

# Desarrollo e Integración de un Sensor Modular y Flexible en la Banda de Ondas Milimétricas para Aplicaciones de Automoción

Francisco-José Martín-Bayona<sup>(1)</sup>, Guillermo Villalba Calvillo<sup>(2)</sup>, Mario Pérez-Escribano<sup>(1)</sup>, Jaime Oliva<sup>(2)</sup>, Antonio Rojas<sup>(3)</sup>, Sergio Cobos<sup>(3)</sup>, Enrique Márquez-Segura<sup>(1)</sup>  
 fjmb@ic.uma.es, guillermo.villalba@iertec.com, mpe@ic.uma.es, jaime.oliva@iertec.com,  
 antonio.rojas@grupopremo.com, sergio.cobos@grupopremo.com, ems@ic.uma.es.

<sup>(1)</sup>Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Málaga. E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, Boulevard Louis Pasteur 35, 29010, Málaga, España.

<sup>(2)</sup>Iertec Smart Technologies. Av. de la Innovación, 1, 11591 Guadalcazín, Cádiz.

<sup>(3)</sup>Grupo Premo S.L. Calle Severo Ochoa, 47, 29590 Málaga.

**Abstract-** This paper presents the development of a full prototype of a millimetre wave sensor for automotive radar in the 77-81GHz frequency band. The interest in millimetre wave sensors has grown significantly in the last ten years. Millimetre-wave automotive sensors are necessary to add data and complement optical devices to allow safety autonomous driving algorithms. The sensor is designed based in the use of FMCW signal in the 77-81 GHz frequency band. The sensor integrates the millimetre-wave antenna, the radio transceiver and the signal-processing unit. Communications with the rest of the vehicle systems and sensors are ensured using fast can-bus. The proposed hardware is modular so the main parts can be used for different application without the design a new set of PCB boards. Part of the system is re-utilizable between different applications.

## I. INTRODUCCIÓN

El mercado de la automoción es un mercado exigente donde las medidas de seguridad priman en los fabricantes para garantizar la seguridad tanto en el interior del vehículo como en el exterior. Si bien el mercado de automóviles particulares juega un papel muy importante, es el sector del transporte inteligente y los vehículos de emergencias donde la conducción asistida es de vital importancia. En la actualidad los sistemas integrados en los vehículos son de diversos tipos, entre ellos sistemas basados en ultrasonidos, cámaras, detección láser y sensores de ondas milimétricas. Ninguno de ellos, a día de hoy, garantiza la conducción autónoma de nivel 3 en su totalidad [1], el objetivo de nivel 5 se encuentra aún lejos en vehículos comerciales. La fusión de datos provenientes de los diferentes sistemas instalados en el vehículo sí permite maximizar el rango de situaciones desfavorables donde se puede garantizar la seguridad del vehículo en su trayectoria [2-3].

Los sensores de milimétricas han evolucionado desde sistemas de detección de presencia en ángulos muertos desarrollados en la banda de 24 GHz a sistemas radar en la banda de 76-77GHz para el control de crucero. En la actualidad predominan sistemas desarrollados en la banda de 77-81GHz que permiten determinar posición y velocidad de vehículos y objetos en el entorno [4-5]. En un futuro cercano los sistemas de detección para conducción autónoma convivirán con comunicaciones

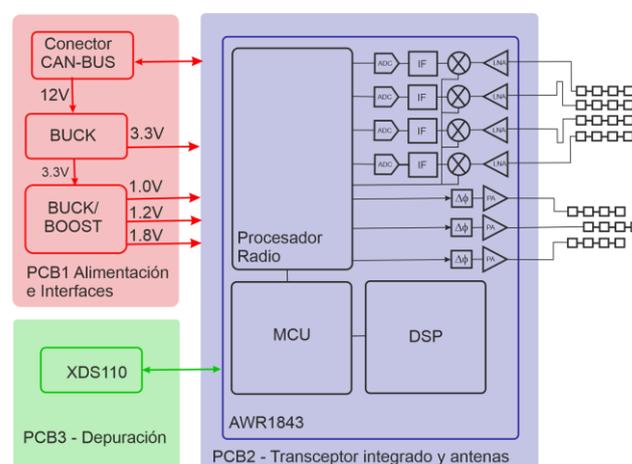


Fig. 1. Esquema del sensor basado en AWR1843 de Texas Instruments.

entre vehículos e infraestructuras para incrementar la seguridad [6-7].

