

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación



**ESTUDIO DE ALGORITMOS DE
LOCALIZACIÓN EN INTERIORES,
PARA TECNOLOGÍAS MÓVILES DE
ÚLTIMA GENERACIÓN**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Félix Barba Barba

2012

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación

**Máster Universitario en
Ingeniería de Redes y Servicios Telemáticos**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO DE ALGORITMOS DE
LOCALIZACIÓN EN INTERIORES,
PARA TECNOLOGÍAS MÓVILES DE
ÚLTIMA GENERACIÓN**

Autor
Félix Barba Barba

Director
Francisco González Vidal

Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos

2012

Resumen

El objetivo del presente trabajo es llevar a cabo un estudio de los principales algoritmos y técnicas auxiliares de posicionamiento aplicables en entornos de interior (edificios, etc), y que sean aptos para tecnologías móviles de última generación.

Lo que se pretende es poner de relieve las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos algoritmos, teniendo como motivación final su aplicabilidad al mundo de las redes móviles 3G y 4G, y en especial a las femtoceldas y small-cells LTE; y teniendo siempre presente que el objetivo último es usarlos en interiores de edificios.

Obviamente, para alcanzar a comprender en todo su alcance cada uno de los aspectos a estudiar, se necesita previamente revisar el panorama general relativo al posicionamiento vía radio, en general, y a los aspectos específicos de los interiores de edificios en particular.

Por otro lado, aunque el estudio se centre en las tecnologías para móviles, se abarcarán dentro de él otras tecnologías radio que puedan ser de aplicación en interiores, como puedan ser el WiFi, etc. por haber sido empleadas en trabajos previos que resulten de utilidad para el presente estudio.

Uno de los objetivos del trabajo es identificar el estado del arte actual del asunto, a la par que se intenta llevar a cabo una comparativa lo más amplia posible, poniendo de relieve los puntos fuertes y las debilidades de otros trabajos llevados a cabo hasta el momento presente.

Como se verá, a lo largo del trabajo se pone de manifiesto que las técnicas más usadas actualmente en este terreno son las que se agrupan bajo la identificación de "fingerprinting", y que consisten en deducir la posición de un terminal comparando las medidas tomadas en el momento de llevar a cabo el posicionamiento con otras medidas previas de referencia que constituyen la huella frente a la que comparar. Por tanto, este tipo de técnicas serán estudiadas en mayor profundidad que las restantes.

Un segundo objetivo del trabajo, no menos importante, será el de identificar algunos campos o facetas que no hayan sido suficientemente investigados, que presenten lagunas o que generen controversias, proponiendo posibles sendas a seguir en futuros trabajos sobre este mismo asunto.

A lo largo del presente trabajo se irá haciendo revisión de todos los aspectos relacionados con los mecanismos de posicionamiento, que constituye la base sobre la que se cimentan las aplicaciones de localización (conocimiento personal del lugar donde uno mismo se encuentra), monitorización (conocimiento por terceros del citado lugar) y seguimiento (monitorización prolongada en el tiempo). Sin embargo, el esfuerzo mayor se realizará en el estudio de los aspectos aplicables a la localización.

Abstract

The objective of this work is to carry out a study about the main algorithms and auxiliary techniques related with indoor positioning (buildings, etc) suitable to be used with last generation mobile technologies.

This study is done trying to highlight the advantages and disadvantages of each of these algorithms, having as final motivation their applicability in the world of 3G and 4G mobile networks, and especially in femtocells and small-cells of LTE; and having always in mind that the final aim is to use it in indoor environments.

Obviously, to realize the full extent of each one of the aspects to consider, is a prior requirement to have an overall picture in relation with wireless positioning, in general, and with the specific aspects to be applied indoor in particular.

Furthermore, although the study is focused on mobile technologies, it will be also covered other wireless technologies that can be applied indoor, like WiFi, etc, because they were employed in previous works useful for the present study.

Another objective of this study is to identify the indoor positioning state of the art, at the same time that the broadest possible comparison is carried out, detecting strengths and weaknesses of other works previously done.

Throughout this document it will be seen that most frequently currently used techniques in this area are grouped under the common identification of "fingerprinting", a group of methods that base the deduction of the position of a mobile terminal by the comparison of measurements taken just in the moment to perform the positioning, against other previously taken measurements used as a fingerprint reference to compare. Therefore, these techniques will be studied deeper than the rest of them.

A second objective of the work, as important as the first, will be to identify areas or aspects that have not been investigated enough, presenting empty or controversial aspects, in order to suggest possible ways to follow in other future works about this subject.

Along this paper, it will be done also a review of every aspect related with the positioning mechanisms, that are the base over which to build applications regarding location (personal knowledge about where you are), monitoring (third party

knowledge about where you are) and tracking (monitoring during the time). However, the bigger effort will be done in the study of aspects applicable just to location.

Índice general

Resumen	i
Abstract.....	iii
Índice general.....	v
Índice de figuras	ix
Siglas	xi
1 Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	3
1.2 Objetivos	4
2 Aspectos generales relativos a la localización radio	5
2.1 Arquitecturas básicas de posicionamiento.	5
2.2 Exactitud, precisión y tolerancia de la medida.	7
2.3 Técnicas de posicionamiento.	9
2.3.1 Técnicas basadas en la triangulación.....	9
2.3.2 Técnicas basadas en el análisis del escenario (fingerprinting).....	13
2.3.3 Técnicas de proximidad.	14
2.4 Representación de la localización.....	15
2.4.1 Localización Física o Real.....	15
2.4.2 Localización Simbólica.	16
3 Aspectos concretos para la localización radio en interiores.....	18
3.1 Aplicabilidad en interiores de las técnicas de posicionamiento.	18
3.2 Tecnologías radio disponibles para la localización en interiores.	19
3.2.1 Redes de comunicaciones móviles. Femtoceldas y LTE.	19
3.2.2 Redes inalámbricas de área local. WiFi.....	20
3.2.3 Redes de área personal. Bluetooth y ZigBee.	20
3.2.4 Otras tecnologías.	21

3.2.5	Consideraciones para la selección de la mejor tecnología.....	21
3.3	Características relativas a la propagación de la señal radio.....	22
4	Localización en interiores mediante RSS-Fingerprinting.....	24
4.1	Introducción.....	24
4.2	Fase offline o de calibración.....	26
4.2.1	Método empírico. Recolección de medidas en el escenario.....	27
4.2.2	Simulación. Parametrización de los modelos de propagación.....	27
4.3	Fase online.....	29
4.3.1	Vecinos más cercanos. Método kNN.....	29
4.3.2	Redes Neuronales.....	30
4.3.3	Máquina de vectores de apoyo. SVM.....	31
4.3.4	Menor Polígono de M-vértices. SMP.....	32
4.3.5	Métodos probabilísticos.....	32
5	Técnicas auxiliares.....	33
5.1	Mejoras frente a la variabilidad temporal de la señal.....	33
5.2	Mejoras frente a fallos de estaciones emisoras o ataques maliciosos.....	35
5.3	Otras técnicas de mejora y refinamiento de la posición.....	35
a)	Adición de triangulación en sentido uplink.....	35
b)	Adición del fingerprinting ambiental.....	36
c)	Acelerómetros y otras ayudas.....	37
6	Prestaciones y resultados.....	38
6.1	Criterios para la comparación.....	38
6.1.1	Exactitud y precisión.....	38
6.1.2	Complejidad.....	39
6.1.3	Robustez.....	39
6.1.4	Escalabilidad.....	40
6.1.5	Coste.....	40
6.1.6	Densidad.....	40
6.2	Comparativa. Resultados.....	41
7	Posibles tecnologías y arquitecturas para despliegues.....	46
7.1	Tecnologías radio para localización en interiores.....	46

7.2	Posibles arquitecturas para localización radio en interiores.	47
8	Conclusiones.....	50
8.1	Trabajos futuros.....	51
8.2	Reconocimientos.....	52
	Bibliografía.....	53

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de los sistemas de posicionamiento según la topología.	6
Figura 2. Diferencia entre exactitud (accuracy) y precisión.	7
Figura 3. Precisión y tolerancia en los sistemas de localización comerciales.	8
Figura 4. Esquema de posicionamiento por lateralización (TOA o ROTF).....	10
Figura 5. Esquema de posicionamiento por Ángulo de Llegada (AOA).	12
Figura 6. Ejemplo de división de un centro comercial.....	16
Figura 7. Ejemplo de división simbólica de una planta en distintas zonas.	17
Figura 8. Pérdidas de propagación de la señal de radio.....	23
Figura 9. Fases básicas de un sistema de localización por fingerprinting.	26
Figura 10. Perceptrón multinivel.	31
Figura 11. Esquema del Algoritmo de S. Fang.....	34
Figura 12. Esquema del sistema propuesto por M. Azizyan.	37
Figura 13. Escenario de medición de LIN05.	42
Figura 14. Exactitud de las distintas técnicas, según LIN05.	42
Figura 15. Precisión de las distintas técnicas, según LIN05.	43

Siglas

3GPP	3rd Generation Partnership Project	<i>(Proyecto Asociación de 3ª Generación)</i>
AOA	Angle of Arrival	<i>(Ángulo de Llegada)</i>
BS	Base Station	<i>(Estación Base)</i>
CDF	Cumulative Probability Functions	<i>(Funciones de Probabilidad Acumulativa)</i>
CPU	Central Processing Unit	<i>(Unidad Central de Procesamiento)</i>
DFT	Discrete Fourier Transform	<i>(Transformada Discreta de Fourier)</i>
DSL	Digital Subscriber Loop	<i>(Bucle de Abonado Digital)</i>
FTP	File Transfer Protocol	<i>(Protocolo de Transferencia de Ficheros)</i>
GPS	Global Positioning System	<i>(Sistema de Posicionamiento Global)</i>
GSM	Global System for Mobile Communications	<i>(Sistema Global de Comunicaciones Móviles)</i>
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	<i>(Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)</i>
IP	Internet Protocol	<i>(Protocolo de Internet)</i>
kNN	k Nearest Neighbor	<i>(k Vecinos Más Cercanos)</i>
LAN	Local Area Network	<i>(Red de Área Local)</i>
LBS	Location-based Service	<i>(Servicio basado en la Localización)</i>
LOS	Line Of Sight	<i>(Línea de Visión)</i>
LTE	Long Term Evolution	<i>(Evolución a Largo Plazo)</i>
MLP	Multi-Layer Perceptron	<i>(Perceptrón Multi-Nivel)</i>
NLOS	Non Line Of Sight	<i>(Sin Línea de Visión)</i>
OLOS	Obstructed Line Of Sight	<i>(Línea de Visión Obstruida)</i>
OG	Geometric Optics	<i>(Óptica Geométrica)</i>
RFID	Radio Frequency Identification	<i>(Identificación por Radiofrecuencia)</i>

RSS	Receive Signal Strength	<i>(Potencia de la Señal Recibida)</i>
SMP	Smallest M-vertex Poligon	<i>(Menor polígono de M vértices)</i>
SVM	Support Vector Machine	<i>(Máquina de vector de apoyo)</i>
TOA	Time of Arrival	<i>(Tiempo de Llegada)</i>
TDOA	Time Difference of Arrival	<i>(Diferencia de Tiempos de Llegada)</i>
UTD	Uniform Theory of Diffraction	<i>(Teoría Uniforme de la Difracción)</i>
WiFi	Wireless Fidelity	<i>(Fidelidad Inalámbrica)</i>
WLAN	Wireless Local Area Network	<i>(Red de Área Local Inalámbrica)</i>
WSN	Wireless Sensor Network	<i>(Red Inalámbrica de Sensores)</i>

1 Introducción

Los diferentes sistemas de posicionamiento, que son aquellos que permiten determinar la ubicación en la que se encuentra un dispositivo en un momento concreto de forma fiable, con un reducido y acotado margen de error, son claves para el desarrollo e implantación de servicios telemáticos contextuales, conscientes de las condiciones del entorno.

Dentro de las posibles aplicaciones que permitan desarrollar esos servicios, de especial relevancia son aquellas cuyo ámbito de aplicación específico sean los entornos de interior: sistemas de ayuda y navegación para discapacitados, control y seguimiento de pacientes o equipos en hospitales, servicios contextuales en museos, aeropuertos, grandes centros comerciales, etc.

Todos estos sistemas y aplicaciones de posicionamiento son la característica común compartida por los sistemas de localización, monitorización y seguimiento. El objetivo de los sistemas de localización es reportar al usuario del dispositivo la posición en la que se encuentra el mismo; en los mecanismos de monitorización, la ubicación encontrada debe ser, principalmente, conocida por un tercero; y en los mecanismos de seguimiento, a los anteriores objetivos se ha de añadir el de la trazabilidad de las distintas ubicaciones durante el tiempo.

Aunque se he empleado con gran éxito para localización en exteriores, la tecnología GPS no es adecuada para entornos de interior debido a la escasa o nula cobertura de los satélites de la red de posicionamiento en este tipo de entornos, por lo que hay que recurrir a otras tecnologías radio para realizar la citada localización.

Una tecnología disponible prácticamente en la totalidad de los casos en entornos de interior es la red de telefonía móvil y, dentro de ella, un dispositivo que juega un papel fundamental para este tipo de entornos es la femtocelda. Una femtocelda es una pequeña estación base de móviles concebida y diseñada, principalmente, para entornos de interior, ya sean residenciales, empresariales o comerciales, que conecta varios teléfonos móviles a la red del operador a través de una conexión fija de banda ancha (DSL, fibra o cable). Proporciona en interiores una mejor cobertura y un alto rendimiento en datos, mejorando en todos los aspectos la capacidad de la citada red de telefonía móvil.

Otra variante, dentro del mismo campo de los teléfonos móviles, son las small-cell de LTE. En este segundo caso, el camino a recorrer desde la celda al núcleo de la red de móviles es red IP fija, como el resto de infraestructura fija de la cita red. Sin embargo, las características de cobertura y potencia de ese tipo de celdas las hacen también ideales para este tipo de escenarios.

La tecnología WLAN es competidora de las anteriores para este tipo de aplicaciones, ya que las conexiones WiFi cada vez tienen mayor presencia y cobertura en entornos públicos de interior. Sin embargo, aunque se vaya incrementando el número de dispositivos móviles que incorporan este tipo de tecnología, una diferencia fundamental entre las conexiones WLAN y las redes de móviles, es que los puntos de acceso de las primeras son privativos de los abonados a la red, y por ello pueden requerir claves de acceso, etc, mientras que los puntos de acceso de las segundas forman parte de la propia red, y por tanto su gestión y la transferencia de datos dispositivo-router puede ser más homogéneo y abierto para los abonados a la propia red de móviles.

Existen otros dispositivos que usan tecnologías radio, y que podrían ser empleados para llevar a cabo el posicionamiento (sensores, RFID, etc), pero que cuentan con la desventaja de que su despliegue por interiores debería realizarse ad hoc con el objetivo de facilitar las tareas de localización. Sin embargo, las tecnologías basadas en redes de móviles, se despliegan inicialmente con el objetivo de facilitar la comunicación de voz o datos, y las funcionalidades relativas al posicionamiento se pueden obtener como un servicio adicional. Por tanto, parece más fácil y probable el despliegue de las segundas frente a las primeras, respaldado además por la expansión universal de los terminales móviles, frente a otros dispositivos más específicos requeridos por esos otros tipos de redes radio.

