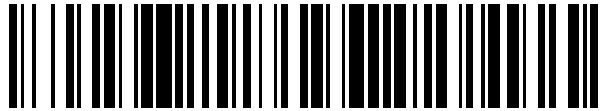


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 434 515**

51 Int. Cl.:

G01S 5/22

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.09.2008 E 08852320 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.04.2013 EP 2235558**

54 Título: **Procedimiento de trayectografía robusto en tiempo real en ordenador portátil, de uno o varios cetáceos mediante acústica pasiva**

30 Prioridad:

03.09.2007 FR 0706162

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

16.12.2013

73 Titular/es:

**UNIVERSITE DU SUD TOULON VAR (100.0%)
BP 20132
83957 LA GARDE CEDEX 20, FR**

72 Inventor/es:

**CAUDAL, FRÉDÉRIC;
GLOTIN, HERVÉ GILLES PIERRE y
GIRAUDET, PASCALE VÉRONIQUE**

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 434 515 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 de trayectografía robusto en tiempo real en ordenador portátil, de uno o varios cetáceos mediante acústica pasiva

5 La presente invención se refiere a un procedimiento de trayectografía robusto de una pluralidad de X cetáceos mediante acústica pasiva, empleando un conjunto de Y sensores.

10 Por extensión, la presente invención se refiere a un procedimiento de trayectografía por vía pasiva, de una o varias fuentes que se desplazan en un medio cualquiera y emiten una señal no estacionaria.

15 A modo de ejemplo concreto, se describirá la invención en el marco de su aplicación a la problemática de la detección de mamíferos marinos capaces de emitir señales en forma de clics, pero queda entendido que la invención se aplica a otros tipos de fuentes de señales no estacionarias y a otros medios de propagación.

Estado de la técnica

20 Se conocen ya en el estado de la técnica varios procedimientos de seguimiento de trayectorias de cetáceos. Se distinguen generalmente los procedimientos de detección activos, que consisten en enviar hacia la fuente una señal, especialmente sonora, y en captar el eco de dicha señal cuando encuentra la fuente. Estos procedimientos no están recomendados, ya que la potencia de la señal es nefasta tanto para el cetáceo buscado como para su entorno.

25 Se distinguen además los procedimientos de detección pasivos, que consisten simplemente en captar señales mediante sensores adecuados (en el caso de los cetáceos se trata de señales sonoras que pueden captarse por medio de hidrófonos sumergidos), y en procesar después las señales recibidas con objeto de determinar las características y la posición de la fuente.

30 Los procedimientos de detección pasivos son mucho más satisfactorios en su principio (ninguna perturbación del medio).

Un procedimiento de este tipo se divulga por ejemplo en "Real-time 3D tracking of whales by echo-robust precise TDOA estimates with a widely-spaced hydrophone array" de Giraudet P. y Glotin H.

35 Se han llevado a cabo otros intentos para poner a punto un procedimiento de detección de cetáceos por vía pasiva, en base a algoritmos de procesamiento de las diferencias de tiempos de llegada a los hidrófonos de los clics captados por hidrófonos, denominándose dichas diferencias "TDOA", acrónimo de "Time Difference Of Arrival" en terminología anglosajona.

40 Entre los métodos probados, se encuentran los algoritmos de detección denominados de Morissey et al., el de Nozal y Frazer, o el de White et al., todos ellos ampliamente descritos en la literatura científica.

Inconvenientes del estado de la técnica

45 En resumen, los métodos mencionados incluyen todos por lo menos un inconveniente importante de entre la siguiente relación:

- o bien se trata de métodos que no son pasivos y, por consiguiente, requieren el envío de señales hacia los cetáceos, lo que corresponde a métodos activos que son perjudiciales para los animales;

50 - o bien no están industrializados y requieren el concurso de métodos visuales cuando los cetáceos suben a la superficie, y funcionan únicamente para el seguimiento aproximado de un único cetáceo aislado y, por lo tanto, en condiciones acústicas idóneas;

55 - o bien requieren un perfil de celeridad del sonido en el agua del mar en el lugar de la detección, y en general esos perfiles no están disponibles, o no están actualizados, sabiendo que la celeridad del sonido varía en función del tiempo y de las estaciones, lo que falsea los resultados de los métodos de detección conocidos;

60 - o bien incluso recurren a algoritmos de procesamiento de la señal muy complejos (por ejemplo tiempo frecuencia), que requieren una gran potencia de cálculo, siendo el caso de los algoritmos citados anteriormente, lo que tiene como consecuencia que la detección, incluso de una única ballena, no puede hacerse en tiempo real ni casi real.

Objetivos de la invención

65 En consecuencia, un objetivo de la invención es proponer un procedimiento de detección y de trayectografía de cetáceos por vía pasiva, que sea capaz de resolver los problemas planteados por los procedimientos conocidos en el estado de la técnica.

En particular, un objetivo de la invención es proponer un procedimiento y un sistema que permitan trayectografiar y contar cetáceos, incluso en grupos, e identificarlos, lo que implica separar las señales de varios cetáceos que emiten clics simultáneamente en un área de varios kilómetros cúbicos.

5 Otro objetivo de la invención es obtener el resultado mencionado sin necesidad de un perfil de celeridad del sonido en el agua.

10 Otro objetivo de la invención es proponer un procedimiento de detección que permita una detección rápida, en tiempo real.

Otro objetivo de la invención es proponer un procedimiento de detección que sea fácil de poner en funcionamiento en la práctica, incluso con material de bajo coste.

15 Otro objetivo de la invención es proponer un procedimiento y un sistema de detección que sean robustos frente a los ecos, y que proporcionen resultados precisos y fiables, cualesquiera que sean el medio y las fuentes considerados.

20 Un objetivo adicional de la invención es proponer un procedimiento y un sistema de detección por vía pasiva, que permitan la aplicación al etiquetado de las emisiones acústicas de los animales, lo que debe permitir el estudio detallado de sus características, tales como tamaño, sexo, edad, grupo, dialecto y sus interacciones comportamentales.

25 A tal efecto, la invención tiene por objeto un procedimiento de trayectografía por vía pasiva como se define en las reivindicaciones, así como un sistema para la puesta en funcionamiento de dicho procedimiento.

Las características y ventajas de la invención se harán evidentes mediante la lectura de la descripción detallada de los dibujos adjuntos, en los cuales:

30 - la figura 1 ilustra un organigrama general del procedimiento de trayectografía según la invención;

- la figura 2 ilustra el principio de transitividad de las TDOA;

35 - las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 representan respectivamente un clic de una única ballena en la señal bruta, este mismo clic tras el filtrado con el operador de Teager-Kaiser y, finalmente, el clic tras el filtrado y la decimación;

- las figuras 4.1 y 4.2 representan respectivamente la señal bruta correspondiente a varios clics de una única ballena, antes y después del filtrado mediante Teager-Kaiser, pero sin procesamiento de decimación;

40 - la figura 5 representa la señal de la figura 4.1 tras una etapa de filtrado según el algoritmo de Teager Kaiser y decimación;

- la figura 6.1 representa la señal de la figura 4.1 tras una etapa de filtrado adicional según el algoritmo de Mallat seguido de una operación de raíz cuadrada en la señal;

45 - la figura 6.2 representa la señal de la figura 4.1 tras un filtrado estocástico (FAS);

- la figura 6.3 representa la señal de la figura 6.2 tras la ampliación de un clic y un eco;

50 - la figura 7 ilustra el principio del cálculo de las TDOA mediante intercorrelación, en base a la señal real de una única ballena;

- la figura 8.1 ilustra el principio de detección de los ecos mediante intercorrelación, aplicado a la señal de la figura 7;

55 - la figura 8.2 ilustra la señal absoluta de un eco;

- la figura 8.3 ilustra la señal de la figura 8.2 una vez realizada la media;

- la figura 8.4 ilustra la señal absoluta de un clic;

60 - la figura 9 representa una señal bruta recibida de los hidrófonos, que contiene una cadena de clics de varias ballenas, con ruido;

- la figura 10 representa las sucesivas posiciones en (x,y,z) y en vista desde arriba en función del tiempo de cuatro ballenas detectadas según el procedimiento de la invención para un primer número de TDOA guardadas;

65 - la figura 11 representa las sucesivas posiciones en (x,y,z) y en vista desde arriba en función del tiempo de cuatro

ballenas detectadas, para otro número de TDOA guardadas;

- la figura 12 representa las trayectorias de la figura 10, tras una etapa de alisamiento;

- 5 - la figura 13 representa un organigrama de procedimiento que permite explotar las posiciones obtenidas de las ballenas, para su estudio comportamental.

Principio de la invención

10 Con referencia a la figura 1, se ha representado un organigrama funcional del procedimiento según la invención. Con varios hidrófonos dispuestos en el agua en el área donde se quiere detectar la presencia y la posición de cetáceos, se captan en 10 de manera conocida las señales analógicas enviadas por los hidrófonos. Estas señales corresponden a las distintas señales y ruidos acústicos presentes en el medio. La etapa 11 de recogida y digitalización de las señales procedentes de los hidrófonos se efectúa, por ejemplo, por medio de tarjetas electrónicas de recogida conectadas a un ordenador, especialmente un ordenador portátil clásico. Pero también es posible que cada hidrófono esté directamente dotado de medios de digitalización de las señales acústicas, en cuyo caso las señales recibidas de los hidrófonos serían señales digitalizadas, directamente utilizables por un ordenador.

15 La invención prevé que las señales digitales remitidas en 12 a un ordenador se sometan a una etapa de filtrado 13 particular, con objeto de aislar las señales útiles debidas a los clics del ruido de fondo. Esta etapa de filtrado particular es crítica para el funcionamiento del procedimiento según la invención, y se describirá con mayor detalle más adelante.

20 A la salida 14 de la etapa de filtrado 13, se recupera una señal limpia, desprovista de ruido y cuyos picos corresponden a las cadenas de clics emitidas por las ballenas eventualmente presentes en un área vigilada.

25 Sin embargo, es posible que algunos de los picos de la señal en 14 correspondan a ecos de los clics de las ballenas, por ejemplo, mediante reverberación en la superficie o el fondo del mar. En una variante opcional más perfeccionada, el procedimiento según la invención prevé en 21 una etapa de cálculo y eliminación de los ecos.

30 A partir de la señal limpia que contiene los picos correspondientes a las cadenas de clics de las ballenas, se determinan en 15 las TDOA de los clics, lo que permite obtener en 16 un conjunto de TDOA de los clics de las ballenas, pero sin que se pueda decir aún qué TDOA corresponden a una misma fuente, lo que permitiría localizar dicha fuente mediante un procedimiento de triangulación / regresión.

35 En consecuencia, es necesario prever una etapa 17 consistente en determinar, de entre las TDOA disponibles en 16, las que son coherentes entre ellas, es decir las que cumplen el principio de la transitividad de las TDOA, que se recordará con más detalle en relación con la figura 2. Todas las etapas anteriores se realizan en ventanas de 10 s con un recubrimiento de las ventanas de p% (pudiendo ir p del 0 % al 95 %; en los ejemplos presentados, p=50 %).

40 A la salida 18 de la etapa 17, se dispone de un conjunto de TDOA coherentes entre ellas, que se someten a una etapa de regresión no lineal que permite determinar en 19 las posiciones instantáneas (x,y,z) de cada ballena en función del tiempo. Estas posiciones brutas están disponibles en 20 al final del procedimiento de procesamiento según la invención. Como se verá más adelante en relación con la figura 11, la obtención de las posiciones espaciales de las ballenas en los tres ejes x,y,z para algunas ventanas de tiempo, posibilita la aplicación a dichas posiciones de fases de procesamiento adicionales, como el alisamiento de las trayectorias con objeto de visualizar mejor en tiempo real las trayectorias de las ballenas presentes en el área de observación.

45 Se hace referencia a la figura 2 que ilustra el principio de transitividad de las TDOA. Se ha representado en esta figura una fuente S que emite una señal sonora. En el ejemplo elegido para describir la invención, esta fuente sonora S es un mamífero marino y la señal sonora es un clic. Se han representado asimismo cuatro hidrófonos i,j,k,h. Se denotan respectivamente T_i, T_j, T_k, T_h , los tiempos de propagación del clic para alcanzar cada uno de los hidrófonos i,j,k,h. Por otra parte, se denota mediante $TDOA(i,j)$, la diferencia de tiempo de propagación ($T_j - T_i$) de la señal sonora para alcanzar los hidrófonos i y j.

50 La señal sonora produce ondas esféricas, por lo que la TDOA debe verificar una relación de transitividad. Por lo tanto, en la figura 2, para una señal emitida por la fuente S y que alcanza los hidrófonos i, j y k, es preciso tener la relación:

60 **(1):** $TDOA(i,j) + TDOA(j,k) = TDOA(i,k)$

65 Se observa que, con una red de cuatro hidrófonos i,j,k,h que captan el clic de una misma fuente, existen $C_4^2 = 6$ TDOA posibles. Se pueden elegir tres TDOA independientes de entre estas seis TDOA. Las demás son combinaciones lineales de estas últimas (véanse las ecuaciones (1) y la figura 2).

La invención emplea la transitividad de las TDOA para:

- seleccionar los sextetos de TDOA que verifican las cuatro ecuaciones (1) para comprobar que proceden bien de una misma fuente;
- conservar solo tres TDOA independientes de las seis seleccionadas, con objeto de localizar la fuente.

Filtrado de la señal

La figura 9 representa una señal bruta antes del filtrado, que incluye varios picos correspondientes a clics de varias ballenas. Por lo tanto, queda claro que una señal bruta de esta naturaleza es muy difícil de interpretar y, especialmente, no se sabe si los distintos picos corresponden a clics de una misma ballena.

