

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 977 698**

51 Int. Cl.:

G01M 17/007 (2006.01)

G01M 17/08 (2006.01)

G01M 17/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.10.2015** **PCT/IT2015/000255**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.04.2017** **WO17064734**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.10.2015** **E 15820894 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.03.2024** **EP 3362773**

54 Título: **Procedimiento para determinar los parámetros modales de vehículos viarios o ferroviarios y para la caracterización indirecta de perfiles viarios o ferroviarios**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
28.08.2024

73 Titular/es:

POLITECNICO DI BARI (100.0%)
Via Amendola, 126/B
70126 Bari, IT

72 Inventor/es:

DE FILIPPIS, GIOVANNI;
MANGIALARDI, LUIGI;
PALMIERI, DAVIDE y
SORIA, LEONARDO

74 Agente/Representante:

TORNER LASALLE, Elisabet

ES 2 977 698 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

Procedimiento para determinar los parámetros modales de vehículos viarios o ferroviarios y para la caracterización indirecta de perfiles viarios o ferroviarios

Descripción

La presente invención según la reivindicación 1 versa sobre un procedimiento para la estimación de parámetros modales de sistemas de vehículos viarios/ferroviarios en condiciones de trabajo y para la caracterización indirecta de propiedades estadísticas de rugosidad de perfiles de rodadura sobre superficies viarias/ferroviarias.

Se ha de precisar preliminarmente que el procedimiento descrito a continuación puede aplicarse bien a sistemas de vehículos viarios o bien ferroviarios y que, por lo tanto, se concibe que las expresiones superficie viaria y superficie ferroviaria, perfil viario y perfil ferroviario, carretera y raíl o ferrocarril sean intercambiables en todo el texto.

Para una explicación de todos los acrónimos utilizados, véase la lista al final de la descripción.

Campo técnico

Los campos de aplicación de la presente invención son el análisis modal operacional, OMA (por sus siglas en inglés), aplicado en un caso de sistemas de vehículos viarios/ferroviarios y la caracterización de perfiles de rugosidad de superficies viarias/ferroviarias.

El OMA es una técnica utilizada habitualmente para llevar a cabo la identificación experimental de estructuras en condiciones de trabajo y está basada únicamente en el análisis de las señales de salida, generalmente adquiridas utilizando acelerómetros. La identificación experimental de un sistema lineal con N grados de libertad, sometido a cargas de trabajo, tiene como objetivo la estimación de los denominados parámetros modales operacionales, es decir:

- polos del sistema λ_n ;

- vectores modales $\psi_n \in \mathbb{C}^{N \times 1}$;

- vectores operacionales de referencia $\phi_n \in \mathbb{C}^{N \times 1}$.

En particular, la determinación de los polos del sistema λ_n es crucial, dado que contienen información acerca de frecuencias naturales ω_n y relaciones de amortiguación ζ_n del sistema examinado

$$\lambda_n = \left(-\zeta_n + i\sqrt{1-\zeta_n^2} \right) \omega_n \text{ con } n=1, \dots, N \quad (1)$$

Para la caracterización de los perfiles de superficie viaria/ferroviaria se concibe la determinación de las propiedades estadísticas asociadas con su rugosidad. Tal caracterización es llevada a cabo, en general, partiendo de mediciones directas, llevadas a cabo por medio de perfilómetros adecuados, y está dirigida a una clasificación de los perfiles que pertenecen a diversas superficies viarias o diversos elementos de vía férrea.

Estado de la técnica

Análisis modal operacional

En el estado de la técnica se conocen diversos procedimientos que permiten obtener la estimación de los parámetros modales de sistemas estructurales partiendo únicamente del análisis de las señales de salida, en caso de que se satisfagan las hipótesis de la técnica de excitación natural, NExT. En el dominio de separación (retraso temporal) (τ) se utilizan habitualmente las funciones de correlación automática y cruzada $R_{q,q_j}(\tau)$ de salida (Ec. (3)). En cambio, en el dominio frecuencial (ω), los parámetros modales pueden ser estimados directamente a partir de la densidad espectral de potencia automática y cruzada, DEP, de las salidas $S_{q,q_j}(\omega)$, (Ec. (4)). En caso de que

las cargas externas N_i satisfagan las hipótesis de NExT, se puede escribir la matriz de DEP S_f de entrada como una matriz diagonal con elementos constantes (ec. (2)).

$$S_f = \begin{bmatrix} S_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & S_{N_i} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N_i \times N_i} \quad (2)$$

Las hipótesis de NExT citadas anteriormente son, de hecho:

5 hipótesis 1: las cargas que actúan sobre el sistema tienen que tener un patrón que puede ser rastreado hasta una secuencia de ruidos blancos (amplitud independiente de la frecuencia en la ec. (2));

hipótesis 2: en caso de que la excitación actúe sobre muchos puntos, las entradas tienen que ser estrictamente no correlacionadas (ausencia de elementos extradiagonales en la ec. (2)).

10 Con referencia a un sistema genérico con N grados de libertad, sometido a cargas externas que satisfacen las hipótesis de NExT, y considerando las salidas q_i y q_j , podemos escribir la expresión de la correlación cruzada como [Shen, DOI:10.1006/jsvi.2002.5203] en la que:

$$R_{q_i q_j}(\tau) = \sum_{n=1}^{2N} \phi_{in} \psi_{jn} e^{\lambda_n \tau} h(\tau) + \psi_{in} \phi_{jn} e^{-\lambda_n \tau} h(-\tau) \quad (3)$$

15 - ψ_{in} y ψ_{jn} son dos componentes genéricos del vector modal ψ_n ;

- ϕ_{in} y ϕ_{jn} son dos componentes genéricos del vector operacional ϕ_n ;

20 - $h(\cdot)$ indica la función de Heaviside.

Como consecuencia, se puede obtener la expresión DEP cruzada de la ec. (3) aplicando la transformada de Fourier

$$S_{q_i q_j}(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\phi_{in} \psi_{jn}}{i\omega - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} \phi_{jn}}{-i\omega - \lambda_n} \quad (4)$$

Finalmente, reescribiendo las ecuaciones (3) y (4) en forma de matriz compacta, se obtiene:

25

$$R_q(\tau) = \sum_{n=1}^{2N} \phi_n \psi_n^T e^{\lambda_n \tau} h(\tau) + \psi_n \phi_n^T e^{-\lambda_n \tau} h(-\tau) \quad (5)$$

$$S_q(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\phi_n \psi_n^T}{i\omega - \lambda_n} + \frac{\psi_n \phi_n^T}{-i\omega - \lambda_n} \quad (6)$$

en las que:

- $R_q(\tau) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ es la matriz de correlación de salida;

30

- $S_q(\tau) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ es la matriz de DEP de salida;

- el símbolo $(\cdot)^T$ indica el operador de transposición matricial.

35 En particular, al agrupar los diversos términos, se puede reescribir la ec. (6) en forma más genérica como una relación entre funciones polinómicas [Reynders, DOI: 10.1007/s1 1831-012-9069-x]

$$S_q(\omega) = \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \quad (7)$$

en la que:

- $B(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ representa una matriz, cuyo elemento genérico $B_{ij}(\omega) \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r b_{ijr}$ es el polinomio del numerador de la DEP correspondiente que tiene coeficientes b_{ijr} ; los polinomios $B_{ij}(\omega)$ se definen aquí como polinomios de ajuste y resultan estar asociados con las entradas;

- $A(\omega) = \sum_{r=0}^{n_a} (i\omega)^r a_r$ es el polinomio del denominador común a todas las DEP que tienen coeficientes a_r ; representa el polinomio característico, cuyas raíces son los polos del sistema;

- n_b y n_a indican el número de coeficientes de los polinomios del numerador y del denominador, respectivamente.

Las hipótesis de NExT, para las que son válidas las ecuaciones (5), (6) y (7), son satisfechas, generalmente, en aplicaciones de ingeniería de obras públicas (edificios, puentes, estructuras en general), dado que en la mayoría de casos las grandes construcciones están expuestas a cargas estocásticas (tráfico y viento), que satisfacen fácilmente tales hipótesis.

A continuación, se describen las principales contribuciones disponibles en la bibliografía de patentes.

La solicitud WO 01/33182 A1 describe el procedimiento recién presentado para la identificación modal operacional basada en las hipótesis de NExT.

La solicitud WO 2008/002310 A1 hace referencia a un procedimiento para la extracción de parámetros modales partiendo de FRF. Para obtener tales funciones es necesario excitar la estructura con señales conocidas. Al contrario, las técnicas de OMA no requieren que se midan las entradas.

La solicitud WO 2014/006176 A1 presenta un procedimiento para la estimación de los parámetros modales de una estructura, en función del uso de transmisibilidades. Se obtienen tales funciones como una relación entre dos salidas del sistema en una condición determinada de trabajo. Para eliminar la influencia de las entradas también es necesario considerar al menos dos condiciones distintas de trabajo.

Caracterización de perfiles de rugosidad de superficies viarias/ferroviarias

En las últimas décadas, se han estudiado de forma generalizada las propiedades de procesos aleatorios (campos aleatorios) y como consecuencia ha surgido el uso de diversos planteamientos en el modelado de la rugosidad viaria/ferroviaria [Dodds&Robson, DOI:10.1016/S0022-460X(73)80373-6]. En particular, subyacentes a tales modelos existen tres hipótesis fundamentales:

hipótesis 3: la superficie es homogénea; es decir, las propiedades estadísticas de la rugosidad son independientes de la observación espacial considerada mientras se hace referencia a más perfiles paralelos;

hipótesis 4: las alturas de rugosidad tienen una distribución gaussiana con una media nula, por lo tanto las propiedades estadísticas pueden ser descritas completamente por medio de funciones de correlación o por medio de DEP;

hipótesis 5: la superficie es un proceso ergódico; es decir, la media simple, calculada junto con la realización individual, coincide con la media de conjunto, calculada junto con todas las realizaciones.

En este contexto, la bibliografía técnica sugiere diversas aproximaciones, la mayor parte de las cuales se basa en el uso de modelos paramétricos de DEP medidas. Los parámetros relativos a tales aproximaciones son calculados, partiendo de los datos adquiridos, utilizando técnicas adecuadas de ajuste. Por ejemplo, la norma ISO 8608-1995 propone el siguiente modelo de DEP automática, definido en el dominio de frecuencia espacial v

$$S_{d(ISO)}(v) = S_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^{-e} \quad (8)$$

en la que:

- v_0 indica la frecuencia espacial de referencia ($v_0 = 1 \text{ rad/m}$)

- S_0 (m^3) es la amplitud de DEP para $v = v_0$.

La norma sugiere que el exponente e sea igual a 2 en caso de que los datos sean adquiridos a velocidad constante. Por lo tanto, si se considera un perfilómetro que avanza a una velocidad dada V , la expresión de la ec. (8) puede ser convertida al dominio temporal y frecuencial ω y ser reescrita como

$$S_{d(ISO)}(\omega) = S_{d(ISO)}(v = \omega/V) / v = \frac{S_0}{V} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-e} \quad (9)$$

en la que $\omega_0 = V_0 V$ (producto entre la frecuencia espacial de referencia y la velocidad V) indica la frecuencia de referencia. Se debe hacer notar cómo, en este ejemplo, el único parámetro que tiene que estar determinado por ajuste resulta ser la amplitud S_0 .

Otra aproximación, utilizada habitualmente para aplicaciones tanto viarias como ferroviarias, fácilmente utilizable, dado que requiere la estimación únicamente de dos parámetros, es la propuesta por Sussman [Andrén, DOI:10.1504/IJVD.2006.008450]. En el dominio temporal y frecuencial ω , el patrón de la DEP automática resulta ser

$$S_{d(SUS)}(\omega) = \frac{C}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (10)$$

En la que C ($m^2 \text{rad/s}$) y ω_0 (rad/s) son los valores desconocidos que han de ser determinados.