El objetivo del presente trabajo es llevar a cabo un completo estudio de los algoritmos y técnicas auxiliares de posicionamiento aplicables en interiores de edificios, que sean aptos para tecnologías móviles de última generación, con el objetivo inicial de la mera localización. Por tanto, a lo largo del mismo, se pondrán de relieve las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos algoritmos, vistos desde la perspectiva de su aplicabilidad al mundo de las redes móviles 3G y 4G, y en especial a las femtoceldas y small-cells LTE, que son los tipos de antena más habitualmente empleados en interiores.

El escenario físico de referencia será el correspondiente a un edificio de oficinas clásico, que se puede aplicar también a un edificio de un campus universitario o a un gran centro comercial, con la intención de localizar a la persona básicamente en dos dimensiones, y con un margen de error máximo de unos pocos metros. Otras

aplicaciones pueden necesitar requerimientos más precisos (grandes hipermercados, localizando a la persona frente a un lineal y un estante determinado de productos, etc) pero quedan fuera del ámbito de estudio de este trabajo.

1.1 Motivación

En el maremágnum de algoritmos y propuestas que tratan sobre el tema de la localización en interiores, ninguna se logra imponer con claridad para que sea seleccionada, no ya como un estándar de facto, sino tan siquiera como una tecnología de consenso. La vertiginosa evolución tecnológica, con la sucesiva aparición cada vez más rápida de distintos tipos de dispositivos y tecnologías de comunicaciones móviles con diferentes características y capacidades, no ayudan a encontrar esa tecnología o práctica común.

Esto se debe, principalmente, a que mientras para la localización en exteriores se logran buenos resultados con técnicas sencillas, desde el punto de vista conceptual, para la localización en interiores es mucho más difícil poder alcanzar similares grados de precisión, incluso con el uso de procedimientos más complicados.

En donde sí existe un cierto grado de consenso, como se verá, es reconocer las técnicas de “fingerprinting” como las más adecuadas para la localización en interiores. Estas técnicas basan su funcionamiento en deducir la posición de un terminal comparando las medidas obtenidas en un momento dado, con otras medidas previas de referencia que han sido guardadas y que constituyen “la huella” radioeléctrica del lugar.

Sin embargo, la falta habitual de alineamiento entre las medidas tomadas y las medidas almacenadas frente a las que se realiza la comparación, obliga a emplear diferentes técnicas con el objetivo de reducir el error, compensar las variabilidades en la señal, etc. Todo ello da lugar a la aparición sucesiva de nuevas propuestas que hace que el grupo de técnicas denominadas fingerprinting sea cada día más numeroso y variado, contribuyendo a abrir de nuevo el abanico de opciones disponibles para llevar a cabo estas tareas.

1.2 Objetivos

Teniendo en cuenta las motivaciones anteriormente citadas, que son las que impulsan la realización del presente trabajo, se seleccionan los siguientes objetivos:

1) Obtener una visión de conjunto sobre el estado del arte actual del asunto de la localización, llevando a cabo una revisión general los principales aspectos relacionados con el tema, donde se pongan de relieve los puntos fuertes y las debilidades de los mismos desde un punto de vista general, y en particular para su uso en interiores.

2) Revisar más en profundidad los algoritmos y técnicas de localización específicos para interiores, aplicables a las redes móviles de telecomunicaciones; y en especial de las técnicas basadas en el “fingerprinting”, que como se demostrará, son las más comúnmente aceptadas para entornos de interior.

3) Dentro del grupo de las técnicas fingerprinting, realizar una comparativa para intentar determinar las fortalezas y debilidades de cada una de ellas, con el objeto de seleccionar, si existe, la más idónea desde el punto de vista técnico.

4) Identificar algunos campos o facetas relacionados con el asunto de la localización en interiores que no hayan sido suficientemente investigados, que presenten lagunas o que generen controversias, proponiendo otras posibles sendas a seguir en futuros trabajos sobre este mismo asunto.

A continuación, se describe la estructura del presente trabajo. La sección 2 revisa y resume los aspectos generales relativos a la localización radio. La sección siguiente entra a valorar los aspectos concretos para la citada localización, pero ya enfocada a su uso en interiores. La sección 4 se centra en explicar las técnicas englobadas bajo la denominación “fingerprinting”. La 5 revisa técnicas y procedimientos auxiliares para mitigar los problemas que pueden encontrarse durante la localización, y la sección 6 realiza una comparativa de las distintas técnicas y algoritmos conocidos para la localización en interiores mediante tecnologías radio. La sección 7 trata de las posibles arquitecturas y detalles a tener en cuenta para los hipotéticos despliegues reales y, por último, en la sección 8 se pormenorizan las conclusiones extraídas del estudio realizado.

2 Aspectos generales relativos a la localización radio

Dentro de este apartado se realizará una revisión general de los conceptos básicos relativos al posicionamiento y la localización. Los conceptos aquí desarrollados tienen aplicación tanto para exteriores como para interiores.

2.1 Arquitecturas básicas de posicionamiento.

En el trabajo de Liu H. y otros en 2007 [LIU07] que, como se verá más adelante, realiza una revisión de las técnicas de posicionamiento existentes en aquella fecha, se identifican cuatro diferentes topologías básicas para los sistemas de posicionamiento, atendiendo a la configuración básica de la arquitectura del sistema (una clasificación similar aparece en el libro temático de Figueiras de 2010 [FIG10]):

- a) Auto-posicionamiento: la unidad de medida es el terminal móvil, que recibe las señales de varios transmisores ubicados en localizaciones conocidas, y tiene la capacidad de evaluar su localización en base a las medidas realizadas.
- b) Posicionamiento remoto: el transmisor de la señal es móvil, y varias unidades de medición fijas (p. ej. las femtoceldas) reciben la señal del transmisor. Las medidas obtenidas por todas las unidades de medida se aúnan, y la localización del transmisor es establecida por una estación o unidad de procesamiento.
- c) Auto-posicionamiento indirecto: las medidas se realizan por las estaciones fijas (posicionamiento remoto), pero se envían a la unidad móvil, que es la que realiza los cálculos necesarios para posicionarse.
- d) Posicionamiento remoto indirecto: la medida sobre la señal recibida se realiza en el terminal móvil, pero se envía el resultado a una unidad remota, que es la que lleva a cabo la evaluación de los mismos.

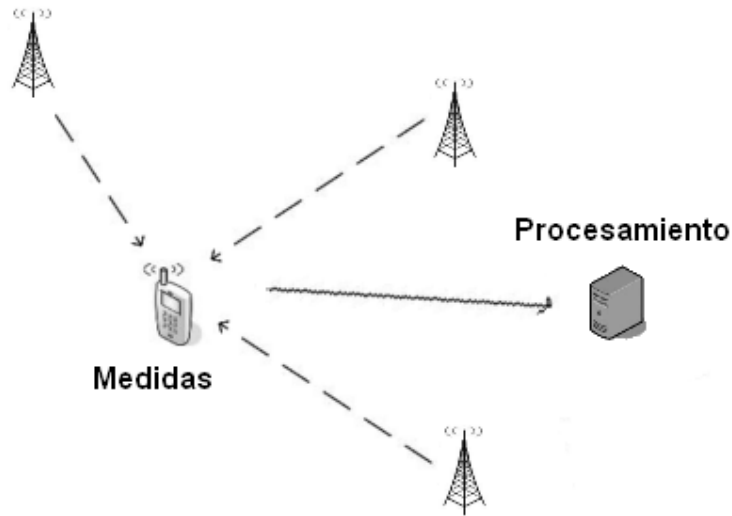


Figura 1. Procesamiento remoto indirecto.

La Tabla 1 resume las diferentes opciones:

Tipo de sistema	Realización de medidas	Procesado de las medidas
Auto-posicionamiento	Terminales móviles	Terminales móviles
Posicionamiento remoto	Estaciones base	Unidad de procesamiento
Auto-posicionamiento indirecto	Estaciones base	Terminales móviles
Posicionamiento remoto indirecto	Terminales móviles	Unidad de procesamiento

Tabla 1: Tipos de sistemas de posicionamiento según su arquitectura

Según se propone en el citado trabajo de Figueiras, las soluciones de posicionamiento también se pueden clasificar según su relación con la tecnología de comunicaciones. Así, podrían existir sistemas integrados, oportunistas e híbridos. Los primeros serían sistemas autónomos de posicionamiento adaptados en dispositivos de comunicación. La actual integración de receptores GPS en los smartphones es el caso típico. Las soluciones oportunistas explotan las propiedades de las tecnologías de comunicación (por ejemplo, medidas de la potencia recibida, etc). El precio a pagar es que las comunicaciones oportunistas suelen ser menos precisas que las integradas. Las híbridas combinan ambas, en búsqueda de la mayor precisión según los casos.

2.2 Exactitud, precisión y tolerancia de la medida.

Para medir la calidad de un determinado sistema de posicionamiento, dos conceptos fundamentales, aunque no sean los únicos evaluables, son los de exactitud y precisión. La correcta comprensión de estos términos es vital para aclarar un panorama complicado por el excesivo uso de la palabra “precisión” en relación al mismo.

Tal como se observa en el Fig. 2, la exactitud se define como el grado de acercamiento de la estimación realizada por el sistema, a la posición real de referencia donde se encuentra el dispositivo a localizar. La exactitud también se denomina a veces error de localización.

Según esa misma figura, la precisión representa la desviación estándar en el error de la medida, o lo que es lo mismo, el grado de dispersión de la medida ofrecida.

En inglés, se emplea “accuracy” para el término “exactitud”, que sin embargo muchas veces se traduce también por “precisión” al español.

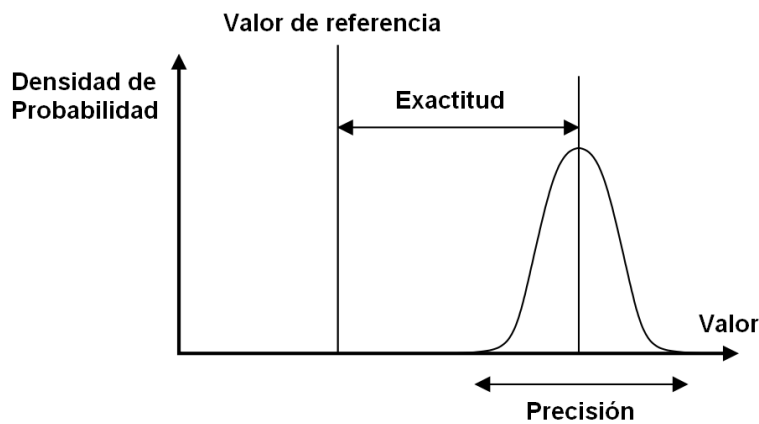


Figura 2. Diferencia entre exactitud y precisión.

Sin embargo, la definición anterior de exactitud y precisión tiene un difícil encaje en los aspectos comerciales relacionados con la localización. Según la conceptualización indicada para la exactitud, unos valores menores en términos absolutos son reflejo de mejores comportamientos, siendo el sistema ideal aquel que presentara una exactitud igual a cero; lo cual es difícil de entender por el potencial usuario del sistema de localización, salvo que la publicidad de las características del mismo vaya acompañada

de algún tipo de explicación, o que el usuario esté iniciado en estos temas. Este es el motivo que empuja al uso del término “error de localización” para este mismo concepto.

Por otro lado, asociar el concepto de “precisión” a los valores de medida estimada, en lugar de hacerlo al valor real de referencia también es difícil de asimilar. Por tanto, lo que ocurre con más frecuencia es que el término “precisión” no se usa con el significado anteriormente indicado, sino como la distribución del error entre la localización estimada y la real. En estos casos, la precisión se ofrece acompañada de una medida de “tolerancia” (cuando no se indica, se asume una tolerancia del 50%).

Así, la precisión se define como el grado de certeza que tiene la tolerancia asociada a la estimación realizada. Es decir, dada una posición estimada, se garantiza con una cierta probabilidad que la posición real se encuentra a una distancia de ese punto menor o igual a la tolerancia indicada. Dicho de otra forma, si el sistema ofrece una tolerancia de T metros con una probabilidad P cuando estime una posición concreta, entonces se garantiza que el punto (x,y) real se encuentra contenido en el área delimitada por el punto (x',y') estimado y un disco de radio T, con una probabilidad P. Así, el sistema será mejor cuanto menor tolerancia y mayor precisión presente. La Fig 3 representa estos otros conceptos.



Figura 3. Precisión en los sistemas de localización comerciales.

En el presente trabajo, se utilizan normalmente las expresiones exactitud y precisión como medidas para indicar el error entre la posición estimada y la real. Si se emplea la palabra precisión en relación a la medida estimada (es decir, como concepto asociado a la exactitud) se hará mención expresa de ello.

2.3 Técnicas de posicionamiento.

A lo largo del tiempo, se han desarrollado muy diversas técnicas para determinar la posición de un objeto móvil, intentando atender a los requisitos establecidos para distintos tipos de aplicaciones, principalmente de localización, y usando diferentes técnicas que pueden ser más o menos adecuadas para unos casos u otros.

En la literatura existente se distinguen con claridad las técnicas más destacadas, que son referenciadas por la mayoría de los autores, aunque se observa cierta diversidad de opiniones a la hora de clasificarlas por familias o características afines. Ocurre también con frecuencia que distintos artículos aplican denominaciones ligeramente distintas a las mismas técnicas básicas, añadiendo calificativos que pretenden resaltar las variaciones aportadas por los distintos autores.

A continuación se revisan esas técnicas más destacadas, atendiendo al tipo de clasificación realizado en trabajos como el citado de [LIU07], o el de T. N. Lin en 2005 [LIN05].

2.3.1 Técnicas basadas en la triangulación.

Dentro de este grupo, a su vez, existen dos formas de establecer el posicionamiento: por lateralización, basado en la realización de distintas medidas que permiten estimar la distancia entre el punto a localizar y las fuentes de la señal (tiempos, atenuaciones, etc), con lo que la triangulación se realiza respecto de los lados del triángulo; y una segunda forma denominada angularización, que se basa en las medidas respecto de los ángulos del triángulo.

a) Tiempo de Llegada (TOA, Time of Arrival).

Técnica de lateralización en la que la posición se estima a partir de las medidas del tiempo de propagación. Partiendo de cada medida, se puede calcular a qué distancia se encuentra el terminal medidor de cada estación emisora (estaciones base, femtoceldas, etc). Después, utilizando métodos geométricos, se puede obtener el punto donde intersectan distintas circunferencias centradas, cada una de ellas, en una unidad emisora (mínimo 3), y con un radio similar a la distancia medida por el terminal móvil (ver Fig. 4).

