

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 385 191**

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: **10002862 .0**
96 Fecha de presentación: **24.08.2005**
97 Número de publicación de la solicitud: **2199817**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **23.06.2010**

54 Título: **Sistemas y métodos para desambiguar posiciones de un tirador**

30 Prioridad:
24.08.2004 US 925875
23.08.2005 US 210295

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
19.07.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
19.07.2012

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/Representante:
Carvajal y Urquijo, Isabel

ES 2 385 191 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

Sistemas y métodos para desambiguar posiciones de un tirador

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a con seguridad y tecnologías para la aplicación de la ley, y más en concreto a sistemas para determinar el origen y la dirección de desplazamiento de proyectiles supersónicos. Los métodos y sistemas son capaces de examinar y desambiguar posiciones de un tirador, incluso para grandes distancias entre el tirador y el sensor, y cuando no se recibe señal o solo se recibe una débil señal del sonido de la boca del cañón.

Antecedentes de la invención

10 Se conocen sistemas y métodos que pueden determinar en general la dirección y la trayectoria de proyectiles supersónicos, tales como balas y proyectiles de artillería, mediante medir parámetros asociados con la onda de choque generada por un proyectil. Uno de tales sistemas, descrito en la Patente de EE.UU. Número 5 241 518, incluye al menos tres sensores separados espacialmente, incorporando cada sensor tres transductores acústicos dispuestos en un plano. Los sensores generan señales en respuesta a la onda de choque, que están relacionadas con el acimut y el ángulo de elevación respecto del origen de la onda de choque. Con medidas solo de ondas de
15 choque, es imposible determinar la distancia entre el sensor o los sensores y el origen de la onda de choque. La información de distancia se obtiene típicamente a partir del fognazo o del rebufo.

El acimut y el ángulo de elevación de un tirador en relación con la localización del sensor, se determinan típicamente midiendo información del Momento de Llegada (TOA, Time of Arrival) de la señal de la boca del cañón y de la señal de la onda de choque, en cada sensor. Cada uno de los sensores encuentra las señales en diferentes momentos, y genera una señal en respuesta a la presión de la boca del cañón y de la onda de choque. Se procesan las señales procedentes de diversos sensores, y puede determinarse una dirección (acimut y elevación) desde el sensor o los
20 sensores al origen de la boca del cañón y la onda de choque, y por lo tanto la trayectoria del proyectil.

Los sistemas convencionales utilizan micrófonos, que pueden estar relativamente próximos (por ejemplo a 1 metro de separación) o ampliamente separados (por ejemplo montados sobre un vehículo, o portados por soldados en un campo de batalla), y miden la presión de la boca del cañón y la onda de choque de forma omnidireccional en sus respectivas localizaciones. Sin embargo, salvo que los sensores tengan una separación relativamente grande y/o la trayectoria quede dentro de la antena, es muy alta la precisión de sincronización necesaria para obtener soluciones precisas solo con onda de choque, y se requieren técnicas especiales.
25

Una antena de gran tamaño puede ser una gran desventaja, por ejemplo en sistemas montados en vehículos. Además, los sistemas con una resolución temporal solo marginal pueden producir soluciones ambiguas, por cuanto que la información del momento de llegada de la onda de choque en un conjunto dado de sensores, es casi idéntica para dos posiciones de tirador en simetría especular.
30

Los algoritmos convencionales requieren al menos 4 detecciones de onda de choque y boca del cañón, de modo que pueda invertirse una matriz 4 x 4 para mapear una onda plana sobre el TOA de la onda de choque. Pequeños errores en la determinación del TOA de la onda de choque y de la boca del cañón, pueden producir errores sustanciales en el alcance de las estimaciones. Además, los algoritmos convencionales asumen una velocidad de la bala constante a lo largo de la trayectoria de la bala, lo que proporciona estimaciones de alcance imprecisas para disparos de largo alcance producidos desde una distancia de más de unos 300 m.
35

El documento US 5 930 202 da a conocer un método para determinar una trayectoria no ambigua de un proyectil utilizando una matriz de sensores acústicos separados, de acuerdo con la parte precharacterizadora de la reivindicación 1.
40

Resumen de la invención

La invención se ocupa de las deficiencias del arte previo, proporcionando un método caracterizado de acuerdo con la reivindicación 1.

45 Preferentemente, el método incluye además ejecutar un algoritmo genético para un número predefinido de generaciones, con una población inicial que incluye un número predeterminado de individuos, estando cada individuo representado por una 4-tupla que incluye el acimut del tirador, la elevación del tirador, el acimut fallido y la elevación fallida, y calcular residuos para los individuos en cada generación, incluyendo en los residuos un ajuste por mínimos cuadrados de una combinación de señales de onda de choque TDOA y de rebufo. Si la relación entre la solución con el residuo mínimo y su solución alternativa ambigua es mayor que un valor predefinido, por ejemplo un
50 valor de por lo menos 2, entonces la solución con el mínimo residuo calculado se designa como la trayectoria del

5 proyectil desambiguada. Para impedir que se interpreten señales espurias, como formas de onda de la onda de choque, una trayectoria de proyectil puede ser eliminada como falsa si la energía acústica de la forma de onda de la onda de choque medida, tiene menos de un valor umbral sobre una banda de frecuencia predeterminada, por ejemplo frecuencias entre aproximadamente 700 Hz y 10 kHz. Alternativa o adicionalmente, puede eliminarse la trayectoria de un proyectil y ser considerada como falsa, si un intervalo estimado en el que una forma de onda de la onda de choque tiene un valor positivo, es menor que un tiempo mínimo o mayor que un tiempo máximo, por ejemplo menor de aproximadamente 70 μ s o mayor de aproximadamente 300 μ s.

10 En realizaciones ventajosas, puede determinarse la energía total mediante integrar la energía emitida sobre la ventana, preferentemente despreciando partes de la señal detectada, provocadas por ecos de la onda de choque. Ventajosamente, el valor máximo de la señal puede determinarse en la ventana que produce la energía total máxima y, si el valor máximo de señal es mayor que la energía total medida en la ventana en un factor proporcional preferido, el valor máximo de señal puede identificarse como estando relacionado con la señal de la boca del cañón.

15 Realizaciones de la invención pueden incluir una o más de las siguientes características. La distribución de error de sincronización, de la antena y/o los sensores acústicos, puede relacionarse con variaciones de ganancia, variaciones de muestreo y variaciones de localización del sensor, de los sensores de antena. El nivel de confianza para la desambiguación depende del tamaño de la antena, de forma que las antenas menores requieren mayor precisión de medida. Si existen dos soluciones ambiguas, la trayectoria desambiguada del proyectil es seleccionada en función de una relación de los residuos para dos soluciones ambiguas.

20 En otras realizaciones ventajosas, las diferencias entre tiempos de llegada (TDOA) para pares de sensores pueden determinarse mediante designar como el sensor de referencia un sensor que encuentra primero la onda de choque, y activar un primer seguro de un circuito de sincronización cuando la amplitud, por ejemplo la parte inicial de la señal solo de onda de choque, en el sensor de referencia, cruza un valor umbral. El primer seguro activa contadores de inicio para cada uno de los otros sensores, funcionando el contador en cada uno de los otros sensores hasta que el sensor correspondiente encuentra la onda de choque. Cuando uno de los otros sensores encuentra, por ejemplo, la parte inicial de la señal solo de onda de choque, activa un segundo seguro para tal sensor, que detiene el contador inicial para tal sensor. Después se registra los valores TDOA para los otros sensores, en relación con el sensor de referencia.

Otras características y ventajas de la presente invención resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción de las realizaciones preferidas, y a partir de las reivindicaciones.

30 Breve descripción de los dibujos

Estas y otras características y ventajas de la invención, se comprenderán de forma más completa mediante la siguiente descripción ilustrativa, haciendo referencia a los dibujos anexos, en los que se etiqueta elementos con números de referencia, y que pueden no estar a escala.

La figura 1 muestra esquemáticamente una vista en sección transversal, de un cono de Mach cruzando una antena;

35 la figura 2 muestra esquemáticamente una matriz de sensores con 7 sensores acústicos omnidireccionales;

la figura 3 muestra esquemáticamente la ambigüedad inherente a la determinación de la trayectoria solo con onda de choque;

la figura 4 muestra esquemáticamente una densidad de probabilidad para la diferencia de tiempo en las medidas de llegada, para la determinación de la curvatura del cono de Mach;

40 la figura 5 muestra esquemáticamente la probabilidad de 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 proceso de un algoritmo genético, utilizado para desambiguar correctamente entre trayectorias de tirador;

la figura 8 es un flujo de proceso para discriminar frente a señales no de onda de choque;

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

la figura 10 muestra un diagrama esquemático de flujo de proceso, para estimación de alcance; y

la figura 11 muestra un diagrama esquemático de flujo de proceso, de un algoritmo genético para estimación de alcance.

Descripción detallada de ciertas realizaciones ilustradas

5 Tal como se ha descrito arriba de forma resumida, la invención proporciona en diversas realizaciones, métodos y sistemas para la estimación del alcance de un tirador y la desambiguación de trayectorias de proyectil. Estos sistemas y métodos son especialmente útiles y ventajosos cuando se detecta un número insuficiente de parámetros requeridos para una solución precisa, o cuando no pueden detectarse tales parámetros de forma fiable.

10 Las trayectorias de proyectiles supersónicos son estimadas exclusivamente a partir de momentos de llegada de onda de choque del proyectil, medidos por varios sensores próximos entre sí, distribuidos por un "pequeño" volumen de medida, denominado una antena. Un volumen de medida se considera pequeño si la separación del sensor es de 2 metros o menos. Identificada la trayectoria del proyectil se conoce la posición del tirador, excepto por la distancia de retorno a lo largo de la trayectoria. Esta distancia puede hallarse si la antena también obtiene el momento de llegada del sonido de rebufo. Sin embargo el rebufo no siempre es detectable, de forma que es esencial una solución precisa a partir solo de onda de choque, para determinar la trayectoria.

15 A continuación haciendo referencia a la figura 1, se considera que la superficie de la onda de choque es una superficie cónica de expansión, que tiene su eje coincidente con la trayectoria de la bala. La superficie de la onda de choque se denomina también el cono de Mach. Para obtener la solución solo mediante onda de choque, a partir de los tiempos de llegada medidos en cinco o más sensores de antena han de determinarse tres propiedades, a saber el ángulo de llegada, el radio de curvatura y el gradiente espacial del radio de curvatura de la superficie cónica de expansión.

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

30 La precisión necesaria puede estimarse considerando la característica de propagación de la onda de choque descrita en la figura 1. A continuación haciendo referencia también a la figura 2, una antena 20 incluye N sensores (N = 7) capaces de determinar los tiempos de llegada de una onda de choque cónica que avanza. Puesto que puede esperarse que las trayectorias entrantes de la bala estén esencialmente originadas en cualquier parte, los elementos de antena 23 a 28 pueden estar ventajosamente distribuidos de forma uniforme en localizaciones C (C_{xj} , C_{yj} , C_{zj}) sobre una superficie esférica, con un elemento 22 localizado en el centro en (C_{x0} , C_{y0} , C_{z0}), de forma que se presenta una abertura de sensor uniforme independientemente del ángulo de llegada. El instante de tiempo en que el primer sensor, designado como sensor de referencia, detecta la superficie cónica en avance, se denota como t_0 . Los otros sensores detectan la superficie cónica en avance en instantes subsiguientes derrotados como t_i . Las distancias de propagación del sonido en la dirección de la superficie cónica de avance 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 hay errores de medida, entonces la superficie cónica que pasa a través del sensor de referencia se determina también mediante los otros (N - 1) sensores, con las coordenadas tridimensionales de los N puntos, determinando idealmente todos los parámetros del cono de la onda de choque. Sin embargo, tal como se ha mencionado arriba, los errores en las medidas del tiempo de llegada y en las coordenadas del sensor pueden tener como resultado parámetros erróneos para el cono de la onda de choque, y por tanto también para la trayectoria del proyectil. En lo que sigue se describirán las precisiones necesarias, en la diferencia entre tiempos de llegada, para adoptar decisiones correctas en torno a los dos ángulos de trayectoria, de lo contrario ambiguos.

