

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 374 485**

51 Int. Cl.:  
**H04W 64/00** (2009.01)  
**G01S 5/02** (2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **09003962 .9**  
96 Fecha de presentación: **19.03.2009**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2230871**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **22.09.2010**

54 Título: **MÉTODO Y APARATO PARA ESTIMAR DESVIACIONES DE RELOJ, PARA SINCRONIZACIÓN VIRTUAL DE RELOJES DE FUNCIONAMIENTO LIBRE Y PARA DETERMINAR LA POSICIÓN DE UN OBJETO MÓVIL.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**17.02.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**17.02.2012**

73 Titular/es:  
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V.  
Hansastraße 27c  
80686 München, DE y  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-  
Nürnberg**

72 Inventor/es:  
**Patino-Studencka, Lucila;  
Eidloth, Andreas y  
Thielecke, Joern**

74 Agente: **Arizti Acha, Monica**

**ES 2 374 485 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).

## DESCRIPCION

Método y aparato para estimar desviaciones de reloj, para sincronización virtual de relojes de funcionamiento libre y para determinar la posición de un objeto móvil.

5 Las realizaciones de la invención se refieren a un método y un aparato para estimar desviaciones entre relojes de transmisor de funcionamiento libre y un reloj de referencia. En las realizaciones de la invención, las desviaciones estimadas se usan para sincronizar virtualmente transmisores usando los relojes de transmisor de funcionamiento libre. En las realizaciones de la invención, la desviación entre una pluralidad de relojes de transmisor de funcionamiento libre y el reloj de referencia se estima en un receptor estacionario, las desviaciones estimadas se envían a un objeto móvil, en las que el objeto móvil usa las desviaciones estimadas y señales de transmisor recibidas desde la pluralidad de  
10 relojes de transmisor de funcionamiento libre para determinar su posición.

La sincronización es un elemento fundamental en cualquier sistema de posicionamiento preciso basado en mediciones de tiempo de llegada (TOA) o diferencia de tiempo de llegada (TDOA). Hay numerosas publicaciones sobre estrategias de sincronización para sistemas de navegación local. La mayoría de ellas se basan en una infraestructura fija y compleja o transmisores costosos e inteligentes, [1] y [2].

15 Un sistema que comprende transmisores de funcionamiento libre de bajo coste que se sincronizan virtualmente por medio de una sola estación de referencia fija sería una solución preferible. Entonces, la estación de referencia distribuiría los parámetros de sincronización de manera inalámbrica a los elementos móviles (*rovers*). Obviamente, tal solución requiere que cualquier receptor en el sistema pueda modelar adecuadamente el comportamiento de los diferentes relojes de transmisor. La mayoría de los modelos de error de reloj publicados son particularmente adecuados para relojes precisos, estables y a largo plazo [3], [4], [5], [6].  
20

25 Todos estos modelos identifican los tipos y determinan los parámetros de los componentes de ruido a partir de representaciones gráficas de la varianza de Allan o de las densidades espectrales de potencia por un método denominado identificación de ruido potencial que subdivide la representación gráfica en regiones de diferentes pendientes. Los parámetros extraídos de la varianza de Allan pueden usarse para configurar un proceso aleatorio que modela el comportamiento de reloj. Un inconveniente de este método es su aplicabilidad limitada: algunas de las componentes de ruido son difíciles de modelar por una función de transferencia racional. Además, todos los estudios mencionados se centran en las componentes de modulación de frecuencia (FM): FM blanca, FM de centelleo y FM de recorrido aleatorio.

30 Cuando la estabilidad a corto plazo es de interés, es necesario tener en cuenta también las componentes moduladas en fase (PM): ruido de PM blanco y de centelleo, si está presente. En este caso, la identificación de ruido potencial leyendo simplemente los parámetros de ruido de la varianza de Allan conduce a funciones de transferencia no racionales.

Un enfoque diferente para la identificación de ruido se basa en la función de autocorrelación del ruido de fase tal como se presenta en [7], que aquí se aplica a cualquier tipo de ruido.

35 El documento US 2006/029009 A1 da a conocer un sistema para medir la distancia entre nodos en una red de comunicaciones inalámbricas con una transferencia de datos unidireccional, en la que cada nodo transmite periódicamente un mensaje que contiene información relativa a los nodos de entorno desde los que se ha recibido cualquier mensaje anterior por el nodo de transmisión. Un nodo recibe los mensajes transmitidos desde los nodos de entorno en la red, y registra los tiempos de llegada de los mensajes recibidos. Por tanto, el nodo que recibe esos mensajes puede determinar las distancias respectivas entre sí mismo y los nodos de entorno basándose en los tiempos  
40 de llegada respectivos de los mensajes recibidos y la información respectiva incluida en los mensajes respectivos.

45 Mouly M; Dornstetter J-L: "The Pseudo-Synchronisation, a Costless Feature to Obtain the Gains of a Synchronised Cellular Network" MRC Mobile Radio Conference, XX, XX, 1 de noviembre de 1991 (01-11-1991), páginas 51-55, XP000391318, dan a conocer un esquema de pseudosincronización para un sistema de telefonía por radio celular. Se mantiene un conocimiento preciso de las diferencias de fase entre la base de tiempo de diferentes estaciones base y cada estación base almacena la diferencia de tiempo con sus nodos de entorno. Una vez conocidas, se envían las diferencias de tiempo a la entidad que las necesita en el momento que las necesita, por ejemplo a una estación móvil cuando se ordena a otra célula.

50 Carpenter R; Lee T: "A stable clock error model using coupled first and second-order gauss-markov processes" Advances in the Astronautical Sciences - Space Flight Mechanics 2008 - Advances in the Astronautical Sciences, Proceedings of the AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting 2008 Univelt Inc. EE.UU., 31 de diciembre de 2008 (31-12-2008), páginas 1-13, XP002545930, enseña un modelo de error de reloj estable usando procesos de gauss-markov de primer y segundo orden acoplados.

55 Nicola Altan; Erwin P Rathgeb Ed - David Coudert; David Simplot-RYL, Ivan Stojomenovic: "Opportunistic Clock Synchronization in a Beacon Enabled Wireless Sensor Network" 10 de septiembre de 2008 (10-09-2008), AD-HOC, Mobile and Wireless Networks; 20080910 Springer Berlin Heidelberg, Berlín, Heidelberg, página(s) 15-28, XP019102619 ISBN: 9783540852087, enseñan una sincronización de reloj en una red de sensores inalámbricos con baliza que consiste en un gran número de pequeños nodos de sensor económicos. Se propone un mecanismo de sincronización

de tiempo basándose en el uso de un filtro de Kalman en una secuencia suavizada de intervalos de baliza medidos. Se introduce una sincronización de reloj global.

El objeto de la presente invención es proporcionar métodos y un aparato que permitan estimar una desviación entre un reloj de transmisor de funcionamiento libre y un reloj de referencia de una manera fácil.

5 Según la invención, este objeto se logra mediante un método según la reivindicación 1 y un aparato según la reivindicación 9.

Las realizaciones de la invención proporcionan un método para estimar una desviación entre un reloj de transmisor de funcionamiento libre y un reloj de referencia, comprendiendo el método: en un receptor estacionario con respecto a un transmisor, recibir una señal de transmisor generada por el transmisor basándose en el reloj de transmisor;

10 basándose en el reloj de referencia determinar un tiempo de llegada de la señal de transmisor y una fase de pulsación de la portadora de señales de transmisor; y

basándose en un modelo de error de reloj, el tiempo de llegada y la fase de pulsación, estimar la desviación entre el reloj de transmisor y el reloj de referencia,

15 en el que el modelo de error de reloj se deriva adaptando una función de correlación de un modelo estocástico a una función de autocorrelación medida del reloj de transmisor.

Las realizaciones de la invención proporcionan un aparato para estimar una desviación entre un reloj de transmisor de funcionamiento libre y un reloj de referencia, que comprende:

un receptor configurado para recibir una señal de transmisor generada por un transmisor estacionario con respecto al receptor, basándose en el reloj de transmisor;

20 un procesador configurado para:

basándose en el reloj de referencia, determinar un tiempo de llegada de la señal de transmisor y una fase de pulsación de la portadora de señales de transmisor; y

25 basándose en un modelo de error de reloj, el tiempo de llegada y la fase de pulsación, estimar la desviación entre el reloj de transmisor y el reloj de referencia, en el que el modelo de error de reloj se deriva adaptando una función de correlación de un modelo estocástico a una función de autocorrelación medida del reloj de transmisor.

30 En las realizaciones de la invención, se usa un modelo estocástico para estimar la desviación de reloj. El modelo estocástico se deriva de una función de autocorrelación medida. La desviación estimada puede determinarse por una unidad de referencia estacionaria y puede distribuirse a un objeto móvil, que representa un receptor en el sistema. El objeto móvil o una pluralidad de objetos móviles (receptores) pueden usar el mismo modelo para predecir o extrapolar desviaciones de reloj actuales entre actualizaciones.

Las realizaciones de la invención se basan en el reconocimiento de que las funciones de autocorrelación medidas para relojes de transmisor se asemejan a la función de autocorrelación de ruido de PM de centelleo y que también son muy similares a las funciones de correlación de procesos de Markov de segundo orden.

35 En las realizaciones de la invención, el modelo estocástico es un proceso de Markov de segundo orden y la función de correlación del modelo estocástico es la función de correlación de un proceso de Markov de segundo orden. En las realizaciones de la invención, la desviación se estima usando un filtro de Kalman, en las que se determinan coeficientes de la matriz de sistema del filtro de Kalman basándose en el modelo de error de reloj.

En las realizaciones de la invención, se estiman desviaciones para una pluralidad de transmisores y las desviaciones estimadas para la pluralidad de transmisores se usan para sincronizar virtualmente la pluralidad de transmisores.

40 Las realizaciones de la invención se refieren a un método para la sincronización virtual de transmisores de funcionamiento libre dentro de un sistema de navegación local. Los transmisores tienen osciladores de funcionamiento libre y no necesitan comunicarse con otros transmisores dentro del sistema. No necesitan conectarse explícitamente a un reloj maestro, pero puede realizarse una sincronización de una manera virtual en una estación de referencia.

