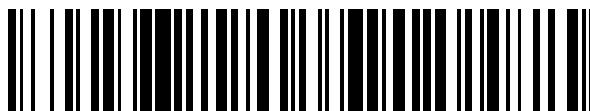


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 759 401**

51 Int. Cl.:

G01M 5/00 (2006.01)

G01M 9/08 (2006.01)

G05B 17/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.09.2016** **E 16382445 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.09.2019** **EP 3299790**

54 Título: **Método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real modos elásticos en señales discretas en el tiempo**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
08.05.2020

73 Titular/es:

AIRBUS DEFENCE AND SPACE, S.A.U. (100.0%)
Paseo John Lennon, s/n
28906 Getafe - Madrid, ES

72 Inventor/es:

ASENSIO NIETO, FRANCISCO JOSÉ;
RODRIGUEZ ROBLES, RODNEY y
SANZ DE BLAS, ALBERTO

ES 2 759 401 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

Método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real modos elásticos en señales discretas en el tiempo

5 Campo técnico de la invención

La presente invención pertenece al campo de la supresión de acoplamiento aeroservoelástico, y particularmente, pertenece al campo de la cancelación adaptativa tiempo real de modos elásticos en señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de una estructura flexible.

10 En particular, la estructura flexible es una estructura con características variables elásticas, y más particularmente, una estructura con aerodinámica no lineal.

Antecedentes de la invención

15 A lo largo de la historia aeroespacial, son muchos los incidentes que han enfatizado el importante papel que desempeña el acoplamiento aeroservoelástico en la estabilidad de vehículos controlados. La inestabilidad y la degradación de la maniobrabilidad deben evitarse suprimiendo los modos elásticos estructurales (supresión de acoplamiento aeroservoelástico) en las cadenas de realimentación de las leyes de control.

20 Dichas leyes de control son cualquier ley que es función de la dinámica del sistema medido, y que rige el movimiento de los efectores o dispositivos de control del sistema, siendo dichos efectores cualquier dispositivo previsto para modificar el movimiento o los desplazamientos de un sistema.

25 La supresión de acoplamiento aeroservoelástico es una tecnología multidisciplinar que aborda la interacción de fuerzas aerodinámicas no estacionarias de vehículos aéreos, la dinámica de la estructura y la dinámica del sistema de control de vuelo. Se han realizado varios estudios que evalúan estrategias y metodologías en el diseño de algoritmos de control de vuelo activos para modificar de manera favorable la dinámica aeroelástica del sistema, o simplemente para desacoplar la dinámica rígida y elástica medida para minimizar los efectos adversos sobre los márgenes de estabilidad y la maniobrabilidad.

30 En el caso particular de sistemas controlados con una estructura muy flexible, una práctica normal es aplicar técnicas de filtrado, es decir, filtros de ranura para eliminar los modos elásticos de las señales de realimentación. Esta técnica conocida es adecuada para sistemas con frecuencias de modos elásticos de medias a altas, de tal manera que dichas frecuencias de modo elástico se encuentran fuera del ancho de banda de la frecuencia de control del sistema aumentado.

35 En el caso particular del brazo de reabastecimiento instalado en un avión cisterna, dicho brazo de reabastecimiento es una estructura fina flexible con una aerodinámica altamente no lineal y características elásticas que varían fuertemente con la condición de vuelo, la fase operacional, la longitud de la barra telescópica y el flujo de combustible. La primera frecuencia de modo de flexión del brazo de reabastecimiento, en condiciones tanto al aire libre como acoplado (durante operaciones de reabastecimiento), se encuentra en el ancho de banda de las frecuencias de control rígido.

40 También se conocen soluciones alternativas al filtro de ranura para sistemas muy flexibles que cumplen con los requisitos de diseño. Por ejemplo, pueden aplicarse filtros de Kalman extendidos para atenuar las componentes elásticas en las señales de realimentación a las frecuencias resonantes usando el modelo teórico del sistema rígido. Adicionalmente, se conoce una técnica de filtrado espacial que usa una red de sensores distribuidos para cancelar las componentes de modos elásticos en la señal de realimentación, suponiendo que las formas de los modos elásticos se conocen de antemano. No obstante, el número de sensores usados en la técnica de filtrado espacial es en general mayor que el doble del número de modos elásticos que van a suprimirse.

45 Estas soluciones alternativas conocidas, tales como métodos de filtrado basados en modelo, carecen convencionalmente de robustez y capacidades de adaptación frente a incertidumbres de la planta, no pueden hacer frente a cambios rápidos en la morfología de la estructura, y su rendimiento es muy sensible a variaciones en las condiciones de contorno exógeno que actúan sobre el sistema. Por tanto, resulta esencial realizar un método alternativo que minimice el impacto sobre la componente dinámica rígida detectada para cumplir con los requisitos de nivel de maniobrabilidad y márgenes de estabilidad; y para alcanzar una cancelación en línea robusta de los modos elásticos en las señales de realimentación usando un enfoque no basado en modelo.

60 El documento "Modelado de orden reducido y control de supresión de aleteo de un ala experimental" de la Conferencia de Control Americana (ACC) y el Consejo de Control automático Americano (AACC), páginas 3144-3149, describe un estudio numérico y experimental del modelado de orden reducido (ROM) y control de supresión de aleteo de un modelo de ala de túnel de viento.

El documento "Supresión del modelo adaptativo para vehículo hipersónico aeroelástico" de la Electrónica Industrial y Aplicaciones (ICIEA) en la 6ª Conferencia IEEE, páginas 68-72, describe el modelo elástico y el modelo de identificación de parámetros modal del vehículo hipersónico y un sistema de supresión adaptativo.

5 Sumario de la invención

La presente invención proporciona una solución alternativa para los problemas mencionados anteriormente, mediante un método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real modos elásticos en señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de una estructura flexible según la reivindicación 1, un programa informático según la reivindicación 6, un sistema según la reivindicación 7 y una aeronave según la reivindicación 8. En reivindicaciones dependientes se definen realizaciones preferidas de la invención.

En un primer aspecto inventivo, la invención proporciona a método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real N modos elásticos en señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de una estructura flexible, teniendo la estructura flexible características variables elásticas, y comprendiendo el método dos bloques principales:

– comprendiendo el primer bloque del método las siguientes etapas:

a) proporcionar un número total $N \in \mathbb{N}^+$ de modos elásticos que van a cancelarse, siendo i un modo elástico genérico que va a cancelarse, $i \in \mathbb{N}^+ : i \in [1, N]$, y dos fuentes de medición activas (A, B) cuya ubicación se define respectivamente mediante vectores de ubicación l_A y l_B , en los que $l_A, l_B \in \mathbb{R}^3$,

b) tomar muestras de dos señales escalares discretas en el tiempo de medida de salida y^A e y^B de la dinámica de la estructura flexible, siendo y_n^A e y_n^B la $n^{\text{ésima}}$ muestra de la señal respectiva medida mediante las dos fuentes de medición activas (A, B), realizándose dicha toma de muestras con un tiempo de muestra Δt , y siendo la $n^{\text{ésima}}$ muestra de una señal $n \in \mathbb{N}^+ : n \in [1, \infty)$,

c) proporcionar una estimación de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i , y un parámetro entero M_{n-1}^i , siendo dicha estimación de frecuencia y el parámetro respectivamente:

c₁) si $n = 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_0^i$, $M_{n-1}^i = M_0^i$, siendo M_0^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_0^i \Delta t} \right\rfloor$, aplicándose el método por primera vez,

c₂) si $n \neq 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_{n-1}^i$; $M_{n-1}^i = M_{n-1}^i$, siendo M_{n-1}^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_{n-1}^i \Delta t} \right\rfloor$,

d) filtrar las señales escalares discretas en el tiempo de medida de salida y^A e y^B , por medio de un filtro de acondicionamiento H_c^i , obteniendo salidas de medición filtradas para el modo elástico i , $Y^{A,i}$ e $Y^{B,i}$, calculadas mediante las siguientes expresiones en el dominio Z :

$$\begin{aligned} Y^{A,i}(z) &= H_c^i(z) y^A(z) \\ Y^{B,i}(z) &= H_c^i(z) y^B(z) \end{aligned}$$

en las que $H_c^i(z)$ corresponde a la función de transferencia en el dominio Z del filtro de acondicionamiento H_c^i , siendo dicho filtro de acondicionamiento un filtro digital de paso de banda paramétrico centrado en la estimación de frecuencia $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i proporcionada en la etapa c),

e) obtener una $n^{\text{ésima}}$ muestra de un parámetro de cancelación estimado por modo elástico i que va a cancelarse, \hat{K}_n^i , según la siguiente expresión:

$$\hat{K}_n^i = \frac{\sum_{j=n-M_{n-1}^i+1}^n \left((Y_j^{B,i})^2 - Y_j^{A,i} Y_j^{B,i} \right)}{\sum_{j=n-M_{n-1}^i+1}^n \left((Y_j^{A,i})^2 + (Y_j^{B,i})^2 - 2Y_j^{A,i} Y_j^{B,i} \right)}$$

en la que el valor del parámetro M_{n-1}^i corresponde al valor proporcionado en la etapa c),

f) generar una $n^{\text{ésima}}$ muestra de una señal escalar discreta en el tiempo y^X , concretamente y_n^X , según la siguiente expresión:

$$y_n^X = \hat{K}_n^i y_n^A + (1 - \hat{K}_n^i) y_n^B$$

g) obtener una señal escalar discreta en el tiempo filtrada Y^F por medio de la siguiente expresión de filtrado en banco en el dominio Z :

$$Y^F(z) = y^X(z) H_1(z) + y^A(z) (1 - H_1(z))$$

en la que H_1 es un filtro de paso de banda de segundo orden centrado en la estimación de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i proporcionada en la etapa c), y

obtener directamente a partir de la señal escalar discreta en el tiempo filtrada Y^F una $n^{\text{ésima}}$ muestra de la señal escalar discreta en el tiempo filtrada Y^F , concretamente Y_n^F ,

h) obtener una $n^{\text{ésima}}$ muestra de una estimación de los desplazamientos de modo para cada modo elástico i , $\hat{\gamma}_n^i$, por medio de la siguiente expresión:

$$\hat{\gamma}_n^i = y_n^A - Y_n^F$$

i) calcular un valor ajustado de $\hat{\omega}_{n-1}^i$, concretamente $\hat{\omega}_n^i$, introduciendo el valor de $\hat{\gamma}_n^i$ de la etapa h) en un módulo de rastreo de frecuencia, obteniendo el valor ajustado $\hat{\omega}_n^i$,

j) guardar el valor ajustado $\hat{\omega}_n^i$ calculado en la etapa i)

k) realizar, desde $i = 1$ hasta $i = N$, las etapas c) a j),

– comprendiendo el segundo bloque del método las siguientes etapas:

- l) heredar de la etapa h) los valores de la $n^{\text{ésima}}$ muestra de la estimación de los desplazamientos de modo, \hat{y}_n^i para cada modo elástico i ,
 m) obtener una $n^{\text{ésima}}$ muestra de una función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida} según la siguiente expresión:

$$5 \quad Y_n^{\text{salida}} = \theta_n^1 y_n^A + \theta_n^2 y_n^B + \sum_{j=1}^{N-1} \theta_n^{j+2} \hat{\beta}_n^j = [y_n^A \quad y_n^B \quad \hat{\beta}_n^1 \quad \hat{\beta}_n^2 \quad \dots \quad \hat{\beta}_n^{N-1}] \begin{bmatrix} \theta_n^1 \\ \vdots \\ \theta_n^N \\ \theta_n^{N+1} \end{bmatrix}$$

obteniéndose dicha $n^{\text{ésima}}$ muestra de la función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida} mediante las siguientes etapas:

- m₁) calcular la inversa de una matriz de filtro espacial estimada $\hat{\Phi}$ mediante la siguiente expresión:

$$\hat{\Phi}^{-1} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{\hat{K}_n^1}{\hat{K}_n^1 - 1} & \dots & \frac{\hat{K}_n^N}{\hat{K}_n^N - 1} & 1 \\ 1 - \lambda_n^{1,1} & \dots & 1 - \lambda_n^{N,1} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \dots \\ 1 - \lambda_n^{1,N-1} & \dots & 1 - \lambda_n^{N,N-1} & 1 \end{bmatrix}^T \right)^{-1}$$

10 en la que:

\hat{K}_n^i son valores de la $n^{\text{ésima}}$ muestra del parámetro de cancelación estimado para cada modo elástico i que va a cancelarse, heredado de la etapa e)

$\lambda_n^{i,p}$, $p \in \mathbb{N}^+$: $p \in [1, N - 1]$; $i \in \mathbb{N}^+$: $i \in [1, N]$, es un parámetro discreto en el tiempo ajustable para cada modo elástico i , seleccionado para lograr una matriz de filtro espacial no singular $\hat{\Phi}$,

- 15 m₂) calcular un vector de parámetro de filtro espacial $\theta_n \in \mathbb{R}^{N+1}$, en el que:

$$\theta_n = \begin{bmatrix} \theta_n^1 \\ \vdots \\ \theta_n^N \\ \theta_n^{N+1} \end{bmatrix} = \hat{\Phi}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

m₃) generar un conjunto de $N - 1$ señales virtuales discretas en el tiempo paramétricas $\hat{\beta}^p$, siendo $\hat{\beta}_n^p$ la $n^{\text{ésima}}$ muestra de las señales virtuales $\hat{\beta}^p$, siendo $p \in \mathbb{N}^+$: $p \in [1, N - 1]$, estando dicha $n^{\text{ésima}}$ muestra de las señales virtuales $\hat{\beta}_n^p$ configurada para complementar y_n^A e y_n^B según la siguiente expresión:

$$20 \quad \hat{\beta}_n^p = y_n^A - \sum_{i=1}^N \lambda_n^{i,p} \hat{y}_n^i$$

m₄) sustituir en la expresión de la función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida} los valores obtenidos en las etapas anteriores (k₁) - (k₃), obteniendo el valor de la función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida}

$$25 \quad Y_n^{\text{salida}} = \theta_n^1 y_n^A + \theta_n^2 y_n^B + \sum_{j=1}^{N-1} \theta_n^{j+2} \hat{\beta}_n^j = [y_n^A \quad y_n^B \quad \hat{\beta}_n^1 \quad \hat{\beta}_n^2 \quad \dots \quad \hat{\beta}_n^{N-1}] \begin{bmatrix} \theta_n^1 \\ \vdots \\ \theta_n^N \\ \theta_n^{N+1} \end{bmatrix}$$

- n) cancelar los modos elásticos i por medio de la función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida} ,
 o) realizar, desde $n = 1$ hasta $n = \infty$, las etapas b) a n), introduciendo los valores de $\hat{\omega}_n^i$ ajustados guardados de la etapa j) en la etapa c).

30 A lo largo de todo el presente documento, cancelar "de manera adaptativa" modos elásticos se entenderá como la capacidad del método de ajustar los resultados de cancelación cuando cambian condiciones tales como la geometría de la estructura flexible o las condiciones de contorno.

35 A lo largo de todo el presente documento, estructura "flexible" se entenderá como una estructura con geometrías que varían rápidamente con el tiempo y condiciones de contorno exógeno que pueden experimentar cambios discretos. Además, dicha estructura flexible está dotada de características variables elásticas, y en realizaciones preferidas de aerodinámica no lineal.

40 Las señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de una estructura flexible comprenden un número total N de modos elásticos que van a cancelarse y, ventajosamente, dicha estructura flexible sólo comprende dos fuentes de medición activas para cancelar todos estos modos elásticos en las señales discretas en el tiempo, es decir las señales de medidas de salida obtenidas mediante diferentes operaciones de toma de muestras. En comparación con el estado de la técnica, en el que se necesita tener al menos un número $N + 1$ de fuentes de medición, este método proporciona ventajosamente resultados fiables con tan sólo dos fuentes de medición.

45 Por tanto, el presente método usa la mínima información de la estructura flexible para cancelar en tiempo real los N modos elásticos seleccionados en las señales discretas en el tiempo, es decir en las señales de medida de salida.

Tanto el número N de modos elásticos como las dos fuentes de medición activas se proporcionan mediante la etapa a) del presente método. Adicionalmente, la etapa a) proporciona además los vectores de ubicación l de cada fuente de medición activa, dependiendo dichos vectores de ubicación l de la colocación espacial de cada fuente de medición sobre la estructura flexible cuyos modos elásticos deben cancelarse en las señales discretas en el tiempo, es decir en las medidas de salida, y la variación de las características elásticas de dicha estructura flexible. Dichas variaciones condicionan las ubicaciones de dichas fuentes de medición debido al hecho de que diferentes posiciones de las fuentes de medición pueden afectar a las medidas de salida proporcionadas por las fuentes.

Ambas fuentes de medición activas, concretamente las fuentes A y B, son fuentes que proporcionan indistintamente muestras discretas de la dinámica del sistema medido, que comprenden la dinámica rígida del sistema, la dinámica de estructura flexible, y los errores y ruidos de medición respectivos. Por tanto, el usuario puede decidir cuál de las fuentes puede denominarse A o B. Los resultados del presente método se obtienen indistintamente, de manera independiente de cuál de las fuentes se considera que es la fuente A o la fuente B. Sin embargo, la ubicación de la fuente A puede afectar a la ubicación de la fuente B o viceversa.

En una realización preferida, una vez seleccionada la ubicación de la fuente de medición A, los puntos de isodesplazamiento de los modos elásticos definen la ubicación en la que no deberá colocarse la fuente de medición B con el fin de aplicar satisfactoriamente el método de cancelación de modos elásticos propuesto en las señales de medida de salida proporcionadas por la fuente de medición A o B.

En una realización preferida las fuentes de medición son sensores.

A lo largo de todo el presente documento, las fuentes de medición "activas" se entenderán como fuentes de medición que proporcionan resultados de toma de muestras durante el funcionamiento del presente método. Esto no excluye fuentes de medición adicionales que pueden estar ubicadas en la estructura flexible pero que no son esenciales para realizar el presente método una vez que funcionan dos fuentes de medición activas en la estructura flexible.

Ventajosamente, el presente método permite al usuario decidir, dependiendo de las necesidades o el funcionamiento de la estructura, la toma de muestras en tiempo real por medio de las dos fuentes de medición, obteniendo por tanto dos señales escalares discretas en el tiempo de medida de salida como las proporcionadas en la etapa b).

A lo largo de todo el presente documento, "medida de salida" se entenderá como una señal, y más particularmente una señal proporcionada por cualquier fuente de medición activa dispuesta sobre la estructura flexible.

La etapa c) del presente método proporciona la estimación de frecuencia natural elástica de cada modo elástico que va a cancelarse, frecuencia que será diferente dependiendo de si el método se aplica por primera vez o no, es decir si el método está realizando la primera toma de muestras.

Por tanto, al método se le proporciona en la etapa c) una estimación de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^i$, que en la etapa c₁) la conoce el usuario o se conoce mediante resultados anteriores de aplicación del método, siendo dicha frecuencia $\hat{\omega}_0^i$; que se entiende como la estimación de frecuencia natural inicial del modo elástico i .

Por el contrario, la estimación de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^i$ proporcionada para la etapa c₂) se toma de resultados anteriores de ajuste o estimación de la estimación de frecuencia natural de muestras anteriores. Por tanto, en este caso:

$$\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_{n-1}^i$$

Es decir, la estimación de frecuencia natural necesaria se proporciona como el valor heredado de muestras anteriores en las que ya se ha realizado el método.

Ventajosamente, esto permite que el método ajuste los resultados a medida que tiene en cuenta las diferentes fases de comportamiento de la estructura flexible dado un valor estimado inicial de estas frecuencias.

