



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES
Y REDES

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO MEDIANTE UN RADAR DE
APERTURA SINTÉTICA (SAR) PARA LA DETECCIÓN Y
UBICACIÓN DE OBJETOS EN AMBIENTES INTERNOS CON
UNA TARJETA USRP B210

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES

AUTOR: DIEGO ARMANDO LLALAU GUALLO

TUTOR: Ing. PAÚL DAVID MORENO AVILÉS Ph.D.

Riobamba – Ecuador

2017

©2017, Diego Armando Llalau Guallo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y REDES

El Tribunal del Proyecto de Titulación certifica que: El trabajo de investigación: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO MEDIANTE UN RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR) PARA LA DETECCIÓN Y UBICACIÓN DE OBJETOS EN AMBIENTES INTERNOS CON UNA TARJETA USRP B210, de responsabilidad del Señor Diego Armando Llalau Guallo, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Proyecto de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Washington Gilberto Luna Encalada DECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Ing. Franklin Moreno DIRECTOR DE LA ESCUELA DE ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y REDES
Ing. Paúl David Moreno Avilés Ph.D. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés Ph.D. MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Yo, Diego Armando Llalau Guallo soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación y el patrimonio intelectual de la misma pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Diego Armando Llalau Guallo

DEDICATORIA

A mi hermana Luisa quien ha sido un apoyo fundamental en cada nuevo emprendimiento, en cada reto; quien ha estado junto a mí esforzándose diariamente para que pueda cumplir este sueño familiar.

De igual manera a mi madre Lolita quien es mi principal motivo de superación profesional, mi madre quien con sus consejos y su gran amor me impulsa cada día a ser mejor persona.

Diego

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios, por cada una de las bendiciones recibidas como estudiante en esta prestigiosa universidad y por permitirme cumplir una meta más en mi vida.

A mi madre y hermana quienes con su apoyo incondicional han sido el principal motivo de superación diaria.

A mi director de este trabajo de titulación el Ing. David Moreno y al Ing. Hugo Moreno por compartirme sus valiosos conocimientos, experiencias y ser una guía en el desarrollo de esta investigación.

Un agradecimiento muy especial a mis amigos, quienes, con su apoyo, trabajos y una amistad desinteresada han aportado para culminar mi carrera universitaria; queda en mi memoria momentos inolvidables compartidos todo este tiempo.

Diego

TABLA DE CONTENIDOS

DERECHOS DEL AUTOR.....	1
CERTIFICACIÓN.....	2
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTO	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE ECUACIONES	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
ÍNDICE DE ANEXOS	14
RESUMEN.....	15
SUMMARY	16
INTRODUCCIÓN	17
Antecedentes.....	18
Formulación del problema	18
Justificación del Trabajo de Titulación.....	19
<i>Justificación Teórica.....</i>	<i>19</i>
<i>Justificación Aplicativa.....</i>	<i>19</i>
Objetivos:.....	20
<i>Objetivo general:.....</i>	<i>20</i>
<i>Objetivos Específicos:</i>	<i>20</i>
CAPÍTULO I	
1.MARCO TEÓRICO	21

1.1.	Radar.....	21
<i>1.1.1.</i>	<i>Definición.....</i>	<i>21</i>
<i>1.1.2.</i>	<i>Funcionamiento.....</i>	<i>21</i>
<i>1.1.3.</i>	<i>Clasificación de los sistemas Radar.....</i>	<i>22</i>
<i>1.1.3.1.</i>	<i>Tipos de radares por su frecuencia de operación.....</i>	<i>22</i>
<i>1.1.3.2.</i>	<i>Tipos de radares por la forma de onda.....</i>	<i>23</i>
<i>1.1.4.</i>	<i>Generación de Señales Radar.....</i>	<i>24</i>
<i>1.1.4.1.</i>	<i>Tren de pulsos.....</i>	<i>24</i>
<i>1.1.4.2.</i>	<i>Onda Continua (CW).....</i>	<i>25</i>
<i>1.1.4.3.</i>	<i>Onda continua modulada en frecuencia (FMCW).....</i>	<i>27</i>
<i>1.1.4.4.</i>	<i>Onda continua de frecuencia escalonada (SFCW).....</i>	<i>30</i>
<i>1.1.4.5.</i>	<i>Pulso corto.....</i>	<i>32</i>
<i>1.1.4.6.</i>	<i>OFDM.....</i>	<i>34</i>
<i>1.1.5.</i>	<i>Parámetros de un Sistema Radar.....</i>	<i>35</i>
<i>1.1.5.1.</i>	<i>Ancho de Banda.....</i>	<i>35</i>
<i>1.1.5.2.</i>	<i>Resolución.....</i>	<i>35</i>
<i>1.1.5.3.</i>	<i>Alcance máximo de un radar.....</i>	<i>36</i>
<i>1.1.5.4.</i>	<i>Radargrama.....</i>	<i>36</i>
1.2.	Radar de Apertura Sintética (SAR).....	38
<i>1.2.1.</i>	<i>Definición.....</i>	<i>38</i>
<i>1.2.2.</i>	<i>Modo de operación.....</i>	<i>38</i>
<i>1.2.3.</i>	<i>Resolución del SAR.....</i>	<i>39</i>
<i>1.2.4.</i>	<i>Formación de imágenes SAR.....</i>	<i>40</i>
<i>1.2.5.</i>	<i>Algoritmos de formación de imágenes.....</i>	<i>40</i>
<i>1.2.5.1.</i>	<i>Algoritmo de Rango Doppler (DRA).....</i>	<i>41</i>
<i>1.2.5.2.</i>	<i>Algoritmo de Migración de Rango (RMA).....</i>	<i>42</i>
<i>1.2.6.</i>	<i>Formación de la imagen con el algoritmo RMA.....</i>	<i>42</i>
<i>1.2.6.1.</i>	<i>Transformada Discreta de Fourier de rango transversal.....</i>	<i>42</i>
<i>1.2.6.2.</i>	<i>Filtro coincidente.....</i>	<i>43</i>
<i>1.2.6.3.</i>	<i>Stolt de Interpolación.....</i>	<i>44</i>
<i>1.2.6.4.</i>	<i>Transformada de Fourier inversa en el dominio de imagen (IDFT 2D).....</i>	<i>44</i>
1.3.	Software Defined radar (SDRadar).....	46
<i>1.3.1.</i>	<i>Arquitectura del Hardware.....</i>	<i>47</i>
<i>1.3.2.</i>	<i>Principios de operación.....</i>	<i>47</i>
<i>1.3.2.1.</i>	<i>Transmisión de la señal.....</i>	<i>47</i>
<i>1.3.2.2.</i>	<i>Recepción de la señal.....</i>	<i>48</i>

1.3.3.	GNURadio	48
1.4.	Tarjetas USRP	49
1.4.1.	Tarjeta USRP B210	49
1.4.1.1.	<i>Características</i>	49
1.4.1.2.	<i>Programación</i>	50
1.4.1.3.	<i>Aplicaciones Radar con la USRP B210</i>	51

CAPITULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	52
2.1.	Metodología de la investigación	52
2.1.1.	Tipo de Investigación	52
2.1.1.1.	<i>Investigación Bibliográfica</i>	52
2.1.1.2.	<i>Investigación descriptiva</i>	52
2.1.1.3.	<i>Investigación de campo</i>	53
2.1.2.	Técnicas de investigación	53
2.1.2.1.	<i>Población y Muestra</i>	53
2.1.2.2.	<i>Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos</i>	53
2.1.2.3.	<i>Técnicas de procesamiento y análisis de Datos</i>	53
2.1.2.4.	<i>Validación y confiabilidad</i>	54
2.2.	Metodología del diseño del Prototipo Radar	54
2.2.1.	Configuración de la tarjeta USRP B210	55
2.2.1.1.	<i>Frecuencia de operación</i>	55
2.2.1.2.	<i>Diseño de las antenas</i>	55
2.2.1.3.	<i>Ganancia del Tx/Rx</i>	57
2.2.1.4.	<i>Frecuencia de muestreo</i>	57
2.2.1.5.	<i>Diezmado</i>	58
2.2.1.6.	<i>Interpolación</i>	59
2.2.2.	Máxima Resolución de la tarjeta para aplicaciones radar	60
2.2.3.	Generación de la Señal FMCW en MatLab	60
2.2.4.	Envío de datos de MatLab a GNURadio	63
2.2.5.	Transmisión y Recepción de la señal con GNURadio	63
2.2.6.	Envío de datos de GNURadio a MatLab	64
2.2.7.	Algoritmo de mejoramiento de la resolución del radar	65
2.2.8.	Procesamiento de los datos para generar la imagen SAR	68

CAPÍTULO III

3.MEDICIONES Y RESULTADOS	70
3.1. Simulaciones	70
3.2. Prueba de distancias	74
3.2.1. Resolución	74
3.2.2. Tiempo de retardo del sistema radar	75
3.2.3. Resolución en rango transversal	76
3.3. Capturas de datos transversales con el prototipo	77
3.4. Procesamiento de los datos para la obtención de la imagen SAR	80
3.5. Análisis de resultados	83
3.6. Alcances y limitaciones	84
3.6.1. Alcances	84
3.6.2. Limitaciones	85
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	87
GLOSARIO DE ABREVIATURAS	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Frecuencias y tipos de Radar	23
Tabla 2-1 Rendimiento de conversión y velocidad del reloj.....	50
Tabla 1-2 Parámetros de configuración para la generación de una señal FMCW	61
Tabla 1-3 Parámetros de configuración para la generación de una señal FMCW	71
Tabla 2-3 Ubicación de los objetivos	73
Tabla 3-3 Resultados de las mediciones del objetivo.....	82
Tabla 4-3 Niveles de potencia en la imagen SAR.....	83

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1: Señal de onda continua	25
Ecuación 2-1: Señal de onda continua en el dominio de la frecuencia	26
Ecuación 3-1: Frecuencia Doppler.....	26
Ecuación 4-1: Señal FMCW	27
Ecuación 5-1: Frecuencia instantánea de la señal FMCW	28
Ecuación 6-1: Variación de la frecuencia de la señal FMCW	28
Ecuación 7-1: Tiempo de retardo.....	28
Ecuación 8-1: Distancia del objetivo	29
Ecuación 9-1: Alcance máximo del radar	30
Ecuación 10-1: Ancho de banda de la señal SFCW.....	31
Ecuación 11-1: Incremento de frecuencia de la señal SFCW	31
Ecuación 12-1: Resolución del radar SFCW	32
Ecuación 13-1: Señal FMCW	34
Ecuación 14-1: Ancho de banda de la señal FMCW	35
Ecuación 15-1: Resolución del radar FMCW	35
Ecuación 16-1: Alcance máximo de un radar FMCW	36
Ecuación 17-1: Frecuencia radial instantánea.....	39
Ecuación 18-1: Resolución de un SAR.....	40
Ecuación 19-1: Magnitud de la onda FMCW reflejada	42
Ecuación 20-1: Filtro coincidente	43
Ecuación 21-1: Señal Filtrada.....	43
Ecuación 22-1: Relación del slot de interpolación.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Funcionamiento de un sistema radar	22
Figura 2-1 Sistema de radar de pulsos con una secuencia de impulsos modulados.....	24
Figura 3-1 Forma de onda por modulación de pulso	25
Figura 4-1 Anchura del lóbulo por modulación de pulso	25
Figura 5-1 Señal sinusoidal de onda continua en el dominio del tiempo.....	26
Figura 6-1 Señal sinusoidal de onda continua en el dominio de la frecuencia	26
Figura 7-1 Funcionamiento de un sistema radar de policía.	27
Figura 8-1 Señal de onda continua modulada en frecuencia lineal.....	28
Figura 9-1 Señal FMCW lineal transmitida y recibida	29
Figura 10-1 Diagrama de bloques de un radar FMCW lineal.....	30
Figura 11-1 Señal SFCW en el plano tiempo vs frecuencia	31
Figura 12-1 Perfil de alcance de un objetivo con un radar SFCW.....	32
Figura 13-1 Forma de onda de un pulso rectangular en el dominio del tiempo.....	32
Figura 14-1 Forma de onda de un pulso rectangular en el dominio de la frecuencia	32
Figura 15-1 Forma de onda de un pulso de un solo tono en el dominio del tiempo.	33
Figura 16-1 Forma de onda de un pulso de un solo tono en el dominio de la frecuencia.....	33
Figura 17-1 Pulso de onda única en el dominio de la Frecuencia.....	33
Figura 18-1 Pulso de onda única en el dominio de la Frecuencia.....	33
Figura 19-1 Señal radar OFDM	34
Figura 20-1 Relación del tiempo vs frecuencia de una señal radar FMCW	35
Figura 21-1 Señal Chirp transmitida.....	37
Figura 22-1 Señal Chirp recibida	37
Figura 23-1 Multiplicación en el dominio del tiempo señal transmitida por la señal recibida ..	37
Figura 24-1 Radargrama en el dominio de la frecuencia espacial.	37
Figura 25-1 Radargrama en el dominio de la frecuencia temporal	38
Figura 26-1 Movimiento transversal del SAR	39
Figura 27-1 Funcionamiento del algoritmo de Rango Doppler	41
Figura 28-1 Señal en el Dominio de la Frecuencia Espacial	42
Figura 29-1 Magnitud de la señal reflejada mostrando la curvatura del frente de onda	43
Figura 30-1 Magnitud de la señal reflejada luego de aplicar el filtro coincidente.....	43
Figura 31-1 Distribución de los datos antes (°) y después (•) de la interpolación.....	44
Figura 32-1 Fase después de aplicar el Slot de interpolación	45
Figura 33-1 Subsección de Fase después de aplicar el Slot de interpolación	45
Figura 34-1 Imagen SAR de un de punto simulado.....	46
Figura 35-1 Arquitectura básica de hardware de un SDR.....	47