45 En las realizaciones de la invención, se usan las desviaciones estimadas entre cada uno de una pluralidad de relojes de transmisor de funcionamiento libre y el reloj de referencia para sincronizar virtualmente señales, que se generan por la pluralidad de transmisores basándose en los relojes de transmisor de funcionamiento libre y que se reciben en un objeto móvil. A este respecto, sincronización virtual significa que los tiempos de transmisión respectivos de las señales, que se generan y transmiten basándose en los relojes de funcionamiento libre, se corrigen basándose en las desviaciones estimadas con la recepción de estas señales. En las realizaciones de la invención, tales señales y las desviaciones estimadas se usan para calcular la posición de un objeto móvil.

50 En las realizaciones de la invención, el objeto móvil calcula desviaciones extrapoladas usando un vector de estado

estimado o predicho en una ecuación de estado de un filtro de Kalman que corresponde a un filtro de Kalman usado en el receptor estacionario.

5 Las realizaciones de la invención se refieren a un objeto móvil que comprende un aparato para determinar una posición del objeto móvil. Las realizaciones de la invención se refieren a un sistema que comprende una pluralidad de transmisores estacionarios espaciados entre sí, un aparato para estimar la desviación entre el reloj de transmisor de funcionamiento libre y el reloj de referencia para cada uno de la pluralidad de transmisores estacionarios, y un objeto móvil.

10 Según las realizaciones de la invención, una estación de referencia estacionaria recibe las señales de transmisor y calcula las desviaciones de reloj usando un modelo estocástico. Posteriormente, la estación de referencia transmite estas desviaciones a los receptores móviles (elementos móviles) de modo que, por consiguiente, puedan corregir sus datos y calcular sus posiciones. Más específicamente, las desviaciones pueden usarse para corregir los tiempos de transmisión de las señales, que se usan en el objeto móvil para calcular la pseudodistancia entre el objeto móvil y el transmisor. Entre las actualizaciones de la estación de referencia estacionaria, el receptor móvil puede predecir o extrapolar las desviaciones de reloj usando un modelo igual.

15 Por consiguiente, las realizaciones de la invención permiten proporcionar una base de tiempo compartido para todos los componentes existentes dentro de un sistema de modo que el cálculo de la posición sea posible. Según las realizaciones de la invención, esto se logra usando una estación de referencia estacionaria, que envía información de desviación asociada con una pluralidad de relojes de transmisor de funcionamiento libre a un receptor móvil. Por tanto, los transmisores pueden ser de funcionamiento libre y no van a sincronizarse, como en sistemas convencionales, en los que se logra una sincronización explícita de los transmisores a través de cables o usando transmisores inteligentes, es decir la comunicación tiene lugar en ambas direcciones entre el transmisor y el receptor.

20 Las realizaciones de la invención son beneficiosas porque no es necesaria una comunicación entre los transmisores y los receptores, los transmisores no necesitan realizar ningún cálculo complicado. Además, pueden usarse osciladores de bajo coste en el enfoque de la invención. Según las realizaciones de la invención, la sincronización completa puede realizarse a través de radio y, por tanto, el coste para la infraestructura puede ser bajo.

Según la invención no se necesita un canal de comunicación entre la estación de referencia y los transmisores para realizar correcciones directamente en los transmisores, mientras que la estación de referencia se usa para monitorizar.

30 En la siguiente memoria descriptiva, se describirá la navegación dentro de los sistemas locales como una aplicación de la invención. Sin embargo, es evidente para un experto en la técnica que es factible emplear el enfoque de la invención para sincronizar otros sistemas, en los que las unidades de recepción requieren una base de tiempo común o al menos una base de tiempo conocida. Las realizaciones de la invención se describirán con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 muestra una vista esquemática de un sistema de navegación local, en el que pueden implementarse las realizaciones de la invención;

35 la figura 2 muestra una variación de las desviaciones de reloj calculadas como diferencias de una fase para seis transmisores;

la figura 3 muestra la desviación de Allan de mediciones de fase de pulsación para seis transmisores de funcionamiento libre;

la figura 4 muestra una autocorrelación de variaciones de reloj para seis transmisores;

40 la figura 5 muestra un error de estimación de reloj en un receptor de referencia;

la figura 6 muestra un impacto de un intervalo de tiempo de actualización usando estimación sólo en un receptor de referencia;

la figura 7 muestra el impacto de un intervalo de tiempo de actualización usando una estimación en un receptor de referencia y en un objeto móvil;

45 la figura 8 muestra la influencia de un intervalo de tiempo entre la corrección; y

la figura 9 muestra variaciones de estimaciones de pseudodistancia (a) sin y (b) con corrección de desviación de reloj de transmisor.

50 Tal como se muestra en la figura 1, las realizaciones de la invención se refieren a un sistema de localización por microondas local que comprende un par de transmisores 10 asíncronos, una (única) estación 12 de referencia de recepción y uno o más objetos 14 móviles, tales como elementos móviles de recepción, donde las posiciones de los transmisores 10 y la estación 12 de referencia son fijas y conocidas y va(n) a determinarse la posición/las posiciones del/de los objeto(s) móvil(es).

Los transmisores 10 pueden comprender osciladores de funcionamiento libre para proporcionar un reloj de transmisor de funcionamiento libre y una portadora para señales 30 de transmisor enviadas por los transmisores 10, teniendo la portadora una frecuencia de portadora y una fase de portadora. Los tiempos de transmisión de las señales 30 de transmisor dependen del reloj de transmisor de funcionamiento libre.

5 La estación 12 de receptor estacionario comprende un transceptor 20 y un procesador 22. El objeto 14 móvil comprende un receptor 24 y un procesador 26.

El transceptor 20 está configurado para recibir las señales 30 de transmisor desde la pluralidad de transmisores 10. El transceptor 20 está configurado además para transmitir información 32 de desviación al receptor 24 del objeto 14 móvil. El procesador 22 está configurado para derivar la información de desviación para cada uno de los transmisores 10 tal como se explica en mayor detalle a continuación.

10

El receptor 24 está configurado para recibir señales 30 desde la pluralidad de transmisores 10, que se generan basándose en los relojes de transmisor de funcionamiento libre. Las señales pueden ser idénticas a las señales de transmisor recibidas en la unidad 12 estacionaria y, por tanto, se les proporciona el mismo número de referencia. Además, el receptor 24 está configurado para recibir la información 32 de desviación desde la unidad 12 estacionaria. El procesador 26 está configurado para calcular la posición del objeto 14 móvil usando la información 32 de desviación y las señales 30 de transmisor.

15

El procesador 26 puede está configurado para realizar mediciones de tiempo de llegada o diferencia de tiempo de llegada para determinar la distancia entre el objeto 14 móvil y al menos algunos de los transmisores 10 con el fin de calcular la posición basándose en ello.

20

Generalmente, el procesador 26 puede está configurado para calcular la distancia entre el objeto 14 móvil y uno respectivo de los transmisores usando el tiempo de llegada de la señal 30 desde el transmisor y el tiempo de transmisión. Con el fin de sincronizar virtualmente el transmisor de funcionamiento libre, se usa la desviación estimada del transmisor respectivo para corregir el tiempo de transmisión usado para calcular la distancia. El tiempo de transmisión, que se corrige, puede ser un tiempo de transmisión predefinido conocido para el objeto móvil o puede ser un tiempo de transmisión enviado al objeto móvil junto con la señal de transmisor.

25

Entonces, pueden usarse las distancias calculadas para calcular la posición del objeto móvil de una manera conocida.

En la siguiente memoria descriptiva, que se refiere a una realización de la invención, se explica la derivación de un modelo estable para desviaciones de reloj de transmisores de bajo coste. La siguiente memoria descriptiva está subdividida en secciones I a V.

30

La sección I presenta mediciones que indican el predominio de componentes de ruido que pueden modelarse más fácilmente aproximando la función de autocorrelación en vez de usando técnicas potenciales. Mediante la aplicación de tal modelo, la sección II introduce un filtro de Kalman que estima el estado de un reloj de transmisor particular. La sección III presenta el sistema de localización por microondas local usado como plataforma de prueba para verificar los algoritmos. El uso y la eficacia de los modelos de reloj se comentan en la sección IV. Finalmente, se sacan conclusiones en la sección V.

35

### I. NATURALEZA ESTOCÁSTICA DE DESVIACIONES DE RELOJ

Cada transmisor y receptor en el sistema de navegación genera una base de tiempo usando su propio oscilador. Puesto que los osciladores no son ideales, es natural que aparezcan algunas desviaciones entre las bases de tiempo de diferentes componentes. Estas desviaciones afectan a las mediciones en el sistema de navegación. En esta sección se deriva la relación entre los datos observables y las desviaciones de reloj, se presenta el modelo usado para describir las desviaciones de reloj. Un transmisor particular  $i$  usa su propia base de tiempo para determinar el momento exacto  $t_i$  para enviar una señal. Esta señal recorre una distancia  $d_{ri}$  y llega al receptor  $r$  en el tiempo  $t_{ri}$ , según la escala de tiempo del receptor. La desviación de reloj de transmisor  $\delta t_i[t]$  se define como la diferencia entre su base de tiempo  $t_i[t]$  y un tiempo de referencia  $t$ , que es, en este caso, la base de tiempo de receptor.

40

$$\delta t_i[t] = t - t_i[t] \tag{1}$$

45

Las mediciones de tiempo de llegada al receptor toman la forma

$$t_{ri} = t_i + \delta t_i[t_{ri}] + \frac{d_{ri}}{c} \tag{2}$$

donde  $d_{ri}$  corresponde a la distancia entre el transmisor y el receptor y  $c$  es la velocidad de la luz. Se supuso de manera implícita que la desviación de reloj de transmisor  $\delta t_i[t]$  no cambia notablemente durante el breve periodo de transmisión.