El presente método proporciona adicionalmente un filtro de acondicionamiento que es un filtro digital de paso de banda paramétrico que está centrado en la estimación de frecuencia de cada modo elástico que va a cancelarse, frecuencia que se proporcionó anteriormente en la etapa c) del método. Ventajosamente, dicho filtro de acondicionamiento filtra la señal escalar discreta en el tiempo de medida de salida, por medio de una función de transferencia, con el fin de obtener salidas de medición filtradas para cada modo elástico que va a cancelarse.

Adicionalmente, el filtro de acondicionamiento del presente método potencia el rendimiento y la robustez del método de cancelación en comparación con métodos actuales de filtrado espacial del estado de la técnica.

Las frecuencias naturales elásticas se estiman y proporcionan en tiempo real, y el método permite generar una señal filtrada que sólo contiene la dinámica rígida medida de la estructura flexible, con nada de pérdida de fase y atenuación.

Con respecto a la etapa g) del presente método, se usa un filtro digital de paso de banda de segundo orden que está centrado en la estimación de frecuencia natural de cada modo elástico que va a cancelarse, que se proporcionó anteriormente en la etapa c). Ventajosamente, dicho filtro digital de paso de banda de segundo orden filtra las

- 5 señales escalares discretas en el tiempo, lo cual es parte de un banco de filtros complementario, obteniendo una señal escalar discreta en el tiempo filtrada de cada modo elástico que va a cancelarse. Adicionalmente, el filtro digital de paso de banda de segundo orden del presente método potencia el rendimiento y la robustez del método en comparación con un método actual de filtro espacial.
- 10 El presente método comprende adicionalmente el uso de un módulo de rastreo de frecuencia que en la etapa i) estima y actualiza la frecuencia natural de cada modo elástico que va a cancelarse. El ajuste de esta frecuencia natural se realiza introduciendo los desplazamientos estimados de modo de cada modo elástico en el módulo de rastreo de frecuencia, y obteniendo los valores actualizados de la frecuencia natural estimada.
- 15 Los valores actualizados anteriores se guardan en la etapa j).

La inclusión de las etapas i) y j) permite reajustar el método cada vez que se ejecuta, por tanto los resultados obtenidos son más fiables.

- 20 El presente método proporciona adicionalmente un bucle en la etapa k) que, ventajosamente, permite realizar de la etapa c) a la etapa j), tantas veces como el número N de modos elásticos que van a cancelarse. Dicho bucle garantiza que el procedimiento de estimación se realiza para cada modo elástico que va a cancelarse y también potencia el rendimiento y la robustez del presente método.
- 25 El presente método proporciona adicionalmente una función de salida de cancelación de modo elástico en la etapa m) que, ventajosamente, permite la cancelación de cada modo elástico que va a cancelarse en tiempo real en las señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de la estructura flexible estudiada, teniendo en consideración las condiciones variables y las propiedades elásticas de dicha estructura flexible. Para obtener dicha función de salida, el presente método proporciona adicionalmente un filtrado espacial extendido. Ventajosamente, dicho filtrado
- 30 espacial extendido se encarga de generar $N - 1$ señales virtuales para complementar las señales medidas mediante las dos fuentes de medición activas con el fin de obtener la función de salida de cancelación de modo elástico.

El presente método potencia el rendimiento y la robustez en comparación con métodos de filtrado espacial conocidos a partir del estado de la técnica, reduciendo también el tiempo de desarrollo y el coste asociado.

- 35 En una realización particular, el filtro digital de acondicionamiento H_c^i de la etapa d) del primer aspecto inventivo es una combinación de un filtro digital de paso de banda (BP) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^i$ y uno o dos filtros digitales de rechazo de banda (SB) estrechos centrados en $\hat{\omega}_{n-1}^{i-1}$ y $\hat{\omega}_{n-1}^{i+1}$, y en el que $H_c^i(z)$ es la función de transferencia en el dominio Z del filtro digital de acondicionamiento H_c^i correspondiente a la siguiente expresión:
- 40 si $i = 1$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i+1})$$

si no, si $i = 2, \dots, N - 1$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i-1}) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i+1})$$

si no, si $i = N$

- 45 $H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i-1})$

y en el que la etapa c) del método comprende además proporcionar estimaciones de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^{i-1}$ y $\hat{\omega}_{n-1}^{i+1}$ del modo elástico $i - 1$ y $i + 1$, que son:

c₁) si $n = 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_0^i$; $\hat{\omega}_{n-1}^{i-1} = \hat{\omega}_0^{i-1}$; $\hat{\omega}_{n-1}^{i+1} = \hat{\omega}_0^{i+1}$; $M_{n-1}^i = M_0^i$, siendo M_0^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_0^i \Delta t} \right\rfloor$, aplicándose el método por primera vez,

- 50 c₂) si $n \neq 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_{n-1}^i$; $\hat{\omega}_{n-1}^{i-1} = \hat{\omega}_{n-1}^{i-1}$; $\hat{\omega}_{n-1}^{i+1} = \hat{\omega}_{n-1}^{i+1}$; $M_{n-1}^i = M_{n-1}^i$, siendo M_{n-1}^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_{n-1}^i \Delta t} \right\rfloor$,

Ventajosamente, la combinación de un filtro digital de paso de banda y uno o dos filtros de rechazo de banda digitales estrechos proporciona un mejor ajuste de las estimaciones de frecuencia natural.

- 55 En una realización más particular, el filtro digital de paso de banda estrecho se define por un ancho de banda $\Delta\omega_{BP}$ y el uno o dos filtros digitales de rechazo de banda estrechos se definen por un ancho de banda $\Delta\omega_{SB}$ respectivamente, según la expresión:

si $i = 1$

- 60 $H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i, \rho^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i+1}, \rho^{i+1})$

si no, si $i = 2, \dots, N - 1$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i, \rho^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i-1}, \rho^{i-1}) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i+1}, \rho^{i+1})$$

si no, si $i = N$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i, \rho^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i-1})$$

en las que ρ es la profundidad de filtro del filtro digital de acondicionamiento H_c^i , que cumple:

$$\begin{aligned} \rho^i &= \Delta\omega_{BP} \\ \rho^{i-1} &= \rho^{i+1} = \Delta\omega_{SB} \end{aligned}$$

5 Ventajosamente, el ancho de filtro es igual al ancho de banda del filtro. Valores superiores de ancho de banda implican valores superiores de ancho de filtro; por tanto, el filtro puede seleccionarse según las necesidades.

10 En una realización particular, el filtro digital de acondicionamiento H_c^i de la etapa d) es una combinación de un filtro digital de paso de banda (BP) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^i$ y $N - 1$ filtros digitales de rechazo de banda (SB) estrechos centrados en $\hat{\omega}_{n-1}^q$ siendo $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$, siendo $H_c^i(z)$ la función de transferencia en el dominio Z del filtro digital de acondicionamiento H_c^i correspondiente a la siguiente expresión:

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i) \cdot \prod_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^N H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^q)$$

15 y en el que la etapa c) del método comprende además proporcionar una estimación de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i , y estimaciones de frecuencias naturales del resto de los modos elásticos $\hat{\omega}_{n-1}^q$, con $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$, que son:

c₁) si $n = 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_0^i$; $\hat{\omega}_{n-1}^q = \hat{\omega}_0^q$ con $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$; $M_{n-1}^i = M_0^i$, siendo M_0^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_0^i \Delta t} \right\rfloor$, aplicándose el método por primera vez,

20 c₂) si $n \neq 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_{n-1}^i$; $\hat{\omega}_{n-1}^q = \hat{\omega}_{n-1}^q$ con $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$; $M_{n-1}^i = M_{n-1}^i$, siendo M_{n-1}^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_{n-1}^i \Delta t} \right\rfloor$,

25 Ventajosamente, la combinación de un filtro digital de paso de banda y $N - 1$ filtros de rechazo de banda digitales estrechos proporciona un mejor ajuste de las estimaciones de frecuencia natural y un mayor rendimiento de cancelación de los N modos elásticos que van a suprimirse cuando las frecuencias estimadas de modos elásticos están muy cerca unas de otras.

En una realización más particular, el filtro digital de paso de banda estrecho se define por un ancho de banda $\Delta\omega_{BP}$ y los $N - 1$ filtros digitales de rechazo de banda estrechos se definen por un ancho de banda $\Delta\omega_{SB}$ respectivamente, según la expresión:

$$30 \quad H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i, \rho^i) \cdot \prod_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^N H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^q, \rho^q)$$

en la que ρ es el ancho de filtro de un filtro digital de paso de banda o de rechazo de banda, que cumple:

$$\begin{aligned} \rho^i &= \Delta\omega_{BP} \\ \rho^q &= \Delta\omega_{SB} \quad q \neq i \end{aligned}$$

35 Ventajosamente, los anchos de filtro son iguales al ancho de banda de los filtros. Valores superiores de ancho de banda implican valores superiores de ancho de filtro; por tanto, el filtro puede seleccionarse según las necesidades.

40 En un segundo aspecto inventivo, la invención proporciona un programa informático que comprende código de programa informático, que, cuando se ejecuta por un dispositivo informático, hace que el dispositivo informático lleve a cabo todas las etapas de método del primer aspecto inventivo.

Esto permite la realización, por medio de cualquier dispositivo informático, del presente método de cancelación de modos elásticos.

45 En un tercer aspecto inventivo, la invención proporciona un sistema que comprende una estructura flexible y N modos elásticos que van a cancelarse en tiempo real en señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de la estructura flexible y un dispositivo informático, estando el dispositivo informático configurado para aplicar un método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real N modos elásticos en dichas señales discretas en el tiempo según el primer aspecto inventivo.

50 En un cuarto aspecto inventivo, la invención proporciona una aeronave que comprende un sistema según el tercer aspecto inventivo.

55 Ventajosamente, la realización de este método de cancelación de modos elásticos aplicado en las señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de la estructura flexible usadas en el campo de la aeronáutica proporciona resultados fiables.

