



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.38.1.621.38>

Sistema de radar SDR de onda continua múltiple implementado mediante GNU Radio

Multiple frequency continuous wave SDR radar implementation using GNU Radio

JOSÉ DE JESÚS RUGELES URIBE*

JUAN CARLOS MARTÍNEZ QUINTERO**

LUIS EDUARDO QUIBANO ALARCÓN***

*Docente planta Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones. jose.rugeles@unimilitar.edu.co

**Docente planta Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones. juan.martinezq@unimilitar.edu.co

***Auxiliar de investigación Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Grupo de Investigación GISSIC. u1400855@unimilitar.edu.co

Correspondencia: José de Jesús Rugeles Uribe. Dirección: Carrera 11 # 101-80, Bogotá (Colombia). Teléfono: +57 300 454 7586, 6500000 ext. 1282/184.

Origen de subvenciones: Financiación total por parte de la Universidad Militar Nueva Granada, proyecto de investigación INV-ING- 2647.



Resumen

Radio definido por software (SDR) es una tecnología reconocida en la industria de telecomunicaciones por su capacidad para desarrollar sistemas de comunicación reconfigurables. Este trabajo presenta el diseño, la implementación y la evaluación de un radar de bajo costo utilizando la librería *gr-radar* disponible desde la versión 3.7.4 de GNU Radio. La evaluación de desempeño del radar implementado se realizó mediante pruebas en espacio abierto donde fue posible medir con gran exactitud la distancia y la velocidad de un objeto en movimiento. En la estimación de la velocidad se obtuvo un error de 1,98 % en el trayecto de ida y de 3,22 % en el de regreso. Para la estimación de posición se obtuvo un error promedio de 1,56 % para los trayectos de ida y de 2,75 % en el regreso. El sistema de radar fue configurado para transmitir a 2,4 GHz con la técnica de ondas continuas múltiples. El escenario en el que se desarrolló la prueba del sistema fue el campus de la Universidad Militar Nueva Granada, en Cajicá (Colombia). Los resultados mostrados en este trabajo se orientan a la profundización en las técnicas de radar empleando herramientas de bajo costo.

Palabras claves: GNU Radio, múltiple CW, radar, radar bajo costo, radar corto alcance, SDR.

Abstract

Software Defined Radio (SDR) is a technology with recognition in Telecommunication industry because of its capacity of developing reconfigurable communication systems. This paper presents the implementation and field-testing evaluation for a low-cost radar system using the *gr-radar* toolbox created into the version 3.7.4 of GNU Radio. Tests allowed to measure distances and velocities of a target in movement. Velocity estimation errors were obtained with 1.8% and 3.22% in a round trip. Range estimation errors were also obtained with 1.56% and 2.75% in a round trip. Radar system was configured to transmit at 2.4 GHz with Multiple CW technique. The test scenario was the Nueva Granada Military University Campus in Colombia. The results are oriented toward using this tools for deepening on basic Radar principles with low-cost devices.

Keywords: GNU Radio, Low-cost radar, Multiple CW, Radar, SDR, Short range Radar.

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de radar se utilizan con frecuencia tanto en entornos civiles como militares. Algunas de sus aplicaciones buscan el desarrollo de sistemas de navegación vehicular [1], la detección de minas antipersona [2]–[4], el diseño de nuevos sensores [5], el diseño de escáneres biomédicos [6], o el procesamiento de señales SAR (synthetic aperture radar) [7], [8], etc. Su desarrollo continúa avanzando gracias a los niveles de integración logrados por la electrónica de alta frecuencia y los avances en las técnicas de procesamiento de señales.

El estudio de las tecnologías de radar requiere de la profundización en los fenómenos electromagnéticos de la radiopropagación y del análisis del comportamiento de las señales de radiofrecuencia ante diversos tipos de materiales, al abordar conceptos físicos de la teoría electromagnética como, por ejemplo, las ecuaciones de Maxwell, las propiedades de los materiales y los efectos ópticos de las ondas de radio, entre otros. Llevar a la práctica estos conceptos, desde el punto de vista de la ingeniería, requiere, además de conocimientos y profundización en antenas, instrumentación en sistemas de comunicaciones y procesamiento de señales. En la academia, a nivel mundial, las tecnologías de radar, por lo general, se estudian durante una formación especializada en la que se parte de los análisis teóricos para, posteriormente, realizar simulaciones y, en algunos casos, pruebas de laboratorio. Sin embargo, se encuentran esfuerzos que buscan incrementar el interés de los estudiantes hacia el área de la teoría electromagnética y sus aplicaciones. Un ejemplo es el laboratorio Lincoln del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Allí se imparte un curso de radar [9] en el que los estudiantes, además de estudiar los conceptos teóricos, construyen un radar de bajo costo que les permite realizar mediciones y experimentar en diversos ambientes para, posteriormente, analizar las señales en el aula.

En este sentido, la evolución de la tecnología de radio definido por *software* (SDR) ha impulsado el desarrollo de avanzados sistemas de radiocomunicación a un bajo costo [10], lo cual ha permitido que conceptos abstractos puedan implementarse fácilmente mediante dispositivos *hardware* reconfigurables. La Unión Internacional de Telecomunicaciones define la tecnología de radio definido por *software* (SDR) en los siguientes términos:

Un transmisor y/o receptor radioeléctrico que utiliza una tecnología que permite fijar o modificar mediante programas informáticos los parámetros de funcionamiento de RF, incluidos, entre otros, la gama de frecuencias, el tipo de modulación o la potencia de salida, salvo los cambios de los parámetros de funcionamiento que se producen durante el funcionamiento normal preinstalado y predeterminado de un sistema radioeléctrico con arreglo a una especificación del sistema o a una norma. [11]

