiendo cada transformador de deformaciones un elemento enrollado devanado helicoidalmente. Al menos un elemento enrollado devanado helicoidalmente puede devanarse en la dirección opuesta a otro elemento enrollado devanado helicoidalmente y/o al menos un elemento enrollado devanado helicoidalmente puede entrelazarse con otro elemento enrollado devanado helicoidalmente.

20 El transformador de deformaciones puede ser más rígido que el material de núcleo compatible.

El transformador de deformaciones y el material de núcleo compatible pueden tener una respuesta a la deformación de entre el 0,05 % y el 0,01 % de deformación por carga de tensión de Newton.

El transformador de deformaciones puede comprender un material metálico. El transformador de deformaciones puede comprender un elemento de acero conformado.

25 El material de núcleo compatible puede comprender nailon extruido.

30 En algunas realizaciones, el cable puede comprender una primera capa de cubierta con al menos una fibra óptica, el material de núcleo compatible y el -al menos uno- transformador de deformaciones dispuestos dentro de la primera capa de cubierta. En algunas realizaciones, al menos parte del transformador de deformaciones puede estar acoplado o unido a la primera capa de cubierta. Sin embargo, en algunas realizaciones, el transformador de deformaciones y el material de núcleo compatible pueden estar dispuestos de modo que puedan moverse con respecto a la primera capa de cubierta. La -al menos una- fibra óptica, el material de núcleo compatible y el -al menos uno- transformador de deformaciones pueden estar dispuestos dentro de un líquido contenido dentro de la primera capa de cubierta. En algunas realizaciones, la -al menos una- fibra óptica, el material de núcleo compatible y el -al menos uno- transformador de deformaciones pueden estar contenidos dentro de una segunda capa de cubierta que está dispuesta dentro de la primera capa de revestimiento, siendo la segunda capa de cubierta móvil con respecto a la primera capa de cubierta.

40 El cable puede configurarse para proporcionar una sensibilidad deseada a las ondas acústicas transversales incidentes cuando la fibra óptica se utiliza para la detección acústica distribuida (DAS). Ese es el diseño del transformador de deformaciones con respecto al material de núcleo compatible y la fibra óptica puede estar dispuesta para proporcionar un grado deseado de sensibilidad. En algunas aplicaciones, el cable puede estar diseñado para proporcionar una sensibilidad transversal relativamente alta. Por lo tanto, el transformador de deformaciones puede configurarse para garantizar que la sensibilidad transversal del cable cuando se usa para la detección acústica distribuida es mayor de lo que sería de otro modo si el transformador de deformaciones no estuviera presente. El diseño del transformador de deformaciones con respecto al material de núcleo compatible y a la fibra óptica se puede configurar para garantizar que la sensibilidad transversal del cable cuando se usa para la detección acústica distribuida sea mayor que para un cable de fibra óptica convencional que tiene el mismo tipo de fibra óptica y una o más capas de cubierta.

50 Según se usa aquí, el término "alta sensibilidad" se puede entender que significa que la magnitud de la respuesta de la fibra óptica del cable es mayor que la respuesta de una fibra óptica correspondiente o una fibra óptica estándar no amortiguada para una deformación o presión transversales dadas. Por ejemplo, como se describirá con más detalle a continuación, se puede esperar que una fibra óptica sin amortiguamiento muestre una variación en la fase de una señal de medición del orden de -40 microradianes por pascal por metro a una longitud de onda de aproximadamente 1550 nm. En otras palabras, se puede esperar que una señal de medición de una longitud dada de 1 m de fibra óptica no amortiguada examinada utilizando una fuente láser 1550 varíe en una cantidad de 40 microradianes con un cambio de presión de 1 Pa en esa sección de fibra óptica. Para un cable de alta sensibilidad, la magnitud del cambio de fase con el cambio de presión puede ser mayor, por ejemplo al menos un 25% mayor o al menos un 50% mayor. En algunas realizaciones, un cable de alta sensibilidad puede tener una respuesta que es al

menos un 100% mayor que para un cable estándar no amortiguado o al menos cinco veces mayor o al menos diez veces mayor. Por lo tanto, un cable de alta sensibilidad puede ser uno en el que la respuesta de una fibra óptica a una deformación transversal o a un cambio de presión en términos de cambio de longitud de la trayectoria sea del orden de 80 microradianes por metro por Pa o más, por ejemplo, de más de 200 microradianes por metro por Pa.

- 5 Sin embargo, en algunas realizaciones, el diseño del transformador de deformaciones con respecto al material de núcleo compatible y a la fibra óptica puede estar dispuesto para proporcionar una sensibilidad transversal relativamente baja. En algunas realizaciones, el diseño del transformador de deformaciones con respecto al material de núcleo compatible y a la fibra óptica puede configurarse de modo que la fibra óptica sería sustancialmente insensible a las señales acústicas transversales si se usara para DAS. En otras palabras, dicho cable de fibra óptica
10 puede ser sustancialmente insensible a las variaciones de presión.

Como se indicó anteriormente y se describirá con más detalle a continuación, una deformación dinámica que actúa sobre una parte de una fibra óptica de detección de un sensor DAS puede dar como resultado un cambio efectivo en la longitud de la trayectoria óptica de esa parte, que puede ser detectado por el examen de la DAS. El cambio en la longitud efectiva de la trayectoria óptica puede surgir al menos en parte a través de un cambio físico en la longitud
15 debido al estiramiento o la compresión de la fibra óptica y también al menos en parte a través de una modulación del índice de refracción. Se ha descubierto que, para algunas fibras ópticas, la respuesta a un aumento de la presión sobre una parte de la fibra, que se puede esperar que resulte en un alargamiento de la fibra, es en realidad una reducción aparente en la longitud efectiva de la trayectoria óptica. Sin desear limitarse a ninguna teoría en particular, se cree que la modulación del índice de refracción en tales casos puede tener un impacto en la longitud efectiva de
20 la trayectoria óptica, que tiene sentido contrario al impacto del cambio de longitud física. Se cree que la modulación del índice de refracción depende, al menos en parte, de la presión superficial ejercida sobre la fibra óptica. Si una parte dada de dicha fibra óptica está sujeta a una variación de presión, es decir, a una deformación dinámica, que conduce al estiramiento de la fibra, aumentando así la longitud de la trayectoria óptica, la modulación del índice de refracción que también surge debido a la variación en la presión sobre la fibra óptica puede tender a reducir la
25 longitud de la trayectoria óptica. Por lo tanto, se cree que el impacto general sobre la longitud efectiva de la trayectoria óptica es una combinación de estos efectos y depende de la contribución relativa de cada uno.

En algunas realizaciones, por lo tanto, el transformador de deformaciones puede diseñarse con respecto al material compatible y a la fibra óptica de modo que una deformación transversal en una parte dada del cable no produce sustancialmente ningún cambio en la longitud efectiva de la trayectoria óptica de esa parte de la fibra óptica. Por lo tanto, cualquier cambio en la trayectoria óptica efectiva debido a un cambio físico en la longitud de la fibra óptica se ve sustancialmente compensado por un cambio opuesto en la trayectoria óptica efectiva, p. ej. tal como puede
30 deberse a la modulación del índice de refracción.

En otras palabras, el transformador de deformaciones puede configurarse con respecto al material de núcleo compatible y a la fibra óptica de manera que, en respuesta a una deformación transversal dada, la fibra óptica experimente un cambio efectivo en la longitud de la trayectoria óptica debido a una modulación del índice de refracción que es sustancialmente igual y opuesto a un cambio efectivo en la longitud de la trayectoria óptica debido
35 a un cambio de longitud física. El transformador de deformaciones está así configurado para amplificar efectivamente el cambio de longitud física de la fibra óptica a una deformación transversal para que coincida con el cambio de longitud de trayectoria efectiva debido a una modulación del índice de refracción.

Se cree que el cable con un transformador de deformaciones descrito anteriormente se comporta como si el cable estuviera bajo presión hidrostática, incluso si los extremos del cable no perciben la presión. Como se analizó, el efecto principal sobre la inversión de deformación en las estructuras del cable que tienen un transformador de deformaciones tal como el descrito anteriormente es que la ventaja mecánica de la malla es superior y alarga la fibra
40 incluso con presión en los extremos del cable (como es el caso de la presión hidrostática), mientras que la fibra óptica sin amortiguamiento se contrae físicamente con una presión creciente. Por lo tanto, la variación de deformación y el cambio efectivo en la longitud de la trayectoria óptica con una presión creciente se pueden variar de un valor negativo pequeño a un valor positivo grande, y así utilizar la disposición del transformador de deformaciones. Esto implica que con la rigidez apropiada para el transformador de deformaciones, uno puede o bien cancelar la deformación o bien cambiar la longitud efectiva de la trayectoria óptica. Cabe señalar que el cambio cero
45 en la longitud de la trayectoria óptica no ocurre en el diseño de deformación nula debido al cambio del índice de refracción con la presión.

En otro aspecto, se proporciona un sistema de detección acústica distribuido que comprende: un cable de fibra óptica como se describe anteriormente; y una unidad examinadora para realizar una detección acústica distribuida sobre dicha fibra óptica.

- 55 El cable de fibra óptica puede desplegarse en un pozo.