En el caso en el que la caracterización concierne a más perfiles paralelos, que pertenecen a la misma superficie viaria o los dos raíles que pertenecen a la misma vía férrea, se puede utilizar la función de coherencia $\Gamma_{ij}(v)$ para describir la relación entre los mismos. Al considerar dos perfiles paralelos genéricos $d_i(x)$ y $d_j(x)$ colocados a una distancia W_m y definida en función de la abscisa espacial x , tal función puede ser calculada utilizando la siguiente fórmula:

$$\Gamma_m(v) = \frac{|S_{d_i d_j}(v)|}{\sqrt{S_{d_i}(v) S_{d_j}(v)}} \quad (11)$$

en la que el ancho de vía m -ésima es el identificado por los perfiles paralelos $d_i(x)$ y $d_j(x)$ y mide específicamente la distancia entre tales perfiles. Además,

- $S_{d_i}(v)$ y $S_{d_j}(v)$ son, respectivamente, las DEP automáticas asociadas con los perfiles $d_i(x)$ y $d_j(x)$;

- $S_{d_i d_j}(v)$ es la DEP cruzada calculada entre los perfiles $d_i(x)$ y $d_j(x)$.

De ello se deduce que se puede obtener la DEP cruzada como

$$S_{d_i d_j}(v) = \Gamma_m(v) \sqrt{S_{d_i}(v) S_{d_j}(v)} e^{-i\beta_m(v)} \quad (12)$$

en la que $\beta_m(v)$ es la diferencia entre las fases asociadas con los espectros de los dos perfiles $d_i(x)$ y $d_j(x)$.

Como definición, la coherencia es una función real uniforme ($\Gamma_m(v) = \Gamma_m(-v)$) cuyo valor puede estar entre 0 y 1. Como consecuencia, dos perfiles resultan ser muy similares entre sí únicamente para tales frecuencias espaciales en las que la coherencia asume valores cercanos a la unidad. Además, al aproximar a cero la distancia W_m entre los dos perfiles, la coherencia $\Gamma_m(v)$ se vuelve claramente unitaria. Estudios llevados a cabo sobre distintos tipos de superficies viarias/ferroviarias han mostrado cómo, en muchos casos, la coherencia tiene un patrón decreciente

en función de la frecuencia espacial V . El modelo de ajuste propuesto por Bogsjö [Bogsjö, DOI:10.1080/00423110802018289] se compadece bien con tales observaciones dado que está basado en el uso de una función exponencial decreciente con un único parámetro μ , según la siguiente relación

$$\Gamma_m(v) = e^{-\mu W_m |v|} \quad (13)$$

Finalmente, se debe recordar que, dado que $\Gamma_m(v)$ es una unidad adimensional, las relaciones documentadas en las ecuaciones (11) y (13) pueden ser convertidas en el dominio temporal y frecuencial ω aplicando la sustitución $V = \omega/v$. Recientemente, la caracterización indirecta de las propiedades estadísticas de los perfiles de superficie viaria/ferroviaria ha tenido un creciente interés en la bibliografía tanto técnica como de patentes.

En particular, Gonzáles et al. [Gonzáles, DOI:10.1080/00423110701485050] proponen un procedimiento para la estimación indirecta de la DEP automática del perfil viario, en el que se considera que todo el vehículo está en movimiento sobre un único perfil. Al conocer la matriz de FRF del vehículo, es posible reconstruir la DEP automática del perfil partiendo exclusivamente de las aceleraciones detectadas en el mismo vehículo.

La solicitud US 2014/257629 A1 describe un procedimiento para permitir la estimación del perfil viario partiendo de las vibraciones medidas corriente arriba y corriente abajo de una o más suspensiones. Tal procedimiento utiliza un algoritmo basado en un filtro de Kalman adaptativo y hace referencia a un modelo de mono-suspensión de vehículo. La solicitud US 2014/204205 A1 propone un procedimiento para medir la altura de los perfiles viarios sobre los que se mueve un vehículo. Tal procedimiento hace un uso amplio de las técnicas de procesamiento de imágenes y requiere el uso de una o más cámaras (por ejemplo, cámaras para la monitorización del tráfico) dispuestas a nivel de la carretera.

Los procedimientos propuestos en el campo del ferrocarril están limitados generalmente para detectar la presencia de defectos de los raíles y no utilizan algoritmos de estimación para caracterizar las propiedades estadísticas de la rugosidad.

La solicitud US 799988B2 describe un procedimiento para monitorizar la red ferroviaria por medio de al menos una cámara dispuesta en un vehículo ferroviario. Mediante algoritmos de control y de modificación de imágenes es posible monitorizar la red ferroviaria y, sobre todo, detectar la presencia de posibles anomalías en la misma red.

La solicitud US 8905359 B2 describe un procedimiento para detectar daños en los raíles. Al utilizar dos acelerómetros que miden la aceleración vertical y la longitudinal del eje, respectivamente, es posible crear una base de datos de señales acelerométricas. Se puede identificar un posible daño como desviaciones entre las señales adquiridas en distintos momentos en la misma sección de vía férrea.

La solicitud US 8942426 B2 describe un procedimiento para monitorizar la red ferroviaria en tiempo real, utilizando cámaras y GPS. Las mediciones son procesadas en tiempo real para controlar si se atienen a criterios de presencia de irregularidades de la red ferroviaria. Si están presentes, los datos son enviados automáticamente a un centro de control para determinar el tipo de tales irregularidades. El documento DE 102 57 793 A1 da a conocer un procedimiento basado en un modelo de simulación predictiva para monitorizar la vida útil de un vehículo motorizado. El documento EP 1 600 755 A1 da a conocer un dispositivo para la simulación de vibraciones, para ser utilizado con un banco de pruebas para motores de combustión interna.

El documento US 5 614 670 A da a conocer un dispositivo y un procedimiento para monitorizar las condiciones asociadas con el deterioro del pavimento que utilizan martillos neumáticos para excitar pavimentos de carretera.

El documento EP 0 971 217 A2 da a conocer un sistema de diagnóstico de ruidos y un procedimiento para diagnosticar un ruido imprevisto en un conjunto de múltiples componentes.

El documento WO 2007/009460 A1 da a conocer un procedimiento para comprobar un objeto con respecto a sus modos de vibración proporcionado en una ubicación seleccionada de excitación y medido por medio de sensores sensibles a las vibraciones.

Problema técnico

En el caso específico de OMA aplicado a un sistema de vehículo, objeto de la presente invención, ciertamente es necesario verificar si se satisface la siguiente hipótesis de constancia de movimiento:

hipótesis 6: el vehículo tiene que proseguir en la condición de marcha constante; es decir, a una velocidad constante a lo largo de una trayectoria rectilínea o una curva con un radio constante, es decir, que no implique variaciones bruscas de dirección.

En estas condiciones, el vehículo es principalmente sometido a cargas externas estacionarias, producidas por las interacciones existentes entre las ruedas y la carretera o la vía férrea. Dado que, en general, las entradas aplicadas al sistema siguen siendo desconocidas, se puede utilizar el análisis modal operacional para identificar sus parámetros modales.

5 Considérese, por ejemplo, el vehículo descrito en la fig. (1) que tiene un número de ruedas $N_t = 5$. La geometría se definió de tal forma que fuera general, resultando, así, en estar caracterizada por la presencia de 10 anchos de vía W_m y 3 distancias distintas entre ejes L_l . En un caso en el que el vehículo se mueve sobre 5 perfiles $d_1(x)$, $d_2(x)$, $d_3(x)$, $d_4(x)$, $d_5(x)$ en condición de marcha constante con velocidad v , las cargas externas son transmitidas al sistema a través de cada rueda individual. Para facilitar la descripción de sus interacciones con la superficie de rodadura, es posible considerar un contacto de tipo puntiforme. Dado que, en realidad, las superficies de contacto actúan como un filtro de paso bajo sobre las entradas, se puede introducir este modo de descripción sin perder generalidad. Si se verificaran las hipótesis 3 a 6, se podría definir la matriz de DEP $S_r(\omega)$, que hace referencia a los desplazamientos inducidos por la superficie, sobre las ruedas, en los puntos de contacto respectivos (indicados en la fig. 1 con las letras A a E) en el dominio temporal y frecuencial ω como

$$S_r(\omega) = \begin{bmatrix} S_{d_A} & S_{d_A d_B} & \cdots & S_{d_A d_E} \\ S_{d_A d_B}^* & S_{d_B} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ S_{d_A d_E}^* & \cdots & \cdots & S_{d_E} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$$

$$= \begin{bmatrix} S_{d_1} & \Gamma_1 \sqrt{S_{d_1} S_{d_2}} e^{+i(\omega \tau_1 - \beta_1)} & \Gamma_2 \sqrt{S_{d_1} S_{d_3}} e^{+i(\omega \tau_2 - \beta_2)} & \Gamma_3 \sqrt{S_{d_1} S_{d_4}} e^{+i(\omega \tau_3 - \beta_3)} & \Gamma_4 \sqrt{S_{d_1} S_{d_5}} e^{-i\beta_4} \\ S_{d_A d_B}^* & S_{d_2} & \Gamma_5 \sqrt{S_{d_1} S_{d_3}} e^{+i(\omega \tau_3 - \beta_5)} & \Gamma_6 \sqrt{S_{d_2} S_{d_4}} e^{-i\beta_6} & \Gamma_7 \sqrt{S_{d_2} S_{d_5}} e^{-i(\omega \tau_1 + \beta_7)} \\ \vdots & & S_{d_3} & \Gamma_8 \sqrt{S_{d_3} S_{d_4}} e^{-i(\omega \tau_3 + \beta_8)} & \Gamma_9 \sqrt{S_{d_3} S_{d_5}} e^{-i(\omega \tau_2 + \beta_9)} \\ \vdots & & & S_{d_4} & \Gamma_{10} \sqrt{S_{d_4} S_{d_5}} e^{-i(\omega \tau_1 + \beta_{10})} \\ S_{d_A d_F}^* & \cdots & \cdots & \cdots & S_{d_5} \end{bmatrix} \quad (14)$$

en la que $\tau_l = L_l/v$ con $l = 1, \dots, 3$ indica el retraso genérico entre dos ejes, y en aras de la brevedad, se ha omitido la dependencia de S_{d_l} , Γ_m y β_m con respecto a ω . Al indicar con $H_{fr}(\omega) \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$ la matriz de las funciones de respuesta de frecuencia (FRF) de las ruedas, se puede calcular la matriz de DEP $S_r(\omega)$ de entrada, representada por las fuerzas que actúan sobre los cuerpos, como

$$S_r(\omega) = H_{fr}^*(\omega) S_f(\omega) H_{fr}^T(\omega) \quad (15)$$

Comparando las expresiones de la matriz de DEP de entrada obtenida considerando la excitación natural (ec. (2)) y la debida a la interacción con la superficie de rodadura (ec. (15)), es evidente cómo las técnicas de identificación modal que se derivan de las hipótesis de NExT, y por lo tanto basadas en las ecuaciones (5), (6) y (7), no resultan válidas en casos en los que se aplica OMA a vehículos en condición de trabajo. De hecho:

Problema 1: las cargas tienen un patrón que puede ser rastreado al del ruido de color, con una amplitud generalmente decreciente con la frecuencia, cuya forma depende de las características del perfil viario/ferroviario (ecuaciones (9) y (10)) y de las ruedas (descritas por medio de $H_{fr}(\omega)$ en la ec. (15)): por lo tanto, la hipótesis 1 de NExT no es válida.

Problema 2: las entradas que actúan sobre las ruedas colocadas en el mismo eje son de interés para una correlación espacial (descrita por medio de $\Gamma_m(\omega)$ en la ec. (14)); las entradas aplicadas sobre ruedas el perfil de rodadura en común, pero dispuestas en distintos ejes son de interés para una correlación temporal (descrita por medio de $e^{\pm i\omega\tau_l}$ en la ec. (14)), mientras que para las cargas relacionadas con las ruedas sin ningún perfil de rodadura en común y que pertenecen a distintos ejes hay una correlación tanto espacial como temporal: por lo tanto, la hipótesis 2 de NExT no es válida.

