

# Localización de personas en interiores por radio tomografía RFID

A.R. Jiménez and F. Seco

Centro de Automática y Robótica (CAR).

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC-UPM).

Ctra. Campo Real km 0.2, 28500 La Poveda, Arganda del Rey, Madrid, España.

e-mail: {antonio.jimenez, fernando.seco}@csic.es

Web: <http://www.car.upm-csic.es/lopsi>

**Abstract**—Se han propuesto muchas soluciones de localización de personas en entornos de interior pequeños como viviendas o apartamentos. La mayoría de estos sistemas requieren instalar una red de balizas en el entorno y además exigir al usuario que porte permanentemente un dispositivo sobre su cuerpo. Un enfoque muy diferente es el que utiliza el concepto de imagen radiográfica por tomografía (RTI o Radiographic Tomography Imaging) que permite averiguar la posición del usuario sin necesidad de que este lleve ningún dispositivo encima. Este trabajo muestra cómo la tecnología RFID de largo alcance operando a frecuencias tan bajas como 433 MHz puede ser usado para este propósito. Un desafío importante es conseguir lograr una precisión de posición suficiente utilizando un número bajo de lectores RFID en espacios interiores. La amplia longitud de onda (0,6 m), la baja tasa de medición (1 Hz) y una baja relación señal/ruido son otros desafíos que hay que afrontar. El algoritmo RTI que se ha implementado utiliza un filtro de partículas para permitir mayor flexibilidad para posibles fusiones sensoriales. La experimentación realizada en un entorno de 84 metros cuadrados permite conocer la ubicación de una persona con un error inferior a 2 metros en el 70% de los casos.

## I. INTRODUCCIÓN

La localización en interiores sigue siendo un problema abierto. Se han propuesto muchos enfoques diferentes utilizando distintas tecnologías para obtener una usabilidad similar al GPS al aire libre [1], [2], [3]. El desafío más difícil para la localización de personas es encontrar un método de localización en interiores suficientemente preciso, válido para áreas extendidas, resistente a las condiciones ambientales y al mismo tiempo lo más simple posible.

Pueden utilizarse diferentes enfoques para la ubicación de personas en interiores: 1) Soluciones que dependen de la existencia de una red de receptores o emisores ubicados en lugares conocidos del entorno, junto con otros sensores portados por las personas a localizar (solución con balizas); 2) Soluciones que se basan principalmente en métodos de odometría (dead-reckoning) con sensores inerciales instalados en la persona a localizar (solución sin balizas o también llamada PDR-Pedestrian Dead-Reckoning) [4], [5], [6]; 3) Soluciones que crean una malla de enlaces de radio que cruzan un área con el propósito de detectar subáreas de donde proviene una atenuación significativa de la señal. Este último enfoque no requiere que la persona lleve ningún dispositivo

(solución sin dispositivos o DFL-Device-Free Localization) [7], [8], [9], [10], [11], [12].

Este artículo explora cómo el enfoque DFL puede ser utilizado para localizar a una persona en áreas pequeñas del tamaño de un apartamento, de utilidad por ejemplo en la asistencia a la vida independiente de personas en su hogar (AAL). Los sensores empleados en este estudio utilizan la tecnología RFID activa de largo alcance a 433 MHz. Un desafío importante es lograr una precisión de posición aceptable utilizando un número bajo de lectores RFID en el área de prueba. La amplia longitud de onda (0,6 m), la baja tasa de medición (1 Hz) y una baja relación señal/ruido del RFID utilizado son otros desafíos que hay que afrontar.

Uno de los objetivos de este trabajo es validar RFID a 433 MHz como una tecnología factible para realizar tomografía por radiofrecuencia (Radio Tomographic Imaging -RTI). Estimamos que una calidad en la localización alrededor de 1 o 2 metros para el caso de una sola persona moviéndose por el entorno es adecuada y suficiente para aplicaciones AAL. El algoritmo de posicionamiento se implementa utilizando un filtro de partículas que obtiene medidas de las diferencias de la potencia recibida RSS en cada enlace de radio con respecto a una referencia de potencia cuando el espacio está vacío, es decir, sin la presencia de personas. La información de movimiento se modela como un movimiento aleatorio dispersivo de una persona con velocidad limitada.

Este artículo presenta una descripción de los principios de la técnica RTI en la sección II, los detalles de implementación del método de estimación de posición (sección III), la evaluación de las mediciones y modelos RSS (sección IV) y la evaluación del desempeño de posicionamiento del sistema RFID desplegado en un laboratorio de 84 metros cuadrados (sección V). Finalmente, en la última sección, damos algunas conclusiones y trabajos futuros.