Esta comunicación presenta el desarrollo de un sensor en la banda de ondas milimétricas entre 77 y 81 GHz. El sensor ha sido desarrollado empleando el ecosistema de la compañía Texas Instruments (TI), en concreto el sistema integrado AWR1843 que integra en un solo chip el transceptor radio, el subsistema basado en DSP para el procesamiento de la señal FMCW (*Frequency-Modulated Continuous-Wave*) [8-9] y el subsistema basado en una unidad microcontroladora para la interconexión de las diferentes partes interiores como las comunicaciones con el exterior. El sistema se ha diseñado de forma modular para flexibilizar el conjunto de aplicaciones en las cuales pueda aplicarse. Entre las diferentes aplicaciones se encuentran los radares de corto, medio y largo alcance, sensores de ultracorta distancia y sensores para la detección de ocupantes de un vehículo y/o sus constantes vitales. En la Fig. 1 se muestra el esquema del sistema desarrollado en tres placas diferentes e integrado en un volumen de 5x5x3 cm<sup>3</sup>, adecuado para su integración en vehículos. El sistema integra los subsistemas radio, de alimentación y de programación y depuración.

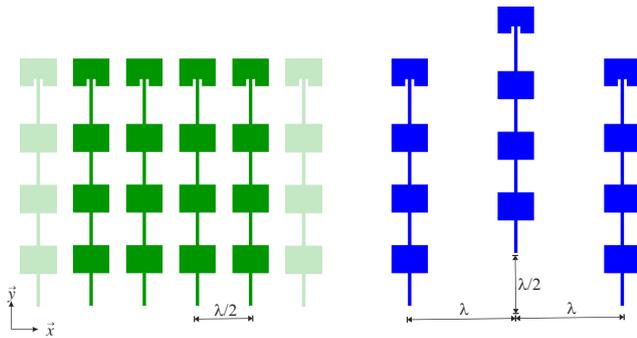


Fig. 2. Agrupaciones de antenas en configuración de transmisión (azul) y en configuración de recepción (verde).

## II. CONJUNTO DE ANTENAS

El elemento fundamental del diseño es una antena de parche con forma rectangular en tecnología microstrip [10]. Se elige esta tecnología, por su facilidad de diseño, fabricación e integración con el resto de los elementos que componen el sistema. Se han considerado otras alternativas como alimentación por slot o tecnología SIW entre otras, aunque debido a las pérdidas y facilidad de integración se ha desistido y se ha empleado el parche en tecnología microstrip. Dado que las características de radiación necesarias no pueden ser satisfechas con un solo elemento, se diseña una primera agrupación de parches con alimentación en serie, refiriéndonos a este conjunto como *Single-Feed Microstrip Patch Array* (SFMPA) [11-12]. La agrupación compuesta por cuatro elementos alimentados en serie constituirá el elemento base para el desarrollo de agrupaciones más complejas. La Fig. 2 muestra la agrupación base empleada en las diferentes configuraciones que serán discutidas más adelante.

La configuración propuesta para la agrupación de antenas en recepción es la presentada en la Fig. 2. Se trata de una agrupación en paralelo de cuatro elementos, separados entre sí una distancia de media longitud de onda, siendo estos elementos el SFMPA mencionado anteriormente. A cada uno de los extremos se ha introducido una copia del SFMPA, a modo de parásito. Esto ha permitido no deformar significativamente la forma del diagrama de radiación del conjunto.

El diseño ha sido evaluado empleando el software de simulación electromagnética HFSS (*High Frequency Structure Simulator*). La Fig. 3 muestra el coeficiente de reflexión de la agrupación básica 1x4. Junto con el coeficiente de reflexión de la agrupación de 1x4 parches se muestra el coeficiente de reflexión de la agrupación formada por cuatro elementos para recepción de la Fig. 2. Como puede observarse el conjunto mostrado en verde en la Fig. 2 no se ha deteriorado en exceso y se mantiene la adaptación en el rango de frecuencias de interés. Si bien el integrado podría emplearse en aplicaciones en la banda de 76-77GHz no se ha considerado optimizando su comportamiento en la banda de interés de 77-81 GHz. Es importante recordar que la combinación de las señales de los elementos de la agrupación de recepción y transmisión se realiza en el circuito integrado cuyo esquema se muestra en la Fig. 1. Puede verse como la combinación de las señales provenientes de cada uno de los elementos básicos se combina en el procesador radio.