50 Ventajosamente, el sistema incorpora características que aseguran que no confundirá señales no balísticas tales como el ruido de un vehículo, la vibración, el ruido del viento e IEM (interferencia electromagnética), con un tirador. Por ejemplo, el mástil del sensor puede estar montado sobre un vehículo (no mostrado) con manguitos elásticos en uniones de acoplamiento, para impedir el traqueteo. Los sensores pueden unirse a los extremos de los espines con acoplamientos elásticos, que tienen resonancias de baja frecuencia en aproximadamente 1 Hz, para aislarlos respecto de la vibración del espín. Los espines del sensor pueden unirse a un núcleo común que contiene electrónica analógica, que puede también unirse al mástil del sensor con soportes elásticos para aislarlo de las vibraciones del mástil.

Además, puede utilizarse el siguiente algoritmo de decisión para filtrar señales que carecen de las características distintivas que se encuentran típicamente en señales derivadas de onda de choque. Todos los valores están

parametrizados, es decir son relativos y pueden ajustarse externamente. Los valores listados se proporcionan solo a modo de ilustración.

5 Haciendo referencia a la figura 8, un proceso 800 determina si una señal detectada se origina en una onda de choque. El proceso 800 comienza en la etapa 802, y en la etapa 804 verifica si la señal es un suceso lo suficientemente fuerte como para considerarse una onda de choque, por ejemplo si el valor máximo de señal excede un umbral parametrizado concreto, por ejemplo de 500. Si éste es el caso, el proceso 800 sigue con la etapa 806 y verifica si hay una transición abrupta desde cero hasta el valor máximo de señal, asegurándose de que la transición a este valor máximo no está precedida por otra señal que tenga una magnitud significativa, por ejemplo 1/16 del valor máximo de señal.

10 Si éste es el caso, el proceso 800 sigue con la etapa 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 200-400 μ s. Si éste es el caso, el proceso 800 pasa a la etapa 810 y verifica si las magnitudes están en mutua proximidad, por ejemplo dentro del 35%. Si éste es el caso, el proceso 800 sigue en la etapa 812 y verifica si el máximo transitorio de presión entre la señal de pico mínimo y cero es abrupto, utilizando esencialmente el mismo criterio que en la etapa 806. Si éste es el caso, el proceso 800 sigue con la etapa 814 y verifica si son comparables los tiempos entre el valor máximo de señal y el cruce por cero, y entre el cruce por cero y el valor mínimo de señal, por ejemplo dentro de aproximadamente 180 μ s. Si todas las etapas producen una respuesta afirmativa, el proceso 800 decide que la señal puede ser una onda de choque y la señal es procesada, etapa 816. A la inversa, si la respuesta a una de las 6 etapas de decisión es negativa, la señal detectada no se ha originado a partir de una onda de choque, etapa 818.

20 Haciendo referencia de nuevo a la figura 1, se asume que la trayectoria del proyectil coincide con el eje x. El ángulo de Mach está dado por $\theta = \arcsen(1/M)$, donde N es el número de Mach, definido como la velocidad del proyectil V dividida por la velocidad del sonido c. L se refiere 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 de costado de la mitad izquierda del dibujo, muestra cómo se mide la curvatura r_1 . La distancia d es igual a $d = r_1 \cdot \cos(\varphi)$. El ángulo φ está definido por $\sen(\varphi) = L / 2 r_1$, de forma que para pequeños ángulos de φ se obtiene $F \sim L / 2 r_1$. La medida de diferencia temporal de la curvatura entre los puntos de la superficie de la antena que bisecan la superficie cónica con radio r_1 , es igual a $dt_1 = \Delta d/c = (r_1 - d)/c \sim r_1 \varphi^2/2c = L^2/(8 \cdot r_1 \cdot c)$. La medida de diferencia temporal de la curvatura en $r_2 = r_1 - L \cdot \sin(\theta)$, está dada por la misma expresión sustituyendo r_2 por r_1 . Por consiguiente, $dt_2 = dt_1 + L^3 \sen(\theta) / 8 r_1^2 c$.

30 Asumiendo errores de medida no sesgados, es decir asumiendo que las diferencias temporales de medida dt_1 y dt_2 son valores distribuidos aleatoriamente que tienen diferentes promedios dt_1 y dt_2 pero la misma desviación estándar σ determinada estadísticamente, los valores de medida promediados en los dos extremos de la matriz determinan correctamente la curvatura local en tal punto. En la figura 4 se muestran distribuciones a modo de ejemplo, de valores de medida para las diferencias temporales dt_1 y dt_2 .

35 La medida 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 un extremo 1 (radio r_1). Por lo tanto, todas las medidas realizadas en el extremo 1 que tengan valores mayores que 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 adoptar la decisión correcta cuando la medida en el extremo 2 es igual a X está dada por:

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

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

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

40 Integrando en x y realizando sustitución de variables resulta la siguiente probabilidad de adoptar la decisión correcta:

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

$$\text{con } a = \frac{dt_1 - dt_2}{\sqrt{2}\sigma} = \frac{L^3 \sen(\theta)}{\sqrt{2} 8 r_1^2 c \sigma}$$

5 A continuación haciendo referencia a la figura 5, la probabilidad de una decisión correcta, o el nivel de confianza para la desambiguación, está representado 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, closest point of approach) 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 más grande tiene un alcance significativamente expandido, para soluciones no ambiguas solo con onda de choque. Para valores de CPA grandes, la diferencia en curvatura en los dos extremos de la antena (r_1 y r_2) es demasiado pequeña como para ser distinguible, de tal modo que la probabilidad de una decisión correcta se aproxima al 50%, es decir la ambigüedad es total. Por consiguiente, el nivel de confianza depende del tamaño de la antena, es decir de su diámetro o su extensión espacial.

10 Tal como se ha mencionado arriba, se generan errores a partir de los errores de sincronización y de la incertidumbre en las coordenadas del sensor. La incertidumbre en las coordenadas del sensor contribuye a errores sistemáticos, que son una función extremadamente variable del ángulo de llegada de la onda de choque. Sin embargo, para ángulos de llegada aleatorios los errores de coordenadas del sensor aparecen como errores aleatorios para la diferencia de tiempo.

15 Los errores de sincronización surgen también de las variaciones tanto de ganancia como de intensidad de señal, entre un canal y otro. Los tiempos de llegada se obtienen cuando las salidas del sensor se incrementan hasta un valor umbral predeterminado V_0 . El error de sincronización dt provocado por una variación de ganancia dg , depende de la tasa temporal de incremento de tensión para el canal, teniéndose $dt = \frac{dg}{g} \frac{V_0}{dV/dt}$.

20 También se producen errores de sincronización cuando la intensidad de señal varía sobre la abertura. Para una abertura de longitud L y una fuente de sonido cilíndrica a la distancia r , la máxima variación del nivel de señal a través de la abertura es igual a $p_0 (L / 2r)$, donde p_0 es la presión del sonido en el centro de abertura. La anterior ecuación del error de sincronización aplica también a este tipo de error, con la expresión $L / 2r$ sustituyendo la variación de ganancia relativa dg/g . Los errores de amplitud no son aleatorios entre los sensores, sino que varían uniformemente desde un máximo en la abertura completa hasta cero en el centro. Para alcances mayores que 10 m, para una abertura de 1 m el factor de amplitud máxima es menor de 0,05, que es menos que el parámetro de variación de ganancia del canal de 0,2, de modo que pueden ignorarse los efectos debidos a errores de amplitud. A la inversa, tal como se ha descrito anteriormente, para alcances menores de unos 10 m el radio del cono de Mach es lo suficientemente pequeño con respecto a la longitud de abertura de 1 m como para que los errores de medida no sean importantes.

30 Con estimaciones realistas para errores de sincronización provocados por incertidumbre de los sensores, asumiendo que las magnitudes de los vectores de error son estadísticamente independientes y están uniformemente distribuidas entre 0 y 1 mm, y que los ángulos de error son estadísticamente independientes, la desviación estándar de errores equivalentes de diferencias temporales aleatorias distribuidos uniformemente será igual a $\frac{10^{-3}}{340 \cdot \sqrt{12}} = 0.85 \mu\text{s}$.

35 La desviación estándar de errores de muestreo de tiempo aleatorios, distribuidos de forma 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 de ganancia son aproximadamente de 0,75 μs , para un sistema a modo de ejemplo con un ancho de banda de canal de aproximadamente 18 kHz, correspondiente a una variación de tensión de aproximadamente 0,02 V/ μs . Los sensores acústicos utilizados para cada matriz se escogen con sensibilidades dentro de $\pm 1,5\text{ dB}$. Por lo tanto, las variaciones de ganancia relativa del canal están distribuidas de forma aproximadamente uniforme entre 0,84 y 1,19, de modo que la desviación estándar de la ganancia relativa es

40 $\frac{1.19 - 0.84}{\sqrt{12}} = 0.10$.
aproximadamente igual a $\frac{1.19 - 0.84}{\sqrt{12}} = 0.10$. La tensión umbral es $V_0 = 0,15\text{ V}$, lo que tiene como resultado una desviación estándar de errores de sincronización de aproximadamente 0,75 μs .

45 El total de errores de sincronización de medida se estima asumiendo que las variaciones de ganancia del canal, las variaciones de muestreo y las variaciones de localización del sensor son todas ellas estadísticamente independientes. Entonces, la desviación estándar del error de sincronización puede estimarse como $\sqrt{0.85^2 + 0.75^2 + 0.25^2} = 1.1 \mu\text{s}$.

Es complicado y costoso conseguir tal precisión con conversión analógica a digital, debido a que se requieren altas frecuencias de muestreo seguidas por interpolación. En el sistema dado a conocer se utilizan dos circuitos diferentes para medir con precisión la diferencia entre tiempos de llegada (TDOA).

