

Técnicas de Localización en Redes Inalámbricas de Sensores*

Eva M. García Polo

Instituto de Investigación en Informática de Albacete
Departamento de Sistemas Informáticos
Universidad de Castilla-La Mancha
evamaria.garcia@uclm.es

Resumen. Actualmente, las redes inalámbricas de sensores gozan de un gran interés, motivado por su amplio abanico de aplicaciones. Uno de los problemas cruciales de estas redes es la determinación de dónde se encuentra físicamente un nodo, conocido como problema de localización. En este trabajo se presentan y detallan diversas técnicas de localización utilizadas en la actualidad, clasificadas en tres grandes grupos: basadas en distancias, libres de distancias y técnicas con uno o varios nodos móviles. A lo largo del trabajo, veremos que la elección de la técnica óptima de localización dependerá en gran medida de la aplicación concreta a la que vaya destinada la red de sensores.

Keywords: Redes inalámbricas de sensores, localización.

1 Introducción

En los últimos años, las redes inalámbricas de sensores (en adelante WSNs de *Wireless Sensor Networks*) gozan de un gran interés, tanto por parte de la comunidad científica como del sector industrial. Los avances en las comunicaciones inalámbricas y en la electrónica, han hecho viable el desarrollo de redes de sensores multifuncionales de bajo coste y bajo consumo. Estos pequeños sensores, o “motes” (de mota de polvo), son capaces de medir parámetros físicos, procesar información y comunicarla a otros dispositivos, generalmente, a través de un canal de radiofrecuencia (RF). Los campos de aplicación de las WSNs son innumerables. Algunas de estas aplicaciones son: telemática, agricultura de precisión, exploración de hábitats, detección y actuación ante desastres, edificios inteligentes, gestión de centros gubernamentales, monitorización sanitaria y médica, entre otras.

Es evidente que una de las cuestiones críticas en la mayoría de las aplicaciones anteriores, es relacionar los datos físicos medidos con posiciones en el espacio. Esta cuestión se conoce con el nombre de localización, es decir, cada dispositivo debe conocer su posición exacta en el espacio en cualquier instante de tiempo.

* Este trabajo ha sido financiado por los siguientes proyectos: CSD2006-46 (Ministerio de Educación y Ciencia), TIN2006-15516-C04-02 (Ministerio de Educación y Ciencia) y PREG-07-25 (Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha).

En ocasiones es difícil, si no imposible, que dicha posición pueda ser programada en cada dispositivo de antemano. Piénsese, por ejemplo, en el despliegue de una WSN desde un vehículo aéreo tras la ocurrencia de un desastre, la introducción de sensores en un glaciar para analizar su desplazamiento, o el anillamiento de aves para estudiar sus hábitos migratorios. En entornos al aire libre, es posible el empleo de un sistema de posicionamiento por satélite, como el GPS (*Global Positioning System*) [12] o la propuesta europea Galileo [7]. Sin embargo, hoy por hoy, dotar a todos los sensores de la red de un receptor GPS es una opción inviable, debido fundamentalmente a razones de tamaño, consumo y precio. Por tanto, lo habitual es que solamente una porción de los motes conozca su posición exacta. Estos nodos, denominados en la literatura balizas (*beacons*) o anclas (*anchors*), difunden dicha información al resto de la red. Entonces, mediante un algoritmo distribuido, el resto de los motes podrán llegar a inferir su ubicación.

Existe otro tipo de aplicaciones que asumen la existencia de nodos móviles que es necesario localizar (este tipo de algoritmos se denominan de seguimiento o *tracking*). Citemos como ejemplo Motetrack [16], un sistema descentralizado basado en radiofrecuencia para realizar el seguimiento de objetivos móviles. Su funcionamiento está basado en la utilización de una serie de motes actuando como balizas, que emiten periódicamente mensajes indicando su identificador y su potencia de transmisión. Previo a la utilización del sistema es necesario realizar un proceso de calibración en el que un usuario móvil con un receptor de radio recolecta un conjunto de referencias de dichas balizas. Una vez que se ha calibrado el sistema, el objetivo móvil que desea conocer su posición escucha durante un instante de tiempo. Se realiza entonces un proceso de obtención de la posición que consiste en calcular el centroide geográfico del conjunto de referencias que están al alcance de dicho objetivo.

En otras ocasiones, son precisamente los nodos móviles los que proporcionan información de posicionamiento al resto de la red. Un ejemplo son los aviones no tripulados o UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle*). La misma aeronave que disemina los sensores, puede incorporar un GPS y transmitir su posición a los nodos en tierra [5].

Puesto que el objetivo de este curso es abordar las técnicas de localización, cuya función principal es determinar la posición de cada nodo de la red, una vez ha sido desplegada, nos centraremos en ellas, dejando a un lado los sistemas de rastreo de objetivos.

La técnica de localización o posicionamiento más adecuada dependerá en gran medida de la aplicación específica a la que se destine la WSN. En este curso veremos una clasificación de las técnicas actuales de localización para redes inalámbricas de sensores y entraremos en detalle en algunas de ellas.

2 Localización en redes inalámbricas de sensores

Para discutir en detalle la localización en redes inalámbricas de sensores, vamos a introducir el contexto en el que operan estos algoritmos. Denominaremos “nodo baliza”, o simplemente “baliza”, a aquél capaz de conocer su posición exacta en cualquier instante, al estar dotado de alguna tecnología para ello (por ejemplo de un

receptor GPS). Asimismo, denominaremos “nodo desconocido” a aquél que desconoce su posición exacta o aproximada.

Actualmente, las técnicas de localización en redes inalámbricas de sensores se pueden dividir en dos grandes grupos:

1. Basadas en distancias (*range-based*)
2. Basadas en proximidad (*proximity-based*) o libres de distancias (*range-free*)

El primer grupo necesita estimar, o bien las distancias entre los nodos, o bien los ángulos entre ellos. Para ello, se han desarrollado las técnicas siguientes:

- Tiempo de llegada (ToA – *Time of Arrival*)
- Diferencia de tiempos de llegada (TDoA – *Time Difference of Arrival*)
- Ángulo de llegada (AoA – *Angle of Arrival*)
- Fuerza de la señal recibida (RSS – *Received Signal Strength*)

Antes de entrar en detalle en las técnicas de localización actuales, vamos a explicar cada una de las técnicas de estimación de distancias o ángulos que se utilizan actualmente.

2.1 Técnicas de estimación de distancias

Para permitir la estimación de distancias, en los últimos años se han desarrollado diferentes técnicas que detallaremos a continuación.

2.1.1 Tiempo de llegada (ToA)

La medición del ToA de una señal es un método robusto para estimar distancias que se usa, entre otros, en GPS. Esta técnica mide el tiempo que tarda una señal en viajar de un nodo a otro a una velocidad conocida. Por ejemplo, las ondas sonoras viajan a una velocidad aproximada de 344 metros/segundo con una temperatura de 21°C. Así, un pulso de ultrasonido enviado por un nodo y que llega a otro 14'5 milisegundos después, nos permite concluir que la distancia entre ellos es de 5 metros.