Por lo tanto, los errores realizados en el proceso de estimación utilizando modelos formulados según las hipótesis de NExT, aumentan notablemente. Además, para compensar errores de modelado, provocados por la falta de satisfacción de las hipótesis de NExT, los algoritmos conocidos de identificación presentan soluciones adicionales que no tienen un significado físico y que se proporcionan en forma de polos/modos espurios en el conjunto de parámetros modales estimados, que son difíciles, si no imposibles, de ser identificados y excluidos. Por lo tanto, un problema técnico no solucionado por los procedimientos de identificación conocidos en el estado de la técnica es llevar a cabo la identificación modal de un sistema también cuando este es sometido a cargas "de color" y correlacionadas en el tiempo y el espacio.

Por lo tanto, un primer objetivo de la presente invención es proporcionar un procedimiento para la estimación de parámetros modales de vehículos en condiciones de trabajo, que considera explícitamente los efectos que tienen la coloración y la correlación de entradas sobre las salidas del sistema.

Con referencia a la caracterización indirecta de los perfiles de superficie viaria/ferroviaria, los procedimientos descritos anteriormente y todos los otros conocidos en el estado de la técnica no consideran explícitamente los efectos de la correlación de las entradas sobre las salidas del sistema de vehículo. El procedimiento propuesto por Gonzáles et al. [Gonzáles, DOI: 10.1080/00423110701485050] necesita de hecho una etapa de calibración, necesaria para determinar la matriz de FRF del vehículo en diversas condiciones de trabajo, es decir considerando diversas velocidades de desplazamiento sobre una superficie viaria con características conocidas. La solicitud US 2014/257629 A1, en cambio, propone un procedimiento basado en un modelo mono-suspensión de vehículo que no permita considerar de forma apropiada los efectos ligados a la correlación de las entradas de la carretera.

Dado que las cámaras están montadas en una estructura fija (y no en vehículos), el procedimiento descrito en la solicitud US 2014/204205 A1 permite reconstruir únicamente la altura de los perfiles en la zona cubierta por los ángulos de visión de las mismas cámaras. En el campo de los ferrocarriles, las solicitudes US 799988B2, US 8905359 B2 y US 8942426 B2 están limitadas a detectar la presencia de defectos del rail y no utilizan algoritmos de estimación para caracterizar las propiedades estadísticas de la rugosidad.

Por lo tanto, según otro objetivo, la presente invención proporciona un procedimiento para la caracterización indirecta de las propiedades estadísticas de los perfiles de superficie viaria/ferroviaria partiendo de las señales de salida adquiridas en vehículos en condiciones de trabajo. En particular, al aprovechar algunas propiedades intrínsecas de homogeneidad, el procedimiento propuesto permite reducir notablemente el número de cantidades que es preciso estimar para caracterizar las propiedades estadísticas de perfiles paralelos que pertenecen a la misma superficie de rodadura. Además, la presente invención proporciona un programa según la reivindicación 8 y un sistema según la reivindicación 9.

Breve descripción de la invención

La presente invención proporciona un procedimiento para la identificación de los polos (λ_n) y vectores modales (ψ_n) de un vehículo viario o ferroviario dotado de al menos dos ruedas y en condición de trabajo, por medio del análisis de los desplazamientos o velocidades o aceleraciones (salida del sistema) adquiridos en puntos asignados de medición de dicho vehículo, siendo determinados dichos parámetros modales por medio del ajuste de los datos relacionados con dichas salidas del sistema de acuerdo con un modelo matemático que describe la interacción entre la carretera o la vía férrea y dicho vehículo, caracterizado por:

- trabajar con la hipótesis de que dicho vehículo se mueve a una velocidad constante en una trayectoria rectilínea o una curva con un radio constante;
- trabajar con la hipótesis de que dicho vehículo se mueve sobre una superficie homogénea y ergódica, cuya rugosidad tiene una distribución gaussiana y que dichas al menos dos ruedas se mueven sobre un perfil o sobre una pluralidad de perfiles paralelos entre sí;
- trabajar con la hipótesis de que las entradas inducidas por la superficie viaria o ferroviaria sobre dicho vehículo no puedan ser rastreadas a una secuencia de ruidos blancos y que están correlacionados entre sí en el tiempo y/o el espacio.

Además, la presente invención proporciona un procedimiento para la estimación de vectores operacionales (α_n^m, β_n^m y χ_n^m) y para la caracterización indirecta de las propiedades estadísticas de una superficie viaria o ferroviaria obtenidas utilizando:

- 5 - la función de autocorrelación ($R_d(\tau)$) o DEP automática ($S_d(\omega)$) asociada a los perfiles viarios o ferroviarios;
- las funciones de coherencia ($\Gamma_m(\omega)$) o IFT respectivas ($\eta_m(\tau)$) asociadas con los perfiles paralelos viarios o ferroviarios.

10 Descripción detallada de la invención

En la fig. (1) se muestra la geometría de un vehículo con 5 ruedas y que tiene 10 anchos de vía y 3 distancias distintas entre ejes.

- 15 En la fig. (2) se muestra un modelo esquematizado de vehículo como un sistema con 7 grados de libertad.

En las figuras (3.a) y (3.b) se muestran, respectivamente, los diagramas de estabilización obtenidos aplicando el procedimiento de identificación según la invención y el algoritmo de dominio de frecuencia compleja de mínimos cuadrados (LSCF, por sus siglas en inglés) a un modelo de vehículo con 7 grados de libertad, en movimiento a una

- 20 velocidad constante (60 km/h) sobre una superficie homogénea y gaussiana.

En la fig. (4) se muestra un diagrama de validación del modelo sintetizado utilizando el procedimiento propuesto de identificación.

- 25 En las figuras (5) a (8) se muestran algunos diagramas de flujo que explican el procedimiento según la presente invención.

Hipótesis básica del procedimiento

- 30 El procedimiento para la identificación modal de vehículos según la presente invención necesita que se satisfagan todas las hipótesis 3 a 6, pero no requiere que se satisfagan las hipótesis 1 y 2 de NExT: en otras palabras, se supone que la superficie es homogénea y asimilable a un procedimiento ergódico, que la rugosidad tiene una distribución gaussiana con una media nula y que el vehículo avanza a una velocidad constante a lo largo de una trayectoria rectilínea o una curva con un radio constante. Pero se trabaja con la hipótesis de que las cargas que
- 35 actúan sobre el vehículo tienen un patrón que puede ser rastreado al ruido de color y son de interés para una correlación temporal y/o espacial. En particular, como se explica a continuación, el conocimiento de la geometría del vehículo, concebido como el conocimiento de los anchos de vía y distancias entre ejes, permite incluir información relativa a la correlación temporal y/o espacial de las entradas en el procedimiento de identificación modal. Esto permite determinar los parámetros modales del vehículo y también los parámetros característicos de la carretera o
- 40 de la vía férrea en caso de que no se satisfagan las hipótesis de NExT.

Descripción del procedimiento

- 45 En un caso en el que se puede asimilar una superficie viaria o ferroviaria dada a un campo aleatorio gaussiano homogéneo, se puede reducir notablemente el número de cantidades necesarias para caracterizar las propiedades estadísticas asociadas con perfiles paralelos que pertenecen a la misma. Con tal fin, es posible aprovechar propiedades intrínsecas importantes de homogeneidad:

propiedad 1: $S_{d_i}(v) = S_{d_j}(v) = S_d(v)$, las DEP automáticas asociadas con los perfiles $d_i(x)$ y $d_j(x)$ son

- 50 coincidentes y, por lo tanto, pueden ser consideradas iguales a una función $S_d(v)$;

propiedad 2: $S_{d_i d_j}(v) = \Gamma_m(v) S_d(v)$ la DEP cruzada calculada entre los perfiles $d_i(x)$ y $d_j(x)$ es una función real que depende exclusivamente de la DEP automática $S_d(v)$ y de la función de coherencia $\Gamma_m(v)$.

- 55 Por lo tanto, la matriz de DEP de la ec. (14), que se refiere a desplazamientos inducidos por la superficie sobre las ruedas, puede ser reescrita en el dominio de temporal y frecuencial ω , como:

$$\mathbf{S}_r(\omega) = \mathbf{S}_d(\omega) \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_1(\omega)e^{+i\omega\tau_1} & \Gamma_2(\omega)e^{+i\omega\tau_2} & \Gamma_3(\omega)e^{+i\omega\tau_1} & \Gamma_4(\omega) \\ \Gamma_1(\omega)e^{-i\omega\tau_1} & 1 & \Gamma_5(\omega)e^{+i\omega\tau_3} & \Gamma_6(\omega) & \Gamma_7(\omega)e^{-i\omega\tau_1} \\ \vdots & & 1 & \Gamma_8(\omega)e^{-i\omega\tau_3} & \Gamma_9(\omega)e^{-i\omega\tau_2} \\ \vdots & & & 1 & \Gamma_{10}(\omega)e^{-i\omega\tau_1} \\ \Gamma_4(\omega) & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Conociendo la geometría del vehículo, en términos de anchos de vía W_m y de distancias entre ejes L_l es posible calcular el número de cantidades que han de conocerse para la determinación completa de los coeficientes de la matriz de DEP de la ec. (16):

5

- el número de DEP automática está limitado a una única función S_d ;

- el número de la función de coherencia Γ_m coincide con el número de anchos de vía N_W ;

10

- el número de retrasos τ_l coincide con el número de distancias entre ejes de distinta longitud N_L .

Con referencia al sistema genérico de vehículo de la fig. (1), la matriz de correlación $\mathbf{R}_f(\tau) \in \mathbb{R}^{N_i \times N_i}$ de entrada puede ser calculada aplicando la IFT a la expresión de la ec. (15); la matriz de correlación $\mathbf{R}_q(\tau) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ de salida puede obtenerse expresando en primer lugar la respuesta del sistema a la acción de cargas externas arbitrarias, en el dominio temporal, utilizando la denominada integral de Duhamel:

15

$$q(t) = \int_{-\infty}^t h(t-\rho) f(\rho) d\rho \quad (17)$$

En la que $\mathbf{h}(t) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ es la matriz de las funciones de respuesta al impulso, $\mathbf{q}(t) \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ es el vector de salida, $\mathbf{f}(t) \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ es el vector de las entradas, y obteniendo entonces la expresión de la función de correlación cruzada genérica $R_{q_i q_j}(\tau)$ de salida, considerando dos salidas genéricas $q_i(t)$ y $q_j(t)$. Tal función comprende los parámetros característicos de la dinámica del sistema (es decir, los parámetros modales) y depende de la matriz $\mathbf{R}_r(\tau)$.

20

Es específicamente posible demostrar que se puede obtener la matriz de correlación $\mathbf{R}_q(\tau)$ de salida en la siguiente forma:

25

$$\mathbf{R}_q(\tau) = \sum_{n=1}^{2N} \bar{\varphi}_n(\tau) \psi_n^T e^{\lambda_n \tau} + \psi_n \bar{\varphi}_n^T(-\tau) e^{-\lambda_n \tau} \quad (18)$$

En la que los términos $\bar{\varphi}_n(\tau) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ son vectores operacionales de referencia dependientes del retraso y se definen como

30

$$\bar{\varphi}_n(\tau) = \mathbf{R}_d(\tau) * \left(\sum_{m=0}^{N_W} \eta_m(\tau) * \left(\alpha_n^m h(\tau) + \sum_{l=1}^{N_L} \left(\beta_n^m e^{+\lambda_n \tau_l} h(\tau + \tau_l) + \chi_n^m e^{-\lambda_n \tau_l} h(\tau - \tau_l) \right) \right) \right) \text{ con } \eta_0(\tau) = 1 \quad (19)$$

En la que

- $\mathbf{R}_d(\tau)$ es la función de autocorrelación asociada con los perfiles y puede ser calculada por medio de la transformada inversa de Fourier, IFT, partiendo de $\mathbf{S}_d(\omega)$;

35

- $\eta_m(\tau)$ con $m = 1, \dots, N_W$ es la IFT de la función de coherencia $\Gamma_m(\omega)$ calculada entre los perfiles d_i y d_j dispuestos a una distancia W_m ;

- α_n^m, β_n^m y $\chi_n^m \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ son los vectores operacionales.

