



Bizkaiko Foru Aldundia  
Diputación Foral de Bizkaia  
Berrikuntza eta Ekonomi  
Sustapen Saila  
Departamento de Innovación  
y Promoción Económica

## *Programa Ekinberri 2008*

# Sentinel

Sistema flexible de localización  
en interiores basado en redes de  
sensores ZigBee

---

E2 Estado del arte en sistemas de  
localización en interiores basados en  
RF

---



Tecnológico  
Fundación Deusto

Teknologikoa  
Deustu Fundazioa

sumenor   
security & control systems



## RESUMEN

Este documento aborda el estado del arte sobre sistemas de localización en interiores basados en RF. A partir de él se abordarán los objetivos del proyecto Sentinel. La principal fuente de información han sido artículos y libros recientemente publicados.

En el primer apartado se estudian los modelos de propagación indoor. A continuación se detallan los distintos mecanismos de localización para interiores existentes. También se dedica un apartado a la importancia que pueden tener las antenas en estos sistemas. Finalmente se profundiza en la estrategia que emplean diferentes tecnologías como WiFi, UWB y ZigBee para hacer localización en interiores.

## HISTORIAL DE CAMBIOS

<b>Versión</b>	<b>Descripción</b>	<b>Autor</b>	<b>Fecha</b>	<b>Comentarios</b>
1.0	Primer Borrador	Leire Muguiru	01-12-2009	
2.0	Primera Versión	Leire Muguiru Juan Manuel López	01-03-2009	

## TABLA DE CONTENIDOS

Resumen .....	2
Historial de cambios .....	3
Tabla de contenidos .....	4
1 Introducción.....	6
2 Modelos de propagación indoor .....	7
2.1 Planificación radio .....	7
2.2 Estimación de las pérdidas de la señal .....	8
2.3 Mecanismos de propagación .....	9
2.4 Modelos de propagación en interiores .....	9
2.4.1 Modelos empíricos de propagación en interiores (banda estrecha).....	10
2.4.2 Modelos empíricos de propagación en interiores (banda ancha).....	15
2.4.3 Comparación de los diferentes modelos .....	16
2.5 Realización de medidas en sistemas móviles .....	17
2.5.1 Ajuste de los modelos empíricos de pérdidas de propagación .....	17
2.5.2 Creación de modelos de canal sintéticos .....	17
2.5.3 Medida de la cobertura existente .....	18
2.5.4 Estudios de diseño .....	18
2.6 Impacto de las inexactitudes en las medidas .....	18
2.7 Muestreo de señales .....	19
2.7.1 Obtención de la media en decibelios.....	20
3 Técnicas de localización .....	22
3.1 Obtener la medida de los sensores.....	22
3.1.1 Medida del AOA (Angle-of-arrival).....	23
3.1.2 Medidas relacionadas con la distancia:.....	25
3.1.3 Medidas de perfil de RSS.....	26
3.2 Combinan las diferentes medidas para deducir la localización de los nodos. ....	27
3.3 Localización en redes de sensores ad-hoc .....	28

---

4	Smart antennas.....	30
4.1	Aplicaciones de las antenas inteligentes.....	30
4.1.1	Aumento de la cobertura .....	30
4.1.2	Aumento de la capacidad .....	31
4.1.3	Mejora de la calidad de enlace.....	31
4.1.4	Reducción de la dispersión del retardo .....	31
4.1.5	Mejora de la estimación de la posición del usuario .....	31
5	Localización Wi-Fi .....	33
5.1	Descripción.....	33
5.2	Mecanismos de localización.....	33
	Vector Potencia o WiFi Mapping .....	34
	Triangulación Potencia.....	34
	Métodos Heurísticos.....	34
5.3	Resumen de características .....	35
6	Localización UWB .....	36
6.1	Descripción.....	36
6.2	Resumen de características .....	37
7	Localización ZigBee .....	38
7.1	Descripción.....	38
7.2	Resumen de características .....	39
7.3	Experiencias reales de localización con ZigBee .....	40
7.4	Conclusiones.....	47
8	Referencias .....	48

## 1 INTRODUCCIÓN

---

Los sistemas de localización en interiores han cobrado un interés creciente, pudiendo ser usados para llevar a cabo un seguimiento de bienes o personas que permita conocer sus posiciones en todo momento, por ejemplo mejorando la eficiencia en el almacenamiento de productos en una nave industrial, o analizando los patrones de movimientos de visitantes por motivos de seguridad dentro de un edificio.

Sin embargo, existe un factor fundamental que ha impedido que los sistemas de localización en interiores se hayan implementado y extendido en muchos sectores industriales dónde la información de localización tiene un carácter estratégico: el alto coste de despliegue de estos sistemas, que puede rondar entre los 6.000-12.000€ por estancia (Estos son los precios de instalaciones básicas de sistemas como Ekahau o Ubisense.). Además, estos sistemas están orientados hacia el propósito general y son poco adaptables a las necesidades de un sector industrial concreto que puede requerir una determinada precisión de localización, eficiencia energética de la batería de la etiqueta/tag, o frecuencia de muestreo de la posición fuera de los rangos normales de uso del sistema.

El objetivo del proyecto SENTINEL es utilizar la facilidad de despliegue y la versatilidad de las redes de sensores inalámbricas para diseñar un sistema de localización en interiores de bajo coste basado en tecnología ZigBee, con la precisión y flexibilidad necesaria para que se adapte a los requisitos de varios sectores industriales dónde puede proporcionar una ventaja competitiva.

---

## 2 MODELOS DE PROPAGACIÓN INDOOR

---

### 2.1 Planificación radio

La planificación radio de los sistemas móviles ha de tener en cuenta las siguientes cuestiones[1]:

- Ha de asegurarse la cobertura en toda la zona de interés, por lo que es necesario hacer una primera predicción de la señal recibida en la mayoría de los emplazamientos con objeto de garantizar un mínimo de señal recibida en ambos sentidos (de estación base a móvil, y de móvil a estación base). En relación con esta cuestión, el aumento del número de estaciones base mejorará las prestaciones de los sistemas, a costa de aumentar la complejidad y el precio de los sistemas.
- La existencia de múltiples trayectos (*multipath*) entre transmisor y receptor, por la existencia de múltiples obstáculos físicos entre ellos, origina réplicas de las señales originales que son causadas por los fenómenos de reflexión, difracción y refracción.
- A estas dos cuestiones hay que añadir el hecho intrínseco de que el terminal móvil se mueve, y que el entorno también puede ser variable (debido a la presencia de personas y/o modificaciones en el mobiliario), por lo que el nivel de señal recibido por estación base y móvil varían de forma continua.

Como consecuencia de todo ello, el estudio de los canales radio requieren:

- La parametrización y caracterización del canal móvil en banda estrecha, con objeto de determinar la pérdida básica de propagación entre transmisor y receptor en la zona de cobertura considerada. Esta pérdida tiene tres contribuciones principales:
  - o las pérdidas en espacio libre, dependientes de la distancia recorrida y de la frecuencia de la onda,
  - o las pérdidas producidas por la presencia de obstáculos,
  - o las pérdidas producidas por el entorno más cercano del receptor, que puede modificar significativamente el nivel de la señal recibida.
- La parametrización y caracterización del canal móvil en banda ancha, dado que los sistemas digitales se ven especialmente afectados por la propagación multitrayecto.
- La elaboración de modelos de simulación que analicen la pérdida básica de propagación y los efectos del multitrayecto.
- La realización de medidas destinadas a validar los modelos teóricos desarrollados.

## 2.2 Estimación de las pérdidas de la señal

La variación del nivel de señal recibida se puede expresar como superposición de una componente fija, más una serie de componentes variables de carácter estadístico, que evitan entrar en detalle en todas las situaciones posibles.

En una primera aproximación, las variables que afectan al decaimiento que sufre el nivel de la señal a medida que se propaga son la distancia  $d$ , y un coeficiente  $n$  que toma en cuenta la influencia del medio de propagación y de la altura a la que se encuentren las antenas. La pérdida de propagación  $l$  viene representada por:

$$l = l_0 \cdot d^n$$

donde  $l_0$  es la pérdida de propagación a una distancia de 1 metro del emisor.

A esto hay que añadir los obstáculos que haya en el trayecto entre transmisor y receptor, cuya atenuación se caracteriza por una distribución estadística gaussiana normal. Este tipo de desvanecimientos son de tipo lento, y la expresión para las pérdidas de propagación es:

$$l = l_0 \cdot d^n \cdot g(x, y)$$

Por último, el entorno inmediatamente próximo al móvil (en una radio menor de  $100\lambda$ ), produce una variación marcada por la distribución de Rayleigh, utilizada en entornos marcados por el multipath, que afecta principalmente a las señales de banda ancha. Este es un desvanecimiento de tipo rápido, donde debido a la baja altura de las antenas receptoras, con la consiguiente presencia de obstáculos próximos, aparecen gran cantidad de trayectos de propagación que ocasionan la rápida variación del nivel de la señal recibida. Las pérdidas quedan finalmente:

$$l = l_0 \cdot d^n \cdot g(x, y) \cdot r(t, f)$$

donde  $r$  es una variable aleatoria de media cero dependiente de la distancia (y por tanto del tiempo) y de la frecuencia de la señal.

En ocasiones, la señal sigue variaciones mixtas, siendo una de las más habituales la RLN (Rayleigh + Lognormal): la señal sigue una distribución Rayleigh cuando hacemos desplazamientos cortos, y la media va variando según una distribución lognormal cuando realizamos recorridos largos.

Existen otras formas de caracterizar la señal, como la distribución de Nakagami-Rice, que se aplica cuando las variaciones de la señal se deben a la contribución de una componente determinista (LOS – Line Of Sight, existe visión directa entre emisor y receptor) más varias contribuciones aleatorias (NLOS – Non Line Of Sight, consecuencia del multitrayecto existente)

## 2.3 Mecanismos de propagación

Los mecanismos de propagación son diversos y complejos. Los más significativos son:

- Difracción: se produce cuando hay un obstáculo entre emisor y receptor (se considera que hay un obstáculo cuando se obstruye al menos parcialmente la primera zona de Fresnel). El obstáculo, de tamaño mucho mayor que la longitud de onda, rerradia la señal en todas las direcciones, posibilitando la comunicación entre puntos que no tienen visión directa, aunque con una atenuación superior a la del espacio libre.
- Scattering o esparcimiento: es de naturaleza semejante a la difracción, y tiene mayor influencia cuando el obstáculo es de dimensiones semejantes a la longitud de onda de la señal, o cuando la superficie del mismo no es lisa. La dispersión de la señal se produce en un mayor número de direcciones que la difracción.
- Reflexión: se produce cuando la señal incide sobre un obstáculo de dimensiones mucho mayores que su longitud de onda, de forma que la señal “rebota” en el obstáculo con un ángulo idéntico al de incidencia.
- Transmisión: se produce cuando la señal incide sobre un obstáculo y es capaz de atravesarlo (con la consiguiente pérdida de nivel de señal).
- Refracción: cuando una señal viaja por un medio no homogéneo, la consiguiente variación del índice de refracción varía la dirección de propagación de la señal.

Los tres primeros mecanismos dan lugar a fenómenos de multitrayecto.

## 2.4 Modelos de propagación en interiores

En entornos indoor, el número de componentes que afectan a la señal “principal” es mucho mayor que en otros entornos, originando una mayor variabilidad de la señal.

Los métodos empíricos proporcionan una estimación rápida de la pérdida de propagación, a costa de reducir la precisión que nos proporcionaría el cálculo teórico, basado en un procesado sistemático de grandes cantidades de información de la señal, el entorno circundante y su variabilidad espacio-temporal.

Los métodos deterministas se basan en estudios mucho más rigurosos (y consiguientemente más complejos), que buscan la resolución del complejo problema electromagnético planteado, de formas diferentes, pero siempre con una gran carga computacional. Estos métodos quedarán fuera del ámbito del proyecto en el que nos

encontramos.

