

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 420 984**

51 Int. Cl.:

G01S 13/90 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.07.2010 E 10007300 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.05.2013 EP 2284569**

54 Título: **Focalización automática de datos brutos de radar SAR basada en la evaluación de la función de error de fase**

30 Prioridad:

16.07.2009 US 225930 P

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

28.08.2013

73 Titular/es:

**EADS DEUTSCHLAND GMBH (100.0%)
Willy-Messerschmitt-Strasse
85521 Ottobrunn, DE**

72 Inventor/es:

**MUSMANN, HANS-GEORG, PROF., DR. y
FARHOUD, RIDHA, DR.**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 420 984 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

Focalización automática de datos brutos de radar SAR basada en la evaluación de la función de error de fase

5 La invención se refiere a un método en relación con las características establecidas en la reivindicación 1.

Para las imágenes de radar SAR de alta resolución, es necesario aplicar técnicas de focalización automática además de la compensación de movimiento para garantizar la resolución de imagen deseada. Varias técnicas de focalización automática se han propuesto en los últimos años. Las técnicas más avanzadas se derivan del denominado Algoritmo de Gradiente de Fase (PGA) (véase el documento de Hayes, M.P. Callow, H. J. y Gough, P.T. (2002) Focalización automática de gradiente de fase de mapa de bandas, Auckland, Nueva Zelanda: Proceedings Image and Vision Computing New Zealand 2002, IVCNZ2002, noviembre 2002, 71-76), que estima la función de error de fase a partir de los datos brutos evaluando las señales azimutales de reflectores. La función de error de fase se utiliza para la corrección de los datos brutos. La imagen de radar SAR puede generarse luego utilizando la función de referencia de azimut nominal. Para una estimación precisa de la función de error de fase se requieren objetivos puntuales. Puesto que dichos objetivos no están siempre disponibles en la escena iluminada, el algoritmo de PGA utiliza los así denominados reflectores fuertes en su lugar, cada uno de los cuales consiste en numerosos objetivos puntuales conjuntos. Por ello, la función de error de fase estimada por el algoritmo PGA no es exacta. Además, los errores posicionales de los reflectores utilizados pueden causar un error de coordenadas, dependientes del azimut, en la imagen del radar SAR.

Con el fin de mejorar la calidad de la imagen, el algoritmo de gradiente de fase puede aplicarse de una manera iterativa (véase Qinyan Tan et al: "Un algoritmo de focalización automática para radar SAR con soporte de misiles", Microwave Conference, 10 de septiembre de 2008, páginas 253–257, XP031417265, ISBN: 978-1-4244-3821-1). La iteración requiere una gran cantidad de cálculo y hace difícil su uso en un procesamiento en tiempo real. La utilización del algoritmo de desplazamiento y correlación (SAC) y del algoritmo de desplazamiento y correlación de estrategia de puertas (SACGS), que estiman la frecuencia de cambio Doppler respectivamente antes y después de la compensación de migración de alcance. La operación iterativa del algoritmo de gradiente de fase utilizado puede reducirse o incluso omitirse, por lo que es posible un procesamiento en tiempo real (véase Xin Zhang, et al: "Un método de PGA en tiempo real integrado para SAR de soporte aéreo de mapa de bandas", 6ª Conferencia Europea sobre Radar de Apertura Sintético: 16–18 de mayo de 2006, Dresden, Alemania, página 3PP, XP009140067, ISBN: 978-3-8007-2960-9).

El objetivo de la invención es dar a conocer un método con el que se pueden evitar los fallos del algoritmo de gradiente de fase.

