

# Nuevo concepto de radares pasivos multiestáticos basados en LTE-R para vigilancia de líneas ferroviarias de alta velocidad

Blázquez García, Rodrigo <sup>1,2,\*</sup>, Casamayón Antón, Jorge <sup>2</sup> y Burgos García, Mateo <sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup> Observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM. Av. Complutense, 30. 28040 Madrid.

<sup>2</sup> Grupo de Microondas y Radar. Universidad Politécnica de Madrid. Av. Complutense, 30. 28040 Madrid. Correos electrónicos: rodrigo.blazquez@upm.es (RBG), jcasamayon@gmr.ssr.upm.es (JCA), mateo@gmr.ssr.upm.es (MBG)

\* Autor Principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: rodrigo.blazquez@upm.es (RBG)

---

**Resumen:** Entre las diferentes líneas de trabajo del observatorio Horizonte en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM se encuentra el análisis de tecnologías emergentes que puedan hacer frente a las nuevas amenazas basadas en el uso de drones. Una de las infraestructuras críticas que debe protegerse frente al uso malintencionado o negligente de drones son las redes ferroviarias de alta velocidad. Sin embargo, no existe actualmente una solución eficiente de vigilancia de medio alcance para este tipo de escenarios, ya que el empleo de radares convencionales supone un coste excesivamente elevado. En esta comunicación, se propone un sistema radar pasivo multiestático basado en el uso de las señales del enlace descendente del sistema de comunicaciones *Long-Term Evolution-Railway* (LTE-R), cuyo despliegue se extenderá previsiblemente a gran parte de la red ferroviaria de alta velocidad en los próximos años. Los múltiples nodos receptores de este sistema radar distribuido pueden implementarse utilizando dispositivos comerciales de radio definida por software (SDR), disminuyendo considerablemente su coste. Además, este sistema no requiere asignación de frecuencias, no interfiere con otros sistemas de comunicaciones, no puede ser interceptado por equipos de guerra electrónica y es fácilmente escalable. Tras presentar la arquitectura hardware y el procesamiento de señal y datos que permite la detección y seguimiento de blancos, se analiza la viabilidad técnica de este sistema en base a la función de ambigüedad de las señales LTE-R y al alcance de detección para drones de pequeño tamaño, que se estima en 4 km para drones de 0,1 m<sup>2</sup> de sección radar.

**Palabras clave:** Alta velocidad, anti-UAV, LTE-R, radar pasivo, SDR, vigilancia.

---

## 1. Introducción

En los últimos años, se ha puesto de manifiesto la necesidad de desarrollar nuevas soluciones de vigilancia perimetral para infraestructuras críticas que hagan frente al uso malintencionado o negligente de drones. Una de las soluciones más eficientes para la detección de drones que se aproximan a infraestructuras críticas aisladas, como centrales nucleares, es el uso de radares activos de alcance medio integrados, a su vez, con sensores ópticos, para la clasificación de la amenaza, y con equipos de jamming, para su neutralización [1]. Sin embargo, estos sistemas no son adecuados para vigilar áreas extensas, como el trazado de las vías de trenes de alta velocidad, ya que el despliegue de múltiples equipos a lo largo de las vías supondría un coste excesivo.

Por su parte, los sistemas actuales de vigilancia perimetral de las vías ferroviarias tampoco son apropiados para detectar amenazas aéreas basadas en drones. Estos sistemas están compuestos principalmente por la sensorización del vallado [2], para detectar impactos y saltos sobre la valla, y por cámaras de vigilancia, que presentan un tiempo de refresco de información excesivamente alto para detectar con un alcance adecuado la intrusión de drones en un cierto volumen de seguridad alrededor de la vía [1]. Por tanto, no existe actualmente un sistema eficaz para hacer frente a posibles ataques terroristas basados en el uso de drones, que puedan comprometer la seguridad de los usuarios de los trenes de alta velocidad.