Figura 36-1 Tarjeta USRP B210.....	50
Figura 37-1 Configuración de la tarjeta USRP	51
Figura 38-1 Detección de una persona en ambientes internos aplicando técnicas radar	51
Figura 1-2 Sistema radar con tarjeta USRP B-210	54
Figura 2-2 Arreglo de 4 antenas con tecnología microstrip	55
Figura 3-2 Diagrama de radiación 3D de una antena de apertura.....	56
Figura 4-2 Diagrama de radiación 3D del arreglo de antenas microstrip	56
Figura 5-2 Ganancia total del arreglo de antenas microstrip	57
Figura 6-2 Configuración de la frecuencia de muestreo en GNURadio	59
Figura 7-2 Frecuencia de reloj determinada por GNURadio	60
Figura 8-2 Configuración de la tarjeta USRP con Simulink.....	61
Figura 9-2 Señal FMCW en el dominio del tiempo.....	62
Figura 10-2 Señal chirp repetida 8 veces	62
Figura 11-2 Concatenación de la señal real e imaginaria	63
Figura 12-2 Configuración de los parámetros del radar.....	64
Figura 13-2 Envío de la señal desde GNURadio a MatLab.....	64
Figura 14-2 Diseño del transmisor y receptor radar en GNURadio.....	65
Figura 15-2 Estimación errónea de la distancia con el radar grama	67
Figura 16-2 Estimación de la distancia del radar	66
Figura 17-2 Mejora de la resolución del radar de 2m a 1m	67
Figura 18-2 Diagrama de flujo del SAR	69
Figura 1-3 Objetivos de prueba.....	70
Figura 2-3 Radar grama identificando 2 objetivos.....	72
Figura 3-3 Radar grama con un solo objetivo.....	72
Figura 4-3 Imagen SAR con tres objetivos.....	73
Figura 5-3 Imagen SAR disminuida el solapamiento de señales.....	74
Figura 6-3 Prueba de calibración del sistema radar	75
Figura 7-3 Radar grama de calibración del sistema radar.....	76
Figura 8-3 Prototipo radar a 3 metros del objetivo	78
Figura 9-3 Prototipo radar en la posición inicial eje transversal.....	78
Figura 10-3 Radar grama de la medición número 10.....	79
Figura 11-3 Zoom del radar grama de la medición número 10.....	80
Figura 12-3 Imagen final del SAR.....	80
Figura 13-3 Imagen final del SAR mejorada.....	81
Figura 14-3 Zoom Imagen final del SAR mejorada.....	82
Figura 15-3 Niveles de energía de la imagen SAR.....	83

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Generación de las señales en MatLab

Anexo B. Envío de la señal desde MatLab a GNURadio

Anexo C.Recepción de la señal desde GNURadio

Anexo D. Algoritmo para mejorar la resolución de la tarjeta USRP

Anexo E. Calibración del dispositivo Radar

Anexo F. Algoritmo RMA

RESUMEN

En esta investigación se desarrolló un prototipo radar de apertura sintética (SAR) para detectar y ubicar objetos en ambientes de laboratorio, para lo cual se utilizó como dispositivo principal la tarjeta USRP B210 propiedad de la ESPOCH. Se aplicó las metodologías bibliográfica y de campo, la primera permitió la recolección de la información la cual ayudó a describir el funcionamiento básico de un sistema radar, los requerimientos de la tarjeta USRP B210 y se hizo énfasis principalmente en los algoritmos de formación de imágenes de un SAR, la segunda permitió utilizar técnicas para recolectar y procesar los datos o hechos reales. Para generar las señales y realizar el procesamiento de los datos se utilizó el software MatLab, en este se generaron los diferentes algoritmos como el mejoramiento de la resolución y la formación de la imagen SAR; en cambio la transmisión y recepción de la señal se realizó mediante GNURadio debido a que este consume menos recursos cuando se trabaja con señales en tiempo real. Las diferentes pruebas se realizaron en un lugar amplio y cerrado con un objeto metálico cuyas características propias del material ayudan a la reflexión de las señales. Luego de aplicar los diferentes algoritmos se obtuvo la resolución en rango frontal máxima del radar igual a 30 m, esto debido a la limitante que genera la conexión USB entre el computador y la tarjeta USRP, además se logró una resolución en rango transversal igual a 7.65 cm. Con este prototipo SAR se pudo determinar claramente el ancho de cada objetivo lo que hace posible la detección y ubicación de los mismos luego de aplicar el algoritmo de migración de rango (RMA). Se recomienda probar el prototipo radar con Linux para evitar la saturación de datos ocasionada por la conexión USB entre la tarjeta USRP y el computador.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TELECOMUNICACIONES>, <RADAR DE APERTURA SINTÉTICA [SAR]>, <TARJETA USRP>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <GNURadio (SOFTWARE)>, <RESOLUCIÓN RADAR >, <ALGORITMO DE MIGRACIÓN DE RANGO (RMA)>.

SUMMARY

In this research, it was developed a prototype aperture radar (SAR) to detect and locate objects in laboratory environments, for which the USRP B210 card owned by ESPOCH was the main device. It was applied the bibliographical and field methodologies the first allowed the collection of the information which helped to describe the basic operation of a radar system, the requirements of the USRP B210 card and It was emphasized the algorithms of imaging of a SAR, the second allowed to use techniques to collect and process the actual data or facts. In order to generate the signals and perform the data processing, the MatLab software was used, in this the different algorithms were generated as the improvement of the resolution and the formation of the SAR image; On the other hand, the transmission and reception of the signal was done by GNU Radio because it consumes less resources when working with signals in real time. The different tests were carried out in a wide and closed place with a metallic object whose characteristics of the material help the reflection of the signals. After applying the different algorithms, the resolution was obtained in the frontal range of the radar equal to 30m, due to the limitation that generates the USB connection between the computer and the USRP card, in addition a resolution was achieved in transversal range equal to 7.65 cm. With this SAR prototype was possible to clearly defined the width of each target, which makes it possible to stop and locate them after applying the range migration algorithm (RMA). It is recommended to test the prototype. It is recommended to test the prototype radar with Linux to avoid the data saturation caused by the USB connection between the USRP card and the computer.

KEYWORDS: TECHNOLOGY AND SCIENCE OF ENGINEERING, TELECOMMUNICATIONS, SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR), USRP CARD, MATLAB (SOFTWARE), GNU RADIO (SOFTWARE), RADAR RESOLUTION, RANGE MIGRATION ALGORITHM (RMA).

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de titulación se basa en el desarrollo de un prototipo radar de apertura sintética, para la formación de imágenes de pequeña escala en un ambiente de laboratorio. En la actualidad existen diversidad de prototipos radares, pero a un costo muy elevado; por lo que mediante este ejemplar radar basado en tarjetas SDR de propósito general se logra obtener un prototipo radar de bajo costo.

El objetivo principal de esta investigación es: Desarrollar un prototipo mediante un radar de apertura sintética (SAR) para la detección y ubicación de objetos en ambientes internos con una tarjeta USRP B210, para esto se empieza estudiando el funcionamiento básico del sistema radar, se analiza los requerimientos de la tarjeta USRP, se continúa con el estudio de la operación de un SAR con sus diferentes algoritmos para la formación de imágenes, seguidamente se aplican algoritmos mediante software para mejorar la resolución de la tarjeta y se termina verificando y validando los resultados.

Los métodos y técnicas que se utilizaran en este trabajo son la investigación bibliográfica para la obtención de la información, la investigación de campo con la cual se realiza la recolección y el procesamiento de los datos, de manera contemporánea se describe la metodología de las mediciones en la que se utiliza Softwares como GNURadio y MatLab para manipular las señales y realizar el procesamiento de las mismas.

Finalmente, se realizan las respectivas simulaciones y pruebas con el prototipo radar utilizando la tarjeta USRP B210 que posee la ESPOCH en sus laboratorios, se presentan los resultados y se realiza el respectivo análisis, el presente trabajo se finiquita con las conclusiones y las respectivas recomendaciones.

Este trabajo deja un aporte a la investigación de la ESPOCH, que al realizar unas pequeñas variaciones del sistema radar se puede aplicar en un área diferente a la formación de imágenes mediante un radar de apertura sintética.

Antecedentes

Heinrich Rudolf Hertz fue quien descubrió la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio, en 1887 mediante un experimento logró transmitir ondas electromagnéticas entre una antena emisora y una antena receptora, demostrando que las ondas electromagnéticas son capaces de ser reflejadas de un modo parecido al comportamiento de los rayos luminosos, confirmando experimentalmente las teorías del físico inglés James C. Maxwell sobre similares características entre las ondas luminosas y electromagnéticas.

Robert Watson-Watt, ocupó sus conocimientos para, a través de ondas de radio, obtener una manera de alertar a los pilotos de la presencia de tormentas y malos tiempos, es así que en 1935 consiguió una patente para el sistema de radar al lograr la primera detección de un avión a través de ondas de radio a una distancia de 15 millas.

En 1953, se formó la primera imagen SAR donde se utilizó un avión C-46 para asignar una sección de Key West, Florida. El primer sistema SAR por satélite a bordo fue desarrollado por los investigadores de Aeronáutica y del Espacio NASA (Administración Nacional) en 1978. Este notable invento por satélite proporciona una gran cantidad de datos para aplicaciones oceanográficas.

En la actualidad existen varios módulos para realizar investigaciones como el Universal Software Radio Peripheral (USRP) que es un periférico de bajo costo diseñado para trabajar junto con una computadora a través de una FPGA permitiendo la realización de Software Radios. Esta tarjeta USRP permite trabajar con ondas electromagnéticas por lo que la construcción de un prototipo radar de bajo costo puede ser desarrollado.

Formulación del problema

La formación de imágenes SAR se lo puede desarrollar con algún tipo de dispositivo radar que actualmente ya existen en el mercado, varios de estos dispositivos presentan grandes ventajas y una excelente resolución en rango, la gran desventaja es que presentan un acceso limitado o su costo de adquisición es muy elevado.

Con este proyecto se pretende desarrollar un prototipo de sistema radar de bajo costo que permita detectar y ubicar objetos en lugares internos de poca visibilidad o acceso limitado, para esto se pretende utilizar la tarjeta multipropósito USRP B210 propiedad de la ESPOCH, la misma que permite trabajar con señales de radiofrecuencia y fácilmente se lo puede programar como un radar.

Justificación del Trabajo de Titulación

Justificación Teórica

El radar de apertura sintética permite resolver las limitaciones de la resolución tangencial que tiene un radar, dado que si es necesario una gran resolución tangencial se requiere de antenas de gran apertura, la solución a este problema se puede conseguir mediante algoritmos de procesamiento de los ecos recibidos a partir del movimiento del objetivo o del radar, de esta manera se consigue formar una apertura virtual mayor a la normal con pequeñas antenas.

El sistema SAR digitaliza y registra el conjunto de ecos recibidos por cada barrido de frecuencia emitido. La repetición regular de estos barridos genera una matriz de dos dimensiones de datos SAR, la cual necesita ser procesada para poder interpretar la información contenida en cada eco.

Para la transmisión y recepción de las señales existen varios dispositivos radares con sus respectivas modulaciones a precios altos, es por eso que se pretende utilizar una tarjeta de propósito general como la USRP para poder enviar y recibir la señal, posteriormente mediante el uso del software MatLab se aplican algoritmos que permiten el procesamiento de las señales y de esa manera construir una imagen.

Justificación Aplicativa

Las señales que envía o recibe la tarjeta USRP necesitan ser procesada en un computador con la ayuda de un software para obtener la información necesaria, la unión de software y hardware (tarjeta USRP) permiten la creación de un prototipo radar de bajo costo, con múltiples aplicaciones como el control del tráfico vehicular, detección de objetivos, SAR, etc.

Este prototipo de SAR tiene como finalidad ser utilizado en ambientes internos en donde exista poca visibilidad o el acceso a dicho lugar no sea posible, con esta técnica radar se puede obtener un panorama de los diferentes objetos, a la vez sus características como distancia, ubicación, tamaño.

Este modelo admite realizar un estudio del funcionamiento del SAR para ambientes internos, que a futuro permita con variaciones de ciertos parámetros o con una tarjeta que presente mejores características a la utilizada, trabajar en otras investigaciones.

Objetivos:

Objetivo general:

Desarrollar un prototipo mediante un radar de apertura sintética (SAR) para la detección y ubicación de objetos en ambientes internos con una tarjeta USRP B210.

Objetivos Específicos:

- Determinar los requerimientos del dispositivo USRP B210 para aplicaciones multi radar
- Desarrollar un algoritmo mediante Matlab para el mejoramiento de la resolución de la tarjeta USRP B210
- Desarrollar un algoritmo con los datos obtenidos mediante la tarjeta USRP B210 para realizar el procesamiento correspondiente de un sistema SAR
- Verificar y validar los resultados

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Radar

1.1.1. Definición

RADAR es un acrónimo de (Radio Direction and Ranging). Un radar es un equipo electrónico que detecta la presencia de objetos utilizando la energía electromagnética, estas ondas parten del radar, chocan contra un objetivo, regresan al radar y este realiza el procesamiento adecuado para determinar diferentes características del objetivo. (Lara & Olivares, 2013, p. 9)

La energía electromagnética utilizada para el radar no se ve afectada por la oscuridad, niebla o las nubes. Esto permite que los sistemas radar puedan determinar la posición de los aviones, barcos, u otros obstáculos que son invisibles a simple vista debido a la distancia, la oscuridad o el clima. (Charvat, 2014, p. 1)

1.1.2. Funcionamiento

Básicamente un sistema radar consta de un transmisor y un receptor con una modulación específica diseñada para facilitar el procesamiento de la información. La energía electromagnética que se origina en el transmisor viaja en el espacio libre aproximadamente a la velocidad de la luz hasta encontrar un objetivo, un fragmento de la energía electromagnética choca con el objetivo, se refleja, regresa y es detectada por el receptor como se muestra en la Figura 1-1.

Esta energía reflejada o eco contiene la información necesaria para determinar parámetros como, distancia, posición, velocidad, características de uno o varios objetivos. (Álvarez & Shagñay, 2015, p. 22)

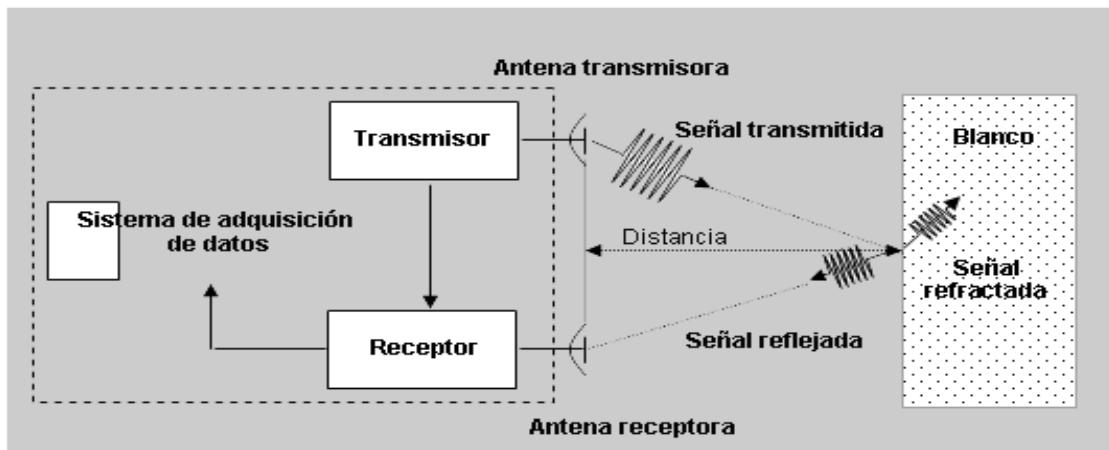


Figura 1-1 Funcionamiento de un sistema radar

Fuente: <http://www.umag.cl/investigacion/dpa/radar/sistemas/ecuaciones/figura-02.gif>

1.1.3. Clasificación de los sistemas Radar

Los radares pueden clasificarse en numerosas categorías fundamentadas en las características específicas del radar, pero más a menudo se clasifican por su frecuencia de operación o por las formas de onda que utiliza el radar. (Mahafza, 2013, pp. 16-20)

1.1.3.1. Tipos de radares por su frecuencia de operación

- Radares de alta Frecuencia (HF): Utilizan la reflexión de las ondas electromagnéticas de la ionosfera para detectar objetivos más allá del horizonte.
- Radares de muy alta frecuencia (VHF): Se utilizan para radares de alerta temprana de gran alcance.
- Radares de ultra alta frecuencia (UHF): Se usa en el sistema de búsqueda y detección de los misiles balísticos.
- Radares en banda L: Son básicamente sistemas basados en tierra y basados en barcos que se usan en operaciones de búsqueda militar y de control de tráfico aéreo de largo alcance.
- Radares en banda S: La mayoría de los radares de alcance medio basados en tierra y en barcos operan en la banda S.
- Radares en banda C: Manipulados en meteorología, así como para los radares militares de búsqueda y control de fuego de medio alcance.
- Radares en banda X: Es utilizado en sistemas en donde el tamaño de la antena constituye una limitación física, principalmente en los aviones militares.
- Radares en altas frecuencias (Ku, K y Ka): Sufren condiciones meteorológicas severas y atenuación atmosférica por lo que se utiliza para aplicaciones de corto alcance como el control del tráfico vehicular.