Los trabajos realizados en torno a la acción COST 231 “*Evolution of Land Mobile Radio (including personal) Communications*”, han propuesto modelos de análisis simplificados.

#### 2.4.1 Modelos empíricos de propagación en interiores (banda estrecha) [2]

##### 2.4.1.1 Modelo de pendiente única

Sigue la expresión habitual de la propagación,  $L(dB) = L_0 + 10n \log d$ , donde  $d$  es la distancia en metros, y  $L_0$  y  $n$  dependen de la frecuencia y del entorno de propagación, con valores calculados para minimizar el error cuadrático medio de los valores medidos experimentalmente. Habitualmente se hace una clasificación de escenarios para los cuales se calculan diferentes valores de  $L_0$  y  $n$ .

Esta manera de estimar una pérdida de trayecto, es similar a la empleada en sistemas outdoor, determinando los parámetros a partir de la toma de medidas. Esta aproximación comete errores demasiado grandes debido a la gran variabilidad de los mecanismos de propagación entre diferentes tipos de edificios y en diferentes caminos dentro del mismo edificio, y lo mismo puede decirse si se aplican modelos de doble pendiente.

##### 2.4.1.2 Modelo de atenuación lineal

Asume que el exceso de pérdidas depende linealmente de la distancia, siendo  $\alpha$ (dB/m) el coeficiente de atenuación:

$$L = L_{\text{espacio libre}} + \alpha \cdot d$$

##### 2.4.1.3 Modelo UIT-R P.1238 [3]

Caracteriza las pérdidas a partir de un exponente  $n$ , que dependerá del escenario e incluye implícitamente las pérdidas entre dos puntos del mismo piso, más los factores adicionales de pérdidas relacionados con el número de pisos que obstruyen la línea de visión directa entre emisor y receptor. Asume una dependencia con la frecuencia similar a la de espacio libre, proporcionando la siguiente expresión:

$$L(dB) = 20 \log f_c + 10 \cdot n \cdot \log d + L_f(n_f) - 28$$

donde  $n_f$  es el número de plantas entre emisor y receptor, y  $L_f$  es el factor de pérdidas de penetración en suelos, que en la banda de 1,8-2 GHz toma el valor de  $L_f(n_f)=4n_f$  para entornos residenciales,  $L_f(n_f)=15+4(n_f-1)$  para entornos de oficinas, y el valor  $L_f(n_f)=6+3(n_f-1)$

para entornos comerciales.

Los valores del exponente  $n$  propuestos por el modelo son:

Frecuencia [GHz]	Entorno		
	Residencial	Oficinas	Comercial
0,9	-	3,3	2,0
1,2 – 1,3	-	3,2	2,2
1,8 – 2,0	2,8	3,0	2,2
4,0	-	2,8	2,2

#### 2.4.1.4 Modelo de múltiples paredes COST231

Este modelo requiere datos reales y exactos para poder deducir resultados fiables. Es completamente empírico y parte del modelo de Motley-Keenan [4]:

$$L = L_1 + 10n \log d + L_C + \sum_{i=1}^I K_{fi} \cdot L_{fi} + \sum_{j=1}^J K_{wj} \cdot L_{wj}$$

donde los parámetros utilizados son:

- $d$  = distancia en metros
- $n$  = indicador de variación de la potencia con la distancia (es típico tomar  $n=2$ , aunque depende de cada escenario)
- $L_1$  = pérdidas a 1 metro de distancia
- $L_C$  = Constante de pérdidas
- $L_{fi}$  = factor de pérdidas por piso tipo  $i$
- $L_{wj}$  = factor de pérdidas por pared tipo  $j$
- $K_{fi}$  = número de pisos tipo  $i$  atravesados
- $K_{wj}$  = número de paredes tipo  $j$  atravesadas
- $I$  = Número de tipos de pisos
- $J$  = Número de tipos de paredes

Se aplican a situaciones NLOS y la pérdida de propagación se expresa como la suma de las pérdidas en espacio libre ( $L_0+10n\log d$ ), las pérdidas debidas a los obstáculos que se encuentran a lo largo de la línea directa de visión y una constante  $L_C$ . Aún quedan por caracterizar de modo exacto cada tipo de piso y pared con sus coeficientes apropiados, punto donde reside la dificultad en la aplicación del modelo. Pueden usarse bases de datos para diferenciar los distintos tipos de obstáculos a los que se asocian diferentes coeficientes de atenuación.

En 1999, la iniciativa COST231 propuso los siguientes valores, en la banda de 1 a 2 GHz, para diferentes tipos de materiales. [5]

Material	Pérdidas (dB)
Yeso	1,5
Madera	1,5
Vidrio	2
Pared de ladrillo (<14cm)	2,5
Ladrillo	2,5
Pared de hormigón (<10 cm)	6
Pared doble de hormigón (2x20cm)	17
Suelo	23

Para ciertas situaciones ofrece valores más precisos, adaptados a las frecuencias de los sistemas GSM, pero que pueden servir para deducir la evolución de los mismos con la frecuencia:

Material	900 MHz	1800 MHz
Pared de ladrillo (<14cm)	$L_w = 1,9$ dB	$L_w = 3,4$ dB
Pared doble de hormigón (2x20cm)	-	$L_w = 6,9$ dB
Suelo	$L_f = 14,8$ dB	$L_f = 18,3$ dB

El COST 231 añade además a este modelo de Motley los resultados de otra serie de estudios efectuados, y propone otra fórmula que da cuenta de unos resultados particulares alrededor de las medidas observadas por la atenuación de los suelos y su alinealidad, La expresión es muy similar:

$$L = L_0 + 10n \log d + L_C + \sum_{j=1}^J K_{wj} \cdot L_{wj} + K_f \left[ \frac{K_f + 2}{K_f + 1} - b \right] \cdot L_f$$

donde b es un factor empírico cuyo valor típico propuesto es 0,46.

El factor  $L_c$  es un término que se calcula, cuando las pérdidas en las paredes se determinan a partir de los resultados de las medidas, utilizando regresión lineal múltiple. Normalmente es un valor cercano al cero.

Conviene no definir demasiados tipos de paredes, puesto que cuando las diferencias no son significativas se puede complicar el modelo innecesariamente. La clasificación más habitual contempla dos tipos de paredes:  $L_{w1}$  - delgada (<10cm) y  $L_{w2}$  -gruesa (>10cm).

Antes de continuar con otros modelos de propagación, adjuntamos una tabla con los resultados obtenidos por diferentes estudios, para la optimización de los coeficientes utilizados en algunos de los modelos previamente expuestos: modelo de pendiente única (One slope model - 1SM), Modelo de paredes múltiples (Multiple Walls Model – MWM) y Modelo de atenuación lineal (Linear Attenuation Model – LAM) [2].

Environment	One slope model (1SM)		Multi-wall model (MWM)				Linear model (LAM)
	$L_0$ [dB]	n	$L_{w1}$ [dB]	$L_{w2}$ [dB]	$L_f$ [dB]	b	a
Dense							
one floor	33.3 <sup>3)</sup>	4.0 <sup>3)</sup>	3.4 <sup>1)</sup>	6.9 <sup>1)</sup>	18.3 <sup>2)</sup>	0.46 <sup>9)</sup>	0.62 <sup>10)</sup>
two floors	21.9 <sup>4)</sup>	5.2 <sup>4)</sup>					
multi floor	44.9 <sup>4)</sup>	5.4 <sup>4)</sup>					2.8 <sup>4)</sup>
Open	42.7 <sup>5)</sup>	1.9 <sup>5)</sup>	3.4 <sup>1)</sup>	6.9 <sup>1)</sup>	18.3 <sup>2)</sup>	0.46 <sup>9)</sup>	0.22 <sup>8)</sup>
Large	37.5 <sup>6)</sup>	2.0 <sup>6)</sup>	3.4 <sup>1)</sup>	6.9 <sup>1)</sup>	18.3 <sup>2)</sup>	0.46 <sup>9)</sup>	
Corridor	39.2 <sup>7)</sup>	1.4 <sup>7)</sup>	3.4 <sup>1)</sup>	6.9 <sup>1)</sup>	18.3 <sup>2)</sup>	0.46 <sup>9)</sup>	

<sup>1)</sup>Alcatel, CNET, TUW, UPC, VTT; <sup>2)</sup>Alcatel, CNET, UPC, VTT; <sup>3)</sup>UPC, TUW; <sup>4)</sup>VTT; <sup>5)</sup>TUW; <sup>6)</sup>VTT, UPC; <sup>7)</sup>Alcatel; <sup>8)</sup>Lund; <sup>9)</sup>VTT, Ericsson; <sup>10)</sup>TUW, Lund

La optimización se ha hecho para 1800MHz, y para edificios con mobiliario de tipo estándar. El efecto del mobiliario sólo fue estudiado por UPC, observándose un descenso de 3,8 a 3,4 en el exponente de decaimiento. En el modelo MWM, la optimización se ha hecho para entorno denso, pero los resultados pueden utilizarse en otros entornos más abiertos.

Otros estudios han comprobado que el incremento de las pérdidas es mayor en los pisos que en las paredes a medida que aumenta la frecuencia.

#### 2.4.1.5 Modelo de Ericsson

Este modelo está diseñado para utilizarse en 900MHz, y considera que la pérdida de propagación, incluyendo el efecto de las zonas de sombra, es una variable aleatoria, uniformemente distribuida entre límites y varían con la distancia tal como se indica en la siguiente tabla:

Distancia (m)	Límite inferior de pérdidas (dB)	Límite superior de pérdidas (dB)
$1 < r < 10$	$30 + 20 \log r$	$30 + 40 \log r$
$10 \leq r < 20$	$20 + 30 \log r$	$40 + 30 \log r$
$20 \leq r < 40$	$-19 + 60 \log r$	$1 + 60 \log r$
$40 \leq r$	$-115 + 120 \log r$	$-65 + 120 \log r$

El exponente aumenta de 2 a 12 a medida que la distancia aumenta, indicando una rápida disminución del nivel de la señal con la distancia. El modelo puede extenderse a 1800MHz añadiendo una pérdida adicional de 8,5dB en todas las distancias.

#### 2.4.1.6 Modelos empíricos para Wireless Lan

La popularización de las redes WLAN ha posibilitado el desarrollo de modelos de propagación a las frecuencias de los estándares WiFi, 2,4GHz y 5,2GHz.

En el modelo propuesto por Tuan en 2003 [6], la pérdida de propagación tiene la siguiente forma general:

$$L_T = k_1 + k_2 \cdot \log f + k_3 \cdot \log r + n_w(k_4 P_1 + k_5 P_2) + k_6 n_f$$

$P_1$  y  $P_2$  están asociados al ángulo  $\theta$  de incidencia en la pared. Tras varias propuestas para  $P_1$  y  $P_2$ , una vez validado el modelo con medidas reales, la expresión quedó como sigue:

$$L_T = 19,07 + 37,3 \cdot \log f + 18,3 \cdot \log r + n_w[21 \sin \theta + 12,2(1 - \sin \theta)] + 8,6 n_f$$

Este modelo es válido en la banda de frecuencia que va de 900MHz a 5,7GHz. Tuan reporta una desviación estándar del error en la predicción de 6,7dB. Los coeficientes  $k_1$  a  $k_6$  pueden calcularse por regresión lineal a partir de los datos medidos.

#### 2.4.1.7 Predicción basada en medidas

Los modelos empíricos están habitualmente limitados, puesto que proporcionan una descripción general de la propagación, mientras que si se necesita una mayor precisión para un lugar específico, debemos utilizar modelos físicos detallados del mismo. Como ya se ha comentado con anterioridad, los modelos generales no son suficientes, y los modelos físicos son demasiado complejos para ser puestos en práctica.