2.1.2 Diferencia de tiempos de llegada (TDoA)

Aunque la técnica anterior es muy precisa, se necesita una estricta sincronización entre el emisor y el receptor. Sistemas como Calamari [37], Cricket [26] y AHLoS (*Ad-Hoc Localization System*) [29] utilizan una técnica llamada diferencia de tiempos de llegada (TDoA) que permite una sincronización en el tiempo más compleja. En estos sistemas, el transmisor emite un pulso acústico (ultrasonido) junto con un pulso de radio, mientras que el receptor compara el tiempo de llegada de ambos pulsos. Conociendo la velocidad de vuelo de cada una de las señales, la diferencia de tiempo entre las llegadas revela la distancia entre el emisor y el receptor.

Las diferentes medidas tienden a producir un error medio en la estimación del 74%. Aún así, se pueden obtener medidas más precisas post-procesando los datos con técnicas de cancelación de ruido, filtrado digital y detección y calibrado de picos.

Mientras que algunos autores revelan un error medio en la estimación de un 10%, otros aseguran obtener un error en torno al 1% en distancias menores a 9 metros [27].

Aunque estos sistemas ofrecen errores muy pequeños en la estimación, tienen dos limitaciones que reducen notablemente su aplicabilidad en el mundo real. La primera es su limitada cobertura: estos sistemas son capaces de cubrir entre 3 y 15 metros [29], lo que supone sólo una fracción del rango de comunicación de los transmisores de radio-frecuencia. La segunda y más importante es que dichos sistemas requieren un par emisor/receptor por separado, lo que implica mayor tamaño, coste y consumo de energía; precisamente tres de los retos más importantes en las redes inalámbricas de sensores.

Con el fin de aumentar y complementar las técnicas de ToA y TDoA, se ha propuesto la técnica denominada ángulo de llegada (AoA), la cual permite que los nodos estimen los ángulos entre ellos mismos y sus vecinos.

2.1.3 Ángulo de llegada (AoA)

El ángulo de llegada se define como el ángulo que forma la dirección de propagación de una onda incidente y una determinada dirección de referencia, que se conoce con el nombre de orientación [25]. La antena que posee cada sensor es utilizada para medir el ángulo de llegada. Algunos sistemas de localización que explotan esta técnica son los propuestos en [4], [20] y [22].

De forma similar a ToA y TDoA, las estimaciones de AoA requieren hardware adicional demasiado caro para ser utilizado en redes de sensores muy grandes. Con el fin de evitar la necesidad de dicho hardware adicional, se ha desarrollado un esquema que utiliza la interfaz de radio en sí para inferir las distancias entre nodos. A continuación se detalla dicha técnica.

2.1.4 Fuerza de la señal recibida (RSS)

Esta técnica utiliza las propiedades de atenuación de la señal de radio para modelar la distancia entre dos nodos como una función del indicador de la fuerza de la señal recibida (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*). Sistemas que se basan en el RSSI como parámetro de entrada tales como [2], [3] y [28], tienden a ser muy precisos en distancias cortas si se emplea un extenso post-procesamiento, pero son imprecisos cuando se aumentan unos pocos metros [17]. En distancias cortas, las estimaciones obtienen errores de aproximadamente un 10% en una distancia máxima de 20 metros [38]. La incertidumbre de la propagación de las ondas de radio impone problemas como el desvanecimiento de múltiples trayectorias (*multipath fading*), sombras (*shadowing*) y pérdidas de trayectorias (*path loss*). Estos efectos complican el desarrollo de un modelo consistente. Como resultado, los sistemas basados exclusivamente en valores de RSSI obtienen estimaciones muy imprecisas [6].

2.2 Técnicas de estimación de la posición

Trilateración, triangulación, multilateración, análisis de la escena y proximidad son las principales técnicas de estimación de la posición utilizadas en redes inalámbricas

de sensores [11]. Los sistemas de localización actuales las utilizan individualmente o combinándolas. A continuación veremos estas técnicas.

2.2.1 Trilateración

La técnica de trilateración calcula la posición de un nodo midiendo las distancias desde él mismo hasta varias posiciones de referencia (o balizas). Para calcular la posición de un nodo en dos dimensiones es necesario conocer al menos las distancias desde tres balizas no colineales (en diferentes líneas), como se muestra en la Fig. 1. En tres dimensiones, son necesarias cuatro balizas en planos distintos.

Para medir la distancia entre un nodo desconocido y una baliza, se utilizará una de las técnicas de estimación de distancias que vimos en el apartado anterior.

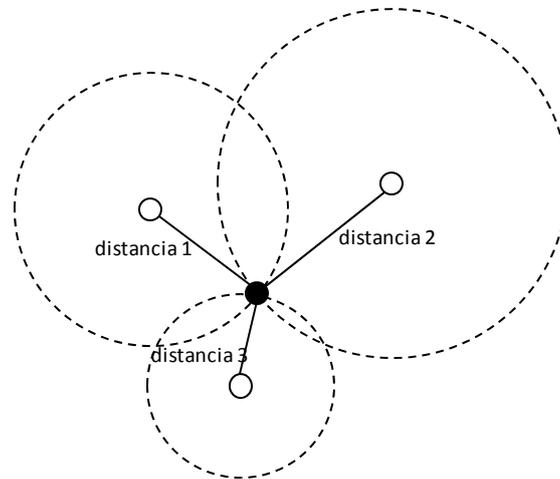


Fig. 1. Trilateración. La distancia a tres balizas (nodos blancos) permite a un sensor (nodo negro) determinar su posición

2.2.2 Triangulación

La triangulación es similar a la trilateración, solo que, en lugar de distancias, se utilizan ángulos para determinar la posición de un nodo. En general, se requieren dos ángulos y la distancia entre dos puntos de referencia en un entorno bidimensional (Fig. 2). Para tres dimensiones son necesarios dos ángulos, la distancia entre dos nodos de referencia y un azimut¹ para especificar una posición precisa. Normalmente se utiliza un vector de referencia constante con valor 0° (por ejemplo, el norte magnético).

El uso de una red de antenas sincronizadas (*phased antenna array*) es una excelente tecnología para la técnica de triangulación. Varias antenas con una

¹ Ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo

separación conocida a priori miden el tiempo de llegada de una señal. Dadas las diferencias entre tiempos de llegada y la geometría de la red de antenas, entonces es posible calcular el ángulo desde el cual se originó la emisión. Si hay suficientes elementos en la red de antenas y suficientes separaciones, se puede realizar el cálculo de la triangulación.

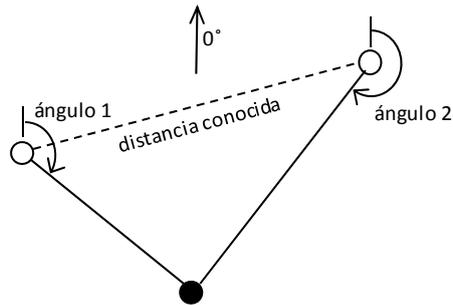


Fig. 2. Triangulación. Dos ángulos y la distancia a dos balizas (nodos blancos) permite a un sensor (nodo negro) determinar su posición.

2.2.3 Multilateración

Al igual que en el método de triangulación, para la multilateración se necesitan las distancias a un número determinado de balizas para calcular la posición de un nodo, solo que en este caso, las distancias se determinan utilizando TDoA.

En el caso tridimensional, serán necesarias cuatro balizas y en el caso bidimensional, serán suficientes tres balizas.