Además del tiempo de llegada (TOA) los receptores en el sistema miden la fase de pulsación de portadora  $\phi_{bi}$ , es decir la diferencia entre la fase de receptor  $\phi_r$  en el tiempo de recepción  $t_{ri}$  y la fase de transmisor  $\phi_i$  en el tiempo de transmisión  $t^s$  usando el tiempo de receptor como referencia:

5

$$\phi_{bi} = \phi_r[t_{ri}] - \phi_i[t^s] \quad (3)$$

Tanto el receptor como el transmisor generan la señal de portadora con una frecuencia nominal  $f_0$ , que facilita la relación entre el tiempo de transmisor  $t_i[t]$  y la fase  $\phi_i[t]$ :

$$\phi_i[t^s] = 2\pi f_0 t_i[t^s] \quad (4)$$

10 Las variaciones en la frecuencia  $f_i[t]$  son el motivo principal para las desviaciones de reloj y fase de (1) y (3). Se supuso un comportamiento ideal de los relojes de receptor, puesto que los relojes de transmisor son mucho más económicos. Mediante el uso de (1) para sustituir  $t_i[t^s]$  en la fase de transmisor  $\phi_i$ , se obtiene:

$$2\pi \int_0^{t^s} f_i[t] dt = \phi_i[t^s] = 2\pi f_0 (t^s - \delta t_i[t^s]) \quad (5)$$

La fase de receptor  $\phi_r[t_{ri}]$  toma la forma

$$\phi_r[t_{ri}] = 2\pi f_0 t_{ri} = 2\pi f_0 \left( t^s + \frac{d_{ri}}{c} \right) \quad (6)$$

15

que sustituye el tiempo de recepción  $t_{ri}$  por el tiempo de transmisión  $t^s$  más el tiempo de recorrido  $d_{ri}/c$ . Insertando (5) y (6) en (3) la fase de pulsación toma la forma

$$\phi_{bi}[t_{ri}] = 2\pi f_0 \delta t_i[t^s] + 2\pi f_0 \frac{d_{ri}}{c} \quad (7)$$

20

La variación de la fase de pulsación corresponde a la variación del reloj de transmisor si la distancia  $d_{ri}$  entre el transmisor y el receptor permanece constante y la velocidad de la luz no varía. La diferenciación con respecto al tiempo produce entonces (suponiendo de nuevo  $\delta t_i[t^s] = \delta t_i[t_{ri}]$ , es decir relojes que cambian lentamente):

$$\frac{\partial \phi_{bi}}{\partial t} = 2\pi f_0 \frac{\partial \delta t_i}{\partial t} \quad (8)$$

La suposición de una distancia constante es verdadera para el receptor de referencia y los transmisores puesto que son estáticos.

25

Las relaciones mostradas en (2), (7) y (8) demuestran que tanto la medición de TOA como la de fase en un receptor estático proporcionan información acerca del comportamiento de los relojes de transmisor. Tales mediciones se usarán en la sección II para determinar las desviaciones de reloj.

En (9) a continuación, basándose en diferencias de una fase se facilita una aproximación de la derivada en (8). El superíndice  $k$  indica que la fase de pulsación se muestrea en momentos discretos.

$$\frac{\partial \phi_{bi}}{\partial t} \approx \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{\phi_{bi}^k - \phi_{bi}^{k-1}}{t_{ri}^k - t_{ri}^{k-1}}. \quad (9)$$

Para seis transmisores Tx1 a Tx6 del sistema de localización por microondas, la figura 2 muestra la variación del error de reloj calculado según (8).

5 Por conveniencia, los valores se expresan como velocidad en m/s, como es común en sistemas de posicionamiento como GPS. La figura 2 muestra claramente la naturaleza no determinística de los errores de reloj. Las técnicas tradicionales para el análisis de estabilidad de dominio de tiempo de relojes usan la varianza de Allan como una medida de estabilidad de reloj.

10 Mediante la varianza de Allan es posible identificar el tipo de ruido presente en los errores de reloj (identificación de ruido potencial). Antes de citar la definición de la varianza de Allan es necesario definir el error de frecuencia fraccional  $y(t)$  y la fase de error  $\delta\phi$ . El error de frecuencia fraccional es la razón del error de frecuencia  $\delta f$  y la frecuencia nominal  $f_0$ . La fase de error es el error en la fase producido por las variaciones de frecuencia. La relación entre  $y(t)$  y  $\delta\phi$  es:

$$y(t) = \frac{\delta f}{f_0} = \frac{1}{2\pi f_0} \frac{\partial \delta \phi}{\partial t} \quad (10)$$

La varianza de Allan se calcula como el promedio de la diferencia al cuadrado entre dos muestras de la frecuencia fraccional  $y(t)$  tomada a una distancia  $\tau$ , en la que  $\tau$  es el intervalo de tiempo entre las muestras  $i$  e  $i+\tau$ .

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y(t_{i+1}) - y(t_i))^2 \quad (11)$$

15 La desviación de Allan es la raíz cuadrada de la varianza de Allan. En la configuración las variaciones del error de fase  $\delta\phi$  que corresponden a las variaciones de la fase de pulsación  $\phi_{bi}$  disponiendo de la velocidad de la luz y la distancia entre el transmisor y el receptor (de referencia) no cambian, véase (7). La desviación de Allan se usa para identificar componentes de ruido relevantes de los relojes de transmisor. En la figura 3 se muestra la desviación de Allan de las señales presentadas anteriormente en la figura 2. Para intervalos de tiempo menores que 0,1 segundos (a la izquierda de la línea vertical en la figura 3) la pendiente de la desviación de Allan es de aproximadamente menos uno. Esto demuestra el predominio de ruido de PM de centelleo. La varianza de Allan se relaciona estrechamente con la densidad espectral de potencia del error de frecuencia fraccional  $y(t)$ . La pendiente de ruido de PM de centelleo en una representación gráfica de densidad de potencia  $S_y(f)$  es más uno, es decir  $S_y(f) \propto f$  [8]. En este caso es difícil modelar la componente de ruido aplicando un filtro con función de transferencia racional a ruido blanco.

En lugar de derivar el modelo de error de reloj directamente de la desviación de Allan, según la invención, se propone derivarlo adaptando la función de correlación del modelo estocástico, tal como el modelo de ruido, a funciones de autocorrelación medidas.

30 En la figura 4 se muestran las funciones de autocorrelación medidas para los seis relojes de transmisor Tx1 a Tx6. Se asemejan a la función de autocorrelación de ruido de PM de centelleo facilitada en la tabla 2 de [7]. También son muy similares a las funciones de correlación de los procesos de Markov de segundo orden. Los procesos de Markov de segundo orden se caracterizan por un factor de atenuación  $\zeta$  y una frecuencia natural  $\omega_n$ . Se facilita su función de transferencia y la función de correlación correspondiente en [9]:

$$H(s) = \frac{as + b}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (12)$$

$$R(\tau) = \frac{\sigma^2}{\cos \theta} e^{\zeta\omega_n |\tau|} \cos \left[ \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n |\tau| - \theta \right] \quad (13)$$

35

5 Los parámetros  $\sigma$  y  $\theta$  son constantes. Tomando  $a = 0$  y adaptando la función de autocorrelación del modelo de Markov a las funciones presentadas en la figura 4, se obtuvieron los valores para los parámetros  $\zeta$  y  $\omega_n$ . Los parámetros  $\zeta$  y  $\omega_n$  determinan, por un lado, la frecuencia de las oscilaciones y el tamaño de los picos secundarios en las funciones de correlación y, por otro lado, los polos de la función de transferencia, que definen la forma de densidad espectral de potencia.

En la figura 3 se muestra la desviación de Allan de datos simulados (línea continua) para un proceso de Markov de segundo orden que modela las desviaciones de reloj tal como acaba de describirse. Claramente, las desviaciones de reloj simuladas pueden modelar apropiadamente el comportamiento observado en los datos reales incluyendo la componente de ruido de PM de centelleo.

10 II. FILTRO DE KALMAN

Esta sección describe la representación de variable de estado del modelo presentado en la sección I y muestra el desarrollo de las ecuaciones de filtro de Kalman. En general, la representación de espacio de estado de un sistema lineal usado en un filtro de Kalman se describe por una ecuación (14) de estado y una ecuación (15) de observación.

$$\dot{X}(t) = FX(t) + W(t) \tag{14}$$

$$Z(t) = HX(t) + V(t) \tag{15}$$

15

X representa el vector de estado, F la matriz de sistema, W el ruido de proceso, Z el vector de medición, H la matriz de salida y V el ruido de medición.

Para el modelo de reloj el error de reloj absoluto  $\delta t_i$ , su derivada  $\dot{\delta t}_i$  y la segunda derivada  $\ddot{\delta t}_i$  se eligieron como variables de estado.

$$X_i = [\delta t_i \quad \dot{\delta t}_i \quad \ddot{\delta t}_i]^T \tag{16}$$

20

La matriz de sistema F toma la forma de (17). Las dos últimas líneas en esta matriz corresponden al modelo de Markov de segundo orden para la variación de la desviación de reloj, tal como se describe en la sección I.

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -\zeta\omega_n \end{bmatrix} \tag{17}$$

25 Las mediciones de la desviación de reloj absoluta  $\delta t_i$  se calcularon usando (2). El transmisor está programado para enviar secuencias breves con un periodo  $T_i$ . Por tanto, el tiempo de transmisión en el transmisor  $t_i$  puede sustituirse por  $K \cdot T_i$ , donde el número entero K es un contador que indica el número de secuencias enviadas. Las diferencias de una fase tal como se calcularon en (9) se tomaron como mediciones de la variación de error de reloj. El vector de medición y la matriz de salida correspondiente toman la forma:

$$Z_i = \begin{bmatrix} t_{ri} - K \cdot T_i - \frac{d_{ri}}{c} \\ \Delta\phi/\Delta t \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{18}$$

30 El estado de reloj de cada transmisor se estima en el receptor de referencia mediante filtros de Kalman separados y se transmite al elemento móvil. El elemento móvil usa predictores de Kalman para estimar las desviaciones de reloj. El modelo para los predictores comprende sólo la ecuación (14) de estado. Cada vez que una nueva estimación de estado de reloj llega al elemento móvil se actualiza el vector de estado del transmisor correspondiente. Con las desviaciones de reloj estimadas se calculan las pseudodistancias entre los transmisores y el elemento móvil. Éstas se usan para estimar

la posición de elemento móvil y las desviaciones de reloj entre la estación de referencia y el elemento móvil.

