

# Detección de objetos mediante un radar compacto en banda de milimétricas

Humberto Fernández Álvarez<sup>(1)</sup>, Jaime Laviada<sup>(1)</sup>, Ana Arboleya Arboleya<sup>(2)</sup>, Fernando Las-Heras<sup>(1)</sup>, etc.

hfernandez@tsc.uniovi.es, jlaviada@tsc.uniovi.es, flasheras@tsc.uniovi.es

<sup>(1)</sup> Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oviedo.

<sup>(2)</sup> Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Université Nice Sophia Antipolis.

**Abstract-** The characteristics of a compact new generation radar in the millimeter band are tested and their ability to identify targets is shown. The bases of FMCW radar are explained using mathematical formulation and a block diagram. Moreover, the imaging algorithm used to process the retrieved measurements is presented. The radar under test is a highly compact system-on-chip commercialized by Infineon for the detection of hand and finger gestures by exploiting the micro Doppler effect. To the authors' best knowledge, it is the first publication in which this radar is used to identify targets by means of synthetic aperture imaging. For doing so, a suitable measurement set-up is devised with proper planar absorbers to avoid unwanted echoes. A great image quality is obtained using the radar and the processing algorithm introduced here.

## I. INTRODUCCIÓN

Los radares de onda continua (CW) han sido comúnmente utilizados para detectar objetos tanto estáticos como móviles en diversos entornos [1]. Estos radares emiten señales moduladas (bien sea en amplitud o en fase) o sin modular en función de los requisitos de la aplicación. Según el tipo de radar y la modulación utilizada, diferentes técnicas de procesado son empleadas para obtener la información deseada a partir de los datos recopilados. En este documento se estudiará el funcionamiento y características de un radar comercial de onda continua que usa una modulación en frecuencia (FMCW) con el objetivo de identificar blancos estáticos [2].

Los radares FMCW son comúnmente utilizados en automoción como sensores de proximidad, por ejemplo en las maniobras de aparcamiento o para evitar colisiones con otros vehículos durante la marcha [3]. Estos radares también se utilizan en sistemas de seguridad y vigilancia, para la detección de objetos potencialmente peligrosos [4]. Además su utilización en la banda de frecuencia milimétrica ofrece la posibilidad de obtener una gran resolución de imagen sin la necesidad de utilizar técnicas invasivas que deterioren el objeto o estructura bajo análisis [5]. Otras aplicaciones de los mismos se recogen en [6].

Este tipo de radares no solo se han popularizado por la gran cantidad de aplicaciones que poseen, sino que también por su reducido tamaño, pudiendo encontrarse de forma cada vez más frecuente en vehículos aéreos no tripulados (UAVs) [7]. La reducción de costes que supone la implementación de estos radares en bandas milimétricas debido al actual desarrollo de la tecnología 5G y los radares automovilístico en dicha banda [2], [7]-[8], es otro de sus principales atractivos.

El chip comercial EVAL BGT60TR24B [9], el cual ha sido diseñado por la compañía Infineon para la detección de gestos y que está siendo explotado por Google mediante el proyecto SOLI [10], será el utilizado a lo largo de este documento para estudiar su posible utilización como radar FMCW para la detección de objetos, lo cual hasta donde los autores conocen es la primera vez que se publica una caracterización del mismo en este sentido, debido a su reciente aparición y comercialización.

## II. RADAR FMCW

### A. Principios básicos

Los radares FMCW se caracterizan por transmitir una señal de onda continua modulada linealmente en frecuencia, también conocida como chirp. Existen diferentes patrones de modulación cuya elección depende de la aplicación para la cual se utilizará el radar. En este documento se ha elegido utilizar el patrón de modulación sawtooth (diente de sierra), que se caracteriza por un aumento de la frecuencia con el tiempo (up-chirp). Esta elección se debe a que los blancos analizados serán estáticos y el radar utilizado solo permite patrones sawtooth o triangulares, cuya diferencia se encuentra principalmente en la detección de objetos que se mueven a gran velocidad. El patrón utilizado se representa en Fig. 1.

