

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 683 823**

51 Int. Cl.:

B61L 23/04 (2006.01)

B61L 1/16 (2006.01)

B61L 27/00 (2006.01)

G01M 5/00 (2006.01)

G01N 29/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.02.2013 PCT/GB2013/050451**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.08.2013 WO13124681**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.02.2013 E 13707906 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.05.2018 EP 2817604**

54 Título: **Monitorización de infraestructura de red de transporte**

30 Prioridad:
24.02.2012 GB 201203273

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
28.09.2018

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 2 683 823 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

Monitorización de infraestructura de red de transporte

5 La presente invención se refiere a la monitorización de la infraestructura de redes de transporte, por ejemplo, la infraestructura de redes ferroviarias, tales como túneles o puentes o la propia vía férrea, y en particular a la supervisión de condiciones que utiliza el movimiento del tráfico en la red ferroviaria.

La infraestructura de la red de transporte, como la infraestructura de la red ferroviaria, generalmente comprenderá algunas estructuras de las que es deseable monitorizar la condición. Por ejemplo, se puede desear monitorizar la condición de los túneles que forman parte de la red para detectar cualquier falla en el túnel que pueda conducir a fallas.

10 En algunas redes ferroviarias, la condición de los túneles puede inspeccionarse manualmente. Esto puede comprender una inspección por parte del personal adecuado, que incluye una inspección visual y/o la realización de varias pruebas o mediciones para identificar cualquier posible problema. Por ejemplo, la condición de las paredes puede inspeccionarse visualmente, la posición relativa de los marcadores conocidos puede medirse para cualquier movimiento y, en algunos casos, la condición de la pared puede probarse utilizando sondas adecuadas.

15 Claramente, sin embargo, tales inspecciones requieren enviar un equipo de inspección a la estructura pertinente y la inspección puede tomar un tiempo significativo. El área que se inspeccionará, incluso en un túnel de ferrocarril de vía única de unos pocos cientos de metros de longitud, puede ser importante y algunos túneles pueden ser lo suficientemente grandes como para albergar pistas múltiples y tener un orden de kilómetros de longitud. La inspección solo será posible en momentos en que la sección relevante de la red ferroviaria no esté en uso, lo que puede limitar el tiempo disponible para la inspección y/o resultar en servicios reducidos o cancelados en la red. Por estas razones, 20 la inspección manual suele ser una empresa costosa y que requiere mucho tiempo, por lo que la mayoría de la infraestructura se inspecciona solo periódicamente, en algunos casos con períodos de tiempo significativos entre las inspecciones.

25 En algunas estructuras también puede haber una cantidad de sensores instalados de forma permanente para proporcionar una monitorización estructural de la salud en curso. Por ejemplo, varios sensores de esfuerzo, acelerómetros, etc. y similares pueden desplegarse a través de un túnel para detectar cualquier movimiento. Tales sensores son típicamente sensores de punto y, por lo tanto, proporcionan una cobertura adecuada para un túnel, que puede tener kilómetros de longitud, y requiere muchos de tales sensores con el consiguiente gasto. Para la supervisión remota, cada sensor debe tener una fuente de alimentación adecuada y estar dispuesto para poder transmitir los datos 30 adquiridos para su análisis. Realizaciones de la presente invención proporcionan métodos y aparatos para monitorizar la condición de estructuras que forman parte de la infraestructura de una red de transporte.

35 En un aspecto de la invención se proporciona un método de monitorización de condición según la reivindicación 1. El método de este aspecto de la presente invención utiliza detección acústica distribuida por fibra óptica (DAS). La detección acústica distribuida es un tipo conocido de detección donde una fibra óptica se despliega como fibra sensible y se interroga repetidamente con radiación electromagnética para proporcionar detección de actividad acústica a lo largo de su longitud. Normalmente, uno o más pulsos de entrada de radiación se lanzan a la fibra óptica. Al analizar la radiación retrodispersada desde el interior de la fibra, la fibra se puede dividir efectivamente en una pluralidad de partes discretas de detección que pueden ser (pero no tienen que ser) contiguas. Dentro de cada una de las perturbaciones mecánicas de las partes discretas de detección, de la fibra, por ejemplo, debidas a ondas acústicas incidentes, provocan una variación en las propiedades de la radiación que se retrodispersa desde esa parte. Esta variación se puede detectar y analizar y usar para dar una medida de la intensidad de la perturbación de la fibra en esa parte de detección. Por lo tanto, el sensor DAS actúa efectivamente como una matriz de detección lineal de partes de detección acústica de la fibra óptica. La longitud de las partes de detección de fibra está determinada por las características de la radiación de interrogación y el procesamiento aplicado a las señales de retrodispersión, pero 45 típicamente se pueden usar partes sensoras del orden de unos pocos metros a algunas decenas de metros aproximadamente. Tal como se usa en esta memoria descriptiva, el término "detección acústica distribuida" significa detección al interrogar una fibra óptica para proporcionar una pluralidad de partes de detección acústica discretas distribuidas longitudinalmente a lo largo de la fibra y el término "sensor acústico distribuido" se interpretará en consecuencia. El término "acústico" significa cualquier tipo de onda de presión o perturbación mecánica que pueda dar lugar a un cambio de tensión en una fibra óptica y para evitar dudas, el término acústico debe incluir ondas ultrasónicas y subsónicas, así como ondas sísmicas. 50

55 El DAS puede utilizarse para proporcionar muchas partes o canales de detección en una longitud de fibra larga, por ejemplo, DAS se puede aplicar en longitudes de fibra de hasta 40 km o más con canales de detección contiguos del orden de 10 m de longitud. En el documento US 6487914 B1 se divulga un método de monitorización estructural que utiliza sensores acústicos distribuidos que tienen fibras ópticas. En este documento, las señales de los sensores se utilizan para identificar el deterioro de la estructura al analizar ondas acústicas en la medida que pasan los vehículos.

Del documento "Fibre Optic Sensor Applications in Transportation Infrastructure Protection" de David Krohn et al de Proceedings of SPIE vol. 7314, 731407, los sensores ópticos de fibra distribuidos para monitorizar estructuras de puentes y túneles son conocidos. En este documento, la propagación de vibraciones a través de las juntas de los puentes se realiza un seguimiento para identificar la amortiguación o amplificación de vibraciones indicativas de defectos. En la solicitud de patente copendiente GB1201768.7 se ha propuesto que los sensores DAS pueden desplegarse a lo largo de redes de transporte ferroviarias o de carreteras, para proporcionar monitorización del movimiento del tráfico en la red de transporte como parte de un método de monitorización y/o para detectar movimiento de tráfico anormal. Por ejemplo, en una red ferroviaria, el movimiento de un tren en una vía férrea adyacente a una fibra que detecta el DAS. La fibra generará señales acústicas que pueden usarse para rastrear el tren a medida que se mueve, proporcionando información de posición en tiempo real a una resolución de unas pocas decenas de metros continuamente a lo largo de toda la longitud de la sección supervisada.

Los presentes inventores se han dado cuenta de que el DAS se puede usar para proporcionar la monitorización del estado de una estructura que forma parte o está asociada a una red de transporte monitorizando la respuesta acústica de la estructura al paso del tráfico en la red. Los presentes inventores han identificado que el movimiento del tráfico en la red proporciona una excitación acústica de la estructura y que la respuesta de la propia estructura se puede discriminar del ruido general del tráfico. En otras palabras, el movimiento del tráfico proporciona una fuente acústica y, sorprendentemente, las señales acústicas asociadas con la propia estructura se pueden identificar por separado como distintas de la fuente acústica. Además, los inventores se han dado cuenta de que la respuesta acústica de una estructura al paso del tráfico puede ser prácticamente la misma incluso cuando el tráfico es diferente. En otras palabras, tomando el ejemplo de monitorizar un túnel en una red ferroviaria, el paso de un primer tren a través del túnel excita la misma respuesta general en el túnel que posteriormente el paso de otro tren a través del mismo túnel. La red de transporte puede ser una red para el movimiento vehicular de personas y/o mercancías y puede ser, en particular, una red ferroviaria.

Por lo tanto, se ha apreciado que la respuesta acústica de la estructura se puede monitorizar durante el funcionamiento de la red para proporcionar una monitorización continua de la condición. Cualquier cambio significativo en la respuesta acústica puede indicar un cambio en la condición.

Por lo tanto, el método implica realizar una detección acústica distribuida en al menos una fibra óptica para proporcionar una señal de medición desde cada una de una pluralidad de partes de detección acústica como se describió anteriormente. La al menos una fibra de detección se despliega para monitorizar la estructura. La fibra detectora puede desplegarse para pasar a través de una estructura tal como un túnel, puente, viaducto, terraplén o corte y, en algunos casos, al menos parte de la fibra puede estar incrustada dentro del material de la estructura. Sin embargo, en otras aplicaciones, una fibra detectora puede desplegarse adicional o alternativamente con al menos parte de la fibra óptica adyacente a la estructura o unida a la estructura.

