

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 375 611**

51 Int. Cl.:
G01S 3/808 (2006.01)
G01S 5/22 (2006.01)
F41J 5/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **10002861 .2**
96 Fecha de presentación: **24.08.2005**
97 Número de publicación de la solicitud: **2204665**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **07.07.2010**

54 Título: **MÉTODO PARA IDENTIFICAR UN REBUFO.**

30 Prioridad:
24.08.2004 US 925875
23.08.2005 US 210295

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
02.03.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
02.03.2012

73 Titular/es:
Raytheon BBN Technologies Corp.
10 Moulton Street
Cambridge, MA 02138 , US

72 Inventor/es:
Mullen, Richard;
Brinn, Seth Marshall;
Milligan, Stephen D. y
Barger, James

74 Agente: **Carvajal y Urquijo, Isabel**

ES 2 375 611 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método para identificar un rebufo.

Resumen de la invención

5 La presente invención hace referencia a tecnologías para las fuerzas de orden público y seguridad, y más particularmente a métodos y sistemas para determinar el origen y dirección de la trayectoria de proyectiles supersónicos. Los métodos y sistemas son capaces de determinar y distinguir la localización de los tiradores, incluso para grandes distancias entre el tirador y el sensor, y cuando no se recibe señal alguna o si se recibe sólo una señal débil del sonido de la boca del arma de fuego.

Antecedentes de la invención

10 Se conocen sistemas y métodos que pueden determinar la dirección general y la trayectoria de proyectiles supersónicos, tales como balas y obuses, midiendo los parámetros asociados con la onda de choque generada por el proyectil. Un sistema tal, que se encuentra descrito en la patente estadounidense N° 5,241,518, incluye al menos tres sensores separados, donde cada sensor incorpora tres transductores acústicos dispuestos en un plano. Los sensores generan señales en respuesta a la onda de choque que se relacionan con el acimut y ángulo de elevación con respecto al origen de la onda de choque. Las medidas de sólo la onda de choque no permiten determinar la distancia entre el sensor o sensores y el origen de la onda de choque. La información sobre distancia habitualmente se obtiene del fognazo o rebufo.

20 El acimut y ángulo de elevación de un tirador en referencia a la ubicación del sensor habitualmente se determinan midiendo la información del tiempo de llegada (TOA, por sus siglas en inglés) de la señal de la boca del arma de fuego y la señal de la onda de choque en cada sensor. Cada uno de los sensores encuentra las señales en un momento diferente y genera una señal en respuesta a la presión del rebufo y la presión de la onda de choque. Las señales de los diferentes sensores se procesan, y puede determinarse una dirección (acimut y elevación) desde el sensor o sensores al origen del rebufo y onda de choque, y por lo tanto la trayectoria del proyectil.

25 Los sistemas convencionales utilizan micrófonos, que pueden estar ubicados relativamente cerca unos de otros (por ejemplo, a 1 metro de distancia) o lejos (por ejemplo, montados sobre un vehículo o llevados por soldados en el campo de batalla), y miden de forma omnidireccional la presión del rebufo y la presión de la onda de choque en sus respectivas ubicaciones. Sin embargo, a menos que los sensores estén muy separados unos de otros y/o que la trayectoria se encuentre dentro de la antena, se necesita una precisión de sincronización muy alta para obtener soluciones sólo de onda de choque precisas, y se requieren técnicas especiales.

30 Una antena de gran tamaño puede ser una desventaja importante, por ejemplo, en sistemas montados en vehículos. Además, los sistemas con sólo una resolución de tiempo mínima pueden generar soluciones ambiguas en las cuales la información del tiempo de llegada de la onda de choque en un conjunto de sensores dado es casi idéntica para dos ubicaciones del tirador especularmente simétricas.

35 Los algoritmos convencionales requieren al menos 4 detecciones de onda de choque y rebufo, de modo tal que una matriz de 4 x 4 pueda invertirse para trazar un mapa de una onda plana en el TOA de la onda de choque. Pequeños errores en la determinación del TOA de choque y rebufo pueden producir errores sustanciales en los cálculos de la distancia. Además, los algoritmos convencionales asumen una velocidad de la bala constante a lo largo de la trayectoria de bala, que produce cálculos de distancia imprecisos para disparos de largo alcance a más de aproximadamente 300m.

40 Por lo tanto, hay una necesidad de algoritmos rápidamente convergentes capaces de calcular con precisión una distancia de tirador lejano. Existe también la necesidad de distinguir soluciones solamente con onda de choque, para la dirección del tirador. Existe además la necesidad de extraer señales de la boca del arma de fuego que pueden estar ocultas por señales acústicas no relacionadas con el rebufo.

Resumen de la invención

45 La presente invención proporciona un método para identificar un rebufo según la reivindicación 1. En otro aspecto se proporciona un sistema para identificar un rebufo según la reivindicación 8.

50 La invención aborda deficiencias del arte previo, en varias realizaciones, proporcionando métodos y sistemas para calcular la distancia del tirador para disparos de largo alcance, en particular, cuando las señales de la boca del arma de fuego son débiles o se detectan en una cantidad insuficiente de canales de detección. Los métodos y sistemas revelados también mejoran la desambiguación de soluciones de la trayectoria del tirador de sólo onda de choque, con mejoras adicionales alcanzadas mediante la inclusión de un sonido débil de la boca del arma de fuego y/o detectado de manera no fiable en el proceso de optimización.

Para evitar que se interpreten señales parásitas (falsas) como formas de onda de la onda de choque, una trayectoria de proyectil puede eliminarse por considerarse falsa si la energía acústica de la forma de onda de la onda de choque

5 medida tiene un valor menor que un valor umbral predeterminado en una banda de frecuencia predeterminada, por ejemplo, frecuencias entre aproximadamente 700 Hz y 10 kHz. De manera alternativa o adicional, una trayectoria de proyectil puede eliminarse por considerarse falsa si un intervalo de tiempo, donde una forma de onda de la onda de choque medida tiene un valor positivo, es inferior a un tiempo mínimo o superior a un tiempo máximo, por ejemplo, menos de aproximadamente 70µs o más de aproximadamente 300µs.

10 En realizaciones ventajosas, la energía total puede determinarse integrando la energía medida sobre la ventana, preferentemente sin tener en cuenta partes en la señal detectada causadas por ecos de la onda de choque. De manera ventajosa, el valor de la señal de cresta puede determinarse en la ventana con la energía total máxima y si el valor de la señal de cresta es mayor que la energía total medida en la ventana por un factor de relación predeterminado, el valor de la señal de cresta puede identificarse como un valor que está relacionado con la señal de la boca del arma de fuego.

15 Las realizaciones de la invención pueden incluir una o más de las siguientes características. La distribución de errores de sincronización de la antena y/o los sensores acústicos puede relacionarse con variaciones de ganancia, variaciones de muestreo y variaciones de la posición del sensor de los sensores de antena. El nivel de confianza para la desambiguación depende del tamaño de la antena, por lo que las antenas menores requieren mayor precisión de medición. Si existen dos soluciones ambiguas, la trayectoria discriminada del proyectil se selecciona en función de la relación entre los residuos para las dos soluciones ambiguas.

20 En otras realizaciones ventajosas, pueden determinarse las diferencias en el tiempo de llegada (TDOA, por sus siglas en inglés) para pares de sensores, designando un sensor que se encuentra primero con la onda de choque como un sensor de referencia, y configurando un primer bloqueo de un circuito de sincronización cuando la amplitud de, por ejemplo, la parte inicial de la señal solamente de onda de choque, en el sensor de referencia, cruza un valor umbral. El primer bloqueo activa contadores de inicio para cada uno de los demás sensores, estando en marcha el contador en cada uno de los otros sensores hasta que el sensor correspondiente se encuentra con la onda de choque. Cuando uno de los otros sensores se encuentra, por ejemplo, con la parte inicial de la señal solamente de onda de choque, determina un segundo bloqueo para ese sensor, que detiene el contador de inicio para ese sensor. A continuación, se registran los valores de TDOA para los otros sensores en relación con el sensor de referencia.

A partir de la siguiente descripción de realizaciones preferentes y a partir de las reivindicaciones, serán evidentes otras características y ventajas de la presente invención.

Breve descripción de los dibujos

30 Estas y otras características y ventajas de la invención se comprenderán mejor mediante la siguiente descripción ilustrativa con referencia a los dibujos adjuntos, en los que los elementos se indican con referencias similares, y pueden no estar a escala.

La figura 1 muestra una vista transversal esquemática de un cono de Mach que intersecta una antena;

35 La figura 2 muestra de manera esquemática un matriz de sensores a modo de ejemplo con 7 sensores acústicos omni-direccionales;

La figura 3 muestra de manera esquemática la ambigüedad inherente a la determinación de la trayectoria solamente con onda de choque;

La figura 4 muestra de manera esquemática una densidad de probabilidad para la diferencia de tiempo de mediciones de llegada para determinar la curvatura del cono de Mach;

40 La figura 5 muestra de manera esquemática la probabilidad de realizar una desambiguación correcta entre trayectorias de tirador;

La figura 6 muestra un diagrama esquemático de un proceso de correlación;

La figura 7 es un flujo de procesos de un algoritmo genético utilizado para una desambiguación correcta entre las trayectorias del tirador;

45 La figura 8 es un flujo de procesos para discriminar señales que no son de onda de choque;

La figura 9 es un diagrama esquemático de un modelo de tiempo de llegada (TOA) de la onda de choque;

La figura 10 muestra un diagrama de flujo de procesos esquemático para el cálculo de la distancia; y

La figura 11 muestra un diagrama de flujo de procesos esquemático de un algoritmo genético para el cálculo de distancia.

50

Descripción detallada de algunas realizaciones ilustradas

Tal como se ha descrito en el resumen con anterioridad, la invención proporciona, en diferentes realizaciones, métodos y sistemas para el cálculo de la distancia de un tirador y la desambiguación de trayectorias de proyectiles. Estos sistemas y métodos son particularmente útiles y ventajosos, cuando se detecta un número insuficiente de parámetros requeridos para una solución precisa, o cuando dichos parámetros no pueden ser detectados de manera fiable.

Las trayectorias de proyectiles supersónicos se calculan exclusivamente a partir de los tiempos de llegada de la onda de choque del proyectil, medidos por varios sensores a poca distancia unos de otros, distribuidos en un volumen de medición "pequeño" denominado antena. Un volumen de medición se considera pequeño si la separación entre sensores es de 2 metros o menos. Una vez que se ha identificado la trayectoria del proyectil, se conoce la posición del tirador, excepto por la distancia en retroceso a lo largo de la trayectoria. Esta distancia puede descubrirse si la antena obtiene también el tiempo de llegada del sonido del rebufo. Sin embargo, el rebufo no siempre es detectable, de manera que una solución precisa solamente con onda de choque es fundamental para determinar la trayectoria.

Con referencia a la figura 1, se considera que la superficie de la onda de choque es una superficie cónica en expansión, con su eje coincidente con la trayectoria de la bala. La superficie de la onda de choque también se conoce como el cono de Mach. Para obtener la solución solamente con la onda de choque, es necesario determinar tres propiedades: el ángulo de llegada, el radio de curvatura, y el gradiente espacial del radio de curvatura de la superficie cónica en expansión, a partir de los tiempos de llegada medidos en cinco o más sensores de antena.

El *ángulo de llegada* del generador de la superficie cónica que primero alcanza la antena determina dos posibles ángulos relativos (a menudo denominados ángulos 'ambiguos') en la trayectoria de la bala respecto del ángulo de llegada a la antena. Los ángulos 'ambiguos' se describirán a continuación en mayor detalle en referencia a la figura 3. El *radio de curvatura* de la superficie cónica en la antena determina tanto la distancia como la dirección hacia la trayectoria. El *gradiente del radio de curvatura* a lo largo del trayecto del generador de superficie determina en qué dirección se está moviendo la bala, eliminando de ese modo la 'ambigüedad' entre las dos posibles direcciones. Determinar con precisión estas tres propiedades de la onda de choque, y decidir correctamente entre los dos posibles ángulos 'ambiguos' de la trayectoria requiere mediciones muy precisas. Por ejemplo, los errores aleatorios no deberían ser mayores de aproximadamente 1µs para decidir correctamente entre los dos ángulos de orientación alternativos del tirador.

La precisión requerida puede ser calculada considerando la característica de propagación de la onda de choque representada en la figura 1. Con referencia a la figura 2, una antena 20 incluye N sensores ($N = 7$) que pueden determinar los tiempos de llegada de una onda de choque cónica que avanza. Dado que se puede esperar que las trayectorias entrantes de la bala se originen esencialmente en cualquier sitio, los elementos de antena 23 a 28 pueden estar ventajosamente distribuidos de manera uniforme en posiciones C (C_{xj}, C_{yj}, C_{zj}) sobre una superficie esférica, con un elemento 22 ubicado en el centro en (C_{x0}, C_{y0}, C_{z0}), de manera que se presenta una abertura de sensor uniforme independientemente del ángulo de llegada. En el momento en el que el primer sensor, designado como el sensor de referencia, detecta la superficie cónica que avanza, se designa como tal. Los otros sensores detectan la superficie cónica que avanza, en momentos posteriores designados como t_i . Las distancias de propagación del sonido en la dirección de la superficie cónica que avanza, se obtienen multiplicando cada una de las diferencias de tiempo por la velocidad local del sonido c , es decir, $d_i = c \cdot (t_i - t_0)$. Si no existen errores de medición, la superficie cónica que pasa a través del sensor de referencia también se determina mediante los otros (N-1) sensores, donde las coordenadas tridimensionales de los N puntos determinan idealmente todos los parámetros del cono de la onda de choque. Sin embargo, tal como se ha mencionado con anterioridad, los errores en las mediciones del tiempo de llegada y en las coordenadas del sensor pueden dar como resultado parámetros erróneos para el cono de la onda de choque, y por lo tanto también de la trayectoria del proyectil. A continuación, se describirán las precisiones de la diferencia en el tiempo de llegada necesarias para tomar decisiones correctas en torno a los dos ángulos de trayectoria de otro modo ambiguos.