35 Este objetivo se consigue mediante un método para focalización automática de datos brutos de SAR utilizando el algoritmo de Rango-Doppler, en donde el método está integrado en un procesamiento de Rango-Doppler de un SAR de observación lateral en el modo de mapa de bandas, en donde el método comprende la compresión de alcance, compensación de movimiento y corrección de migración de alcance con el fin de establecer las señales de líneas azimutales para estimar las señales azimutales de objetivos puntuales, espacialmente distribuidos, en donde la señal azimutal de un objetivo puntual se estima a partir de la señal azimutal de un reflector que consiste en varios objetivos puntuales próximos, con el fin de calcular primero la función de error de fase local del objetivo puntual y luego, la función de error de fase completa utilizada para corregir las fases de señales de las líneas azimutales antes de la compresión del azimut.

45 La invención se describirá ahora con más detalle para el algoritmo de Rango-Doppler, pero puede utilizarse también para el algoritmo del dominio de números de ondas o modos de búsqueda selectiva del radar SAR con referencia a los dibujos adjuntos.

50 La Figura 1 es una vista esquemática para generar una imagen de SAR utilizando el algoritmo desarrollado,

La Figura 2 es una vista esquemática del diagrama de bloques del algoritmo desarrollado para la estimación de la función de error de fase.

Según la invención, se desarrolla un algoritmo perfeccionado para la focalización automática de datos brutos de SAR, con el fin de evitar los fallos del algoritmo de gradiente de fase. El algoritmo está integrado en un procesamiento de Rango-Doppler de un radar SAR de observación lateral en el modo de mapa de bandas y también está basado en la evaluación de las señales azimutales de reflectores con el fin de estimar la función de error de fase. Por lo tanto, se supone que la compresión del alcance y la compensación de movimiento, sobre la base de los datos de INS y de GPS, se realizan por anticipado. Habiendo obtenido la función de error de fase, los datos brutos se pueden corregir y se puede realizar la focalización de azimut utilizando la función de referencia de azimut nominal como un filtro adaptado (véase Figura 1).

En una primera etapa, el algoritmo estima las señales azimutales de objetivos puntuales. Por lo tanto, son detectados los reflectores, que aparecen como elementos resaltados luminosos en su entorno cercano, se asignan sus coordenadas y se extraen sus señales azimutales. Para la detección de candidatos de reflectores se genera una imagen SAR de baja resolución utilizando una función de referencia de azimut nominal con un ancho de banda reducido. El denominado

algoritmo Watershed (véase Vincent, L.; Soille, P.; Watersheds en espacios digitales: Un algoritmo eficiente basado en simulaciones de inmersión. En: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 13 (1991), nº 6 S. 583-598) se aplica en las líneas azimutales de la imagen de SAR con el fin de localizar los candidatos de reflectores. Sin embargo, solamente unas pocas líneas de azimut son evaluadas dependiendo de su contenido energético, que debe ser más alto que la media del contenido energético de la imagen de SAR completa.

Un criterio de clasificación G_u

$$G_u = \frac{|u|}{m_u}, \quad (2.1)$$

se asigna a cada candidato, que describe el cociente de la amplitud del candidato dentro de la imagen de SAR $|u|$ y el valor medio local en su entorno cercano m_u :

$$m_u = \frac{1}{T_{mi}} \int_{T_0 - \frac{T_{mi}}{2}}^{T_0 + \frac{T_{mi}}{2}} |u(t_s)| dt_s, \quad (2.2)$$

en donde T_{mi} es la gama de tiempos para la determinación del valor medio y T_0 la posición del candidato. La banda de imagen de SAR está dividida en varias secciones. La longitud de cada sección T_A está limitada a la mitad de la longitud de la apertura sintética T_L . En cada sección de la imagen de SAR, se selecciona al menos un reflector por consideración del criterio de clasificación mencionado.