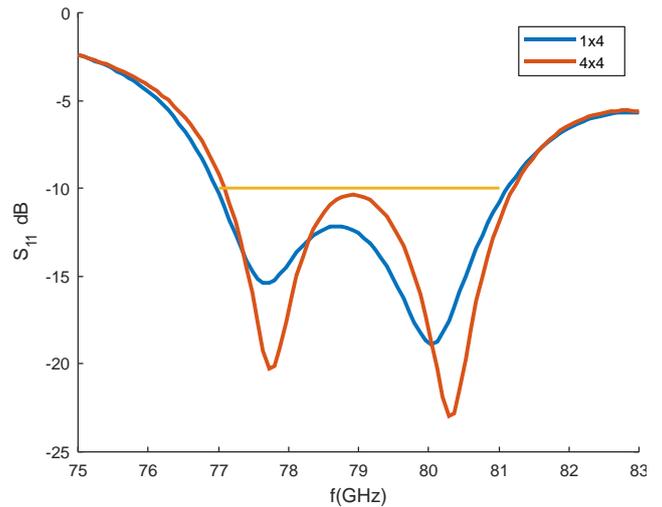


Fig 3. Coeficiente de reflexión de las agrupaciones de antenas en configuración aislada y en configuración de recepción.

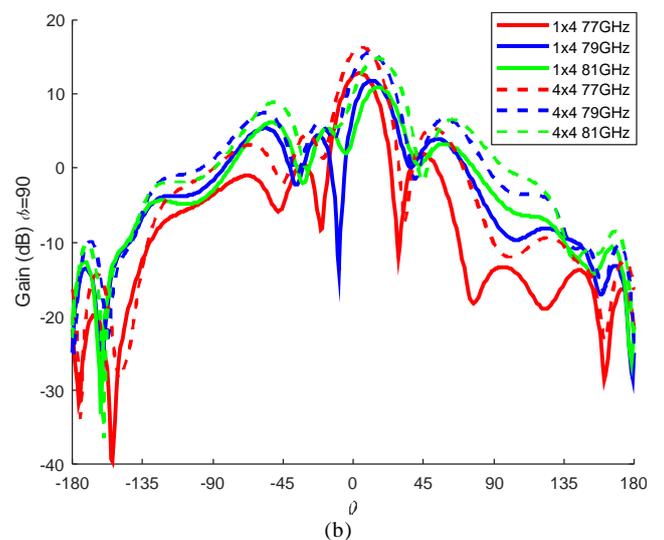
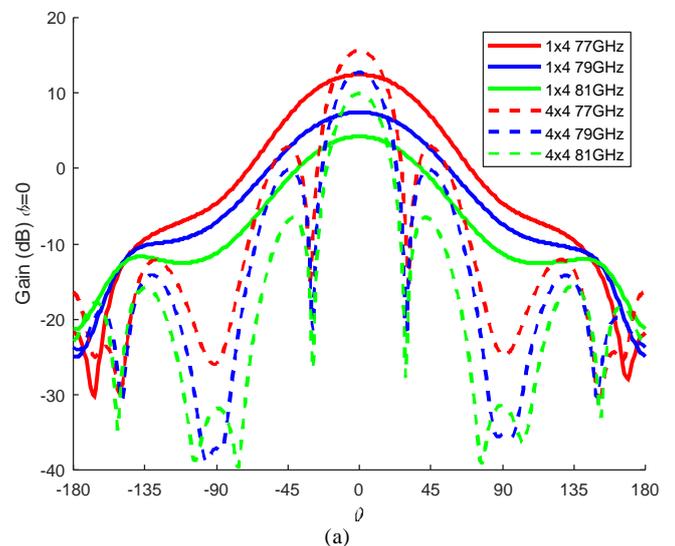


Fig. 4. Diagramas de radiación. (a) Corte para  $\phi=0^\circ$ . (b) Corte para  $\phi=90^\circ$

La Fig. 4 muestra el diagrama de radiación de la agrupación base 1x4 junto con la agrupación de recepción 4x4 a las distintas frecuencias de la banda para los dos cortes ortogonales ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) de la dirección phi (longitudinal y transversal). Puede observarse que el acoplamiento mutuo entre los elementos de la agrupación no influye negativamente en los resultados. Este hecho garantiza el funcionamiento de los elementos en la configuración de transmisión mostrada en rojo en la Fig. 2 aunque no se muestren las simulaciones en este trabajo. En el caso de transmisión se ha elegido una distribución espacial considerando que se trata de una aplicación donde se va a hacer uso de las ventajas de una configuración MIMO.