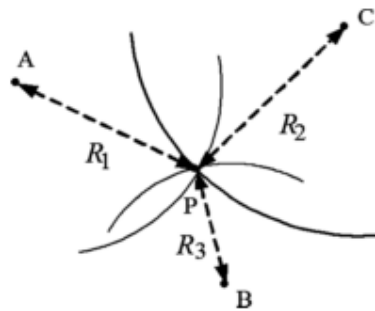


Figura 4. Esquema de posicionamiento por lateralización (TOA o ROTF).

Pros: Bajo nivel computacional del algoritmo.

Contras: Necesidad de sincronización y de enviar marcas de tiempo (*time-stamps*) en los datos para poder obtener precisión en las medidas. Si se presentan multitrayectos, las medidas resultan de baja precisión.

b) Diferencia de Tiempo de Llegada (TDOA, Time Difference of Arrival).

Al igual que TOA, se trata de una técnica de lateralización basada en medir el tiempo de propagación, pero en este caso el cálculo para medir distancias se basa en las diferencias de tiempo de llegada de las señales procedentes de las distintas estaciones emisoras.

Pros y Contras: Exactamente los mismos que para TOA.

c) Método Basado en la Atenuación de la Señal (RSS-Based Method o Signal Attenuation Based Method).

Técnica de lateralización donde la estimación de la posición se realiza a partir de las medidas de potencia recibida. Partiendo de cada medida de potencia, se obtienen las pérdidas de propagación, y a partir de ellas la distancia a la que se encuentra el terminal medidor de cada estación emisora. Una vez conocida la distancia los métodos geométricos son similares a TOA.

Pros: Bajo nivel computacional del algoritmo.

Contras: Necesidad de visión directa (LOS) entre emisor y receptor; si se presentan efectos multitrayecto se reduce la precisión.

d) Método basado en el Tiempo de Retorno de la Señal (ROTF, Return Time of Flight).

Técnicas basadas en medir el tiempo de transmisión de una señal desde que es enviada por el transmisor hasta que retorna al mismo, devuelta por la unidad de medida. Posteriormente se realizan cálculos parecidos a los de TOA para determinar la posición del móvil.

Pros: Bajo nivel computacional del algoritmo.

Contras: Se debe disponer de mecanismos de sincronización precisos para poder obtener una alta precisión en las medidas. El tiempo de procesado de la señal en el terminal móvil puede diferir entre distintos modelos, lo cual reduce la precisión y la fiabilidad de la medida.

e) Método de la Fase de la Señal Recibida (Received Signal Phase Method).

Esta técnica realiza mediciones relativas a la fase de las portadoras recibidas (o a las diferencias de fase) para estimar la distancia a las distintas entidades emisoras. También es conocido como Phase of Arrival (POA). Asume que todas las entidades emisoras transmiten una señal sinusoidal pura, con una misma frecuencia, y sin desplazamiento de fase. Existe un rango máximo evaluable de desplazamiento de fase, fijado por la longitud de onda empleada.

Los algoritmos empleados son los mismos que para el método TOA cuando se mide la fase, y al método TDOA, cuando se trata de medir diferencias de fase.

Además, a veces se emplea este método conjuntamente con técnicas TOA o TDOA, para incrementar la precisión.

Pros: Muy bajo nivel computacional del algoritmo.

Contras: El desplazamiento de fase máximo disponible presenta una limitación adicional. Necesita LOS para no perder precisión.

f) **Ángulo de Llegada (AOA, Angle of Arrival) o Dirección de Llegada (DOA, Direction of Arrival).**

La localización del objetivo deseado puede encontrarse por la intersección de varios pares de líneas de prolongación de ángulos, cada uno de ellos formado por el radio circular desde la entidad emisora hasta el objetivo móvil. Estos métodos necesitan usar al menos dos puntos de referencia conocidos y dos ángulos medidos para deducir la localización en 2 dimensiones del objetivo.

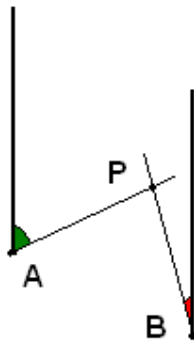


Figura 5. Esquema de posicionamiento por Ángulo de Llegada (AOA).

Pros: La estimación de la posición requiere tan solo tres unidades de medida para posicionamiento en 3 D, o dos unidades para posicionamiento en 2D. Además, no hace falta sincronizar las unidades de medida.

Contras: Se necesita un hardware relativamente grande y complejo. La estimación se degrada conforme el móvil se aleja de las estaciones emisoras. La exactitud se puede ver limitada también por el shadowing, reflexiones multitrayecto llegadas de la señal desde direcciones no previstas, o por la directividad de la apertura de medición.

2.3.2 Técnicas basadas en el análisis del escenario (fingerprinting).

Este tipo de técnicas de localización recolectan inicialmente los datos relativos a las señales de radiofrecuencia de un escenario (*fingerprints*) para después estimar la localización de un objeto mediante comparación de las medidas obtenidas en tiempo real con las previamente recolectadas.

En general, a la fase de recolección de medidas para construir el patrón de referencia se la denomina fase de calibración, o fase offline. Luego, durante la fase online, se determina la localización mediante comparación de las medidas obtenidas frente al patrón guardado (también llamado “radio-map”).

Son métodos basados en mediciones en la potencia de la señal recibida (RSS), y dependiendo de la tecnología concreta utilizada, los datos recolectados pueden ser los niveles de la señal del piloto de portadora, etc

A continuación se enumeran los principales algoritmos y técnicas pertenecientes a esta familia, aunque se verán con más profundidad en la § 4.3. La necesidad de uso de todos ellos deriva del hecho de que los valores medidos durante la fase online no suelen tener un emparejamiento sencillo con los valores almacenados en el radio-map, por diversos motivos (disposición de las referencias, variaciones de la señal, etc):

a) Método kNN (k vecinos más próximos).

El método de los vecinos más próximos, kNN (k-Nearest-Neighbor), en el que k es un parámetro adaptado a cada situación para obtener mejores prestaciones, usa las medidas RSS online para buscar las k equivalencias más próximas de localizaciones conocidas en las bases de datos previamente construidas.

b) Redes Neuronales.

Durante la fase offline, los valores de RSS y sus correspondientes coordenadas de localización se adoptan como entradas y objetivos del sistema neuronal, con el propósito de entrenar al sistema y obtener los pesos apropiados. Durante la fase online, un árbol de decisión determina la posición en función de las medidas recabadas.

c) Máquina de Vectores de Apoyo. SVM.

SVM (Support Vector Machine) es una técnica de clasificación de datos donde la clasificación se realiza “por aproximación”.

d) Menor Polígono de M-vértices. SMP.

La técnica SMP (Smallest M-vertex Poligon), compara separadamente los valores medidos de RSS para cada localización con respecto a la señal de cada transmisor, suponiendo un total de M transmisores. La posición la determina el menor polígono resultante.

e) Métodos Probabilísticos.

Abordan el asunto del posicionamiento como un problema de clasificación, determinando la posición del usuario a partir de diversas técnicas probabilísticas.

2.3.3 Técnicas de proximidad.

Los algoritmos de proximidad proporcionan información de la posición relativa o simbólica (ver apartado siguiente para la descripción de ambas), basándose en una densa red de antenas o sensores, y para cada objetivo móvil se asume la misma posición que tiene el sensor o antena más cercano al mismo, que será el que reciba su señal con más potencia.

Pros: Es un método relativamente simple de implementar, que puede llevarse a cabo además sobre diferentes tipos de medios físicos. En particular, los infrarrojos (IR) y los sistemas de identificación por frecuencias de radio (RFID) se basan en esta metodología. También se puede usar por identificación de celda (Cell-ID), que es una técnica disponible hoy en todos los teléfonos móviles.

Contras: Para obtener una alta exactitud, la red de dispositivos de referencia debe ser muy grande. Los cambios de posición, además, son “discretos”, no existiendo un espacio continuo de posibles ubicaciones.

2.4 Representación de la localización.

A la hora de representar la localización, se pueden usar varios convenios distintos, lo cual es de especial interés para el caso de interiores y las aplicaciones que, en este tipo de entornos, se pueden desarrollar.

Básicamente, existen dos tipos de localizaciones: física y simbólica.

2.4.1 Localización Física o Real.

La localización física identifica las coordenadas del espacio en que se encuentra el objeto móvil a posicionar, en dos o en tres dimensiones (normalmente referenciadas como 2D ó 3D).

En interiores de edificios, la localización en 2D mantiene tanta relevancia como en exteriores, ya que se suelen realizar comparaciones de la situación frente a un plano que puede corresponder a plantas, distribuciones de salas y pasillos, etc (ver Fig. 6)

Sin embargo, la localización en interiores añade un punto de complicación a la hora de elegir el sistema de coordenadas. En exteriores, latitud y longitud, o coordenadas absolutas similares, pueden considerarse referencias adecuadas para 2D. Estas mismas coordenadas se pueden usar para interiores también. Sin embargo, trabajar con ellas en interiores se torna más incómodo, al tratarse normalmente de desplazamientos cortos o muy cortos, que en coordenadas de ese orden de magnitud se ven representadas por valores pequeñísimos.

Otro punto de complicación se añade en lo relativo a la altura de la posición a buscar, que se convierte en una variable fundamental para la localización en un edificio de varias plantas. En este caso se hace indispensable la medición de coordenadas de forma relativa al propio edificio.

Se pueden emplear distintos métodos de localización absoluta para interiores, dividiendo por ejemplo el plano o el espacio en forma de rejilla, etc, si bien en estos casos, y para interiores en concreto, es mejor que la referencia del sistema sea propia del marco en que se realiza la localización.



Figura 6. Ejemplo de división de un centro comercial, potencial objetivo para estas localizaciones.

2.4.2 Localización Simbólica.

La localización simbólica se utiliza bien con la intención de simplificar el proceso del posicionamiento, bien con la de facilitar la tarea realizada por las aplicaciones que van a hacer uso de la información relativa a la posición, centrandolo los resultados relativos a la localización en aquellos aspectos que puedan resultar más interesantes.

En la Fig. 7 se expone un ejemplo de división de una planta en sectores, para un sistema o aplicación en el que la información que se desea conocer en relación a la posición es exclusivamente en cuál de ellos (salas, pasillos, etc) se encuentra un determinado terminal móvil.

9	9	9	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14
9	9	9	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14
9	9	9	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14
9	9	9	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14
8	8	8	8	8	8	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14
8	8	8	8	8	8	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6
1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6
1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6
1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6
1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6
1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6

Figura 7. Ejemplo de división simbólica de una planta en distintas zonas.

En el trabajo de S. Phillips y otros de 2007 [PHI07], se profundiza en la idea de que para realizar el guiado de personas en interiores no hace falta conocer la posición exacta del dispositivo móvil, sino que muchas veces es suficiente con identificar únicamente la habitación o sala en que se encuentra. Así, para ese tipo de aplicaciones de guiado, sería suficiente con conocer la citada sala, y hacia dónde se intenta ir, y se darían las indicaciones necesarias de la forma: ‘por el siguiente pasillo, a la derecha’, ‘baje la escaleras’, ‘tome el ascensor’, etc... La descripción de los atributos de las salas presenta enfoques que permiten definir restricciones (p. e., restricciones de acceso, como que esté supeditado a disponer de una llave, una clave o una tarjeta identificadora), relaciones de vecindad entre ellas, y otras muchas características (tamaño, disponibilidad de distintos elementos como asientos, mesas, etc).

3 Aspectos concretos para la localización radio en interiores

3.1 Aplicabilidad en interiores de las técnicas de posicionamiento.

Es difícil modelar la propagación radio en entornos de interior a causa de los diferentes caminos que puede recorrer la señal, la baja probabilidad para disponer de un camino con línea de visión directa (LOS, Line-Of-Sight), y los parámetros específicos dependientes de la localización real, tales como la disposición física de la planta, los muebles y objetos de todo tipo, y las numerosas superficies reflectantes.

La habitual presencia de efectos multitrayecto, o la no menos habitual ausencia de visión directa, provocan que todos los métodos basados en la triangulación anteriormente revisados sean inapropiados para la localización en interiores, ya que en este tipo de entornos la estimación de las distancias medidas se vuelve imprecisa y también, por tanto, el posicionamiento obtenido a partir de las mismas.

Para reducir la incidencia de esos inconvenientes, a veces se han llegado a usar varias técnicas simultáneamente, con el objeto de incrementar la exactitud (por ejemplo, RTOF con TOA o TDOA). Pero, en cualquier caso, la distancia que recorre la señal radio en interiores es tan corta, que los sistemas basados en mediciones de tiempos requerirían de una grandísima precisión para reducir la incertidumbre en los valores medidos.

Por todo lo anteriormente indicado, la mayoría de autores coinciden en descartar directamente para la localización en interiores todas las técnicas que no basen su funcionamiento en el fingerprinting que, como se ha indicado, es una técnica que consiste en la estimar la localización de un dispositivo móvil mediante la comparación de las medidas realizadas sobre las señales de radiofrecuencia en un determinado momento por el citado dispositivo, con otras previamente recolectadas en el mismo escenario, y almacenadas para ser usadas como referencia, durante una fase del proceso denominada fase de calibración.

De hecho, las comparativas generales de métodos y sistemas para localización en interiores realizadas por Lin en 2005 [LIN05] y por Liu en 2007 [LIU07] utilizan ese método como el único aplicable en este tipo de entornos, descartando todos los demás, y centrándose en la comparación de las diferentes técnicas y algoritmos existentes dentro del mismo.

Además, el uso de esta técnica no se reduce a interiores. Otros trabajos, como el de T. Wigren en 2007 [WIG07], emplean técnicas de fingerprinting también para exteriores con emplazamientos difíciles (cañones entre edificios, etc).

3.2 Tecnologías radio disponibles para la localización en interiores.

A continuación se indicarán las principales tecnologías empleadas para la localización en interiores basada en RF. Para conocer más en profundidad las tecnologías de acceso radio que se describen en este apartado, se pueden consultar trabajos generales sobre redes de acceso, como el de Álvarez-Campana y otros de 2009 [ALV09], o los ya citados sobre localización móvil de Figueiras [FIG10] y Liu [LIU07].

3.2.1 Redes de comunicaciones móviles. Femtoceldas y LTE.

Una femtocelda es una pequeña estación base de móviles diseñada, principalmente, para entornos de interior, ya sean residenciales, empresariales o comerciales. Conecta varios teléfonos móviles a la red del operador a través de una conexión de acceso fijo por banda ancha existente (DSL, fibra o cable). Proporciona en interiores una mejor cobertura y un alto rendimiento en datos, mejora la capacidad de la red y, en consecuencia, la hace más atractiva para ofrecer planes de tarifa flexible al usuario final de la red de móviles. Un beneficio adicional para los operadores es que las femtoceldas ayudan a descongestionar el tráfico soportado por la red de macro células, que pueden presentar problemas de capacidad por el incremento de conexiones de datos en los dispositivos móviles.

El concepto de femtocelda apareció a principios de este siglo, cuando los operadores se vieron obligados a hacer frente a importantes retos en la cobertura de interiores. Estas incidencias fueron haciéndose más comunes aún con la introducción de la generación 3G, que usaba mayores frecuencias que las generaciones anteriores, lo cual iba asociado a una menor penetración de la señal radio en interiores.