La flexibilidad de los sistemas SDR permite que una misma plataforma *hardware* se pueda emplear para la implementación de diversos tipos de tecnologías de comunicación. En [12] y [13] se describe su origen, su evolución y el impacto que ha tenido esta tecnología durante los últimos años. Asimismo, en [12] se describe un método para la implementación de un radar FMCW en ambientes cerrados. El método desarrollado permite corregir errores y reducir las reflexiones ocasionadas por objetos estáticos. En la implementación se utilizó Matlab, Smulink, GNU Radio y un radio USRP. Los resultados obtenidos muestran una mejora en la exactitud de la detección respecto a otros métodos convencionales. Ahora bien, en [15] los autores presentan una implementación de la técnica *stepped frequency radar*, en la cual se utilizaron saltos de frecuencia con el fin de incrementar el ancho de banda de los dispositivos USRP. En [16] se describe la implementación de un radar de vigilancia FMCW empleando una USRP B210 y GNU radio; el sistema desarrollado permite la detección de drones en un rango de hasta 150 m. En [17] se presenta una metodología que permite detectar la presencia de objetos en movimiento a partir del análisis de la señal dópler en el dominio de la frecuencia, empleando la técnica FMCW a 1GHz con una antena Logo periódica. En [18] se describe la arquitectura de diseño de un sistema básico de radar de onda continua modulada (FMCW) para aplicaciones climáticas utilizando GNU Radio y el *hardware* USRP N210 en la frecuencia de 2,1 GHz. El desarrollo de un sistema de radar pasivo se describe en [19], en el cual el procesamiento de las señales permite realizar el seguimiento de un objeto empleando un arreglo de antenas conmutadas de forma digital. Por su parte, [20] presenta el diseño e implementación de un sistema de radar pasivo utilizando señales wifi para identificar los patrones de señal dópler que produce el movimiento del cuerpo humano. El sistema permite identificar algunos gestos de una persona al mover los hombros, los brazos o las manos; el uso de este tipo de aplicación abarca escenarios tales como la interacción humano-máquina y el cuidado médico.

Ahora bien, GNU radio [21] es una herramienta *software* que contiene los elementos necesarios para crear múltiples arquitecturas en el procesamiento de señales de radio. En la actualidad cuenta con un gran número de *toolboxes* especializadas en tecnologías, como, por ejemplo, comunicaciones satelitales, DVB-TV y radar, entre otros. Stefan Wünsch, del Instituto de Tecnológico de Karlsruhe en Alemania [22], implementó una librería de radar para GNU Radio en el 2014. La librería incluye componentes programables empleados en las arquitecturas de radar tales como CW, FMCW, FSK y Múltiple CW. Su trabajo fue presentado en la conferencia mundial de GNU Radio del 2014 y, posteriormente, la librería se incluyó en la plataforma GNU Radio desde su versión 3.7.4.

Este artículo presenta los resultados de la implementación de prototipo de radar de onda continua múltiple (Múltiple CW), el cual permite medir distancia y velocidad

utilizando tecnología de radio definido por *software*. El sistema de radar está compuesto por dos USRP N210 con tarjetas hijas XCVR 2450, con una frecuencia de operación de 2,45 GHz, dos antenas bocina HF 907 y un GNU Radio versión 3.7.4 instalado en el sistema operativo Linux Mint 17.1, junto con la librería gr-radar. En este documento se presentan los resultados de la medida de distancia y velocidad de una persona caminando frente al radar en un trayecto de 25 m de ida y regreso. Al tener en cuenta las mediciones realizadas, se encontró que la relación entre la velocidad medida por el radar y la obtenida mediante la relación tiempo-desplazamiento tiene un error promedio de 2,6 %. Para la estimación de posición se obtuvo un error promedio de 2 %, al tener en cuenta los desplazamientos de ida y regreso. Los resultados obtenidos son un aporte importante a la comunidad académica interesada en el estudio de las tecnologías de radar, ya que evidencia cómo es posible implementar un sistema de radar flexible con un alto desempeño y a un bajo costo.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma: primero, se describen los aspectos teóricos básicos de las tecnologías de radar de onda continua, onda continua modulada y onda continua múltiple; posteriormente, se describen el montaje y los experimentos realizados, así como el sistema de bloques desarrollado en GNU Radio; finalmente, se presentan y discuten los resultados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Tecnologías de radar

Radar de onda continua (CW)

También conocido como “radar dópler”, permite medir la velocidad de un objeto en movimiento. Su funcionamiento se basa en encontrar las variaciones en la frecuencia ocasionadas por el objeto reflectante; esta variación se conoce como “frecuencia dópler” [23]. La relación entre la velocidad y la frecuencia dópler se observa en la ecuación 1, en la que f_d corresponde a la frecuencia dópler (H_z), v a la velocidad del objetivo (m/s), C a la velocidad de la luz (m/s) y f_o a la frecuencia de transmisión (H_z).

$$f_d = \frac{2v}{C} f_o \quad (1)$$

Una de las falencias del radar de onda continua es su imposibilidad para determinar la ubicación del objeto en movimiento.

Radar de onda continua modulada (FMCW)

Con en este tipo de radar, además de medir la velocidad de un objeto, es posible encontrar su posición. Para el desarrollo de esta técnica se requiere determinar la frecuencia d'opler, el retardo de la señal y la duración del cambio de frecuencia en la transmisión [24]. La señal que se transmite sufre un cambio de frecuencia de manera periódica asemejándose a una señal modulada en FM [25].

Radar de onda continua múltiple (Múltiple CW)

Empleando múltiples frecuencias, es posible determinar de manera óptima los valores de distancia sin tener que recurrir a la técnica FMCW [26].

A fin de entender este concepto se consideran dos señales:

$$s_1(t) = A_1 \text{sen} (2\pi f_1 t) \quad (2)$$

$$s_2(t) = A_2 \text{sen} (2\pi f_2 t) \quad (3)$$

La señal reflejada en un objeto localizado a una distancia R es:

$$s_{1r}(t) = A_{1r} \text{sen} (2\pi f_1 t - \varphi_1) \quad (4)$$

$$s_{2r}(t) = A_{2r} \text{sen} (2\pi f_2 t - \varphi_1) \quad (5)$$

Donde la fase φ es igual a:

$$\varphi = \frac{4\pi R}{c} f \quad (6)$$

Luego del proceso de mezclado de estas dos señales con la frecuencia portadora (heterodinaje), la diferencia corresponde a:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi R}{C} \Delta f \quad (7)$$

Al resolver R se tiene:

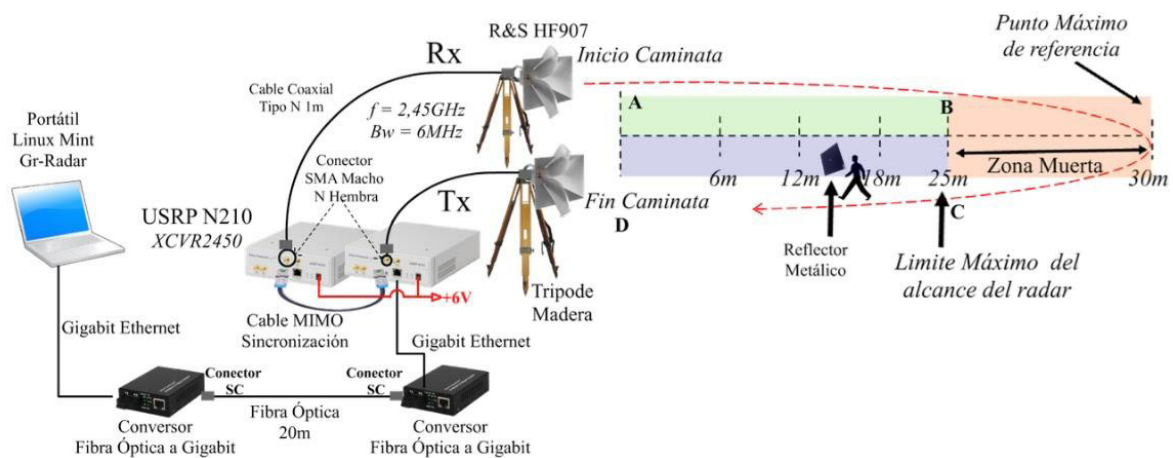
$$R = \frac{\Delta\varphi C}{4\pi \Delta f} \quad (8)$$

Para determinar el máximo valor que R puede alcanzar, se maximiza la ecuación (8) cuando $\Delta\varphi=2\pi$; por tanto, el máximo rango no ambiguo es:

$$R_{max} = \frac{C}{2\Delta f} \quad (9)$$

Implementación del radar de onda continua múltiple definido por software

En la figura 1a se puede apreciar el sistema conformado por dos USRP N210 con tarjetas de radio XCVR-2450. Cada USRP se conectó a una antena bocina tipo HF 907 (Rohde & Schwarz), instalada a 1,5 metros sobre un trípode de madera. Se emplearon dos módulos de conversión fibra-GigaEthernet para extender hasta 20 m la instalación del computador. Se utilizó un cable MIMO para la interconexión entre las USRP, lo que permitió emplear solo un puerto ethernet para la comunicación con el computador de control. Asimismo, se instaló GNU Radio en su versión 3.7.4 sobre el sistema operativo Linux Mint versión 17.1.



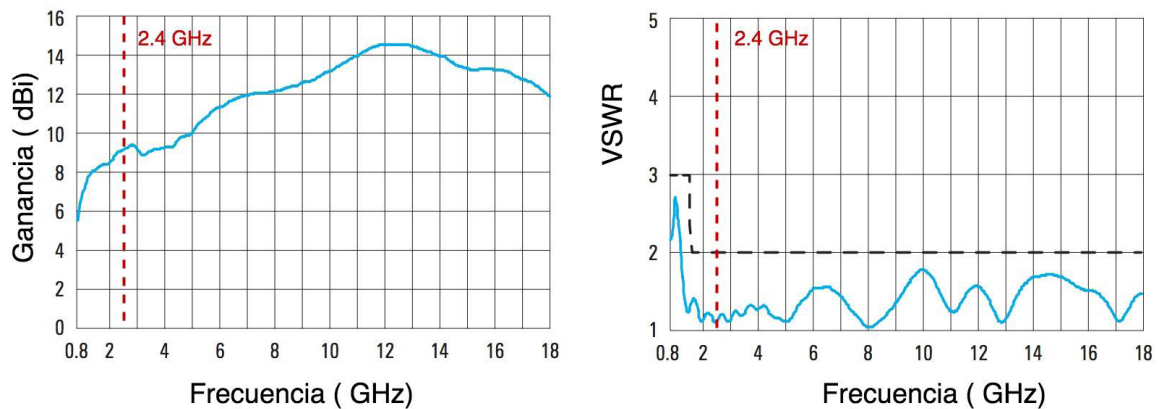
(a) Escenario de prueba para el sistema de radar de onda continua múltiple



(b) Montaje físico del sistema, campus Universidad Militar Nueva Granada
Fuente: elaboración propia.

FIGURA 1. SISTEMA DE RADAR EXPERIMENTAL SDR

Para el diseño del sistema de radar se seleccionaron las antenas de acuerdo con las características de directividad y ancho de banda. Según la figura 2, se observa el comportamiento de estos parámetros con respecto a la frecuencia, en la que cada una de estas antenas cuenta con una ganancia aproximadamente 9dBi y un VSWR de 1,2 a 2,4GHz.



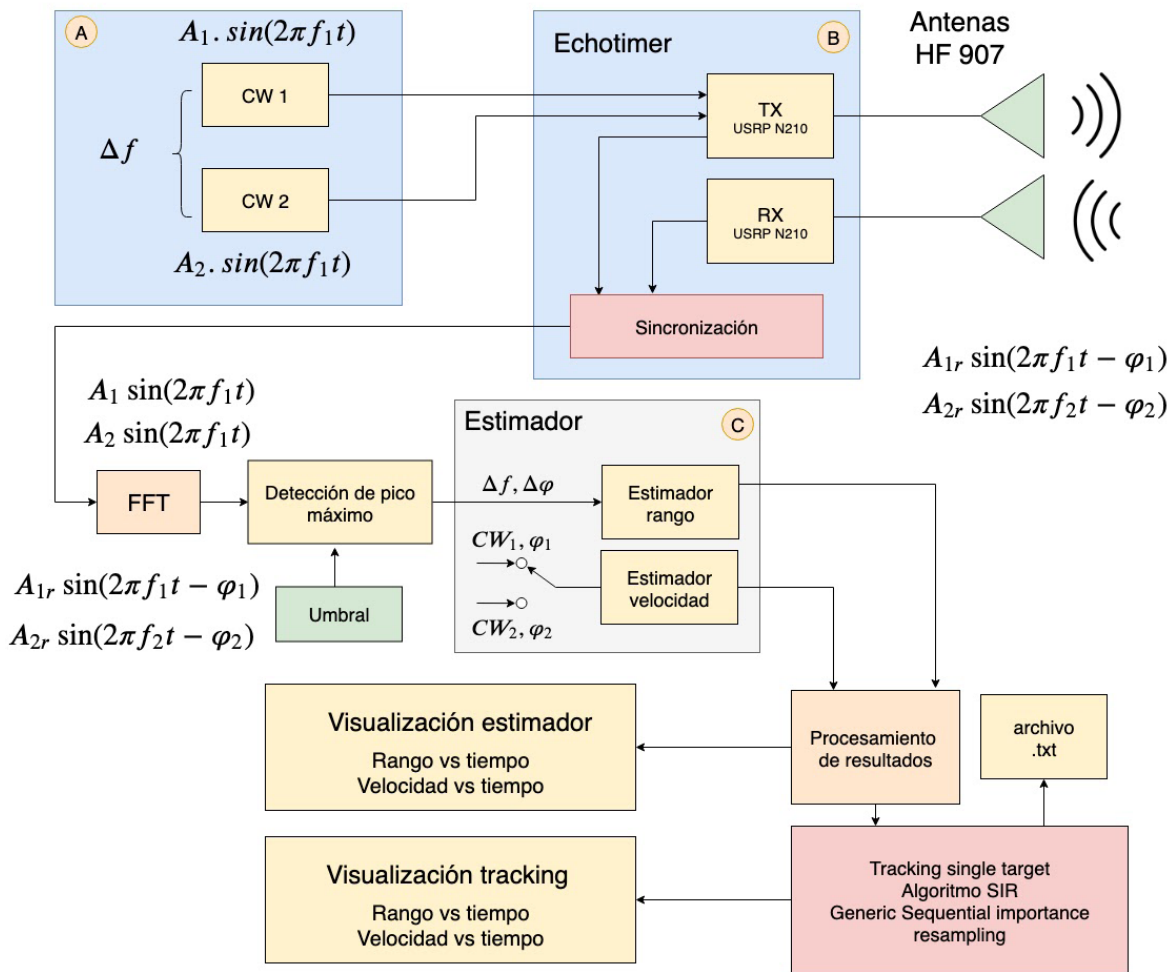
Fuente: elaboración propia.