Estimación de señales azimutales de objetivos puntuales

Con el fin de extraer la señal azimutal de un reflector se aplica un procesamiento denominado *deramping* seguido por una transformación de Fourier sobre los datos comprimidos de alcance de la línea azimutal asociada. El reflector es extraído mediante el uso de un filtro de Hamming con el ancho de banda B . La señal azimutal del reflector extraído se obtiene finalmente realizando una operación de *deramping* inversa y una transformación de Fourier inversa. Con el fin de obtener una señal azimutal de un objetivo puntual, se aplica un modelo matemático para la descripción paramétrica de la señal azimutal de un reflector seleccionado. En este modelo, el reflector se describe mediante las señales azimutales de varios objetivos puntuales equidistantemente distribuidos. El número de los objetivos puntuales M se determina como:

$$M = INT \left\{ - \frac{f_p \cdot B}{2\pi \cdot f_R} \right\} + 1, \quad (2.3)$$

en donde f_R es la frecuencia de cambio Doppler y f_p la frecuencia de repetición de pulsos. De este modo, la señal azimutal $r(t_s)$ del reflector seleccionado puede describirse como:

$$r(t_s) = \sum_{m=1}^M \left(A(t_s - T_m) \cdot \tau_p \cdot \sigma_m \cdot e^{j2\pi(-2R_{T_0}/\lambda + f_R(t_s - T_m)^2/2)} \cdot e^{j\Phi_e(t_s)} ; |t_s - T_m| < \frac{T_L}{2} \right) \quad (2.4)$$

en donde R_{T_0} es la distancia entre antena y el reflector, T_p la duración de pulso, λ es la longitud de onda de portadora, $A(t_s)$ la función de configuración de antenas y σ_m el coeficiente de retrodispersión del objetivo puntual m . La distancia entre dos objetivos puntuales próximos viene dada por la frecuencia de repetición de pulsos f_p . Se supone que los M objetivos

puntuales se iluminan simultáneamente por la antena, sus señales azimutales tienen el mismo error de fase $\Phi_e(t_s)$ pero diferente amplitud, esto es:

$$A(t_s - T_{m1}) = A(t_s - T_{m2}) ; \forall m1, m2 \in \{1, \dots, M\} \quad (2.5)$$

Un análisis de la estadística de reflectores muestra que la función de retrodispersión $\sigma(t_s)$ de un reflector es aproximadamente simétrica y su espectro de densidad de potencia consiste principalmente en componentes de frecuencia positivos y reales. De este modo, se puede obtener una estimación de la función de retrodispersión evaluando el espectro de densidad de potencia $S_{\sigma\sigma}(\omega)$ de la señal azimutal $r(t_s)$

$$\hat{\sigma}(t_s) \approx FT^{-1}\{\sqrt{S_{\sigma\sigma}(\omega)}\} \quad (2.6)$$

Una estimación de la función de retrodispersión $\sigma(t_s)$, basada en este supuesto, genera un error de estimación en función de un SNR de 15 dB.

A partir de la función de retrodispersión $\sigma(t_s)$, se pueden determinar los coeficientes de retrodispersión σ_m de los objetivos puntuales m , con $m = 1, \dots, M$, del reflector

$$\sigma_m = \hat{\sigma}(T_m) \quad (2.7)$$

Mediante la denominada función de *deramping* de la señal $r(t_s)$ obtenemos

$$d(t_s) = r(t_s) \cdot e^{-j\pi f_R t_s^2} \quad (2.8)$$

y con la Ecuación 2.2

$$d(t_s) = \sum_{m=1}^M \left(A(t_s - T_m) \cdot \sigma_m \cdot \tau_p \cdot e^{j\frac{4\pi}{\lambda} R r_0} \cdot e^{j\omega_m t_s} \cdot e^{j\pi f_R T_m^2} \cdot e^{j\phi(t_s)} \text{ für } |t_s - T_m| < \frac{T_L}{2}, \right) \quad (2.9)$$

en donde, $\omega_m = -2\pi f_R T_m$.