Una solución intermedia, apropiada para diseños de alta fiabilidad, es realizar medidas en el lugar específico y utilizarlas para detallar los mecanismos de propagación y los parámetros de los materiales en dicho entorno concreto, sin necesidad de complicar en exceso el sistema. Esta aproximación se describe en profundidad en Aragón-Zavala, 06 [7]. El uso de

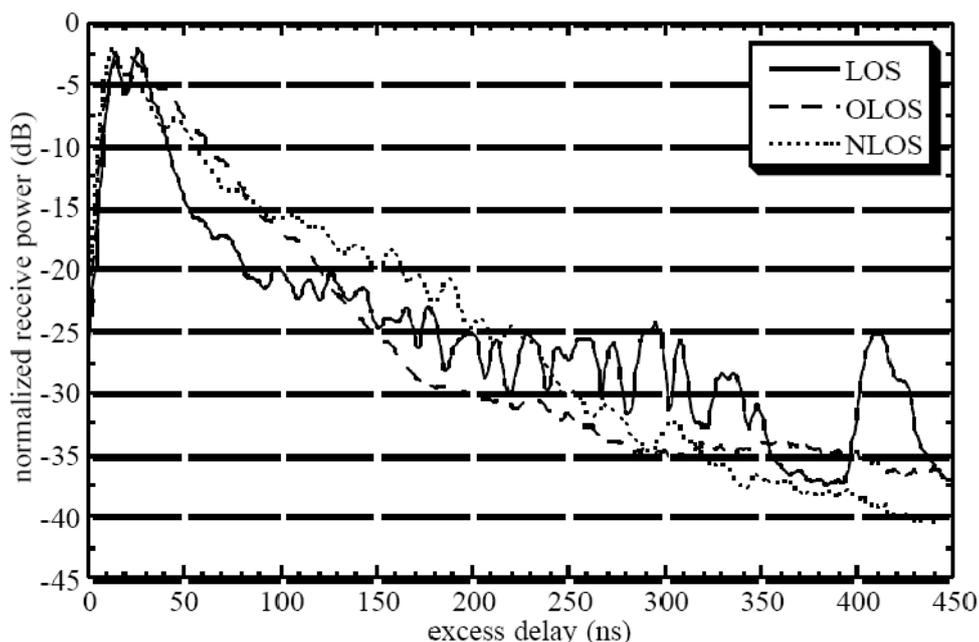
estadísticas espaciales apropiadas posibilita utilizar los datos medidos a lo largo de todo el edificio, y no sólo en la ruta de medida. La reutilización de estos datos, junto con modelos empíricos para los factores de pérdidas de paredes y pisos, también permite optimizar el diseño del sistema para diferentes tipos y localizaciones de antenas sin necesidad de repetir las medidas, incluso a frecuencias distintas de las originales.

#### 2.4.2 Modelos empíricos de propagación en interiores (banda ancha) [2]

Son un medio para evaluar la dispersión del retardo y el perfil de retardo de potencia promedio (PDP). Uno de esos dos factores, junto con las características Doppler, suelen ser los parámetros típicos requeridos como inputs para las simulaciones. En general, se asume un espectro Doppler plano.

La dispersión del retardo, tiene valores menores en entornos densos, y valores mayores en entornos grandes y abiertos. Esta dependencia con las dimensiones del entorno puede utilizarse en la predicción.

Aunque los valores instantáneos y las medias locales del PDP pueden incluir numerosos detalles dependientes del entorno, la media global del PDP tiene una forma bastante regular. El PDP en entornos densos tiene la misma forma que la función de potencia (decaimiento logarítmico en escala dB). En entornos abiertos, el PDP sigue mejor la función de potencia, debido al fuerte efecto del rayo directo. En la siguiente figura pueden observarse valores PDP promedio típicos de situaciones LOS, NLOS y OLOS (el rayo directo es obstruido por un único obstáculo, por ejemplo, un mueble).



### 2.4.3 Comparación de los diferentes modelos[2]

data set / frequency	1SM		MWM		LAM	
	STD (dB)	mean (dB)	STD (dB)	mean (dB)	STD (dB)	mean (dB)
Alcatel, O: 1900 MHz	5.7	-1.6	4.2	2.2	4.7	-0.8
TUW, D: 1800 MHz	10.0	-0.7	9.5	-10.3	7.8	-7.5
VTT, D; 2nd floor only: 856 MHz	8.6	19.2	4.4	-4.5	8.5	4.7
1800 MHz	7.5	20.6	2.0	-2.7	8.4	6.5

Comportamiento de los modelos para propagación dentro de la misma planta  
(error medio: pérdidas estimadas – pérdidas medidas)

data set: VTT, D	1SM		MWM		LAM	
	STD (dB)	mean (dB)	STD (dB)	mean (dB)	STD (dB)	mean (dB)
3rd-4 <sup>th</sup> floor: 856 MHz	10.3	-2.7	8.3	-8.2	10.2	-16.1
1800 MHz	12.2	-7.3	7.1	-11.1	11.6	-20.3
3rd-5 <sup>th</sup> floor: 856 MHz	10.7	-7.1	7.9	-7.2	9.7	-19.6
1800 MHz	11.9	-11.8	7.5	-9.7	10.9	-23.8
3rd-7 <sup>th</sup> floor: 856 MHz	9.6	-10.6	9.4	-5.0	8.6	-19.5
1800 MHz	10.0	-14.1	10.2	-5.9	9.8	-22.7

Comportamiento de los modelos para propagación entre diferentes pisos  
(error medio: pérdidas estimadas – pérdidas medidas)

## **2.5 Realización de medidas en sistemas móviles [3]**

Cuando se planifica una red de comunicaciones móviles, es esencial caracterizar el canal radio con objeto de profundizar en los mecanismos de propagación dominantes. Esta caracterización permite al diseñador asegurarse de que conoce adecuadamente el comportamiento del canal antes de proceder al despliegue del sistema, validar los modelos de propagación usados en el proceso de diseño y asegurar que los equipos utilizados proporcionan un comportamiento robusto frente a las múltiples causas de desvanecimiento que pueden darse. Además, una vez que el sistema ha sido desplegado, las medidas permiten validar ciertos parámetros cruciales del diseño que muestran cómo se está comportando el sistema y de qué manera puede ser optimizado.

Por todo ello, es imprescindible asegurarse de que las medidas realizadas son fiables.

### **2.5.1 Ajuste de los modelos empíricos de pérdidas de propagación**

Este es el punto de partida habitual para el desarrollo de cualquier red nueva, bien sea porque se van a cambiar las frecuencias de trabajo, o bien porque se va a cambiar el escenario de despliegue. Las medidas de la pérdida de señal realizadas en diferentes escenarios van a ayudar a ajustar los parámetros de los modelos empíricos, de forma que se minimicen la media y la desviación estándar del error entre el modelo y las medidas. El error medio siempre puede reducirse a cero eligiendo un offset apropiado, por lo que la forma habitual de evaluar la bonanza del modelo es a través de la desviación estándar de las diferencias entre las medidas y las estimaciones teóricas. 6,7 dB de desviación estándar es un valor razonablemente bueno.

### **2.5.2 Creación de modelos de canal sintéticos**

Si queremos caracterizar el comportamiento de las estaciones base y/o de los terminales móviles, se hace preciso someter los equipos a todo el rango de variaciones de señal que luego se encontrarán durante el funcionamiento normal. Esto ha de hacerse de una forma repetible, de forma que podamos comparar el diferente comportamiento de los equipos sin introducir incertidumbres en la medida. En estas situaciones se puede usar un modelo de canal sintético, implementado por HW y/o SW, que proporciona variaciones de canal completamente realistas en un entorno de laboratorio. Aunque el canal es sintético, el punto de partida siempre son campañas exhaustivas de medidas que determinen con precisión la variación de los parámetros estadísticos del canal con el entorno concreto.

### 2.5.3 Medida de la cobertura existente

La medida continua de los niveles de señal existentes es la base para la optimización de cualquier sistema, de forma que las variaciones en el entorno no originen un empeoramiento de las prestaciones del sistema.

### 2.5.4 Estudios de diseño

En entornos de interiores, a menudo es importante realizar estudios desde alguno o incluso desde todas las localizaciones de antena propuestas con objeto de validar las asunciones iniciales realizadas con respecto a los materiales de construcción o la geometría detallada del edificio. Es importante comprobar la cobertura de los sistemas existentes, especialmente para sistemas no licenciados, tales como WiFi o Zigbee, para los cuales no existe un registro central de potenciales interferencias.

## 2.6 Impacto de las inexactitudes en las medidas

El impacto de unas medidas inexactas depende de la aplicación concreta para la que se han tomado dichas medidas. Una buena aproximación es analizar el impacto de los errores en el ajuste de los modelos empíricos de estimación de las pérdidas de señal en un trayecto.

Las medidas han de tomarse con equipos calibrados adecuadamente, de forma que los valores de nivel de señal medidos puedan ser relacionados con precisión con valores de pérdidas de trayecto. El impacto de los errores depende especialmente del tamaño del error en comparación con el exponente de pérdidas del trayecto. Si se modelan las pérdidas de trayecto con un modelo de pendiente única de la forma

$$L = A + B \log r$$

y utilizamos subíndices  $v$  para los parámetros verdaderos, y  $m$  para indicar el resultado de la medida, entonces es sencillo mostrar que la relación entre el número de sitios donde se hace preciso tomar medidas, para un modelo erróneo con respecto al resultado verdadero es

$$\frac{N_v}{N_m} = 10^{2\left(\frac{L_v - A_v}{B_v} - \frac{L_m - A_m}{B_m}\right)}$$

Por lo tanto, un simple error de offset de 1dB incrementa el número de sitios donde tomar medidas por un factor de  $10^{2/40}$ , o lo que es lo mismo, un 12%, asumiendo un exponente de pérdidas de trayecto de 4, y que el sistema está limitado por cobertura en vez de por interferencia. Es evidente que el impacto de dichos errores es considerable.

Además, los emplazamientos y rutas de medidas han de seleccionarse cuidadosamente cuantitativa y cualitativamente para asegurarse de que el modelo es aplicable a todos los tipos de entorno en los que va a operar la red. Una buena opción es utilizar dos terceras partes de las medidas realizadas para el ajuste del sistema, y la tercera parte restante para la validación posterior. Sobra decir que los mismos conjuntos de medidas no pueden usarse para el ajuste y la validación.

El proceso de ajuste en sí mismo debería permitir modificar los parámetros del modelo con objeto de minimizar los errores. Es habitual utilizar técnicas de optimización estadística tales como el análisis regresivo para minimizar los errores cuadráticos medios. Como es lógico, de esta forma se minimiza la desviación estándar, pero también sirve para analizar la correlación entre las predicciones y las medidas en localizaciones concretas, un muy buen indicador de la bonanza del modelo.

Por último, y teniendo en cuenta que los modelos únicamente predicen las pérdidas en un 50% de los emplazamientos a una distancia dada, se hace necesario introducir un margen de desvanecimiento que tenga en cuenta tanto el efecto de sombra, como las incertidumbres asociadas a las medidas y al proceso de modelado. La variabilidad total  $\sigma_T$ , se calcula como la combinación de tres variabilidades estadísticamente independientes: la variabilidad del emplazamiento  $\sigma_L$ , que incluye el efecto de sombra, la variabilidad de las medidas  $\sigma_M$ , y la variabilidad en la sensibilidad del equipo receptor móvil  $\sigma_E$ .

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_M^2 + \sigma_E^2}$$

Este valor de  $\sigma_T$  es utilizado para calcular el margen de desvanecimiento. La probabilidad de cobertura no es puramente una variabilidad de emplazamiento, sino una confianza global de conseguir una cobertura aceptable.

## 2.7 Muestreo de señales

Aunque los requisitos de los sistemas de medida van a depender de la aplicación concreta para la que se realicen, hay una serie de cuestiones relacionadas con la forma en han de muestrearse las señales de los sistemas móviles que son comunes para todas las aplicaciones.