Mientras que en presencia de una única ballena (figura 4.1) se obtienen picos claros y fáciles de identificar, en presencia de varias ballenas los clics de las ballenas más alejadas y menos directivas generan picos de escasa amplitud, que van a confundirse con el ruido. Para conservar los clics de las ballenas más alejadas de los hidrófonos es necesario, por consiguiente, eliminar el ruido, lo que justifica un filtrado adicional. El procedimiento original que permite este procesamiento forma parte de la presente invención.

Como se ha indicado anteriormente, las señales que van a permitir trayectografiar los cetáceos se denominan clics. La figura 3.1 muestra el detalle de un clic muestreado a 48 kHz. Los clics son señales de alta frecuencia y fuerte nivel (hasta 200 dB re: 1 µPa) que los cetáceos emiten para la ecolocalización y la comunicación. Se emiten en general en cadenas, como en la figura 4.1.

Como se observa en la figura 3.1, la amplitud de un clic bruto en función del tiempo muestra que la estructura de esta señal hace aparecer varios picos: se trata de una señal de alta frecuencia bastante compleja, que superpone un ruido HF y una señal HF. Estas señales, durante las grabaciones mediante hidrófonos, poseen un ruido de fondo aditivo que resulta de distintos ruidos (estado del mar (SSL Gaussiano), señales biológicas, barcos y turbulencias moleculares), lo que impide procesar los datos brutos sin pasar por una etapa de filtrado. Pero no es posible filtrar un clic de forma sencilla para extraer la señal con la ayuda de un filtro básico, como un filtro de paso bajo o paso alto, ya que un filtro de este tipo reduciría tanto la señal como el ruido.

Para resolver esta dificultad, se procede según la invención a una etapa de prefiltrado consistente en aplicar el operador de energía de Teager-Kaiser a la señal bruta.

El operador de Teager-Kaiser en continuo se define así:

$$\Psi [x(t)] = \left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 - x(t) \frac{d^2x(t)}{dt^2} = \dot{x}^2 - x\ddot{x}, \quad (2)$$

donde x(t) es el valor de la señal en el instante t.

En discreto, se obtiene:

$$\Psi [x(n)] = x^2(n) - x(n+1)x(n-1), \quad (3)$$

donde x(n) es la n-ésima muestra.

Una de las ventajas de este operador es que, en cada instante, solo son necesarias 3 muestras para la evaluación de la energía. Es un filtro de alta frecuencia, por lo que el resultado filtrado será de alta frecuencia.

Considerando la señal grabada en los hidrófonos como:

$$s(n) = x(n) + y(n) + u(n). \quad (4)$$

donde s(n) es la señal grabada, x(n) la señal de interés, y(n) una señal de interferencia, u(n) un ruido de fondo del océano emitiendo la hipótesis de que es gaussiano estacionario en sentido amplio en una corta duración, aplicando el operador de TK a s(n), se obtiene:

$$\Psi [s(n)] = \Psi [x(n)] + \Psi [y(n)] + \Psi [u(n)] + T[n], \quad (5)$$

donde T[n] es la suma de todos los términos entre los pares posibles de las componentes (x(n), y(n) y u(n)). Por ejemplo, el término Ψ, entre x(n) y y(n) está definido por:

$$\Psi_c[x(n), y(n)] = x(n)y(n) - x(n+1)y(n-1) \quad (6)$$

Teniendo en cuenta el carácter de paso alto y el comportamiento estadístico del operador, se muestra que el resultado de la ecuación (6) se da aproximadamente mediante:

$$\Psi[s(n)] \approx \Psi[x(n)] + w(n). \quad (7)$$

donde $w(n)$ es un proceso gaussiano. La salida queda entonces dominada por la energía de los clics, a la vez que posee un ruido aditivo gaussiano.

El operador de Teager-Kaiser se aplica a cada ventana de 10 s de cada hidrófono. La figura 3.2 muestra el resultado cuando se aplica el operador en un clic y la figura 4.2 muestra el resultado en una señal bruta como la de la figura 4.1.

Por otra parte, el ruido de fondo se ha convertido en gaussiano gracias al operador de Teager-Kaiser.

Según la invención, la etapa de filtrado siguiente consiste en efectuar una etapa de decimación tomando la media de la señal en varias ventanas.

El muestreo puede ser de varias decenas de kHz y la duración de un clic es aproximadamente de 20 ms, por lo que se procede en primer lugar a una decimación de un factor N haciendo la media de las N muestras adyacentes con objeto de obtener una representación sencilla del clic. Esta decimación tendrá por efecto reducir la precisión temporal de los picos a N/F_e , donde F_e es la frecuencia de muestreo, y reducir la varianza del ruido de un factor N.

La figura 3.3 muestra el detalle de un clic decimado de un factor 100 (frecuencia de muestreo de la señal bruta = 48 kHz). Se obtiene una representación simple del clic, de manera que desde un punto de vista temporal, se parece a un pico. Esta decimación permite asimismo reducir el tamaño de los datos, ya que el filtrado posterior debe tener en cuenta menos datos, lo que contribuye a reducir significativamente el tiempo de cálculo con relación a las demás técnicas.

La figura 5 muestra el resultado de la decimación en esta ventana de 10 s en una cadena de clics como la de la figura 4.1. Las muestras son menos numerosas y se identifican claramente los clics mediante picos y, en consecuencia, no es forzosamente necesario un filtrado adicional en el caso de una única ballena, ya que se ha reducido la componente del ruido.

Algoritmo de Mallat

Para eliminar el ruido residual, la invención prevé utilizar el algoritmo de Mallat. En efecto, se sabe que este último permite eliminar ruido de las señales que poseen un ruido aditivo gaussiano. El objetivo en este caso es filtrar la señal para eliminar el ruido gaussiano al mismo tiempo que se conserva la información, es decir los clics.

Se recuerda en primer lugar el principio del algoritmo. El algoritmo de Mallat describe una transformación en ondículas discretas utilizando el análisis de multiresolución. Esto consiste en descomponer la señal según un plano de alta frecuencia y un plano de baja frecuencia, Esta descomposición se efectúa gracias a dos filtros g y h que forman una base denominada de Haar:

$$h = \frac{[1 \quad 1]}{\sqrt{2}} \text{ et } g = \frac{[1 \quad -1]}{\sqrt{2}}, \quad (8)$$

El filtro h es un filtro de paso bajo, y g un filtro de paso alto, ambos con la misma frecuencia de corte. Se trata de filtros espejo conjugados. Permiten calcular la descomposición de una señal en una base ortonormal de ondículas. La señal que se va a analizar está representada por un conjunto de detalles d , y una aproximación que corresponde a la última resolución, esto se denomina la representación en ondículas de la señal. Se ha mostrado que los coeficientes de ondículas de fuertes amplitudes presentaban una relación de señal sobre ruido favorable y a la inversa. Se utiliza esta propiedad para eliminar el ruido en nuestra señal descompuesta. Tras haber aplicado el algoritmo de Mallat a la señal a la salida del operador de Teager-Kaiser en ventanas de 10 s ($N=4800$), se genera y descompone de la misma manera un ruido b gaussiano, reducido y centrado del mismo tamaño. Se calcula la varianza $\sigma_{B, n}$ de los coeficientes $B_{i, n}$ del plano de detalle n del ruido b anterior, y se aplica una umbralización denominada universal a cada coeficiente $C_{i, n}$ de cada plano de detalle n de la señal, con

$$C_{i,n} = \begin{cases} C_{i,n} & \text{si } |C_{i,n}| > \text{thres} * \sigma_{R,n} * \sigma_N \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (9)$$

5 donde thres es el coeficiente de umbralización y σ_N la varianza del ruido en la señal de 10 s. Para estimar σ_N , se calculan las varianzas de la señal bruta (es decir la señal de interés más el ruido), preferentemente en ventanas de 100 muestras que se solapan al 80 %.

10 σ_N está considerada como la máxima verosimilitud de las varianzas anteriormente calculadas. La máxima verosimilitud es un método que consiste en tomar la estimación de varianza más probable entre las distintas varianzas calculadas. Para ello, se toma la media de las varianzas que han aparecido más. Esto permite evitar seleccionar manualmente una parte de la señal sin señal de interés. En efecto, el ruido es distinto en cada hidrófono, y evoluciona con el transcurso del tiempo, por lo que sería demasiado fastidioso realizar una selección manual. Dado que la varianza de un clic es grande, y dado el tamaño de las ventanas de estimación de la varianza, la duración de un clic y el número de clics por ventana (1 clic por segundo de media para una ballena), la máxima verosimilitud de las varianzas calculadas tiene la mayor probabilidad de ser σ_N .

15 En la literatura, se ofrecen numerosas variantes del coeficiente thres según el tipo de datos que se procesan. Aquí, se utiliza la umbralización denominada universal (lo que hace que este procedimiento sea totalmente independiente), que consiste en utilizar:

$$20 \quad \text{thres} = \sqrt{2 \cdot \log e(N)}. \quad (10)$$

donde N es el número de coeficientes de ondículas en el plano umbralizado.

25 Finalmente, tras haber efectuado la etapa de umbralización, se reconstruye la señal a la que se ha retirado el ruido. El algoritmo de Mallat permite llevar a cabo la interesante prestación, en el caso de varias ballenas, de guardar los picos secundarios, es decir aquellos muy próximos al ruido, a la vez que elimina este último. A continuación, se toma la raíz cuadrada de la señal a la salida del algoritmo de Mallat, se comprueba la transitividad de las TDOA para obtener tripletes coherentes y se realiza una regresión no lineal. Se obtienen así varios puntos de posición x,y,z (t) para cada ballena, como se ha representado en la figura 10.

30 Como alternativa con relación a una etapa de filtrado 13 empleando los algoritmos de Teager Kaiser y Mallat, una variante de la invención prevé un filtrado adaptado estocástico, en adelante filtrado FAS.

35 El filtrado adaptado estocástico (FAS) es un método de filtrado que se utiliza aquí para llevar a cabo la detección de clics.

Se considera un clic como una señal aleatoria gaussiana, al igual que el ruido del mar.

40 Se considera que A es la matriz de varianza-covarianza de un clic y B la del ruido del mar. Los vectores del FAS son entonces los vectores propios de la matriz $B^{-1}A$. El filtrado consiste en seleccionar el vector propio correspondiente al mayor valor propio de la matriz $B^{-1}A$ y en multiplicar dicho vector propio por la señal, en ventanas de tiempo deslizantes. Se obtiene así una señal filtrada mediante el método FAS. La señal filtrada se denomina una funcional, de la que se muestra un ejemplo en la figura 6.2, que es el resultado del filtrado FAS aplicado a la cadena de clics de la figura 4.1. Para distinguir los clics en la señal filtrada, se debe elegir un umbral de detección. Todos los valores por encima de dicho umbral se consideran correspondientes a la presencia de un clic.

Los umbrales de detección se evalúan gracias a la varianza del ruido y las curvas COR (Característica Operativa de Recepción) del detector, con el fin de tener una tasa de falsa alarma de por ejemplo el 1 %.

50 Cálculo de las TDOA, según la etapa 15 de la figura 1

Una buena estimación de las TDOA requiere primero un buen filtrado, motivo por el cual la invención prevé utilizar un filtrado del tipo operador de Teager-Kaiser, seguido del algoritmo de Mallat, o un filtrado adaptado estocástico, como se ha descrito anteriormente. Este buen filtrado generará picos de TDOA más claros en los intercorrelogramas, lo que, combinado con la recuperación de un gran número de TDOA, permitirá estimaciones de trayectorias múltiples, lo que no permiten los procedimientos del estado de la técnica.

60 Con referencia a la figura 8, las señales de los distintos hidrófonos están intercorrelacionadas en ventanas de 10 segundos para estimar las diferencias de tiempos de llegada a los hidrófonos (Time Delay Of Arrival, es decir TDOA).

En la figura 8, se ha representado el ejemplo de las señales tras su filtrado mediante Teager-Kaiser y Mallat, para los hidrófonos 1 y 2. Se ven por lo tanto las señales de salida de filtrado en el caso de una ballena, detectada por 2

hidrófonos, a saber, los hidrófonos 1 y 2.

El algoritmo de base para determinar las TDOA que corresponden potencialmente a clics es el denominado de Glotin-Giraudet: se calculan las TDOA intercorrelacionando las ventanas de 10 s de cada par de hidrófonos. Sirven para la regresión múltiple no lineal para estimar las posiciones de la o las trayectorias.

En teoría, la posición en abscisa del pico más elevado corresponde a la TDOA del clic de una ballena, es decir la TDOA₁ en la figura 8. Solo existe una TDOA real por par de hidrófonos y por ballena. En caso de presencia de clics de varias ballenas, habrá tantas TDOA reales como ballenas. Pero, con objeto de asegurarse de tener entre los distintos picos el que corresponde a los clics de una ballena, se recogen preferentemente varias TDOA.

En la figura 7, mostramos cinco TDOA, pero el procedimiento de esta patente permite conservar hasta quince TDOA por ventana de análisis, permaneciendo a la vez en tiempo real, incluso hasta treinta y cinco TDOA si la potencia de cálculo disponible lo permite.

Por lo tanto, n ($5 \leq n \leq 35$) TDOA $(i, j) = T_j - T_i$ de los hidrófonos (i, j) se calculan conservando el valor del tiempo correspondiente a los n TDOA valores más elevados en el intercorrelograma, para cada par de hidrófonos. La precisión de cada TDOA es relativa a la eventual operación de decimación (en nuestro ejemplo es de ± 2 ms).