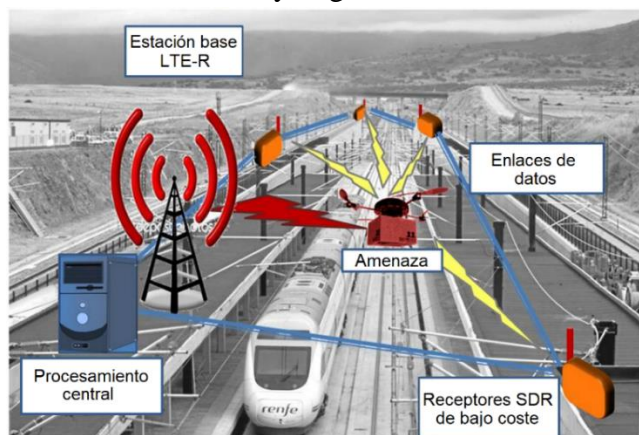
Para solventar estas nuevas necesidades de vigilancia, en esta comunicación, se propone un sistema radar pasivo multiestático y escalable basado en el uso de las señales del enlace descendente del sistema de comunicaciones *Long-Term Evolution-Railway* (LTE-R) como iluminación de oportunidad.

Aunque el sistema de comunicaciones más extendido actualmente en las redes ferroviarias de alta velocidad es el *Global System for Mobile communication-Railway* (GSM-R), dadas sus limitadas capacidades y el impulso que están recibiendo las tecnologías 5G, se prevé que el sistema LTE-R se despliegue en gran parte de la red ferroviaria durante los próximos años. El sistema LTE-R, cuyos principales parámetros se resumen en la Tabla 1, permitirá proveer servicios avanzados de comunicación en los escenarios de trenes de alta velocidad de acuerdo con los siguientes requisitos: alta movilidad (hasta 500 km/h), transmisión de banda ancha para vídeo en tiempo real, baja latencia (inferior a 500 ms), alta fiabilidad, disponibilidad y calidad de servicio, y compatibilidad con los sistemas de comunicaciones LTE y GSM-R [3].

**Tabla 1.** Parámetros del sistema LTE-R.

| Parámetro                 | Valor                                      |
|---------------------------|--|
| Bandas de frecuencia      | 700 MHz, 800 MHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz         |
| Ancho de banda de canal   | 1,4 – 20 MHz                               |
| Modulación                | OFDM (subportadoras: QPSK/16-QAM)          |
| Longitud de celda         | 4 – 12 km                                  |
| Máxima velocidad de datos | 50/10 Mbps (enlace descendente/ascendente) |

Los nodos receptores del sistema radar pasivo propuesto, cuyo esquema se representa en la Figura 1, pueden implementarse utilizando radios definidas por software (SDR) comerciales, reduciendo el coste del sistema. Las reflexiones producidas en los blancos de las señales de LTE-R transmitidas por las estaciones base son recibidas por las SDRs donde puede llevarse a cabo un procesamiento distribuido. Los resultados obtenidos en cada nodo receptor son transmitidos a través de enlaces de datos a una unidad de procesamiento central donde se lleva a cabo la fusión de los datos para realizar la detección y el seguimiento de los blancos presentes en el escenario.



**Figura 1.** Esquema propuesto del sistema radar pasivo multiestático basado en LTE-R.

En comparación con los radares activos, los radares pasivos no requieren asignación de frecuencias, lo que representa una ventaja importante dada la alta congestión actual del espectro radioeléctrico. Además, no interfieren con otros sistemas de comunicaciones y no pueden ser interceptados por equipos de guerra electrónica. Estas ventajas han motivado el desarrollo de radares pasivos basados en diferentes iluminadores de oportunidad, tanto analógicos [4] como digitales (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial* [5], WiFi [6], GSM-R [7], etc.), para aplicaciones de seguridad. Sin embargo, la novedad del sistema propuesto es el uso de señales LTE-R para implementar un sistema radar pasivo multiestático, escalable y de bajo coste que pueda proveer servicios de vigilancia perimetral de las vías de tren de alta velocidad. Además, este sistema puede servir de apoyo a la monitorización del tráfico de la red ferroviaria para optimizar el uso de la infraestructura.