### III. PLATAFORMA DE PRUEBA

5 La plataforma de prueba usada para generar datos con el fin de verificar los algoritmos comprende una herramienta de simulación y un sistema de localización real. La herramienta de simulación se desarrolló en Matlab. Permite generar mediciones controladas con el fin de comprobar la eficacia de los algoritmos. Además, los filtros de estimación de reloj tanto para la estación de referencia como para el elemento móvil así como el cálculo de la posición se desarrollaron en Matlab. Pueden procesar tanto datos simulados como datos procedentes del sistema real. El sistema real consiste en un conjunto de transmisores y receptores de funcionamiento libre asíncronos localizados en posiciones conocidas.

10 Los transmisores están encargados de la generación y transmisión periódica de secuencias de código breves en la banda ISM a 2,4 GHz. Cada transmisor está programado para emitir secuencias breves con un periodo de aproximadamente 5 ms. Se instalaron doce receptores estáticos y seis transmisores alrededor de un campo de fútbol. Los relojes en los transmisores son osciladores de cristal de bajo coste. Para todas las pruebas presentadas en este caso, los receptores se sincronizan mediante una red de fibra óptica con un reloj maestro, que se basa en unos osciladores de cristal controlados por horno (OCXO).

### 15 IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El primer objetivo de los experimentos es demostrar la eficacia de los algoritmos para estimar desviaciones de reloj  $\delta t_i$ . Se generó un conjunto de mediciones (TOA y fases de pulsación) para seis transmisores de funcionamiento libre y dos receptores (estación de referencia y elemento móvil) usando la herramienta de simulación. Los datos de estación de referencia simulados se usan para estimar las desviaciones de reloj de transmisor. Mediante los datos simulados, es posible calcular el error en la estimación. En la figura 5 se muestra el error de una estimación de desviación de reloj de transmisor frente al tiempo en la estación de referencia. La desviación convencional del ruido de medición usada para estas simulaciones fue de 150 ps para las mediciones de tiempo y de 0,04 rad para las mediciones de fase. El ruido en la estimación de desviación de reloj es de media cero, su desviación es de aproximadamente 25 ps.

25 La estrategia de sincronización requiere que la estación de referencia, que estima las desviaciones de reloj  $\delta t_i$ , procese los datos a la misma velocidad que se reciben las señales. Las desviaciones de reloj estimadas deben transmitirse a una velocidad inferior con el fin de mantener el tráfico de datos entre la estación de referencia y los elementos móviles a niveles apropiados. Por tanto, es importante analizar el impacto de la velocidad de actualización de los parámetros de reloj sobre la precisión de las estimaciones de posición. Los elementos móviles deben poder predecir la desviación de reloj entre actualizaciones.

30 Un primer enfoque es una predicción de orden cero, es decir, se usa la última estimación de desviación de reloj recibida desde la estación de referencia hasta que una corrección nueva llega al elemento móvil. Para estos experimentos se eligieron intervalos de tiempo de actualización de 0,005, 1 y 5 segundos. La figura 6 muestra los resultados obtenidos siguiendo este enfoque. Cuanto mayor es el intervalo de actualización, más rápido se desarrollan los errores hasta niveles inaceptables por encima del intervalo de los nanosegundos. Por tanto, este enfoque es poco práctico para el posicionamiento con precisión de nivel de submetros.

35 Otro enfoque usa predictores de Kalman en los elementos móviles para extrapolar las desviaciones de reloj de transmisor entre actualizaciones recibidas desde la estación de referencia. La estación de referencia y el elemento móvil usan el mismo filtro de Kalman tal como se explicó al final de la sección II. Obviamente la eficacia de la predicción se ve afectada por la velocidad de actualización de los valores de corrección. Esto se destaca mediante la figura 7, que muestra errores de estimación de desviación de reloj en el elemento móvil para los tres intervalos de tiempo de actualización de 0,005, 1 y 5 segundos. Los errores quedan en un intervalo de subnanosegundos. La superioridad del enfoque propuesto para usar predictores de Kalman en los elementos móviles es obvia.

45 En la figura 8 se muestra el efecto en la precisión de posicionamiento frente al tiempo. De arriba abajo se ha aumentado el intervalo de tiempo de actualización. Cada subgráfica muestra la precisión de posicionamiento para las tres coordenadas X, Y y Z. Para intervalos de tiempo hasta un segundo, la estimación trabaja en límites aceptables y no hay ningún cambio significativo en la precisión. El ruido observado en la posición se debe a ruido en las mediciones de TOA, que no se han filtrado en este experimento. Para intervalos de actualización más largos el error aumenta de manera notable y alcanza su nivel más alto justo antes de una actualización. Puede observarse que el ajuste a escala del eje vertical se ha cambiado para cada intervalo de actualización.

50 Se han recopilado datos reales durante una hora a partir del sistema de prueba para comprobar los algoritmos. Uno de los receptores estáticos se tomó como estación de referencia para estimar los estados del modelo de reloj de transmisor tal como se presenta en la sección II. Un segundo receptor usa los estados estimados de la estación de referencia para estimar desviaciones de reloj de transmisor  $\delta t_i$  como un elemento móvil. Las mediciones de TOA de elemento móvil  $t_{ri}$  se corrigieron usando las desviaciones de reloj de transmisor predichas. Las pseudodistancias pueden calcularse restando el tiempo de estimaciones de transmisión K- $T_i$  de las mediciones de TOA de elemento móvil.

55 La figura 9(a) muestra cómo las estimaciones de pseudodistancia divergen con el tiempo si las desviaciones de reloj de transmisor no se modelan, es decir las mediciones de TOA de elemento móvil no son correctas para tener en cuenta la

desviación de reloj de transmisor. Después de una hora las estimaciones de pseudodistancia han disminuido  $4,10^6$  m aunque la distancia entre el elemento móvil y el transmisor no cambia. La figura 9(b) muestra el resultado correspondiente si se corrigen las mediciones de TOA de elemento móvil. El algoritmo puede compensar los errores de reloj de transmisor, las estimaciones de pseudodistancia varían sólo en el intervalo de los decímetros. Está claro que sin la corrección de la desviación de reloj de transmisor el cálculo de una estimación de posición razonable por el elemento móvil sería imposible.

#### V. CONCLUSIÓN

Para un sistema de localización por microondas se ha propuesto un método para sincronizar virtualmente todos los transmisores y receptores en el sistema sin acoplarlos explícitamente a un reloj maestro. Para este fin, se ha concebido un modelo estocástico para estimar de manera precisa desviaciones de reloj. El modelado comienza con funciones de autocorrelación medidas en lugar de aprovechar las medidas potenciales convencionales para la identificación de ruido como, por ejemplo, la desviación de Allan. El método de autocorrelación permite el diseño de filtros estables. Este modelo puede reflejar el comportamiento de osciladores de bajo coste caracterizados por ruido de PM de centelleo y otras componentes de ruido. El modelo estocástico puede aprovecharse tanto en el receptor de referencia como los elementos móviles. En el receptor de referencia, un conjunto de filtros de Kalman, uno para cada transmisor, estima las desviaciones de reloj de transmisor usando mediciones de fase de pulsación y de TOA. En el elemento móvil, los predictores de Kalman prevén las desviaciones de reloj entre actualizaciones de corrección. Mediante simulaciones basadas en datos medidos, se demostró la superioridad del predictor de Kalman comparado con un predictor de orden cero. Además, este enfoque ha mostrado ser adecuado para proporcionar estimaciones de posición precisas en el intervalo de los submetros siempre que el intervalo de tiempo de actualización permanezca por debajo de un segundo. Los algoritmos se sometieron a prueba también con datos reales recopilados en el sistema de localización por microondas. Se demostró la eficacia para compensar las desviaciones de reloj de transmisor. Sin una estrategia de este tipo sería imposible calcular estimaciones de posición razonables.

Por consiguiente, las realizaciones de la invención se refieren a una sincronización virtual de relojes de transmisor de funcionamiento libre de bajo coste en un sistema de localización por microondas. La estrategia de sincronización puede basarse en modelar los relojes de transmisor. Un modelo estocástico estable puede diseñarse analizando la función de correlación de los datos observables en el sistema de localización, es decir, el tiempo de llegada y la fase de portadora. En las realizaciones de la invención, se aprovecha este modelo en un filtro de Kalman y un receptor de referencia estima los estados de reloj actuales y los distribuye periódicamente a los receptores móviles permitiéndoles predecir las desviaciones de reloj de transmisor entre actualizaciones. Haciendo referencia a las figuras 6 a 9, se analizó el impacto de tal esquema de sincronización en la precisión de posición usando tanto datos reales como simulados.