2.2.4 Análisis de la escena

La técnica de análisis de la escena utiliza las características de una escena observada desde un punto de vista en particular, para extraer conclusiones sobre la posición relativa de los objetos. Habitualmente las escenas observadas se simplifican para obtener características que son fáciles de representar y comparar. Cuando se produce una diferencia en la escena observada, podemos determinar el movimiento de un objeto.

Una escena podría ser una o imagen visual (obtenida con una cámara) o cualquier otro parámetro físico susceptible de ser medido, tal como las características electromagnéticas que existen cuando un objeto se encuentra en una posición y orientación determinadas.

2.2.5 Proximidad

La técnica de proximidad implica la determinación de cuándo un objeto está “cerca” de una localización conocida. La presencia del objeto se aprecia utilizando un

fenómeno físico con una cobertura limitada. Existen tres métodos generales para determinar la proximidad entre puntos:

1. Detectando el contacto físico. Es el método más básico de proximidad y se suelen utilizar sensores de presión, sensores de tacto y detectores de capacitancia.
2. Monitorizando puntos de acceso celulares inalámbricos. La monitorización de un dispositivo móvil, para determinar si está en el rango de uno o más puntos de acceso en una red celular inalámbrica, es otra implementación de la técnica de localización de proximidad.
3. Observando sistemas automáticos de identificación. Algunos ejemplos de este sistema son los terminales de puntos de venta con tarjeta de crédito, los historiales de *login* en computadores y los registros de llamadas de teléfono.

3 Técnicas de localización basadas en distancias

Como introdujimos en la sección 2, las técnicas de localización basadas en distancias necesitan calcular las distancias entre distintos nodos de la red, para realizar una estimación de la posición de un nodo.

En esta sección veremos algunas de las técnicas basadas en distancias que se utilizan en la actualidad.

3.1 GPS (Global Positioning System)

El GPS funciona mediante una red de 24 satélites en órbita sobre el globo terráqueo a 20.200 km de altura, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la tierra [12].

Cuando se desea determinar la posición, el aparato receptor debe captar como mínimo la información de 4 satélites de la red, de los que recibe unas señales que indican la posición y el reloj de cada uno de ellos. En base a estas señales, el receptor de GPS sincroniza su reloj y calcula el retraso de las señales, es decir, la distancia al satélite (ToA).

Por triangulación calcula la posición en que éste se encuentra. La triangulación en el caso del GPS, a diferencia del caso 2-D que consiste en averiguar el ángulo respecto de puntos conocidos, se basa en determinar la distancia de cada satélite respecto al punto de medición. Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a los tres satélites. Conociendo además las coordenadas de cada uno de ellos por la señal que emiten, se obtienen las coordenadas reales (posición absoluta) del punto de medición. También se consigue una exactitud extrema en el reloj del GPS, similar a la de los relojes atómicos que desde tierra sincronizan a los satélites.

3.2 Cricket

Cricket está diseñado para ser utilizado en edificios en los que se desea localizar elementos móviles [26]. El sistema permite, tanto a nodos móviles como estáticos, conocer su posición mediante el uso de escuchas (*listeners*) que oyen y analizan la información procedente de un conjunto de balizas, que se encuentran desplegadas por todo el edificio.

El sistema utiliza emisores de ultrasonido para crear la infraestructura con las balizas y, por tanto, el nodo que desea conocer su posición debe incorporar receptores de este tipo. En Cricket, es el propio nodo a localizar el que tiene que realizar todos los cálculos de triangulación, método utilizado en este sistema para inferir su propia posición, conociendo las distancias entre él mismo y las balizas. Estas balizas pre-instaladas transmiten un paquete de forma *broadcast* a través de un canal de radio-frecuencia junto con un pulso de ultrasonido. En dicho paquete de datos se encuentra la posición de la baliza, además de otra información útil de proximidad. Los receptores utilizan la técnica TDoA para estimar sus distancias a las balizas. Cricket implementa tanto la técnica de estimación de la posición de multilateración como la de proximidad. Cuando un nodo que desea inferir su posición recibe información de varias balizas, éste triangula su posición. Sin embargo, si dicho nodo recibe la posición de una sola baliza, entonces utiliza la información de proximidad que las balizas enviaron previamente.

Las principales ventajas de Cricket son su privacidad y escalabilidad descentralizada. Entre las desventajas, destacan la falta de una gestión o monitorización centralizada y la sobrecarga computacional, debido a la temporización y el procesamiento de las señales de radio y de ultrasonido, que deben realizar los receptores.

3.3 AHLoS (Ad-Hoc Localization System)

AHLoS [29] es una técnica distribuida que requiere que sólo una porción de los nodos de la red (balizas) conozca su posición exacta durante el despliegue (mediante el uso de receptores GPS o programada manualmente). El sistema es operativo tanto en entornos interiores como exteriores y no necesita ni una infraestructura costosa ni una planificación previa.

AHLoS permite que los nodos descubran su posición dinámicamente mediante un proceso que consiste en dos fases. Durante la primera fase, cada nodo estima la distancia a sus vecinos. En la segunda fase, los nodos desconocidos utilizan la información recopilada en la fase previa y las posiciones de las balizas vecinas para estimar las suyas propias. Una vez que un nodo haya estimado su posición, se convierte en baliza para poder asistir a otros nodos en la estimación de sus posiciones mediante la propagación de sus propias localizaciones a través de la red. Este proceso itera con el fin de estimar las posiciones de tantos nodos como sea posible.

Una vez que la red ha sido desplegada, las balizas envían de forma *broadcast* sus posiciones a sus vecinos, es decir, a aquellos nodos que se encuentran dentro del radio de cobertura de las balizas. Los nodos desconocidos miden la distancia a sus vecinos baliza, utilizando la técnica TDoA que usa una señal de RF y otra de ultrasonido, y

utilizan las posiciones de las balizas para estimar las propias. Una vez que un nodo desconocido ha estimado su localización, se convierte en baliza y emite (de forma *broadcast*) su posición estimada a otros vecinos desconocidos, permitiendo a éstos estimar las suyas propias. Este proceso, que se conoce con el nombre de multilateración iterativa, se repite hasta que todos los nodos desconocidos que satisfacen las condiciones propias de la multilateración, obtienen una estimación de sus posiciones.

Esta técnica es similar a Cricket pero presenta algunas diferencias. AHLoS no precisa de una infraestructura pre-instalada. En cambio, es un sistema puramente ad-hoc en el que todos los nodos ejecutan labores de localización, y en el que incluso los nodos que no están dentro de la cobertura de las balizas, son capaces de estimar su posición. La mayor desventaja de este sistema es la alta capacidad de cómputo que requieren los nodos.

3.4 RADAR

Un grupo de *Microsoft Research* desarrolló RADAR, un sistema de localización y seguimiento en edificios basado en la tecnología *IEEE 802.11 WaveLAN* [1]. RADAR mide, en una estación base, la fuerza de la señal y el ratio señal-ruido de las señales que envían dispositivos inalámbricos. Entonces, utiliza esta información para calcular la posición 2-D dentro de un edificio. Hay dos versiones de RADAR: una que utiliza análisis de la escena y otra que utiliza multilateración.

Las ventajas de RADAR son dos: requiere sólo unas pocas estaciones base y utiliza la misma infraestructura para las redes inalámbricas en el edificio. También son dos las desventajas: primero, el hecho de que el objeto de seguimiento debe soportar una LAN inalámbrica, lo que es impracticable en dispositivos pequeños o con limitada capacidad de cómputo. Y segundo, escalar el sistema a tres dimensiones para edificios de varias plantas, presenta un problema no trivial.