A continuación, se presenta la arquitectura hardware del sistema y el procesamiento de señal y datos que permite la detección y seguimiento de blancos. Además, se analiza la viabilidad técnica del sistema propuesto en términos de la función de ambigüedad de las señales LTE-R y del alcance de detección para drones de pequeño tamaño, personas y coches.

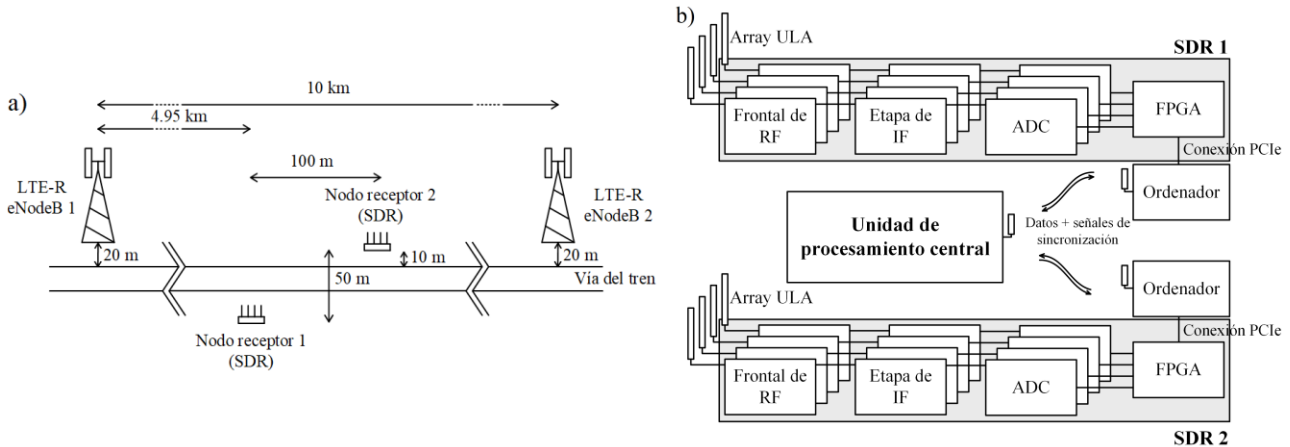
## 2. Arquitectura y procesamiento del sistema radar pasivo basado en LTE-R

### 2.1. Arquitectura hardware

La arquitectura básica del sistema propuesto, compuesto por dos transmisores de oportunidad LTE-R (eNodeB) y dos nodos receptores, se representa en la Figura 2a, teniendo en cuenta las características típicas del despliegue de las estaciones base de LTE-R. Se considera una arquitectura multiestática para mejorar las capacidades de detección y localización de los blancos gracias a la diversidad espacial y a las técnicas de multilateración, respectivamente [6,8]. Además, esta arquitectura puede ser escalada incrementando el número de nodos receptores a lo largo de la vía para extender el área cubierta por el sistema de vigilancia y mejorar sus capacidades.

Los nodos receptores se basan en equipos SRD comerciales con cuatro canales coherentes en recepción, de forma que se puedan aplicar técnicas de beamforming digital para recibir las señales de referencia transmitidas por cada estación base LTE-R y las señales de vigilancia a partir de las cuales se detectan los blancos presentes en el escenario. Los cuatro elementos de antena conforman un array lineal uniforme (ULA) con una separación  $\lambda/3$  entre elementos (12,5 cm para la banda LTE-R en 800 MHz). Cada elemento del array presenta una ganancia de 3 dBi y un diagrama de radiación omnidireccional.

Como se muestra en la Figura 2b, los módulos SDR se componen de los frontales de radiofrecuencia (RF), las etapas de frecuencia intermedia (IF), los conversores analógico-digital (ADC) y una FPGA (*field-programmable gate array*), donde se lleva a cabo el procesamiento de señal que permite obtener las detecciones de los blancos. La FPGA se conecta a través de *Peripheral Component Interconnect Express* (PCIe) a un ordenador, que controla la SDR y realiza el procesamiento de datos distribuido a partir de los plots obtenidos por el procesamiento de señal. Finalmente, el ordenador transmite los datos a una unidad de procesamiento central donde se lleva a cabo la fusión de datos centralizada. Además, la unidad central transmite señales de sincronización a los nodos receptores.