5

Como consecuencia, la expresión de la matriz de DEP $S_q(\omega)$ de salida puede obtenerse por medio de la ec. (18) aplicando la transformada de Fourier

$$S_q(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\phi_n(\omega) \psi_n^T}{i\omega - \lambda_n} + \frac{\psi_n \phi_n^T(-\omega)}{-i\omega - \lambda_n} \quad (20)$$

10 En la que los términos $\phi_n(\omega) \in (\omega) \mathbb{C}^{N \times 1}$ son los vectores operacionales de referencia dependientes de la frecuencia y se definen como

$$\phi_n(\omega) = S_d(\omega) \left(\sum_{m=0}^{N_W} \Gamma_m(\omega) \left(\alpha_n^m + \sum_{l=1}^{N_L} \beta_n^m e^{+i\omega\tau_l} + \chi_n^m e^{-i\omega\tau_l} \right) \right) \text{ con } \Gamma_0(\omega) = 1 \quad (21)$$

15 Al agrupar los diversos términos, se puede reescribir la ec. (20) en una forma más general, como una relación entre funciones polinómicas

$$S_q(\omega) = \frac{S_d(\omega) \left(\sum_{m=0}^{N_W} \Gamma_m(\omega) \left(B^m(\omega) + \sum_{l=1}^{N_L} (C^m(\omega) e^{+i\omega\tau_l} + D^m(\omega) e^{-i\omega\tau_l}) \right) \right)}{A(\omega)} \text{ con } \Gamma_0(\omega) = 1 \quad (22)$$

En la que

20 - $B^m(\omega), C^m(\omega)$ y $D^m(\omega)$ representan matrices cuyos elementos genéricos $B_{ij}^m(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r b_{ijr}^m$,

$C_{ij}^m(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r c_{ijr}^m$ y $D_{ij}^m(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r d_{ijr}^m$ son polinomios del numerador de la DEP correspondiente, que tienen coeficientes b_{ijr}^m, c_{ijr}^m y d_{ijr}^m , respectivamente; aquí, se denomina a los polinomios $B_{ij}^m(\omega), C_{ij}^m(\omega)$ y $D_{ij}^m(\omega)$ polinomios de ajuste y resultan estar asociados con las entradas.

25 - $A(\omega) = \sum_{r=0}^{n_a} (i\omega)^r a_r$ es el polinomio del denominador, común a todas las DEP, que tiene coeficientes a_r ; representa el polinomio característico cuyas raíces son los polos del sistema;

- n_b y n_a indican el número de coeficientes de los polinomios del numerador y del denominador, respectivamente. Por lo tanto, es evidente que las ecuaciones (18) a (22) contienen una combinación de diversos términos en las mismas:

30

(i) $R_g(\tau)$ y $S_d(\omega)$ describen en los dominios de separación y frecuencial, respectivamente, el patrón de las propiedades estadísticas asociadas con los perfiles;

35 (ii) $h(\tau \pm \tau_l)$ y $e^{\pm i\omega\tau_l}$ permiten incluir los efectos de la correlación temporal que existen entre las entradas que actúan sobre las ruedas que tienen el perfil de rodadura en común pero están dispuestas en distintos ejes;

(iii) $\eta_m(\tau)$ y $\Gamma_m(\omega)$ modelan los efectos de la correlación espacial existente entre las entradas que actúan sobre las ruedas en movimiento sobre distintos perfiles.

Finalmente, dichas ecuaciones subyacen a un nuevo procedimiento para la identificación de vehículos en condiciones de trabajo. Partiendo de estas expresiones, es posible desarrollar procedimientos específicos que permiten la estimación de parámetros modales de sistemas de vehículo viario/ferroviario en condición de trabajo y la caracterización indirecta de propiedades estadísticas de los perfiles de superficie viaria/ferroviaria. En particular, se pueden utilizar las ecuaciones (18) a (19) para establecer los algoritmos de operación en el dominio de separación. Como alternativa, según una realización preferida de la invención, utilizando las ecuaciones (20), (21) y (22), es posible implementar técnicas de ajuste que son capaces de aprovechar las ventajas que se derivan del análisis del dominio frecuencial.

Procedimiento de identificación en el dominio frecuencial

El procedimiento de identificación, objeto de la presente invención, requiere que conozca la geometría del sistema de vehículo en número y dimensión de anchos de vía y de distancias entre ejes. Basta únicamente medir las señales de salida. Las herramientas de medición pueden referirse a diversas cantidades, por ejemplo desplazamiento, velocidades o aceleraciones requeridas en puntos asignados de medición de dicho vehículo. Aunque se sepa que, utilizando únicamente una herramienta de medición, es posible identificar todos los parámetros modales del sistema, para obtener una reconstrucción visual adecuada de las formas modales y, por lo tanto, una buena resolución espacial del mismo, se recomienda utilizar un número adecuado de sensores. Se puede realizar una configuración experimental adecuada colocando los sensores por encima y por debajo de cada suspensión. Para iniciar el proceso de estimación puede ser útil detectar la posición y la velocidad del vehículo en el tramo cubierto utilizando, por ejemplo, un sensor de GPS. Tal información puede permitir discriminar posibles zonas transitorias en las cuales no se respeta la condición de marcha constante. Una vez que se adquieren las señales, comienza la etapa de análisis de datos reales.

Aunque también se puede aplicar el procedimiento según la presente invención en el dominio de separación, adoptando un procedimiento que trabaja en el dominio frecuencial se obtienen al menos tres ventajas: (1) un esfuerzo de cálculo mínimo; (ii) diagramas más claros de estabilización y (iii) capacidad del procedimiento para tratar correctamente sistemas muy amortiguados como lo son, en general, los sistemas de vehículo.

El procedimiento de estimación según la presente realización de la invención se divide en dos etapas:

- etapa A: estimación de los polos y de vectores modales del sistema de vehículo;
 - etapa B: estimación de los vectores operacionales y de parámetros característicos de la carretera o la vía férrea.
- Se ha de decir que la etapa A, estimación de los polos y de vectores modales del vehículo, comprende las siguientes etapas:

A.1) estimación de una de más funciones de la matriz de DEP $S_q(\omega)$ de salida partiendo de las señales de salida medidas de acuerdo con el modelo polinómico expresado por medio de la ec. (25) representada a continuación;

A.2) estimación de los polos λ_n y vectores modales ψ_n determinando los autovalores y los autovectores de la matriz compañera asociada con el polinomio característico de la ec. (25).

La etapa B, estimación de vectores operacionales y parámetros característicos de la carretera o la vía férrea, comprende las siguientes etapas:

B.1) elección del modelo paramétrico que ha de ser utilizado para describir la DEP automática asociada con los perfiles viarios $S_q(\omega)$ y, cuando están presentes, las funciones de coherencia $\Gamma_m(\omega)$;

B.2) estimación de los vectores operacionales α_n^m, β_n^m y χ_n^m de los parámetros de la DEP automática asociados con los perfiles viarios $S_q(\omega)$ y, si se requiere, de los parámetros de las funciones de coherencia $F_m(\omega)$ de acuerdo con la descomposición en fracciones incompletas de una o más funciones de la matriz de DEP $S_q(\omega)$ de salida según las ecuaciones (26) a (34) representadas a continuación.

A continuación, se describe en detalle el procedimiento de identificación de los parámetros modales en etapas individuales y con referencia al uso de una función de base polinómica $\Omega(\omega)$. La función polinómica $\Omega(\omega)$

puede ser $\Omega_T(\omega) = (i\omega)^r$ para modelos en el dominio temporal continuo y $\Omega_T(\omega) = (e^{i\omega T_s})^r$ para los modelos en el dominio temporal discreto, en la que T_s indica el periodo de muestreo.

Etapa A: Estimación de los polos y vectores modales del sistema de vehículo

Durante la etapa A, según se ha descrito anteriormente, se determinan los polos λ_n y los vectores modales ψ_n de los sistemas de vehículo partiendo únicamente de las señales de salida. La etapa A comprende las siguientes dos etapas: A.1) estimación de una o más funciones de la matriz de DEP $S_q(\omega)$ de salida partiendo de señales de salida medidas de acuerdo con el modelo polinómico expresado por la siguiente ec. (25).

Los algoritmos mediante los cuales es posible determinar la DEP automática y cruzada de salida son estimadores paramétricos, dado que requieren la adopción de un modelo de ajuste de datos. En este contexto, los estimadores paramétricos pueden dividirse en dos tipos: (i) estimadores paramétricos en el sentido estricto de la palabra: si los datos de partida sobre los que trabaja el estimador paramétrico son las señales medidas; (ii) estimadores paramétricos mixtos: si los datos de partida sobre los que trabaja el estimador paramétrico son las estimaciones no paramétricas de DEP.

En particular, las estimaciones no paramétricas de DEP pueden obtenerse partiendo de la definición teórica de la DEP, por ejemplo según los teoremas de Parseval y de Wiener-Khinchin. Lo que normalmente diferencia tales estimadores es el dominio de los datos sobre los que trabajan y las ventanas utilizadas para reducir los errores de estimación, por ejemplo, la dispersión. Se deben mencionar el procedimiento del periodograma ponderado de Welch y el procedimiento del correlograma entre las técnicas más difundidas en el contexto de OMA.

En particular, en el procedimiento según la presente invención, se obtiene una simplificación del modelo polinómico de la ec. (22) describiendo el patrón de la DEP automática asociada con los perfiles S_d y el de las funciones de coherencia Γ_m por medio de un modelo polinómico que solo tiene ceros que, claramente, no introduce polos en la DEP de salida y, como consecuencia, no influye en la estimación de los polos de los sistemas y sus vectores modales.

De acuerdo con tal consideración es posible escribir:

$$S_d(\omega) = \sum_{r=0}^{n_s} \Omega_T(\omega) \sigma_r \quad (23)$$

$$\Gamma_d(\omega) = \sum_{r=0}^{n_g} \Omega_T(\omega) \gamma_r^m \quad (24)$$

en las que

- σ_r y n_s indican los coeficientes y el número de coeficientes del polinomio interpolador de la DEP automática asociada con los perfiles, respectivamente;

- γ_r y n_g indican los coeficientes y el número de coeficientes de los polinomios interpoladores de las funciones de coherencia, respectivamente.

De acuerdo con el modelo de ajuste presentado en la ec. (22) y aprovechando las ecuaciones (23) y (24), el nuevo modelo polinómico de la matriz de DEP $S_q(\omega)$ de salida se convierte en

$$S_q(\omega) = \frac{\bar{B}(\omega) + \sum_{l=1}^{N_L} (\bar{C}^l(\omega) e^{+i\omega\tau_l} + \bar{D}^l(\omega) e^{-i\omega\tau_l})}{A(\omega)} \quad (25)$$

En la que

- $\bar{B}(\omega), \bar{C}'(\omega)$ y $\bar{D}'(\omega)$ representan matrices cuyos elementos genéricos $\bar{B}_{ij}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} \Omega_r(\omega) \bar{b}_{ijr}$,

$\bar{C}'_{ij}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} \Omega_r(\omega) \bar{c}'_{ijr}$ y $\bar{D}'_{ij}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} \Omega_r(\omega) \bar{d}'_{ijr}$ son los polinomios del numerador de la DEP

correspondiente, que tienen coeficientes $\bar{b}_{ijr}, \bar{c}'_{ijr}$ y $\bar{d}'_{ijr}$, respectivamente. Se debe subrayar que, debido al procedimiento de estimación escogido, los coeficientes $\bar{b}_{ijr}, \bar{c}'_{ijr}$ y $\bar{d}'_{ijr}$ comprenden la información relativa a la coloración de las entradas y a la correlación espacial entre las mismas.

- $A(\omega) = \sum_{r=0}^{n_a} (i\omega)^r a_r$ es el polinomio del denominador, común a todas las DEP, que tiene coeficientes a_r .

La determinación de los valores desconocidos de la ec. (25) necesita que se resuelva un problema de estimación. Se puede presentar tal problema de forma que resulte ser lineal o no lineal en los parámetros. Según el caso, se pueden calcular los valores desconocidos por medio de técnicas conocidas en la bibliografía, por ejemplo, reduciendo al mínimo el error cuadrático (planteamiento de mínimos cuadrados) o maximizando la función de probabilidad (planteamiento de máxima probabilidad) y, utilizando, cuando sea posible, procedimientos de solución directa (por ejemplo, basados en la inversión de una matriz de regresión conocida) o procedimientos iterativos (por ejemplo, basados en los algoritmos de resolución de Newton-Raphson o de Levenberg-Marquardt).

