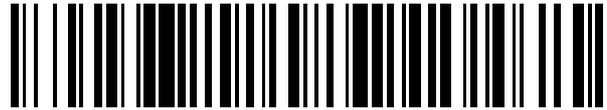


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 443 033**

51 Int. Cl.:

**G01S 15/96** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.06.2006 E 06784640 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.11.2013 EP 1894038**

54 Título: **Supervisión continua de poblaciones y comportamiento de peces a escala de plataforma continental**

30 Prioridad:

**08.06.2005 US 688619 P**

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

**17.02.2014**

73 Titular/es:

**MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
(100.0%)**

**77 Massachusetts Avenue  
Cambridge, MA 02139, US**

72 Inventor/es:

**MAKRIS, NICHOLAS C. y  
RATILAL, PURNIMA**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 443 033 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

Supervisión continua de poblaciones y comportamiento de peces a escala de plataforma continental

### Antecedentes de la invención

5 La población de peces está disminuyendo en todo el mundo; sin embargo, los planteamientos convencionales a la hora de estudiar la abundancia y el comportamiento de los peces se basan en gran medida en equipos de sonar locales imprecisos y medidas consistentes en captura de arrastre. En concreto, la supervisión de peces en entornos de plataforma continental se ha realizado por medio de técnicas de recorridos de observación lineales realizadas desde barcos de investigación a baja velocidad; estas técnicas muestrean, de forma significativa, las poblaciones de peces en el tiempo y en el espacio, dejando una imagen incompleta de su abundancia y comportamiento. El sonar localizador de peces convencional (CFFS) opera en el rango 10-500 kHz y mide la distribución local de la profundidad de los de peces por medio del eco acústico dentro de un haz estrecho y dirigido hacia abajo a lo largo del recorrido de observación lineal de un barco de investigación a baja velocidad. Normalmente, los sistemas reconocen los hábitats a tasas próximas a los 0,2 km<sup>2</sup>/hora, lo cual es similar a las tasas de reconocimiento de los barcos de captura de arrastre. Las tasas de los reconocimientos pueden aumentar aproximadamente un orden de magnitud con un sonar convencional de exploración lateral que aprovecha sólo los trayectos de propagación locales, lineales y acuáticos. En cambio, los bancos aislados de peces están a menudo bastante separados en el espacio y son difíciles de detectar por métodos convencionales. Los bancos pequeños que ocupan cientos de metros en diámetro son conocidos por experimentar una rápida variación en tamaño y forma. Los bancos más grandes a menudo se extienden entre decenas y centenas de kilómetros cuadrados y pueden también sufrir cambios morfológicos drásticos, incluyendo fragmentación y apiñamiento, en periodos inferiores a una hora.

Por lo tanto, la medición del tamaño, distribución espacial y evolución temporal de los bancos de peces suele no resultar práctica con los métodos convencionales. Los peces están demasiado dispersos y durante el curso de una medición utilizando CFFS, sus concentraciones y distribuciones espaciales cambian de forma drástica.

### Resumen de la invención

25 La presente invención permite que la densidad de población de área y el comportamiento detallado de los bancos de peces y su interacción sean supervisados de forma continua en intervalos cortos (por ejemplo, de aproximadamente un minuto) en áreas a escala de plataforma continental que abarcan miles de kilómetros cuadrados por medio de sensores oceánicos a distancia de guías de ondas acústicas. Esto es posible porque la presente invención se basa en la capacidad de ciertos entornos geofísicos, tales como plataformas continentales, islas, etc., de actuar como guías de ondas acústicas en las que el sonido se propaga largos tramos por medio de modos de intercepción que sufren sólo pérdida de dispersión cilíndrica, en lugar de la pérdida esférica que se experimenta en la transmisión CFFS. La invención puede también ser utilizada en aguas profundas alejadas de las plataformas continentales basándose en variaciones en la velocidad del sonido de la columna de agua para generar un guía de ondas.

35 Para formar una imagen instantánea de acuerdo con la invención, los modos de guías de ondas pueden ser estimulados uniformemente en acimut por medio de una estructura vertical de fuentes que emplean un transmisor de banda ancha preferiblemente corta. Se reciben entonces de forma continua rebotes dispersos de las condiciones ambiente por medio de una estructura lineal horizontal y dispuesta en intervalos y apoyos horizontales (por ejemplo, por medio de un filtrado y formación de haces temporales apareados). La imagen resultante es una instantánea del entorno oceánico sobre los tiempos de viaje en los dos sentidos de los rebotes de la señal. La invención es útil para localizar e identificar peces con y sin vejigas natatorias y puede ser aplicada para detectar, obtener imágenes de, y localizar criaturas marinas tales como los camarones.

45 De acuerdo con ella, en un primer aspecto, la invención describe un método de identificar una población de peces como se define en la reivindicación 1. El método comprende generar, dentro de un entorno acuático, señales acústicas dirigidas horizontalmente por medio de modos de intercepción por lo que las señales sufren eventualmente pérdidas de dispersión cilíndrica; recibir señales acústicas de rebote estimuladas o excitadas por las señales acústicas generadas; e interpretar la señales acústicas de rebote con objeto de detectar e identificar la población de peces. En algunas realizaciones, las señales acústicas son pulsadas. Preferiblemente, las señales acústicas generadas son uniformes en acimut y se propagan dentro de medios geofísicos limitados que actúan como guías de ondas, tales como el fondo del mar y la superficie océano-atmosférica. Las guías de ondas pueden también originarse por las variaciones en la velocidad del sonido de la columna de agua.

55 La etapa de interpretación comprende preferiblemente filtrado y formación de haces temporales apareados; este procedimiento presenta gráficamente las intensidades de rebote de la señal acústica a la posición espacial horizontal de la característica de dispersión que retornó de ellas, formando por tanto una imagen de las intensidades acústicas de rebote. La etapa puede también incluir compensar la pérdida de transmisión de la guía de ondas en los dos sentidos, la huella de resolución, la potencia de la señal de rebote de los peces y la potencia de la fuente. En algunas realizaciones, la etapa de interpretación comprende establecer una potencia de la señal de rebote de los peces, y en función de ella, identificar las señales de rebote indicativas de poblaciones de peces. Esto puede suponer el establecer la potencia de la señal de rebote de diferentes especies de peces y distinguir entre distintas

poblaciones de peces basándose en las potencias de rebote establecidas y establecer la densidad de población de área de los grupos de peces. En algunas realizaciones, la etapa de interpretación puede también implicar la transformación logarítmica de las intensidades de la señal acústica de rebote para convertir el ruido de fondo dependiente de la señal de rebote en ruido aditivo independiente de la señal de rebote, optimizando por lo tanto el reconocimiento de patrones de potencia de la señal de rebote de los peces o distribuciones de la población.

La caracterización normalmente (aunque no necesariamente) se produce en una zona que tiene un área superior a los 25 km<sup>2</sup>. Las señales acústicas generadas se propagan de la manera deseada y las señales acústicas de rebote cubren, 360 grados en acimut. Pueden ser generadas desde una estructura orientada verticalmente de fuentes acústicas dispuestas dentro del entorno acuático. Puede utilizarse una apertura horizontal en la estructura de fuente para dirigir las señales acústicas generadas según ciertos grados de acimut preferidos en algunas realizaciones.

Pueden adoptarse medidas para optimizar la longitud de onda de las señales acústicas. Por ejemplo, la longitud de onda optimizada puede ser lo bastante grande como para que las señales acústicas de rebote sean expresadas como el producto de (i) un factor que representa la transmisión a unos peces, (ii) un factor que representa la dispersión desde los peces y (iii) un factor que representa la transmisión desde los peces. La longitud de onda optimizada puede ser tal que un rango de campo lejano de las señales acústicas, sea más corto que el espacio medio entre peces para que sea caracterizado. En algunas realizaciones, la longitud de onda optimizada es tal que una longitud de la sombra del pez, para ser caracterizada, sea más pequeña que la distancia media entre los peces. La longitud de onda optimizada puede elegirse de forma que las señales acústicas de rebote sean independientes del aspecto de cualquier pez individual. La longitud de onda optimizada puede elegirse de forma que la atenuación acústica total causada por la dispersión de la guía de onda (muchos ángulos de incidencia dentro y fuera) desde el pez o grupos de peces sea menor que 1 dB. (Los sistemas CFFS normalmente operan a una frecuencia mucho más alta y pueden experimentar una atenuación significativa al propagarse incluso a través de pequeños bancos de peces, lo que conduce a errores importantes en la estimación de la población.) La longitud de onda optimizada y el nivel de potencia de la señal acústica pueden ser elegidos de tal forma que las señales acústicas de rebote de los peces superen un nivel de ruido ambiente en un margen máximo de detección de al menos 5 dB. El margen máximo de detección puede superar decenas de kilómetros o más. La longitud de onda acústica optimizada puede ser elegida del forma que la dispersión de los grupos de peces u otras criaturas marinas supere la dispersión del fondo del mar en el rango de detección máxima.

Pueden adoptarse medidas para optimizar los modos de guía de onda estimulados por la estructura fuente para maximizar las señales acústicas de rebote de los peces y para minimizar las señales acústicas de rebote del fondo del mar.

En algunas realizaciones, si así se desea, pueden concatenarse formando una película las imágenes sucesivas de la intensidad de la señal acústica de rebote, la potencia de la señal de rebote de los peces o la densidad de población de área.

La invención puede identificar un área total ocupada por un grupo de peces detectado e identificar un centro de población del grupo de peces. Esto, a su vez, puede ser utilizado para detectar una velocidad del grupo de peces, diferenciando con respecto al tiempo el centro identificado de la población. Los vectores de velocidad de un campo entero de peces pueden ser también determinados diferenciando con respecto al tiempo y al espacio siguiendo la conservación de la masa, y las presiones ambiente sobre los peces que provocan su desplazamiento pueden ser también cuantificadas siguiendo la conservación del momento. Alternativamente, puede estimarse la velocidad de un grupo de peces basándose en un desplazamiento de frecuencia de efecto Doppler de las señales acústicas de rebote.

En otro aspecto, la invención presenta un aparato para identificar una población de peces como se define en la reivindicación 29. El aparato comprende un dispositivo transmisor para generar, dentro de un entorno acuático, señales acústicas dirigidas horizontalmente por medio de modos de intercepción por lo que las señales experimentan una pérdida de dispersión cilíndrica; un receptor para recibir señales acústicas de rebote estimuladas por las señales acústicas generadas; y un módulo analizador para interpretar las señales acústicas de rebote así como para detectar e identificar la población de peces. Esto puede realizarse en tiempo real o por medio de un análisis posterior.