Todas las características descritas en esta memoria descriptiva (incluyendo las reivindicaciones, descripción y dibujos) y/o todas las etapas del método descrito pueden combinarse en cualquier combinación, con la excepción de combinaciones de características y/o etapas mutuamente excluyentes.

5 **Descripción de los dibujos**

Estas y otras características y ventajas de la invención se entenderán más claramente a la vista de la descripción detallada de la invención que resulta evidente a partir de una realización preferida de la invención, facilitada sólo a modo de ejemplo y sin limitarse a la misma, con referencia a los dibujos.

10 Figura 1. Esta figura muestra un diagrama con las etapas del primer bloque del método para cancelar modos elásticos según la presente invención.

15 Figura 2. Esta figura muestra un diagrama con el método completo según una primera realización de la presente invención.

Figura 3. Esta figura muestra un diagrama con el método completo según una segunda realización de la presente invención.

20 Figura 4. Esta figura muestra un diagrama con el método completo según una tercera realización de la presente invención.

25 Figura 5. Esta figura muestra una realización particular de un brazo de reabastecimiento de un avión cisterna en el que se aplica el método de cancelación de modos elásticos de la presente invención a las señales de realimentación de las leyes de control.

Descripción detallada de la invención

La presente invención da a conocer un método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real N modos elásticos en señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de una estructura flexible, teniendo la estructura flexible características variables elásticas.

La cancelación de modos elásticos en las señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de una estructura puede abordarse o bien de manera teórica o bien de manera experimental.

35 Cuando se tienen en cuenta estudios teóricos, existe la necesidad de realizar una resolución analítica con el fin de obtener resultados para la cancelación de los modos elásticos seleccionados.

A continuación se da a conocer un ejemplo de un estudio teórico.

40 *Resolución analítica para cancelar N modos elásticos en señales discretas en el tiempo que contienen la dinámica medida de una estructura flexible.*

La resolución teórica está compuesta principalmente por dos etapas diferentes que son:

- 45 1) identificar las características de modos elásticos mediante una colección de núcleos de estimación, y
2) proporcionar un solucionador algebraico de filtro espacial extendido.

Adicionalmente, la resolución teórica estima, en paralelo con dichas etapas, la condición de contorno exógeno que actúa sobre el sistema y por consiguiente configura las restricciones aplicables a los núcleos de estimación restringidos distribuidos.

- 50 1) Núcleos de estimación de modos elásticos

Para cancelar N modos elásticos en señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de una estructura flexible con características variables elásticas, se requieren N núcleos de estimación de modos elásticos, en los que se pretende que cada núcleo proporcione una estimación del desplazamiento de modos elásticos, y una estimación del parámetro K_n^i requerido para cancelar un modo elástico específico i , con $i \in \mathbb{N}^+$: $i \in [1, N]$, dadas dos señales escalares discretas en el tiempo de medida de salida y^A e y^B , medidas mediante dos fuentes de medición (A, B) respectivamente, según la ubicación de las fuentes y las características de la estructura.

60 La n ésima muestra y_n^A e y_n^B de dichas señales escalares discretas en el tiempo de medida de salida y^A e y^B puede expresarse en cuanto a la dinámica de sistema rígida y elástica detectada como

$$y_n^A = r_n + \sum_{i=1}^N \varphi_n^i(l_A) \eta_n^i + v_n^A$$

$$y_n^B = r_n + \sum_{i=1}^N \varphi_n^i(l_B) \eta_n^i + v_n^B$$

en las que

$l_A, l_B \in \mathbb{R}^3$ indica los vectores de ubicación de las dos fuentes de medición (A, B) respectivamente,
 n es un subíndice que indica la $n^{\text{ésima}}$ muestra de una señal discreta en el tiempo, que es $n \in \mathbb{N}^+$: $n \in [1, \infty)$

5 i es un índice genérico que hace referencia al modo elástico que va a cancelarse, $i \in \mathbb{N}^+$: $i \in [1, N]$,

r_n es una medida de salida dinámica rígida de cada fuente de medición activa (A, B),

η_n^i es un desplazamiento elástico de cada uno de los modos elásticos i ,

v_n^A y v_n^B son ruidos de medición de cada fuente de medición activa (A, B) respectivamente, y

10 $\varphi_n^i(l)$ es una forma de modo elástico de cada uno de los modos elásticos i , según el vector de ubicación l de las fuentes de medición activas (A, B), $l \in \mathbb{R}^3$.

Por tanto, las muestras y_n^A e y_n^B comprenden tres componentes diferentes, que son una componente de dinámica rígida, una componente elástica y una componente de ruido directamente relacionada con las fuentes de medición.

15 El parámetro de cancelación perfecta, según se determina de manera teórica, K_n^i de cada modo elástico puede calcularse imponiendo que la combinación lineal de las muestras y_n^A e y_n^B de como resultado la supresión de la dinámica de sistema elástica detectada $\varphi_n^i(l_A) \eta_n^i$ del modo elástico i al tiempo que se mantiene inalterada la dinámica rígida detectada indicada mediante r_n según las siguientes expresiones

$$K_n^i \varphi_n^i(l_A) \eta_n^i + (1 - K_n^i) \varphi_n^i(l_B) \eta_n^i = 0$$

$$20 \quad K_n^i y_n^A + (1 - K_n^i) y_n^B = r_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N [K_n^i \varphi_n^j(l_A) \eta_n^j + (1 - K_n^i) \varphi_n^j(l_B) \eta_n^j] + K_n^i v_n^A + (1 - K_n^i) v_n^B$$

Adicionalmente, es necesario que la forma del modo elástico de cada uno de los modos elásticos cumpla con la siguiente condición:

$$\varphi_n^i(l_A) \neq \varphi_n^i(l_B),$$

25 Según las expresiones anteriores, el parámetro de cancelación de la forma del modo elástico teórico K_n^i por modo elástico i que va a cancelarse se obtiene por medio de la siguiente ecuación

$$K_n^i = \frac{\varphi_n^i(l_B)}{\varphi_n^i(l_B) - \varphi_n^i(l_A)}$$

30 Estos parámetros proporcionan la solución de la función teórica que permite la cancelación de los N modos elásticos seleccionados en señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de la estructura flexible.

Teniendo en cuenta dichos parámetros, puede relacionarse una solución analítica con una solución experimental de los parámetros, concretamente los parámetros estimados \tilde{K}_n^i .

35 La relación entre la solución teórica y la solución experimental puede expresarse de la siguiente manera:

$$\tilde{K}_n^i = K_n^i + \tilde{\varepsilon}_n^i(\phi_A^i, \phi_B^i, v_n^A, v_n^B)$$

en la que $\tilde{\varepsilon}_n^i$ es la $n^{\text{ésima}}$ muestra de una función de sesgo de error discreta en el tiempo para el modo elástico i que depende de las razones de potencia de ancho de banda ϕ_A^i y ϕ_B^i entre la medida de salida dinámica rígida r_n y el desplazamiento elástico medido de cada uno de los modos elásticos i para cada fuente de medición activa (A, B)

40 respectivamente, y también depende de los ruidos de medición v_n^A y v_n^B de la fuente de medición activa (A, B).

Dichas razones de potencia de ancho de banda ϕ_A^i y ϕ_B^i deben cumplir con el siguiente requisito con el fin de minimizar el error de estimación $\tilde{\varepsilon}_n^i$:

$$45 \quad \phi_A^i = \frac{\int_{\omega_i - \Delta\omega/2}^{\omega_i + \Delta\omega/2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_n e^{-j\omega n} d\omega}{\int_{\omega_i - \Delta\omega/2}^{\omega_i + \Delta\omega/2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi_n^i(l_A) \eta_n^i e^{-j\omega n} d\omega} \ll 1$$

$$\phi_B^i = \frac{\int_{\omega_i - \Delta\omega/2}^{\omega_i + \Delta\omega/2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_n e^{-j\omega n} d\omega}{\int_{\omega_i - \Delta\omega/2}^{\omega_i + \Delta\omega/2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi_n^i(l_B) \eta_n^i e^{-j\omega n} d\omega} \ll 1$$

siendo:

ω una frecuencia genérica

ω_i una frecuencia del modo elástico i

j un número imaginario igual a $\sqrt{-1}$

50 $\Delta\omega$ un ancho de banda de frecuencia genérica

Las condiciones requeridas en las ecuaciones anteriores siempre pueden satisfacerse si $\Delta\omega$ es lo suficientemente pequeño, considerando que un valor lo suficientemente pequeño es el de $\Delta\omega < 0,1\omega_i$.

Con estos resultados, se realiza una segunda etapa que tiene en cuenta la actuación de un solucionador algebraico de filtro espacial extendido, lo cual proporcionará finalmente la solución de función de salida para cancelar los modos elásticos usando las señales discretas en el tiempo de entrada y^A e y^B .

5 Sin embargo, una resolución de este tipo para la cancelación de los modos elásticos en señales discretas en el tiempo es complicada de cumplir, ya que es muy difícil distinguir qué parte de las señales y^A e y^B procede de la dinámica rígida medida del sistema, y qué parte procede de la dinámica elástica medida del sistema. Por ello no resulta evidente la obtención de las diferentes componentes de dichas señales ($r_n, \sum_{i=1}^N \varphi_n^i(l_A) \eta_n^i$ y v_n^A para la fuente de medición A) con el fin de seleccionar la componente elástica para cancelarla, obteniendo como resultado la componente de dinámica rígida medida en las señales y^A e y^B con nada de pérdida de fase y atenuación además de los ruidos de medición.

10 Por tanto, resulta complicado realizar una solución teórica para cancelar modos elásticos. Por el contrario, el presente método proporciona un solucionador en tiempo real que permite la cancelación de dichos modos elásticos según diferentes condiciones variables.

Resolución de estimación para cancelar en tiempo real N modos elásticos en señales discretas en el tiempo que contienen la dinámica medida de una estructura flexible.

