

Localización robusta de pacientes mediante tecnología WiMAX

Juan Hernández-Serrano
Depto. de Telemática
Universitat Politècnica de Catalunya
Email: jserrano@entel.upc.edu

Olga León
Depto. de Telemática
Universitat Politècnica de Catalunya
Email: olga@entel.upc.edu

Juan Vera-del-Campo
Depto. de Telemática
Universitat Politècnica de Catalunya
Email: juanvc@entel.upc.edu

Miguel Soriano
Depto. de Telemática
Universitat Politècnica de Catalunya
Email: soriano@entel.upc.edu

Resumen—La monitorización remota de pacientes es una de las piedras angulares de lo que hoy en día se denomina e-Salud. Una rápida reacción ante síntomas de una enfermedad puede mejorar sustancialmente tanto su diagnóstico como su tratamiento, y además puede evitar el ingente gasto derivado de tratamientos tardíos. Una buena parte de las soluciones de e-Salud dependen de una red de adquisición de datos, p.ej. una red de sensores adherida al paciente, de una red de distribución de los datos hasta los centros de operación médicos y de la localización de los pacientes cuando se debe intervenir de urgencia. El despliegue de una red celular WiMAX puede facilitar la distribución de los datos de forma inalámbrica de gran alcance y también la localización del paciente. Ahora sí, si bien la distribución segura de datos mediante WiMAX se ha abordado con considerable éxito, la localización en presencia de estaciones bases WiMAX que hayan sido comprometidas o que no funcionen correctamente es todavía un importante reto de investigación. En este artículo se propone un método robusto de localización que permite localizar hasta k estaciones base “maliciosas” y que sigue siendo preciso incluso en su presencia.

I. INTRODUCCIÓN

La rapidez con que se realiza una intervención médica determina en gran medida la efectividad de la misma. Hoy en día, los protocolos médicos de operación tienen entre sus mayores objetivos minimizar tanto el tiempo de detección de una posible enfermedad como el tiempo que transcurre entre los primeros síntomas y el tratamiento. El uso de las nuevas tecnologías para la salud, comúnmente denominado como e-Salud, lo hace posible. Gracias al uso de redes de sensores adheridas a los pacientes, se puede detectar una enfermedad desde sus primeros síntomas, y las redes de comunicación permiten que un centro de operaciones pueda recibir esta información y preparar el tratamiento o la intervención en el menor tiempo posible. Además, y especialmente si se desea que el paciente tenga un cierto grado de movilidad, se necesitan también sistemas de localización que permitan llegar hasta el paciente en casos de urgencia.

Las redes celulares WiMAX han surgido como una solución muy prometedora para mantener la conectividad entre las redes de adquisición en los pacientes, usualmente redes de sensores, y las unidades médicas operativas. WiMAX ofrece mayores

rangos de cobertura que otras tecnologías inalámbricas, y permite por tanto el seguimiento de pacientes no sólo en casa o en el hospital, si no también en grandes extensiones en espacios abiertos, como por ejemplo pueblos o campus de hospitales. Además, como se describe a continuación, las redes celulares WiMAX pueden ser utilizadas para desarrollar sistemas de localización precisos y robustos sin necesidad de hardware adicional.

Existen diferentes técnicas de localización aptas para redes inalámbricas [1], pero las basadas en la intensidad de la señal recibida (*received signal strength* - RSS), el instante de llegada (*time of arrival* - TOA) de la señal y diferencias entre instantes de llegada (*time difference of arrival* - TDOA) parecen ser las más adecuadas para la localización en WiMAX, ya que el resto de sistemas, como el sistema de posicionamiento global (*global positioning system* - GPS) o las técnicas basadas en el ángulo de incidencia de la señal (*angle of arrival* - AOA), requerirían hardware adicional.

Mediante el uso de RSS, TOA y TDOA es posible estimar la distancia, o la diferencia de distancias, entre el nodo que se encuentra y varios nodos de anclaje. A partir de estos datos, la posición del nodo podría obtenerse mediante tri/multi-lateration. Sin embargo, en la práctica, las medidas obtenidas están sometidas a errores y por lo tanto el problema de localización se convierte en un problema de optimización que se resuelve usando, por ejemplo, sistemas de mínimos cuadrados (Least Square - LS) [2] y/o filtros extendidos de Kalman-Bucy [3].