El dispositivo transmisor genera de la forma deseable señales acústicas uniformes según el acimut, que idealmente se propagan 360 grados en acimut, y que pueden ser pulsadas. En algunas realizaciones, el módulo analizador interpreta las señales acústicas de rebote por medio de un filtrado y formación de haces temporales apareados. El dispositivo transmisor puede, por ejemplo, comprender una estructura orientada verticalmente de fuentes acústicas. La estructura de las fuentes puede transmitir una señal filtrada espacialmente para optimizar las señales acústicas de rebote de los peces o criaturas marinas y minimizar las señales acústicas de rebote del fondo marino. Deseablemente, las señales generadas tienen una longitud de onda y nivel de potencia optimizados conjuntamente de forma que esas señales acústicas de rebote de los peces superen un nivel de ruido ambiente en un rango máximo de detección de al menos 5 dB.

- El módulo analizador puede estar configurado para compensar la pérdida de transmisión del guía de ondas bidireccional, la huella de la resolución, la potencia de la señal de rebote de los peces, el ruido dependiente de la señal y la potencia de la fuente. En algunas realizaciones, el módulo analizador está configurado para establecer una potencia de la señal de rebote de los peces y basándose en ella, identificar, señales de rebote indicativas de poblaciones de peces. En este sentido, el módulo analizador puede estar además configurado para establecer potencias de rebote de diferentes especies de peces y para distinguir entre diferentes poblaciones de peces basándose en las potencias del rebote establecidas y para establecer la densidad de población del área de los grupos de peces. En algunas realizaciones, el módulo analizador está configurado para optimizar una longitud de onda de las señales acústicas como se describió anteriormente.
- El módulo analizador pueden estar configurado para identificar la población total de peces en una zona determinada y las variaciones de esta población en el tiempo. El módulo analizador puede estar configurado para identificar un área total ocupada por un grupo detectado de peces y, si se desea, un centro de la población del grupo de peces. El módulo analizador puede estar configurado además para detectar una velocidad del grupo de peces diferenciando con respecto al tiempo el centro identificado de la población. El módulo analizador puede estar configurado además para determinar vectores de velocidad de un campo entero de peces diferenciando con respecto al tiempo y al espacio siguiendo la conservación de la masa, así como las presiones ambiente sobre los peces que hacen que se desplacen utilizando la conservación del momento. Alternativamente, el módulo analizador puede estimar una velocidad de un grupo de peces basándose en un desplazamiento de frecuencia Doppler de las señales acústicas de rebote.
- El aparato puede también incluir un módulo de tratamiento de imágenes para generar imágenes de una población de peces basándose en las señales acústicas de rebote. El módulo de tratamiento de imágenes puede estar configurado para establecer el espectro espacial de la población de peces. El módulo de tratamiento de imágenes puede, si se desea, estar configurado para concatenar imágenes sucesivas dentro de una película. El módulo de tratamiento de imágenes puede, si se desea, estar configurado para estimar series con respecto al tiempo de poblaciones de peces, áreas de grupo de peces, ejes mayor y menor de peces dentro de una región determinada, así como las longitudes del espectro y correlación de estas series con respecto al tiempo.

### Breve descripción de los dibujos

Lo anteriormente expuesto se comprenderá más fácilmente a partir de la siguiente descripción detallada de la invención, considerada en conjunto con los dibujos adjuntos, en los cuales:

- La figura 1 ilustra esquemáticamente el campo de imagen de un sistema de acuerdo con la presente invención, en contraste con un rastreo CFFS.
- La figura 2 ilustra esquemáticamente un emplazamiento modelo de la presente invención.
- La figura 3 ilustra esquemáticamente un sistema de tratamiento de datos de acuerdo con la presente invención.

### Descripción detallada

#### Planteamiento básico

- En una realización de ejemplo, se conoce la situación de la fuente y del receptor y se conoce el momento de la transmisión fuente. Se reciben entonces continuamente rebotes dispersos de elementos ambiente tales como peces por medio de una estructura en línea horizontal, y recogidos en rango y relación horizontales, preferiblemente por medio de filtrado y formación de haces temporales apareados utilizando las velocidades de propagación conocidas de los modos acústicos en el océano (por ejemplo, como se determina a partir de las mediciones locales de la velocidad del sonido). La imagen resultante es una instantánea del entorno oceánico durante el tiempo de viaje de ida y vuelta de los rebotes de señal que abarcan 360 grados en acimut. Cada píxel en tal imagen sin procesar tiene las unidades de nivel de presión sonora en decibelios relativas a una presión de referencia. El margen de resolución está fijado en la velocidad media del sonido,  $c = 1475$  m/s, dividida por el doble del ancho de banda de la señal. La resolución acimutal en radianes varía según la longitud de onda acústica  $\lambda$  dividida por la longitud de la estructura proyectada  $L \cos \theta$ , donde  $L$  es la longitud completa de la estructura y el ángulo acimut  $\theta$  es cero en la dirección normal al eje de la estructura. En la dirección paralela al eje de la estructura, la resolución viene a ser de aproximadamente  $\sqrt{\frac{2\lambda}{L}}$  radianes.

- La figura 1 proporciona una vista horizontal de la resolución y la contrasta con un recorrido de observación lineal CFFS. Como se muestra en la figura 1, la estructura no presenta ambigüedad derecha-izquierda con respecto a su eje porque la estructura tiene alguna apertura normal a su eje longitudinal para proporcionar doble dimensión a la apertura, eliminando por tanto esta ambigüedad, por ejemplo, en una estructura cardioide o remolque de estructura de líneas múltiples. Para una estructura de línea única, sin apertura normal al eje de la estructura, la ambigüedad se puede solucionar cambiando la posición y la orientación de la estructura del receptor. El haz en la dirección del

remolque no resulta a veces útil para obtener imágenes ambientales dado que a veces está contaminado con el ruido del barco remolcador.

5 Pueden utilizarse varias formas de onda fuente, incluyendo secuencias de impulsos lineales modulados en frecuencia (lfm), hiperbólicos modulados en frecuencia (hfm), y ondas constantes o sinusoidales (cw). Las formas de onda moduladas de frecuencia, tales como lfms y hfms, resultan ventajosas porque posibilitan que se use la compresión del impulso o técnicas de filtro pareado que mejoran la resolución del rango, la relación señal/ruido y la relación de reverberación señal/ruido de fondo.

10 La tasa de repetición de la transmisión establece un límite en el margen de cobertura. Una tasa de repetición de 50 segundos corresponde a una cobertura de radio de más o menos 30 kms. para cada imagen instantánea, mientras que una tasa de repetición de 100 segundos corresponde a una cobertura de radio de más o menos 60 kms., dejando algún momento sin registro entre la recepción previa y la siguiente transmisión para obtener una adquisición óptima. Las tasas de repetición tanto de 50 como de 100 segundos se han utilizado ventajosamente.

### Equipo

15 En la figura 2 se muestra una realización típica. Una estructura fuente 210 con boyas, remolcada o a la deriva utiliza una o más estructuras lineales verticales 215, cada una de las cuales contiene una o más fuentes acústicas subacuáticas, que emiten sonido en los 360 grados en acimut horizontal. Los modos de guías de ondas son excitados por la estructura fuente vertical 215, que está suspendida, por ejemplo, 35-70 mts. por debajo del buque remolcador. La estructura fuente emplea una ventana especial para estimular los modos que maximizarán los rebotes de los peces y minimizarán los rebotes del fondo del mar. Una estructura de receptor con boyas 220, remolcada o a la deriva, incluye una o más estructuras receptoras lineales horizontales 225 de hidrófonos (conteniendo preferiblemente cada una múltiples hidrófonos para posibilitar la determinación del sentido de las ondas acústicas bajo el agua). En el ejemplo mostrado en la figura 2, esta está suspendida, por ejemplo, 24-55 mts. por debajo y 115-230 mts. detrás de otro buque de investigación. Se reciben rebotes dispersos por medio de la estructura receptora horizontal 225. En general, las fuentes y receptores pueden ser remolcados desde buques de investigación en movimiento o pueden ser anclados al fondo del mar. Las profundidades típicas del fondo del mar en este ejemplo, varían entre 70 mts. y 140 mts..

20 Las estructuras desplegables de fuentes o receptores acústicos pueden adoptar cualquier forma adecuada conocida en la técnica. Una estructura típica incluye un paquete de flotabilidad, un cable o línea de conexión, un expendedor de cable, un sensor de profundidad y una carcasa a presión que alberga las fuentes o receptores, así como la electrónica de control asociada. El paquete de flotabilidad puede, por ejemplo, comprender una boya o flotador que sirve para sostener la estructura en una posición recta vertical u horizontal. Se utilizan habitualmente múltiples sensores de profundidad, pero si se utiliza uno individual, se sitúa generalmente cerca de la estructura, y en el caso de la estructura receptor, está también conectado eléctricamente al sistema de control de forma que se transmita información sobre la profundidad para su análisis junto con las señales acústicas.

35 Con referencia a la figura 3, un sistema 300 para tratar las señales desde la estructura receptor 225, de acuerdo con la invención, se organiza conceptualmente como una serie de módulos funcionales que incluye un módulo de acondicionamiento y filtrado de la señal 310 que, de acuerdo con la práctica convencional, reduce el ruido y mejora los datos acústicos bajo el agua; un módulo analizador de datos 320, que analiza señales condicionadas, digitalizadas para formar imágenes a intervalos por medio de filtrado pareado temporal y en acimut por medio de formación de haces de onda plana; y, si se desea, un módulo de tratamiento de imágenes 330 para ensamblar o tratar además las imágenes obtenidas por medio del módulo analizador de datos 320. Las imágenes pueden ser mostradas en una pantalla de ordenador 340. La presente invención utiliza un sonido menos intenso que CFFS,

40 generalmente mayor que tres órdenes de magnitud. La resolución del rango obtenible es  $\Delta r = \frac{c}{2B}$  en la que  $c$  es la velocidad media del sonido en el océano durante un experimento y  $B$  es el ancho de banda de las señales transmitidas.

Los módulos 320, 330 pueden ser realizados en su conjunto o en partes como programa de software que utilice cualquier lenguaje o lenguajes de programación adecuados (C++, C#, java, FORTRAN, LISP, BASIC, PERL, etc.) y/o como dispositivo de hardware (por ejemplo, ASIC, FPGA, procesador, memoria, almacenamiento y similares). Las funciones realizadas por los módulos 320, 330 se describen a continuación con más detalle.

### 50 Modo de filtrado con la estructura fuente

La estructura fuente vertical puede estar diseñada para filtrar los modos estimulados y propagados en la guía de ondas. Esto se hace sombreando la amplitud y fase de cada elemento individual de la estructura fuente durante la transmisión de la señal. Generalmente, es preferible estimular los modos de orden inferior de la columna de agua con la estructura fuente, ya que estos tienen vectores de número de onda con orientación más horizontal y así interactúan menos o inciden con ángulos someros en el fondo y superficie marinos, minimizando por tanto los rebotes de productos heterogéneos y característicos del fondo y de la superficie del mar. Estos modos inferiores aún rellenan la columna de agua y producen rebotes mayores de poblaciones de peces.