Como se muestra en la parte inferior de la figura 7, el intercorrelograma de las dos señales presenta picos, de los que se guarda una cantidad correspondiente a n TDOA. En el caso con una ballena, se puede recuperar así la verdadera TDOA, dada la buena calidad de los datos. Para cada pico, se observa el valor en abscisa, que es la diferencia de tiempo entre dos hidrófonos, sabiendo que puede ser positiva o negativa en función del hidrófono tomado para referencia.

Para detectar debidamente varias ballenas, lo que es un aspecto importante del procedimiento, se debe recoger un máximo de TDOA potenciales, es decir los máximos de las ventanas de los intercorrelogramas de cada par de hidrófonos. Un buen compromiso de valor para n TDOA entre tiempo de cálculo y contenido informativo de las TDOA puede tomarse en $n=15$. Por debajo de este número, existe el riesgo de perder TDOA reales y, por encima de dicho número, el tiempo de cálculo debido a la etapa 17 de determinación de las TDOA coherentes descrita más adelante se vuelve problemático para garantizar un cálculo en tiempo real con un simple ordenador personal.

Cabe observar que no se distingue a priori el caso con una o con varias ballenas (dado que su número es desconocido al principio). Por lo tanto, por defecto, y si el PC es válido, se toma $n=15$.

Por lo tanto, tenemos en la salida 16 de la figura 1 un número n TDOA de tiempos que son TDOA potenciales, a las que se va a aplicar una etapa 17 de determinación, de entre todas estas TDOA potenciales, de las que son coherentes entre ellas, como se describe más adelante.

Pero antes de la determinación de las TDOA coherentes, la invención prevé a modo opcional una etapa de detección y eliminación de los ecos, consistente en eliminar las TDOA generadas por los ecos debidos a la reflexión en la superficie y el fondo del mar.

45 Eliminación de las TDOA debidas a los ecos según la etapa 21 de la figura 1

Se hace referencia a la figura 8. Según un primer método de eliminación de los ecos, se procede mediante autocorrelación de las señales de varios hidrófonos.

50 Existe un eco para cada pico (en el caso de una ballena y cuando la señal es limpia), y se referencia $E(i)$ la diferencia de tiempo entre el pico y el eco, donde i es el i -ésimo hidrófono. Se observa en la parte superior de la figura 8 el eco E1 con relación al hidrófono 1 y, abajo, el eco E2 con relación al hidrófono 2.

Se efectúa entonces una autocorrelación de cada señal de hidrófono. Se toma el lóbulo secundario más elevado, y si alcanza cierta proporción (1/5) con relación al pico principal que corresponde a la energía, el valor en abscisa del pico secundario es el valor $E(i)$ del eco para el hidrófono i . En el caso contrario, se considera que no existe eco. Por lo tanto, conociendo los ecos $E(i)$, se puede identificar las TDOA generadas por los ecos, con el fin de eliminar estas TDOA.

60 Las TDOA_x que verifican una de las relaciones (11) siguientes con relación a la TDOA₁ se eliminan por ser debidas a ecos:

$$\begin{aligned} TDOA_x(i, j) - TDOA_1(i, j) &= k * E(i) \pm 0.002, k = \{1, 2\}, x \in \{2..nbTDOA\} \\ TDOA_x(i, j) - TDOA_1(i, j) &= -k * E(j) \pm 0.002, k = \{1, 2\}, x \in \{2..nbTDOA\} \end{aligned} \quad (11)$$

Según un método alternativo, se puede proceder a la eliminación de los ecos utilizando una de las propiedades de los ecos, que es el hecho de que se prolongan en el tiempo (véase por ejemplo el eco representado en la figura 8.2 que se extiende sobre 2.000 muestras de la señal), debido a las distintas capas de agua que atraviesa la señal reflejada, lo que retrasa algunas frecuencias. Como se observa comparando las figuras 8.2 y 8.4, las señales de clic y de eco poseen un perfil muy distinto, en duración y en número de muestras.

Para ello, se selecciona un tramo de señal de 30 ms alrededor de cada fecha de detección, lo que corresponde potencialmente a un clic o un eco.

10 Como el valor absoluto de la señal de eco varía muy deprisa, para detectar y eliminar los ecos, se procede de la siguiente manera:

15 - Se determina la envuelta de la señal. A tal efecto, se toma el valor absoluto de la señal (filtrada con ayuda de uno de los métodos de filtrado descritos anteriormente) y, a continuación, se realiza la media y se normaliza dicho valor absoluto en ventanas de, por ejemplo, 100 muestras (para 48 kHz), lo que pone en evidencia una envuelta de la señal, como se ilustra en la figura 8.3 para un eco, y en la figura 8.5 para un clic. Se observa de hecho que la forma de la envuelta de un clic es muy distinta de la de un eco.

20 - A continuación, se integra dicha envuelta (lo que significa calcular el área dispuesta bajo la envuelta de la figura 8.3 o de la figura 8.5), y se compara el resultado (en este caso un área de 499.2485 para el eco y un área inferior de 236.6896 para el clic) con un umbral predeterminado de manera experimental.

25 - Teniendo en cuenta la prolongación en el tiempo de los ecos con relación a los clics, el área de la envuelta correspondiente a un eco será muy superior al área de una señal correspondiente a un clic. En consecuencia, el especialista en la materia podrá fácilmente determinar experimentalmente un umbral tal que la envuelta de las señales por encima de este umbral corresponda a ecos (y se eliminen las señales correspondientes), mientras que la envuelta de las señales por debajo de dicho umbral correspondan a clics, y se conserven las señales correspondientes.

30 Se pueden emplear incluso otros métodos de eliminación de los ecos en el marco de la invención. De este modo, se puede efectuar una descomposición de la señal mediante ondículas, utilizando especialmente el algoritmo denominado de "matching pursuit" de Mallat, que está disponible en un producto llamado "Matching Pursuit Toolkit".

35 Se podría efectuar asimismo una búsqueda de firma de los clics, denominada "signature matching" en terminología anglosajona, que consiste en buscar por ejemplo correlaciones máximas con señales conocidas de clics.

Estos dos métodos pueden emplearse en tiempo real en una herramienta denominada MPTK-IRISA.

40 En definitiva, los métodos de eliminación de eco hacen que sea posible por tanto conservar únicamente los clics en la señal, con una completa eliminación del ruido.

45 Por lo tanto, en principio, después del cálculo y la eliminación de los ecos, se han eliminado las TDOA generadas por dichos ecos y, en consecuencia, entre las TDOA restantes figuran las verdaderas TDOA correspondientes a los clics de las ballenas.

Determinación de las TDOA coherentes, según la etapa 17 de la figura 1

50 El principio consiste en buscar las TDOA que proceden de una misma fuente, lo que consiste en comprobar la transitividad de las TDOA. Existen cuatro hidrófonos i, j, k, h. Por lo tanto, existe, para una TDOA(i,j) dada, un máximo de nbTDOA = 15 valores (o menos en función de las eliminaciones que se han podido hacer durante el cálculo del eco anterior).

55 Solo se conservan las TDOA que verifican las cuatro ecuaciones siguientes (12), y se numeran las TDOA que proceden de la misma fuente, con objeto de no mezclar los valores durante la regresión prevista más adelante.

60 Para emplear el principio de coherencia, se buscan por lo tanto en cada ventana de 10 s los sextetos de TDOA generadas por la misma fuente, es decir que verifiquen la coherencia de su suma entre ellas. Un cuarteto de hidrófonos (i, j, k, h) localiza la misma fuente con las TDOA (u, v, w, x, y, z) si se verifican las cuatro relaciones (12) siguientes:

$$\begin{aligned}
 TDOA_u(i, j) + TDOA_v(j, k) &= TDOA_w(i, k) \pm er, \\
 TDOA_u(i, j) + TDOA_x(j, h) &= TDOA_y(i, h) \pm er, \\
 TDOA_w(i, k) + TDOA_z(k, h) &= TDOA_y(i, h) \pm er, \quad (12) \\
 TDOA_v(j, k) + TDOA_z(k, h) &= TDOA_x(j, h) \pm er.
 \end{aligned}$$

donde er es igual a tres veces la incertidumbre generada por la decimación de la señal bruta (en nuestro ejemplo, er = 3*0,002 = 0,006).

5 En el procedimiento según la invención, es posible tener nbTDOA hasta 35, conservando al mismo tiempo un procesamiento en tiempo real en un ordenador del tipo PC. En efecto, tomando el sistema entero (12) compuesto por cuatro ecuaciones (de 1 a 4), teniendo cada TDOA nbTDOA valores posibles, existe un número igual a nbTDOA⁶ verificaciones del sistema. Un aspecto interesante del procedimiento consiste en comprobar en primer lugar la primera ecuación para todos los valores de TDOA que la componen, lo que da un cálculo en nbTDOA³. Para cada una de las ecuaciones 2, 3, 4, su verificación solo se realiza en caso de que se verifique la ecuación que las precede. Se reduce así considerablemente el tiempo de cálculo que responde entonces a una complejidad entre nbTDOA³ y nbTDOA⁶. Se gana entonces un tiempo de cálculo de más de un factor 100 con relación a una versión de análisis directo.

15 Los sextetos de TDOA(u,v,w,x,y,z) que no responden al sistema de ecuaciones (12) son eliminados, por no ser coherentes.

20 Para cuatro hidrófonos, se seleccionan tres TDOA independientes, en relación con un hidrófono. Se obtienen por lo tanto, a la salida 18 de la etapa 17 de la figura 1, tres TDOA independientes, que se utilizan a continuación en la etapa 20 para calcular la posición de la fuente de emisión de los clics, mediante minimización de la función de error de los mínimos cuadrados en la posición, como se explica a continuación.

Cálculo de la posición instantánea Xs(t) de la fuente de los clics

25 Se efectúa al efecto una regresión múltiple no lineal según la etapa 19 de la figura 1, gracias al algoritmo de Gauss-Newton, utilizando por ejemplo una velocidad del sonido en el agua constante de 1500 ms⁻¹. La posición de la fuente se denota X. Las tres TDOA independientes {TDOA_u(i,j), TDOA_w(i,k), TDOA_y(i,h)} de cada cuarteto de hidrófonos (i, j, k, h) se utilizan para minimizar el error LMS (Least Mean Square) en el sistema de las tres ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}
 Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_j) &= TDOA_u(i, j) * c, \\
 Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_k) &= TDOA_w(i, k) * c, \quad (13) \\
 Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_h) &= TDOA_y(i, h) * c.
 \end{aligned}$$

$$X_s = \begin{bmatrix} x \\ y \\ y \end{bmatrix}^s \text{ y el hidrófono}$$

35 donde Q(X_s, X_a) es la distancia euclidiana entre la fuente de coordenadas desconocidas de coordenadas X_a conocidas y c = 1500 ms⁻¹.

En detalle, durante la regresión no lineal, se minimiza recursivamente la función:

$$\min_{X_s} (f(X_s)) = f_1(X_s)^2 + f_2(X_s)^2 + f_3(X_s)^2, \quad (14)$$

40 donde

$$\begin{aligned}
 f_1(X_s) &= \sqrt{\sum_{l=1}^3 (X_s(l) - X_i(l))^2} - \sqrt{\sum_{l=1}^3 (X_s(l) - X_j(l))^2} + d_{i,j}, \\
 f_2(X_s) &= \sqrt{\sum_{l=1}^3 (X_s(l) - X_i(l))^2} - \sqrt{\sum_{l=1}^3 (X_s(l) - X_k(l))^2} + d_{i,k}, \\
 f_3(X_s) &= \sqrt{\sum_{l=1}^3 (X_s(l) - X_i(l))^2} - \sqrt{\sum_{l=1}^3 (X_s(l) - X_h(l))^2} + d_{i,h},
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

5 con $d_{i,j} = \text{TDOA}_{u(i,j)} \cdot c$ la TDOA estimada entre el hidrófono i y el hidrófono j , y x_a las coordenadas del hidrófono a . La función se minimiza preferentemente mediante la técnica de Levenberg-Marquardt. Si la solución de (14) es $X_{estim\ c'}$ el error LMS se escribe:

$$f(X_{estim\ c'}) = f_1(X_{estim\ c'})^2 + f_2(X_{estim\ c'})^2 + f_3(X_{estim\ c'})^2 \tag{16}$$

10 Una posición X de la fuente de los clics se considera correcta cuando $f(X_{estim\ c'}) < 1$ en este ejemplo, o a cierto umbral de manera general, de lo contrario, no se tiene en cuenta.

Determinación y representación de las trayectorias de las ballenas

15 Con referencia a la figura 10, que muestra las sucesivas posiciones de cuatro ballenas en los ejes x,y,z , en función del tiempo, habiéndose representado cada ballena mediante un símbolo distinto. Cada resolución del sistema (13) de 3 ecuaciones da una única posición $X_s(x,y,z)$. Como existen varios juegos de tripletes independientes de TDOA coherentes, se resuelve este sistema de ecuaciones para cada juego, lo que proporciona varios puntos en la figura 10 para cada ballena y cada instante considerado, tanto en vista desde arriba como en vista en cada eje x,y,z en función del tiempo.

20 La figura 11 es equivalente a la figura 10 con un número de TDOA más elevado (35), y se observa que las trayectorias en x,y,z y también en vista desde arriba en el plano x,y , son más precisas.