En primer lugar es importante determinar una velocidad de muestreo que represente la señal de forma suficientemente precisa, teniendo en cuenta las capacidades del equipo de medida y las características de la señal a muestrear.

En el modelado de las pérdidas de trayecto, es muy importante determinar la media local de la señal, eliminando la componente de desvanecimiento rápido y proporcionando al mismo tiempo una estimación altamente fiable de la potencia de señal subyacente, asociada a las pérdidas totales de trayecto y a los procesos de sombreado. Esto implica que todas las muestras recogidas deben ser tomadas en un período de tiempo en el que el terminal móvil se encuentra dentro de la distancia de correlación de sombreado. En caso contrario, la media local no representará adecuadamente las variaciones del sombreado, perdiendo el detalle de la cobertura del sistema, que es precisamente lo que se pretende buscar con las medidas. También deberá haber un número suficiente de medidas de forma que el nivel de ruido del receptor no afecte excesivamente a la estimación. Por el contrario, es importante que las muestras no se tomen en localizaciones demasiado próximas, con objeto de evitar la toma de medidas en un nulo o en un pico, que provoquen una sub- o súper-estimación de la media local.

Si lo que se pretende es establecer el comportamiento estadístico del desvanecimiento rápido, se necesita una velocidad de muestreo considerablemente más alta, que asegure muestras que representen todos los niveles de señal posibles a su frecuencia relativa. Estadísticas de segundo orden requieren un muestreo casi continuo de la señal que permita deducir la tasa de variación de la señal con la distancia.

### 2.7.1 Obtención de la media en decibelios

Los receptores proporcionan habitualmente el nivel de señal en decibelios. Esto ocurre porque el receptor utiliza un amplificador con respuesta logarítmica para aumentar el rango dinámico disponible. En dichos casos es normal estimar la media local realizando el promedio  $\bar{R}$  de las  $N$  muestras en decibelios.

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i$$

Asumiendo desvanecimiento de Rayleigh para la tensión de la señal subyacente, la desviación estándar de  $\bar{R}$  es [8]:

$$\sigma_{\bar{R}} = \frac{\pi}{\ln 10} \sqrt{\frac{50}{3N}} \approx \frac{5,57}{\sqrt{N}} \text{ dB}$$

Es deseable entender el número de muestras requeridas para asegurar con alta probabilidad que el promedio de las muestras así deducido presenta un error pequeño dado respecto del valor verdadero. Dado que el valor  $\bar{R}$  calculado para las  $N$  muestras es en sí

mismo una variable aleatoria normal, la probabilidad  $P_{good}$  de que el valor de  $\bar{R}$  calculado se encuentre a menos de  $K$  decibelios respecto del valor verdadero puede calcularse utilizando la función  $Q$ , definida como sigue:

$$P_{good} = Pr(R_v - K \leq \bar{R} \leq R_v + K) = 1 - 2 \times Q\left(\frac{K}{\sigma_{\bar{R}}}\right)$$

$$Q(z) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right)$$

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{x=0}^z e^{-x^2} dx \quad \operatorname{erfc} z = 1 - \operatorname{erf} z$$

El número de muestras requerido para obtener una confianza dada en la media de la muestra viene dado por:

$$N = \left[ \frac{5,57}{K} Q^{-1}\left(\frac{1 - P_{good}}{2}\right) \right]^2$$

donde  $N$  se redondea al entero superior. Para  $K=1\text{dB}$  y  $P_{good}=90\%$ , el resultado es  $N=84$  muestras. Para  $P_{good}=95\%$ , el número de muestras  $N=120$ .

En cuanto a la mínima distancia eléctrica en la que deben tomarse y promediarse las muestras de forma que se asegure su independencia estadística, para la media en decibelios es de  $32\lambda$  con un 90% de confianza, y  $46\lambda$  con una confianza del 95%. Para entornos indoor, donde la correlación de sombreado es del orden de unos pocos metros puede ser imposible de cumplir, por lo que debe alcanzarse un compromiso entre desvanecimiento rápido y sombreado. Una aproximación es tomar las muestras en un área, más que a lo largo de una línea.

Por último, la velocidad mínima de muestreo, para una velocidad dada del móvil viene dada por:

$$f_s \geq \frac{v_{m\acute{a}x}}{0,38\lambda}$$

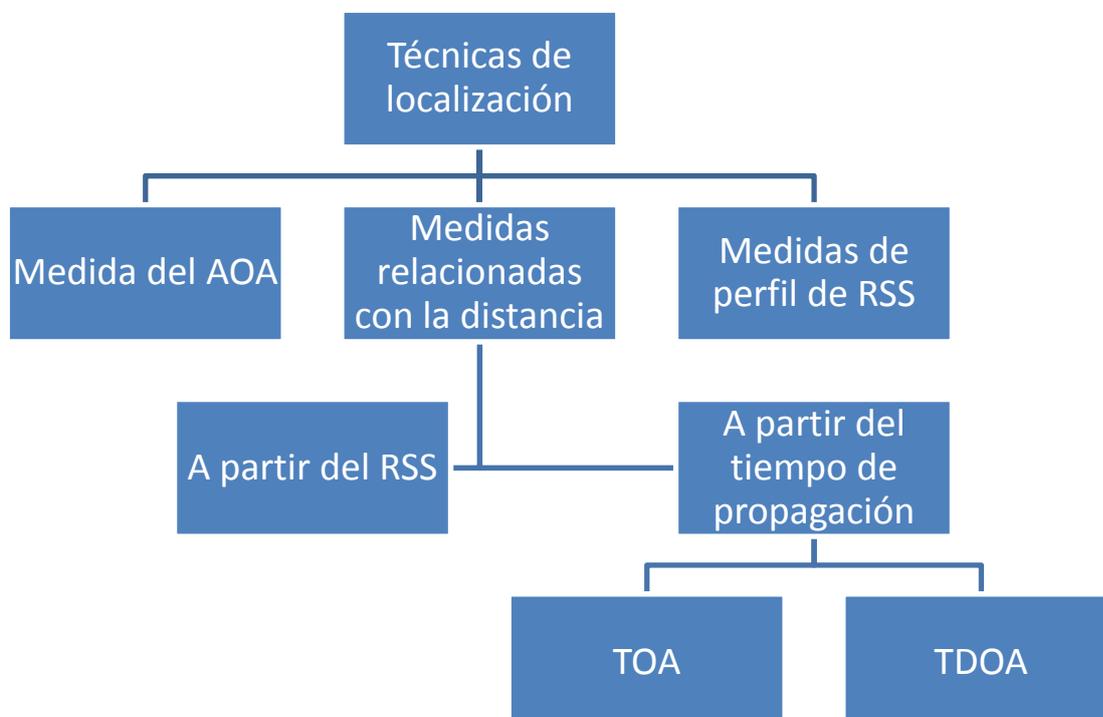
### 3 TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN

Las técnicas de localización asocian elementos simbólicos de un sistema con posiciones de objetos y gente del mundo físico. Emplean medidas de lecturas de sensores para calcular las propiedades físicas del sistema y a continuación aplican diversos algoritmos para poder deducir la localización. El proceso de *positioning* es aquel en el cual se calcula la posición de un nodo respecto a los nodos de referencia y se realiza en dos pasos:

#### 3.1 Obtener la medida de los sensores

Los nodos en una red ad-hoc pueden tener diversas capacidades que les permitan medir el TOA (Time-of-arrival), TDOA (Time-difference-of-arrival), AOA (Angle-of-arrival) y el nivel de señal. Estas se usan para lograr localizar los nodos con relación a otros nodos de referencia.

Existen diversas técnicas de medición para WSN. Generalmente se clasifican en tres categorías, tal y como se explica en [9]:



### 3.1.1 Medida del AOA (Angle-of-arrival)

El ángulo de llegada con el que incide una señal sobre un receptor se puede calcular midiendo el nivel de señal o la diferencia de tiempos de llegada.

Las técnicas de localización basadas en AOA se pueden dividir en dos clases, por un lado las que hacen uso de la respuesta de amplitud y por otro las que se basan en la respuesta de fase de la antena receptora.

#### 3.1.1.1 AOA basada en la respuesta en amplitud de de la antena receptora

Los sistemas basados en el nivel de señal recibido comparan el nivel de señal recibido desde un espectro de ángulos y en base a ello seleccionan el ángulo por el cual se obtiene un máximo nivel, como el ángulo de recepción.

La técnica AOA basada en la respuesta de amplitud hace uso del *beamforming*, el uso de una antena anisotrópica en recepción.

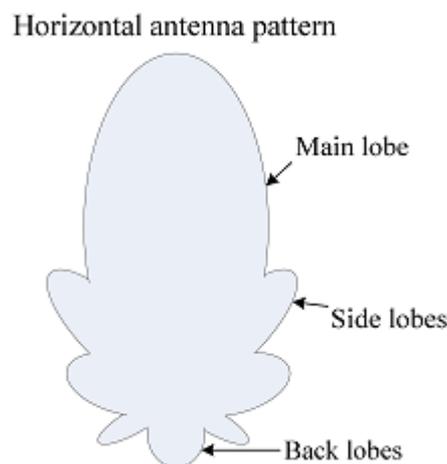


Diagrama de radiación de una típica antena anisotrópica

La dirección de la antena transmisora será aquella a través de la cual se obtenga el máximo nivel de señal, de manera que se rota el haz de la antena receptora para que apunte hacia dicha dirección de forma electrónica o mecánica.

Al aplicar dicha técnica los parámetros que hay que tener en cuenta son la sensibilidad del receptor y el ancho de haz.

Un nivel de señal variable de la señal transmisora puede causar problemas a esta solución ya que el receptor no puede diferenciar si se debe a un cambio de amplitud de la señal transmitida o si es debido al diagrama de recepción de la antena receptora. Existen dos formas de abordarlo, una solución es emplear una segunda antena, que no rote y que sea omnidireccional en el receptor. De esta forma se elimina el impacto de la variabilidad del nivel de señal, normalizando el nivel de señal recibido por la antena anisotrópica rotativa, respecto al nivel recibido por la antena omnidireccional no-rotativa. La otra posible solución es usar como mínimo dos (por lo general cuatro) antenas estacionarias, con patrones anisotrópicos conocidos. Superponiendo los patrones y comparando el nivel de señal recibido de cada antena se descubre la dirección de la antena transmisora.

### 3.1.1.2 AOA basada en la respuesta de fase de la antena receptora

Se conoce como *phase interferometry*. Esta otra técnica deriva el AOA midiendo las diferencias de fase existentes en la llegada del frente de onda. Para ello hace falta una antena de grandes dimensiones, en comparación con la longitud de onda de la señal transmitida, o un array de antenas. Se consigue obtener la orientación del transmisor basándose en la diferencia de fase existente en la señal del transmisor recibida por las antenas adyacentes. Esta aproximación funciona mal en presencia de interferencia co-canal fuerte y señales multitrayecto, pero funciona bien en situaciones de alto SNR.

La existencia de línea directa entre el transmisor y el receptor, LOS, influyen en la medida del AOA. La precisión de la medida de AOA se ve afectada por la directividad de la antena, el *shadowing*, y las reflexiones multitrayecto. Los algoritmos ML (maximum likelihood) permiten disminuir los errores producidos por la existencia de componentes multitrayecto. La desventaja de aplicar dichos métodos recae en la complejidad de cómputo que requieren. Ésta es proporcional al número de caminos recibidos por el receptor, pero a priori no es posible conocer el número de caminos que va a haber.

[10] Proponen un método para que todos los nodos de una red ad-hoc sean capaces de determinar su orientación y posición, con la peculiaridad de que solo algunos tienen capacidades de posicionamiento. Asumen que todos los nodos tienen capacidades de medir el AOA, para ello necesitarían un array de antenas o varios receptores de ultrasonidos y son aquellos que tienen mayores capacidades las que se encargan de difundir la información para saber el posicionamiento y la orientación.