Como se mencionó anteriormente, las señales de medición generadas por el movimiento de tráfico, es decir, vehículos, en la red de transporte en la vecindad de dicha estructura se analizan para identificar señales acústicas asociadas con dicha estructura, es decir, distinguir esas señales debido a la respuesta acústica de la estructura de cualquier señal directamente debido al movimiento del tráfico. Como se describirá más adelante, esto se puede lograr de varias maneras.

Las señales acústicas que se identifican como asociadas a la estructura se analizan a continuación para proporcionar una indicación de cualquier cambio en la condición de dicha estructura.

En una realización, analizar las señales acústicas asociadas con dicha estructura comprende comparar las señales acústicas con las señales acústica adquiridas previamente. Como se describió previamente, la respuesta acústica general de la estructura puede ser la misma para generalmente el mismo tipo de movimiento de tráfico, por ejemplo, los trenes que viajan en la misma dirección a través de un túnel pueden generar la misma respuesta general si no se han producido cambios significativos en las condiciones del túnel. En efecto, por lo tanto, la estructura puede exhibir una firma acústica.

Por ejemplo, considere un túnel que tiene una longitud de 300 m con una fibra óptica de detección DAS que atraviesa el túnel y se interroga para proporcionar porciones de detección del orden de 15 m de longitud. Por lo tanto, puede haber 20 partes de detección contigua de fibra a lo largo del túnel. En respuesta a un tren que pasa a través del túnel, algunas partes de detección pueden presentar típicamente una respuesta acústica que es más intensa y/o persiste durante más tiempo que otras partes de detección. Además, algunas partes de detección pueden exhibir respuestas fuertes en algunas frecuencias acústicas en comparación con otras. Por lo tanto, los patrones de intensidad relativa, evolución de tiempo y/o frecuencias de las señales de medición de las diversas partes de detección correspondientes a la estructura pueden verse como una firma acústica para la estructura, en este ejemplo el túnel.

La firma acústica detectada en respuesta al movimiento del tráfico cerca de la estructura podría entonces compararse con una firma preexistente que corresponde a o se deriva de una o más respuestas detectadas previamente. Si la firma acústica adquirida más recientemente es sustancialmente la misma que la firma preexistente, esto puede

tomarse como una indicación de que las propiedades de la estructura son las mismas y, por lo tanto, la condición de la estructura no ha cambiado. Sin embargo, si, por ejemplo, una parte de detección exhibe una respuesta acústica que tiene una intensidad o duración relativa marcadamente diferente que la anterior, esto podría indicar un cambio en las propiedades de la estructura, que podría indicar un cambio en la condición de la estructura.

- 5 En el método de acuerdo con la invención, analizar las señales acústicas asociadas con la estructura comprende, identificar ondas acústicas que se propagan en la estructura. Especialmente para estructuras alargadas, es decir, estructuras tales como túneles que se extienden por una cierta distancia y así pueden extenderse para varias partes de detección del sensor DAS, puede identificarse la propagación de ondas acústicas dentro de la estructura. Típicamente, la energía acústica generada por el tráfico que se mueve a lo largo de una estructura tal como un túnel
- 10 conducirá a ondas acústicas que se propagan a lo largo de la estructura. Esto conducirá a una serie de perturbaciones de la fibra que serán detectadas por el sensor DAS como una señal acústica que afecta a las diversas partes de detección en secuencia. La propagación de tales ondas acústicas puede formar al menos parte de la firma acústica de la estructura y puede compararse con las respuestas detectadas previamente para detectar cualquier cambio significativo.
- 15 En particular, el método puede implicar la identificación de cualquier discontinuidad en las ondas acústicas que se propagan en la estructura, por ejemplo, un cambio repentino en la velocidad o la intensidad de la onda o la detección de una reflexión.

Para tomar un ejemplo simple, considere que una estructura comprende un material sólido homogéneo. Se puede esperar que cualquier onda acústica que se propague dentro de dicha estructura viaje a una velocidad relativamente constante (sujeta a cualquier efecto multitrayecto) y con una atenuación relativamente constante. Sin embargo, si hay una discontinuidad, como una grieta o vacío dentro del material, puede haber un cambio de paso en la velocidad o intensidad en la grieta o vacío y/o se pueden generar reflexiones significativas. El cambio de paso y/o las reflexiones podrían detectarse indicando un problema potencial en la ubicación de la parte de detección relevante, especialmente si tal cambio de paso o reflexiones no se habían detectado previamente.

- 25 Por lo tanto, el método puede comprender analizar las velocidades de propagación de ondas acústicas en la estructura.

Tenga en cuenta que la velocidad de propagación de las ondas acústicas que se propagan en la estructura puede ser diferente a la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el aire. De este modo, se puede detectar una velocidad de propagación que es diferente de la del aire para detectar las señales que se propagan en la estructura.

- 30 Además, la velocidad de propagación de las ondas acústicas en la estructura que se desea monitorizar puede ser diferente a la velocidad de propagación de las ondas acústicas en otra estructura que forma la red de transporte. Por ejemplo, considere una red ferroviaria. Habrá rieles formando el ferrocarril a lo largo de toda la red de transporte. Cuando un tren viaja por la red, al menos algunas señales acústicas pueden propagarse a través de los rieles a una velocidad determinada por la composición de los rieles (y posiblemente por los efectos ambientales). Cuando el tren llega a un túnel, algunas señales acústicas pueden propagarse a través del túnel a una velocidad diferente a las
- 35 señales que viajan por el aire o a través de los rieles. La detección de señales que se propagan a diferentes velocidades se puede usar para discriminar entre esas señales que se propagan a través de la estructura de interés y cualquier otra estructura de red. El método también puede comprender la identificación de ondas acústicas que se propagan a diferentes velocidades en la estructura. Típicamente, una estructura puede comprender diversos materiales diferentes. Por ejemplo, puede haber una mezcla de algunas o todas las limaduras de concreto, ladrillos,
- 40 vigas de acero, etc., todas las cuales exhibirán una velocidad de sonido diferente. Por lo tanto, una onda acústica que se propaga a lo largo de una estructura alargada puede viajar a diferentes velocidades en diferentes partes de la estructura. Al observar la velocidad de la onda acústica a medida que se propaga a lo largo de la estructura, es posible detectar las señales acústicas de diferentes partes de la estructura. Si se conocen los diversos componentes de la estructura, por lo tanto, puede ser posible discriminar entre la respuesta acústica de diferentes materiales dentro de la
- 45 estructura.

Por lo tanto, el método puede comprender analizar las señales de medición de las partes de detección para detectar señales acústicas que se propagan a lo largo de la estructura a velocidades predefinidas o dentro de un intervalo de velocidades predefinido. En otras palabras, al analizar los rendimientos de una estructura que tiene cantidades significativas de hormigón, el método puede comprender buscar señales que se propaguen a la velocidad del sonido

50 en el hormigón.

Buscar velocidades de propagación esperadas particulares puede ayudar a distinguir la respuesta acústica de la estructura del ruido directo del tráfico que es detectado por el sensor DAS.

En una realización, sin embargo, la respuesta acústica de la estructura se detecta mirando las señales de medición que se graban antes y/o después de que el tráfico pase por la(s) parte(s) detectora(s) relevante(s). Por lo tanto, las

señales acústicas asociadas con la estructura son aquellas detectadas por las partes de detección antes y/o después del movimiento del tráfico más allá de la parte de detección relevante.

5 A medida que el tráfico se mueve en una red, como un tren que se mueve en una vía férrea, el ruido generado por el tren se propagará delante y detrás del tren en movimiento. Por lo tanto, a medida que el tráfico se acerca a una estructura, especialmente una estructura cerrada, como un túnel, el sonido del tráfico en movimiento, por ejemplo, tren, estimulará acústicamente la estructura. Como se mencionó anteriormente, la energía acústica se acoplará a la estructura y, para una estructura alargada como un túnel, se propagará a lo largo del túnel. En este punto, las señales acústicas detectadas por el sensor DAS comprenderán en gran parte la respuesta acústica de la estructura a un estímulo que proviene de una dirección definida. Esto permite que se determine la respuesta acústica de la estructura en sí misma. Una vez que el tren llega realmente a las partes de detección relevantes, la fibra se estimulará directamente desde varias direcciones diferentes desde diferentes partes del tren y todas las partes de detección mostrarán típicamente una respuesta intensa. Por lo tanto, cualquier influencia de la estructura en la respuesta acústica puede verse inundada por la perturbación "directa" causada por el tren. Una vez que el tren ha pasado las partes de detección relevantes, sin embargo, la fuente acústica volverá a ser más direccional. Además, la excitación acústica de la estructura debido al paso del tren puede tardar un tiempo en desaparecer y, por lo tanto, la respuesta acústica después del paso del tren también se deberá en gran medida a la respuesta acústica de la estructura.