Dependiendo de determinados requisitos de implementación, las realizaciones de la invención pueden implementarse en hardware o en software. La implementación puede realizarse usando un medio de almacenamiento digital, en particular un disco, DVD o un CD con señales de control legibles electrónicamente almacenadas en el mismo, que cooperen con un sistema informático programable de manera que se realicen los métodos de la invención. Generalmente, las realizaciones de la invención pueden ser un producto de programa informático con un código de programa almacenado en un soporte legible por máquina, siendo operativo el código de programa para realizar los métodos de la invención cuando el producto de programa informático se ejecuta en un ordenador. En otras palabras, las realizaciones de los métodos de la invención pueden implementarse como un programa informático que tiene un código de programa para realizar al menos uno de los métodos de la invención cuando el programa informático se ejecuta en un ordenador.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Yun y C. Kee, "Centimeter accuracy stand-alone indoor navigation system by synchronized pseudolite constellation", Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS, págs. 213 - 225, septiembre de 2002.
- 5 [2] J. Barnes, C. Rizos, J. Wang, D. Small, G. Voigt y N. Gambale, "High Precision Indoor and Outdoor Positioning using LocataNet", Journal of Global Positioning Systems, vol. 2, n.º 2, págs. 73-82, 2004.
- [3] L. Galleani, L. Sacerdote, P. Tavella y C. Zucca, "A mathematical model for the atomic clock error", METROLOGIA-BERLIN-, vol. 40, n.º 3, págs. 257-264, 2003.
- [4] J. Wright, "GPS Composite Clock Analysis", Time, vol. 8, n.º 6, pág. 4.
- 10 [5] F. Gonzalez y P. Waller, "Short term GNSS clock characterization using One-Way carrier phase", págs. 517-522, 2007.
- [6] P. Daly y I. Kitching, "Characterization of NAVSTAR GPS and GLONASS on-board clocks", Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, vol. 5, n.º 7, págs. 3-9, 1990.
- 15 [7] W. Riley y C. Greenhall, "Power Law Noise Identification Using the Lag 1 Autocorrelation", en Proc. 18th European Frequency and Time Forum (Guildford, Reino Unido), 2004.
- [8] T. Parker, "Characteristics and Sources of Phase Noise in Stable Oscillators", págs. 99-110, 1987.
- [9] M. Grewal y A. Andrews, Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB. Wiley, 2001.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para estimar una desviación entre un reloj de transmisor de funcionamiento libre y un reloj de referencia, comprendiendo el método:
- 5 en un receptor (12) estacionario con respecto a un transmisor (10), recibir una señal de transmisor generada por el transmisor (10) basándose en el reloj de transmisor;
- basándose en el reloj de referencia determinar un tiempo de llegada de la señal de transmisor y una fase de pulsación de la portadora de señales de transmisor; y
- basándose en un modelo de error de reloj, el tiempo de llegada y la fase de pulsación, estimar la desviación entre el reloj de transmisor y el reloj de referencia,
- 10 en el que el modelo de error de reloj se deriva adaptando una función de correlación de un modelo estocástico a una función de autocorrelación medida del reloj de transmisor.
2. Método según la reivindicación 1, en el que la función de correlación del modelo estocástico es la función de correlación de un proceso de Markov de segundo orden.
3. Método según la reivindicación 1 ó 2, en el que estimar la desviación comprende:
- 15 usar un filtro de Kalman, en el que se determinan coeficientes de la matriz de sistema del filtro de Kalman basándose en el modelo de error de reloj.
4. Método según la reivindicación 3, en el que la desviación entre el reloj de transmisor de funcionamiento libre y el reloj de referencia se proporciona como un vector de estado estimado del filtro de Kalman.
- 20 5. Método según una de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende:
- estimar una desviación entre cada uno de una pluralidad de relojes de transmisor de funcionamiento libre y el reloj de referencia, en el que cada uno de los relojes de transmisor de funcionamiento libre está asociado con uno de una pluralidad de transmisores (10) estacionarios espaciados entre sí; y
- sincronizar virtualmente la pluralidad de transmisores (10) usando las desviaciones estimadas.
- 25 6. Método para determinar una posición de un objeto (14) móvil, que comprende:
- en el objeto (14) móvil, recibir una desviación estimada entre cada reloj de transmisor de una pluralidad de transmisores (10) y un reloj de referencia de un receptor (12) estacionario con respecto a la pluralidad de transmisores (10), estimándose las desviaciones estimadas según una de las reivindicaciones 1 a 5, y recibir señales generadas basándose en los relojes de transmisor de funcionamiento libre desde la pluralidad de transmisores (10), y
- 30 calcular la posición del objeto (14) móvil usando un tiempo de llegada de las señales recibidas desde la pluralidad de transmisores (10) y tiempos de transmisión de las señales recibidas corregidos por las desviaciones estimadas.
7. Método según la reivindicación 6, en el que las desviaciones son vectores de estado estimados de un filtro de Kalman usado en el receptor (20) estacionario, y en el que el objeto (14) móvil calcula desviaciones extrapoladas usando los vectores de estado estimados en una ecuación de estado de un filtro de Kalman que corresponde al filtro de Kalman usado en el receptor (20) estacionario.
- 35 8. Método según la reivindicación 7, en el que el objeto (14) móvil calcula las desviaciones extrapoladas en un periodo de tiempo entre vectores de estado estimados posteriores recibidos desde el receptor (20) estacionario.
- 40 9. Aparato (20) para estimar una desviación entre un reloj de transmisor de funcionamiento libre y un reloj de referencia, que comprende:
- un receptor (12) configurado para recibir una señal de transmisor generada por un transmisor (10) estacionario con respecto al receptor (12), basándose en el reloj de transmisor;
- 45 un procesador (20) configurado para:
- basándose en el reloj de referencia, determinar un tiempo de llegada de la señal de transmisor y una fase de pulsación de la portadora de señales de transmisor; y
- basándose en un modelo de error de reloj, el tiempo de llegada y la fase de pulsación, estimar la desviación

entre el reloj de transmisor y el reloj de referencia,

en el que el modelo de error de reloj se deriva adaptando una función de correlación de un modelo estocástico a una función de autocorrelación medida del reloj de transmisor.

10. Sistema para determinar una posición de un objeto (14) móvil, que comprende:

5 un aparato (20) para estimar una desviación entre un reloj de transmisor de funcionamiento libre y un reloj de referencia según la reivindicación 9;

10 un receptor (24) configurado para recibir desviaciones estimadas entre cada reloj de transmisor de una pluralidad de transmisores (10) y un reloj de referencia de un receptor (12) estacionario con respecto a la pluralidad de transmisores (10) desde el aparato (20), y recibir señales generadas basándose en los relojes de transmisor de funcionamiento libre desde la pluralidad de transmisores (10), y

un procesador (26) configurado para calcular la posición del objeto (14) móvil usando un tiempo de llegada de las señales recibidas desde la pluralidad de transmisores (10) y tiempos de transmisión de las señales recibidas corregidos por las desviaciones estimadas.

15 11. Aparato según la reivindicación 10, en el que las desviaciones son vectores de estado estimados de un filtro de Kalman usado en el receptor estacionario, y en el que el procesador está configurado para calcular desviaciones extrapoladas usando los vectores de estado estimados en una ecuación de estado de un filtro de Kalman que corresponde al filtro de Kalman usado en el receptor estacionario.

20 12. Aparato según la reivindicación 11, en el que el procesador (26) está configurado para calcular las desviaciones extrapoladas en un periodo de tiempo entre vectores de estado estimados posteriores recibidos desde el receptor estacionario.

13. Objeto móvil que comprende un aparato según una de las reivindicaciones 10 a 12.

14. Sistema que comprende una pluralidad de transmisores (10) estacionarios espaciados entre sí, un aparato (20) según la reivindicación 9, que es estacionario con respecto a los transmisores (10), y un objeto (14) móvil según la reivindicación 13.

25 15. Programa informático que tiene un código de programa para realizar, cuando se ejecuta en un ordenador, un método según una de las reivindicaciones 1 a 8.