Un aspecto de la invención también se refiere al uso de un cable de fibra óptica según se describió anteriormente para la detección acústica distribuida.

Un aspecto de la invención también se refiere al uso de un cable de fibra óptica según se describió anteriormente que tiene una sensibilidad relativamente alta a las señales acústicas transversales para la detección acústica distribuida para realizar un levantamiento sísmico.

5 Un aspecto de la invención también se refiere al uso de un cable de fibra óptica según se describió anteriormente que es relativamente insensible a las señales acústicas transversales en la detección por fibra óptica distribuida. En algunas realizaciones, la detección por fibra óptica distribuida puede comprender detectar variaciones en el campo magnético, en cuyo caso la fibra óptica puede estar acoplada a un material cuyas dimensiones varían en función de la intensidad del campo magnético, p. ej. un material magnetoestrictivo. En algunas realizaciones, la detección por fibra óptica distribuida puede comprender la detección de variaciones de temperatura.

10 La invención se describirá ahora a modo de ejemplo solamente con respecto a los dibujos adjuntos, de los cuales:

la figura 1 ilustra un aparato sensor de DAS convencional;

la figura 2 ilustra una estructura de cable de fibra óptica convencional;

la figura 3 ilustra una realización de una estructura de cable de fibra óptica según una realización de la presente invención;

15 la figura 4 ilustra los principios de un transformador de deformaciones para transformar una fuerza transversal en una fuerza longitudinal;

las figuras 5a y 5b ilustran dos realizaciones adicionales de la presente invención;

la figura 6 ilustra otros tipos de posibles transformadores de deformación;

20 las figuras 7a y 7b ilustran una estructura de cable de ejemplo que se fabricó y la figura 7c ilustra una estructura de cable de control; y

la figura 8 ilustra algunos resultados de pruebas usando las estructuras de cable ilustradas en las figuras 7a-c.

25 Las realizaciones de la presente invención se refieren a cables de fibra óptica adecuados para su uso para detección por fibra óptica, p. ej. para detección acústica distribuida (DAS), que tiene una sensibilidad deseada o ajustada a las deformaciones transversales. Algunas realizaciones se refieren a cables de fibra óptica adecuados para su uso para la detección por fibra óptica distribuida que tiene una sensibilidad relativamente buena a las tensiones transversales, por ejemplo, una sensibilidad transversal mejorada en comparación con los cables de fibra óptica convencionales. Otras realizaciones se refieren a cables de fibra óptica adecuados para su uso para detección acústica distribuida (DAS) que son sustancialmente insensibles a las tensiones transversales.

30 La figura 1 muestra un esquema de una disposición de detección por fibra óptica distribuida. Una longitud de fibra 104 óptica de detección está conectada de forma desmontable en un extremo a un examinador 106.

La salida del examinador 106 se pasa a un procesador 108 de señal, que puede situarse junto con el examinador o puede estar alejado del mismo, y opcionalmente una interfaz de usuario/pantalla gráfica 110, que en la práctica puede realizarse mediante un PC especificado de manera apropiada. La interfaz de usuario puede estar situada junto con el procesador de señal o puede estar alejada del mismo.

35 La fibra 104 de detección puede tener muchos kilómetros de longitud y, en algunas aplicaciones, puede tener decenas de kilómetros de longitud. En la DAS convencional, la fibra de detección puede ser una fibra óptica monomodo estándar, no modificada, tal como se usa habitualmente en aplicaciones de telecomunicaciones sin la necesidad de puntos de reflexión introducidos deliberadamente, tales como una rejilla Bragg de fibra o similares. La fibra estará protegida al contenerla con una estructura de cable que puede contener más de una fibra óptica.

40 En uso, el cable de fibra óptica que comprende la fibra 104 de detección se despliega en un área de interés para ser monitoreada. En funcionamiento, el examinador 106 lanza de radiación electromagnética de examen, que puede comprender, por ejemplo, una serie de pulsos ópticos que tienen un patrón de frecuencia seleccionado, a la fibra de detección. Los pulsos ópticos pueden tener un patrón de frecuencia como se describe en la publicación de patente de Gran Bretaña GB2,442,745 o características ópticas tales como las descritas en WO2012/137022 aunque los sensores DAS que dependen de un solo pulso de interrogación también son conocidos y se pueden usar. Obsérvese que, según se usa en el presente documento, el término "óptico" no está restringido al espectro visible y la radiación óptica incluye radiación infrarroja y radiación ultravioleta. Como se describe en GB2.442.745 y WO2012/137022, el fenómeno de la retrodispersión por efecto Rayleigh da como resultado que una fracción de la luz introducida a la fibra se refleje de vuelta al examinador, donde se detecta que proporciona una señal de salida que es representativa de las perturbaciones acústicas en la proximidad de la fibra. Por lo tanto, el examinador comprende convenientemente al menos un láser 112 y al menos un modulador 114 óptico para producir una pluralidad de pulsos ópticos separados por una diferencia de frecuencia óptica conocida. El examinador también comprende al menos un fotodetector 116 dispuesto para detectar la radiación que es retrodispersada por efecto Rayleigh de los

puntos de dispersión intrínseca dentro de la fibra 104. Un sensor DAS de retrodispersión por efecto Rayleigh es muy útil, pero también se conocen sistemas basados en la dispersión por efectos Brillouin o Raman.

La señal del fotodetector es procesada por el procesador 108 de señal. El procesador de señal demodula convenientemente la señal devuelta basándose en la diferencia de frecuencia entre los pulsos ópticos. El procesador puede procesar la retrodispersión detectada, por ejemplo, según se describe en cualquiera de los documentos GB2.442.745, WO2012/137021 o WO2012/137022. El procesador de señal también puede aplicar un algoritmo de desenvolvimiento de fase. Por lo tanto, se puede controlar la fase de la luz retrodispersada de varias secciones de la fibra óptica. Como se describió anteriormente, cualquier cambio en la longitud efectiva de la trayectoria óptica dentro de una sección dada de fibra, tal como podría ser debido a ondas de presión incidentes que causan deformación en la fibra, se puede, por lo tanto, detectar.

La forma de la entrada óptica y el método de detección permiten que una única fibra continua se resuelva espacialmente en partes discretas de detección longitudinal. Es decir, la señal acústica detectada en una parte de detección puede proporcionarse de manera sustancialmente independiente de la señal detectada en una parte adyacente. Obsérvese que el término "acústico" debe entenderse como cualquier tipo de onda de presión o perturbación mecánica o deformación variable generada en la fibra óptica y para evitar dudas, el término "acústico" se utilizará en la especificación para incluir señales sísmicas y ondas u otros tipos de vibración. Como se usa en esta especificación, el término "detección acústica distribuida" se tomará como detección mediante la interrogación óptica de una fibra óptica para proporcionar una pluralidad de partes discretas de detección acústica distribuidas longitudinalmente a lo largo de la fibra y el término "sensor acústico distribuido" se interpretará en consecuencia.

Un sensor de este tipo puede verse como un sensor intrínseco o totalmente distribuido, ya que utiliza la dispersión intrínseca procesada inherente a una fibra óptica y, por lo tanto, distribuye la función de detección en toda la fibra óptica.

La figura 2 ilustra generalmente un ejemplo de un tipo conocido de cable 200 de fibra óptica que podría usarse para proporcionar la fibra de detección. La figura 2 ilustra una sección transversal a través del cable de fibra óptica. El cable 200 de fibra óptica comprende al menos una fibra 201 óptica, que típicamente comprenderá un núcleo y un revestimiento y posiblemente una cubierta de fibra, como comprenderá bien un experto en la técnica. En algunas aplicaciones puede haber más de una fibra 201 óptica. Las fibras 201 ópticas pueden estar situadas dentro de un material 202 de protección para la protección de la fibra óptica. En algunos cables de fibra óptica, el amortiguamiento puede ser un material que está estrechamente unido a la(s) fibra(s) óptica(s) del cable, pero se conocen otros diseños que incluyen cables rellenos de gel donde el gel proporciona el material de amortiguamiento. En este ejemplo, el material 203 de protección está rodeado por una capa 203 de armadura. La capa 203 de armadura puede proporcionarse para proporcionar refuerzo y protección a la(s) fibra(s) 201 óptica(s). En algunas aplicaciones, la capa de armadura puede ser una capa metálica y puede, por ejemplo, comprender un tubo de acero o material similar. Sin embargo, en algunas aplicaciones se desea que el cable tenga cierta flexibilidad y un tubo de acero sería demasiado inflexible. En tales casos, el cable puede comprender una capa de armadura flexible, tal como una capa de aramida o un apantallamiento metálico trenzado. La aramida o capa metálica trenzada se enrollará firmemente para formar una capa de armadura continua y efectiva para proteger la fibra en todos los lados y se unirá a la capa de amortiguamiento para proteger la capa de fibra de la sobrestensión si está sujeta a una fuerza longitudinal, p. ej. que tira del cable. Se puede proporcionar un material 204 de cubierta exterior para proporcionar protección ambiental, p. ej. para hacer que el cable sea hermético al agua y/o impermeable al gas.