Además del ruido general creado por el tráfico mientras se mueve, el tráfico de alta velocidad también puede producir un impulso de presión en las estructuras cercanas, especialmente en los portales como puentes o túneles. Cuando un tren de alta velocidad alcanza un túnel, la presión del aire aumentará debido al movimiento del tren. A medida que el tren pasa, la presión del aire se reducirá. Esto puede crear un impulso de presión que excite acústicamente la estructura. La respuesta acústica de la estructura a dicho impulso de presión se puede monitorizar como se describió anteriormente.

Además, al observar la respuesta de baja frecuencia del sensor DAS, se puede detectar el aumento y disminución del esfuerzo causado por el aumento y la disminución de la presión de aire, lo que puede proporcionar información sobre la condición de la estructura.

Como se mencionó anteriormente, la fibra óptica utilizada para DAS se despliega para monitorizar la estructura, lo que puede implicar que la fibra óptica esté dispuesta para pasar a través de una estructura tal como un túnel o puente. La fibra óptica podría ser una fibra óptica dedicada que se ha desplegado específicamente para la monitorización de la estructura o podría ser una fibra óptica que se había desplegado anteriormente para otros fines, pero que es adecuada para su uso como fibra de detección en un sistema DAS. Por ejemplo, en un túnel puede haber cables de fibra óptica existentes destinados a las comunicaciones que pueden tener fibras ópticas redundantes que se pueden utilizar para DAS.

En algunas realizaciones, al menos una fibra sensible puede formar parte de un sistema de monitorización DAS usado para monitorizar y/o controlar el movimiento del tráfico en la red de transporte. Como se mencionó anteriormente, DAS es muy adecuado para monitorizar el movimiento del tráfico en una red de transporte, especialmente el movimiento de vehículos ferroviarios en una red ferroviaria. Un solo sensor DAS puede proporcionar una serie contigua de canales de detección separados por 10 m aproximadamente para una longitud de hasta 40 km o más y se pueden lograr mayores longitudes utilizando más sensores. Se puede multiplexar una sola unidad de interrogador DAS entre dos fibras para proporcionar detección en una distancia de 80 km (con el interrogador en el medio) con las fibras desplegadas a lo largo de la ruta de la red. Esto ofrece la capacidad de continuidad de detección a lo largo de grandes partes de la red. La fibra sensible puede ser fibra estándar de telecomunicaciones y, por lo tanto, es relativamente barata. La fibra puede ser simplemente enterrada junto a las redes de transporte, por ejemplo, a lo largo de los lados o debajo de pistas o caminos en un canal estrecho a cualquier profundidad requerida. La fibra óptica se puede encerrar en una carcasa protectora y puede sobrevivir durante mucho tiempo sin mantenimiento. Por lo tanto, los costos de instalación y mantenimiento son bajos. En muchas redes de transporte ya puede haber fibra óptica desplegada a lo largo de al menos las rutas principales y dicha infraestructura de comunicaciones existente puede comprender fibras ópticas redundantes que pueden usarse para DAS.

La fibra óptica es interrogada por pulsos ópticos generados por la unidad de interrogador (como se explicará con más detalle más adelante) y, por lo tanto, solo se necesita potencia para las unidades de interrogador.

De este modo, la fibra sensible puede desplegarse a lo largo de la ruta de la red de transporte y utilizarse para rastrear el movimiento del tráfico en la red. Además, en las proximidades de las estructuras que se desea supervisar el estado de, las señales acústicas asociadas con la estructura se pueden detectar y analizar como se establece anteriormente. Por lo tanto, el despliegue de la fibra puede ser simplemente seguir la ruta general de la red, por ejemplo, colocarse junto a la vía férrea. Sin embargo, para algunas estructuras, por ejemplo, puentes, una primera sección de fibra podría desplegarse a lo largo de la ruta de la red de transporte hasta que llegue a la estructura, en cuyo punto se podría desplegar una segunda sección de fibra en relación con la estructura para proporcionar detección de la estructura, antes de continuar a lo largo del resto de la trayectoria de la red. Por lo tanto, la segunda sección de fibra puede disponerse para unirse al puente, por ejemplo. La fibra antes y después de la segunda sección se puede desplegar

para que se ejecute a lo largo de la trayectoria de la red de transporte y las señales de medición de estas partes de detección se pueden usar para rastrear el movimiento del tráfico en la red. Sin embargo, los retornos de la primera sección brindarán información útil sobre la condición de la estructura.

5 Como se mencionó, el método es particularmente aplicable a redes ferroviarias y, por lo tanto, la fibra óptica puede desplegarse junto con una red ferroviaria. El método también es particularmente útil para monitorizar el estado de los túneles. Por lo tanto, la fibra óptica puede desplegarse junto a una vía férrea que atraviesa el túnel.

10 En algunas realizaciones, la estructura a monitorizar puede incluir la propia pista de ferrocarril. Como se mencionó anteriormente, el ruido del tren viajará adelante del tren o detrás del tren para ciertas distancias. Parte de este ruido será transportado por ondas acústicas que se propagan en los rieles y la propagación de esta señal acústica a través de los rieles dará una indicación del estado de los rieles mismos y de la trayectoria subyacente. La velocidad de propagación esperada de las señales acústicas a través de los raíles se puede conocer y, por lo tanto, las señales acústicas delante y detrás del tren en movimiento se pueden analizar para detectar las señales que se propagan dentro del intervalo esperado de velocidades como se describió anteriormente. Como se describe, sin embargo, el método de la presente invención permite que la estructura que está separada de la pista de ferrocarril se monitorice usando el paso de trenes en la pista, sin requerir ningún estímulo activo directo de la estructura. En el caso de los túneles, la estructura que se está supervisando no es la estructura sobre la que viaja el vehículo de la red de transporte.

La invención también se refiere a un sistema de detección acústico distribuido según la reivindicación 15. El sistema de acuerdo con este aspecto de la presente invención ofrece todas las mismas ventajas y se pueden usar en todos de las mismas maneras que los métodos descritos anteriormente.

20 La invención se describirá ahora, a modo de ejemplo solamente, con referencia a los siguientes dibujos, de los cuales:

La Figura 1 muestra una disposición de sensor DAS convencional;

La Figura 2 ilustra una red de transporte proporcionada con sensores DAS;

La Figura 3 muestra datos adquiridos de un sensor DAS que monitoriza los trenes que se mueven en una sección de camino que incluye un túnel;

25 La Figura 4 muestra más datos adquiridos de un sensor DAS de un tren que pasa por un túnel;

La Figura 5 ilustra cómo se puede desplegar la fibra sensible sobre una estructura a monitorizar; y

La Figura 6 ilustra los datos adquiridos de un sensor DAS en una red ferroviaria a partir del seguimiento de trenes que pasan por un viaducto, un túnel y un puente.

30 La Figura 1 muestra un esquema de una disposición de detección de fibra óptica distribuida. Una longitud de fibra 104 de detección está conectada de manera extraíble en un extremo a un interrogador 106. La salida del interrogador 106 se pasa a un procesador 108 de señal, que puede ubicarse junto con el interrogador o puede estar alejado del mismo, y opcionalmente una pantalla 110 de interfaz de usuario/gráfica, que en la práctica se puede realizar mediante una PC adecuadamente especificada. La interfaz de usuario puede colocarse junto con el procesador de señal o puede estar remotamente alejada de la misma.

35 La fibra 104 detectora puede tener muchos kilómetros de longitud y puede tener, por ejemplo, 40 km o más de longitud. La fibra de detección puede ser una fibra óptica de modo único, no modificada, estándar, tal como la que se usa rutinariamente en aplicaciones de telecomunicaciones sin la necesidad de sitios de reflexión introducidos deliberadamente, tales como rejillas de fibra de Bragg o similares. La capacidad de usar una longitud no modificada de fibra óptica estándar para proporcionar detección significa que se puede usar fibra disponible de bajo costo. Sin embargo, en algunas realizaciones, la fibra puede comprender una fibra que se ha fabricado para ser especialmente sensible a las vibraciones incidentes. La fibra estará protegida al contenerla con una estructura de cable. En uso, la fibra 104 se despliega en un área de interés para ser monitorizada.