En RSS, suponiendo conocidos la potencia de transmisión y el modelo de pérdidas de propagación, es posible estimar la distancia desde un nodo hasta diversos nodos de posición conocida, y por tanto su posición. Aunque las mediciones de RSS son relativamente baratas y fáciles de implementar en hardware [1], son muy sensibles a errores debido sobretudo a la variabilidad del canal, la propagación multi-camino y el shadowing. De hecho, el efecto del shadowing se modela normalmente como una distribución log-normal, derivando la desviación estándar de la potencia recibida en estimaciones de posición con varianza del error proporcional a la distancia.

Por esta razón, las técnicas basadas en RSS no son adecuadas para enlaces de largo alcance, como es el caso de WiMAX, cuyas estaciones base (*Base Station* - BS) tiene un rango de cobertura del orden de kilómetros.

TOA y TDOA son técnicas similares. En TOA, las distancias se obtienen por medio del tiempo transcurrido entre que una señal dada se envía y se recibe. Por otro lado, en TDOA se obtienen diferencias de distancia a partir de la diferencia en los instantes de llegada de una misma señal a diferentes nodos (p.ej. las BSs). Puesto que TOA requiere una sincronización precisa entre emisor y receptor, y TDOA sólo entre los distintos receptores, la última es más adecuada en redes celulares, puesto que es más fácil asumir que las estaciones base de cada celda estén sincronizadas que no que lo esté un nodo cualquiera.

Ya ha habido intentos de aplicar técnicas de localización basadas en TDOA en WiMAX, pero sin embargo todavía no se ha abordado en la literatura el uso de los mismos en un entorno que podría ser hostil, donde algunas BS podrían reportar información errónea o falsa. En este artículo presentamos un método robusto de localización para redes celulares WiMAX que permite identificar hasta k estaciones bases reportando información de localización errónea, que de ahora en adelante llamaremos estaciones base maliciosas (*malicious base stations* - MBS), y que, al apartarlas del proceso de localización, sigue dando una estimación fiable de la posición. Si bien este trabajo se ha desarrollado dentro de un proyecto más amplio que aborda los retos actuales y futuros de la e-Salud, la solución obtenida se extiende a un ámbito más general y podría entenderse como un sistema de localización robusto para redes celulares.

El resto de este artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección II se introduce nuestra propuesta de localización de redes celulares WiMAX. A continuación, en la Sección III, se muestra los resultados de la simulación del método propuesto y se evalúa la bondad del mismo y su fortaleza ante MBSs. Por último, en la Sección IV se presentan las conclusiones acerca de este trabajo.

II. LOCALIZACIÓN ROBUSTA EN REDES CELULARES WiMAX

En esta sección se presenta un método de localización para redes celulares WiMAX que permite a los usuarios de la red obtener una estimación precisa de su posición incluso en la presencia de MBS. El método se basa en el hecho de que un nodo puede recibir señales de n BSs diferentes y, por tanto, proporciona protección ante un máximo de $k < n$ MBS. En la Sección II-A se define como estimar la posición mediante un método de minimización de la suma ponderada de errores cuadráticos (*weighted least squares* - WLS) en el que se aplica a las medidas un peso en función de la probabilidad de error. La Sección II-B define como detectar y descartar hasta k MBS en el método de localización propuesto, o lo que es lo mismo, como conseguir un sistema de localización k -resistente.

II-A. Estimación de la posición basada en WLS

Los métodos LS de estimación [2] son esquemas iterativos que comienzan con una estimación inicial aproximada (x, y, z) que se va mejorando en cada iteración $(x + \delta_x, y + \delta_y, z + \delta_z)$ a partir de las correcciones $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ que minimizan (localmente) la suma de errores cuadráticos. El objetivo es iterar el método hasta que los componentes de la corrección están por debajo de un umbral dado, es decir, que la estimación converge.

De acuerdo con esto, dado un conjunto de n medidas TDOA τ_i tomadas por los pares formados por la BS de referencia (la estación base en la está asociado el nodo) y otras n estaciones base, el error en las medidas de distancia para una predicción (x, y, z) se puede expresar como en (1), con d_i como en (2) y d_0 como en (3) siendo las distancias entre la estimación y la BS_i y entre la estimación y la BS de referencia, que se asume que está en el origen, y v_p la velocidad de propagación de las seales en el medio radio.