El sistema incorpora de manera ventajosa características para asegurar que no confundirá con un tirador señales no balísticas, tales como ruido de vehículos, vibraciones, ruido del viento e interferencias electromagnéticas (EMI, por sus siglas en inglés). Por ejemplo, el mástil del sensor puede estar montado en un vehículo (no se muestra) con manguitos elastoméricos en juntas de acoplamiento para impedir vibraciones. Los sensores pueden estar acoplados a los extremos de las varillas en punta con acoplamientos elastoméricos, presentando resonancias de baja frecuencia en aproximadamente un 1 Hz para aislarlos de la vibración de la varilla en punta. Las varillas en punta de los sensores pueden estar acopladas a un núcleo común que tiene componentes electrónicos analógicos, que a su vez puede estar acoplado al mástil del sensor con montajes elastoméricos anti-golpes, para aislarlo de las vibraciones del mástil.

Además, puede utilizarse el siguiente algoritmo de decisión para filtrar las señales que carecen de los indicadores que habitualmente se encuentran en las señales derivadas de la onda de choque. Todos los valores funcionan como parámetros, es decir, son relativos, y pueden ser ajustados externamente. Los valores indicados se proporcionan únicamente con fines ilustrativos.

En referencia ahora a la figura 8, un proceso 800 determina si una señal detectada está originada en una onda de choque. El proceso 800 comienza en el paso 802 y verifica, en el paso 804, si la señal es un evento lo suficientemente fuerte como para contar como choque, por ejemplo, si el valor de la señal de cresta excede un umbral que funciona como parámetro dado de, por ejemplo, 500. Si es éste el caso, el proceso 800 prosigue con el paso 806 y verifica si existe una transitoria brusca desde cero hasta el valor de la señal de cresta, asegurando que la transitoria hacia este valor de cresta no está precedida por otra señal con una magnitud significativa, por ejemplo, un 1/16 del valor de la señal de cresta.

Si éste es el caso, el proceso 800 continúa con el paso 808 y verifica si el tiempo entre el mínimo y el máximo de la onda de choque tiene un valor lo suficientemente grande, por ejemplo, de 200 a 400 μ s. Si éste es el caso, el proceso 800 prosigue con el paso 810 y verifica si las magnitudes de las amplitudes de señal de cresta mínima y máxima se encuentran próximas entre sí, por ejemplo dentro del 35%. Si éste es el caso, el proceso 800 prosigue con el paso 812 y verifica si es brusca la transitoria del pico de presión desde la señal de cresta mínima hasta cero, utilizando esencialmente los mismos criterios que en el paso 806. Si éste es el caso, el proceso 800 prosigue con el paso 814 y verifica si son comparables los tiempos entre el valor máximo de la señal y el cruce por cero, y entre el cruce por cero y el valor mínimo de la señal, por ejemplo, dentro de aproximadamente 180 μ s. Si todos los pasos producen una respuesta afirmativa, el proceso 800 decide que la señal puede ser una onda de choque y la señal es procesada, paso 816. En caso contrario, si uno de los 6 pasos de decisión es respondido en negativo, la señal detectada no está originada a partir de una onda de choque, paso 818.

Con referencia nuevamente a la figura 1, se asume que la trayectoria del proyectil coincide con el eje x. El ángulo de Mach viene dado por $\theta = \arcsen(1/M)$, donde M es el número de Mach definido como la velocidad del proyectil V dividida por la velocidad del sonido c. L hace referencia a la longitud característica de la antena. Los radios de curvatura del cono en los dos extremos de la antena 20 son r_1 y r_2 . La vista posterior en la mitad izquierda del dibujo, muestra cómo se mide la curvatura r_1 . La distancia d es igual a $d = r_1 \cdot \cos(\phi)$. El ángulo ϕ se define por $\sin(\phi) = L / 2 r_1$, de manera que para ángulos pequeños ϕ se obtiene $\phi \sim L / 2 r_1$. La diferencia de tiempo de medición de la curvatura entre los puntos de la superficie de la antena que bisecan la superficie cónica con radio r_1 es igual a $dt_1 = \Delta d / c = (r_1 - d) / c \sim r_1 \phi^2 / 2 c = L^2 / (8 \cdot r_1 \cdot c)$. La diferencia entre tiempos de medición de la curvatura en $r_2 = r_1 - L \cdot \sin(\theta)$ viene dada por la misma expresión, donde r_2 es sustituido por r_1 . Por lo tanto, $dt_2 = dt_1 + L^3 \sin(\theta) / 8 r_1^2 c$.

Asumiendo errores de medición no derivados, es decir, asumiendo que las diferencias del instante de medición dt_1 y dt_2 son valores distribuidos aleatoriamente con diferentes medias dt_1 y dt_2 pero la misma desviación estándar determinada estadísticamente σ , los valores de medición de media en los dos extremos de la matriz determinan correctamente la curvatura local allí. Distribuciones a modo de ejemplo de valores de medición para las diferencias de tiempo dt_1 y dt_2 se muestran en la figura 4.

La medición de muestra realizada en el extremo 2 se muestra como X. El radio de curvatura en el extremo 2 (radio r_2) es menor que en el extremo 1 (radio r_1). Por lo tanto, todas las mediciones realizadas en un extremo que tiene valores mayores de X tendrán como resultado la decisión correcta de que la curvatura en el extremo 1 es mayor que en el extremo 2. La probabilidad de que se adopte la decisión correcta cuando la medición en el extremo 2 es igual a X, viene dada por:

$$P(r_1 < r_2 | x) = p_2(x) \int_x^{\infty} p_1(\xi) d\xi$$

con

$$p_2(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-dt_2)^2}{2\sigma^2}}$$

y

$$p_1(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\xi-dt_1)^2}{2\sigma^2}}$$

La integración sobre x y la sustitución de variables, da como resultado la siguiente probabilidad de adoptar la decisión correcta:

$$P(r_1 < r_2) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-u^2} \operatorname{erf}(u - a) du$$

con

$$\alpha = \frac{dt_1 - dt_2}{\sqrt{2}\sigma} = \frac{L^3 \sin(\theta)}{\sqrt{2}8r_1^2 c \sigma}$$

5 En referencia ahora a la figura 5, se muestra en un gráfico la probabilidad de una decisión correcta, o nivel de confianza para la desambiguación, para dos tamaños de antena a modo de ejemplo, $L = 1\text{ m}$ y $L = 2\text{ m}$, frente al punto más próximo de aproximación (CPA, por sus siglas en inglés) r entre la trayectoria del proyectil y la antena 20. Se asume que la velocidad del sonido es $c = 340\text{ m/s}$. Es evidente que una antena mayor tiene un alcance significativamente mayor, para soluciones solamente con onda de choque no ambiguas. Para valores CPA altos, la diferencia en la curvatura en los 2 extremos de la antena (r_1 y r_2) es demasiado pequeña para ser distinguible, de manera que la probabilidad para una decisión correcta se aproxima al 50%, o ambigüedad total. Por consiguiente, el nivel de confianza depende del tamaño, es decir del diámetro o extensión espacial, de la antena.

10 Tal como se ha mencionado con anterioridad, los errores surgen a partir de errores de sincronización e imprecisión en las coordenadas de los sensores. La imprecisión en las coordenadas de los sensores aporta errores sistemáticos constantes que son una función sumamente variable del ángulo de llegada de la onda de choque. Sin embargo, para ángulos de llegada aleatorios, los errores en las coordenadas de los sensores aparecen como errores aleatorios en las diferencias de tiempo.

15 También surgen errores de sincronización de variaciones de la intensidad de señal y de la ganancia entre un canal y otro. Los tiempos de llegada se obtienen cuando las salidas de los sensores alcanzan un valor umbral predeterminado V_0 . El error de sincronización dt provocado por una variación de ganancia dg depende de la

frecuencia de tiempo del incremento de tensión para el canal, con $dt = \frac{dg}{g} \frac{V_0}{dV/dt}$.

20 Se producen asimismo errores de sincronización cuando la intensidad de la señal varía sobre la abertura. Para una abertura de longitud L y una fuente de sonido cilíndrica a la distancia r , la variación máxima del nivel de la señal a través de la abertura es igual a $p_0 (L / 2r)$, donde p_0 es la presión de sonido en el centro de la abertura. La ecuación anterior del error de sincronización también se aplica a este tipo de error, donde la expresión $\frac{L}{2r}$ sustituye la

variación de ganancia relativa $\frac{dg}{g}$. Los errores de amplitud no son aleatorios entre los sensores, sino que varían de

25 manera uniforme desde un máximo en toda la abertura hasta cero en el centro. En distancias mayores de 10m, para una abertura de 1m, el factor de amplitud máxima es menor de 0,05, que es menor que el parámetro de variación de ganancia del canal de 0,2, de manera que pueden ser ignorados los efectos debidos a errores de amplitud. En cambio, tal como se ha descrito con anterioridad, en distancias menores de aproximadamente 10m, el radio del cono de Mach es lo suficientemente pequeño con respecto a la longitud de abertura de 1m, de modo tal que los errores de medición no son muy importantes.

30 En cálculos realistas para los errores de sincronización generados por la ambigüedad de los sensores, asumiendo que las magnitudes de los vectores de error son independientes estadísticamente y están distribuidas de manera uniforme entre 0 y 1mm, y que los ángulos de error son independientes estadísticamente, la desviación estándar de los errores de las diferencias de tiempos aleatorios equivalentes distribuidos de manera uniforme, será igual a

35 $\frac{10^{-3}}{340 \cdot \sqrt{12}} = 0.85 \mu\text{s}$. La desviación estándar de errores de muestra de sincronización aleatorios

40 distribuidos de manera binomial para un muestreo del sistema a 1 MHz es igual a 0,25 μs . Se estima que los errores de sincronización debidos a variaciones en la ganancia son de aproximadamente 0,75 μs para un sistema a modo de ejemplo, con un ancho de banda del canal de aproximadamente 18 kHz, que corresponden a una tensión nominal de aproximadamente 0,02 V/ μs . Los sensores acústicos utilizados para cada matriz se eligen con sensibilidades dentro de $\pm 1,5\text{ dB}$. Por lo tanto, las variaciones de ganancia relativa del canal están distribuidas de manera aproximadamente uniforme entre 0,84 y 1,19, de manera que la desviación estándar de la ganancia relativa es

aproximadamente igual a $\frac{1.19 - 0.84}{\sqrt{12}} = 0.10$. La tensión umbral es $V_0 = 0,15\text{V}$, lo cual da como resultado

45 una desviación estándar de los errores de sincronización de 0,75 μs .

El total de errores de sincronización de la medición se calcula asumiendo que las variaciones de ganancia del canal, las variaciones de muestreo, y las variaciones de la posición del sensor son todas estadísticamente independientes. La desviación estándar de errores de sincronización puede calcularse como

$$\sqrt{0.85^2 + 0.75^2 + 0.25^2} = 1.1 \mu s .$$

- 5 Es difícil y costoso conseguir una precisión semejante con conversión de analógico a digital, debido a que se requieren frecuencias de muestreo elevadas seguidas de interpolación. En el sistema que se revela, se utilizan dos circuitos diferentes para medir de manera precisa la diferencia en el tiempo de llegada (TDOA).

10 En una realización, el sistema a modo de ejemplo utiliza un circuito analógico de diferencia en el tiempo de llegada (TDOA), que utiliza relojes de 1 MHz en cada canal. Los relojes se activan cuando la señal del sensor excede un nivel de señal umbral en el sensor de referencia, el cual se definió con anterioridad como el sensor que se encuentra primero con la onda de choque. Tal como se ha comentado con anterioridad, una frecuencia de reloj de 1 MHz es suficiente para eliminar la importancia de los errores de muestreos de tiempo en la práctica. El sistema funciona en modo analógico, basándose en la detección de los niveles umbrales, donde la lógica digital realiza las siguientes funciones:

- 15
1. Se configura un primer bloqueo cuando la amplitud de señal del canal en el sensor de referencia que se encuentra primero con la onda de choque cruza un valor umbral.
 2. El primer bloqueo activa contadores de inicio para cada canal, que se incrementan en una unidad en cada ciclo de reloj. Se alerta sobre esto al procesador.
 3. El contador en cada canal está en marcha hasta que el sensor correspondiente se encuentra con la onda de choque. Esto activa un segundo bloqueo en el canal, que detiene el conteo en el canal. Si no se activa el segundo bloqueo, el contador correspondiente funciona hasta alcanzar un valor límite superior.
 4. El número de conteo final en cada contador es registrado en un registro de TDOA digital.
 5. El procesador lee el registro de TDOA.
 6. El procesador reinicia los contadores para recibir la siguiente onda de choque.
- 20

25 En otra realización, se calcula la correlación para cada canal con cada uno de los otros canales, durante un segmento de tiempo centrado en el momento de la detección de TDOA por el equipamiento físico. La correlación de las dos funciones, denominada $Corr(g, h)$, está definida por

$$Corr(g, h) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau + t)h(\tau) d\tau$$

30 La correlación es una función de t , que se denomina un "retardo". Por lo tanto está en el dominio de tiempo, y tiene la siguiente propiedad:

$$Corr(g, h) \Leftrightarrow G(f)H(-f)$$

en que g y h son funciones reales del tiempo. $G(f)$ es la transformada de Fourier de $g(t)$, y $H(f)$ es la transformada de Fourier de $h(t)$.