## II. FUNDAMENTOS DE RADIO TOMOGRAFÍA-RTI

La tomografía por radio (RTI) es una técnica sin dispositivo (DFL) que utiliza múltiples transmisiones de enlaces (links) de radio superpuestos sobre un área de interés, con el fin de estimar la ubicación de una persona. La deducción de la presencia de la persona se basa en los cambios de la potencia

recibida en los múltiples receptores de cada enlace de radio, causados por la sombra del cuerpo a la propagación directa de la señal de radio en el enlace.

Si tenemos un número total de  $K$  nodos de radio distribuidos en un área, y estos nodos pueden comunicarse entre sí bidireccionalmente, entonces tenemos un total de  $M = K \times (K-1)/2$  radio enlaces. Estos  $M$  enlaces se ven afectados por diferentes efectos de sombreado y desvanecimiento causados por el bloqueo de los objetos en el área bajo observación (muebles, paredes, etc.). Si el área no contiene ninguna persona, entonces se reciben valores RSS casi estáticos en cada enlace; Este conjunto de medidas puede usarse como referencia,  $\text{RSS}_{\text{ref}}$ , que es un vector con  $M$  promedios de los valores RSS para cada enlace. Cuando una persona entra en el área, los valores RSS de los enlaces que cruzan las subregiones donde se encuentra la persona sufre una atenuación adicional con respecto al valor de referencia. Estas fluctuaciones del enlace RSS contienen información valiosa sobre la ubicación de la persona.

La localización pasiva sin dispositivos fue introducida por Youssef en 2007 [13] con un número limitado de enlaces de radio WiFi, y el concepto fue completado por Wilson y Patwari [7], aplicando un modelo simplificado para la tomografía radiográfica. El modelo de Wilson que relaciona la variación del enlace RSS ( $\mathbf{y}$ ) con las subregiones o voxels en un área ( $\mathbf{x} \in R^N$ ) se expresa como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

donde  $\mathbf{y}$  es un vector de longitud  $M$  con la diferencia en las mediciones de RSS (i.e.:  $\mathbf{y} = \Delta\text{RSS} = \text{RSS} - \text{RSS}_{\text{ref}}$ , siendo  $\text{RSS} = \{\text{RSS}_1, \text{RSS}_2, \dots, \text{RSS}_i, \dots, \text{RSS}_M\}$ ),  $\mathbf{n}$  es un vector de ruido,  $\mathbf{x}$  es la imagen de atenuación que hay que estimar, medida en decibelios (dB), y que se organiza en forma vectorial con los  $N$  voxels que forman la imagen. Por último,  $\mathbf{W}$  es una matriz de ponderación de dimensiones  $M$  por  $N$  que relaciona la contribución de atenuación de cada voxel en un enlace particular. Estos pesos se pueden calcular inicialmente y previo a su uso, mediante un modelado del bloqueo de la señal prevista en cada punto, debido a que las ubicaciones de los nodos y los voxels no cambian con el tiempo. La matriz  $\mathbf{W}$  se calcula normalmente de esta manera:

$$w_{ij} = 1/\sqrt{d_i} \begin{cases} 1 & \text{si } \text{range}(r_j, \text{link}_i) < th \\ 0 & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (2)$$

donde  $d_i$  es la longitud del enlace  $i$  (siendo  $i = \{1 \dots M\}$ ),  $r_j$  es la posición espacial del voxel  $j$  (siendo  $j = \{1 \dots N\}$ ),  $\text{link}_i$  es la línea que conecta los dos nodos en un enlace  $i$ , y  $\text{range}$  es una función que calcula la distancia entre un punto y una línea. Un umbral,  $th$ , se utiliza para decidir qué voxels están suficientemente cerca a la línea del enlace como para afectar al RSS.