25 Una vez que se han identificado ventanas de tiempo como participantes en la convergencia de una posición X_s mediante regresión, el procedimiento según la invención extrae dichas ventanas y los clics que contiene, y las etiqueta utilizando los valores de TDOA como procedentes de la fuente situada en S . Los continuos espacio-temporales de las posiciones permiten aislar trayectorias individuales y, por lo tanto, unir clics a una ballena en particular (mediante agrupación automática del vecino más próximo, por ejemplo). Se sabe según Laplanche et al. que la forma de los clics identifica la edad y el sexo de las ballenas, y puede servir para estimar la actividad de la ballena. La extracción de clics en medio de ruido o varias cadenas de clics de distintas ballenas constituye por lo

30 Alisamiento de las trayectorias

35 De acuerdo con estos resultados, se estima una posición para cada individuo, varias veces por minuto (una cada 10 s en el caso idóneo). En consecuencia, algunas zonas no poseen punto y forman espacios vacíos en las trayectorias. Se llega entonces a los límites del sistema, que no puede estimar más posiciones ya que existe demasiado recubrimiento de clics en algunas ventanas de detección. Se podrá remediar este problema alisando las trayectorias, como se muestra en la figura 12, según métodos de alisamiento conocidos por sí mismos, por ejemplo un método de interpolación lineal.

45 El alisamiento lineal o mediante splines de las trayectorias permite estimar las posiciones desconocidas de la ballena entre dos puntos de paso obtenidos (figura 10). Esto permite determinar las TDOA que habrían generado estas posiciones, ya que la posición de la ballena y las coordenadas de los hidrófonos son conocidas. Se puede entonces volver a la grabación y etiquetar los clics en tramos de la señal cuyo filtrado y las intercorrelaciones no han conseguido extraer información.

Estimación del perfil de celeridad

La invención, como se ha descrito hasta ahora, emitía la hipótesis de la utilización de cuatro hidrófonos y de un perfil de celeridad constante de 1500 m/s. Cabe subrayar que, con un hidrófono adicional (es decir 5 hidrófonos por lo menos) es posible, añadiendo un grado de libertad a las ecuaciones (13), estimar un perfil de celeridad característico del medio en el momento de la grabación. Se evita entonces un perfil de celeridad modelizado para el período afectado. El 5º hidrófono añade un grado de libertad al sistema y permite efectuar la regresión para estimar el vector de posición de la fuente-celeridad θ en cada ventana de 10 s, con:

$$\theta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ c \end{bmatrix} \quad (17)$$

10 Se utiliza entonces el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_j) &= TDOA_u(i, j) * c, \\ Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_k) &= TDOA_w(i, k) * c, \\ Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_h) &= TDOA_v(i, h) * c, \\ Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_l) &= TDOA_v(i, l) * c, \end{aligned} \quad (18)$$

$$X_s = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

15 donde $Q(X_s, X_a)$ es la distancia euclidiana entre la fuente X_s y el hidrófono de coordenadas X_a , $TDOA_u(i, j)$, $TDOA_w(i, k)$, $TDOA_v(i, h)$, $TDOA_v(i, l)$ las cuatro TDOA independientes y c la norma de la celeridad del sonido en el medio, que será dependiente del tiempo de la grabación. A continuación, se reinyecta $c(t)$ en el sistema de ecuaciones (13). La calidad de las estimaciones espaciales queda entonces mejorada. Por supuesto, la incorporación de hidrófonos adicionales mejora la calidad de los resultados, sin reducir drásticamente la velocidad de ejecución.

20 Sistema para poner en marcha el procedimiento de trayectografía según la invención

Con el fin de poner en marcha el procedimiento de la invención, basta con utilizar un ordenador estándar dotado de una tarjeta de recogida mediante hidrófono, y capaz de ejecutar un programa informático que aplique las etapas de procesamiento descritas anteriormente. Además, se requiere un mínimo de cuatro hidrófonos (que muestreen a por lo menos 400 Hz en el caso del cachalote) separados por entre unas decenas y unos centenares de metros. Pueden ser fijos y estar colocados en el fondo del mar o en una costa, pero también pueden estar dispuestos en barcos o diferenciables en la superficie o en el agua si llevan asociado un sistema del tipo GPS. Las grabaciones deben ser de varios minutos para tomar en cuenta el desplazamiento de los cetáceos y obtener trayectorias.

30 Preferentemente, el sistema de puesta en marcha del procedimiento se compone de un kit que se suelta en el mar e incluye los N-1 hidrófonos flotantes a una distancia de algunas decenas de metros, dotados de un sistema de localización por GPS o de una pequeña baliza emisora (para autolocalización de los hidrófonos). El n-ésimo hidrófono (con las mismas características) se sumerge a unas decenas de metros por debajo los demás. De este modo, las derivas de los hidrófonos pueden calcularse por un GPS o emisor sonoro situado en cada hidrófono para relocalizarlos con precisión cada minuto en función de la posición de un hidrófono de referencia (en el casco de un barco averiado, por ejemplo). Los hidrófonos están unidos por cable o por teléfono móvil de última generación, al PC de a bordo, por lo que es posible entonces la trayectografía en tiempo real de las ballenas detectadas.

40 Con referencia a la figura 13, muestra un organigrama de un procedimiento que permite utilizar y explotar las posiciones (localización en x,y,z) obtenidas (en 19) de las ballenas gracias al procedimiento de trayectografía, para su estudio comportamental.

45 A partir de las TDOA y de la señal en cada hidrófono, se puede proceder al etiquetado 23 de la señal y determinar su energía y el intervalo interclíc (ICI). Además, la localización en 19 permite determinar la trayectoria y, en consecuencia, otros parámetros tales como la evolución de la distancia de la ballena, el ángulo de su cabeza y la velocidad de la ballena con relación al hidrófono i . Estos datos combinados en 24 con los resultantes del etiquetado pueden por lo tanto integrarse, anotarse y estructurarse con la ayuda de ficheros del tipo XML, y finalmente almacenarse automáticamente en una base de datos.

50 Finalmente, pueden analizarse en 25, a voluntad, con objeto de entender mejor el comportamiento de las ballenas en distintas situaciones: caza, ingestión de calamares, búsqueda de presas, etc.

Ventajas de la invención

5 El procedimiento de trayectografía según la invención cumple los objetivos fijados. Por lo tanto, la invención permite observar por la vía pasiva, sin perturbación alguna del medio o las ballenas, un grupo de varias ballenas que evolucionan a varios centenares de metros bajo la superficie y en un área de varios kilómetros cuadrados.

10 Gracias a las etapas de preprocesamiento y de filtrado de la señal de los hidrófonos, la invención funciona para relaciones de señal/ruido (SNR) bajas sin procesamientos frecuenciales complejos, pero filtrando y analizando un número controlado de TDOA que permiten procesamientos en tiempo real.

15 La señal referenciada como "clic" o señal no estacionaria en todo el texto de la presente solicitud de patente puede sustituirse por cualquier otra señal casi estacionaria, incluso armónica, siempre que se puedan detectar eventos singulares bastante precisos en el tiempo, permitiendo dichas singularidades la datación de eventos en la señal, como los instantes de inicio de armónicos intermitentes ("on set"). Por supuesto, si la señal se propaga en un medio distinto que el agua del mar, habrá que sustituir los hidrófonos descritos en relación con el ejemplo de la trayectografía de cetáceos en medio marino por sensores adaptados a la señal acústica o electromagnética que se quiera captar.

20 El procedimiento según la invención puede ejecutarse fácilmente en tiempo real con la ayuda de un programa informático que funcione en un PC portátil del tipo "Windows™" / Matlab™ dotado de un microprocesador del tipo "Pentium™" y de una memoria activa del orden de 1 Gigabyte.

25 Es interesante subrayar que el procedimiento según la invención permite detectar y trayectografiar X fuentes con Y sensores, teniendo un número de sensores Y inferior al de las X fuentes. (De este modo, $4 \leq Y$, y X varía entre 1 y una docena, pero Y no es necesariamente superior o igual a X). La invención permite asimismo el etiquetado de las emisiones superpuestas de varias fuentes y, en el caso de los cetáceos, el análisis de su comportamiento individual y en grupo, las características de sus emisiones ligadas a su comportamiento de caza, por ejemplo (intervalo interclíc especialmente), y su recuento cuando permanecen sumergidos durante largos períodos.

30 La invención permite además estimar la celeridad media de una señal en un medio cualquiera (líquido, sólido o gaseoso, o que posea varias fases), recurriendo eventualmente a la emisión artificial de fuentes controladas.

Principales aplicaciones del procedimiento de trayectografía según la invención

35 Las aplicaciones del procedimiento de trayectografía simultánea según la invención son numerosas, en varios ámbitos. Citaremos algunas únicamente a modo de ejemplo y sin carácter limitativo alguno.

40 Las propiedades y ventajas de la invención interesan, además de algunas aplicaciones militares, a los etólogos, que poseen muy pocos datos sobre estos animales que pasan lo esencial de su vida a muy grandes profundidades (por debajo de - 1000 metros).

45 Desde un punto de vista ecológico y etológico, el procedimiento proporciona las posiciones y las trayectorias en tiempo real, así como la atribución de los clics a sus fuentes. En consecuencia, permite indirectamente el recuento de cetáceos y la determinación de su sexo y tamaño. Se pueden deducir de ello mapas de migración y estudiar las variaciones de comportamiento de los cetáceos, y ponerlos en correlación especialmente con los cambios climáticos.

50 El procedimiento según la invención define un sistema completo que permite censar varios datos que describen la actividad de los mamíferos marinos en una zona marítima dada de varios km^3 (como, por ejemplo, en un santuario como "PELAGOS" del mar de Liguria, frente a las costas de Tolón y Génova).

55 Desde un punto de vista militar, la invención permite especialmente establecer mapas instantáneos o históricos de densidad de poblaciones de cetáceos, para no interferir con los cetáceos durante maniobras militares. Asimismo, para las actividades pesqueras, dado que el uso de repelentes acústicos es poco fiable, la invención permite conocer en tiempo real la presencia de cetáceos durante la pesca y maniobrar en consecuencia.

60 Desde el punto de vista civil (ferry) y de la marina mercante, la invención permite detectar la presencia de cetáceos en las rutas marítimas comerciales, con el fin de evitar colisiones entre cetáceos y embarcaciones.

Por lo tanto, es posible apreciar mejor la presencia de los mamíferos que frecuentan una zona a lo largo de todo el año, y contribuir así a su protección mediante una mejor gestión militar del medio.

65 Gracias a la invención, es asimismo posible vigilar una zona sensible dada, como las zonas de acuicultura, puertos, etc., y llevar a cabo la detección de intrusiones por parte de cetáceos, detectando sus clics y comparando la señal detectada con un umbral de alarma. Basta con instalar en la zona 4 o 5 hidrófonos fijos unidos a la costa por medios

de comunicación alámbricos o inalámbricos, y alimentar con las señales procedentes de los hidrófonos, un servidor capaz de ejecutar el procedimiento de trayectografía de la invención y calcular umbrales de alarma. Por lo tanto, se asocia el sistema de trayectografía a medios de alarma capaces de emitir una señal de alarma cuando se detectan clics correspondientes a la presencia de uno o varios cetáceos en la señal procedente de los hidrófonos colocados en dicha zona.

5

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de trayectografía por vía pasiva de por lo menos un animal marino que emite señales sonoras en forma de cadenas de clics, especialmente por lo menos un cetáceo, en el que se procede durante ventanas de tiempo de procesamiento sucesivas a la recogida (11) de las señales brutas analógicas procedentes de una pluralidad de H hidrófonos dispuestos en el medio marino, y se convierten después dichos datos analógicos brutos en datos digitales mediante muestreo a cierta frecuencia de muestreo F_e , incluyendo además dicho procedimiento las siguientes etapas desarrolladas en tiempo real:
- 5
- 10 a. un filtrado (13,14) de los datos digitales capaz de eliminar los ruidos parásitos y de guardar (15,16), de entre los datos digitales, los que corresponden, para cada par de hidrófonos y cada ventana de procesamiento, a valores potenciales de diferencias de tiempo de llegada de las señales sonoras para alcanzar dos hidrófonos distintos, denominándose TDOA estos valores potenciales;
- 15 b. para cada par de hidrófonos, se comprueba (17) la coherencia de las TDOA obtenidas y se guarda (18) un número, denominado nbTDOA, de TDOA filtradas y coherentes entre ellas;
- c. a partir de los nbTDOA de TDOA filtradas y coherentes entre ellas, se determinan mediante regresión no lineal (19) las posiciones instantáneas sucesivas de las fuentes de los clics, y se deduce de ello (20) en tiempo real la trayectoria de dicho por lo menos un animal marino en su medio;
- 20
- procedimiento caracterizado porque incluye además una etapa de eliminación de los ecos, que consiste en:
- determinar la envuelta de la señal filtrada;
- 25
- integrar esta envuelta en ventanas de tiempo y comparar el resultado con un umbral predeterminado;
- si dicho resultado es inferior a dicho umbral predeterminado, la señal correspondiente es un clic y se conserva, y si dicho resultado es superior a dicho umbral predeterminado, la señal correspondiente es un eco y se elimina.
- 30
2. Procedimiento de trayectografía según la reivindicación 1, caracterizado porque incluye una etapa consistente en aplicar el operador denominado de Teager-Kaiser a los datos digitales correspondientes a la señal bruta, de manera que se obtiene a la salida de este procesamiento una señal compuesta por picos con una amplitud amplificada, y un ruido aditivo gaussiano.
- 35
3. Procedimiento de trayectografía según la reivindicación 2, caracterizado porque en el caso en el que la frecuencia de muestreo de las señales recogidas es muy superior a la inversa de la duración de un clic, se procede antes del filtrado a una etapa denominada de decimación mediante cálculo de media, consistente en sustituir N muestras analógicas consecutivas por su media, de manera a obtener una señal de frecuencia N veces más débil, así como un ruido de varianza reducido N veces, pero con amplitudes de señal más fuertes con relación al ruido.
- 40
4. Procedimiento de trayectografía según una cualquiera de las reivindicaciones 2 o 3, caracterizado porque la etapa de filtrado incluye una etapa consistente en aplicar a los valores digitales resultantes de la etapa de filtrado mediante el operador de Teager Kaiser y de la etapa de decimación, un algoritmo denominado de Mallat, con un umbral universal, consistente en conservar los n picos más fuertes debidos a los clics potenciales de la fuente, y en determinar, a partir de la posición de dichos picos, las TDOA potenciales correspondientes a los clics de la fuente.
- 45
5. Procedimiento de trayectografía según la reivindicación 1, caracterizado porque la etapa de filtrado incluye una etapa de filtrado adaptado estocástico para detectar los clics.
- 50
6. Procedimiento de trayectografía según la reivindicación 4 o la reivindicación 5, caracterizado porque se elige un número n de TDOA que se han de conservar en la etapa de determinación de las TDOA, que sea superior o igual a 5 e inferior o igual a 35.
- 55
7. Procedimiento de trayectografía según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque, para determinar las TDOA coherentes entre ellas, se conservan, de entre las TDOA correspondientes potencialmente a clics de la fuente, las que verifican el principio de transición de las TDOA y cumplen el sistema de ecuaciones:

60

$$TDOA_u(i, j) + TDOA_v(j, k) = TDOA_w(i, k) \pm er,$$

$$TDOA_u(i, j) + TDOA_x(j, h) = TDOA_y(i, h) \pm er,$$

$$TDOA_w(i, k) + TDOA_z(k, h) = TDOA_y(i, h) \pm er,$$

$$TDOA_x(j, k) + TDOA_x(k, h) = TDOA_x(j, h) \pm er.$$

5 donde er es igual a tres veces la incertidumbre generada por la decimación de la señal bruta, y $TDOA_x(i, j)$ designa la x-ésima TDOA potencial entre los hidrófonos i y j.