Por supuesto, un experto en la técnica apreciará que hay una variedad de diseños de cables de fibra óptica y en otros diseños puede haber capas de armadura adicionales o puede que no haya ninguna armadura en absoluto. En algunos diseños puede haber un elemento de resistencia central, tal como una varilla metálica o un cable que se extiende a lo largo de la trayectoria del eje del cable. Además, puede haber más capas de amortiguamiento y/o de cubierta.

Un cable 200 de fibra óptica tal como se describe con respecto a la figura 2 puede emplearse de manera útil en muchas aplicaciones de DAS. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, si la fibra 201 óptica de dicho cable 200 de fibra óptica se usa para detección por DAS, dicha fibra de detección será preferentemente sensible a las ondas de presión que se propagan a lo largo del eje longitudinal del cable. Una onda de presión longitudinal provocará una compresión del medio en el que se despliega el cable de fibra óptica. Al menos parte de la fuerza debida a la onda de presión, es decir, la deformación dinámica, se transmitirá a la fibra 201 óptica a través de las capas intermedias (la cantidad de acoplamiento depende de las propiedades de las capas intermedias). Sin embargo, una onda de presión que se propaga transversalmente con respecto al eje del cable (es decir, al eje longitudinal del cable) puede provocar en gran medida que el cable de fibra óptica se mueva de lado a lado, especialmente si cualquier capa 203 de armadura o resistencia comprende un material relativamente flexible tal como la aramida.

Las realizaciones de la presente invención proporcionan cables de fibra óptica donde el cable de fibra óptica comprende al menos un transformador de deformaciones para transformar una fuerza radial sobre el cable en una fuerza longitudinal sobre la fibra óptica, en otras palabras, para transformar una deformación dinámica sobre el transformador de deformaciones en una dirección transversal al eje del cable a una deformación longitudinal sobre la

fibra óptica. Obsérvese que, según se usa en el presente documento, el término "eje del cable" se referirá a un eje que se extiende longitudinalmente a lo largo de la longitud del cable. Por lo tanto, el eje del cable puede considerarse como una trayectoria a lo largo de la cual discurre el cable. Se apreciará que la dirección del eje del cable puede variar a lo largo de la longitud del cable y puede ser curvada o serpenteante o recta en varias secciones dependiendo del despliegue del cable.

Por lo tanto, en una realización, un cable de fibra óptica comprende al menos una fibra óptica. Un material de núcleo compatible puede estar acoplado mecánicamente a la fibra óptica de manera que una fuerza longitudinal que actúa sobre el material de núcleo compatible induce una tensión longitudinal en la fibra óptica. El cable de fibra óptica también comprende al menos un transformador de deformaciones deformable acoplado al material de núcleo compatible y configurado de tal manera que una fuerza que actúa sobre el transformador de deformaciones en una dirección transversal al eje del cable da como resultado una deformación del transformador de deformaciones aplicando así una fuerza longitudinal al material de núcleo compatible.

El transformador de deformaciones está configurado, junto con el material de núcleo compatible para ser deformable en una dirección transversal, es decir, localmente perpendicular al eje del cable del cable de fibra óptica, y para traducir efectivamente un desplazamiento radial o transversal en un desplazamiento longitudinal aplicado al material de núcleo compatible. En algunas realizaciones, el transformador de deformaciones tiene una forma con una longitud longitudinal en reposo, en ausencia de cualquier fuerza externa aplicada al cable, que se configura de tal manera que la deformación del transformador de deformaciones en respuesta a una fuerza transversal al eje del cable sobre una primera parte del cable provoca un cambio en la longitud longitudinal del transformador de deformaciones. Por longitud longitudinal se entiende una dimensión a lo largo del eje del cable.

Al menos una parte del transformador de deformaciones puede tener una forma convexa con respecto al eje del cable cuando se ve desde una dirección perpendicular al eje del cable para transferir una fuerza transversal a una fuerza longitudinal. Alternativamente, en algunas realizaciones, al menos una parte del transformador de deformaciones puede tener una forma cóncava con respecto al eje del cable cuando se ve desde una dirección perpendicular al eje del cable. Esto también podría transferir una fuerza transversal a una fuerza longitudinal, aunque con una inversión de la dirección de deformación en comparación con una realización convexa.

En una realización, el transformador de deformaciones puede comprender un elemento o componente helicoidal relativamente rígido o enrollado de manera similar que es sustancialmente helicoidal o está de manera general enrollado alrededor de un eje que es paralelo al eje longitudinal del cable.

La figura 3 ilustra una vista en perspectiva en corte de un cable 300 de fibra óptica según una realización de la presente invención. El cable de fibra óptica comprende al menos una fibra 301 óptica. Solamente se ilustra una fibra 301 óptica en la figura 3 para mayor claridad, pero se apreciará que el cable podría comprender una pluralidad de fibras ópticas. Cada fibra óptica puede comprender un núcleo y un revestimiento como entendería un experto en la técnica. La fibra óptica también puede comprender al menos un material de cubierta de fibra.

La(s) fibra(s) 301 óptica(s) se puede(n) acoplar a un material 302 amortiguador impermeable que está él mismo acoplado a un material 303 de núcleo compatible. El acoplamiento entre la fibra 201 óptica y el material 303 de núcleo compatible es tal que una deformación longitudinal dinámica aplicada al material de núcleo compatible inducirá una deformación longitudinal en la fibra óptica. En otras palabras, un desplazamiento longitudinal del material del núcleo compatible dará como resultado un desplazamiento longitudinal del material de amortiguamiento y, en consecuencia, de la fibra 301 óptica. Por lo tanto, la fibra óptica no se deslizará significativamente dentro del material 303 de núcleo o del amortiguador 302, al menos con las deformaciones dinámicas resultantes de las ondas de presión de las frecuencias de interés. En algunas realizaciones, el material 303 de núcleo compatible también puede actuar como material 302 amortiguador, es decir, puede no ser necesario un material 302 amortiguador separado.

En algunas realizaciones, el material 301 amortiguador puede ser un gel o material similar a un gel. Se conocen varios amortiguadores de gel para cables de fibra óptica. Un movimiento longitudinal relativamente repentino del material 303 de núcleo compatible provocará un movimiento longitudinal en un material amortiguador de gel que se transmitirá a la fibra 301 óptica embebida. Por lo tanto, un amortiguador de gel puede proporcionar el acoplamiento descrito anteriormente. Sin embargo, si el cable de fibra óptica está sujeto a deformaciones relativamente grandes y lentas, es decir, deformaciones a baja frecuencia, tales como las que se pueden experimentar durante la instalación o la manipulación del cable de fibra óptica, por ejemplo, un material de amortiguación de gel puede relajar las deformaciones experimentadas por la fibra óptica. Por lo tanto, el uso de un material amortiguador de gel puede ayudar a reducir el riesgo de daños durante la instalación y la manipulación, a la vez que proporciona un buen acoplamiento a las frecuencias de interés. Los cables de fibra óptica amortiguados con gel basados en un diseño convencional, es decir, sin un transformador de deformaciones, se han utilizado previamente como fibras de detección de DAS y han funcionado bien para las ondas longitudinales incidentes, mostrando un buen acoplamiento entre la fibra, el amortiguador de gel y las capas externas del cable a frecuencias acústicas de interés.

Mecánicamente acoplado al material 304 de núcleo compatible hay al menos un transformador de deformaciones que en esta realización comprende un elemento 304 enrollado devanado alrededor del material 303 de núcleo

compatible. El elemento 304 enrollado puede estar firmemente unido al material de núcleo compatible para sujetar de forma efectiva el material 303 de núcleo compatible de modo que el material de núcleo compatible se mueva con el transformador de deformaciones. Sin embargo, en algunas realizaciones, el transformador de deformaciones puede anclarse adicional o alternativamente al material de núcleo compatible en diversos puntos de anclaje y/o al menos parte del elemento 304 enrollado puede estar embebido dentro del material de núcleo compatible. El elemento enrollado en este ejemplo está enrollado alrededor del eje 305 de cable longitudinal de una manera generalmente helicoidal y está rodeado por al menos un material 306 de cubierta de cable. El material de cubierta de cable puede estar dispuesto de modo que cualquier presión que actúe sobre el material de cubierta pueda ser preferencialmente transferido al transformador de deformaciones, en lugar de al material de núcleo compatible. En otras palabras, sustancialmente ninguna o solamente una presión limitada puede transferirse directamente al material de núcleo compatible desde el material de la cubierta.

El elemento 304 enrollado del transformador de deformaciones es relativamente rígido y más rígido que el material 303 de núcleo compatible y que el material 302 amortiguador, si está presente. Sin embargo, el elemento enrollado es deformable en una dirección radial en respuesta a una deformación transversal dinámica. Debido al devanado helicoidal, dicha deformación del elemento 304 enrollado da como resultado un cambio radial o diametral que se traduce en un cambio de longitud longitudinal, como se ilustra en la figura 4.