El algoritmo de reconstrucción de imágenes calcula el vector de imagen  $\mathbf{x}$  del vector de datos RSS contenido en  $\mathbf{y}$ . Una solución de mínimos cuadrados implicaría resolver esta ecuación  $\hat{\mathbf{x}}_{LS} = (\mathbf{W}^T\mathbf{W})^{-1}\mathbf{W}^T\mathbf{y}$ , sin embargo  $\mathbf{W}^T\mathbf{W}$  es

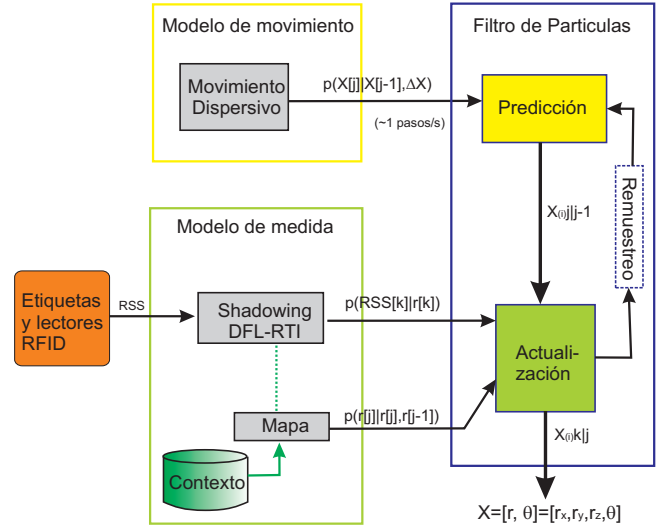


Fig. 1. Esquema general de posicionamiento por radio tomografía (DFL) usando un filtro de partículas.

casi siempre singular. Dado que este problema inverso está mal condicionado, se necesita algún tipo de regularización (por ejemplo, la regularización de Tikanov [14]) para obtener soluciones válidas. La regularización se consigue añadiendo información a priori sobre el vector de imagen ([7]) y una formulación Maximum A-Posteriori (MAP):

$$\hat{\mathbf{x}}_{MAP} = (\mathbf{W}^T\mathbf{W} + \mathbf{C}_x^{-1}\sigma_N^2)^{-1}\mathbf{W}^T\mathbf{y}, \quad (3)$$

La posición de la persona dentro de la imagen  $\mathbf{x}$  se puede estimar, por ejemplo, obteniendo la posición del voxel  $r_j$  con el valor máximo (la mayor atenuación).

### III. IMPLEMENTACIÓN

Esta sección explica los detalles de implementación de un algoritmo de posicionamiento de tipo RTI con sensores RFID, pero en nuestro caso particular utilizando un filtro de partículas para facilitar posibles fusiones con otras tecnologías adecuadas para su uso en AAL como map-matching.

#### A. El esquema general de estimación con filtro de partículas

El esquema propuesto se representa en la Fig. 1. El enfoque bayesiano se compone de una predicción y un proceso de corrección iterativa. El término de predicción es activado por un modelo de movimiento aleatorio que dispersa las partículas a una velocidad proporcional a la de la marcha de una persona caminando. Para el modelo de medición utilizamos la información de posición que se deriva del desvanecimiento en cada enlace de radio particular. Obsérvese que en este último enfoque no existe una imagen explícita o un proceso inverso como en [7], sino una acumulación secuencial de indicios sobre dónde podría localizarse la persona que bloquea las señales.

### B. Modelo de medida por bloqueo de señal

Existen en la literatura modelos de atenuación de enlaces radio que tienen en cuenta la difracción del cuerpo humano al tiempo que bloquean un enlace de radio [15]. Ese trabajo considera la primera zona de Fresnel en un enlace de radio, y la distancia desde el cuerpo al nodo más cercano, para estimar la cantidad de atenuación en dB que se produce. Este modelo se adapta bien a espacios abiertos donde la propagación es ideal, sin embargo en espacios interiores con obstáculos y muchos reflectores, el modelado no es lo suficientemente preciso.

Proponemos utilizar una distribución normal bidimensional alineada con la posición del enlace de radio, y con una matriz de covarianza adaptada a la longitud,  $L_i$ , y la orientación,  $\theta_i$ , de ese enlace, con el fin de modelar la probabilidad de medir una atenuación de RSS en cada enlace:

$$P_i^{RTI}(y_i[k]|\hat{r}^{(p)}[k]) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Omega_i|}} \exp\{-0.5(\hat{r}^{(p)}[k] - r_i)\Omega_i^{-1}(\hat{r}^{(p)}[k] - r_i)^T\} \quad (4)$$

donde  $r_i$  es la posición del enlace  $i$ , y  $\Omega_i$  es una matriz de covarianza que define el área alrededor de la posición del enlace  $i$  donde es probable que cause un desvanecimiento. Creamos la matriz  $\Omega_i$  a partir de los autovalores y vectores propios que definen una distribución elipsoidal de longitud  $L_i$ , anchura  $W_i$ , y con su eje principal orientado un ángulo  $\theta_i$  como:

$$\Omega_i = \lambda[1] \cdot \nu_{\text{eigen}}[1]\nu_{\text{eigen}}[1]^T + \lambda[2] \cdot \nu_{\text{eigen}}[2]\nu_{\text{eigen}}[2]^T \quad (5)$$

donde los autovalores son:  $\lambda[1] = L_i^2$ ,  $\lambda[2] = W_i^2$ , y los autovectores son:  $\nu_{\text{eigen}}[1] = [\cos(\theta_i), \sin(\theta_i)]^T$  y  $\nu_{\text{eigen}}[2] = [\cos(\theta_i + \pi/2), \sin(\theta_i + \pi/2)]^T$ .