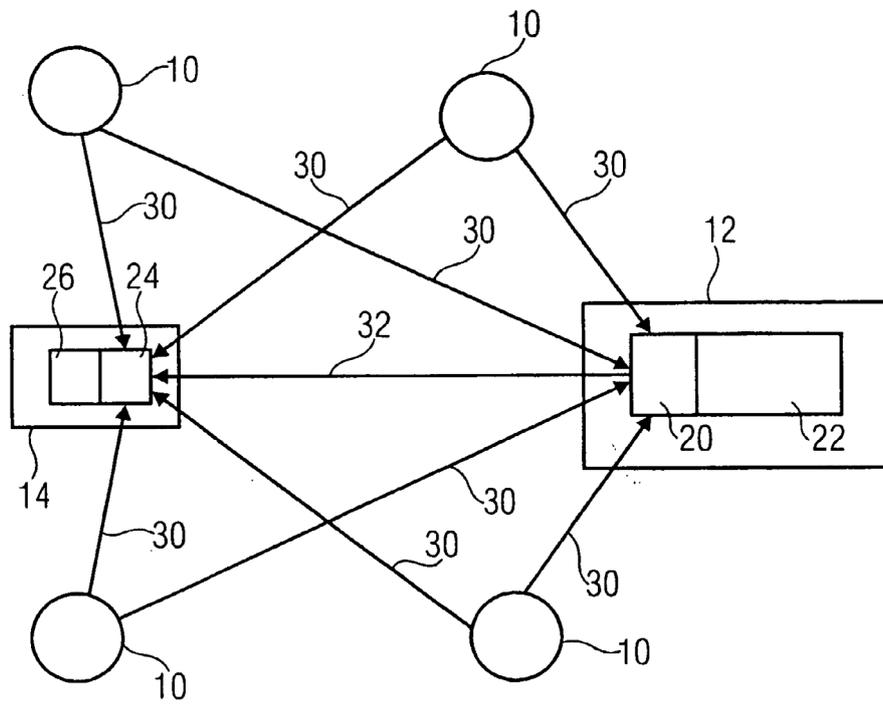


FIG 1

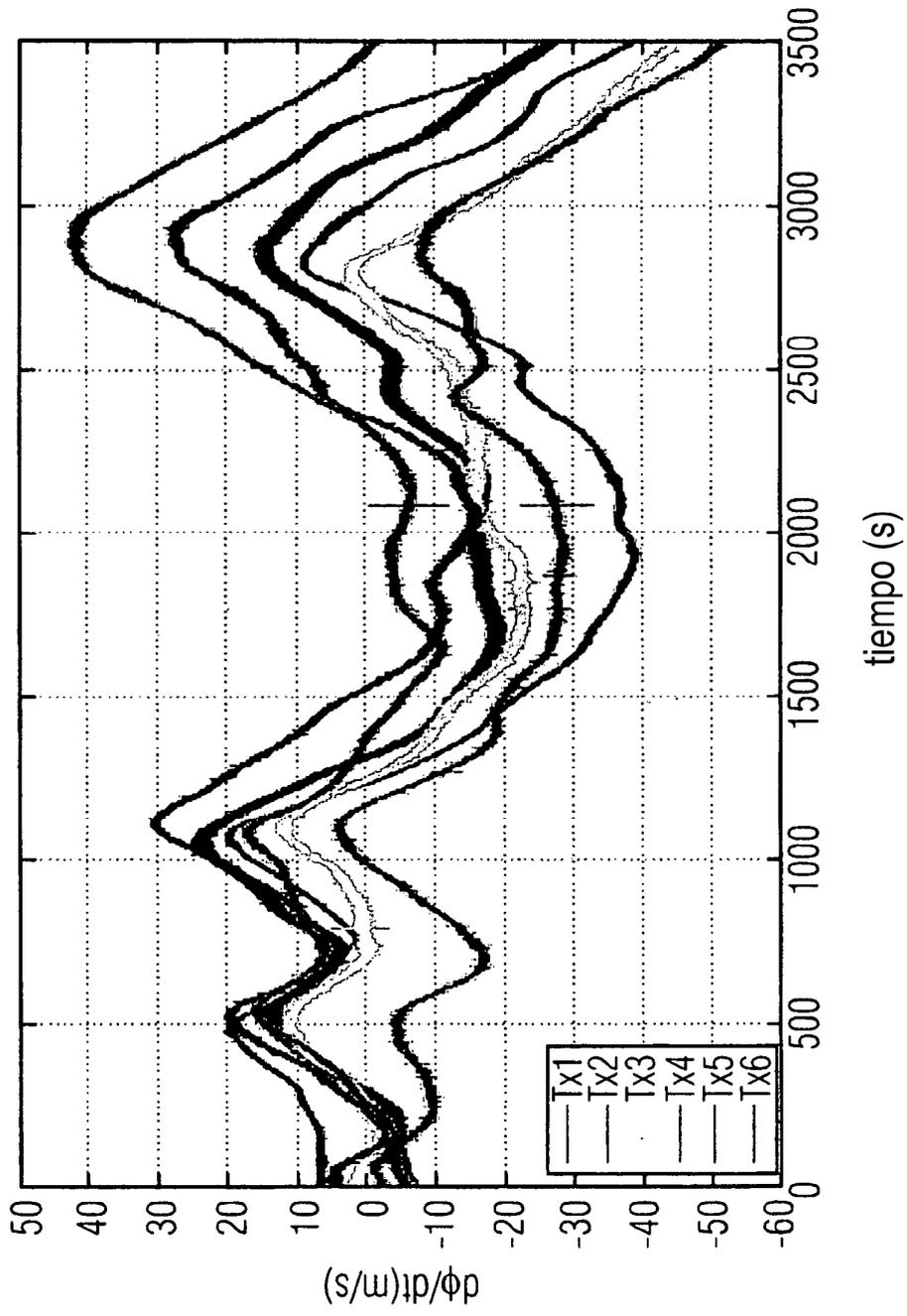


FIG 2

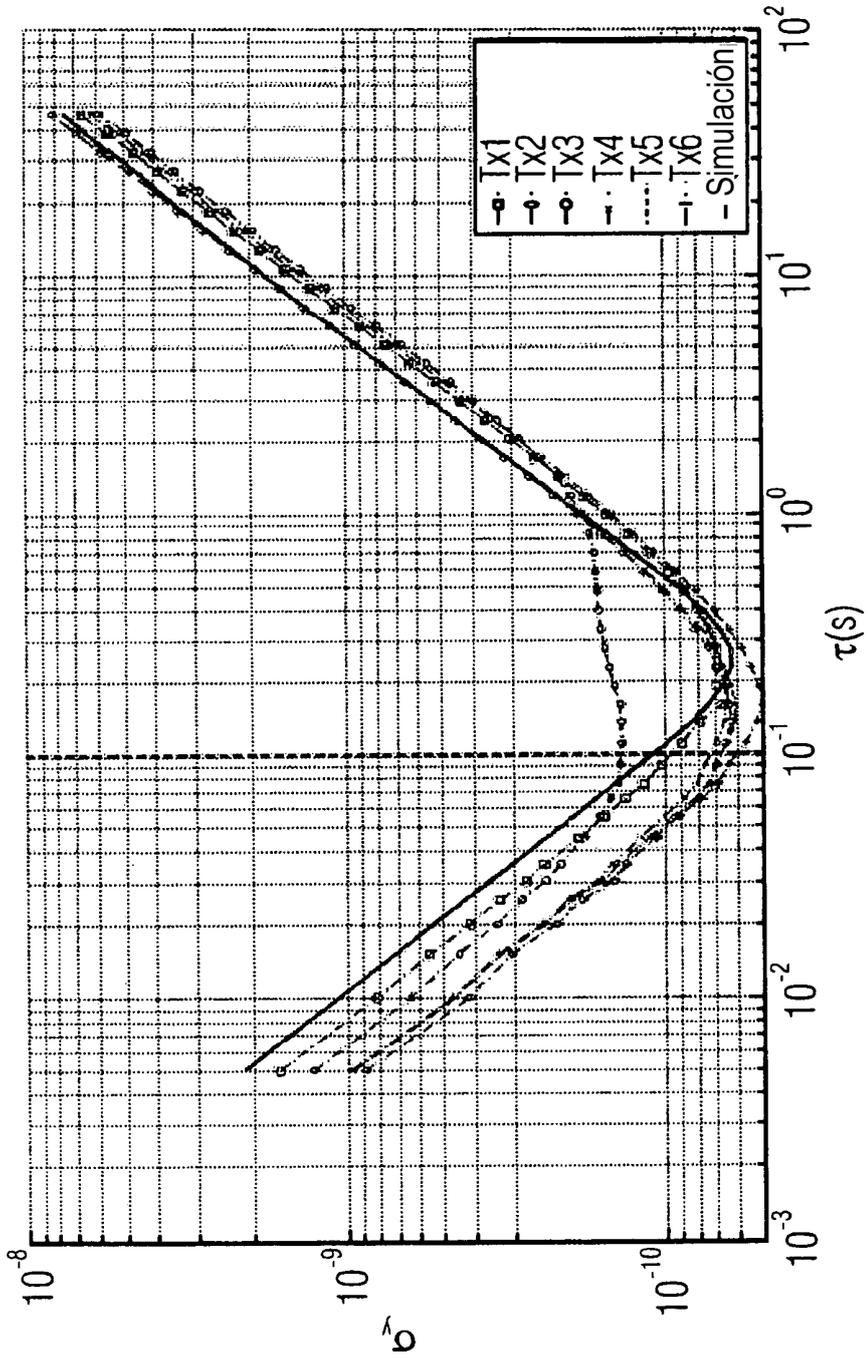


FIG 3