Con el fin de determinar la señal acimutal, con fase desplazada, de un objetivo puntual único, se establece de nuevo la ecuación 2.7. Como resultado, la señal con fase desplazada $d(t_s)$ se puede describir como:

$$d(t_s) = d_{m_p}(t_s) \cdot \left[1 + \sum_{m \neq m_p} \left[\frac{\hat{\sigma}(T_m)}{\hat{\sigma}(T_{m_p})} \cdot e^{j\pi f_R (T_m^2 - T_{m_p}^2)} \cdot e^{j(\omega_m - \omega_{m_p}) \cdot t_s} \right] \right], \quad (2.10)$$

en donde

$$d_{m_p}(t_s) = A(t_s - T_{m_p}) \cdot \sigma_{m_p} \cdot \tau_p \cdot e^{j\frac{4\pi}{\lambda} R r_0} \cdot e^{j\omega_{m_p} t_s} \cdot e^{j\pi f_R T_{m_p}^2} \cdot e^{j\phi(t_s)} \text{ für } |t_s - T_{m_p}| < \frac{T_L}{2}, \quad (2.11)$$

es la señal acimutal, con desplazamiento de fase, solicitada del objetivo puntual m_p con el coeficiente de retrodispersión $\sigma_{0,m_p} = \hat{\sigma}(T_{m_p})$. La ecuación 2.8 se utiliza solamente para determinar la fase $\phi_{m_p}(t_s)$ de la señal $d_{m_p}(t_s)$.

$$\phi_{m_p}(t_s) = \phi(t_s) - \phi_q(t_s), \quad (2.12)$$

en donde $\phi(t_s)$ es la señal de fase de la señal observada $d(t_s)$ y $\phi_q(t_s)$ la señal de fase del

$$\text{term} \left[1 + \sum_{m \neq m_k} \left(\frac{\hat{\sigma}_k(T_m)}{\hat{\sigma}_k(T_{m,k})} \cdot e^{j\pi f_R(T_m^2 - T_{m,k}^2)} \cdot e^{j(\omega_m - \omega_{m_k}) \cdot t_s} \right) \right].$$

La amplitud de $d_{m_p}(t_s)$ se calcula utilizando la función de configuración de antena conocida como:

$$A_{m_p} = A(t_s - T_{m_p}) \cdot \tau_p \cdot \hat{\sigma}(T_{m_p}) \quad ; \quad |t_s - T_{m_p}| < \frac{T_L}{2}. \quad (2.13)$$

Por último, la señal azimutal $\hat{r}_{m_p}(t_s)$ del objetivo puntual se obtiene realizando la operación de *deramping* inversa.

Determinación de la función de error de fase

En la segunda etapa, la función de error de fase $\phi_e(t_s)$ se determina utilizando las señales de objetivos puntuales de azimut estimadas $\hat{r}_{k,m_p}(t_s)$, $k = 1, \dots, K$. Por lo tanto, se calcula primero una función de error de fase local $\phi_{k,e}(t_s)$

$$\phi_{k,e}(t_s) = \phi_{\hat{r}_{k,m_p}}(t_s) - \phi_{k,nom}(t_s), \quad (2.14)$$

en donde $\phi_{k,nom}(t_s)$ es la señal de fase de un chirp (pulso modulado en frecuencia) de azimut nominal situado en la posición T_{m_p} . Las funciones de error de fase locales $\phi_{k,e}(t_s)$, $k = 1, \dots, K$, son solamente válidas para la sección del reflector asociado. La función de error de fase completa $\phi_e(t_s)$ se construye luego a partir de las funciones de error de fase locales utilizando una técnica de superposición ponderada. Debido a diferentes errores de coordenadas de los reflectores seleccionados, los gradientes de las funciones de error de fase locales tienen una compensación de desplazamiento de la amplitud. Con el fin de evitar un impacto por los errores de coordenadas, los gradientes de errores no están superpuestos, pero sus derivadas $q_k(t_s)$, $k = 1, \dots, K$, se ponderan por el criterio de calidad $G_k(t_s)$

$$q(t_s) = \frac{\sum_{k=1}^K G_k(t_s) \cdot q_k(t_s)}{\sum_{k=1}^K G_k(t_s)}, \quad (2.15)$$

con

$$G_k(t_s) = G_{u,k} \cdot A(t_s - T_k) \quad ; \quad k = 1, \dots, K \quad (2.16)$$