La tabla 1-1 describe los rangos de frecuencias asignadas por la IEEE.

Tabla 1-1 Frecuencias y tipos de Radar

Designación de frecuencias	Rango de frecuencias en GHz (estándar IEEE)	Nuevas bandas designadas en GHz
HF	0.003-0.03	A
VHF	0.03-0.3	A<0.25; B>0.25
UHF	0.3-1.0	B<0.5; c>0.5
L_Band	1.0 -2.0	D
S_Band	2.0-4.0	E<3.0; F > 3.0
C_Band	4.0-8.0	G<6.0; H>6.0
X_Band	8.0-12.5	I<10.0; J>10.0
Ku_Band	12.5-18.0	J
K_Band	18.0-26.5	J<20.0; K>20.0
Ka_Band	26.5-40.0	K
V & Wo MMW	Normal>34.0	

Fuente: Mahafza, 2013, p. 17

1.1.3.2. Tipos de radares por la forma de onda

Los radares por su forma de onda pueden ser de onda continua o pulsados.

- Radar de Onda Continua

Son aquellos que emiten continuamente la señal y utilizan una antena para la transmisión y otra para la recepción. Este tipo de radares utilizan una señal no modulada pudiendo medir con precisión la velocidad del objetivo mediante el desplazamiento Doppler. Si se utiliza una señal de onda continua modulada además de detectar la velocidad es posible adquirir información de la distancia a la que el objetivo se encuentre.

- Radar Pulsado

Los radares pulsados utilizan un tren de impulsos estrechos usualmente del orden de 0,1 a 50 μ s aproximadamente como se muestra en la Figura 2-1. Utilizan algún tipo de modulación para su operación que permite al radar estimar tanto la distancia como la velocidad del objetivo, generalmente miden el tiempo que la señal se toma en alcanzar el objetivo y volver al receptor. (Wang, 2008, p.147)

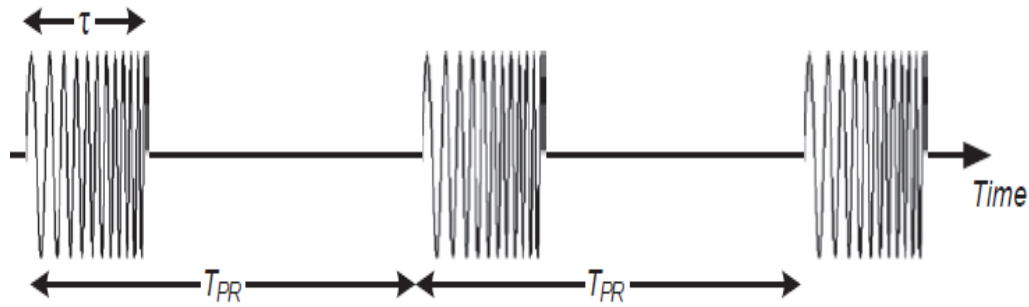


Figura 2-1 Sistema de radar de pulsos con una secuencia de impulsos modulados

Fuente: (Ozdemir, 2012, p. 67)

1.1.4. Generación de Señales Radar

La señal radar depende de la aplicación del radar. Por lo tanto, diferentes formas de onda pueden ser utilizadas para las diversas aplicaciones de radar. Las formas de onda de radar más utilizadas según (Ozdemir, 2012, p.51) son:

- Tren de pulsos
- Onda continua (CW)
- Onda continua modulada en frecuencia (FMCW)
- Onda continua de frecuencia escalonada (SFCW)
- Pulso corto
- OFDM

1.1.4.1. Tren de pulsos

Este tipo de radares transmiten y reciben un tren de pulsos modulados. El alcance de un objetivo se puede determinar por el recorrido de la señal en el trayecto de ida y vuelta de los pulsos al objetivo. (Ozdemir, 2012, p.52)

Para la formación de esta señal radar existen 4 parámetros fundamentales que son:

- La frecuencia de la portadora
- La longitud del pulso
- La modulación del pulso
- La PRF (Frecuencia de repetición de impulsos, en el dominio del tiempo)

La figura 3-1 muestra una onda cuadrada para señal radar con sus diferentes parámetros fundamentales en el dominio del tiempo, mientras que en la figura 4-1 se define la anchura del lóbulo en el dominio de frecuencia.

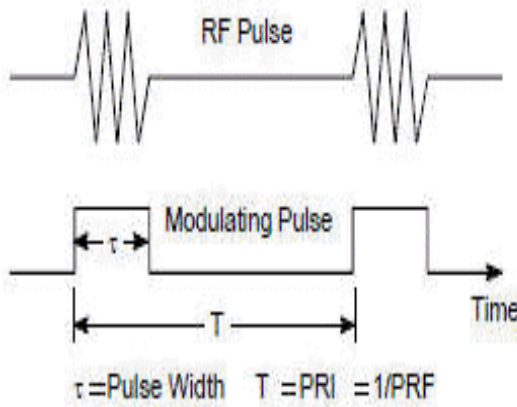


Figura 3-1 Forma de onda por modulación de pulso

Fuente: <http://www.rfcafe.com/references/electrical/ew-radar-handbook/modulation.htm>

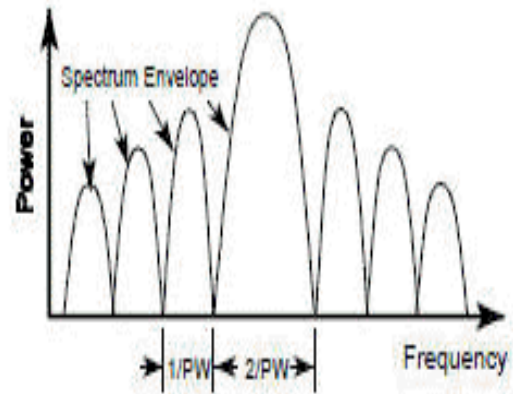


Figura 4-1 Anchura del lóbulo por modulación de pulso

Fuente: <http://www.rfcafe.com/references/electrical/ew-radar-handbook/modulation.htm>

1.1.4.2. Onda Continua (CW)

Un sistema radar CW transmite señales de onda de radio a una frecuencia definida. Si tanto el radar como el objetivo están estacionarios, entonces la frecuencia de la señal CW recibida es la misma que la señal transmitida.

Si el objetivo está moviéndose con respecto al radar, las componentes de frecuencia de la señal reflejada se desplazan de la frecuencia transmitida. Este cambio que ocurre en el espectro de la frecuencia es de gran importancia para determinar la velocidad a la que se encuentra moviéndose el objetivo y es conocido como desplazamiento de frecuencia Doppler.

La señal de onda continua en el dominio del tiempo se define matemáticamente mediante la Ecuación 1-1, y se observa en la Figura 5-1.

$$tx(t) = A \cdot \cos(2\pi f_o t) \quad \text{Ecuación 1-1}$$

Donde, A es la amplitud de la onda, f_o es la frecuencia de operación del radar.

El espectro de frecuencia de la señal CW se puede encontrar fácilmente aplicando la de transformada de Fourier con la Ecuación 2-1 y se muestra en la Figura 6-1 en donde, $f_o = 1000$ Hz.

$$Tx(f) = \frac{A}{2}(\delta(f - f_0) + \delta(f + f_0))$$

Ecuación 2-1

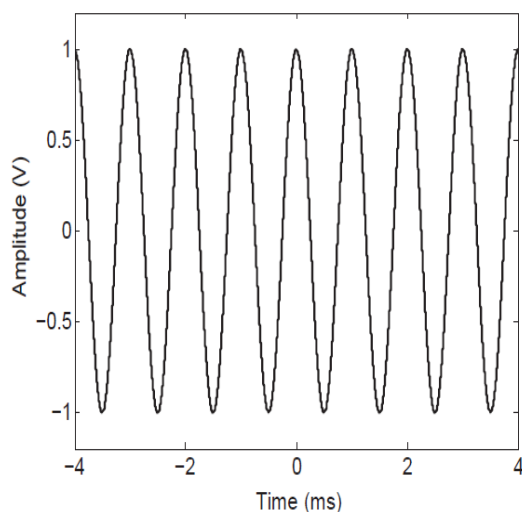


Figura 5-1 Señal sinusoidal de onda continua en el dominio del tiempo

Fuente: Ozdemir, 2012, p.53

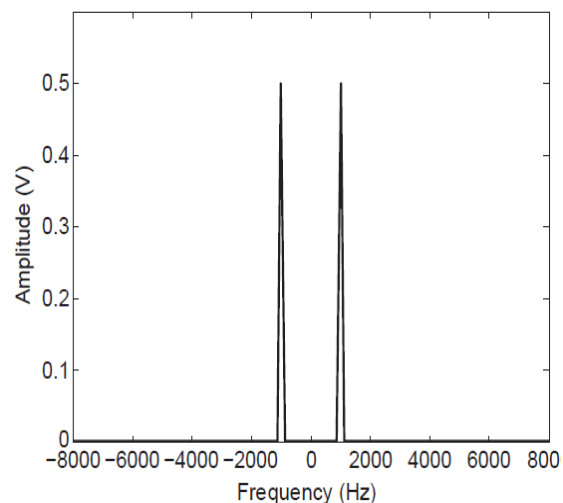


Figura 6-1 Señal sinusoidal de onda continua en el dominio de la frecuencia

Fuente: Ozdemir, 2012, p.53

El desplazamiento Doppler en el dominio de frecuencia de la onda reflejada se crea debido al movimiento del radar, del objetivo o ambos, el cual se puede calcular mediante la Ecuación 3-1.

$$f_D = 2 \frac{v_r}{\lambda_0}$$

Ecuación 3-1

En donde f_D es la frecuencia Doppler, v_r es la velocidad radial del objetivo móvil, λ_0 es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de la onda transmitida.

El principal uso que se les da a este tipo de radares CW es para el control de la velocidad del tráfico vehicular.

En la Figura 7-1 se muestra el funcionamiento del radar de policía CW. Primero el radar está fijo y transmite una señal CW a una frecuencia f_0 , la frecuencia de la onda reflejada desde un objetivo fijo es la misma frecuencia de transmisión f_0 . Segundo si el objetivo se acerca al radar, la frecuencia de la onda reflejada aumenta con una cantidad desplazada de f_D .

Tercero si el objetivo se aleja del radar, la frecuencia de la onda reflejada produce un valor negativo de frecuencia Doppler. Por lo tanto, la longitud de onda de la onda reflejada aumenta, y la frecuencia disminuye con una cantidad de f_D . (Ozdemir, 2012., pp.51-53)

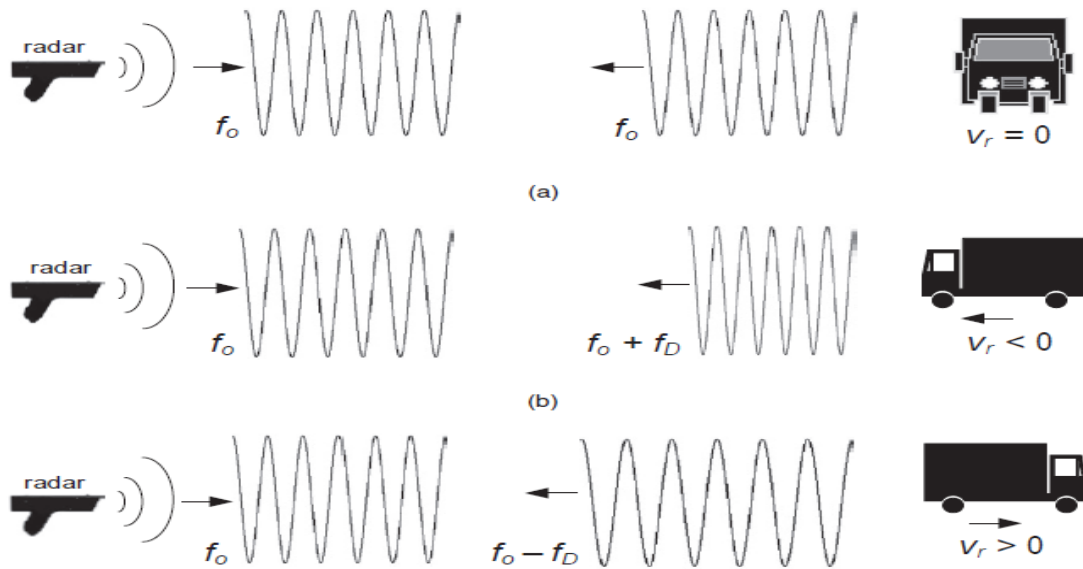


Figura 7-1 Funcionamiento de un sistema radar de policía.

Fuente: Ozdemir, 2012., p.54

Este tipo de onda continua en aplicaciones radar presenta las siguientes ventajas

- Son fáciles de fabricar debido que generan formas de ondas simples.
- Detectan cualquier objetivo dentro del rango que el nivel de potencia lo permita.
- Se pueden usar tanto en bandas de frecuencias muy bajas y muy altas.

Y presentan las siguientes desventajas

- No pueden estimar la distancia de un posible objetivo o blanco, debido a que la onda necesita ser modulada.
- Son capaces de detectar solo objetivos móviles.
- La energía reflejada de los objetivos estacionarios se filtra.
- Maximizan el consumo de energía ya que transmiten continuamente la señal.

1.1.4.3. Onda continua modulada en frecuencia (FMCW)

El radar FMCW se puede utilizar para determinar el alcance de un posible objetivo a diferencia del radar CW que sólo puede estimar el desplazamiento Doppler. Su modulación en frecuencia se lo realiza aumentando la frecuencia a medida que pasa el tiempo, por lo que se la conoce también como modulación de frecuencia lineal o modulación chirp. La Figura 8-1 muestra la señal FMCW en el dominio del tiempo que se representa mediante la Ecuación 4-1.

$$tx(t) = A \cdot \cos(2\pi(f_o \pm c_r t)t) \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Donde, A representa la amplitud de la señal, f_0 el inicio de la frecuencia y c_r la velocidad de la señal chirp, el signo "+" indica un incremento en frecuencia de la señal chirp (upchirp) y el signo "-" un decremento de frecuencia de la señal chirp (downchirp). La característica principal de una señal upchirp es que la frecuencia de la onda aumenta a medida que avanza el tiempo.

