

SEGUIMIENTO DE DISPOSITIVOS MÓVILES EN UN SISTEMA DE COMUNICACIONES MÓVILES CELULARES

Santiago Silva René Játiva *

Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

Resumen

Este artículo trata sobre el uso de algoritmos estadísticos en la estimación de señales de una red celular y su aplicación al posicionamiento y seguimiento de dispositivos móvil, con la finalidad de conseguir que la red esté en capacidad de proporcionar servicios basados en localización que podrían ser explotados conforme a las necesidades de los usuarios del sistema.

Se introducen brevemente dos técnicas de posicionamiento homogéneas: la primera basada en la estimación de los instantes de llegada de la señal (TOA), y la otra en la observación de la diferencia de instantes de llegada (TDOA); y se utilizan ciertos estadísticos desarrollados para estimar la varianza del error de posicionamiento al aplicar estas metodologías, para simular un entorno realista en el cual se disponen de mediciones de posición de suscriptores móviles. Estas mediciones contienen errores asociados a las limitaciones inherentes de la aplicación de estas metodologías sobre canales móviles, en este caso especialmente a sesgos introducidos por la presencia de propagación multitrayecto. A partir de estas medidas y de las ecuaciones de estado que definen el movimiento del dispositivo, y mediante la aplicación del Filtro de Kalman, se refina la estimación de posición. En efecto, el Filtro de Kalman minimiza el ruido de medida, a partir de su estadística y del comportamiento de los datos; es un filtro adaptativo cuyo uso permite conseguir una mejor aproximación de los resultados, y por consiguiente una mayor flexibilidad en los servicios basados en localización (LBS) que potencialmente podrían derivarse de su incorporación al esquema de localización.

El esquema desarrollado en esta propuesta se ha integrado para su visualización en un programa de mapas en tiempo real, GoogleEarth, que ocupa el puesto de servidor geográfico en este proyecto. En este artículo, se realiza la evaluación de las dos técnicas de posicionamiento ya mencionadas: TOA y TDOA, y del seguimiento de suscriptor móvil a través del uso del filtro de Kalman, en operación integrada, y no incluye los procesos de gestión y cálculo requeridos en una red celular para llevar a cabo la localización.

Palabras Clave. Kalman, Time Of Arrival (TOA), Time Differences Of Arrival (TDOA), Location Based Services (LBS).

Introducción

La determinación de la posición de un terminal móvil surgió ante la necesidad de ofrecer servicios de emergencia, y gestión de flotas, y sin duda supuso un impulso muy importante el mandato de 1999 de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, de que para Octubre de 2001, los servicios de emergencia deberían ser capaces de posicionar automáticamente a cualquier ciudadano que llamase al 911, dentro de 125m en dos tercios de los casos. A partir de entonces los servicios basados en localización (LBS) han tenido un desarrollo importante, de forma que estudios recientes de STRATEGY-ANALITICS predicen que los gastos que el usuario final en América del Norte realizará por concepto de esta clase de servicios crecerá desde 110 millones de dólares a finales de 2006 hasta alrededor de 2.200 millones de dólares a finales de 2011, y que alrededor de la tercera parte de esta contribución se producirá en el servicio de navegación de automóviles. La determinación de la posición de un terminal móvil no sólo es de utilidad para la prestación de LBS, sino también es de utilidad en la gestión de recursos radio y puede

aplicarse para maximizar la capacidad de un sistema de comunicaciones móviles.

El posicionamiento del suscriptor móvil puede realizarse de dos maneras: utilizando esquemas basados en red, que utilizan la infraestructura de la red celular existente; o esquemas basados en el terminal, que incorporan un dispositivo GPS (*Global Positioning System*) que se encarga de proveer la localización. Este último esquema se está desarrollando ampliamente en la actualidad. Estos esquemas se ilustran en la Figura 1.

Cualquiera de estos esquemas tiene sus propias limitaciones; así por ejemplo el esquema basado en GPS necesita un mínimo de tres satélites para determinar la localización del terminal móvil y su exactitud puede ser disminuida por la presencia de vegetación pesada, y geografía irregular (montañas o edificios altos). Los esquemas basados en red por su parte, se ven degradados en formas diversas que dependen del conjunto de señales utilizadas para efectuar la localización, tales como variaciones de potencia en la señal recibida, errores de sincronismo en las estaciones base (BS), sesgos originados en la propagación multitrayecto y en la presencia de obstrucciones, etc. Estas técnicas requieren también de la interacción de la

unidad móvil con varias estaciones base para conseguir mejorar su resolución, lo cual se dificulta en áreas rurales y de poca densidad de población. [1][2].