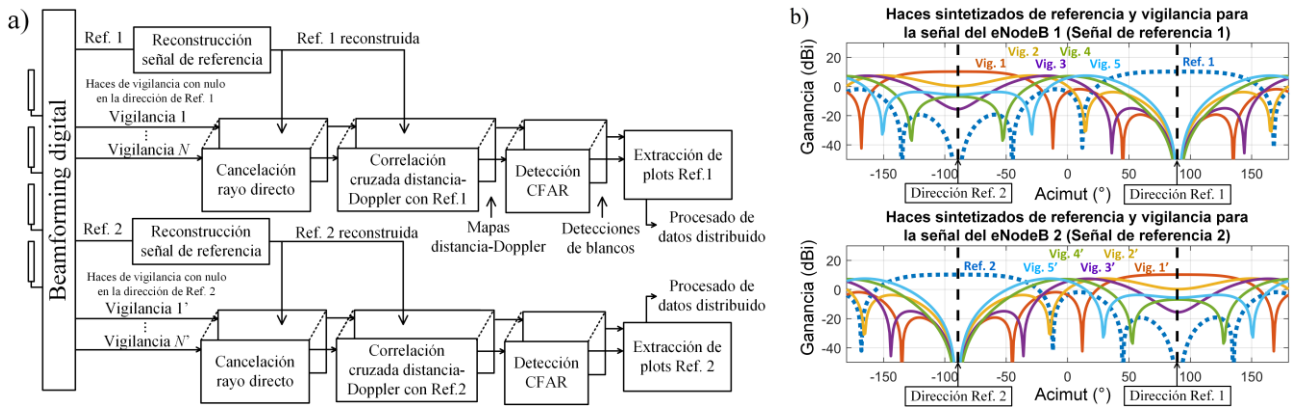


**Figura 2.** Sistema radar pasivo multiestático: a) Geometría del sistema y b) Arquitectura hardware del sistema compuesto por dos nodos SDR receptores y una unidad de procesamiento central.

## 2.2. Procesado de señal y fusión de datos multiestáticos

El diagrama de bloques del procesado de señal implementado en cada nodo receptor se representa en la Figura 3a. En primer lugar, se aplica un beamforming digital para obtener las dos señales de referencia, transmitidas por los dos iluminadores de oportunidad (estaciones base de LTE-R), y varios canales de vigilancia en diferentes direcciones. Para ello, se sintetizan simultáneamente diversos haces de antena que presentan distintas posiciones de sus nulos y lóbulos principales. Como se muestra en la Figura 3b, un haz de referencia es apuntado a cada estación base de LTE-R con un nulo en la dirección del otro transmisor, mientras que los haces de vigilancia se solapan y presentan un nulo en la dirección de su transmisor de oportunidad asociado con el objetivo de minimizar la interferencia por rayo directo, que podría enmascarar las reflexiones producidas en los blancos e impedir su detección. A partir de las señales recibidas por los dos haces de referencia, se reconstruyen las señales LTE-R transmitidas teniendo en cuenta las especificaciones de la capa física del estándar de comunicaciones. Esta estrategia permite evitar el uso dos canales dedicados en recepción para obtener las señales de referencia transmitidas por las estaciones base.

Teniendo en cuenta el despliegue celular del sistema LTE-R, en el que dos estaciones base adyacentes utilizan distintos canales de frecuencia, la interferencia entre las dos señales de referencia es reducida. De esta forma, las reflexiones producidas en los blancos de las señales transmitidas por las dos estaciones base pueden separarse en cada nodo receptor mediante una correlación cruzada entre cada señal de referencia y las señales de vigilancia, tras aplicar sobre dichos canales de vigilancia procesados de cancelación del rayo directo para evitar que dicha interferencia oculte las reflexiones de los blancos débiles. Posteriormente, un detector *Constant False Alarm Rate* (CFAR) [9] y el extractor de plots permiten obtener las estimaciones de distancia biestática, velocidad biestática y acimut de los blancos detectados a partir de los picos de las funciones de correlación cruzada.