La figura 4 ilustra una parte del cable de fibra óptica con un devanado completo del elemento 304 helicoidal enrollado. La figura 4 ilustra la trayectoria del elemento enrollado visto desde una dirección que es perpendicular al eje longitudinal del cable, es decir, una dirección transversal. Se puede ver que, desde tal punto de vista, el elemento en espiral tiene una forma convexa con respecto al eje longitudinal del cable, es decir, tiene una forma que se abomba o se curva hacia afuera desde el eje del cable en una dirección transversal. Por supuesto, se entenderá que si el elemento enrollado se enrolla alrededor del eje del cable, entonces la distancia radial de la bobina desde el eje del cable puede ser sustancialmente constante. Sin embargo, cuando se ve desde una dirección transversal (fija) dada, la trayectoria del miembro en espiral (o al menos la proyección de la trayectoria en un plano paralelo al eje del cable) tiene una trayectoria generalmente de meandro o serpentina con respecto al eje del cable que define una forma convexa. En otras palabras, la forma del transformador de deformaciones es tal que la distancia del transformador de deformaciones desde el eje del cable en una primera dirección transversal (fija) (p. ej., la componente de distancia del eje x) varía a lo largo del eje del cable (p. ej. el eje z). Esto significa que una fuerza 401 transversal aplicada al elemento enrollado se transforma al menos parcialmente en una fuerza longitudinal que da como resultado un cambio en la longitud longitudinal del transformador de deformaciones.

El lado izquierdo de la figura 4 ilustra la sección del cable en ausencia de una fuerza externa. Esta parte del transformador de deformaciones, que corresponde a un devanado simple, tiene una longitud de reposo igual al paso P de la bobina o devanado helicoidal y un diámetro D en reposo. El lado derecho de la figura 4 ilustra la situación con una fuerza 401 transversal aplicada, tal como puede aplicarse mediante una onda de presión que se propaga transversalmente al eje del cable. La fuerza 401 transversal da como resultado una deformación del transformador 304 de deformaciones en la dirección radial que se traduce en una deformación en la dirección longitudinal y, por lo tanto, un cambio en la longitud longitudinal de esta parte del elemento 304 enrollado. El transformador de deformaciones responde así a una transversal fuerza para inducir una deformación longitudinal en el material 303 de núcleo compatible y, por lo tanto, en la fibra 301 óptica.

Por lo tanto, si dicho cable de fibra óptica se usa para la detección con DAS con la fibra 301 óptica como fibra de detección, entonces las ondas de presión que se propagan transversalmente al cable de fibra óptica pueden dar como resultado una deformación longitudinal dinámica en la fibra óptica con un cambio de longitud de la trayectoria óptica resultante, incluso aunque la fibra óptica generalmente pueda discurrir a lo largo de una trayectoria que es paralela al eje del cable, es decir, sin requerir una disposición helicoidal de la fibra óptica. Tal cable de fibra óptica, por lo tanto, puede configurarse para mejorar la sensibilidad del sensor DAS a los estímulos acústicos/sísmicos que se propagan transversalmente al cable de fibra óptica en comparación con un cable de fibra óptica convencional tal como se ilustra en la figura 2.

La presión en el exterior de un cable de fibra óptica se traslada a un cambio en la longitud efectiva de la trayectoria óptica por dos efectos principales. El primero es el cambio físico en la longitud del cable a medida que se cambia la presión de la superficie. El segundo es por el efecto de la presión sobre el índice de refracción efectivo de la fibra. El principio detrás del transformador de deformaciones es utilizar una estructura de refuerzo dentro del cable para mejorar mecánicamente la forma en que la deformación diametral (es decir, la deformación radial o transversal) se traslada a una deformación longitudinal.

La inclusión del transformador de deformaciones puede proporcionar así un aumento controlado de la deformación longitudinal experimentada por la fibra óptica en respuesta a una deformación transversal o a una variación de presión dadas que actúan sobre el cable. En algunas realizaciones, el cable puede estar diseñado para proporcionar una sensibilidad mejorada a las deformaciones transversales, cuando se usa en detección por fibra óptica, en comparación con un cable de fibra óptica convencional.

La respuesta del transformador de deformaciones y del material de núcleo compatible a una deformación transversal dada puede adaptarse para la aplicación particular en la que puede emplearse el sensor de DAS.

Por ejemplo, en algunas aplicaciones, el cable de fibra óptica puede desplegarse en uso dentro de un medio líquido. Cuando se despliega en un medio líquido, una onda de presión de propagación dará como resultado una compresión y una rarefacción del medio líquido que rodea el cable de fibra óptica y, en consecuencia, del propio cable de fibra óptica. Para un cable de fibra óptica que en uso está destinado a ser encajado en un medio sólido, como enterrado en el suelo o encajado en cemento, por ejemplo, una onda de presión de propagación generalmente tenderá a producir una fuerza lateral y el cable estará limitado en su movimiento significativamente. En este último caso donde el cable está cementado en su lugar o embebido de manera similar en un material o estructura, la capa exterior de cubierta del cable puede estar privada de un movimiento longitudinal significativo. Para que el transformador de deformaciones pueda ofrecer la ventaja mecánica y transformar una deformación transversal en una deformación longitudinal, el transformador de deformaciones debería ser idealmente libre de moverse longitudinalmente con respecto a la cubierta exterior. De este modo, volviendo a la figura 3, el transformador de deformaciones puede estar dispuesto para poder moverse con relativa libertad dentro de la capa 306 de cubierta. Además, o alternativamente, puede haber al menos una capa 307 de cubierta externa que envuelva la capa 306 de cubierta con la capa 206 de cubierta libre para deslizarse efectivamente dentro de la capa 307 externa. En algunas realizaciones puede haber un pequeño espacio entre las dos capas que puede llenarse con un fluido, p. ej. un líquido que permite el movimiento relativo entre las capas de cubierta mientras transfiere cualquier onda de presión incidente a la estructura interna del cable.

La ventaja mecánica que proporciona el transformador de deformaciones del sistema dependerá de la rigidez relativa de los componentes, p. ej. del elemento helicoidal enrollado y del material de núcleo compatible, así como el ángulo helicoidal del devanado helicoidal.

El cable idealmente debería ser lo suficientemente rígido para instalarlo sin demasiado estiramiento. En alguna realización, el material de núcleo compatible puede no ser un material homogéneo continuo, sino que puede tener cavidades u otras características internas para que la rigidez total pueda adaptarse a la aplicación relevante. Por ejemplo, el material de núcleo compatible podría ser una forma extruida con agujeros y/o radios. El material de núcleo también debe ser lo suficientemente rígido como para no colapsar demasiado bajo ninguna presión en régimen estable del medio circundante cuando se despliega, p. ej. de la presión del agua si se despliega en el agua o del terreno circundante en una aplicación enterrada. En algunas realizaciones, la estructura del cable de fibra óptica, que puede comprender, por ejemplo, una única fibra óptica puede exhibir una respuesta de deformación/rigidez de aproximadamente 0,05% a 0,01% de deformación por carga de tensión de Newton.

El ángulo de hélice del transformador de deformaciones debe disponerse para proporcionar una ventaja mecánica deseada para el transformador de deformaciones, pero también elegirse para proporcionar una fuerza longitudinal significativa sobre el núcleo compatible para una fuerza transversal dada sobre el transformador de deformaciones. En alguna realización, el ángulo de hélice puede ser inferior a 45 grados para proporcionar la ventaja mecánica. En alguna realización, el ángulo de hélice puede ser mayor de aproximadamente 5 grados. En un ángulo de aproximadamente 5 grados, aproximadamente el 8% de la fuerza radial se transforma en fuerza longitudinal.

El diámetro del transformador de deformaciones puede ser relativamente reducido, lo que permite que el diámetro total de la estructura del cable sea relativamente reducido. Por ejemplo, el diámetro del transformador de deformaciones puede ser del orden de 5 a 10 mm. En algunos casos, el diámetro total del cable puede ser del orden de 6 a 10 mm. Sin embargo, si fuera necesario, se podrían construir cables de menor diámetro utilizando transformadores de deformación de menor diámetro y núcleos compatibles con un diámetro menor, por ejemplo, se podría fabricar un diámetro de cable de hasta aproximadamente 3 mm. Sin embargo, en algunas aplicaciones, p. ej. para el uso de tipos de hidrófonos, una estructura de cable de mayor diámetro puede ser ventajosa y se puede desear utilizar una estructura de transformador de deformaciones de mayor diámetro.

El elemento enrollado del transformador de deformaciones puede comprender convenientemente un material metálico, por ejemplo el acero. Como se mencionó, el elemento enrollado debe ser más rígido que el núcleo compatible y que la fibra óptica y aun así ser deformable frente las fuerzas transversales de interés. El acero puede proporcionar las propiedades requeridas y puede trabajarse para formar una estructura en espiral con relativa facilidad durante la fabricación del cable. El acero inoxidable es rígido, resistente a la corrosión, fácilmente disponible y razonablemente barato y ya se ha utilizado en la fabricación de cables por diferentes razones. Sin embargo, otros materiales tales como la fibra de vidrio o la fibra de carbono podrían usarse potencialmente en algunos diseños de cables y posiblemente materiales superelásticos tales como el Nitinol.

El material de núcleo compatible debería ser compatible de manera adecuada para moverse con el transformador de deformaciones, pero también debería ser adecuado para transferir una deformación inducida a la fibra óptica o al material amortiguador. Un material de núcleo compatible adecuado puede ser nailon extruido que ya se usa en algunas construcciones de cable de fibra óptica. Como se mencionó anteriormente, el material del núcleo compatible debe tener la rigidez suficiente para la aplicación requerida y, en algunos casos, puede tener una estructura no homogénea. En algunas realizaciones, por ejemplo, podría usarse un material de espuma de celda cerrada y, por ejemplo, la fracción de poro podría controlarse para ajustar la rigidez para la aplicación requerida. También podrían usarse otros materiales poliméricos.