8. Procedimiento de trayectografía según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la etapa (21) de cálculo y de eliminación de eco consiste en eliminar las TDOA que verifican las siguientes relaciones:

$$10 \quad TDOA_x(i, j) - TDOA_1(i, j) = k * E(i) \pm 0.002, k = \{1, 2\}, x \in \{2..nbTDOA\}$$

$$TDOA_x(i, j) - TDOA_1(i, j) = -k * E(j) \pm 0.002, k = \{1, 2\}, x \in \{2..nbTDOA\}$$

15 donde $TDOA_x(i, j)$ designa la x-ésima TDOA potencial entre los hidrófonos i y j, $E(i)$ designa la diferencia de tiempo entre el clic y el eco en el hidrófono i, k es un número entero igual a 1 o 2, i, j son números enteros inferiores o iguales al número H de hidrófonos, x es un número entero incluido entre 2 y nbTDOA.

9. Procedimiento de trayectografía según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque para determinar, a partir de las TDOA coherentes, la posición instantánea $X_s(t)$ de un cetáceo que emite un clic, se opera una regresión no lineal según el algoritmo de Gauss-Newton utilizando las tres TDOA independientes $\{TDOA_u(i, j), TDOA_w(i, k), TDOA_y(i, h)\}$ de cada cuarteto de hidrófonos, (i, j, k, h) para minimizar el error LMS (Least Mean Square) en el sistema de las tres ecuaciones siguientes:

$$25 \quad Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_j) = TDOA_u(i, j) * c,$$

$$Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_k) = TDOA_w(i, k) * c,$$

$$Q(X_s, X_i) - Q(X_s, X_h) = TDOA_y(i, h) * c,$$

$$X_s = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

30 donde $Q(X_s, X_a)$ es la distancia euclidiana entre la fuente de coordenadas desconocidas de coordenadas X_s y el hidrófono de coordenadas X_a conocidas, y c representa la celeridad de la onda.

10. Procedimiento de trayectografía según la reivindicación 9, caracterizado porque se determina la trayectoria de dicho cetáceo a partir de las posiciones instantáneas $X_s(t)$ sucesivas.

35 11. Sistema de trayectografía por vía pasiva de una pluralidad de cetáceos, caracterizado porque incluye:

40 a. una red de por lo menos cuatro hidrófonos dispuestos en el agua en el área de detección, con cada hidrófono conectado a una tarjeta de recogida y digitalización de las señales acústicas detectadas por los hidrófonos;

b. un ordenador conectado a las tarjetas de recogida y que contiene un programa informático aplicativo de detección que aplica las etapas del procedimiento de detección según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10.

45 12. Uso del procedimiento de trayectografía por vía pasiva según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado porque se equipa una zona de mar que se quiere vigilar con un sistema de trayectografía según la reivindicación 11, y se asocia a medios de alarma capaces de emitir una señal de alarma cuando se detectan clics correspondientes a la presencia de uno o de varios cetáceos en la señal procedente de los hidrófonos colocados en dicha zona.

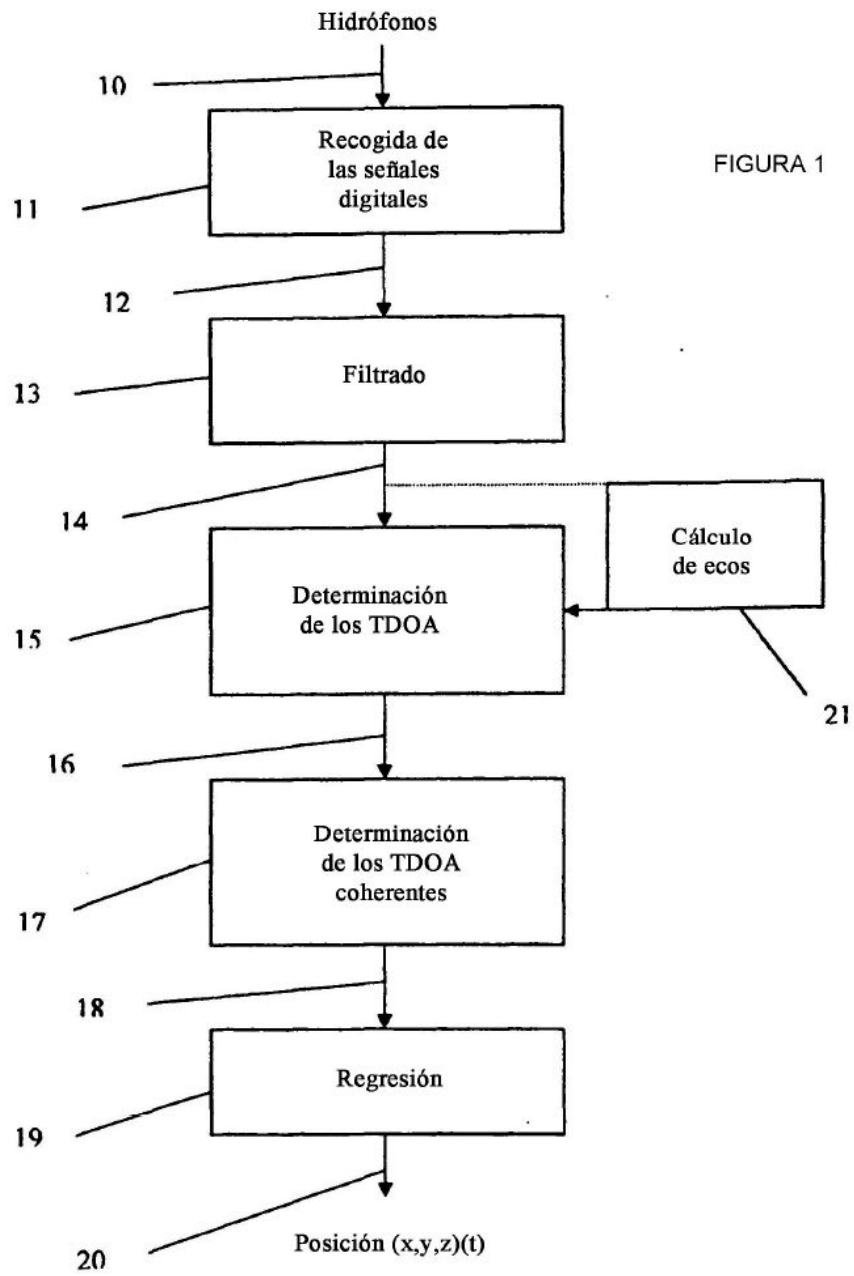
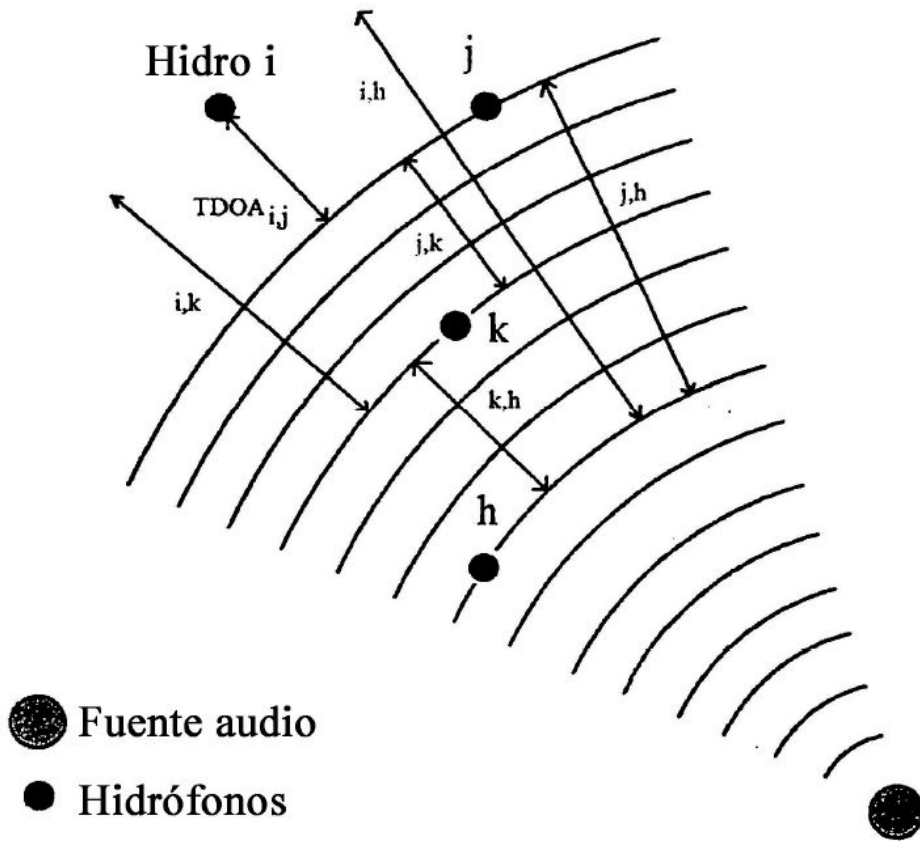


FIGURA 2: Principio de transitividad de los TDOA ilustrado para TDOA(i,j), TDOA(j,h) y TDOA(i,h). Los índices u, v, w, x, y, z indexan el rango de cada TDOA extraído de la inter-correlación del par de hidrófonos afectado.



$$\begin{aligned}
 TDOA_u(i, j) + TDOA_v(j, k) &= TDOA_w(i, k) \pm 0,006, \\
 TDOA_u(i, j) + TDOA_x(j, h) &= TDOA_y(i, h) \pm 0,006, \\
 TDOA_w(i, k) + TDOA_z(k, h) &= TDOA_y(i, h) \pm 0,006, \\
 TDOA_v(j, k) + TDOA_z(k, h) &= TDOA_x(j, h) \pm 0,006.
 \end{aligned}$$

FIGURA 3.1: clic de una única ballena en la señal bruta

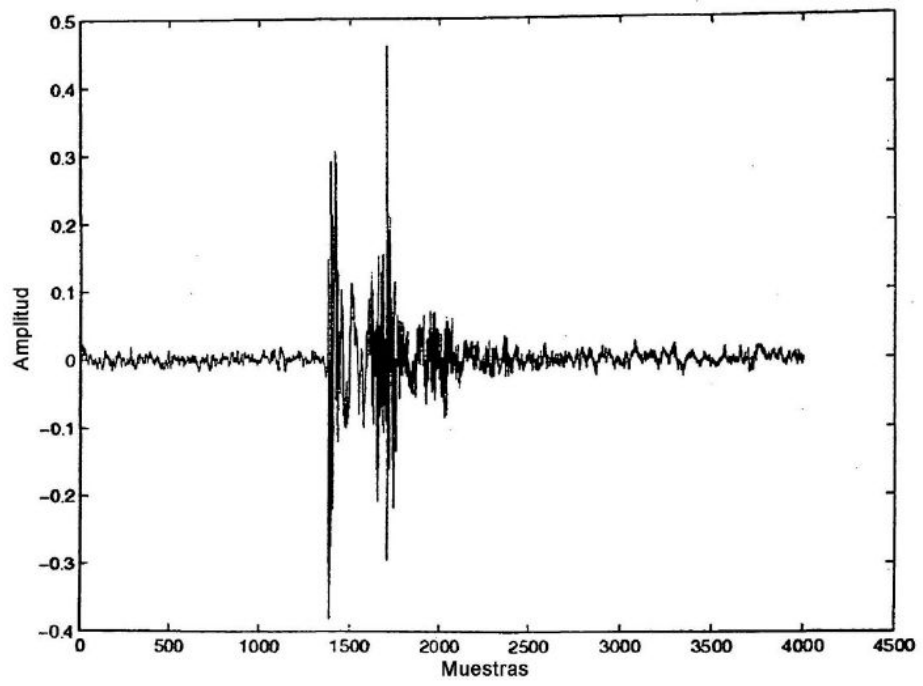


FIGURA 3.2: clic de una única ballena tras el filtrado mediante el algoritmo de Teager-Kaiser