La potencia total en una señal es:

$$Potencia\ total \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)|^2 d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)|^2 df$$

35 La señal del tiempo de llegada tiene una duración finita, de manera que solamente es necesario llevar a cabo la integración (o la suma para datos discretos) sobre un intervalo de tiempo finito centrado en torno al tiempo de llegada; la longitud de los datos en uno o ambos canales puede extenderse mediante relleno de ceros, de manera que coincida la duración de las dos señales, tal como se conoce en el arte.

40 En la siguiente discusión, se utilizan integrales de funciones continuas por simplicidad, aunque los datos reales son valores digitalizados y discretos. Los expertos en el arte podrán sustituir fácilmente las integrales por una suma.

Con referencia ahora a la figura 6, en un proceso 60 los datos de tiempo $g_i(t)$, $g_j(t)$ de la señal de la onda de choque son adquiridos en cada canal i, j , pasos 601, 602, y registrados como una función de tiempo. En los pasos 603, 604, se calcula la potencia de señal total en un canal i para la subsiguiente normalización de la correlación como

$$\text{Potencia total en el canal } i \equiv \frac{\int |g_i(\tau)|^2 d\tau}{\text{Duración de la señal}}$$

- 5 Se calcula para el canal i la transformada de Fourier $G_i(f)$ de los datos de tiempo $g_i(t)$ de la señal de la onda de choque, y se forma el conjugado $G_i(-f)$, paso 605. Del mismo modo, se calcula la transformada de Fourier $G_j(f)$ de los datos de tiempo $g_j(t)$ de la señal de la onda de choque, para todos los otros canales j , paso 606. Después de ello, se forma la correlación cruzada $G_i(-f) \cdot G_j(f)$ para cada par de canales (i, j) , paso 608, que es una función $f_{i,j}(t)$ del "retardo" t . La TDOA para cada par de canales es el tiempo t_{\max} donde $f(t)$ tiene su valor máximo, paso 610. La correlación entre los canales i y j puede ser definida como
- 10

$$\text{Corr}(g_i, g_j) = \frac{\text{Valor de cresta } f_{i,j}(t)}{\sqrt{(\text{Canal de potencia } i) * (\text{Canal de potencia } j)}}$$

El residuo para el canal i se obtiene calculando el valor promedio para un sensor i sobre todos los sensores j :

$$\text{Residuo } (i) \text{ media } \left(\sum_{j \neq i} (1 - \text{Corr}(g_i, g_j)) \right)$$

- 15 como se indica en el paso 612. A continuación, las TDOA y las correlaciones para ese canal con el mejor residuo global (es decir, el menor) se seleccionan como la "mejor" solución, paso 614.

20 Tal como se ha mencionado con anterioridad, los datos del canal se analizan, habitualmente a intervalos de tiempo discretos con una frecuencia de muestreo predefinida de, por ejemplo, 41.666,66 muestras/segundo. Esto corresponde a una amplitud de intervalo de 24 μ s, que refleja la resolución de tiempo para la señal recibida. El proceso de correlación es realizado con una resolución de tiempo que se mejora en un factor de 8 hasta 3 μ s tomando 333333 muestras/segundo.

Una vez que han sido determinadas, a partir de las señales solamente de onda de choque, las diversas diferencias en tiempos de llegada (TDOA) entre los sensores, pueden ser determinados el acimut y la elevación del tirador y la trayectoria de la bala. La posición del tirador, es decir la distancia del tirador de la matriz de sensores, puede ser determinada si se conoce además la señal de rebufo.

- 25 En un sistema de coordenadas cartesianas centrado en el centro de la matriz, es decir $\{(C_{x0}, C_{y0}, C_{z0}) = (0, 0, 0)\}$, el tiempo de llegada TOA de la onda de choque a un sensor dado (C_{xj}, C_{yj}, C_{zj}) (véase la figura 2) está dado por:

$$t_{\text{choque}} = t_0 + \frac{L}{Mc} \left(\cos(\beta) + \sqrt{M^2 - 1} \sin(\beta) \right)$$

con

$$\cos(\beta) = \frac{V_x(X_0 - C_x) + V_y(X_0 - C_y) + V_z(X_0 - C_z)}{LMc}$$

- 30 $V = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}$ representa la velocidad de la bala supersónica $Mc = V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$,
- 35 L el del sonido y M el número de Mach. β representa el 'ángulo fallado' entre la posición del tirador y la trayectoria de la bala, que incluye los ángulos tanto de acimut como de elevación. Un impacto directo correspondería a $\beta = 0$. El ángulo de Mach θ está definido por

$$\frac{1}{M} = \text{sen}(\theta).$$

Como se mencionó con anterioridad y como se indica en la figura 3, para una posición del tirador y una trayectoria de la bala dadas, existe otra posición del tirador y otra trayectoria de la bala para las cuales el TOA de la onda de choque a un conjunto dado de sensores, es prácticamente idéntico. Las dos soluciones ambiguas son de hecho idénticas, si en un modelo simplificado, se supone que la onda de choque se propaga a través de la matriz de sensores como una onda plana. Si la resolución de la TDOA es lo suficientemente elevada para resolver la curvatura de la onda de choque, pueden distinguirse las dos soluciones casi idénticas. La ambigüedad esencial de las soluciones de TDOA solamente de onda de choque, se indica en la figura 3.

Asumiendo mediciones de TOA lo suficientemente precisas, la solución verdadera para la posición del tirador y la trayectoria de la bala puede obtenerse calculando la combinación tirador/trayectoria que minimiza la raíz cuadrada media (RMS, por sus siglas en inglés) del residuo de las TDOA de la onda de choque, calculada y medida:

$$\Delta \tau_{\min} = \min \sqrt{\sum_j (\tau_{\text{calc}} - \tau_{\text{med}})^2},$$

en donde la suma se realiza sobre todos los sensores.

Un enfoque para resolver este problema es el algoritmo L1 de Levenberg-Marquardt, descrito en detalle en la patente estadounidense N° 5,930,202. La mayoría de los algoritmos clásicos punto a punto utilizan un procedimiento determinista para aproximarse a la solución óptima, comenzando a partir de una solución aleatoria supuesta y especificando una dirección de búsqueda basada en una regla de transición predefinida, tal como métodos directos que utilizan una función objetiva y valores límite, y métodos basados en gradiente que utilizan derivadas de primer y segundo orden. Sin embargo, estos métodos tienen desventajas, por ejemplo, que la solución óptima depende de la solución inicial seleccionada, y que el algoritmo puede quedarse "atascado" en una solución no óptima, tal como un mínimo local o cuando la superficie de la función de coste tiene un valle plano, de manera que las iteraciones posteriores no mejoran el resultado.

Se ha encontrado que un mínimo global de la dirección del tirador y la trayectoria del proyectil puede ser calculado con mayor rapidez y desambiguado con mayor fiabilidad, utilizando un algoritmo genético (GA, por sus siglas en inglés) evolutivo. Los GA imitan los principios evolutivos naturales, y los aplican a procedimientos de búsqueda y optimización.

Un diagrama de flujo esquemático de un GA se muestra en la figura 7. En lugar de comenzar con una sola suposición para una solución, un proceso GA 70 comienza su búsqueda a partir de una población aleatoria de soluciones, paso 71, y configura un contador de generación a cero indicando el conjunto inicial de soluciones, paso 72. Una vez que se crea una población aleatoria de soluciones, cada una es evaluada en el contexto del problema de programación no lineal, paso 73, y se asigna una aptitud (mérito relativo) a cada solución, paso 74. La aptitud puede ser representada por la distancia euclídea $\Delta \tau_{\min}$ entre una solución calculada y la solución medida.

$$\Delta \tau_{\min} = \min \sqrt{\sum_j (\tau_{\text{calc}} - \tau_{\text{meas}})^2}$$

De manera intuitiva, es mejor un algoritmo con un valor pequeño de $\Delta \tau_{\min}$.

Por ejemplo, cuando se aplica el GA para desambiguar la solución para la dirección del tirador y la trayectoria del proyectil, el GA a modo de ejemplo utiliza como cromosoma una población inicial de 200 conjuntos de 4 elementos, donde cada conjunto de 4 elementos contiene los siguientes valores:

$$[\text{Acimut}_{\text{Tirador}}, \text{Elevación}_{\text{Tirador}}, \text{Acimut}_{\text{Fallado}}, \text{Elevación}_{\text{Fallada}}].$$

[Acimut_{Tirador}, Elevación_{Tirador}] están definidos por el ángulo $(\theta+\beta)$, mientras que [Acimut_{Fallado}, Elevación_{Fallada}] están definidos por el ángulo β (véase la figura 3). Dado que con el enfoque de solamente onda de choque descrito con anterioridad no se utiliza el rebufo, se asume una distancia nominal de 100 metros entre la matriz de sensores y el tirador.

La población inicial se crea mediante selección aleatoria de los conjuntos de 4 elementos abarcando un rango significativo y razonable de valores (todos los valores están en grados):

$$\text{Acimut}_{\text{Tirador}} = \{0, \dots, 360\},$$

$$\text{Elevación}_{\text{Tirador}} = \{-10, \dots, 30\},$$

$$\text{Acimut}_{\text{Fallado}} = \{-20, \dots, 20\}, \text{ y}$$

$Elevación_{Fallada} = \{-20, \dots, 20\}$.

5 En el paso 75 se verifica si se ha alcanzado un número máximo de iteraciones para el GA, que puede establecerse, por ejemplo, en 25. Si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones, el proceso 70 se detiene en el paso 80, y el resultado puede aceptarse o seguir evaluándose. En otro caso, el paso 76 verifica si se han satisfecho criterios de aptitud predeterminados.

Los criterios de aptitud pueden ser, por ejemplo, un acimut fallado calculado de $<15^\circ$ y/o una relación entre los residuos de dos soluciones ambiguas. Si se satisfacen los criterios de aptitud, el proceso 70 se detiene en el paso 80; de lo contrario, se crea una nueva población mediante cruce, paso 77, y mutación, paso 78, y el contador de generación se incrementa en uno, paso 79.

10 En cada generación, se permite al "mejor" individuo sobrevivir sin mutación, mientras que los 100 individuos mejores, estimados por su aptitud, también sobreviven pero son utilizados para crear los 100 individuos siguientes a partir de pares de estos supervivientes, con los operadores de cruce/mutación enumerados en la Tabla 1.

Se utilizaron los siguientes operadores de cruce y mutación, a modo de ejemplo, para demostrar el proceso 70:

15 Tabla 1

Nombre del Operador	Tipo de Operador	Probabilidad	Descripción
Cruce-Acimut	Cruce	0,5	Intercambio de acimut de tirador/trayectoria entre dos cromosomas
Cruce-Fallado	Cruce	0,5	Intercambio de acimut/elevación fallados entre dos cromosomas
Mutación-Campo	Mutación	0,3	Sustitución de un campo dado (con una probabilidad de 0,25 por campo) con un nuevo valor seleccionado aleatoriamente dentro de la distancia
Mutación-Gradual	Mutación	0,4	Introducción de mutaciones pequeñas en todos los campos de un cromosoma (dentro de $\leq 2^\circ$ para información del tirador; dentro de $\leq 0,5^\circ$ para información fallada)
Mutación-de Inversión	Mutación	0,1	Cambio de la solución a la solución alternativa ambigua
Sin-Mutación	Mutación	0,2	El cromosoma permanece intacto

20 La desambiguación se logra y/o mejora llevando a cabo una búsqueda de gradiente en la mejor solución y la solución alternativa correspondiente. Para ambas soluciones ambiguas, se calculan los residuos y las relaciones de los residuos. Si el acimut fallado calculado es $<15^\circ$, lo que representa disparos "próximos", y si la relación entre los residuos es >2 , se selecciona la solución con el residuo menor. En otro caso, no se hace una verdadera selección, y la solución con el residuo menor se marca como la solución "principal", mientras que la otra solución se marca como una solución "alternativa".

25 Con detección solamente de onda de choque, el algoritmo GA produjo una solución en un ordenador de 1 GHz ejecutando el sistema operativo Linux, en 0,15 segundos, en una amplia gama de disparos simulados. El 97% de los disparos simulados estaban dentro de 15° del acimut fallado, y el 86% de los disparos simulados estaban dentro de 5° del acimut fallado. Utilizando el algoritmo de desambiguación descrito con anterioridad, los disparos próximos, es decir los disparos con un acimut fallado de $<15^\circ$, fueron desambiguados el 95% de las veces. El algoritmo de desambiguación producido corrigió resultados para disparos más lejanos, el 70% de las veces. Se espera que la precisión de la desambiguación varíe en función de la configuración de la matriz de sensores y de la distribución supuesta de los disparos, siendo más sencillos de desambiguar los disparos con baja elevación.