Para el conjunto de elementos en transmisión, se ha elegido una agrupación de tres grupos, separados entre sí una longitud de onda y no alineados, como se muestra en Fig. 2 en azul. Esta configuración permite la posibilidad de usar técnicas MIMO con la ventaja de poder considerar una agrupación virtual de hasta 12 elementos de 1x4 antenas.

El uso de técnicas MIMO en radares es usado habitualmente para mejorar significativamente la estimación del ángulo de llegada [13]. En este trabajo se han usado tres transmisores y cuatro receptores. De esta forma la agrupación de antenas virtual resultante es de 12 elementos que permiten mejorar la resolución angular del sistema. En este sistema como se ha comentado anteriormente se usará una señal FMCW, la gestión de esta señal es la que determinará la ganancia en la resolución angular final. Los parámetros de distancia de detección, velocidad y resolución angular dependerán de los valores que se establezcan en función de la aplicación a la que se destine el prototipo, el mismo sistema puede emplearse en radares de corto o medio alcance, por ejemplo.

### III. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

La agrupación de antenas desarrollada en la sección anterior se ha integrado en el sistema completo mostrado en la Fig. 1. Con el fin de poder realizar distintos sistemas para aplicaciones diferentes, como se comentó anteriormente, el sensor de ondas milimétricas se ha desarrollado en tres partes cada una implementada en una placa PCB de forma que pueden ser apiladas. En la Fig. 5 se muestra el conjunto de las tres placas apiladas desarrollado. La primera de las placas integra la alimentación del sistema y el conjunto de conectores que permiten la comunicación con el resto del sistema y la tercera placa que integra la circuitería necesaria para la depuración del sistema durante el desarrollo. Esta placa de depuración no formará parte del prototipo comercial. La placa denominada PCB2 integra la agrupación de antenas y el circuito integrado. Las placas PCB1 y PCB3 se han fabricado en tecnología de circuitos impresos convencional empleando FR4 con múltiples capas.

La placa PCB2, en cambio, se ha realizado con un doble proceso de fabricación mixto para poder integrar vías de diferentes tipos separando la parte de milimétricas de la parte de circuitos de procesado donde una máscara de soldadura era necesaria. Se ha empleado un apilamiento de sustratos de varios materiales como se muestra en la Fig. 6. En concreto se ha empleado RO4830 para la capa superior y FR4 para el

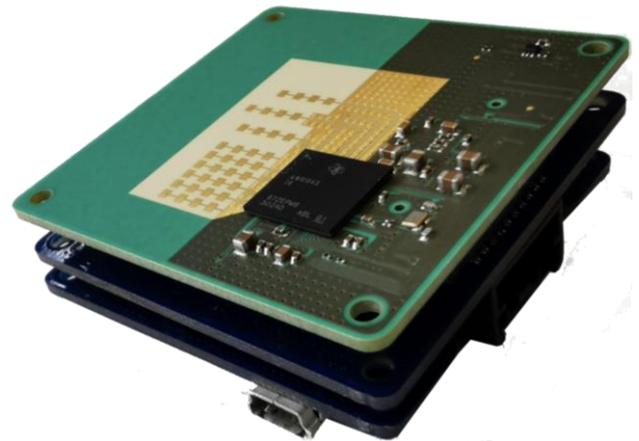


Fig. 5. Sensor diseñado dividido en capas

conjunto de capas que dan soporte a la estructura. Es importante indicar que esta separación en capas del sensor ha permitido reducir el coste del conjunto ya que el área que emplea el sustrato RO4830 es mucho menor y permite no tener que integrar el sistema de depuración en todos los prototipos. La Fig. 6 muestra la zona de unión entre el conjunto de antenas y el circuito integrado. La metalización para la protección del cobre de la zona de milimétricas se ha realizado con la deposición de níquel y oro a través de un proceso de deposición sin corrientes (*electroless plated*). Puede observarse como en la fabricación el plano de masa dorado frente a la zona donde se debe soldar los componentes accesorios al chip como condensadores y resistores que requieren de pads de estaño para su fabricación en un proceso de soldadura industrial. Las antenas se han conectado a los puertos de transmisión y recepción de la señal de radiofrecuencia empleando líneas de transmisión coplanar con plano de masa inferior.