3.5 APS (Ad-hoc Positioning System)

A diferencia del sistema anterior que está diseñado para entornos de interior, APS (*Ad-hoc Positioning System*) se desarrolló para ser utilizado en entornos de exterior, donde la red de sensores posiblemente sea desplegada por un vehículo aéreo [21]. Este sistema extiende la capacidad del GPS a nodos sin GPS en una red de sensores ad-hoc y de manera salto a salto (*hop by hop*). APS utiliza una versión simplificada de GPS, trabajando únicamente con distancias, sin necesidad de relojes para la sincronización. El requisito fundamental para que este sistema sea operativo es que en la red han de estar presentes al menos tres balizas. Una vez que un nodo al azar tenga conectividad con al menos tres de estas balizas, estima su posición inicial como el centroide de este conjunto de balizas, en un primer salto. Entonces esta nueva baliza transmitirá su posición estimada a sus vecinos directos y éstos medirán su distancia a la baliza mediante RSS.

Utilizando el método de propagación conocido como vector distancia (DV – *Distance Vector*), los vecinos del segundo salto serán capaces de inferir sus distancias a la nueva baliza, y el resto de la red continúa con este proceso.

Lo que hace a este método similar a la técnica de encaminamiento conocida como vector distancia es que, en cualquier instante, cada nodo sólo se comunica con sus vecinos directos, y en cada mensaje intercambiado se comunican las distancias estimadas a las balizas. APS es un sistema distribuido, que no requiere ni infraestructura ni inicialización previa, y que sólo necesita volver a calcular la posición de un nodo sólo cuando éste es móvil.

Existe una versión de APS (APS-AoA) que utiliza ángulos de llegada en lugar de distancias para realizar la triangulación [22]. La mejora de la que disfruta APS-AoA es que, además de proporcionar la posición de cada nodo, también determina su orientación. Para ello, no es necesario que los sensores lleven incorporada una brújula. Sin embargo, si el sistema incorpora una brújula, aumentará la precisión del algoritmo.

Como cualquier sistema basado en AoA, APS-AoA requiere o bien una red de antenas, o bien una serie de receptores de ultrasonido.

3.6 N-Hop Multilateration

El sistema denominado *N-Hop Multilateration* en [30] intenta solventar los dos problemas principales que presenta el sistema AHLoS desarrollado por los mismos autores. El primero consiste en que, sin una gran densidad de balizas, la multilateración iterativa podría estancarse en regiones de la red relativamente dispersas. Y el segundo es que la propagación de errores se convierte en un problema en redes con un gran número de nodos.

En el primer paso de esta técnica se realiza una medición de las distancias entre los nodos desconocidos y las balizas. Para ello, *N-Hop Multilateration* utiliza el método que en [15] denominan *sum-dist*. Las balizas envían un mensaje con su identificador, su posición y un camino con longitud igual a 0. Cada uno de los nodos que recibe este mensaje, suma su distancia a la baliza a este camino y reenvía (*broadcast*) un mensaje con la nueva longitud. Si un nodo recibe más de una vez información sobre una baliza, se queda con el camino de menor longitud. El resultado de este proceso es que todos los nodos tienen un camino y la longitud a cada una de las balizas de la red.

El segundo consiste en estimar una posición inicial para cada nodo. Este sistema crea una caja limitadora (*bounding box*) alrededor de cada baliza, que es el resultado de aproximar el círculo de cobertura de la baliza a un cuadrado. Es decir, si el radio de cobertura de la baliza es R , la longitud del lado del cuadrado resultante será igual a $2R$. La posición de cada nodo, se estimará como el centro del rectángulo resultante de intersecar los cuadrados de las balizas vecinas del nodo (intersección rectangular), tal y como muestra la Fig. 3.

Por último, existe una fase de refinamiento. Como resultado de la segunda fase, existirán nodos que no hayan obtenido una estimación inicial, dado que no tienen conectividad con ninguna baliza. Dichos nodos toman las posiciones iniciales de los nodos desconocidos estimadas en la fase anterior como puntos de referencia. De la misma forma que en la segunda fase, estos nodos estiman su posición y la reenvían a

sus vecinos. Este proceso se ejecuta de forma iterativa hasta alcanzar un valor de tolerancia previamente establecido.

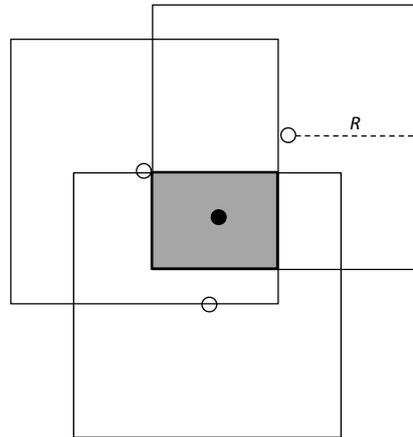


Fig. 3. Intersección rectangular. El nodo negro estima su posición a partir de la intersección de los cuadros que representan la cobertura de las balizas (nodos blancos)

3.7 MDS-MAP

La técnica denominada en [32] MDS-MAP consiste en tres fases. Comenzando con la información de conectividad de la red, el sistema primero utiliza un algoritmo del camino más corto para estimar la distancia entre tantos pares de nodos como sea posible. Estas distancias se utilizan para construir una matriz de distancias. Entonces, dicha matriz es utilizada por MDS (Escalado Multidimensional – *MultiDimensional Scaling*), técnica matemática utilizada en psicología y psicometría, para construir mapas relativos. Por último, y teniendo balizas suficientes (3 o más en dos dimensiones y 4 o más en tres), transforma el mapa relativo en un mapa absoluto basado en las posiciones absolutas de las balizas.

La ventaja de este sistema es que para localizar un nodo en dos dimensiones es suficiente contar con 3 balizas, mientras que otros necesitan que se distribuyan uniformemente. Sin embargo, MDS-MAP no opera demasiado bien en redes irregulares, donde la distancia medida por el camino más corto no guarda buena correlación con su distancia real.

Existe una versión perfeccionada de MDS-MAP y denominada MDS-MAP(P). Esta idea mejorada de la técnica anterior nace por la importante desventaja que MDS-MAP guarda frente a redes irregulares [31]. La idea principal es computar un mapa local utilizando MDS para nodos cercanos, y después combinar estos mapas locales para construir un mapa global.

Además de operar bien tanto en redes regulares como irregulares, esta técnica posee la ventaja de poder trabajar de manera distribuida, lo que la hace apropiada para ser utilizada en redes muy grandes.

4 Técnicas de localización libres de distancias

A diferencia de las técnicas presentadas en la sección anterior, las técnicas de localización libres de distancias (*range-free*) no necesitan estimar las distancias entre nodos. La gran ventaja de estas técnicas es que los sensores no requieren hardware adicional para realizar la medición de las distancias entre ellos.

A continuación se detallan las técnicas más significativas que se enmarcan en este grupo.