50 En una realización, el sistema a modo de ejemplo utiliza un circuito analógico de diferencia entre tiempos de llegada (TDOA), utilizando relojes de 1 MHz en cada canal. Los relojes se disparan cuando la señal del sensor excede un

nivel de señal umbral en el sensor de referencia, que se definió más arriba como el sensor que encuentra primero la onda de choque. Tal como se discutió arriba, una frecuencia de reloj de 1 MHz es suficiente para eliminar la importancia de los errores de muestreo temporal en la práctica. El sistema funciona en modo analógico, basándose en la detección de niveles umbral, con la lógica digital llevando a cabo las siguientes funciones:

- 5 1. Se activa un primer seguro cuando la amplitud de señal del canal, en el sensor de referencia que encuentra primero la onda de choque, atraviesa un valor umbral.
2. El primer seguro activa contadores de inicio para cada canal, que incrementan su cuenta en uno en cada ciclo de reloj. Se alerta al procesador.
- 10 3. El contador en cada canal funciona hasta que el correspondiente sensor encuentra la onda de choque. Esto activa un segundo seguro en el canal, que detiene la cuenta en ese canal. Si no se activa un segundo seguro, el contador correspondiente funciona hasta un valor límite superior.
4. El número final de cómputos en cada contador es registrado en un registro digital TDOA.
5. El procesador lee el registro TDOA.
6. El procesador reinicializa los contadores para recibir la siguiente onda de choque.
- 15 En otra realización, se calcula la correlación para cada canal con todos los otros canales, para un segmento de tiempo centrado en el instante de detección de la TDOA mediante equipamiento físico. La correlación de dos funciones, denotada $Corr(g, h)$, se define mediante

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

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

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

donde 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:

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

25 La señal del tiempo de llegada tiene una longitud finita, de modo que solo es necesario realizar la integración (o 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 con ceros, de forma que la duración de las dos señales coincida, tal como se sabe en la técnica.

30 En la siguiente discusión se utilizan por simplicidad integrales de funciones continuas, aunque los datos reales son valores digitalizados y discretos. Los expertos en la materia serán capaces de reemplazar fácilmente las integrales por una suma.

35 A continuación haciendo referencia a la figura 6, en un proceso 60 los datos temporales de la señal de onda de choque $g_i(t)$, $g_j(t)$ son adquiridos en cada canal i, j , etapa 601, 602, y registrados en función del tiempo. En las etapas 603, 604, la potencia total de señal en un canal i se calcula para la subsiguiente normalización de la correlación, como

$$\text{Potencia Total en canal } i \equiv \int_{\text{Duración de la señal}} |g_i(\tau)|^2 d\tau$$

5 La transformada de Fourier $G_i(f)$ de los datos temporales de la señal de la onda de choque $g_i(t)$ se calcula para el canal i , y se obtiene la conjugada $G_i(-f)$, etapa 605. Análogamente, la transformada de Fourier $G_j(f)$ de los datos temporales de la señal de onda de choque $g_j(t)$ se calcula para todos los otros canales j , etapa 606. A continuación, se obtiene la correlación cruzada $G_i(-f) \cdot G_j(f)$ para cada par de canales (i, j) , etapa 608, la cual es una función $f_{i,j}(t)$ del "retardo" t . La TDOA para cada par de canales, es el tiempo t_{\max} en el que $f(t)$ tiene su valor máximo, etapa 610. La correlación entre canales i y j puede definirse como

$$\text{Corr}(g_i, g_j) = \frac{\text{valor máximo } f_{i,j}(t)}{\sqrt{(\text{Canal de Potencia } i) \cdot (\text{Canal de Potencia } j)}}$$

El residuo para el canal i se calcula mediante calcular el valor promedio de un sensor i sobre todos los sensores j :

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

10 tal como se indica en la etapa 612. Las TDOA y las correlaciones para ese canal con el mejor (es decir el menor) residuo global son seleccionadas a continuación como la "mejor" solución, etapa 614.

15 Tal como se ha mencionado anteriormente, típicamente los datos de canal son muestreados a intervalos de tiempo discretos, con una frecuencia de muestreo predefinida, por ejemplo de 41 666,66 muestras/segundo. Esto corresponde a una anchura de 24 μ s, que refleja la resolución temporal para la señal recibida. El proceso de correlación se realiza con una resolución temporal que está mejorada en un factor 8, hasta 3 μ s, mediante tomar 333 333 muestras/segundo.

20 Una vez que se han determinado las diversas diferencias entre tiempos de llegada (TDOA) entre los sensores, a partir de señales solo de onda de choque, puede determinarse el acimut y la elevación del tirador, y la trayectoria de la bala. La posición del tirador, es decir la distancia del tirador desde la matriz de sensores, puede determinarse si además se conoce la señal del rebufo.

En un sistema cartesiano de coordenadas 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 en un sensor dado (C_{xi}, C_{yi}, C_{zi}) (véase la figura 2), está dado por:

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

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

25 $V = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}$ representa la velocidad supersónica de la bala $Mc = V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$, siendo c la velocidad del

sonido y N el número de Mach. β representa el 'ángulo fallido' 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 $\frac{1}{M} = \text{sen}(\Theta)$.

30 Tal como se ha mencionado arriba y se indica en la figura 3, para una posición de tirador y una trayectoria de bala dadas, hay otras posición de tirador y trayectoria de bala, para las que el TOA de la onda de choque en un conjunto

de sensores es casi idéntico. De hecho, las dos soluciones ambiguas son idénticas si, en un modelo simplificado, se asume 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 como para resolver la curvatura de la onda de choque, entonces pueden desambiguarse las dos soluciones casi idénticas. La ambigüedad esencial de las soluciones de TDOA solo con onda de choque, se indica en la figura 3.

Asumiendo medidas de TDOA lo suficientemente precisas, puede obtenerse la solución verdadera para la posición del tirador y la trayectoria de la bala, mediante calcular la combinación tirador/trayectoria que minimiza el residuo del valor cuadrático medio (RMS, root mean square), de las TDOAs de onda de choque medidas y calculadas:

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

donde la suma se realiza sobre todos los sensores.

Un enfoque para resolver este problema es el algoritmo de Levenberg-Marquardt L1, descrito en detalle en la patente de EE.UU. 5 930 202. La mayoría de los algoritmos punto a punto clásicos utilizan un procedimiento determinista para aproximarse a la solución óptima, empezando en una solución aleatoria supuesta, y especificando una dirección de búsqueda en función de una regla de transición especificada previamente, tal como métodos directos que utilizan una función objetivo 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 una solución óptima dependa de la solución inicial seleccionada, y que el algoritmo pueda bloquearse en una solución por debajo del nivel óptimo, tal como un mínimo local o donde la superficie de la función tenga un valle plano, de tal forma que las iteraciones adicionales no mejoren el resultado.

Se ha encontrado que un mínimo global de la dirección del tirador y la trayectoria del proyectil puede calcularse de forma más rápida y desambiguarse con mayor fiabilidad mediante el uso de un algoritmo genético evolutivo (GA). Los GA imitan los principios evolutivos naturales y los aplican a procedimientos de búsqueda y optimización.

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

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

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

Por ejemplo, cuando se aplica el GA a 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 4-s, con cada 4- conteniendo los siguientes valores:

[Acimut_{Tirador}, Elevación_{Tirador}, Acimut_{Fallido}, Elevación_{Fallida}].

[Acimut_{Tirador}, Elevación_{Tirador}] están definidos por el ángulo $(\theta + \beta)$, mientras que [Acimut_{Fallido}, Elevación_{Fallida}] están definidos por el ángulo β (véase la figura 3). Puesto que el rebufo no es utilizado con el enfoque solo por onda de choque descrito arriba, se asume un alcance nominal de 100 metros entre la matriz de sensores y el tirador.

La población inicial se crea por selección aleatoria del 4-s, abarcando un rango razonable y significativo de valores (todos los valores se dan en grados):

Acimut_{Tirador} = {0, ... , 360},

Elevación_{Tirador} = {-10, ... , 30},

Acimut $F_{\text{Fallido}} = \{-20, \dots, 20\}$, y

Elevación $F_{\text{Fallida}} = \{-20, \dots, 20\}$.

5 En la etapa 75 se verifica si se ha alcanzado un número máximo de iteraciones para el GA, que puede fijarse por ejemplo en 25. Si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones, el proceso 70 se detiene en la etapa 80, y el resultado puede ser aceptado o bien evaluado adicionalmente. En otro caso, la etapa 76 verifica si se satisface el criterio de aptitud predeterminado.

10 Por ejemplo, el criterio de aptitud puede ser un acimut fallido calculado de $< 15^\circ$ y/o una relación entre los residuos de dos soluciones ambiguas. Si se satisface el criterio de aptitud, el proceso 70 se detiene en la etapa 80; en otro caso, se crea una nueva población mediante cruce, etapa 77, y mutación, etapa 78, y el contador de generación se incrementa en uno, etapa 79.

En cada generación se permite al "mejor" individuo sobrevivir sin mutación, mientras que sobreviven también los mejores 100 individuos estimados según su aptitud, pero se utilizan para crear con los operadores de cruce/mutación listados en la tabla uno los 100 individuos siguientes a partir de pares de estos supervivientes.

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

15 Tabla 1

Nombre del Operador	Tipo de Operador	Probabilidad	Descripción
Cruce - Acimut	Cruce	0,5	Intercambiar acimut de tirador/trayectoria entre dos cromosomas
Cruce - Fallido	Cruce	0,5	Intercambiar acimut/elevación fallidos entre dos cromosomas
Mutación – Campo	Mutación	0,3	Reemplazar un campo dado (con una probabilidad de 0,25 por campo) con un nuevo valor seleccionado aleatoriamente dentro del alcance
Mutación – Incremental	Mutación	0,4	Inducir pequeñas mutaciones en todos los campos de un cromosoma (dentro de $\leq 2^\circ$ para información del tirador; dentro de $\leq 5^\circ$ para información fallida)
Mutación - Por Alternancia	Mutación	0,1	Cambiar la solución en la solución alternativa ambigua
No - Mutación	Mutación	0,2	El cromosoma permanece intacto

20 Se consigue y/o mejora la desambiguación llevando a cabo una búsqueda por gradiente de la mejor solución y la correspondiente solución alternativa. Para las soluciones ambiguas se calculan los residuos y las tasas de los residuos. Si el acimut fallido calculado es $< 15^\circ$, lo que representa disparos "próximos", y si la relación de los residuos es > 2 , entonces se selecciona la solución con el residuo menor. En otro caso no se realiza selección, y la solución con el menor residuo es etiquetada como la solución "principal", etiquetándose la otra solución como una solución "alternativa".

25 Con detección solo mediante onda de choque, el algoritmo GA produjo una solución sobre un ordenador a 1 GHz funcionando con el sistema operativo Linux en 0,15 segundos, sobre un amplio rango de disparos simulados. El 97% de los disparos simulados están dentro de 15° del acimut fallido, y el 86% de los disparos simulados están dentro del 5% del acimut fallido. Utilizando el algoritmo de desambiguación descrito, los disparos próximos, es decir los disparos que tienen un acimut fallido menor que 15° , fueron desambiguados el 95% de las veces. El algoritmo de desambiguación produjo resultados correctos para disparos más distantes el 75% de las veces. Se supone que la precisión de la desambiguación varía en función de la geometría de la matriz de sensores y de la distribución presumida de los disparos, siendo más sencillo desambiguar los disparos que tienen poca elevación.

30 Las soluciones descritas para la trayectoria del proyectil fueron obtenidas sin detección del rebufo. Sin embargo, se ha encontrado que incluso una débil señal de la boca del cañón, o una señal de la boca del cañón recibida solo

sobre un número limitado de canales, pueden utilizarse ventajosamente para mejorar el rango de determinación y desambiguación.

