

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 434 015**

51 Int. Cl.:

G01S 11/06 (2006.01)

G01S 5/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.04.2010 E 10275033 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.10.2013 EP 2249176**

54 Título: **Técnica de localización de terminal**

30 Prioridad:

14.04.2009 GB 0906283

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

13.12.2013

73 Titular/es:

**VODAFONE GROUP PLC (100.0%)
The Connection
Newbury, Berkshire RG14 2FN, GB**

72 Inventor/es:

MARKOULIDAKIS, YANNIS

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 434 015 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

Técnica de localización de terminal

Esta invención se refiere a una técnica de localización y/o de rastreo de un terminal móvil y al equipo asociado. Más particularmente la presente invención se refiere a la localización y/o al rastreo de un terminal de comunicación móvil, estando el propio terminal en una red de comunicación de telefonía móvil y al equipo de red de comunicación asociado. Más específicamente, la presente invención se refiere a un sistema para y a un método de estimar la posición de un terminal móvil en una red de comunicaciones de telefonía móvil.

Con la creciente capacidad y cobertura de área de las redes celulares por todo el mundo, los proveedores de telecomunicaciones de telefonía móvil son capaces de proporcionar nuevos y mejores servicios para sus abonados. En particular, un tipo de servicio en el cual ha habido un creciente interés en de lo último son los servicios Basados en la Ubicación (LBS – Location Based Services, en inglés).

El LBS proporciona un usuario de terminal móvil con suministro de contenidos basados en la ubicación, tal como predicciones de tiempo locales, y puede también permitir que el usuario del terminal móvil identifique a personas o establecimientos cerca de su proximidad. Por ejemplo, un usuario de teléfono móvil puede contactar a un proveedor de LBS para identificar su gasolinera, restaurante, banco u otros, más cercanos, basándose en la ubicación actual del terminal móvil (MT – Mobile Terminal, en inglés) del usuario. De manera similar, puede utilizarse el encontrar la ubicación de amigos o familia, tal como por razones de seguridad o emergencia, o simplemente de encuentro, solicitando al proveedor del LBS una actualización de la ubicación de una o más personas. Estos servicios pueden ayudar a los usuarios, ahorrándoles tiempo, en lugar de viajar por un área geográfica, buscando un establecimiento / persona particular, evitando así potencialmente los embotellamientos. Puede también ayudar a las personas en situaciones de emergencia, tal como ayudando a identificar rápidamente su hospital más cercano o la ubicación de alguien que requiera una asistencia de emergencia.

Estos servicios requieren una técnica de localización que pueda conseguir una precisión de posición razonable así como costes de despliegue comercialmente razonables. Tales costes se refieren generalmente al alcance y complejidad del software y hardware adicional para ser incorporado en los terminales móviles y/o en la red. Hay también otros aspectos que considerar, tales como cualquier penalización impuesta por las técnicas y los procedimientos de rastreo frente a requisitos de almacenamiento / memoria y de consumo de potencia de batería en los terminales móviles.

Se han propuesto hasta la fecha una gran variedad de técnicas de localización de un terminal móvil. La técnica de localización de mejor rendimiento en términos de precisión y de fiabilidad es actualmente el Sistema de Localización Global Asistido (A-GPS – Assisted Global Positioning System, en inglés). El GPS es una técnica en la que el terminal recibe señales de una constelación de satélites de GPS. A partir de las señales recibidas, el terminal calcula su posición basándose en la diferencia de tiempo observada en las señales recibidas de los diferentes satélites. En el A-GPS la red de telefonía móvil (por ejemplo GSM) proporciona información adicional a través de su interfaz aérea para asistir al terminal en estimar su posición (por ejemplo, correcciones de GPS diferenciales). Esto conduce a un menor "Tiempo hasta la Primera Localización" (Time to First Fix, en inglés) y a un menor consumo de batería del terminal.

No obstante, el A-GPS es un planteamiento bastante costoso, y la relativamente baja aceptación comercial de los Servicios Basados en la Ubicación combinada con los elevados costes asociados con el punto de GPS conduce a un periodo de tiempo relativamente largo antes de que los terminales móviles de 2G y de 2G/3G estén equipados con receptores de GPS de manera extendida. Además, incluso tras la introducción de los receptores de GPS en una gran proporción de terminales móviles, puesto que el GPS requiere contacto directo con los satélites para funcionar, la limitada disponibilidad de las señales de satélite en entornos de interior y de ciertos exteriores (por ejemplo debido al efecto de cañón urbano) indica la necesidad de técnicas híbridas que combinen A-GPS con una localización basada en la telefonía móvil.

Un método simple basado en la telefonía móvil utiliza la celda más cercana como medio para proporcionar una posición aproximada del terminal. Por ejemplo se determina la celda que proporciona al terminal la medición de Potencia de Señal Recibida (RSS – Received Signal Strength, en inglés) más potente, y se asume entonces que el terminal está dentro del área de cobertura de esa celda. La precisión de este método depende por supuesto del área de cobertura de la celda, y así, proporcionará típicamente una posición de terminal móvil que es precisa en un intervalo de 600 m a un par de kilómetros (es decir, 600 m – 2000 m dependiendo del tamaño de la celda). Este método es una de las técnicas que es actualmente utilizada por los operadores que ya han introducido LBS comercial.

Las técnicas de localización de terminal basadas en mediciones de la Potencia de Señal Recibida (RSS – Received Signal Strength, en inglés) son de una complejidad reducida de implementación debido al hecho de que las mediciones de la RSS están disponibles en el lado del terminal como parte de su operación estándar tanto en modo de reposo como dedicado. El principal problema con las técnicas de localización basadas en la RSS es en lo que

respecta a la precisión que alcanzan, debido a la variabilidad de la señal, resultante de la naturaleza estocástica del entorno de propagación por radio de telefonía móvil.

En el documento GB2416461 se describió una técnica que se denominó “Localización de Móvil Asistida por Terminal Estadístico” o brevemente “STAMP” (“Statistical Terminal Assisted Mobile Positioning”, en inglés). Esta técnica permite el aprovechamiento de múltiples mediciones históricas de RSS recogidas mientras que el terminal está en modo de reposo. Durante una fase de establecimiento de un LBS, estas mediciones de RSS son utilizadas con una técnica de localización para estimar la posición del terminal, y esta determinación es a continuación estadísticamente procesada para mejorar la precisión de la posición determinada del terminal. De esta manera, la técnica de “STAMP” era capaz de mejorar la precisión de la mayoría de las técnicas de rastreo existentes, haciéndolas más útiles para las aplicaciones de LBS. La técnica de STAMP, no obstante, cuando se aplica sobre las mediciones de RSS, es también susceptible de variabilidad de señal, particularmente en lo que respecta al efecto de múltiples rutas que afecta a su precisión. En el documento GB2416461, este problema fue solucionado eliminando mediciones con un alto contenido de error (por ejemplo, debido a un desvanecimiento rápido).

La variabilidad de la señal es particularmente un problema cuando se utiliza STAMP con modelos empíricos como Hata o Cost231, puesto que estos modelos estiman la distancia entre el terminal y la estación de base, siendo la distancia una función exponencial de la RSS. Por lo tanto, una variabilidad indebida en las mediciones de la RSS resultará en errores de estimación drásticamente exagerados.

Aunque se ha encontrado que la técnica de STAMP proporciona un grado razonable de precisión de posición, y para ser implementable para un coste razonable, la precisión de posición que se consigue actualmente podría ser aun mejorada, particularmente con respecto a la mitigación del error de posición del terminal introducido por las técnicas basadas en la RSS.

El método propuesto en el documento EP135393 que se utiliza para la delimitación de forma de dos partes se refiere a la capacidad de utilizar una serie de mediciones de la Potencia de Señal Recibida (RSS – Received Signal Strength, en inglés) recogidas mientras que el terminal está conectado a la red (es decir, durante una llamada o una sesión de datos) con el fin de mejorar la precisión de la localización. Las técnicas propuestas en el documento EP135393 corresponden a un planteamiento de filtrado que podría ser considerado como una alternativa al Filtro de Kalman. No obstante el método utilizado en este documento para la estimación de la distancia en función de la RSS no considera el empleo de estimadores que optimicen la precisión de la localización del terminal teniendo en cuenta el proceso de filtrado aplicado.

El método propuesto en el documento WO2006096923 aprovecha un modelo de pérdida de ruta genérico (basado en la formulación de Hata, Cost231 de la estimación de la pérdida de ruta) y así, se basa en la localización del terminal para proporcionar un método para identificar los parámetros del modelo de pérdida de ruta específicos que aplican en la proximidad de la ubicación del terminal. Como resultado se aplica eventualmente un modelo de pérdida de ruta refinado con el fin de mejorar la precisión de la localización del terminal. No obstante, el método propuesto en el documento WO2006096923 no trata el comportamiento estadístico del error introducido durante la estimación de la distancia de terminal a estación de base incluso cuando la precisión del modelo de pérdida de ruta ha sido mejorada. Además, la presente aplicación propuesta define estimadores estadísticos que se adaptan al proceso de Filtrado de Kalman y proporcionan una mayor precisión de localización, un planteamiento completamente carente de las enseñanzas del documento WO2006096923.

El método propuesto en el documento WO03071303 corresponde efectivamente a un método de Mínimos Cuadrados Ponderados sobre las mediciones de la RSS de múltiples estaciones de base con el fin de optimizar la localización resultante del MT. Los factores ponderados propuestos en el documento WO03071303 se dirigen a que se cumpla el error esperado en la estimación de distancia. No obstante, el documento WO03071303 no proporciona ningún análisis del error esperado en la estimación de la distancia del terminal a la estación de base y no proporciona ningún estimador estadístico que pudiese mejorar la precisión de la localización del terminal.

El método propuesto en “New Method for Estimation of Mobile Location Based on Signal Attenuation and Hata Model Signal Prediction”; 2005, de OROOJI, M. et al considera un conjunto de ecuaciones para expresar la ubicación del terminal como una función de (a) las coordenadas de la estación de base, (b) las distancias entre el terminal y las estaciones de base relevantes y (c) un conjunto de ángulos que relacionan la posición del terminal con las posiciones de las estaciones de base. El método se basa en una aproximación de los ángulos requeridos en este conjunto de ecuaciones que permite la identificación de la posición del terminal. No obstante, la estimación de la distancia entre el terminal y cada una de las estaciones de base no considera ningún estimador estadístico que pudiese mejorar su precisión. Además el método propuesto en esta publicación no proporciona ningún estimador estadístico que pueda mejorar el rendimiento de un proceso de filtrado estadístico como el Filtrado de Kalman.

Existe por tanto una necesidad de una técnica mejorada de localización basada en la red que combine una precisión adecuada con bajos costes de despliegue.

La presente invención busca superar o aliviar al menos uno de estos problemas.

Compendio de la invención

De acuerdo con un primer aspecto, la presente invención proporciona un método de estimar la ubicación de un terminal móvil en una red de telecomunicaciones de telefonía móvil que tiene una pluralidad de estaciones de base, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

5 Convenientemente, el estimador puede incluir un componente de filtrado de Kalman.

Resulta también preferible que la medición determinada de al menos un parámetro de la señal sea una medición de la Potencia de la Señal Recibida (RSS – Received Signal Strength, en inglés) y una técnica de localización basada en la RSS, tal como la Identidad Global de Celda Mejorada (ECGI – Enhanced Cell Global Identity, en inglés) o STAMP, se utiliza para obtener la primera estimación de distancia de la ubicación del terminal móvil.

10 Ventajosamente los estimadores minimizan el impacto del proceso del cálculo de la posición sobre la precisión resultante de la técnica de localización.

Los estimadores son estimadores estadísticos que pueden ser aplicados a una estimación de distancia del terminal móvil desde cada una de las estaciones de base y/o aplicados a una estimación mediante trilateración / triangulación de la posición real del terminal móvil, basándose en las distancias estimadas del terminal móvil desde la pluralidad de estaciones de base. Los estimadores se infieren preferiblemente teniendo en cuenta la naturaleza de los modelos de propagación de pérdida de ruta (como Hata y Cost231), del error introducido en la estimación de la distancia del terminal móvil a la estación de base así como del error introducido en el proceso de triangulación.

Otros aspectos de la invención se refieren a un terminal de telecomunicaciones y a un elemento de red de comunicaciones, tal como una estación de base, configurados para implementar el aspecto de la invención, particularmente como se establece en las reivindicaciones adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

Se describirán ahora realizaciones de la invención con referencia a los dibujos que se acompañan, en los cuales:

la Figura 1 ilustra un diagrama esquemático de una red de telecomunicaciones en la cual puede ser implementada la invención;

25 la Figura 2 ilustra un diagrama de flujo de las etapas claves en un proceso de determinación de localización basado en la RSS;

la Figura 3 ilustra un gráfico que compara el error medio cuadrático de la distancia MT-BS para tres valores σ_{RX} de varianza diferentes (4 db, 8 db y 12 db) para tres estimadores diferentes de acuerdo con diferentes realizaciones de la invención;

30 la Figura 4 ilustra un gráfico que compara el rendimiento de los estimadores de la RSS, de acuerdo con realizaciones de la invención, en una técnica de localización basada en la RSS;

la Figura 5 ilustra un gráfico que compara el rendimiento de diferentes técnicas de localización basadas en la RSS que utilizan diferentes estimadores de acuerdo con diferentes realizaciones de la invención;

35 la Figura 6 ilustra un gráfico que compara el rendimiento para diferentes estimadores de acuerdo con las realizaciones de la invención tal como se utiliza en la técnica de STAMP.

la Figura 7 ilustra un gráfico que compara el rendimiento de diferentes estimadores de acuerdo con las realizaciones de la invención tal como se utilizan en la técnica de Rastreo del MT; y

la Figura 8 ilustra el rendimiento comparativo de CGI, CGI+TA y ECGI, STAMP y Rastreo del MT utilizando los estimadores calculados de acuerdo con una realización de la invención;

40 la Figura 9 se refiere a las realizaciones de la invención en las que se aplica filtrado de Kalman a los diferentes estimadores, e ilustra un gráfico que compara el factor de ganancia del filtro de Kalman f_{Rx} en función de la desviación estándar de la RSS σ_{RX} para un rendimiento teórico del Filtrado de Kalman de estado estacionario así como para una simulación real;

45 la Figura 10 ilustra un Modelo de Cálculo de Posición de Terminal Móvil Equivalente mediante Filtrado de Kalman de la RSS (Opción A) de acuerdo con una realización de la invención;

la Figura 11 ilustra un Modelo de Cálculo de Posición de Terminal Móvil Equivalente mediante Filtrado de Kalman de la Distancia MT-BS (Opción B) de acuerdo con una realización de la invención;

la Figura 12 ilustra un Modelo de Cálculo de Posición de Terminal Móvil Equivalente mediante Filtrado de Kalman de las Coordenadas del MT (Opción C) de acuerdo con una realización de la invención; y

5 la Figura 13 ilustra un gráfico de un rendimiento comparativo, de una simulación de los mejores estimadores del rendimiento para las realizaciones con Filtrado de Kalman de la invención y las realizaciones de la RSS Básica de la invención.

Descripción detallada de las realizaciones de la invención

Los elementos claves de una red de telecomunicaciones de telefonía móvil y su operación se describirán ahora brevemente con referencia a la Figura 1.

10 Cada celda corresponde a una estación de base (BS – Base Station, en inglés) respectiva de su red de telecomunicaciones celular o de telefonía móvil que recibe llamadas desde y finaliza llamadas en cualquier terminal móvil de esa celda mediante comunicación por radio inalámbrica en uno o ambos de los dominios de circuitos conmutados o paquetes conmutados. Tal terminal móvil de abonado o Equipo de Usuario (UE – User Equipment, en inglés) se muestra en 1. El terminal móvil puede ser cualquier dispositivo de comunicación portátil tal como un teléfono móvil de mano, un asistente digital personal (PDA – Personal Digital Assistant, en inglés) o un ordenador portátil de regazo equipado con una tarjeta de datos de red.

15 En una red de telecomunicaciones de telefonía móvil GSM, el subsistema de estación de base (BSS – Base Station Subsystem, en inglés) comprende las estaciones transeptoras de base (BTS – Base Transceiver Stations, en inglés) y el controlador de estación de base (BSC – Base Station Controller, en inglés). Un BSC puede controlar más de una BTS. Las BTSs y los BSCs comprenden la red de acceso por radio.

20 La presente invención se describirá en relación a una red de GSM, aunque resultará evidente que los conceptos de la invención pueden ser fácilmente aplicados a otras disposiciones de la red de telefonía móvil, incluyendo UMTS y SAE / LTE.

25 Convencionalmente, en una red de GSM, las estaciones de base están dispuestas en grupos y cada grupo de estaciones de base está controlado mediante un centro de conmutación de telefonía móvil (MSC – Mobile Switching Centre, en inglés), tal como el MSC 2 para las estaciones de base 3, 4 y 5. Como se muestra en la Figura 1, la red tiene otro MSC 6, que está controlando otras tres estaciones de base más 7, 8 y 9. En la práctica, la red incorporará muchos más MSCs y estaciones de base que las mostradas en la Figura 1. Las estaciones de base 3, 4, 5, 7, 8 y 9 tienen cada una de ellas una conexión dedicada (no compartida) a su MSC 2 ó MSC 6 – típicamente una conexión de cable. Esto impide que las velocidades de transmisión se reduzcan debido a la congestión provocada por otro tráfico.