A.2) estimación de polos λ_n y vectores modales ψ_n determinando los valores propios y los vectores propios de la matriz compañera asociada con el polinomio característico de la ec. (25).

Una vez que se estiman los coeficientes de los polinomios del numerador y del denominador de la ec. (25) es posible convertir el modelo polinómico en una representación estándar en el espacio de la variable de estado, construyendo la matriz compañera del polinomio característico $A(\omega)$. Con independencia de la representación utilizada, dicha matriz se corresponde con la matriz de estado, cuyos valores propios, por definición, son los polos del sistema λ_n . En cambio, los vectores propios asociados con tal matriz pueden asumir diversos significados físicos según la forma estándar utilizada. Por lo tanto, se debe escoger la representación en el espacio de la variable de estado de forma que los vectores modales ψ_n se correspondan con tales vectores propios.

Etapas B: Estimación de los vectores operacionales y parámetros característicos de la carretera o la vía férrea

Durante la etapa B, según se ha descrito anteriormente, se obtienen los vectores operacionales y los parámetros característicos de la carretera o la vía férrea. La etapa B comprende las siguientes etapas: B.1) descripción de la DEP automática asociada con los perfiles $S_q(\omega)$ y, si están presentes, de las funciones de coherencia $\Gamma_m(\omega)$, por medio de un modelo paramétrico escogido de forma adecuada.

Con tal fin, se pueden utilizar los modelos polinómicos únicamente con ceros presentados en las ecuaciones (23) y (24); en cualquier caso, su uso implica la presencia de un número elevado de parámetros desconocidos que han de ser estimados. En cambio, los modelos propuestos en el estado de la técnica de la presente descripción ofrecen la ventaja de que son caracterizados por un número mucho menor de parámetros y resultan corresponder bien a los patrones típicos observados en las mediciones experimentales. Para llevar a cabo tal simplificación, a modo de ejemplo, se consideran los modelos propuestos por Sussman (ec. (10)) y Bogsjö (ec. (13)) en el dominio temporal y frecuencial ω .

B.2) Estimación de los vectores operacionales α_n^m, β_n^m y χ_n^m de los parámetros de la DEP automática asociada con los perfiles $S_q(\omega)$ y, si se requiere, de los parámetros de las funciones de coherencia $\Gamma_m(\omega)$, de acuerdo con la descomposición en fracciones incompletas de una o más funciones de la matriz de DEP $S_q(\omega)$ de salida, según las siguientes ecuaciones (26) a (34).

Partiendo de la descomposición en fracciones incompletas de la matriz de DEP $S_q(\omega)$ de salida (Ec. (20)) se puede expresar la DEP automática genérica $S_{q_i}(\omega)$ como:

$$S_{q_i}(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\varphi_{in}(\omega) \psi_{in}}{\mathcal{Q}_1(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} \varphi_{in}(-\omega)}{\mathcal{Q}_1(-\omega) - \lambda_n} \quad (26)$$

En la que los componentes i-ésimos de los vectores operacionales dependientes de la frecuencia $\varphi_{in}(\omega)$ están dados por:

$$\varphi_{in}(\omega) = S_d(\omega) \sum_{m=0}^{N_W} \Gamma_m(\omega) \left(\alpha_{in}^m + \sum_{l=1}^{N_L} \left(\beta_{in}^m e^{+i\omega\tau_l} + \chi_{in}^m e^{-i\omega\tau_l} \right) \right) \text{ con } \Gamma_0(\omega) = 1 \quad (27)$$

Utilizando los modelos propuestos por Sussman (ec. (10)) y Bogsjö (ec. (13)) en el dominio temporal y frecuencial ω , se puede reescribir la ec. (27) como:

$$\varphi_{in}(\omega) = \frac{C}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{m=0}^{N_W} e^{-\frac{\mu_m W_m |\omega|}{v}} \left(\alpha_{in}^m + \sum_{l=1}^{N_L} \left(\beta_{in}^m e^{+i\omega\tau_l} + \chi_{in}^m e^{-i\omega\tau_l} \right) \right) \text{ con } \mu_0 W_0 = 0 \quad (28)$$

Como consecuencia la ec. (26) se convierte en:

$$S_{q_i}(\omega) = \frac{C}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{n=1}^{2N} \left(\sum_{m=0}^{N_W} e^{-\frac{\mu_m W_m |\omega|}{v}} \left(T_{in}(\omega) \alpha_{in}^m + \sum_{l=1}^{N_L} \left(U_{in}^l(\omega) \beta_{in}^m + V_{in}^l(\omega) \chi_{in}^m \right) \right) \right) \text{ con } \mu_0 W_0 = 0 \quad (29)$$

en la que

$$T_{in}(\omega) = \frac{\psi_{in}}{\mathcal{Q}_1(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in}}{\mathcal{Q}_1(-\omega) - \lambda_n} \quad (30)$$

$$U_{in}^l(\omega) = \frac{\psi_{in} e^{+i\omega\tau_l}}{\mathcal{Q}_1(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} e^{-i\omega\tau_l}}{\mathcal{Q}_1(-\omega) - \lambda_n} \quad (31)$$

$$V_{in}^l(\omega) = \frac{\psi_{in} e^{-i\omega\tau_l}}{\mathcal{Q}_1(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} e^{+i\omega\tau_l}}{\mathcal{Q}_1(-\omega) - \lambda_n} \quad (32)$$

En particular, los valores desconocidos en la ec. (29) son:

- los componentes i-ésimos de los vectores operacionales $\alpha_{in}^m, \beta_{in}^m$ y χ_{in}^m con $m = 0, \dots, N_W, l = 1, \dots, N_L, n = 1, \dots, 2N$;

- los parámetros C y ω_0 de la DEP automática asociada con los perfiles $S_d(\omega)$;

- los parámetros μ_m con $m=1, \dots, N_W$ de las funciones de coherencia $\Gamma_m(\omega)$.

La determinación de los valores desconocidos de la ec. (29) necesita la solución del problema de la estimación no lineal en parámetros.

En particular, los parámetros necesarios para la caracterización de la superficie de rodadura pueden inicializarse utilizando datos procedentes de mediciones experimentales o valores conocidos en la bibliografía.

Es posible identificar tres casos en los que no se requiere la estimación de parámetros de las funciones de coherencia $\Gamma_m(\omega)$:

caso 1: si un vehículo se encuentra en movimiento sobre un único perfil, por ejemplo una motocicleta, los $\Gamma_m(\omega)$ no están presentes;

caso 2: si un vehículo se encuentra en movimiento sobre perfiles perfectamente coincidentes, se conocen las funciones de coherencia y todas asumen un valor igual a 1;

caso 3: si un vehículo se encuentra en movimiento sobre perfiles completamente distintos, se conocen las funciones de coherencia y todas asumen un valor igual a 0.

En los tres casos, la determinación de los valores desconocidos puede obtenerse utilizando la siguiente relación, deducida a partir de la ec. (29):

$$S_{q_i}(\omega) = \frac{C}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{n=1}^{2N} \left(T_{in}(\omega) \alpha_{in} + \sum_{l=1}^{N_L} (U_{in}^l(\omega) \beta_{in}^l + V_{in}^l(\omega) \chi_{in}^l) \right) \quad (33)$$

En particular, los valores desconocidos de la ec. (33) son:

- los componentes i-ésimos de los vectores operacionales $\alpha_{in}, \beta_{in}^l$ y χ_{in}^l con $l = 1, \dots, N_L, n = 1, \dots, 2N$

- los parámetros C y ω_0 de la DEP automática asociada con los perfiles $S_d(\omega)$.

A diferencia de la ec. (29), la determinación de los valores desconocidos de la ec. (33) puede llevarse a cabo solucionando un problema de estimación lineal en parámetros.

La estimación de los componentes restantes de los vectores operacionales α_n, β_n^l y χ_n^l en el caso en el que no se requieren las funciones de coherencia, α_n^m, β_n^m o χ_n^m , y en el caso contrario, pueden obtenerse siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, en la presente sección, y considerando la descomposición en fracciones parciales de la DEP cruzada genérica $S_{q,q_i}(\omega)$ de salida

$$S_{q,q_i}(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\phi_{in}(\omega) \psi_{jn}}{\Omega_1(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} \phi_{jn}(-\omega)}{\Omega_1(-\omega) - \lambda_n} \quad (34)$$

En tal caso, los únicos valores desconocidos que han de ser estimados en la ec. (34) serán los componentes i-ésimos de los vectores operacionales $\alpha_{jn}, \beta_{jn}^l$ y χ_{jn}^l con $l = 1, \dots, N_L, n = 1, \dots, 2N$, o $\alpha_{jn}^m, \beta_{jn}^m$ y χ_{jn}^m con $m=0, \dots, N_w, l=1, \dots, N_L$ y $n = 1, \dots, 2N$.

Ejemplo numérico

Para demostrar el rendimiento del procedimiento de identificación, objeto de la presente invención, a continuación se describe un ejemplo numérico de identificación de un sistema de vehículo, con parámetros concentrados, con 7 grados de libertad (DOF, por sus siglas en inglés), representado en la fig. (2). Se simuló en un campo informático adecuado el movimiento de un vehículo con características geométricas y parámetros modales conocidos sobre una superficie que respeta la hipótesis del procedimiento según la presente invención. El modelo utilizado permite describir los modos de cuerpos rígidos de la masa suspendida (el chasis), es decir, levantamiento, cabeceo y balanceo, y los modos de cuerpos rígidos de las masas no suspendidas (las ruedas), es decir movimientos verticales oscilantes y de balanceo de los ejes delantero y trasero. En la siguiente tabla se documentan las frecuencias naturales $f_n = \omega_n / 2\pi$ (Hz) y los factores de amortiguación ζ_n %:

Modo	f_n (Hz)	ζ_n %	Descripción
1	1,064	27,954	<i>Levantamiento</i>
2	1,221	32,189	<i>Balanceo</i>
3	1,295	34,295	<i>Cabeceo</i>
4	8,044	26,031	<i>Salto del eje trasero</i>
5	8,129	27,794	<i>Balanceo del eje delantero</i>
6	8,134	28,372	<i>Salto del eje delantero</i>
7	8,207	25,354	<i>Balanceo del eje trasero</i>

El vehículo tiene una geometría conocida, con un único ancho de vía $W_1 = 1,49$ m y una única distancia entre ejes $L_1 = 2,66$ m, y se supone que se encuentra en movimiento a una velocidad constante $V = 60$ km/h sobre una superficie homogénea y gaussiana (véanse las hipótesis 3 a 6).

5 Los modos de cuerpos rígidos han sido captados utilizando una disposición de sensores de desplazamiento virtual, dispuestos en las direcciones verticales en los 3 ángulos de la masa suspendida (Z_{s_1}, Z_{s_2} y Z_{s_3}) y en cada una de las 4 masas no suspendidas ($Z_{u_1}, Z_{u_2}, Z_{u_3}$ y Z_{u_4}): las series temporales de datos relativas a estos siete sensores de desplazamiento son los únicos datos utilizados como entrada para el procedimiento de identificación. Los mismos datos, como se describe a continuación, han sido analizados con una técnica de OMA tradicional (LSCF) y con el procedimiento según la presente invención.

En este ejemplo, para describir las entradas producidas por la interacción entre las ruedas y los perfiles de rodadura, por medio de la ec. (16), se necesitan;

15 - una única función de coherencia $\Gamma_1(\omega)$, calculada entre los perfiles d_1 y d_2 , sobre los que se desplazan las ruedas de los lados derecho e izquierdo, respectivamente;

- un único retraso $\tau_1 = 0,16$ s.