4.1 Intersección rectangular

La técnica se basa en la idea de conectividad [34]. Si dos nodos son capaces de comunicarse, se asume que uno está dentro de un cuadrado centrado en el otro nodo y cuyo lado es igual a dos veces el radio de cobertura del segundo. La principal ventaja de este algoritmo es que la intersección de dos cuadrados es una operación matemáticamente más simple que la intersección de dos círculos. Esta simplicidad viene dada por el hecho de que el resultado de intersecar dos cuadrados es un rectángulo (Fig. 3), mientras que la intersección de círculos es una figura geométrica mucho más compleja de describir matemáticamente (Fig. 4).

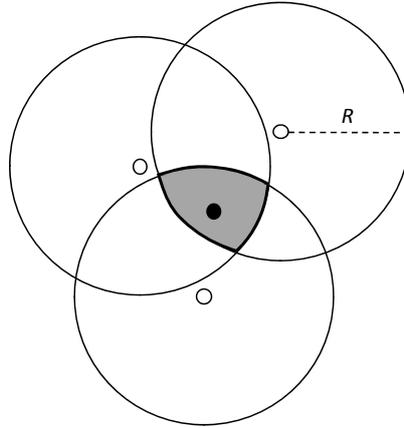


Fig. 4. Intersección circular

Cada rectángulo se puede representar por sus esquinas superior izquierda e inferior derecha. Si todos los nodos vecinos tienen sus centros en las coordenadas x_i, y_i , se definen las esquinas del rectángulo intersección como:

$$[x_{SI}, y_{SI}] = \left[\max_{i \in 1..N} \{x_i\} - R, \max_{i \in 1..N} \{y_i\} - R \right] \quad (1)$$

$$[x_{ID}, y_{ID}] = \left[\min_{i \in 1..N} \{x_i\} + R, \min_{i \in 1..N} \{y_i\} + R \right] \quad (2)$$

siendo R el radio de cobertura de los nodos y N el número total de nodos de la red.

La segunda ventaja de este algoritmo es que se ejecuta de forma distribuida. Cada nodo adquiere las posiciones de las balizas vecinas. Entonces, se intersecan los cuadrados centrados en dichos vecinos obteniendo un rectángulo final. La posición final estimada es el centro de este rectángulo intersección.

Las desventajas de este método son la dependencia en la convexidad de las regiones de comunicación, además de la necesidad de una elevada conectividad, a fin de obtener una estimación refinada y precisa.

4.2 DV-Hop

El método propuesto en [23] utiliza un mecanismo similar al clásico encaminamiento por vector-distancia. En este sistema, una baliza difunde un mensaje que contiene las posiciones de todas las balizas con un contador de saltos (*hop-count*) inicializado a 1. Cada nodo receptor mantiene el valor mínimo del contador de cada baliza entre todos los mensajes que recibe, e ignora aquellos cuyos contadores son más altos que los que tiene almacenados. Los mensajes fluyen por la red desde dentro hacia fuera de manera que el valor del contador se incrementa en cada salto intermedio. A través de este mecanismo, todos los nodos de la red (incluyendo otras balizas) obtienen la distancia más corta, medida en saltos.

Con el fin de convertir el contador de saltos en una distancia física, el sistema estima la distancia media por salto sin necesidad de utilizar técnicas basadas en distancias. Las balizas realizan esta tarea mediante la obtención de información acerca de la posición y del contador de saltos de todas las demás balizas de la red. Una vez calculadas las distancias medias, las mismas balizas propagan dicha información a los demás nodos. Cuando un nodo es capaz de estimar la distancia a más de tres balizas en 2-D (cuatro balizas en 3-D), dicho nodo emplea la técnica de triangulación para estimar su propia posición.

4.3 Localización amorfa

La técnica de Localización Amorfa (*Amorphous Localization*) propuesto en [18, 19] utiliza un algoritmo similar a DV-Hop. Primero, igual que en DV-Hop, cada nodo obtiene la distancia en saltos a los nodos baliza mediante la propagación de mensajes. Una vez que se han recogido dichos mensajes, se obtienen las distancias calculando medias locales. Cada nodo recoge las distancias estimadas de sus nodos vecinos y calcula una media de todos los valores de los vecinos. Después se reduce la mitad del radio de cobertura para compensar el error causado por la baja resolución.

Este sistema difiere del anterior a la hora de estimar la distancia media de un salto porque asume que la densidad de la red es conocida a priori. De esta manera puede calcular la distancia media de un salto con la fórmula de Kleinrock y Slivester [14]. Finalmente, después de obtener las distancias a tres balizas, se utiliza triangulación para estimar la posición de un nodo.

4.4 APIT

La técnica propuesta en [10] y denominada APIT asume que la red es heterogénea y que una porción de los sensores están equipados con receptores GPS. Las balizas transmiten mensajes y se utiliza una técnica basada en áreas para realizar la estimación de la posición, mediante la cual se aísla el entorno en regiones triangulares entre balizas. La presencia de un nodo dentro o fuera de estas regiones triangulares permite a un nodo restringir el área en la cual podría residir. Utilizando combinaciones de las posiciones de las balizas, se puede reducir el diámetro del área estimada en la cual el nodo reside, y así proporcionar una mejor estimación de la posición.

El método teórico utilizado para restringir la posible área en la cual un nodo podría residir se denomina Test PIT (*Point-In-Triangulation*). En este test, un nodo escoge tres balizas de todas aquéllas a las que escucha, y testea si está dentro del triángulo formado por la conexión de esas tres balizas. APIT repite este test PIT con diferentes combinaciones de balizas audibles hasta que se han agotado todas las combinaciones o se ha alcanzado el nivel de precisión predeterminado. En este punto, APIT calcula el centro de gravedad de la intersección de todos los triángulos en los cuales un nodo reside, para así determinar su posición.

4.5 Intersección hexagonal

La técnica descrita en [9] basada en las técnicas de intersección rectangular [34], N-Hop Multilateration [30] y [8], propone el uso de hexágonos para representar el área de cobertura de los sensores. En particular, utiliza el hexágono regular centrado en el área de cobertura circular y con una apotema de longitud igual al radio de cobertura (Fig. 5.a).

Si bien el resultado de intersecar áreas rectangulares de forma iterativa es siempre un nuevo rectángulo, en el caso de las áreas hexagonales, su intersección iterativa dará lugar a polígonos irregulares de 6, 5, 4, o incluso 3 lados (Fig. 6). Sin embargo, estos polígonos presentan la propiedad de que todos sus lados tienen una inclinación de 0° , 60° o 120° . Aunque no tengan necesariamente seis lados, los autores denominan a estos polígonos *pseudo-hexágonos*.

Si un rectángulo se determina mediante las coordenadas de dos vértices opuestos, un pseudo-hexágono requiere la intervención de tres vértices pertenecientes a diferentes lados. Numerando los vértices en sentido horario comenzando desde el vértice superior izquierdo, se han considerado los vértices 1, 3 y 5 (Fig. 5.a). De manera análoga a la intersección de áreas rectangulares, para intersecar dos pseudo-hexágonos basta con calcular los vértices 1, 3 y 5 del área resultante.

El proceso de localización lo comienzan las balizas, que difunden su pseudo-hexágono de localización a sus nodos vecinos (obsérvese que en el caso de poseer un receptor de GPS los tres vértices que determinan el pseudo-hexágono de localización de la baliza, coincidirán). Entonces, los nodos que reciben la información de sus balizas vecinas, realizan la intersección de los pseudo-hexágonos recibidos ampliados un factor igual al radio de cobertura del sensor (Fig. 5.b). Estos nuevos pseudo-hexágonos serán difundidos nuevamente por la red de forma iterativa, bien hasta

alcanzar un valor de tolerancia previamente establecido, bien durante un determinado período de tiempo.