FIGURA 2. GANANCIA Y VSWR PARA LA ANTENA HF 907, ADAPTADO DE [29]

A fin de comprobar el funcionamiento del sistema se realizó el montaje del radar en un sitio abierto sin la presencia de obstáculos en un espacio con 30 m libres frente a las antenas del radar. En la figura 1b se identifican conos de color naranja que sirvieron como referencia de distancia durante las pruebas. Se ubicó una persona frente al radar, quien se alejó progresivamente hasta alcanzar una distancia máxima de 30 m. El recorrido desde el punto A hasta el punto B se consideró como el desplazamiento de ida; desde el punto B hasta la distancia máxima se estableció una zona muerta donde el radar no pudo detectar objetos estacionarios o en movimiento. El recorrido desde el punto C hasta el punto D se consideró el trayecto de regreso. Durante los experimentos la persona encargada de realizar el recorrido sostuvo una placa metálica cuadrada de 30 cm. Las medidas de velocidad y distancia se registraron en un archivo de texto.

Implementación de *software* mediante GNU Radio

La figura 3 muestra el diagrama de bloques utilizado en el sistema de radar de onda continua múltiple. La generación de las señales CW1 y CW2 se realiza en el bloque A y utiliza dos bloques *signal generator* en GNU Radio configurados con una frecuencia central de 2,45 GHz. CW1 se parametriza para enviar una señal a 2,447 GHz y CW2 a 2,453 GHz. La diferencia de frecuencias entre ellas es de 6 MHz y corresponde al parámetro Δf de la ecuación (9). Empleando esta ecuación, se encuentra la distancia o rango máximo del radar que para un Δf de 6 MHz es de 25 m.

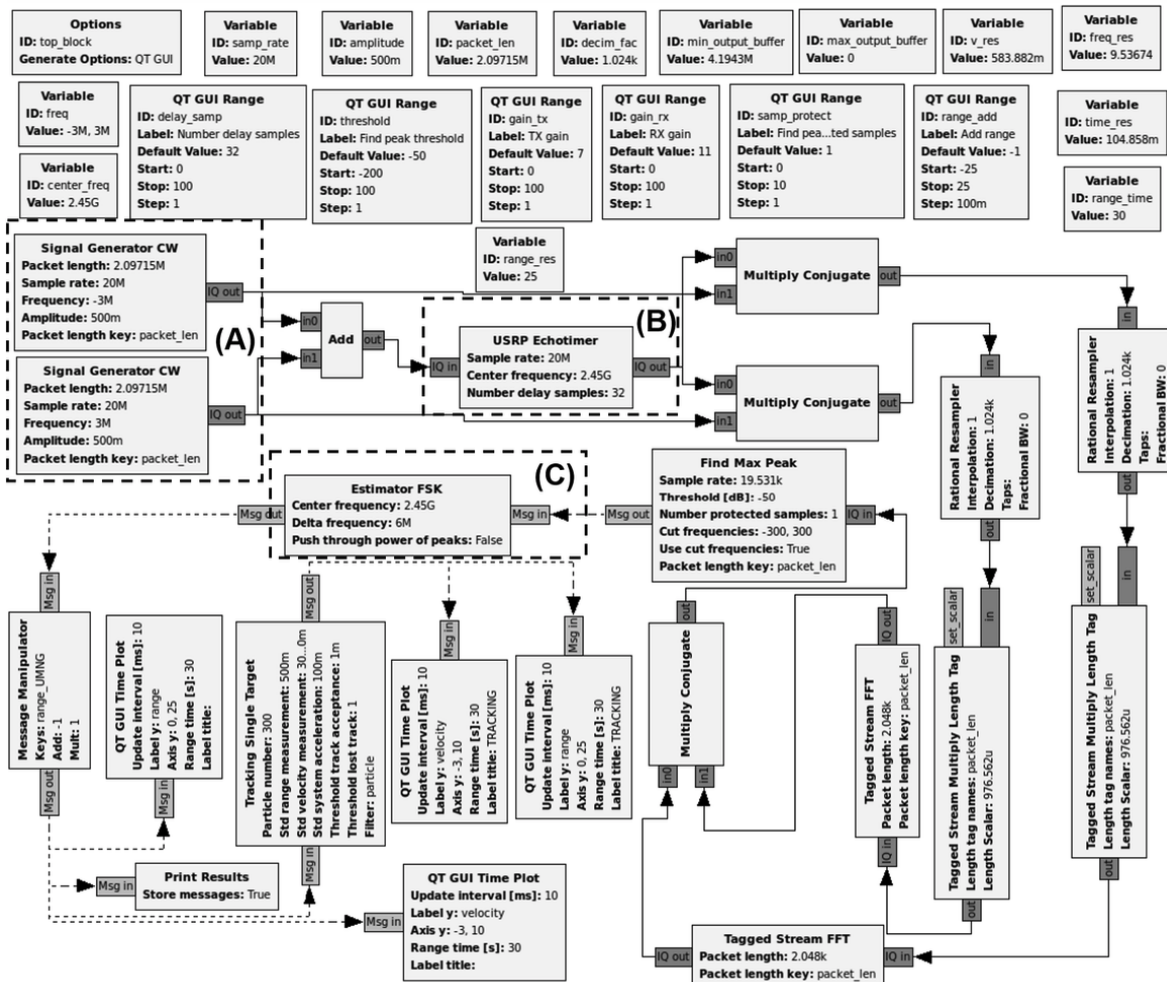


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 3. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE GR-RADAR USANDO MÚLTIPLE CW