**Figura 3.** a) Diagrama de bloques del procesado de señal y b) Haces sintetizados de referencia (líneas punteadas) y vigilancia (líneas sólidas) en el nodo receptor 1 para los dos eNodeB de LTE-R.

En relación con el procesado y fusión de datos, se implementa un algoritmo de seguimiento dividido en dos niveles (nivel de sensor y nivel global) [10]. En esta estrategia, se lleva a cabo un primer seguimiento distribuido para cada par transmisor-receptor usando los plots extraídos por el procesado de señal y un segundo seguimiento centralizado en coordenadas cartesianas tras la asociación y multilateración de los datos de salida obtenidos de los múltiples pares. La asociación de datos se basa en un procesado de abajo a arriba (*bottom up processing*) [11] en el cual se considera un conjunto finito de posibles posiciones de los blancos en forma de rejilla dentro del área de interés y las posiciones de los blancos detectados se localizan en los mínimos locales de una función de error calculada para cada punto de la rejilla. Esta función de error viene dada por la suma cuadrática de las distancias entre el punto considerado de la rejilla y el plot más cercano de cada par transmisor-receptor. Esta técnica permite reducir la tasa global de falsas alarmas del sistema y evitar ambigüedades y blancos fantasma.

### 3. Análisis de la viabilidad técnica

#### 3.1. Análisis de la función de ambigüedad de señales LTE-R

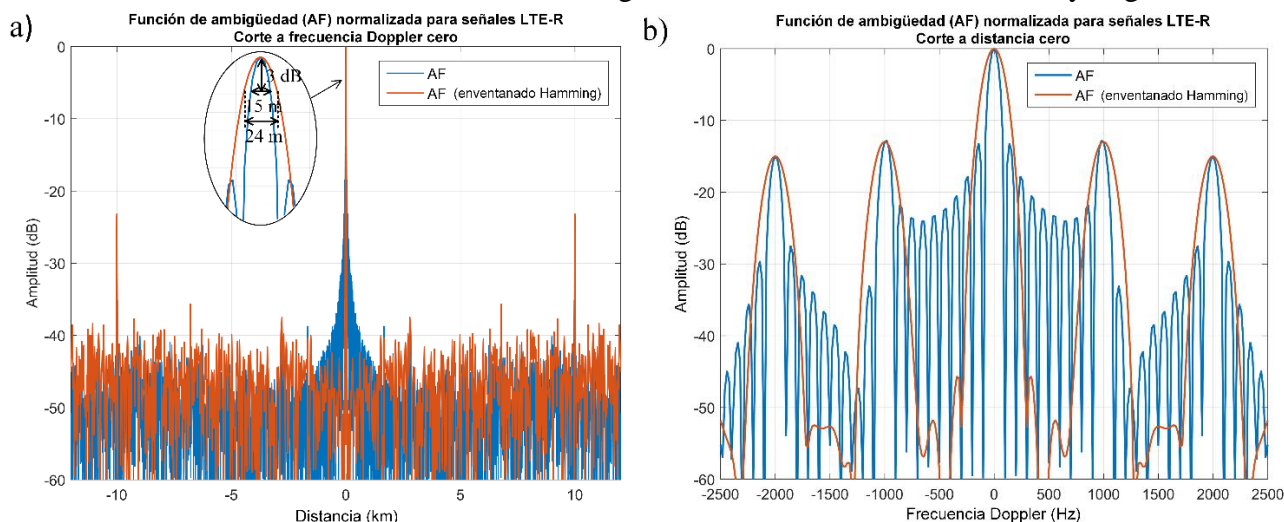
Las mejores resoluciones en distancia y frecuencia Doppler alcanzables por cada nodo receptor del sistema multiestático pueden evaluarse a partir de la función de ambigüedad de las señales de referencia del enlace descendente del sistema LTE-R, que representa la salida del filtro adaptado. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las resoluciones realmente obtenidas en distancia y frecuencia Doppler dependen de la geometría biestática entre el blanco y cada par transmisor-receptor [12].