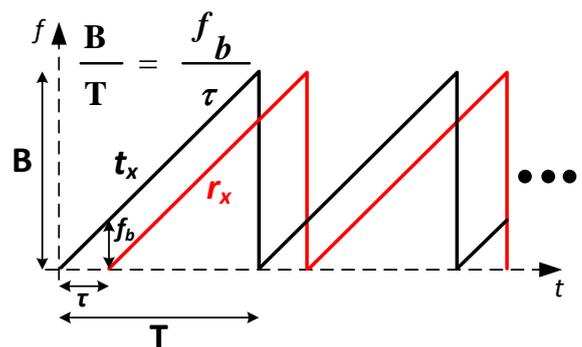


Fig. 1. Señal transmitida y recibida por un radar FMCW.

La señal transmitida puede expresarse matemáticamente de la siguiente forma:

$$s_{t_x}(t) = e^{j2\pi(f_c t + \frac{1}{2}\alpha t^2)} \quad (1)$$

siendo  $f_c$  la frecuencia central de la banda,  $\alpha$  la variación de la frecuencia con el tiempo (tasa de variación de la señal

chirp) la cual se puede expresar como  $\alpha = \frac{B}{T}$ , siendo B el ancho de banda de la señal transmitida y T la duración del chirp. La señal recibida será idéntica a la transmitida pero sufriendo un retardo  $\tau$  correspondiente al tiempo que tarda la señal transmitida en impactar con el blanco y el eco de la misma en volver al radar ( $\tau = \frac{2R_0}{c}$ , siendo  $R_0$  la distancia entre el radar y el blanco y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío).

Por otro lado, la señal recibida será igual a la transmitida pero retardada:

$$s_{rx}(t) = e^{j2\pi(f_c(t-\tau) + \frac{1}{2}\alpha(t-\tau)^2)} \quad (2)$$

Como se puede apreciar en Fig. 1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** al mezclar las señales transmitida y recibida, aparece una frecuencia diferencia (o frecuencia de batido  $f_b$ ) la cual puede relacionarse con el retardo que sufre la señal recibida ( $f_b = \alpha\tau$ ). Dicho retardo se relaciona con la distancia entre el radar y el blanco de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{2R_0}{c} = \frac{f_b T}{B} \rightarrow R_0 = \frac{f_b T c}{2 B}$$

Por consiguiente, implementando un mezclador y un filtro paso bajo en la cadena receptora del radar, es posible extraer la frecuencia diferencia.

La señal a la salida del mezclador (señal de batido o de frecuencia intermedia) se representa matemáticamente de la siguiente forma:

$$s_b(t) = s_{tx}(t)s_{rx}^*(t) = e^{j2\pi(f_b t + f_c \tau - \frac{1}{2}\alpha\tau^2)} \quad (3)$$

Esta señal se compone de tres exponenciales y solo una de ellas es la que contiene la frecuencia de batido, las otras dos exponenciales se corresponden con la fase residual de video y son fases que deben ser filtradas mediante procesamiento para que no afecten en la visualización de los resultados [2].

Por tanto, el funcionamiento de un radar FMCW común suponiendo que tanto el transmisor como el receptor están calibrados se puede resumir mediante el diagrama de bloques que se representa en Fig. 2.

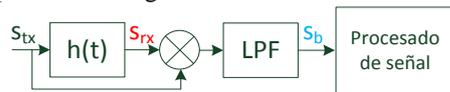


Fig. 2. Diagrama de bloques de un radar FMCW

La señal transmitida por el radar se propaga por un canal cuya respuesta será una combinación lineal de funciones como la representada en (2), en función del número de blancos presentes en el sistema. La señal recibida se mezcla con la señal transmitida y se obtiene una señal a la frecuencia diferencia de ambas una vez que pasa por un filtro paso bajo. Por último, a la señal de salida del filtro (señal de batido) se le aplica un procesamiento para generar una imagen que represente el sistema.