Se puede observar que los bloques de generación de señales (*signal generator CW*) se interconectan al bloque Echotimer (bloque B). El programa calcula la FFT tanto de las señales transmitidas como de las recibidas y su resultado pasa al detector de picos [27] en el que se compara con un nivel de umbral escogido por el usuario. El detector de picos entrega como resultado al estimador (bloque C) los valores de frecuencia y fase que sobrepasan el umbral establecido. Para la estimación de rango se emplean las diferencias de frecuencia (Δf) y fase ($\Delta \phi$), tal como lo establece en la ecuación (8). A fin de obtener velocidad se puede utilizar cualquiera de las señales CW1 ó CW2 junto con su correspondiente frecuencia dópler (ϕ_1 o ϕ_2), de acuerdo con la ecuación (1). La variación de la velocidad y la distancia respecto al tiempo se obtiene a través de la aplicación de algoritmo SIR (generic sequential importance sampling) [28]. Los

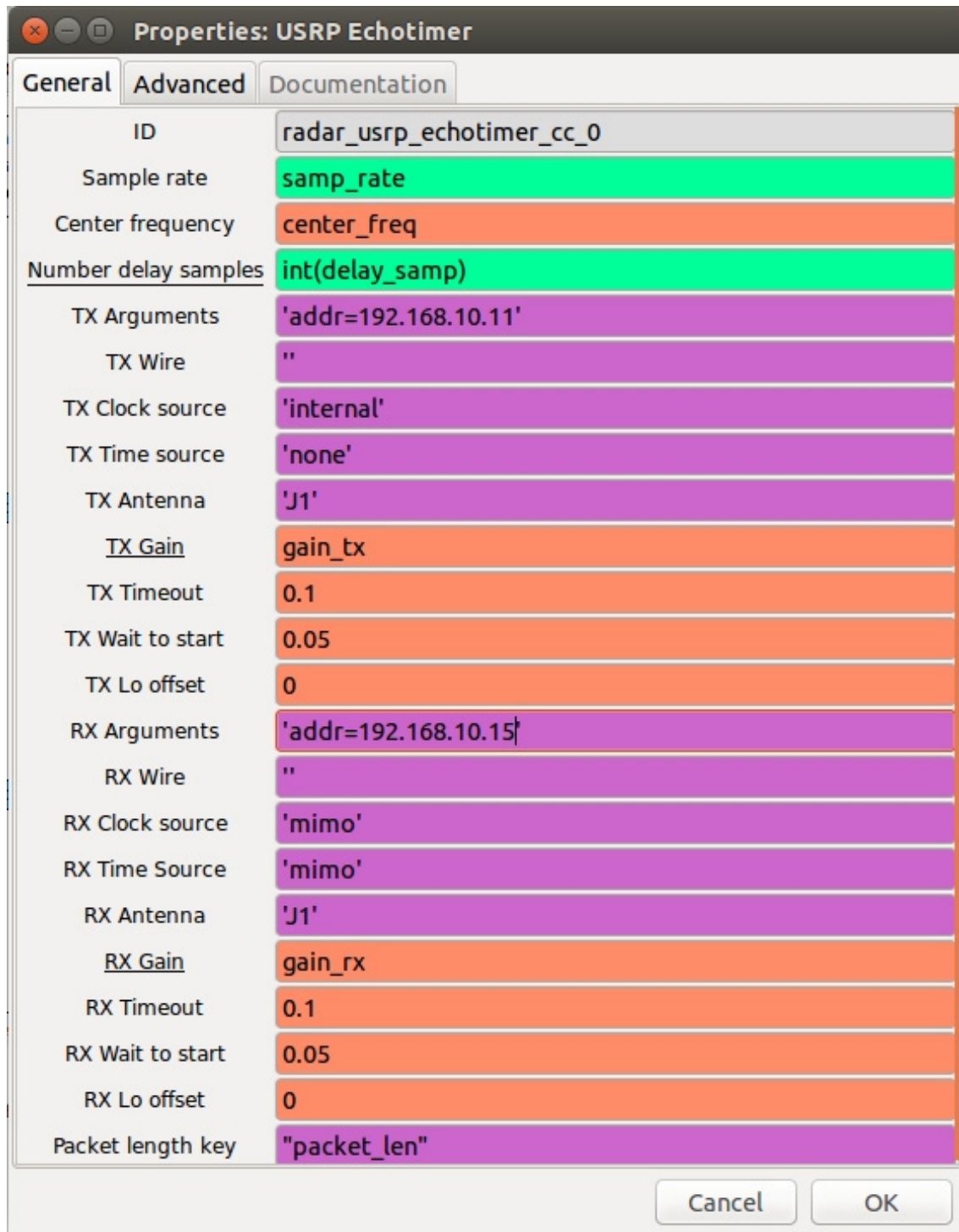
resultados finales de rango y velocidad se visualizan respecto al tiempo y se guardan, además, en un archivo de texto. En la figura 4. se muestra la implementación realizada en GNU Radio.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 4. IMPLEMENTACIÓN DE GR-RADAR, DIAGRAMA DE BLOQUES EN GNU-RADIO

Los parámetros utilizados para la configuración del bloque echotimer (USRP Echotimer) se observan en la figura 5. Allí se establecen las direcciones IP de cada USRP junto con la ganancia de transmisión (máximo 20 dBm). La variable *delay_samp* controla la sincronización entre las dos USRP; este valor permite que la señal de sincronismo del receptor se ajuste a la señal de sincronismo del transmisor. La sincronización es necesaria para minimizar los errores en las mediciones.