### C. Modelo de movimiento dispersivo

Se utiliza un modelo de movimiento muy sencillo para una persona. Se supone que una persona puede estar estática o puede moverse no más rápido que una velocidad determinada (menos de 4 km/h). El cambio de orientación se modela asumiendo que una persona puede cambiar su orientación sin ser detectado por ningún cambio RSS en el radio enlace. Lo implementamos en el enfoque de filtro de partículas distribuyendo estas aleatoriamente alrededor de su posición actual, con una desviación estándar dada por la velocidad de movimiento máxima permitida (por ejemplo, añadiendo a las coordenadas de la partícula XY un ruido con una media cero y una distribución gaussiana de 0,5 m segundo).

## IV. EVALUACIÓN: MEDIDAS RSS Y MODELADO

En esta sección presentamos cómo se despliegan los nodos RFID en nuestro área de pruebas y la distribución resultante del enlace radioeléctrico de nodo a nodo. Además, estudiamos el nivel de sombreado causado por una persona que camina a diferentes distancias de un enlace. Esta información se utilizará para modelar nuestro proceso de medición, el

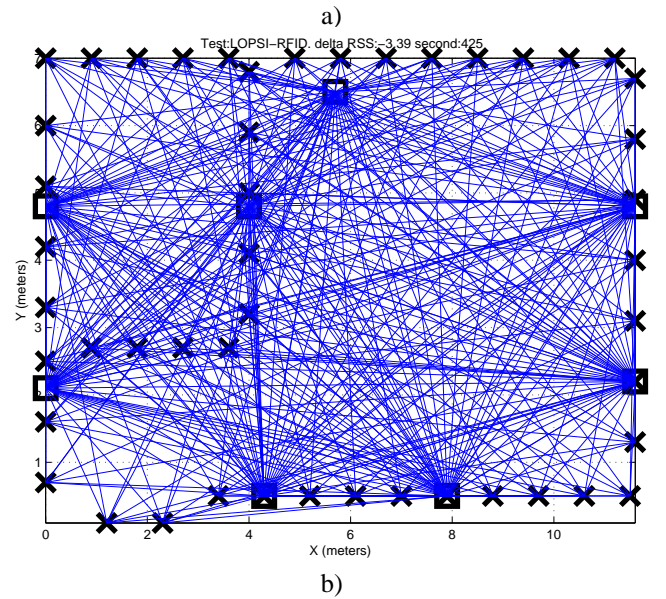


Fig. 2. Despliegue RFID en nuestro laboratorio (tamaño: 12 por 7 metros). a) Detalle de algunas etiquetas y antenas de lector fijadas en las paredes a una altura de 1 metro. b) Distribución de enlaces RFID en el área de pruebas. Las 48 cruces negras en la periferia del recinto son las etiquetas RFID, y los 8 cuadrados son las antenas receptoras RFID. Cada línea azul es uno de los 384 enlaces entre un emisor y un receptor.

cual será empleado para parametrizar nuestros algoritmos de localización presentados en la sección III y evaluados en la sección V.

### A. Montaje experimental

Hemos instalado el equipo RFID en nuestro laboratorio de 84 metros cuadrados el cual incluye dos salas separadas por tabiques. Debido a que se trata de un entorno sin posibilidad de usar el GPS, no se puede crear una referencia verdadera de posición por RTK-GPS (ground-truth), por lo que durante las pruebas la posición real de la persona en movimiento se obtiene situando a esta durante un tiempo controlado sobre unas marcas pegadas al suelo en posiciones conocidas a lo largo del recorrido de experimentación.

Debe tenerse en cuenta que la tecnología RFID está diseñada para funcionar con muchas etiquetas (el componente más barato) y sólo unos pocos lectores (mucho más caros). En nuestro caso tenemos muchas etiquetas RFID, pero

estamos limitados a operar con un total de 4 lectores. Afortunadamente, cada lector RFID tiene dos antenas con lecturas independientes, por lo que se pueden utilizar un total de 8 nodos receptores.