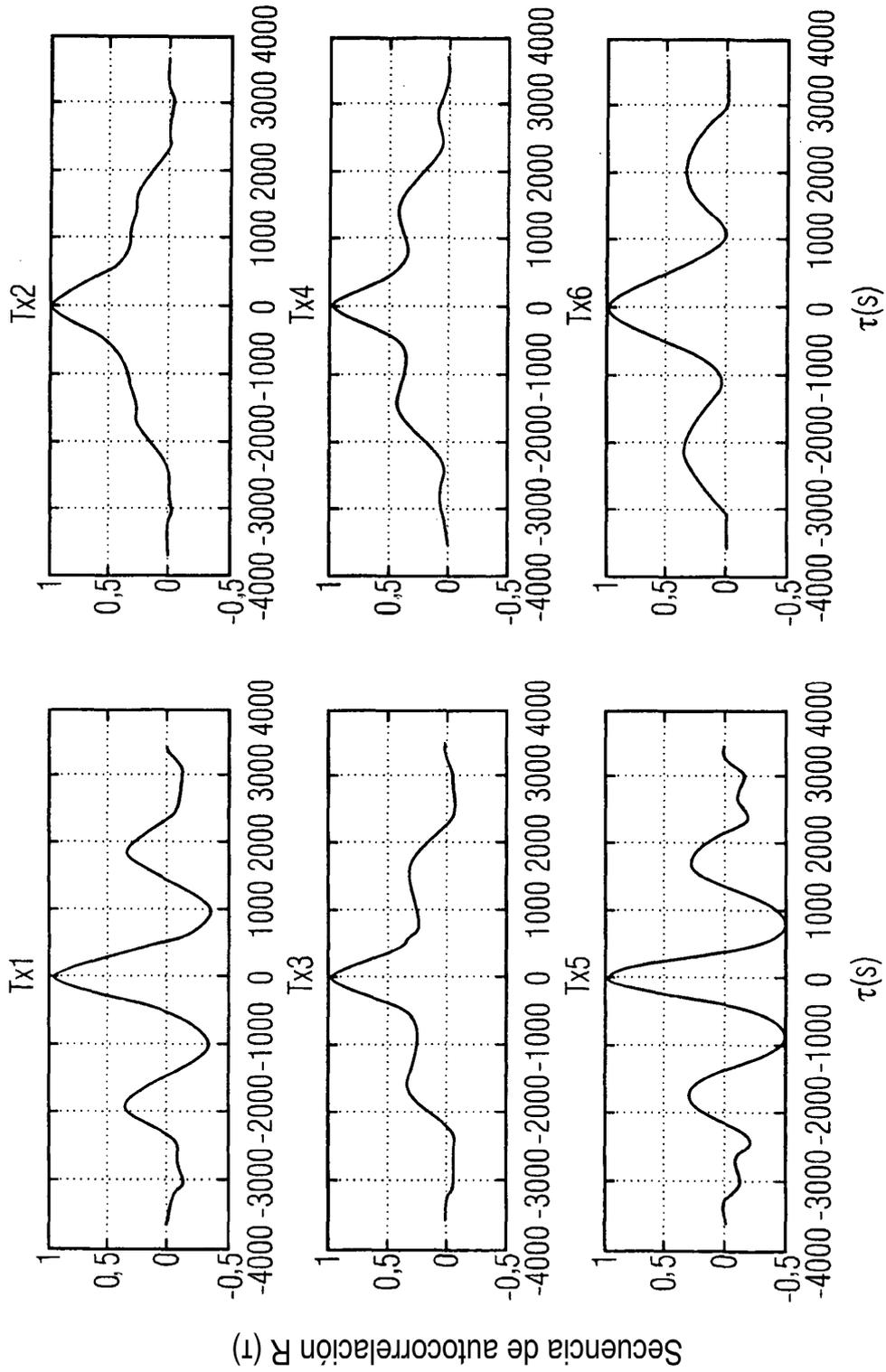


FIG 4

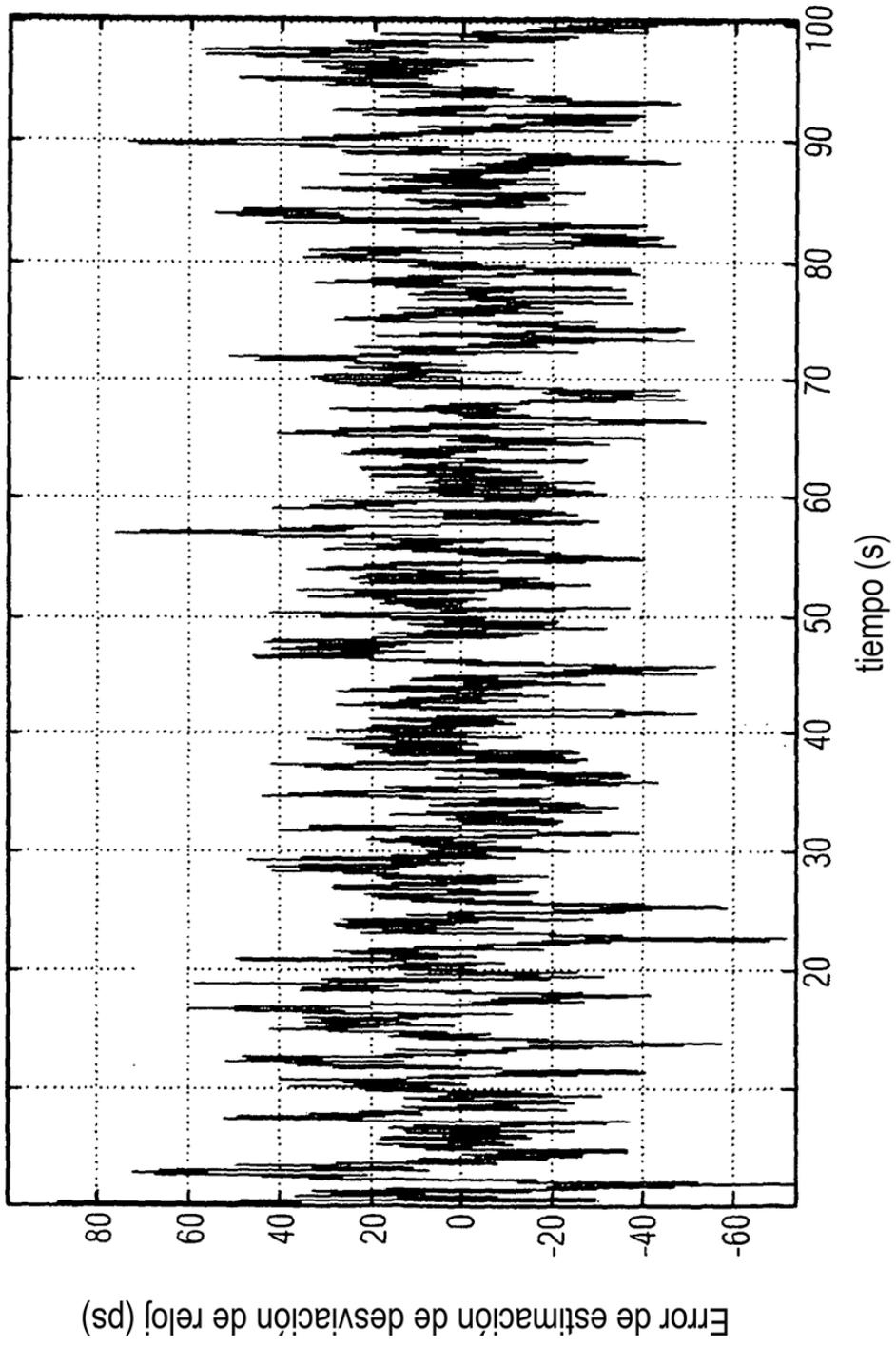


FIG 5

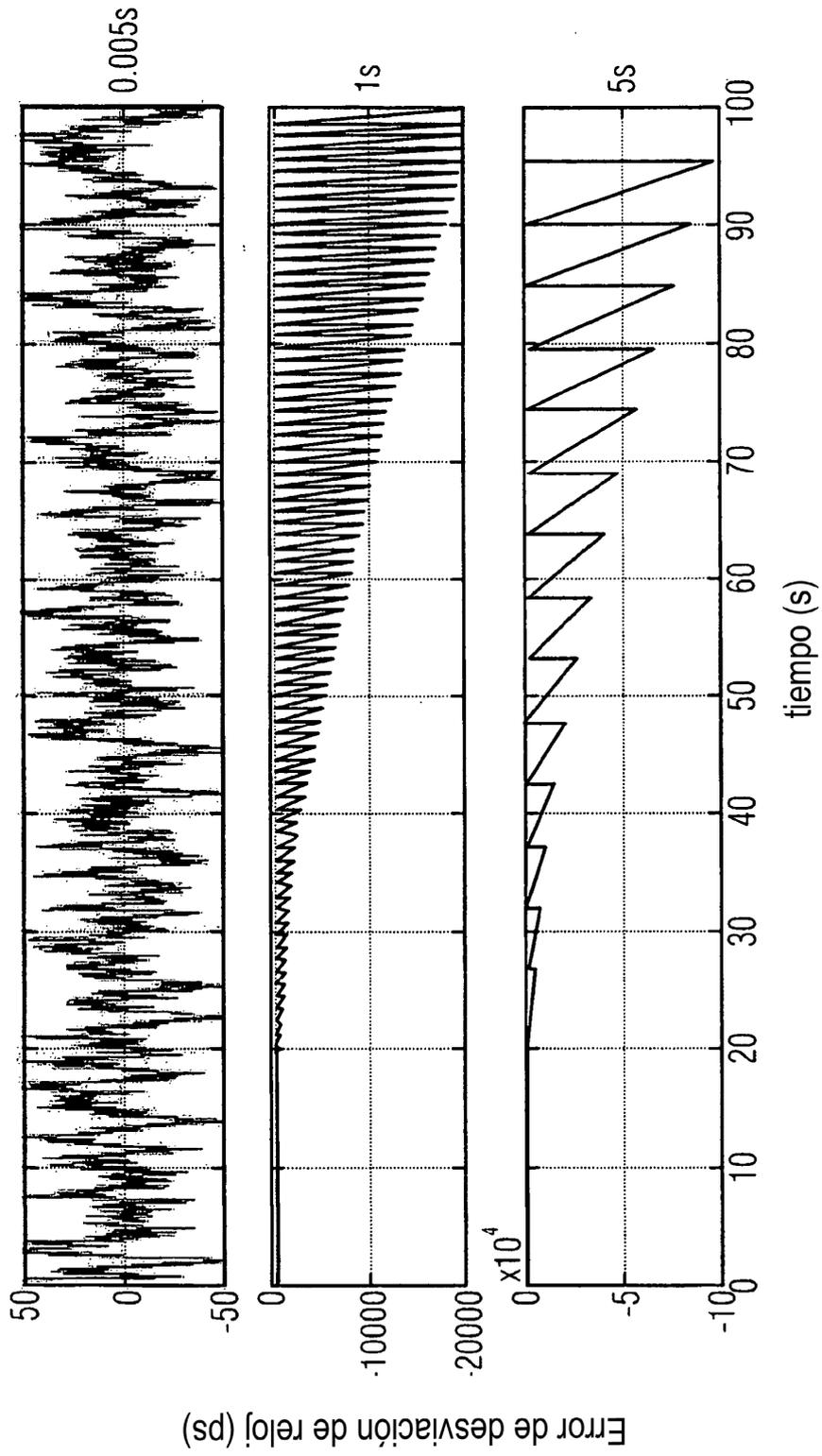


FIG 6