### B. Procesado de la señal

Una vez se ha transmitido la señal y se han recibido los ecos de los diferentes blancos es necesario llevar a cabo un procesamiento de la señal de batido. Hay diferentes tipos de procesamiento y correcciones que se deben aplicar a la señal recibida en función de cómo se han captado los datos y la información que se quiere visualizar. En el caso de este

documento se utilizará un radar con una apertura sintética en una dimensión trabajando en modo “stripmap” y se utilizará un procesamiento similar a [12] cuyo diagrama de bloques queda reflejado en Fig. 3 y se explicará a continuación.

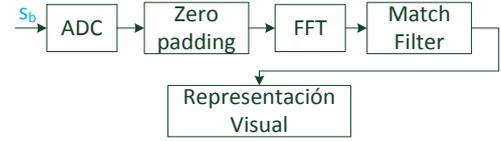


Fig. 3. Diagrama de bloques del procesamiento de señal utilizado

La señal a la salida del filtro paso bajo (señal de batido) es muestreada (con una frecuencia de muestreo  $f_{ADC} = 2MHz$ ), posteriormente se añaden ceros (zero padding) para aumentar la resolución de la transformada rápida de Fourier que se aplicará a continuación. Esta señal en el dominio transformado permite la “compresión en rango”, de modo que el contenido espectral es similar a la respuesta al impulso del sistema salvo por los términos de fase adicionales (que se han detallado en (3)). A esta señal en el dominio frecuencial se le aplica un filtro para eliminar la fase residual de video (Residual Video Phase, RVP) y por último se suman en un muestreo 2D (en rango y azimut) las diferentes contribuciones de las señales que se han obtenidas en cada punto de muestreo de la apertura sintética.

### C. Características del chip EVAL BGT60TR24B

Se ha elegido el chip EVAL BGT60TR24B para llevar a cabo las medidas, ya que incorpora tanto la etapa transmisora como la receptora en unas dimensiones muy reducidas y sin la necesidad de utilizar otro tipo de circuitos adicionales que lleven a cabo las labores de mezclado y filtrado de las señales puesto que el chip ya incorpora dicha circuitería. Además, dispone de una interfaz que permite enviar las medidas a un PC para su posterior almacenamiento y procesamiento.

El módulo de RF del chip se compone de un VCO capaz de generar señales entre 56GHz y 64GHz y que utiliza un PLL para realizar el enganche en fase, dos antenas transmisoras, cuatro receptoras, un mezclador, un amplificador, un filtro paso bajo, un convertor analógico digital para tomar las muestras de la señal de batido y una memoria para almacenar dichas muestras y que puedan ser transferidas a un PC mediante una interfaz USB.

El chip permite ajustar vía software mediante un microcontrolador integrado en el mismo, diferentes parámetros como el ancho de banda y el tipo de chirp, el número de muestras y la frecuencia de muestreo del ADC, la potencia transmitida y también permite activar o desactivar las diferentes antenas tanto transmisoras como receptoras.

## III. MEDIDAS

Se ha dispuesto un set-up de medida para testear el chip. Dicho set-up se compone de una mesa óptica metálica sobre la que se sitúa en un lado de la misma y centrado un posicionador micrométrico ajustable sobre el que se situará el radar, en los otros tres extremos de la mesa y sobre la misma se situarán absorbentes planos para evitar posibles ecos no deseados. El set-up se muestra en Fig. 4.

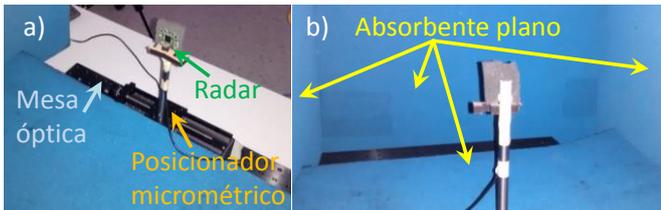


Fig. 4. Set-up de medida cilindros metálicos.