30 Cada abonado a la red está provisto de una tarjeta inteligente o SIM que, cuando se asocia con el terminal móvil del usuario identifica al abonado a la red. La tarjeta SIM está pre-programada con un único número de identificación, la “Identidad de Abonado Móvil Internacional” (IMSI – International Mobile Subscriber Identity, en inglés), que no es visible en la tarjeta y no es generalmente conocido para el abonado. El abonado es emitido con un número conocido públicamente, es decir, el número de teléfono del abonado, por medio del cual se inician las llamadas al abonado por parte de los llamantes. Este número es el MSISDN.

35 La red de núcleo 12 incluye un registro de ubicación local (HLR – Home Location Register, en inglés) 10, el cual, para cada abonado de la red, almacena la IMSI y el correspondiente MSISDN junto con otros datos del abonado, tales como la actual o la última Área de Ubicación conocida del terminal móvil del abonado.

40 Cuando un terminal móvil está en modo de reposo selecciona una celda para ser sincronizado con ella (la celda primaria) basándose en la potencia de la señal recibida más fuerte. Para conseguir esto, el terminal periódicamente monitoriza la potencia de la señal recibida desde la celda primaria y un conjunto de hasta seis celdas vecinas. A medida que el terminal se mueve, el conjunto de celdas monitorizadas así como la celda primaria pueden cambiar.

45 Siempre que un terminal móvil (que está en modo de reposo) selecciona una nueva celda primaria, detectará que pertenece a un Área de Ubicación diferente (a través de la Identidad de Área de Ubicación que cada celda está emitiendo) de la de su celda primaria seleccionada previamente. El terminal móvil enviará por lo tanto a continuación una solicitud de actualización de área de ubicación a la red de núcleo 12.

50 Con estos antecedentes en mente, se describirán ahora implementaciones de las realizaciones de la invención, en relación con la situación de un abonado que está utilizando el terminal móvil 1 para iniciar un Servicio Basado en la Ubicación (LBS – Location Based Service, en inglés).

Cuando un usuario desea utilizar el terminal móvil para iniciar un LBS, el terminal pasará del modo de reposo al modo activo o dedicado, y comenzará la fase de establecimiento para a sesión de LBS. Hay tres casos diferentes en los que la RSS puede ser aprovechada para soportar un servicio de LBS:

- 5 (a) Caso Regular: En este caso el terminal en la fase de establecimiento de un LBS (es decir, estando en modo dedicado) mide la RSS de las celdas primaria y vecinas y sube esta información a la red. Dado que es terminal está en modo dedicado también puede proporcionar el parámetro Avance de Sincronización (TA – Timing Advance, en inglés) que se hace disponible tan pronto como un canal de comunicación está siendo ajustado para soportar la sesión. La red en este caso puede emplear la técnica de localización mediante “Identidad Global de Celda Mejorada “Enhanced Cell Global Identity, en inglés) para situar al terminal (es decir, aprovechar la información de la celda de servicio, el parámetro Avance de Sincronización y las mediciones de la RSS para llevar a cabo la localización del terminal). Alternativamente, pueden aplicarse otras técnicas de localización híbridas para aprovechar cualquier otro tipo de medición de la red de telefonía móvil u otra tecnología (por ejemplo GPS) combinada con la RSS medida y el Avance de Sincronización.
- 10
- 15 (b) Concepto de STAMP (Localización de Móvil Asistida por Terminal Estadístico – Statistical Terminal Assisted Mobile Positioning, en inglés): aunque el terminal 1 esté en modo de reposo estará midiendo periódicamente la RSS de sus celdas primaria y vecinas. Realiza esto midiendo y almacenando, típicamente en una lista con marcas de tiempo para un tamaño predeterminado, las mediciones de la RSS de su celda primaria así como de sus celdas vecinas. En la fase de establecimiento del LBS el terminal sube a la red la lista de las mediciones de RSS más recientes junto con una única medición del TA que fue realizada después de que el terminal entró en el modo dedicado. La red aprovecha la serie de mediciones de la RSS en el tiempo con el fin de inferir un conjunto de posiciones históricas del terminal para proporcionar una estimación de la posición real del terminal. A continuación mediante la aplicación del filtrado estadístico de las estimaciones de la posición del terminal resultantes la red puede proporcionar una estimación refinada y más precisa de la posición actual del terminal. Además pueden identificarse una gran variedad de técnicas híbridas en el caso de que el concepto de STAMP sea aprovechado dependiendo de los parámetros adicionales que pueden ser monitorizados bien en modo de reposo o en el modo dedicado.
- 20
- 25 (c) Rastreo del Terminal Móvil (MT – Mobile Terminal, en inglés): Este concepto se refiere a una categoría específica de LBS en la cual tras el establecimiento de la sesión de LBS la red rastrea de manera continua la posición del terminal basándose en las mediciones de la RSS y del TA regulares llevadas a cabo por el terminal. En este caso cualquier técnica de ECGI puede ser aplicada o cualquier técnica híbrida que aproveche las mediciones de la RSS y del TA disponibles.
- 30

35 Debe considerarse que la expresión “estación de base” engloba tanto a macro estaciones de base estándar que soportan múltiples celdas, como también micro o pico celdas así como Puntos de Acceso como femto celdas. El número de celdas vecinas que son monitorizadas por el terminal móvil normalmente varía de una a seis, dependiendo de la ubicación y de la densidad de las celdas. En un entorno urbano, el número típico de celdas vecinas visibles puede ser seis debido a la alta densidad de estaciones de base. Como las estaciones de base soportan una o más celdas (el número típico es tres en una red celular) el número de celdas vecinas monitorizadas corresponde a una a seis estaciones de base diferentes.

40 Con referencia a la Figura 2, un proceso de calcular la ubicación del terminal móvil basado en un solo conjunto de mediciones de RSS implica las siguientes etapas:

- 40 (a) Determinación de mediciones de la RSS (o mediciones de RSS y del Avance de Sincronización (TA – Timing Advance, en inglés) (etapa 21);
- (b) Estimación de la distancia de Terminal Móvil a Estación de Base (MT-BS – Mobile Terminal-Base Station, en inglés), particularmente basándose en modos empíricos de pérdida de ruta como Hata o Cost231 (etapa 22);
- 45 (c) Trilateración / Triangulación de las distancias estimadas entre el Terminal Móvil y tres Estaciones de Base adyacentes diferentes (etapa 23); y
- (d) Determinación de las coordenadas de posición del terminal (etapa 24).

50 En las comunicaciones mediante telefonía móvil la RSS de una Estación de Base en una cierta ubicación es variable con el tiempo y consiste en dos factores principales, a saber:

- i) el lento desvanecimiento o medio local que se refiere a la pérdida de ruta y a la naturaleza del terreno. Este factor se caracteriza por un comportamiento Log-normal; y
- ii) el desvanecimiento a corto plazo o rápido que es provocado por los efectos de las múltiples rutas.

El desvanecimiento de Rayleigh o de Rician son los modelos relevantes para el desvanecimiento rápido, dependiendo de si hay una línea de visión o no, respectivamente.

De acuerdo con la operación del terminal móvil estándar, la RSS es medida periódicamente y promediada sobre un periodo de tiempo dado. En GSM se realizan mediciones cada 480 ms mientras se está en el modo dedicado y cada 2 – 5 s mientras se está en el modo de reposo.

5 Para terminales que se están moviendo, el desvanecimiento rápido puede ser suavizado promediando sobre $2T = 40$ – 80 periodos de desvanecimiento. El componente de desvanecimiento lento resultante expresado en decibelios puede ser modelizado como una variable aleatoria Gaussiana con una desviación estándar del orden de 8 db – 12 db. Para eliminar el impacto del desvanecimiento lento la señal debe ser promediada para periodos de tiempo más largos correspondientes a una distancia de cientos de longitudes de onda cubiertas por un terminal en movimiento (es decir, del orden de 100 m – 200 m para una operación en 900 MHz). En tal caso la señal promediada
10 proporciona el llamado “componente medio” que corresponde a la RSS que es una función directa de la pérdida de ruta que ocurre debido a la distancia del MT desde la BS. Los modelos de pérdida de propagación de radio (por ejemplo Hata y cost231) pueden ser entonces aprovechados para estimar la distancia entre el MT y una BS. Estos modelos indican que la distancia MT-BS es una función no lineal de la RSS, un hecho que afecta en gran manera a la manera en la que se propagan los errores de RSS a la estimación de la localización del MT.

15 Las siguientes fórmulas ilustran los modelos Hata y Cost231:

$$\begin{aligned} \text{Hata : } R_x(i) &= -K(i) - [69,5 + 26,16 \log(f(i)) - 13,82 \log(h_{bs}(i)) + [44,9 - 6,55 \log(h_{bs}(i))] \cdot \log(d(i)) - c(h_{mt})] \\ \text{Cost 231 : } R_x(i) &= -K(i) - [46,33 + 33,9 \log(f(i)) - 13,82 \log(h_{bs}(i)) + [44,9 - 6,55 \log(h_{bs}(i))] \cdot \log(d(i)) - \alpha(h_{mt}) + c] \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

- $R_x(i)$ es la RSS de la BS i en la ubicación del terminal móvil x en dbm,
- $K(i)$ es la potencia de transmisión de la BS i en dbm,
- 20 - $f(i)$ es la frecuencia del transmisor en MHz,
- $h_{bs}(i)$ es la altura de la BS i en m,
- h_{mt} es la altura del terminal móvil en m,
- $d(i)$ es la distancia MT-BS i en km,
- $c(h_{mt})$, $\alpha(h_{mt})$ son funciones de entorno (por ejemplo, urbano, suburbano) dependiendo de la altura del
25 terminal móvil y
- c es una constante específica para un modelo que depende del entorno de propagación por radio.

Estos modelos de predicción de pérdida de ruta proporcionan la RSS en función de la distancia del MT desde la BS.

La estimación de la distancia entre el MT y la BS basada en la RSS se determina basándose en cálculos inversos de los modelos de predicción de pérdida de ruta de propagación:

$$\hat{d}(i) = 10^{\left[\frac{\hat{R}_x(i) + A(i)}{B(i)} \right]} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Hata: } A(i) &= K(i) + 69,5 + 26,16 \log(f(i)) - 13,82 \log(h_{bs}(i)) - c(h_{mt}) \\ \text{Cost231: } A(i) &= K(i) + 46,33 + 33,9 \log(f(i)) - 13,82 \log(h_{bs}(i)) - \alpha(h_{mt}) + c \\ B(i) &= 44,9 - 6,55 \log(h_{bs}(i)) \end{aligned}$$

30

Donde:

$\hat{d}(i)$ es la estimación resultante de la distancia entre el MT y la BS i,

$\hat{R}_x(i)$ es la RSS medida en el MT de posición x.

$B(i)$: está definido en esta memoria como un parámetro para simplificar el análisis de las ecuaciones.

35 Para ilustrar el comportamiento estadístico del estimador proporcionado en la Ec. (2) consideramos lo siguiente: en el caso de que el modelo de predicción de pérdida de ruta esté adecuadamente calibrado para una región geográfica

específica entonces podemos asumir que la RSS puede ser modelizada como una variable N aleatoria distribuida Gaussiana / Normal. Basándose en la Ec. (2) puede concluirse que la distancia MT-BS estimada seguirá una distribución Log-normal (LN):

$$\begin{aligned} \hat{R}_x(i) \sim N(R_x(i), \sigma_{R_x}^2) &\Rightarrow \hat{d}(i) \sim LN(\mu_d(i), \sigma_d^2(i)) \\ \mu_d(i) = \ln[d(i)] &= \ln\left[10^{\frac{R_x(i)+A(i)}{B(i)}}\right], \quad \sigma_d^2(i) = \left(\frac{\ln(10)}{B(i)}\right)^2 \sigma_{R_x}^2 = \beta(i) \cdot \sigma_{R_x}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

5 donde $\sigma_{R_x}^2$ es la varianza de la distribución Gaussiana de la RSS, $\mu_d(i)$ y $\sigma_d^2(i)$ son el valor medio y la varianza de la distribución Log-normal $\hat{d}(i)$ respectivamente. Además, $\beta(i)$ se define aquí como un parámetro para simplificar el análisis de las ecuaciones.

10 Debe observarse que la noción $R_x(i)$ corresponde al valor de la RSS proporcionado por la Ec. (1) cuando se utiliza la distancia MT-BS $d(i)$ real. La distribución proporcionada en la Ec (3) asume que el error del resto de los parámetros implicados en la Ec. (1) es despreciable en comparación con el error de la RSS. Además, las ecuaciones anteriores aplican para las antenas de celda omni direccionales. De la Ec. (2) el valor medio E, la varianza V y el Error Cuadrático Medio (MSE – Mean Squared Error, en inglés) de la distancia MT-BS pueden ser estimados:

$$\begin{aligned} E(\hat{d}(i)) &= d(i) \cdot e^{\frac{\beta(i)\sigma_{R_x}^2}{2}} \\ V(\hat{d}(i)) &= d(i)^2 \cdot e^{\beta(i)\sigma_{R_x}^2} \cdot [e^{\beta(i)\sigma_{R_x}^2} - 1] \\ MSE(\hat{d}(i)) &= E\left[(\hat{d}(i) - d(i))^2\right] = d(i)^2 \cdot \left[e^{2\beta(i)\sigma_{R_x}^2} - 2 \cdot e^{\frac{\beta(i)\sigma_{R_x}^2}{2}} + 1\right] \end{aligned} \quad (4)$$

15 De la Ec. (4), puesto que la varianza y el MSE no son iguales, la estimación de la distancia MT-BS proporcionada en la Ec. (2) está desviada. Esta estimación no es por lo tanto probable que proporcione mucha mejora en la precisión de la estimación de la distancia.

Estimador de distancia no desviado

De acuerdo con una primera realización de la invención, a una distancia MT-BS $d(i)$ dada, se ha obtenido un estimador de distancia no desviado, tal como proporciona la siguiente ecuación:

$$\hat{d}_1(i) = c_1(i) \cdot \hat{d}(i) = e^{-\frac{\beta(i)\sigma_{R_x}^2}{2}} \cdot \hat{d}(i) = e^{-\frac{\beta(i)\sigma_{R_x}^2}{2}} \cdot 10^{\frac{R_x(i)+A(i)}{B(i)}} \quad (5)$$

20 Donde $c_1(i) = e^{-\frac{\beta(i)\sigma_{R_x}^2}{2}}$ es el factor aplicado al estimador básico para conseguir el estimador de distancia MT-BS no desviado y $\beta(i) = \left(\frac{\ln(10)}{B(i)}\right)^2$.

En realidad el valor medio de la estimación de la distancia resulta:

$$E(\hat{d}_1(i)) = e^{-\frac{\beta(i)\sigma_{R_x}^2}{2}} \cdot E(\hat{d}(i)) = d(i) \quad (6)$$

25 La varianza y el MSE en este caso son iguales (propiedad de los estimadores no desviados):

$$V(\hat{d}_1(i)) = MSE(\hat{d}_1(i)) = d(i)^2 \cdot [e^{\beta(i)\sigma_{R_x}^2} - 1] \quad (7)$$

Estimador de distancia de Error Cuadrático Medio (MSE) Mínimo

De acuerdo con una segunda realización de la invención el estimador de la distancia MT-BS de MSE mínimo puede ser conseguido mediante la introducción de un factor $c_2(i)$ y la minimización de la siguiente función:

$$MSE(\hat{d}_2(i)) = E\left[\left(\hat{d}_2(i) - d(i)\right)^2\right] = d^2(i) \cdot \left[c_2^2(i) \cdot e^{\beta(i)2\sigma_{R_x}^2} - 2c_2(i) \cdot e^{\beta(i)\frac{\sigma_{R_x}^2}{2}} + 1 \right] \quad (8)$$

La siguiente ecuación muestra que el MSE está optimizado para el siguiente valor de $c_2(i)$:

$$c_2(i) = e^{-\beta(i)\frac{3\sigma_{R_x}^2}{2}} \quad \text{i.e.,} \quad \hat{d}_2(i) = e^{-\beta(i)\frac{3\sigma_{R_x}^2}{2}} \cdot 10^{\frac{\hat{R}_s(i) + A(i)}{B(i)}} \quad (9)$$

Para este estimador, el MSE, el valor medio E y la varianza V de la distancia MT-BS se expresan como sigue:

$$\begin{aligned} \min\{MSE(\hat{d}_2(i))\} &= d^2(i) \cdot \left[1 - e^{-\beta(i)\sigma_{R_x}^2} \right] \\ E(\hat{d}_2(i)) &= c_2(i) \cdot E(\hat{d}(i)) = d(i) \cdot e^{-\beta(i)\sigma_{R_x}^2} \\ V(\hat{d}_2(i)) &= c_2^2(i) \cdot V(\hat{d}(i)) = d^2(i) \cdot e^{-\beta(i)2\sigma_{R_x}^2} \cdot \left[e^{\beta(i)\sigma_{R_x}^2} - 1 \right] \end{aligned} \quad (10)$$

La Figura 3 proporciona una comparación del error cuadrático medio de la distancia MT-BS para tres valores σ_{R_x} diferentes (4 db, 8 db y 12 db) para los siguientes estimadores:

- 10 (a) estimador básico ($j = 0$, Ec. (2)),
- (b) estimador no desviado ($j = 1$, Ec. (5) primera realización) y
- (c) estimador de MSE mínimo ($j = 2$, Ec. (9) segunda realización).