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} \tau_1 v_p - d_1 + d_0 \\ \tau_2 v_p - d_2 + d_0 \\ \vdots \\ \tau_n v_p - d_n + d_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (2)$$

$$d_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

Entonces, a partir del polinomio de Taylor de primer grado de \mathbf{e} , se puede representar el error de distancia para una estimación (x, y, z) como en (4), con \mathbf{A} una matriz $n \times 3$ con los coeficientes de Taylor de primer orden, y $\boldsymbol{\delta}$ un vector columna 3×1 con las correcciones $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$.

$$\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\delta} + \mathbf{e} \quad (4)$$

Asumiendo que $\hat{\mathbf{e}}$ es de rango máximo, el valor de $\boldsymbol{\delta}$ que minimiza la suma ponderada de errores cuadráticos $\hat{\mathbf{e}}^T \mathbf{W} \hat{\mathbf{e}}$ se puede obtener como en (5), con \mathbf{W} una matriz diagonal con los pesos w_{ii} asignados a cada medida TDOA.

$$\boldsymbol{\delta} = -[\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{e} \quad (5)$$

En esta propuesta utilizamos pesos normalizados obtenidos a partir de la inversa de una estimación de la varianza obtenida a partir de la posición. Por lo tanto, una vez definido un modelo para el error de medida, los pesos asignados a cada medida se definen como en (6), con σ_i la varianza del error de medida si el nodo estuviese en la posición estimada, y σ_{min} la varianza mínima de entre todas las n medidas TDOA. En la Sección III se presenta un ejemplo de como definir el modelo de error.

$$w_{ii} = \frac{\sigma_{min}(x, y, z)}{\sigma_i(x, y, z)} \quad (6)$$

II-B. Localización robusta k -resistente

A fin de alcanzar k -resistencia, en vez de aplicar directamente un método WLS como en la Sección II-A, se agrupan el conjunto de n medidas TDOA en todos los posibles subconjuntos de $(n-k)$ elementos, es decir $\binom{n}{n-k}$. Entonces, se aplica un método de localización WLS por separado en cada subconjunto $j = 1.. \binom{n}{n-k}$ obteniendo $\binom{n}{n-k}$ estimaciones de posición (x_j, y_j, z_j) . A continuación, se calculan los errores de medida \hat{e}_j en función de cada una de las estimaciones anteriores. Finalmente, se selecciona como estimación provisional (x, y, z) a la estimación dada por el subconjunto con la menor mediana de los errores cuadráticos \hat{e}_j .

Obviamente, para cualquier número $m \leq k$ de MBS, al menos uno de los subconjuntos estará libre de medidas erróneas. Por tanto, la estimación de ese subconjunto exhibirá la menor mediana de errores cuadráticos. Debe hacerse hincapié en este punto en el hecho de que el cálculo de $\binom{n}{n-k}$ estimaciones WLS no tiene porqué ser un factor enlentecedor del sistema ya que: 1) el número normal de BS en el rango de cobertura de una red celular WiMAX debe ser más o menos 7 [4] (la BS asociada y las 6 adyacentes), con lo que n es un número pequeño; y 2) se trata sólo de recombinaciones de las medidas ya obtenidas, y no de adquirir nuevas medidas.

Hasta aquí, hemos proporcionado un método simple pero efectivo que aparta de la estimación k medidas, $m \leq k$ de ellas provienen de MBSs. Quedan por tanto dos problemas por resolver: 1) si $m < k$, estamos descartando $k - m$ medidas válidas y perdiendo por tanto precisión; y 2) es necesario identificar exactamente a las m MBSs para tomar futuras acciones como dejarlas de lado, informar de su mal comportamiento, etc. A continuación se detalla cómo medir la fiabilidad de una medida TDOA y por tanto cómo detectar con eficacia las “malas” medidas. Una vez detectadas, se aplica una última estimación WLS descartando sólo las medidas erróneas.

La fiabilidad de una medida determinada se puede obtener a partir de su error de acuerdo a la estimación provisional. Intuitivamente, cuanto más pequeño es el error de medición, más fiable es la medida, y viceversa. Es decir, que si se expresa el error de medida como una variable aleatoria E , la función de densidad de E evaluada en el error obtenido de la medida indica claramente lo probable que es el error reportado. Consecuentemente, tal y como se expresa en (7), la fiabilidad de una medida se puede representar entre 0 y 1 como la función de densidad normalizada de E evaluada en el error calculado a partir de la estimación final de la posición.

$$\rho_{ij} = \frac{\text{pdf}(E)}{\max(\text{pdf}(E))} \quad (7)$$

Obviamente, las medidas “malas” van a ser muy improbables pues van a estar muy alejadas del valor esperado. Por lo tanto, definido un umbral de fiabilidad, las medidas “malas” se pueden descartar fácilmente y por tanto se puede comenzar una nueva estimación WLS apartando dichas medidas.