La fabricación de un cable de fibra óptica según la presente invención puede implicar, por lo tanto, producir inicialmente una o más fibras ópticas en una configuración amortiguada hermética en un material de núcleo tal como el nailon extruido usando diversas técnicas de fabricación convencionales antes de enrollar un material adecuado tal como un alambre de acero alrededor del material de núcleo utilizando técnicas de bobinado conocidas. El material de núcleo con el elemento enrollado helicoidalmente de forma circundante puede entonces encapsularse en uno o más materiales de cubierta externa usando técnicas de fabricación conocidas. Como se mencionó anteriormente, la cubierta externa está dispuesta para aplicar cualquier presión externa al elemento enrollado, pero para evitar sustancialmente aplicar presión directamente al núcleo compatible. La estructura general del cable debe ser preferiblemente lo suficientemente rígida para instalarse sin demasiado estiramiento del cable, lo que podría causar daños a la fibra o fibras ópticas. En algunas realizaciones, se puede incorporar un elemento de resistencia en el cable de fibra óptica para limitar la magnitud total de la extensión longitudinal de la fibra para evitar daños al cable, y en particular a la fibra óptica, durante la manipulación e instalación donde se pueden experimentar fuerzas longitudinales relativamente altas. Adicional o alternativamente, un cable de tracción u otro aparato para limitar la extensión del cable puede estar unido o conformado dentro de la estructura del cable.

Se entenderá que las fibras ópticas devanadas con material metálico se han propuesto previamente. Por ejemplo, como se señaló anteriormente, el trenzado metálico se ha utilizado previamente para la armadura en cables de fibra óptica convencionales. Sin embargo, en tales cables el trenzado se ha devanado y entretejido firmemente y, como tal, no está configurado para ser deformable junto con un núcleo compatible de modo que traduzca una deformación radial en una deformación longitudinal. En los cables de fibra óptica convencionales, cualquier trenzado de este tipo está configurado para tener una deformación limitada y no proporciona ninguna ventaja mecánica y no funciona como un transformador de deformaciones.

También se ha propuesto utilizar material magnetostrictivo, que puede ser metálico, en un cable de fibra óptica para sensibilizar el cable de fibra óptica a campos magnéticos variables. Cualquier campo magnético variable podría detectarse utilizando las técnicas de DAS aplicadas a dicho cable que comprende material magnetostrictivo. Sin embargo, tales cables de fibra óptica sensibilizados magnéticamente están diseñados para un cambio de longitud inducido directamente en el material magnetostrictivo y tales cables de sensibilización magnética no han proporcionado un transformador de deformaciones deformable configurado para ser deformable para traducir una deformación radial en una deformación longitudinal. Si bien los principios de la presente invención podrían aplicarse utilizando material magnetostrictivo para el transformador de deformaciones en algunas realizaciones de la invención, el material del transformador de deformaciones no es magnetostrictivo.

La figura 3 ilustra un único elemento 304 enrollado devanado en una hélice continua. Sin embargo, se entenderá que se pueden usar otras disposiciones diversas. Por ejemplo, puede haber diferentes elementos helicoidales en diferentes partes del cable de fibra óptica. Puede que no sea posible proporcionar un único elemento helicoidal enrollado continuo para toda la longitud del cable de fibra óptica y, por lo tanto, se pueden proporcionar diferentes longitudes de la fibra óptica con diferentes elementos helicoidales enrollados. En alguna realización, una longitud dada de cable de fibra óptica puede tener más de un transformador de deformaciones, p. ej. más de un elemento helicoidal enrollado. Por ejemplo, como se ilustra en la figura 5a, se puede proporcionar al menos un elemento 304a helicoidal enrollado para una longitud dada de bobinado de cable en una dirección, p. ej. en el sentido de las agujas del reloj, y se puede proporcionar otro elemento 304b helicoidal enrollado para la misma longitud de devanado de fibra en la dirección opuesta, p. ej. en el sentido contrario a las agujas del reloj. Tener elementos helicoidales que se enrollen en direcciones opuestas a lo largo de la misma longitud de cable de fibra óptica puede incluso ayudar en la transformación de la deformación.

Además o alternativamente, un elemento 304c helicoidal enrollado puede ser intercalado con otro elemento 304d helicoidal enrollado con devanado en el mismo sentido. Como se mencionó anteriormente, el ángulo de devanado helicoidal se puede elegir para proporcionar una ventaja mecánica deseada. Por lo tanto, esto definirá el paso de hélice para un diámetro dado de material 303 de núcleo compatible. En algunos casos, proporcionar más de un devanado helicoidal puede ayudar a garantizar que las deformaciones transversales localizadas se transformen al menos parcialmente en un cambio de longitud longitudinal. Por ejemplo, si el diámetro, D , de la estructura helicoidal es del orden de 8 mm, y el ángulo de la hélice, a , es del orden de 10° , entonces el paso de la hélice es de aproximadamente 4,4 mm (basado en el paso = $\pi \cdot D \tan(a)$). Puede desearse tener elementos del transformador de deformaciones a lo largo de un lado del núcleo compatible con un espaciado de menos de 4,4 mm y, por lo tanto, se pueden entrelazar dos o más estructuras helicoidales.

Un transformador de deformaciones devanado helicoidalmente devanado alrededor del exterior de un material de núcleo compatible tiene las ventajas descritas anteriormente y puede fabricarse con relativa facilidad. Sin embargo, existen otros diseños de transformadores de deformación que podrían usarse en algunas realizaciones. La figura 6 ilustra algunos ejemplos.

En algunas realizaciones, se pueden usar uno o más transformadores de deformación helicoidales que no rodean el material 303 de núcleo compatible o incluso las fibras 301 ópticas. Por ejemplo, un transformador 601 de deformaciones helicoidal puede devanarse helicoidalmente con respecto a un eje paralelo al eje del cable pero dispuesto a un lado de la fibra 301 óptica, por ejemplo embebido dentro del material 303 de núcleo compatible. Al

menos otro transformador 601b de deformaciones helicoidal similar podría disponerse en el otro lado de la fibra o fibras ópticas para proporcionar una transformación uniforme de la deformación en ambos lados de la fibra óptica.

En algunas realizaciones, uno o más transformadores de deformación con formas convexas podrían anclarse al exterior del material de núcleo compatible. Por ejemplo, el transformador 602 de deformaciones está anclado al material de núcleo compatible en los puntos 603 y 604 que están separados longitudinalmente entre sí y comprenden un elemento generalmente curvado que se extiende entre los puntos de anclaje, de modo que la longitud total del transformador de deformaciones es mayor que la separación longitudinal. Una fuerza radial hacia adentro tenderá a deformar la transformación de deformación forzando al punto de anclaje a separarse. El transformador 604 de deformaciones es similar y está anclado en los puntos 605 y 606, pero comprende dos varillas generalmente rectas que, por ejemplo, pueden unirse en un punto de pivote. El exterior del núcleo compatible puede estar rodeado por varios de dichos transformadores de deformación para responder a una fuerza transversal desde cualquier dirección y los transformadores de deformación pueden estar acoplados a una placa de fuerza para una distribución uniforme de la fuerza. El transformador 608 de deformaciones es algo similar pero está embebido dentro del material 302 de núcleo compatible.

En algunas realizaciones, el transformador de deformaciones puede comprender tubos corrugados o cápsulas acopladas al material del núcleo, por ejemplo, tubos corrugados de acero inoxidable.

En un ejemplo, se fabricó un primer cable con un transformador de deformaciones helicoidal. La figura 7a muestra una sección transversal de la estructura del cable. Una sola fibra 701 óptica con un recubrimiento 702 de acrilato fue amortiguada con nailon 703 a un diámetro de 0,4 mm antes de ser trenzada por encima con alambres 703 de níquel de 80 micrones de diámetro. La configuración de trenzado era de ocho grupos de tres alambres con una longitud de tendido de 6,5 mm. La figura 7b muestra una micrografía de la fibra óptica amortiguada trenzada. Después del trenzado, el cable se enfundó con una fina capa de nailon para unir el sistema. El diámetro total después del trenzado y el revestimiento fue de 0,9 mm.

Para proporcionar ejemplos comparativos, se fabricó un segundo cable con una sección transversal como se ilustra en la figura 7c. En este diseño, una fibra 701, 702 monomodo recubierta de acrilato (similar a la utilizada para el primer cable) se amortiguó con nailon 703 junto con cuatro alambres 705 de níquel de 150 micrones de diámetro. Los alambres de Ni se colocaron para que discurrieran paralelos a la fibra óptica y los cables y la fibra óptica se hicieron pasar a través de un cabezal de extrusión. El nailon 12 se extruyó alrededor de la disposición de fibra/alambre hasta un diámetro total de 1 mm antes de enfriarse con agua. La sección transversal del segundo cable y el área de la sección transversal del níquel dentro del segundo cable es, por lo tanto, sustancialmente la misma que en el primer cable.