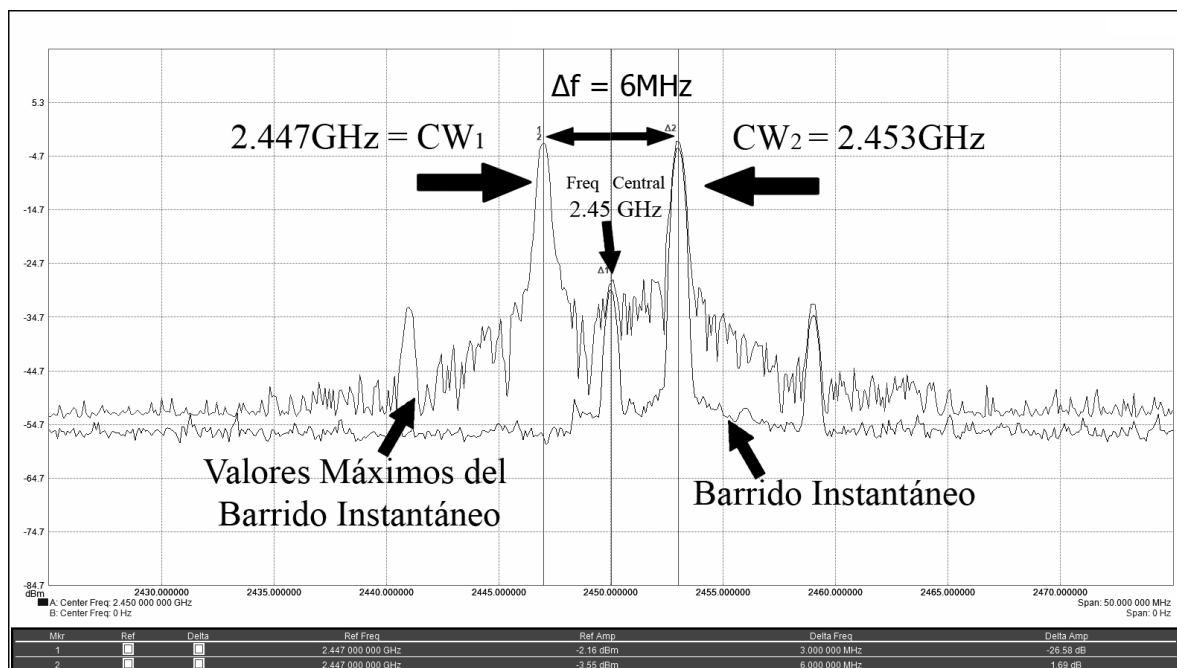
Fuente: elaboración propia.

FIGURA 5. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL BLOQUE ECHOTIMER

El sistema final se configuró con los siguientes parámetros: tasa de muestreo (*samp_rate*) de 2 MS/s; frecuencia central (*center_freq*) de 2,45 GHz; treinta y dos muestras retardadas para la sincronización de las USRP (*delay_samp*); fuente de reloj interna; ganancia de transmisión (*gain_tx*) de 11 dB; *timeout* (*Rx timeout*) de 0,1 s; y tiempos de espera para inicio del transmisor y receptor (*Rx Wait to start*) de 0,05 segundos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 6 muestra la señal generada por la USRP N210 transmisora, obtenida mediante un analizador de espectros Anritsu MS2724B. En ella se identifican las componentes de frecuencia (f_1 y f_2), generadas por cada uno de los bloques *signal generator* CW. Se observa que estas frecuencias aparecen en 2,447 GHz y 2,453 GHz y tienen una separación de 6 MHz alrededor de la frecuencia central de 2,45 GHz. Esto se corresponde con los valores esperados en la configuración y el diseño del sistema de radar.

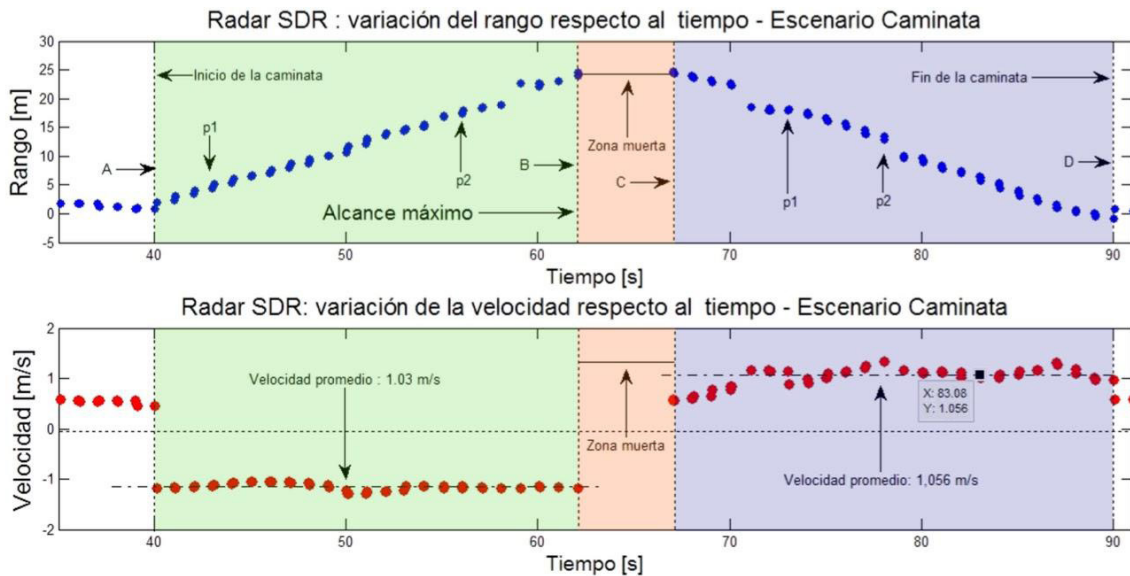


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 6. SEÑAL TRANSMITIDA POR LA USRP N210 TX

La figura 7 muestra los resultados del experimento de un trayecto realizado durante un periodo de 55 s. Desde el segundo cuarenta (Punto A), se observa cómo inicia la variación del rango, comprendido desde 0 cm hasta 25 m (Punto B); posteriormente, se encuentra una zona muerta de aproximadamente 5 s en la que el radar no registra

ningún valor (Punto B hasta el punto C). Esta zona corresponde al tiempo que tardó la persona en caminar desde el límite de alcance máximo del radar (25 m) hasta el punto de referencia ubicado en 30 m y regresar. Desde el segundo 67 (Punto C) hasta el segundo 90 (Punto D), el radar detecta el regreso del caminante y se observa cómo la distancia varía desde 25 m hasta aproximadamente 0 m.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 7. GRÁFICA DE RANGO Y VELOCIDAD PERSONA CAMINANDO

La figura 7 muestra además una variación en la velocidad respecto al tiempo, calculada directamente por las mediciones del sistema de radar. Se observa que el sistema reporta una velocidad inicial con la persona estática de aproximadamente 0,5 m/s, y este valor cambia al iniciar el trayecto. Cuando la persona se aleja del radar la magnitud de la velocidad es negativa, pero si se acerca, el signo en la magnitud de la velocidad es positivo; este signo es un indicador del sentido de desplazamiento.