5 La figura 9 muestra esquemáticamente un diagrama de un modelo de tiempo de llegada (TOA), que se describe en mayor detalle en la patente de EE.UU. número 6 178 141. El modelo TOA puede utilizarse para estimar la trayectoria del proyectil y la dirección del tirador en relación con la localización del sensor. El modelo TOA está basado en un modelo balístico que tiene en cuenta ciertas características físicas, relativas a la trayectoria de vuelo del proyectil, tales como la densidad del aire (que está relacionada con la temperatura); la posición \vec{P} (P_x, P_y, P_z) de un tirador; el acimut y los ángulos de elevación de la boca del rifle; la velocidad inicial del proyectil (o equivalentemente el número de Mach); y la velocidad del sonido (que varía con la temperatura/densidad del aire). Con este modelo balístico, es posible calcular con precisión el momento en que la onda de choque y el rebufo alcanzan un punto concreto del espacio.

10 Tal como se ha descrito en el diagrama de la figura 9, el tirador está localizado en un punto \vec{P} (P_x, P_y, P_z) con respecto a un origen (0, 0, 0), los diversos sensores están localizados en puntos \vec{S}_j (S_{xj}, S_{yj}, S_{zj}) y la trayectoria de la bala se muestra saliendo del tirador en la dirección de \vec{A} . El vector desde el tirador hasta el sensor j-ésimo es \vec{D} , el punto de aproximación más próximo (CPA, closest point of approach) de la bala hasta el sensor j-ésimo es $|\vec{R}| = |\vec{D}| \sin(\beta)$, y la trayectoria seguida desde el punto en el que es radiada la onda de choque desde la trayectoria al sensor j-ésimo es S (el índice j de los sensores ha sido omitido). El ángulo de Mach de la bala es $\theta = \sin^{-1}(1/M)$, $M = V/c_0$. M el número de Mach del proyectil, V es la velocidad supersónica del proyectil y c_0 es la velocidad (dependiente de la presión y la temperatura) del sonido. El 'ángulo fallido' entre la trayectoria y el sensor j-ésimo es β . La trayectoria está caracterizada por su ángulo de acimut medido en sentido antihorario desde el eje x, en el plano x - y, y por su ángulo de elevación medido hacia arriba desde el plano x - y. Las ecuaciones que definen el tiempo de llegada de la onda de choque t_j y el vector unitario en el sensor j-ésimo se describen en términos de estas cantidades geométricas.

15 El tiempo de llegada es igual al tiempo $\frac{|\vec{A}|}{V}$ que tarda del proyectil en recorrer la distancia $|\vec{A}|$ hasta el punto en el que es radiado el sonido hacia el sensor j-ésimo, mas el tiempo que tarda la onda de choque en recorrer la distancia $|\vec{S}|$ desde el punto de radiación hasta el sensor j-ésimo, $\frac{|\vec{S}|}{c_0}$

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

donde t_0 es una referencia temporal (tiempo de activación) y c_0 es la velocidad del sonido. El ángulo de Mach θ está también indicado en la figura 9.

30 Puede asumirse con seguridad que la velocidad V del proyectil se mantiene constante sobre la distancia correspondiente a la separación de sensores, de forma que hay una pérdida insignificante de velocidad entre los tiempos en los que el proyectil radia a los diferentes sensores. Sin embargo, se sabe que sobre largas distancias los proyectiles se ralentizan debido a resistencia del aire. La resistencia del aire puede expresarse mediante un coeficiente de resistencia aerodinámica C_b que depende de la forma de la bala y del calibre de la bala. Un modelo balístico matemático derivado de principios físicos puede predecir el tiempo de llegada de una onda de choque en cualquier punto general del espacio, en función de un conjunto completo de parámetros que describen el proyectil (por ejemplo, mediante su coeficiente de resistencia aerodinámica C_b , su velocidad inicial y la densidad del aire circundante, que se conocen por adelantado).

40 Los parámetros requeridos para un cálculo exacto son típicamente desconocidos en una configuración realista, tal como un campo de batalla. Sin embargo, la estimación de alcance puede mejorarse significativamente mediante un proceso iterativo, mostrado en forma de diagrama de flujo de proceso 200 en la figura 10, que tiene en cuenta la deceleración de la velocidad del proyectil a lo largo de la trayectoria. El proceso 200 comienza la etapa 202, con las siguientes suposiciones:

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

C_b = eficiente nominal de resistencia aerodinámica, promediado sobre las armas previstas

V_0 = velocidad inicial del proyectil cuando es disparado, promediada sobre las armas previstas

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

- 5 En la etapa 204 se calcula una primera estimación de la distancia del tirador D_0 , utilizando la diferencia entre tiempos de llegada (TDOA) medida τ_{ms} , y un ángulo de llegada α entre el sonido de la boca del cañón y la onda de choque, en la matriz de sensores, y asumiendo una velocidad inicial V_0 y un número de Mach M_0 constantes, de acuerdo con la ecuación

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

- 10 Con estas suposiciones, la velocidad del proyectil a una distancia a desde la posición del tirador \vec{P} , puede calcularse en la etapa 206 a partir de la ecuación

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

de modo que el tiempo en que el proyectil recorre la distancia, a , a lo largo trayectoria queda, etapa 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 mediante la ecuación

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

- 15 donde el número de Mach M_a se fija inicialmente en M_0 . Debe observarse que la velocidad instantánea de la bala se fija a la velocidad del sonido (es decir, $M_a = 1$) si la velocidad calculada de la bala se hace inferior a la velocidad del sonido. La distancia revisada $a = |\vec{A}|$ en la etapa 210 queda entonces como

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

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

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

- 25 Este proceso se repite hasta que se ha alcanzado un número máximo de iteraciones, o bien el valor de alcance D converge, tal como se determina la etapa 212.

El proceso 200 también verifica en la etapa 214 si el valor del alcance revisado $D = |\vec{D}|$ para la distancia entre el tirador y el conjunto de sensores, es un valor "razonable", en cuyo caso el proceso 200 termina en la etapa 216. Por ejemplo, el valor para D puede considerarse válido si la distancia a, recorrida por el proyectil, y la distancia

$$s = a \cdot \frac{\text{sen}(\beta)}{\text{sen}(\alpha)}$$

entre el sensor y el punto en el que la onda de sonido es radiada desde el proyectil al sensor, son números válidos, es decir no es un NAN. Un NAN es un valor especial de punto flotante, que representa el resultado de una operación numérica que no puede devolver un valor numérico válido, y se utiliza típicamente para impedir la propagación de errores a través de un cálculo. Además, α y β deben ser ambos menores que un valor umbral predeterminado, indicando que el proyectil ha sido indudablemente disparado hacia la matriz de sensores.

Tal como se ha mencionado arriba, el par de números (τ_{ms}, α) se utiliza inicialmente para calcular el alcance del tirador D_0 en la aproximación cero-ésima, despreciando cambios en la velocidad del proyectil a lo largo de la trayectoria. Si el proceso iterativo 200 descrito arriba no devuelve una geometría consistente que soporte el par de números (τ_{ms}, α) , la solución se descarta.

Incluso si no es posible obtener una solución exacta, un objetivo es hallar valores para el alcance del tirador D y el acimut fallido y los ángulos de elevación (que están relacionados con β) que se ajusten más estrechamente a una TDOA medida de la onda de choque y a una TDOA medida de la boca del cañón. Tal como ya se ha mencionado, la TDOA solo de onda de choque entre los diversos sensores, puede medirse de modo fiable en la mayoría de las situaciones. El acimut del tirador y la elevación del tirador, pero no el alcance del tirador, pueden determinarse a partir de la TDOA solo de la onda de choque, utilizando las coordenadas conocidas de la matriz de sensores (S_{xj}, S_{yj}, S_{zj}) . Se asumirá que puede también medirse la TDOA τ_{ms} entre la onda de choque detectada y el sonido de la boca del cañón, de modo que el sonido de la boca del cañón puede no ser detectado por todos los sensores.

Si en la etapa 214 se determina que el proceso iterativo 200 no devuelve un resultado válido, entonces el proceso 200 intenta calcular el alcance del tirador, invocando un algoritmo genético evolutivo (GA) 300. El GA imita los principios evolutivos naturales, y los aplica a procedimientos de búsqueda y optimización. Un GA comienza su búsqueda con un conjunto aleatorio de soluciones, en lugar de hacerlo solo con una solución. Una vez que se ha creado 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 representarse mediante la distancia euclídea entre una solución calculada y la solución medida, por ejemplo mediante

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

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

En la figura 11 se muestra un diagrama de flujo esquemático del proceso GA 300. El proceso 300 utiliza una diferencia entre tiempos de llegada (TDOA) τ_{ms} y el ángulo de llegada α medido previamente por el proceso 200, etapa 302. A modo de ejemplo, se define un número de 3-tuplas que tienen los valores {alcance, MA, ME}, como población inicial en la etapa 304, donde ALCANCE es el alcance del tirador $D = |\vec{D}|$ mostrado en la figura 9, MA es el acimut fallido y ME es la elevación fallida. Los valores MA y ME indican en qué medida la bala ha fallado el blanco, en acimut y espacio de elevación. En el ejemplo ilustrado se asume que el blanco es la matriz de sensores. En la etapa 304, la población inicial se ha creado por selección aleatoria de la 3-tupla, abarcando un rango significativo y razonable de valores:

$$\text{Alcance}_{\text{Tirador}} = \{1000, \dots, 3000\} \text{ [metros]},$$

$$\text{Acimut}_{\text{Fallido}} = \{-20, \dots, 20\} \text{ [grados]},$$

$$\text{Elevación}_{\text{Fallida}} = \{-20, \dots, 20\} \text{ [grados]}.$$

El cálculo sigue un proceso similar al esbozado arriba para la solución solo con onda de choque. Inicialmente para la generación $\text{Gen} = 0$, etapa 306, el vector de posición del tirador $\vec{P} (P_x, P_y, P_z)$ se calcula para cada 3-tupla con el acimut y elevación del tirador determinados previamente, y un ALCANCE asumido para 3-tupla concreta. Asumiendo un número inicial de Mach M_0 , el vector $\vec{A} (A_x, A_y, A_z)$, es decir la posición desde la que es radiado el sonido de la

onda, se calcula como los valores MA y ME para cada 3-tupla, etapa 308. Se calculan también las distancias $\vec{D} = \vec{S}_j - \vec{P}$ entre el tirador y cada sensor j que detecta una onda de choque.

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

Para cada 3-tupla, se calcula el ángulo β a partir de la ecuación donde el símbolo " \bullet " indica el producto escalar de dos vectores. Los valores actualizados para la distancia a , el tiempo de recorrido T_a del proyectil sobre la distancia E , y el número de Mach M_a , se calculan mediante insertar el valor calculado para β , y los valores asumidos inicialmente para $M_a = M_0$ y a , en las anteriores ecuaciones para M_a , T_a , a y D , etapa 312. Este proceso se itera varias veces para cada una de las 3-tuplas, por ejemplo 3 veces tal como se indica en la etapa 312, tras lo cual el residuo ΔT_{\min} definido arriba, que incluye la señal de la boca del cañón, se calcula para cada 3-tupla en la etapa 314.

5 En la etapa 316 se verifica si se ha alcanzado un número máximo de iteraciones para el GA, por ejemplo 25 iteraciones. Si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones, entonces el proceso 300 se detiene en la etapa 320, devolviendo la 3-tupla con el mínimo residuo. De lo contrario, el proceso 300 crea una nueva población a través de una operación de cruce y mutación, etapa 318, y el contador de generación se incrementa en uno, etapa 322.

15 En cada generación se permite que el "mejor" individuo sobreviva sin mutación, mientras que los 100 individuos mejores estimando su aptitud sobreviven también, pero son utilizados para crear los siguientes 100 individuos a partir de pares de estos supervivientes, con los operadores de cruce/mutación listados en la siguiente tabla 2.