Los modos de orden inferior también pueden ser estimulados por una colocación ventajosa de la estructura fuente en un entorno con una batimetría conocida. La colocación de la estructura fuente en una batimetría somera puede a veces resultar ventajosa ya que se excitan menos modos, y estos están en el extremo inferior. Como resultado, cuando estos modos se desplazan en aguas más profundas, los ángulos incidentales del fondo y de la superficie del mar serán más someros que si la fuente hubiera sido colocada en aguas más profundas, por lo que los rebotes del fondo y superficie marinos serán de nuevo minimizados.

*Derivación de la potencia de la señal de rebote de un área de unidad y densidad de población.*

El resultado típico de un módulo analizador de datos 320 es generalmente una o más imágenes de la potencia de la señal de rebote de un área de unidad del entorno oceánico, incluyendo bancos de peces y otras vidas acuáticas. Estas vienen determinados por la compensación de niveles de presión sonora recibida por (i) pérdida de transmisión bidireccional en la guía de ondas de la plataforma continental dependiendo del rango (utilizando, por ejemplo, modelos de ecuación parabólica como los que se describen, por ejemplo, en Makris et al., Science 311:660-663 (2006) incluyendo el material de apoyo en línea); por (ii) la huella de resolución que varía espacialmente del sistema receptor fuente OARS; (iii) potencia de la señal de rebote de los peces; y por (iv) la potencia de la señal de la fuente.

*Modelo de dispersión de guía de ondas acústica en el océano para un objetivo general*

Con propósito ilustrativo, se describe una formulación de modo normal para el campo disperso desde un objetivo general en una guía de onda oceánica estratificada. Se sitúa el origen del sistema de coordenadas en el interfaz aire-agua con el eje positivo z apuntando hacia abajo. Se definen las coordenadas de la fuente como  $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ , las coordenadas del receptor como  $\mathbf{r} = (x, y, z)$ , y las coordenadas del baricentro de un objetivo como  $\mathbf{r}_t = (x_t, y_t, z_t)$ . Los sistemas espaciales cilíndricos  $(\rho, \phi, z)$  y esféricos  $(r, \theta, \phi)$  son definidos por  $x = r \sin \theta \cos \phi$ ,  $y = r \sin \theta \sin \phi$ ,  $z = r \cos \theta$  y  $\rho^2 = x^2 + y^2$ . El número de onda acústica  $k$  viene dado por la velocidad angular  $\omega = 2\pi f$  dividida por la velocidad del sonido  $c$ .

El campo disperso armónico medido por medio de un receptor en  $\mathbf{r}$  para una fuente en  $\mathbf{r}_0$  desde un objetivo arbitrario en una guía de onda oceánica estratificada con un centro objetivo en  $\mathbf{r}_t$  viene dado por

$$\Phi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_t, f) = \sum_{m=1}^{M_{\max}} \sum_{n=1}^{M_{\max}} \frac{(4\pi)^2}{k} [A_m(\mathbf{r} - \mathbf{r}_t) A_n(\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_0) S_{r_t}(\pi - \alpha_m, \beta(\phi, \phi_t), \alpha_n, \beta(\phi_t, \phi_0)) - B_m(\mathbf{r} - \mathbf{r}_t) A_n(\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_0) S_{r_t}(\alpha_m, \beta(\phi, \phi_t), \alpha_n, \beta(\phi_t, \phi_0)) - A_m(\mathbf{r} - \mathbf{r}_t) B_n(\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_0) S_{r_t}(\pi - \alpha_m, \beta(\phi, \phi_t), \pi - \alpha_n, \beta(\phi_t, \phi_0)) + B_m(\mathbf{r} - \mathbf{r}_t) B_n(\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_0) S_{r_t}(\alpha_m, \beta(\phi, \phi_t), \pi - \alpha_n, \beta(\phi_t, \phi_0))]$$

(Ecuación 1)

en la que  $A_n(\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_0)$  y  $B_n(\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_0)$  son las amplitudes de los componentes modales de la onda plana ascendente y descendente que inciden sobre la heterogeneidad en  $\mathbf{r}_t$ .

$A_m(\mathbf{r} - \mathbf{r}_t)$  y  $B_m(\mathbf{r} - \mathbf{r}_t)$  son las amplitudes de los componentes modales ascendentes y descendentes dispersos desde la heterogeneidad,  $S_{r_t}(\pi - \alpha_m, \beta(\phi, \phi_t), \alpha_n, \beta(\phi_t, \phi_0))$  es la función dispersa del objeto centrado en

$$\mathbf{r}_t, \beta(\phi, \phi_t) = \phi - \sin^{-1} \left\{ \frac{\rho_t}{|\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}_t|} \sin(\phi_t - \phi) \right\}$$

es el acimut del receptor desde el objetivo,  $\beta(\phi_t, \phi_0)$  es el acimut del objetivo desde la fuente,  $\alpha_m$  son los ángulos de elevación modal y  $M_{\max}$  es el número de modo en el que las sumas modales pueden ser truncadas y representan el campo todavía de forma precisa, como en el documento P. Ratilal and N. C. Makris, J. Acoust. Soc. Am. 118:3532-3559 (2005). Se encuentra una formulación equivalente en términos de integrales de número de onda en el documento N. C. Makris, F. Ingenito, y W. A. Kuperman, "Detection of a submerged object insonified by surface noise in an ocean waveguide," J. Acoust. Soc. Am. 96:1703-1724 (1994). La potencia de la señal de rebote de un objeto es  $TS = 10 \log_{10} |S/k|^2$  en dB re 1 m para  $k$  medido en 1/m.

Para cualquier objeto dado en una guía de ondas oceánica, la función de dispersión del objetivo asocia los modos de guía de ondas incidente y disperso, de forma que la propagación y la dispersión se intercalan de forma coherente tal y como muestra la ecuación 1. Esta asociación entre propagación y dispersión puede ser especialmente importante para objetivos altamente direccionales, tales como los que son grandes en comparación con la longitud de onda acústica, ya que estos asociarán los modos incidentes y dispersos de forma diferente dependiendo en sus direcciones equivalentes de la onda plana en el objetivo. Para tales objetos altamente direccionales, esta asociación

se hace desafiando la precisamente estimada función de dispersión o potencia de rebote de las señales acústicas de rebote medidas en una guía de ondas oceánica, como se señala en el documento P. Ratilal, Y. Lai, y N. C. Makris, J. Acoust. Soc. Am. 112:1797-1816 (2002). Este es un problema para las frecuencias de trabajo de CFFS que apenas cubren 10 kHz., en las que los peces individuales tienden a convertirse en dispersiones altamente direccionales.. En estas frecuencias, también existe un importante ensombrecimiento de un pez con respecto al siguiente e importante dispersión múltiple en bancos densos de peces. Esto también hace que estimar las densidades de población de peces resulte difícil en las frecuencias CFFS, ya que los efectos del ensombrecimiento y dispersión múltiple también precisan ser tenidos en cuenta en el análisis de señales acústicas de rebote para estimar la potencia de la señal de rebote y la población de los peces objetivo.

5  
10  
15  
En las frecuencias acústicas más bajas, por debajo de 10 kHz., la mayoría de los peces se hacen acústicamente compactos, pequeños en comparación con la longitud de onda acústica. La función de dispersión de estos peces se hace omnidireccional tanto para la vejiga natatoria como para el cuerpo del pez. La función de dispersión en la ecuación 1 puede ser entonces expresada como una constante, independiente de la dirección de las ondas planas modales incidentes y dispersas de forma que  $S_{it}(\pi-\alpha_m, \beta(\phi, \phi_t), \alpha_n, \beta(\phi_t, \phi_0) \approx S_0(r_t, f)$  puede ser factorizada a partir de las sumatorias. Como se muestra en el documento P. Ratilal, Y. Lai, y N. C. Makris, J. Acoust. Soc. Am. 112:1797-1816 (2002), el campo de dispersión se simplifica a

$$\Phi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_t, f) = \frac{(4\pi)^2}{k} G(\mathbf{r}_t | \mathbf{r}_0, f) G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_t, f) S_0(\mathbf{r}_t, f) \quad \text{(Ecuación 2)}$$

en la que la propagación en la guía de ondas determinada por la función de Green G a y desde el dispersor se hace factorizable y, por tanto, separable de la función de dispersión que depende de las propiedades del objetivo.

20 *Intensidad esperada de dispersión de los peces dentro de la huella de resolución*

Sea  $q(t)$  la señal de la fuente con la transformada de Fourier o el espectro  $Q(f)$ . Entonces, dada una distribución de  $N$  peces dentro de la huella de resolución del sonar centrada en la posición horizontal  $r_t$ , en la que cada pez lleva un número  $i$ , el espectro de frecuencia del campo disperso de los  $N$  peces puede ser expresado como una suma de los de cada pez.

$$\Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \mathbf{p}_t, f) = \sum_{i=1}^N Q(f) \frac{(4\pi)^2}{k} G(\mathbf{r}_i | \mathbf{r}_0, f) G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_i, f) S_0(\mathbf{r}_i, f) . \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Una guía de ondas oceánica es espacial y temporalmente aleatoria dada la presencia de fluctuaciones de onda internas de la columna de agua y otros elementos heterogéneos y variaciones en el medio y en los límites de la guía de ondas. La guía de ondas aleatoria conduce a fluctuaciones temporales y espaciales en la propagación del campo acústico multi-modal y por tanto a aleatoriedad en la intensidad acústica medida. Los peces que están dentro de la huella de resolución de la presente invención estarán también aleatoriamente distribuidos en tamaño, forma, densidad espacial y otras propiedades físicas, además de su situación dentro de la huella de resolución del sonar. La intensidad dispersa medida dentro de la huella de resolución del sonar será entonces aleatoria debido tanto a fluctuaciones de la guía de ondas como a la aleatoriedad en la distribución de peces. Es preciso entonces adoptar un procedimiento estadístico para analizar los datos acústicos medidos.

35 El campo disperso medio dentro de la huella de resolución del sonar se halla tomando el valor esperado de la ecuación 3.

$$\langle \Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \mathbf{p}_t, f) \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^N Q(f) \frac{(4\pi)^2}{k} G(\mathbf{r}_i | \mathbf{r}_0, f) G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_i, f) S_0(\mathbf{r}_i, f) \right\rangle \quad \text{(Ecuación 4)}$$

40 en la que las funciones Green de la guía de ondas  $G(\mathbf{r}_i | \mathbf{r}_0, f)$ ,  $G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_i, f)$ , la posición  $\mathbf{r}_i$  del pez  $i$ th y la función de dispersión  $S_0(\mathbf{r}_i, f)$  del pez  $i$ th son todas variables aleatorias, como lo puede ser el número de peces dentro de la huella de resolución del sistema a lo largo del tiempo. Dado que la función de dispersión del pez es independiente de la función de Green de la guía de ondas, la expectativa en la parte derecha de la ecuación 4 es factorizable para estos términos.