45 En funcionamiento, el interrogador 106 lanza una radiación electromagnética de interrogación, que puede comprender, por ejemplo, una serie de pulsos ópticos que tienen un patrón de frecuencia seleccionado, en la fibra detectora. Los pulsos ópticos pueden tener un patrón de frecuencia como se describe en la publicación de patente británica GB2,442,745, cuyos contenidos se incorporan aquí como referencia, aunque los sensores DAS que dependen de un solo pulso de interrogación también son conocidos y pueden usarse. Obsérvese que tal como se utiliza aquí, 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, el fenómeno de retrodispersión de Rayleigh hace que una fracción de la entrada de luz en la fibra se refleje de nuevo al interrogador, donde se detecta que proporciona una señal de salida que es representativa de las perturbaciones acústicas en las proximidades de la fibra. Por lo tanto, el interrogador comprende

convenientemente al menos un láser 112 y al menos un modulador óptico 114 para producir una pluralidad de impulsos ópticos separados por una diferencia de frecuencia óptica conocida. El interrogador también comprende al menos un fotodetector 116 dispuesto para detectar radiación que es retrodispersada de Rayleigh desde los sitios intrínsecos de dispersión dentro de la fibra 104. Un sensor DAS de retrodispersión de Rayleigh es muy útil en realizaciones de la presente invención, pero los sistemas basados en la dispersión de Brillouin o Raman también son conocidos y podrían usarse en realizaciones de la invención.

La señal del fotodetector es procesada por el procesador 108 de señal. El procesador de señal convenientemente demodula la señal devuelta basándose en la diferencia de frecuencia entre los pulsos ópticos, por ejemplo, como se describe en GB2,442,745. El procesador de señal también puede aplicar un algoritmo de desenrollamiento de fase como se describe en GB2,442,745. Por lo tanto, se puede monitorizar la fase de la luz retrodispersada de varias secciones de la fibra óptica. Cualquier cambio en la longitud de la trayectoria óptica efectiva dentro de una sección dada de la fibra, tal como se debería a ondas de presión incidente que causan esfuerzo sobre la fibra, puede por lo tanto ser detectado.

La forma de la entrada óptica y el método de detección permiten que una sola fibra continua se resuelva espacialmente en partes de detección longitudinales discretas. Es decir, la señal acústica detectada en una parte de detección puede proporcionarse de forma sustancialmente independiente de la señal detectada en una parte adyacente. Tal sensor puede verse como un sensor completamente distribuido o intrínseco, ya que utiliza la dispersión intrínseca procesada inherente en una fibra óptica y, por lo tanto, distribuye la función de detección a lo largo de toda la fibra óptica. La resolución espacial de las partes detectoras de fibra óptica puede ser, por ejemplo, de aproximadamente 10 m, que para una longitud continua de fibra del orden de 40 km proporciona 4000 canales acústicos independientes o así desplegados a lo largo de una sección de 40 km de la red de transporte, como una sección de una red ferroviaria. Esto puede proporcionar una supervisión efectiva y simultánea de toda la sección de 40 km de la vía. En una aplicación para monitorizar el tren, las porciones de detección individuales pueden ser cada una del orden de 10 m de longitud o menos.

Como la fibra óptica sensible es relativamente económica, la fibra detectora puede desplegarse en una ubicación de manera permanente ya que los costes de dejar la fibra in situ no son significativos. La fibra se puede desplegar a lo largo o debajo de la pista (o carretera) y, por ejemplo, se puede enterrar junto a una sección de la pista.

La figura 2 ilustra una sección de la red de tráfico, en este caso, una red 201 ferroviaria, que tiene fibra óptica enterrada a lo largo de las pistas. En este ejemplo, la pista tiene tres ramificaciones 202, 203 y 204. Como se mencionó anteriormente, la detección de fibra óptica se puede realizar en longitudes de fibra del orden de 40-50 km. Sin embargo, para algunos sensores DAS puede ser difícil detectar confiablemente más allá de 50 km a lo largo de una fibra. Una longitud de 40-50 km puede ser suficiente para monitorizar una sección deseada de la vía, por ejemplo, entre las estaciones principales, y otras fibras podrían desplegarse para monitorizar otras secciones de la vía. Para pistas muy largas, puede ser necesario encadenar varios sensores DAS juntos. La figura 2 ilustra una unidad 106 de interrogador dispuesta para monitorizar una fibra óptica 104a desplegada a lo largo de una parte de la pista (que incluye parte de las ramificaciones 202 y 204) y otra fibra 104b óptica desplegada a lo largo de otra longitud de pista (derivación 202). La unidad de interrogador podría alojar dos láseres y detectores, etc., es decir, componentes dedicados para cada fibra o el láser y posiblemente el detector podría ser multiplexado entre las dos fibras. Después de 40 km, por ejemplo, de la fibra 104b, se podría desplegar otra fibra que será monitorizada por otra unidad interrogadora. Por lo tanto, podría haber 80 km más o menos entre las unidades de interrogador. En este ejemplo, la ramificación 203 también se monitoriza mediante un sensor DAS que usa una fibra 104c detectora diferente que está conectada a una unidad de interrogador diferente (no mostrada).

En uso, el interrogador funciona como se describió anteriormente para proporcionar una serie de canales de detección acústicos contiguos a lo largo de la trayectoria de las ramificaciones de pista. En uso, las señales acústicas generadas por un tren 205 en movimiento a lo largo de la pista 204 pueden detectarse y analizarse para determinar la ubicación exacta del tren y la velocidad.

Como una longitud significativa de la pista puede monitorizarse mediante partes contiguas de detección de fibra, puede ser relativamente sencillo detectar el movimiento del tren a lo largo de la pista. Claramente, el movimiento del tren creará una gama de ruidos, desde el ruido del motor de la locomotora, los ruidos de los vagones del tren y los acoplamientos y el ruido de las ruedas en la pista. Las señales acústicas serán mayores cerca del tren y, por lo tanto, mirando la intensidad de las señales detectadas por el sensor, los retornos de las partes de detección de la fibra adyacentes a la posición actual del tren exhibirán una intensidad acústica relativamente alta.

Las formas de realización de la presente invención, sin embargo, también pueden usar las señales acústicas detectadas por los sensores DAS para proporcionar una monitorización del estado de la estructura que forma parte de la infraestructura de red. Tales estructuras pueden ser especialmente túneles, pero también pueden ser puentes, terraplenes o recortes o similares, cuya integridad es importante para el funcionamiento seguro de la red.

La figura 2 ilustra una estructura 206 que puede comprender un túnel a través del cual corre la ramificación 202 de la red. La fibra 104b óptica también corre a través del túnel 206.

El movimiento del tren 205 hacia y a través del túnel 206 proporciona un estímulo acústico al túnel que puede usarse para determinar información sobre el estado del túnel.

5 La Figura 3 ilustra algunos datos acústicos obtenidos realizando una detección DAS en una fibra óptica desplegada a lo largo de una vía férrea a medida que los trenes viajaban por la pista. La figura 3 muestra un "diagrama de cascada" en el que se muestra la intensidad acústica de una selección de canales de detección a lo largo del tiempo. El eje horizontal muestra los diversos canales contiguos a partir de una longitud de fibra. Estos datos fueron adquiridos con una longitud de canal de aproximadamente 15 m. El tiempo se ilustra en el eje vertical con eventos más recientes en la parte superior. En una gráfica de cascada típica, la intensidad acústica detectada se puede ilustrar por color, sin embargo, claramente la figura 3 es en blanco y negro y la intensidad acústica está representada por la intensidad de la sombra (siendo el negro de intensidad alta).

15 La Figura 3 ilustra una primera serie 301 de perturbaciones detectadas que se deben a un primer tren que se desplaza en la sección monitorizada de la pista. Se puede ver que las perturbaciones progresan a lo largo de los canales del sensor de una manera bastante constante que es consistente con un tren que viaja a una velocidad relativamente constante. Sabiendo que cada canal del sensor es de 15 m en este ejemplo al observar la velocidad de movimiento de las perturbaciones, se puede estimar la velocidad del tren. En efecto, la velocidad es el gradiente de la serie de perturbaciones.

20 La figura 3 también muestra una segunda serie de perturbaciones 302, que, para un canal dado, ocurren más tarde en el tiempo. Esto indica que un segundo tren también viaja en la sección monitorizada de la vía detrás del primer tren. Al observar el número de canales que separan los dos trenes, se puede determinar la distancia entre los trenes o el avance.

25 Se verá que la perturbación acústica debida al tren es muy intensa para varios canales de detección, que pueden usarse para indicar la longitud del tren, sin embargo, la mayoría de los canales de detección solo se excitan cuando pasa el tren.