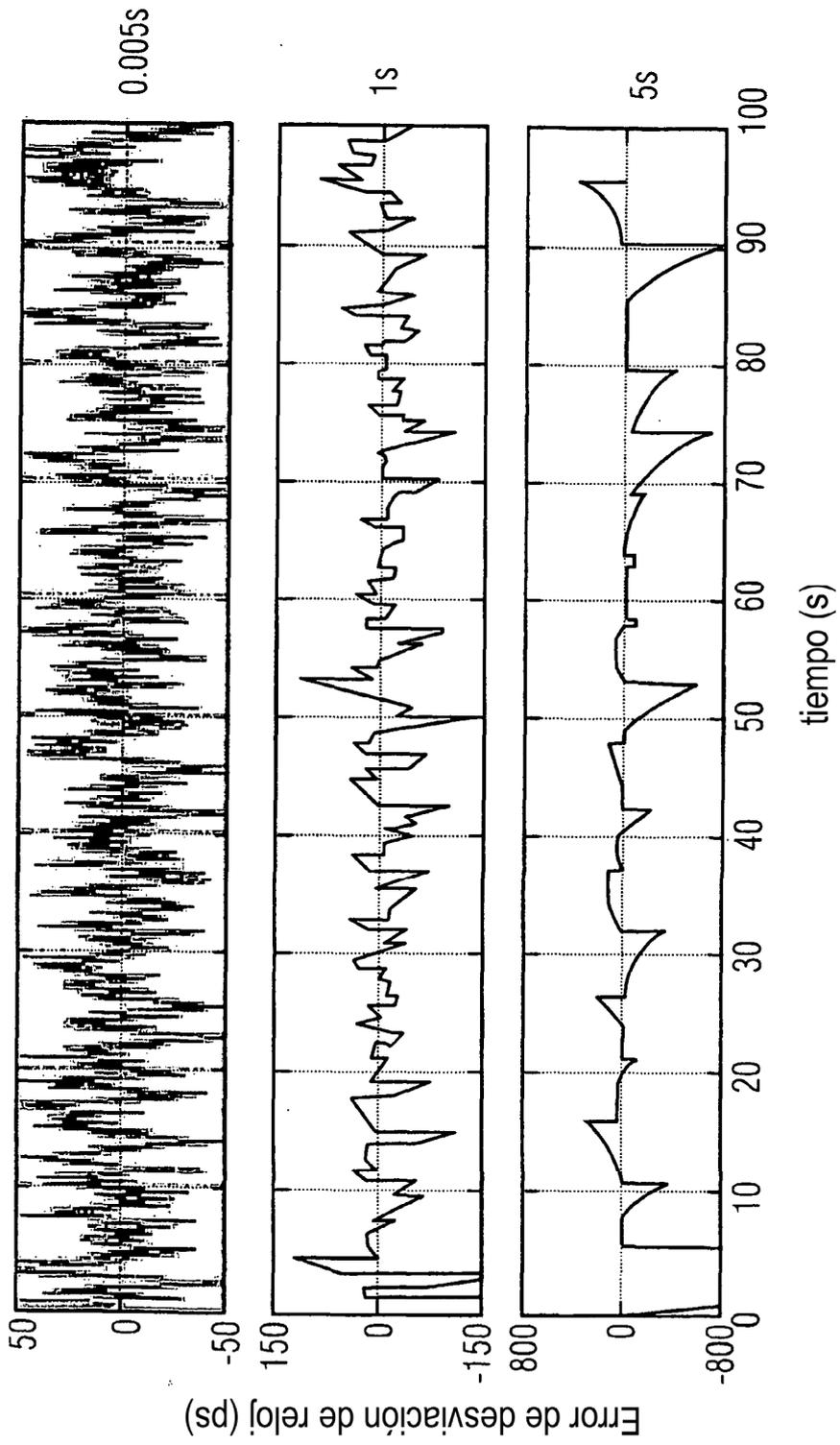


FIG 7

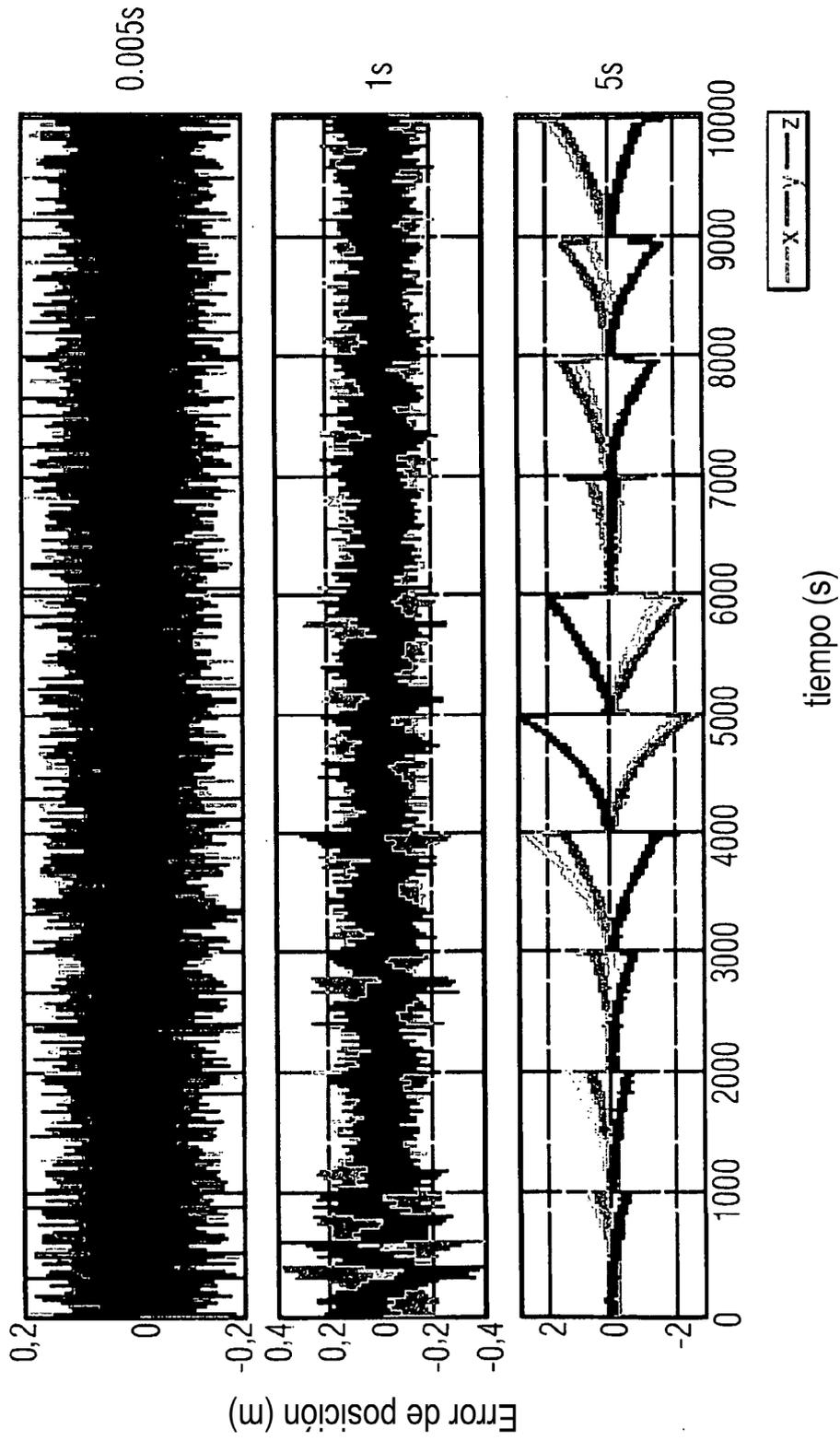


FIG 8

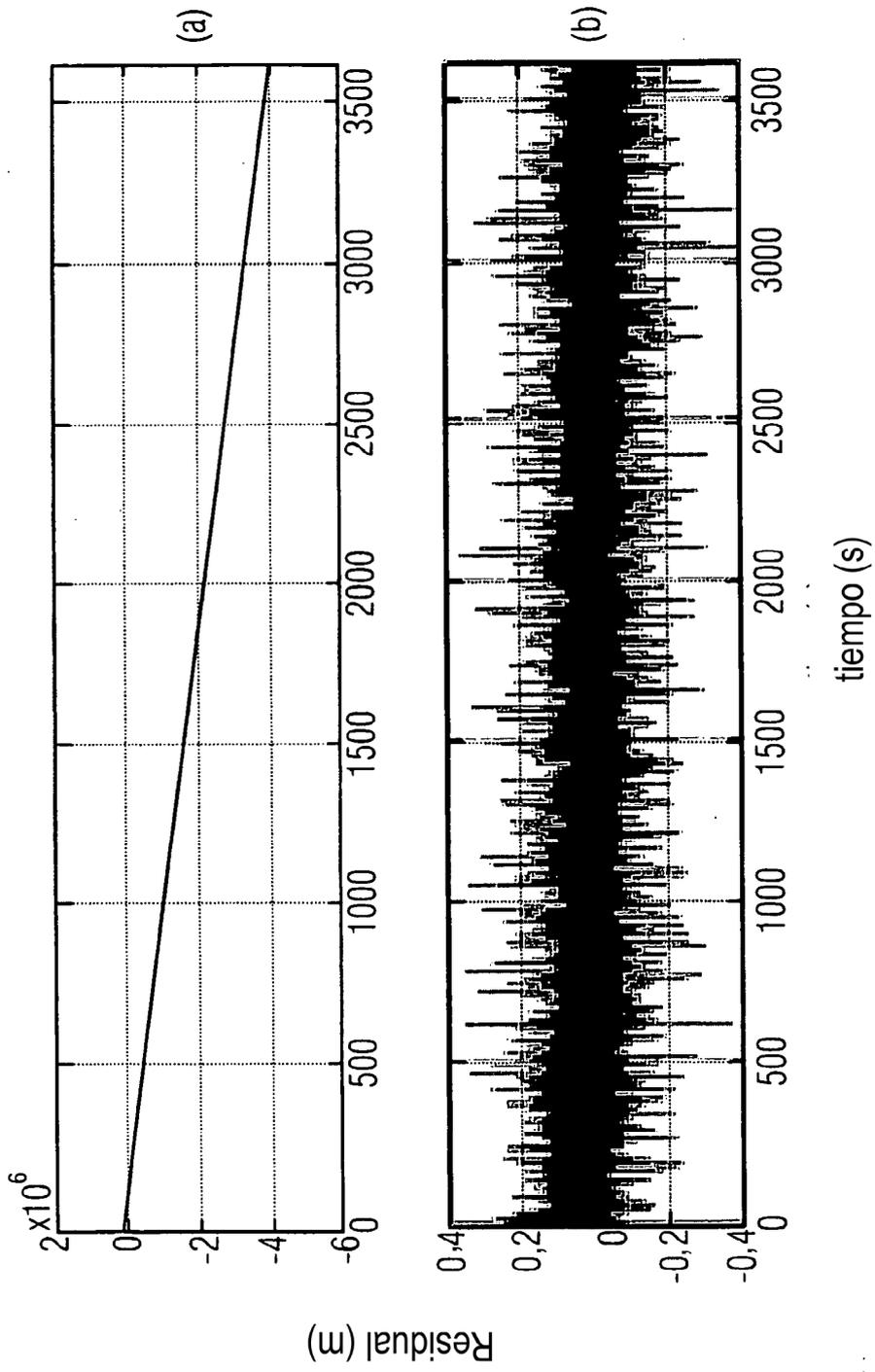


FIG 9