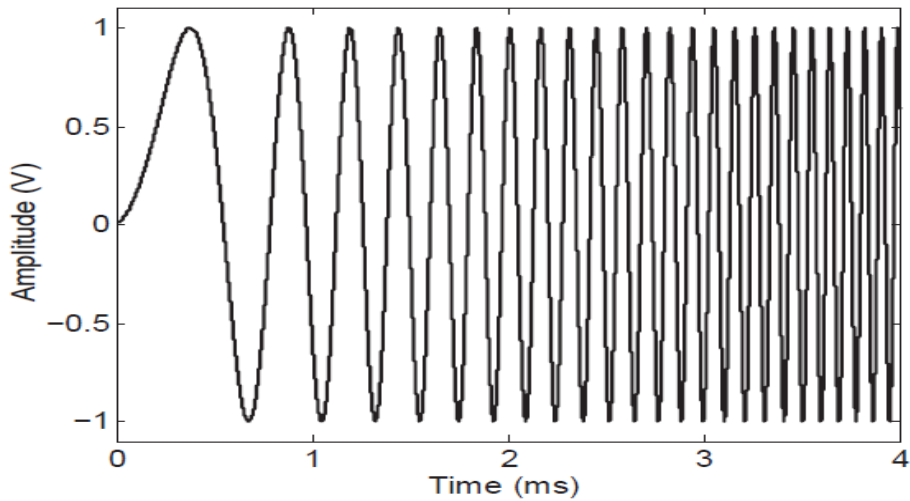


Figura 8-1 Señal de onda continua modulada en frecuencia lineal

Fuente: Ozdemir, 2012., p.55

La frecuencia instantánea de esta señal se puede encontrar fácilmente tomando la derivada temporal de la fase como indica la Ecuación 5-1.

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt} (2\pi(f_0 \pm c_r t)t)$$

$$f_i(t) = f_0 \pm c_r t \quad \text{Ecuación 5-1}$$

La variación de frecuencia lineal se puede representar como en la Figura 9-1, donde el periodo de la serie de ondas LFM es T y la señal recibida llega con un retardo de t_d , este tiempo de retardo se puede determinar realizando la diferencia de frecuencias (Δf) entre las señales transmitida y recibida, con la Ecuación 6-1.

$$\Delta f = f_{tx} - f_{rx}$$

$$\Delta f = (f_0 \pm c_r t) - (f_0 \pm c_r (t - t_d))$$

$$\Delta f = \pm c_r \cdot t_d \quad \text{Ecuación 6-1}$$

El tiempo de retardo se relaciona con el alcance R del objetivo mediante la Ecuación 7-1

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad \text{Ecuación 7-1}$$

Donde, c es la velocidad de la luz en el vacío. Al combinar la Ecuación 6-1 y la Ecuación 7-1 se puede determinar la distancia del objetivo, con la Ecuación 8-1.

$$R = c \frac{\Delta f}{2c_r} \quad \text{Ecuación 8-1}$$

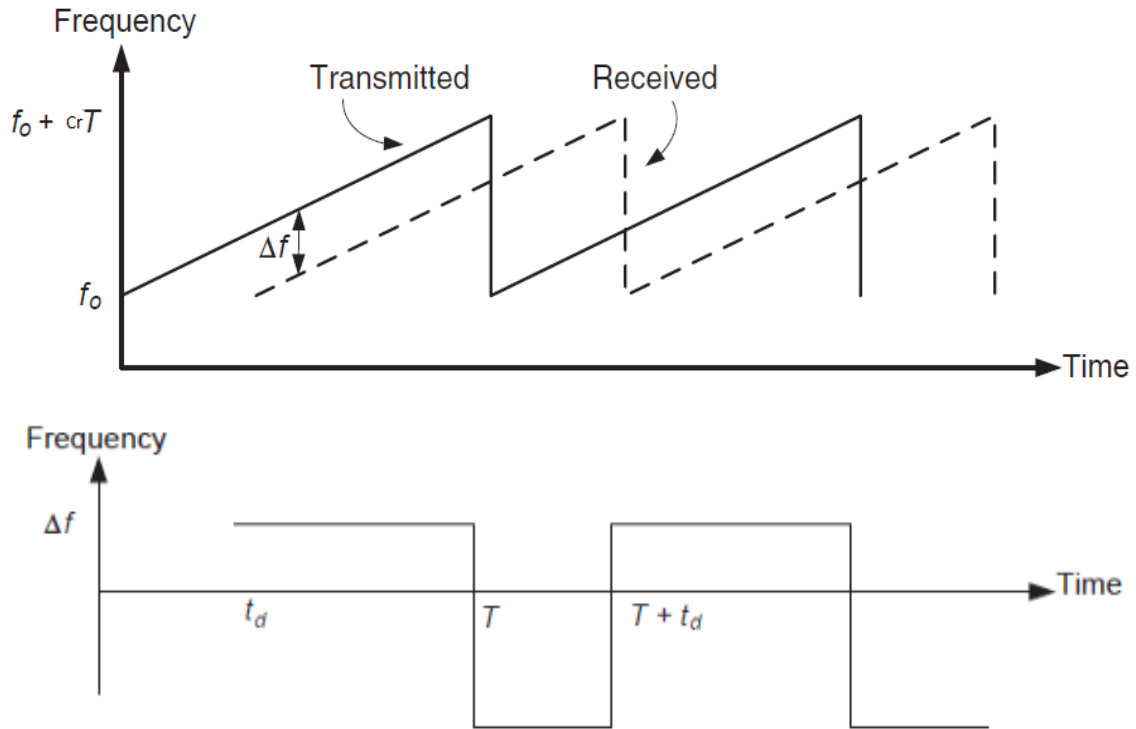


Figura 9-1 Señal FMCW lineal transmitida y recibida

Fuente: Ozdemir, 2012, p.56

El diagrama de bloques del radar de onda continua modulado en frecuencia lineal (LFMCW) se muestra en la Figura 10-1. El generador LFMCW crea la señal para ser transmitida, el receptor recoge la onda reflejada y procede a multiplicarla con la señal transmitida, entonces la señal es alimentada a un discriminador que contiene un diferenciador más un detector de envolvente, la salida del discriminador es proporcional a la diferencia de frecuencia Δf que se le conoce como la frecuencia de batido.

Si están presentes múltiples objetivos, entonces se superpondrán múltiples frecuencias. Una forma de considerar los objetivos en términos de frecuencias de batido es pensar en cada uno como una frecuencia espacial, donde cuanto más lejos un objetivo está en el espacio, mayor es la frecuencia espacial

Otra forma de determinar la distancia de los objetivos es utilizando el análisis de Fourier, lo cual veremos más adelante.

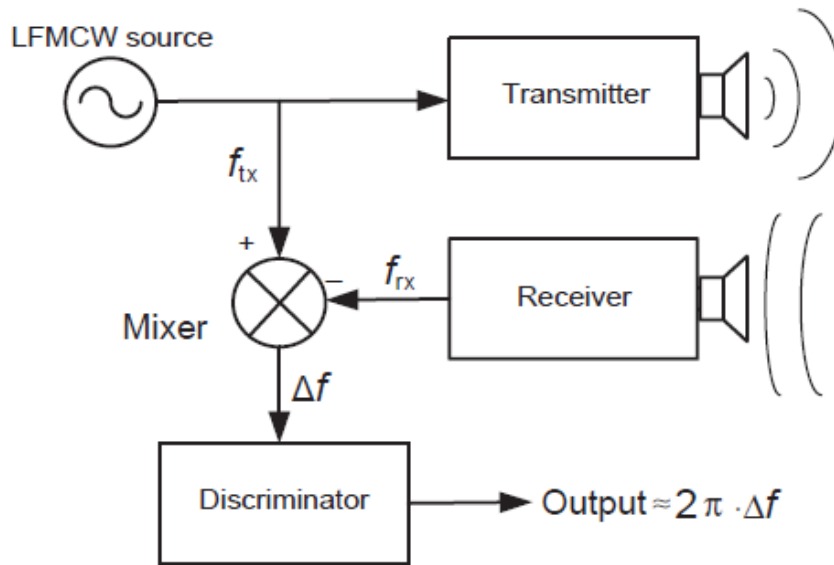


Figura 10-1 Diagrama de bloques de un radar FMCW lineal

Fuente: (Ozdemir, 2012, p.57)

A partir de la ecuación 8-1 se puede determinar la ambigüedad del alcance máximo del radar y se produce cuando $t_d > T$. Por lo tanto, la diferencia máxima en la frecuencia puede ser $\Delta f_{max} = c_r t$, lo que significa que el rango máximo no ambiguo puede ser determinado con la Ecuación 9-1.

$$R_{max} = c \frac{\Delta f_{max}}{2c_r}$$

$$R_{max} = c \frac{c_r T}{2c_r}$$

$$R_{max} = c \frac{T}{2} \quad \text{Ecuación 9-1}$$

La Ecuación 9-1 sugiere que el radar FMCW sólo puede utilizarse para la detección de objetos de corto o medio alcance. Por lo tanto, no es adecuado para la detección de largo alcance, debido a que en la detección de largo alcance influenciara parámetros como potencias del transmisor y receptor, ganancias de las antenas, presencia de ruido, el medio de propagación, etc. (Ozdemir, 2012., pp.53-57)

1.1.4.4. Onda continua de frecuencia escalonada (SFCW)

Esta señal se forma mediante la emisión de una serie de sub ondas continuas cortas en una misma frecuencia. Al generar esta señal, las frecuencias entre las sub ondas adyacentes se incrementan

con una frecuencia Δf como se muestra en la Figura 11-1. Para una ráfaga de señal SFCW, se envía un total de N señales CW, cada una con una frecuencia discreta de $f_n = f_0 + (n - 1) \cdot \Delta f$. Cada sub onda tiene una duración de tiempo τ con una distancia T de la sub onda adyacente. El ancho de banda de frecuencia total, B , y el incremento de frecuencia (o resolución), Δf , se pueden calcular fácilmente con la Ecuación 10-1 y Ecuación 11-1 respectivamente.

$$B = (f_{N-1} - f_0) + \Delta f$$

$$B = N \cdot \Delta f \tag{Ecuación 10-1}$$

$$\Delta f = \frac{B}{N}$$

$$\Delta f = \frac{(f_{N-1} - f_0) + \Delta f}{N} \tag{Ecuación 11-1}$$

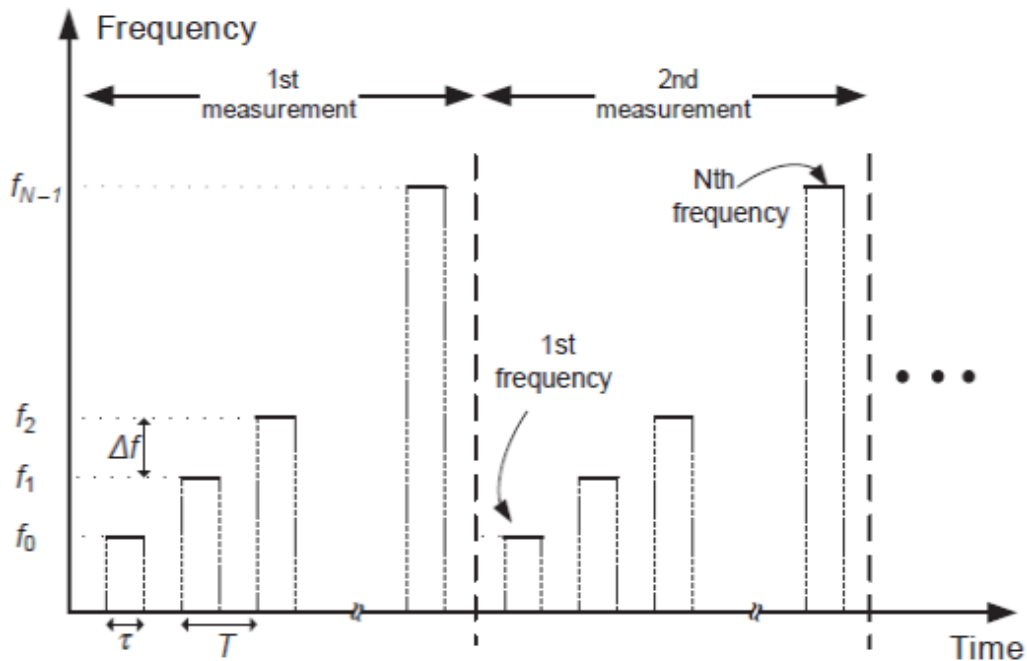


Figura 11-1 Señal SFCW en el plano tiempo vs frecuencia

Fuente: Ozdemir, 2012, p.58

Para determinar la distancia entre el radar y el objetivo se aplica la transformada inversa de Fourier a la salida del radar SFCW, en la que se considera que la fase de la onda reflejada es proporcional al rango como se ilustra en la Figura 12-1. (Ozdemir, 2012, pp.57-58)

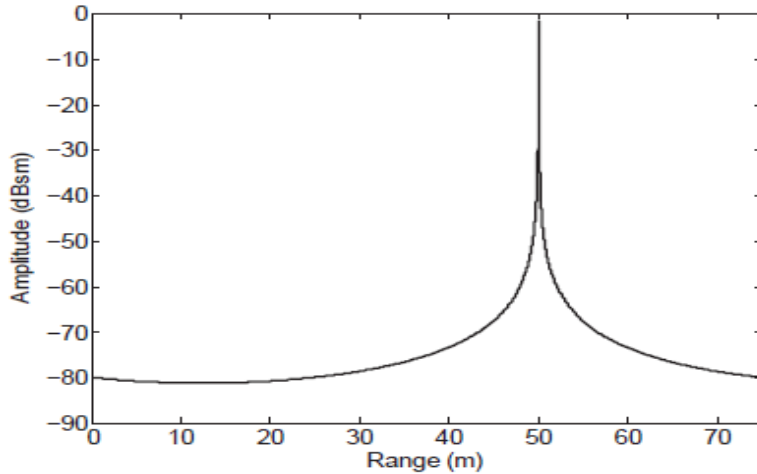


Figura 12-1 Perfil de alcance de un objetivo con un radar SFCW
Fuente: (Ozdemir, 2012., p.59)

1.1.4.5. Pulso corto

Otra forma de onda y una de las más simples es la de pulso corto denominada también de impulso cuya duración en tiempo generalmente está por los nanosegundos. La resolución de rango es determinada por la teoría de Fourier con la Ecuación 12-1.

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \tag{Ecuación 12-1}$$

Donde, B es el ancho de banda de frecuencia del pulso y c la velocidad de la luz en el vacío.

Las formas de onda de pulso cortas más comunes son pulso rectangular, pulso de un solo tono y pulso de onda única. En la Figura 13-1, se muestra una onda rectangular de forma de impulso, y el espectro de esta señal se representa en la Figura 14-1 en donde se puede apreciar un patrón de tipo sinc.