El gradiente $Q(t_s)$ de la función de error de fase se determina entonces como

$$Q(t_s) = \int_0^{T_s} q(t_s) dt_s + Q_0. \quad (2.17)$$

El valor inicial Q_0 en la ecuación 2.15 puede tomarse a partir de la banda precedente. Por último, la función de error de fase $\phi_e(t_s)$ se obtiene a partir de $Q(t_s)$ por medio de integración.

5

Resultados experimentales

El algoritmo desarrollado se ha aplicado a datos sintéticos simulados y a datos brutos reales. Los datos sintéticos se obtienen por medio de la simulación de un vuelo utilizando parámetros de movimiento real y reflectores con diferentes funciones de retrodispersión. El algoritmo se evalúa, de forma subjetiva, comparando la calidad de imagen conseguida con los resultados del algoritmo de gradiente de fase. Para la evaluación objetiva, se utilizan dos criterios de calidad. El primer criterio evalúa la nitidez de la imagen de SAR. Por lo tanto, se evalúan varias secciones de imagen. El criterio de calidad para cada sección se proporciona por el valor máximo dentro de la sección normalizada (contenido energético = 1).

15

El segundo criterio de calidad se define como la desviación estándar de errores de coordenadas de objetos en la imagen de SAR y se puede aplicar solamente sobre datos simulados, puesto que las posiciones reales solicitadas de los objetos examinados son desconocidas en caso de datos reales. Además de la mejora de la representación del objetivo en imágenes de SAR, el segundo plano aparece más nítido cuando se utiliza el algoritmo de focalización desarrollado. La calidad de la imagen, en particular en caso de errores de movimiento de alta frecuencia de la antena de SAR, se mejora de forma notable. En comparación con el algoritmo de gradiente de fase, el criterio de calidad para evaluar la nitidez de las imágenes de SAR se mejora en un 15%. La desviación estándar de errores de coordenadas de objetos, en la imagen de SAR, se reduce desde 94 a 3.8 pel (elementos de imagen).

20

Conclusión

En comparación con el algoritmo de gradiente de fase, el estimador desarrollado para la función de error de fase proporciona una estimación más exacta interpretando un reflector como una secuencia de varios objetivos puntuales próximos en lugar de un objetivo único. En consecuencia, los coeficientes de retrodispersión de los objetivos puntuales próximos han de determinarse mediante un estimador adicional. Además, una técnica de superposición ponderada más exacta, que evita el impacto por errores de coordenadas de los reflectores seleccionados, se utiliza para la construcción de la función de error de fase completa de varias funciones.

30

Seleccionando los reflectores con imágenes puntuales simétricamente dispuestas, se puede reducir el error del estimador y se puede conseguir una función de error de fase más exacta en un desarrollo futuro.

35

40

REIVINDICACIONES

- 5 **1.** Un método para focalización automática de datos brutos SAR con la ayuda del algoritmo de Rango-Doppler, en donde el método está integrado en un tratamiento de Rango-Doppler de un radar SAR de visión lateral en el modo de mapa de bandas,
- 10 comprendiendo el método una compresión de alcance, una compensación de movimiento y una corrección de migración de alcance con el fin de establecer las señales de líneas azimutales que permiten estimar las señales azimutales de objetivos puntuales espacialmente distribuidos,
- 15 estando el método caracterizado porque la señal azimutal de un objetivo puntual se estima a partir de la señal azimutal de un reflector constituido por varios objetivos puntuales próximos, con el fin de calcular primero la función de error de fase local del objetivo puntual y luego, la función de error de fase global utilizada para corregir la fase de señales de las líneas azimutales previamente a una compresión en azimut.
- 20 **2.** El método según la reivindicación 1, en donde la estimación de las señales azimutales de objetivos puntuales se realiza mediante la detección y selección de reflectores, la extracción de las señales azimutales correspondientes de los reflectores y la estimación de la señal azimutal de un objetivo puntual para cada reflector en el supuesto de que un reflector esté constituido por varios objetivos puntuales.
- 25 **3.** El método según la reivindicación 2, en donde la selección de los reflectores está basada en un criterio de clasificación.
- 30 **4.** El método según la reivindicación 1, en donde la función de error de fase global está constituida por funciones de error de fase locales.