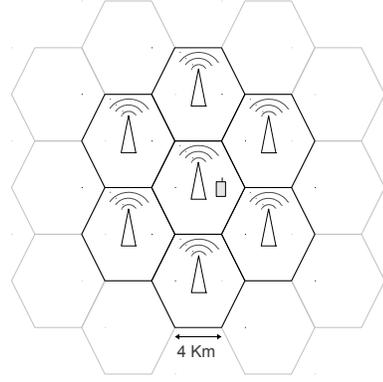


Figura 1: Escenario simulado

III. EVALUACIÓN

En esta sección se evalúa a través de la simulación la bondad del método propuesto. El escenario considerado, ver Figura 1, es una red celular WiMAX IEEE 802.16 que opera en la banda de 3.5 GHz y que consta de siete celdas hexagonales, la estación a la que se asocia el nodo/paciente y sus adyacentes, de lado 4km. Hemos asumido que las BSs de cada celda están sincronizadas. Tal y como se sugiere en [5], el modelo de canal adoptado es el *Stanford University Interim* (SUI), que es una extensión del modelo Hata con parámetros de corrección para frecuencias por encima de 1900 MHz. Hay 3 variantes, A, B y C, de este modelo para diferentes tipos de terreno, difiriendo entre ellas en su valor del exponente pérdidas de propagación y la desviación estándar de los desvanecimientos débiles. En este trabajo, hemos considerado el tipo A, que corresponde a terrenos montañosos con vegetación moderada o muy densa.

Se asume que una señal emitida por un nodo o paciente es recibida no sólo por la BS a la que está asociado, sino también por las BSs de las células adyacentes, en este último caso con una menor relación señal-ruido (*signal-to-noise relation* - SNR). En particular, hemos considerado un promedio de SNR en recepción por parte de la BS asociada de $\text{SNR}_0 = 6\text{dB}$, que se correspondería al peor de los casos (modulación BPSK). La SNR en el resto de BSs se deriva aplicando el modelo SUI. Cuando un nodo quiere obtener su posición, ejecuta el método de localización explicado en las Secciones II-A y II-B con el conjunto de seis medidas TDOA $\tau_i = t_i - t_0$, con t_i el tiempo de recepción de la señal en la i -ésima BS y t_0 el instante de recepción en la BS asociada. Para que las gráficas de resultados fuesen más claras, se ha aplicado el método sobre una superficie 2D.

El objetivo principal es estimar con precisión la ubicación del nodo incluso cuando alguna BSs esté reportando medidas erróneas. Con este fin, aplicamos el método de localización k -resistente descrito en la Sección II-B para $k = [0, 1, 2]$ y $n = 6$ (6 medidas TDOA entre la BS asociada y las BSs en celdas adyacentes). Para la estimación WLS final, se descartan las medidas con peso por debajo de 0,1.

Cuando se aplica el método de WLS con cada uno de los $\binom{n}{n-k}$ subconjuntos de medidas, a cada medida se le asigna un

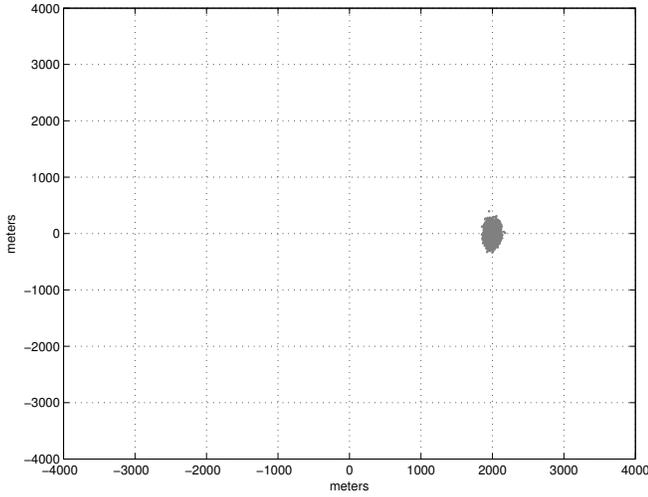


Figura 2: Estimación de la posición con un método de localización 0-resistente sin MBSs