20 Tales entradas son simuladas utilizando como modelos paramétricos los propuestos por Sussman (ec. (10)) para la DEP automática asociada con los perfiles $S_g(\omega)$, y por Bogsjö (ec. (13)) para la función de coherencia $\Gamma_1(\omega)$. En la siguiente tabla se recogen los parámetros utilizados:

Modelo de Sussman		Modelo de Bogsjö
C (m ² rad/s)	ω_0 (rad/s)	μ_1
0,122	1,96	3,80

25 Finalmente, se calculan las señales de salida en términos de DEP automática y cruzada mediante la relación de entrada-salida de la ec. (17).

30 Para subrayar los problemas que se derivan del uso de los algoritmos normales de OMA clásico, es decir basados en las hipótesis de NExT (ecuaciones (5), (6) y (7)), se procesan las mismas señales de salida por medio del estimador de LSCF y se comparan los resultados respectivos con los obtenidos utilizando el algoritmo, objeto de la presente invención.

35 En la prueba modal, a menudo se utiliza el análisis de estabilización para ayudar al analista en la elección de los polos físicos del sistema. De hecho, la presencia de polos espurios puede influir en el proceso de estimación con mayor o menor intensidad. Su presencia puede ser atribuida a diversas causas, por ejemplo al ruido en los datos, a errores de modelado y a problemas de cálculo. En cambio, los polos físicos tienden a estabilizarse cuando la estimación se lleva a cabo con diversos órdenes polinómicos.

40 Una herramienta gráfica, denominada diagrama de estabilización, permite visualizar los parámetros modales estimados con órdenes crecientes del polinomio. Las frecuencias naturales son representadas en el eje de las abscisas mientras que se documentan los diversos órdenes en el eje de ordenadas. El analista establece los umbrales de tolerancia que definen la estabilización en la frecuencia natural, en el factor de amortiguación y en el valor del criterio de garantía modal (MAC). Las diversas situaciones se representan con distintos símbolos: la o indica la estabilización fallida de la frecuencia natural, la f representa la estabilización de la frecuencia natural, la d y la V representan la estabilización adicional en el factor de amortiguación y el vector modal, la s hace referencia a las soluciones completamente estabilizadas.

45 En las figuras (3.a) y (3.b) se documentan los diagramas de estabilización, obtenidos utilizando el procedimiento propuesto de identificación (ec. (25)) y el algoritmo de LSCF, respectivamente. La curva en el segundo plano hace referencia a la DEP automática calculada partiendo de los desplazamientos detectados por el sensor dispuesto en la parte derecha delantera de la masa suspendida (Z_{s_1} en la fig. (2)). Se debe hacer notar cómo las soluciones producidas por el algoritmo de LSCF tienden a no estabilizarse ni siquiera ante órdenes polinómicos altos, produciendo, por lo tanto, también una cantidad notable de polos/modos espurios. En cambio, el procedimiento propuesto de identificación, proporciona un diagrama muy claro de estabilización, en el que aparecen claramente las columnas de soluciones completamente estabilizadas y correspondientes a los 7 polos/modos físicos del sistema.

En la siguiente tabla se proporcionan las frecuencias naturales f_n (Hz), obteniéndose los factores de amortiguación $\zeta_n\%$ utilizando un orden polinómico igual a 40:

Modo	f_n (Hz)	$\zeta_n\%$
1	1,064	27,862
2	1,222	32,189
3	1,294	34,319
4	8,044	26,031
5	8,129	27,794
6	8,134	28,368
7	8,207	25,354

- 5 A partir del análisis de las tablas presentadas anteriormente, se puede hacer notar cómo coinciden perfectamente las estimaciones proporcionadas por el procedimiento propuesto de identificación con los valores exactos tanto en términos de frecuencias naturales como de factores de amortiguación.

- 10 En este contexto, se puede utilizar MAC para comparar los vectores modales (ψ_n) estimados con los exactos. En particular, tal matriz permite cuantificar la semejanza entre vectores modales de conjuntos de diversos modos, variando desde 1, correlación total, hasta 0, ortogonalidad exacta. Por lo tanto, la solución ideal es aquella en la que el MAC coincide con el denominado MAC automático obtenido comparando entre ellos vectores modales que pertenecen al mismo conjunto de modos. A continuación, se documenta la matriz de MAC automático referida a los vectores modales exactos del sistema de vehículo de la fig. (2):

15

		Vectores modales exactos						
		1	2	3	4	5	6	7
Vectores modales exactos	1	1,000	0,011	0,019	0,001	0,000	0,021	0,000
	2	0,011	1,000	0,291	0,003	0,024	0,000	0,007
	3	0,019	0,291	1,000	0,032	0,002	0,003	0,001
	4	0,001	0,003	0,032	1,000	0,000	0,030	0,000
	5	0,000	0,024	0,002	0,000	1,000	0,000	0,365
	6	0,021	0,000	0,003	0,030	0,000	1,000	0,000
	7	0,000	0,007	0,001	0,000	0,365	0,000	1,000

Mientras que el MAC calculado entre los vectores modales estimados y exactos es:

		Vectores modales estimados						
		1	2	3	4	5	6	7
Vectores modales exactos	1	1,000	0,011	0,018	0,001	0,000	0,021	0,000
	2	0,011	1,000	0,291	0,003	0,024	0,000	0,007
	3	0,019	0,291	1,000	0,032	0,002	0,003	0,001
	4	0,001	0,003	0,032	1,000	0,000	0,030	0,000
	5	0,000	0,024	0,002	0,000	1,000	0,000	0,365
	6	0,021	0,000	0,003	0,027	0,000	0,999	0,000
	7	0,000	0,007	0,001	0,000	0,365	0,000	1,000

- 20 El MAC obtenido por medio del procedimiento propuesto de identificación está muy cercano a la situación ideal, mostrando, por lo tanto, la exactitud de los vectores modales estimados.

- Para completar la estimación de los parámetros modales se necesita determinar ahora los vectores operacionales (α_n^m, β_n^m y χ_n^m). Con tal objetivo, por medio de las ecuaciones (26) a (33) se deben calcular en primer lugar los coeficientes asociados con los modelos paramétricos de la DEP automática asociada con los perfiles $S_d(\omega)$ y de la función de coherencia $\Gamma_1(\omega)$. Los resultados, documentados en la siguiente tabla, muestran una correspondencia óptima con los valores exactos, utilizados para modelar las entradas producidas por la interacción de las ruedas con los perfiles de rodadura:

25

Modelo de Sussman		Modelo de Bogsjö
C (m ² rad/s)	ω_0 (rad/s)	μ_1
0,119	1,96	3,64

En este punto, es posible determinar todos los componentes de los vectores operacionales, haciendo referencia cada vez a una DEP automática y cruzada de salida y utilizando las ecuaciones (26) o (34). De nuevo, se puede utilizar el MAC para comparar los vectores operacionales estimados con los exactos. En aras de la brevedad, la matriz del MAC automático, documentada a continuación, hace referencia a un subconjunto de los vectores operacionales exactos del sistema de vehículo de la fig. (2):

		Vectores op. ex.						
		1	2	3	4	5	6	7
Vectores op. ex.	1	1,000	0,002	0,009	0,028	0,000	0,491	0,000
	2	0,002	1,000	0,046	0,001	0,502	0,000	0,140
	3	0,009	0,046	1,000	0,664	0,001	0,059	0,000
	4	0,028	0,001	0,664	1,000	0,000	0,030	0,000
	5	0,000	0,502	0,001	0,000	1,000	0,000	0,366
	6	0,491	0,000	0,059	0,030	0,000	1,000	0,000
	7	0,000	0,140	0,000	0,000	0,366	0,000	1,000

Mientras que el MAC calculado entre los valores operacionales estimados y los exactos es:

		Vectores op. estimados						
		1	2	3	4	5	6	7
Vectores op. ex.	1	1,000	0,002	0,009	0,031	0,000	0,499	0,000
	2	0,002	1,000	0,046	0,001	0,536	0,000	0,149
	3	0,009	0,048	1,000	0,680	0,001	0,064	0,000
	4	0,030	0,001	0,683	1,000	0,000	0,032	0,000
	5	0,000	0,530	0,001	0,000	1,000	0,000	0,393
	6	0,520	0,000	0,062	0,032	0,000	0,991	0,000
	7	0,002	0,146	0,110	0,010	0,372	0,000	1,000

De nuevo, el MAC obtenido a partir del procedimiento propuesto de identificación es muy cercano a la situación ideal, mostrando, por lo tanto, la exactitud de los vectores operacionales estimados.

Una vez estimados todos los parámetros modales operacionales y los coeficientes asociados con los modelos paramétricos de la DEP automática asociada con los perfiles $S_y(\omega)$ y de la función de coherencia $\Gamma_1(\omega)$, es posible sintetizar la DEP automática y cruzada de salida y llevar a cabo una comparación con las estimaciones no paramétricas de la misma. Esta última etapa es muy interesante debido a que ofrece al analista la posibilidad de validar los resultados obtenidos. En la fig. (4) se muestra un ejemplo de tal comparación, en la que se documenta la DEP automática, calculada partiendo de los desplazamientos detectados por el sensor dispuesto en la masa no suspendida delantera derecha (Z_{u_1} en la fig. (2)). La superposición perfecta entre las dos curvas confirma adicionalmente la idoneidad de los resultados obtenidos a partir del procedimiento propuesto de identificación.

Acrónimos

FRF: Función de respuesta de frecuencia

IFT: Transformada inversa de Fourier

LSCF: Frecuencia compleja de mínimos cuadrados

MAC: Criterio de garantía modal

NExT: Técnica de excitación natural

OMA: Análisis modal operacional

DEP: Densidad espectral de potencia

Lista de símbolos

α_n^m, β_n^m y $\chi_n^m \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ = vectores operacionales

$\beta_{ij}(v)$ = diferencia entre las fases asociadas con espectros de los dos perfiles $d_i(x)$ y $d_j(x)$.

5 γ_r = coeficientes de los polinomios interpoladores de la función de coherencia.

$\Gamma_{ij}(v)$ = función de coherencia

λ_n = polos del sistema

10

$\bar{\phi}_n(\tau) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ = vectores operacionales de referencia dependientes del retraso

$\phi_n \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ = vectores operacionales de referencia

15 ϕ_{in} y ϕ_{jn} componentes del vector operacional ϕ_n

$\psi_n \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ = vectores modales del sistema

ψ_{in}, ψ_{jn} = componentes del vector modal ψ_n

20

v_0 = frecuencia espacial de referencia

$\tau_l = L_l/v$ = retraso

25 $\eta_{lm+1}(\tau)$ = IFT de la función de coherencia $\Gamma_{lm+1}(\omega)$ calculada entre los perfiles d_l y d_{m+1} ;

σ_r = coeficientes del polinomio interpolador de la DEP automática asociada con los perfiles;

$\Omega_r(\omega)$ = función polinómica

30

$A(\omega) = \sum_{r=0}^{n_a} (i\omega)^r a_r$ = polinomio del denominador común a todas las DEP

$B(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ = matriz de los polinomios del numerador asociados con la DEP genérica

35 $d_i(x), d_j(x)$ = perfiles paralelos a lo largo de la superficie viaria definidos en función de la abscisa x

$H_{fr}(\omega) \in \mathbb{C}^{N_i \times N_i}$ = matriz de las funciones de respuesta en frecuencia de las ruedas

L_l = distancia entre ejes

40

n_g = número de coeficientes de los polinomios interpoladores de las funciones de coherencia

n_s = número de los coeficientes del polinomio interpolador de la DEP automática asociada con los perfiles;

45 N_t = número de ruedas

q_i, q_j = Salida

$R_q(\tau)$ = función de la autocorrelación asociada con los perfiles

$R_q(\tau) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ = matriz de correlación de salida;

5 $R_{q,q_j}(\tau)$ = función de correlación de salida

S_d = DEP referida a la superficie viaria o ferroviaria

$S_{d_i}(\nu), S_{d_j}(\nu)$ = DEP automática asociada con los perfiles $d_i(x)$ y $d_j(x)$, respectivamente;

10 $S_{d_i d_j}(\nu)$ = DEP cruzada calculada entre los perfiles $d_i(x)$ y $d_j(x)$

S_f = matriz de DEP de entrada

15 $S_q(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ = matriz de DEP de salida;