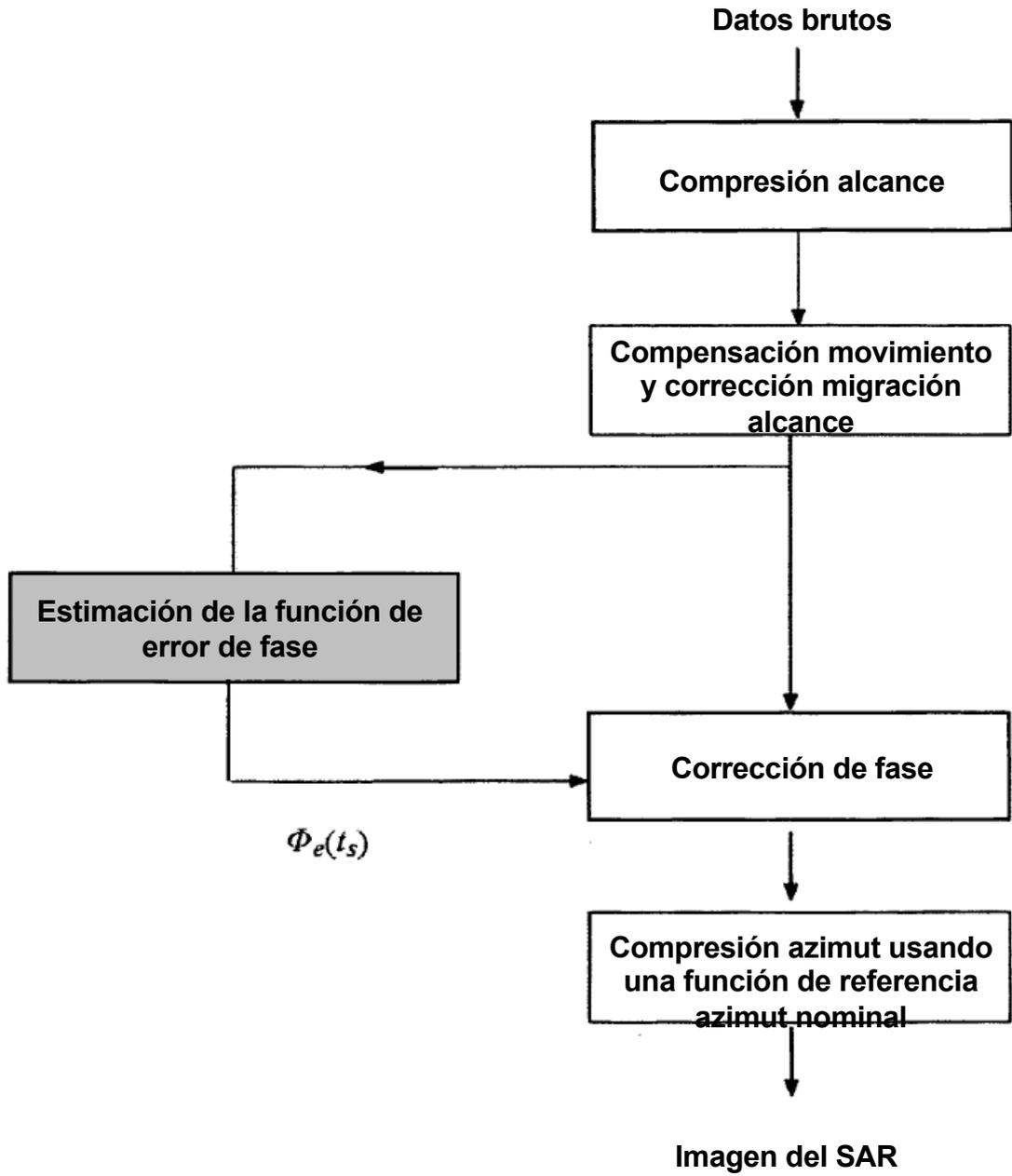


Fig. 1