A modo de ejemplo se utilizaron los siguientes operadores de cruce y mutación, para mostrar el proceso 300:

Tabla 2

Nombre del Operador	Tipo de Operador	Probabilidad	Descripción
Cruce - Acimut Fallido	Cruce	0,5	Intercambiar acimut fallido entre dos cromosomas
Cruce - Elevación Fallida	Cruce	0,5	Intercambiar elevación fallida entre dos cromosomas
Cruce - Alcance Fallido	Cruce	0,5	Intercambiar alcance entre dos cromosomas
Mutación - Campo	Mutación	0,3	Reemplazar un campo dado (con una probabilidad de 0,25 por campo) con un nuevo valor seleccionado aleatoriamente, dentro del rango
Mutación - Incremental	Mutación	0,4	Introducir pequeñas perturbaciones en todos los campos de un cromosoma (dentro de ± 2 metros para el alcance del tirador; dentro de $\pm 0,1^\circ$ para acimut y elevación fallida)

20 El proceso GA 300 se ejecuta con una población inicial de 200 3-tuplas diferentes, con una tasa de relleno de 50, para un total de 25 generaciones. El GA se ejecuta 5 veces en paralelo con diferentes conjuntos de 3-tuplas iniciales, y se selecciona la solución con el menor residuo, como la solución final para ALCANCE, acimut fallido y elevación fallida del tirador, lo que permite el cálculo de un vector \vec{D} .

25 Recientes ensayos experimentales han indicado una disminución de disparos ambiguos del 95% al 8% sobre el mismo conjunto de datos, mediante el uso de al menos un canal de señal de la boca del cañón, además de 5 o más canales de onda de choque, lo que es una mejora significativa sobre las soluciones solo con onda de choque.

30 Los cálculos no tienen en cuenta que la desaceleración del proyectil a lo largo de su trayectoria tiende a sobreestimar el alcance. Para ciertas geometrías y disparos lo suficientemente distantes, esta sobreestimación puede exceder el 20%. El proceso descrito arriba elimina este sesgo respecto de la estimación del alcance, para detecciones de disparos de largo alcance.

Tal como se ha descrito arriba, frecuentemente soluciones ambiguas solo con onda de choque pueden ser desambiguadas mediante comparar los residuos procedentes de dos trayectorias diferentes, y seleccionar la trayectoria con el menor residuo.

5 Si las señales del rebufo son detectadas sobre 4 o más canales de sensor, entonces los algoritmos de onda de choque-boca del cañón descritos arriba pueden ser utilizados para determinar sin ambigüedad la localización del tirador, independientemente del número de canales de onda de choque. Si las señales de rebufo son detectadas en menos de 4 sensores, pero las señales de onda de choque son detectadas en 5 o más canales de onda de choque, entonces el GA mencionado arriba puede ser utilizado con un residuo o función de coste modificado, mediante lo que cualesquiera señales de la boca del cañón disponibles son "mezcladas" en la función de optimización, para desambiguar la solución solo con onda de choque y/o refinar la estimación del alcance del tirador. Sin embargo, si se detectan menos de 3 canales de boca de cañón y menos de 3 canales de onda de choque, entonces puede ser activada una alerta sin que se intente localizar al tirador.

La señal de la boca del cañón puede no ser detectada con fiabilidad en todos los canales, debido a que:

1. El nivel de detección sobre uno o más canales es demasiado bajo para la detección con confianza.
- 15 2. La energía de la boca del cañón no es discernible en la señal en bruto, provocando que el sistema correlacione con 'ruido', proporcionando estimaciones de TDOA no fiables.
3. Los ecos procedentes de la onda de choque pueden ser el mayores que el rebufo, y pueden llegar antes que el rebufo provocando que el sistema detecte de forma falsa la onda de choque como la boca de cañón.

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

$$\Delta \tau_{\min} = \sqrt{\sum_i (\Delta \tau_{boca, calc}^i - \Delta \tau_{boca, med}^i)^2 + \sum_j (\Delta \tau_{Choque, calc}^j - \Delta \tau_{Choque, med}^j)^2},$$

donde el primer término para el rebufo está sumado sobre el número reducido de sensores (< 4) que detectan el rebufo, y j está sumado sobre los sensores que detectan la onda de choque (típicamente, la totalidad de los sensores).

25 Tal como se demuestra mediante los ejemplos descritos arriba, 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 solo con onda de choque, de modo que la solución de la trayectoria calculada se alinea mejor con una de las soluciones ambiguas, es decir, se desambiguan por tanto las soluciones.

30 Sin al menos algunas señales de boca de cañón fiables, puede generarse un número significativo de soluciones ambiguas solo con onda de choque, en especial a largas distancias del tirador, lo cual es menos deseable que un número menor de soluciones no ambiguas pero menos precisas.

35 En el caso de una detección de la boca de cañón potencialmente irrealizable, inicialmente puede realizarse aún el intento de detectar señales de boca de cañón, por ejemplo para encontrar un rastro de rebufo en una señal ruidosa, y calcular la TDOA resultante. La detección de la boca del cañón se estima como fiable si se encuentran señales de la boca de cañón sobre un número suficiente de sensores, con la suficiente correlación transversal entre los canales, y si hay una correlación lo suficientemente fuerte entre la señal de la boca de cañón y la correspondiente banda en bruto sobre cada canal (desplazada una serie de períodos, para tener en cuenta retardos de filtrado).

En otro caso, se borran al menos las señales de boca de cañón que han mostrado correlación insuficiente, y se invoca la siguiente lógica de 'detección gruesa de boca de cañón':

40 –Buscar máximos energía de onda de choque tras una onda de choque. Etiquetar estos máximos como probables 'ecos de la onda de choque', excluyéndolos de ese modo respecto de los rebufos.

45 –Determinar un tiempo máximo que llevaría a la onda de la boca de cañón a través la matriz de sensores, y definir una "ventana" que tenga la correspondiente duración. Buscar máximos de energía de la boca de cañón, mediante mover esta ventana sustancialmente a través de todos los canales del detector tras la onda de choque detectada, saltando secciones en la señal detectada que han sido identificadas como ecos de la onda de choque. Integrar la energía sobre la ventana, es decir buscar el máximo de:

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

5 donde el cuadrado de mb_{i+j}^n representa una medida de la energía, por ejemplo del rebufo, medida por el n-ésimo sensor. El término $(i + j)$ indica el canal de detección, con i indicando un intervalo de tiempo discreto entre el momento en que se detectó la onda de choque y el comienzo de la ventana, y j representa un intervalo de tiempo medido desde el inicio de la ventana.

10 Para discriminar respecto del ruido, se verifica la energía del máximo en la ventana que produce el máximo de la función $f_{max}(i)$, para determinar si el pico de energía en el máximo es menor que la energía a través de la ventana, en un factor de relación dado. Si éste es el caso, entonces la señal en la ventana se identifica como una detección de la boca del cañón, y se lleva a cabo correlación transversal sobre todos los canales en la banda de rebufo mb , para determinar la TDOA de la boca del cañón.

Después, la señal de rebufo determinada puede utilizarse para determinar el alcance del tirador y/o para desambiguar la señal de onda de choque, tal como se ha descrito arriba.

15 En resumen, el sistema descrito puede proporcionar de forma precisa, rápida y a menudo sin ambigüedad, la dirección del tirador y la trayectoria de la bala, en función de medidas solo de onda de choque. La desambiguación puede mejorarse, y puede estimarse el alcance del tirador si se detecta asimismo al menos una débil forma de onda del rebufo. El sistema es relativamente insensible a falsas indicaciones de tirador en respuesta a la vibración del vehículo y a ruido, tal como el ruido del viento, petardos o disparos cercanos en direcciones que se alejan del sistema.

20 Debe mencionarse que el sistema que detecta las señales de onda de choque, lleva a cabo dos pruebas sobre las formas de onda iniciales, para determinar si de hecho la señal puede atribuirse a onda 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. Solo si se excede este valor umbral, puede considerarse la forma de la señal como procedente de una onda de choque. En segundo lugar, la extensión temporal del pico de presión positiva inicial, detectado, debe ser mayor de aproximadamente 70 μ s y menor de aproximadamente 300 μ s. Estos criterios proporcionan al sistema inmunidad frente a ruido impulsivo, tal como petardos y disparos no amenazantes. Si no se superan estas pruebas, la forma de onda detectada no se considera una onda de choque, y no se ensaya una solución para el tirador.

30 Si bien la invención ha sido dada a conocer en relación a las realizaciones preferidas mostradas y descritas en detalle, puede realizarse diversas modificaciones y mejoras sobre ésta. A modo de ejemplo, aunque las realizaciones ilustrativas se describen teniendo sensores acústicos tales como micrófonos, éste no tiene por qué ser el caso. En su lugar, puede utilizarse otros tipos de sensores mecánicos o eléctricos sensibles a la presión. Además, los valores proporcionados en las tablas 1 y 2 para diversos operadores están previstos sólo como ejemplos, y pueden seleccionarse otros valores dependiendo de las condiciones reales del campo.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método para determinar una trayectoria del proyectil no ambigua utilizando una matriz de sensores acústicos separados (22-28) cuando una onda de choque asociada con un proyectil es detectada mediante, por lo menos, cinco de los sensores, pero un rebufo asociado con el proyectil es detectado mediante menos de cuatro de los sensores, que comprende:
- obtener mediciones TDOA de onda de choque desde los sensores que detectan la onda de choque;
- caracterizado por:**
- 10 obtener (302) cuatro o más mediciones de TDOA de la onda de choque desde los sensores que detectan la onda de choque, en donde las mediciones de TDOA de la onda de choque son insuficientes para calcular la trayectoria no ambigua del proyectil;
- obtener menos de tres mediciones TDOA del rebufo, desde los sensores que detectan el rebufo; y
- calcular iterativamente (308) soluciones a un modelo balístico utilizando las mediciones de TDOA de la onda de choque y las mediciones de TDOA del rebufo, para obtener la trayectoria no ambigua del proyectil.
- 15 2. El método acorde con la reivindicación 1, en el que una o dos mediciones TDOA del rebufo se obtienen a partir de los sensores que detectan el rebufo.
3. El método acorde con la reivindicación 2, en el que la trayectoria no ambigua del proyectil se calcula utilizando un algoritmo genético (300).
- 20 4. El método acorde con la reivindicación 3, en el que la ejecución del algoritmo genético comprende utilizar un número predefinido de generaciones con una población inicial que incluye un número predeterminado de individuos, en el que cada individuo está representado por una 4-tupla que incluye el acimut del tirador, la elevación del tirador, el acimut fallido y la elevación fallida.
5. El método acorde con la reivindicación 4, en el que se calculan (314) los residuos para los individuos en cada generación, incluyendo dichos residuos un ajuste por mínimos cuadrados de una combinación de las mediciones TDOA de la onda de choque y las mediciones TDOA del rebufo.
- 25 6. El método acorde con la reivindicación 5, en el que si la relación entre la solución con el residuo mínimo y su solución alternativa ambigua es mayor que un valor predefinido, la solución con el residuo calculado menor es designada (320) como la trayectoria no ambigua del proyectil.
7. El método acorde con la reivindicación 6, en el que la ejecución del algoritmo genético comprende aplicar (318) operadores de cruce y de mutación a la población inicial en una generación.
- 30 8. El método acorde con la reivindicación 7, en el que aplicar el operador de cruce incluye intercambiar por lo menos uno entre el acimut fallido y la elevación fallida, entre dos individuos de la población en una generación.
9. El método acorde con la reivindicación 7, en el que aplicar el operador de cruce incluye intercambiar por lo menos uno entre el acimut del tirador y el acimut de la trayectoria, entre dos individuos de la población en una generación.
- 35 10. El método acorde con la reivindicación 7, en el que el operador de mutación comprende mutación de campo, mutación incremental, mutación por alternancia y ausencia de mutación.
11. El método acorde con la reivindicación 10, en el que el operador de mutación de campo sustituye un valor de la 4-tupla con un valor seleccionado aleatoriamente.
12. El método acorde con la reivindicación 10, en el que el operador de mutación incremental induce una pequeña mutación en todos los campos de la 4-tupla.
- 40 13. El método acorde con la reivindicación 10, en el que el operador de mutación por alternancia cambia la solución de una generación por su solución alternativa ambigua en la generación.
14. El método acorde con la reivindicación 1, en el que calcular iterativamente soluciones para un modelo balístico se basa, por lo menos en parte, en un valor de un residuo para las mediciones TDOA obtenidas a partir de los sensores que detectan la onda de choque y a partir de los sensores que detectan el rebufo.