### 3.1.2 Medidas relacionadas con la distancia:

Lo más habitual para especificar la localización de un objeto es medir la distancia que existe entre él y un nodo de referencia. Las distancias se estiman midiendo las características de las señales que fluyen entre los elementos del sistema de localización. Las aproximaciones más extendidas son deducir las distancias midiendo RSS (Received Signal Strength) o a través del tiempo de propagación, a través del ToF (Time-of-flight), trasladando el ToF en distancias.

#### 3.1.2.1 Distancias extraídas a partir del tiempo de propagación de la señal

Dentro de esta categoría existen diferentes variantes.

##### 3.1.2.1.1 Medida del TOA (Time-of-Arrival)

Es posible estimar las distancias entre nodos vecinos analizando el tiempo de propagación que necesitan las señales. Una posible opción es medir la diferencia de tiempos que existe entre que se envía la señal hasta que se recibe en el destino. Para poder llevar a cabo este tipo de mediciones se requiere una sincronización muy precisa entre el emisor y el receptor, lo que implica un mayor coste en los nodos.

Para hacer frente a esta necesidad de sincronización, una solución es combinar señales RF con ultrasonidos[11], basándose en que su velocidad de propagación en el aire es diferente. Se envían ambas señales a la vez, y se calcula el tiempo de propagación de la señal basándose en la diferencia de llegadas de ambas señales. Este requisito hace que no sea una solución adecuada para redes de sensores.

Otra posible opción es medir el tiempo que pasa desde que se envía la señal hasta que se vuelve a recibir en un mismo nodo, es decir, el nodo alcanza el destino, y éste lo vuelve a reenviar hacia el origen. En este caso, es necesario conocer el tiempo que consume la señal mientras está siendo tratado en el nodo destino, pero la sincronización no causa problemas, ya que se utiliza un único reloj para realizar las medidas.

Otra solución extendida para medir tiempos de propagación es el uso de señales de muy corta duración, como es el caso de UWB, ya que permite obtener buena resolución de tiempos y la separación de señales multitrayecto.

### 3.1.2.2 Medida del TDOA (Time-difference-of-Arrival)

Los algoritmos de localización que se basan en el TDOA miden la diferencia de tiempos existente en la recepción de la señal enviada por el nodo que se quiere localizar, en distintos nodos que están en el entorno y cuya localización es conocida. Entre los factores que influyen a la precisión de localización está la separación entre los receptores, si aumenta se puede obtener mayor precisión. Por otro lado, también se ve afectado por el multitrayecto.

El método más extendido es el de cross-correlation, que requiere una sincronización muy precisa pero no pone requerimientos sobre la señal que transmiten los emisores.

### 3.1.2.3 Medidas de RSS

Analizando la señal emitida es posible estimar las distancias existentes entre distintos nodos. Los métodos basados en el estudio de la atenuación deducen la distancia conociendo las pérdidas que sufre la señal debido a la propagación desde el origen hasta el destino.

El nivel de RSSI suele ser habitual en la mayoría de los dispositivos wireless, de modo que obteniendo el valor de dicha variable en distintos nodos vecinos es posible estimar la localización del nodo emisor.

De forma ideal, en el espacio libre el nivel de RSS disminuye con la distancia, es una relación inversamente proporcional al cuadrado. No hay que olvidar, que el nivel de señal se verá afectado por las difracciones, reflexiones y la dispersión. Para poder amparar la influencia de todos estos parámetros se introducen las pérdidas por el camino, dependientes del propio entorno de propagación.

### 3.1.3 Medidas de perfil de RSS

Esta técnica es otra forma de poder especificar la posición de un nodo en un entorno a través del nivel de RSS medido. En este caso es necesario haber realizado un análisis del entorno antes de poder localizar ningún nodo. De forma que el sistema se calibra, almacenando los distintos valores de RSS que se obtienen en los nodos baliza desde distintos puntos conocidos del mapa, es decir, se crea un mapa con el comportamiento del nivel de señal en el área a cubrir.

---

Este método presenta la desventaja de ser muy dependiente del entorno, es decir, que si el mapa analizado en la fase inicial varía la capacidad de deducir la localización disminuye.

### 3.2 Combinan las diferentes medidas para deducir la localización de los nodos.

Una vez que las medidas de los sensores son conocidas, éstas se combinan para obtener la localización de los nodos del sistema. Por lo general los algoritmos basados en el tiempo de propagación y el AOA, aunque requieren un mayor coste de equipamiento, son capaces de obtener precisiones mayores que aquellos que se basan en la medida de RSS.

Los métodos más comunes [12] son la multilateración, la angulación, la triangulación, análisis del escenario, proximidad.

La **multilateración** realiza la localización empleando las distancias calculadas desde el nodo a localizar a los nodos de referencia. Si se quiere una localización de dos dimensiones se requieren las medidas de distancia a tres nodos de referencia no-colineares, si se quiere localización en tres dimensiones harán falta cuatro nodos de referencia no-colineares.

La **angulación** deduce la localización a través de las medidas de los ángulos con respecto a los nodos de referencia. Es análogo a la multilateración pero basándose en los ángulos medidos.

La **triangulación** combina la multilateración y la angulación para determinar la localización de los nodos en el sistema.

El **análisis del escenario** engloba diversos métodos que se basan en caracterizar el entorno y que no se pueden categorizar tan fácilmente como distancia o ángulo, como por ejemplo el multitrayecto o los patrones del nivel de señal.

El método de **proximidad** es una alternativa a localizar explícitamente un nodo, en lugar de eso, se aproxima la posición al nodo de referencia más cercano.

En [1] se discuten los principios de localización que se basan en TOA, TDOA, medidas de perfil RSS en situaciones en las que el nodo a localizar esté a un salto de un número suficiente de nodos baliza. Afirman que la localización basada en medidas híbridas es la que obtiene mejores resultados, ya que los errores que se producen en los diferentes tipos de medidas provienen de distintas fuentes. Entre las posibles técnicas híbridas la combinación de medidas RSS y TOA dicen que es la más acertada para usar en WSN, ya que requiere

hardware simple.

Por otro lado también analizan las técnicas de localización multihop, es decir, aquellas en las que los nodos a localizar no están necesariamente a un salto de las balizas. Profundizan en los algoritmos basados en conectividad y los basados en distancias, tanto centralizados como distribuidos. De los algoritmos basados en conectividad destacan la simplicidad del algoritmo, pero solo permiten una localización aproximada y es dependiente de la densidad de nodos de sensores

### 3.3 Localización en redes de sensores ad-hoc

En las redes ad-hoc se precisan algoritmos escalables, fáciles de desplegar, que consuman poca energía y que no requieran muchos recursos para realizar el cómputo. Las capacidades de procesamiento y energía de cada nodo de sensores se ven limitadas por su tamaño físico, no son viables los procesos que requieran mucha computación.

Si se clasifican las soluciones de localización en función de las características del sistema se podría realizar una división en tres categorías [13]:



La localización con balizas es aquel sistema en el cual existen nodos que conocen su localización sin tener que llevar a cabo ningún tipo de procesamiento. Los nodos sensibles al contexto son los que se denominan balizas, y el resto de nodos, conocerán su localización a través de la información que obtengan de distintas balizas. Una vez que un nodo ha calculado su posición, puede pasar a actuar como baliza para que otros nodos que estén en su rango y que todavía no conozcan su propia localización puedan llegar a localizarse. En este tipo de soluciones el desafío está en desarrollar un algoritmo que con el menor número de balizas sea capaz de proporcionar una solución lo más robusta posible.

Si en lugar de balizas fijas, se emplean balizas móviles, se consigue un ahorro energético y de costes significativo. Los nodos averiguan su localización realizando una estimación de distancia respecto a las balizas. La capacidad de movilidad se puede usar para mejorar la precisión en las estimaciones de posicionamiento, aun cuando el número de nodos de referencia es pequeño.

También existen algoritmos diseñados para funcionar sin emplear balizas. En este tipo de algoritmos todos los nodos comienzan a funcionar con una asignación de coordenadas aleatoria. A continuación, los diferentes nodos colaboran entre sí para descubrir las coordenadas de cada uno, a partir de las estimaciones de distancias locales. Las coordenadas resultantes, que son posiciones relativas, requieren un post-procesamiento para poder trasladarlas a posiciones absolutas.

Un buen algoritmo de localización debería ser capaz de calcular la posición de forma rápida y al mismo tiempo, ser resistente a posibles cambios del entorno.

---

## 4 SMART ANTENNAS

---

Andreas F. Molisch, en su libro *Wireless Communications* [14] propone una definición de antenas inteligentes: “son antenas compuestas por múltiples elementos, en las cuales se combinan las señales de los distintos elementos mediante un algoritmo adaptativo inteligente”. La inteligencia, por tanto, no está en la antena, si no en el procesado de la señal. En el caso más simple, la combinación de señales de antena es una combinación lineal que usa un vector de peso  $w$ . Las formas de determinar  $w$  son las que diferencian en esencia los sistemas de antenas inteligentes.

Hay una fuerte relación entre sistemas multiantena y los sistemas de diversidad: de hecho, un receptor con diversidad de antenas es una antena inteligente.

La definición enunciada previamente, en la que la antena inteligente es vista como una combinación de señales de diferentes antenas, refuerza el hecho de que se procesan señales de diferentes localizaciones espaciales. De otro modo, se puede decir que las antenas inteligentes aprovechan la directividad del canal radio. Así, un receptor con elementos multiantena puede distinguir componentes multitrayecto con diferentes direcciones de llegada (DOA). De hecho, una forma de entender las antenas inteligentes es como un receptor RAKE espacial que distingue entre componentes multitrayecto con diferentes DOAs, y las procesa por separado. Esto permite al receptor sumarlas de forma coherente y reducir el desvanecimiento; del mismo modo, pueden eliminarse componentes de señales multitrayecto interferentes.

Otra interpretación es que la antena inteligente conforma un diagrama de radiación de manera adaptativa, en los que el conformado de los lóbulos refuerza las componentes deseadas (las combina coherentemente) y suprime las contribuciones interferentes.

### 4.1 Aplicaciones de las antenas inteligentes

Las antenas inteligentes se utilizan con diversos propósitos. No todos ellos pueden ser utilizados al mismo tiempo, por lo que dependiendo de las necesidades, habrá que decidir qué aspecto es más importante en cada caso.

#### 4.1.1 Aumento de la cobertura

Mediante el conformado de haz, cuando se conoce la posición del transmisor, un receptor puede conformar su diagrama en la dirección de transmisión, de forma que se aumente la potencia recibida y se mejore la relación señal a ruido (SNR).

#### **4.1.2 Aumento de la capacidad**

Las antenas inteligentes pueden aumentar la relación señal a interferencia (SIR), que posibilita aumentar el número de usuarios de un sistema. Esta es una de las principales ventajas de las antenas inteligentes.

#### **4.1.3 Mejora de la calidad de enlace**

El incremento de la potencia y/o la disminución de la potencia interferente conllevan la mejora de la calidad de la transmisión en cada enlace simple.

#### **4.1.4 Reducción de la dispersión del retardo**

La supresión de las componentes multitrayecto con retardos elevados permite reducir la dispersión temporal. Esta característica es especialmente útil en sistemas con una alta velocidad de transmisión.

#### **4.1.5 Mejora de la estimación de la posición del usuario**

El conocimiento de las direcciones de llegada de las señales (AOA), especialmente para las componentes quasi-LOS, mejora la geolocalización. Esto es útil para los servicios basados en localización (LBS) así como para localizar usuarios en caso de emergencia.