Un total de 48 etiquetas RFID activas separadas por 0,9 metros respecto a sus vecinos se colocan en las paredes de este laboratorio. Las etiquetas utilizadas son el modelo M100 de RfCode, que son transmisores de RF alimentados por baterías que operan en la banda de radio de 433 MHz. Cada etiqueta transmite su ID único y un mensaje de estado a una frecuencia periódica (1 Hz). El rango de detección RFID máximo típico en interiores es de 25 metros [16], por lo que el sistema podría ser utilizado para cubrir áreas más grandes.

Además instalamos 4 lectores RFID, aproximadamente cubriendo la periferia de las paredes interiores del laboratorio. Cada lector, como se mencionó anteriormente, tiene 2 antenas independientes, por lo que pudimos separar el par de antenas receptoras en 2 metros usando un cable alargador coaxial. El lector RFID es el modelo M220 de RfCode, que es un dispositivo portátil de batería ligera (160 g) con conexión Bluetooth para la captura de datos en tiempo real. Todos los nodos, lectores y etiquetas, se colocan a una altura de 1 metro sobre el nivel del piso. En la figura 2.a se puede ver una imagen del despliegue sensorial sobre una de las paredes del laboratorio.

El número total de enlaces en el área de prueba es 384, que se forman combinando los 48 nodos emisores (etiquetas) y los 8 nodos receptores (antenas lectoras). La distribución y la densidad de estos enlaces se pueden ver como líneas azules en la figura 2.b.

### B. Atenuación RSS experimental del enlace

En esta subsección se estudia el nivel de atenuación causado por una persona colocada a diferentes distancias de un enlace de radio. Este estudio es importante ya que la capacidad de una persona para bloquear enlaces de radio RFID a 433 MHz es en principio más baja que para frecuencias de radio más altas (por ejemplo, Zigbee, WiFi o Bluetooth que funcionan a 2,4 GHz). La mayoría de los trabajos sobre imágenes RTI utilizan frecuencias de radio cercanas o superiores a 1 GHz [17]. De hecho, este es uno de los retos explorados en este documento, para validar RFID a 433 MHz como una tecnología válida para Radio Tomographic Imaging (RTI).

Mediante el despliegue descrito en la sección IV-A, se realiza un experimento registrando valores RSS mientras una persona se está moviendo en diferentes ubicaciones conocidas dentro del área de pruebas. Para tener una referencia RSS de la condición de habitación vacía, se recogen lecturas RSS adicionales cuando nadie está dentro del área de prueba. Los valores medios de RSS para cada enlace,  $i$ , se calculan y representan como  $RSS_{ref}^{(i)}$ . La diferencia entre la referencia ocupada y la referencia vacía para cada enlace se calcula como  $dRSS^{(i)} = RSS^{(i)} - RSS_{ref}^{(i)}$ . Como se conoce la posición real de la persona, se calcula la distancia mínima desde la posición de la persona hasta la línea del enlace ( $Dist_{persona \ a \ enlace}$ ).