$S_{q,q_j}(\omega)$ = Densidad espectral de potencia cruzada

$S_r(\omega)$ = matriz de DEP referida a los desplazamientos inducidos por la superficie

20 T_s = periodo de muestreo

V = velocidad de avance del vehículo

25 W = distancia entre dos perfiles paralelos $d_i(x)$, $d_j(x)$

W_m = ancho de vía

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento aplicado a un sistema de vehículo, comprendiendo el sistema de vehículo un vehículo viario o ferroviario dotado de al menos dos ruedas y que tiene una geometría descrita por N_W anchos de vía W_m , siendo m un número entero positivo que va desde 1 hasta N_W y N_L distancias entre ejes L_l , siendo l un número entero positivo que va desde 1 hasta N_L , siendo N_W y N_L números enteros positivos predefinidos, siendo conducido el vehículo a una velocidad constante V sobre perfiles viarios o ferroviarios, estando adaptado el procedimiento para la estimación de polos (λ_n), vectores modales (ψ_n) y vectores operacionales ($\alpha_n^m, \beta_n^m, \chi_n^m$) por medio de un análisis de los desplazamientos o de las velocidades o de las aceleraciones (salidas del sistema) adquiridos en puntos asignados de medición de dicho vehículo,

en el que las cargas, denominadas "entradas", ejercidas por la superficie viaria o ferroviaria sobre dicho vehículo, tienen amplitudes que disminuyen con la frecuencia temporal y en el que dichas entradas se correlacionan entre sí en tiempo y/o espacio,

caracterizado porque el procedimiento comprende las etapas de:

- Calcular la matriz ($S_q(\omega)$) de las densidades espectrales de potencia DEP en el dominio frecuencial ω de mediciones adquiridas de desplazamientos y/o velocidades y/o aceleraciones procedentes de sensores correspondientes en puntos asignados de medición de dicho vehículo viario o ferroviario, como:

$$S_q(\omega) = \sum_{n=1}^{2N} \frac{\varphi_n(\omega) \psi_n^T}{i\omega - \lambda_n} + \frac{\psi_n \varphi_n^T(-\omega)}{-i\omega - \lambda_n}$$

En la que ψ_n^T es la transposición del vector modal ψ_n , siendo los términos $\varphi_n(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ vectores operacionales de referencia dependientes de la frecuencia y se definen como:

$$\varphi_n(\omega) = S_d(\omega) \left(\sum_{m=0}^{N_W} \Gamma_m(\omega) \left(\alpha_n^m + \sum_{l=1}^{N_L} \beta_n^m e^{+i\omega\tau_l} + \chi_n^m e^{-i\omega\tau_l} \right) \right) \text{ con } \Gamma_0(\omega) = 1$$

En la que $S_d(\omega)$ es la DEP automática asociada con los perfiles viarios o ferroviarios, siendo φ_n^T la transposición de φ_n , que, a su vez, es reescrita como una relación entre funciones polinómicas:

$$S_q(\omega) = \frac{S_d(\omega) \left(\sum_{m=0}^{N_W} \Gamma_m(\omega) \left(B^m(\omega) + \sum_{l=1}^{N_L} (C^m(\omega) e^{+i\omega\tau_l} + D^m(\omega) e^{-i\omega\tau_l}) \right) \right)}{A(\omega)} \text{ con } \Gamma_0(\omega) = 1$$

En la que:

- $B^m(\omega), C^m(\omega)$ y $D^m(\omega)$ son matrices cuyos elementos genéricos $B_{ij}^m(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r b_{ijr}^m$,

$C_{ij}^m(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r c_{ijr}^m$ y $D_{ij}^m(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} (i\omega)^r d_{ijr}^m$ son polinomios con coeficientes b_{ijr}^m, c_{ijr}^m y d_{ijr}^m ,

respectivamente; siendo denominados aquí los polinomios $B_{ij}^m(\omega), C_{ij}^m(\omega)$ y $D_{ij}^m(\omega)$ "polinomios de ajuste";

- $A(\omega) = \sum_{r=0}^{n_a} (i\omega)^r a_r$ también es un polinomio de ajuste con coeficientes a_r , y cuyas raíces son los polos del sistema;

- n_b y n_a son el número de coeficientes de polinomios del numerador y del denominador, respectivamente;

- $\Gamma_m(\omega)$ es una función de coherencia para el ancho de vía W_m según se define por medio de dos perfiles paralelos $d_i(x)$ y $d_j(x)$ de dichos perfiles viarios o ferroviarios que son funciones de la abscisa espacial x , y dada por la siguiente fórmula con la sustitución $v = \omega/V$;

$$\Gamma_m(v) = \frac{|S_{d_i d_j}(v)|}{\sqrt{S_{d_i}(v) S_{d_j}(v)}}$$

5 En la que $S_{d_i}(v)$ y $S_{d_j}(v)$ son, respectivamente, las DEP automáticas asociadas con los perfiles paralelos $d_i(x)$ y $d_j(x)$, mientras que $S_{d_i d_j}(v)$ es la DEP cruzada calculada entre los perfiles paralelos $d_i(x)$ y $d_j(x)$;

- $S_q(\omega) = S_q(v = \omega/V)/V$; y

10 - N es el número de grados de libertad y $\tau_l = L_l/V$;

Calculándose los polinomios de ajuste $A(\omega)$, $B_{ij}^m(\omega)$, $C_{ij}^m(\omega)$ y $D_{ij}^m(\omega)$ ajustándolos a los valores de dichas salidas y obteniendo polinomios ajustados correspondientes, y calculándose los polos (λ_n), vectores modales (ψ_n) y vectores operacionales ($\alpha_n^m, \beta_n^m, \chi_n^m$) a partir de los polinomios ajustados.

2. Un procedimiento según la reivindicación 1, que comprende, además, las etapas de:

- definir un modelo polinómico descriptivo de la matriz de DEP ($S_q(\omega)$) de salida, comprendiendo dicho modelo polinómico términos exponenciales complejos que incluyen los efectos sobre dichas salidas del sistema de la correlación temporal que existe entre las entradas aplicadas a las ruedas de las al menos dos ruedas, que tienen un perfil viario o ferroviario en común y están dispuestos en distintos ejes del vehículo viario o ferroviario;

- llevar a cabo un procedimiento de ajuste para determinar los coeficientes de dicho modelo polinómico partiendo de dichas salidas del sistema;

- determinar dichos polos λ_n y vectores modales ψ_n determinando valores propios y vectores propios de la matriz compañera asociada con el polinomio característico con respecto a dicho modelo polinómico.

3. Un procedimiento según la reivindicación 2, en el que:

$$S_q(\omega) = \frac{\bar{B}(\omega) + \sum_{l=1}^{N_L} (\bar{C}^l(\omega) e^{+i\omega\tau_l} + \bar{D}^l(\omega) e^{-i\omega\tau_l})}{A(\omega)}$$

En la que:

- $\bar{B}(\omega)$, $\bar{C}^l(\omega)$ y $\bar{D}^l(\omega) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ son matrices cuyos elementos genéricos $\bar{B}_{ij}(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} \Omega_r(\omega) \bar{b}_{ijr}$,

$\bar{C}_{ij}^l(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} \Omega_r(\omega) \bar{c}_{ijr}^l$ y $\bar{D}_{ij}^l(\omega) = \sum_{r=0}^{n_b} \Omega_r(\omega) \bar{d}_{ijr}^l$ son los polinomios del numerador de la DEP correspondiente, que tienen coeficientes $\bar{b}_{ijr}$, $\bar{c}_{ijr}^l$ y $\bar{d}_{ijr}^l$, respectivamente; y

- $\Omega_r(\omega)$ es una función polinómica.

4. Un procedimiento según cualquier reivindicación 1 a 3, en el que:

- la DEP automática asociada con los perfiles viarios o ferroviarios ($S_q(\omega)$) es expresada por medio de un modelo paramétrico con coeficientes, y

5 - los coeficientes de dicho modelo paramétrico de la DEP automática asociada con dichos perfiles viarios o ferroviarios ($S_q(\omega)$) son estimados.

5. Un procedimiento según la reivindicación 4, que comprende, además, la descripción de dichas funciones de coherencia ($\Gamma_m(\omega)$), por medio de un modelo paramétrico y la estimación de coeficientes de dicho modelo paramétrico de las funciones de coherencia ($\Gamma_m(\omega)$).

10 6. Un procedimiento según la reivindicación 5, en el que el componente i-ésimo de la matriz ($S_q(\omega)$) de las densidades espectrales de potencia DEP está dado por:

$$S_{q_i}(\omega) = \frac{C}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{n=1}^{2N} \left(\sum_{m=0}^{N_W} e^{-\frac{\mu_m W_m |\omega|}{v}} \left(T_{in}(\omega) \alpha_{in}^m + \sum_{l=1}^{N_L} (U_{in}^l(\omega) \beta_{in}^m + V_{in}^l(\omega) \chi_{in}^m) \right) \right)$$

15 En la que μ_m es un conjunto de parámetros que define la función de coherencia con el modelo de ajuste de Bogsjö, $\mu_0 W_0 = 0$, y:

20 - α_{in}^m , β_{in}^m y χ_{in}^m con $m=0, \dots, N_W$, $l=1, \dots, N_L$, $n = 1, \dots, 2N$ son los componentes i-ésimos de los vectores operacionales;

- C (m²rad/s) y ω_0 (rad/s) son valores desconocidos que han de ser determinados de la DEP automática asociada con los perfiles $S_q(\omega)$; y

25 - $T_{in}(\omega)$, $U_{in}^l(\omega)$, $V_{in}^l(\omega)$ son dados por:

$$\begin{aligned} T_{in}(\omega) &= \frac{\psi_{in}}{\Omega_r(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in}}{\Omega_r(-\omega) - \lambda_n} \\ U_{in}^l(\omega) &= \frac{\psi_{in} e^{+i\omega\tau_l}}{\Omega_r(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} e^{-i\omega\tau_l}}{\Omega_r(-\omega) - \lambda_n} \\ V_{in}^l(\omega) &= \frac{\psi_{in} e^{-i\omega\tau_l}}{\Omega_r(\omega) - \lambda_n} + \frac{\psi_{in} e^{+i\omega\tau_l}}{\Omega_r(-\omega) - \lambda_n} \end{aligned}$$

30 En las que $\Omega_r(\omega)$ es la función polinómica con $r=1$, y ψ_{in} son los componentes i-ésimos de vectores modales (ψ_n).

7. Un procedimiento según la reivindicación 6, en el que el componente i-ésimo de la matriz ($S_q(\omega)$) de las densidades espectrales de potencia DEP está dado por:

$$S_{q_i}(\omega) = \frac{C}{\omega^2 + \omega_0^2} \sum_{n=1}^{2N} \left(T_{in}(\omega) \alpha_{in} + \sum_{l=1}^{N_L} (U_{in}^l(\omega) \beta_{in}^l + V_{in}^l(\omega) \chi_{in}^l) \right)$$

35 En la que α_{in} , β_{in}^l y χ_{in}^l con $l=1, \dots, N_L$, $n = 1, \dots, 2N$ son los componentes i-ésimos de los vectores operacionales.