Existen diferentes esquemas para deducir la localización, que puede ser calculada por el móvil o por la infraestructura. El esquema más sencillo es la triangulación: conociendo los ángulos de llegada de las señales provenientes de dos balizas distintas, el móvil puede deducir su posición. Por otro lado, si una baliza conoce el nivel de señal recibido desde un móvil, junto con su ángulo de llegada, también puede deducir de una forma sencilla la posición del móvil.

La limitación va a radicar en el tamaño de los sistemas multiantena, así como en su gran demanda de capacidad de procesado. En elementos con limitaciones de consumo y tamaño parece poco viable en la actualidad la utilización de sistemas multiantena. Es el caso de muchas aplicaciones, en el que el elemento móvil ha de ser lo menos intrusivo posible. Por ello, en general, los sistemas multiantena estarán en la parte de la infraestructura, que será la que calcule la posición del móvil.

Otra gran limitación van a ser las componentes multitrayecto en situaciones NLOS, que van a distorsionar completamente la medida de localización.

El cálculo del AOA va a estar basado en el procesado de las señales de los arrays de

antenas, y los esquemas son variados: máxima potencia, estimación de máxima verosimilitud, aproximaciones basadas en sub-áreas, etc.

Por último, existen algoritmos de alta resolución para la estimación del DOA (MVM, ESPRIT, MUSIC, SAGE, Matrix Pencil,...) cuyas prestaciones exceden las necesidades de la localización, y que debido a su complejidad y coste computacional, no son viables en nuestro proyecto.

---

## 5 LOCALIZACIÓN WI-FI

---

### 5.1 Descripción

Antes de describir los mecanismos que se utilizan para localizar un dispositivo mediante una red WiFi, es necesario tener en cuenta algunos aspectos de esta tecnología que pueden influir a la hora de utilizarla para este tipo de aplicación:

Como toda tecnología de RF, se ve afectada por:

- **desvanecimientos lentos** de señal (o variaciones de gran escala), como consecuencia de la disminución del nivel de señal recibido a medida que el receptor se aleja del emisor, debido a la atenuación de la señal RF en función de la distancia.
- **desvanecimientos rápidos** de señal (o variaciones de pequeña escala), que ocurren a grandes distancias del emisor, cuando el dispositivo se mueve en distancias muy pequeñas (del orden de la longitud de onda -12.5 cm a 2.4 GHz-) y por efecto del multitrayecto.

Además, se producen **variaciones temporales** de la potencia de la señal a lo largo del tiempo, incluso cuando el dispositivo se encuentra fijo en un sitio durante un largo periodo de tiempo.

Se puede aprovechar la variación de gran escala, y a partir de la potencia recibida, deducir la distancia entre emisor y receptor. Por el contrario, las variaciones a pequeña escala introducen errores en la precisión de la medida de localización. La existencia de elementos fijos (paredes, vigas...), móviles (mesas, ordenadores) y personas distorsiona la potencia recibida. Se produce mayor atenuación que en un espacio abierto y se ocasiona el fenómeno multitrayecto, por el que las interferencias de una señal y sus ecos distorsionan la relación distancia-potencia.

El sistema está formado por una red WiFi (infraestructura) y por elementos móviles que se comunican con dicha infraestructura. El cálculo de la localización puede hacerse de dos formas, en función del rol que adopte el elemento móvil:

- El móvil realiza el cálculo necesario para conocer su ubicación, en función de la identificación del Access Point (AP) y de una base de datos con la ubicación de los AP.
- La red identifica el móvil y calcula su posición, con o sin su colaboración, y existe la posibilidad de que se le notifique posteriormente.

### 5.2 Mecanismos de localización

Existen distintos métodos para realizar una localización mediante una red inalámbrica [15], entre los que se pueden destacar tres:

- Vector Potencia o WiFi Mapping
- Triangulación de Potencia
- Métodos heurísticos

### **Vector Potencia o WiFi Mapping**

En una primera fase de entrenamiento o calibración, se divide la zona de interés en celdas, y se realizan medidas en todas ellas, para obtener la información de la señal de los APs en cada celda. Dicha información se almacena en una base de datos en forma de vector, donde cada celda conoce la potencia que le llega al usuario desde cada AP a su posición.

Durante la operación normal del sistema, conociendo la señal que recibe el móvil desde cada AP, y consultando la base de datos, puede deducirse su posición.

### **Triangulación Potencia**

El dispositivo mide la potencia recibida de tres APs y realiza los cálculos necesarios para obtener su posición mediante triangulación.

### **Métodos Heurísticos**

Se trata de métodos que pueden complementar a otros métodos de localización para mejorar la precisión de éstos, o bien pueden calcular la posición del dispositivo por sí solos. Estos métodos pretenden contextualizar el dispositivo.

**Heurística de Proximidad:** Este método se basa en el punto de acceso más cercano al terminal para determinar su posición. Se descartan las señales de menor potencia de otros APs y se considera solamente la de mayor potencia, concluyendo que la posición del dispositivo corresponde a la misma posición de dicho AP.

**Método de los vecinos más cercanos:** Este método se construye a partir de la técnica de aprendizaje basada en ejemplos, que consiste en memorizar los ejemplos de entrenamiento que se le presentan a la red. El inconveniente de este método es que requiere un gran número de puntos de calibración para poder hacer las comparaciones pertinentes.

**Heurística de Movimientos:** Con este método se puede concluir si el dispositivo está parado o en movimiento gracias a la fuerza de la señal WiFi.

**Teoría de Bayes:** Se trata de una teoría probabilística que consiste en descartar zonas donde no es probable que el dispositivo esté localizado, para así obtener mayor precisión a la hora de calcular la posición.

**Redes neuronales:** Esta tecnología consiste en crear sistemas que sean capaces de aprender, adaptarse o incluso de predecir el estado futuro.

---

Generalmente la **triangulación de potencia** es el método más usado a la hora de localizar un teléfono móvil mediante esta tecnología. Los métodos de probabilidad generalmente están implementados en robótica, donde cada cálculo requiere mucha precisión.

### 5.3 Resumen de características

**Precisión:** Según los estudios que se han realizado, se obtiene un error entre 1 y 5 metros en salas libres de obstáculos y grandes áreas. El error puede llegar a ser de hasta 3 o 4 metros en áreas más complejas, con muchos obstáculos y paredes.

**Facilidad de despliegue y calibración del sistema de localización:** Se requiere poca infraestructura. Su implementación es barata, rápida y sencilla, salvo que se haga mapeo de potencia, que requiere la fase de calibración inicial. Además, si cambia el escenario (muebles, etc.), la calibración ha de rehacerse.

**Precisión escalable:** La escalabilidad es una característica de este tipo de redes. Un punto de acceso WiFi puede tener conectados tantos usuarios como soporte la red. Para que el sistema adopte sistemas de seguridad este número de usuarios se suele delimitar.

**Inmunidad frente a otros sistemas:** Es bastante susceptible a interferencias, al trabajar en una banda no licenciada. Esto se soluciona en parte con una buena gestión de los canales.

**Potencialidades:** tecnología muy extendida y de bajo coste, multitud de dispositivos con conectividad WiFi.

**Limitaciones:** No se suele utilizar para dar un servicio que requiera RTLS (Real Time Locating System), ya que la tecnología WiFi es susceptible a la pérdida de señal debido a obstáculos. Además, en ambientes con mucho nivel de ruido, debido a las interferencias, puede reducirse la efectividad hasta un 30%.

---

## 6 LOCALIZACIÓN UWB

---

### 6.1 Descripción

UWB es una tecnología de comunicación inalámbrica de datos en una WPAN (Wireless Personal Area Network), a alta velocidad en radios pequeños y con un consumo de batería muy bajo.

Existen diferentes variantes de UWB, adaptadas a diferentes aplicaciones. La más extendida, conocida como OFDM UWB es una implementación optimizada para comunicaciones de alta velocidad de transmisión, con un gran ancho de banda y con un rango de alcance corto. Básicamente pretende ser un USB wireless para la transmisión rápida de ficheros, música, etc.

Sin embargo, a la hora de ofrecer soluciones de localización, es necesario realizar una adaptación específica que consiste en la emisión de pulsos cortos UWB con un ciclo de trabajo corto. Existen soluciones comerciales de sistemas de localización en interiores que utilizan esta tecnología tal y como se explica a continuación.

A la hora de utilizar UWB para ofrecer soluciones de localización es preferible la utilización de pulsos cortos de transmisión en lugar de otras formas de onda más complejas. La razón es sencilla: la medida del TDoA (Time Difference of Arrival) de la señal será más precisa si la señal llega en su totalidad al mismo tiempo. Dicho de otro modo, es necesario que la señal sea corta en el tiempo.

Además se precisa que el ciclo de trabajo sea bajo, y por tanto los pulsos son cortos pero el espacio entre ellos es largo. Una vez más la razón es sencilla: es mejor para el receptor no recibir muchos pulsos simultáneamente.

Existen diferentes formas de implementar transmisores de pulso corto con ciclo de trabajo corto, desde soluciones sencillas a base de diodos de conmutación rápida, a sintetizadores digitales de pulsos con un sincronización precisa, dependiendo de las necesidades concretas de la aplicación. Del mismo modo las implementaciones de los receptores UWB, que son el elemento clave del sistema pueden variar en función de los requisitos de prestaciones, coste, consumo de energía y tamaño de cada aplicación.

Existen también soluciones que combinan TDoA con AoA (Angle Of Arrival), de forma que se puede reducir la densidad de receptores.

## 6.2 Resumen de características

**Precisión:** Hasta 15 cm, dependiendo de la densidad de receptores.

**Computación centralizada:** la computación de la localización se debe realizar en la infraestructura, que realiza todos los cálculos, por lo que dependería de los algoritmos propietarios de fabricantes.

**Facilidad de despliegue:** el despliegue del sistema no es sencillo ya que los receptores precisan sincronismo.

**Consumo de energía.** Las soluciones comerciales especifican tags con una duración de alrededor de un año con una batería similar a la de un móvil, y una frecuencia de emisión de pulsos cada 5 segundos.

**Precisión escalable:** Se puede conseguir una precisión escalable en función del número de detectores que componen la infraestructura.

**Potencialidades:** Frente a sistemas convencionales de RF, las soluciones de UWB pueden obtener altas precisiones de localización de hasta 15 cm, ya que se ven menos afectadas por la distorsión multipath que los sistemas RF, y a que el cálculo se realiza en base al Time of Arrival en lugar de la intensidad de señal.

**Limitaciones:** Debido a que se utilizan técnicas TDoA, los receptores UWB deben estar sincronizados, por lo que el coste de dichos receptores y la mayor complejidad de instalación tienen un impacto económico en aquellas soluciones que no necesitan precisiones muy ajustadas.

---

## 7 LOCALIZACIÓN ZIGBEE

---

### 7.1 Descripción

La mayoría de los algoritmos de localización basados en RF usan solo los niveles RSS (Received Signal Strength) para estimar la localización, debido a un requerimiento mínimo o nulo de hardware.

A continuación se comentan posibles algoritmos de localización que se pueden aplicar a redes ZigBee [16].

Por un lado están los algoritmos de localización basados en RSS. Este parámetro se puede medir de cada uno de los paquetes recibidos (tanto el nivel RSSI como el instante en el que se recibió el paquete son accesibles para las capas MAC, NWK y APL). La accesibilidad al RSSI implica que los nodos que forman la red pueden realizar estimaciones de localización sin necesidad de hardware adicional.

El modo más simple de obtener la localización de un nodo es solicitar que envíe una señal y considerar que la localización de dicho nodo, será la localización del nodo de referencia que reporte un nivel RSSI superior. La ventaja de este método es que puede ser implementado fácilmente en nodos con pocas prestaciones, pero la precisión de la estimación realizada puede resultar inadecuada para muchas aplicaciones.