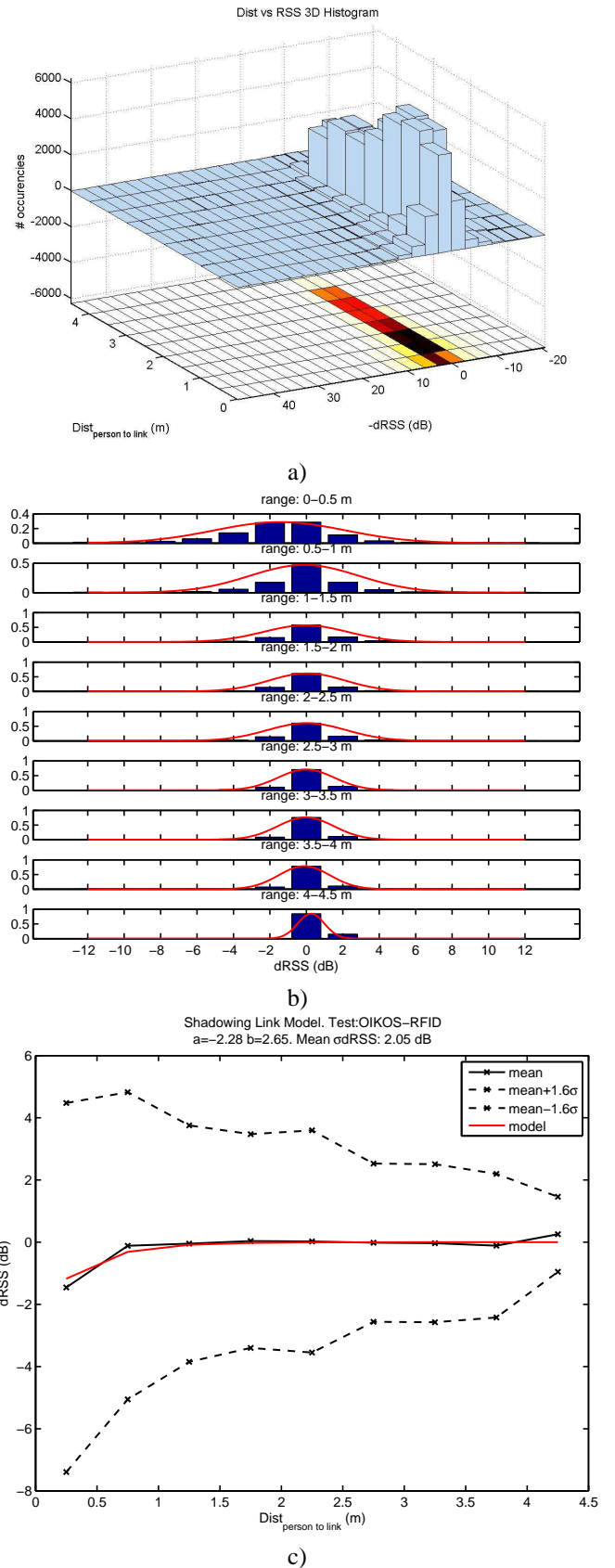


Fig. 3. Dependencia de las lecturas dRSS RFID con la distancia de la persona al enlace de radio. a) histogram en 3D, b) histogram en 2D para diferentes rangos, y c) ajuste de un modelo exponencial a los datos de dRSS RFID.

Se espera verificar que los valores experimentales de  $dRSS$  estén cerca de cero cuando la persona esté lejos del enlace (por ejemplo,  $Dist_{\text{persona a enlace}} > 1m$ ), y debería verse un cambio significativo en  $dRSS$  cuando la persona se encuentre sobre la misma línea del enlace. Un histograma en 3D de la relación entre  $dRSS$  y  $Dist_{\text{persona a enlace}}$  se muestra en la Figura 3a. Estos datos también se representan en la Fig. 3b con varios histogramas 2D (cortes a intervalos de 0,5 metros), normalizados por el recuento total de lecturas. Los resultados muestran un buen comportamiento preliminar del cuerpo humano que bloquea apreciablemente las transmisiones de radio RFID.

Con el fin de modelar el efecto de sombreado del cuerpo humano a las señales de radio RFID, un simple modelo exponencial se ajusta por mínimos cuadrados a los datos:  $dRSS = a \cdot \exp(-b \cdot Dist_{\text{person to link}})$ . Los resultados del ajuste se muestran en la Fig. 3c.

Se pueden deducir varias conclusiones importantes de los histogramas y del modelo de la Fig. 3:

- *a) Dispersión  $dRSS$  baja.* La dispersión media de  $dRSS$   $\sigma_{dRSS}$  cuando la persona está lejos del enlace es de sólo 2 dB, lo cual son buenas noticias ya que la variación de RSS está limitada.
- *b) Crecimiento de la dispersión  $dRSS$  con menor distancia.* Idealmente, nos gustaría tener una dispersión baja de  $dRSS$  para rangos mayores de 1 metro. Sin embargo, tenemos un crecimiento casi lineal de la dispersión de  $dRSS$  cuando la distancia de la persona al enlace disminuye. Este es un efecto indeseable causado por la gran longitud de onda de la radio de 433 MHz (0,69 m).
- *c) Un cambio perceptible en  $dRSS$  para rangos cortos.* Hay un cambio medio de 1,7 dB en  $dRSS$  para rangos inferiores a 0,5 metros. Este cambio no es tan grande como nos gustaría, ya que es incluso menor que la desviación media de  $dRSS$  (2 dB). Para utilizar un método RTI Shadowing basado en RFID, deberemos por tanto seleccionar un umbral en  $dRSS$  para minimizar el número de falsas detecciones. Esto también significa que muchas detecciones positivas (lecturas con la persona realmente sobre un enlace) serán ignoradas. Otros experimentos confirman que un umbral en  $dRSS$  de 2 dB es un buen compromiso.