30 Las soluciones descritas con anterioridad para la trayectoria del proyectil se obtuvieron sin detección del rebufo. Sin embargo, se ha encontrado que incluso una señal débil de la boca del arma de fuego, o una señal de la boca del

arma de fuego recibida solamente en un número limitado de canales, pueden utilizarse ventajosamente para mejorar la desambiguación y la determinación de la distancia.

La figura 9 muestra de manera esquemática un diagrama del modelo de tiempo de llegada (TOA), que se describe en mayor detalle en la patente estadounidense N° 6,178,141. El modelo TOA puede ser utilizado para calcular la trayectoria del proyectil y la dirección del tirador, respecto de la posición del sensor. El modelo TOA está basado en un modelo balístico que tiene en cuenta ciertas características físicas relativas al trayecto de vuelo del proyectil, tales como la densidad del aire (que está relacionada con la temperatura); la posición \bar{P} (P_x, P_y, P_z) de un tirador; el acimut y ángulos de elevación de la boca del rifle; la velocidad inicial del proyectil (o el número de Mach equivalente); y la velocidad del sonido (que varía con la temperatura/densidad del aire). Con este modelo balístico, es posible calcular de forma precisa el momento en que la onda de choque y el rebufo alcanzan un punto espacial concreto.

Tal como se representa en el diagrama de la figura 9, el tirador está ubicado en un punto \bar{P} (P_x, P_y, P_z) relativo a un origen (0, 0, 0), los diversos sensores están ubicados en puntos \bar{S}_j (S_{xj}, S_{yj}, S_{zj}), y se muestra la trayectoria de la bala saliendo del tirador en la dirección de \bar{A} . El vector desde el tirador hasta sensor j es \bar{D} , el punto más próximo de aproximación (CPA) de la bala hasta el sensor j es $|\bar{R}| = |\bar{D}| \sin(\beta)$, y el trayecto seguido desde el punto en que la onda de choque es irradiada desde la trayectoria hasta el sensor j es S (se ha omitido el índice j de los sensores). El ángulo de Mach de la bala es $\theta = \sin^{-1}(1/M)$, $M = V/c_0$. M es el número de Mach del proyectil, V es la velocidad supersónica del proyectil, y c_0 es la velocidad del sonido (que depende de la presión y la temperatura). El 'ángulo fallado' entre la trayectoria y el sensor j es β . La trayectoria está caracterizada por su ángulo de acimut medido en sentido anti-horario desde el eje x en el plano x-y, y por su ángulo de elevación medio hacia arriba desde el plano x-y. Las ecuaciones que definen el tiempo de llegada t_j de la onda de choque y el vector unitario en el sensor l están escritas en términos de estas cantidades geométricas.

El tiempo de llegada es igual al tiempo $\frac{|\bar{A}|}{V}$ que tarda el proyectil en recorrer la distancia $|\bar{A}|$ hasta el

punto donde el sonido es irradiado hacia el sensor j, más el tiempo que tarda la onda de choque en recorrer la distancia $|\bar{S}|$ desde el punto de radiación hasta el sensor j, $\frac{|\bar{S}|}{c_0}$.

$$t_j = t_0 + \frac{|\bar{A}|}{V} + \frac{|\bar{S}|}{c_0} = t_0 + \frac{|\bar{D}|}{c_0} \sin(\beta + \theta),$$

en donde t_0 es una referencia de tiempo (tiempo del disparo) y c_0 es la velocidad del sonido. El ángulo Mach θ se indica también en la figura 9.

Puede suponerse sin problemas que la velocidad V del proyectil permanece constante por una distancia correspondiente a la separación de los sensores, de manera que existe una pérdida de velocidad insignificante entre los instantes en los que el proyectil irradia a los diferentes sensores. Sin embargo, en largas distancias es sabido que los proyectiles se ralentizan debido a la resistencia del aire. La resistencia del aire puede ser expresada mediante un coeficiente de resistencia C_b que depende de la forma de la bala y del calibre de la bala. Un modelo matemático de balística obtenido a partir de principios físicos puede predecir el tiempo de llegada de una onda de choque en cualquier punto espacial general, como una función de un conjunto completo de parámetros que describen el proyectil (por ejemplo, mediante su coeficiente de resistencia C_b), su velocidad inicial, y la densidad del aire circundante, que se conocen por adelantado.

Habitualmente, los parámetros requeridos para un cálculo exacto no se conocen en un escenario realista, tal como un campo de batalla. Sin embargo, el cálculo de la distancia puede mejorarse de manera significativa mediante un proceso iterativo mostrado en forma del diagrama de flujo de procesos 200, en la figura 10, el cual tiene en cuenta la desaceleración de la velocidad del proyectil a lo largo de la trayectoria. El proceso 200 comienza en el paso 202 con las siguientes hipótesis:

c_0 = velocidad del sonido modificada por la temperatura exterior/presión del aire (≈ 340 m/s)

C_b = coeficiente de resistencia nominal, promediado entre las armas previstas

V_0 = velocidad inicial del proyectil, cuando es disparado, promediado entre las armas previstas

$M_0 = V_0/c$ = número de Mach inicial del proyectil

5 En el paso 204 se hace un primer cálculo de la distancia del tirador utilizando la diferencia en el tiempo de llegada (TDOA) τ_{ms} , y un ángulo de llegada α entre el sonido del choque y el del rebufo en la matriz de sensores, y asumiendo una velocidad constante V_0 y un número de Mach M_0 , iniciales, según la ecuación

$$D_0 = \frac{\tau_{ms} \cdot c_0}{1 - \cos(\alpha)}$$

Con estas hipótesis, la velocidad del proyectil a una distancia a desde la posición \bar{P} del tirador puede calcularse, en el paso 206, a partir de la ecuación

$$M_a = M_0 \left(1 - \frac{a}{C_b \sqrt{V_0}} \right)^2$$

10 de manera que el tiempo en el que el proyectil recorre la distancia a , a lo largo de la trayectoria, resulta, paso 208,

$$T_a = \frac{a}{V_0 - \frac{a \cdot \sqrt{V_0}}{C_b}}$$

El ángulo θ está relacionado con el número de Mach M_a por la ecuación

$$\text{sen}(\theta) = \frac{1}{M_a}$$

15 en donde el número de Mach M_a es ajustado inicialmente a M_0 . Cabe destacar que la velocidad instantánea de la bala es ajustada a la velocidad del sonido (es decir, $M_a = 1$) si la velocidad calculada de la bala resulta menor que la velocidad del sonido. En el paso 210, la distancia revisada $a = |\bar{A}|$ es

$$a = D_0 \cdot \cos(\beta) \cdot \left(1 - \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{M_a^2 - 1}} \right).$$

20 Los ángulos α , β , y θ están relacionados por la ecuación $(\alpha + \beta + \theta) = 90^\circ$. A continuación, el proceso 200 vuelve a el paso 206 insertando el valor calculado para la distancia a en las ecuaciones anteriores para M_a y T_a , dando como resultado un número de Mach M_a actualizado y un tiempo de desplazamiento de la bala T_a actualizado, respectivamente, para la distancia recorrida a . La TDOA τ_{ms} medida y los valores actualizados calculados para T_a y a , se utilizan a continuación para actualizar sucesivamente el valor D para la distancia del tirador:

$$D = c_0 \cdot (\tau_{ms} + T_a) + s$$

Este proceso se repite hasta que ha sido alcanzado un número máximo de iteraciones, o un bien los valores D de la distancia convergen, tal como se determina en el paso 212.

El proceso 200 también se verifica en el paso 214, si el valor revisado de la distancia $D = |\overline{D}|$ para la distancia entre el tirador y la matriz de sensores es un valor "razonable", en cuyo caso el proceso 200 finaliza en el paso 216. Por ejemplo, el valor para D puede considerarse válido si la distancia recorrida por el proyectil y la

distancia $s = a \cdot \frac{\text{sen}(\beta)}{\text{sen}(\alpha)}$ entre el sensor y el punto donde la onda de sonido es irradiada desde el proyectil

hasta el sensor son números válidos, es decir, no son un NAN. Un NAN es un valor especial de punto flotante que representa el resultado de una operación numérica que no puede dar un valor numérico válido, y se utiliza habitualmente para evitar la propagación de errores a través de un cálculo. Además, tanto α como β deben ser menores que un valor de umbral predeterminado, indicando que el proyectil fue disparado hacia la matriz de sensores.

Tal como se ha mencionado con anterioridad, el par de números (τ_{ms}, α) se utiliza inicialmente para calcular la distancia del tirador D_0 en la aproximación de orden cero, omitiendo el cambio en la velocidad del proyectil a lo largo de la trayectoria. Si el proceso iterativo 200 descrito con anterioridad no produce una configuración consistente que soporte el par de números (τ_{ms}, α) , la solución se descarta.

Incluso si no puede obtenerse una solución exacta, un objetivo es encontrar los valores para la distancia del tirador D y para los ángulos de acimut y elevación fallados (que están relacionados con β), que más se ajustan a una TDOA de choque medida y a una TDOA de la boca del arma de fuego medida. Tal como se ha mencionado, en la mayoría de las situaciones puede medirse, de manera fiable la TDOA solamente con onda de choque entre los diversos sensores. El acimut del tirador y la elevación del tirador, pero no de la distancia del tirador, pueden ser determinados a partir de la TDOA solamente con la onda de choque, utilizando las coordenadas conocidas (S_{xj}, S_{yj}, S_{zj}) de la matriz de sensores. Se supondrá que puede medirse asimismo la TDOA τ_{ms} entre la onda de choque detectada y el sonido del rebufo, con lo que el sonido del rebufo puede no ser detectado por todos los sensores.

Si se determina en el paso 214 que el proceso iterativo 200 no devuelve un resultado válido, el proceso 200 intenta calcular la distancia del tirador invocando un algoritmo genético (GA) evolutivo 300. Los GA imitan los principios evolutivos naturales, y los aplican a procedimientos de búsqueda y optimización. Un GA comienza su búsqueda con un conjunto aleatorio de soluciones, en lugar de solamente una solución. Una vez que se crea una población aleatoria de soluciones, cada una es evaluada en el contexto del problema de programación no lineal, y se asigna una aptitud (mérito relativo) a cada solución. En una realización, la aptitud puede estar representada por la distancia euclídea entre una solución calculada y la solución medida, por ejemplo, por

$$\Delta\tau_{\min} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\tau_{\text{choque, calc}}^j - \tau_{\text{choque, med}})^2}{N}} + \text{abs}\left(\sum_{l=1}^N \left(\frac{\tau_{ms, calc}^l}{M}\right) - \tau_{ms, med}\right)$$

Intuitivamente, es mejor un algoritmo que produce un valor pequeño de $\Delta\tau_{\min}$.

En la figura 11 se muestra un diagrama de flujo esquemático del proceso GA 300. El proceso 300 utiliza la diferencia en el tiempo de llegada (TDOA) τ_{ms} y el ángulo de llegada α medido previamente para el proceso 200, paso 302. Un número a modo de ejemplo de registro de 3 componentes con los valores {DISTANCIA, MA, ME} se define como una población inicial, paso 304, en donde DISTANCIA es la distancia del tirador $D = |\overline{D}|$ mostrada en la figura 9, MA es el acimut fallado, y ME es la elevación fallada. Los valores MA y ME indican por cuánto la bala falló el objetivo, en el espacio de acimut y elevación. En el ejemplo ilustrado, se supone que el objetivo es la matriz de sensores. En el paso 304, se crea la población inicial por selección aleatoria del registro de 3 componentes, abarcando un rango significativo y razonable de valores:

Distancia_{Tirador} = {1000, ..., 3000} [metros],

Acimut_{Fallado} = {-20, ..., 20} [grados], y

Elevación_{Fallada} = {-20, ..., 20} [grados].

El cálculo sigue un proceso similar al indicado con anterioridad para la solución solamente con onda de choque.

Inicialmente, para la generación Gen = 0, paso 306, se calcula el vector de posición del tirador \bar{P} (P_x, P_y, P_z) para cada registro de 3 componentes con el acimut y la elevación del tirador previamente determinados, y una DISTANCIA supuesta para el registro de 3 componentes concreto. Suponiendo un número de Mach inicial M_0 , se calcula el vector \bar{A} (A_x, A_y, A_z), es decir la posición desde la cual es irradiado el sonido de choque, con los valores de MA y ME para cada registro de 3 componentes, paso 308. También son calculadas las distancias $\bar{D} = \bar{S}_j - \bar{P}$ entre el tirador y cada sensor j que detecta una onda de choque.

Para cada registro de 3 componentes, se calcula el ángulo β a partir de la ecuación

$$\cos \beta = \frac{\bar{A} \cdot (\bar{P} - \bar{S})}{|\bar{A}| \cdot |\bar{P} - \bar{S}|}$$

en donde el símbolo "•" indica el producto escalar entre los dos sensores. Se calculan los valores actualizados para la distancia a, el tiempo de desplazamiento T_a del proyectil a lo largo de la distancia a, y el número de Mach M_a , insertando el valor calculado para β y los valores supuestos inicialmente para $M_a = M_0$ y a, en las ecuaciones anteriores para M_a, T_a, α , y D, paso 312. Este proceso se repite varias veces para cada uno de los registros de 3 componentes, por ejemplo 3 veces, tal como se determina en el paso 312, tras lo cual se calcula para cada registro de 3 componentes el residuo $\Delta\tau_{\min}$ definido con anterioridad, que incluye la señal de la boca del arma de fuego, paso 314.