15. El método acorde la reivindicación 14, en el que el residuo es función de las diferencias entre las mediciones TDOA calculadas y medidas.

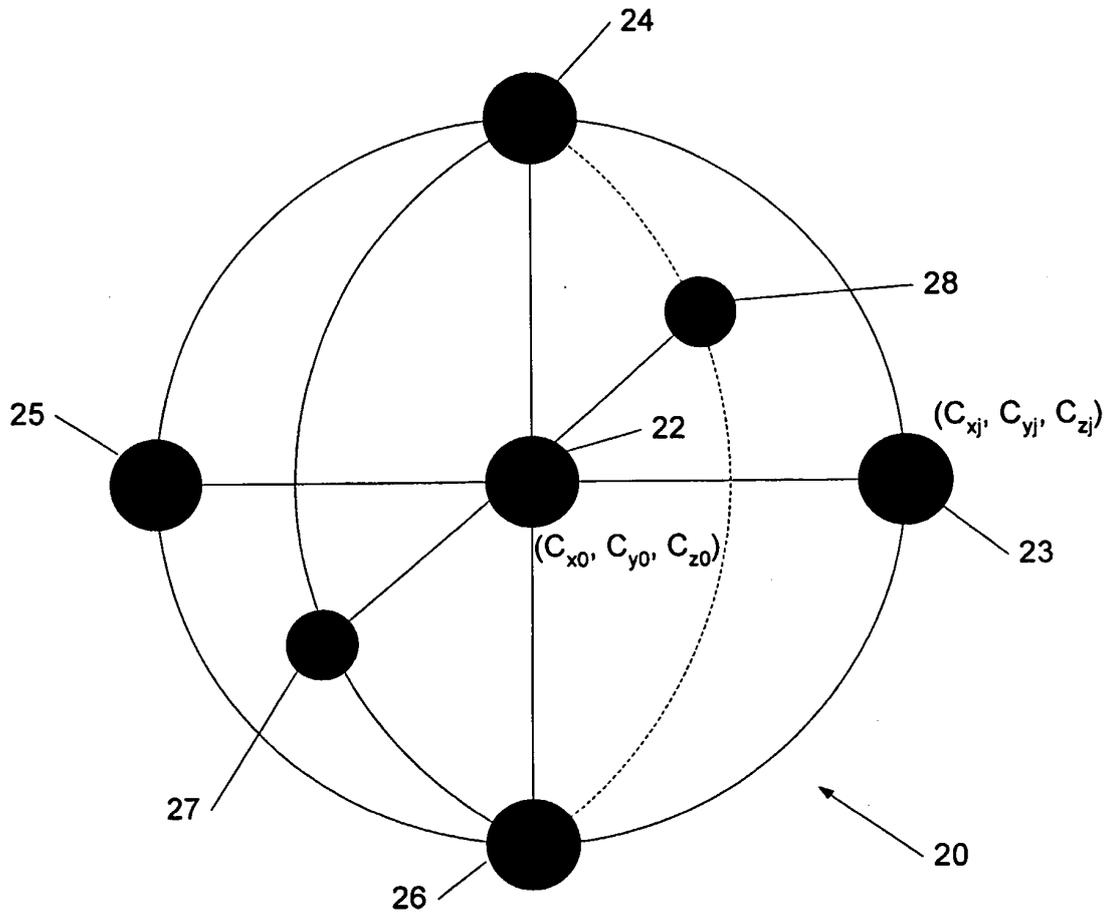


FIG. 2