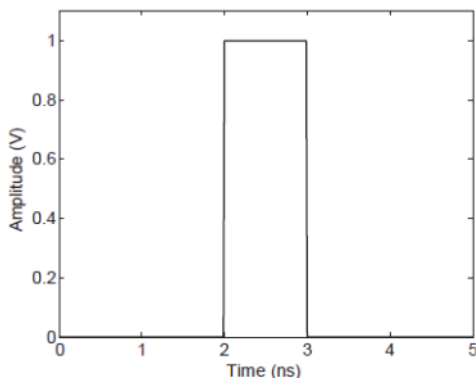


Figura 13-1 Forma de onda de un pulso rectangular en el dominio del tiempo

Fuente: Ozdemir, 2012., p.61

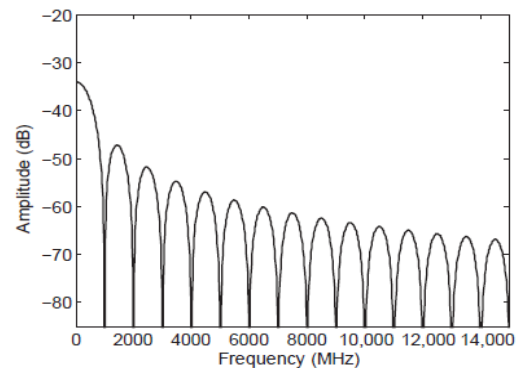


Figura 14-1 Forma de onda de un pulso rectangular en el dominio de la frecuencia

Fuente: Ozdemir, 2012., p.61

La segunda señal de pulso corto es un seno simple como se ilustra en la Figura 15-1. Puesto que el pulso del dominio del tiempo es más suave comparado con el pulso rectangular, el espectro se ensancha y los niveles de los lóbulos laterales disminuyen según lo esperado de acuerdo con la teoría de Fourier como se muestra en la figura 16-1.

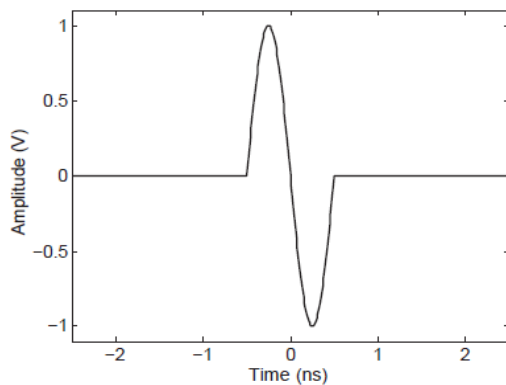


Figura 15-1 Forma de onda de un pulso de un solo tono en el dominio del tiempo.

Fuente: Ozdemir, 2012., p.61

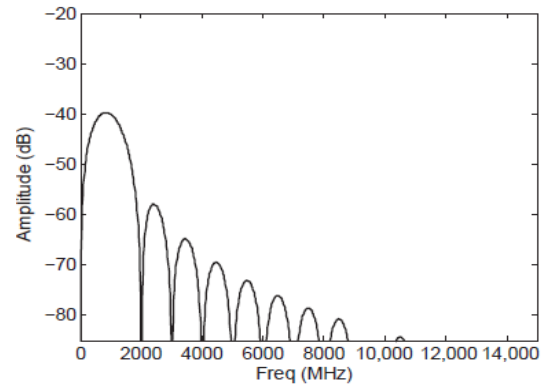


Figura 16-1 Forma de onda de un pulso de un solo tono en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Ozdemir, 2012, p.62

Otra forma de onda de pulso corto se denomina pulso de onda única (Figura 17-1), en donde las ondas son mucho más suaves que el pulso senoidal; por lo tanto, proporcionan menos lóbulos laterales en el dominio de la frecuencia y proporciona un espectro de ultra banda ancha (UWB), como se ilustra en la figura 18-1.

Los pulsos cortos proporcionan un amplio espectro, pero no es posible poner gran cantidad de energía en un pulso muy pequeño. Para solucionar este problema, es necesario utilizar algún tipo de modulación, como una forma de onda chirp. (Ozdemir, 2012, pp.59-63)

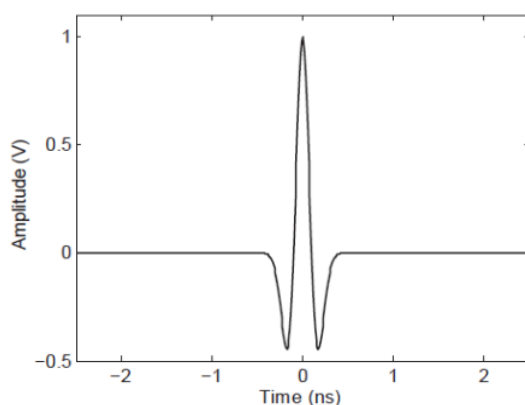


Figura 17-1 Pulso de onda única en el dominio de la Frecuencia

Fuente: Ozdemir, 2012., p.63

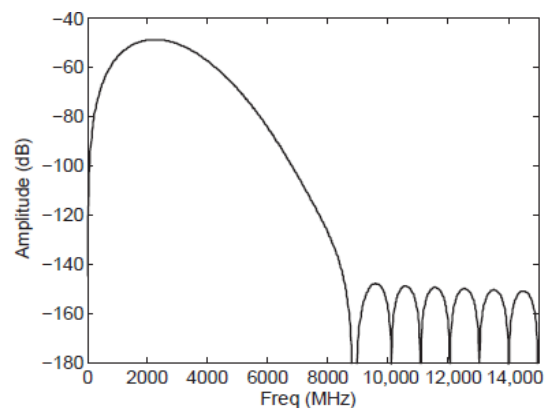


Figura 18-1 Pulso de onda única en el dominio de la Frecuencia.

Fuente: Ozdemir, 2012, p.63

1.1.4.6. OFDM

Una señal OFDM está compuesta por un conjunto de sub portadoras que son matemáticamente ortogonales en el dominio del tiempo. Por lo tanto, el espectro de cada portador tiene un valor nulo en la frecuencia central de los otros portadores en el sistema, y por lo tanto puede alcanzarse un nivel más alto de eficiencia espectral.

Consideramos un radar monostático que emplea un sistema de señalización OFDM con L sub portadoras activas, un ancho de banda de B Hz y una duración de impulso de T segundos. Sea $a = [a_0, a_1, \dots, a_{L-1}]^T$ una representación de los pulsos complejos transmitidos a través de diferentes sub portadoras. Entonces la envolvente compleja de un solo pulso puede ser representado como:

$$s(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l e^{j2\pi l \nabla f t}$$

Donde, $\nabla f = \frac{1}{T} = \frac{B}{L+1}$ y representa el espacio de las sub portadoras.

Sea f_c la frecuencia portadora de operación, la señal transmitida viene dada por la ecuación 13-1

$$s(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l e^{j2\pi f_l t} \quad \text{Ecuación 13-1}$$

Donde, $f_l = f_c + l \nabla f$ representa la l ésima sub portadora de frecuencia.

La figura 19-1 muestra una señal radar OFDM funcionando con las siguientes características: frecuencia portadora $f_c = 1$ GHz; Ancho de banda $B = 125$ MHz; Número de sub portadoras $L = 4$; Espaciamiento de la sub portadora $\nabla f = 25$ MHz. (Satyabrata, 2010, pp. 16-25)

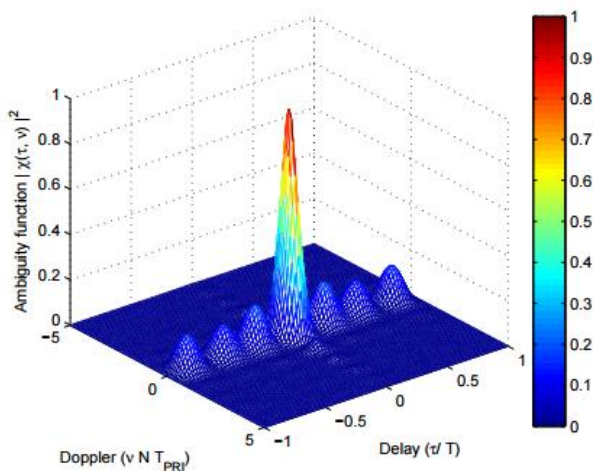


Figura 19-1 Señal radar OFDM

Fuente: Satyabrata, 2010, p.25

1.1.5. Parámetros de un Sistema Radar

Los parámetros que se describen a continuación es para un sistema radar FMCW que al utilizar modulación facilita la obtención de la distancia a la que se encuentre el objetivo.

1.1.5.1. Ancho de Banda

Una señal FMCW puede tener una forma lineal creciente, decreciente o una forma triangular de cambio de frecuencia con respecto al tiempo. En este caso, la frecuencia de la señal aumenta de f_c a f_{max} durante la primera mitad del triángulo, y disminuye de f_{max} a f_c para la segunda mitad como se ilustra en la figura 20-1. El ancho de banda de frecuencia de barrido se determina mediante la ecuación 14-1. (Wang, 2008, p.130)

$$B = f_{max} - f_c \quad \text{Ecuación 14-1}$$

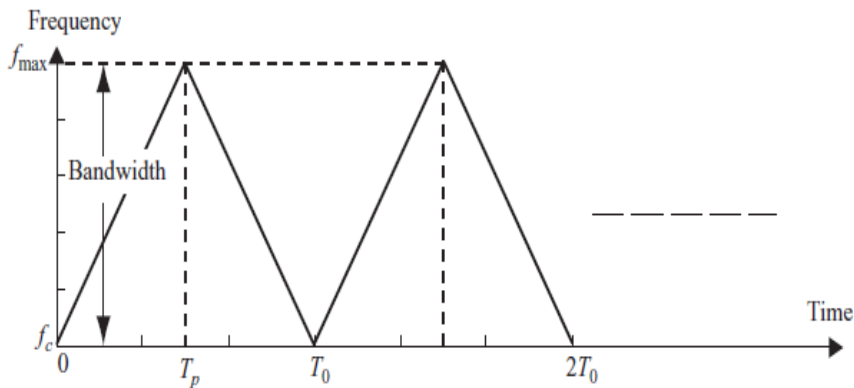


Figura 20-1 Relación del tiempo vs frecuencia de una señal radar FMCW

Fuente: Wang, 2008, p.130

1.1.5.2. Resolución

La resolución de alcance es una medida con la cual un sistema radar puede diferenciar entre diferentes objetivos. Esta distancia es la mínima entre dos objetivos antes de que ya no se pueda diferenciar en el rango. La resolución de rango esperada, para un sistema de radar FMCW lineal depende del ancho de banda de la señal chirp y se puede obtener con la ecuación 15-1.

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad \text{Ecuación 15-1}$$

Donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre y B es el ancho de banda de la señal chirp. (Charvat, 2014, p.75)

1.1.5.3. Alcance máximo de un radar

Cuando se utiliza el análisis de Fourier, el ancho de banda de ruido efectivo del radar FMCW es inversamente proporcional al tiempo de la señal chirp. Cuanto mayor sea el tiempo de la señal chirp, menor será el ancho de banda de ruido efectivo y, por tanto, mayor será la sensibilidad. Esta relación proporciona un alto rendimiento con un transmisor de potencia de pico bajo. El alcance máximo se puede calcular utilizando la ecuación 16-1. (Charvat, 2014, p.74)

$$R^4_{max} = \frac{P_{ave} G_{tx} A_{rx} \rho_{rx} \delta e^{(2\alpha R_{max})}}{(4\pi)^2 k T_0 F_n B_n \tau F_r (SNR)_1 L_s} \quad \text{Ecuación 16-1}$$

Donde

R_{max} = Máximo alcance del sistema radar

P_{ave} = Potencia promedio transmitida (W)

G_{tx} = Ganancia de la antena transmisora

A_{rx} = Apertura efectiva de la antena receptora (m²)

ρ_{rx} = Eficiencia de la antena receptora

σ = Sección transversal del radar (m²) para el objetivo de interés

L_s = Pérdidas del sistema

α = Constante de atenuación del medio de propagación

F_n = Figura del ruido del receptor

k = 1.38×10^{-23} Constante de Boltzmann

T_0 = 290°K Temperatura estándar

B_n = Ancho de banda de ruido del sistema (Hz)

$\tau F_r = 1$, El ciclo de trabajo para un radar de onda continua.

$(SNR)_1$ = Requisito de relación señal / ruido de un solo impulso

1.1.5.4. Radargrama

El radar FMCW es un modo ideal para sistemas de radar de corto alcance donde el bajo costo, el ancho de banda y la alta sensibilidad son requisitos que no deben ser comprometidos. El radar

proporciona información analógica en el dominio de la frecuencia espacial, que debe ser procesada para determinar el rango hasta el (los) objetivo (s).

Una de las formas de determinar el rango hasta el objetivo es mediante la multiplicación de la onda transmitida (Figura 21-1) por la onda reflejada (Figura 22-1) en el dominio del tiempo como se ilustra en la Figura 23-1, luego se utiliza la transformada inversa discreta de Fourier (IDFT) y finalmente se convierte del dominio de la frecuencia espacial al dominio de la frecuencia temporal.

En la figura 24-1 se puede apreciar la IDFT en el dominio de la frecuencia espacial mientras que la figura 25-1 nos muestra la IDFT en el dominio de la frecuencia temporal en donde el pico más alto representa la distancia a la que se encuentra el objetivo. (Charvat, 2014, p.72)

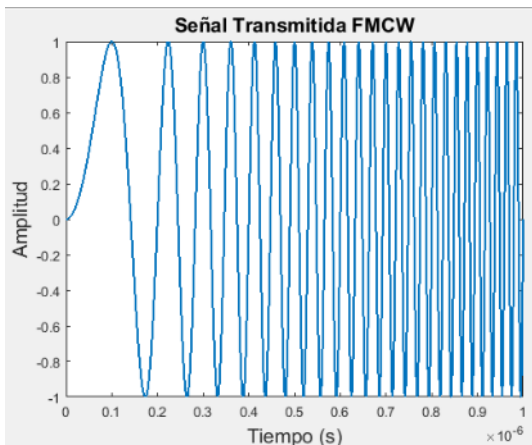


Figura 21-1 Señal Chirp transmitida

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

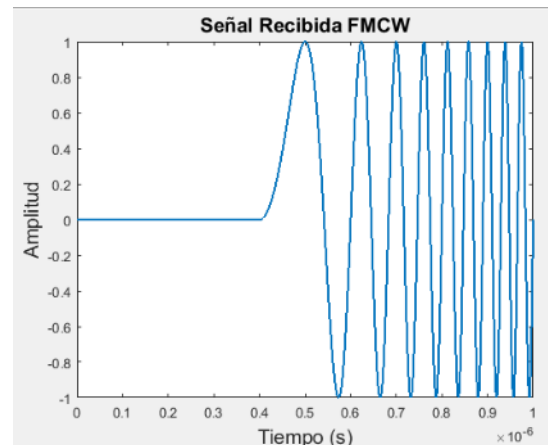


Figura 22-1 Señal Chirp recibida

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

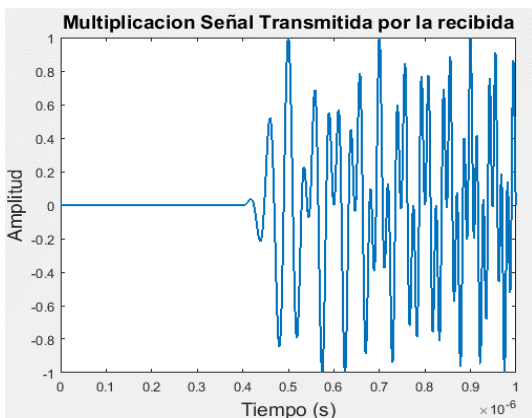


Figura 23-1 Multiplicación en el dominio del tiempo señal transmitida por la señal recibida

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

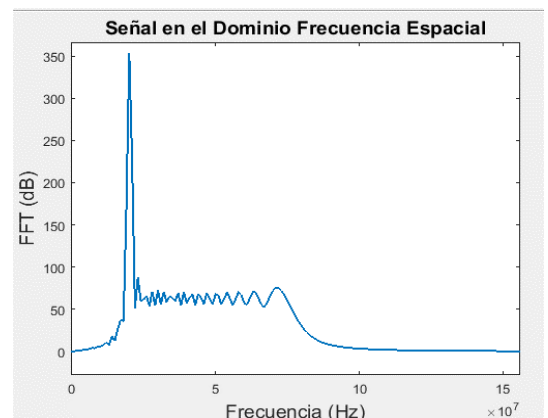


Figura 24-1 Radargrama en el dominio de la frecuencia espacial.