15 El índice “j” ha sido asignado arbitrariamente para asistir en la identificación de estimadores en fórmulas subsiguientes. Como puede verse en la Figura 3, incluso aunque el error aumente con los crecientes valores de la desviación estándar de la RSS σ_{R_x} , el estimador no desviado y el estimador de MSE mínimo, en particular, proporcionan una significativa mejora en el error de estimación de la distancia especialmente para valores de σ_{R_x} elevados.

20 Como puede verse en la Figura 2, la determinación de la distancia es un componente de la técnica de localización de terminal basada en la RSS, siendo otro componente la trilateración / triangulación. Por lo tanto, esta es otra área en la que los cálculos de los estimadores de distancia pueden ser refinados para reducir el error en la estimación de la posición.

Análisis del error de triangulación

25 En este aspecto, la triangulación es un método geométrico que utiliza distancias estimadas entre el MT y tres BSs diferentes para proporcionar la posición del MT. La trilateración es una técnica relacionada que, además de la posición del MT, puede determinar la velocidad y elevación del MT.

La triangulación se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d^2(i), \quad \text{for } i=1,2,3 \quad (11)$$

30 Donde (x, y) son las coordenadas de posición del terminal móvil y (x_i, y_i) $i = 1, 2, 3$ son las coordenadas de las estaciones de base (típicamente se requieren 3 para los cálculos de triangulación). Restando la 3ª ecuación ($i = 3$) de la 1ª ($i = 1$) y la 2ª ($i = 2$) de la 1ª ($i = 1$) obtenemos:

$$-2x(x_1 - x_i) - 2y(y_1 - y_i) = d^2(1) - d^2(i) - x_1^2 + x_i^2 - y_1^2 + y_i^2, \quad i=2,3 \quad (12)$$

De la ec. (12) es factible estimar la posición del terminal (x, y) como sigue:

$$\begin{aligned} x &= \frac{2}{D} [-(y_2 - y_3) \cdot d^2(1) + (y_1 - y_3) \cdot d^2(2) - (y_1 - y_2) \cdot d^2(3) - (y_1 - y_2) \cdot (y_1^2 - y_3^2 + x_1^2 - x_3^2) + (y_1 - y_3) \cdot (y_1^2 - y_2^2 + x_1^2 - x_2^2)] \\ y &= \frac{2}{D} [(x_2 - x_3) \cdot d^2(1) - (x_1 - x_3) \cdot d^2(2) + (x_1 - x_2) \cdot d^2(3) + (x_1 - x_2) \cdot (y_1^2 - y_3^2 + x_1^2 - x_3^2) - (x_1 - x_3) \cdot (y_1^2 - y_2^2 + x_1^2 - x_2^2)] \end{aligned} \quad (13)$$

La Ec. (13), por simplicidad, puede escribirse también como:

$$z = \frac{1}{D} \left[\sum_{i=1}^3 a_z(i) \cdot d^2(i) + \Omega_z \right], \quad z=x,y \quad (14)$$

5 Donde Ω_z y $a_z(i)$, $i = 1, 2, 3$, $z = x, y$ puede ser directamente inferida de la Ec. (13) y D es proporcionada por la siguiente ecuación:

$$D = 4 \cdot (x_1 - x_2) \cdot (y_1 - y_3) - 4 \cdot (x_1 - x_3) \cdot (y_1 - y_2) = 4 \cdot \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} \quad (15)$$

10 La Ec. (15) indica que D es igual a 4 veces el área del triángulo definido por las tres BSs. Resulta claro que a menos que las tres BSs estén en la misma línea tenemos $D \neq 0$, lo que lleva a una única solución en el problema de triangulación descrito por la Ec. (14). Debe observarse que esta propiedad aplica para cualquier conjunto de distancias $d(i)$ $i = 1, 2, 3$ incluso si hay error en su estimación. Por lo tanto el empleo de este planteamiento es aplicable a la localización basada en la RSS y en la ECGI, donde las distancias estimadas entre el MT y las tres BSs definitivamente contienen error.

El error de la posición del MT tal como se estima mediante triangulación es proporcionado por la siguiente ecuación:

$$\hat{z}_j = \frac{1}{D} \left[\sum_{i=1}^3 a_z(i) \cdot \hat{d}_j^2(i) + \Omega_z \right] = z + \frac{1}{D} \left[\sum_{i=1}^3 a_z(i) \cdot [\hat{d}_j^2(i) - d^2(i)] \right], \quad z=x,y \quad (16)$$

15 Donde j es el índice del estimador de la distancia (es decir, $j = 0$ corresponde a un estimador de distancia básico (Ec. 2)).

Asumiendo un conjunto dado de distancias entre el MT y las tres BSs diferentes $d(i)$ ($i = 1, 2, 3$), el valor medio E y la varianza V de las coordenadas del MT estimadas son los siguientes (asumiendo que las variables aleatorias $\hat{d}_j(i)$, $i = 1, 2, 3$ son independientes):

$$E(\hat{z}_j) = z + \frac{1}{D} \left[\sum_{i=1}^3 a_z(i) \cdot d^2(i) \cdot [c_j^2(i) \cdot e^{\beta(i) \cdot 2\sigma_k^2} - 1] \right], \quad z=x, y \text{ and } j=0,1,2 \quad (17a)$$

$$V(\hat{z}_j) = \frac{1}{D^2} \left[\sum_{i=1}^3 a_z^2(i) \cdot d^4(i) \cdot c_j^4(i) \cdot e^{2\beta(i) \cdot 4\sigma_k^2} \cdot [e^{2\beta(i) \cdot 4\sigma_k^2} - 1] \right], \quad z=x, y \text{ and } j=0,1,2 \quad (17b)$$

20

Y el MSE en la estimación de las coordenadas del terminal será ($z = x, y$ y $j = 0, 1, 2$):

$$\begin{aligned} MSE(\hat{z}_j) &= \frac{1}{D^2} \left[\sum_{i=1}^3 a_z^2(i) \cdot d^4(i) \cdot [c_j^4(i) \cdot e^{2\beta(i) \cdot 4\sigma_k^2} - 2c_j^2(i) \cdot e^{2\beta(i) \cdot 2\sigma_k^2} + 1] + \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 a_z(i) \cdot a_z(k) \cdot d^2(i) \cdot d^2(k) \cdot f_j(i,k) \right] \\ f_j(i,k) &= [c_j^2(i) \cdot c_j^2(k) \cdot e^{2\beta(i) \cdot \beta(k) \cdot 4\sigma_k^2} - c_j^2(i) \cdot e^{2\beta(i) \cdot 2\sigma_k^2} - c_j^2(k) \cdot e^{2\beta(k) \cdot 2\sigma_k^2} + 1] \end{aligned} \quad (18)$$

Estimador de Coordenadas del terminal no desviado

25 De acuerdo con una tercera realización de la invención, se proporciona un estimador de la posición de un terminal móvil (MT – Mobile Terminal, en inglés), que se basa en los cálculos del proceso de trilateración / triangulación. Este estimador se define para satisfacer la siguiente condición:

$$E(\hat{z}_3) = z \quad (z=x,y)$$

Donde z ($z = x, y$) es las coordenadas de posición del MT (2 dimensiones) y \hat{z}_3 ($z=x,y$) corresponde a las coordenadas de posición del MT estimadas basadas en el estimador 3.

- 5 Para conseguir una estimación no desviada de las coordenadas de posición del MT (x, y), se introduce el siguiente estimador de distancia de MT-BS no desviado:

$$\hat{d}_3(i) = c_3(i) \cdot \hat{d}(i), \quad \text{with } c_3(i) = e^{-\beta(i)\sigma_n^2} \quad (19)$$

El valor medio E , la varianza V y el MSE de la estimación de coordenadas del MT tras la triangulación resulta:

$$E(\hat{z}_3) = z, \quad V(\hat{z}_3) = \text{MSE}(\hat{z}_3) = \frac{1}{D^2} \left[\sum_{i=1}^3 a_i^2(i) \cdot d^4(i) \cdot \left[e^{4\beta(i)\sigma_n^2} - 1 \right] \right], \quad z=x, y \quad (20)$$

Como es de esperar el MSE es igual a la varianza en este caso debido a la naturaleza no desviada del estimador.

10 **Estimador de MSE de coordenadas del terminal**

De acuerdo con una cuarta realización de la invención, se proporciona un estimador de MSE por debajo del óptimo de la posición del terminal móvil (MT – Mobile Terminal, en inglés), que se basa en el resultado del proceso de triangulación, utilizando un estimador de distancia apropiado.

- 15 Un estimador por debajo del óptimo se basa en la Ec. (18), donde el MSE de la estimación de las coordenadas del MT se reduce minimizando las siguientes cantidades:

$$\min \left\{ E \left[\left(\hat{d}^2(i) - d^2(i) \right)^2 \right] \right\}, \quad i=1,2,3 \quad (21)$$

Basándose en la Ec. (18), la minimización de las cantidades de la Ec. (21) tiene lugar cuando se aplica el estimador siguiente:

$$\hat{d}_4(i) = c_4(i) \cdot \hat{d}(i), \quad \text{with: } c_4(i) = e^{-3\beta(i)\sigma_n^2}, \quad i=1,2,3 \quad (22)$$

- 20 En este caso, el valor medio y la varianza de las coordenadas del terminal estimadas serán:

$$E(\hat{z}_4) = z + \frac{1}{D} \sum_{i=1}^3 a_i(i) \cdot d^2(i) \cdot \left[e^{-4\beta(i)\sigma_n^2} - 1 \right] \quad (23)$$

$$V(\hat{z}_4) = \frac{1}{D^2} \sum_{i=1}^3 a_i^2(i) \cdot d^4(i) \cdot e^{-8\beta(i)\sigma_n^2} \left[e^{4\beta(i)\sigma_n^2} - 1 \right]$$

Y el MSE resultante será:

$$\text{MSE}(\hat{z}_4) = \frac{1}{D^2} \left[\sum_{i=1}^3 a_i^2(i) \cdot d^4(i) \cdot \left[1 - e^{-4\beta(i)\sigma_n^2} \right] \right] + \frac{1}{D^2} \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^3 a_i(i) \cdot a_k(k) \cdot d^2(i) \cdot d^2(k) \cdot \left[e^{-4\beta(i) \cdot \beta(k) \sigma_n^2} - e^{-4\beta(i)\sigma_n^2} - e^{-4\beta(k)\sigma_n^2} + 1 \right], \quad z=x, y \quad (24)$$

- 25 El estimador en la Ec. (22) está por debajo del óptimo para minimizar óptimamente el MSE de las coordenadas del MT; aplicará el siguiente conjunto de ecuaciones simultáneas:

$$\frac{\partial \text{MSE}(\hat{z}_j(i))}{\partial c_j(i)} = 0 \quad z=x, y \text{ and } i=1,2,3 \quad (25)$$

No obstante, la solución resultante para $c_j(i)$ conduce a una función de las distancias $d(i)$ de MT-BS reales para las cuales los parámetros no son conocidos, de manera que la Ec. 21 no es una solución práctica.

Error de estimación de posición de terminal

- 5 Para ilustrar la efectividad del estimador de coordenadas del terminal no desviado, el error en la estimación de la posición del terminal será analizado basándose en el error introducido en la estimación de las coordenadas del terminal mediante el método de triangulación utilizando este estimador. En este aspecto, el error basado en la posición del terminal puede ser estimado como:

$$\hat{e}_j = \sqrt{(\hat{x}_j - x)^2 + (\hat{y}_j - y)^2} = \sqrt{\Delta \hat{x}_j^2 + \Delta \hat{y}_j^2}, j=0,1,2,3,4 \quad (26)$$

- 10 Como no puede inferirse ninguna distribución obvia para el parámetro anterior se considera una aproximación mediante la siguiente distribución de Rice:

$$\hat{e}_j \sim \text{Rice}(u_e(j), \sigma_e^2(j)) \quad (27)$$

- La aproximación anterior se basa en las siguientes asunciones: $\Delta \hat{x}_j$ y $\Delta \hat{y}_j$ se asume que son variables aleatorias independientes con distribución Gaussiana con valores medios $E(\Delta \hat{x}_j)$, $E(\Delta \hat{y}_j)$ respectivamente y varianza común de $\sigma_e^2(j)$.
- 15

El valor medio y la varianza del error de localización del MT pueden por lo tanto ser aproximados como sigue:

$$E(\hat{e}_j) = \sigma_e(j) \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot L_{1/2} \left(-\frac{u_e^2(j)}{2\sigma_e^2(j)} \right)$$

$$V(\hat{e}_j) = 2\sigma_e^2(j) + u_e^2(j) - \frac{\pi\sigma_e^2(j)}{2} \cdot L_{1/2}^2 \left(-\frac{u_e^2(j)}{2\sigma_e^2(j)} \right) \quad (28)$$

El parámetro $u_e(j)$ es proporcionado por la siguiente ecuación:

$$u_e(j) = \sqrt{E(\Delta \hat{x}_j)^2 + E(\Delta \hat{y}_j)^2} \quad (29)$$

- 20 Para estimar $u_e(j)$ para una ubicación del MT dada (por ejemplo las distancias $d(i)$, $i = 1, 2, 3$ dadas), la Ec (16) puede ser aprovechada, lo que define el error de la posición del MT como estimado mediante triangulación. Por lo que respecta al parámetro $\sigma_e^2(j)$, puesto que la asunción de varianza común para $\Delta \hat{x}_j$ y $\Delta \hat{y}_j$ no es válida se aplica la siguiente aproximación a partir de la definición de la varianza del error y de las Ecs. (26), (28):

$$V(\hat{e}_j) = E(\hat{e}_j^2) - E(\hat{e}_j)^2 = E(\Delta \hat{x}_j^2 + \Delta \hat{y}_j^2) - \frac{\pi\sigma_e^2(j)}{2} \cdot L_{1/2}^2 \left(-\frac{u_e(j)}{2\sigma_e^2(j)} \right) \quad (30)$$

- 25 De las Ecs.(28), (29), (30) obtenemos:

$$\sigma_e^2(j) = \frac{1}{2} [V(\Delta \hat{x}_j) + V(\Delta \hat{y}_j)] \quad (31)$$

Los parámetros $V(\Delta \hat{x}_j)$ y $V(\Delta \hat{y}_j)$ para una posición del MT dada son proporcionados por la Ec. (17) como:

$$V(\Delta \hat{z}_j) = V(\hat{z}_j - z) = V(\hat{z}_j), z=x,y \quad (32)$$

La aplicación del estimador de coordenadas del MT no desviado ($j = 3$, véase también la ec. (19)) conduce a un valor medio de cero tanto para $\Delta \hat{x}_3$ como para $\Delta \hat{y}_3$. En este caso $u_e(j)$ resulta también cero y la distribución del error de localización del MT puede ser aproximada mediante una distribución de Rayleigh.

5 Para ilustrar la efectividad de los estimadores, se ha desarrollado un modelo de simulación. El modelo consideraba un área geográfica con un conjunto de estaciones de base que soportan cada una tres celdas, correspondiendo cada celda a un sector de 120 grados de igual radio. Durante la simulación la posición del terminal móvil fue estimada aleatoriamente a partir del modelo Hata. Se añadió entonces un ruido blanco Gaussiano con varianza σ_{Rx}^2 a la RSS resultante y el proceso de estimación de coordenadas del terminal móvil sufrido, utilizando el estimador de base ($j = 0$), el estimador no desviado ($j = 1$) y el estimador de MSE mínimo ($j = 2$).

10 La posición estimada del terminal que fue obtenida se comparó entonces con la posición del terminal real para determinar el error de localización (Ec. (26)). En este aspecto, la Figura 4 proporciona el error medio resultante de la estimación de la posición del terminal móvil utilizando los diferentes estimadores presentados en este documento ($j = 0, 1, 2, 3, 4$) para una variedad de σ_{Rx} (4 db, 8 db y 12 db) y para un radio de celda de 1500 m. Para resumir los estimadores mostrados en la Figura 4:

- El estimador 0 ($j = 0$) es el estimador de distancia desviado básico de la Ec. 2;
- El estimador 1 ($j = 1$) es el estimador de distancia no desviado de la Ec. 5;
- El estimador 2 ($j = 2$) es el estimador de distancia del MSE Mínimo de la Ec. 9;
- El estimador 3 ($j = 3$) es el estimador de coordenadas del terminal no desviado de la Ec. 19; y
- 20 ➤ El estimador 4 ($j = 4$) es el estimador del MSE de coordenadas del terminal por debajo del óptimo de la Ec. 22.