Por simplicidad el radar se configura de tal forma que solo se habilita una antena transmisora y otra receptora. La apertura sintética tendrá una longitud de 10cm y las muestras se tomarán cada 1mm para evitar efectos de aliasing en la imagen ( $\frac{\lambda_{min}}{4} = 1.17mm$ ) [11]. En cada punto de la apertura se promediarán entre 5 y 8 medidas para disminuir el fondo de ruido. Para calibrar el set-up se realizan medidas en vacío antes y después de situar los blancos para su detección. La frecuencia de muestro del ADC será de 2MHz. Estos parámetros se mantendrán en todas las medidas presentadas en este documento.

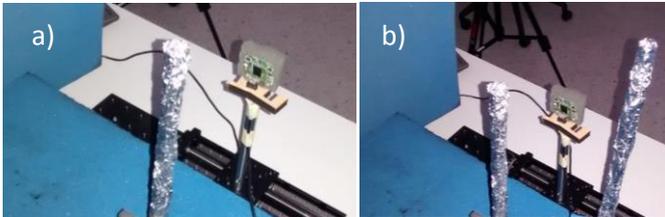


Fig. 5. Set-up con (a) un blanco, (b) dos blancos

En una primera medida se pretende localizar un blanco (Fig. 5(a)) utilizando un ancho de banda de 4GHz con una frecuencia central de 60GHz y tomando 256 muestras de la señal de batido. Dicho blanco es un cilindro recubierto con papel film metálico situado a una distancia de 13cm del radar. Los resultados obtenidos se muestran en Fig. 6(a). El objeto aparece a 13.6cm del radar por lo que se tiene un error absoluto de 0.6cm en la identificación del objeto. Considerando la resolución en rango de la que se dispone para el ancho de banda considerado ( $\Delta R = \frac{c}{2B} = 3.75cm$ ), es posible verificar la validez y precisión de la medida realizada. Sin embargo, el procesamiento utilizado deja una estela bastante importante que puede afectar a la precisión en la identificación del blanco. Por ello, se lleva a cabo un segundo procesamiento (en el bloque de representación visual Fig. 3) que consiste en substrar en cada pixel representado el valor de una medida en vacío, obteniendo así la Fig. 6(b), donde no solo se identifica el objeto con más claridad sino que además se disminuye el error en la identificación de los blancos, pasando este a ser de 0.4cm.

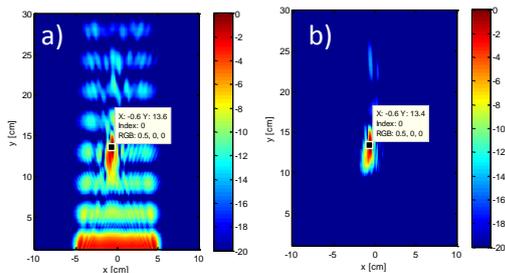


Fig. 6. (a) Medida de un blanco, (b) medida procesada.

A continuación, se intentan identificar dos blancos (Fig. 5(b)), estos blancos son idénticos al cilindro metálico

considerado en el caso anterior. La distancia en rango entre ellos es de 6.5cm y en azimuth de 10.6cm. Además el primer blanco se coloca a una distancia de 11.5cm del radar. Las medidas se representan en Fig. 7. Utilizando el procesamiento anteriormente comentado es posible identificar con claridad ambos blancos y reducir el error en su identificación. Este error considerando la distancia relativa entre blancos es de 0.6cm en azimuth y de 0.3cm en rango. El error debido a la distancia entre el radar y el primer blanco es de 0.9cm. Los errores en rango son coherentes con la resolución anteriormente comentada. En azimuth dicho error puede estimarse usando la formulación de [13] ( $\Delta x = \frac{cR}{2fcL}$ , siendo  $R$  la distancia a un punto intermedio entre los dos blancos y  $L$  la longitud de la apertura sintética). Considerando  $R=9cm$ , dicha resolución en azimuth es de 0.22cm, lo que indica que el error es mayor que la resolución que debería obtenerse, esto es debido a que la formulación planteada en [13] es una aproximación y que las antenas que integran este radar no son muy directivas. Otra posible fuente de error puede estar en la imprecisión al determinar las posiciones de los blancos.