En el paso 316 se verifica si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones para el GA, por ejemplo 25 iteraciones. Si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones, el proceso 300 se detiene en el paso 320, proporcionando el registro de 3 componentes con el residuo más pequeño. De lo contrario, el proceso 300 crea una nueva población a través de una operación de cruce y mutación, paso 318, y el contador de generación se incrementa en uno, paso 322.

En cada generación, se permite al "mejor" individuo sobrevivir sin mutación, mientras que los 100 individuos mejores a juzgar por su aptitud, también sobreviven pero son utilizados para crear los 100 individuos siguientes a partir de pares de estos supervivientes, con los operadores de cruce/mutación enumerados a continuación en la Tabla 2.

Se utilizaron los siguientes operadores de cruce y mutación, a modo de ejemplo, para demostrar el proceso 300:

Tabla 2

Nombre del Operador	Tipo de Operador	Probabilidad	Descripción
Cruce-Azimut fallado	Cruce	0,5	Intercambio de acimut fallado entre dos cromosomas
Cruce-Elevación fallada	Cruce	0,5	Intercambio de elevación fallada entre dos cromosomas
Cruce-Distancia fallada	Cruce	0,5	Intercambio de distancia entre dos cromosomas
Mutación-Campo	Mutación	0,3	Sustitución de un campo dado (con una probabilidad de 0,25 por campo) con un nuevo valor seleccionado aleatoriamente dentro de la distancia
Mutación-Gradual	Mutación	0,4	Introducción de mutaciones pequeñas en todos los campos de un cromosoma (dentro de ± 2 metros para información del tirador; dentro de $\pm 0,1^\circ$ para acimut y elevación fallados)

El proceso GA 300 es ejecutado con una población inicial de 200 registros de 3 componentes diferentes, con una tasa de relleno de 50, para un total de 25 generaciones. El GA es ejecutado 5 veces en paralelo con diferentes

conjuntos de registros de 3 componentes iniciales, y la solución con el residuo más pequeño es seleccionada como la solución final para la DISTANCIA, el acimut fallado, y la elevación fallada del tirador, lo que permite el cálculo del vector \overline{D} .

5 Pruebas experimentales recientes indicaron una disminución de los disparos ambiguos desde el 95% al 8% en el mismo conjunto de datos, utilizando por lo menos un canal de señal de la boca del arma de fuego además de 5 o más canales de onda de choque, lo que es una mejora significativa respecto de las soluciones solamente con onda de choque.

10 Los cálculos que no tienen en cuenta la desaceleración del proyectil a lo largo de su trayectoria, debida a la resistencia del aire, tienden a exagerar la distancia. Para ciertas configuraciones y disparos lo suficientemente lejanos, esta sobreestimación puede exceder el 20%. El proceso descrito con anterioridad elimina esta desviación respecto de la estimación de la distancia para detecciones de disparos de largo alcance.

Tal como se ha descrito con anterioridad, las soluciones ambiguas solamente de onda de choque con frecuencia pueden ser desambiguadas comparando los residuos de dos trayectorias diferentes y seleccionando la trayectoria con el residuo más pequeño.

15 Si las señales de rebufo son detectadas en 4 o más canales de sensor, pueden utilizarse los algoritmos de choque-rebufo descritos con anterioridad, para determinar de manera inequívoca la posición del tirador, independientemente del número de canales de choque. Si las señales de rebufo son detectadas en menos de 4 sensores, pero se detectan señales de onda de choque en 5 o más canales de onda de choque, el GA mencionado con anterioridad puede ser utilizado con un residuo o función de coste modificada, de modo que todas las señales de la boca del arma de fuego que estén disponibles se "mezclen" en la función de optimización para desambiguar la solución solamente de onda de choque y/o para mejorar el cálculo de la distancia del tirador. Sin embargo, si se detectan menos de 3 canales de rebufo Y menos de 5 canales de onda de choque, puede activarse una alerta sin intentar localizar al tirador.

La señal de la boca del arma de fuego puede no ser detectada de manera fiable en todos los canales, debido a que:

- 25
1. El nivel de detección en uno o más canales es demasiado bajo para una detección fiable.
 2. La energía de la boca del arma de fuego no es discernible en la señal no tratada, provocando que el sistema se asocie con 'ruido', proporcionando cálculos de TDOA no fiables.
 3. Los ecos procedentes de la onda de choque pueden ser más fuertes que el rebufo y pueden llegar antes que el rebufo, provocando que el sistema detecte falsamente el choque como rebufo.

30 Con una señal de rebufo detectada solamente en algunos canales, el residuo en esta situación puede definirse como

$$\Delta\tau_{\min} = \sqrt{\sum_i (\Delta\tau'_{\text{rebufo., calc}} - \Delta\tau'_{\text{rebufo., med}})^2 + \sum_j (\Delta\tau'_{\text{choque, calc}} - \Delta\tau'_{\text{choque, med}})^2},$$

en donde el primer término para el rebufo se suma sobre el número reducido de sensores (< 4) que detectan el rebufo, y j se suma sobre los sensores que detectan la onda de choque (habitualmente, todos los sensores).

35 Tal como se ha mostrado mediante los ejemplos descritos con anterioridad, la señal de rebufo proporciona información importante sobre el acimut del tirador, y por lo tanto sobre la trayectoria del proyectil, en comparación con una solución solamente con onda de choque, de manera que la solución calculada de la trayectoria se alinea más estrechamente con una de las soluciones ambiguas, es decir, desambiguando por lo tanto las soluciones.

40 Sin, por lo menos algunas, señales fiables de la boca del arma de fuego, puede ser generado un número significativo de soluciones ambiguas solamente de onda de choque, en particular a distancias largas del tirador, lo cual es menos deseable que un número menor de soluciones no ambiguas, aunque menos precisas.

En el caso de una detección de rebufo potencialmente no fiable, inicialmente puede seguir intentándose detectar señales de la boca del arma de fuego, por ejemplo, encontrar una indicación del rebufo en una señal ruidosa, y calcular las TDOA resultantes. La detección del rebufo se considerará fiable si se encuentran señales de la boca del

arma de fuego en un número suficiente de sensores con suficiente correlación cruzada entre los canales, y si existe una correlación lo suficientemente fuerte entre la señal de la boca del arma de fuego y la correspondiente banda no tratada, en cada canal (desplazada en una serie de intervalos, debido a los retardos de filtrado).

5 De otro modo, se borran por lo menos las señales de la boca del arma de fuego que muestran una correlación insuficiente, y se invoca la siguiente lógica de "detección aproximada de rebufo":

- Buscar picos en la energía de choque, después de un choque. Etiquetar estos picos como 'ecos del choque' probables, excluyéndolos por lo tanto como rebufos.

10 -Determinar un tiempo máximo que tomaría la onda de rebufo en atravesar la matriz de sensores, y definir una "ventana" con la duración correspondiente. Buscar picos de energía de rebufo desplazando esta ventana sustancialmente a través de todos los canales del detector después de la onda de choque detectada, saltándose las secciones de la señal detectada que han sido identificadas como ecos del choque. Integrar la energía sobre la ventana, es decir, buscar el máximo de:

$$f(i) = \sum_{n=0}^N \sum_{j=0}^W (mb_{i+j}^n)^2$$

15 en donde el cuadrado de mb_{i+j}^n representa una medida de la energía, por ejemplo, la energía del rebufo, medida por el sensor n. (i + j) indica el canal de detección, donde i denota un intervalo de tiempo discreto entre el instante en que fue detectada la onda de choque y el inicio de la ventana, y j representa un intervalo de tiempo medido desde el inicio de la ventana.

20 Para discriminar el ruido, se verifica la energía pico en la ventana que produce el máximo de la función $f_{max}(i)$ para determinar si el pico de energía en dicho máximo es mayor que la energía a través de la ventana, en un factor de proporción dado. Si éste es el caso, se identifica la señal en la ventana como una detección de rebufo, y se lleva a cabo la correlación cruzada sobre todos los canales en la banda de rebufo mb para determinar las TDOA de rebufo.

A continuación, puede ser utilizada la señal de rebufo para determinar la distancia del tirador y/o para desambiguar la señal de onda de choque, tal como se ha descrito con anterioridad.

25 En resumen, el sistema descrito puede proporcionar de manera precisa, rápida y a menudo inequívoca, la dirección del tirador y la trayectoria de la bala en función de mediciones solamente de onda de choque. Puede mejorarse la desambiguación y calcular la distancia del tirador, si es detectada una forma de onda, incluso débil, del rebufo. El sistema es relativamente insensible a indicios falsos del tirador en respuesta a la vibración y al ruido de vehículos, al ruido del viento, a petardos o a disparos cercanos en direcciones que se alejan del sistema.

30 Cabe destacar que el sistema que detecta las señales de onda de choque lleva a cabo a dos pruebas sobre las formas de onda iniciales, para determinar si la señal puede de hecho ser atribuida a ondas de choque. En primer lugar, la energía total medida en una banda de frecuencia entre aproximadamente 700 Hz y 10 kHz se compara con un valor umbral empírico. Solamente si se excede este valor umbral, puede considerarse que la forma de la señal surge de una onda de choque. En segundo lugar, el lapso de tiempo del pico positivo de presión inicial detectado debe ser mayor de aproximadamente 70µs y menor de aproximadamente 300µs. Estos criterios proporcionan
35 inmunidad del sistema contra ruido impulsivo, tal como petardos y disparos no amenazadores. Si no se aprueban estas verificaciones, la forma de onda detectada no es considerada una onda de choque, y no se intenta una solución para el tirador.

40 A modo de ejemplo, aunque las realizaciones ilustrativas se muestran con sensores acústicos, tales como micrófonos, esto no necesariamente debe ser así. En cambio, pueden utilizarse otros tipos de sensores mecánicos o eléctricos sensibles a la presión. Además, los valores dados en las Tablas 1 y 2 para los diferentes operadores se proporcionan sólo a modo de ejemplo, y pueden seleccionarse otros valores según las condiciones reales en el campo.

REIVINDICACIONES

1. Un método para identificar una señal de rebufo dentro de una señal generada por una matriz (20) de sensores acústicos (22-28) que forman una antena, que comprende:
 - definir un ancho para una ventana de tiempo que corresponde a un tiempo requerido para que el rebufo atraviese la matriz (20) de sensores acústicos (22-28);
- 5 detectar una señal de onda de choque dentro de la señal generada;
 - después de detectar la señal de onda de choque, medir la energía total ($f(i)$) de la señal generada en una serie de ventanas de tiempo como una función de tiempo y como una función del número de sensores acústicos (22-28) que generaron la señal, en donde cada ventana de tiempo tiene el ancho definido y comienza en un intervalo de tiempo discreto después del tiempo en que se detectó la señal de onda de choque;
- 10 identificar una de las ventanas de tiempo que tiene una energía total medida ($f_{max}(i)$) mayor que cada una del resto de las ventanas de tiempo; y
 - asociar la ventana de tiempo identificada como correspondiente a la señal de rebufo.
2. El método según la reivindicación 1, en donde medir la energía total incluye integrar la energía medida sobre la ventana y sobre la cantidad de sensores acústicos.
- 15 3. El método según la reivindicación 1, que además incluye identificar los ecos de las ondas de choque y no considerar las ventanas en la señal generada correspondiente a los ecos de las ondas de choque identificadas.
4. El método según la reivindicación 1, que además incluye:
 - determinar un punto correspondiente a una energía pico en la ventana de tiempo identificada; y
 - asociar el punto con el rebufo si la energía pico en el punto es mayor que una energía total medida del resto de los puntos en la ventana de tiempo identificada de un factor de relación dado.
- 20 5. El método según la reivindicación 4, que además incluye:
 - realizar una correlación cruzada sobre las señales de sensores acústicos que generaron la señal en una banda de frecuencia de rebufo correspondiente al rebufo para determinar un conjunto de medidas de TDOA de rebufo.
- 25 6. El método según la reivindicación 5, en donde la banda de frecuencia de rebufo es de entre aproximadamente 700 Hz y aproximadamente 10 kHz.
7. El método según la reivindicación 1, que además incluye utilizar la señal de rebufo para detectar una posición del tirador.
8. Un sistema para identificar una señal de rebufo dentro de una señal generada por una matriz (20) de sensores acústicos (22-28) formando una antena, que comprende:
 - 30 medios para definir un ancho de una ventana de tiempo que corresponde a un tiempo requerido para que un rebufo atraviese la matriz (20) de sensores acústicos;
 - una pluralidad de sensores acústicos (22-28) para generar la señal;
 - medios para detectar una señal de onda de choque dentro de la señal generada;
 - 35 medios, que responden a la detección de la señal de onda de choque, para medir la energía total ($f(i)$) en una serie de ventanas de tiempo como una función de tiempo y como una función de la cantidad de sensores acústicos (22-28) que generaron la señal, en donde cada ventana de tiempo tiene el ancho definido y comienza en un intervalo de tiempo discreto después del tiempo en que se detectó la señal de onda de choque;

medios para identificar una de las ventanas de tiempo que tiene una energía total medida ($f_{\max(i)}$) mayor que cada una del resto de las ventanas de tiempo; y medios para asociar la ventana de tiempo identificada como correspondiente a la señal de rebufo.