Sin embargo, puede verse que hay una característica acústica 303 en la primera serie de perturbaciones 301 en la que un número de canales de detección muestra una respuesta durante un período de tiempo mayor a medida que pasa el tren. Una característica 304 similar también se puede ver cuando se observa la segunda serie de perturbaciones 302. Estas características corresponden a la respuesta acústica de un túnel.

30 Se puede ver que cuando la perturbación acústica debida al tren llega al canal 1075, hay una respuesta detectable desde los canales 1075 a 990. Se puede ver que estos canales también muestran una respuesta relativamente fuerte hasta que la principal perturbación intensa debida al tren ha pasado por el canal 990, punto en el que la intensidad de la mayoría de estos canales cae rápidamente a niveles de fondo normales. El mismo patrón general ocurre en ambas características 303 y 304.

35 La Figura 4 muestra la respuesta acústica de otra sección monitorizada de la pista con fibra de detección que corre a través de un túnel con un poco más de detalle. La figura 4 es un diagrama de cascada similar a la FIG. 3 pero muestra una sección más corta de la pista monitorizada, es decir, muestra la respuesta de los canales con más detalle. En esta gráfica, el tren se movía claramente a lo largo de la pista en una dirección que aumentaba el número de canales.

40 De nuevo se puede ver que los canales entre las posiciones 401 (aproximadamente el canal 1798) y 402 (aproximadamente el canal 1910) exhiben una respuesta acústica prolongada al paso del tren. Estos 112 canales o partes de detección corresponden a la sección de fibra óptica que atraviesa el túnel. Por lo tanto, la longitud del túnel es de aproximadamente 1.68 km (con un ancho de canal o longitud de porción de detección de 15 m).

45 También se puede ver que cuando el tren alcanza la posición 401, alrededor del canal 1798, una señal acústica se propaga rápidamente a lo largo de la mayoría de los canales del túnel. Sin embargo, se verá que algunos canales exhiben respuestas mucho más fuertes que otros canales. Por ejemplo, el canal indicado en 403 (alrededor del canal 1831) exhibe una respuesta relativamente más fuerte que otros canales, tanto antes de que el tren llegue a ese canal como después de que el tren haya pasado por ese canal.

50 Se puede observar que las perturbaciones debidas al tren que pasa realmente por un canal son muy elevadas y, por lo tanto, cualquier patrón en los datos de dichos canales suele estar enmascarado por las perturbaciones de alta intensidad. Pero se puede ver que hay una estructura notable en la característica acústica resultante de las perturbaciones detectadas antes y después de que el tren haya pasado.

5 La respuesta acústica de los canales relevantes que se adquieren antes y después de los pasos del tren puede, por lo tanto, analizarse para proporcionar una monitorización del estado. Por ejemplo, los datos se pueden comparar con datos adquiridos previamente para ver si hay cambios significativos. Por lo tanto, haciendo referencia a la FIG. 4 si la respuesta acústica relativamente fuerte en el canal indicado en la posición 403 no estaba presente en ninguna respuesta previa, esto podría indicar que algo significativo ha cambiado en la condición del túnel en esta ubicación. Se observará que la detección de una posible anomalía también proporciona una indicación de la ubicación de dicha anomalía. Por lo tanto, un equipo de inspección podría ser enviado a exactamente la ubicación deseada.

10 Los datos utilizados para la comparación pueden comprender o derivarse de una pluralidad de respuestas acústicas previamente adquiridas. Por ejemplo, puede haber una respuesta promedio o varias respuestas promedio para diferentes tipos de trenes, velocidades, condiciones climáticas, etc. Los datos adquiridos actualmente se pueden comparar con los datos anteriores relevantes para detectar cualquier cambio significativo. Si no se detectan cambios significativos, la respuesta adquirida actual podría agregarse al cuerpo de los datos previos para su uso en comparación. Si se detectan cambios significativos, esto podría usarse para generar una alerta a una sala de control.

15 La comparación puede implicar comparar el patrón de respuestas de intensidad de las diversas partes de detección. Como se menciona anteriormente, se puede ver una estructura definida en la respuesta mostrada en la FIG. 4. Además, sin embargo, los datos pueden analizarse por frecuencia para buscar frecuencias características y/o los datos pueden analizarse para detectar la propagación de ondas acústicas a lo largo del túnel.

20 Se puede observar en la fig. 4 que una vez que el tren llega al inicio del túnel, una señal acústica se propaga a lo largo del túnel a una velocidad relativamente alta. La velocidad de propagación puede determinarse y/o las señales pueden analizarse para buscar velocidades de propagaciones esperadas. Por ejemplo, si el túnel comprende un material conocido, los retornos podrían analizarse para buscar señales que se propaguen a tales velocidades.

25 Cabe señalar que la velocidad de propagación de las señales acústicas a través de la estructura en tierra, por ejemplo, túneles, por lo general es diferente a la velocidad de propagación de las señales acústicas a través del aire o a través de los rieles. La velocidad de propagación acústica se puede usar para determinar las señales correspondientes a la estructura.

La discusión hasta ahora se ha centrado en los túneles, pero las mismas técnicas se pueden aplicar a otras estructuras, como puentes u otras estructuras que forman un portal, o en algunos casos otras estructuras en tierra. En este caso, la fibra de detección no se puede tender simplemente a pasar por el túnel, sino que se puede unir a la estructura.

30 La estructura a ser monitorizada puede por lo tanto ser separada y distinta de cualquier estructura, como la propia vía férrea a lo largo de la cual viajan los vehículos.

35 La figura 5 ilustra un ejemplo en el que una sección 501 de la red de transporte, tal como una pista de ferrocarril, está provista de una fibra 502 de detección. Se despliega una primera sección 502a de fibra detectora para que corra a lo largo de la trayectoria de la red de transporte y se puede enterrar a lo largo de la pista como se describió anteriormente. La pista puede pasar a través de una estructura 503 en la que se desea monitorizar la condición de, por ejemplo, un puente. En este punto, la fibra óptica puede emerger del suelo y puede desplegarse para monitorizar la estructura. Por lo tanto, una segunda sección 502b de fibra puede estar dispuesta para unirse a la estructura. Como se muestra en la figura 5 la fibra puede disponerse para que corra a lo largo del puente y luego volver a girar. El resto de la fibra 502c puede entonces desplegarse para correr a lo largo de la ruta de la red 501.

40 La sección de fibra que se despliega en la estructura puede tener cualquier longitud adecuada, pero puede disponerse para que sea al menos tan larga como dos partes de detección del sensor DAS para asegurar que al menos una parte de detección caiga completamente dentro de la sección de fibra desplegado en la estructura.

En general, la fibra puede unirse a la estructura por cualquier medio adecuado, sin embargo, en algunos casos, puede ser posible embeber una fibra en el material de la propia estructura. Tal fibra puede, por lo tanto, ser una fibra dedicada para monitorizar la estructura o puede formar parte de nuevo de la red de transporte.

45 Las Figuras 6a a 6c muestra algunos datos adicionales adquiridos de un sensor DAS que tiene fibra de detección colocada a lo largo de una red ferroviaria a medida que los trenes pasan por la infraestructura de la red ferroviaria, a saber, un viaducto, un puente y un túnel. En cada caso, el gráfico superior muestra un diagrama de cascada de la intensidad acústica a lo largo de los canales de detección de la fibra óptica frente al tiempo (la intensidad está representada por el color en una pantalla real) junto con un análisis de los diversos componentes que componen las señales acústicas detectadas.

50 En cada caso, pueden detectarse señales relativamente intensas distintas del ruido principal asociado al propio tren y pueden detectarse señales acústicas que viajan hacia arriba y hacia abajo de la estructura pertinente a velocidades de propagación diferentes a la propagación en el aire o pueden detectarse los rieles.

- 5 Las mismas técnicas también pueden ser aplicables a otras redes de transporte. Por ejemplo, una red de carreteras puede tener fibra tendida a lo largo de la carretera que se utiliza para la detección de DAS y dicha fibra puede pasar debajo de puentes o a través de túneles. La respuesta acústica al tráfico que se mueve en la carretera puede ser monitorizada. Se apreciará que el tráfico por carretera puede no extenderse tanto como el tráfico ferroviario, por lo que puede haber un estímulo más constante durante los períodos de mucho tráfico que pueden disfrazar la respuesta acústica de la estructura. Sin embargo, la fibra de detección DAS puede ser monitorizada constantemente y puede haber períodos de uso ligero, por un instante durante la noche, donde pasa el tráfico individual y la respuesta acústica se puede detectar de una manera similar a la descrita anteriormente.
- 10 En general, las realizaciones de la presente invención proporcionan métodos de bajo coste para monitorización de estado remoto que proporciona una buena cobertura espacial, incluso para túneles largos y similares, y que utiliza el movimiento normal de tráfico en la red para proporcionar un estímulo acústico a la estructura monitorizada.