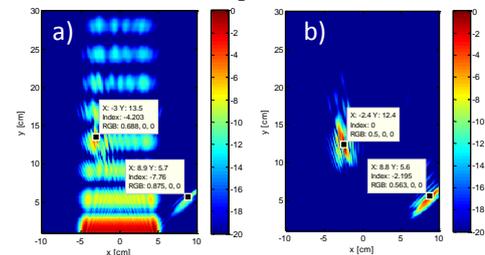


Fig. 7. (a) Medida de un blanco, (b) medida procesada.

Con el objetivo de comprobar la linealidad del VCO y mejorar la resolución en rango, se aumenta el ancho de banda del radar, sin modificar la frecuencia central de la banda, pasando a ser este ancho de banda 6GHz. Además, para mejorar la resolución al realizar el procesamiento de la señal se aumenta el número de muestras que se toman de la señal de batido considerando en este caso 1024 puntos. Se realizan medidas para uno y dos blancos como en el caso anterior y las medidas después de realizar el segundo procesamiento anteriormente comentado se ilustran en la Fig. 8. Considerando solo un blanco (Fig. 8(a)) situado a una distancia de 11cm, el error en la determinación de la posición del mismo es de 0.5cm. En la segunda medida (Fig. 8(b)), la distancia entre blancos en azimuth es de 11.2cm y en rango de 3.3cm, por tanto el error es de 0.6cm y 0.2cm, respectivamente. La distancia del radar al primer blanco es de 11.5cm siendo el error cometido en su identificación de 0.4cm. Los errores son similares al caso anterior, pero en este caso la definición de los blancos es más precisa, debido al aumento del número de muestras tomadas y a que la energía se concentra en mayor medida en torno al blanco gracias al aumento del ancho de banda.

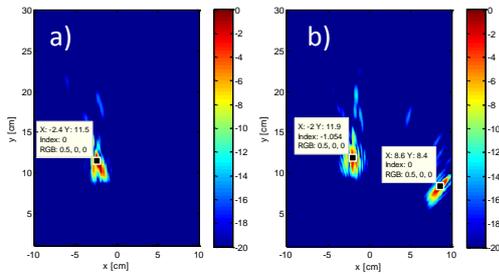


Fig. 8. (a) Medida procesada de un blanco, (b) medida procesada de dos blancos.

Por último, se intenta localizar dos bolas metálicas de reducido tamaño. Estas se sitúan separadas 4.7cm en azimut y 1.8cm en rango y la distancia de la primera bola al radar en rango es de 8.85cm, tal como se muestra en la Fig. 9. Los parámetros del radar son los mismos que en el caso anterior.

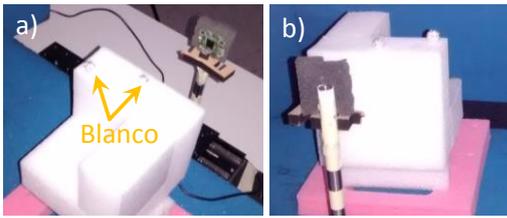


Fig. 9. Set-up de medida bolas metálicas.

Esta medida se representa en Fig. 10, por consiguiente los errores cometidos considerando la distancia entre bolas son de 0.1cm en azimut y 0.6cm en rango. El error cometido al identificar la distancia a la que se encuentra la primera bola metálica respecto del radar es de 0.05cm. Las resoluciones en azimut (considerando  $R=10.1\text{cm}$ ) y en rango son de 0.25cm y 2.5cm respectivamente, por tanto los errores cometidos están dentro de lo que se espera al utilizar un radar de estas características y con los parámetros anteriormente descritos.