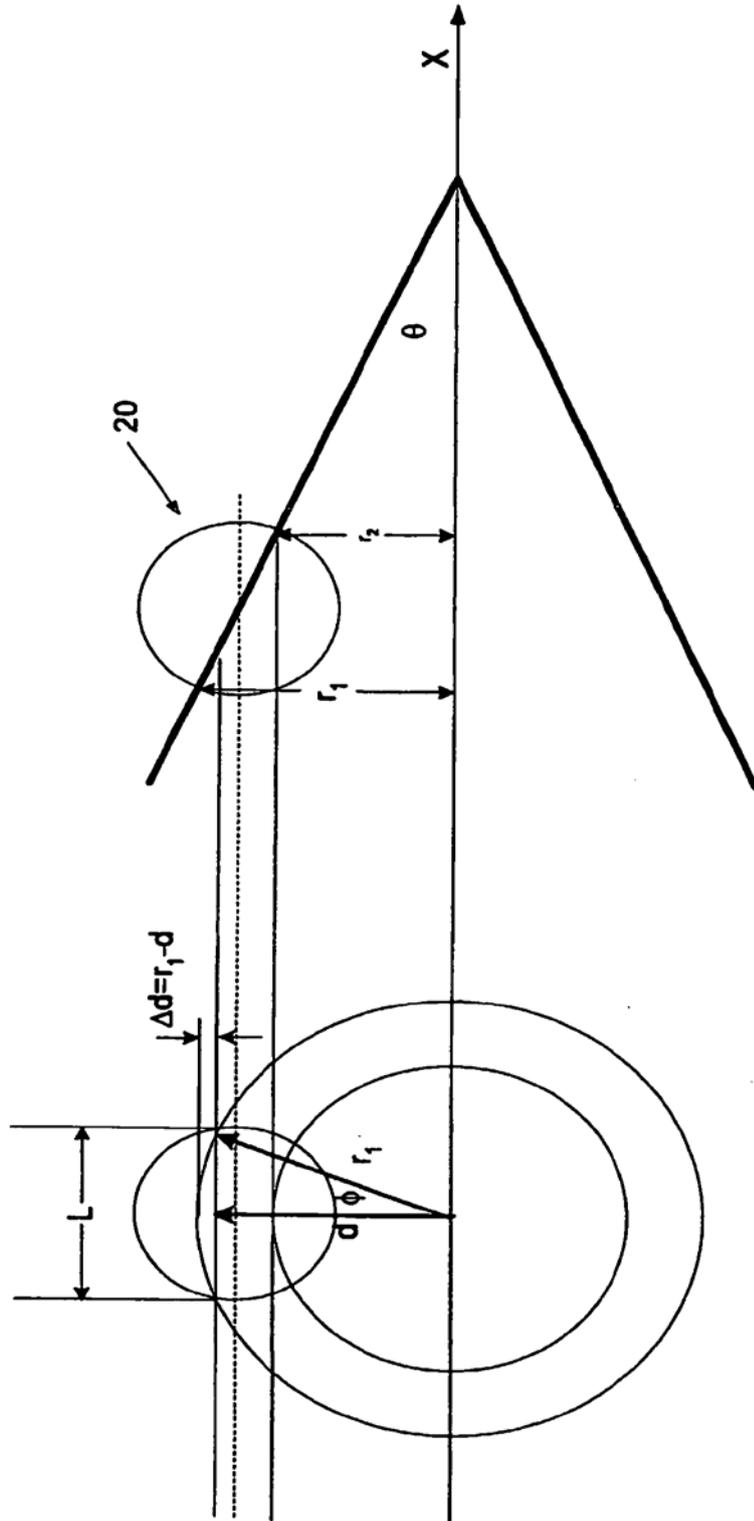


FIG. 1

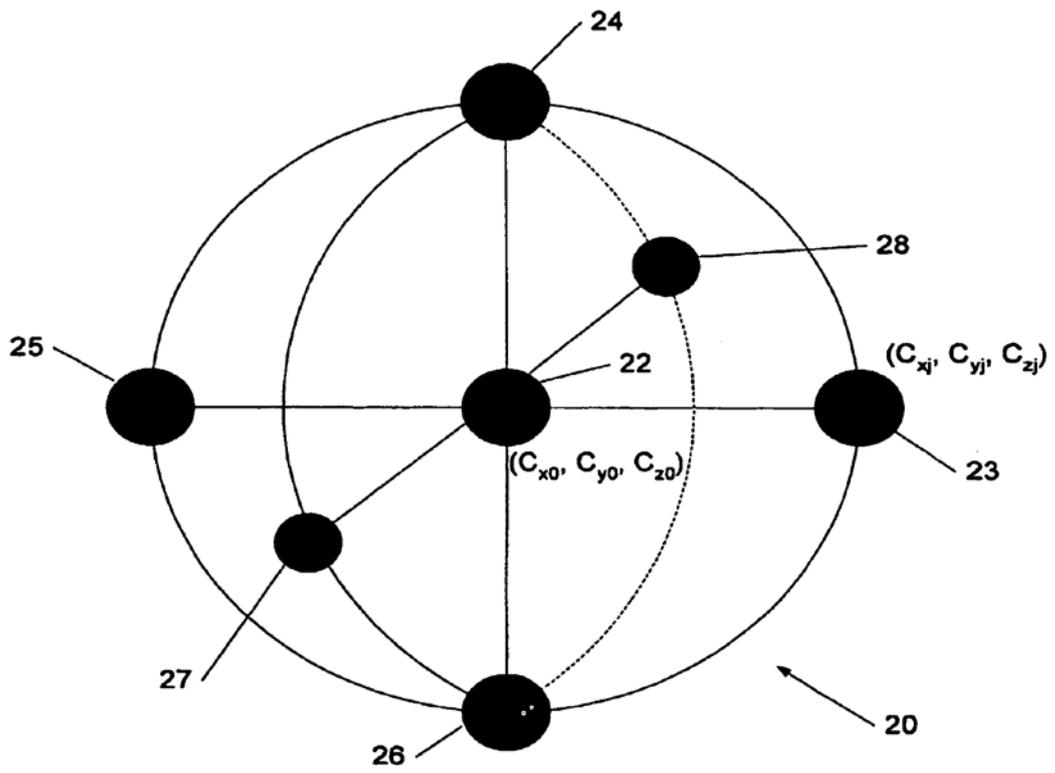


FIG. 2

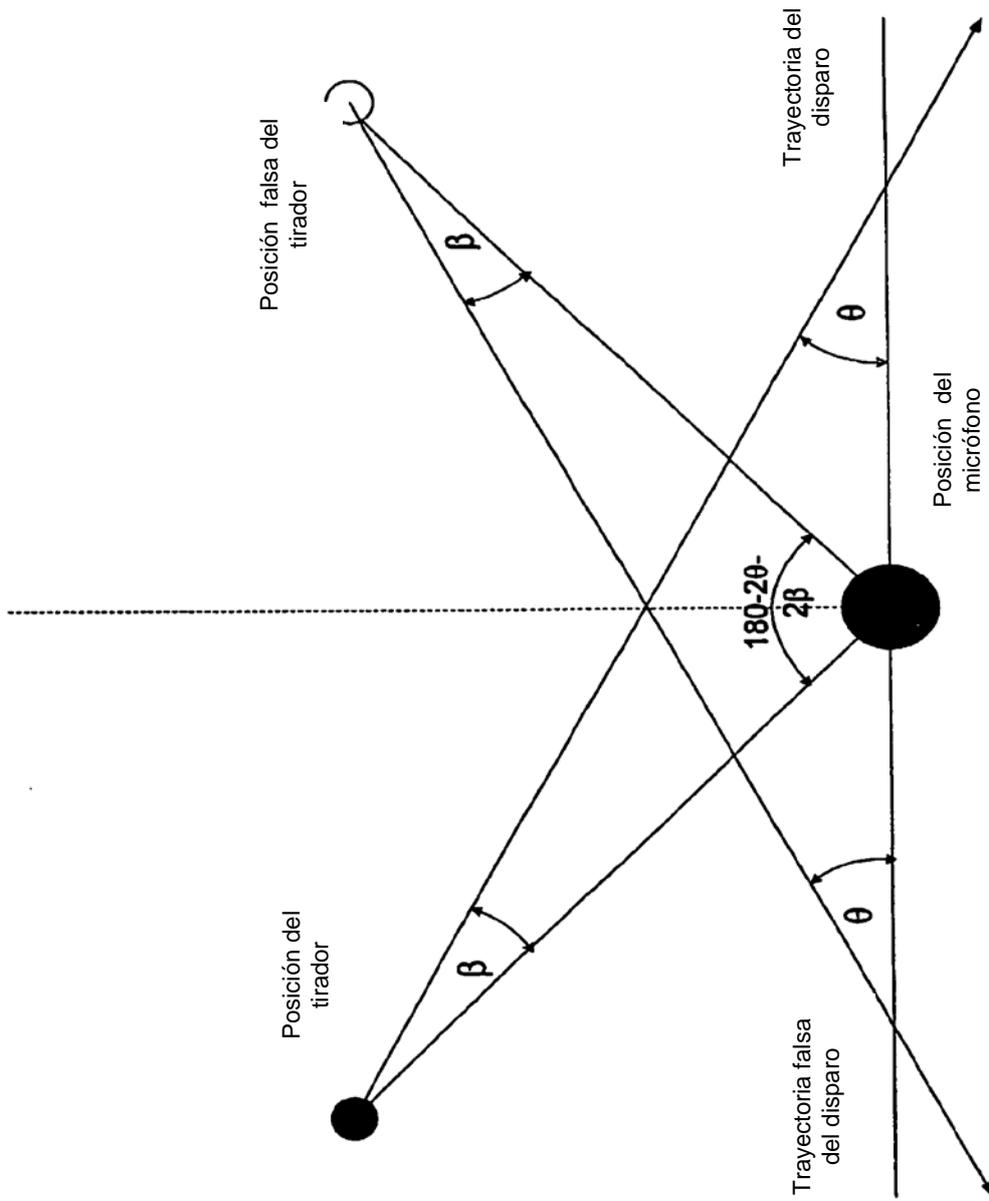


FIG. 3

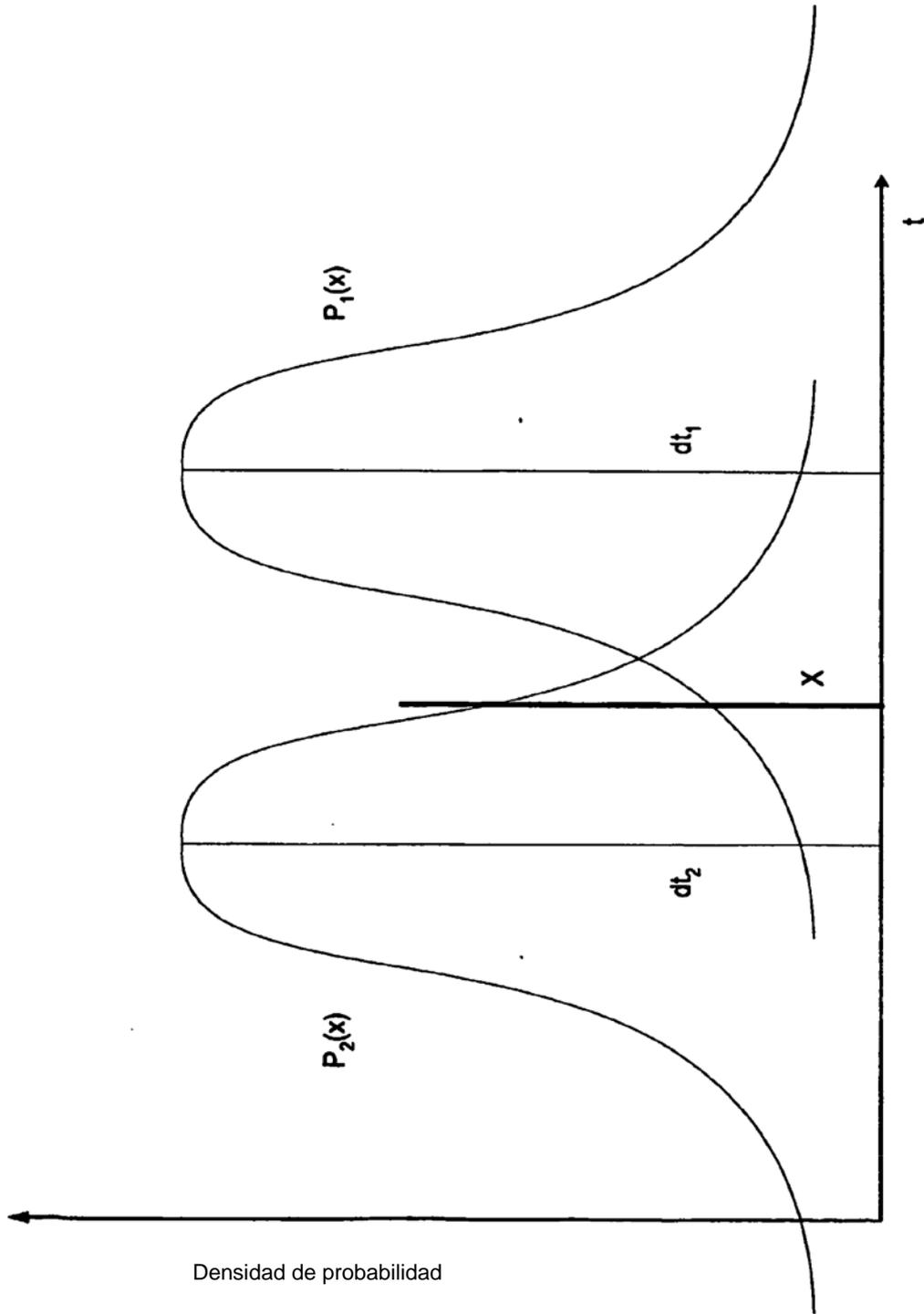