La placa PCB1 integra todo el conjunto de elementos que permite la generación de las diferentes alimentaciones que son necesarias en el sistema. El transceptor empleado para comunicaciones can-bus es el TCAN1042-Q1, de TI. Esta familia de transceptores cumple con el estándar CAN (red de área de controlador) de alta velocidad ISO11898-2 permitiendo velocidades de datos de hasta 5 Mbps. Esta familia tiene un modo de espera de baja potencia con función de solicitud de activación remota, esta condición es importante para minimizar el consumo del sensor en caso de no estar operativo. Este circuito incluye funciones de protección para mejorar la interconexión del dispositivo diseñado con el resto de dispositivos en el bus.

Para el proceso de depuración, en la placa PCB3 se ha integrado el elemento XDS110 de TI. El objetivo de implementar este dispositivo es el de facilitar las tareas de programación y depuración del sensor de ondas milimétricas durante las pruebas de verificación. Este sistema de depuración admite todos los dispositivos de TI con puerto de depuración JTAG, cJTAG y SWD / SWO permitiendo la integración de futuros desarrollos con los nuevos integrados que TI se encuentra desarrollando para su próxima inclusión en el mercado. A través de esta placa se realiza la conexión para poder actualizar el software con los parámetros de las señales [14-15].

#### IV. CONCLUSIONES

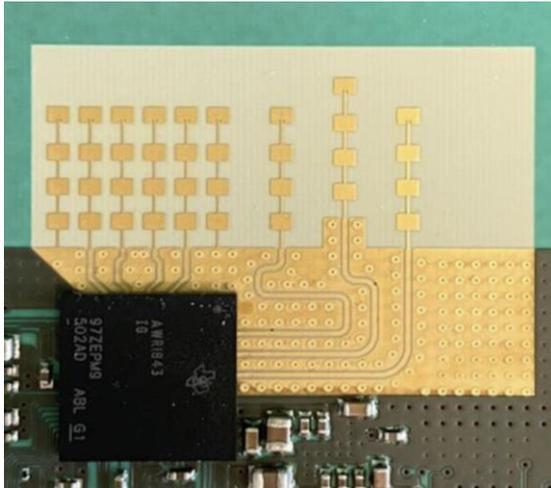
Esta comunicación presenta el desarrollo de un sensor modular en la banda de frecuencias de milimétricas. El sistema está integrado por todos los elementos necesarios para el desarrollo de aplicaciones fundamentalmente en automoción. El conjunto integrado hace uso de señales FMCW y permite la determinación de la distancia, la velocidad y el ángulo con respecto a la línea de visión de objetos. El sensor hace uso de agrupaciones de antenas de parche microstrip alimentados en serie en transmisión y recepción que proporcionan la ganancia y el ancho de haz necesarios para garantizar el cometido con el que ha sido diseñado. Se ha empleado la plataforma de TI para el desarrollo del sensor en su conjunto. La gran integración de la familia de circuitos empleado ha permitido un tamaño final muy reducido.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con fondos del proyecto ITC-20181093 CARCIS – *Car Assisted with Radar and Camera Intelligent Sensors* cofinanciado con fondos FEDER y CDTI.