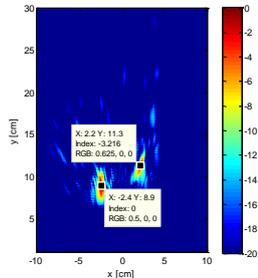


Fig. 10. Medida de las bolas metálicas

#### IV. CONCLUSIONES

En este documento se han recogido las medidas realizadas con un chip de última generación EVAL BGT60TR24B de la compañía Infineon y que ha sido utilizado como radar de onda continua y frecuencia modulada (FMCW) de alta resolución para la identificación de blancos estáticos. El procesado de los datos medidos por el radar, mediante un algoritmo de imagen, utilizando una apertura sintética, muestra unos resultados muy precisos y coherentes con lo que se esperarí obtener utilizando un chip de estas características. Cabe destacar la precisión y la definición de las imágenes obtenidas, haciendo posible la identificación de blancos de reducido tamaño.

Gracias a las reducidas dimensiones del chip y a su bajo coste es posible utilizarlo en dispositivos portátiles para

obtener imágenes en tiempo real de objetos ocultos, lo cual es de gran utilidad en sistemas de seguridad.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España/FEDER bajo los proyectos PortEMVision (TEC2014-55290-JIN) and MIRIEM (TEC2014-54005-P); por el Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto PCTI 2013-2017 GRUPIN14-114; y por las Ayudas Fundación BBVA a Investigadores y Creadores Culturales 2016.

#### REFERENCIAS

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems* Mc Grow-Hill, 2001.
- [2] A. Meta, *Signal processing of FMCW synthetic aperture radar data* Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology.
- [3] J.J. Lin, Y.P. Li, W.C. Hsu and T.S. Lee "Design of an FMCW radar baseband signal processing system for automotive application," *SpringerPlus*, 5(1), 42, 2016.
- [4] D.A. Robertson, D.G. Macfarlane, S.L. Cassidy, T. Bryllert, E. Gandini and N. Lombart, "Submillimetre wave 3D imaging radar for security applications," *IET Digital Library*, 2016.
- [5] C. Li, W. Chen, G. Liu, R. Yan, H. Xu and Y. Qi, "A Noncontact FMCW Radar Sensor for Displacement Measurement in Structural Health Monitoring," *Sensors*, 15(4), 2015,7412-7433.
- [6] A.G. Stove, "Modern FMCW radar-techniques and applications," *In IEEE First European Radar Conference, EURAD*, October 2004 pp. 149-152.
- [7] S. Navneet, A. Roy and C. Bhattacharya "Image generation algorithms for FMCW-SAR at X-Band," *In 9th International Radar Symposium India* 2013.
- [8] M. Vossiek, P. Heide, M. Nalezinski and V. Magori, "Novel FMCW radar system concept with adaptive compensation of phase errors," *In IEEE 26th European Microwave Conference*, vol. 1, September 1996, pp. 135-139.
- [9] I. Nasr et al., "A Highly Integrated 60 GHz 6-Channel Transceiver With Antenna in Package for Smart Sensing and Short-Range Communications," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 9, pp. 2066-2076, Sept. 2016.
- [10] Infineon Technologies AG. The world's first radar-based key technology making the augmented reality breakthrough a reality. Último acceso: 22 de Abril de 2017, url: <http://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/soli/>.
- [11] J. Laviada Y. Álvarez-López A. Arboleya-Arboleya C. García-González, F. Las-Heras, "Inverse scattering with phase retrieval based on indirect holography via synthesised plane-waves", *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 6, no. 12, págs. 1389 - 1398, 2013.
- [12] C. Stringham and D. G. Long, "Improved processing of the casie SAR data," 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, 2011, pp. 1389-1392.
- [13] J. M. Lopez-Sanchez and J. Fortuny-Guasch, "3-D radar imaging using range migration techniques," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 5, pp. 728-737, May 2000.