## V. EVALUACIÓN: RESULTADOS EN LOCALIZACION 2D

Los resultados de posicionamiento se presentan usando el enfoque basado en DFL (Device-Free-Localization) con RFID. Dado que estamos proponiendo una implementación del Filtro de Partículas (PF) del enfoque DFL, primero lo comparamos con el enfoque de RTI basado en imágenes convencional presentado por Wilson [7]. Nos referimos al enfoque basado en imágenes de Wilson como DFL-RTI, mientras que nuestro enfoque de filtro de partículas DFL se llama DFL-PF. Esta comparación inicial se realiza para comprobar el funcionamiento y la similitud o discrepancia entre ambas implementaciones.

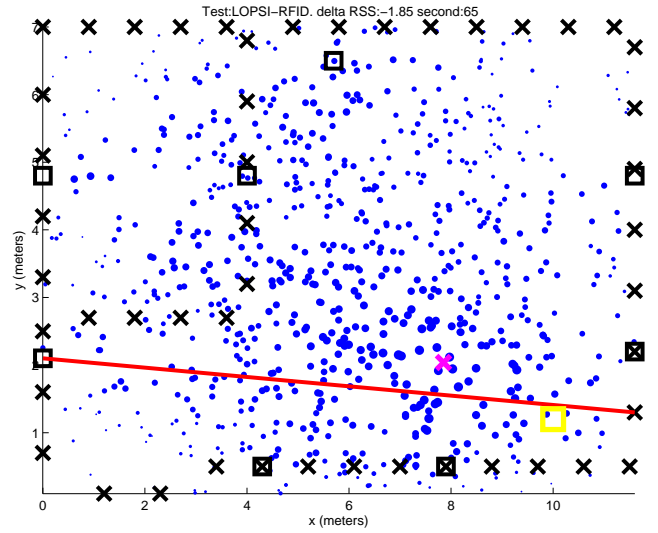


Fig. 4. Ejemplo de localización DFL basado en RFID con una distribución típica de partículas. La posición verdadera está marcada con un cuadrado amarillo, y la posición estimada está marcada con una cruz magenta. La línea roja es el enlace activo en ese instante.

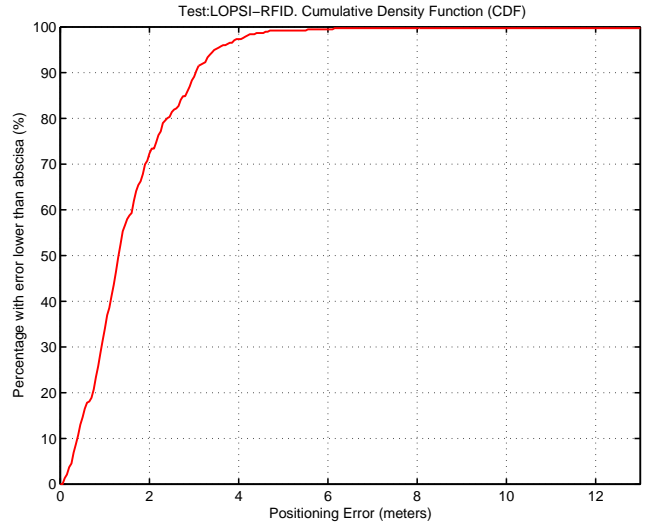


Fig. 5. Función de densidad de errores de posicionamiento acumulativos (CDF) para la implementación DFL con filtro de partículas y datos RFID.

El resultado utilizando el método de imágenes no es lo suficientemente robusto. Sin embargo hemos encontrado que el enfoque utilizando un filtro de partículas es más robusto y obtiene mejores resultados de posicionamiento. En la figura 4 se muestra un ejemplo de una distribución típica de partículas, en un momento dado durante el proceso de estimación de la posición del usuario.

El desempeño de la implementación DFL-PF es aceptable para entornos AAL. Los errores de posicionamiento se pueden ver en la figura 5 donde se representa la distribución de errores acumulativos (CDF). El error de posicionamiento típico es inferior a 2 metros en el 70% de los casos.

## VI. CONCLUSIONES

Uno de los principales desafíos que se exploraron en este trabajo fue validar RFID a 433 MHz como una tecnología potencialmente útil para la Radio Tomographic Imaging (RTI) aplicada a la localización personal en escenarios de interior. Aunque los enlaces de radio que utilizan la tecnología RFID eran menos precisos que los correspondientes a frecuencias más altas (por ejemplo, Zigbee a 2,4 GHz), el despliegue RFID ha demostrado ser un enfoque válido para la detección, localización y seguimiento de personas en interiores. El típico error de posicionamiento medio de RFID, en un área de 8 por 7 metros y con una relativa baja densidad de enlaces de radio, ha sido de aproximadamente 1,5 m, y menos de 2 metros en el 70% de los casos de acuerdo con la CDF obtenida.