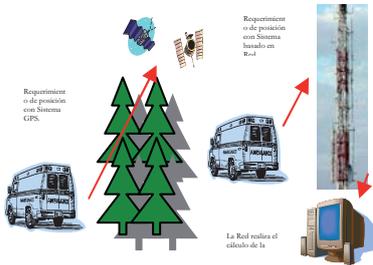


Figura 1. Ilustración de la determinación mediante la Técnica del TOA.

Para determinar la posición del suscriptor, un esquema basado en red puede hacer uso de la estimación de parámetros de la señal tales como: la potencia de la señal recibida, el tiempo de llegada de las señales (TOA: *Time Of Arrival*), la diferencia de los tiempos de llegada observados (TDOA: *Time Difference Of Arrival*), el ángulo de llegada (AOA: *Angle of Arrival*) de las mismas, entre otras. Las técnicas de estimación de la posición basadas en la estimación de los instantes de llegada o de sus diferencias se encuentran en el núcleo de los esquemas de alta resolución y por tanto su uso se contempla dentro de este trabajo.

La posición puede estimarse a partir de la estimación de los parámetros de TOA y TDOA usando la solución de Torrieri que asume que el error, e , en las estimaciones de los instantes de llegada de la señal se distribuye como ruido blanco y Gaussiano de media nula y matriz de covarianza, N_e [2]; y a partir de este conocimiento y del conjunto de parámetros de la técnica empleada es factible la aplicación de un algoritmo iterativo que converge hacia la posición más probable. Es factible también a partir de la estadística de estos parámetros, estimar la varianza del error de posicionamiento para una técnica particular, y por tanto realizar simulaciones que modelen este fenómeno y que permitan evaluar estas técnicas basadas en red.

A partir de la obtención de las estimaciones de posición, y siguiendo con el objetivo de este trabajo se introduce el Filtro de Kalman para conseguir el seguimiento del dispositivo móvil, lo cual involucra el disponer de una aproximación más exacta y dotar de mayor confianza al sistema. En efecto, el Filtro de Kalman es una herramienta que es capaz de modelar la evolución de señales en tiempo real, para lo cual usa ecuaciones de movimiento y mediciones de posición en forma iterativa.

Materiales y métodos

Obtención de la posición geográfica de la ruta y de las estaciones base

Para la simulación del entorno de trabajo se utiliza la herramienta Maptool que es el encargado de generar los archivos de ruta con las posiciones geográficas y forma

parte del simulador MPS-SDK 6.0 para el desarrollo de aplicaciones LBS sobre una red GSM o UMTS de la empresa Ericsson, que nos permite dibujar las trayectorias de los dispositivos móviles en la red y obtener sus coordenadas en un archivo de texto. Las posiciones reales se extraen y una vez infectadas con ruido de medida posibilitan realizar los análisis respectivos. Además, en otro archivo de texto se encuentran las localizaciones geográficas de las BS, las cuales son imprescindibles en el proceso de localización.

Localización mediante la técnica del TOA

En la técnica de localización conocida como TOA, el objetivo es conocer la distancia entre el móvil (MS: Mobile Station) y la estación base (BS: Base Station), para ello se miden los tiempo de propagación de la señal que toma en llegar desde la MS a cada una de las BS y se las relaciona con las distancias entre transmisor y receptor a través de la velocidad de la luz [2][3]. Esto permite obtener un conjunto de ecuaciones a partir del cual se estima la posición del móvil dentro de la red celular [3].

Es fácil entender entonces que el tiempo de propagación de la señal, t_i , desde el transmisor hasta una estación base BS_i se relaciona con la distancia, d_i , como se indica en la siguiente expresión:

$$t_i = \frac{d_i}{c} + e_i \quad (1)$$

Y que este conjunto de ecuaciones expresado en notación vectorial toma la siguiente forma, donde $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ relaciona la distancia con las coordenadas del suscriptor móvil y de cada una de las estaciones base:

$$\mathbf{t} = \mathbf{d} / c + \mathbf{e} = \mathbf{f}(\mathbf{r}) + \mathbf{e} \quad (2)$$

Note que el lugar geométrico de la posición para cada una de estas ecuaciones da lugar a una circunferencia centrada en una BS tal como se muestra en la Figura 2, y la estimación en base a la solución de Torrieri en puntos de color negro.