La Figura 4 indica que el estimador del MSE de coordenadas del MT por debajo del óptimo ($j = 4$) proporciona la mejor precisión. También, el estimador del MSE de distancia mínima ($j = 2$) se comporta mejor que el estimador de coordenadas del MT no desviado ($j = 3$). Resulta claro a partir de la Figura 4 que se consigue una significativa ventaja mediante los estimadores de la presente invención, específicamente para valores elevados de la desviación estándar de la RSS (σ_{Rx}). No obstante, incluso el estimador de mejor rendimiento ($j = 4$) lleva a una precisión del orden de 500 m.

Con el fin de mostrar la aplicabilidad de estos estimadores para la localización basada en la RSS se han analizado un conjunto de técnicas alternativas, a saber: CGI (Identidad Global de Celda – Cell global Identity, en inglés), CGI+TA y ECGI.

De acuerdo con la técnica de la CGI sólo se tiene en cuenta la Identidad de Celda así que se ha asumido que el MT está situado en el centroide de la cobertura de la celda.

En la técnica de CGI+TA la distancia entre el MT y la BS se estima basándose en el parámetro de Avance de Sincronización. De acuerdo con las especificaciones del GSM, el parámetro Avance de Sincronización es un entero con un intervalo de 0 a 63 y permite al MT mientras esté en modo dedicado estimar la correcta sincronización de la transmisión hacia la BS. Una unidad de Avance de Sincronización corresponde a una distancia de aproximadamente 550 m. Por lo tanto, para esta técnica hemos asumido que el Avance de Sincronización corresponde al retardo exclusivamente provocado por la distancia MT-BS de manera que la distancia es aproximada mediante la ecuación siguiente:

$$d_{TA} = TA \cdot 550m + \frac{550}{2}m, TA=0,1,2,\dots,63 \quad (33)$$

Por lo tanto, en la técnica de CGI+TA se ha asumido que la posición del MT está a una distancia d_{TA} y en un ángulo idéntico al azimut de la antena de la celda.

En ECGI, la distancia desde la BS de la celda primaria se estima también basándose en el Avance de Sincronización de acuerdo con la Ec. (33). A continuación basándose en la RSS la distancia desde otras dos BSs se estima y se aplica triangulación. Por lo tanto, el análisis para los estimadores de distancia MT-BS basados en la RSS aplica también a la técnica de ECGI.

- La precisión de estas técnicas, a saber, CGI, CGI+TA, basadas en RSS y ECGI se compara en la Figura 5 para $\sigma_{Rx} = 8$ dB. Las técnicas basadas en la RSS (es decir, RSS y ECGI) se proporcionan para los estimadores básico y el de mejor rendimiento ($j = 0$ y $j = 4$ respectivamente). La Figura 5 indica que las técnicas de RSS y ECGI que utilizan el estimador desviado básico proporcionan menos precisión que las técnicas más simples de CGI y CGI+TA. El estimador básico no es por lo tanto un planteamiento comercialmente atractivo. El mejor estimador de rendimiento ($j = 4$) mejora significativamente el rendimiento de la localización basada tanto en la RSS como en la ECGI; no obstante, la precisión resultante es todavía del orden de la precisión proporcionada por CGI y CGI+TA respectivamente. En este contexto, el interés comercial para aplicar localización basada en RSS o en ECGI es bastante cuestionable.
- Por lo tanto, de acuerdo con otra realización de la invención, los estimadores se utilizan en la técnica de STAMP descrita en el documento GB2416461. En este aspecto, esta técnica recoge una serie en el tiempo de mediciones de la RSS mientras que el MT está en modo de reposo. El proceso de estimación de la posición del terminal de acuerdo con la técnica de STAMP en este ejemplo es llevado a cabo aplicando un filtro de Kalman adaptativo a las coordenadas de posición del terminal estimadas (es decir, la salida del proceso de la Figura 2). La principal asunción requerida por el filtro de Kalman en este caso, es que la diferencia entre las coordenadas estimadas y reales del terminal sigue una distribución normal cero. Como se muestra en el análisis de la sección previa del documento esta asunción puede ser aproximada utilizando el estimador de distancia MT-BS que conduce a una estimación no desviada de las coordenadas del terminal (véase la Ec. (19)).
- La Figura 6 representa el rendimiento de la técnica del STAMP para los cinco estimadores diferentes ($j = 0$ a 5). Este gráfico muestra que el estimador 3 (es decir, el estimador de coordenadas del MT no desviado) es el que se comporta mejor, con un error de localización medio del orden de 200 m (c.f. la Figura 4, donde el error de localización medio para el mejor estimador de la localización basada en la RSS fue del orden de 550 m).
- La Figura 7 ilustra un gráfico que muestra el rendimiento de la técnica de Rastreo del MT para cada uno de los estimadores $j = 1$ a 4. Como se ha descrito anteriormente, el Rastreo del MT es una técnica en la cual tras la fase de establecimiento de una sesión de LBS la red monitoriza constantemente la posición del Terminal Móvil, aprovechando las mediciones regulares de la RSS y del TA. Por lo tanto, en comparación con la técnica de STAMP en el Rastreo del MT las mediciones de la RSS son más frecuentes (cada 480 ms en GSM) y el parámetro TA está siempre disponible (puesto que el terminal está en modo dedicado).
- La Figura 8 proporciona una comparación global de las diferentes técnicas, mostrando la diferencia global entre el planteamiento que se comporta peor (es decir, la localización basada en RSS utilizando el Estimador 0) y las técnicas que se comportan mejor, STAMP y Rastreo del MT utilizando el Estimador 3.
- Más específicamente, la Figura 8 proporciona una comparación entre la precisión proporcionada por la localización basada en la RSS (Estimador 1), CGI, CGI+TA, ECGI (Estimador 4), STAMP (Estimador 0 y 3) y el Rastreo del MT. Como puede verse en esta figura, el rendimiento del STAMP no optimizado (es decir, con Estimador 0) plantea el método de la CGI a pesar del hecho de que proporciona significativas mejoras de la localización basada en RSS básica.
- El STAMP optimizado (es decir, cuando se aprovecha el estimador de coordenadas del MT no desviado $j = 3$) claramente se comporta mejor que las técnicas de CGI, CGI+TA y ECGI. Además la precisión de la localización del MT resultante para este STAMP optimizado está en el intervalo de 100 m – 200 m incluso para valores de radio de celda elevados (Figura 8) y también para valores de desviación estándar de la RSS elevados (Figura 6). El rendimiento de la técnica de STAMP corresponde a una mejora de aproximadamente el 50% de la precisión en comparación con las técnicas de CGI, CGI+TA y ECGI.
- Esto permite que los estimadores optimizados utilizados junto con técnicas como STAMP puedan proporcionar resultados ventajosos, y de acuerdo con esto es probable que sean muy prometedores en términos de explotación comercial. STAMP es una técnica particularmente ventajosa, puesto que puede ser implementada únicamente utilizando modificaciones de software, lo que reduce los costes de despliegue.
- La precisión del Rastreo del MT basado en el estimador 3 (es decir, que utiliza el estimador 3 para estimar las distancias entre el MT y las BSs segunda y tercera y el Área de Rastreo (TA – Tracking Area, en inglés) conocida para la estimación de la distancia desde la primera BS) es mayor que la STAMP optimizada por dos razones principales:
- el aprovechamiento del TA que es nuestro modelo de simulación se considera siempre correcto (algo que no siempre es cierto en redes reales) y
 - el periodo de muestreo más corto aplicado al rastreo del MT (480 ms para una sesión activa en GSM en comparación con 2 – 5 s durante el modo de operación en reposo del MT).

Sobre todo, la Figura 8 muestra los beneficios empíricos que se pueden conseguir mediante los estimadores de la presente invención, particularmente cuando se combinan con técnicas de determinación de posición existentes, tales como STAMP y rastreo del MT.

5 Aunque el análisis proporcionado en el modelo de simulación ha utilizado algunas asunciones que no son completamente aplicables en una red real (por ejemplo, antenas omni direccionales), se considera no obstante que el modelo es una buena indicación de la precisión teórica que puede ser conseguida mediante la localización basada en la RSS.

10 Los estimadores de estas realizaciones de la presente invención han sido inferidos, teniendo en cuenta la naturaleza de los modelos de propagación de pérdida de ruta (como Hata y Cost231) y también el error introducido en la estimación de la distancia MT-BS así como el error introducido en el proceso de triangulación. Ventajosamente los estimadores se han mostrado, a través de las figuras 6 a 8, para minimizar el impacto del proceso de cálculo de posición en la precisión resultante. Los resultados indican una mejora muy significativa en la localización basada en la RSS cuando se aplica a un único conjunto de mediciones de RSS.

15 De acuerdo con otra mejora de estas realizaciones de la invención, el filtrado estadístico, idealmente filtrado de Kalman o un filtro recursivo equivalente, se aplica a las mediciones / estimaciones utilizadas e inferidas en las técnicas de estimación de posición utilizando estimadores, con el fin de mejorar su precisión.

Más específicamente, en las siguientes localizaciones de la invención, las mediciones / estimaciones en la estimación de la posición del terminal al cual será aplicado el filtrado de Kalman incluyen las mediciones de la RSS, la estimación de la distancia MT-BS y la estimación de la trilateración.

20 Las realizaciones que se van a describir a continuación inferirán la serie de tiempos de las mediciones de la RSS utilizando STAMP y Rastreo del MT, que son las técnicas de determinación de posición que se comportan mejor a partir del análisis anterior.

En estas realizaciones de la invención, se utilizará la siguiente función de filtrado de Kalman, la cual asume que el verdadero estado X en el tiempo k ha evolucionado desde el estado en $(k - 1)$:

$$\begin{aligned} X_k &= \Phi \cdot X_{k-1} + \Gamma \cdot W_k \\ Y_k &= M \cdot X_k + U_k \end{aligned} \quad (34)$$

25 Donde:

Φ es el modelo de transición de estado aplicado al estado previo X_{k-1} ;

Γ es el modelo de entrada de control que se aplica al vector de control W_k ;

Y_k es una medición (u observación) en el tiempo k del estado X_k verdadero;

30 M es el modelo de observación que mapea el espacio de estado verdadero en el espacio observado; y

U_k es un vector aleatorio que representa el ruido de la medición.

Los vectores X_k e Y_k pueden representarse como:

$$X_k = \begin{bmatrix} x_k(1) \\ \dots \\ x_k(N) \\ v_k(1) \\ \dots \\ v_k(N) \end{bmatrix}, Y_k = \begin{bmatrix} \hat{x}_k(1) \\ \dots \\ \hat{x}_k(N) \end{bmatrix} \quad (35)$$

donde N es igual al número de estaciones de base para las cuales se han inferido mediciones de la RSS.

35 Los parámetros definidos en los vectores de la Ec. (35) difieren dependiendo de la medición / estimación a la cual se ha aplicado el filtro de Kalman. Por ejemplo, para:

(a) filtrado de Kalman de la RSS $i = 1, 2, 3$: $x_k(i) = R_x(i)$, la RSS de la BS i , $v_k(i)$ es la velocidad de cambio de la RSS de la BS i (es decir, la velocidad de cambio de $R_x(i)$), y $\hat{x}_k(i) = \hat{R}_x(i)$ es la RSS medida;

(b) Filtrado de Kalman de la Distancia MT-BS $i = 1, 2, 3$: $x_k(i) = d(i)$ la distancia entre el MT y la BS i ,

$v_k(i)$ es la velocidad de cambio de $d(i)$, y $\hat{x}_k(i) = \hat{d}(i)$ es la distancia MT-BS estimada basándose en la RSS medida; y

(c) Filtrado de Kalman de las Coordenadas del MT $i = 1, 2$: $x_k(1) = x$, $x_k(2) = y$, las coordenadas de posición del MT, $v_k(1) = v_x(t_k)$, $v_k(2) = v_y(t_k)$ es la velocidad del MT horizontal y vertical y

$\hat{x}_k(1) = \hat{x}(t_k)$, $\hat{x}_k(2) = \hat{y}(t_k)$ son las coordenadas del MT estimadas basándose en la RSS medida.

Además, Ω , Γ y M son matrices de $(2N \times 2N)$, $(2N \times N)$ y $(N \times 2N)$, respectivamente, que pueden ser representadas como sigue:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_N & \Delta t \cdot \mathbf{I}_N \\ \mathbf{0}_N & \mathbf{I}_N \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N \\ \Delta t \cdot \mathbf{I}_N \end{bmatrix}, M = [\mathbf{I}_N \quad \mathbf{0}_N] \quad (36)$$

10 Donde \mathbf{I}_N es la matriz unitaria de $N \times N$ y $\mathbf{0}_N$ es la matriz de $N \times N$ cero y Δt corresponde al periodo de muestreo de las mediciones. N es el número de mediciones para ser analizadas. Típicamente, en el filtrado de Kalman de la RSS $N = 3$, en el filtrado de Kalman de la Distancia MT-BS $N = 3$ y en el filtrado de Kalman de las Coordenadas del MT $N = 2$.

Además, W_k es un parámetro de vector aleatorio distribuido Gaussiano medio cero que representa el ruido del proceso con una matriz de covarianza Q :

$$W_k = \begin{bmatrix} w_1(t_k) \\ \dots \\ w_N(t_k) \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} \sigma_w^2(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_w^2(2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_w^2(N) \end{bmatrix} \quad (37)$$

15

donde $\sigma_w^2(i)$ ($i = 1, \dots, N$) representa la varianza de la velocidad de cambio de la RSS de la BS(i) (es decir, $v_k(i)$):

Y finalmente, U_k es también un parámetro de vector aleatorio Gaussiano medio cero que representa al ruido de la medición con una matriz de covarianza R :

$$U_k = \begin{bmatrix} u_1(t_k) \\ \dots \\ u_N(t_k) \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} \sigma_u^2(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_u^2(2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_u^2(N) \end{bmatrix} \quad (38)$$

20 Donde $\sigma_u^2(i)$ es la varianza de las mediciones de RSS $\hat{x}_k(i)$ ($i = 1, \dots, N$).

Esta función de Filtrado de Kalman se utilizará ahora junto con los diferentes estimadores descritos en las realizaciones previas de la invención para ilustrar cómo el Filtrado de Kalman puede ser utilizado para optimizar más la precisión de la localización del MT.

25 Resultará, no obstante, evidente, que el análisis anterior que condujo a los estimadores tal como se describen en las Ecuaciones 5, 9, 19 y 22 no puede ser aplicado de manera válida directamente al filtrado de Kalman. Por lo tanto, los estimadores revisados adecuadamente que optimizan la precisión de la posición del MT en presencia del filtrado de Kalman necesitan ser desviados.

30 En este aspecto, uno de los elementos claves para la comprensión de la función del filtrado de Kalman en el proceso de estimación de la posición del MT es el rendimiento del proceso de filtrado en condiciones estacionarias. Con el fin de tener un comportamiento convergente del estado estacionario deben cumplirse las siguientes condiciones:

(a) El par $\{\Phi, M\}$ en el espacio de estado del filtro de Kalman de la Ec. (34) debe ser observable completamente:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \Phi \\ \mathbf{M} \cdot \Phi \\ \dots \\ \mathbf{M} \cdot \Phi^{N-1} \end{bmatrix} = 2N \quad (39)$$

Esta condición puede mostrarse como válida basándose en el hecho de que:

$$\mathbf{M} \cdot \Phi^m = [\mathbf{I}_N \quad \mathbf{O}_N] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_N & m \cdot \Delta t \cdot \mathbf{I}_N \\ \mathbf{O}_N & \mathbf{I}_N \end{bmatrix} = [\mathbf{I}_N \quad m \cdot \Delta t \cdot \mathbf{I}_N], \quad (m=1, \dots, N-1) \quad (40)$$

(b) El par $\{\Phi, G^{1/2}\}$ debe ser completamente controlable:

$$\text{rank} [\mathbf{G}^{1/2} \quad \Phi \cdot \mathbf{G}^{1/2} \quad \dots \quad \Phi^{N-1} \cdot \mathbf{G}^{1/2}] = 2N \quad (41)$$

5

Donde:

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}^{1/2} \cdot \mathbf{G}^{T/2} = \Gamma \cdot \mathbf{Q} \cdot \Gamma^T = \Delta t^2 \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{O}_N & \mathbf{O}_N \\ \mathbf{O}_N & \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Y por lo tanto:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}^{1/2} &= \Delta t \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{O}_N & \mathbf{O}_N \\ \mathbf{O}_N & \mathbf{Q}^{1/2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{G}^{1/2} \cdot \Phi^m &= \Delta t \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{O}_N & m \cdot \Delta t \cdot \mathbf{Q}^{1/2} \\ \mathbf{O}_N & \mathbf{Q}^{1/2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (43)$$

10 Puede probarse que la Ec. (41) se cumple basándose en la Ec. (43).

Como tanto la Ec. (39) como la Ec. (43) se cumplen para el espacio de estado del filtro de Kalman de la Ec. (34), entonces hay una única solución positiva P en la siguiente ecuación algebraica de Riccati:

$$\mathbf{P} = \Phi \cdot \mathbf{P} \cdot \Phi^T + \mathbf{G} - \Phi \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{M}^T \cdot (\mathbf{M} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{M}^T + \mathbf{R})^{-1} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{P} \cdot \Phi^T \quad (44)$$

La solución P de esta ecuación de Riccati algebraica determina la matriz de covarianza:

$$\mathbf{S} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{M}^T + \mathbf{R} \quad (45)$$

15

Y la ganancia K de Kalman del Estado Estacionario será:

$$\mathbf{K} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{M}^T \cdot \mathbf{S}^{-1} \quad (46)$$

Resultará evidente que la solución analítica de la Ec. (44) de Riccati requiere la estimación de los valores de Eigen de la siguiente matriz:

$$[\mathbf{I}_N \quad -\mathbf{P}] \cdot \mathbf{F} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{I}_N \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (47)$$

20

Donde:

$$F = \begin{bmatrix} \Phi^{-1} & \Phi^{-1} \cdot G \\ -M^T \cdot R^{-1} \cdot M \cdot \Phi^{-1} & \Phi^T + M^T \cdot R^{-1} \cdot M \cdot \Phi^{-1} \cdot G \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$F = \begin{bmatrix} I_N & -\Delta t \cdot I_N & O_N & -\Delta t^3 \cdot Q \\ O_N & I_N & O_N & \Delta t^2 \cdot Q \\ -R^{-1} & \Delta t \cdot R^{-1} & I_N & -\Delta t^3 \cdot R^{-1} \cdot Q \\ O_N & O_N & \Delta t \cdot I_N & I_N \end{bmatrix} \quad (49)$$

En el análisis y simulación llevados a cabo en esta memoria, se obtuvo una aproximación de la Ec. (44) de Riccati utilizando el software de análisis MatlabTM.