FIG. 4

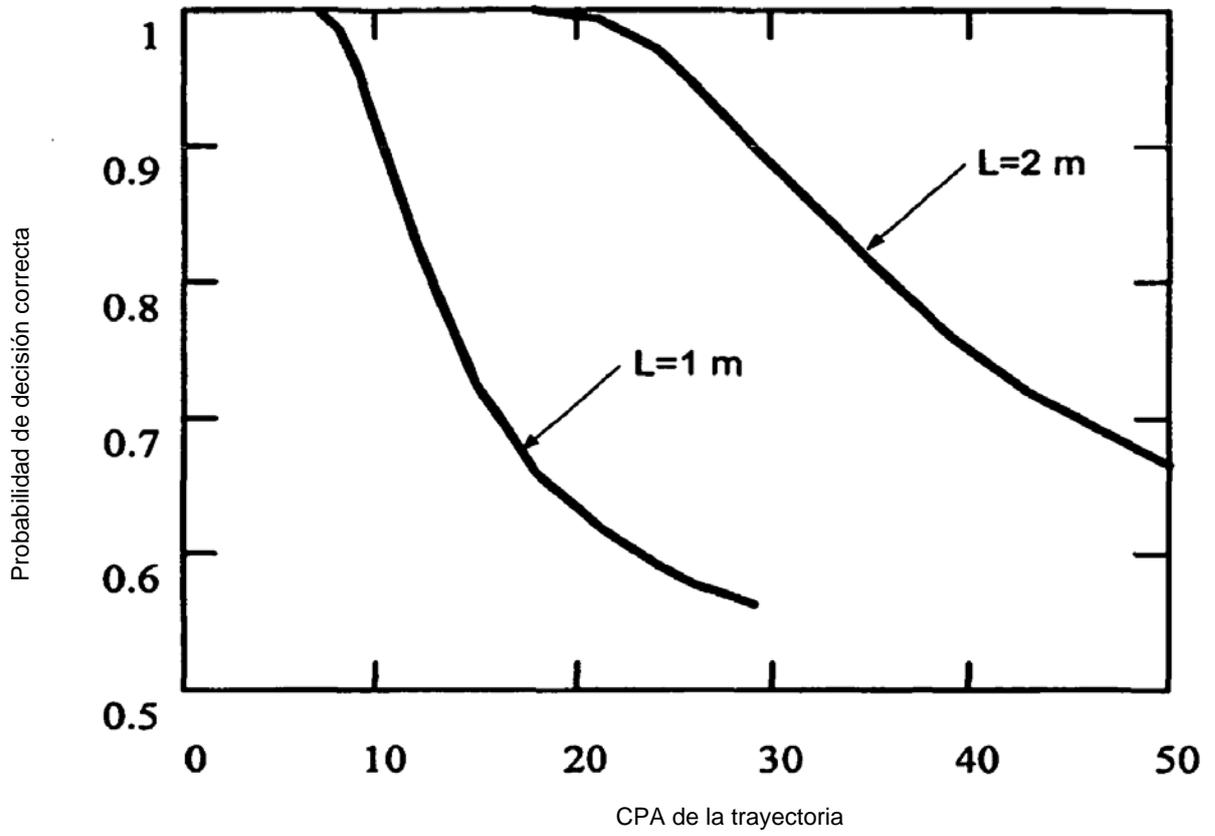


FIG. 5

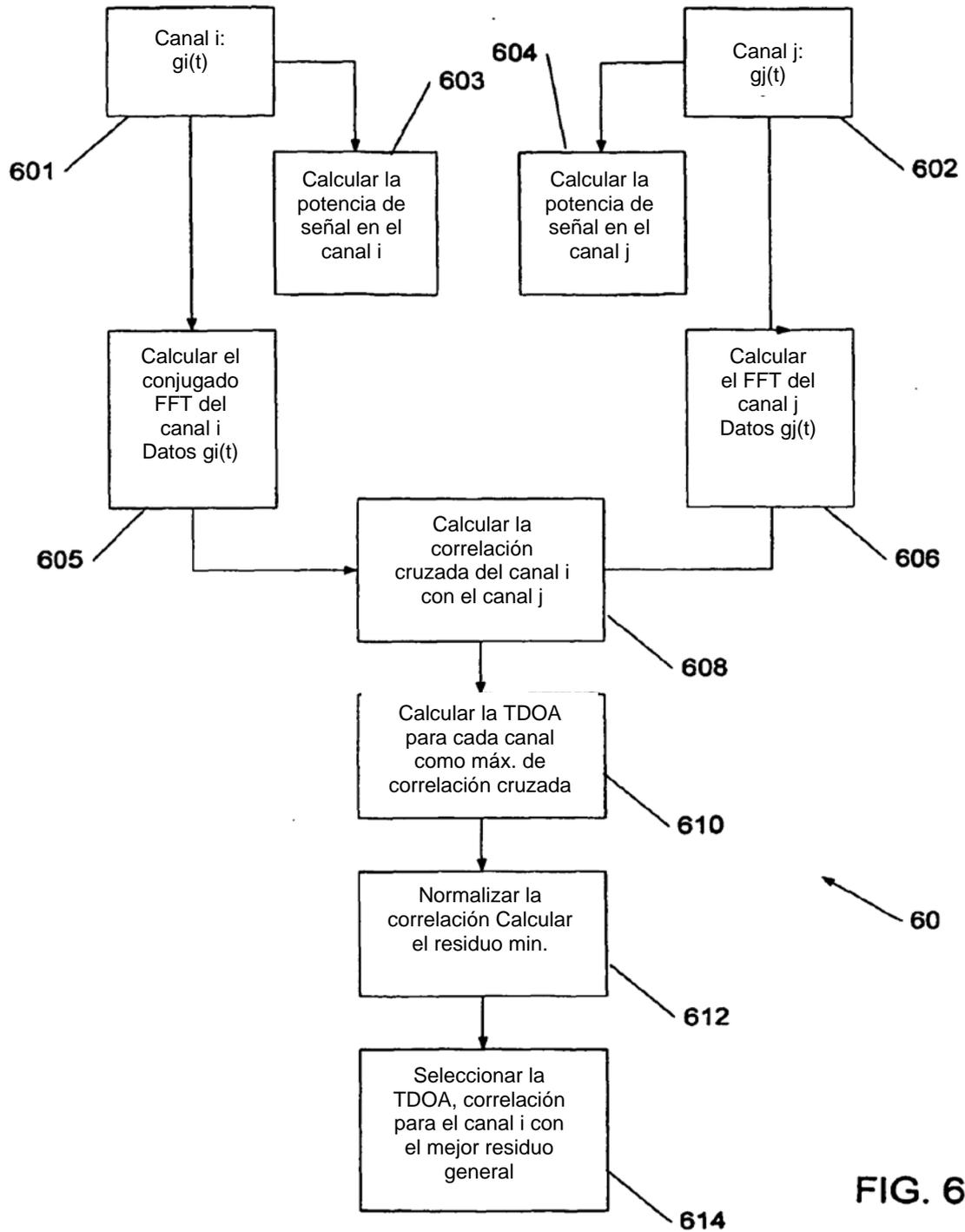


FIG. 6

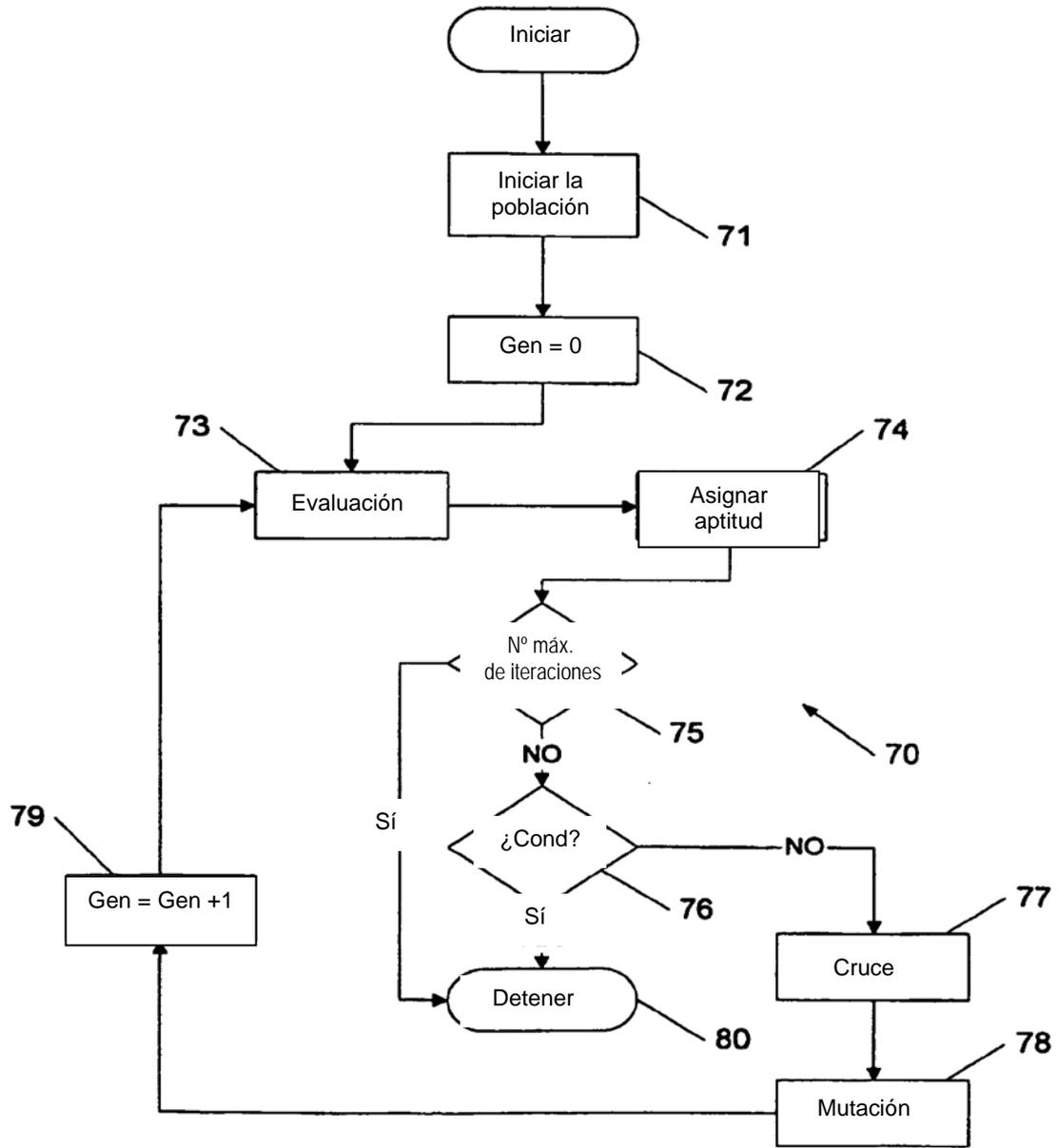


FIG. 7