La función de ambigüedad distancia-Doppler,  $\chi(\tau, f_d)$ , de una señal de oportunidad  $s(t)$  viene dada por:

$$\chi(\tau, f_d) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s^*(t - \tau) \cdot e^{-j2\pi f_d t} \cdot dt \right|^2 \quad (1)$$

donde  $\tau$  es retardo temporal, relacionado con la distancia biestática, y  $f_d$  la frecuencia Doppler.

La Figura 4 representa los cortes para Doppler cero y distancia cero de la función de ambigüedad de una señal LTE-R simulada con 10 MHz de ancho de banda y prefijo cíclico normal utilizando un tiempo de procesado coherente (*coherent processing interval, CPI*) de 10 ms.



**Figura 4.** Función de ambigüedad de señales LTE-R de 10 MHz de ancho de banda y prefijo cíclico normal para CPI 10 ms: a) Corte para frecuencia Doppler cero y b) Corte para distancia cero.

Como puede observarse a partir del corte para Doppler cero de la función de ambigüedad, la resolución en distancia para la señal LTE-R sin ponderar es de aproximadamente 15 m, en concordancia con su ancho de banda de 10 MHz. Sin embargo, dado el alto nivel de lóbulos secundarios, es conveniente aplicar técnicas de reducción de lóbulos secundarios, como un enventanado de Hamming en el dominio de la frecuencia. De esta forma, se consigue un nivel de lóbulos secundarios de -40 dB a costa de disminuir la resolución a 24 m. Además, aparece una ambigüedad en distancia a 10 km debido al prefijo cíclico empleado en la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*). Esta ambigüedad se relaciona con el tiempo útil de símbolo de la capa física de LTE-R ( $T_u = 66,7 \mu\text{s}$ ) y presenta un nivel que viene dado por el cociente entre el tiempo medio del prefijo cíclico ( $T_{CP} = 4,77 \mu\text{s}$  para el prefijo cíclico normal) y el tiempo útil de símbolo (Nivel de la ambigüedad =  $20\log_{10}(T_{CP}/T_u) = -23 \text{ dB}$ ). En el sistema radar pasivo propuesto, el alcance instrumental considerado es inferior a 10 km, por lo que dicha ambigüedad no compromete el funcionamiento del sistema. Sin embargo, para otras aplicaciones que utilicen señales LTE-R como iluminación de oportunidad, puede ser necesario implementar técnicas de supresión del prefijo cíclico para eliminar esta ambigüedad.

Respecto a la resolución en frecuencia Doppler, usando un CPI de 10 ms, el corte de la función de ambigüedad para distancia cero presenta un ancho del lóbulo principal a -3 dB de 90 Hz para la señal sin ponderar y de 170 Hz para la señal con enventanado de Hamming en el dominio del tiempo. Estos resultados, para la banda de LTE-R a 800 MHz, corresponden a resoluciones en velocidad de 33,75 m/s y de 63,75 m/s, respectivamente. Esta escasa resolución en velocidad puede mejorarse incrementando el CPI, lo que también permite aumentar la relación señal a ruido (SNR) de los blancos y, por tanto, el máximo alcance de detección del sistema, siempre y cuando se mantenga la coherencia en la respuesta del blanco durante el tiempo de integración. Por ello, se propone utilizar un CPI de 250 ms, que permite obtener una resolución en velocidad biestática de 10 km/h aplicando un enventanado de Hamming.

En el corte de la función de ambigüedad para distancia cero, también se observan ambigüedades en múltiplos de 1000 Hz de la frecuencia Doppler debido a la estructura pulsada de las señales LTE-R, que se dividen en subtramas de 1 ms [13]. Sin embargo, estas ambigüedades no son significativas para el sistema propuesto porque corresponden a múltiplos de 1350 km/h de la velocidad biestática.



Por tanto, teniendo en cuenta las resoluciones obtenidas en distancia y velocidad y el nivel de lóbulos secundarios de su función de ambigüedad, puede concluirse que las señales LTE-R son adecuadas como iluminación de oportunidad para radares pasivos.