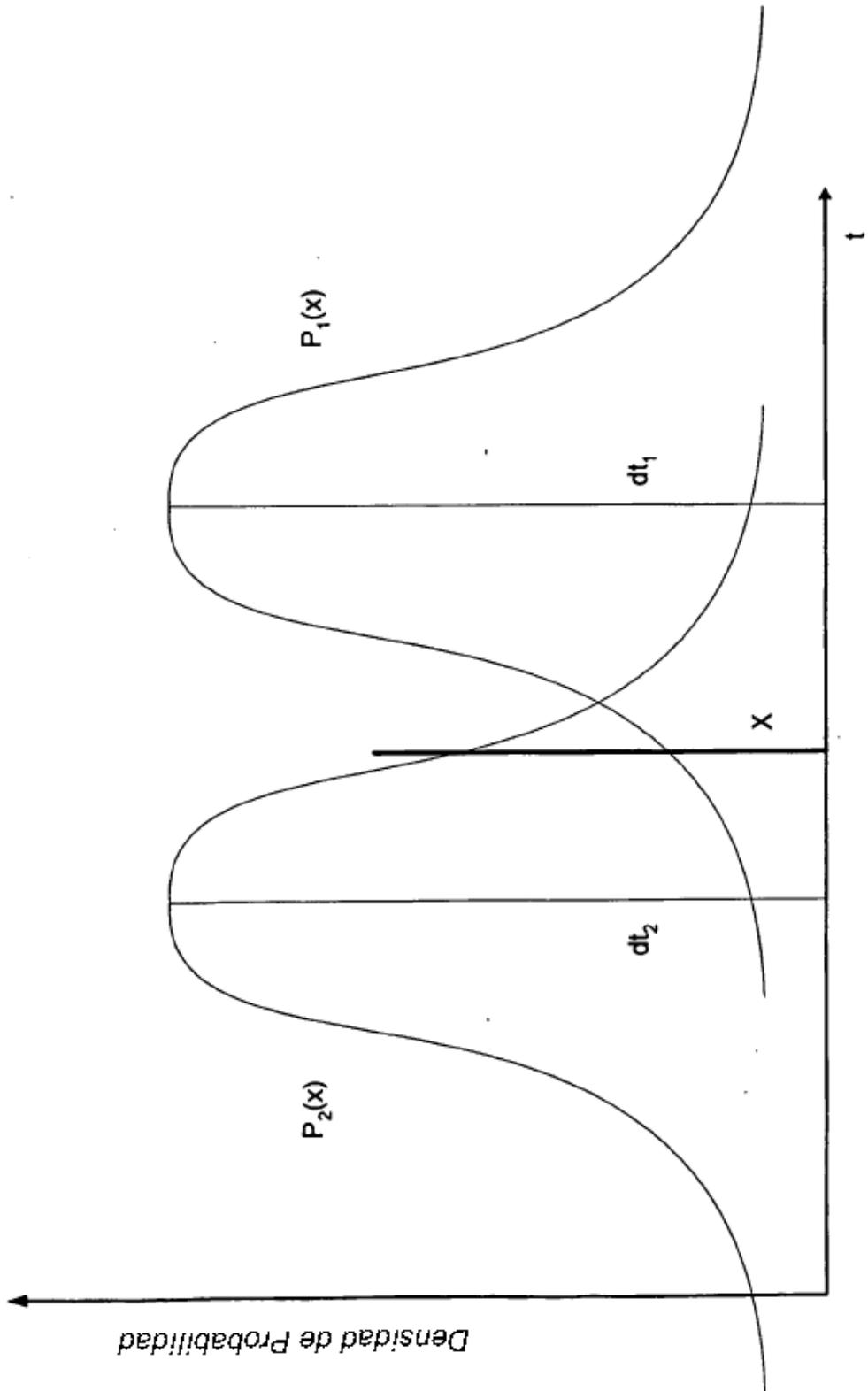


FIG. 4

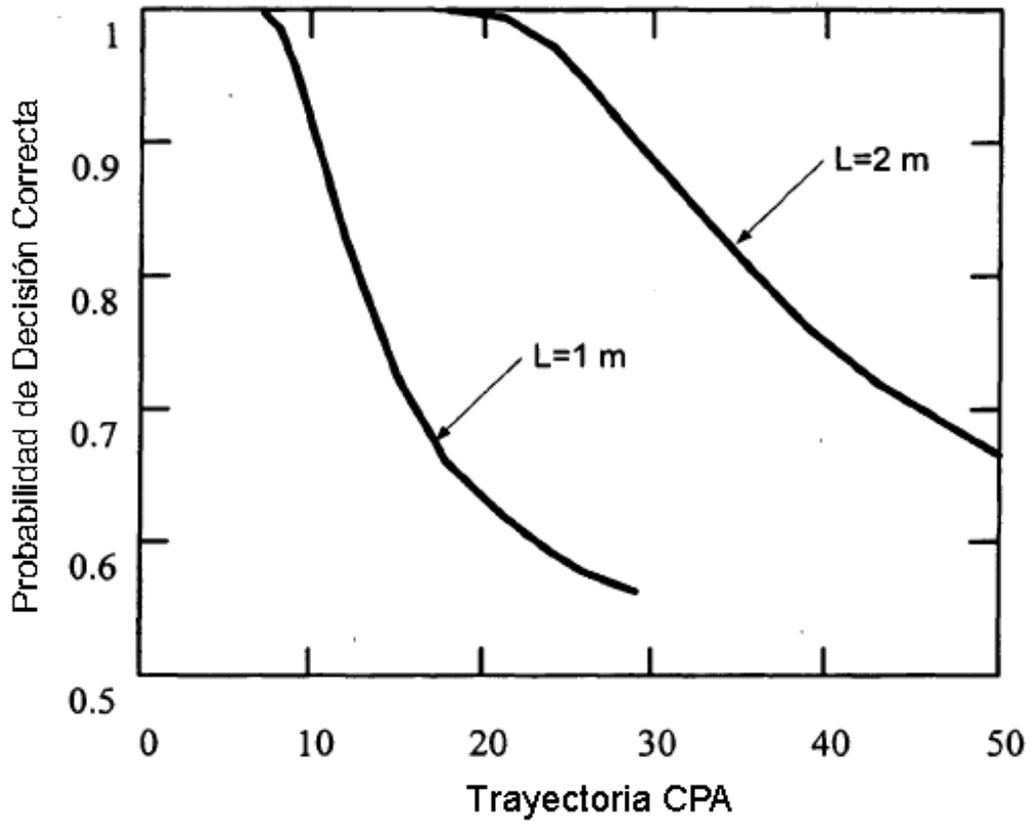


FIG. 5

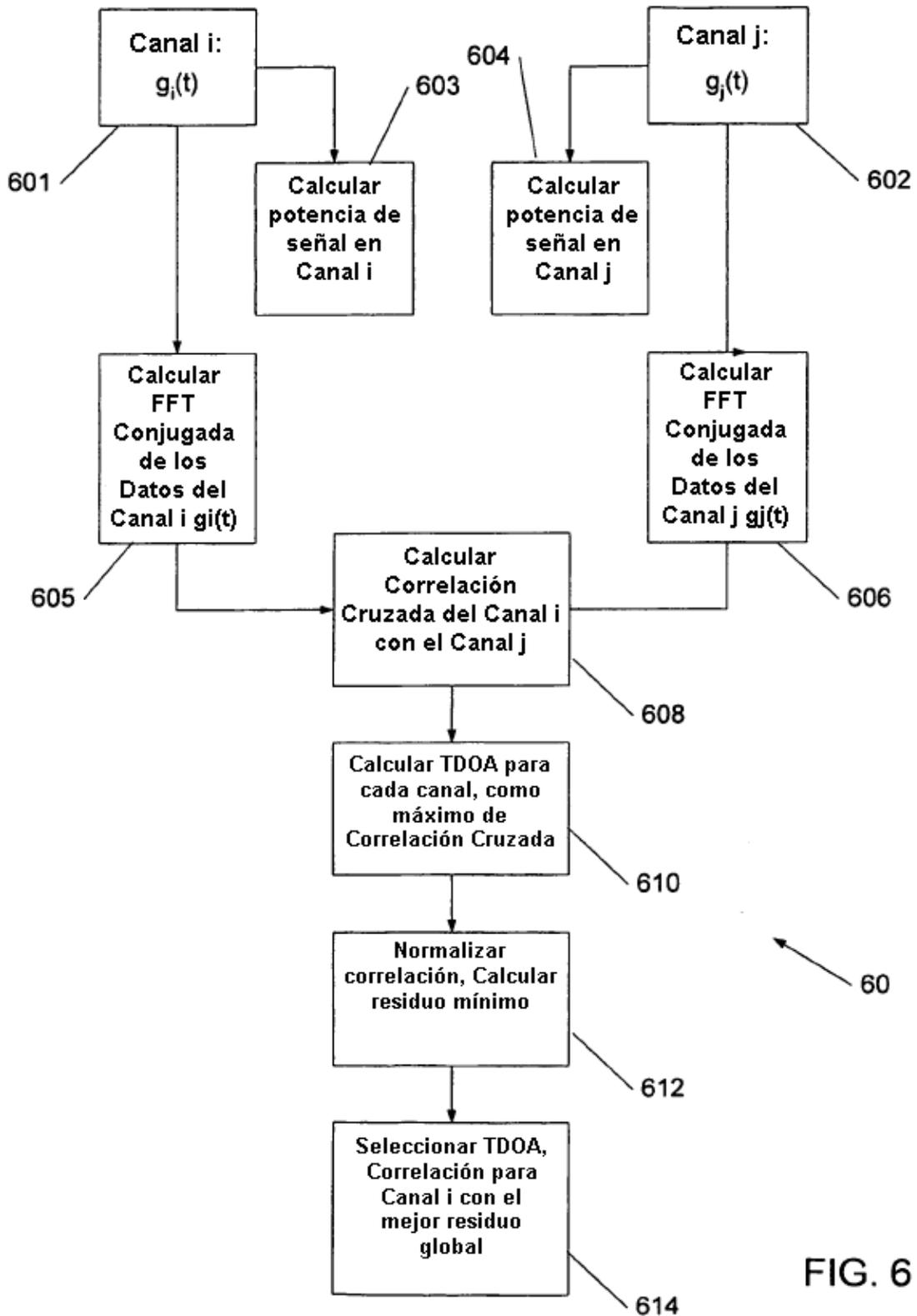


FIG. 6

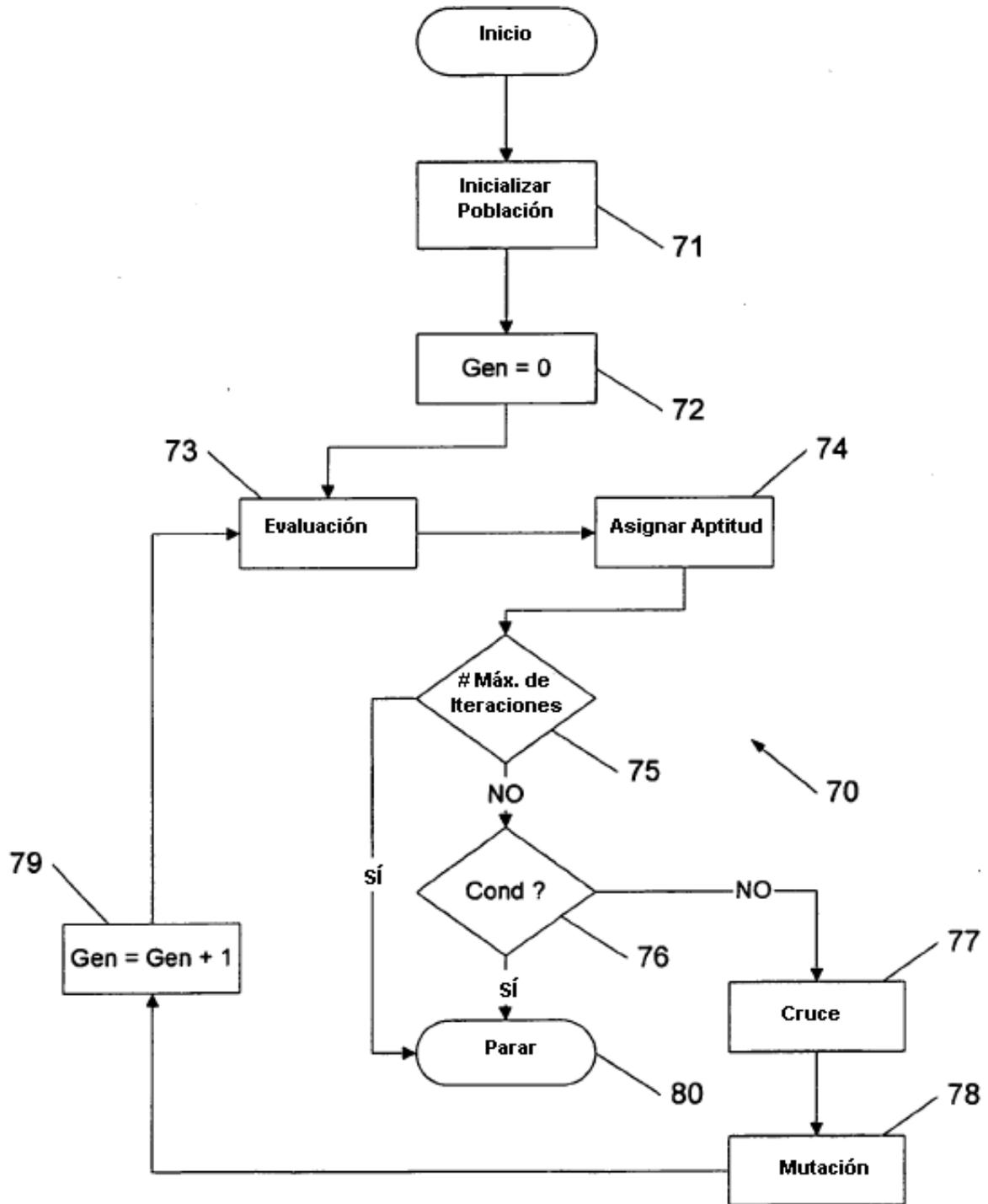


FIG. 7