Se espera que las femtoceldas jueguen un importante papel en la evolución futura de los sistemas de comunicaciones móviles. Actualmente, los primeros conceptos para femtoceldas autónomas y "*fixed relay*" están integrados en el estándar del grupo 3GPP para LTE, y ya se han definido los escenarios de referencia y las metodologías de evaluación para estos casos en el grupo de trabajo BeFemto [BEF12].

Otra tecnología similar a la hora de realizar el posicionamiento, pero con un concepto diferente de red son las small-cells de LTE (Long Term Evolution).

Las small-cells de LTE están diseñadas, como las femtoceldas, para proporcionar mejores prestaciones de cobertura y ancho de banda en interiores. Sin embargo, a diferencia de las femtoceldas, que necesitan del apoyo de una red auxiliar para conectarse al núcleo de la red de móviles, la conectividad en la red LTE es totalmente IP, y se puede considerar que la small-cell está directamente conectada a la red de móviles, siendo transparente para ella que los paquetes IP deban atravesar otras redes antes de llegar al núcleo de la citada red de móviles.

3.2.2 Redes inalámbricas de área local. WiFi.

La tecnología WiFi (Wireless-Fidelity), también conocida como WLAN (Wireless Local Area Network, o Red de Área Local Inalámbrica) se usa habitualmente para ofrecer conectividad por radiofrecuencia, con alcance local a un dispositivo que envíe datos Ethernet, desde la ubicación del mismo hasta una conexión a la red fija de datos. Este punto ofrece puede ofrecer el acceso a la citada red de datos a través de cobre o fibra.

Se funcionamiento se define en la IEEE 802.11. Operando en el rango de frecuencia de 2,4 GHz, y tiene un alcance medio entre 50 y 100 m. Es una tecnología muy popular, y se ha convertido en el estándar dominante para este tipo de conexiones.

3.2.3 Redes de área personal. Bluetooth y ZigBee.

Este tipo de redes se encuentra normalizado principalmente en la IEEE 802.15, donde existe un grupo de recomendaciones especializado en redes de área personal.

Dentro de ese grupo de recomendaciones se encuentra la IEEE 802.15.2, que define la comunicación Bluetooth. Al igual que WLAN, ofrece conectividad IP inalámbrica con alcance local, aunque se diferencia de ella en un menor ancho de banda (1Mbps), y un alcance menor (típicamente, entre 10 y 15 m). Sin embargo, comparado con WLAN, Bluetooth es un estándar mucho más "ligero". Además, es altamente ubicuo (se incluye en la mayoría de teléfonos móviles, agendas digitales, etc), y soporta otros servicios de red además de la comunicación IP.

Por otro lado se encuentran las redes inalámbricas de sensores (WSN, del inglés “Wireless Sensor Network”), que son redes no cableadas formadas por dispositivos autónomos, bajo el principio de constituir un enlace con el mundo físico. Este tipo de redes se encuentra normalizado principalmente en la IEEE 802.15.4, que define los niveles bajos para ellas. Se trata de una norma orientada a alcanzar un consumo bajo en los dispositivos, si bien para lograrlo ofrece unas tasas de transmisión relativamente bajas. Así, la velocidad de los datos puede variar entre 20 y 250 kbps, para una cobertura de entre 1 y 100 m. El número máximo de nodos conectados simultáneamente a la red es de 65.000. Aunque este estándar no es exactamente igual a lo que se conoce habitualmente como ZigBee, se suele hablar de ellos como si fueran equivalentes, ya que las diferencias entre ambos son mínimas. Se permiten topologías en estrella, en árbol y en malla.

Las redes de área personal descritas emplean la banda de 2,4 GHz.

3.2.4 Otras tecnologías.

Las redes Het-Net (Heterogeneous Network) son redes mixtas, donde el dispositivo encargado de realizar la comunicación radio se puede comportar como si fueran una small-cell de LTE o como si fueran un dispositivo WiFi. Luego, se conecta a la infraestructura de red asumiendo el rol que corresponda. La red, a nivel global, es LTE, y por tanto para obtener una ventaja real sobre un dispositivo de funcionalidad dual puro, se debe disponer de un nuevo nivel o capa en la infraestructura de red, que se encuentre “por encima” de las redes clásicas WLAN, y las coordine con la red LTE. Este tipo de redes se encuentra actualmente en fase de definición.

Otras posibles redes propuestas son las ampliaciones para interiores de la propia red GPS, llevando a cabo las oportunas retransmisiones de señal dentro de los edificios.

3.2.5 Consideraciones para la selección de la mejor tecnología.

Para todas las tecnologías citadas, la ventaja principal de usar tecnología inalámbrica frente a tecnología cableada en este tipo de redes es el coste, aunque también es importante su facilidad de montaje y reconfiguración.

Pensando a nivel práctico en un despliegue real comercial, un punto a tener en cuenta es que, mientras los dispositivos finales de la red de móviles (femtoceldas y small-cells de LTE) se encuentran bajo el ámbito y control de un operador de comunicaciones, los restantes dispositivos de área local o personal (WiFi, Bluetooth, etc) que pueden actuar como entidades emisoras para el posicionamiento, son propiedad de los usuarios finales.

Lo anteriormente indicado permite augurar un despliegue muchos más homogéneo de las redes de móviles, que además necesitan las femtoceldas o las células LTE para proporcionar cobertura móvil en interiores (que es un servicio ofrecido por el operador). En el resto de redes descritas, tanto de área local como personal, su nivel de despliegue, densidad, etc, obedece a las necesidades de los usuarios finales. Además, son redes que en algunos casos pueden presentar acceso limitado a terceros, bloqueado mediante el uso de contraseñas.

La conclusión que se puede extraer es que, mientras que las infraestructuras de las redes de comunicaciones móviles son directamente reaprovechables para ser usadas en aplicaciones de localización, las restantes redes necesitarían ser desplegadas ad hoc para ese fin.

En el futuro, las redes Het-Net pueden presentar las ventajas de combinar ambos tipos de acceso LTE y WLAN, con lo que aumentará la disponibilidad física de la red LTE en su conjunto.

3.3 Características relativas a la propagación de la señal radio.

Todas las técnicas anteriormente descritas, al trabajar con señales de radiofrecuencia, presentan una serie de características comunes relativas a su propagación, y las variaciones y ruidos intrínsecos asociados.

En relación a la propagación de las señales de radio, la potencia de la señal recibida varía en función del espacio, la frecuencia y el tiempo. Esta variación puede ser clasificada también como “*fading*” (literalmente “decoloración”, aunque es más apropiado traducirlo por “desvanecimiento”), dividiéndose en dos rangos: a gran o a pequeña escala.

La estimación del fading a gran escala permite conocer con antelación el área de cobertura. Puede ser, a su vez, ser clasificado en pérdidas de propagación y *shadowing* (sombreado).

Las pérdidas de propagación se deben a la atenuación sufrida por la señal, en función de la distancia que separa al transmisor del receptor.

El shadowing es una oscilación en la intensidad media de la señal, más importante cuando no existe visión directa entre transmisor y receptor, debida a los diferentes caminos que puede recorrer la misma según la disposición concreta de los elementos ambientales en las diferentes localizaciones. Como indica [FIG10], el efecto shadowing debido a los cuerpos de las personas que portan los receptores móviles no es nada despreciable para las aplicaciones de posicionamiento, existiendo una vía de investigación por recorrer abierta en ese terreno.

El fading a pequeña escala tiene que ver con las características de intensidad de la señal dentro de una distancia corta, tomando como referencia la localización del receptor. En tal región del espacio, la intensidad media permanece constante, pero la propagación de las ondas electromagnéticas por diferentes caminos provoca efectos que incluyen variaciones de la señal en el tiempo y en el espacio, así como fading selectivo en frecuencia.

En consecuencia, la intensidad de la señal en una localización determinada depende tanto del fading a gran escala como del de pequeña escala. Según el receptor se desplaza, la intensidad instantánea de la señal recibida varía rápidamente, debido principalmente al fading de pequeña escala. Conforme se incrementa la distancia entre el transmisor y el receptor, la media local de la potencia de la señal recibida decrece gradualmente, pudiendo en este caso ser predicha con precisión a partir de las estadísticas conocidas. El fenómeno de la combinación del fading a gran escala con el de pequeña escala se presenta en la Fig. 6 [FIG10].

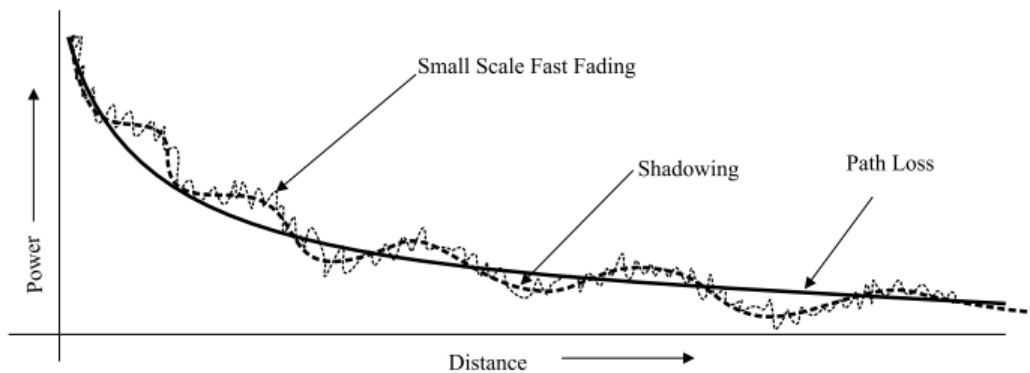


Figura 8. Pérdidas de propagación de la señal de radio.

4 Localización en interiores mediante RSS-Fingerprinting.

4.1 Introducción

Tal como se ha indicado anteriormente, los numerosos estudios realizados sugieren que la técnica de localización más adecuada para interiores es la basada en las medidas RSS-Fingerprinting, ya que es probable que los únicos valores realmente válidos en ese tipo de escenarios sean los correspondientes a mediciones en la potencia de la señal recibida, RSS.

El fingerprinting básico emplea medidas de radio de las señales recibidas desde diferentes estaciones emisoras (por ejemplo, medidas del nivel de señal recibida o de las pérdidas de la misma) para proveer una “huella dactilar” o “fingerprint” de las condiciones de radio en una posición geográfica específica. Normalmente, la posición real estará determinada por algún tipo de medidas de referencia de la misma. De esta forma, se crea un mapa de las condiciones de radio y así la posición de un terminal puede ser encontrada después de comparar las medidas reales con las condiciones de referencia [WIG07].

Esta técnica permite aumentar la exactitud de la medida, teniendo en cuenta la pérdida de LOS y los negativos efectos del multirayecto. Además, no necesita sincronización alguna y, en principio, no es necesario el recalibrado. Se asume como punto de partida que las estaciones emisoras son estáticas, y que se conoce con exactitud su emplazamiento real.

En la práctica, sin embargo, el asunto no es tan sencillo. No solamente hay que especificar una “granularidad” o “densidad” de medidas de referencia que hay que almacenar, encontrando el equilibrio entre el número de puntos guardados, los valores de potencia asociados a cada punto y el tamaño/tiempo del procesamiento necesario para comparar después todos ellos, en tiempo real, con la medida obtenida para realizar una localización; sino que, además, hay que encontrar algoritmos que permitan “emparejar” de forma fiable unos valores reales medidos con unos valores de referencia almacenados que, muy probablemente, no coincidirán nunca o casi nunca con los medidos, por distintos motivos (el móvil no se ubica normalmente en puntos concretos de la “rejilla” de referencia, la señal presenta variaciones temporales, etc).

La fase de precalibración extensiva que hay que realizar con el fingerprinting, y el posible desalineamiento posterior entre la huella registrada y los valores reales medidos (por diferentes motivos) son dos de los principales inconvenientes que presenta este método de posicionamiento.

Además, éste método debe tener en cuenta no solamente las emisiones recibidas de las femtoceldas u otras emisoras de interior, sino también las que se están recibiendo procedentes de estaciones base u otras emisoras exteriores, y que se reciban con la suficiente potencia como para formar parte de la medida. En este sentido ahonda Otsason, que en 2005 [OTS05] propuso realizar localización por fingerprinting en interiores, pero basándose únicamente en la señal recibida de las estaciones GSM exteriores.

En cualquier caso, y con independencia de que se encuentren en el interior o el exterior del edificio, se necesita la participación no solamente de aquellas estaciones emisoras que ofrecen suficiente potencia para comunicar, sino también de todas aquellas que en mayor o menor medida tienen alcance sobre un punto dado, válidas y a veces imprescindibles (por el número de receptores necesarios según la técnica empleada) para realizar la localización.

El método de localización por fingerprinting consta de varias etapas, que se representan en la Fig 9 de forma esquemática. Entre ellas destacan dos fases bien diferenciadas: una fase previa de calibrado, denominada también *offline*, que sirve para generar las medidas de referencia que se han de almacenar en una base de datos que se suele denominar radio-map; y una fase de medida en tiempo real, denominada igualmente *online*, durante la que se realizan las localizaciones de los terminales móviles mediante la comparación y análisis de las medidas obtenidas frente a las almacenadas.

El hecho de que las técnicas fingerprinting se consideren las únicas para localización en interiores expresa bien a las claras las ventajas que presentan respecto a otros métodos: tienen en cuenta los efectos multirayecto, no requieren LOS, y no se necesita ningún tipo de sincronización entre las entidades emisoras y las medidoras. Además, si el entorno no cambia no se necesita, en principio, recalibración.

Por contra, como se ha dicho, estos sistemas requieren una fase inicial de calibración que puede resultar bastante costosa. Además pueden verse afectados durante el momento de la medida por variaciones en la señal, que afecten a la exactitud de los resultados.

En cualquier caso, a pesar de sus puntos débiles, parece existir cierto consenso en descartar las demás técnicas, centrándose gran parte de la investigación en mitigar las debilidades indicadas, en la medida de lo posible.



Figura 9. Fases básicas de un sistema de localización por fingerprinting.

4.2 Fase offline o de calibración

La fase *offline* consiste en la generación de un mapa patrón de señales de radiofrecuencia, asignando una correspondencia entre señales y localizaciones, para el escenario considerado. Este mapa se denomina “mapa radio” (en inglés “radio-map”). Los puntos seleccionados para la realización del mapa deben ser significativos, y su cantidad mínima debe ser tal que permitan obtener una adecuada precisión.

La manera en la cual se genera dicho patrón puede ser puramente empírica, recolectando medidas en el citado escenario, o bien estar basada en la parametrización previa de modelos de propagación, para simular el comportamiento de la señal de radiofrecuencia en el escenario.

Esta segunda vía suele presentar, a su vez, dos pasos separados: un paso inicial de simulación pura, y una segunda etapa consistente en realizar mediciones en directamente en el escenario para verificar y corregir los resultados obtenidos en la simulación.