Si pensamos en una aplicación típica orientada hacia escenarios de asistencia a la vida independientes o AAL, el enfoque RFID puede tener algunos beneficios, ya que una distribución desequilibrada de lectores vs emisores (etiquetas) ha demostrado ser válida. Estimamos que un área del tamaño de un apartamento puede ser cubierto por 8 lectores y probablemente 100 etiquetas (800 enlaces). Sin embargo, sería deseable realizar más pruebas y despliegues para alcanzar conclusiones más concluyentes.

Como trabajo futuro se quiere también analizar la sensibilidad en el desempeño al número de lectores o enlaces de radio utilizados. Otra línea de trabajo futura consistirá en combinar DFL con información adicional que pueda utilizarse proveniente de cuando una persona utiliza su teléfonos móvil mientras se mueve, así como el procesado de las señales de los sensores inerciales que faciliten saber el movimiento real de la persona, y por tanto mejorar nuestro modelo de movimiento.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida de los proyectos TARSIOUS (TIN2015-71564-C4-2-R (MINECO/FEDER)), REPNIN (TEC2015-71426-REDT) y Tomoloc (PIE201750E003).

## REFERENCES

- [1] R. Mautz, *Indoor Positioning Technologies*. PhD thesis, ETH Zurich, 2012.
- [2] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13–32, 2009.
- [3] J. Hightower and G. Borriello, "Location Systems for Ubiquitous Computing," *Computer*, vol. 34, no. 8, pp. 57 – 66, 2001.
- [4] A. R. Jiménez, F. Seco, J. C. Prieto, and J. Guevara, "A comparison of Pedestrian Dead-Reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU," in *2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, (Budapest), pp. 37–42, 2009.
- [5] R. Mautz, "The challenges of indoor environments and specification on some alternative positioning systems," in *Positioning, Navigation and Communication WPNC'09*, (Hannover), pp. 29–36, 2009.
- [6] L. E. Miller, "Indoor Navigation for First Responders : A Feasibility Study," Tech. Rep. February, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, 2006.
- [7] J. Wilson and N. Patwari, "Radio Tomographic Imaging with Wireless Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, pp. 621–632, may 2010.
- [8] B. Wagner and D. Timmermann, "Approaches for Device-free Multi-User Localization with Passive RFID," in *IEEE Int Conf on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp. 28–31, 2013.
- [9] O. Kaltiokallio, M. Bocca, and N. Patwari, "A Multi-Scale Spatial Model for RSS-based Device-Free Localization," *arXiv preprint arXiv:1302.5914*, pp. 1–13, 2013.
- [10] M. Bocca, O. Kaltiokallio, N. Patwari, and S. Venkatasubramanian, "Multiple Target Tracking with RF Sensor Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 8, pp. 1787–1800, 2013.
- [11] J. Wang, H. Jiang, J. Xiong, and K. Jamieson, "LiFS : Low Human-Effort , Device-Free Localization with Fine-Grained Subcarrier Information Categories and Subject Descriptors," in *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 243–256, 2016.
- [12] J. Wang, D. Fang, Z. Yang, and H. Jiang, "E-HIPA : An Energy-Efficient Framework for High-Precision Multi-Target-Adaptive Device-Free Localization," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 3, pp. 716–729, 2017.
- [13] M. Youssef and M. Mah, "Challenges : Device-free Passive Localization for Wireless," pp. 0–7, 2007.
- [14] J. Wilson, N. Patwari, and F. G. Vasquez, "Regularization Methods for Radio Tomographic Imaging," *2009 Virginia Tech Symposium on Wireless Personal Communications*, 2009.
- [15] S. Savazzi, M. Nicoli, F. Carminati, and M. Riva, "A bayesian approach to device-free localization: Modeling and experimental assessment," *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 1, pp. 16–29, 2014.
- [16] A. R. Jiménez, F. Seco Granja, J. Prieto Honorato, and J. Guevara Rosas, "Pedestrian Indoor Navigation by aiding a Foot-mounted IMU with RFID Signal Strength Measurements," in *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 15-17 September 2010, Zürich, Switzerland*, no. September, p. 7, 2010.
- [17] N. Patwari, "Building RF Sensor Networks Device-free localization in wireless networks," *5th IEEE SenseApp Workshop Keynote Address*, 2010.