20 El presente método para cancelar modos elásticos en señales discretas en el tiempo se divide en dos bloques principales, en los que se realizan diferentes etapas con el fin de obtener una ecuación final que permite la cancelación de dichos modos elásticos.

25 La figura 1 muestra un diagrama con las etapas del primer bloque para el método para cancelar N modos elásticos.

Tal como puede observarse, la $n^{\text{ésima}}$ muestra y_n^A e y_n^B de dos señales escalares discretas en el tiempo de medida de salida y^A e y^B se suministran al filtro de acondicionamiento H_c^i con el fin de obtener salidas de medición filtradas para el modo elástico i , $Y^{A,i}$ e $Y^{B,i}$.

30 Estas soluciones permiten la realización de una optimización del error de los mínimos cuadrados con el fin de obtener una $n^{\text{ésima}}$ muestra de un parámetro de cancelación estimado por modo elástico i que va a cancelarse, \hat{K}_n^i .

La obtención de estos parámetros se muestra en la figura 1 por medio de una etiqueta "ETAPA e)".

35 El parámetro de cancelación estimado junto con la $n^{\text{ésima}}$ muestra y_n^A proporcionará la $n^{\text{ésima}}$ muestra y_n^X de una señal escalar discreta en el tiempo y^X .

40 El método usa un banco de filtro complementario que realiza dos operaciones diferentes. La primera operación es el filtrado de la $n^{\text{ésima}}$ muestra de una señal escalar discreta en el tiempo, concretamente y_n^X , por medio de un filtro de paso de banda de segundo orden centrado en la estimación de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i . La segunda operación es el filtrado por medio del filtro complementario anterior de la $n^{\text{ésima}}$ muestra y_n^A .

En esta realización preferida, la señal suministrada en las etapas mencionadas es la $n^{\text{ésima}}$ muestra y_n^A tal como se muestra en la figura 1.

45 La solución de las dos etapas de filtrado se usa para obtener una señal escalar discreta en el tiempo filtrada Y^F , siendo su $n^{\text{ésima}}$ muestra concretamente Y_n^F .

50 Esta $n^{\text{ésima}}$ muestra de la señal escalar discreta en el tiempo filtrada, Y_n^F junto con la $n^{\text{ésima}}$ muestra y_n^A , proporciona una $n^{\text{ésima}}$ muestra de una estimación de los desplazamientos de modo para cada modo elástico i , $\hat{\gamma}_n^i$. Esto se muestra en la figura 1 por medio de la etiqueta "ETAPA h)".

55 En paralelo, los resultados de la $n^{\text{ésima}}$ muestra de una estimación de los desplazamientos de modo para cada modo elástico i , $\hat{\gamma}_n^i$, se usan como entrada para un módulo de rastreo de frecuencia, consistiendo dicho módulo de rastreo en cualquier algoritmo que calcula la frecuencia a la que una señal tiene su máximo de densidad espectral de potencia, para obtener un valor ajustado de $\hat{\omega}_{n-1}^i$, concretamente $\hat{\omega}_n^i$ que se guardará para usarse en etapas posteriores del método. Esto se muestra en la figura 1 por medio de una etiqueta "ETAPA i)" y una etiqueta "ETAPA j)" respectivamente.

60 Los resultados de estas estimaciones de frecuencia natural ajustadas afectan a las funciones de transferencia de filtrado, por tanto a los filtros usados en las diferentes etapas del método.

La figura 2 muestra un diagrama con el método completo según una primera realización de la presente invención.

Tal como puede observarse, la totalidad de las etapas del método se muestran en el diagrama junto con la ubicación de las etapas de bucle que permiten reajustar el método teniendo en cuenta los cambios de las condiciones de la estructura del sistema elástico.

5 El diagrama muestra cómo, empezando con la $n^{\text{ésima}}$ muestra y_n^A e y_n^B de dos señales escalares discretas en el tiempo de medida de salida, las etapas a) y b) del método, el resto de las etapas se cumplen obteniendo los resultados necesarios \hat{K}_n^i y $\hat{\gamma}_n^i$.

10 El filtro de acondicionamiento H_c^i usado en esta realización particular es un filtro digital de paso de banda paramétrico centrado en la estimación de frecuencia $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i proporcionada en cada una de las diferentes etapas c) realizadas para cada uno de los modos elásticos i , lo cual puede observarse en la figura 2. Adicionalmente, el diagrama muestra el segundo bloque del método, que termina con la obtención de Y_n^{salida} , función que permite la cancelación de las componentes de modos elásticos en las señales discretas en el tiempo y^A e y^B .

15 La figura 3 muestra el diagrama mostrado en la figura 2 teniendo en cuenta una composición particular del filtro de acondicionamiento H_c^i .

20 Dicho filtro de acondicionamiento H_c^i usado en esta realización particular es una combinación de un filtro de paso de banda (BP) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^i$ y dos filtros de rechazo de banda (SB) estrechos centrados en $\hat{\omega}_{n-1}^{i-1}$ y $\hat{\omega}_{n-1}^{i+1}$ para $i = 2..N - 1$, y para el caso particular en el que $i = 1$, es una combinación de un filtro de paso de banda (BP) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^1$ y un filtro de rechazo de banda (SB) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^2$, y para el caso particular en el que $i = N$, es una combinación de un filtro de paso de banda (BP) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^N$ y un filtro de rechazo de banda (SB) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^{N-1}$.

25 La figura 3 muestra en cada una de las diferentes etapas c) realizadas para cada uno de los modos elásticos i , cómo el bucle con contador desde $i = 1$ hasta $i = N$ afecta al presente filtro.

30 Tal como puede observarse, la etapa c) se ve afectada cada vez por la estimación de frecuencias naturales correspondiente del modo i y los modos $i - 1, i + 1$.

La figura 4 muestra el diagrama mostrado en las figuras 2 y 3 teniendo en cuenta una composición particular del filtro de acondicionamiento H_c^i .

35 Dicho filtro de acondicionamiento H_c^i usado en esta realización particular es una combinación de un filtro de paso de banda (BP) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^i$ y $N - 1$ filtros de rechazo de banda (SB) estrechos centrados en $\hat{\omega}_{n-1}^q$ siendo $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$.

40 La figura 4 muestra en cada una de las diferentes etapas c) realizadas para cada uno de los modos elásticos i cómo el bucle con contador desde $i = 1$ hasta $i = N$ afecta al presente filtro H_c^i .

Tal como puede observarse, la etapa c) se ve afectada cada vez por la estimación de frecuencias naturales correspondiente del modo i y los modos q siendo $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$.

45 Ejemplo particular

La figura 5 muestra un brazo de reabastecimiento de un avión cisterna (A330 MRTT) que comprende dos fuentes de medición activas, que son el sensor A y el sensor B. El brazo de reabastecimiento comprende formas de modos elásticos y frecuencias de modos elásticos no amortiguadas que experimentan grandes variaciones durante transiciones de condición al aire libre a acoplada y viceversa debido a los cambios discretos en las condiciones de contorno exógeno que actúan sobre la estructura.

55 Para someter a prueba el método de la presente invención, se aplicó dicho método a las leyes de control del brazo de reabastecimiento, obteniendo como resultado la cancelación adaptativa en tiempo real de los dos primeros modos elásticos en las señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de la estructura del brazo de reabastecimiento, siendo por tanto el parámetro $N = 2$.

60 El presente método puede implementarse como parte de las leyes de control de cualquier sistema flexible con más de un sensor ubicado a lo largo de la estructura. Adicionalmente, el presente método puede usarse no sólo para filtrar la componente elástica en las señales de realimentación de las leyes de control, sino también para controlar la dinámica elástica usando unas leyes de control en paralelo con una realimentación compuesta por los desplazamientos de modos elásticos identificados mediante los núcleos de estimación, o simplemente usando la señal discreta en el tiempo $y^A - Y^{\text{salida}}$ y sus derivados como variables de control.

REIVINDICACIONES

1. Método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real N modos elásticos en señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de una estructura flexible, teniendo la estructura flexible características variables elásticas, el método caracterizado porque comprende dos bloques principales:

5 – comprendiendo el primer bloque del método las siguientes etapas:
 a) proporcionar un número total $N \in \mathbb{N}^+$ de modos elásticos que van a cancelarse, siendo i un modo elástico genérico que va a cancelarse, $i \in \mathbb{N}^+ : i \in [1, N]$, y dos fuentes de medición activas (A, B) cuya ubicación se define respectivamente mediante vectores de ubicación l_A y l_B , en los que $l_A, l_B \in \mathbb{R}^3$,

10 b) tomar muestras de dos señales escalares discretas en el tiempo de medida de salida y^A e y^B de la dinámica de la estructura flexible, siendo y_n^A e y_n^B la $n^{\text{ésima}}$ muestra de la señal respectiva medida mediante las dos fuentes de medición activas (A, B), realizándose dicha toma de muestras con un tiempo de muestra Δt , y siendo la $n^{\text{ésima}}$ muestra de una señal $n \in \mathbb{N}^+ : n \in [1, \infty)$,

15 c) proporcionar una estimación de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i , y un parámetro entero M_{n-1}^i , siendo dicha estimación de frecuencia y el parámetro respectivamente:

c₁) si $n = 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_0^i$; $M_{n-1}^i = M_0^i$, siendo M_0^i un múltiplo entero de $\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_0^i \Delta t} \rfloor$, aplicándose el método por primera vez,

c₂) si $n \neq 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_{n-2}^i$; $M_{n-1}^i = M_{n-2}^i$, siendo M_{n-1}^i un múltiplo entero de $\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_{n-1}^i \Delta t} \rfloor$,