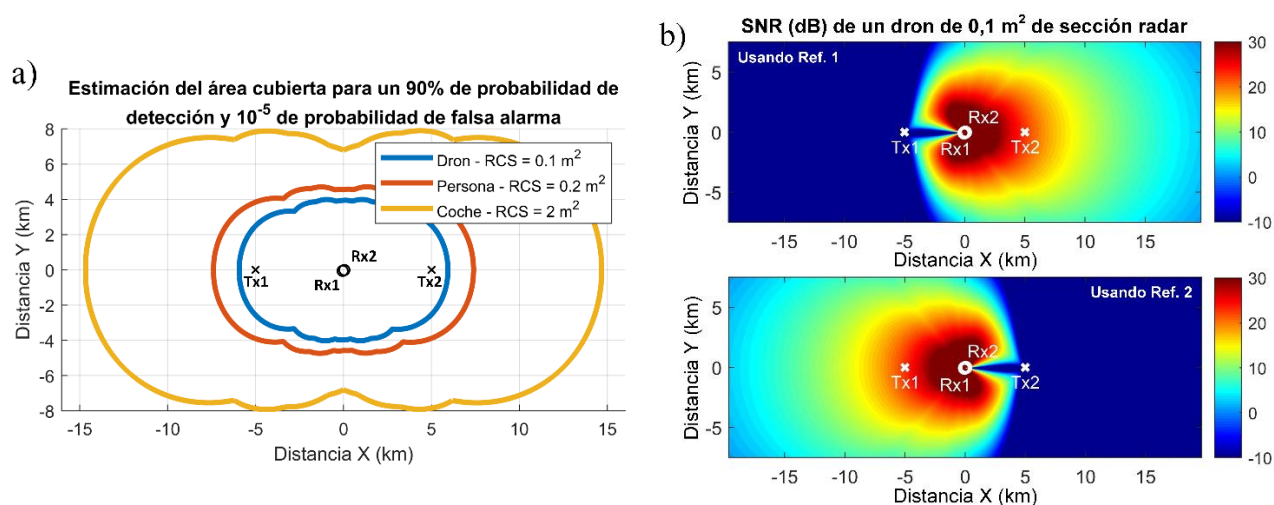
### 3.2. Estimación del alcance de detección

Con el objetivo de demostrar la viabilidad técnica del sistema de vigilancia propuesto en base al máximo alcance de detección limitado por ruido térmico, la Figura 5a representa la estimación del área cubierta por el sistema considerando distintos tipos de blancos. La Tabla 2 muestra los parámetros de la simulación, en la que se ha considerado una probabilidad de detección ( $P_d$ ) objetivo del 90% en al menos uno de los pares transmisor-receptor para una probabilidad de falsa alarma ( $P_{fa}$ ) de  $10^{-5}$ . Además, se asume que las antenas de las estaciones base LTE-R (eNodeB) presentan un diagrama de radiación con un haz principal de  $30^\circ$  de ancho apuntado sobre la vía hacia los receptores.

La Figura 5b representa la relación señal a ruido de un dron pequeño de  $0,1 \text{ m}^2$  de sección radar para el nodo receptor 1 utilizando cada señal de referencia. Como el haz de referencia no se utiliza como haz de vigilancia, para limitar la interferencia por rayo directo, se producen zonas ciegas en cada par transmisor-receptor, que no aparecen al considerar las medidas de todos los pares transmisor-receptor, obteniéndose un alcance de detección de 4 km para drones pequeños de  $0,1 \text{ m}^2$  de sección radar.