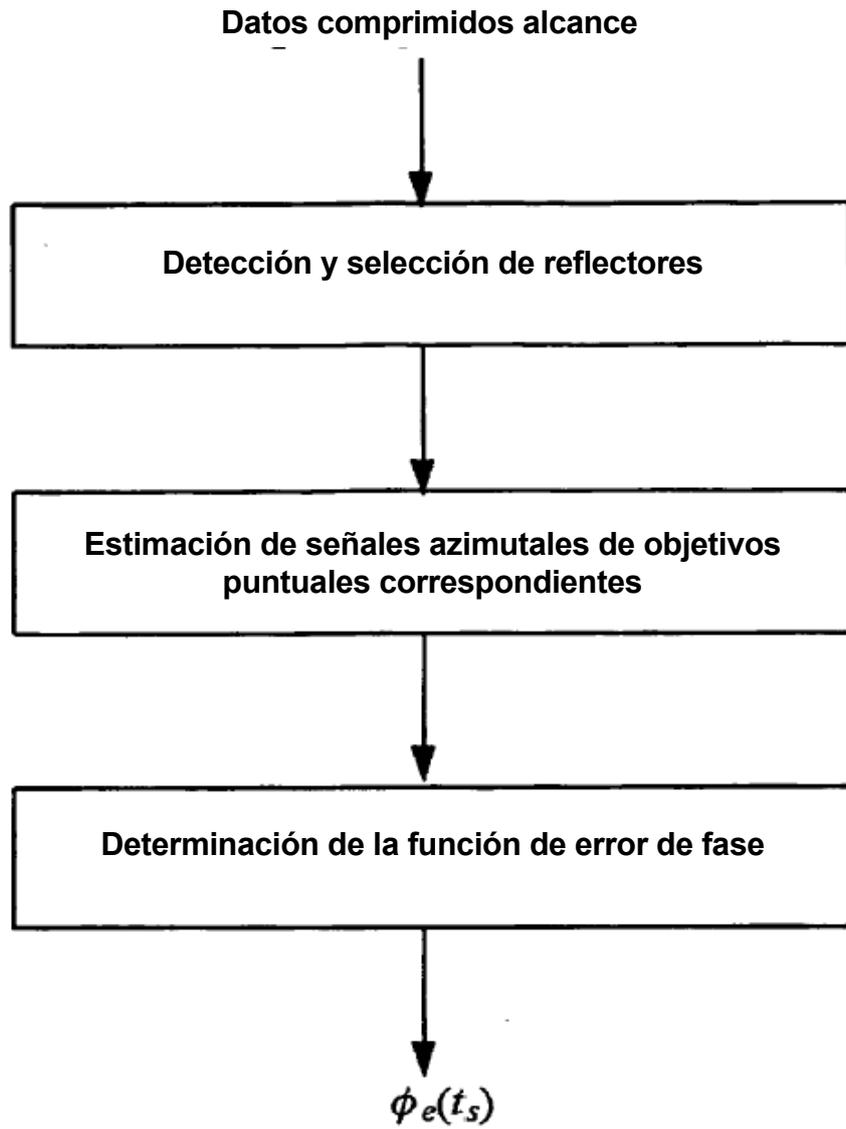


Fig. 2