Otro método de localización basado en RSSI es realizar la estimación empleando trilateración. Los errores en la medición de la RSSI pueden resultar en una precisión inaceptable de la estimación. Esto sucedería por ejemplo en entornos en los que se produzcan muchas señales multicamino, como sucede con la mayoría de los entornos indoors. Métodos alternativos que son más adecuados para estimar la localización indoor son el fingerprinting o la localización cooperativa entre nodos. En ésta última no solo se tienen en cuenta las distancias existentes entre los nodos desconocidos y los nodos de referencia, sino que se analizan también las distancias entre los diferentes nodos a localizar. La distancia entre dichos nodos es la información adicional de la que se dispone en los métodos cooperativos.

Cuando un nodo está equipado de un trasceptor con una antena simple, como por ejemplo un monopolo landa cuartos, es posible medir el nivel de señal recibido, pero no se puede conocer la dirección por la cual se ha captado la señal. Añadiendo complejidad y coste al

nodo, sería posible modificarlo para que fuese capaz de determinar el AoA.

En cuando a los algoritmos basados en tiempo (ToA, TDoA) la sincronización es crítica. Cuanto más rápido viaje la señal en el aire, el error de tiempo será más significativo, es decir, la sincronización de reloj será más crítica si se emplean señales RF en lugar de ultrasonidos. Además, las señales de gran ancho de banda, como UWB, mejoran la estimación de localización significativamente frente a la estimación realizada con señales IEEE 802.15.4. Para entornos indoor y empleando redes ZigBee, las estimaciones de localización basadas en tiempo con señales RF son menos probables que las basadas en RSSI, ya que el pequeño ancho de banda de las señales IEEE 802.15.4, si las comparamos con UWB, podría no ser suficiente para mejorar el error de ToA cuando no hay LoS.

Para ofrecer servicios de localización indoor basados en ZigBee sería necesaria una infraestructura que incluya los siguientes elementos:

- Dispositivos a localizar: con transceptores ZigBee o tags que integran un transceptor ZigBee.
- Balizas ZigBee

## 7.2 Resumen de características

**Precisión:** Dependerá de la densidad de balizas.

**Computación centralizada o distribuida:** Ambas son posibles.

**Facilidad de despliegue:** La utilización de balizas ZigBee autónomas puede hacer más sencillo y económico el despliegue.

**Precisión escalable:** En función del número de balizas instaladas.

**Potencialidades:** Medir los niveles RSS es muy sencillo y se puede hacer por cada paquete recibido. No requiere hardware adicional para poder realizar una estimación de localización.

Del mismo modo que existe un número elevado de redes Wi-Fi desplegadas en el mundo, se espera que vayan apareciendo redes ZigBee para aplicaciones domóticas, de salud, etc. La existencia de dichas redes puede permitir un rápido despliegue de soluciones de localización in-doors.

**Limitaciones:** Los sistemas de localización de bajo coste implementados con ZigBee no sirven para estimar localizaciones de precisión de centímetros. El tiempo requerido para determinar la localización es elevado porque un nodo ZigBee requiere varios intentos antes de conseguir acceder al canal ya que el estándar se basa en CSMA-CA. Además en aplicaciones de bajo coste, los nodos que funcionan alimentados por baterías tienen capacidades computacionales limitadas, luego no son capaces de ejecutar algoritmos de localización complejos. Para determinar el TOA se requiere un reloj de alta precisión y encontrar el AOA requiere modificaciones hardware y puede aumentar el coste del equipo.

### 7.3 Experiencias reales de localización con ZigBee

En este apartado se explican y se analizan diferentes experiencias en las que se han aplicado técnicas de localización en redes de sensores basadas en ZigBee en los últimos años.

En [17] comparan técnicas convencionales para conocer la localización de objetos móviles usando módulos ZigBee. La información de localización se infiere de la RSS de la señal recibida y han clasificado los mecanismos en dos categorías:

- Técnicas de localización basadas en mapas.
- Localización basada en distancias.

La intensidad del RSS de la señal es inestable, ya que en el caso de ZigBee, la señal puede verse afectada por la presencia de redes Bluetooth, WLAN que funcionen en la banda de 2,4GHz. En el paper comparan la precisión de los dos mecanismos.

La primera de las técnicas planteadas, asume que todos los nodos menos uno están fijos y su posición es conocida. Se divide el área que se quiere analizar en celdas y se realiza una medición previa de los valores de RSS recibidos en cada celda, lo que se denomina *fingerprint map*. Para poder identificar el emisor cada dispositivo tiene un ID, y del mismo modo, cada paquete posee un índice para distinguir la secuencia. El nodo móvil, recibe el RSS, el ID del emisor, y el índice del paquete y envía la información a la estación base. Ésta deduce la localización evaluando la menor diferencia posible con el *fingerprint map* almacenado. La mayor limitación de los algoritmos de *fingerprint* es que requieren que el espacio radioeléctrico sea lo más estable posible, si la naturaleza del entorno es dinámico no es posible aplicarlo.

El otro caso es la localización basada en distancias empleando Cadenas de Markov para deducir la localización. Se aplica trilateración para inferir la distancia respecto a nodos fijos. Se plantea la ecuación de relación entre distancias reales y los niveles RSS recibidos desde los nodos fijos. De forma similar al caso de *fingerpint*, cada nodo móvil, situándose en puntos concretos recibe señales desde los nodos fijos y los indexa. Definen una variable, Bel (belief), que es la posibilidad de que un objeto móvil esté en una posición  $l$  en el momento  $t$ . Lo primero que hacen es inferir las distancia de los nodos fijos al nodo móvil mediante la ecuación de relación y empleando trilateración. A medida que pasa el tiempo, la variable Bel se actualiza de acuerdo a las Cadenas de Markov, y se emplea para ir actualizando la posición del nodo móvil.

Para llevar a cabo las pruebas han implementado la red de sensores ZigBee usando el chip Radiopulse MG2400. A través del MangoZDK Profile Simulator y el analizador de paquetes controlaban las potencias de transmisión y el nivel RSS de cada nodo.



Chip Radiopulse MG2400

Tras realizar todas las mediciones han comprobado que con el modelo de localización basado en distancias se reduce el error de estimación de posición. Además han podido comprobar como el RSSI cambia dinámicamente dependiendo de los obstáculos, del lugar, y cómo la dirección de la antena afecta al nivel de señal recibido.

En [18] proponen un algoritmo de localización cooperativo basado en ZigBee. Los nodos ZigBee seleccionados para su implementación fueron los Helicomm IP-Link 1220.

El sistema estaba compuesto por dos tipos de nodos, los nodos de gestión que se conectan al ordenador central y los nodos de sensores que son los que se despliegan por el entorno formando una red mesh y que a su vez se pueden dividir en balizas y nodos desconocidos.

---

Las balizas transmiten con mayor potencia, lo que acarrea un mayor coste, y como regla general, a mayor número de balizas mejor es la precisión de localización.

Teniendo en cuenta que es en las comunicaciones donde más energía se consume, han optado por un algoritmo centralizado, ya que requiere menor cantidad de comunicaciones.

El algoritmo se basa en aplicar el modelo de propagación teórico, que evita calibraciones iniciales, a partir de la medida RSSI obtenida. De forma que periódicamente, todos los nodos, miden el nivel de señal recibido de todos los nodos vecinos y envían dicha información al nodo de gestión. El nivel de señal que miden los nodos es menor que el valor teórico, debido a los obstáculos, las reflexiones, el multitrayecto, luego la distancia que se estima a partir de dicho nivel de señal será mayor que la distancia actual. De esta forma se establecen círculos donde estaría localizado el nodo.

En el algoritmo que plantean todos los nodos realizan las medidas de nivel de señal, el algoritmo es cooperativo. El número de balizas en la red será limitado, y para mejorar la precisión del algoritmo de localización se hace uso de los nodos desconocidos. Primero se establece un círculo inicial a partir de las señales recibidas desde las balizas, y a continuación dicho círculo se refina de forma iterativa, a partir del nivel de señal recibido de los nodos desconocidos, bien hasta que deje de cambiar o hasta que sea menor que un umbral. El proceso de refinamiento, es un proceso iterativo, que almacena de forma ordenada en dos colas distintas los niveles de señal recibidos, por un lado los valores útiles y por otro el resto.

Han comprobado que midiendo los niveles de señal entre nodos desconocidos se reduce el error de localización. Además, con un número fijo de nodos baliza, a medida que se aumenta el número de nodos desconocidos, la precisión de localización aumenta. Se aprovechan del modelo teórico de propagación de las señales y no requiere calibración previa, lo que implica abaratamiento de costes.

En [19] han realizado un estudio teórico y práctico para demostrar que una posible solución es combinar el algoritmo WCL (Weighted Centroid Localization) con ZigBee.

Para medir las distancias se puede utilizar tanto el nivel de señal recibido, que en el caso de los dispositivos embebidos se convierte a RSSI, como el LQI (Link Quality Indicator). En cuanto al primer parámetro, RSSI, puede tener una gran varianza en diversas aplicaciones ya que la calidad del RSSI se degrada con efectos como las reflexiones en efectos

---

metálicos, protocolos MAC inadaptados, circuitos de recepción inaplicables, difracción en bordes, polarización de campos electro-magnéticos, refracciones por el medio debido a diferentes velocidades de propagación, superposición de campos electro-magnéticos. Por ello, la localización se convierte imprecisa. En cuanto al LQI, éste representa el número de retransmisiones requeridas para recibir un paquete radio correctamente en el receptor.

Realizaron experimentos midiendo el LQI con dispositivos basados en ZigBee (CC2420). Comprobaron que el LQI de los paquetes decrece a medida que aumenta la distancia, y además las medidas eran reproducibles. En el dispositivo CC2420 el RSSI lo mapean directamente a LQI.

En cuanto al algoritmo de localización exponen que WCL usa pesos para mejorar la precisión de localización de los nodos desconocidos, mientras que CL realizaba los cálculos basándose únicamente en las coordenadas de los dispositivos baliza. Los pesos son dependientes de la distancia y de las características del receptor del nodo, de forma que cada escenario requiere pesos diferentes. Antes de comenzar los procesos de localización, para obtener un resultado mejor, es necesario realizar un análisis del escenario.

Teniendo en cuenta lo anterior, decidieron implementar en el dispositivo CC2420 el algoritmo WCL, y para medir distancias emplear el LQI. En cada dispositivo está instalado el stack ZigBee, que dentro de la capa de aplicación puede soportar hasta 240 objetos de aplicación. El algoritmo de localización se implementó en uno de estos objetos, simplificándose el proceso de aplicación ya que no es necesario conocer en profundidad aspectos como el canal físico, el empaquetado, el descubrimiento de redes... En su implementación, las balizas estaban configuradas como routers, y el nodo a localizar era el coordinador, que tras recibir un número específico de paquetes, almacenar las coordenadas de las balizas y el LQI, ejecutaba el algoritmo de localización.

La ventaja obtenida es la sencillez del proceso de implementación, así como la poca complejidad, rápido cálculo y necesidad de pocos recursos del WCL. Por otro lado el resultado del proceso de localización no es tan preciso como se desearía, y el error de precisión incrementa si el nodo se desplaza del centro hacia los bordes del área considerada.

Otra experiencia relacionada con la localización de WSN basadas en ZigBee la encontramos en [20]. El sistema planteado es capaz de estimar la distancia entre los nodos sensores a partir del RSSI medido de un número apropiado de nodos. Tal y como han podido

comprobar la mayoría el indicador de nivel de señal recibido, RSSI, sufre variaciones debido a diferentes efectos que ya se han mencionado anteriormente. De modo que para poder conseguir una buena precisión, requiere de mayor cantidad de datos, lo que implica un mayor consumo. Además, al aumentar la cantidad de información a procesar, el proceso se convierte más lento. Ellos han decidido abordar esta problemática desarrollando una técnica para coleccionar datos, en la que los nodos de sensores deciden si deben enviar o no los datos recibidos, de esta forma se evitan el envío innecesario de paquetes.