El cuadrado de la magnitud esperada del espectro del campo disperso dentro de la huella de resolución del sonar, proporcional a la intensidad, es

$$\begin{aligned} & \langle \Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \rho_t, f) \Psi_s^*(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \rho_t, f') \rangle \\ &= \left\langle \sum_{i=1}^N Q(f) \frac{(4\pi)^2}{k} G(\mathbf{r}_i | \mathbf{r}_0, f) G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_i, f) S_0(\mathbf{r}_i, f) \sum_{j=1}^N Q(f') \frac{(4\pi)^2}{k} G^*(\mathbf{r}_j | \mathbf{r}_0, f') G^*(\mathbf{r} | \mathbf{r}_j, f') S_0^*(\mathbf{r}_j, f') \right\rangle \end{aligned}$$

(Ecuación 5)

5 de la ecuación 3.

El cuadrado de la magnitud esperada del espectro del campo disperso puede ser también escrito en términos del cuadrado de la media, un término coherente, y de la varianza del espectro de campo disperso, un término incoherente,

$$\langle |\Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \rho_t, f)|^2 \rangle = \langle \Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \rho_t, f) \rangle^2 + \text{Var}(\Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \rho_t, f)) \quad (\text{Ecuación 6})$$

10 El espectro del campo medio disperso es efectivamente cero, basándose tanto en la teoría como en la experimentación, dado que la huella de resolución del sonar tiene dimensiones que son grandes en comparación con la longitud de onda acústica y la distribución de peces dentro de la huella de resolución es aleatoria. De esa forma, el término coherente desaparece.

15 El cuadrado de la magnitud esperada del espectro del campo disperso dentro de la huella de resolución del sonar es entonces,

$$\langle |\Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \rho_t, f)|^2 \rangle = \sum_{i=1}^N |Q(f)|^2 (4\pi)^4 \left\langle |G(\mathbf{r}_i | \mathbf{r}_0, f)|^2 |G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_i, f)|^2 \frac{|S_0(\mathbf{r}_i, f)|^2}{k^2} \right\rangle \quad (\text{Ecuación 7})$$

La aleatoriedad en las propiedades de dispersión de los peces es efectivamente independiente de las fluctuaciones de transmisión oceánica en las funciones Green. El cuadrado de la magnitud esperada del espectro de campo disperso puede ser escrito como,

$$\langle |\Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \rho_t, f)|^2 \rangle = |Q(f)|^2 (4\pi)^4 \left\langle |G(\mathbf{r}_i | \mathbf{r}_0, f)|^2 |G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_i, f)|^2 \right\rangle \left\langle N \frac{|S_0(\mathbf{r}_i, f)|^2}{k^2} \right\rangle \quad (\text{Ecuación 8})$$

20 en la que el primer factor entre paréntesis a la derecha describe la potencia de la fuente conocida del presente sistema, el segundo factor en el valor esperado describe la transmisión a y desde el pez que puede ser computado a partir de la batimetría conocida y de las mediciones de la velocidad de sonido y el tercer valor en el último valor esperado describe la sección transversal de la dispersión de los peces dentro de la huella de resolución,  $10 \log_{10}$  de ella es la potencia de la señal objetivo de los peces dentro de la huella de resolución. Ocurre a menudo que el camino de ida y el camino de rebote no están correlacionados, especialmente en geometrías biestáticas, haciendo que la expectativa del producto del cuadrado de las funciones Green de la magnitud sea igual al producto de las expectativas del cuadrado de las funciones Green de la magnitud. La ecuación 8 se plantea normalmente utilizando la Ecuación Parabólica para determinar la función Green en una guía de ondas que depende del margen que conecta dos puntos cualesquiera en la guía de ondas a la frecuencia dada.

25 La sección transversal dispersa total del pez dentro de la huella de resolución puede obtenerse al dividir estos factores de fuente y transmisión a partir de las mediciones del cuadrado de la magnitud del campo disperso. Si se conoce la sección transversal dispersa esperada de un pez individual seleccionado aleatoriamente en el grupo, puede estimarse el número total de peces  $N$  restando esta sección transversal esperada para un individuo de la sección transversal total de la huella de resolución.

35 El valor esperado del cuadrado de la magnitud de las funciones Green es normalmente una función que varía muy lentamente en cuanto a profundidad y rango en comparación con las distribuciones de grupos de peces, especialmente en entornos de plataforma continental. El valor esperado del cuadrado de la magnitud de las

funciones Green puede ser computado utilizando una serie de métodos que incluyen por ejemplo, simulación Monte-Carlo con la ecuación parabólica para un océano fluctuante dependiente del rango, así como los métodos descritos en el documento P. Ratilal, N. C. Makris, "Mean and covariance of the forward field propagated through a stratified ocean waveguide with three-dimensional random inhomogeneities," J. Acoust. Soc. Am. 118:3532-3559 (2005), y en el documento T. Chen, P. Ratilal, y N. C. Makris "Mean and variance of the forward field propagated through three-dimensional random internal waves in a continental-shelf waveguide," J. Acoust. Soc. Am. 118:3560-3574 (2005). (En muchos entornos de plataforma continental, también es posible estimar simplemente el valor esperado del cuadrado de la magnitud de la función Green promediando en profundidad el cuadrado de la magnitud de la función Green determinista calculada por medio de la ecuación parabólica u otro modelo de propagación en el rango de la huella de resolución del sonar. Esto normalmente funciona bien porque la aleatorización no cambia de forma significativa la potencia total transmitida por medio de la guía de ondas, pero a menudo mezcla y difunde esa potencia de forma relativamente uniforme en profundidad.) También, se utilizan a menudo señales de fuente de banda finita de forma que la integración de las ecuaciones 7 u 8 sobre la banda de la frecuencia de la fuente pueda por si misma suavizar de forma significativa las variaciones en el cuadrado de la magnitud esperada de la función Green en rango y profundidad.

*Intensidad dispersa esperada de elementos no homogéneos ambientales generales*

Aquí se describe un planteamiento que puede ser utilizado para modelar la dispersión de las heterogeneidades volumétricas en el océano, incluyendo los peces y el fondo del mar. Esto puede utilizarse de forma ventajosa para optimizar la detección de peces y minimizar la reverberación del fondo del mar en la huella de resolución ajustando parámetros controlables, tales como frecuencia de la fuente, la situación del receptor fuente y el filtrado en modo de ventanas espaciales de la estructura fuente.

Considérese un volumen  $V$  en el medio del que se toman imágenes en una posición horizontal  $\mathbf{r}_t$  dentro de su huella de resolución. Dadas las heterogeneidades en las posiciones  $\mathbf{r}$ , dentro del volumen con densidad  $d\mathbf{t}$  y velocidad de sonido  $c\mathbf{t}$  que difieren del medio circundante con densidad ambiente  $d$  y velocidad de sonido  $c$ , el campo disperso de las heterogeneidades puede ser modelado utilizando la aproximación Rayleigh-Born de primer orden al teorema de Green, como,

$$\Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \mathbf{p}_t, f) = Q(f)(4\pi)^2 \iiint_V \left( k^2 \Gamma_\kappa G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, f) G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_t, f) + \Gamma_d \nabla G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, f) \cdot \nabla G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_t, f) \right) dV,$$

(Ecuación 9)

$$\Gamma_\kappa = \frac{\kappa_t - \kappa}{\kappa}$$

en la que  $\kappa = dc^2$  es la compresibilidad,  $\Gamma_\kappa$  es la diferencia fraccional en compresibilidad y

$$\Gamma_d = \frac{d_t - d}{d}$$

es la diferencia fraccional en la densidad de las heterogeneidades relativas al medio del entorno.

Dado que las heterogeneidades están distribuidas de forma aleatoria en sus propiedades de dispersión físicas y acústicas, es deseable adoptar un planteamiento estadístico. El cuadrado de la magnitud esperada del espectro del campo disperso de las heterogeneidades volumétricas puede ser escrito, como en la ecuación 6, como la suma de un término coherente y otro incoherente. El término coherente es el cuadrado del campo disperso medio. El campo disperso medio viene dado por

$$\langle \Psi_s(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \mathbf{p}_t, f) \rangle = Q(f)(4\pi)^2 \iiint_V \left( k^2 \langle \Gamma_\kappa \rangle \langle G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, f) G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_t, f) \rangle + \langle \Gamma_d \rangle \langle \nabla G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, f) \cdot \nabla G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_t, f) \rangle \right) dV,$$

(Ecuación 10)

Como ocurre con la dispersión de los peces dentro de la huella de resolución, el término coherente es insignificamente pequeño para la dispersión del fondo del mar. Los valores cuadrados medios de  $\Gamma_\kappa$  y  $\Gamma_d$  son normalmente mucho más pequeños (en dos órdenes de magnitud) que sus varianzas y su covarianza. Los últimos parámetros se obtienen por medición directa, inversión acústica o inferencia. El cuadrado de la magnitud esperada del espectro del campo disperso dentro de la huella de resolución del sonar viene dado entonces por el término incoherente que es la varianza del campo disperso como,

$$\begin{aligned} & \langle |\Psi_r(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, \rho_t, f)|^2 \rangle \\ &= |\varrho(f)|^2 (4\pi)^4 \iiint_{V_c} \left( k^4 \text{Var}(\Gamma_x) \langle |G(\mathbf{r}_r | \mathbf{r}_0, f)|^2 |G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_r, f)|^2 \rangle + \text{Var}(\Gamma_d) \langle |\nabla G(\mathbf{r}_r | \mathbf{r}_0, f) \cdot \nabla G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_r, f)|^2 \rangle \right. \\ & \quad \left. + \text{Cov}(\Gamma_x, \Gamma_d) \langle 2\Re\{G(\mathbf{r}_r | \mathbf{r}_0, f)G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0, f)\nabla G^*(\mathbf{r}_r | \mathbf{r}_0, f) \cdot \nabla G^*(\mathbf{r} | \mathbf{r}_r, f)\} \rangle \right) dV_r, \end{aligned}$$

(Ecuación 11)

donde  $V_c$  es el volumen coherente para las heterogeneidades 3D aleatorias.

- 5 La ecuación 11 se plantea normalmente utilizando la Ecuación Parabólica para determinar la función Green en una guía de ondas dependiente del rango que conecta dos puntos cualesquiera en la guía de ondas a la frecuencia dada.

*Funciones de dispersión para peces y burbujas de aire*

A continuación se describen algunas funciones de dispersión típicas que pueden utilizarse para modelar el campo disperso de los peces con las ecuaciones 7 u 8 o de las burbujas en el océano.