4.2.1 Método empírico. Recolección de medidas en el escenario.

El método empírico se basa en la recolección pura de medidas de RSS realizadas directamente sobre el escenario. Esas medidas se guardan en una tabla, junto a la posición donde se han llevado a cabo que, obviamente, es un valor conocido en cada momento durante esta fase de calibración.

La variable independiente del proceso son las localizaciones elegidas para realizar las medidas. Un método habitual es el de rejilla, normalmente bidimensional, cuadrículando el espacio a muestrear y obteniendo valores para cada celda de la cuadrícula, a una altura media prefijada. Un valor a decidir es el tamaño de la cuadrícula, y otro la altura relativa a las que se toman las medidas.

4.2.2 Simulación. Parametrización de los modelos de propagación.

La generación por simulación consiste en generar el patrón de señales de radiofrecuencia, tomando como referencia la parametrización de un modelo de propagación. Esa parametrización ha debido ser deducida, previamente, a partir de una serie de medidas realizadas en el mismo escenario o en otro de similares características, de tal modo que el modelo describa fielmente el comportamiento de la señal de radiofrecuencia a monitorizar.

Existen una serie de algoritmos básicos para describir la atenuaciones por pérdidas. De entre ellos, los modelos estadísticos de pendiente simple son los más sencillos. Se basan en la estimación de las pérdidas de propagación, atendiendo únicamente a la distancia entre el transmisor y el receptor, suponiendo que la conexión entre ambos se realiza por rayo directo. Las pérdidas se ajustan al tipo de entorno a través de un parámetro denominado constante de propagación, que es típicamente creciente con la frecuencia de despliegue y con el grado de compartimentación del escenario.

Algo más completo es el modelo de Motley-Keenan, que basándose en los anteriores, añade la caracterización de la estructura del edificio, contemplando las

pérdidas asociadas a las paredes y los suelos atravesados por el citado rayo directo. A este modelo, el de Multiwall-Multifloor suma la capacidad de caracterizar cada uno de los obstáculos individualmente, estableciendo para ellos unas pérdidas que dependen del material, de las características físicas del obstáculo y de la frecuencia del despliegue. Kwok-Sau, además, introduce la posibilidad de que el índice de propagación utilizado para la caracterización de las pérdidas de propagación en el escenario no sea constante.

La principal novedad introducida por el modelo del camino dominante consiste en contemplar la posibilidad de que la señal transmitida alcance el receptor no solamente mediante un rayo directo desde el transmisor, sino por otros caminos que introduzcan menores pérdidas, aprovechando para ello reflexiones y difracciones en los distintos obstáculos presentes en el escenario de despliegue, y considerando, por tanto, los efectos de guiado. El modelo clasifica los distintos trayectos que puede recorrer la señal en tres tipos: LOS (*Line of Sight*), OLOS (*Obstructed Line of Sight*) y NLOS (*Non Line of Sight*). Cada uno de ellos presenta individualmente propagaciones con distintas características y atenuaciones. Tras evaluarlos, se selecciona de entre ellos el camino dominante como aquel trayecto con menores pérdidas de propagación.

Por último, los modelos de trazado de rayos son modelos deterministas que se emplean para la predicción de la respuesta del canal de radiocomunicaciones fundamentándose en la aplicación de la Óptica Geométrica (GO) y la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD). Los mecanismos fundamentales de propagación son la transmisión, la reflexión y la difracción ópticas, de forma que el receptor puede recibir contribuciones del rayo directo y los rayos reflejados y difractados.

Como complemento final al método de simulación, sea cual sea el modelo elegido, se puede añadir una etapa adicional al proceso, consistente en realizar mediciones sobre el escenario, y compararlas con los resultados arrojados para esos puntos por la simulación. El objeto de esta etapa final es, por un lado, verificar que la simulación arroja resultados adecuados y coherentes y, por otro, realizar los ajustes necesarios en la misma en caso de necesidad.

4.3 Fase online

La fase online o de medida es la etapa en la que se lleva a cabo la determinación de la posición de un dispositivo cuya ubicación, a priori, es desconocida. Esta medida se ha de realizar en tiempo real.

La posición se determina mediante la comparación del parámetro de señal de RF medido por el dispositivo en ese momento concreto, y los valores almacenados en la tabla que sirve como patrón de radiofrecuencia.

Desafortunadamente, la medida en tiempo real y los valores almacenados no suelen coincidir, por lo que se hace necesario el uso de técnicas y algoritmos para realizar los emparejamientos, y determinar la posición con mayor exactitud.

Estos algoritmos de posicionamiento son los que se describen a continuación, dividiéndolos en varios grupos:

4.3.1 Vecinos más cercanos. Método kNN.

El método kNN, o de los k vecinos más cercanos (k-Nearest-Neighbor) emplea las medidas RSS realizadas online para buscar y seleccionar las k equivalencias más próximas de localizaciones conocidas, almacenadas en las bases de datos previamente construidas durante la fase offline.

El valor de k es un parámetro adaptado para obtener mejores prestaciones.

El proceso consta de dos fases: durante la primera, se compara el valor medido con todos los valores almacenados, y se seleccionan de entre ellos los k valores más próximos. El criterio de proximidad se establece en base al principio de la raíz del error cuadrático medio, calculado respecto de las distintas estaciones emisoras.

En segundo lugar, se determina la posición promediando los k valores de posición individuales obtenidos en la primera parte del proceso.

Este procedimiento de estimación ponderada se realiza igualmente en otros métodos, como el probabilístico.

Un inconveniente que se presenta en este y otros métodos (otra vez en el probabilístico), es que cabe la posibilidad de encontrar un conjunto de equivalencias (o verosimilitudes) que estén más o menos concentradas, y algún otro valor que presente

también una alta coincidencia, pero que se encuentre disperso a nivel de posición física. En ese caso hay que habilitar técnicas con ponderaciones adicionales para que el valor que se haya fuera del área de concentración de señales sea descartado.

4.3.2 Redes Neuronales.

Los modelos de redes neuronales son técnicas de autoaprendizaje que actúan como aproximadores universales, habiéndose demostrado que son capaces de aproximar cualquier función no lineal con un cierto grado de precisión, por lo que resultan una alternativa válida para el problema del posicionamiento. Una propiedad muy importante es que no se requiere un conocimiento previo de la geometría del entorno, el modelo de propagación del canal, ni de la posición de las estaciones emisoras [MAR09].

En este tipo de sistemas, durante la fase offline, los valores de RSS y sus correspondientes coordenadas de localización se adoptan como entradas y objetivos, respectivamente, con el propósito de entrenar al sistema. Después de ese entrenamiento inicial, se obtienen los pesos apropiados.

El error de generalización define el comportamiento de una red neuronal ya entrenada, ante ejemplos de entradas nunca vistos por la misma (es decir, no usados como muestras de entrada en la fase de entrenamiento). Si la red neuronal es sobreentrenada, se corre el riesgo de que adapte los pesos demasiado bien a las muestras del conjunto empleado para el aprendizaje, y sea muy precisa para los ejemplos de entrenamiento, pero pierda capacidad de generalización, cometiendo errores altos en la estimación de la posición ante patrones nunca antes vistos. Si el entrenamiento es bajo, el error es provocado por la falta de optimización de los pesos.

En las redes neuronales es frecuente utilizar capas o niveles intermedios, para encaminar los resultados buscados. Esas capas se denominan "capas ocultas". Lo habitual es usar solamente una de ellas, como mucho dos.

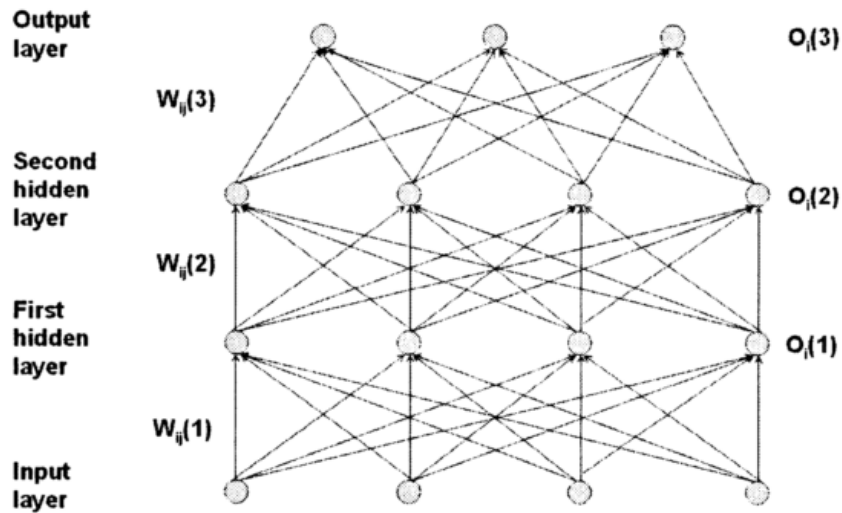


Figura 10. Perceptr3n multivel.

4.3.3 M3quina de vectores de apoyo. SVM.

SVM (Support Vector Machine) es una t3cnica de clasificaci3n de datos relativamente novedosa, que se usa en muchos 3mbitos de la ciencia donde se necesita realizar clasificaci3n "por aproximaci3n". Es una herramienta para realizar an3lisis estadístico, con buenos resultados en aplicaciones de clasificaci3n y regresi3n a partir de datos empíricos.

Tambi3n se ha usado para la localizaci3n por fingerprinting.

B3sicamente, para el problema concreto de la localizaci3n, el procedimiento consiste en asignar a cada punto del espacio un vector n-dimensional, donde n indica el n3mero de entidades emisoras de las cuales se realizan medidas de la seńal de radio recibida. En el radio-map habr3 vectores almacenados durante la fase de calibraci3n, que se compararn con los vectores generados durante la fase de posicionamiento.

Sin embargo, a pesar de comparar vectores, luego la informaci3n de localizaci3n resultante es siempre tratada como un valor escalar, para cada una de las dimensiones tenidas en cuenta en la localizaci3n.

Brunato y Battiti en 2005 [BRU05] realizaron un trabajo en el campo de la localizaci3n en interiores donde se describe a fondo la base matem3tica del SVM y se

llevan a cabo simulaciones y mediciones reales con este tipo de sistemas para verificar su idoneidad.

4.3.4 Menor Polígono de M-vértices. SMP.

La técnica del menor polígono de M-vértices, SMP (Smallest M-vertex Polygon), compara separadamente los valores medidos de RSS para cada localización con respecto a la señal de cada transmisor (suponiendo un total de M transmisores).

Después, se promedian las coordenadas de los vértices del menor polígono generado, es decir, el que tiene el perímetro más corto, para ofrecer la localización estimada.

4.3.5 Métodos probabilísticos.

Los métodos denominados probabilísticos infieren la posición del usuario a partir de diversas técnicas probabilísticas, tratando el problema del posicionamiento como un problema de clasificación.

Asumiendo que existen varias posiciones candidatas a ser elegidas de las tomadas durante la fase offline, y disponiendo de un vector de señal medida durante la fase online, se puede tomar una regla de decisión, que elija como posición válida aquella que tiene la mayor probabilidad de serlo, para esa medida.

Inicialmente se dispone de una serie de valores candidatos a ser la posición del terminal móvil que se corresponderán con las distintas posiciones dentro de la rejilla de medidas (*radio-map*). Además, en ese momento inicial el dispositivo móvil se puede encontrar en cualquier punto de la rejilla, por lo que la probabilidad de estar en una ubicación u otra será la misma para todos los puntos. Con posterioridad, a cada medida que se vaya realizando, se van obteniendo valores que van cambiando las probabilidades. Tras ello, el problema se reduce a hallar el punto con máxima verosimilitud en función de la medida realizada, realizando una estimación ponderada de la posición (es decir, ofreciendo mayores pesos a las ubicaciones que aportan una mayor verosimilitud).

5 Técnicas auxiliares.

Además del algoritmo que se puede considerar como base para la localización, existen otros algoritmos y técnicas que pueden ayudar al refinamiento de los resultados ofrecidos, o bien a mitigar los problemas con los que se encuentra la localización en interiores.

A continuación se describen las principales técnicas desarrolladas hasta la fecha.

5.1 Mejoras frente a la variabilidad temporal de la señal.

S. Fang y otros realizaron un trabajo en 2008 [FAN08], en el que señalaban como el principal problema en relación a la localización en interiores las grandes fluctuaciones de la potencia de señal recibida (RSS) en el móvil cliente, incluso para una posición fija.

Esa variabilidad puede deberse tanto al efecto multitrayecto, como al ruido introducido por el propio medio de radio por las propias características de propagación de la señal descritas en §3.3.

Para mitigar el problema, este estudio propone que, en lugar de comparar directamente los valores de RSS reales, se realice una transformación previa de los valores almacenados en el radio-map, para así reducir el margen dinámico, es decir, reducir el rango de valores de RSS posibles para un determinado punto. Así se logra una mayor efectividad y precisión en la realización de la localización.

Para realizar dicha transformación, primero se hallan las auto-correlaciones para una posición, a continuación se realiza una transformada discreta de Fourier (DFT) de esas auto-correlaciones, seguidamente se pasan dichas DFT a valores logarítmicos y por último, se realiza la media de todos los valores.

En la Fig 11 se esquematiza el procedimiento propuesto por [FAN08].

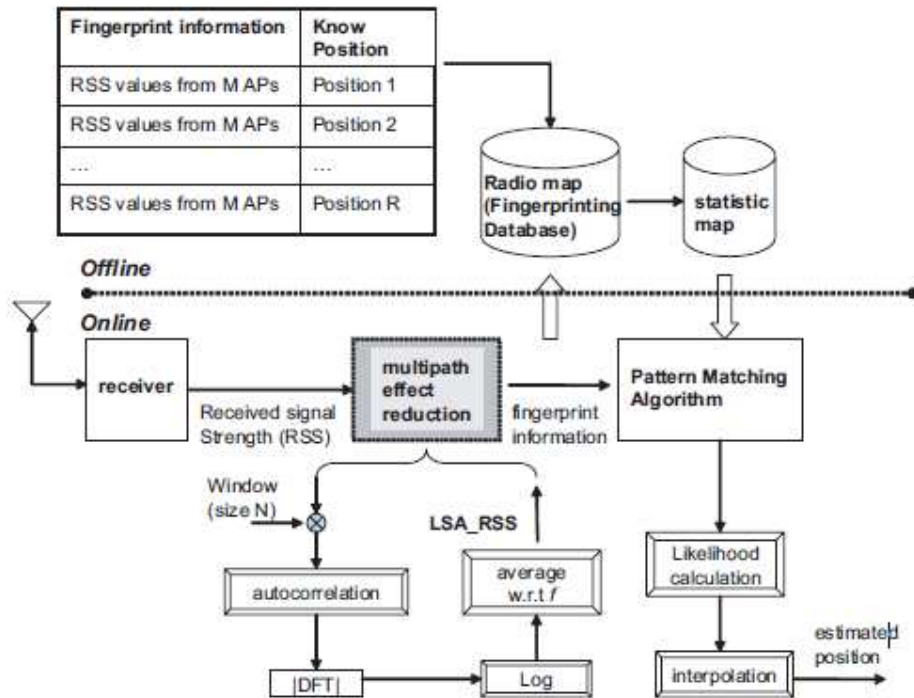


Figura 11. Esquema del Algoritmo descrito en [FAN08].