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

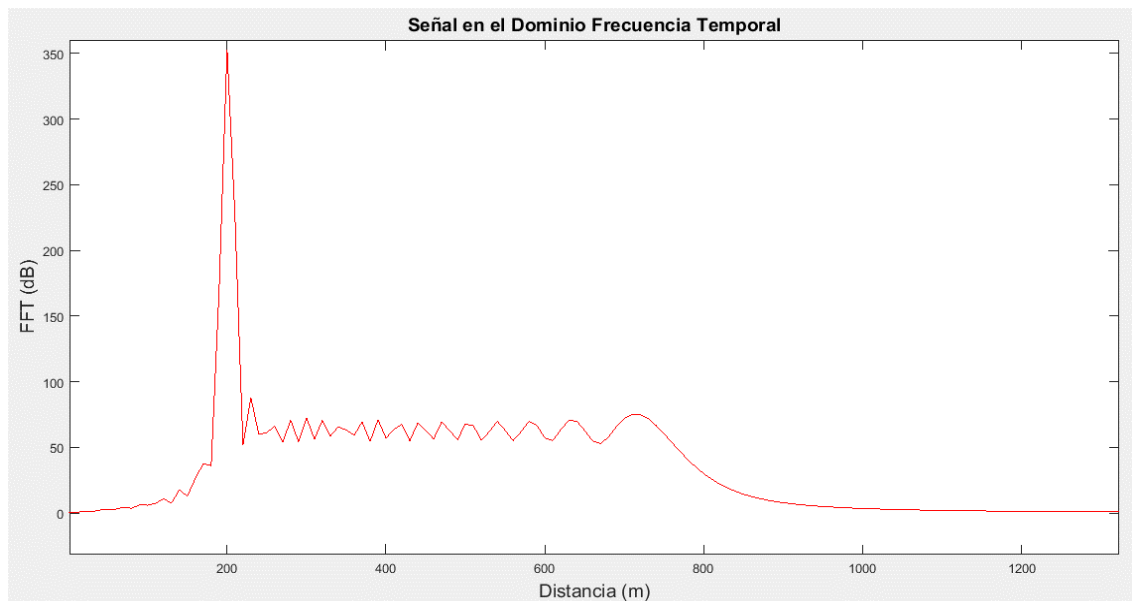


Figura 25-1 Radargrama en el dominio de la frecuencia temporal

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

1.2. Radar de Apertura Sintética (SAR)

1.2.1. Definición

Es un radar de imágenes de microondas activo de alta resolución en dos dimensiones, con este tipo de radar la información se obtiene realizando varios barridos de la antena formando así un solo barrido virtual, con lo que se consigue mejorar el rendimiento y la directividad de la antena. La señal recibida se procesa mediante el uso de algoritmos consiguiendo determinar diferentes características de los objetos como su ubicación, tamaño, tipo de material etc.

Su uso se limitaba, a la cartografía terrestre en donde el radar se ubica en un avión y se adquieren los perfiles mientras el avión se encuentra en movimiento. El SAR también se puede implementar en un entorno de laboratorio de pequeña escala, donde se requiere alta resolución para lograr una correcta formación de las imágenes. (Charvat, 2014, p.137)

1.2.2. Modo de operación

El SAR implementado en un entorno de laboratorio se puede realizar utilizando un carril lineal en donde la posición del radar es bien conocida y se asume que es correcta. Esta geometría de medición SAR de carril se muestra en la figura 26-1 en donde el dispositivo de radar está montado sobre un carril recto de longitud L.

El radar usa una antena cuyo haz está dirigido hacia una escena con un objetivo paralela al carril, el radar realiza su desplazamiento a lo largo del carril deteniéndose en ciertos puntos para adquirir los perfiles de rango, este proceso se repite a intervalos de distancia conocida a lo largo del carril hasta que el dispositivo de radar alcance el final.

Los perfiles de rango sobre cada posición del carril producen una matriz de datos 2D de la posición con respecto a la frecuencia en el tiempo $s(x_n, w(t))$, donde $s(x_n, w(t))$ es la matriz de datos de perfil en el dominio de la frecuencia, x_n es la n-ésima posición de alcance transversal del radar y $w(t)$ es la frecuencia radial instantánea de la señal chirp reflejada; $w(t)$ se define matemáticamente con la ecuación 17-1.

$$w(t) = 2\pi \left(c_r t + f_c - \frac{B}{2} \right) \quad \text{Ecuación 17-1}$$

Donde c_r es la velocidad de la señal chirp definida como $c_r = \frac{B}{T_p}$, f_c es la frecuencia central, B el ancho de banda, T_p el tiempo de duración de la señal chirp. (Charvat, 2014, p.138)

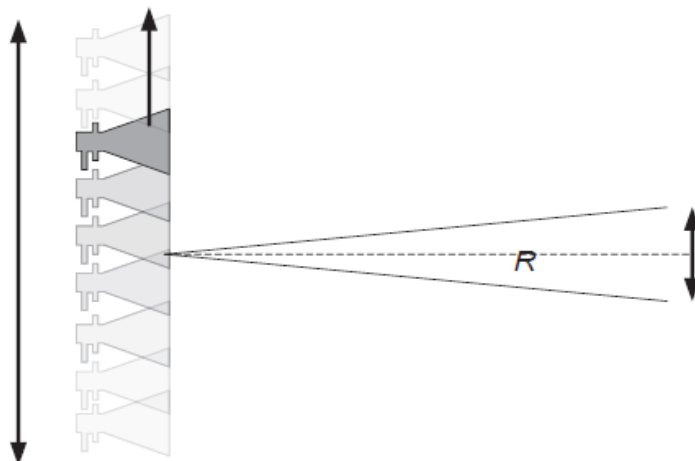


Figura 26-1 Movimiento transversal del SAR

Fuente: Ozdemir, 2012, p.84

1.2.3. Resolución del SAR

La resolución de rango para sistemas de imágenes SAR que utilizan formas de onda lineales de FM es la misma que se describió anteriormente. La resolución de rango cruzado es la distancia mínima de alcance transversal sobre la cual un SAR puede diferenciar entre dos objetivos. La resolución de rango transversal depende de la longitud de la matriz (o abertura) L y de la ubicación del punto objetivo que se mide con relación a la parte frontal de la matriz. La resolución de rango cruzado se calcula mediante la ecuación 18-1.

$$\rho_{cr} = \frac{\lambda_c R_t}{2L \sin \phi_{dc} \cos(\Delta\theta/2)} \quad \text{Ecuación 18-1}$$

Donde, λ_c es la longitud de onda, R_t es la distancia hasta el objetivo, ϕ_{dc} es el ángulo desde el centro de la apertura hasta el objetivo para los sistemas SAR lineales y los sistemas de formación de imágenes en fase cercana $\phi_{dc} = \frac{\pi}{2}$, $\Delta\theta$ es el cambio en el ángulo respecto al objetivo de 0 a L a través de la apertura. (Charvat, 2014, p.149)

Una ecuación útil para el cálculo de $(\Delta\theta)$, dado un rango objetivo R_t y un rango transversal x_t es:

$$\Delta\theta = \left[\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{R_t}{(L/2 + x_t)}\right) \right] + \left[\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{R_t}{(L/2 - x_t)}\right) \right]$$

1.2.4. Formación de imágenes SAR

Existen dos técnicas de procesamiento de señal para producir secuencialmente un mapa o imagen SAR, estos son: procesamiento línea por línea y procesamiento Doppler. El primero se basa a través del movimiento lineal del radar se forma una matriz sintética, donde los elementos de la matriz sintética actual corresponden a la posición de las transmisiones de la antena durante el último intervalo de observación. En el procesamiento Doppler, la matriz de imagen se actualiza una vez cada N pulsos de manera que un bloque en N columnas se genera simultáneamente. En este caso, N se refiere al número de transmisiones durante un intervalo de observación. Desde el punto de vista de la antena, esto es equivalente a tener N lóbulos sintéticos adyacentes formadas en paralelo. (Mahafza, 2013, pp. 457-458)

1.2.5. Algoritmos de formación de imágenes

En las aplicaciones SAR de largo alcance, el Algoritmo de Rango Doppler (DRA) se utiliza normalmente bajo la suposición de que las ondas dispersas por los objetivos son ondas planas con frente de fase lineal. En aplicaciones de SAR de corto alcance, las ondas de regreso hacia la plataforma SAR son ondas esféricas con un frente de fase no lineal. Los algoritmos de formación de imágenes convencionales se usan típicamente bajo la suposición de onda plana.; Sin embargo, el algoritmo de migración de rango (RMA) puede manejar la onda esférica real, por lo que el RMA es adecuado para aplicaciones de escala pequeña. (Mohamed & Widad, 2015, pp. 172-174)

1.2.5.1. Algoritmo de Rango Doppler (DRA)

En el sistema SAR de largo alcance, se transmite una rápida ráfaga de señal LFM, esperando un período corto de tiempo para recibir las reflexiones de los objetivos. El tiempo transcurrido entre las transmisiones de impulsos se conoce como intervalo de repetición de impulsos (PRI) como en la figura 17-1. Una de las ventajas que presenta este sistema de SAR es que se puede implementar con una sola antena.

La formación de la imagen SAR de largo alcance se puede obtener utilizando el algoritmo de Rango Doppler (DRA) que se divide en dos pasos principales (compresión de rango y compresión en acimut) como se muestra en la Figura 28-1.

La compresión de rango se usa para detectar la presencia de la señal de referencia. La referencia de rango y las filas de datos 2D se transforman en dominio de frecuencia usando la transformada rápida de Fourier (FFT) y luego se multiplican. Finalmente se realiza la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT).

Además, la compresión de acimut se implementa para detectar la presencia de la señal. La señal de referencia de acimut y las columnas de los datos 2D se convierten en dominio de frecuencia, y luego se multiplican. La salida del multiplicador se transforma en el dominio del tiempo utilizando la IFFT y con esto se logra la construcción de la imagen. (Mohamed & Widad, 2015, p. 175)

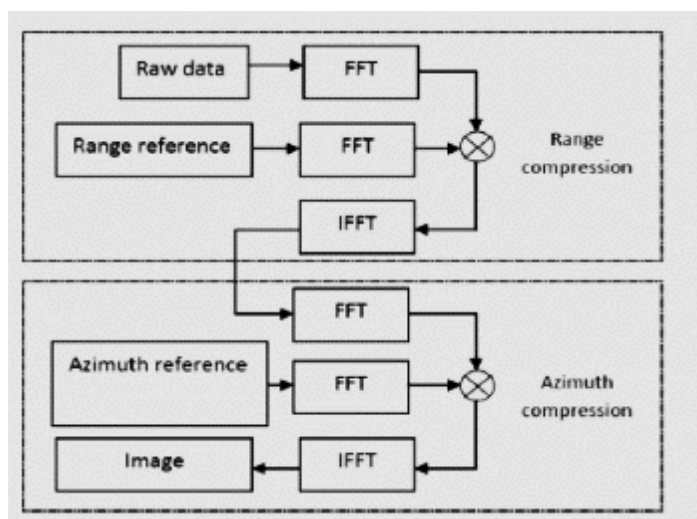


Figura 27-1 Funcionamiento del algoritmo de Rango Doppler

Fuente: Mohamed & Widad, 2015, pp. 175

Raw data (Datos sin procesar) Se refiere a las múltiples mediciones almacenadas en una matriz.

Range Reference (Referencia en Rango) La distancia real que existe entre el objetivo y el radar.

Azimuth Reference (Referencia en acimut) El ángulo que forma el sistema radar y el objetivo.

Image (Formación de la Imagen) Es en donde se muestra el resultado final.