Además, definiendo los estimadores revisados se ha adoptado el siguiente conjunto de asunciones relativas al impacto del Filtrado de Kalman (KF – Kalman Filtering, en inglés):

(a) En términos de comportamiento estadístico, la pdf (función de densidad de probabilidad – Probability Density Function, en inglés) de la salida del Filtrado de Kalman puede ser aproximada por la pdf del parámetro introducido;

(b) en el estado estacionario el valor medio de la salida de KF será igual al valor medio de la entrada de KF:

$$E(\hat{x}_{k|k}) = E(x_k) \quad (50)$$

(c) en el estado estacionario la varianza de la salida de KF será menor que la varianza de la entrada de KF, lo que representa la ganancia del filtro K:

$$V(\hat{x}_{k|k}) = (I_N - K \cdot M) \cdot V(x_k) \quad (51)$$

Basándose en las ecuaciones del espacio del estado de KF (34), la varianza del estado estacionario de la salida de KF de la Ec. (51) puede ser reescrita como sigue:

$$V(\hat{x}_{k|k}) = \begin{bmatrix} f(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & f(2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & f(N) \end{bmatrix} \cdot V(x_k) \quad (52)$$

Donde $0 < f(i) < 1$ representa la ganancia del Filtro de Kalman K del estado estacionario para el parámetro $x_k(i)$ ($i = 1, \dots, N$).

Tal Filtrado de Kalman se utilizará ahora en tres realizaciones diferentes de la invención, a saber, con referencia a la Figura 2, siendo aplicado a la salida de las mediciones de RSS 21 (Opción A), a la Estimación de la Distancia MT-BS 22 (Opción B) y a la Estimación de las Coordenadas de Posición del MT tras la Trilateración 23 (Opción C) y a los estimadores combinados apropiados definidos.

Opción A: Filtro de Kalman de RSS

Se considera que la RSS medida sigue una distribución Normal:

$$\hat{R}_s(i) \sim N(R_s(i), \sigma_{R_s}^2) \quad (53)$$

Esta condición mantiene la asunción de que una $\sigma_{R_s}^2$ aplica para todas las Estaciones de Base implicadas en la localización del MT. Basándose en esta asunción puede concluirse que en el estado estacionario la serie resultante de las mediciones de RSS filtradas seguirá una distribución Normal con la misma varianza e inferior:

$$\hat{R}_{s,i}(i) \sim N(R_s(i), f_{R_s} \cdot \sigma_{R_s}^2) \quad (54)$$

La Figura 9 comprende el factor de ganancia del Filtro de Kalman f_{Rx} frente a σ_{Rx} basándose en el rendimiento del KF del estado estacionario teórico, así como de acuerdo con la simulación que se explicará a continuación. Esta figura muestra que la simulación sigue estrechamente el rendimiento teórico, disminuyendo la ganancia del KF de la RSS exponencialmente a medida que la desviación estándar de las mediciones de la RSS aumenta.

5 Basándose en el análisis anterior es factible considerar un proceso de cálculo de móvil del MT que incorpora el Filtrado de Kalman de la RSS (opción A – véase la Figura 10). Como puede verse en la Figura 10, en el modelo del proceso equivalente simplificado el impacto del Filtro de Kalman ha sido reemplazado con las características estadísticas apropiadas de las mediciones de RSS equivalentes. La validez de este modelo equivalente se ilustrará en la simulación que será esquematizada a continuación.

10 Este modelo de la Figura 10 puede ser utilizado para producir los estimadores de distancia MT-BS revisados que se ajustan al Filtrado de Kalman de la RSS (opción A). En este aspecto, los estimadores de distancia MT-BS revisados en el caso del filtrado de Kalman de la RSS serán los siguientes:

- (a) Estimador 0: Estimador básico para la distancia MT-BS tal como el proporcionado por la Ec. (2).
- (b) Estimador 1: El estimador de la distancia MT-BS No desviado:

$$\hat{d}_{1,A}(i) = e^{-\beta(i) \frac{f_{Rx} \sigma_{Rx}^2}{2}} \cdot \hat{d}_o(i) \quad (55)$$

15

- (c) Estimador 2: El estimador del MSE de la distancia MT-BS Mínimo:

$$\hat{d}_{2,A}(i) = e^{-\beta(i) \frac{3f_{Rx} \sigma_{Rx}^2}{2}} \cdot \hat{d}_o(i) \quad (56)$$

- (d) Estimador 3: El estimador de las coordenadas del MT No desviado:

$$\hat{d}_{3,A}(i) = e^{-\beta(i) f_{Rx} \sigma_{Rx}^2} \cdot \hat{d}_o(i) \quad (57)$$

20

- (e) Estimador 4: El estimador del MSE de las coordenadas del MT por debajo del óptimo:

$$\hat{d}_{4,A}(i) = e^{-3\beta(i) \cdot f_{Rx} \cdot \sigma_{Rx}^2} \cdot \hat{d}_o(i) \quad (58)$$

Debe observarse que una ganancia del KF de $f_{Rx}=1$ correspondiente al caso en el que el Filtrado de Kalman no se ha aplicado, y los estimadores definidos anteriormente resultan iguales a los estimadores definidos para el caso de localización del MT de RSS básico (tal como se define en las Ecuaciones 5, 9, 19 y 22).

25 **Opción B: Filtro de Kalman de Distancia MT-BS**

Esta opción incorpora el filtrado tras la estimación de la distancia MT-BS, como se ilustra en la Figura 11. La Figura 11 también muestra un modelo de cálculo de la posición del MT simplificado equivalente en el que el Filtro de Kalman ha sido reemplazado con las características estadísticas apropiadas de las distancias MT-BS. La validez de este modelo equivalente se ilustrará en la simulación que se esquematizará a continuación.

30 Este modelo de la Figura 11 puede ser utilizado para producir los estimadores de distancia revisados que incorporan el Filtrado de Kalman (opción B). En este aspecto, la distancia MT-BS se considera que sigue una distribución Log-normal:

$$\begin{aligned} \hat{d}_o(i) &\sim LN(\mu_d(i), \sigma_d^2(i)) \\ \mu_d(i) &= \ln[d(i)] = \ln \left[10^{\frac{R_{x,A}(i) + A(i)}{B(i)}} \right] \\ \sigma_d^2(i) &= \beta(i) \cdot \sigma_{Rx}^2 \end{aligned} \quad (59)$$

35 El impacto del filtrado de Kalman en la función de densidad de probabilidad de la salida del filtro puede ser aproximado mediante lo que sigue:

$$\hat{d}_{oB}(i) \sim LN(\mu_{dB}(i), \sigma_{dB}^2(i)) \quad (60)$$

A partir del mismo análisis en el estado estacionario del Filtro de Kalman deberíamos tener:

$$E[\hat{d}_{oB}(i)] = E[\hat{d}_o(i)] \quad (61)$$

$$V[\hat{d}_{oB}(i)] = f_d(i) \cdot V[\hat{d}_o(i)] \quad (62)$$

Donde $f_d(i)$ representa la ganancia del filtro de Kalman.

5 De la Ec. (61) tenemos:

$$e^{\mu_d(i) + \sigma_d^2(i)/2} = e^{\mu_{dB}(i) + \sigma_{dB}^2(i)/2} \quad (63)$$

Y de la Ec. (62):

$$e^{2\mu_d(i) + \sigma_d^2(i)} \cdot (e^{\sigma_d^2} - 1) = f_d(i) \cdot e^{\mu_{dB}(i) + \sigma_{dB}^2(i)/2} \cdot (e^{\sigma_{dB}^2} - 1) \quad (64)$$

Basándose en la Ec. (63), Ec. (64) resulta:

$$\begin{aligned} f_d(i) \cdot (e^{\sigma_d^2(i)} - 1) &= (e^{\sigma_{dB}^2(i)} - 1) \Rightarrow \sigma_{dB}^2(i) = \ln\left[1 + f_d(i) \cdot (e^{\sigma_d^2(i)} - 1)\right] \Rightarrow \\ \sigma_{dB}^2(i) &= \ln\left[1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i)\sigma_{Bz}^2} - 1)\right] \end{aligned} \quad (65)$$

10

Y basándose en la Ec. (65) obtenemos de la Ec. (63):

$$\mu_{dB}(i) = \ln\left[\frac{d(i) \cdot e^{\beta(i)\sigma_{Bz}^2/2}}{\sqrt{1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i)\sigma_{Bz}^2} - 1)}}\right] \quad (66)$$

Este modelo puede ahora ser utilizado para producir los estimadores de la distancia MT-BS que corresponden a la opción B del KF de la Distancia MT-BS.

15 Basándose en estos resultados, es posible definir los estimadores de la distancia MT-BS revisados que son apropiados para este método de filtrado de Kalman de MT-BS.

- (a) Estimador 0: Estimador básico para la distancia MT-BS: tal como el proporcionado por la Ec. (2).
- (b) Estimador 1: El estimador de la distancia MT-BS se define como sigue:

$$\begin{aligned} d(i) &= E[\hat{d}_{1B}(i)] = E[c_{1B}(i) \cdot \hat{d}_{oB}(i)] = c_{1B}(i) \cdot E[\hat{d}_{oB}(i)] = c_{1B}(i) \cdot E[\hat{d}_o(i)] = c_{1B}(i) \cdot e^{\beta(i)\frac{\sigma_{Bz}^2}{2}} \cdot d(i) \Rightarrow \\ c_{1B}(i) &= e^{-\beta(i)\frac{\sigma_{Bz}^2}{2}} = c_1(i) \end{aligned} \quad (67)$$

20 Por lo tanto, el estimador de distancia MT-BS es idéntico al aplicado para el caso de que no se aplique ningún Filtrado de Kalman (Ec. (5)) debido al hecho de que el Filtrado de Kalman no afecta al valor medio de acuerdo con la asunción de la sección previa (Ec. (50)).

- (c) Estimador 2: el estimador de MSE de la distancia MT-BS Mínimo: definido como el que minimiza lo siguiente:

$$MSE(\hat{d}_{2B}(i)) = E\left[\left(\hat{d}_{2B}(i) - d(i)\right)^2\right] = c_{2B}^2(i) \cdot E\left(\hat{d}_{oB}^2(i)\right) - 2 \cdot d(i) \cdot c_{2B}(i) \cdot E\left(\hat{d}_{oB}(i)\right) + d^2(i) \quad (68)$$

De la Ec. (64), el MSE mínimo se consigue mediante el estimador siguiente:

$$c_{2B}(i) = \frac{d(i) \cdot E\left(\hat{d}_{oB}(i)\right)}{E\left(\hat{d}_{oB}^2(i)\right)} = \frac{d^2(i) \cdot e^{-\beta(i)\sigma_{\hat{d}}^2/2}}{e^{2\mu_d(i) + 4\sigma_d^2(i)/2}} = \frac{d^2(i) \cdot e^{-\beta(i)\sigma_{\hat{d}}^2/2}}{d^2(i) \cdot e^{\beta(i)\sigma_{\hat{d}}^2} \cdot [1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i)\sigma_{\hat{d}}^2} - 1)]} \Rightarrow$$

$$c_{2B}(i) = \frac{e^{-\beta(i)\sigma_{\hat{d}}^2/2}}{[1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i)\sigma_{\hat{d}}^2} - 1)]} \quad (69)$$

De manera que el estimador 2 es:

$$\hat{d}_{2B}(i) = \frac{e^{-\beta(i)\sigma_{\hat{d}}^2/2}}{[1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i)\sigma_{\hat{d}}^2} - 1)]} \cdot \hat{d}_o(i) \quad (70)$$

5

(d) Estimador 3: El estimador de las coordenadas del MT No desviado: A partir del análisis del proceso de trilateración, para conseguir la estimación de las coordenadas del MT no desviado debe aplicarse la siguiente condición:

$$d^2(i) = E\left(\hat{d}_{3B}^2(i)\right) = c_{3B}^2(i) \cdot e^{2\mu_d(i) + 4\sigma_d^2(i)/2} = c_{3B}^2(i) \cdot d^2(i) \cdot e^{\beta(i)\sigma_{R^2}} \cdot [1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i)\sigma_{R^2}} - 1)] \Rightarrow$$

$$c_{3B}(i) = \frac{e^{-\beta(i)\sigma_{R^2}/2}}{\sqrt{[1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i)\sigma_{R^2}} - 1)]}} \quad (71a)$$

10 Así que el estimador 3 es:

$$\hat{d}_{3B}(i) = \frac{e^{-\beta(i)\sigma_{R^2}/2}}{\sqrt{[1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i)\sigma_{R^2}} - 1)]}} \cdot \hat{d}_o(i) \quad (71b)$$

(e) Estimador 4: El estimador del MSE de las coordenadas del MT por debajo del óptimo: de acuerdo con el análisis del proceso de trilateración este estimador debe minimizar la siguiente cantidad:

$$\min\left\{E\left[\left(\hat{d}_{4B}^2(i) - d^2(i)\right)^2\right]\right\} = \min\left\{V\left(\hat{d}_{4B}^2(i) - d^2(i)\right) + E\left(\hat{d}_{4B}^2(i) - d^2(i)\right)\right\} \quad (72)$$

15 Basándose en la asunción de que:

$$\hat{d}_{4B}(i) = c_{4B}(i) \cdot \hat{d}_{oB}(i) \quad (73)$$

la minimización del MSE (Ec. (72)) se consigue para:

$$c_{4B}(i) = d(i) \cdot \frac{E(\hat{d}_o^2(i))}{\sqrt{E(\hat{d}_o^2(i))^2 + V(\hat{d}_o^2(i))}} \Rightarrow$$

$$c_{4B}(i) = \frac{e^{-\beta(i) \cdot \sigma_{Rz}^2 / 2}}{\sqrt{[1 + f_d(i) \cdot (e^{-\beta(i) \cdot \sigma_{Rz}^2} - 1)]^5}} \quad (74a)$$

Así que estimador 4 es:

$$\hat{d}_{4B}(i) = \frac{e^{-\beta(i) \cdot \sigma_{Rz}^2 / 2}}{\sqrt{[1 + f_d(i) \cdot (e^{-\beta(i) \cdot \sigma_{Rz}^2} - 1)]^5}} \cdot \hat{d}_o(i). \quad (74b)$$

5 Debe observarse que para una ganancia del KF de $fd(i) = 1$ (correspondiente al caso de que el Filtrado de Kalman no se aplique a todo y por lo tanto no se produzca ganancia) los estimadores anteriores resultan idénticos a los aplicables para el proceso de no filtrado (localización basada en RSS básico), tal como se define en las Ecuaciones 5, 9, 19 y 22.

Opción C: Filtro de Kalman de las coordenadas del MT

10 Esta opción incorpora el filtrado tras la etapa de trilateración, como se ilustra en la Figura 12. La Figura 12 también muestra un modelo de cálculo de posición del MT simplificado equivalente en el que el Filtro de Kalman ha sido reemplazado con las características estadísticas de la distancia MT-BS equivalentes. La validez de este modelo equivalente se ilustrará en la simulación que se esquematizará a continuación.