Se produjo la misma longitud de cada uno de los cables primero y segundo. Las longitudes de cable se conectaron a una unidad examinadora (IU) de DAS y se determinó el cambio en la fase óptica de la señal de medición DAS mientras se sometían los cables a una variación de presión controlada en una cámara de presión. Se realizó una prueba similar usando solamente la fibra óptica monomodo recubierta de acrilato sin ningún amortiguamiento o cables de níquel. La figura 8 muestra algunos resultados de la prueba a medida que la presión se incrementó en incrementos de 0,5 bar desde 0 barg hasta 5 barg, luego se redujo. Se aseguró que la fibra estuviera bien embutida en la cámara de presión para que los cambios en la longitud de la cámara de presión con la presión no afectaran a la fibra. El cambio en la longitud de la trayectoria óptica se midió usando la IU, y luego se normalizó para una longitud de fibra de 1 m. El segundo cable, con los alambres de níquel rectos, exhibió una respuesta 801 de presión que era sustancialmente la misma que la fibra no amortiguada recubierta de acrilato (cuya respuesta está enmascarada en gran medida en la figura 8 por el gráfico 801 superpuesto). Por el contrario, se ve que la respuesta del primer cable, con el transformador de deformaciones trenzado helicoidal, tiene una sensibilidad a la presión 18 veces mayor que el segundo cable equivalente con elementos de rigidez colocados axialmente. Esto proporciona una demostración clara de que la sensibilidad de un cable de fibra óptica con un transformador de deformaciones adecuado tal como el descrito anteriormente puede proporcionar un aumento significativo en la sensibilidad a la presión, es decir, a las deformaciones transversales, comparado con una fibra óptica convencional (p. ej., la fibra recubierta de acrilato) o con un cable sin transformador de deformaciones.

Obsérvese que en esta prueba se puede ver cierta histéresis en la respuesta del primer cable; esto puede ser indicativo de una unión insuficiente entre los alambres que forman el transformador de deformaciones y la fibra óptica en el cable de prueba.

Estos resultados también muestran que, en este ejemplo, la respuesta de la fibra óptica no amortiguada, o el segundo cable sin un transformador de deformaciones, es negativa con el aumento de la presión, es decir, la fase óptica normalizada detectada por la IU de la DAS, se determinó como de aproximadamente $-42 \mu\text{rads/m/Pa}$. Este es un efecto pequeño y, en contra de la intuición, el signo de la respuesta es negativo. En otras palabras, aumentar la presión tiene el efecto de reducir aparentemente la longitud efectiva de la trayectoria óptica.

Se cree que a medida que aumenta la presión superficial en la fibra óptica, la fibra óptica puede experimentar un cambio de longitud física, es decir, un estiramiento, que puede tender a aumentar la longitud de la trayectoria óptica, pero también hay una modulación del índice de refracción que tiende a reducir la longitud de la trayectoria del efecto.

La respuesta general es el resultado de ambas contribuciones y, en el ejemplo ilustrado en la figura 8 sin un transformador de deformaciones, el efecto de modulación del índice de refracción parece dominar.

5 Por lo tanto, un transformador de deformaciones adecuado puede proporcionar una ventaja mecánica al cambio de longitud de modo que domine y, por lo tanto, mejore significativamente la sensibilidad a las variaciones de presión debidas a las ondas acústicas transversales. En otras palabras, la magnitud de la respuesta de la fibra óptica del cable a las deformaciones transversales o la variación de presión es mayor que la respuesta de una fibra óptica correspondiente o una fibra óptica estándar no amortiguada a una deformación o a una presión transversal dada. Como se señaló anteriormente, se puede esperar que una fibra óptica sin amortiguamiento muestre una variación en la fase de una señal de medición del orden de $-40 \mu\text{rads/m/Pa}$ (a una longitud de onda de aproximadamente 1550 nm). La mayoría de las fibras ópticas basadas en sílice estándar exhibirán una respuesta similar. El transformador de deformaciones puede mejorar la sensibilidad de modo que la magnitud del cambio de fase con el cambio de presión puede ser mayor que la de una fibra óptica sin amortiguamiento. El transformador de deformaciones puede proporcionar una magnitud de respuesta que es al menos un 25% mayor, o al menos un 50% mayor, o al menos un 100% mayor que la de un cable estándar no amortiguado o al menos cinco veces mayor o al menos diez veces mayor. Un cable de alta sensibilidad puede verse como uno en el que la magnitud de la respuesta de una fibra óptica a una deformación transversal o cambio de presión en términos de cambio de longitud de la trayectoria es del orden de $80 \mu\text{rads/m/Pa}$ o mayor, por ejemplo mayor de $200 \mu\text{rads/m/Pa}$.

20 El (los) presente(s) inventor(es) también han apreciado, sin embargo, que la respuesta del transformador de deformaciones puede ajustarse de manera que no haya sustancialmente respuesta de la fibra óptica del cable a ninguna variación de presión. En otras palabras, si el transformador de deformaciones se configura de manera que a medida que aumenta la presión, el efecto debido a la variación resultante del índice de refracción (que tiende a reducir la longitud efectiva de la trayectoria óptica) sea sustancialmente opuesto e igual al efecto del cambio de longitud.

25 Por lo tanto, en algunas realizaciones, el transformador de deformaciones puede configurarse con respecto a la fibra óptica y al material de núcleo compatible particular para que el cable sea sustancialmente insensible a cualquier variación de presión, es decir, deformaciones transversales, que actúan sobre el cable, p. ej. tales como los estímulos acústicos incidentes desde una dirección transversal al eje del cable, si dicho cable se usara para DAS.

30 Para ajustar la respuesta de un transformador de deformaciones helicoidal, pueden ajustarse por ejemplo el ángulo de hélice y/o la rigidez total del transformador de deformaciones. El análisis anterior describe cómo la rigidez y/o el ángulo de hélice pueden afectar la ventaja mecánica proporcionada por el transformador de deformaciones y un experto en la técnica sería capaz de diseñar un transformador de deformaciones adecuado. Las fibras ópticas a base de sílice estándar tenderán a tener una respuesta similar entre sí a la deformación/presión transversal aplicada.

35 Un experto en la técnica podría fácilmente fabricar y probar varios diseños conforme a las líneas descritas anteriormente para determinar una disposición adecuada.

40 Un cable de fibra óptica que sería sustancialmente insensible a las deformaciones transversales puede ser ventajoso para otros tipos de detección de fibra óptica distribuida, particularmente para la detección de fibra óptica distribuida basada en la retrodispersión por efecto Rayleigh. Por ejemplo, los principios de la detección de fibra óptica distribuida basada en el efecto Rayleigh se han aplicado para monitorear las variaciones de temperatura, ya que las variaciones de temperatura también darán como resultado la expansión / contracción de la fibra de detección y/o las modulaciones del índice de refracción que resultan en un cambio en la longitud de la trayectoria óptica del efecto. Cuando se monitorean los cambios de temperatura, que tienden a ser cambios a frecuencia relativamente baja, es posible aplicar un filtro de paso bajo a las señales detectadas para evitar los efectos de estímulos acústicos de frecuencia más alta. Sin embargo, es difícil distinguir entre las señales de medición debidas a los cambios de temperatura y las señales de medición debidas a las variaciones de deformación/presión a baja frecuencia. Por lo tanto, un cable de fibra óptica según una realización de la presente invención que es relativamente insensible a las deformaciones transversales o las variaciones de presión se puede usar para la detección de cambio de temperatura de fibra óptica distribuida y será intrínsecamente insensible a las variaciones de presión de fondo que de otro modo podrían enmascarar la señal de interés.

50 En algunas realizaciones, la determinación de los cambios de temperatura usando un cable de fibra óptica que está diseñado para ser insensible a la presión podría usarse para calibrar o corregir variaciones basadas en la temperatura en un sensor de DAS que se usa para detectar variaciones de presión (que pueden o no usar un cable de fibra óptica según una realización de la presente invención que esté configurada para tener una alta sensibilidad a las deformaciones transversales).

55 Los principios de la detección de fibra óptica distribuida basada en el efecto Rayleigh se han aplicado para controlar las variaciones del campo magnético mediante el acoplamiento de la fibra óptica a un material magnetostrictivo. Los cambios en la intensidad del campo magnético provocan un cambio en las dimensiones del material magnetostrictivo que puede comunicar una deformación detectable en la fibra óptica. Sin embargo, de nuevo puede ser difícil distinguir las deformaciones debidas a un campo magnético variable de las deformaciones debidas a una

onda de presión incidente. Nuevamente, usar un cable de fibra óptica que esté configurado para ser sustancialmente insensible a las variaciones de presión en dicho sensor de fibra óptica puede dar como resultado una mejor relación señal/ruido para la señal de interés.

5 En algunas aplicaciones, por ejemplo, para usar la DAS para detectar el movimiento de trenes en una red ferroviaria, la señal acústica recibida en la fibra de detección puede ser una señal de gran amplitud. Esto puede causar que el sensor de DAS se salga de escala, es decir, para un sistema DAS de medición de cambio de fase, el cambio de fase resultante puede ser mayor de 2π radianes. En algunos casos, puede desplegarse una estructura de cable con una sensibilidad a la presión reducida, donde la señal de interés es una señal de gran amplitud, de modo que se reduzca la probabilidad de salirse de la escala.