Otro estudio que revela datos interesantes sobre la variabilidad es el de Alejandro Martínez Sala y otros, de 2009 [MAR09], realizado sobre una red neuronal para localización en 2D. En ese trabajo, realizado sobre una red WLAN, se estudia el efecto de variar el número de neuronas en la capa intermedia, empleando para las simulaciones un modelo de canal con variabilidad controlada. Se hace un despliegue de 3 puntos de acceso en una superficie de 50 x 50 metros, es decir, una baja densidad de 0,12 ref/área (ver § 6.2.7 para la definición de densidad). El espacio presenta también poca compartimentación, con 3 salas y un pasillo, únicamente.

Como conclusiones interesantes de este estudio se obtiene que:

- Normalizar los datos en el rango [-1, 1] para los valores mínimo (umbral) y máximo de potencia recibido, ayuda a la minimización el error de generalización y la convergencia del mismo.
- En principio, un mayor número de neuronas intermedias presenta una mejora de funcionamiento, pero por encima de 64 neuronas no se observan mejoras significativas, frente a la complejidad que aportan al sistema.
- La variación de la variabilidad desde 0 hasta 6dBm produce variaciones reducidas del error y de la precisión.

Una ayuda al sistema, para mejorar la precisión frente a las variaciones de la señal sería disponer de medidas online de referencia, en la forma de medidas ofrecidas por terminales móviles emplazados de forma permanente en localizaciones fijas conocidas. De esa forma, se podrían llevar a cabo modificaciones periódicas en el radio-map en función de las medidas obtenidas, o se podrían optimizar los algoritmos. Esta vía requiere de futuros trabajos para realizar concreciones.

5.2 Mejoras frente a fallos de estaciones emisoras o ataques maliciosos.

Según C. Laoudias [LAO11], uno de los problemas del fingerprinting en los métodos deterministas kNN o en los probabilísticos, es que no tiene en consideración la presencia de posibles fallos durante el proceso de posicionamiento. Este trabajo investiga cómo mejorar la tolerancia a los fallos de un sistema kNN ante el mal funcionamiento de algunas de las estaciones emisoras (el trabajo usa WiFi para ello) o ante ataques maliciosos realizados con ánimo de hacer fallar o corromper los valores RSS medidos durante el proceso de posicionamiento. En ambos casos, se provocaría una degradación del sistema en forma de pérdida de exactitud.

Existen diferentes métodos, como son la introducción de estaciones emisoras redundantes para evitar ataques maliciosos, o usar solamente un número concreto de puntos de acceso seguros, en lugar de todos los disponibles; aunque en este trabajo lo que se propone es detectar el problema y, una vez hecho esto, cambiar el modo de cálculo de la distancia a un método híbrido más robusto. Sin embargo, la altísima densidad de emisoras (13,04 ref/área) resta en parte validez al experimento.

5.3 Otras técnicas de mejora y refinamiento de la posición.

a) Adición de triangulación en sentido uplink.

V. Khaitan, en 2011 [KHA11] apuntó la posibilidad de utilizar no solamente las medidas fingerprinting del sentido *downlink* (desde la estación al terminal), sino también, de forma ocasional, emplear técnicas de triangulación en sentido *uplink* (desde el terminal hacia la estación emisora), en un trabajo que pretende mejorar las prestaciones de localización en interiores mediante el empleo de femtoceldas en una

red móvil 3G. En él se intenta demostrar, mediante simulación, que los métodos basados en medir la potencia de la señal downlink funcionan bien cuando los móviles no están demasiado próximos a una femtocelda. Pero cuando están muy cerca, la potencia de la femtocelda que le sirve puede interferir con las de las restantes, degenerando la exactitud de la predicción de la localización. Indica que, en ese caso las prestaciones del sistema fingerprinting podían mejorarse empleando adicionalmente técnicas de triangulación por ortogonalización en el tiempo en el sentido uplink.

Este es un trabajo reciente que, de momento, no tiene refrendo experimental.

b) Adición del fingerprinting ambiental.

Otro interesante trabajo es el de M. Azizyan y otros, que en 2009 presentaron una propuesta para realizar la localización del teléfono móvil usando un fringerprinting combinado basado a la vez en la señal radio y en los posibles datos ambientales medidos [AZI09].

En él no se pretenden encontrar localizaciones físicas exactas, sino localizaciones asociadas a etiquetas lógicas, principalmente asociadas a establecimientos comerciales.

Teniendo presente que, paulatinamente, los teléfonos móviles van equipados cada vez con más tipos de sensores capaces de medir los sonidos, la luz, el color, la aceleración, etc, se puede pensar que la localización asistida por los mismos será también cada vez más sencilla y precisa. Así proponen que, además de asociar cada lugar con la huella de la potencia de la señal de radiofrecuencia, se la asocie también con una firma foto-acústica, que luego pueda ser comparada por las capturas que se realicen desde la cámara y el micrófono de un dispositivo móvil. En concreto, para la imagen estiman que una buena firma puede ser la foto del suelo de cada establecimiento. La Fig. 12 muestra el esquema básico del sistema.

Esta propuesta, a pesar de su relativa sencillez de concepto, no parece fácil de implementar salvo para posicionamientos estáticos y puntuales en el tiempo, ya que requiere la captura de imágenes y sonidos durante la fase de determinación de la posición. Además, a la complejidad de los algoritmos para determinar la posición por fingerprinting radio, habrá que sumar la de los algoritmos necesarios para identificar fotografías y sonidos, y la complicada fase de calibración. A cambio, se dispondría de más elementos de juicio para determinar una posición lo más correcta posible.

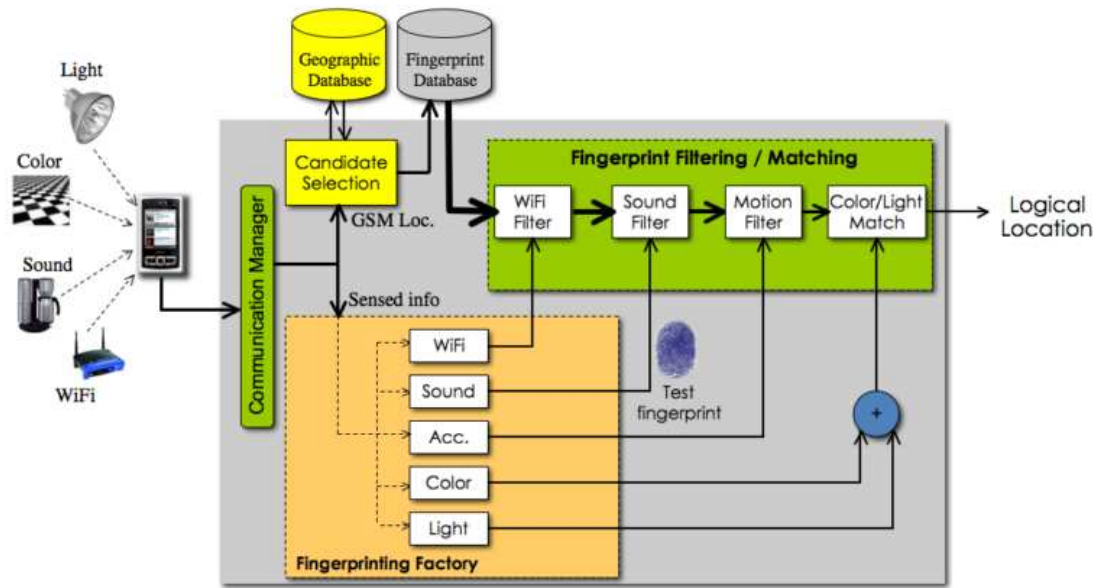


Figura 12. Esquema del sistema propuesto en [AZI09].

c) Acelerómetros y otras ayudas..

En línea con lo indicado en el punto anterior, existe una tendencia que intenta sacar provecho de los cada día más completos sensores e instrumentos que incorporan los smartphones, con la intención de emplearlos para refinar la medida realizada.

Dentro de ellos, el uso del acelerómetro como ayuda para este tipo de sistemas parece prometedor. Ya [AZI09] lo propuso, como refuerzo a su sistema de fingerprinting ambiental. En cualquier caso, no son difíciles de imaginar técnicas combinadas que restrinjan los posibles puntos de localización en función de la distancia recorrida por el terminal, etc; ese tipo de ayudas de predicción o acotación del movimiento ayudarían también a acelerar el tiempo de determinación de la posición.

Sin embargo, por otro lado, este uso combinado no dejaría de añadir complejidad al sistema, que tendría que primar a un tipo de medición sobre otro para no ofrecer resultados conflictivos. Por ejemplo, si el acelerómetro indica que no hay movimiento, lo más lógico parece ser pensar que la localización no debería cambiar. Sin embargo, puede que la señal leída por el terminal sí que esté variando, y que el resultado del correspondiente algoritmo de localización indique que el móvil se encuentra desplazado respecto de ese punto. La pregunta a la que hay que responder entonces es: ¿procedería primar la medida del acelerómetro o el resultado del algoritmo?

6 Prestaciones y resultados.

A lo largo del presente apartado se pretende realizar una comparativa entre los algoritmos y técnicas más comunes empleados para realizar la localización en interiores mediante fingerprinting.

El objeto de esta revisión comparativa es el de poner de manifiesto las prestaciones habituales en este tipo de sistemas, según las variadas configuraciones y escenarios propuestas a lo largo de distintos trabajos, a la vez que se resaltan las virtudes o carencias observadas en esas investigaciones. La necesidad que justifica la misma es el hecho de que ninguno de los sistemas de posicionamiento estudiados se presenta libre de errores, que además aparecen por muy diversos motivos, como se ha descrito en apartados anteriores.

6.1 Criterios para la comparación.

A la hora de realizar una comparativa entre los algoritmos disponibles, los principales conceptos a evaluar son la exactitud y la precisión. Sin embargo, la comparativa no se debe reducir solamente a esos conceptos, y debe incluir otros, tal como se indica a continuación.

Como se verá, estos conceptos están muy relacionados, de forma que el coste de lograr una mayor exactitud es empeorar alguna de las características restantes del sistema. Por tanto, lo habitual es que haya que llegar a un compromiso adecuado entre la exactitud y las otras características del citado sistema.

6.1.1 Exactitud y precisión.

Tal como se indicó en el apartado de consideraciones generales de la localización, tanto la exactitud como la precisión se emplean para indicar el grado de acercamiento de la estimación realizada por el sistema, a la posición real de referencia donde se encuentra el dispositivo a localizar.

Lo anterior parecería señalar, en una primera reflexión, que es suficiente con conocer uno de esos dos términos para realizar una comparativa acertada entre distintos sistemas. Sin embargo, también se usan las funciones de probabilidad acumulativa (CDF, Cumulative Probability Functions) de la exactitud para medir la bondad o preferibilidad de un sistema ya que, cuando dos técnicas de posicionamiento se comparan, si su exactitud es la misma, se prefiere el sistema con una gráfica CDF que indique que los valores con una alta probabilidad se obtienen más rápidamente, porque su error en distancia está concentrado en valores más pequeños [LIU07].

6.1.2 Complejidad.

La complejidad considera el tiempo de computación requerido para obtener la convergencia de la medida durante la fase en tiempo real.

La evaluación de ese tiempo no solamente representa el tiempo de espera para obtener un resultado, sino también el consumo de CPU del dispositivo que tiene que realizarla o, lo que es lo mismo, de batería, si el citado dispositivo es portátil (teléfono móvil, etc).

La complejidad de cada algoritmo impone un límite máximo a la periodicidad con la que se puedan realizar las mediciones y, por ende, a la velocidad de desplazamiento del terminal móvil a posicionar.

Obviamente, los resultados obtenidos para este parámetro varía en términos absolutos según el momento en que se realice el estudio, ya que la capacidad de computación evoluciona muy rápidamente. En cualquier caso, es un dato que ayuda a hacerse una idea sobre el grado de sencillez que presenta el tratamiento de datos por el algoritmo seleccionado, y de rapidez en la respuesta esperada.

6.1.3 Robustez.

Una técnica de posicionamiento con una alta robustez podría funcionar normalmente incluso cuando algunas señales de referencia no estuvieran disponibles, por ejemplo porque una estación emisora se encontrara dañada o bloqueada.

También es posible que algunos valores de RSS u otros parámetro en los que se base el sistema de posicionamiento, aparezcan por primera vez en el mismo al haberse añadido nuevas unidades, o reparado unidades averiadas.

En todos esos casos, el sistema se debe mantener lo más estable y preciso posible.

6.1.4 Escalabilidad.

La característica de escalabilidad de un sistema asegura su normal funcionamiento cuando el ámbito del posicionamiento crece.

Cuando el área o volumen cubiertos se hacen más amplios, puede haber necesidad de trabajar con más unidades emisoras, porque se haya excedido el límite de cobertura de las mismas. Se corre el riesgo de que un alto número de emisoras en juego, porque se necesita cubrir más espacio, o porque se requiere una alta densidad para mejorar la precisión, ocasione que los canales de comunicación inalámbrica se congestionen, se requieran más cálculos, o se necesitare infraestructura adicional.

6.1.5 Coste.

Al igual que para cualquier sistema en general, el coste de un sistema de posicionamiento puede depender de varios factores, entre los que se pueden destacar los requerimientos monetarios, de tiempo y de consumo energético; teniendo en cuenta en todos esos parámetros tanto los recursos necesarios para la instalación del sistema como para su mantenimiento.

El peso de los equipos y el espacio físico requerido para su instalación también son importantes, porque pueden existir fuertes restricciones relativas a los mismos.

6.1.6 Densidad.

En el presente trabajo se introduce una magnitud adicional a los estudios realizados hasta la fecha, con el objeto de poder comparar objetivamente la concentración o densidad de estaciones emisoras utilizadas en los mismos.

Para los trabajos de localización en 2D, la densidad se medirá en número de estaciones por cada 100 m², o decámetro cuadrado, y se expresará en “número de estaciones de referencia por área” o “ref/área”.

6.2 Comparativa. Resultados.

La gran disparidad de escenarios elegidos en los diferentes trabajos realizados en relación al posicionamiento en interiores, las diferentes condiciones de ubicación de las estaciones de referencia para el citado posicionamiento, las divergentes condiciones de entorno en general, y otra serie de distintos aspectos asociados a los trabajos de forma muy dispar, hacen que la mera comparación de los resultados obtenidos por los mismos se vuelva una tarea complicada y tediosa, ya que resulta muy difícil homogeneizar tanto los parámetros de entorno como los resultados. Si a eso añadimos las diferentes tecnologías de radio empleadas, nos podemos empezar a hacer una idea de la complejidad del asunto.

Así, se han publicado con anterioridad algunas comparativas. En algunas de ellas, el primer paso consistió en intentar homogeneizar las condiciones de trabajo, para obtener resultados con criterios más claros.