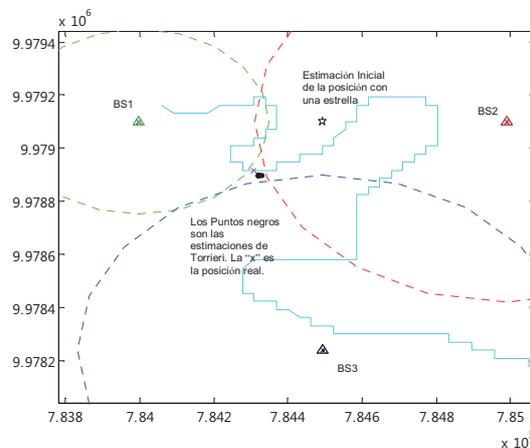


Figura 2. Visualización de la técnica del ToA con la solución de Torrieri

La dificultad en la solución del sistema expresado por la ecuación (2) radica en que $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ no es una función lineal,

que \mathbf{e} se desconoce y tiene una característica estocástica [3]. Para la técnica del ToA la solución de Don J. Torrieri es ahora clásica, y se basa en asumir que el vector de error \mathbf{e} se distribuye como ruido blanco y Gaussiano de media nula y matriz de covarianza \mathbf{N}_e [2][3]. De esta forma, la probabilidad de estimar \mathbf{t} dado que el móvil se encuentra en la posición \mathbf{r} , se expresa como en la ecuación (3), siendo N el número de ecuaciones de rango (número de estaciones base) disponibles [2].

$$p(\mathbf{t} | \mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[\mathbf{t} - f(\mathbf{r})]^T \mathbf{N}_e^{-1}[\mathbf{t} - f(\mathbf{r})]\right\} \quad (3)$$

La solución de Torrieri en (4) se calcula buscando el valor de \mathbf{r} que minimiza la probabilidad de cometer un error en la estimación de \mathbf{t} , aplicando la relación de máxima verosimilitud para inmediatamente linealizar la solución a través de una expansión de Taylor alrededor de un punto cercano a la posición del suscriptor, \mathbf{r}_0 , y que puede conseguirse fácilmente puesto que la celda donde éste se encuentra se encuentra siempre disponible.

$$\hat{\mathbf{r}}_{TOA} = \mathbf{r}_0 + c(\mathbf{F}^T \mathbf{N}_e^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{N}_e^{-1} (\mathbf{t} - \mathbf{d}_0 / c) \quad (4)$$

La matriz \mathbf{F} en la expresión anterior hace alusión a la geometría del problema de localización y que para esta técnica toma la forma en la ecuación (5).

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} (\mathbf{r}_0 - \mathbf{s}_1)^T / d_{01} \\ \vdots \\ (\mathbf{r}_0 - \mathbf{s}_N)^T / d_{0N} \end{bmatrix} \quad d_{0i} = \|\mathbf{r}_0 - \mathbf{s}_i\| \quad (5)$$

Donde \mathbf{s}_i corresponde a la posición de la BS_{*i*}.

Localización mediante la técnica del TDOA

En un esquema de localización basado en la observación de la diferencia de instantes de llegada hacia dos BS el lugar geométrico de la posición para cada ecuación define una hipérbola en lugar de la circunferencia del caso anterior [3]. En este caso la ecuación la forma siguiente:

$$t_i - t_{i+1} = (d_i - d_{i+1}) / c + n_i \quad (6)$$

Donde n_i corresponde al error de medida tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$n_i = e_i - e_{i+1} \quad (7)$$

En forma vectorial, este conjunto de ecuaciones se escribe como sigue:

$$\mathbf{H}\mathbf{t} = \mathbf{H}\mathbf{d} / c + \mathbf{n} \quad (8)$$

Donde la matriz \mathbf{H} define la geometría del problema para esta técnica.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Como se describe en [2], la solución de Torrieri para la técnica del TDoA es análoga a la presentada para la técnica del ToA, y toma la forma de la ecuación (10).

$$\hat{\mathbf{r}}_{TDOA} = \mathbf{r}_0 + c(\mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \mathbf{N}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \mathbf{N}^{-1} (\mathbf{H}\mathbf{t} - \mathbf{H}\mathbf{d}_0 / c) \quad (10)$$

Donde la matriz de covarianza del error de medición \mathbf{N} , se define como:

$$\mathbf{N} = (\mathbf{H}\mathbf{N}_e \mathbf{H}^T) \quad (11)$$

Se muestra en las expresiones (10) y (11) que la estimación de la posición está relacionada con la matriz de covarianza del error de las medidas, \mathbf{N}_e , y con la geometría del problema a través de las matrices \mathbf{F} y \mathbf{H} según la técnica empleada. Para la realización de las simulaciones se ha utilizado en lugar de las covarianzas del error de las medidas, sus cotas inferiores de Cramer-Rao, por lo cual se asume un entorno optimista.