En [9] se demuestra que la mera sustitución de la figura geométrica para representar el área de cobertura de los sensores, reduce el error de localización en aproximadamente un 12% de media, con respecto a la utilización de rectángulos.

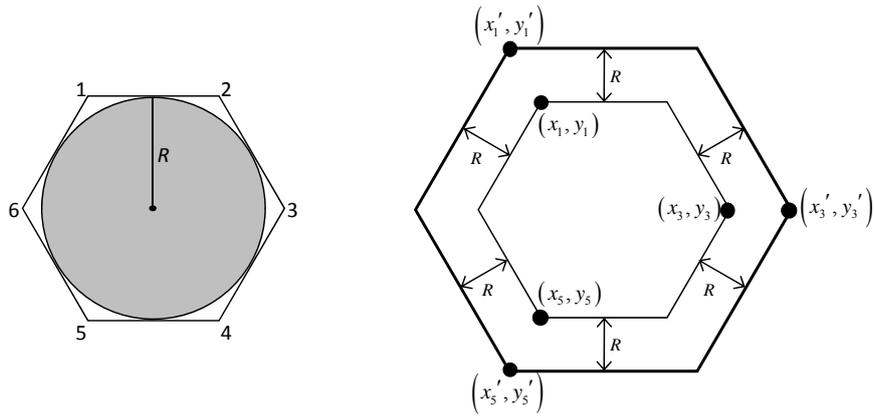


Fig. 5.a) Aproximación de cobertura por hexágono **Fig. 5.b)** Ampliación de pseudo-hexágono

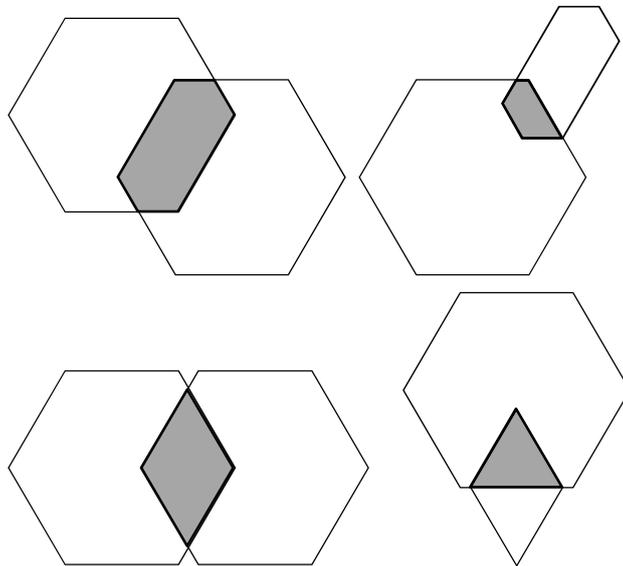


Fig. 6. Intersección hexagonal

5 Técnicas de localización con uno o varios nodos móviles

En las secciones 3 y 4 hemos visto técnicas de localización en las que los sensores son estáticos, es decir, una vez desplegada la red (de forma controlada o no) los sensores no cambiarán su posición. Existe, además, una serie de sistemas de posicionamiento en los que uno o varios nodos móviles (vehículos aéreos, robots terrestres, etc.) se desplazan a lo largo de la red transmitiendo mensajes con sus coordenadas. De esta forma, el resto de nodos de la red pueden inferir su posición mediante uno de los sistemas que se detallan a continuación.

5.1 MCL para redes de sensores móviles

En [13] se presenta una técnica que consiste en una adaptación del método de localización Monte Carlo (MCL – *Monte Carlo Localization*) desarrollado para ser utilizado en localización robótica. Esta adaptación pretende hacer utilizable el sistema MCL en aplicaciones de redes de sensores móviles. MCL es un particular filtro combinado con modelos probabilísticos del movimiento y la percepción de los robots.

La idea clave de MCL es representar la distribución posterior de las posibles localizaciones utilizando un conjunto de muestras ponderadas. Cada paso está dividido en una fase de predicción y una fase de actualización. En la fase de predicción, el robot realiza un movimiento e incrementa la incertidumbre de su posición. En la fase de actualización, se incorporan nuevas medidas (tales como observaciones de nuevas balizas) para filtrar y actualizar los datos. El proceso se va repitiendo y el robot actualiza continuamente su localización predicha.

En el caso de la red de sensores, MCL para WSNs asume que los nodos están dispersos de forma no uniforme y que no existe control sobre el movimiento de las balizas móviles. El algoritmo comienza con una fase de inicialización en la que asume que ningún nodo sabe su posición e inicializa un conjunto de muestras de forma aleatoria entre todas las posibles localizaciones. En cada paso, el conjunto de localizaciones se actualiza basándose en posibles movimientos y nuevas observaciones. Se estima la localización del nodo calculando la localización media de todas las localizaciones del conjunto de muestras. Después, para cada conjunto de muestras se realiza una fase de predicción y otra de filtrado. En la fase de predicción, el nodo utiliza una distribución de transición para predecir sus posibles localizaciones basándose en las muestras previas y en su movimiento. En la fase de filtrado, el nodo utiliza la nueva información recibida para eliminar las localizaciones predichas que son inconsistentes con las observaciones. Después, se realiza un re-muestreo para mantener el número de muestras de localizaciones.

En [13] se demuestra que la técnica MCL puede proporcionar una localización precisa aunque los límites de memoria sean severos, la densidad de balizas móviles sea baja y las transmisiones en la red sean altamente irregulares.

5.2 Sistema de localización utilizando robots móviles

En [24] se presenta una técnica de localización indicado para redes de sensores tolerantes a retardos (DTN – *Delay-Tolerant sensor Network*). Una DTN es desplegada para monitorizar un entorno durante un largo período de tiempo y se caracteriza porque el tráfico de datos entre los sensores no es interactivo. Los sensores se diseminan aleatoriamente y se organizan en uno o más clusters que se pueden desconectar de los demás. Cada cluster posee un líder de cluster, donde se agrupa la información del resto de sensores del cluster. Un conjunto de robots móviles e inalámbricos (robomotes [33]) o vehículos aéreos no tripulados, pueden recorrer la red para recoger datos de los líderes de cluster o para reprogramar o reconfigurar dinámicamente los sensores.

Esta técnica explota la movilidad para reducir los errores de localización y el número de balizas estáticas. Además, sus autores han desarrollado un algoritmo de estimación del estado, basado en un Filtro Kalman Extendido Robusto (REKF – *Robust Extended Kalman Filter*) para la localización de un nodo en una DTN. La localización, basada en medidas de la fuerza de la señal recibida en un robot móvil, se resuelve modelándola como una estimación on-line en un sistema dinámico y no lineal.

5.3 Walking GPS

La técnica presentada en [36], y denominada *Walking GPS*, está diseñada para ser utilizada en aquellas situaciones en las que la red de sensores es desplegada por una persona o por un vehículo. Dicho vehículo estará equipado con un dispositivo GPS que emite periódicamente su posición.