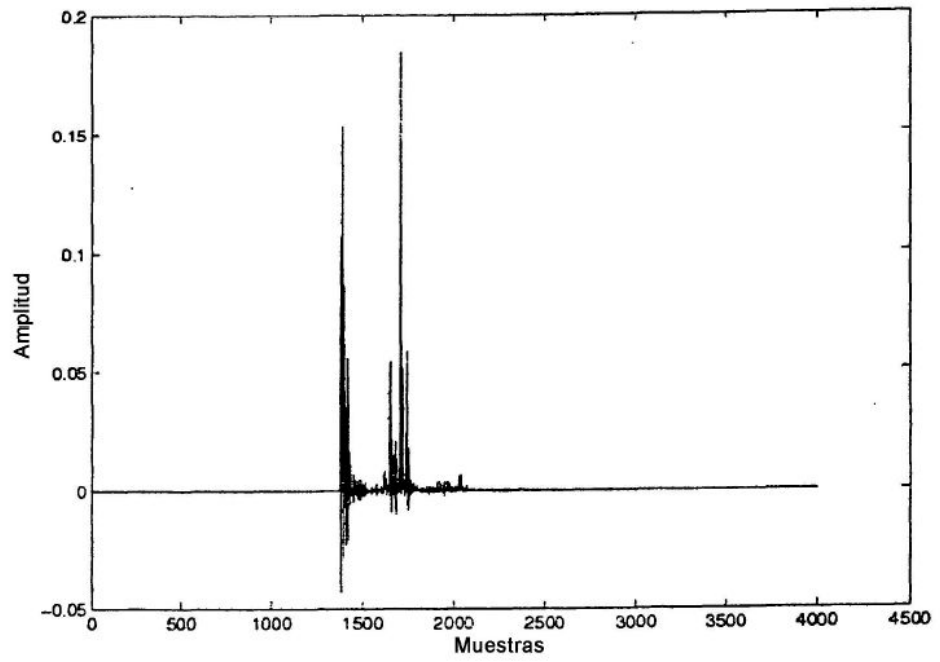


FIGURA 3.3: clic de una única ballena tras la decimación

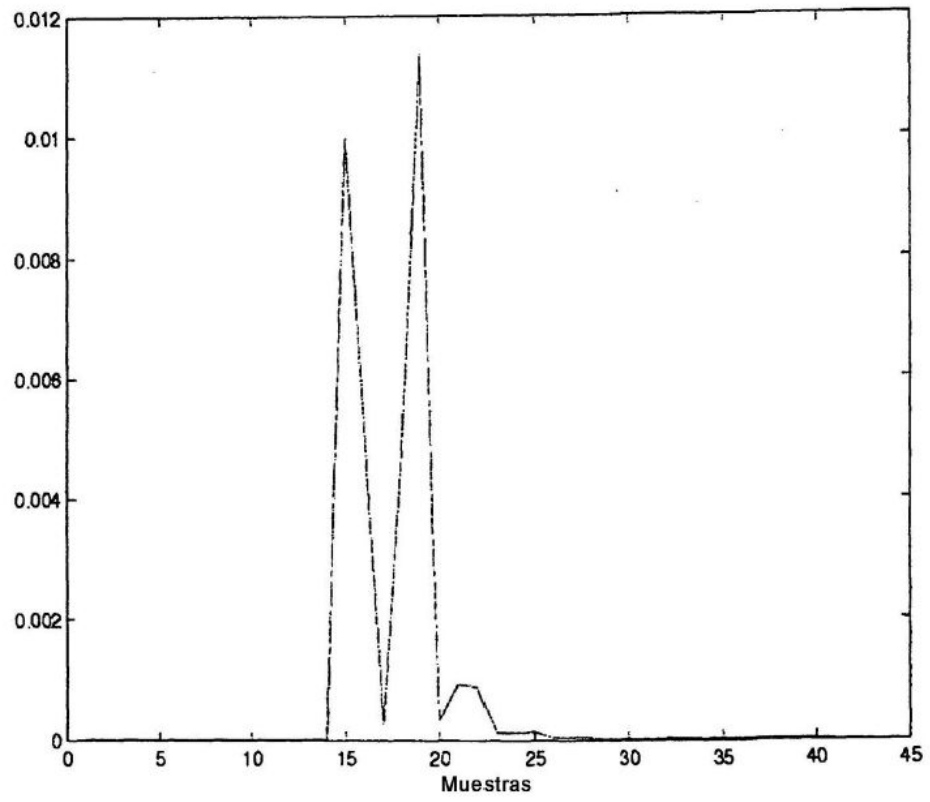


FIGURA 4.1: Cadena de clics antes del filtrado mediante el algoritmo de Teager-Kaiser, de la señal real de una única ballena

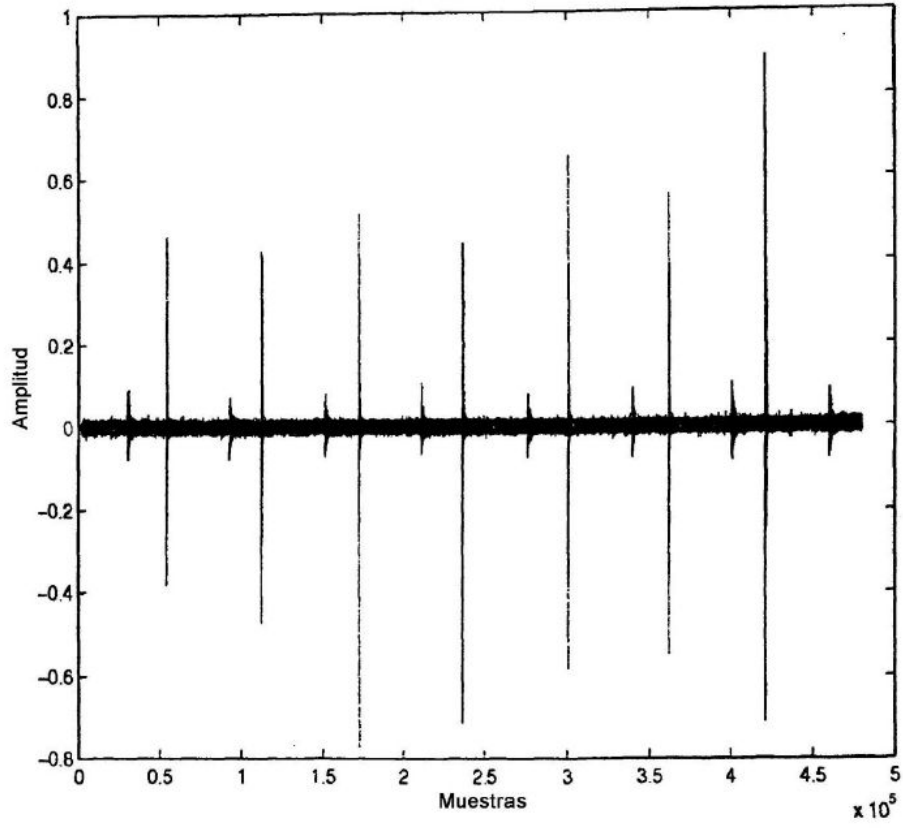


FIGURA 4.2: Cadena de clics tras el filtrado mediante el algoritmo de Teager-Kaiser, de la señal real de una única ballena

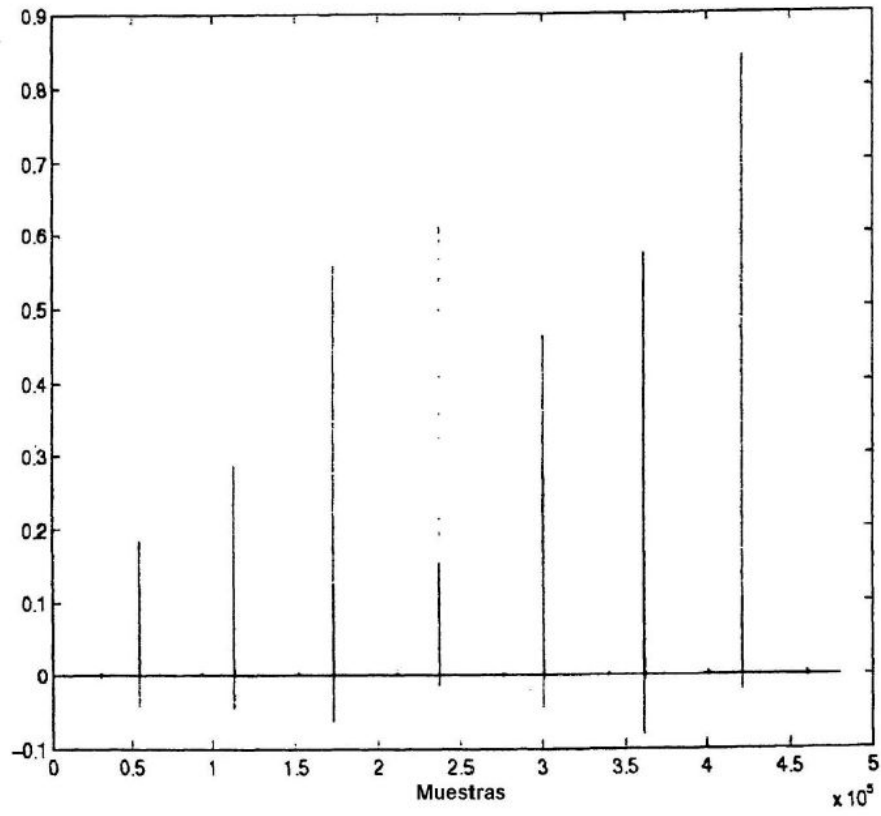


FIGURA 5: Cadena de clics de una única ballena en la señal bruta tras el filtrado Teager-Kaiser + decimación (Figura según señal real de una única ballena)

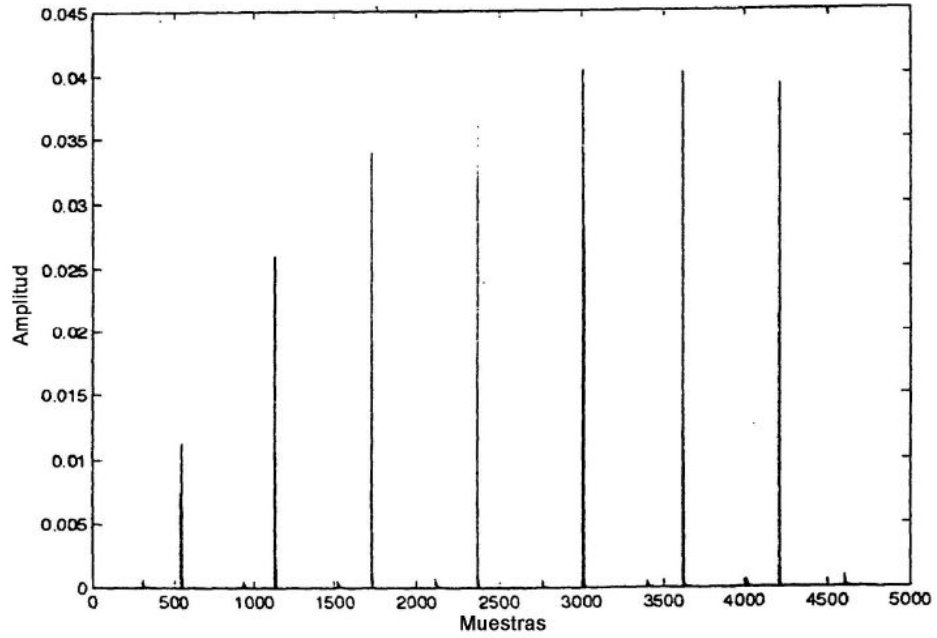


FIGURA 6.1: Cadena de clics de una única ballena en la señal bruta después del algoritmo de Mallat (y raíz cuadrada); Figura según la señal real de una única ballena

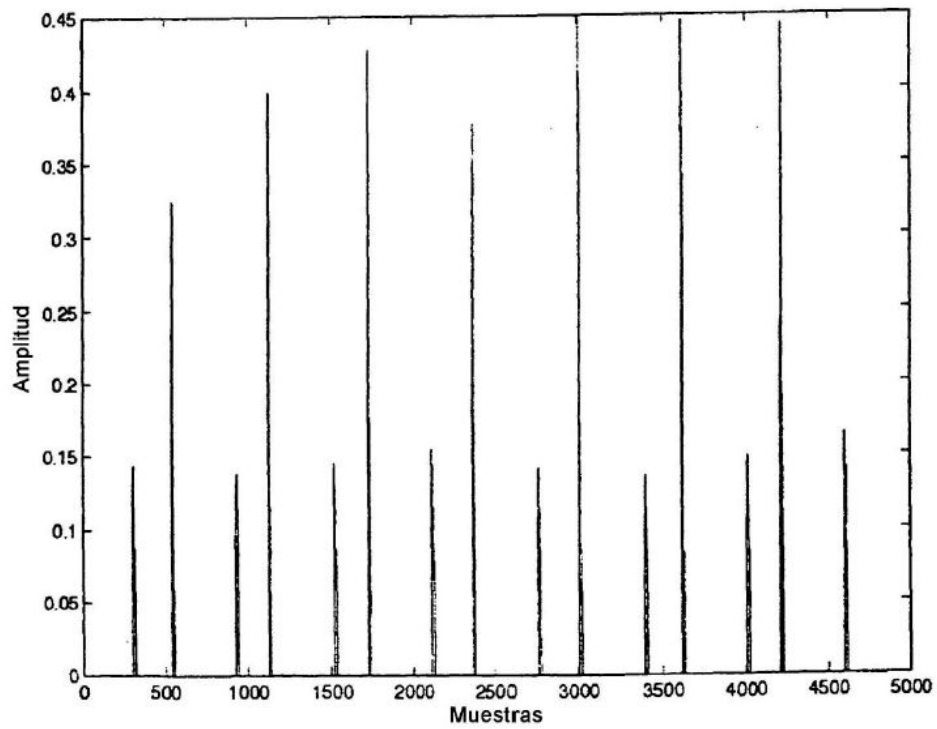


FIGURA 6.2: Cadena de clics de única ballena en la señal bruta tras el filtrado adaptado estocástico (FAS); Figura según la señal real de una única ballena