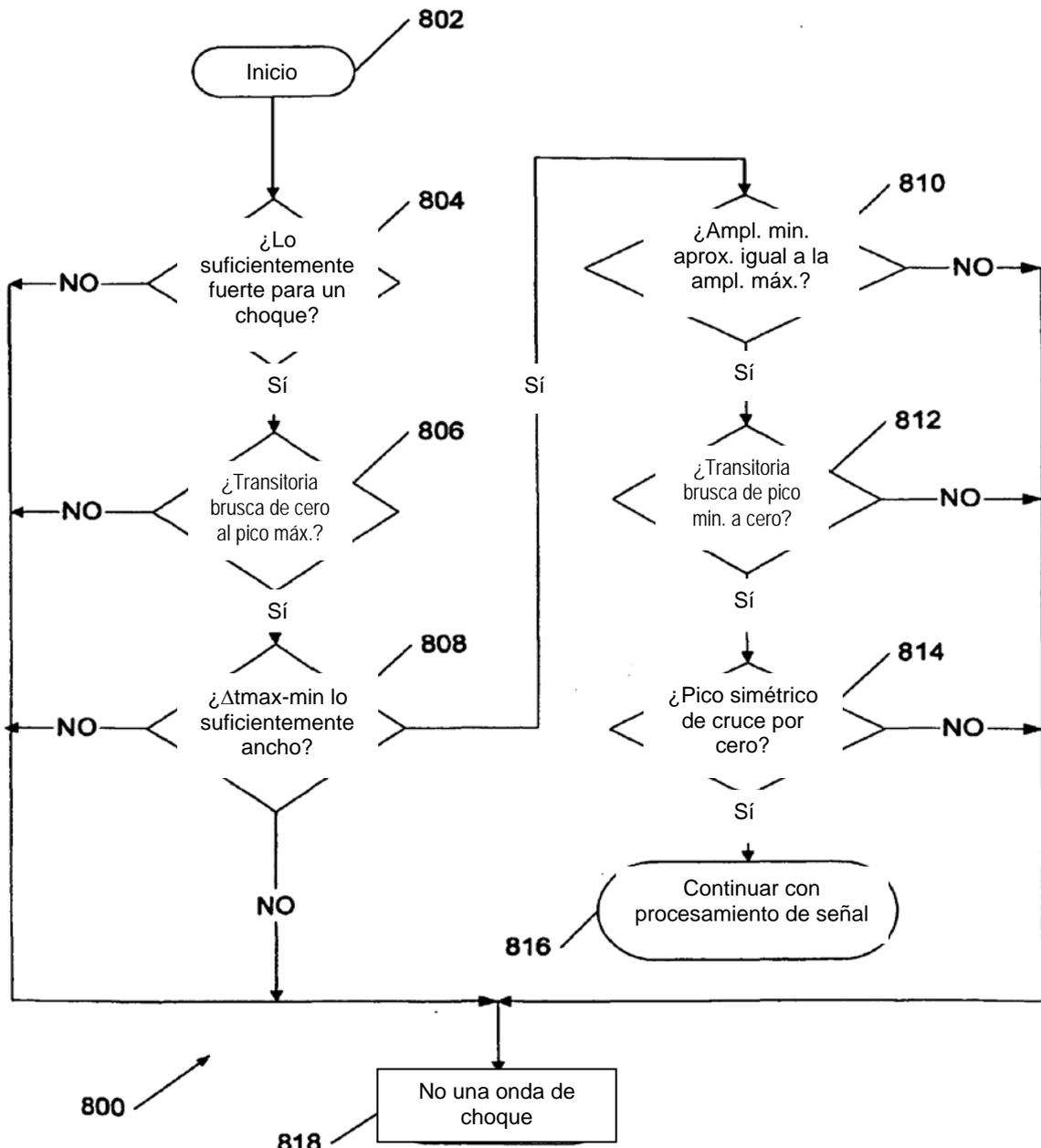


FIG. 8

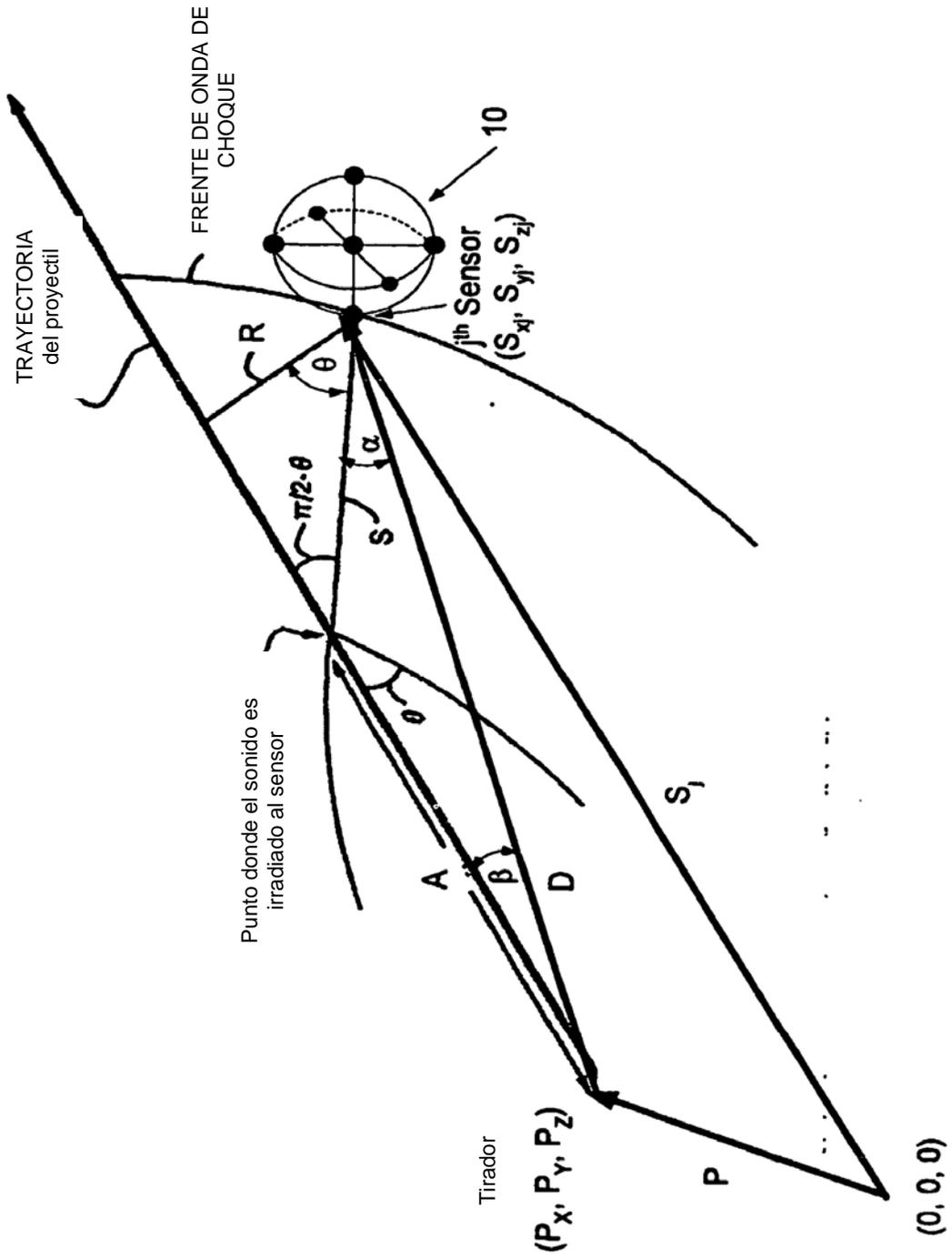


FIG. 9

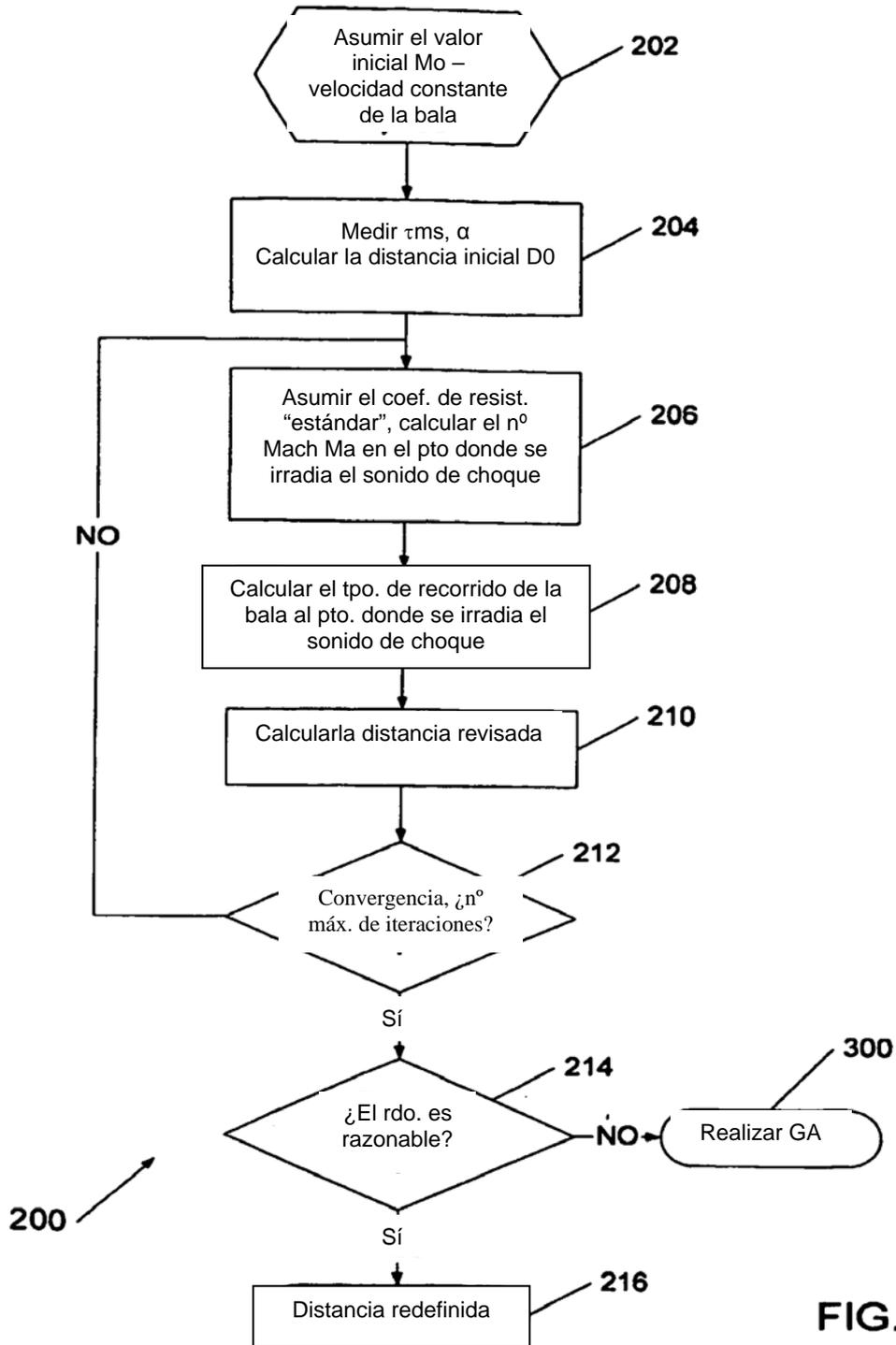


FIG. 10

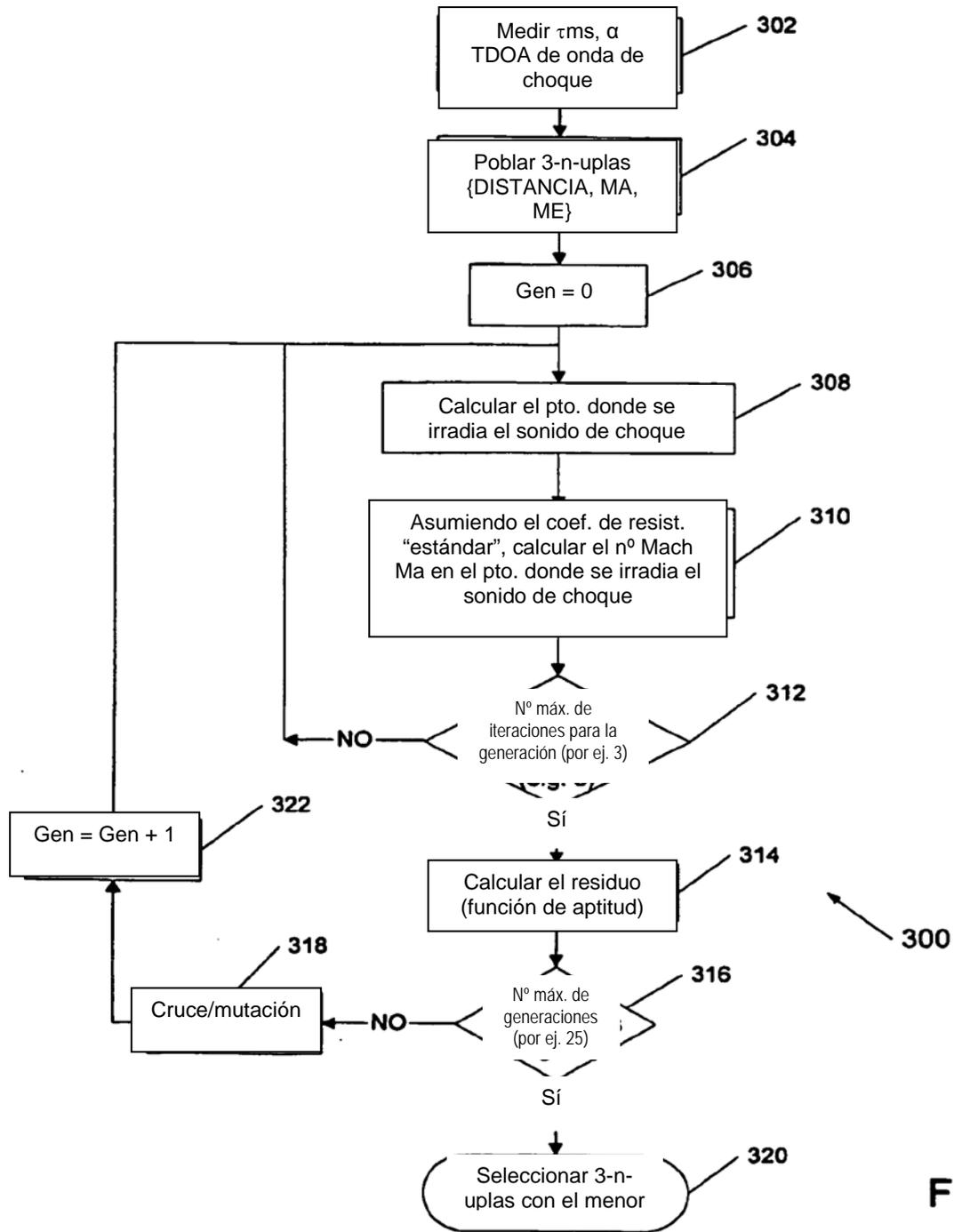


FIG. 11