15 Este modelo de la Figura 12 puede ser utilizado para producir los estimadores revisados que corresponden al Filtrado de Kalman como para la opción C. A este respecto, las coordenadas del MT (x, y) tras la etapa de trilateración pueden ser expresadas como sigue:

$$\hat{z}_j = z + \frac{1}{D} \left[\sum_{i=1}^3 a_i(i) \cdot [\hat{d}_i^2(i) - d^2(i)] \right], \quad z=x,y \quad (75)$$

Donde para $(x_i, y_i) \ i = 1, 2, 3$ las coordenadas de las Estaciones de Base consideradas para el proceso de trilateración son:

$$D = 4 \cdot (x_1 - x_2) \cdot (y_1 - y_3) - 4 \cdot (x_1 - x_3) \cdot (y_1 - y_2) \quad (76)$$

$$a_1(i) = -(y_2 - y_3), \quad a_2(i) = (y_1 - y_3), \quad a_3(i) = -(y_1 - y_2) \quad (77)$$

$$a_1(i) = (x_2 - x_3), \quad a_2(i) = -(x_1 - x_3), \quad a_3(i) = (x_1 - x_2) \quad (78)$$

20 La función de densidad de probabilidad de las coordenadas del MT no es conocida, puesto que corresponde a la suma de los parámetros distribuidos Log-normal. Por lo tanto, en esta opción de Filtrado de Kalman adoptamos el modelo de cálculo de la posición del MT equivalente representado en la Figura 12. Como puede verse en esta Figura se asume que el modelo del cálculo de la posición del MT equivalente se basa en un conjunto de distancias MT-BS equivalentes que siguen una distribución Log-normal con parámetros de media y varianza adecuados. Para inferir las características de las distancias MT-BS equivalentes se aprovechan las siguientes condiciones, que están basadas en las asunciones presentadas en las Ecuaciones (26) y (27) en lo que respecta al estado estacionario del Filtro de Kalman:

$$E(\hat{z}_{jC}) = E(\hat{z}_j), \quad z=x,y \quad (79)$$

$$V(\hat{z}_{jC}) = f_z \cdot V(\hat{z}_j), \quad z=x,y \quad (80)$$

En particular la Ec. (79) conduce a la siguiente condición:

$$E(\hat{z}_{jC}) = E(\hat{z}_j) \Rightarrow \sum_{i=1}^3 a_i(i) \cdot [E(\hat{d}_{oc}^2(i, z)) - E(\hat{d}_o^2(i))] = 0, \quad z=x,y \quad (81)$$

30

Y la Ec. (80) conduce a lo siguiente:

$$V(\hat{z}_{jC}) = f_z \cdot V(\hat{z}_j) \Rightarrow \sum_{i=1}^3 a_i^2(i) \cdot [V(\hat{d}_{oc}^2(i, z)) - f_z \cdot V(\hat{d}_o^2(i))] = 0, z=x, y \quad (82)$$

Una solución que justifica ambas condiciones proporcionadas por las Ecs. (81) y (82) es la siguiente:

$$E(\hat{d}_{oc}^2(i, z)) = E(\hat{d}_o^2(i)), z=x, y \quad (83)$$

$$V(\hat{d}_{oc}^2(i, z)) = f_z \cdot V(\hat{d}_o^2(i)), z=x, y \quad (84)$$

- 5 Asumiendo que $\hat{d}_{oc}(i, z)$ sigue una distribución Log-Normal $LN(\mu_{dc}(i, z), \sigma_{dc}^2(i, z))$ tenemos, basándonos en la Ec. (84):

$$V(\hat{d}_{oc}^2(i, z)) = f_z \cdot V(\hat{d}_o^2(i)) \Rightarrow E(\hat{d}_{oc}^2(i, z)) \cdot [e^{4\sigma_{dc}^2(i, z)} - 1] = f_z \cdot E(\hat{d}_o^2(i)) \cdot [e^{4\beta(i)\sigma_h^2} - 1], z=x, y \quad (85)$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{dc}^2(i, z) = \ln \left[\sqrt[4]{1 - f_z \cdot (e^{4\beta(i)\sigma_h^2} - 1)} \right], z=x, y \quad (86)$$

- 10 En este caso la Ec. (83) conduce a lo que sigue:

$$e^{2\mu_{dc}(i, z) + 4\sigma_{dc}^2(i, z)/2} = d^2(i) \cdot e^{2\beta(i)\sigma_h^2} \Rightarrow \mu_{dc}(i, z) = \ln \left[\frac{d(i) \cdot e^{\beta(i)\sigma_h^2}}{\sqrt[4]{1 - f_z \cdot (e^{4\beta(i)\sigma_h^2} - 1)}} \right], z=x, y \quad (87)$$

- 15 Las distancias MT-BS equivalentes son por lo tanto una función de la estación de base i ($i = 1, 2, 3$) así como de la coordenada z del Terminal Móvil ($z = x, y$). Esto lleva a unos estimadores de la distancia MT-BS diferentes que pueden ser utilizados para la estimación de cada una de las coordenadas del MT de acuerdo con esta realización de la invención.

Por lo tanto, basándose en el análisis anterior los estimadores de la distancia MT-BS revisados para esta realización de la invención son:

- (a) Estimador 0: estimador básico: el proporcionado por la Ec. (2).
 (b) Estimador 1: estimador de la distancia MT-BS no desviado: definido como el que satisface la condición siguiente:
- 20

$$E(\hat{d}_{1C}(i, z)) = d(i) \Rightarrow E(c_{1C}(i, z) \cdot \hat{d}_{oc}(i, z)) = d(i) \Rightarrow c_{1C}(i, z) = \frac{d(i)}{E(\hat{d}_{oc}(i, z))}, z=x, y \quad (88)$$

Basándose en la Ec. (86) y (87) tenemos:

$$c_{1C}(i, z) = e^{-\beta(i)\sigma_h^2} \cdot \sqrt[4]{1 + f_z \cdot (e^{4\beta(i)\sigma_h^2} - 1)}, z=x, y \quad (89a)$$

Así que el estimador 1 es:

$$\hat{d}_{1c}(i) = e^{-\beta(i)\sigma_k^2} \cdot \sqrt[3]{1 + f_z \cdot (e^{4\beta(i)\sigma_k^2} - 1)} \cdot \hat{d}_o(i) \quad (89b)$$

(c) Estimador 2: estimador del MSE de la distancia MT-BS mínimo: definido como el que minimiza la siguiente condición:

$$MSE(\hat{d}_{2c}(i, z)) = E\left[\left(\hat{d}_{2c}(i, z) - d(i)\right)^2\right] = c_{2c}(i, z) \cdot E(\hat{d}_{oc}^2(i, z)) + d^2(i) - 2d(i)c_{2c}(i, z) \cdot E(\hat{d}_{oc}(i, z)) \quad (90)$$

, z=x,y

5 La condición anterior es minimizada por lo siguiente:

$$c_{2c}(i, z) = \frac{d(i) \cdot E(\hat{d}_{oc}(i, z))}{E(\hat{d}_{oc}^2(i, z))} = \frac{e^{-\beta(i)\sigma_k^2}}{\sqrt[3]{1 + f_z \cdot (e^{4\beta(i)\sigma_k^2} - 1)}}, \quad z=x,y \quad (91a)$$

Así que el estimador 2 es:

$$\hat{d}_{2c}(i) = \frac{e^{-\beta(i)\sigma_k^2}}{\sqrt[3]{1 + f_z \cdot (e^{4\beta(i)\sigma_k^2} - 1)}} \cdot \hat{d}_o(i) \quad (91b)$$

10 (d) Estimador 3: estimador de coordenadas del MT No desviado: definido como el que satisface la condición siguiente:

$$E(\hat{z}_{3c}) = z \Rightarrow \sum_{i=1}^3 a_z(i) \left[E(\hat{d}_{3c}^2(i, z)) - d^2(i) \right] = 0, \quad z=x,y \quad (92)$$

Una solución para la condición anterior es la siguiente:

$$E(\hat{d}_{3c}^2(i, z)) = d^2(i) \Rightarrow E(c_{3c}^2(i, z) \cdot \hat{d}_{oc}^2(i, z)) = d^2(i) \Rightarrow$$

$$c_{3c}(i, z) = \frac{d(i)}{\sqrt{E(\hat{d}_{oc}^2(i, z))}}, \quad z=x,y \quad (93)$$

Y basándose en las Ecs. (86) y (87) se obtiene el siguiente estimador:

$$15 \quad c_{3c}(i, z) = e^{-\beta(i)\sigma_k^2} = c_3(i), \quad z=x,y \quad (94)$$

La ecuación anterior para el estimador de las coordenadas del MT No desviado filtrado es idéntica a la aplicable para la localización basada en la RSS básica definida en la Ec. (9).

(e) Estimador 4: estimador del MSE de coordenadas del MT por debajo del óptimo: definido como el que minimiza las siguientes cantidades:

$$20 \quad MSE(\hat{d}_{4c}(i, z)) = E\left[\left(\hat{d}_{4c}(i, z) - d^2(i)\right)^2\right] = c_{4c}^4(i, z) \cdot E(\hat{d}_{oc}^4(i, z)) + d^4(i) - 2d^2(i)c_{4c}^2(i, z) \cdot E(\hat{d}_{oc}^2(i, z)) \quad (95)$$

, z=x,y

La minimización de las cantidades anteriores puede lograrse con lo siguiente:

$$c_{4c}(i, z) = d(i) \sqrt{\frac{E(\hat{d}_{oc}^2(i, z))}{E(\hat{d}_{oc}^4(i, z))}} = \frac{e^{-\beta(i)\sigma_k^2}}{\sqrt{1 + f_z \cdot (e^{4\beta(i)\sigma_k^2} - 1)}}, \quad z=x,y \quad (96a)$$

Así que el estimador 4 es:

$$\hat{d}_{4C}(i) = \frac{e^{-\beta(i)\sigma_{Rz}^2}}{\sqrt{1 + f_z \cdot (e^{4\beta(i)\sigma_{Rz}^2} - 1)}} \cdot \hat{d}_o(i) \quad (96b)$$

Es interesante observar que para una ganancia del Filtro de Kalman de $f_z = 1$ correspondiente al caso de que no se aplique el Filtrado de Kalman, los estimadores definidos para la Opción C resultan iguales a los estimadores definidos para el caso de RSS básico tal como se define en las Ecuaciones 5, 9, 19 y 22.

5 **Análisis del Rendimiento**

10 Para analizar el rendimiento de los diferentes estimadores de la distancia MT-BS filtrada mediante Filtro de Kalman (es decir, de las Opciones A, B y C), se ilustrará un modelo de simulación. Este modelo de simulación se basa en una red de telefonía móvil con un área geográfica que tiene un conjunto de estaciones de base que soportan cada una tres celdas del mismo radio (cada celda corresponde a un sector de 120° del área geográfica). Durante la simulación, la posición del MT es seleccionada aleatoriamente dentro de esta área y los niveles de la RSS de cada una de las estaciones de base están estimados a partir el modelo Hata. También, se añade un ruido blanco Gaussiano con varianza σ_{Rz}^2 al RSS resultante y se produce un conjunto de mediciones de RSS en un periodo Δt .

15 Con respecto a la movilidad del MT, se considera una red de calles con el mallado de Manhattan y el MT se está moviendo a una velocidad que es seleccionada uniformemente en un intervalo de entre 10 km/hr – 60 km/hr (típica para un entorno Urbano). En cada cruce de calles la dirección del movimiento del MT es seleccionada con igual probabilidad desde los posibles segmentos de calle alternativos, mientras que la velocidad del MT es seleccionada de nuevo desde el mismo intervalo mencionado anteriormente. Basándose en la serie de tiempos producida de las mediciones de la RSS, se aplica la localización del MT basada en las opciones de Filtrado de Kalman alternativas, y la posición del MT fue a continuación comparada con la posición del MT real para determinar el error de localización.

20 A este respecto, las Tablas 1, 2 y 3 proporcionan el error de localización del MT para las tres opciones de Filtrado de Kalman diferentes frente a la desviación estándar de la RSS medida (σ_{Rz}). Esto se proporciona tanto para los estimadores originales (es decir, los estimadores 0 – 4, sin KF) y los estimadores de la distancia MT-BS (es decir, los estimadores 1A – 4A, 1B – 4B y 1C – 4C, con KF).

σ_{Rz}		4db	8db	12db
Error de Localización del MT Medio (m)	Estimador 0	73,4m	108,9m	154,9m
	Estimador 1	73,7m	192,6m	337,2m
	Estimador 2	139,1m	427,2m	619,8m
	Estimador 3	112,3m	320,5m	523,4m
	Estimador 4	250,5m	592,7m	718,9m
	Estimador 1A	54,3m	96,1m	165,6m
	Estimador 2A	54,2m	95,4m	143,8m
	Estimador 3A	53,2m	90,7m	151,1m
	Estimador 4A	51,6m	89,3m	125,5m

25 TABLA 1: El rendimiento del filtrado de Kalman de la RSS frente al estimador de la distancia MT-BS aplicado.

σ_{Rx}		4db	8db	12db
Error de Localización del MT Medio (m)	Estimador 0	117,1m	294,5m	670,0m
	Estimador 1 y 1B	97,3m	168,1m	248,0m
	Estimador 2	128,5m	312,5m	516,0m
	Estimador 3	105,2m	227,9m	365,0m
	Estimador 4	221,3m	542,3m	695,0m
	Estimador 2B	94,2m	177,8m	271,4m
	Estimador 3B	106,0m	178,2m	272,2m
	Estimador 4B	103,4m	163,3m	219,6m

Tabla 2: El rendimiento del filtrado de Kalman de la Distancia MT-BS frente al estimador de la distancia MT-BS aplicado.

σ_{Rx}		4db	8db	12db
Error de Localización del MT Medio (m)	Estimador 0	126,2m	548,1m	1667,6m
	Estimador 1	83,3m	257,7m	703,5m
	Estimador 2	72,6m	191,8m	341,0m
	Estimador 3 y 3C	68,8m	130,8m	207,1m
	Estimador 4	69,0m	160,2m	232,7m
	Estimador 1C	66,7m	130,3m	225,8m
	Estimador 2C	62,7m	124,9m	208,3m
	Estimador 4C	59,0m	120,3m	201,4m

5 Tabla 3: El rendimiento del filtrado de Kalman de las Coordenadas del MT frente al estimador de la distancia MT-BS aplicado.

Estas tablas indican que los estimadores de la distancia MT-BS con KF proporcionan el medio para mejorar la precisión de la localización del MT en todas las opciones del KF. En particular los estimadores de la distancia MT-BS revisados (estimadores 4A, 4B y 4C) conducen al rendimiento óptimo.

10 Es interesante observar que en el caso de la Opción B del KF de la distancia MT-BS, el rendimiento del estimador 1 que es idéntico al estimador 1B (estimador de la distancia MT-BS No desviado) está muy cerca del estimador de rendimiento óptimo (estimador 4B revisado).

15 Una observación similar aplica para la Opción C del KF de las Coordenadas del MT con respecto al rendimiento del estimador 3 que es idéntico al estimador 3C (estimador No desviado de las Coordenadas del MT). La razón para este resultado es la manera en la que el Filtrado de Kalman afecta a las características estadísticas de su entrada (véase la Ec. (50) y (51)): la salida del Filtrado de Kalman mantiene el valor medio de la entrada y reduce la varianza de la entrada. En el caso de que la entrada del KF sea no desviada entonces el error de localización resultante resulta equivalente al caso de una menor σ_{Rx} . En tal caso el rendimiento de todos los estimadores es convergente, como puede verse en las Tablas 1, 2 y 3 para, por ejemplo, $\sigma_{Rx} = 4$ db.

20 Por otro lado, en el caso de que la entrada del KF esté desviada entonces la salida resultante mantiene la desviación de la entrada, lo que lleva posiblemente a un error mayor, aunque tiene una menor varianza (debido a la ganancia del KF). El estimador de mejor rendimiento (estimador 4A revisado) para todas las opciones del KF proporciona de

hecho una solución por debajo del óptimo al MSE de las coordenadas del MT equilibrando la desviación y la varianza resultantes.

5 La Figura 13 compara el rendimiento de las opciones del KF basándose en su estimador de mejor rendimiento (4A, 4B y 4C respectivamente) así como el rendimiento de la localización de la RSS básica (para el estimador 4). Como puede verse en el filtrado de Kalman la opción A sigue siendo la opción de filtrado de Kalman de mejor rendimiento. No obstante, como puede verse en la Figura 13, la precisión de la localización del MT resultante para todas las opciones del KF está en un intervalo que es válido y aceptable para un aprovechamiento comercial (es decir error de localización de 100 m – 200 m para $\sigma_{Rx} = 12$ db).

10 El análisis anterior proporciona el medio para estimar estos parámetros basándose en las características del KF del estado estacionario. En una implementación comercial tales parámetros pueden ser calculados sin conexión a la Internet con el fin de reducir la carga de trabajo del procesamiento en tiempo real (particularmente en lo que respecta a proporcionar una buena estimación de los factores de ganancia del KF).

15 Un planteamiento simplificado alternativo, que es aplicable a la Opción B del KF de la distancia MT-BS y a la Opción C del KF de las coordenadas del MT, es utilizar los estimadores 1B y 3C (Ec. (68) y (94) respectivamente), puesto que no requieren la estimación de los parámetros de ganancia del KF y aun así, de acuerdo con los resultados anteriores, mostrar un rendimiento muy cercano a los estimadores de mejor rendimiento.

20 Con respecto a aplicar más de una opción del KF, aunque tal planteamiento es posible, no se ha encontrado que lleve a otra mejora de la precisión de la localización del MT. Lo mismo aplica en el caso de que los estimadores de la distancia MT-BS revisados sean utilizados además de los estimadores del KF revisados. Este resultado se debe al hecho de que, donde la salida de un KF es utilizada como una entrada a otro KF entonces el segundo KF no proporcionará la esperada ganancia porque su entrada no muestra una de las características que permiten al KF proporcionar ganancia. Es decir, la serie de mediciones de entrada debería tener ruido de medición que es independiente en cada muestra. Esta es una propiedad que la salida del primer KF no tiene.