Esta técnica de localización se divide en dos fases. La primera fase se realiza durante el despliegue de los sensores. El portador de los sensores (persona o vehículo) lleva un dispositivo GPS que emite periódicamente mensajes con su posición. Los sensores que reciben esta información infieren su localización basándose en la información presente en el mensaje. La segunda fase se lleva a cabo durante la inicialización del sistema. Si en un instante de tiempo, un sensor no conoce su posición, puede preguntar a sus vecinos por sus posiciones. Esta información recibida de los vecinos se utiliza en un proceso de triangulación para que el nodo desconocido infiera su posición. Esta segunda fase es la responsable de la robustez del sistema. *Walking GPS* es capaz de localizar el 100% de los sensores con errores medios de localización de 1 ó 2 metros.

5.4 Localización distribuida on-line utilizando un objetivo móvil

En [8] proponen un esquema distribuido y on-line que es capaz de simultanear la localización de los nodos con el rastreo (*tracking*) de un objetivo móvil. Dentro de la red hay un conjunto de nodos de referencia que están equipados con receptores GPS y que actúan como balizas. En el algoritmo propuesto, los sensores utilizan las

observaciones sobre un objetivo móvil para mejorar las estimaciones de las posiciones tanto del objetivo como de los propios sensores.

Los sensores comienzan con una estimación de su posición que viene dada por la conectividad entre ellos y las balizas. Después utilizan la detección del objetivo móvil para actualizar sus posiciones. Dado que el rango de acción (S) es normalmente menor que el rango de comunicaciones (R), las estrechas restricciones impuestas por el objetivo ayudan a localizar los nodos con más precisión. La estimación inicial de cada nodo viene dada por el centroide de la intersección de las cajas limitadoras de cobertura (*bounding box*) de los nodos de referencia con los que tienen conectividad.

En este sistema se han tenido en cuenta dos situaciones. La primera asume que el objetivo conoce su posición en todo momento, es decir, se comporta como una baliza móvil. Cuando dicha baliza comienza a moverse, emite sus coordenadas a los nodos que están dentro de su radio de conectividad. Cada vez que un nodo recibe un mensaje baliza, actualiza su posición lanzando una nueva restricción que consiste en realizar la intersección de la caja limitadora anterior con la caja limitadora de la baliza, es decir, una caja de lado igual a $2S$ cuyo centroide es la posición de la baliza, siendo S el radio de acción de cada nodo (asumiendo que todos tienen el mismo).

La segunda situación asume que el objetivo móvil no conoce sus coordenadas a priori. La posición del objetivo se estima como la intersección de su caja limitadora inicial (toda el área en la que está desplegada la red) con las cajas limitadoras, aumentadas en su radio de acción, de los nodos con los que tiene conectividad. De esta forma se van actualizando tanto las posiciones de los sensores como la del objetivo móvil. Así, siendo K el conjunto de nodos dentro del radio de acción del objetivo móvil, la caja limitadora de éste (Q_T) viene definida por la siguiente fórmula:

$$Q_T \rightarrow Q_T \bigcap_{k \in K} [x_{\min}^k - S, x_{\max}^k + S] \times [y_{\min}^k - S, y_{\max}^k + S] \quad (3)$$

donde $x_{\min}^k, x_{\max}^k, y_{\min}^k$ e y_{\max}^k son las coordenadas de la caja limitadora para la posición del nodo k -ésimo.

Para que el resto de nodos de la red puedan mejorar sus estimaciones de posición, los autores han tenido en cuenta dos situaciones. La primera es hacer la actualización de las esquinas de la caja limitadora (Q_T) del nodo móvil (fórmula (4)). La segunda toma el centroide de dicha caja limitadora, aumentando así la incertidumbre de la posición del nodo móvil (fórmula (5)). A continuación se exponen estas dos fórmulas, donde Q_i es la caja limitadora del nodo a actualizar.

$$Q_i \rightarrow Q_i \cap [x_{\min}^T - S, x_{\max}^T + S] \times [y_{\min}^T - S, y_{\max}^T + S] \quad (4)$$

$$Q_i \rightarrow Q_i \cap [x_{est}^T - S, x_{est}^T + S] \times [y_{est}^T - S, y_{est}^T + S] \quad (5)$$

donde (x_{est}^T, y_{est}^T) es la posición estimada del objetivo móvil (el centroide de la caja limitadora). A pesar de la pérdida de información que se propaga con la fórmula del centroide (fórmula (5)), se ha demostrado que se reduce significativamente el error total en la localización de la red.

5.5 Localización con balizas móviles

La técnica propuesta en [35] utiliza una de las reglas básicas en geometría: una bisectriz perpendicular a una cuerda –línea que une dos puntos– pasa por el centro de la circunferencia en la que se encuentran los dos puntos (Fig. 7). Considerando que el radio de transmisión de un sensor es una circunferencia (en dos dimensiones) y que el centro de la circunferencia indica la posición del sensor, si se pueden obtener dos cuerdas, se puede calcular fácilmente la posición del nodo basándose en la regla anterior.

Este mecanismo utiliza balizas móviles que se desplazan alrededor del área donde se ha desplegado la red y emiten periódicamente mensajes que contienen sus actuales localizaciones. Una vez que los sensores han recibido los mensajes baliza, se determinan los puntos y cuerdas válidos (Fig. 8), para después estimar la posición de cada nodo como el centro de la circunferencia (Fig. 9).

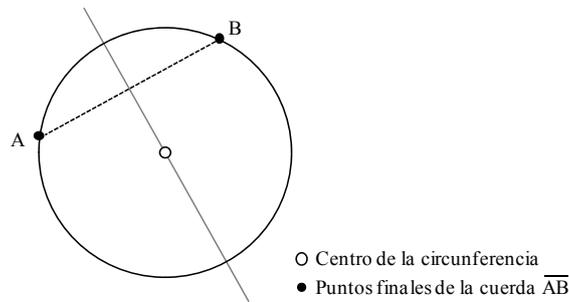


Fig. 7. La bisectriz perpendicular a una cuerda pasa por el centro de la circunferencia en la que se encuentran los dos puntos de la cuerda

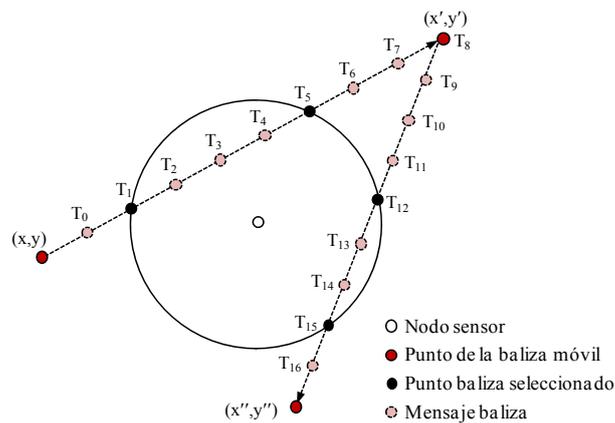


Fig. 8. Selección de puntos baliza. La baliza se mueve desde (x,y) hasta (x'',y'') pasando por (x',y') , enviando mensajes baliza con un intervalo constante

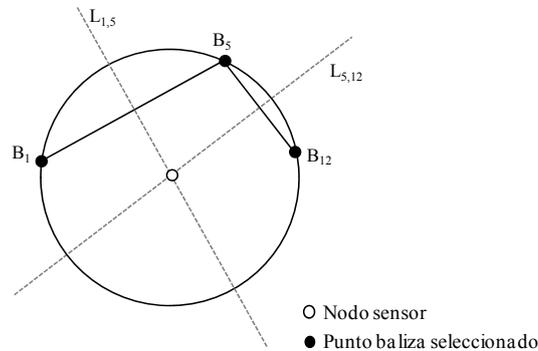


Fig. 9. Estimación de la posición. Se generan dos cuerdas a partir de tres puntos seleccionados en la fase anterior (B_1 , B_5 y B_{12}). Considerando que las líneas $L_{1,5}$ y $L_{5,12}$ son las correspondientes bisectrices perpendiculares a las cuerdas B_1B_5 y B_5B_{12} , entonces es fácil calcular las ecuaciones de dichas bisectrices para determinar la posición del sensor

6 Conclusiones

A lo largo de este curso hemos presentado numerosas técnicas de localización para redes inalámbricas de sensores, agrupadas en tres grandes grupos: basadas en distancias, libres de distancias y con uno o varios nodos móviles.