20 d) filtrar las señales escalares discretas en el tiempo de medida de salida y^A e y^B , por medio de un filtro de acondicionamiento H_c^i , obteniendo salidas de medición filtradas para el modo elástico i , $Y^{A,i}$ e $Y^{B,i}$, calculadas mediante las siguientes expresiones en el dominio Z :

$$Y^{A,i}(z) = H_c^i(z)y^A(z)$$

$$Y^{B,i}(z) = H_c^i(z)y^B(z)$$

25 en las que $H_c^i(z)$ corresponde a la función de transferencia en el dominio Z del filtro de acondicionamiento H_c^i , siendo dicho filtro de acondicionamiento un filtro digital de paso de banda paramétrico centrado en la estimación de frecuencia $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i proporcionada en la etapa c),

e) obtener una $n^{\text{ésima}}$ muestra de un parámetro de cancelación estimado por modo elástico i que va a cancelarse, \hat{K}_n^i , según la siguiente expresión:

$$\hat{K}_n^i = \frac{\sum_{j=n-M_{n-1}^i+1}^n ((Y_j^{B,i})^2 - Y_j^{A,i}Y_j^{B,i})}{\sum_{j=n-M_{n-1}^i+1}^n ((Y_j^{A,i})^2 + (Y_j^{B,i})^2 - 2Y_j^{A,i}Y_j^{B,i})}$$

30 en la que el valor del parámetro M_{n-1}^i corresponde al valor proporcionado en la etapa c),

f) generar una $n^{\text{ésima}}$ muestra de una señal escalar discreta en el tiempo y^X , concretamente y_n^X , según la siguiente expresión:

$$y_n^X = \hat{K}_n^i y_n^A + (1 - \hat{K}_n^i) y_n^B$$

35 g) obtener una señal escalar discreta en el tiempo filtrada Y^F por medio de la siguiente expresión de filtrado en banco en el dominio Z :

$$Y^F(z) = y^X(z)H_1(z) + y^A(z)(1 - H_1(z))$$

en la que H_1 es un filtro de paso de banda de segundo orden centrado en la estimación de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i proporcionada en la etapa c), y

40 obtener directamente a partir de la señal escalar discreta en el tiempo filtrada Y^F una $n^{\text{ésima}}$ muestra de la señal escalar discreta en el tiempo filtrada Y^F , concretamente Y_n^F ,

h) obtener una $n^{\text{ésima}}$ muestra de una estimación de los desplazamientos de modo para cada modo elástico i , $\hat{\gamma}_n^i$, por medio de la siguiente expresión:

$$\hat{\gamma}_n^i = y_n^A - Y_n^F$$

45 i) calcular un valor ajustado de $\hat{\omega}_{n-1}^i$, concretamente $\hat{\omega}_n^i$, introduciendo el valor de $\hat{\gamma}_n^i$ de la etapa h) en un módulo de rastreo de frecuencia, obteniendo el valor ajustado $\hat{\omega}_n^i$,

j) guardar el valor ajustado $\hat{\omega}_n^i$ calculado en la etapa i)

k) realizar, desde $i = 1$ hasta $i = N$, las etapas c) a j),

– comprendiendo el segundo bloque del método las siguientes etapas:

50 l) heredar de la etapa h) los valores de la $n^{\text{ésima}}$ muestra de la estimación de los desplazamientos de modo, $\hat{\gamma}_n^i$ para cada modo elástico i ,

m) obtener una $n^{\text{ésima}}$ muestra de una función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida} según la siguiente expresión:

$$Y_n^{\text{salida}} = \theta_n^1 y_n^A + \theta_n^2 y_n^B + \sum_{j=1}^{N-1} \theta_n^{j+2} \hat{\beta}_n^j = [y_n^A \quad y_n^B \quad \hat{\beta}_n^1 \quad \hat{\beta}_n^2 \quad \dots \quad \hat{\beta}_n^{N-1}] \begin{bmatrix} \theta_n^1 \\ \vdots \\ \theta_n^N \\ \theta_n^{N+1} \end{bmatrix}$$

55 obteniéndose dicha $n^{\text{ésima}}$ muestra de la función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida} mediante las siguientes etapas:

m₁) calcular la inversa de una matriz de filtro espacial estimada $\hat{\Phi}$ mediante la siguiente expresión:

$$\hat{\Phi}^{-1} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{\hat{K}_n^1}{\hat{K}_n^1 - 1} & \dots & \frac{\hat{K}_n^N}{\hat{K}_n^N - 1} & 1 \\ 1 - \lambda_n^{1,1} & \dots & 1 - \lambda_n^{N,1} & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 - \lambda_n^{1,N-1} & \dots & 1 - \lambda_n^{N,N-1} & 1 \end{bmatrix}^T \right)^{-1}$$

en la que:

\hat{K}_n^i son valores de la $n^{\text{ésima}}$ muestra del parámetro de cancelación estimado para cada modo elástico i que va a cancelarse, heredado de la etapa e)

- 5 $\lambda_n^{i,p}$, $p \in \mathbb{N}^+$: $p \in [1, N - 1]$; $i \in \mathbb{N}^+$: $i \in [1, N]$, es un parámetro discreto en el tiempo ajustable para cada modo elástico i , seleccionado para lograr una matriz de filtro espacial no singular $\hat{\Phi}$,
 m₂) calcular un vector de parámetro de filtro espacial $\theta_n \in \mathbb{R}^{N+1}$, en el que:

$$\theta_n = \begin{bmatrix} \theta_n^1 \\ \vdots \\ \theta_n^N \\ \theta_n^{N+1} \end{bmatrix} = \hat{\Phi}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

- m₃) generar un conjunto de $N - 1$ señales virtuales discretas en el tiempo paramétricas $\hat{\beta}^p$, siendo $\hat{\beta}_n^p$ la $n^{\text{ésima}}$ muestra de las señales virtuales $\hat{\beta}^p$, siendo $p \in \mathbb{N}^+$: $p \in [1, N - 1]$, estando dicha $n^{\text{ésima}}$ muestra de las señales virtuales $\hat{\beta}_n^p$ configurada para complementar y_n^A e y_n^B según la siguiente expresión:

$$\hat{\beta}_n^p = y_n^A - \sum_{i=1}^N \lambda_n^{i,p} \hat{\gamma}_n^i$$

- m₄) sustituir en la expresión de la función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida} los valores obtenidos en las etapas anteriores (k₁) - (k₃), obteniendo el valor de la función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida}

$$Y_n^{\text{salida}} = \theta_n^1 y_n^A + \theta_n^2 y_n^B + \sum_{j=1}^{N-1} \theta_n^{j+2} \hat{\beta}_n^j = [y_n^A \quad y_n^B \quad \hat{\beta}_n^1 \quad \hat{\beta}_n^2 \quad \dots \quad \hat{\beta}_n^{N-1}] \begin{bmatrix} \theta_n^1 \\ \vdots \\ \theta_n^N \\ \theta_n^{N+1} \end{bmatrix}$$

- n) cancelar los modos elásticos i por medio de la función de salida de cancelación de modo elástico Y_n^{salida} ,
 o) realizar, desde $n = 1$ hasta $n = \infty$, las etapas b) a n), introduciendo los valores de $\hat{\omega}_n^i$ ajustados guardados de la etapa j) en la etapa c).

- 20 2. Método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real N modos elásticos en señales discretas en el tiempo según la reivindicación 1, en el que el filtro de acondicionamiento H_c^i de la etapa d) es una combinación de un filtro de paso de banda (BP) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^i$ y uno o dos filtros de rechazo de banda (SB) estrechos centrados en $\hat{\omega}_{n-1}^{i-1}$ y $\hat{\omega}_{n-1}^{i+1}$, y en el que $H_c^i(z)$ es la función de transferencia en el dominio Z del filtro de acondicionamiento H_c^i correspondiente a la siguiente expresión:

si $i = 1$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i+1})$$

si no, si $i = 2, \dots, N - 1$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i-1}) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i+1})$$

- 30 si no, si $i = N$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i-1})$$

y en el que la etapa c) del método comprende además proporcionar estimaciones de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^{i-1}$ y $\hat{\omega}_{n-1}^{i+1}$ del modo elástico $i - 1$ y $i + 1$, que son:

- c₁) si $n = 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_0^i$; $\hat{\omega}_{n-1}^{i-1} = \hat{\omega}_0^{i-1}$; $\hat{\omega}_{n-1}^{i+1} = \hat{\omega}_0^{i+1}$; $M_{n-1}^i = M_0^i$, siendo M_0^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_0^i \Delta t} \right\rfloor$, aplicándose el método por primera vez,

- c₂) si $n \neq 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_{n-1}^i$; $\hat{\omega}_{n-1}^{i-1} = \hat{\omega}_{n-1}^{i-1}$; $\hat{\omega}_{n-1}^{i+1} = \hat{\omega}_{n-1}^{i+1}$; $M_{n-1}^i = M_{n-1}^i$, siendo M_{n-1}^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_{n-1}^i \Delta t} \right\rfloor$,

3. Método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real N modos elásticos en señales discretas en el tiempo según la reivindicación 2, en el que el filtro de paso de banda estrecho se define por un ancho de banda $\Delta\omega_{BP}$ y el uno o dos filtros de rechazo de banda estrechos se definen por un ancho de banda $\Delta\omega_{SB}$ respectivamente, según la expresión:

si $i = 1$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i, \rho^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i+1}, \rho^{i+1})$$

- 45 si no, si $i = 2, \dots, N - 1$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i, \rho^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i-1}, \rho^{i-1}) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i+1}, \rho^{i+1})$$

si no, si $i = N$

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i, \rho^i) H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^{i-1})$$

en la que ρ es el ancho de filtro del filtro de acondicionamiento H_c^i , que cumple:

$$\begin{aligned} \rho^i &= \Delta\omega_{BP} \\ \rho^{i-1} &= \rho^{i+1} = \Delta\omega_{SB} \end{aligned}$$

- 5 4. Método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real N modos elásticos en señales discretas en el tiempo según la reivindicación 1, en el que el filtro de acondicionamiento H_c^i de la etapa d) es una combinación de un filtro de paso de banda (BP) estrecho centrado en $\hat{\omega}_{n-1}^i$ y $N - 1$ filtros de rechazo de banda (SB) estrechos centrados en $\hat{\omega}_{n-1}^q$ siendo $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$, siendo $H_c^i(z)$ la función de transferencia en el dominio Z del filtro de acondicionamiento H_c^i correspondiente a la siguiente expresión:

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i) \cdot \prod_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^N H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^q)$$

y en el que la etapa c) del método comprende además proporcionar una estimación de frecuencia natural $\hat{\omega}_{n-1}^i$ del modo elástico i , y estimaciones de frecuencias naturales del resto de los modos elásticos $\hat{\omega}_{n-1}^q$, con $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$, que son:

- 15 c₁) si $n = 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_0^i$; $\hat{\omega}_{n-1}^q = \hat{\omega}_0^q$ con $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$; $M_{n-1}^i = M_0^i$, siendo M_0^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_0^i \Delta t} \right\rfloor$, aplicándose el método por primera vez,
- c₂) si $n \neq 1$; entonces $\hat{\omega}_{n-1}^i = \hat{\omega}_{n-1}^i$; $\hat{\omega}_{n-1}^q = \hat{\omega}_{n-1}^q$ con $q \in \mathbb{N}^+ : \{q \in [1, N] \mid q \neq i\}$; $M_{n-1}^i = M_{n-1}^i$, siendo M_{n-1}^i un múltiplo entero de $\left\lfloor \frac{2\pi}{\hat{\omega}_{n-1}^i \Delta t} \right\rfloor$,

- 20 5. Método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real N modos elásticos en señales discretas en el tiempo según la reivindicación 4, en el que el filtro de paso de banda estrecho se define por un ancho de banda $\Delta\omega_{BP}$ y los $N - 1$ filtros de rechazo de banda estrechos se definen por un ancho de banda $\Delta\omega_{SB}$ respectivamente, según la expresión:

$$H_c^i(z) = H_{BP}(z, \hat{\omega}_{n-1}^i, \rho^i) \cdot \prod_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^N H_{SB}(z, \hat{\omega}_{n-1}^q, \rho^q)$$

- 25 en la que ρ es el ancho de filtro de un filtro de paso de banda o un filtro de rechazo de banda, que cumple:

$$\begin{aligned} \rho^i &= \Delta\omega_{BP} \\ \rho^q &= \Delta\omega_{SB} \quad q \neq i \end{aligned}$$

- 30 6. Programa informático que comprende código de programa informático, que, cuando se ejecuta por un dispositivo informático, hace que el dispositivo informático lleve a cabo las etapas del método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5.

7.

8. Sistema que comprende una estructura flexible y N modos elásticos que van a cancelarse en tiempo real en señales discretas en el tiempo que miden la dinámica de la estructura flexible y un dispositivo informático, estando el dispositivo informático configurado para aplicar un método para cancelar de manera adaptativa en tiempo real N modos elásticos en dichas señales discretas en el tiempo según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5.

9.