8. Un programa para dispositivos programables que contiene instrucciones que, cuando son llevadas a cabo, realizan el procedimiento para la estimación de polos (λ_n), vectores modales (ψ_n) y vectores operacionales (α_n^m , β_n^m , χ_n^m) de un vehículo viario o ferroviario, según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes.
- 5 9. Un sistema de vehículo viario o ferroviario, que comprende:
- Un vehículo viario o ferroviario;
 - Una serie de sensores colocados en dicho vehículo viario o ferroviario y configurados para adquirir y almacenar, en un soporte electrónico, datos relativos a las salidas definidas en la reivindicación 1;
 - Dispositivos electrónicos que comprenden un programa para un dispositivo programable que contiene instrucciones que, cuando son llevadas a cabo, realizan el procedimiento para la estimación de los polos (λ_n), vectores modales (ψ_n) y vectores operacionales (α_n^m , β_n^m , χ_n^m) de un vehículo viario o ferroviario, según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.
- 10
- 15

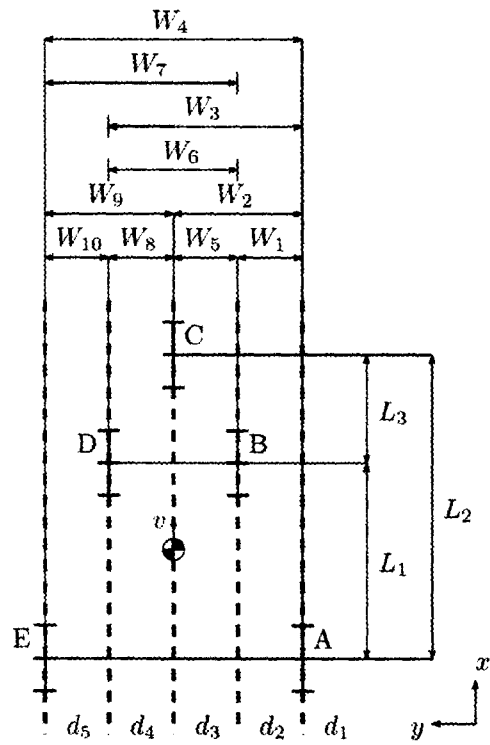


Fig. 1

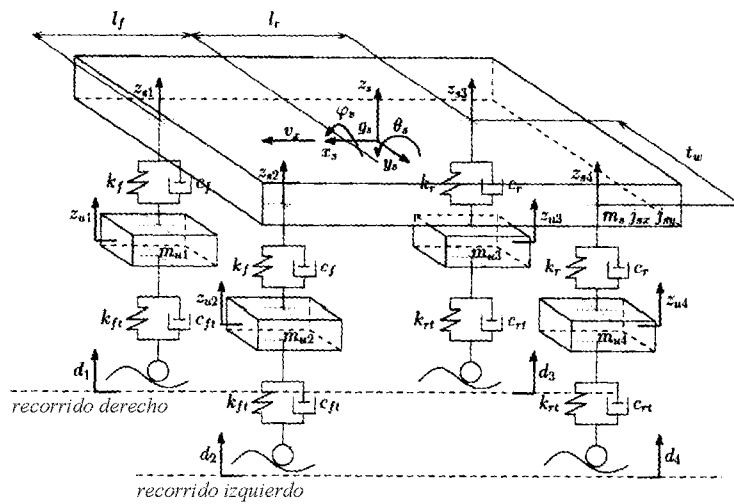


Fig. 2

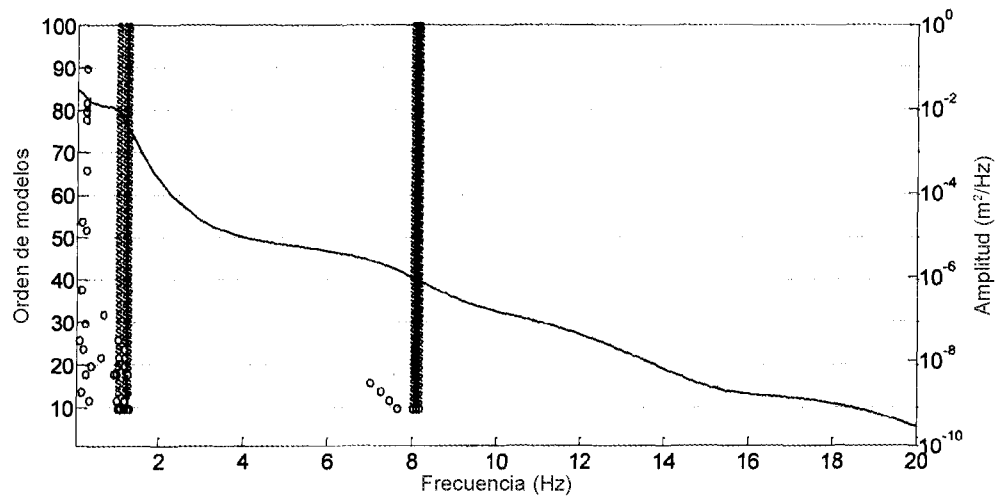


Fig. 3-a

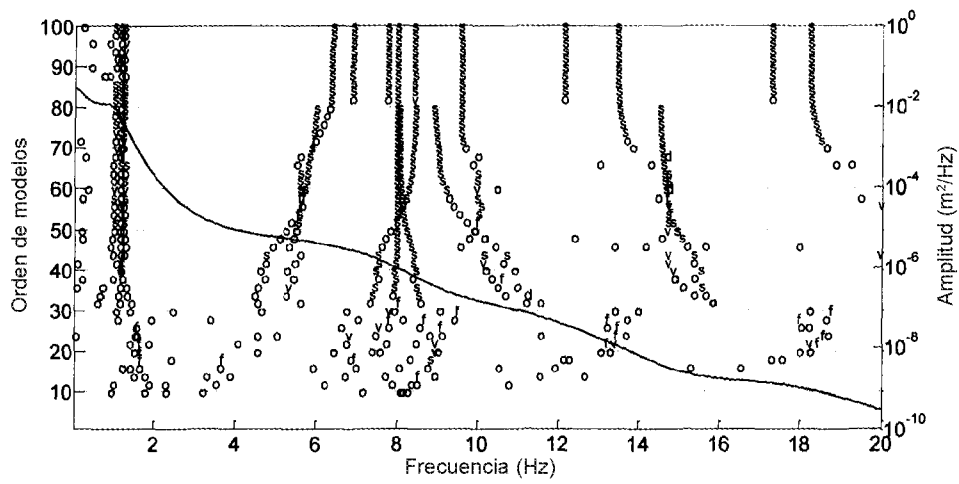


Fig. 3-b

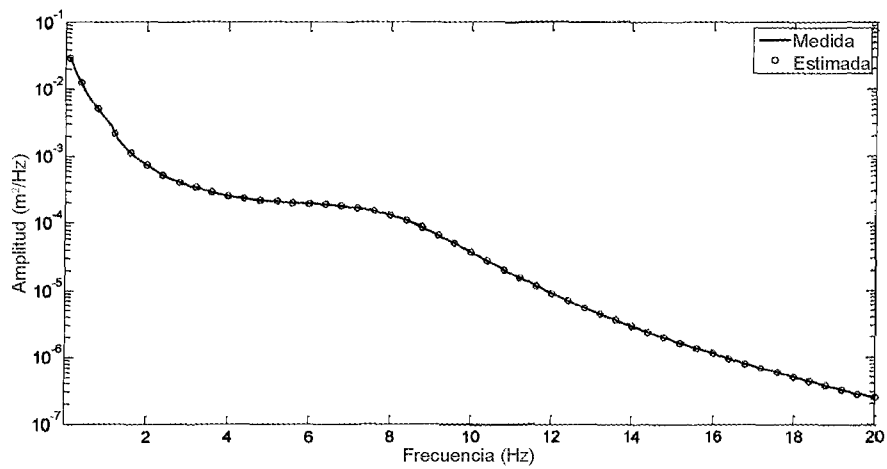


Fig. 4

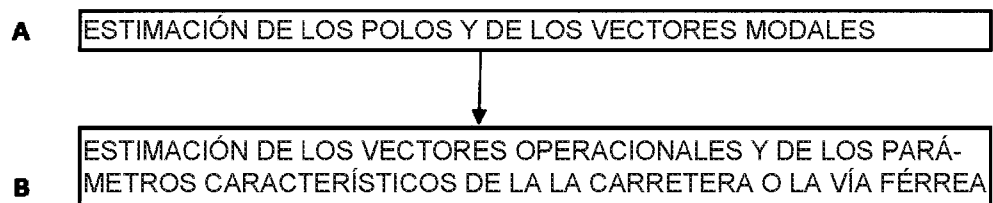


Fig. 5

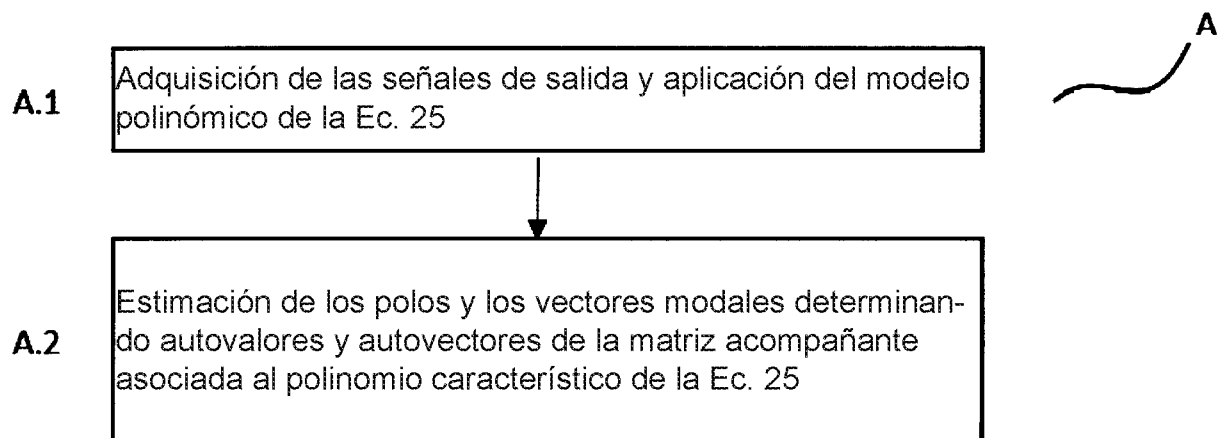


Fig. 6

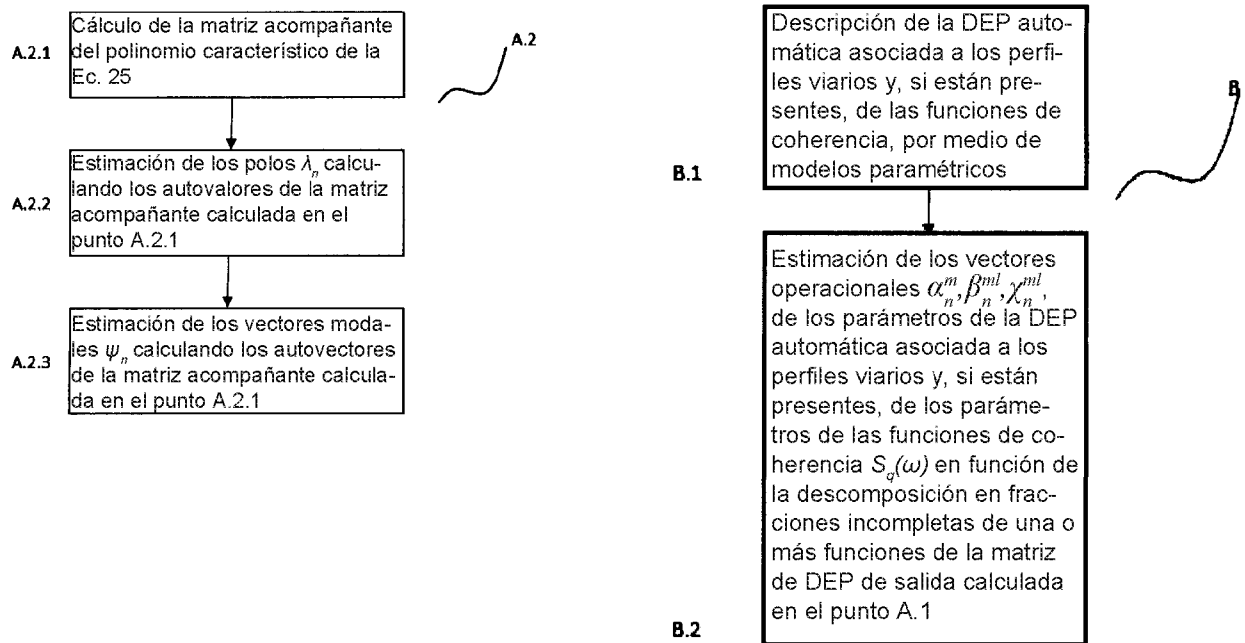


Fig. 8