10 Debe observarse que, en las realizaciones descritas anteriormente, los transformadores de deformación están dispuestos generalmente de modo que el cable responda de manera sustancialmente igual a una deformación transversal incidente desde cualquier dirección transversal. Sin embargo, en algunos casos, los transformadores de deformación pueden estar dispuestos para proporcionar una transformación de deformación para deformaciones transversales incidentes solo en una o más direcciones predeterminadas. En otras palabras, los transformadores de deformación pueden estar dispuestos para hacer que la estructura del cable sea direccionalmente sensible a las direcciones transversales definidas y relativamente insensible a las ondas que se propagan en una dirección transversal ortogonal.

15 Las realizaciones de la invención son particularmente adecuadas para su uso como cables de detección para detección acústica distribuida de fibra óptica basada en la dispersión de Rayleigh a medida que el transformador de deformaciones convierte al menos alguna fuerza transversal en una deformación longitudinal en la fibra óptica dando como resultado un cambio en la longitud de la trayectoria. Sin embargo, las estructuras de cable de la presente invención pueden usarse en una gama de aplicaciones y, por ejemplo, como cables de detección para otros tipos de sensores.

20 La estructura de cable de fibra óptica de la presente invención puede desplegarse, por ejemplo, para levantamientos sísmicos. La estructura del cable de fibra óptica puede desplegarse en un pozo para ser sensible a las ondas sísmicas transversales y, por ejemplo, puede usarse para el perfilado sísmico vertical. En algunas realizaciones, la estructura del cable de fibra óptica puede desplegarse en o cerca de la superficie de un área de interés, por ejemplo enterrada en una zanja poco profunda, para la prospección sísmica de superficie para recibir señales sísmicas que viajan sustancialmente verticalmente.

25 Debe observarse que las realizaciones mencionadas anteriormente ilustran en lugar de limitar la invención, y que los expertos en la materia podrán diseñar muchas realizaciones alternativas sin apartarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas. La palabra "que comprende" no excluye la presencia de elementos o pasos distintos de los enumerados en una reivindicación, "un" o "una" o "uno" no excluye una pluralidad, y un único procesador u otra unidad puede cumplir las funciones de varias unidades mencionadas en las reivindicaciones. Cualquier signo de
35 referencia en las reivindicaciones no se interpretará de manera que limite su alcance.

REIVINDICACIONES

1. Un cable (300) de fibra óptica para detección de fibra óptica distribuida que tiene un eje (305) de cable longitudinal que comprende;
- al menos una fibra (301) óptica;
- 5 un material (303) de núcleo compatible acoplado mecánicamente a la -al menos una- fibra (301) óptica de manera que una fuerza longitudinal que actúa sobre el material (303) de núcleo compatible induce una deformación longitudinal en la -al menos una- fibra (301) óptica; y
- al menos un transformador (304) de deformaciones deformable acoplado al material (303) de núcleo compatible, caracterizado por que al menos un transformador (304) de deformaciones comprende al menos un elemento (304a-d, 601a-b) helicoidalmente enrollado y está configurado de manera que una fuerza (401) que actúa sobre el elemento helicoidalmente enrollado del transformador de deformaciones en una dirección transversal al eje del cable da como resultado una deformación del elemento helicoidalmente enrollado del transformador (304) de deformaciones aplicando así una fuerza longitudinal al material (303) de núcleo compatible.
- 10 2. Un cable (300) de fibra óptica según la reivindicación 1, en el que al menos una porción del transformador (304) de deformaciones tiene una forma con una longitud longitudinal en reposo en ausencia de cualquier fuerza externa aplicada al cable (300) y está configurado de tal manera que la deformación del transformador (304) de deformaciones en respuesta a una fuerza transversal al eje (305) del cable sobre una primera parte del cable (300) provoca un cambio en la longitud longitudinal del transformador (304) de deformaciones.
- 15 3. Un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que al menos una parte del transformador (304) de deformaciones tiene una forma convexa con respecto al eje (305) del cable cuando se mira desde una dirección perpendicular al eje (305) del cable.
- 20 4. Un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el al menos un transformador (304) de deformaciones está anclado al material (303) de núcleo compatible en una pluralidad de puntos de anclaje.
- 25 5. Un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el al menos un transformador (304) de deformaciones está al menos parcialmente embebido en el material (303) de núcleo compatible.
6. Un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el elemento (304a-d, 601a-b) helicoidalmente enrollado está enrollado alrededor de dicho elemento (303) de núcleo compatible.
- 30 7. Un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el ángulo de hélice de dicho elemento (304a-d, 601a-b) helicoidalmente enrollado es mayor de 5 grados y menor de 45 grados.
8. Un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que al menos una parte del cable (300) de fibra óptica comprende una pluralidad de transformadores (304a-d, 601a-b) de deformaciones, comprendiendo cada transformador de deformaciones un elemento (304a-d, 601a-b) enrollado devanado helicoidalmente.
- 35 9. Un cable (300) de fibra óptica según la reivindicación 8, en el que al menos un elemento (304a-d, 601a-b) enrollado devanado helicoidalmente está enrollado en la dirección opuesta a otro elemento (304a-d, 601a-b) enrollado devanado helicoidalmente.
10. Un cable (300) de fibra óptica según la reivindicación 8 o la reivindicación 9, en el que al menos un elemento (304a-d, 601a-b) enrollado devanado helicoidalmente está intercalado con otro elemento (304a-d, 601a-b) enrollado devanado helicoidalmente.
- 40 11. Un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el transformador (304) de deformaciones es más rígido que el material (303) de núcleo compatible.
12. Un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende una primera capa (306) de cubierta en el que al menos una fibra (301) óptica, el material (303) de núcleo compatible y el -al menos uno- transformador (304) de deformaciones están dispuestos dentro de la primera capa (306) de cubierta.
- 45 13. Un cable (300) de fibra óptica según la reivindicación 12, en el que al menos parte del transformador (304) de deformaciones está acoplado a la primera capa (306) de cubierta y el transformador (304) de deformaciones y el material (303) de núcleo compatible están dispuestos de manera que sean móviles con respecto a la primera capa (306) de cubierta.
- 50 14. Un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el transformador (304) de deformaciones está configurado con respecto al material (303) de núcleo compatible y a la fibra (301) óptica

de modo que la fibra (301) óptica sea sustancialmente insensible a las señales acústicas transversales si se usa para la detección acústica distribuida; en el que, una deformación transversal de una parte dada del cable (300) no da como resultado ningún cambio sustancial en la longitud efectiva de la trayectoria óptica de esa parte de la fibra (301) óptica.

5 15. Un sistema de detección acústica distribuida que comprende:

un cable (300) de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores; y

una unidad (106) examinadora para realizar una detección acústica distribuida en dicha fibra (301) óptica.