1.2.5.2. Algoritmo de Migración de Rango (RMA)

En el sistema SAR de corto alcance, la señal LFM se transmite continuamente sin período de espera, en donde la señal transmitida y sus reflexiones recibidas se producen simultáneamente, de modo que se requieren dos antenas. Para formar la imagen los datos se procesan usando el Algoritmo de Migración de Rango (RMA) y deben seguir los siguientes pasos:

- DFT transversal
- Filtro coincidente
- Stolt de Interpolación
- Transformada de Fourier inversa en el dominio de la imagen

1.2.6. Formación de la imagen con el algoritmo RMA

Asumiendo que existe un único objetivo en el rango transversal y frontal en $(x_t; y_t)$ su magnitud reflejada se puede representar mediante la ecuación 19-1.

$$s(x_n, w(t)) = a_t e^{-j2\frac{w(t)}{c}\sqrt{(x_n-x_t)^2+y_t^2}} \quad \text{Ecuación 19-1}$$

1.2.6.1. Transformada Discreta de Fourier de rango transversal

El primer paso en el RMA es calcular la DFT de la componente espacial de la matriz de datos SAR $s(x_n, w(t))$, en donde debe aplicarse la DFT a todos los valores de x_n por cada $w(t)$ (figura 29-1) su resultado es una matriz de datos del dominio de frecuencia espacial $s(k_x, w(t))$, Además de la DFT, se realiza la sustitución $k_r = w(t)/c$, esto resulta en la matriz de datos SAR $s(k_x, k_r)$

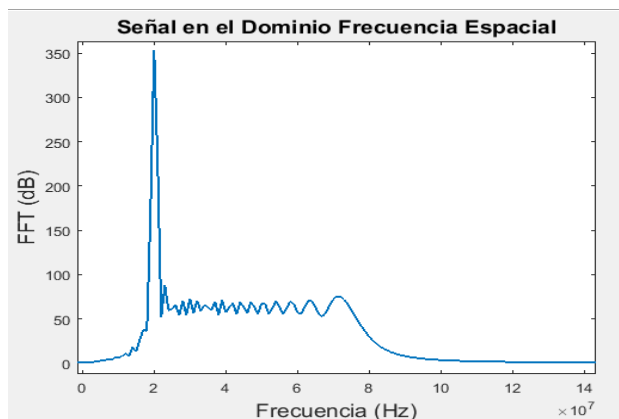


Figura 28-1 Señal en el Dominio de la Frecuencia Espacial

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

1.2.6.2. Filtro coincidente

A continuación, se aplica un filtro 2D para corregir la curvatura del frente de onda, este filtro se representa con la ecuación 20-1.

$$s_{mf}(k_x, k_r) = e^{jR_s \sqrt{k_r^2 - k_x^2}} \quad \text{Ecuación 20-1}$$

Donde, R_s es la distancia frontal al centro de la escena. Multiplicando la ecuación 20-1 por la matriz de datos SAR $s(k_x, k_r)$ obtenemos la ecuación 21-1 que como resultado nos da una matriz de datos SAR aplicado el filtro coincidente. En la figura 30-1 se puede observar una curvatura del frente de onda, mientras que en la figura 31-1 se aprecia una corrección de la curvatura que se obtiene luego de aplicar el filtro coincidente.

$$s_{filtrada}(k_x, k_r) = s_{mf}(k_x, k_r) \cdot s(k_x, k_r) \quad \text{Ecuación 21-1}$$

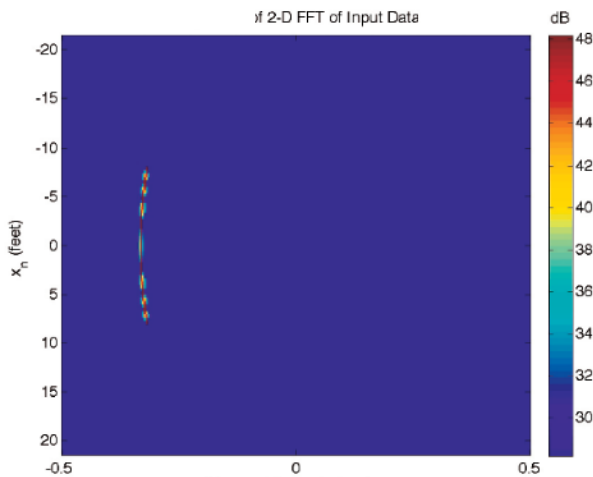


Figura 29-1 Magnitud de la señal reflejada mostrando la curvatura del frente de onda

Fuente: Charvat, 2014, p.142

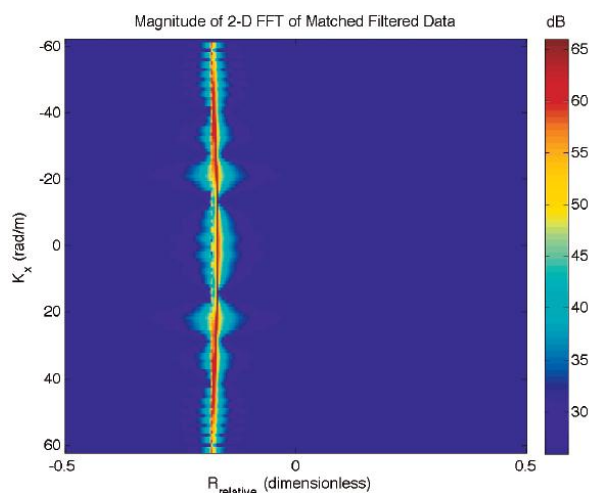


Figura 30-1 Magnitud de la señal reflejada luego de aplicar el filtro coincidente.

Fuente: Charvat, 2014, p.144

1.2.6.3. Stolt de Interpolación

La interpolación de Stolt es el paso crítico en el RMA. Este transforma los datos SAR 2D después del filtrado coincidente de la frecuencia espacial y del número de onda (k_x, k_r) al dominio del número de onda espacial (k_x, k_y) .

La relación del Stolt entre k_y, k_r y k_x esta dado por la ecuación 22-1.

$$k_y = \sqrt{k_r^2 - k_x^2} \quad \text{Ecuación 22-1}$$

Con esto, se aplica una interpolación unidimensional a través de todos los números de onda k_r para mapearlos sobre k_y resultando en la matriz interpolada Stolt $s_{st}(k_x, k_y)$. En la figura 32-1 se puede observar la distribución de los datos antes y después de aplicar la interpolación.

Cuanto mayor sea la apertura del radar, más se notará la curvatura en los datos y cuanto mayor sea la longitud de onda, más se notará la curvatura. El Stolt corrige la curvatura del frente de onda curvando los datos, en software, en la dirección opuesta para cada componente de frecuencia del campo dispersado medido, de manera que el análisis de Fourier puede usarse para calcular una imagen. (Charvat, 2014, p.145)

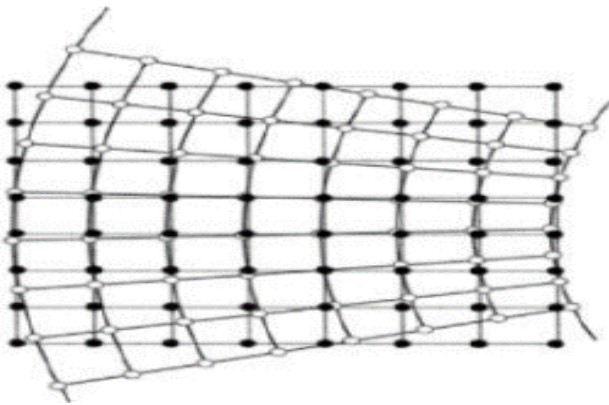


Figura 31-1 Distribución de los datos antes (\circ) y después (\bullet) de la interpolación

Fuente: Mohamed & Widad, 2015, pp. 176

1.2.6.4. Transformada de Fourier inversa en el dominio de imagen (IDFT 2D)

Para convertir la matriz de Stolt $s_{st}(k_x, k_y)$ en el dominio de imagen $S(X; Y)$ se debe tomar una subsección de los datos de interpolación curvos de la figura 33-1 Esta subsección es un rectángulo como se observa en la figura 34-1. La subsección debe ser tomada generalmente de modo que el rectángulo esté completamente lleno de datos.

A veces esto no es posible cuando se trabaja con sistemas de imagen SAR de banda estrecha, en cuyo caso no se usaría una subsección y todas las áreas donde no hay valores en el anillo se establecerían en 0.

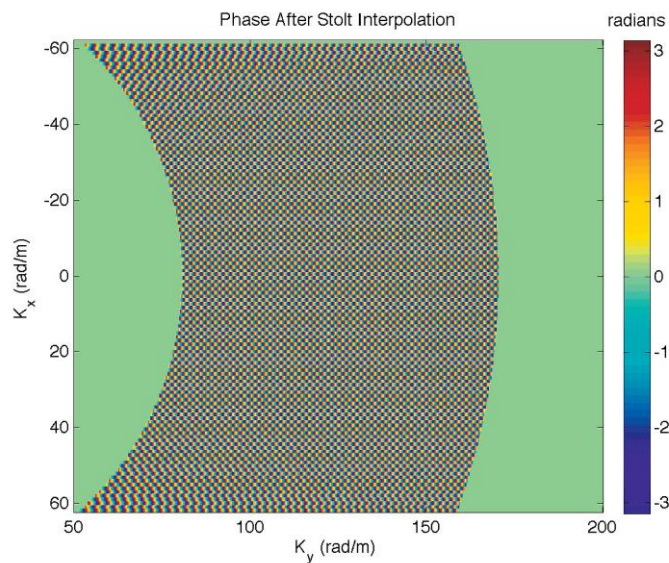


Figura 32-1 Fase después de aplicar el Slot de interpolación

Fuente: Charvat, 2014, p.145

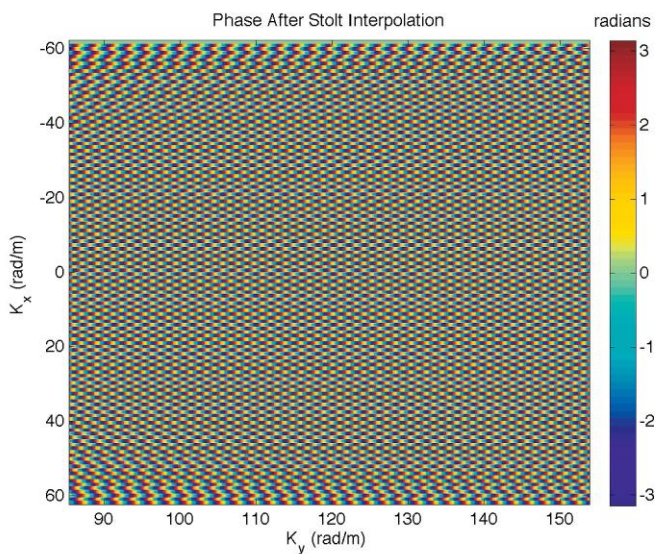


Figura 33-1 Subsección de Fase después de aplicar el Slot de interpolación

Fuente: Charvat, 2014, p.146

Luego de determinar la subsección, la IDFT 2D se aplica (a las filas, luego a las columnas por separado) y se calcula la matriz de imagen SAR resultante $S(X; Y)$. La magnitud relativa en dB de esta imagen SAR se muestra en la figura 35-1, donde la ubicación del punto objetivo se muestra claramente en su ubicación correcta.

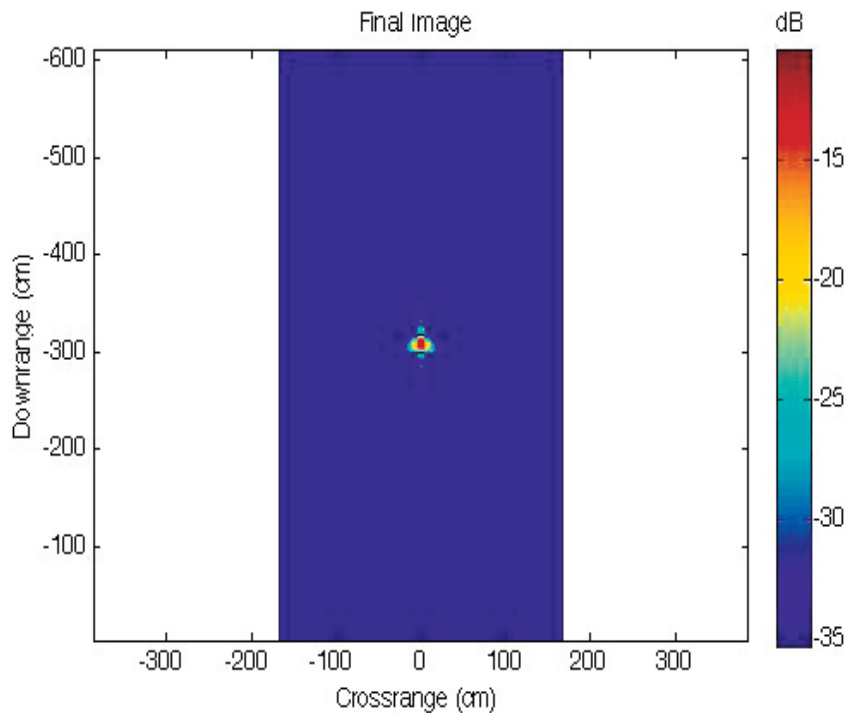


Figura 34-1 Imagen SAR de un de punto simulado

Fuente: Charvat, 2014, p.142

1.3. Software Defined radar (SDRadar)

Software Defined Radar (SDRadar) podría representar un nuevo reto en la tecnología de radar debido a la posibilidad de llevar a cabo la mayor parte de las operaciones básicas (es decir, la mezcla, el filtrado, la modulación y demodulación) simplemente el empleo de módulos de software para lograr la mayor parte del hardware específico.

El objetivo principal de un enfoque definido software se relaciona no sólo a una reducción de costes clara, sino también a un aumento significativo de la versatilidad del sistema, ya que la generación de la señal y los parámetros de procesamiento de señal pueden ser adaptados fácilmente sobre la marcha para la tarea en cuestión. Nuevas investigaciones han sido recientemente llevaron a cabo para implementar un SDRadar

Una posible solución para un sistema de costos de desarrollo SDRadar baja puede obtenerse a través de la adopción del transceptor universal Software Radio Peripheral (USRP), sin embargo, presentan limitaciones de ancho de banda impuestas por la conexión USB, por lo que es necesario la utilización de algoritmos para mejorar el procesamiento de los datos (Dyson, Peter, et al., 2003, pp. 282-287)

1.3.1. Arquitectura del Hardware

El SDR básico debe incluir el frontal de radio que consta de las siguientes funciones para soportar el modo de recepción: unidad de adaptación de antena, amplificador de bajo ruido, filtros, osciladores locales y convertidores analógicos a digital (ADC) para capturar la señal deseada y suprimir señales no deseadas en una extensión práctica. Esto maximiza el rango dinámico del ADC disponible para capturar la señal deseada

Para soportar el modo de transmisión, el frontal radio incluirá convertidores digitales analógico (DAC), osciladores locales, filtros, amplificadores de potencia y circuitos de adaptación de antena. En el modo de transmisión, la propiedad importante de estos circuitos es sintetizar la señal de RF sin introducir ruido ni emisiones no deseadas de cualquier otra frecuencia que pueda interferir con otros usuarios en el espectro. (Arslan, 2007, p. 112)

La figura 36-1 muestra la arquitectura del hardware básico de un SDR.

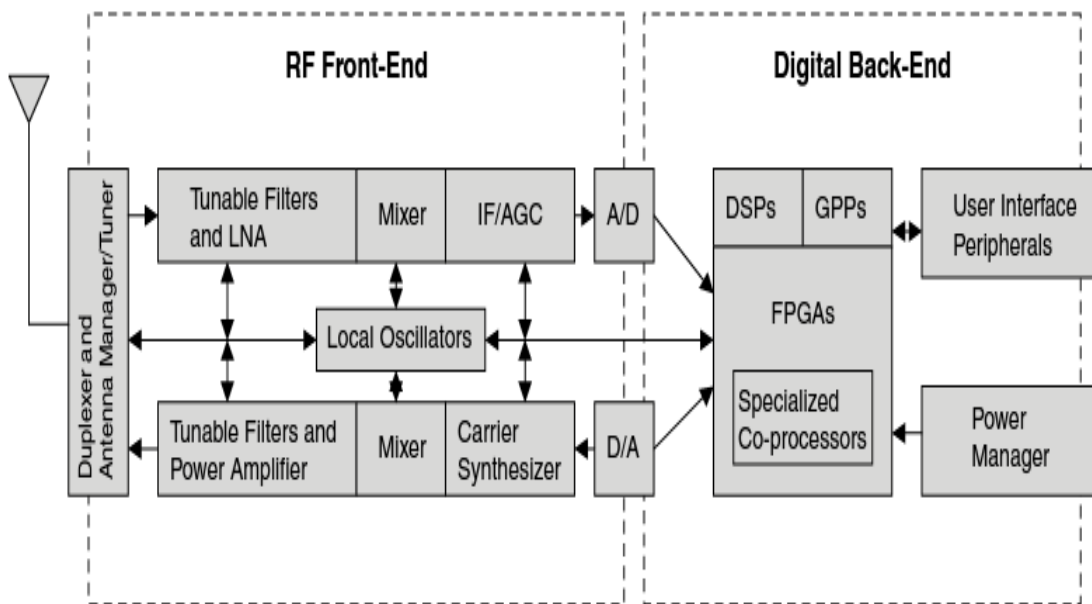


Figura 35-1 Arquitectura básica de hardware de un SDR

Fuente: Fette, 2003, p. 7

1.3.2. Principios de operación

1.3.2.1. Transmisión de la señal

Las muestras para transmitir se producen a una frecuencia de banda base en un formato de valor complejo (es decir, en fase y en cuadratura). Esto se denomina "banda base compleja". Las

muestras complejas pueden ser de 16 bits o de 8 bits, cada muestra es un número complejo de 4 bytes (1 byte = 8 bits), estos se recogen en un búfer luego se entrelazan en paquetes de datos que se transmiten desde el ordenador al FPGA.