De la elaboración de este estado del arte de localización para WSNs, podemos concluir que la elección de la técnica de posicionamiento adecuada, dependerá en gran medida de la aplicación para la que vaya destinada la WSN.

Referencias

1. Bahl, P., & Padmanabhan, V. N.: RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In Proceedings of the IEEE INFOCOM '00 (March, 2000)
2. Bergamo, P., & Mazzini, G.: Localization in sensor networks with fading and mobility. In Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (2002)
3. Beutel, J.: Geolocation in a picoradio environment. Thesis (1999)
4. Biswas, P., Aghajan, H., & Ye, Y.: Integration of angle of arrival information for multimodal sensor network localization using semidefinite programming. In 39th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (November, 2005)
5. Corke, P. Peterson, R., & Rus, D.: Coordinating aerial robots and sensor networks for localization and navigation. In proceedings of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS) (June, 2004)
6. Elnahrawy, E., Li, X., & Martin, R. P.: The limits of localization using signal strength: a comparative study. In IEEE SECON (2004)
7. Energy and Transport – GALILEO, http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/index_en.htm

8. Galstyan, A., Krishnamachari, B., Lerman, K., & Patten, S.: Distributed online localization in sensor networks using a moving target. (págs. 61-70). Berkeley: In Proceedings of International Symposium of Information Processing Sensor Networks (IPSN '04) (April, 2004)
9. García, E. M., Bermúdez, A., Casado, R., & Quiles, F. J.: Wireless Sensor Network Localization using Hexagonal Intersection. In proceedings of the 1st IFIP International Conference on Wireless Sensor and Actor Networks (WSAN'07) (October, 2007)
10. He, T., Huang, C., Blum, B. M., Stankovic, J. A., & Abdelzaher, T.: Range-free localization schemes for large scale sensor networks. (págs. 81-95). In Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM Press (2003)
11. Hightower, J., Borriello, G., & Want, R.: SpotON: An indoor 2D location technology based on RF signal strength. University of Washington CSE Report #2000-02-02 (February, 2000)
12. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J.: Global Positioning System: Theory and Practice. Fourth Edition. Springer Verlag (1997)
13. Hu, L., & Evans, D.: Localization for mobile sensor networks. Philadelphia: In 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '04) (2004)
14. Kleinrock, L., & Silvester, J.: Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number. (págs. 4.3.1-4.3.5). In proceedings of national Telecomm conference (1978)
15. Langendoen, K., & Reijers, N.: Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison. Computer Networks (Elsevier), special issue on Wireless Sensor Networks (November, 2003)
16. Lorincz, K., & Welsh, M.: Motetrack: A robust, decentralized approach to RF-based location tracking. In Proceedings of the International Workshop on Location and Context-Awareness (LoCA 2005) at Pervasive 2005 (May, 2005)
17. Maroti, M., Volgyesi, P., Dora, S., Kusy, B., Nadas, A., Ledeczi, A., y otros.: Radio interferometric geolocation. In Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '05) (2005)
18. Nagpal, R.: Organizing a global coordinate system from local information on an amorphous computer. A.I. Memo 1666, MIT A.I. Laboratory (August, 1999)
19. Nagpal, R., Shrobe, H., & Bachrach, J.: Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network. Palo Alto: In the 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '03) (April, 2003)
20. Nasipuri, A., & Li, K.: A directionality based location discovery scheme for wireless sensor networks. Atlanta, GA: In First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (September, 2002)
21. Niculescu, D., & Nath, B.: Ad hoc positioning system (APS). San Antonio: In Proceedings of GLOBECOM (November, 2001)
22. Niculescu, D., & Nath, B.: Ad hoc positioning system (APS) using AOA. In IEEE INFOCOM (April, 2003)
23. Niculescu, D., & Nath, B.: DV based positioning in ad hoc networks. In Journal of Telecommunication System (2003)
24. Pathirana, P. N.: Node localization using mobile robots in delay-tolerant sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 4 (3) , 285-296 (2005)
25. Peng, R., & Sichitiu, M. L.: Angle of arrival localization for wireless sensor networks. In Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON '06) (2006)
26. Priyantha, N. B., Chakraborty, A., & Balakrishnan, H.: The cricket location-support system. (págs. 32-43). New York, USA: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '00). ACM Press (2000)
27. Sallai, J., Balogh, G., Maroti, M., Ledeczi, A., & Kusy, B.: Acoustic ranging in resource-constrained sensor networks. International Conference on Wireless Networks (2004)

28. Savarese, C., Rabaey, J. M., & Beutel, J.: Locationing in distributed ad-hoc wireless sensor networks. (págs. 2037-2040). In Proceedings of ICASSP '01 (2001)
29. Savvides, A., Han, C.-C., & Strivastava, M. B.: Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. (págs. 166-179). New York, USA: Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '01). ACM Press (2001)
30. Savvides, A., Park, H., & Strivastava, M. B.: The bits and the flops of the N-hop multilateration primitive for node localization problems. ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA '02) (2002)
31. Shang, Y., & Ruml, W.: Improved MDS-based localization. INFOCOM 2004 (2004)
32. Shang, Y., Ruml, W., Zhang, Y., & Fromherz, M. P.: Localization from Mere Connectivity. MobiHoc (2003)
33. Sibley, G. T., Raihimi, M. H., & Sukhatme, G. S.: Robomote: a tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks. (págs. 1143-1148). Washington DC: Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (ICRA '02) (September, 2002)
34. Simic, S. N., & Sastry, S.: A distributed algorithm for localization in random wireless networks. Discrete Applied Mathematics (2002)
35. Ssu, K.-F., Ou, C.-H., & Jiau, H. C.: Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, VOL. 54, NO. 3 (May, 2005)
36. Stoleru, R., He, T., & Stankovic, J. A.: Walking GPS: A practical solution for localization in manually deployed wireless sensor networks. In Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computers Networks (LCN'04) (2004)
37. Whitehouse, K., & Culler, D.: Calibration as parameter estimation in sensor networks. (págs. 59-67). New York, USA: In proceedings of the 1st ACM international workshop on wireless sensor networks and applications (WSNA '02). ACM Press (2002)
38. Whitehouse, K., Karlof, C., Woo, A., Jiang, F., & Culler, D.: The effects of ranging noise on multihop localization: an empirical study. In The 4th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '05) (2005)