- 10 En el caso de peces con vejigas natatorias, ese órgano relleno de aire es a menudo una fuente dominante de dispersión. Cuando es compacto acústicamente, su función de dispersión o potencia de la señal de rebote pueden ser modelados utilizando la formulación de la señal de rebote de una burbuja equivalente de igual volumen.

$$\frac{|S_0(\mathbf{r}_r, f)|^2}{k^2} = \frac{a^2}{(f_r^2 / f^2 - 1) + \delta^2} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

- 15 en la que  $a$  es el radio de la vejiga natatoria,  $f_r$  es la frecuencia de resonancia de la vejiga natatoria, y  $\delta$  es la constante de amortiguamiento total que comprende efectos de amortiguamiento termales, de radiación y viscosos. La frecuencia de resonancia de la vejiga natatoria es una función de la profundidad de sumersión  $D$  de los peces, donde  $D$  y  $a$  están en metros y viene dada por,

$$f_r = \frac{3.26}{a} \sqrt{1 + 0.0984D} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

- 20 Con estas ecuaciones, la frecuencia de resonancia, o de forma equivalente, la profundidad de los peces, así como el radio de las burbujas y la constante de amortiguamiento total, pueden ser determinadas por medio de mediciones acústicas directas del pico del espectro en la frecuencia transversal de dispersión de peces, de la potencia de la señal de rebote de los peces, de la frecuencia de resonancia transversal de pico. Estas pueden ser también determinadas por medio del conocimiento previo o por otros medios adecuados, tales como datos locales de pesca de arrastre.

- 25 Para peces sin vejiga natatoria, el cuerpo del pez proporciona la fuente principal de dispersión como un elemento heterogéneo volumétrico. El modelo de dispersión Rayleigh-Born descrito anteriormente puede también aplicarse al análisis de la dispersión de tales peces. La mayoría de los peces de interés a las frecuencias que se contemplan en esta memoria tienen tamaños corporales pequeños en comparación con la longitud de onda acústica. La ecuación 9 puede ser también aplicada para derivar la función de dispersión de un cuerpo de pez heterogéneo de volumen  $V_0$  como,

$$S(\mathbf{r}_t, f) = V_0 \frac{k^3}{4\pi} (\Gamma_x + \eta \Gamma_d) \quad \text{(Ecuación 14)}$$

- 30 en la que  $\eta = \frac{\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{k}}{k^2}$  es el producto escalar de los vectores de onda incidente y dispersa. Esta función de dispersión puede utilizarse en las ecuaciones 7 y 8 para proporcionar el espectro de intensidad de campo disperso para peces, debido a la dispersión de sus cuerpos, dada la densidad y contraste de compresibilidad de los peces con relación al agua. Normalmente, las relaciones de densidad y compresibilidad para los peces son bien conocidos a priori, haciendo que la variable primaria sea el volumen del pez, lo que puede determinarse por medio de las mediciones acústicas de la potencia de la señal de rebote.
- 35

*Maximización de los rebotes de los peces y minimización de los rebotes de reverberación límite*

Los rebotes dentro de la huella de resolución de los peces, modelada por las ecuaciones 7-8 y las ecuaciones 12-14, pueden ser maximizados, y aquellos otros procedentes de otros dispersores ambiente tales como los modelados heterogéneos del fondo marino por la ecuación 11 pueden ser minimizados, ajustando parámetros controlables tales como frecuencia de la fuente, situación del receptor fuente y ventanas espaciales de la estructura fuente. Por ejemplo, la dispersión del fondo del mar tiene a incrementarse más lentamente con la frecuencia que la dispersión resonante de los peces con vejiga natatoria, por debajo del pico de resonancia, como puede inferirse de las ecuaciones 11-14. Por lo tanto, elegir la frecuencia operacional cercana a la resonancia de los peces puede maximizar los rebotes de los peces y minimizar los de dispersión del fondo marino. Además, dado que la dispersión del fondo marino es altamente dependiente de la profundidad de la penetración significativa del sonido en el fondo marino, como se observa en la integral volumétrica de la ecuación 11 sobre los elementos heterogéneos que causan la dispersión, puede resultar ventajoso minimizar la dispersión del fondo marino, estimulando los modos de orden inferior que aún rellenan la columna de agua pero haciéndolo en ángulos rasantes relativamente someros, de forma que no se profundice tanto en el fondo marino. Esto puede lograrse, por ejemplo, por medio de las ventanas espaciales de la estructura fuente y la colocación de fuentes en posiciones batimétricas someras. La minimización de los rebotes de la agitación de la superficie marina puede ser tratada de la misma forma con las mismas ecuaciones. Tales rebotes no son normalmente significativos, excepto en estados de mar adentro donde los barcos de investigación marina no suelen operar.

#### *Optimización de la frecuencia*

Puede utilizarse un amplio rango de frecuencias de transmisión, variando desde frecuencias muy bajas de varios Hz. a frecuencias muy altas de decenas de kHz. La propagación del sonido de largo alcance en el océano se atenúa a frecuencias más bajas y es menos sensible a las fluctuaciones oceanográficas. Además, la reverberación del fondo marino tiene a ser menor a frecuencias más bajas. Por último, el rango de frecuencias de 100 Hz a 3 kHz es particularmente óptimo para la presente invención ya que abarca la resonancia de la vejiga natatoria para muchas especies de peces, donde las potencias de la señal de rebote son altas.

En la práctica, la frecuencia o banda de frecuencias óptimas pueden ser determinadas por varios factores. Primero, la dispersión de cualquier pez es efectivamente omnidireccional. De acuerdo con la presente invención, un pez individual puede ser visto desde cualquier dirección (o muchas direcciones al mismo tiempo) y tiene la misma potencia de señal de rebote. No hay fluctuaciones en la dispersión debidas a cambios en la orientación de los peces como en CFFS. En particular, los peces serán generalmente más grandes que las longitudes de onda utilizadas en CFFS, y por consiguiente, las fluctuaciones dependientes del aspecto provocarán errores en la detección de peces y en la estimación de su abundancia. (Las dispersiones pequeñas en comparación con la longitud de onda acústica se conocen como dispersiones "acústicamente compactas".)

Es deseable que la longitud de onda óptima sea lo bastante grande como para que el campo acústico recibido disperso de cualquier pez considerado se pueda expresar como el producto de tres factores – uno para la transmisión al pez de que se trate, otro para la dispersión del pez y otro para la transmisión desde el pez. A las longitudes de onda CFFS, esta factorización no suele ser posible en un sistema de guía de ondas de detección a distancia, porque los efectos de propagación y dispersión se mezclan entre sí. Los métodos normalizados CFFS para eliminar efectos de transmisión pueden entonces causar errores importantes cuando son utilizados para detección a distancia en una guía de ondas a frecuencias CFFS. La razón es que en una guía de ondas no hay direcciones únicas de incidencia y dispersión como en el espacio libre, sino que hay muchas más de esas direcciones, según el ángulo de elevación. Estas surgen de las características de multi-trayecto o multi-modo de la propagación de la guía de ondas. Si el dispersor es grande comparado con la longitud de onda, tendrá un patrón de dispersión direccional con muchos lóbulos. Estos pueden estimular los modos de diferente manera, conduciendo a la mezcla entre sí de la propagación y de la dispersión, como ocurre con la mayoría de las frecuencias CFFS. Si el objetivo se dispersa omnidireccionalmente según los ángulos de elevación abarcados por los modos de acuerdo con la presente invención, la dispersión puede ser un factor de la propagación.

En las longitudes de onda utilizadas en esta memoria, y de nuevo, en contraste con los sistemas típicos CFFS, la atenuación acústica debida a la propagación a través de los peces es insignificante incluso en rangos largos. Esto ocurre porque la extinción por unidad de volumen debida a la dispersión de los peces es muy pequeña en tales longitudes de onda. Esto a menudo no ocurre así con CFFS, donde las longitudes de onda más cortas conducen a la atenuación, a través de bancos de peces, que puede ser importante y causa desfallecimiento y ensombrecimiento de bancos distantes o de partes de bancos distantes en sentido directo. Esto, a su vez, puede conducir a errores significativos en la detección y estimación de la abundancia.

También se elige la longitud de onda acústica óptima  $\lambda$  de forma que el rango del campo lejano ( $L^2/\lambda$ ) sea más corto que la separación media entre peces, donde  $L$  es la escala de la longitud del dispersor dominante dentro de un pez, que puede ser el pez completo o sólo la vejiga natatoria. Esto no ocurre a menudo con las frecuencias CFFS, que pueden llevar a efectos de dispersión múltiple que perjudiquen la inversión de densidad de la población de peces.

La longitud de onda optima será también lo bastante grande para que la longitud de la sombra de cualquier pez individual o grupo de peces sea menor que la distancia media entre los peces. Esto puede no ocurrir a las frecuencias CFFS y puede conducir a efectos significativos de dispersión múltiple que impidan una detección precisa

de los peces y la inversión de densidad de población de peces. De nuevo, de acuerdo con la presente invención, el sonido incide en un pez determinado desde muchos ángulos de elevación al tiempo, y se propaga de vuelta al receptor tras la dispersión en muchos ángulos de elevación al tiempo. El tipo de sombra provocada por grupos densos de peces en el trayecto directo en CFFS queda por tanto muy reducido por la propagación de la guía de ondas que se contempla en esta memoria. Además, la atenuación por la absorción y dispersión en el agua y lecho marinos de propiedades no relacionadas con peces aumentan al aumentar la frecuencia. En las frecuencias de transmisión adecuadas para la presente invención, que abarcan tanto la frecuencia óptima para propagación de guía de ondas de largo alcance como la frecuencia óptima para obtención de imágenes de peces distantes por guía de ondas, estos efectos de atenuación se reducen significativamente en comparación con las frecuencias CFFS. Además, la dispersión del fondo marino y de la superficie marina tiende a aumentar al aumentar la frecuencia, lo que puede enmascarar rebotes distantes del pez según la frecuencia aumenta en regímenes CFFS; este no es un problema en el rango de las frecuencias contempladas en esta memoria.

Otra limitación respecto a la longitud de onda de la transmisión es la necesidad de soportar propagación modal. Si la longitud de onda elegida es demasiado grande, la guía de ondas no puede soportar más la propagación modal, de forma que la detección distante deja de ser eficaz. También, los niveles de dispersión de los peces se reducirán, pero a menudo así es la interferencia de dispersores no deseados del fondo y superficie marinos.

La potencia de la fuente es también una consideración importante, y se elige preferentemente de forma que la dispersión de peces esté 5 dB por encima del nivel del ruido ambiente en la guía de ondas al máximo rango de detección para la longitud de onda dada.