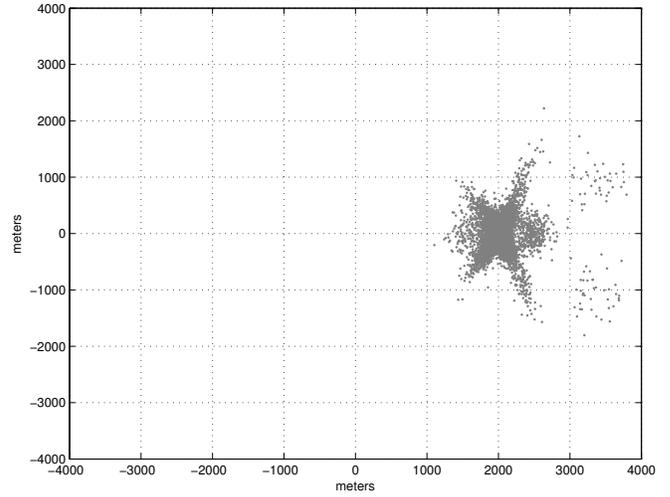


Figura 4: Estimación de la posición con un método de localización 2-resistente y 2 MBSs

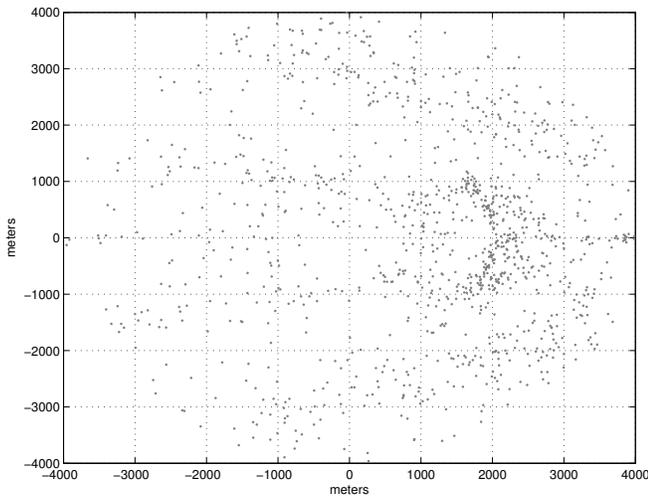


Figura 3: Estimación de la posición con un método de localización 0-resistente y 2 MBSs

peso como en (6). Siguiendo el enfoque de [6], los errores de las medidas de tiempo se modelan como variables aleatorias normales de media 0. Por lo tanto, el error de cada medida TDOA obtenida por el par BS asociada y BS i , se modela como una distribución normal con media 0 y varianza $\sigma_i + \sigma_0$, siendo σ_i la varianza del error en tiempo en la recepción de la señal por la BS i y σ_0 la varianza de la BS asociada. Las varianzas σ_i se obtienen por medio del límite inferior de Cramer-Rao (*Cramer-Rao lower bound - CRLB*) [7] como en (8), con B el ancho de banda de la señal y SNR la relación señal-ruido para esa medida.

$$\sigma_i^2 \geq \frac{1}{8\pi^2 \cdot B^2 \cdot \text{SNR}} \quad (8)$$

Las figuras 2 y 3 representan los resultados de las simulaciones obtenidas con 10.000 iteraciones considerando un nodo paciente situado en (2000m,0), en ausencia de MBSs

y cuando hay 2 MBSs. Como se puede observar, los reportes falsos de 2 MBSs hacen que la precisión en la localización decaiga drásticamente, llevando el error cuadrático medio de la estimación de 97,46m hasta 2.467,15m, lo que vendría a significar que la localización no aporta más información adicional que la celda de asociación.

La Figura 4 muestra la mejora obtenida por el método de localización que se propone en la Sección II cuando hay 2 MBS con $k = 2$. El método propuesto identifica eficazmente las medidas erróneas y estima la posición del nodo sin tenerlas en cuenta. El error obtenido es mayor que en el caso de la Figura 3 debido a que la estimación final se basa en 4 medidas en vez de 6 (se han descartado dos). Sin embargo con 2 de 6 medidas erróneas ha sido capaz de dar una estimación de la posición con un error aceptable.

Aparte del incremento en el error de localización, las medidas erróneas pueden llevar a una situación incluso peor: la no-convergencia del estimador WLS; es decir, que no se sea capaz de estimar la posición. El Cuadro I muestra porcentaje de iteraciones en las que el algoritmo no converge debido a datos inconsistentes en función del número de MBS y el valor de resistencia k . En el cuadro se puede observar que el mecanismo de detección WLS sin k -resistencia falla en torno a un 80 % de las veces cuando hay al menos una MBS. Por otro lado, cuando se aplica el método k -resistente, el porcentaje de no-convergencia tiende a cero cuando el número de MBSs es menor que k , lo que es un resultado muy prometedor, pues garantiza la localización en presencia de MBSs.