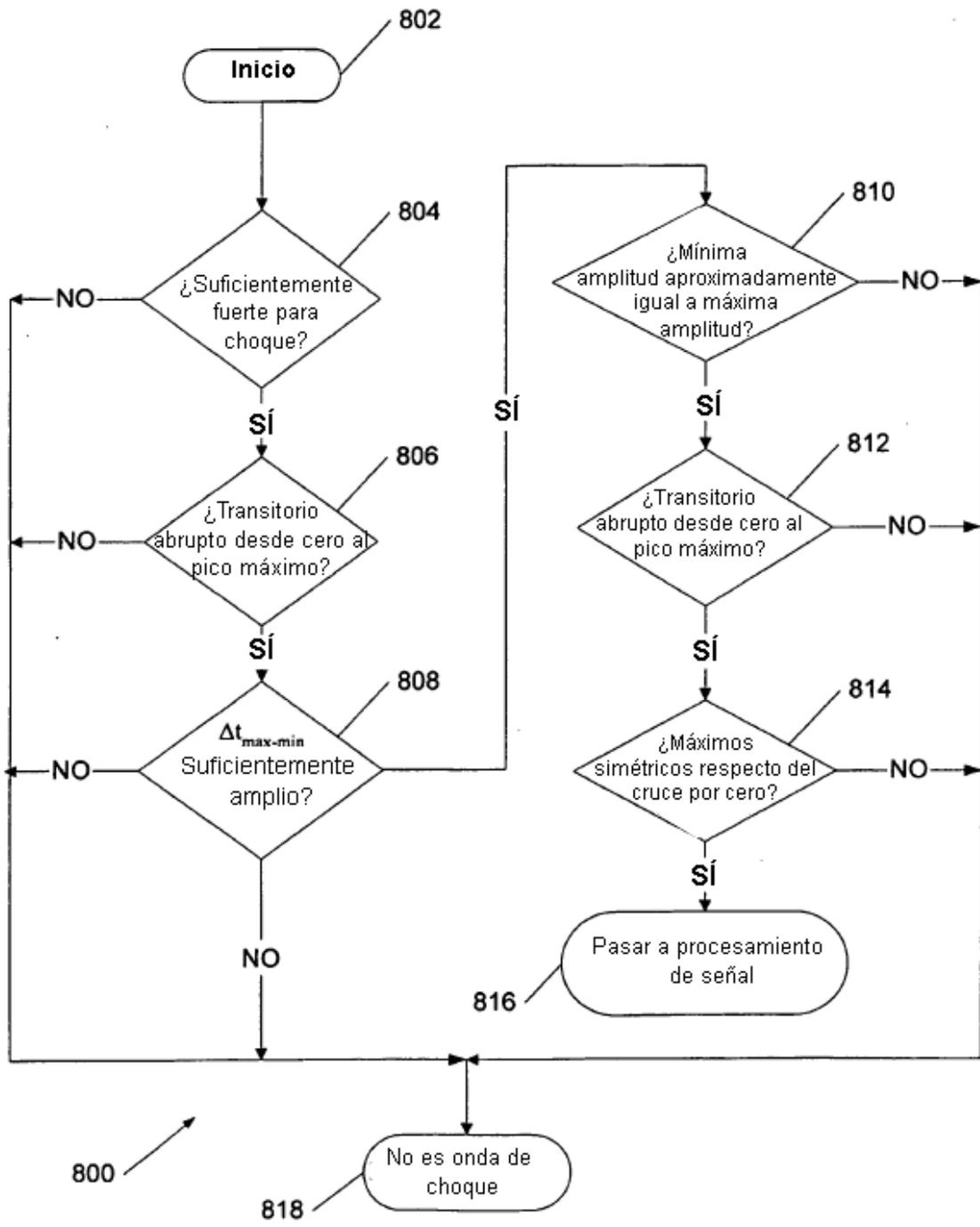


FIG. 8

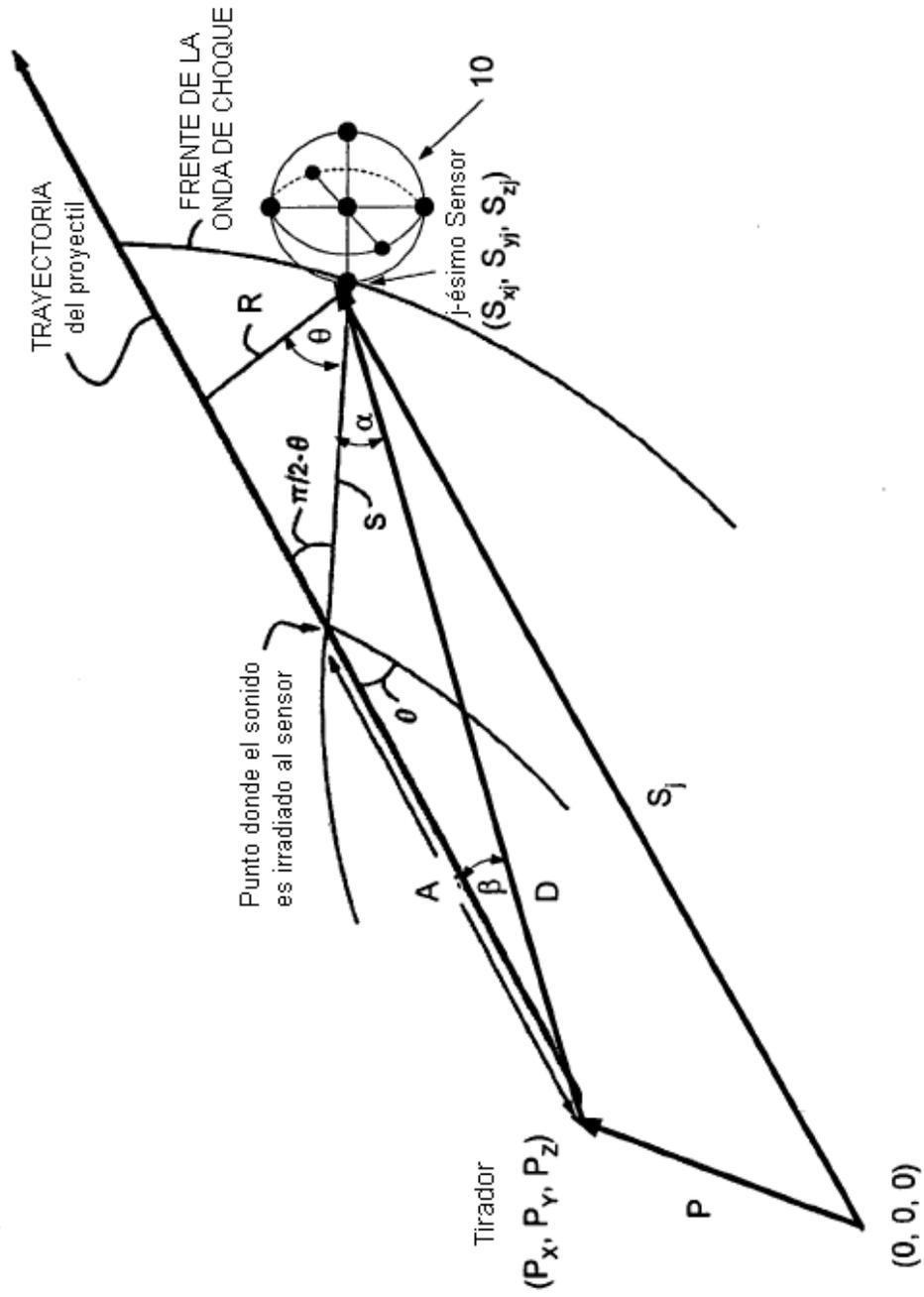


FIG. 9

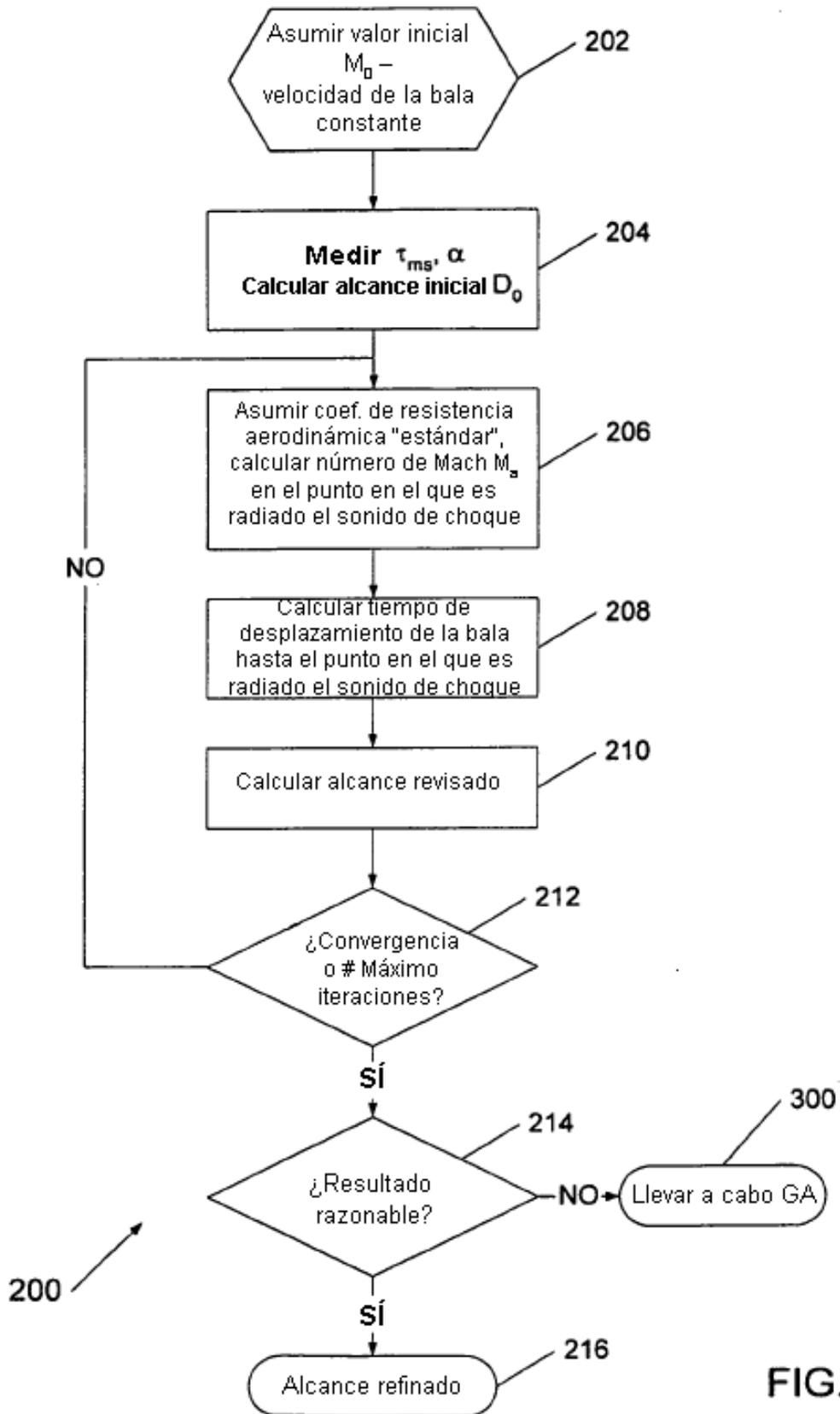


FIG. 10

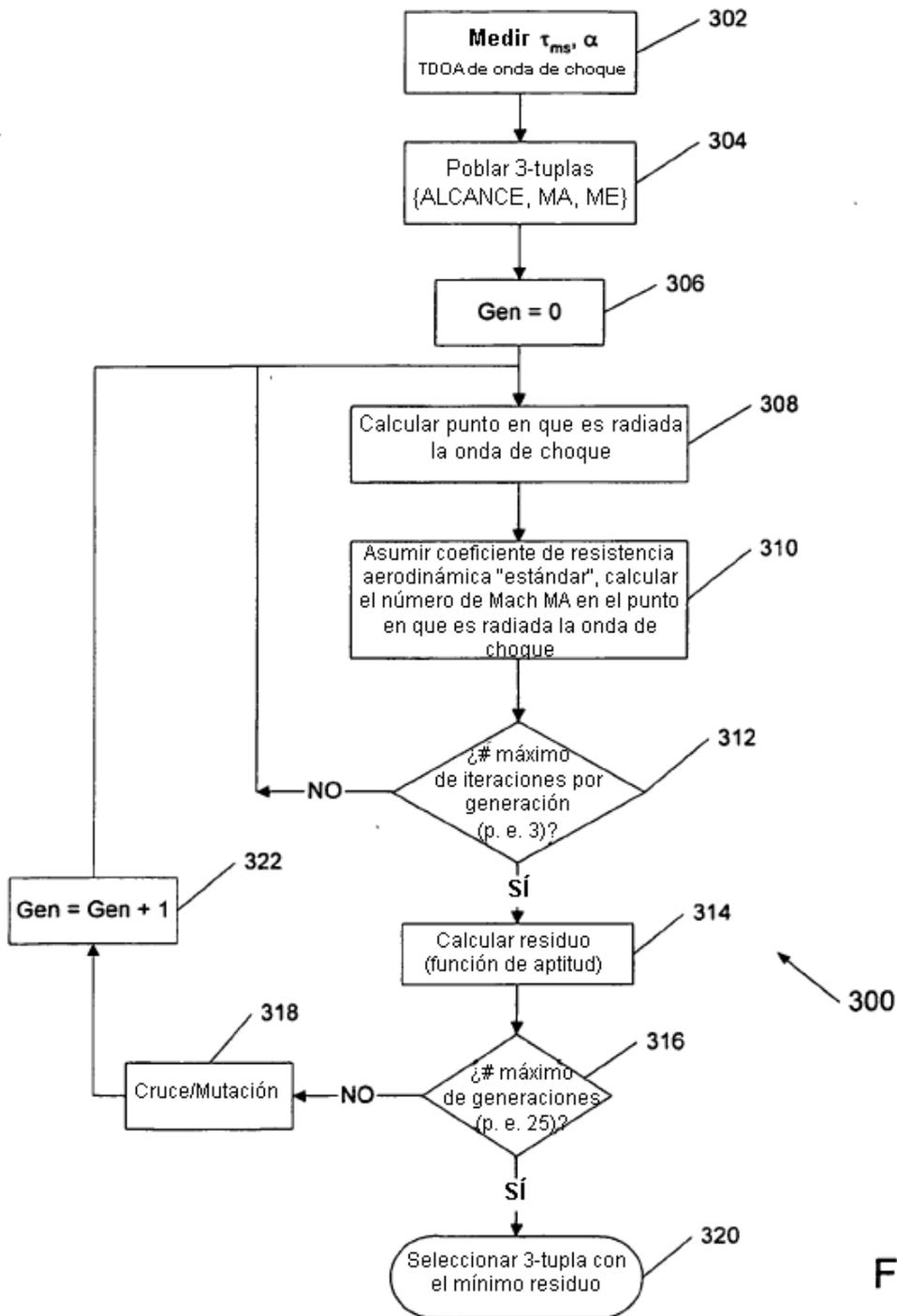


FIG. 11