*Estabilización de la varianza mediante transformación logarítmica para presentación óptima de imágenes y reconocimiento de patrones y reducción de fluctuaciones debido a la dispersión aleatoria y centelleo de propagación*

La dispersión de superficies y volúmenes aleatorios conduce a la aleatoriedad en el campo recibido, como hace la propagación a través las fluctuaciones oceánicas. Ambas formas de aleatoriedad conducen, a su vez, a fluctuaciones en los rebotes dispersos acústicos recibidos de los bancos de peces. El campo acústico recibido instantáneo devuelto por un grupo de peces, por el fondo o por la superficie marina, es una variable aleatoria Gaussiana compleja y circular, al igual que el campo transmitido a través de una guía de ondas fluctuante oceánica. Esto es consecuencia del teorema del límite central dadas las muchas contribuciones aleatorias al campo por parte de los peces, por los dispersores del fondo o superficie marina o por la propagación a través del océano aleatorio. Al cuadrado de la magnitud del campo acústico instantáneo de rebote, proporcional a la intensidad instantánea y por simplicidad aquí definido como intensidad instantánea, le sigue entonces una distribución exponencial negativa. Sonidos de rebote consecutivos producen muestras estadísticamente independientes del campo acústico de rebote de un grupo de peces dentro de la huella de resolución del sistema. El promediado independiente de muestras independientes de la intensidad instantánea conduce a la intensidad promediada, que sigue a la distribución gamma. Tanto la intensidad instantánea como la intensidad promediada tienen desviaciones normalizadas proporcionales a la intensidad esperada o media. Esto quiere decir que una imagen de intensidad del entorno tiene ruido dependiente de la señal tal que la desviación normalizada o el error en la intensidad en cualquier píxel es proporcional al medio, y de esa forma es mayor donde el medio es mayor y menor donde el medio es menor. La desviación normalizada no uniforme por medio de la imagen es conocida como ruido nieve.

Generalmente, buscar modelos de peces en una imagen con ruido dependiente de la señal no es lo mejor porque los métodos que eliminan el ruido también eliminarán generalmente la información sobre la señal (dado que el ruido depende de la señal). Se utiliza la transformación logarítmica de la intensidad promediada para tratar este problema. La transformación logarítmica transforma homomórficamente el ruido dependiente de la señal en ruido independiente de la señal de forma que la desviación normalizada en cada píxel en la imagen es constante e independiente del medio de la intensidad promediada transformada logarítmicamente. La varianza se estabiliza entonces en toda la imagen de forma que la desviación normalizada o el error en cada píxel es uniforme en toda la imagen transformada logarítmicamente, y es independiente del nivel de señal (en dB) en cada píxel. La correlación normalizada o el filtrado de coincidencia son entonces ideales para encontrar patrones de distribución de peces dentro de la imagen transformada logarítmicamente. Se realiza el promediado en intensidad antes de la transformación logarítmica para reducir y eliminar de forma efectiva los efectos inherentes a la transformación logarítmica.

La desviación normalizada en cualquier píxel en una imagen de intensidad promediada es reducida por  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  de la de la intensidad instantánea ( caso  $N= 1$ ) en ese píxel, en la que  $N$  es el número de muestras independientes en el promedio. La intensidad promediada variará en toda la imagen, para producir una escena, al igual que la desviación normalizada de la intensidad promediada. La desviación normalizada de la imagen transformada logarítmicamente

en dB, sin embargo, es aproximadamente  $\frac{4.3}{\sqrt{N}}$  para  $N > 2$  por cada píxel en la imagen. Al promediar tanto los grupos de rango adyacente como las imágenes consecutivas en, por ejemplo,  $N = 10$ , se obtiene una desviación normalizada de aproximadamente 1,36 dB, lo que se traduce en una desviación normalizada de

aproximadamente un 37% de la auténtica densidad de población en el píxel dado. Este porcentaje de error se reduce además cuando se estima la población total de la forma descrita más abajo.

*Identificación de especies por medio del análisis de la frecuencia*

5 Diferentes especies de peces pueden tener potencias acústicas de la señal de rebote únicas. La dependencia de la frecuencia de estas potencias de la señal del objetivo puede ser utilizada para identificar a distancia especies de acuerdo con la presente invención. Esto se puede conseguir, por ejemplo, enviando una transmisión sobre una banda de frecuencias diferente, formando una imagen de área ancha de la potencia de la señal de rebote por unidad de superficie para esta transmisión, y repitiendo el proceso inmediatamente sobre una banda de frecuencias diferente. Pueden enviarse las transmisiones por separado transcurridos algunos segundos entre ellas, o simultáneamente si el contenido de la frecuencia no se superpone. La diferencia en la potencia de la señal de rebote por unidad de superficie por sustracción píxel a píxel de dos imágenes cualesquiera tomadas en aproximadamente el mismo momento, producirá una imagen espacial de la diferencia en la potencia de la señal de rebote de los peces por unidad de superficie para las diferentes bandas de frecuencia de las dos transmisiones. La comparación de la diferencia, así como los niveles absolutos, se utilizan para distinguir especies de peces en diferentes localizaciones en imágenes de área extendida.

20 Los grupos sociales de peces, tales como bancos y cardúmenes pueden ser detectados de forma automática y localizados en imágenes obtenidas de la forma que se describe en esta memoria, basándose en el nivel de presión de sonido, en la fuerza del rebote o en la densidad de población. Esto puede lograrse identificando todos los píxeles en la imagen por encima de un umbral especificado con respecto al nivel de fondo y contorneando estas regiones de alto nivel. Estos contornos segmentan las poblaciones de peces como regiones de nivel de presión de sonido localmente alto, fuerza del rebote o densidad de población de peces en una imagen dada.

25 Efectivamente, el módulo de tratamiento de imágenes 330 puede crear películas de área extendida de la evolución de las poblaciones de peces como una secuencia concatenada de imágenes. Las imágenes pueden estar basadas en el nivel de presión del sonido, en la potencia de la señal de dispersión y/o en la densidad de población de peces del área. Las películas permiten estudiar cuantitativamente el comportamiento en tiempo real de las poblaciones de peces e identificar potencialmente especies a partir de su comportamiento observado.

*Densidad de población de peces por área, espectros espaciales y series de tiempos de población y espectros temporales y escalas de correlación*

30 Una vez que la potencia de la señal de rebote representativa o media de un pez individual ha sido identificada en una localización determinada (a partir del análisis de frecuencia descrito anteriormente, por medio de muestreo de captura directo o CFFS, o por conocimiento anterior), puede determinarse una imagen de la densidad de población de peces por área a partir de la imagen de la potencia de la señal de rebote en cada píxel. Esto se consigue substrayendo la potencia media del rebote de un pez individual en esa localización de cada píxel en donde se determinó que dicha potencia media del rebote fuera representativa en la imagen.

35 Pueden entonces obtenerse imágenes bidimensionales de los espectros espaciales de la densidad de población de los peces, tomando la transformada bidimensional de Fourier de una imagen de la densidad de población de peces por área. La desviación normalizada de cada píxel de las imágenes espectrales puede ser reducida promediando estadísticamente las imágenes espectrales independientes a partir de rebotes consecutivos. Puede utilizarse la transformación logarítmica para estabilizar la varianza y determinar si existen en los espectros leyes de potencia que puedan ser utilizadas para caracterizar y predecir las distribuciones espaciales.

45 Puede obtenerse la población total de peces en una imagen de densidad de población de peces dada sumando los valores de cada píxel y multiplicándolo por el área de píxeles. Se generan entonces series de tiempos de la densidad de población de peces, computando la población total de peces para una secuencia temporal de imágenes. Además de la población total de peces, es posible determinar la población de peces dentro de un rango de densidad de área en concreto o la población de peces dentro de un segmento de banco de peces determinado o de una región espacial, sumando sólo los píxeles relevantes.

50 Dado que a estas estimaciones de población se añaden contribuciones de millones de peces de cientos de píxeles independientes, las fluctuaciones debidas al centelleo de la propagación y las variaciones de la sección transversal de la dispersión de peces deben dar lugar a errores inferiores al 1% del valor estimado para cualquier muestra dada de población temporal. (Esto es consecuencia de la "ley de los grandes números". La desviación normalizada porcentual de la población total es la relación entre la desviación normalizada y la densidad media de población en un único píxel en una imagen promediada dividida por la raíz cuadrada de la suma de los píxeles independientes para obtener la población total.)

*Series por tiempos de área de banco de peces, centro de la población y morfología*

55 El módulo analizador de datos 320 puede caracterizar el área total ocupada por un banco de peces detectado y segmentado, determinando el número de píxeles en un banco segmentado y multiplicándolo por el área de píxeles. Puede determinarse el centro de la población del banco segmentado en una imagen de la densidad de la población

- de peces encontrando el primer momento del vector de la posición horizontal con respecto a la densidad de población de peces que varía espacialmente, dentro del banco. El eje principal y el de la extensión del banco de peces y su dirección pueden ser determinados desde el segundo momento central del vector de la posición horizontal dentro del banco. Estos ejes principales caracterizan cuantitativamente la morfología del banco. De forma alternativa, puede utilizarse la función normalizada de auto-correlación bidimensional de una imagen de la densidad de población de peces para determinar el área de coherencia de un centro de la población, en la que este área de coherencia puede ser definida por el contorno más cercano a la correlación de pico en el lapso cero que ha caído a un valor determinado, tal como la convención  $1/e$ . Las series por tiempos del área del banco de peces, el centro de la población y la morfología se generan computando estas cantidades durante una secuencia temporal de imágenes.
- 5
- 10 *Estimación de la velocidad de los peces por medio de movimiento diferencial, conservación de la masa, presiones ambiente estimadas por medio de la conservación del momento*
- Los vectores de velocidad absoluta de un campo entero de peces pueden ser también determinados diferenciando con respecto al tiempo la densidad de población y diferenciando con respecto al espacio el flujo de masa limitado por la conservación de la masa y, por ejemplo, la minimización de la energía cinética en el campo del flujo de peces de acuerdo con el principio de Fermat de la acción menor. Las presiones ambiente en los peces que hacen que se muevan pueden también ser cuantificadas utilizando la ecuación de la conservación del momento y utilizando el campo de velocidad computado y el campo de densidad de población medido. Puede utilizarse un filtro paso bajo de los datos de densidad de población espacial para estimar las velocidades más altas en el campo de flujo.
- 15
- Las velocidades absolutas de los grupos de peces pueden ser también determinadas por medio de diferenciar con respecto al tiempo el centro de la masa o el gradiente espacial del banco dado con respecto a ecos trazados desde un objetivo de localización fija y conocida. Las velocidades relativas de los centros de masa de los peces pueden ser determinadas diferenciando con respecto al tiempo las posiciones de los centros de la masa.
- 20
- Estimación de la velocidad instantánea de banco de peces por medio del efecto Doppler*
- Para fuentes ancladas al fondo y receptores también fijados al fondo del mar, la velocidad instantánea media de un banco de peces dentro de la huella de resolución del sistema y su varianza pueden ser determinadas examinando el medio y la varianza en el desplazamiento de frecuencia Doppler del rebote disperso. Algunas formas de onda adecuadas para determinar el desplazamiento Doppler incluyen m-secuencias de ventanas, dado que estas ofrecen tanto resolución de alto rango como alta resolución Doppler para objetivos de baja cifra de velocidad como los peces. Para una fuente y receptor únicos, sólo se puede determinar el componente radial de la velocidad. Para escenarios multi-estáticos con múltiples receptores y/o fuentes, se pueden determinar ambos componentes horizontales de la velocidad. La estimación de la velocidad de peces a larga distancia desde sistemas fuente-receptor en movimiento es más difícil porque el movimiento de la plataforma puede enmascarar la señal Doppler del pez.
- 25
- 30
- Resultados de ejemplo*
- 35 Un sistema de acuerdo con la presente invención se utilizó para estudiar la Plataforma Continental de la Costa Este de Estados Unidos, 200 kms. al sur de Long Island, Nueva York, cerca del borde de la plataforma en mayo de 2003, simultáneamente con mediciones del recorrido de observación lineal realizadas por medio de CFFS. Se descubrió una alta correlación espacial y temporal entre el sistema basado en Euler de la presente invención y el sistema basado en Lagrange en CFFS al detectar, obtener imágenes y trazar bancos de peces tanto pequeños como grandes. Mientras que el sistema CFFS tenía una huella de resolución horizontal con un diámetro de 10 mts., el sistema de la presente invención tenía una resolución de 15 mts. a lo largo del recorrido de observación lineal CFFS y aproximadamente 2 grados en acimut a lo largo de él, por ejemplo, una resolución transversal de 350 mts. en 10 kms.
- 40
- Muchos de los bancos de peces co-registrados en el tiempo y en el espacio por los dos sistemas permanecían en el tiempo en imágenes de área extendida antes y después del recorrido de observación lineal CFFS. La persistencia observada también se mostró en una correspondencia puramente espacial al detectar, obtener imágenes y trazar bancos de peces por parte de los dos sistemas. Tras un análisis estadístico, se observó que en aquellas localizaciones en las que el presente sistema obtuvo imágenes con características lo bastante destacables como para superar la intensidad de fondo por al menos un orden de magnitud, a una tasa de repetibilidad temporal de más de 25% en ese día, CFFS siempre detectó capas altamente concentradas de peces de una densidad de área de al menos  $0,4$  peces/ $m^3$ . Esto se correspondía con bancos de peces muy grandes y con gran densidad de población. No se encontró correlación entre las características de las imágenes generadas de acuerdo con la presente invención y las del sub fondo tras una amplia investigación y a las características del suelo marino de la plataforma les faltaba relieve suficiente para provocar rebotes perceptibles.
- 45
- 50
- 55 Se realizaron de forma continua estimaciones de las densidades de población de peces sobre amplias áreas a partir de las imágenes generadas de acuerdo con la presente invención. Las densidades de población de área son coherentes con las obtenidas de CFFS durante el mismo periodo de tiempo. Nuestras estimaciones de densidad de población dependen de la sección transversal esperada de la dispersión de un pez individual, que descubrimos que