En la tabla 1 se muestra que durante el trayecto de ida (A hasta B) la velocidad experimental calculada por el algoritmo de la librería de radar fue de un promedio de -1,03 m/s. Para el trayecto de regreso (C hasta D) el comportamiento de la velocidad experimental varía alcanzando un valor promedio de 1,056 m/s. Al tomar dos puntos (y) de la variación de distancia recorrida respecto al tiempo empleado, se calcularon las velocidades teóricas y se encontró un error de 1,98 % para el trayecto de ida, y de 3,22 % para el trayecto de regreso.

TABLA 1. ERROR EN LA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD PARA
EL EXPERIMENTO DE PERSONA CAMINANDO

Trayecto	Tiempo		Distancia		Δt [s]	ΔR [m]	v_{exp} [m/s]	v_{cal} [m/s]	% Error
	p_1 [s]	p_2 [s]	p_1 [m]	p_2 [m]					
A hasta B (Ida)	43,01	56,05	4,49	17,76	13,04	13,27	1,03	1,01	1,98 %
C hasta D (Regreso)	73,03	78,06	18,11	12,93	5,06	-5,18	1,056	1,023	3,22 %

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, en la tabla 2 se muestran los resultados de las distancias experimentales obtenidas durante el recorrido de 30 m (véase la figura 1a). En el trayecto de ida se puede observar que los datos obtenidos experimentalmente difieren en promedio en un 1,56 % de las distancias reales. Asimismo, para el trayecto de regreso el promedio del porcentaje de error es del 2,75 %.

TABLA 2. ERROR EN LA ESTIMACIÓN DE LA DISTANCIA
PARA EXPERIMENTO DE PERSONA CAMINANDO

	Trayecto Ida				Trayecto Regreso			
	1	2	3	4	4	3	2	1
Número de Cono	1	2	3	4	4	3	2	1
Distancia Teórica [m]	6	12	18	25	25	18	12	6
Tiempo Experimental [s]	43,9	50,1	55,8	62	67	73,03	78,06	82,9
Distancia Experimental [m]	6,12	11,86	17,76	24,71	24,67	18,11	12,93	5,92
% Error	2 %	1,1 %	2 %	1,16 %	1,32 %	0,6 %	7,75 %	1,33 %

Fuente: elaboración propia.

Trabajo futuro

Se espera desarrollar un conjunto de pruebas con objetos en movimiento como, por ejemplo, bicicletas o vehículos, lo que permita comprobar la efectividad del radar con objetos que se desplacen a alta velocidad. Se espera, además, evaluar la relación entre el ancho de banda transmitido (Δf) y el rango máximo del sistema de radar. También se considera importante implementar y evaluar otras técnicas tales como el radar de onda continua (CW) y el radar de onda continua modulada (FMCW).

4. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de la implementación del sistema se evaluó con éxito el desempeño del radar definido por *software* utilizando la técnica de radar de onda continua múltiple, de modo que se detectó el rango y la velocidad de una persona en movimiento a baja velocidad, quien sostiene una superficie reflectora metálica; se obtuvo un error promedio menor al 3,5 %.

La librería gr-radar para GNU Radio permite la implementación de un radar flexible de bajo costo para uso académico e investigación; es una alternativa importante si se considera su versatilidad y el alto costo de los sistemas de radares didácticos existentes en el mercado.

La sincronización entre las URSP que se logra al ajustar en la variable *delay_samp* es de gran importancia para el funcionamiento del sistema, ya que permite la calibración de las magnitudes de rango y velocidad. Es necesario desarrollar una metodología de calibración que optimice este proceso.

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema de radar implementado no es eficiente en determinar la distancia cuando los objetos se encuentran estacionarios. El sistema entrega datos erróneos y, para estos casos, deben ser descartados. Se debe estudiar el fenómeno y realizar comparaciones con otras técnicas de radar como, por ejemplo, FMCW y radar de pulsos.

Durante las pruebas realizadas se evidenció que es necesario generar una señal o alarma de límite de rango que indique al usuario que el sistema sigue funcionando correctamente, y para que no se generen problemas al momento del procesamiento de las señales.

Se encontró una diferencia entre las pruebas realizadas con una persona caminando sin ningún tipo de plano reflector. Si bien era posible detectar la posición del caminante, las magnitudes de rango y velocidad oscilaban de forma constante. Con la superficie reflectora empleada en las pruebas presentadas en este documento se obtuvo una variación muy pequeña en las magnitudes entregadas por el sistema, lo que permitió medir de forma eficiente los parámetros de magnitud y velocidad.