REIVINDICACIONES

1. Un método de monitorización del estado de las estructuras que forman parte de una red (201) de transporte que comprende:
- 5 recibir una pluralidad de señales de medición adquiridas por uno o más sensores (106) acústicos distribuidos que tienen una o más fibras (104a, 104b, 104c) ópticas desplegadas para monitorizar dicha estructura (206) para proporcionar una señal de medición desde cada una de una pluralidad de partes de detección acústica;
- analizar las señales de medición generadas a partir del movimiento del tráfico (205) en la red de transporte en las proximidades de dicha estructura para identificar señales (303, 304) acústicas asociadas con dicha estructura; y
- 10 analizar dichas señales acústicas asociadas con dicha estructura para proporcionar una indicación de cualquier cambio en la condición de dicha estructura identificando ondas acústicas que se propagan en la estructura caracterizada porque el análisis de dichas señales acústicas asociadas con dicha estructura comprende analizar las velocidades de propagación de ondas acústicas en la estructura.
2. Un método según la reivindicación 1, en el que el análisis de dichas señales acústicas asociadas con dicha estructura comprende comparar las señales acústicas con las señales acústicas adquiridas previamente.
- 15 3. Un método según la reivindicación 1 o la reivindicación 2 que comprende identificar cualquier discontinuidad en las ondas acústicas que se propagan en la estructura.
4. Un método según cualquier reivindicación precedente que comprende identificar ondas acústicas que se propagan a diferentes velocidades en la estructura.
- 20 5. Un método según cualquier reivindicación precedente, en el que las señales acústicas asociadas con dicha estructura son aquellas detectadas por las partes de detección antes y/o después del movimiento del tráfico más allá de la parte de detección relevante.
6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que las señales acústicas asociadas con dicha estructura comprenden una respuesta de baja frecuencia.
- 25 7. Un método según cualquier reivindicación precedente, que comprende además realizar detección acústica distribuida en dicha una o más fibras ópticas para seguir el movimiento del tráfico (205) en la red de transporte.
8. Un método según la reivindicación 7, en el que al menos parte de dicha una o más fibras ópticas se despliega a lo largo de la trayectoria de la red de transporte.
9. Un método según la reivindicación 8, donde una primera fibra óptica de dicha una o más fibras ópticas tiene al menos una primera sección (502a) desplegada a lo largo de la ruta de la red de transporte y al menos una segunda sección (502b) desplegada para monitorizar dicha estructura.
- 30 10. Un método según la reivindicación 9, en el que la segunda sección de fibra está unida a la estructura.
11. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la red de transporte es una red ferroviaria.
12. Un método según la reivindicación 11, en el que dicha estructura comprende un túnel (206).
13. Un método según la reivindicación 12, en el que dicha una o más fibras ópticas comprenden al menos una fibra óptica desplegada a lo largo de una pista de ferrocarril que atraviesa el túnel.
- 35 14. Un método según la reivindicación 11, en el que dicha estructura comprende la pista de riel (202).
15. Un sistema de detección acústica distribuida que comprende:
- 40 una unidad (106) de interrogador para, en uso, realizar detección acústica distribuida en una o más fibras (104a, 104b) ópticas desplegadas para monitorizar una estructura de una red (201) de transporte para proporcionar una señal de medición de cada una de una pluralidad de partes de detección acústica; y
- un procesador (108) configurado:

para analizar las señales de medición generadas a partir del movimiento del tráfico (205) en la red de transporte en las proximidades de dicha estructura para identificar señales acústicas asociadas con dicha estructura; y

5 analizar dichas señales acústicas asociadas con dicha estructura para proporcionar una indicación de cualquier cambio en las condiciones de dicha estructura identificando ondas acústicas que se propagan en la estructura caracterizada porque el procesador está configurado para analizar dichas señales acústicas asociadas con dicha estructura analizando las velocidades de propagación de ondas acústicas en la estructura.