tiene una potencia de la señal de rebote correspondiente de -45 dB en la banda 390-440 Hz de nuestro experimento. Esta proviene de una combinación de modelado estadístico y evidencia empírica recogidos por medio de muestras de arrastre obtenidas previamente en la misma localización y de mediciones CFFS locales simultáneas de densidades de población de peces tanto volumétricas como por área. Las capturas consistían en un componente variable de arenque del Atlántico, pargo, merluza, lubina, pintarroja y caballa, todos los cuales tienen rebotes dentro de un orden de magnitud cada uno en la banda 390-440 Hz, que está casi, o justo por debajo, de la resonancia de la vejiga natatoria de muchas de estas especies. Una desviación normalizada de menos de 1 dB por píxel corresponde a un error inferior al 25% en cualquier estimación de intensidad o densidad de población para el píxel dado. Se esperan variaciones en la sección transversal de dispersión de un pez individual para introducir una desviación normalizada inferior a 1 dB para cualquier píxel correspondiente a un cardumen de peces, dado que se suma un número muy grande de peces en una huella de resolución correspondiente del presente sistema. El centelleo de transmisión desde la aleatoriedad en el medio oceánico debido a efectos tales como las olas internas y la turbulencia también introduce, en última instancia, una incertidumbre relativamente pequeña en las imágenes obtenidas dado que se espera una desviación normalizada de aproximadamente 1 dB por píxel tras promediar más de cinco imágenes instantáneas consecutivas y dos grupos de rango adyacente por imagen.

Se generaron series por tiempos de poblaciones de peces por medio de la toma de muestras a intervalos de 50 segundos. Abarcaron la población total de peces así como la población por encima o por debajo de varios umbrales significativos de densidad de área. La contribución de la población de densidades moderada a baja ( $n_A < 0.2$  pez/m<sup>2</sup>), que aparentemente corresponde a pequeños grupos de peces dispersos y en la periferia de grandes cardúmenes de peces, fue relativamente estable durante el día y supuso entre 1/5 y 1/3 de la población total de peces y en torno al 90% del área total. Se produjo una dramática reducción en las poblaciones con densidad entre moderada a alta ( $n_A \leq 0.2$  pez/m<sup>2</sup>) de 4/5 a 1/2 del total en eventos de aproximadamente una hora de duración en dos ocasiones distintas. La fragmentación en este último caso fue severa. Tuvo lugar una reducción en el área ocupada por densidades de peces entre moderada a alta con un aumento correspondiente en el área ocupada por poblaciones de densidad entre moderada a baja. La pérdida de población se debe o bien a que los peces abandonan el área de estudio o a la dispersión de los peces por debajo de la densidad de 0.01 peces/m<sup>2</sup> donde dominan los mecanismos de dispersión del fondo marino. Esto último aparentemente enmascara los rebotes de los peces en un máximo del 30% del área examinada. Este mecanismo no biológico todavía contribuye a las imágenes de densidad de área en todas las otras regiones pero no se incluye en las series de población en el tiempo. Regiones con densidad extremadamente alta, con concentraciones mayores de 0.5 pez/m<sup>2</sup> suponen menos del 16% de la población total y menos del 1% del área total. Dado que se añadieron a estas estimaciones de población contribuciones de millones de peces de cientos de píxeles independientes, las fluctuaciones debidas al centelleo de la propagación y a las variaciones en la sección transversal de la dispersión de peces deben llevar a errores inferiores al 1% del valor estimado para cualquier muestra temporal de población dada.

La disponibilidad de imágenes temporalmente continuas también permite analizar cuantitativamente el comportamiento e interacción de grupos de peces tanto grandes como pequeños en áreas muy amplias y de forma novedosa. El módulo analizador de datos 320 puede utilizar un procedimiento automático para segmentar, seguir y estimar la población y área de cada grupo individual de peces que se encuentran dentro de una serie de imágenes. Esto facilita el estudio de la evolución y fragmentación de un banco de peces. Primero, se identifican los bancos individuales y se les segmenta en caso de densidades de peces entre moderada y alta ( $n_A > 0.2$  pez/m<sup>2</sup>). Se generan entonces series en el tiempo de la población, área y centro de la población para estos grupos.

La velocidad relativa de los grupos de veces puede ser también determinada a distancia por medio de imágenes obtenidas de acuerdo con esta memoria. Se puede generar un histograma de la velocidad diferencial entre los centros de población con el propósito de analizarlo. En nuestros experimentos, se obtuvo una tasa de separación media de -0,30 m/s y una desviación normalizada de 3,0 m/s, y son coherentes con las velocidades esperadas de los peces individuales. Los valores extremos en el histograma, de hasta +/- 15 m/s, sin embargo, son velocidades semejantemente aparentes, consecuencia de cambios abruptos en la densidad de los peces que se propagan como las olas a través del banco.

## REIVINDICACIONES

1. Un método de caracterizar una población de peces, que comprende las etapas de:
- a. generar, dentro de un entorno acuático, señales acústicas dirigidas horizontalmente a través de modos de intercepción, en el que, al experimentar las señales pérdida de dispersión cilíndrica, las señales acústicas de frecuencias inferiores a 10kHz hacen que un pez disperse las señales acústicas esencialmente de forma omnidireccional;
  - b. recibir señales acústicas de rebote, estimuladas por las señales acústicas generadas; y
  - c. interpretar las señales acústicas de rebote con objeto de detectar y caracterizar la población de peces, comprendiendo la interpretación, determinar una intensidad dispersa medida de las señales acústicas de rebote dentro de una huella de resolución, establecer una potencia de la señal de rebote de los peces, y en función de ello, identificar los rebotes indicativos de una población de peces, en el que la potencia de la señal de rebote de los peces se basa en una sección transversal de dispersión total de peces dentro de la huella de resolución, determinada por medio de dividir los factores de fuente y transmisión por el cuadrado de la magnitud de la intensidad dispersa medida.
2. El método según la reivindicación 1 en el que la interpretación comprende además identificar una especie de peces a partir de una dependencia de la frecuencia de la potencia de la señal de rebote.
3. El método según la reivindicación 1 en el que las señales acústicas generadas se propagan dentro de las características geofísicas limitantes que actúan como una guía de ondas.
4. El método según la reivindicación 1 en el que las señales acústicas generadas se propagan dentro de una guía de ondas producida por variaciones en la velocidad del sonido en la columna de agua. .
5. El método según la reivindicación 1 en el que la caracterización se produce en una región que sobrepasa los 25 km<sup>2</sup> en un minuto.
6. El método según la reivindicación 1 en el que las señales acústicas de propagan, y las señales acústicas de rebote abarcan, 360 grados en acimut.
7. El método según la reivindicación 1 en el que las señales acústicas generadas se generan a partir de una estructura de fuentes acústicas orientadas dispuestas verticalmente dentro del entorno acuático.
8. El método según la reivindicación 1 en el que las señales acústicas generadas son uniformes en sentido acimutal.
9. El método según la reivindicación 1 en el que las señales acústicas generadas son pulsadas.
10. El método según la reivindicación 1 en el que la etapa de interpretación comprende un filtrado y una formación de haces temporales apareados.
11. El método según la reivindicación 1 en el que la etapa de interpretación comprende compensar al menos una de entre las siguientes, pérdida de transmisión bidireccional de la guía de ondas, huella de resolución, potencia de la señal de rebote de los peces, potencia de la fuente y fluctuaciones estadísticas de propagación y dispersión de la guía de ondas.
12. El método según la reivindicación 1 en el que la etapa de interpretación comprende (i) establecer potencias de rebote de diferentes especies de peces y (ii) distinguir entre diferentes poblaciones de peces basándose en las potencias de rebote establecidas.
13. El método según la reivindicación 1 que además comprende la etapa de seleccionar una longitud de onda optimizada de las señales acústicas generadas.
14. El método según la reivindicación 13 en el que la longitud de onda optimizada es una longitud de onda seleccionada por ser lo bastante grande para permitir que las señales acústicas de rebote de cualquier pez en concreto, de los peces que van a ser caracterizados, puedan ser expresadas como el producto de (i) un factor que representa la transmisión de la guía de ondas hacia los peces, (ii) un factor que representa la dispersión de los peces, y (iii) un factor que representa la transmisión de la guía de ondas desde los peces.
15. El método según la reivindicación 13 en el que la longitud de onda optimizada,  $\lambda$ , se selecciona de tal forma, que un rango de campo lejano de las señales acústicas generadas,  $L^2/\lambda$  donde L es la escala longitudinal del dispersor dominante dentro de un pez, que puede ser el pez entero o la vejiga natatoria del pez, es más reducido que un espaciamiento medio entre los peces que van a ser caracterizados.