Filtrado de Kalman

En este trabajo se utiliza el Filtro de Kalman vectorial [4][5] a efectos de conseguir el seguimiento en el tiempo del suscriptor móvil.

Dadas las Observaciones = $\{y_{(1)}, y_{(2)}, \dots, y_{(n)}\}$, se tiene un sistema de medición, donde deben conocerse parámetros respecto del funcionamiento del filtro, entre estas la Matriz de transición, que hace referencia a las ecuaciones cinemáticas de movimiento del problema.

$$F_{(n+1,n)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de medición, C , donde se combinan los resultados de las mediciones.

$$C_{(n)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La matriz de correlación de la varianza del proceso, $Q_{1(n)}$, donde se determinan los estadísticos del proceso en sí mismo.

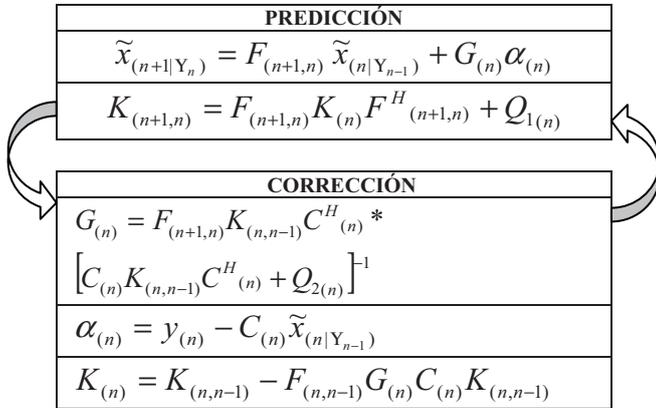
La matriz de correlación de la varianza del ruido de medición, $Q_{2(n)}$, donde se determinan los estadísticos del ruido, y que para el caso de TOA y TDOA se obtienen directamente de la técnica.

Las condiciones iniciales permiten empezar el ciclo de predicción de Kalman

$$\tilde{x}_{(1|Y_0)} = E[x_{(1)}]$$

$$K_{(1,0)} = E[(x_{(1)} - E[x_{(1)}])(x_{(1)} - E[x_{(1)}])^H] = \Pi_0$$

A continuación se presentan las ecuaciones de predicción y corrección



Finalmente, utilizando este conjunto de ecuaciones, el filtro de Kalman puede determinar y estimar la posición en base a los datos y estadísticos que se le proporciona.

Resultados y discusión

El siguiente experimento se ha desarrollado para observar el funcionamiento de las técnicas estudiadas y la aplicación del filtro de Kalman.

Los objetivos de este experimento son los siguientes:

- Estudiar el funcionamiento del sistema de localización a velocidades inferiores a 10 km/h.
- Visualizar y estudiar el comportamiento del filtro en una ruta de carretera.

En esta experiencia, se analiza la técnica del TOA y del TDOA para el caso en el que se tienen 3 ó 4 BS cercanas, en capacidad de servir al dispositivo móvil. Esta presunción se la hace con un radio de cobertura de

parámetros del proceso tales como la varianza de las medidas en los dos ejes de coordenadas utilizados, y las varianzas de las velocidades. Las primeras pueden estimarse a partir de cotas tales como las de Cramer-Rao [2][5], para las técnicas empleadas; y las últimas se



asumen que toman valores muy pequeños, lo cual es una suposición razonable para móviles desplazándose a velocidad constante, o cuando la actualización de las medidas se realiza en un corto intervalo ($t \sim 1s$).

Figura 4. Visualización de la ruta real sobre una foto Satelital

Durante la realización de esta experiencia, las varianzas del proceso se mantuvieron constantes, debido a la dificultad en su adquisición, pero se destaca el hecho de que estos estadísticos deberían calcularse justo en el momento que ocurre la solicitud de localización, así como debería disponerse de un tiempo de espera para efectuar la inicialización de determinados parámetros del filtro, como la estimación de la velocidad por ejemplo.