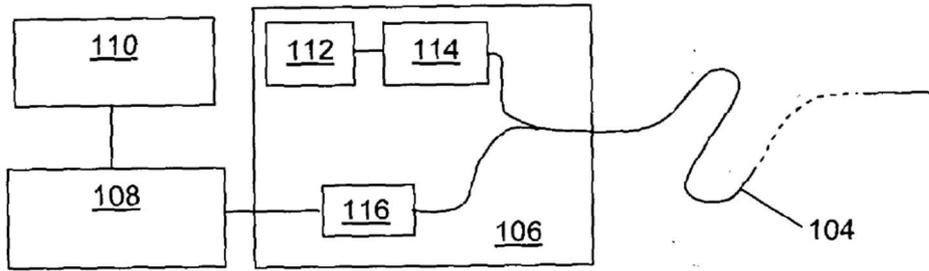


Fig. 1

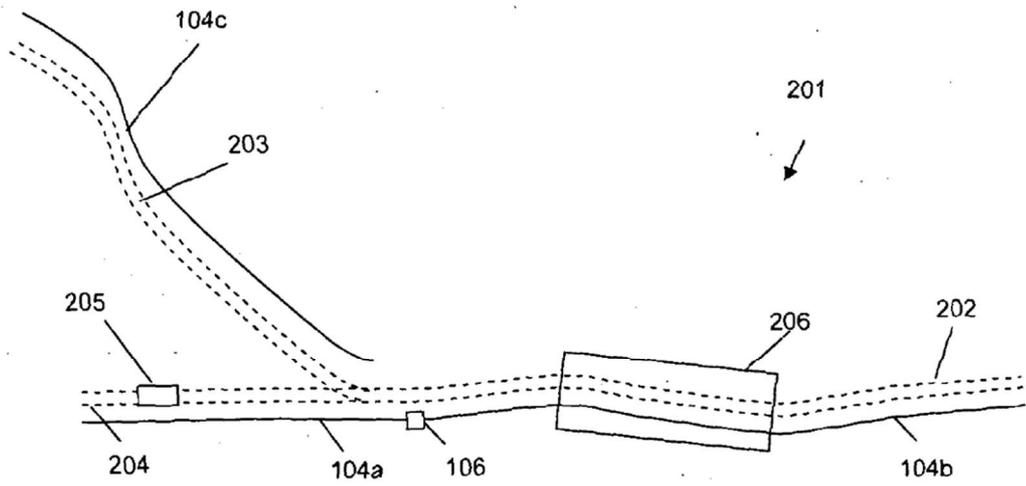


Fig. 2

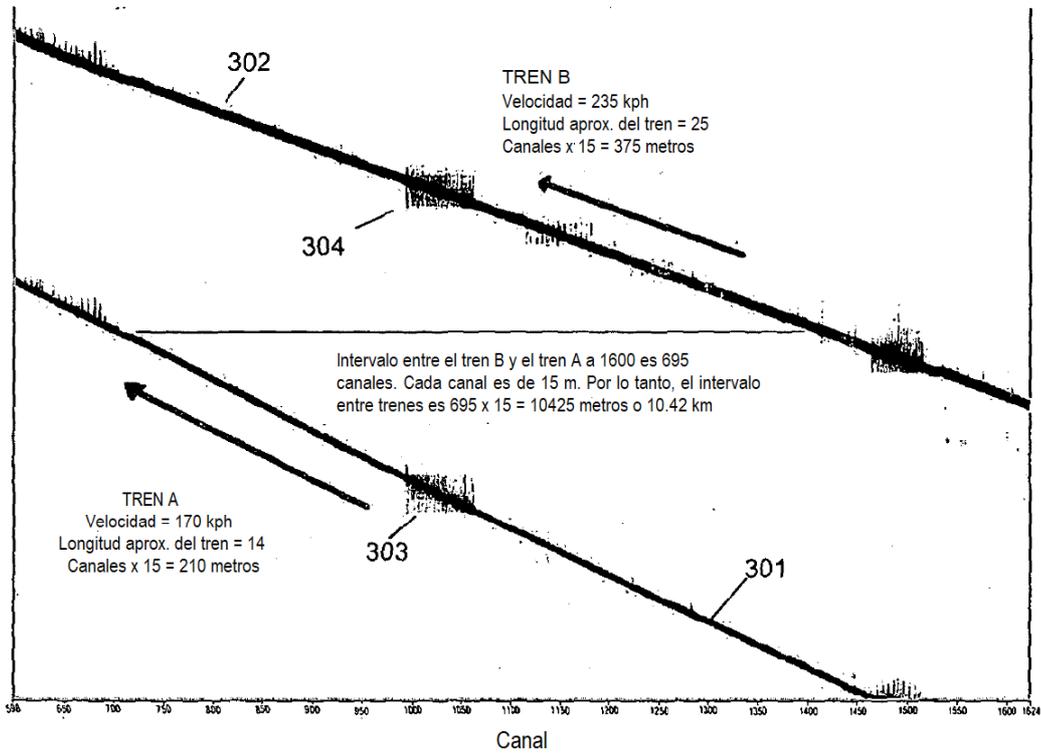


Fig. 3

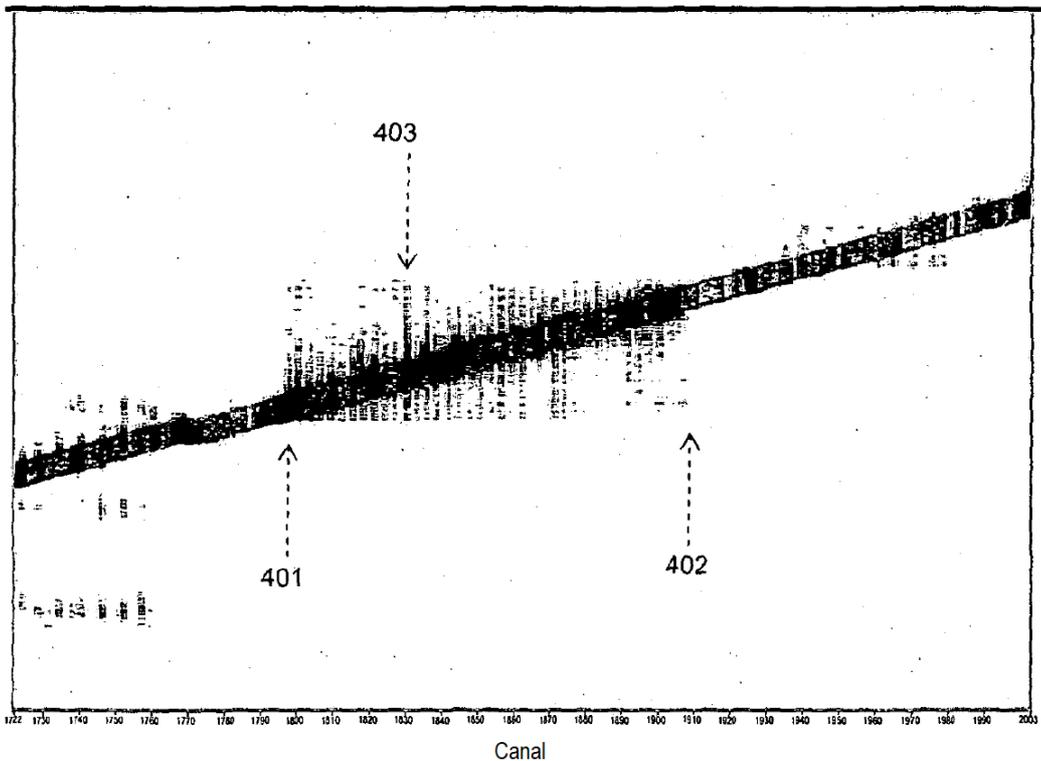


Fig. 4

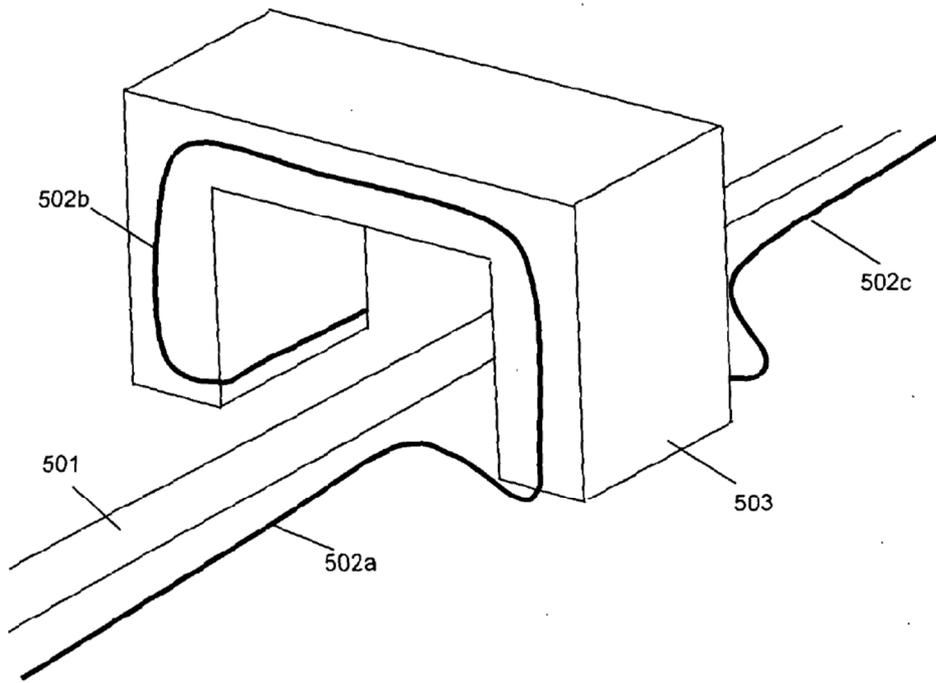