16. El método según la reivindicación 13 en el que las señales acústicas son generadas con una longitud de onda optimizada y un nivel de potencia tales que las señales acústicas de rebote desde el pez superan un nivel de ruido ambiente en un rango máximo de detección de al menos 5 dB.
- 5 17. El método según la reivindicación 1 que comprende además la etapa de generar imágenes de la población de peces basándose en las señales acústicas de rebote.
18. El método según la reivindicación 17 en el que la etapa de generar imágenes comprende la concatenación de imágenes sucesivas formando una película.
- 10 19. El método según la reivindicación 17 que además comprende la etapa de caracterizar un área total ocupada por la población de peces detectada, determinando el número de píxeles en una imagen y multiplicándolo por el área de píxeles.
20. El método según la reivindicación 19 que además comprende identificar un centro de la población de peces detectada, encontrando el primer momento del vector de posición horizontal con respecto a la densidad de población de peces que varía espacialmente dentro de la población de peces detectada.
- 15 21. El método según la reivindicación 20 que además comprende detectar la velocidad de la población de peces diferenciando con respecto al tiempo el centro identificado de la población.
22. El método según la reivindicación 20 que además comprende determinar los vectores de velocidad de un campo diferenciando con respecto al tiempo y al espacio siguiendo la conservación de masas.
23. El método según la reivindicación 20 que además comprende cuantificar las presiones ambiente en los peces que les hacen que se desplacen siguiendo la conservación del momento.
- 20 24. El método según la reivindicación 19 que además comprende caracterizar una población total de peces dentro del área.
- 25 25. El método según la reivindicación 17 en el que la etapa de interpretar comprende realizar transformaciones logarítmicas de las intensidades de las señales acústicas de rebote para convertir el ruido de fondo dependiente de la señal de rebote, en ruido aditivo independiente de la señal de rebote y filtrar las intensidades transformadas utilizando filtrado de correlación o coincidencia para identificar patrones de potencias de rebote de peces o distribuciones de población.
26. El método según la reivindicación 13 en el que la longitud de onda optimizada se selecciona de forma que la atenuación acústica total causada por la dispersión de la guía de ondas del pez o grupos de peces es inferior a 1 dB.
- 30 27. El método según la reivindicación 1 que comprende la etapa de estimar una velocidad de un banco de peces basándose en un desplazamiento de frecuencia de efecto Doppler de las señales acústicas de rebote.
28. El método según la reivindicación 1 en el que generar las señales acústicas comprende estimular modos de guía de ondas para maximizar las señales acústicas de rebote de los peces y para minimizar las señales acústicas de rebote del fondo marino.
29. Aparato para caracterizar una población de peces, que comprende:
- 35 a. un dispositivo transmisor (215) para generar, dentro de un entorno acuático, señales acústicas dirigidas horizontalmente por medio de modos de intercepción en los que las señales experimentan pérdida de dispersión cilíndrica, teniendo las señales acústicas frecuencias por debajo de 10kHz que hacen que un pez disperse las señales acústicas sustancialmente de forma omnidireccional;
- b. un receptor (225) para recibir las señales acústicas de rebote, estimuladas por las señales acústicas generadas; y
- 40 c. un módulo analizador (320) para interpretar las señales acústicas de rebote así como para detectar y caracterizar la población de peces, comprendiendo la interpretación, determinar una intensidad medida de dispersión de las señales acústicas de rebote dentro de una huella de resolución, estableciendo una potencia de la señal de rebote de los peces y, basándose de ello, identificar las señales de rebote indicativas de población de peces,
- 45 en el que la potencia de la señal de rebote de los peces se basa en una sección transversal total de dispersión dentro de la huella de resolución, determinada por dividir los factores de fuente y transmisión por el cuadrado de la magnitud de la intensidad dispersa medida.
30. El aparato según la reivindicación 29 en el que el dispositivo transmisor (215) está configurado para generar las señales acústicas de acuerdo con el método de cualquiera de las reivindicaciones 8, 9, 13-16, 26 y 28.

31. El aparato según la reivindicación 29 en el que el módulo analizador (320) está configurado para interpretar las señales acústicas de rebote de acuerdo con el método de cualquiera de las reivindicaciones 2, 10-12, 19-21, 24, 25 y 27.
- 5 32. El aparato según la reivindicación 29 que además comprende un módulo de tratamiento de imágenes (330) configurado para generar imágenes de acuerdo con el método de la reivindicación 17 o de la reivindicación 18.
33. El aparato según la reivindicación 29 en el que el dispositivo transmisor (215) genera señales acústicas que se propagan 360 grados en acimut.
34. El aparato según la reivindicación 29 en el que el dispositivo según (215) comprende una estructura orientada vertical de fuentes acústicas. .
- 10 35. El aparato según la reivindicación 29 en el que el módulo analizador (320) está configurado para caracterizar una población total de peces en un área determinada y las variaciones de la población caracterizada en el tiempo, como series por tiempos de poblaciones de peces dentro de un rango de densidad de población de área.
- 15 36. El aparato según la reivindicación 29 en el que el módulo analizador (320) está configurado para caracterizar un espectro temporal de series por tiempos de poblaciones de peces y una escala en el tiempo de auto correlación de fluctuaciones de la población.
37. El aparato según la reivindicación 32 en el que el módulo de tratamiento de imágenes (330) está configurado para establecer un espectro espacial bidimensional de la población de peces y una escala de correlación espacial de un centro de población de peces.
- 20 38. El aparato según la reivindicación 32 en el que el módulo de tratamiento de imágenes (330) está configurado para determinar series por tiempos de la morfología de un grupo de peces por medio de la determinación de sus ejes mayor y menor.
39. El aparato según la reivindicación 32 en el que el módulo de tratamiento de imágenes (330) está configurado para reducir una varianza de cada píxel promediando muestras independientes temporales o espaciales de una intensidad de la señal acústica recibida proporcional al número de muestras del promedio.

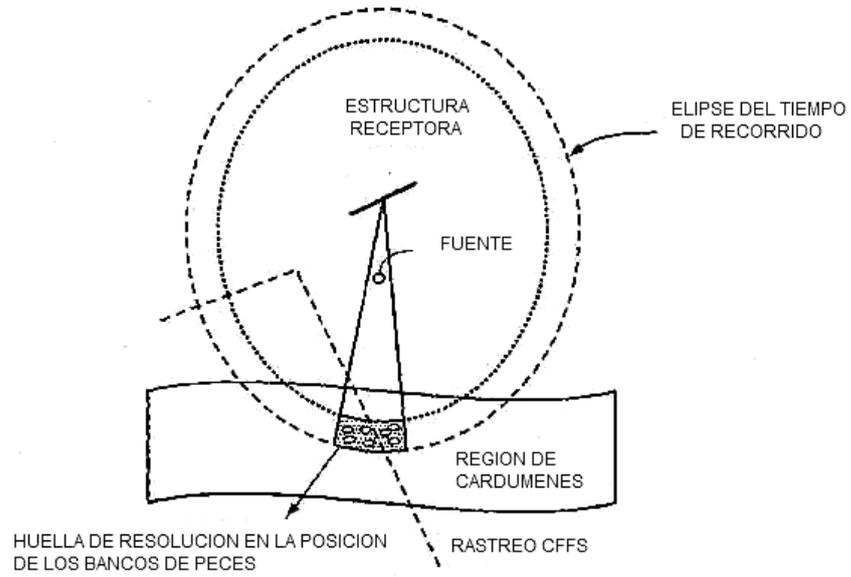


FIG. 1

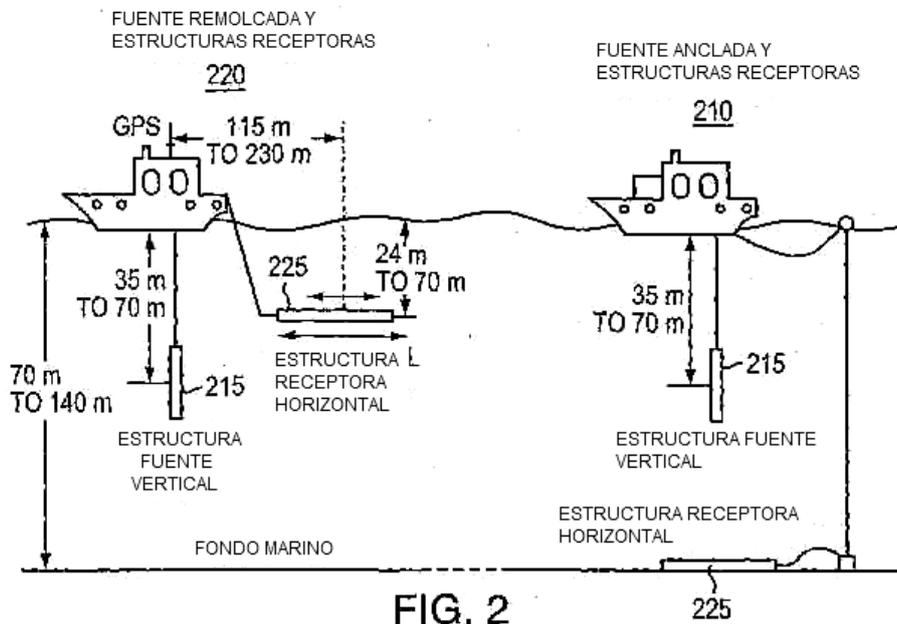


FIG. 2

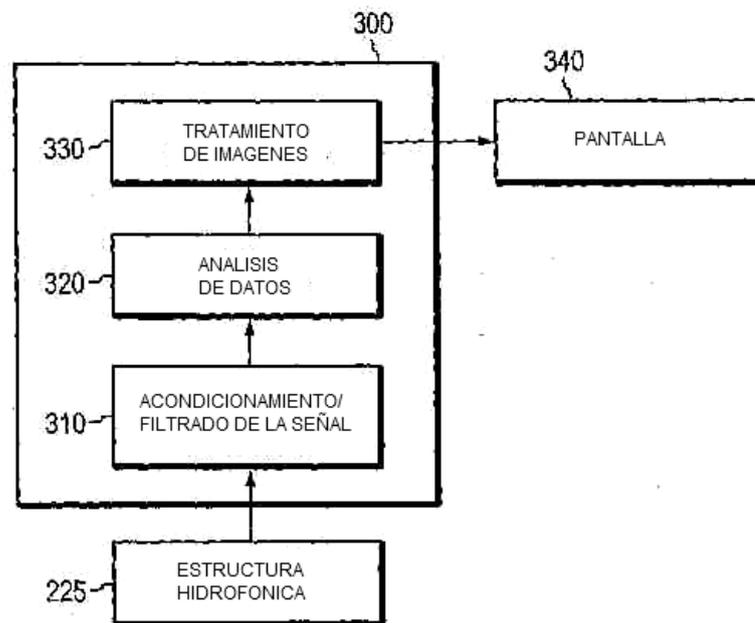


FIG. 3