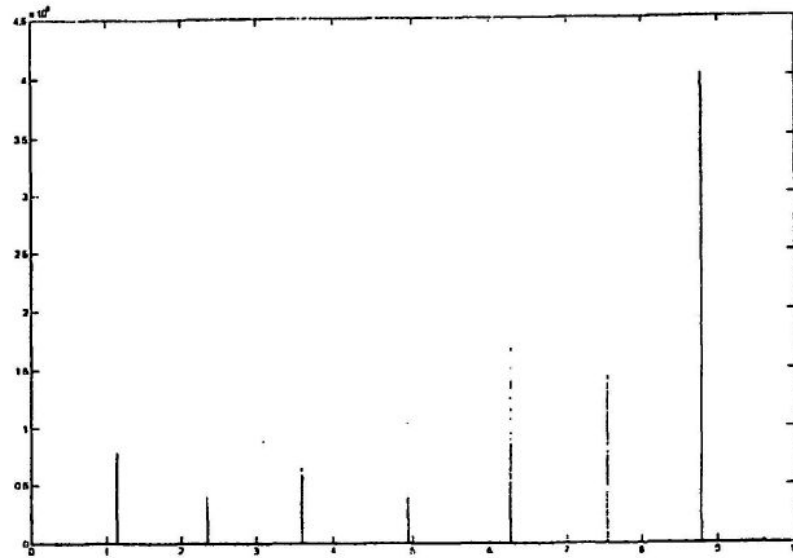


FIGURA 6.3: ampliación de Figura 6.2 en un eco seguido de un clic

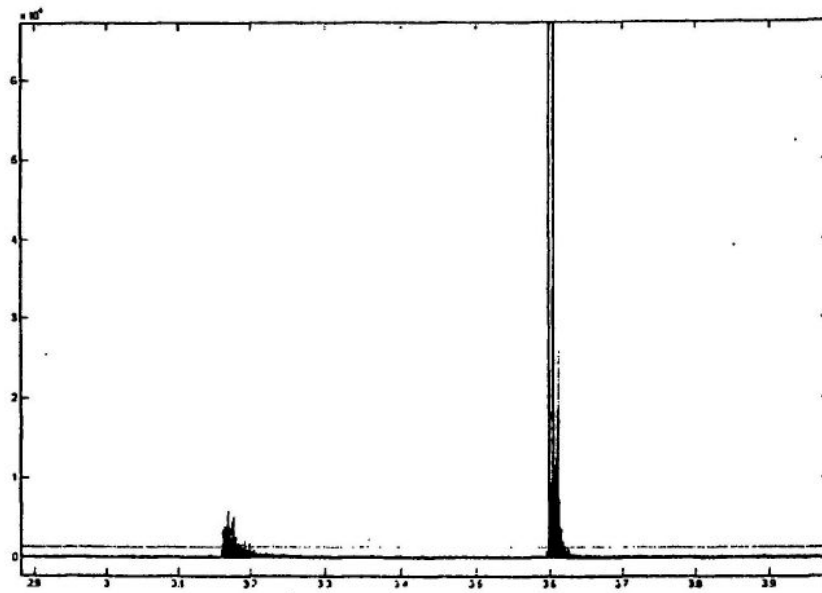


FIGURA 7: Cálculo de los TDOA (Time Delay Of Arrival) – Figura según la señal real de una única ballena. Los 5 primeros TDOA conservados se indican mediante flechas.

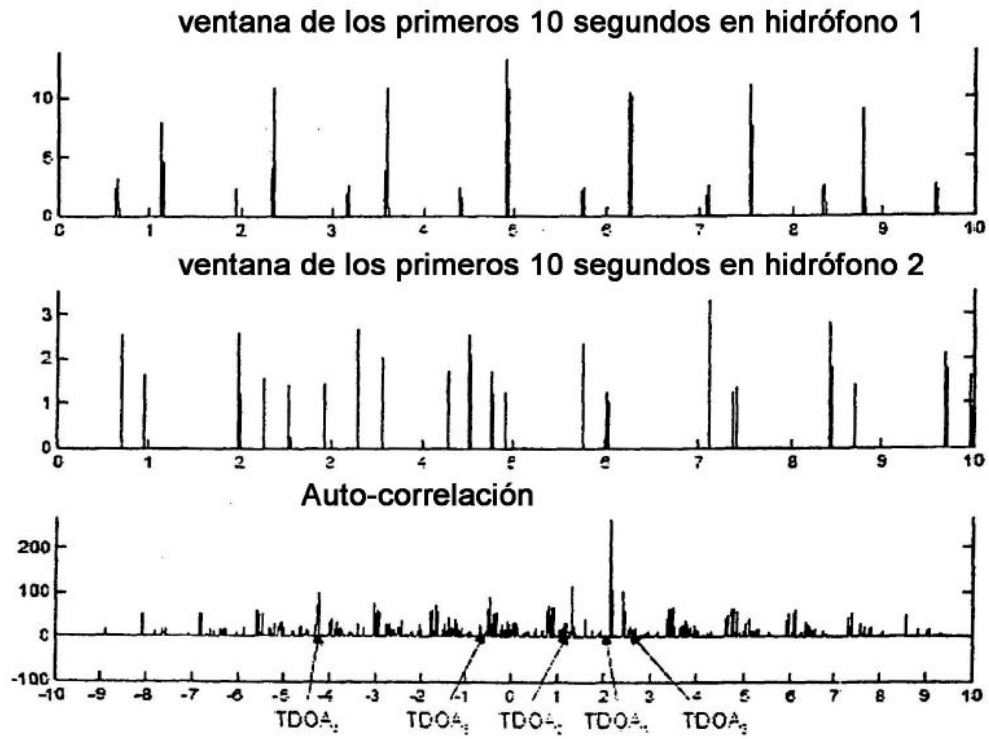


FIGURA 8.1: efectos / detección de los ecos en la señal de la figura 7: están representados los efectos de los ecos E(1) y E(2). Figura según la señal real de una única ballena

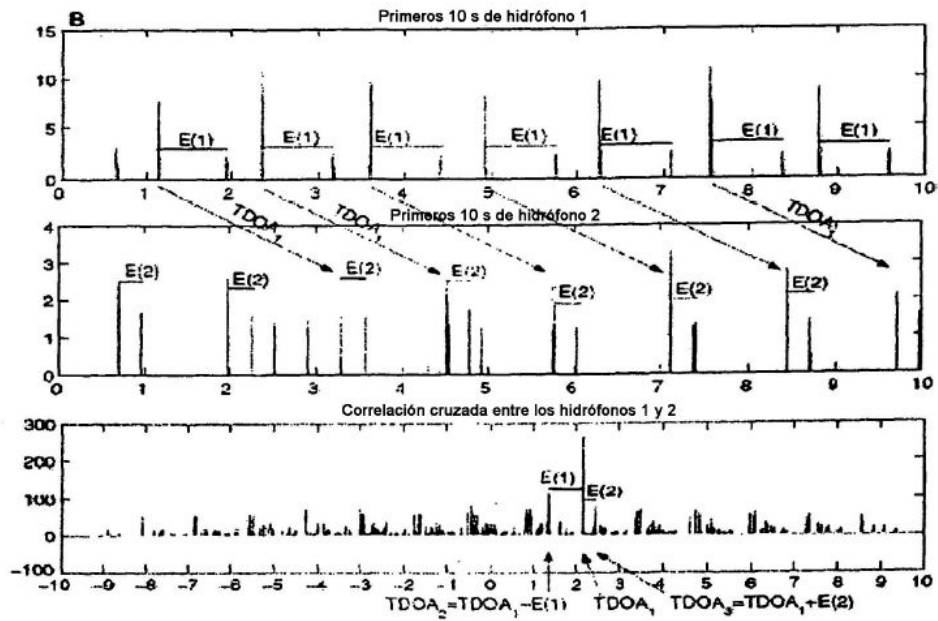


FIGURA 8.2: señal absoluta de un eco

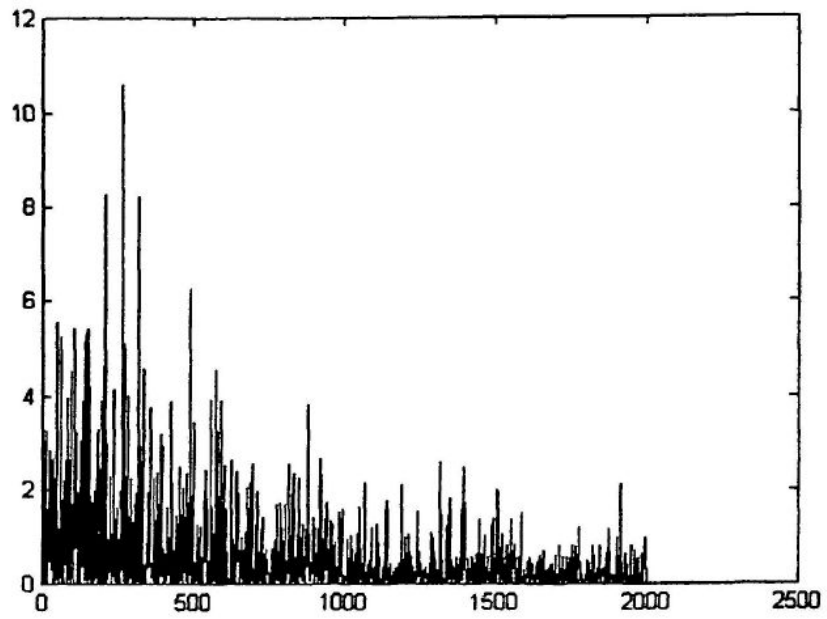


FIGURA 8.3: señal de la Figura 8.2, con la media realizada

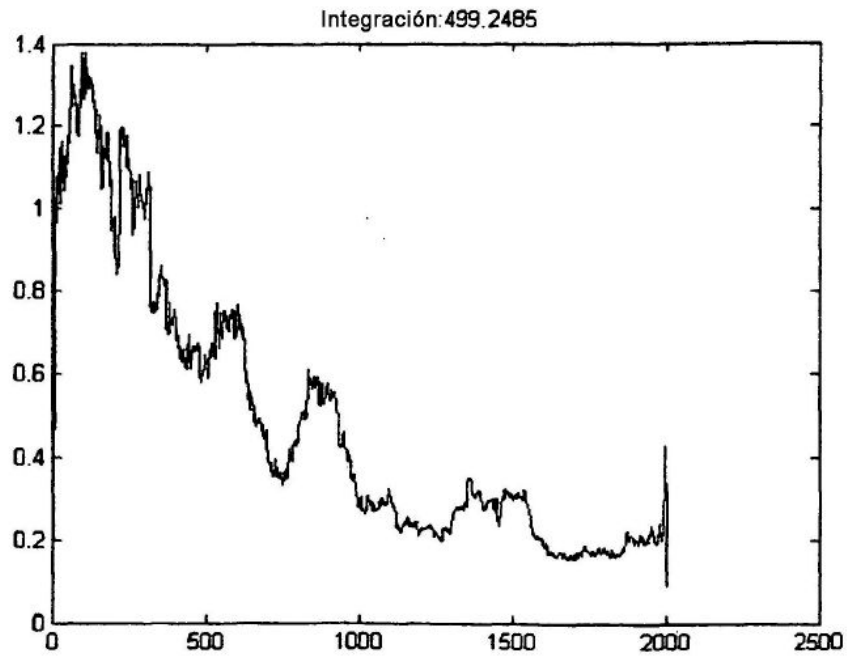


FIGURA 8.4: señal absoluta de un clic

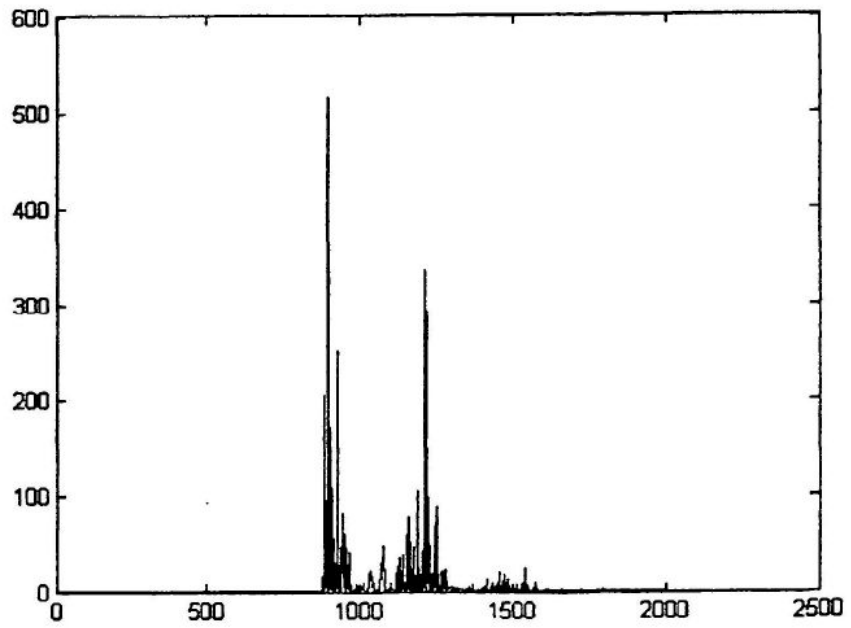


FIGURA 8.5: señal absoluta, con la media realizada, del clic de la figura 8.4

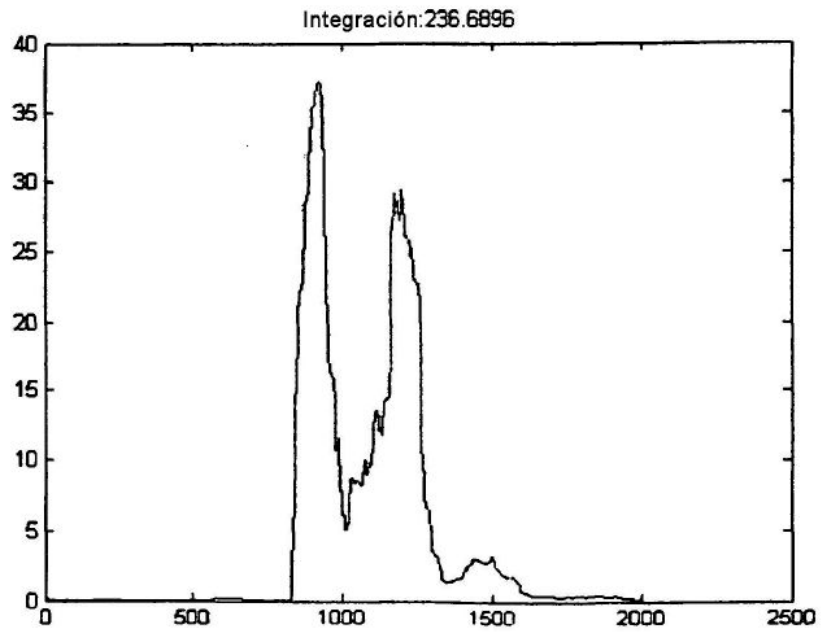


FIGURA 9: señal bruta: cadena de clics de varias ballenas con ruido: datos reales grabados durante 20 minutos por 4 hidrófonos