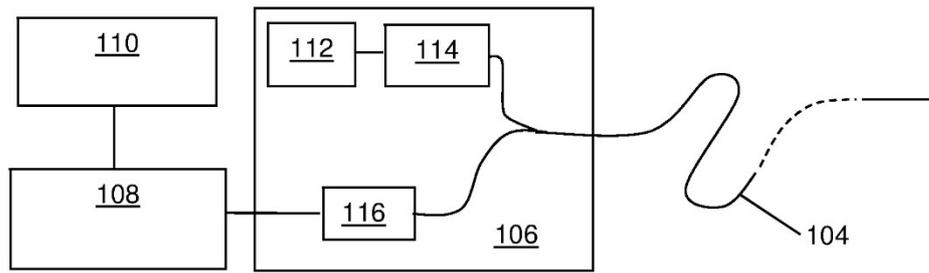


Figura 1

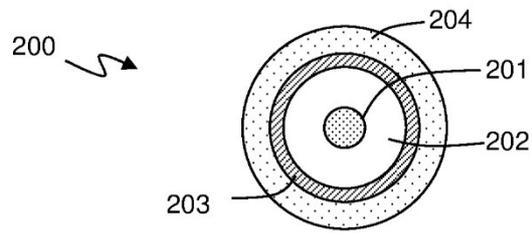


Figura 2

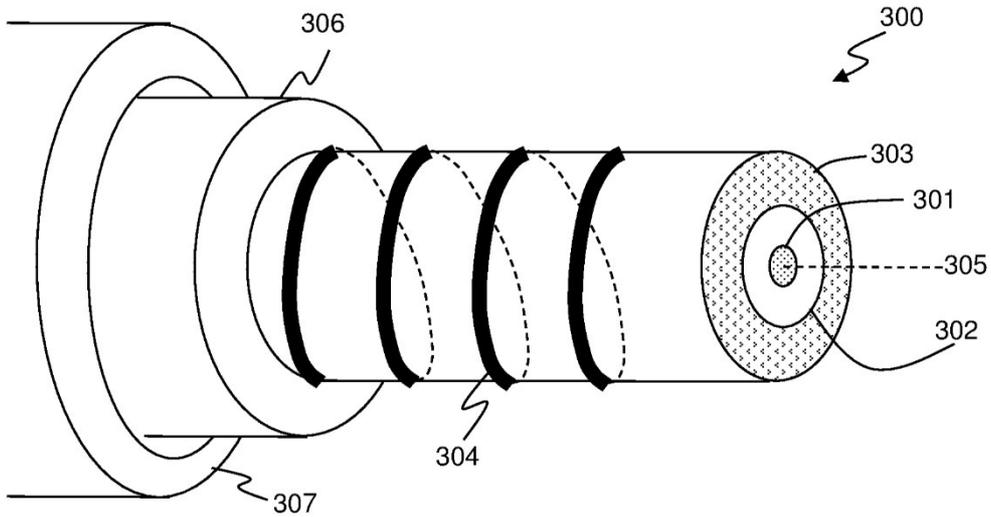


Figura 3

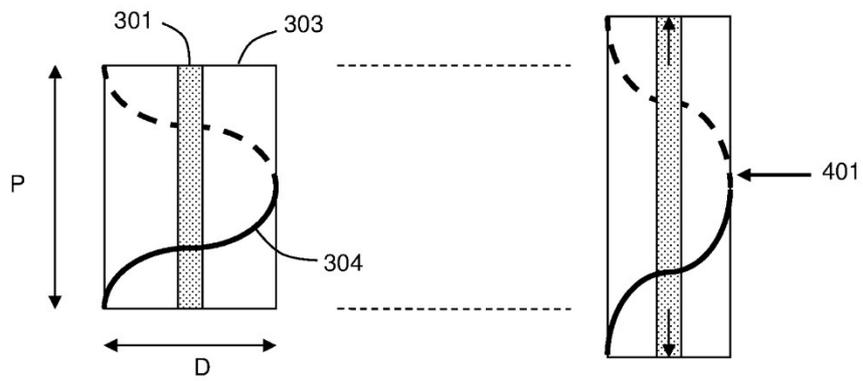


Figura 4

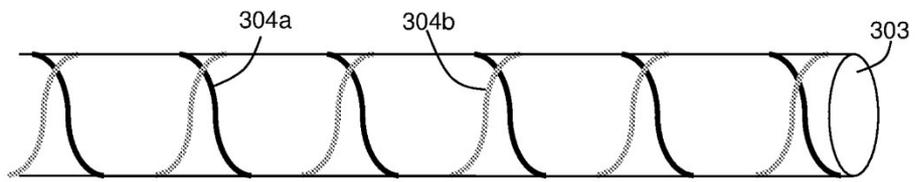


Figura 5a

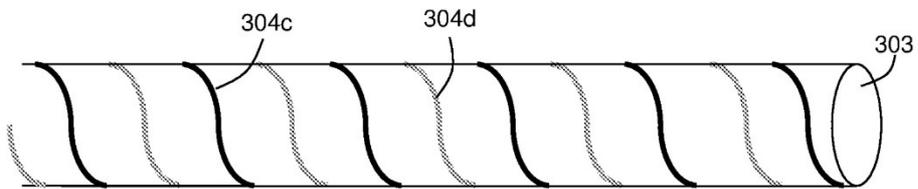


Figura 5b

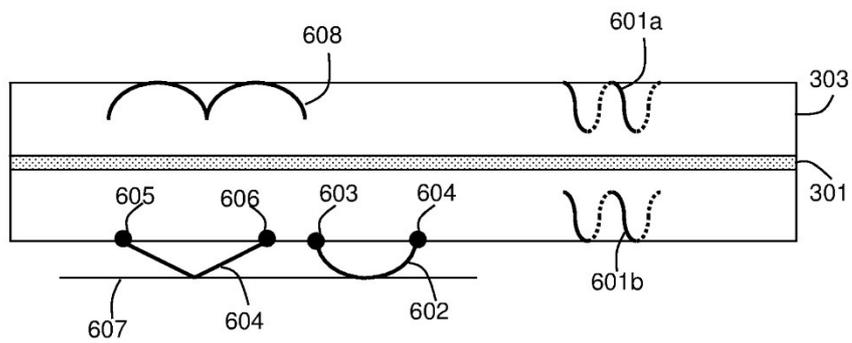


Figura 6

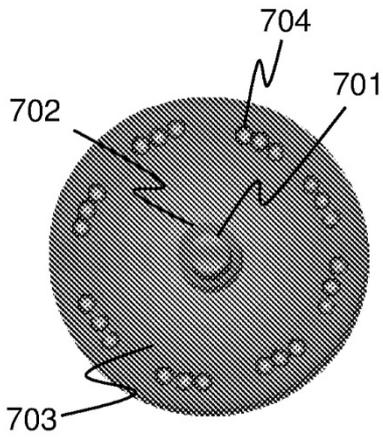


Figura 7a

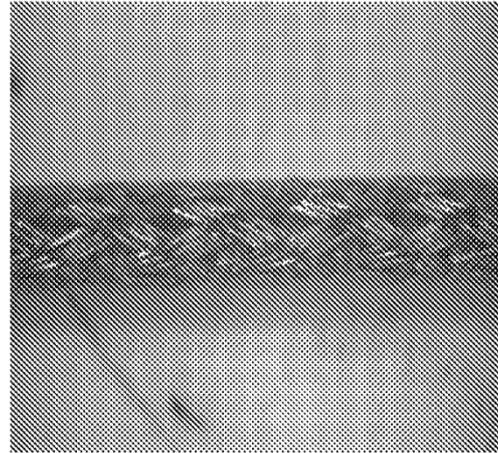


Figura 7b

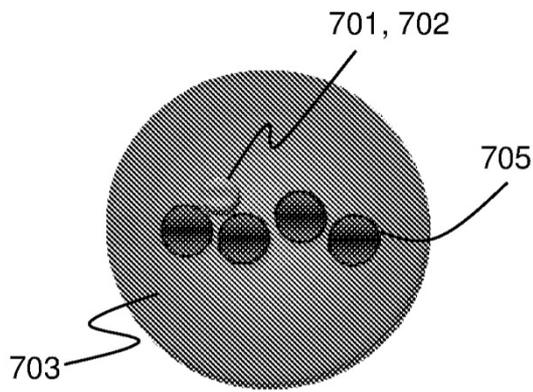


Figura 7c

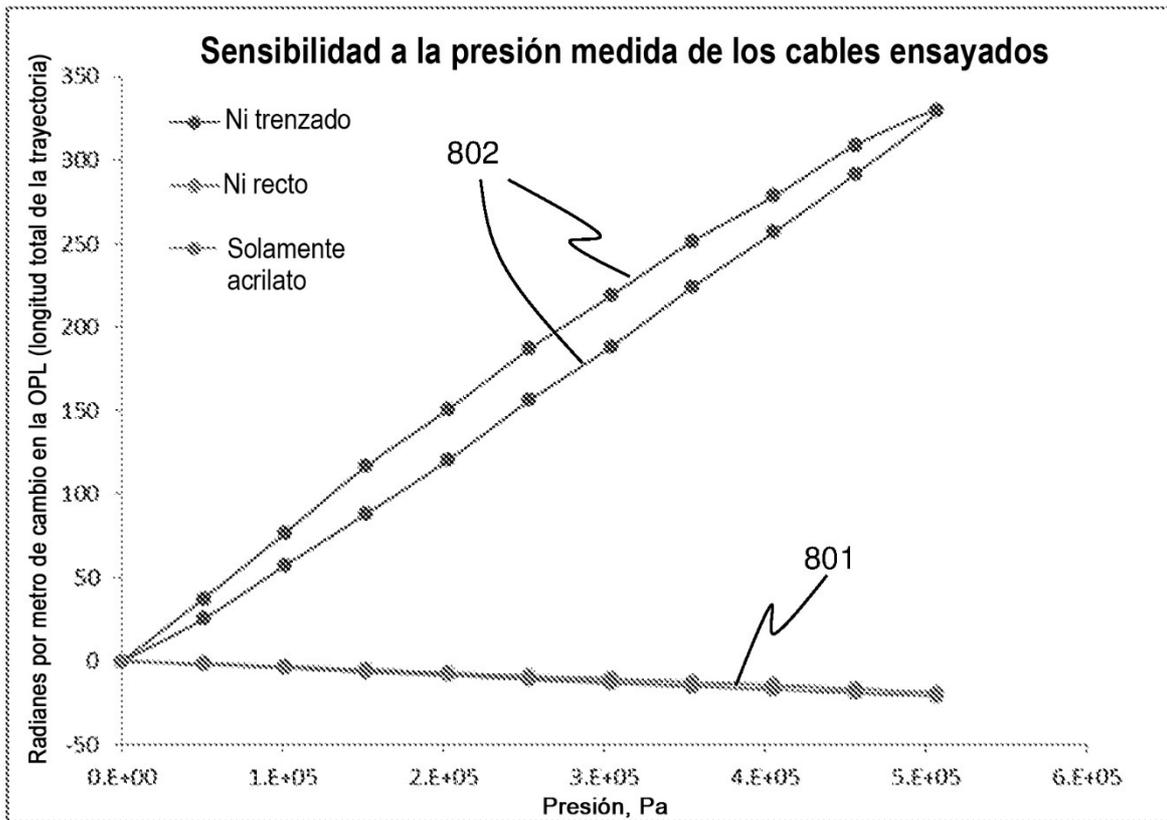


Figura 8