Por ejemplo, T. N. Lin en 2005 [LIN05] realizó una comparación de algoritmos con tecnología WLAN (802.11b, esto es, WiFi de 11 Mbps), en la que obtuvo unos resultados, a priori, muy buenos para todos los algoritmos probados (redes neuronales con diversos niveles, kNN con distintos k, y probabilístico), pero que en realidad pueden resultar engañosos, ya que para realizar este estudio se dispusieron 11 puntos de acceso WiFi, en un espacio de 24,6 X 17,6 m, lo cual significa una densidad bastante elevada (2,54 ref/área), con independencia de que en el escenario existieran un gran número de obstáculos en forma de paredes (ver Fig 13).

En relación a la exactitud, los resultados obtenidos en el trabajo de [LIN05] indican que el mejor de los algoritmos disponibles en aquel momento, para esa distribución física y esa densidad de emisoras era el método kNN. En ese trabajo se utilizó el error medio en la exactitud como medida de las prestaciones de un algoritmo para ese concepto.

Según el citado trabajo, se consigue una exactitud de 1 m con el método kNN utilizando solamente la comparación sobre 10 muestras (es decir, $k = 10$). Además, en cuanto a precisión se obtiene que con kNN se acierta el 80% de las veces en posicionamientos de menos de 1 m (y, como se ha indicado, una densidad de unidades emisoras bastante alta).

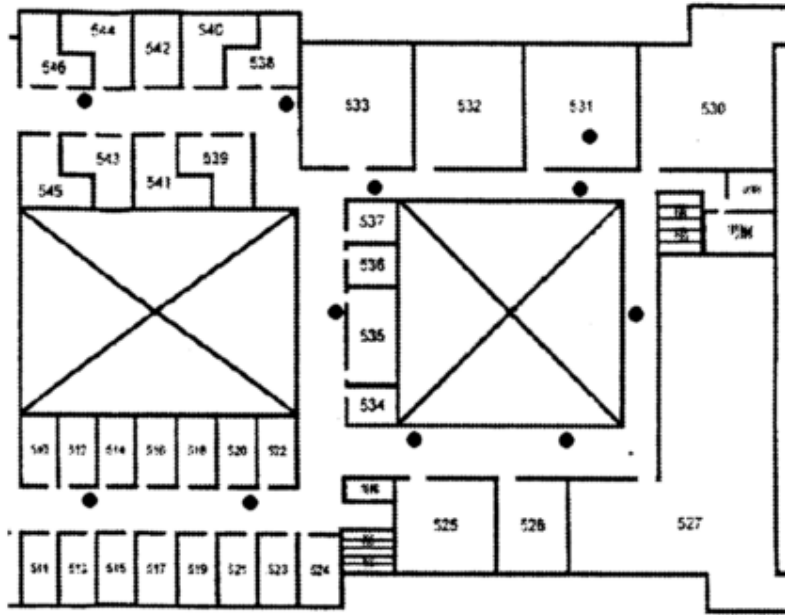


Figura 13. Escenario de medición , con la ubicación de las emisoras, según [LIN05].

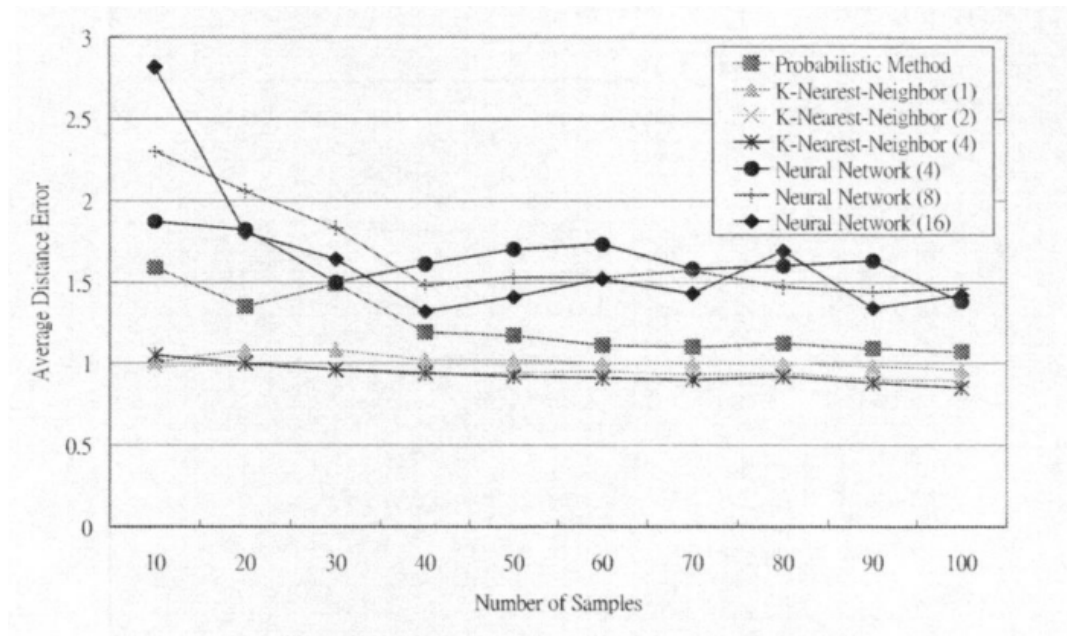


Figura 14. Exactitud de las distintas técnicas, según LIN05.

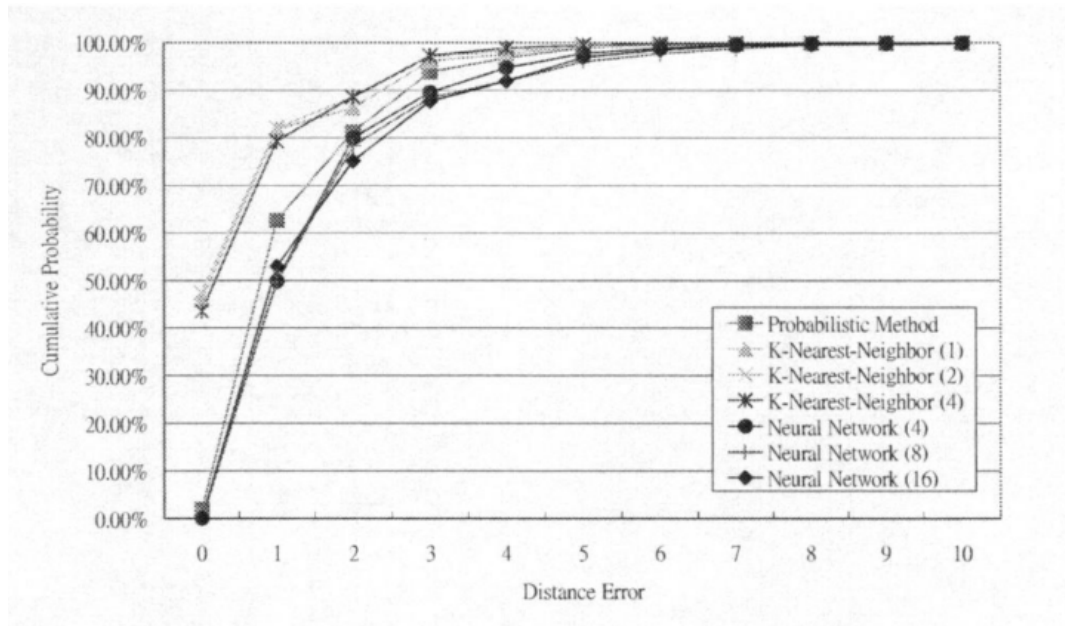


Figura 15. Precisión de las distintas técnicas, según LIN05.

Resultados igualmente interesantes son los obtenidos por Otsason y otros en el mismo año 2005 [OTS05], donde se indica que se puede realizar una localización precisa en interiores usando técnicas fingerprinting basadas exclusivamente en células GSM externas, lo cual contraviene la creencia general de que para realizar en interiores las células GSM exteriores no son válidas. Con 6 estaciones base (mínimo), Otsason afirma que se puede localizar a una persona en el interior dentro de un radio de 5 m, con una exactitud media de hasta 2,5 m dentro de una misma planta. Para ello se emplea un algoritmo denominado RADAR, definido en [BAH00], y que consiste básicamente en un kNN ponderado.

Un punto débil del trabajo de Otsason es que, aun siendo aplicable a edificios, no se puede generalizar a todo tipo de interiores (túneles, estaciones subterráneas de metro, etc).

En relación a la complejidad, sin embargo, según [LIN05], el método más sencillo a nivel computacional es el de las redes neuronales. El método kNN depende mucho del valor que se asigne a la variable k, aunque incluso no alcanza en sencillez a las redes neuronales ni siquiera para valores bajos de k. También se observa para el método kNN que, a partir de un determinado número de k, el incremento del mismo únicamente trae aparejado un sustancial incremento en la complejidad, frente a una mejora prácticamente despreciable de la exactitud en el posicionamiento.

Para [LIN05], los 3 métodos estudiados (probabilístico, kNN y red neuronal) son robustos tanto ante la caída como ante la aparición de una nueva entidad emisora, porque pueden funcionar bien añadiendo valores por defecto a la medida, que no entorpecerían la localización, una vez que los algoritmos asumieran esos valores por defecto. Sin embargo, lo que no entra a valorar el trabajo es en qué momento ni con qué mecanismo procede añadir esos valores por defecto al radio-map.

Sin haber entrado a formar parte de la comparativa realizada por [LIN05], la propia naturaleza del método hace pensar que el más robusto ante este tipo de situaciones sea el SMP, que dispone para cada punto del radio-map de una medida para cada estación emisora. De esa forma, la tarea de eliminar o añadir estaciones es mucho más sencilla y precisa que con cualquier otro método que deba asumir valores por defecto para compensar los cambios.

En el trabajo de Brunato y Battiti [BRU05], coetáneo del anterior, se realizaron también comparativas entre diferentes técnicas, en este caso encaminadas a probar la idoneidad de los sistemas SVM para la localización en interiores, que son comparados frente a métodos kNN, redes neuronales, y sistemas probabilísticos bayesianos. Para un escenario de 25x30 m con una densidad de puntos WiFi de 0,8 ref/área, dividido en cinco grandes salas y unos pocos pasillos, es decir, con una compartimentación media, se concluye que la exactitud en SMV es similar al kNN (el mejor de los restantes) o incluso mejor en algunos casos, presentando un error menor de 3 m para una probabilidad del 50%. La complejidad del algoritmo también se demuestra similar entre ambos métodos, por detrás de las redes neuronales, pero requiriendo menos operaciones que los sistemas probabilísticos.

Otros estudios importantes, como el de Liu H. y otros en 2007 [LIU07], muy citado en la bibliografía al respecto de la localización en interiores, hacen una revisión bastante amplia de los algoritmos conocidos hasta ese momento, pero basan sus conclusiones directamente en los resultados ofrecidos por los citados trabajos, sin llegar a realizar una comparativa en un escenario similar para todos ellos o para algunas técnicas seleccionadas.

Así, por ejemplo, ofrece una tabla resumen donde se listan los principales sistemas conocidos, clasificándolos en función de la tecnología radio y los algoritmos empleados, indicando la exactitud reportada, su precisión, y calificándolos desde el punto de vista de los conceptos señalados al principio del apartado (complejidad, robustez, etc). En ella, sin embargo, no se indica ninguna característica relativa al escenario o la densidad de celdas empleadas, razón por la cual la tabla resulta válida para la mera enumeración de los trabajos realizados hasta el momento, pero hasta cierto punto engañosa para realizar la comparación.

Además, no se citan algunos trabajos significativos en WLAN como el de Brunato y Battiti [BRU05], anteriormente descrito, pero sí se incluyen varios trabajos basados en tecnologías radio de corto alcance (RFID, UWB...). Respecto a las tecnologías de comunicaciones móviles, tan sólo aparece referenciado el trabajo de Otsason [OTS05], que como se ha indicado previamente, basa la localización en las estaciones base GSM externas al edificio. No se incluye ninguna referencia a trabajo alguno basado en femtoceldas.

Sin embargo, si se encuentra citado EKAHAU [EKA12], que es actualmente uno de los principales sistemas de localización comercial por WLAN basado en RSSI fingerprinting, y que emplea clasificadores bayesianos y técnicas estadísticas para inferir la posición. Se indican para él unas buenas características (exactitud de 1 m, precisión de 2 m al 50% de probabilidad, buena escalabilidad y robustez, y bajo coste, aunque una complejidad moderada). Este es, sin embargo, un sistema cerrado, con dispositivos propios para realizar la localización y el seguimiento de personas e instrumentos en el interior de edificios tales como hospitales, para el que normalmente se realiza un despliegue ad hoc de las estaciones emisoras.

Como cierre a este apartado se puede señalar una máxima común que se extrae de las diversas comparaciones y trabajos previos estudiados: a pesar de la disparidad de topologías físicas y técnicas en los experimentos descritos en ellos, normalmente una mayor densidad de estaciones emisoras suele redundar en una mayor exactitud y robustez pero, por el contrario, la excesiva concentración puede acarrear un mayor grado de complejidad en el sistema, además de incrementar el coste.

7 Posibles tecnologías y arquitecturas para despliegues.

7.1 Tecnologías radio para localización en interiores.

Las redes WLAN basadas en WiFi son muy usadas para los trabajos experimentales, frente a otros tipos de tecnologías como pueden ser las basadas en femtoceldas, por la facilidad de acceso y uso para pruebas en todo tipo de entornos. Sin embargo, no está claro que su empleo para despliegues reales vaya a realizarse en la misma proporción respecto de esas otras tecnologías.

Este tipo de redes pueden estar protegidas por claves para proteger la privacidad de los datos. No habría impedimento para medir la potencia recibida de cada una de las estaciones emisoras, si bien habría que asegurar que es posible la comunicación abierta para la transmisión de las medidas desde el terminal móvil al servidor que realizara los cálculos del posicionamiento, a través de los distintos puntos de acceso WLAN por los que el usuario del servicio se fuera moviendo. Por esa motivación, el uso de WLAN sería relativamente fácil en redes privadas, abiertas o no, donde el usuario final de la localización fuera el mismo que monta la infraestructura (por ejemplo, un hospital que ofreciera un servicio de localización a sus pacientes), pero no sería tan fácil de implementar para uso general disponible a cualquier usuario que accediese, por ejemplo, a un aeropuerto o a un centro comercial, que lo primero que tendría que procurar es la conexión de datos a el sistema propio del centro, a través de los puntos de acceso WiFi puestos a su disposición.