En su sistema se diferencian tres tipos de dispositivos, los target son aquellos que quieren conocer su localización, y envían paquetes a los nodos de sensores. Los nodos de sensores, se encargan de medir el RSSI, y envían los paquetes al nodo sink, que está conectado a un PC, y es donde se lleva a cabo todo el cómputo de la localización. Los paquetes que envían los nodos de sensores contienen el ID del sensor, el ID del target, el número del paquete, y la distancia del sensor al target.

Los cálculos de la posición se realizan en el nodo sink empleando la estimación ML (Maximum likelihood) para conocer la posición del target, se requieren tres o más nodos de sensores para poder resolver la posición.

Es necesario especificar el número de paquetes que hay que coleccionar para alcanzar una precisión de localización concreta, de modo que el usuario lo decidirá basándose en el conocimiento del entorno y lo propagará a la red a través del nodo sink. En su solución, para decidir si el nodo sensor debe enviar o no los datos al nodo sink han tenido en cuenta la densidad de nodos de sensores que tiene a su alrededor y la distancia al target. Han implementado el algoritmo en dispositivos equipados con CC2420. Estableciendo un umbral de RSSI se controla el número de datos coleccionados. Para lograr un sistema autónomo sería conveniente que los nodos de sensores pudieran decidir un umbral de RSSI automáticamente analizando el entorno radioeléctrico a través de un intercambio de información de RSSI.

En [21] han implementado la localización empleando el *Beacon Enable Meshing* y la técnica de TOA en redes IEEE 802.15.4. Descartan la opción de usar AOA debido a restricciones de factor de forma, ya que la integración de varias antenas involucraría un aumento de tamaño en el nodo. La mayor ventaja del método híbrido es la capacidad que tiene de seguir el desplazamiento de los objetos a una velocidad lenta y con una precisión razonable, manteniendo la sobrecarga adicional del protocolo baja.

---

Han evaluado los módulos ZigBee basados en el transceiver CC2420. Las opciones de emplear antenas direccionales, o evaluar el RSSI fueron descartados, y se enfocaron en la alternativa de TOA, empleado la señal SFD (Start-of-Frame) como *time-stamp* para las tramas recibidas.

Se colocan diversas balizas en las esquinas y siempre que el nodo a localizar pueda alcanzar tres o más balizas será posible conocer su posición. Un requisito para la localización es el *beaconing* sincronizado.

En el escenario que plantearon consiguieron localizaciones con errores menores de 2m en el peor de los casos. La localización en redes IEEE 802.15.4 con topología mesh con *beacons* sincronizados posibilita realizar localización de alta calidad sin añadir tráfico adicional al canal radio, no se requieren tramas extra.

En [22] han analizado las capacidades y precisión de localización que se puede lograr con la plataforma de nodos de sensores CC2431 de Texas Instruments, realizado pruebas y mediciones en un entorno real y dinámico. Los nodos de sensores CC2431 son una solución comercial que incorpora un motor de localización basado en niveles RSSI. Para que el motor de localización funcione correctamente, requiere unos parámetros de entrada, de esta forma, es capaz de relacionar las distancias con los niveles RSSI medidos. Lo habitual es especificar dichos parámetros en una fase inicial de calibración, pero esto acarrea que la precisión de localización disminuya cuando las características de propagación del canal radio varían.

Se plantean cuál es la precisión alcanzable empleando los parámetros seleccionados durante la fase de calibración, en un entorno donde las características del canal radio varían. Demuestran que la precisión de localización estimada por el motor de localización puede ser mejorada empleando el algoritmo que proponen, llamado ESD (Enhanced Steepest Descent).

Para llegar a la conclusión anterior realizan un experimento en el que comparan cuatro situaciones. En el primer caso de estudio calculan los valores de los dos parámetros necesarios para el motor de localización, en una fase de calibración inicial, para el escenario vacío (sin muebles). El cómputo de dichos valores lo llevan a cabo los nodos *blind* que son los que no conocen su posición, a partir de los niveles RSSI recibidos de los nodos baliza, éste es el método normal del motor de localización.

---

En el segundo caso de estudio, al igual que en el anterior, también calculan los valores de los parámetros en la fase inicial de calibración, y las mantienen inalterables a lo largo de todo el experimento, pero en este caso el escenario está amueblado. Además en lugar de emplear el método normal en el que el cómputo se realiza en los nodos *blind*, proponen uno diferente en el que los nodos baliza son los que realizan la mayor parte del procesamiento.

En el método propuesto cada nodo baliza recibe paquetes de otras balizas y estiman el valor RSSI de cada uno de ellos. A partir de estos datos, calcula la distancia respecto a los nodos baliza de los cuales ha recibido paquetes y calcula los parámetros (A y n) para enviárselos a continuación al nodo *blind*. Éste a su vez, debe realizar la media de todos los parámetros recibidos de los nodos baliza para quedarse con un único valor de cada parámetro.

El empleo de este nuevo método en entornos estáticos, el de realizar el cómputo en los nodos baliza en lugar de en el nodo *blind*, no aporta grandes mejoras.

El tercer caso de uso es similar al anterior, pero los parámetros se actualizan a lo largo de todo el experimento, es decir, no son estáticos. Comprueban que realmente, existen grandes fluctuaciones en los valores de los parámetros, ya que el entorno analizado es cambiante (entra y sale gente...). El hecho de tener que actualizar continuamente los parámetros conlleva un mayor consumo, luego existen dos posibles situaciones. Por un lado está el escenario en el que los nodos baliza pueden estar alimentados continuamente por corriente eléctrica de forma que el consumo no sería tan crítico, y por otro lado está el escenario en el que los nodos baliza funcionan con baterías y hay que controlar el consumo. En este último escenario, proponen solucionar el problema actualizando los parámetros solo cuando se soliciten a través de la red, basándose en estrategias de decisión concretas.

En el último caso de uso, añaden un algoritmo de optimización para mejorar la precisión obtenida. La posición calculada por el motor de localización en el caso de estudio anterior se considera dato de entrada para el algoritmo de optimización propuesto llamado ESD.

Tras analizar los resultados obtenidos llegan a la conclusión de que la localización mejora si los parámetros A y n se actualizan de forma dinámica ya que la precisión se ve afectada por la estimación de dichos parámetros dependientes del canal, y además, si se incorpora el algoritmo ESD la localización estimada mejora aún más.

Otro ejemplo más en el que han realizado la estimación de localización usando el nivel de señal recibido en redes ZigBee lo encontramos en [23]. Proponen el despliegue de una red

ZigBee para entornos de hogar empleando la topología *cluster-tree*. Para el cálculo de la posición de los nodos se basan en las medidas de RSS entre pares. Definen un objeto de aplicación entre un ZED (ZigBee End Device) y un ZC (ZigBee Coordinator) para poder estimar la localización. El ZED debe implementar el algoritmo de localización ZiLA.

Ellos proponen un algoritmo ML(Maximum likelihood) para calcular la localización, y que es aplicable a redes ZigBee. Demuestran una precisión suficiente para soportar servicios inteligentes para entornos del hogar.

#### 7.4 Conclusiones

Tal y como se puede apreciar, la mayoría de las soluciones han optado por algoritmos de localización basados en niveles RSS, aunque también existen soluciones que se apoyan en la técnica del TOA. El AOA no lo emplean debido al hardware que requiere. Se ve claramente que los niveles RSSI son la forma más económica y rápida de dotar de localización a nodos de sensores ZigBee, ya que el nivel de RSSI no es un parámetro adicional que haya que añadir, sino que se obtiene de los propios mensajes que se intercambian entre los nodos. De todas formas, hay que tener presente, que el entorno radioeléctrico, aun centrándonos en un mismo espacio o recinto, puede variar con facilidad debido a que entra y sale gente, cambios de mobiliario, etc. de forma que si se quiere obtener una localización lo más precisa posible no es suficiente con una calibración inicial basada, sino que esta tiene que realizarse dinámicamente a lo largo de todo tiempo en el que se requiera el conocimiento de la localización.

Jaakko L"ahteenm"aki. Indoor propagation models. In *COST Action 231: Digital mobile radio towards future generation systems*, EUR 18957, chapter 4, pages 175–190. Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST), 1999. (Ref: p. 34.)

---

## 8 REFERENCIAS

---

- [1] A. Sendín Escalona, *Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles*. Madrid: McGraw-Hill, 2004.
- [2] C. A. 231, "Digital mobile radio towards future generation systems. COST 231 Final Report," 1999.
- [3] S. R. Saunders and A. Aragón-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*, 2nd ed. Chichester, England ; Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2007.
- [4] A. J. Motley and J. M. P. Keenan, "Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz," *Electronics Letters*, vol. 24, pp. 763-764, 1988.
- [5] H. Sizun, *Radio wave propagation for telecommunication applications*. Berlin ; New York: Springer, 2005.
- [6] T. Shih-Chung, *et al.*, "Optimization of propagation models for the radio performance evaluation of wireless local area network," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003. IEEE*, 2003, pp. 146-149 vol.2.
- [7] A. Aragon-Zavala, *et al.*, "Accuracy evaluation analysis for indoor measurement-based radio-wave-propagation predictions," *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings -*, vol. 153, pp. 67-74, 2006.
- [8] D. Wong and D. C. Cox, "Estimating local mean signal power level in a Rayleigh fading environment," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 956-959, 1999.
- [9] M. Guoqiang, *et al.*, "Wireless sensor network localization techniques," *Comput. Netw.*, vol. 51, pp. 2529-2553, 2007.
- [10] D. Niculescu and B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS) using AOA," in *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE*, 2003, pp. 1734-1743 vol.3.
- [11] B. P. Nissanka, *et al.*, "The Cricket location-support system," presented at the Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, Boston, Massachusetts, United States, 2000.
- [12] J. Tauber, "Indoor Location Systems for Pervasive Computing," ed, 2002.
- [13] S. Guolin, *et al.*, "Signal processing techniques in network-aided positioning: a survey of state-of-the-art positioning designs," vol. 22, ed. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, pp. 12-23.
- [14] A. F. Molisch, *Wireless communications*. Chichester, England ; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.
- [15] A. Carcavilla Sanz, "Sistemas de posicionamiento basados en WiFi," Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.
- [16] S. Farahani, *ZigBee wireless networks and transceivers*, 2008.
- [17] A. Song-le Noh, *et al.*, "Comparison of the Mechanisms of the Zigbee's Indoor Localization Algorithm," vol. 0, ed. Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, ACIS International Conference, 2008, pp. 13-18.

- 
- [18] W. Chen and X. Meng, "A Cooperative Localization Scheme for Zigbee-based Wireless Sensor Networks," vol. 2, ed: Networks, 2006. ICON '06. 14th IEEE International Conference on, 2006, pp. 1-5.
- [19] J. Blumenthal, *et al.*, "Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks," ed. Intelligent Signal Processing, 2007. WISP 2007. IEEE International Symposium on, 2007.
- [20] M. Sugano, *et al.*, "Indoor Localization System using RSSI Measurement of Wireless Sensor Network based on ZigBee Standard," ed. Proceedings of the sixth IASTED International Multi-Conference on Wireless and Optical Communication, 2006, pp. 503-508.
- [21] R. Burda, *et al.*, "A Hybrid Indoor Localization Using Beacon Enabled Meshing and TOA in IEEE 802.15.4 Networks," ed. Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE, 2008, pp. 118-122.
- [22] T. Stefano, *et al.*, "Locating ZigBee Nodes using the TI's CC2431 Location Engine: A Testbed Platform and New Solutions for Positioning Estimation of WSNs in Dynamic Indoor Environments," presented at the Proceedings of the first ACM international workshop on Mobile entity localization and tracking in GPS-less environments, San Francisco, California, USA, 2008.
- [23] H. Cho, *et al.*, "Performance Analysis of Location Estimation Algorithm in ZigBee Networks Using Received Signal Strength," vol. 2, ed. Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2007, AINAW '07. 21st International Conference on, 2007, pp. 302-306.