La Tabla 1 muestra estadísticos respecto de la precisión en la posición estimada cuando se aplica el Filtro de Kalman en el proceso de refinamiento de la posición, cuando se han aplicado técnicas de TOA o TDOA en el núcleo de la función para el cálculo de la posición de la unidad móvil. Esta tabla muestra por ejemplo que la estimación de la posición presenta un sesgo de entre -1

Experimento	Desviación estándar		Varianza		Valor medio		Valor medio del error absoluto	
	x	y	x	y	x	y	x	y
Coordenadas								
ToA (3BS)	12.96	14.06	167.99	197.63	-0.91	0.25	16.56	17.91
ToA (4BS)	13.37	13.22	178.62	174.85	-0.57	-0.76	16.50	17.23
TDoA (3BS)	13.89	15.86	192.99	251.59	-0.90	1.57	17.93	20.57
TDoA (4BS)	12.51	16.90	156.48	285.66	-0.88	0.23	14.97	19.21

Tabla 1. Estadísticos del error después del filtrado de kalman.

200m y que corresponde a un entorno urbano. En la Figura 4 se puede observar la ruta seguida por el dispositivo móvil.

Para mostrar el comportamiento del filtro de Kalman en el seguimiento de un dispositivo móvil, se fijan los

y 2 m, que se reduce al aumentar el número de estaciones base; y que el error de posicionamiento se encuentra entre 15 y 20m. Estos resultados muestran una clara mejoría respecto de las mediciones originales cuyo error bordeaba los 40m.

En la Figura 5 pueden observarse los resultados para el seguimiento. La gráfica superior utiliza la técnica de TOA, y la inferior la de TDOA (ambas para 3 B.S.), mostrando ambos resultados muy prometedores para la implementación de este servicio, siendo mejor la aplicación de la técnica basada en TDOA con cuatro BS que la de TOA con tres, por lo cual la primera se prefiere sobre la segunda, dado que esta técnica permite trabajar cómodamente aun con sincronización global deficiente.

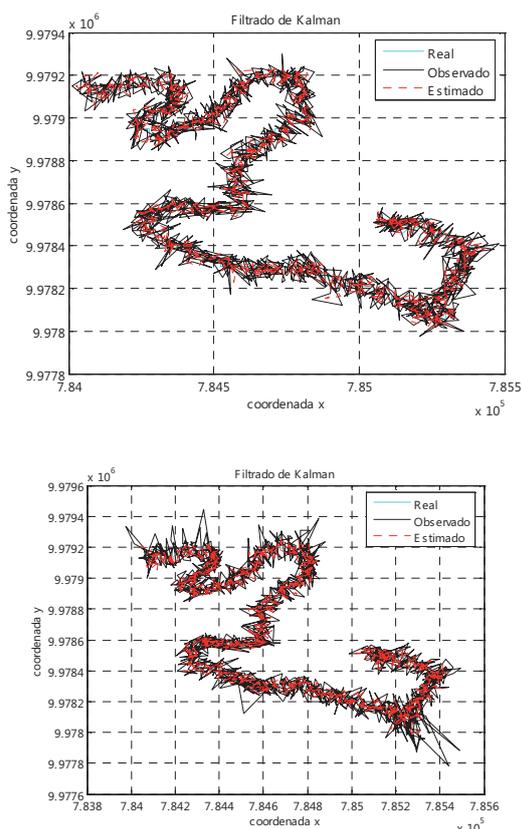


Figura 5. En la parte de arriba la técnica del ToA y en la parte inferior el TDoA para 3 estaciones base

Trabajos posteriores podrían desarrollarse en el sentido de implementar un simulador propio a fin de tener control sobre determinados parámetros que aparecen como inalterables en la herramienta, como el período de muestro por ejemplo.

Cabe señalar finalmente que este trabajo ha permitido tener herramientas y evidencias del comportamiento del filtro, y la enorme importancia de la inicialización de los parámetros de varianzas de la velocidad vectorial en el momento del cálculo de la posición, tópico éste que se encuentra en investigación y que será abordado en un artículo posterior.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Politécnica de Cataluña que ha permitido hacer uso de algunos de los resultados del proyecto SATURN para la realización de las simulaciones que se muestran en este documento.

Referencias bibliográficas

1. Olga Muñoz et al. 2000. "SATURN 231: Overview of UMTS User Location Possibilities and Limitations". Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Barcelona - España
2. Játiva R., Vidal J. 2004. "Principios y Evaluación del Servicio de Localización en UMTS". Centro de Investigación Científica (CEINCI).
3. Vidal J., Játiva R. 2000. "SATURN Report D621". Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Barcelona - España.
4. Perret G. "Kalman Tracking para peatones basado en TDOA para Sistemas Móviles Celulares". Instituto de Ingeniería Eléctrica Facultad de Ingeniería de la R.O.U.
5. G. Bishop. 2001. "An Introduction to the Kalman Filter". University of North Carolina at Chapel Hill. 2001.