25 Por lo tanto, en resumen, el análisis anterior ha ilustrado la RSS basándose en la optimización de la precisión de localización en presencia de filtrado de Kalman y ha adaptado el análisis de la optimización del error de la localización del MT mediante RSS básica para definir estimadores revisados para las siguientes opciones del Filtrado de Kalman: Filtrado de Kalman de la RSS, Filtrado de Kalman de la distancia MT-BS y filtrado de Kalman de las coordenadas del MT. Tras evaluar el impacto del filtrado de Kalman en la precisión de la localización del MT basándose en el análisis del estado estacionario, se obtuvo un conjunto de estimadores de MT-BS para cada una de las opciones del Filtrado de Kalman.

30 Resultará evidente que la implementación exacta del filtro de Kalman tal como se describe en esta memoria sólo debe considerarse como ilustrativa, y que las configuraciones de Kalman alternativas están dentro del alcance de la invención. Además, aunque el uso de un filtro de Kalman es una implementación preferida, son posibles filtros alternativos, particularmente otros filtros recursivos estadísticos capaces de estimar el estado de un sistema dinámico. Ejemplos de posibles alternativas incluyen Filtros de Suavizado Exponencial y Filtros de Reconciliación de Datos Dinámicos.

35 Además, las realizaciones con filtrado de Kalman de la invención se ilustraban sólo en relación con las mediciones de la RSS derivadas de STAMP y de las técnicas de determinación de la posición de Rastreo del MT; sin embargo, las realizaciones son aplicables a cualquier otra técnica de rastreo en la cual se recogen mediciones de la RSS, tales como CGI, CGI+TA y ECGI.

Adicionalmente, las realizaciones de la invención han sido descritas en relación con la monitorización del terminal móvil y la determinación de mediciones de la RSS. Esto no es esencial para la invención, y la misma funcionalidad puede ser implementada externa al terminal. Por ejemplo, el terminal puede enviar las mediciones de la RSS a la red de núcleo para su procesamiento.

45 Las técnicas de estimación de posición listadas anteriormente son aplicables a varias configuraciones de red que incluyen las redes de 2G, 3G y 4G.

Además, aunque la presente invención tiene una aplicabilidad particularmente para las mediciones de la RSS, cualquier otro parámetro adecuado para las comunicaciones entre el terminal móvil y sus estaciones de base adyacentes puede ser utilizado (por ejemplo, Diferencia de Tiempo Observada – Observed Time Difference, en inglés) así como mediciones asociadas a otras tecnologías como GPS. Más particularmente, resultará evidente que los estimadores de acuerdo con las realizaciones de la invención son aplicables particularmente al parámetro RSS debido a su naturaleza estadística, y a otros parámetros con una distribución de error similar.

REIVINDICACIONES

1. Un método de estimar la ubicación de un terminal móvil (1) en una red de comunicaciones de telefonía móvil que tiene una pluralidad de estaciones de base (3 – 5, 7 – 9), incluyendo el método:

5 determinar la medición de al menos un parámetro de señal para el terminal móvil en relación con cada una de la pluralidad de estaciones de base;

utilizar las mediciones del parámetro de la señal para obtener una primera estimación de la distancia del terminal móvil desde cada una de la pluralidad de estaciones de base; y caracterizado por

10 utilizar al menos un estimador en cada una de las primeras estimaciones de distancia para obtener una estimación de distancia refinada del terminal móvil (1) desde cada una de la pluralidad de estaciones de base i de manera que el al menos un estimador se adecúa al menos a uno de los siguientes formatos:

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad \hat{d}_1(i) &= e^{-\beta(i) \frac{\sigma_{RX}^2}{2}} \cdot 10^{\left[\frac{\hat{R}_r(i)+A(i)}{B(i)} \right]} \\ \text{b)} \quad \hat{d}_2(i) &= e^{-\beta(i) \frac{3\sigma_{RX}^2}{2}} \cdot 10^{\left[\frac{\hat{R}_r(i)+A(i)}{B(i)} \right]} \\ \text{c)} \quad \hat{d}_3(i) &= e^{-\beta(i) \cdot \sigma_{RX}^2} \cdot 10^{\left[\frac{\hat{R}_r(i)+A(i)}{B(i)} \right]} \\ \text{d)} \quad \hat{d}_4(i) &= e^{-3\beta(i) \cdot \sigma_{RX}^2} \cdot 10^{\left[\frac{\hat{R}_r(i)+A(i)}{B(i)} \right]} \end{aligned}$$

utilizar la citada pluralidad de estimaciones de distancia refinadas para obtener una estimación de la posición del terminal móvil, y

15 aplicar un filtrado de Kalman a uno de las mediciones de parámetro de señal, las estimaciones de distancia refinadas o la estimación de posición del terminal móvil determinadas, donde:

$\hat{d}_{1..4}$ es la estimación de la distancia refinada en kilómetros

σ_{RX}^2 es la varianza de la distribución Gausiana de la Potencia de Señal Recibida (RSS – Received Signal Strength, en inglés),

$$B(i) = 44.9 - 6.55 \log h_{bs}(i),$$

20 $h_{bs}(i)$ es la altura de la estación de base i en m,

A(i) es una estimación de una cantidad de pérdida de ruta de propagación desde la estación de base i; y

$\hat{R}_r(i)$ es la Potencia de Señal Recibida (RSS – Received Signal Strength, en inglés) desde la estación de base i en la ubicación real del terminal.

25 2. El método de la reivindicación 1, en el que el filtrado de Kalman se aplica adaptando el al menos un estimador de manera que se adecúa al menos a uno de los siguientes formatos:

$$\begin{aligned}
 \text{a) } \hat{d}_{1A}(i) &= e^{-\beta(i) \frac{f_{Rx} \sigma_{Rx}^2}{2}} \cdot \hat{d}_o(i); \\
 \text{b) } \hat{d}_{2A}(i) &= e^{-\beta(i) \frac{3f_{Rx} \sigma_{Rx}^2}{2}} \cdot \hat{d}_o(i); \\
 \text{c) } \hat{d}_{3A}(i) &= e^{-\beta(i) f_{Rx} \sigma_{Rx}^2} \cdot \hat{d}_o(i); \\
 \text{d) } \hat{d}_{4A}(i) &= e^{-3\beta(i) \cdot f_{Rx} \cdot \sigma_{Rx}^2} \cdot \hat{d}_o(i); \\
 \text{e) } \hat{d}_{2B}(i) &= \frac{e^{-\beta(i) \sigma_{Rx}^2 / 2}}{\left[1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i) \sigma_{Rx}^2} - 1)\right]} \cdot \hat{d}_o(i); \\
 \text{f) } \hat{d}_{3B}(i) &= \frac{e^{-\beta(i) \sigma_{Rx}^2 / 2}}{\sqrt{\left[1 + f_d(i) \cdot (e^{\beta(i) \sigma_{Rx}^2} - 1)\right]}} \cdot \hat{d}_o(i); \\
 \text{g) } \hat{d}_{4B}(i) &= \frac{e^{-\beta(i) \sigma_{Rx}^2 / 2}}{\sqrt{\left[1 + f_d(i) \cdot (e^{-\beta(i) \sigma_{Rx}^2} - 1)\right]^5}} \cdot \hat{d}_o(i); \\
 \text{h) } \hat{d}_{1C}(i) &= e^{-\beta(i) \sigma_{Rx}^2} \cdot \sqrt[8]{1 + f_z \cdot (e^{4\beta(i) \sigma_{Rx}^2} - 1)} \cdot \hat{d}_o(i); \\
 \text{i) } \hat{d}_{2C}(i) &= \frac{e^{-\beta(i) \sigma_{Rx}^2}}{\sqrt[8]{1 + f_z \cdot (e^{4\beta(i) \sigma_{Rx}^2} - 1)}} \cdot \hat{d}_o(i); \text{ or} \\
 \text{j) } \hat{d}_{4C}(i) &= \frac{e^{-\beta(i) \sigma_{Rx}^2}}{\sqrt{1 + f_z \cdot (e^{4\beta(i) \sigma_{Rx}^2} - 1)}} \cdot \hat{d}_o(i)
 \end{aligned}$$

donde:

f_{Rx} , $f_d(i)$ y f_z son los factores de ganancia del filtro de Kalman; y

$$\hat{d}_o(i) \text{ es un estimador básico, } \hat{d}_o(i) = 10^{-\frac{\hat{R}_r(i) + A(i)}{B(i)}}$$

- 5 3. El método de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la medición del al menos un parámetro de señal determinado es una medición de la Potencia de Señal Recibida, RSS, y se utiliza una técnica de localización basada en la RSS para obtener la primera estimación de la distancia de la ubicación del terminal móvil.
4. El método de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la medición del al menos un parámetro de señal determinado es una medición de Potencia de Señal Recibida, RSS, y las mediciones de la RSS son determinadas a partir de posiciones históricas del terminal recogidas cuando el terminal estaba en modo de reposo.
- 10 5. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la medición del al menos un parámetro de señal determinado incluye también mediciones de Avance de Sincronización, que son determinadas por el terminal móvil mientras el terminal está activo.

6. El método de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la cantidad de pérdida de ruta de propagación se estima utilizando un modelo Hata o un modelo Cost231.
7. El método de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que incluye también utilizar las estimaciones de distancia en los cálculos de triangulación / trilateración para estimar la ubicación del terminal móvil.
- 5 8. Un terminal móvil configurado para ejecutar un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 del método.
9. Un elemento de red de comunicaciones configurado para ejecutar un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 del método.
- 10 10. Una red de telecomunicaciones de telefonía móvil configurada para ejecutar un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 del método.