Durante las pruebas realizadas se encontró que el valor límite teórico calculado a partir del ancho de banda ocupado por la señal transmitida ($\Delta f = 6\text{MHz}$) concuerda cuando la persona sobrepasa dicho valor en su recorrido, lo que permite demostrar de forma experimental el efecto que tiene cuando se realiza algún cambio en este parámetro de transmisión.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló como parte del proyecto de Investigación INV-ING- 2647 “Prototipo para detección de metales usando tecnologías de radio reconfigurable orientado a procesos de desminado humanitario”, realizado por el grupo GISSIC (Grupo de Investigación en Seguridad y Sistemas de Comunicaciones) perteneciente al programa de Ingeniería en Telecomunicaciones. Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada por la financiación del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] H. Ma *et al.*, «Performance analysis of joint radar and communication enabled vehicular ad hoc network», 2019, pp. 887-892. Doi: <https://doi.org/10.1109/iccchina.2019.8855937>
- [2] D. J. Daniels, & I. of E. Engineers, *Ground penetrating radar*. Londres: Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [3] C. H. Díaz Medina, R. Bustamante Miller, L. F. Giraldo Trujillo, & J. F. Vargas Buitrago, «Análisis del desempeño de los sistemas GPR “Ground Penetrating Radar”, en el contexto del desminado humanitario en Colombia», 2017. Disponible en: <http://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto201699.php?id=13553.pdf>
- [4] H. Sierra Coley, «Análisis de la detección de minas mediante la técnica GPR “Ground Penetrating Radar”», tesis de maestría, 2017. Disponible en: <http://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto201699.php?id=11424.pdf>
- [5] L. Piotrowsky, T. Jaeschke, S. Kueppers, J. Siska, & N. Pohl, «Enabling High Accuracy distance measurements with FMCW radar sensors», *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, pp. 1-12, septiembre, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1109/tmtt.2019.2930504>
- [6] Ultra-Wideband Radio Technologies for Communications, «Localization and Sensor Applications», *InTech*, 2013. doi: <https://doi.org/10.5772/2648>
- [7] N. Smitha, D. R. Ullas Bharadwaj, S. Abilash, S. N. Sridhara, & V. Singh, «Kirchhoff and F-K migration to focus ground penetrating radar images», *Int. J. Geo-Engineering*, vol. 7, n.o 1, p. 4, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1186/s40703-016-0019-6>
- [8] C. Özdemir, Ş. Demirci, E. Yiğit, & B. Yilmaz, «A review on migration methods in b-scan ground penetrating radar imaging», *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/280738>
- [9] G. L. Charvat, A. J. Fenn, & B. T. Perry, «The MIT IAP radar course: build a small radar system capable of sensing range, doppler, and synthetic aperture (SAR) imaging», in *IEEE National Radar Conference-Proceedings*, 2012, pp. 0138-0144. Doi: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2012.6212126>

- [10] J. Mitola, «Software radios: Survey, critical evaluation and future directions», *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 8, n.o 4, pp. 25-36, abril, 1993. Doi: <https://doi.org/10.1109/62.210638>
- [11] «Definiciones de sistema radioeléctrico determinado por programas informáticos (RDI) y sistema radioeléctrico cognoscitivo (SRC)», 2019. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/r-rep-sm.2152/es>
- [12] P. Pawelczak, K. Nolan, L. Doyle, S. Oh, & D. Cabric, «Cognitive radio: ten years of experimentation and development», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, n.o 3, pp. 90-100, marzo, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5723805>
- [13] J. Mitola, P. Marshall, K. Chen, M. Mueck, & Z. Zvonar, «Software defined radio-20 years later: Part 1 [Guest Editorial]», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, n.o 9, pp. 22-23, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263341>
- [14] J. Hao, T. Huang, Z. D. Chen, H. Zhao, & J. Li, «A GNU radio based FMCW radar with a simple frequency correction technique for accurate indoor localization applications», en *2018 IEEE MTT-S Int. Wirel. Symp. IWS 2018-Proc.*, pp. 1-4, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1109/IEEE-IWS.2018.8400973>
- [15] Kafedziski, V., & Pecov, S. (2017), «Implementation of a high resolution stepped frequency radar on a USRP», en *2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2017-Proceeding*, octubre, 2017, 236-239. Doi: <https://doi.org/10.1109/TELSKS.2017.8246271>
- [16] T. W. Mathumo, T. G. Swart, & R. W. Focke, «Implementation of a GNU radio and python FMCW radar toolkit», *2017 IEEE Africon Sci. Technol. Innov. Africa, Africon, 2017*, pp. 585-590, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2017.8095547>
- [17] S. Sundaresan, C. Anjana, T. Zacharia, & R. Gandhiraj, «Real time implementation of FMCW radar for target detection using GNU radio and USRP», en *2015 International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2015*, 2015, pp. 1530-1534. Doi: <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2015.7322772>
- [18] A. Prabaswara, A. Munir, & A. B. Suksmono, «GNU Radio based software-defined FMCW radar for weather surveillance application», en *Proceedings of 2011 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications, TSSA 2011*, 2011, pp. 227-230. Doi: <https://doi.org/10.1109/TSSA.2011.6095440>
- [19] M. Alam, K. Jamil, Z. O. Alhekail, & S. Al-Humaidi, «A multi-band multi-beam software-defined passive radar Part II: Signal processing», en *IET Conference Publications, 2012*, vol. 2012, n.o 603 CP. Doi: <https://doi.org/10.1049/cp.2012.1582>
- [20] B. Tan, K. Woodbridge, & K. Chetty, «A real-time high resolution passive WiFi Doppler-radar and its applications», en *2014 International Radar Conference, Radar 2014*, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.7060359>

- [21] «GNU Radio-The Free & Open Source Radio Ecosystem», GNU Radio. Disponible en: <https://www.gnuradio.org/>
- [22] «GNU Radio Radar Toolbox-Page 2-gr-radar: GNU Radio Radar Toolbox», 2019. Disponible en: <https://grradar.wordpress.com/page/2/>
- [23] J. Zhang, «Basic gait analysis based on continuous wave radar» *Gait and Posture*, vol. 36, n.o 4. pp. 667-671, septiembre, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.04.020>
- [24] S. Pal, «FMCW-Radar Design» *IETE J. Res.*, vol. 65, n.o 4, pp. 576-577, julio, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1080/03772063.2019.1615392>
- [25] Mao-Yanfei, «FMCW radar receiver front-end design», tesis de maestría, Dept. Electronic Engineering, Delft University of Technology, Países Bajos, 2009. Disponible en: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:ee554cc0-a7e6-49ee-939e-312bcef3d674/datastream/OBJ/download>
- [26] B. R. Mahafza, *Radar systems analysis and design using MATLAB*, 3ª ed. CRC Press, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1201/b14904>
- [27] «kit-cel/gr-radar: GNU Radio Radar Toolbox». Disponible en: <https://github.com/kit-cel/gr-radar>
- [28] A. Gorji Daronkolaeei, M. B. Menhaj, & A. Doostmohammadi, «Multiple target tracking with a 2-D radar using the JPDAF algorithm and combined motion model», *AUT J. Model. Simul.*, vol. 41, n.o 2, pp. 43-51, noviembre, 2009. Doi: <https://doi.org/10.22060/MISCJ.2009.239>
- [29] «Brochures and Data Sheets for Product HF907|Rohde & Schwarz». Disponible en: <https://www.rohde-schwarz.com/hu/brochure-datasheet/hf907/>