**Tabla 2.** Parámetros usados para la estimación del área cubierta por el sistema.

| Parámetro   | Valor              |
|---|--------------------|
| Potencia transmitida  | 40 W               |
| Ganancia de la antena transmisora   | 14 dB              |
| Ganancia de la antena receptora   | Haces sintetizados |
| Banda de frecuencia   | 800 MHz            |
| CPI   | 250 ms             |
| Figura de ruido de los receptores   | 5 dB               |
| Pérdidas del sistema y margen de seguridad  | 5 dB               |
| SNR <sub>min</sub> para blanco tipo Swerling 1, $P_d = 90\%$ y $P_{fa} = 10^{-5}$ | 20,5 dB            |



**Figura 5.** Estimación del alcance de detección: a) Estimación del área cubierta para la detección de drones pequeños, personas y coches y b) SNR de un dron pequeño para el nodo receptor 1 utilizando la señal de referencia del eNodeB 1 (arriba) y la señal de referencia del eNodeB 2 (abajo).

#### 4. Conclusiones

En esta comunicación, se ha propuesto un nuevo concepto de radares pasivos multiestáticos basados en LTE-R para llevar a cabo la vigilancia perimetral de las vías ferroviarias de alta velocidad. Este sistema escalable puede implementarse haciendo uso de equipos SDR comerciales para disminuir su coste. Además, se ha demostrado la viabilidad técnica del sistema en base al análisis de la función de ambigüedad de las señales LTE-R como iluminación de oportunidad y al alcance de detección obtenido para coches, personas y drones de pequeño tamaño. La función de ambigüedad de las señales LTE-R muestra buenas propiedades en términos de resolución en distancia y frecuencia Doppler, nivel de lóbulos secundarios y ambigüedades. Además, la estimación del área cubierta por el sistema multiestático compuesto por dos iluminadores de oportunidad LTE-R y dos nodos SDR receptores muestra capacidades de detección prometedoras para hacer frente a las nuevas amenazas basadas en drones y llevar a cabo la vigilancia perimetral de las redes ferroviarias de alta velocidad.

#### Referencias

1. Barbero Rodríguez A., Blázquez García R., Fernández Cruza A., Insua Feito M., Burgos García M. Análisis de viabilidad de despliegues antri-dron basados en tecnologías de última generación. *V Congreso Nacional I+D en Defensa y Seguridad*; Toledo, España; **2017**.
2. Indra Sistemas, S. A. Protección Perimetral: Vallado [Internet]. [cited 2018 Ago 02]. Available from: <https://www.indracompany.com/es/proteccion-perimetral-vallado>
3. He R., Ai B., Wang G., Guan K., Zhong Z., Molisch A., Briso-Rodriguez C., Oestges C. P. High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. **2016**; 11(3):49-58.
4. Colone F., Bongioanni C., Lombardo P. Multifrequency integration in FM radio-based passive bistatic radar. Part II: Direction of arrival estimation. *IEEE Aerospace and Electronic System Magazine*. **2013**; 28(4): 40-47.
5. Liu Y., Wan X., Tang H. Yi J., Cheng Y., Zhang X. Digital television based passive bistatic radar system for drone detection. *2017 IEEE Radar Conference*; Seattle, EE. UU.; **2017**.
6. Colone F., Falcone P., Bongioanni C., Lobardo P. WiFi-based passive bistatic radar: Data processing schemes and experimental results. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. **2012**; 48(2):1061-1079.
7. Chetty K., Chen Q., Woodbridge C. Train monitoring using GSM-R based passive bistatic radar. *2016 Radar Conference*; Philadelphia, EE. UU; **2016**.
8. Griffiths H. D., Baker C. J. Passive coherent location radar systems. Part 1: performance prediction. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*. **2005**; 152(3):153-159.
9. Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. **1983**; 19(4):608-621.
10. León Infante F., González-Partida J. T., Blázquez-García R., Burgos-García M. Processing chain of a radar network for safety improvement in the usage of heavy machinery. *2015 European Radar Conference (EuRAD)*; París, Francia; **2015**.
11. Fölster F., Rohling H. Data association and tracking for automotive radar networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. **2005**; 6(4):370-377.
12. Baker C. J., Griffiths H. D., Papoutsis I. Passive coherent location radar systems. Part 2: waveform properties. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*. **2005**; 152(3):160-168.
13. Colone F., Woodbridge K., Guo H., Mason D., Baker C. J. Ambiguity function analysis of wireless LAN transmission for passive radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. **2011**; 47(1):240-264.