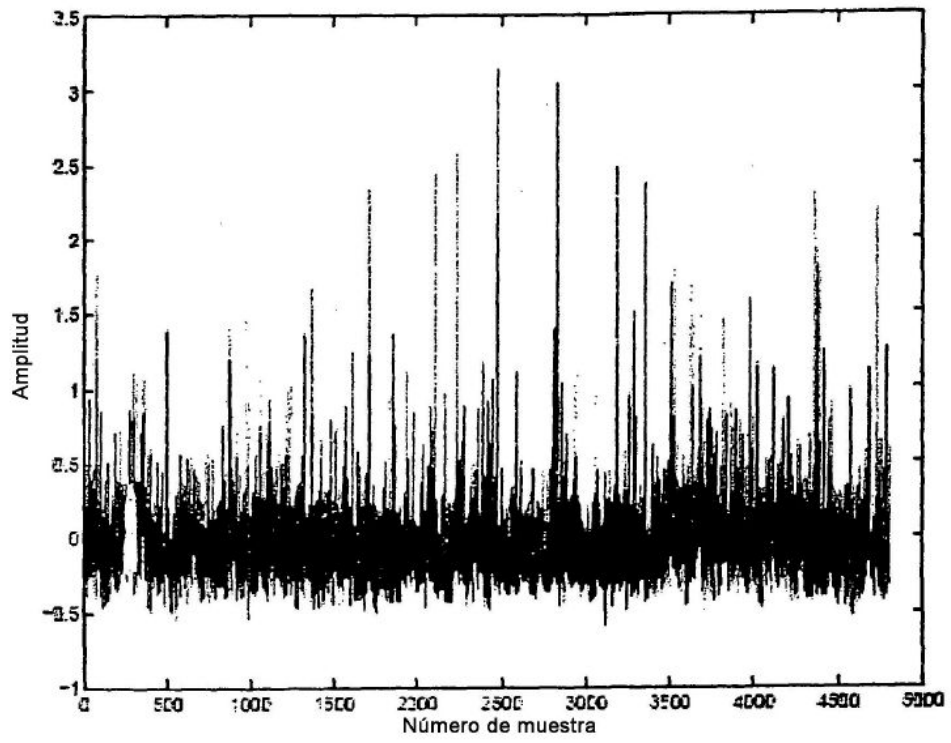


FIGURA 10: Posiciones calculadas para nbTDOA=13, son visibles 4 ballenas en (x,y,z). Un símbolo distinto por ballena identificada. [cálculos realizados a partir de datos reales durante 20 minutos por 4 hidrófonos] (con método de filtrado Teager Kaiser Mallat)

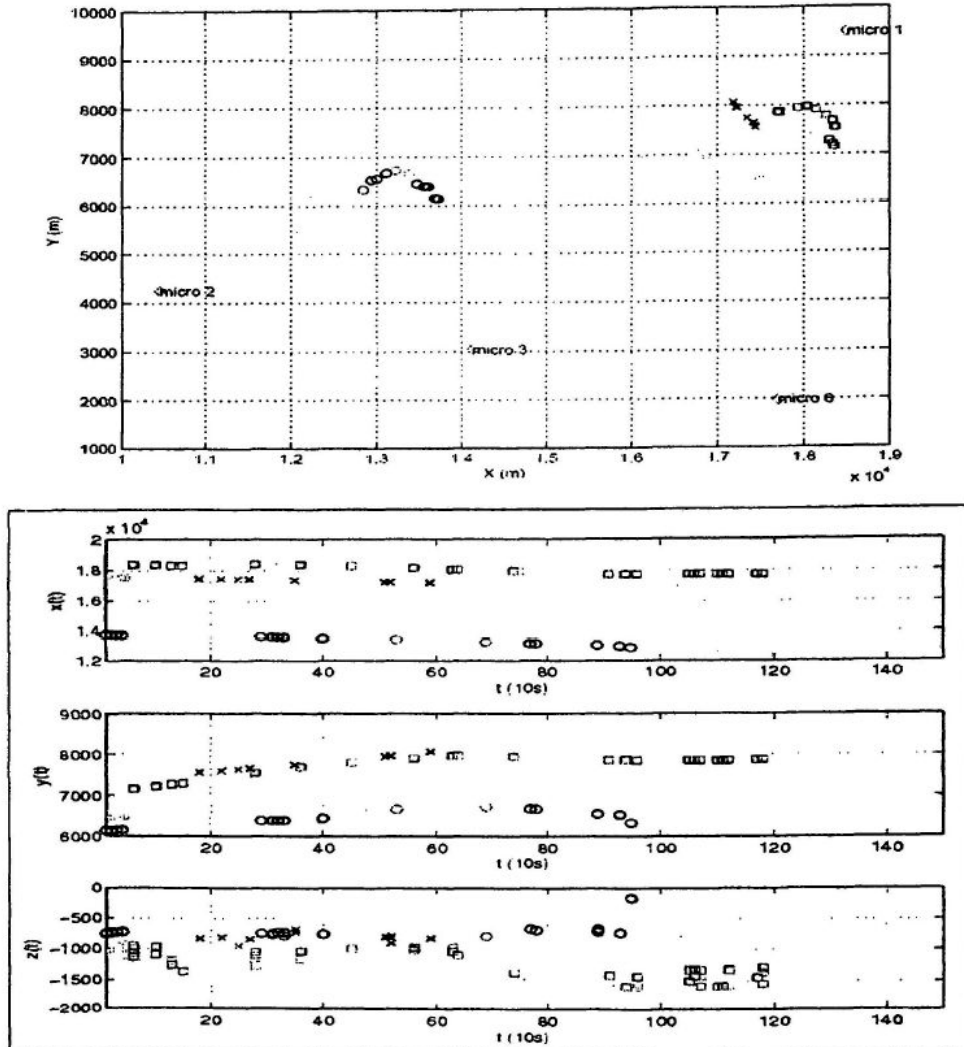


FIGURA 11: Posiciones de 4 (o 5) ballenas en (x,y,z) según resultados con nbTDOA=13 [calculadas a partir de los datos reales idénticos a la figura 10]. El paso de nbTDOA de 13 a 35 incrementa la precisión (con el método de filtrado TK Mallat).

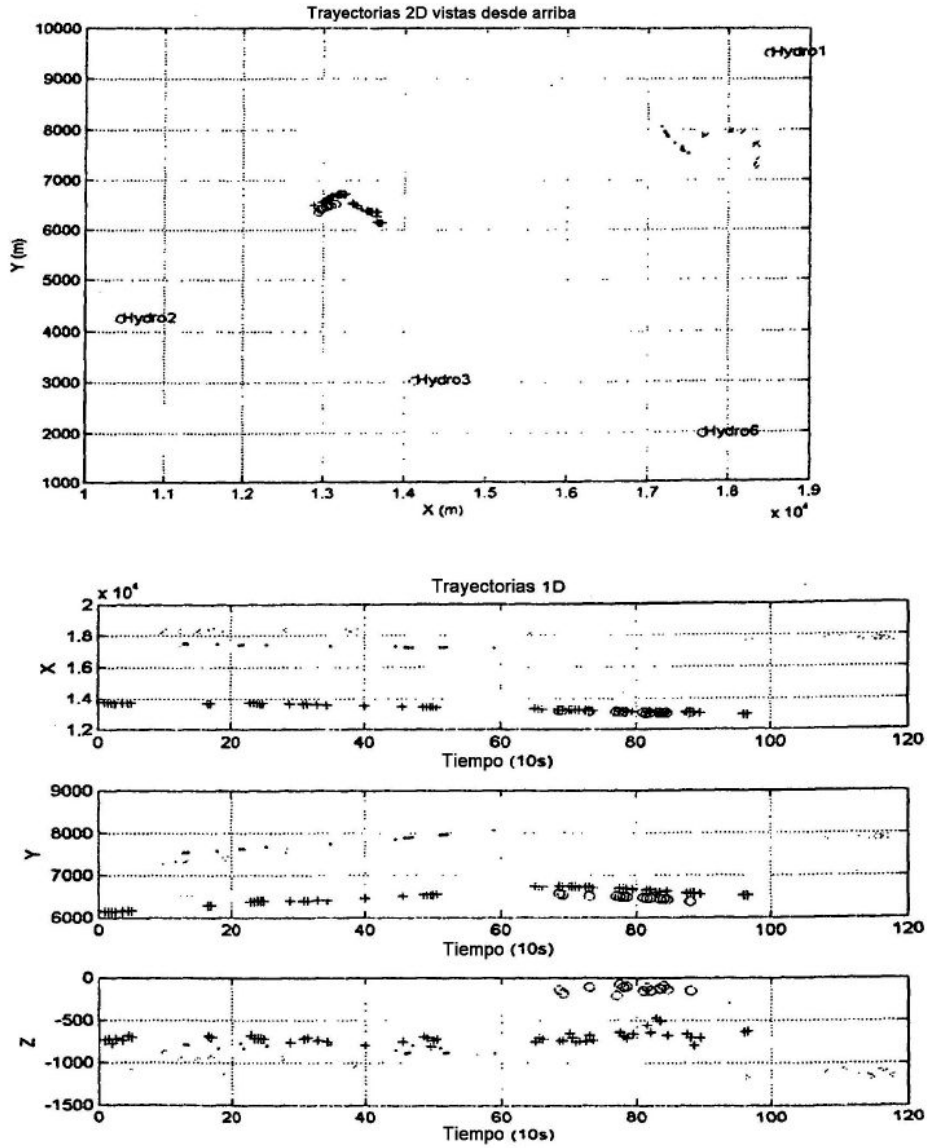


FIGURA 12: Representación de trayectorias tras alisamiento (con método de filtrado TK Mallat)

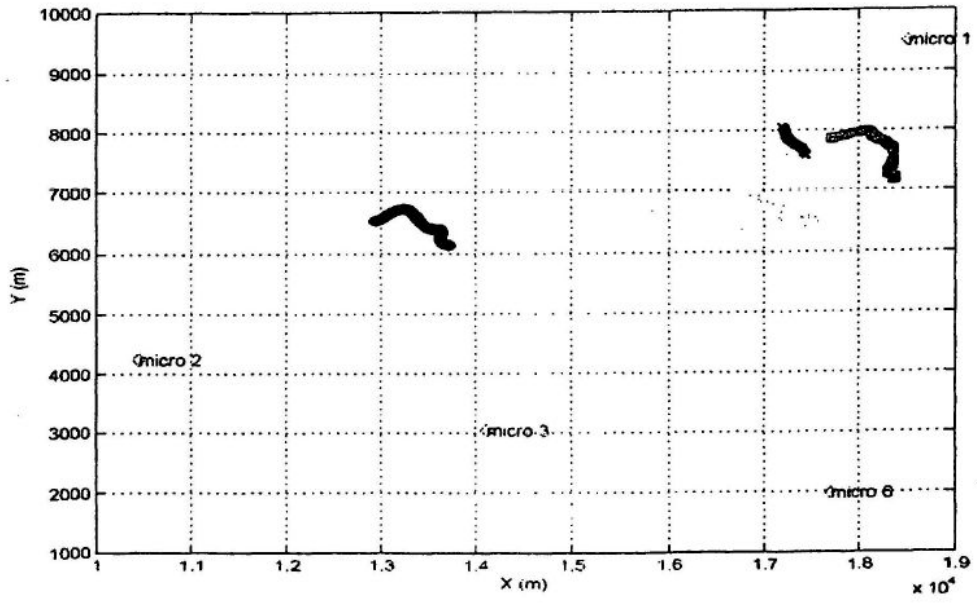


FIGURA 13: Aplicación de la localización de las ballenas cuyo comportamiento es objeto de estudio