#### REFERENCIAS

- [1] Society of Automobile Engineers International, "Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for onroad motor vehicles," 2016. [Online]. Available: [http://standards.sae.org/j3016\\_201609/](http://standards.sae.org/j3016_201609/)
- [2] H. H. Meinel, "Evolving automotive radar: From the very beginnings into the future," in *Proc. European Conf. Antennas and Propagation*, Hague, The Netherlands, 2014, pp. 3107–3114.
- [3] J. Dickmann *et al.*, "Automotive radar the key technology for autonomous driving: From detection and ranging to environmental understanding," in *Proc. IEEE Radar Conf. (RadarConf)*, May 2016. doi: 10.1109/RADAR.2016.7485214.
- [4] European Telecommunications Standards Institute Short Range Devices; Transport and Traffic Telematics (TTT); Short Range Radar Equipment Operating in the 77 GHz to 81 GHz Band; Harmonised Standard Covering the Essential Requirements of Article 3.2 of Directive 2014/53/EU, ETSI EN 302 264, 2017.
- [5] D. Belgiovane and C.-C. Chen, "Bicycles and human riders Backscattering at 77 GHz for automotive radar," in *Proc. European Conf. Antennas and Propagation (EuCAP)*, Apr. 2016.
- [6] J. Contreras-Castillo, S. Zeadally, and J. A. Guerrero-Ibanez, "Internet of vehicles: architecture, protocols, and security," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3701–3709, 2017.
- [7] F. Jameel, Z. Chang, J. Huang, and T. Ristaniemi, "Internet of autonomous vehicles: Architecture, features, and socio-technological challenges," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 4, pp. 21–29, 2019.
- [8] V. Winkler, "Range Doppler detection for automotive FMCW radars," in *Proc. 4th European Radar Conf. (EuRAD)*, Oct. 2007, pp. 166–169.
- [9] G. Hakobyan and B. Yang, "High-Performance Automotive Radar: A review of signal processing algorithms and modulation schemes", *IEEE Signal Processing Magazine*, September 2019, pp. 32–44.
- [10] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley and Sons, 1997.
- [11] J. Freese, R. Jakoby, H. Blocher and J. Wenger, "Synthesis of microstrip series-fed patch arrays for 77 GHz-sensor applications," *2000 Asia-Pacific Microwave Conference. Proceedings (Cat. No. 00TH8522)*, Sydney, NSW, Australia, 2000.
- [12] W. Wang, et al.: "A 77 GHz Series Fed Weighted Antenna Arrays with Suppressed Sidelobes in E-and-H-Plane," *PIER Letters* vol. 72, 2018.
- [13] Vivek Dham, Programming Chirp Parameters in TI Radar Devices, Application Report SWRA553A–May 2017–Revised February 2020.
- [14] Anand Gadiyar, Karthik Subburaj, Sumeer Bhatara, Self-Calibration in TI's mmWave Radar Devices. Application Report SPRACF4–June 2018.
- [15] Sandeep Rao, MIMO Radar, Application Report SWRA554A–May 2017–Revised July 2018.
- [16] H. Sun, F. Briguì and M. Lesturgie, "Analysis and comparison of MIMO radar waveforms," *2014 International Radar Conference*, Lille, 2014.



(a)

TOP		1/2oz	Cu/Ni/Gold
L1	Rogers RO4830	5mils	Er: 3.24
		1/2oz	Cu/Ni/Gold
L2	FR4	45 mils	Er4.2
		1oz	Cu
	FR4	5mils	Er: 4.2
BOTTOM		1/2 oz	Cu/Sn

(b)

Fig. 6. Integración de la agrupación de antenas y el sistema de procesamiento de señal y comunicaciones. (a) Detalle de la agrupación de parches y las líneas de alimentación de las antenas. (b) Características de la placa PCB2.

El circuito AWR1843 de TI integra en un solo encapsulado una unidad microcontroladora (MCU) de altas prestaciones MCU-ARM Cortex R4F con velocidad de reloj de 200MHz, un DSP de la serie C674x a 600MHz. Junto con los elementos de procesamiento y gestión el AWR1843 integra un sistema radio con tres transmisores y cuatro receptores que son conformados de forma digital permitiendo un sistema MIMO [16-17].

El hecho de que ambos sistemas, radio y procesamiento de señal, estén encapsulados en el mismo paquete facilita la transferencia entre el procesamiento de señales y el post-análisis en el MCU, el cual suministra los datos filtrados directamente a través de dos interfaces distintas en función del caso de uso. En el caso de uso de programación y depuración del sistema los datos son transmitidos vía UART al MCU de depuración XDS110, el cual envía estos mismos vía USB a un ordenador. En el funcionamiento normal, la información es transmitida en tiempo real por el interfaz can-bus del AWR1843.

En el futuro está previsto el desarrollo de algoritmos específicos para la caracterización OTA (*Over The Air*) de las propiedades de las antenas en cámara anecoica. A la frecuencia de funcionamiento este tipo de caracterización es fundamental para evitar las pérdidas de propagación, tanto en la placa del circuito como en el propio canal radio en la banda de 77-81 GHz.