Nótese que el porcentaje de no-convergencia es ligeramente mayor con $k = 3$ que con $k = 2$. Esto se debe al hecho de que, cuando k aumenta, decrece el tamaño de los subconjuntos de medidas que se pasan al estimador, lo que puede llevar a que de forma más probable puedan fallar todas las estimaciones incluso por el propio ruido de medida. Obviamente, la elección de un valor grande de k debe ir acompañada de un mayor número n de medidas TDOA. En cualquier caso, la eficiencia

k	0 MBSs	1 MBSs	2 MBSs
0	0	78,78 %	88,81 %
1	0	0	71,31 %
2	0	0,02 %	0,15 %
3	0	0,03 %	0,21 %

Cuadro I: Porcentaje de no-convergencia en el método de localización

del algoritmo de localización es mayor cuando se aplica el método de k -resistencia.

IV. CONCLUSIONES

El seguimiento o monitorización de pacientes de forma remota es una piedra angular en el desarrollo de lo que se denomina la e-Salud. Una rápida detección de los primeros síntomas de una enfermedad puede facilitar el diagnóstico médico y mejorar la eficacia de los tratamientos. Puesto que el coste del tratamiento muchas veces es proporcional al tiempo que se ha tardado en detectar la enfermedad, la e-Salud no sólo puede mejorar la asistencia médica, sino que es también una fuente potencial de ahorro para el sistema de salud.

Los servicios de e-Salud a menudo se basan en la monitorización continua de los pacientes a través de una red de adquisición (por ejemplo, una red de sensores adherida al paciente) que reporta a una unidad médica operativa a través de una red de distribución. La red de distribución debe ser preferiblemente inalámbrica para permitir la movilidad de los pacientes. En este contexto, las redes WiMAX, en especial después de la aparición de la tecnología WiMAX celular [4], surgen como una tecnología prometedora para proporcionar conectividad inalámbrica tanto en interiores como en exteriores, lo que lleva al paciente a un nuevo grado de libertad. Además, las redes WiMAX también pueden utilizarse para la localización del paciente sin necesidad de cargarle con nuevo hardware. Sin embargo, la localización puede ser contraproducente e incluso perjudicial si no es suficientemente precisa. Como consecuencia de ello, se ha abordado el problema de hacer la localización robusta ante reportes falsos de las estaciones base WiMAX, ya sea por fallos de funcionamiento o porque hayan sido comprometidas.

En este trabajo se ha presentado un método de localización para redes celulares WiMAX capaz de estimar la posición incluso en la presencia de hasta k medidas erróneas reportadas por las estaciones base. El método de localización se basa en la adquisición de medidas TDOA, una estimación WLS de estas medidas, un método de recombinación con el fin de obtener una estimación provisional, y un sistema fiabilidad que identifica las medidas erróneas con el fin de apartarlas de una estimación de la posición final más exacta. Además se ha evaluado el método propuesto siguiendo las recomendaciones del propio estándar [4], demostrándose la bondad de esta propuesta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha podido realizar parcialmente gracias a los fondos de: el proyecto CICYT TAMESIS (TEC2011-

22746), el proyecto CONSOLIDER ARES (CSD2007-00004), los fondos AVANZA para el proyecto ITEA2 DiCoMa (TSI-020400-2011-55) y el reconocimiento 2009 SGR-1362 de la *Generalitat de Catalunya* como grupo consolidado de investigación.

REFERENCIAS

- [1] N. Patwari, J. Ash, S. Kyperountas, I. Hero, A.O., R. Moses, and N. Correal, "Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 22, no. 4, pp. 54–69, Jul. 2005.
- [2] T. C. Hsia, *System identification: Least-squares methods*. Lexington Books, 1977.
- [3] J. Hamilton, *Time series analysis*. Cambridge Univ Press, 1994, vol. 10.
- [4] IEEE 802.16 Task Group m (TGM), "IEEE Std. 802.16m-2011," 2011. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/16/tgm>
- [5] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, "Channel models for fixed wireless applications," 802.16.3c-01/29r4, 2001. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/16>
- [6] S. Gezici, Z. Tian, G. Giannakis, H. Kobayashi, A. Molisch, H. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, Jul. 2005.
- [7] R. J. Barton and D. Rao, "Performance capabilities of long-range uwb-ir tdoa localization systems," *EURASIP J. Adv. Signal Process*, vol. 2008, pp. 81:1–81:17, Jan. 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2008/236791>