En el aspecto del handover, o cambio de conexión del terminal móvil de una antena emisora a otra, las femtoceldas o small-cells de LTE pueden presentar ventaja, al estar prevista su realización de forma transparente incluso para dispositivos que se desplazan a una alta velocidad. Este, además, se presenta en dos variantes para las femtoceldas: conmutación entre las macroceldas y las femtoceldas al acceder, al salir, o incluso en el interior del edificio (ya se ha revisado un trabajo con localización basada únicamente en las macroceldas externas), o conmutación únicamente entre femtoceldas. En LTE, esta diferenciación no existe, ya que todas las celdas de la red juegan un papel similar en la misma, con independencia de su radio de cobertura. En cualquier caso, para las redes de móviles, todos estos traspasos están bien regulados por la funcionalidad intrínseca de la propia red, con protocolos claramente establecidos por los que el terminal debe medir la potencia de los pilotos que reciba, y bien

autónomamente, o bien controlado por las celdas, conmutar la conexión entre el citado terminal y las distintas estaciones emisoras. Este aspecto puede suponer una gran ventaja para la localización de terminales en movimiento con respecto a la tecnología WLAN.

7.2 Posibles arquitecturas para localización radio en interiores.

Existen dos aproximaciones básicas al proceso de diseño de un sistema de posicionamiento en interiores basado en radiofrecuencia: desarrollar el sistema y una infraestructura de red enfocados principalmente a proveer la funcionalidad necesaria para la localización, o usar una infraestructura de red radio ya existente para llevar a cabo esta tarea. La ventaja de la primera opción es que los diseñadores serán capaces de controlar más en detalle los requerimientos físicos y, consecuentemente, los resultados obtenidos. Por el contrario, la segunda opción evita despliegues adicionales de infraestructura, que suelen resultar bastante costosos en tiempo y dinero, aunque necesitarán de algoritmos y métodos más inteligentes para compensar la peor precisión de las medidas obtenidas.

La primera opción parece más efectiva en aplicaciones de alto presupuesto, pero desde luego parece inviable en despliegues a gran escala.

Por otro lado, parece obvio que, atendiendo a las arquitecturas básicas descritas en el §2.2, el caso de una localización en interiores basada en fingerprinting debería corresponder a un sistema de posicionamiento remoto indirecto, en el cual la realización de la medida la llevase a cabo un terminal móvil, pero el procesado de la misma lo realizara una unidad de procesamiento independiente. No parecen adecuadas las arquitecturas de autoposicionamiento, donde la determinación de la localización fuera llevada a cabo por el propio terminal móvil, ya que eso requeriría la entrega previa del radio-map completo asociado a un entorno, cada vez que el citado terminal de introdujera en él. Y además, que toda la potencia de cálculo para llevar a cabo el algoritmo se llevara a cabo en el mismo, con el consumo adicional de batería que pudiera conllevar. Un posicionamiento remoto puro, en el que las medidas fueran tomadas por las estaciones base, requeriría un radio-map por cada una de ellas, que además sería muy dependiente de la variabilidad en la potencia de emisión de cada terminal móvil, por lo que tampoco parece una buena opción.

Una característica común de los sistemas de medida indirectos es el hecho de que necesitan enviar medidas y cálculos entre el terminal móvil y la estación fija. Éstas, dependiendo del sistema operativo disponible en el dispositivo (Android, etc), y el firmware del mismo, podrían ser más amplias o más restringidas.

En cualquier caso, lo que es obvio es que estos sistemas producirán un mayor tráfico de datos, lo cual podría constituir un problema en los casos en los que la red presente unos altos niveles de carga.

Una posible solución sería proporcionar preferencia a los datos correspondientes al proceso de localización, asignándoles mayor prioridad que al resto de ellos. Otra posible solución pasaría por enviar dichos datos dentro de tramas de control de la red, intrínsecamente prioritarias sobre los datos. Ambas aproximaciones necesitarían fijar también cada cuánto tiempo se envían los datos de localización, y en el segundo caso encontrar qué tipo de trama de control se debería enviar albergando estos datos.

Como se ha indicado anteriormente, en el citado servidor es donde se encontrarían el radio-map, formado por una serie de vectores u otro tipo de medidas asociados a cada punto de los chequeados durante la fase de calibración. Lo mejor sería tener un *radio-map* con una alta densidad, para poder tener el mayor número de puntos de referencia posible, pero conseguir esto puede ser muy costoso a nivel de despliegue de entidades emisoras. Además, para el tiempo de respuesta del sistema, puede ser también un aspecto negativo. Por lo tanto, habrá que llegar a un equilibrio entre tamaño del *radio-map* y coste de realización y funcionamiento del mismo. Para ello, habrá que contemplar distintas cuestiones, como el tipo de algoritmo que se va a usar, cuántas mediciones se necesitan por cada punto representado, etc. Además, en el caso del dimensionamiento de la capacidad de proceso, debe tenerse presente que esa tarea sea viable para el número máximo de usuarios que puedan requerir los servicios de localización simultáneamente, lo cual dependerá del tipo de entorno, básicamente. A nivel de capacidad, no es lo mismo un aeropuerto internacional que un centro comercial o un edificio de oficinas.

Por el lado del terminal móvil, las medidas deben realizarse en determinados momentos. Una variable del sistema debería ser la repetitividad de las mismas [WIG07]. Esa repetitividad debería ser suficientemente alta para cubrir con precisión y rapidez los desplazamientos a la mayor velocidad previsible en los usuarios. Así, si se prevén desplazamientos a pie, se puede estimar una velocidad máxima de unos 6 km/h como referencia. Pero si el entorno dispone de cintas mecánicas, por ejemplo como las existentes en los aeropuertos, esa velocidad puede verse incrementada, y por tanto la velocidad de repetición de la medida. Además, para el caso de procesos en los que se contemple también la monitorización, habría que fijar otra variable temporal

para marcar el ratio de almacenamiento de las localizaciones sucesivas, posiblemente con capacidad para muchos terminales simultáneamente. Sin embargo, como se señala en [FIG10], añadir variables temporales a las mediciones introduce nuevos factores de complejidad adicionales, así que en este terreno se debe actuar también con cautela.

Por último, y en relación a la distribución de las entidades emisoras, bien sean femtoceldas, small-cell LTE o WiFi, como se ha visto a lo largo del trabajo, para un mismo entorno, una mayor densidad en el despliegue y una adecuada distribución de las mismas permite una mayor exactitud o precisión en la localización. Además, esa mayor densidad puede traer también aparejada un incremento en el caudal de datos que se puede cursar por ellas. Sin embargo, el contrapunto a esta medida se encuentra en el incremento de las interferencias provocadas entre las entidades emisoras, y el aumento de procesos de handover asociados al movimiento de los terminales, incluso para pequeñas distancias recorridas.

En cualquier caso, la ubicación física de las entidades emisoras WiFi, femtoceldas, o de la tecnología que fuera a emplearse, debe ser siempre conocida a priori. Además, si se asume el empleo de métodos fingerprinting, esa localización no debe modificarse sin pasar, posteriormente, por una recalibración del sistema.

8 Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se ha visto cómo las especiales características de propagación de la señal radio en interiores de edificios (ausencia de visión directa, múltiples caminos, etc) fuerzan a desestimar la mayoría de las técnicas usadas para el posicionamiento radio en exteriores, basadas principalmente en las técnicas de triangulación.

En este aspecto, existe bastante consenso a la hora de señalar las técnicas basadas en fingerprinting como las ideales para realizar el posicionamiento en interiores basado en señales de radiofrecuencia.

Estas técnicas fingerprinting, como se ha descrito a lo largo del trabajo, están basadas en la comparación de una medición realizada en tiempo real, frente a unos valores previamente almacenados en una base patrón de referencia, durante una fase previa denominada de calibración (valores procedentes directamente de mecanismos de simulación, de medición en el entorno real, o de ambas).

Las citadas técnicas presentan, sin embargo, un nivel de consenso mucho menor en relación a qué tipo de algoritmo se debe usar para determinar finalmente la posición, a partir de mediciones que, aunque se realicen sobre el mismo escenario que se tomaron las medidas patrón de referencia, normalmente no coinciden con ellas por diversos motivos (variaciones en la señal, etc).

En la revisión comparativa realizada, se han señalado los principales aspectos a tener en cuenta (exactitud, complejidad, etc), verificándose que no existe ninguna técnica que sobresalga sobre las demás en todos los aspectos. También se ha visto que es común que los incrementos en exactitud sean normalmente a costa de incrementar también la complejidad.

Por otro lado, entre las diferentes tecnologías radio que podrían ser utilizables en un sistema de estas características, y a pesar de que un amplio número de trabajos emplean WiFi para sus medidas y experimentaciones, se estima que el uso de femtoceldas o small-cells de LTE puede ser el que ofrezca unas condiciones de mercado más favorables para el despliegue de este tipo de sistemas de localización en interiores.

Con todas estas conclusiones, se dan por alcanzados los objetivos planteados al inicio del desarrollo del trabajo ya que:

1) Se ha podido obtener una visión general sobre el estado del arte actual del asunto de la localización basada en señales de radiofrecuencia.

2) Se han revisado más en profundidad los algoritmos y técnicas específicos para entornos de interior. De entre ellos, se ha realizado un estudio más pormenorizado de las técnicas fingerprinting.

3) Se ha podido realizar una comparativa de las fortalezas y debilidades de los diferentes algoritmos y métodos pertenecientes a este tipo de técnicas.

4) Se han identificado algunos campos o facetas que disponen de recorrido abierto para posteriores investigaciones, y que se indicarán más en detalle en la § 8.1.

8.1 Trabajos futuros.

Como se ha indicado anteriormente, uno de los objetivos del trabajo es encontrar nuevos caminos que permitan avanzar en el tema de la localización en interiores usando tecnologías radio.

Estos interiores normalmente pertenecerán a edificios, pero existen también otro tipo de entornos de interior que deben tenerse en cuenta (túneles, etc).

La diversidad de posibles escenarios y entornos de interior, y el hecho de que la mayoría de los trabajos se circunscriban a un determinado escenario físico concreto, distinto en cada uno de ellos, y cuyos resultados muchas veces no son extrapolables a otros escenarios diferentes con distinto tamaño, número de salas, densidad de estaciones emisoras, etc, ofrece un campo abierto para el posterior avance en el estudio del comportamiento de los algoritmos propuestos, buscando la optimización general de los mismos para los diferentes entornos posibles.

Otro campo abierto se encuentra en la mejora de los resultados obtenidos, en general, por otras vías distintas a la aparentemente más obvia, consistente en incorporar mayor densidad de entidades emisoras.

Con vistas a una posible tesis doctoral a realizar sobre el tema del presente trabajo, se han identificado dos posibles vías específicas de investigación:

- Para un entorno determinado, identificar cuál es el número óptimo de entidades emisoras que permiten alcanzar una determinada precisión, y dónde deberían emplazarse las mismas. En la literatura, existen trabajos similares para intentar obtener la mejor distribución de antenas o entidades emisoras, pero siempre encaminadas a cubrir los servicios de comunicaciones de voz y datos, no los de localización.
- Realimentar a los algoritmos de posicionamiento con dispositivos receptores (terminales móviles) que actúen como “testigos”, con una posición fija y conocida, y que fueran tomando constantemente medidas de la señal recibida en determinados puntos. Las variaciones de la señal serían de esa forma detectables, y podrían ser periódicamente incorporadas al radio-map durante la fase de posicionamiento, sin requerir una recalibración completa del sistema.

8.2 Reconocimientos.

La realización del presente trabajo se ha visto facilitada por mi participación, dentro de Alcatel-Lucent, en un proyecto INNPACTO de investigación, relacionado con la temática principal del mismo.

El proyecto se denomina MONOLOC [MON11], y busca avanzar en la monitorización y localización en interiores, usando tecnologías de comunicaciones móviles de última generación, e incorporando funcionalidades de autogestión como la autoconfiguración, el autodiagnóstico y la autocuración.

Bibliografía

- ALV09 Alvarez-Campana, M., Berrocal, J., González, F., Pérez, R., Román, I. & Vázquez, E, 2009. Tecnologías de Banda Ancha y Convergencia de Redes. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. ISBN: 978-84-96275-85-0.
- AZI09 Azizyan, M. & Choudhury, R.R., 2009. SurroundSense: Mobile Phone Localization via Ambience Fingerprinting. In *MobiCom'09, September 20–25, 2009, Beijing, China*.
- BAH00 Bahl, P. & Padmanabhan, V.N., 2000. RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System. *Data Processing*, 2, pp.775-784 vol.2.
- BEF12 ICT-Befemto. [Internet]. Disponible en: <http://www.ict-befemto.eu/>, [Acceso el 6 de Marzo de 2012]
- BRU05 Brunato, M. & Battiti, R., 2005. Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless LANs. *Computer Networks*, 47, pp.825-845.
- EKA12 WiFi Site Survey Tool for professional WiFi Planning | Ekahau. [Internet]. Disponible en: <http://www.ekahau.com/products/ekahau-site-survey/overview.html>, [Acceso el 9 de Mayo de 2012]
- FAN08 Fang, S, Lin, T. & Lee, K., 2008. A Novel Algorithm for Multipath Fingerprinting in Indoor WLAN Environments. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(9), pp.3579-3588. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4626331>.
- FIG10 Figueiras, J. & Frattasi, S., 2010. Mobile Positioning and Tracking. From Conventional to Cooperative Techniques, Wiley.
- KHA11 Khaitan, V., Tinnakornsriruphap, P. & Yavuz, M., 2011. Indoor Positioning Using Femtocells. *2011 IEEE Vehicular Technology Conference VTC Fall*, pp.1-5.

- LAO11 Laoudias, C. & Michaelides, M., 2011. Fault detection and mitigation in WLAN RSS fingerprint-based positioning. *Indoor Positioning and*. Disponible en:
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6071926 [Acceso el 12 de Abril de 2012].
- LIN05 Lin, T.N. & Lin, P.C., 2005. Performance comparison of indoor positioning techniques based on location fingerprinting in wireless networks. In *Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, 2005 International Conference on*. IEEE, pp. 1569-1574. Disponible en:
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1549647 [Acceso el 19 de Febrero de 2012].
- LIU07 Liu, H. et al., 2007. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 37(6), pp.1067-1080. Disponible en:
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4343996 [Acceso el 19 de Febrero de 2012].
- MAR09 Martínez Sala, A., Guzmán Quirós, R. & Egea López, E., 2009. Influencia de la variabilidad del canal en un sistema de localización para interiores. In *JITEL*. Disponible en:
<http://ait.upct.es/~eegea/pub/jitel09-1.pdf> [Acceso el 28 de Diciembre de 2011].
- MON11 Proyecto MONOLOC. [Internet]. Disponible en:
<http://monoloc.creativit.com/>, [Acceso el 23 de Abril de 2012]
- OTS05 Otsason, V., Varshavsky, A. & LaMarca, A., 2005. Accurate GSM indoor localization. *UbiComp 2005*; (iv), pp.141-158. Disponible en:
<http://www.springerlink.com/index/B6TBWEUG7QM91BWK.pdf>
 [Acceso el 10 de Enero de 2012].
- PHI07 Phillips, S., Katchabaw, M. & Lutfiyya, H., 2007. WLocator: An Indoor Positioning System. *Third IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2007)*, (WiMob), pp.33-33. Disponible en:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4390827> [Acceso el 7 de Mayo de 2012]

WIG07 Wigren, T., 2007. Adaptive Enhanced Cell-ID Fingerprinting Localization by Clustering of Precise Position Measurements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(5), pp.3199-3209.