10. Aeronave que comprende un sistema según la reivindicación 7.

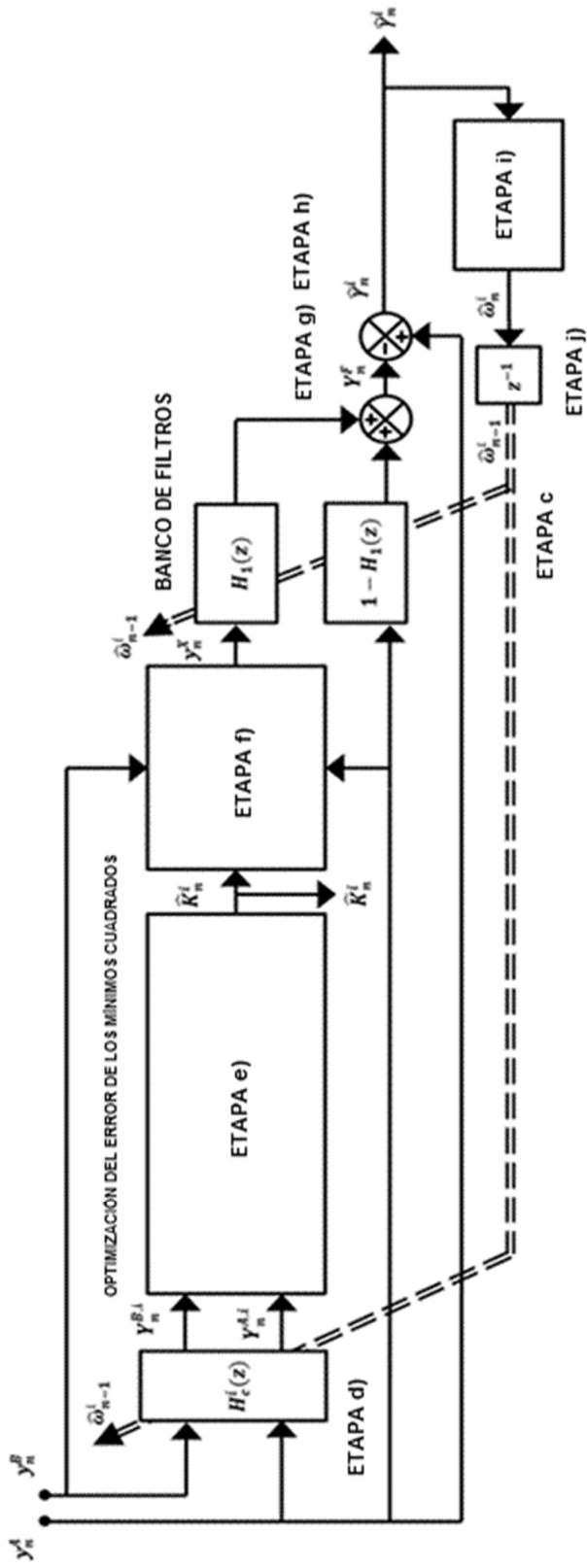


FIG. 1

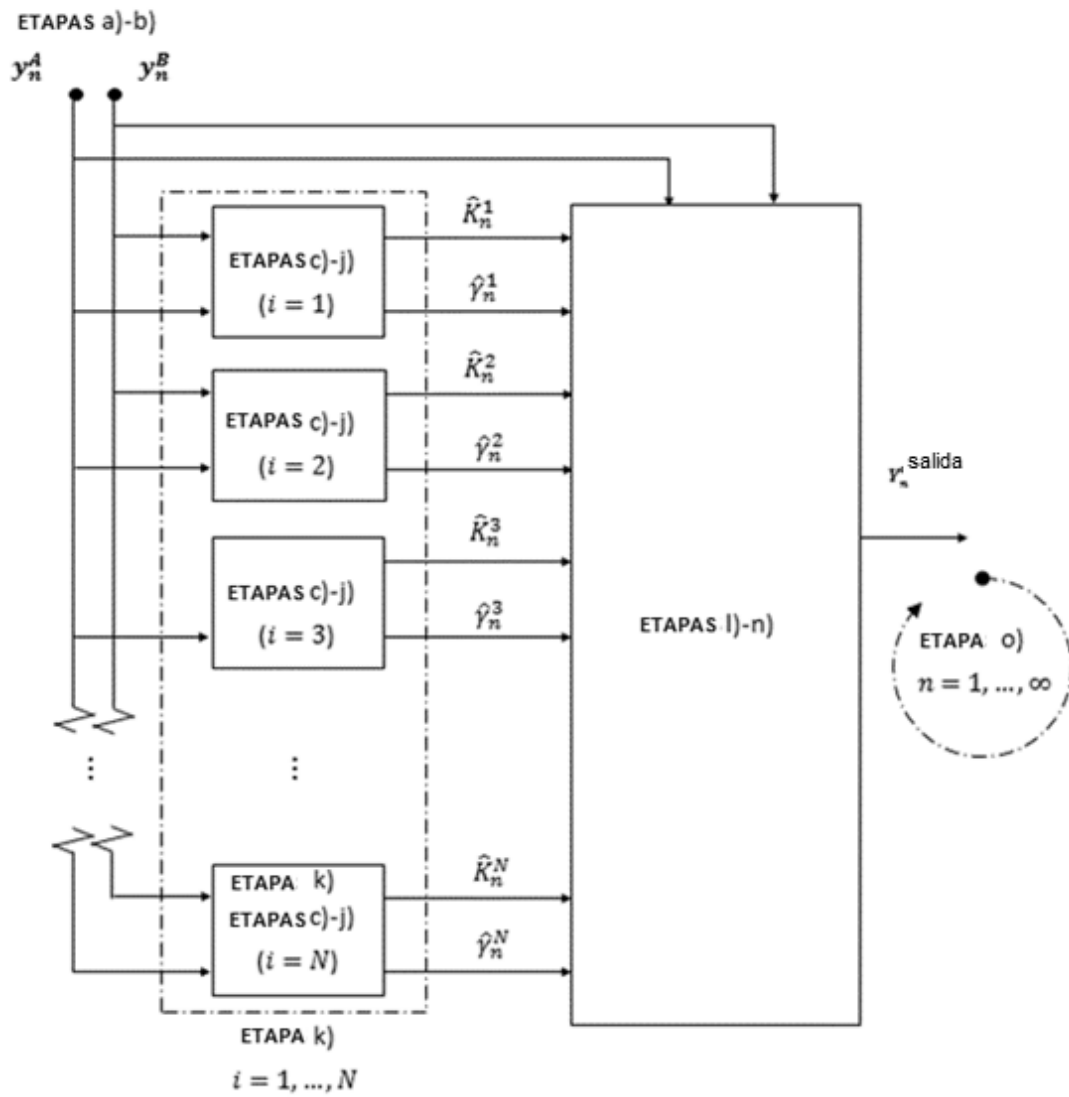


FIG. 2

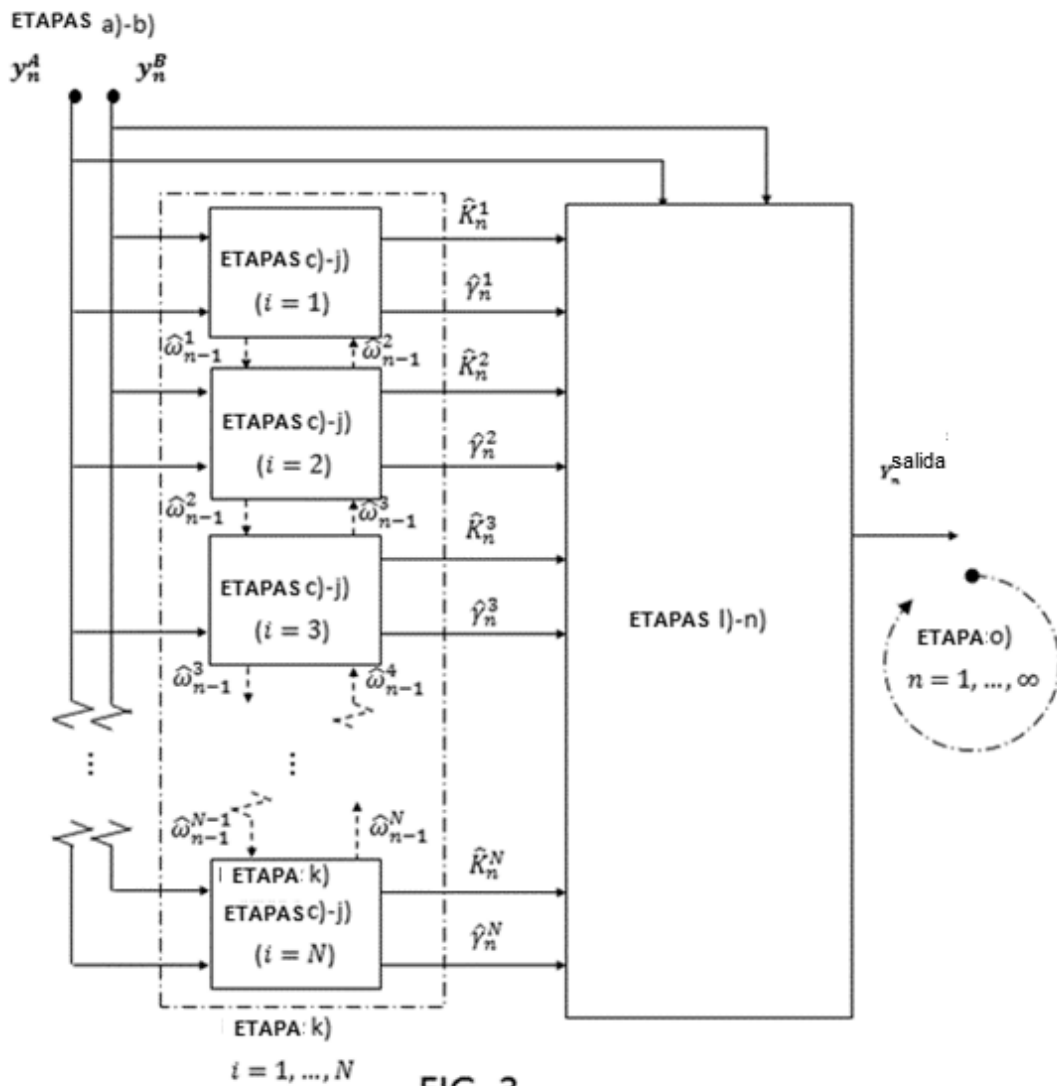


FIG. 3

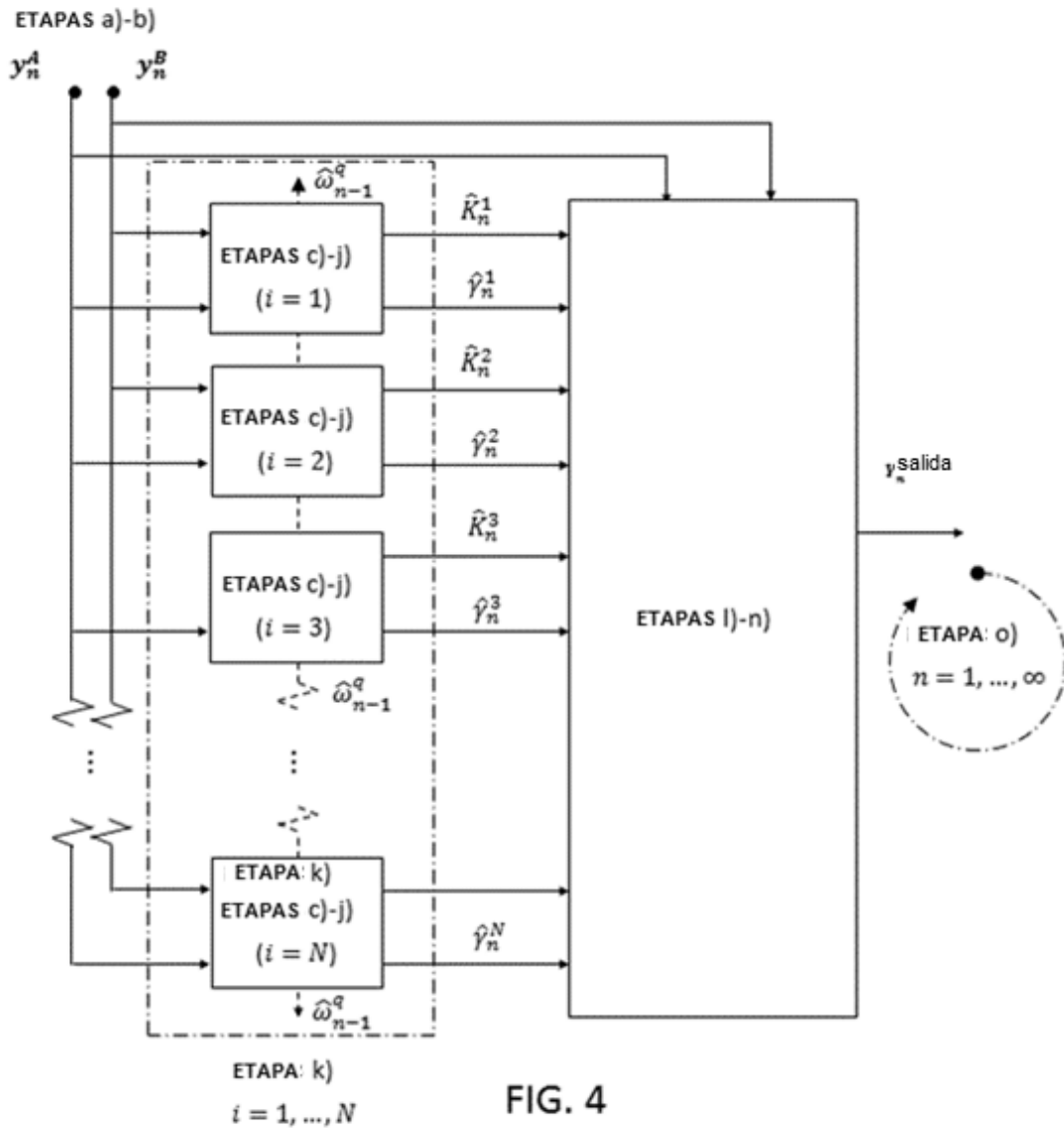


FIG. 4

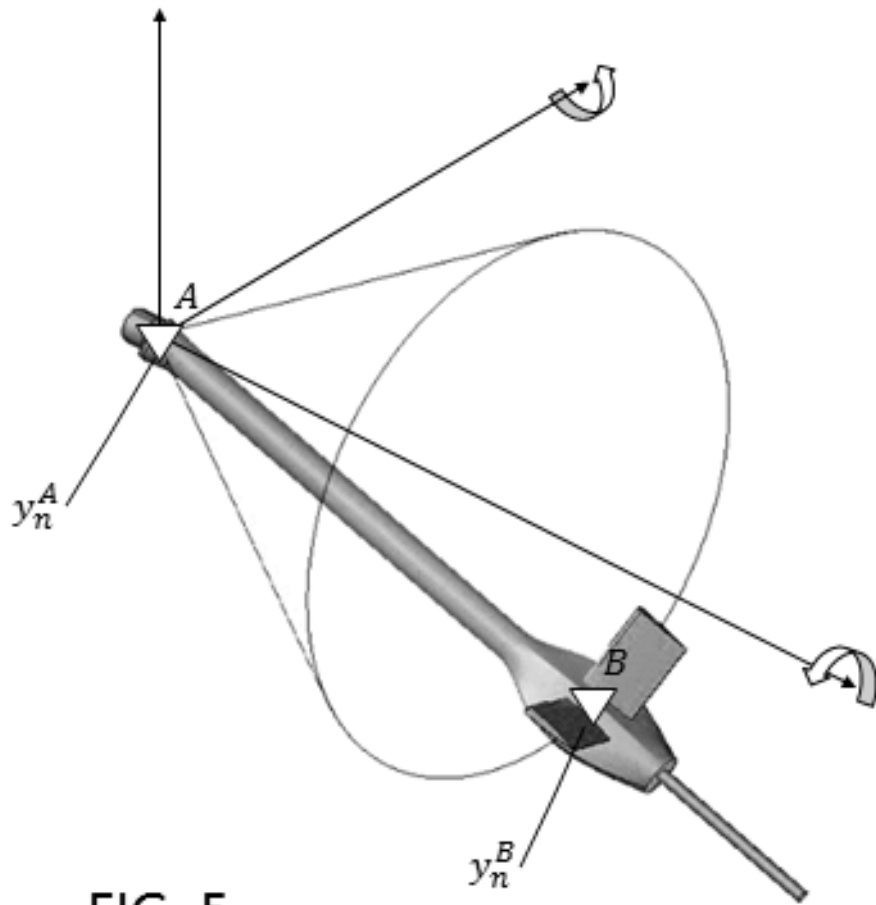


FIG. 5