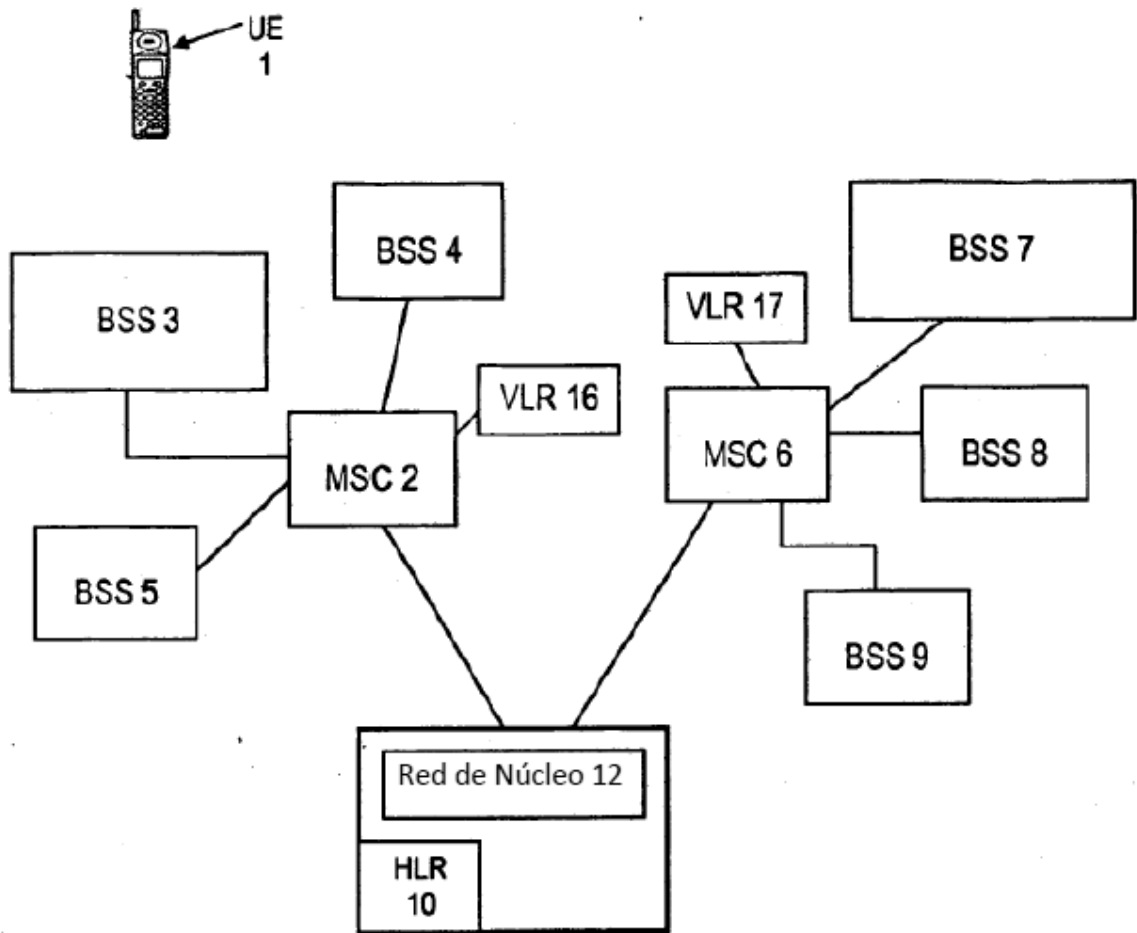


FIGURA 1

FIGURA 2

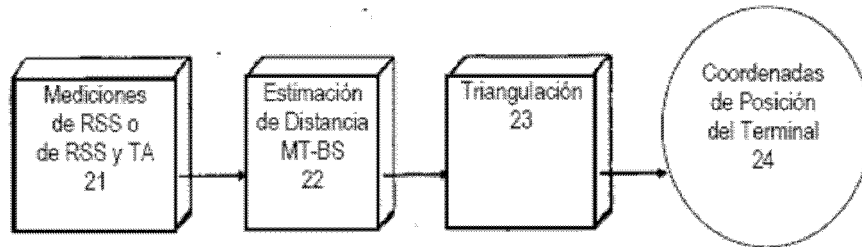


FIGURA 3

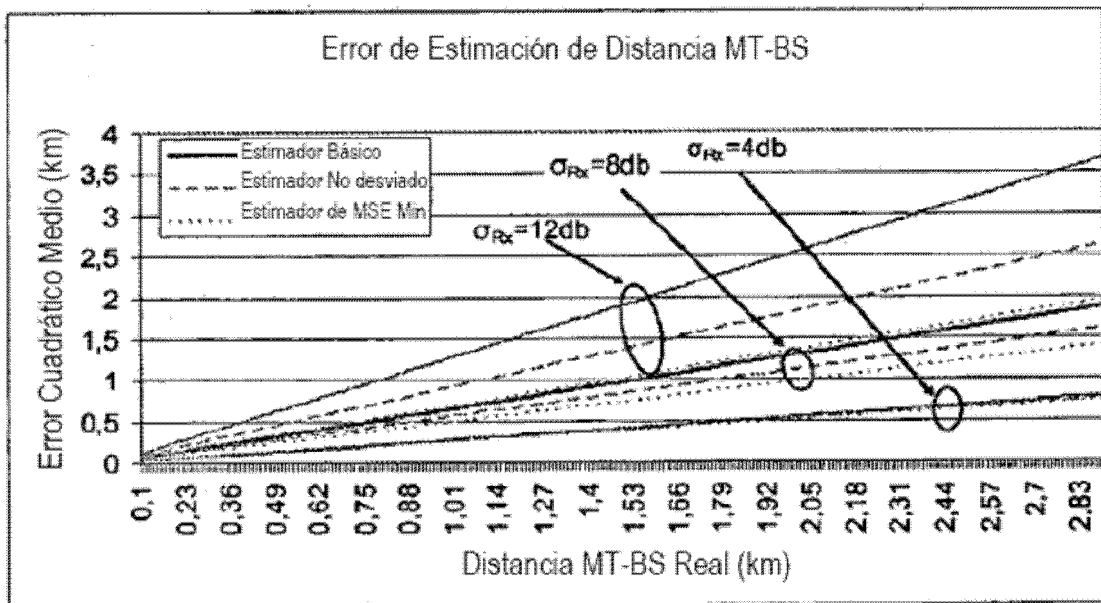


FIGURA 4

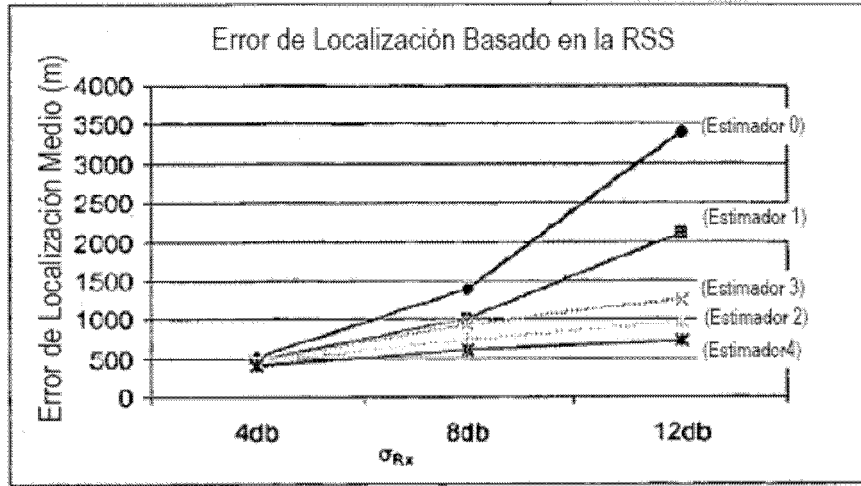


FIGURA 5

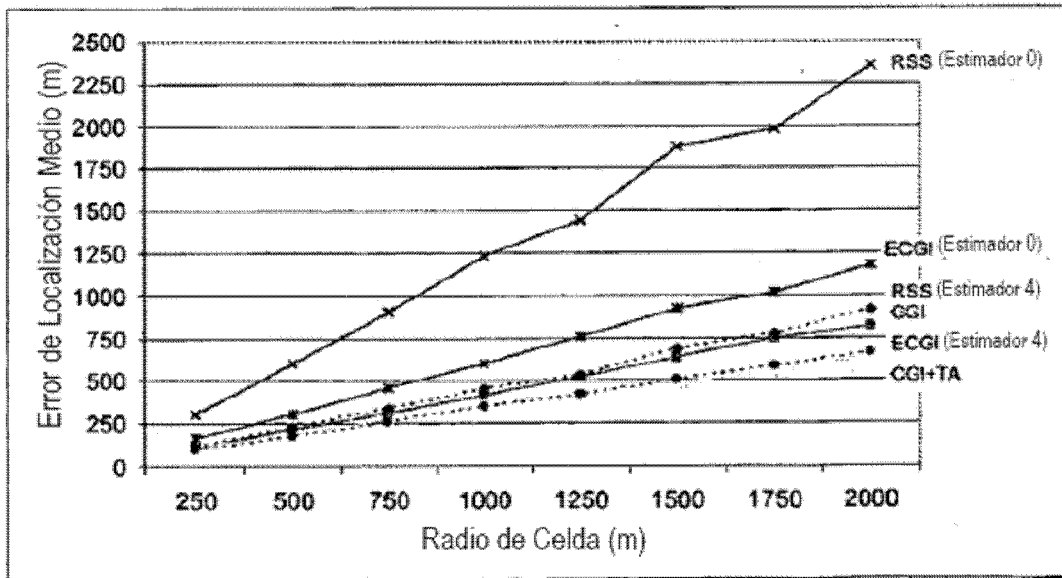


FIGURA 6

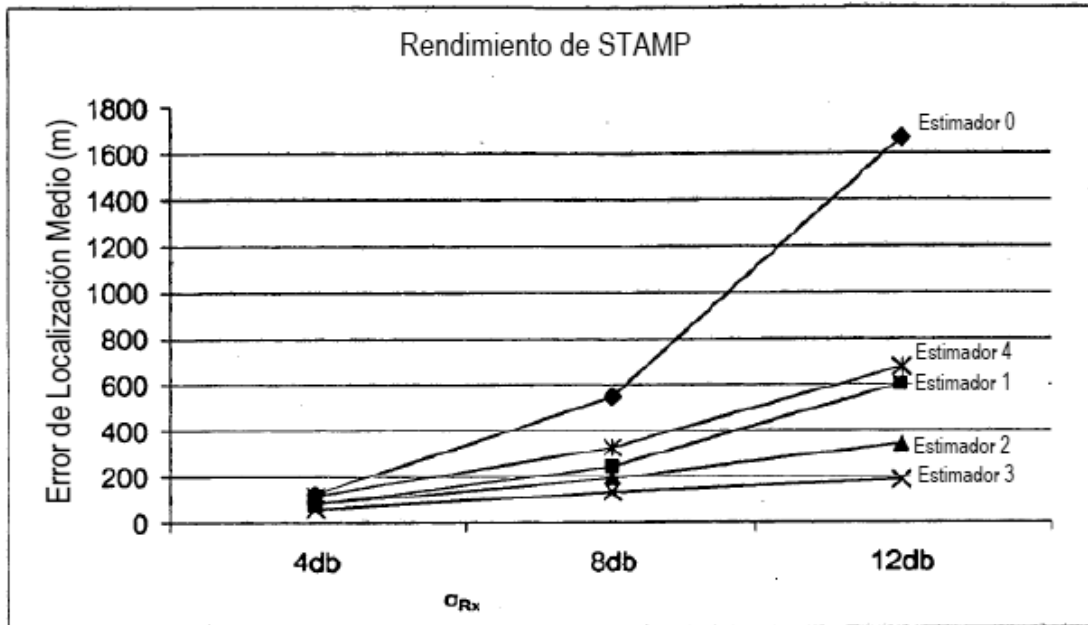


FIGURA 7

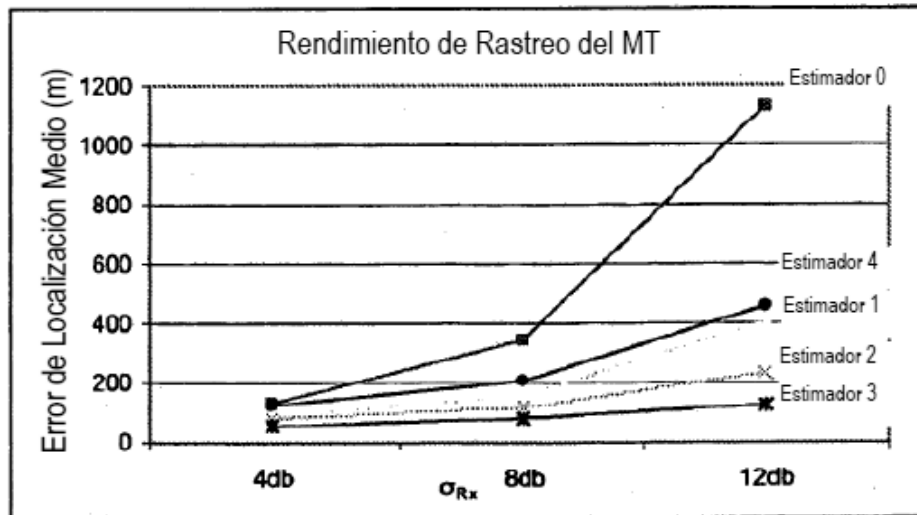


FIGURA 8

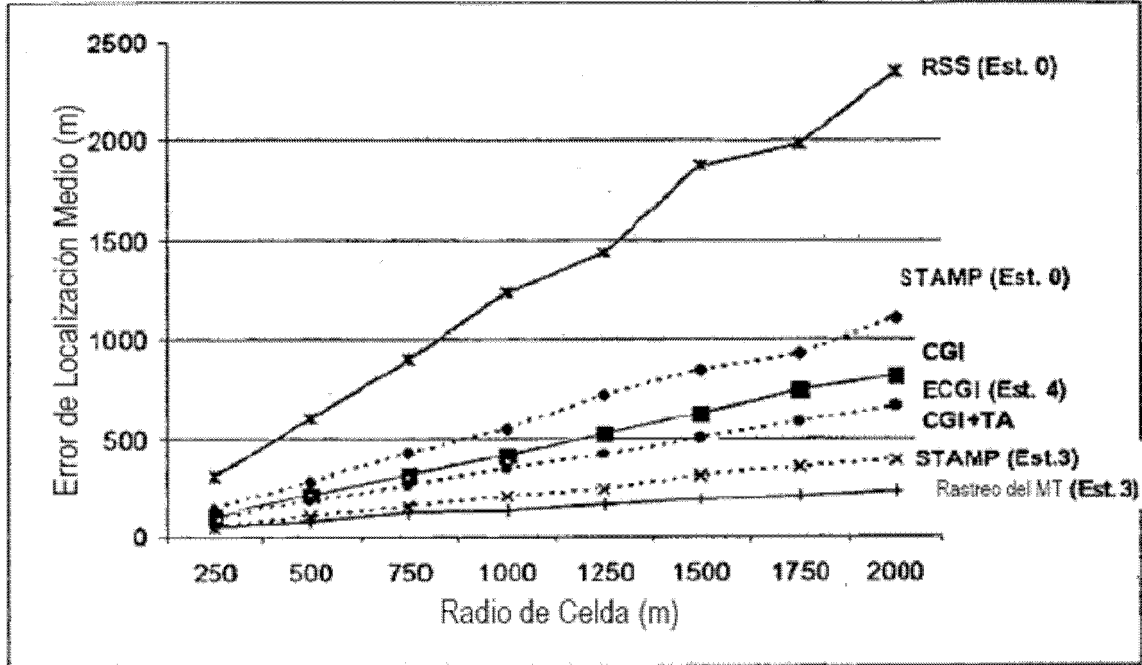


FIGURA 9

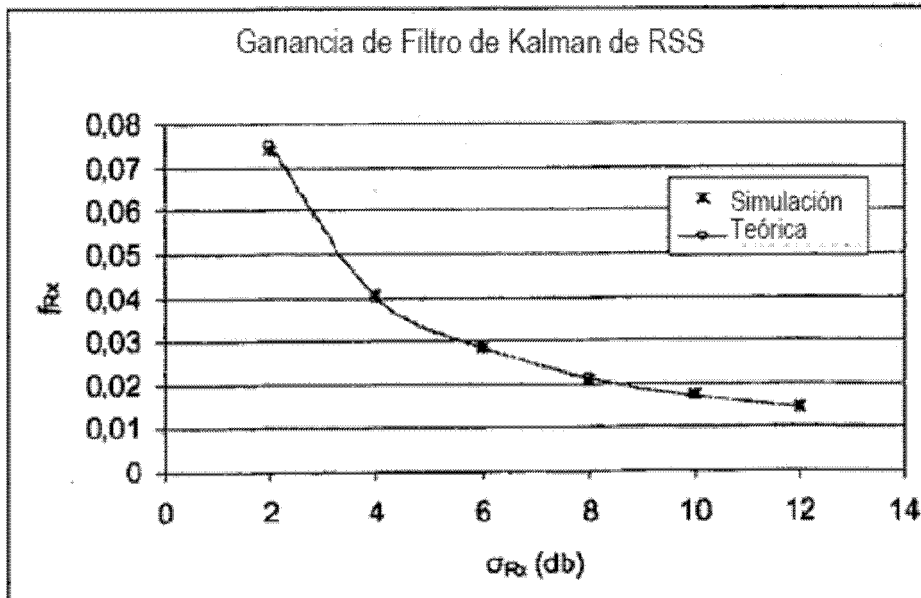


FIGURA 10

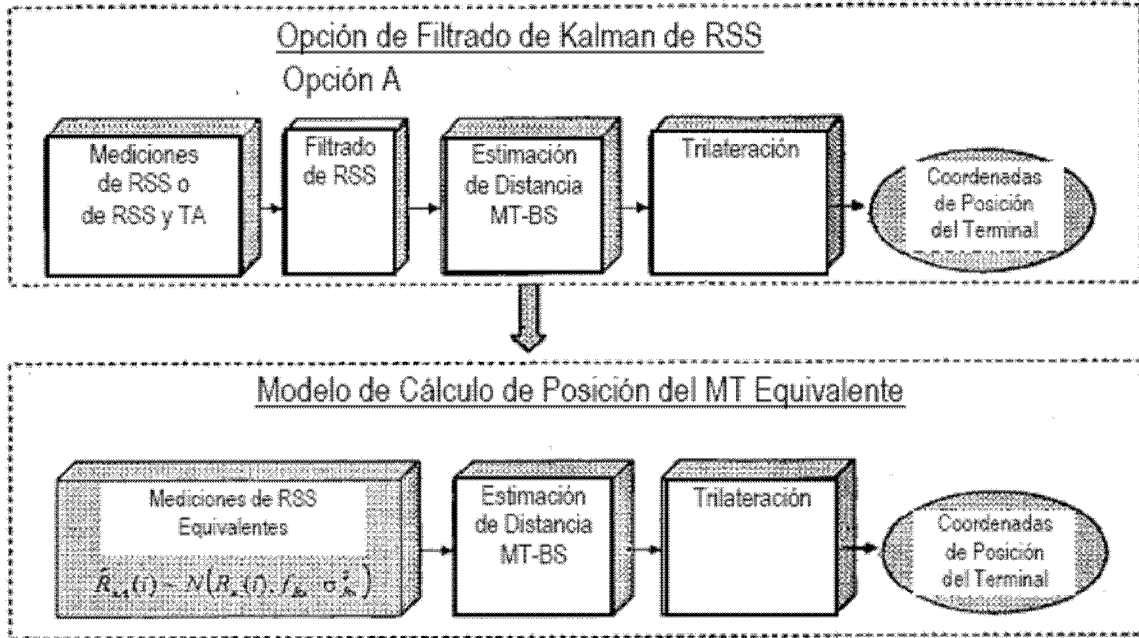


FIGURA 11

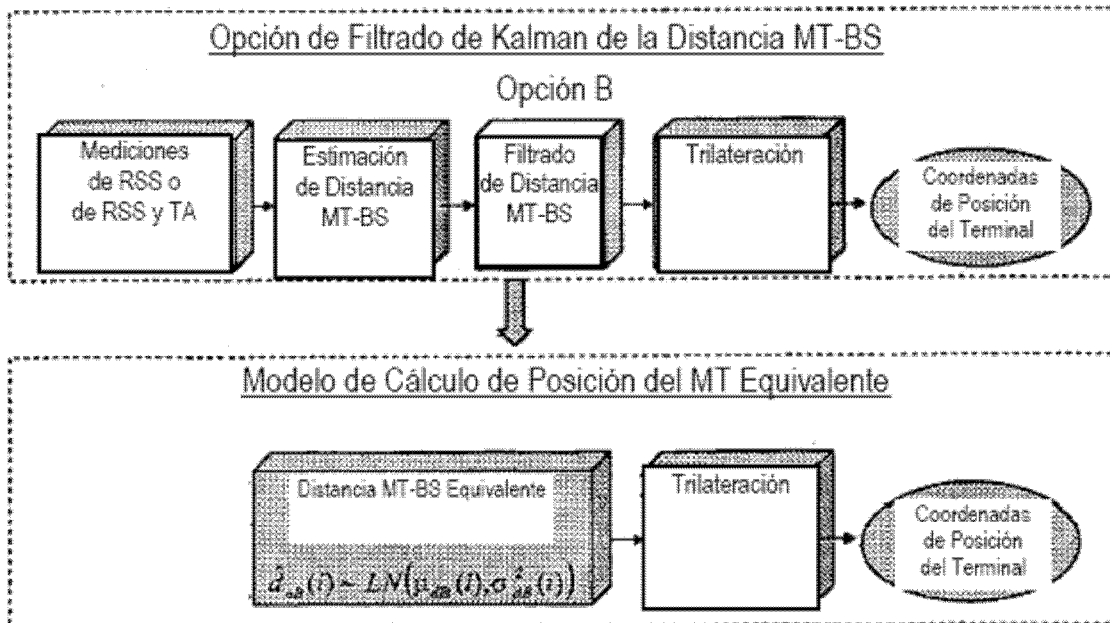


FIGURA 12

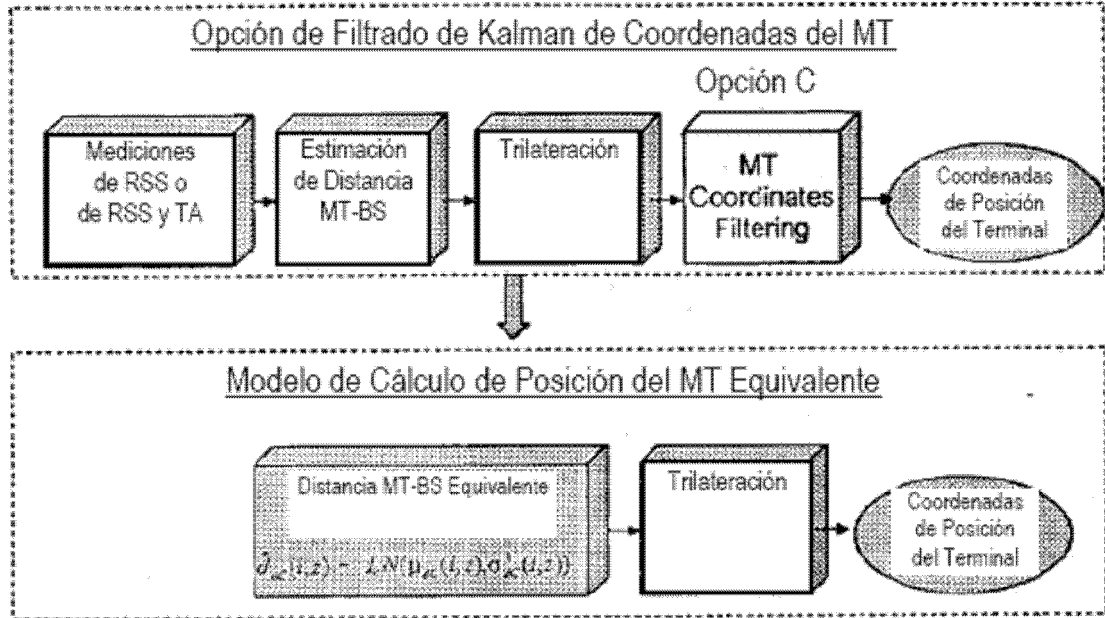


FIGURA 13