Fig. 5

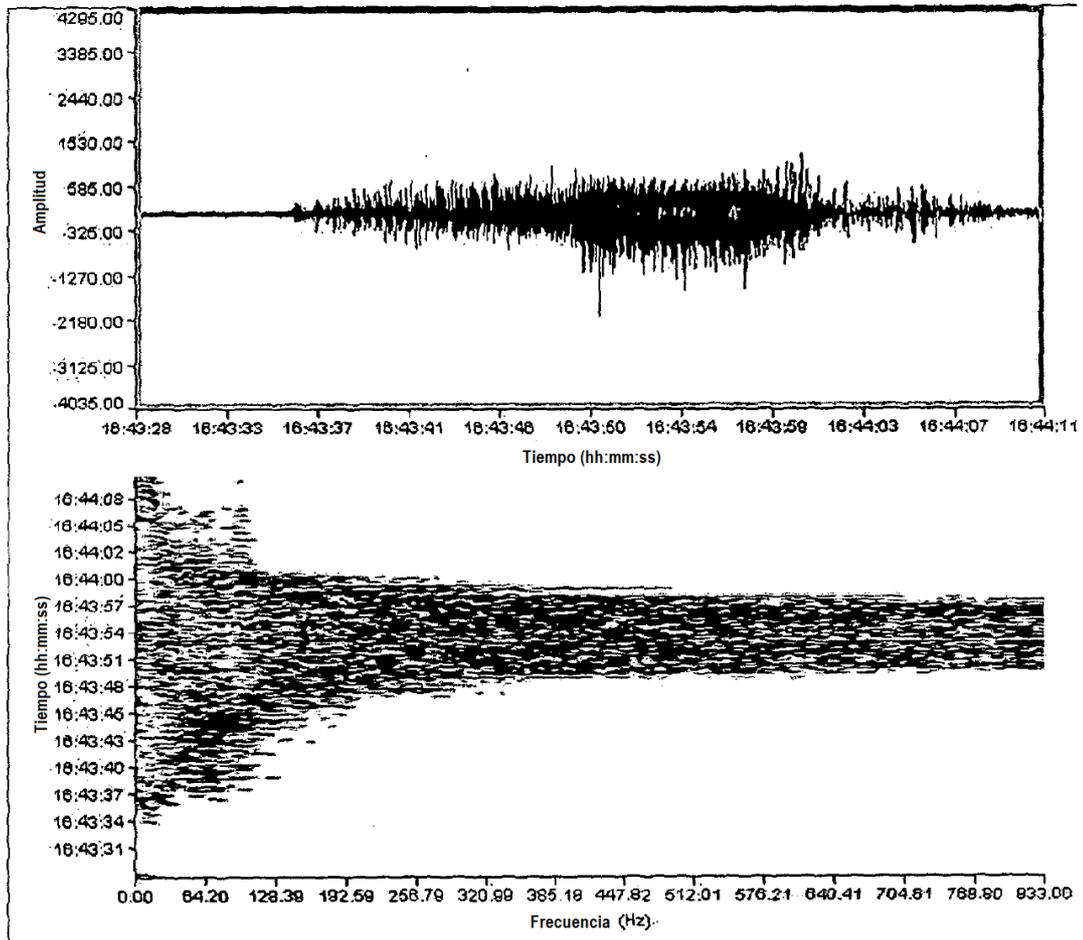


Fig. 6a

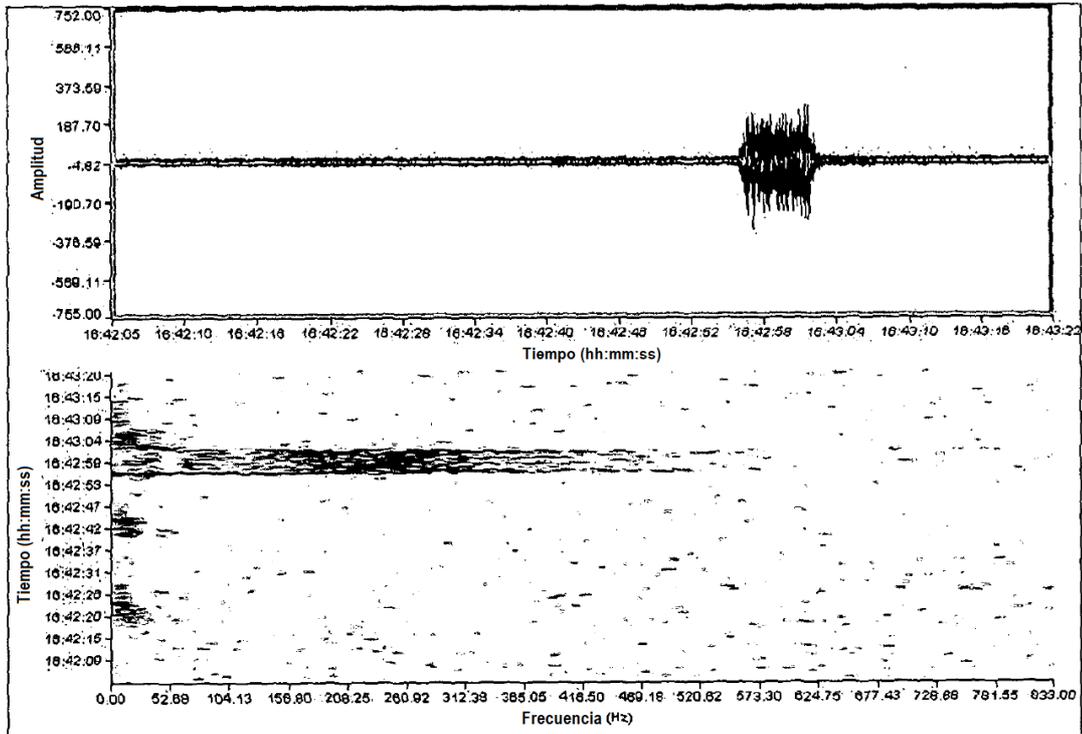
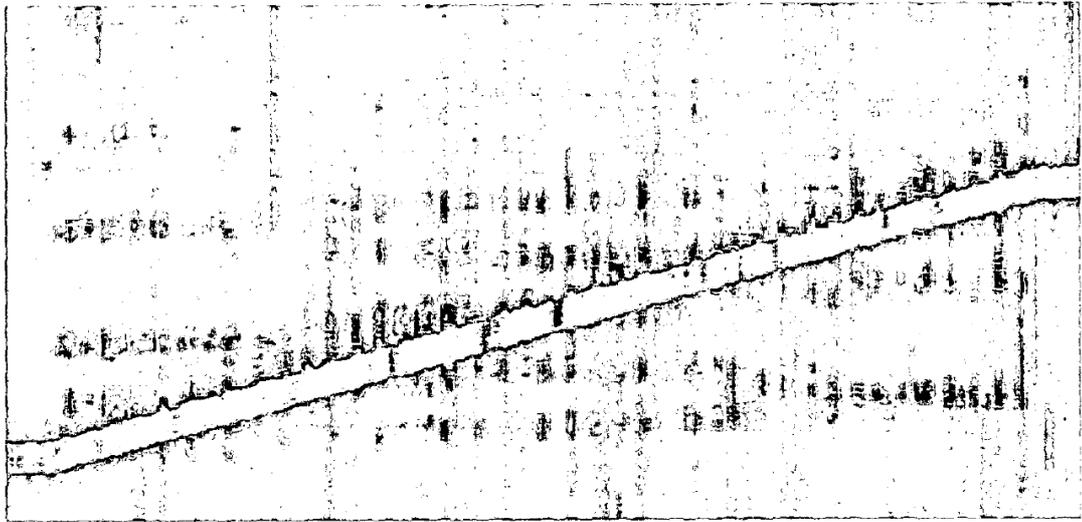


Fig. 6b

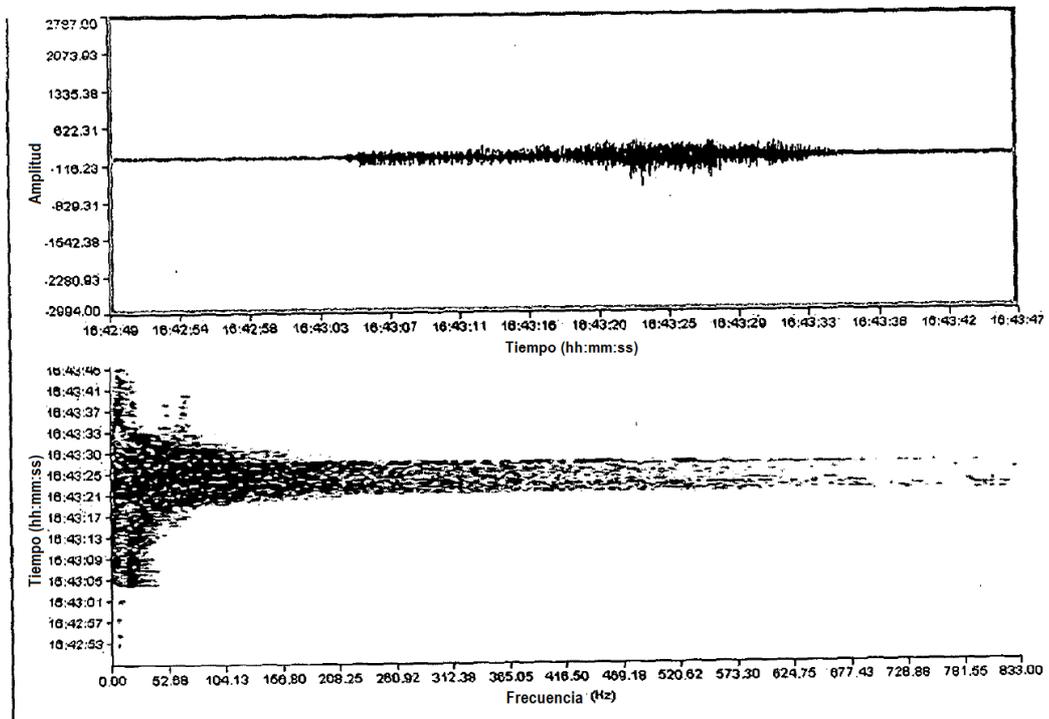
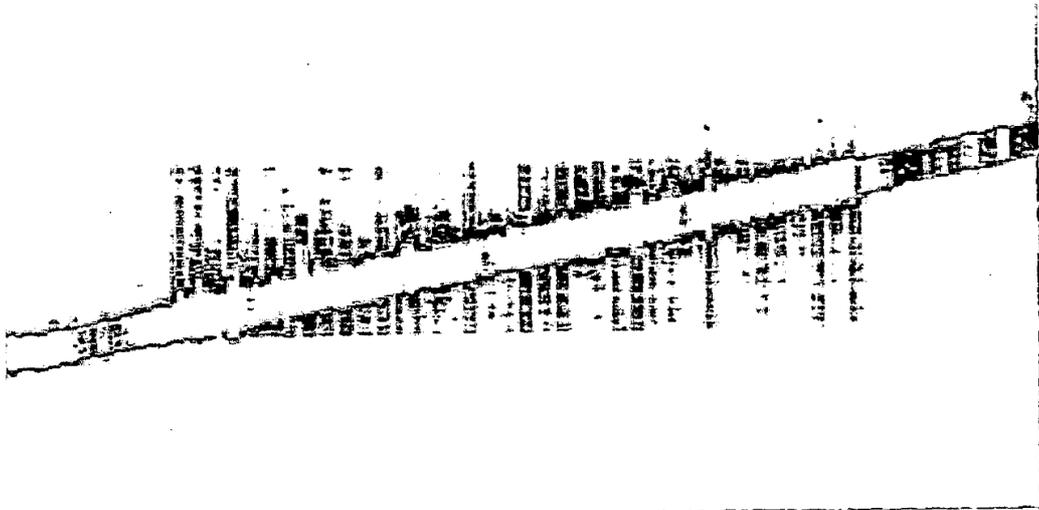


Fig. 6c