Luego se aplica un proceso de digital up converter (DUC) que implica filtrar e interpolar la entrada a un factor para alcanzar la frecuencia de muestreo, finalmente se mezcla la entrada con un modulador complejo. De forma predeterminada, el modulador complejo no mezcla la señal hasta una frecuencia intermedia (IF) a menos que sea especificada por el usuario (ya que se puede transferir señales hasta la portadora RF directamente desde la banda base). (Maxwell ,2012, p.30-32)

1.3.2.2. Recepción de la señal

La señal recibida desde el puerto de RF pasa a través de un diplexor y luego se filtra para obtenerla en banda base y se somete a un amplificador de potencia. A continuación, se mezcla a una frecuencia de banda o IF y se pasa a través de un filtro de paso bajo. Para digitalizar la entrada analógica se utilizan muestras generalmente de 14 bits a través de canales dobles.

Luego se aplica un proceso digital down converter (DDC) que implica mezclar la señal con un modulador complejo hasta la frecuencia de la banda y luego diezmar la señal mediante un factor especificado por el usuario. La señal de valor complejo se pasa entonces al FPGA, en donde se recoge las muestras recibidas en un búfer y las pasa al ordenador central para procesarlas según se requiera. (Maxwell ,2012, p.30-32)

1.3.3. GNURadio

GNU Radio es un conjunto de herramientas de desarrollo de software libre que proporciona la capacidad de procesar la señal en tiempo real, facilita bloques de procesamiento para implementar radios de software que emplean hardware de RF externo de fácil acceso y de bajo costo. Utilizado en la investigación de comunicaciones inalámbricas, así como para implementar sistemas radares reales.

Las herramientas o bloques de GNU Radio se escriben principalmente utilizando el lenguaje de programación Python, mientras que la ruta de procesamiento de señal crítica, se implementa en C ++ usando extensiones de punto flotante de procesador cuando están disponibles. De esta manera, el desarrollador es capaz de implementar sistemas de radio de alto rendimiento y en tiempo real. (Blossom, 2016. p 1, <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio>)

1.4. Tarjetas USRP

Una tarjeta USRP es un Sistema Periférico Universal de Radio que permite a un equipo computacional funcionar como un software de radio de alto rendimiento, donde las propiedades de la frecuencia portadora, el ancho de banda de la señal, la modulación y el acceso a la red son definidas por software.

Las tarjetas USRP modernas de hoy en día también implementan cualquier criptografía necesaria como: codificación de correcciones de errores hacia adelante (FEC), la codificación de fuente de voz, video o datos en el software. (Kenington, 2005, p.1)

Si bien en el mercado existen diferentes tarjetas USRP con sus distintas características y funcionalidades, la ESPOCH dispone en sus laboratorios la tarjeta USRP B210 que se describe a continuación:

1.4.1. Tarjeta USRP B210

Ettus Research TM, una compañía de National Instruments, es el proveedor líder mundial de plataformas de radio definidas por software, incluyendo la familia de productos Universal Software Radio Peripheral (USRP TM).

1.4.1.1. Características

El USRP B210 ofrece una plataforma completamente integrada, de una placa, con cobertura de frecuencia continua de 70 MHz - 6 GHz. Diseñado para la experimentación de bajo costo, combina el transceptor de conversión directa RFIC AD9361 que proporciona hasta 56MHz de ancho de banda en tiempo real, un FPGA Spartan 6 abierto y reprogramable y una conectividad rápida USB 3.0 con una conveniente alimentación de bus como se observa en la figura 37-1.

El soporte completo para el software USRP Hardware Driver (UHD) le permite comenzar a desarrollar inmediatamente con GNURadio, sus propios prototipos. La tabla 2-1 muestra los valores de frecuencia de reloj, y la velocidad a la que puede trabajar los convertidores analógico digital y viceversa. (Ettus Research. 2016. p 1, <https://www.ettus.com/>)



Figura 36-1 Tarjeta USRP B210

Fuente: <https://www.ettus.com/product/details/UB210-KIT>

Tabla 2-1 Rendimiento de conversión y velocidad del reloj.

Descripción	Valor	Unidad
ADC Frecuencia de Muestreo	61.44	MS/s
ADC Resolución	12	bits
ADC Ancho de banda SFRD	78	dBc
DAC Frecuencia de Muestreo	61.44	MS/s
DAC Resolución	12	bits
Frecuencia de Muestreo Host (16b)	61.44	MS/s
Frecuencia Exacta	±2.0	ppm

Fuente: https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf

1.4.1.2. Programación

Mediante la programación de la tarjeta es posible generar prototipos personalizados de un sistema de comunicación inalámbrica, usando programación de interfaz gráfica con GNURadio, o programación mediante código con MATLAB. La generación de las señales, así como sus diferentes modulaciones, demodulaciones y el procesamiento de los datos se lo realizan en la computadora.

La figura 38-1 muestra la configuración de parámetros en GNURadio como: el tipo y formato de los datos, el número de serie del dispositivo, la frecuencia de muestreo, la frecuencia central, la ganancia del TX/RX, el ancho de banda de la antena.

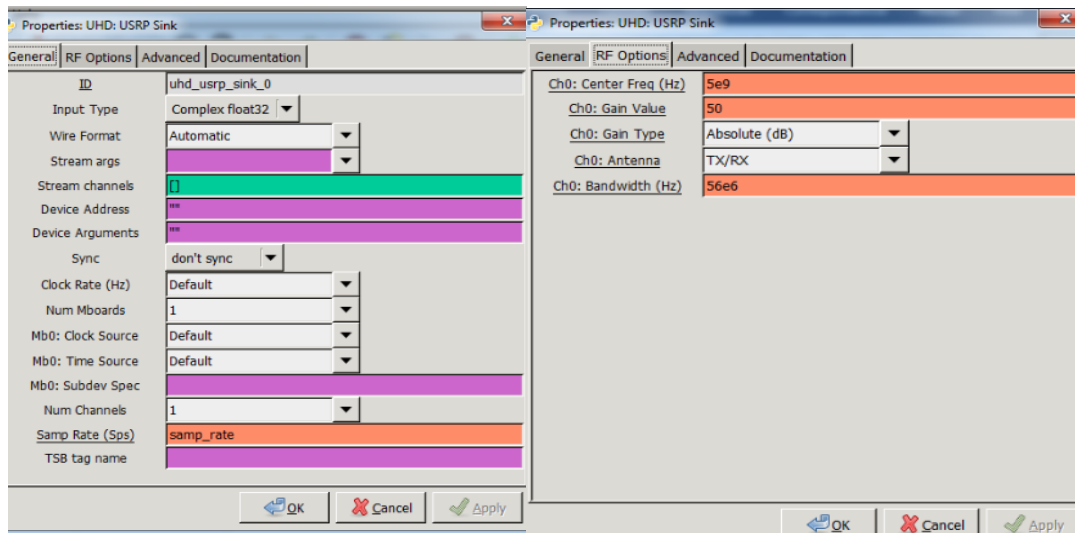


Figura 37-1 Configuración de la tarjeta USRP

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

1.4.1.3. Aplicaciones Radar con la USRP B210

La implementación de un RADAR definido por software permite un alto nivel de flexibilidad y permite al equipo adaptarse a los ambientes y requisitos cambiantes. Las ventajas de este sistema sugieren la posibilidad de emplear radares en una amplia gama de aplicaciones como la seguridad nacional, la vigilancia costal y el sistema de alerta temprana para la detección de vehículos.

Entre otras aplicaciones con esta tarjeta se puede realizar un prototipo radar para la detección y ubicación de objetos y personas en ambientes internos como se observa en la figura 38-2.



Figura 38-1 Detección de una persona en ambientes internos aplicando técnicas radar

Fuente: <https://www.ettus.com/application/detail/usrp-technology-for-multiband-passive-bi-static-radar>

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se explica los mecanismos utilizados para el desarrollo del prototipo SAR, en el que se trata los diferentes tipos de investigación, el diseño de la investigación y las técnicas utilizadas.

2.1. Metodología de la investigación

2.1.1. *Tipo de Investigación*

Es necesario utilizar uno o varios tipos de investigación para que la misma sea correcta, para el desarrollo del presente proyecto se utilizó principalmente la investigación bibliográfica, descriptiva y de campo.

2.1.1.1. *Investigación Bibliográfica*

Este tipo de investigación es el pilar fundamental para la realización del presente trabajo, esta nos proporciona la suficiente información sobre investigaciones realizadas con anterioridad, para lo cual se utilizaron diferentes fuentes bibliográficas como los libros electrónicos y principalmente el internet.

La investigación bibliográfica ayudó con las diferentes definiciones enfocándose principalmente en los sistemas radares, SAR y tarjetas SDR. Para realizar una investigación sistemática y secuencial se utilizó el software EndNote que ayuda a manipular la información y las citas bibliográficas.

2.1.1.2. *Investigación descriptiva*

Se utilizó este tipo de investigación para realizar la descripción paso a paso de cómo se realizó el diseño del prototipo, la manera en que se registran las muestras o datos y el análisis que se le pueden realizar a los diferentes resultados.

2.1.1.3. Investigación de campo

Se utilizó este tipo de investigación debido a que se recolectaron los datos directamente utilizando el prototipo radar, sin manipular o controlar alguna variable. El lugar en el que se realizaron las mediciones para la obtención de los datos fue un cuarto amplio procurando que se encuentre un solo objetivo con características metálicas, para que la mayor cantidad de energía transmitida que choque en el objetivo sea reflejada.

2.1.2. Técnicas de investigación

El diseño a utilizar en esta investigación será de campo, las diferentes mediciones y tomas de muestras serán de datos reales.

2.1.2.1. Población y Muestra

Conforme se realizaron las mediciones, cada una de ellas fueron almacenadas en una matriz. Para el presente trabajo se utilizó toda la población, pues la medición se realizó a un objetivo determinado y no a todo el ambiente interno, las muestras individuales registradas en la matriz aportan con información esencial de un solo objetivo para realizar el procesamiento y la formación de la imagen SAR.

2.1.2.2. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Se utilizó la técnica de la observación directa utilizando el dispositivo radar para obtener los datos, la información necesaria se obtuvo al realizar varias mediciones del mismo objetivo metálico que se encontraba a una distancia determinada. Como instrumento para el registro de cada uno de las mediciones se utilizó una matriz de dos dimensiones en el que cada medición representa una distancia o un objetivo.

2.1.2.3. Técnicas de procesamiento y análisis de Datos

Los datos se procesaron mediante el algoritmo RMA el mismo que fue programado utilizando el software MatLab, en donde cada medida de distancia registrada en la matriz de dos dimensiones contribuirá para la formación de una imagen SAR. Para realizar el análisis se utilizó la imagen

formada por el algoritmo RMA con un solo objetivo, en la cual se pudo apreciar su dimensión, ubicación y las diferentes concentraciones de energía.

2.1.2.4. Validación y confiabilidad

Para validar el resultado se utilizó un método manual comprobando de este modo que las distancias son correctas, es así que utilizando una cinta topográfica como un instrumento de medida se pudo comprobar que los datos obtenidos fueron los reales.

2.2. Metodología del diseño del Prototipo Radar

Para la construcción del prototipo SAR se utilizó:

1. La tarjeta USRP B210 que permite transmitir y recibir las señales necesarias en RF para que funcione como un radar.
2. Software MatLab para la generación de la señal en banda base
3. Software GNURadio para el envío y recepción de la señal modulada.
4. Nuevamente MatLab para el procesamiento de los datos y la formación de la imagen como se ilustra en la Figura 1-2.

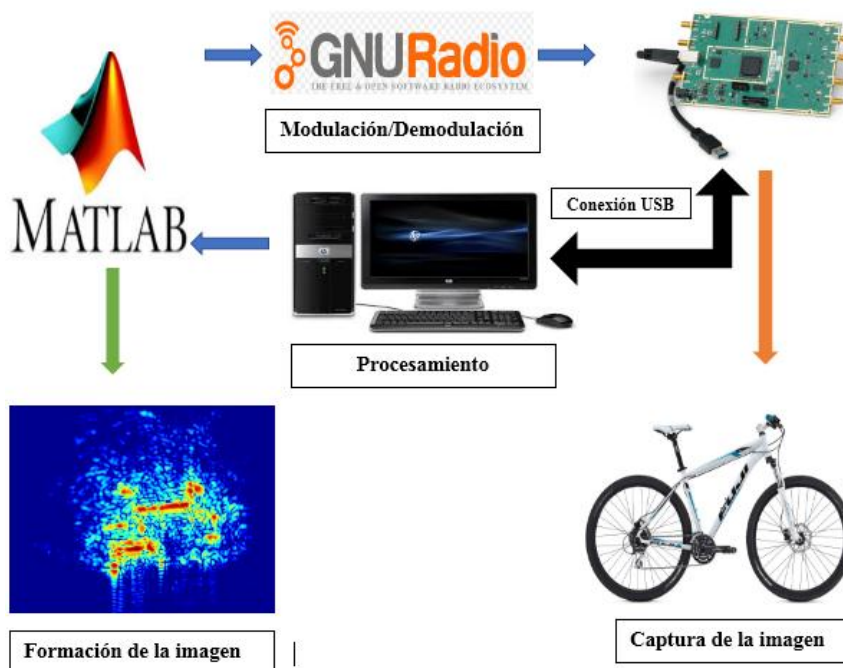


Figura 1-2 Sistema radar con tarjeta USRP B-210

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

2.2.1. Configuración de la tarjeta USRP B210

2.2.1.1. Frecuencia de operación

La tarjeta USRP B210 puede trabajar en un rango de frecuencias desde los 70 MHz hasta los 6 GHz, se eligió la frecuencia central de 5 GHz debido a que es una frecuencia menos saturada, de esta manera se consigue disminuir las interferencias que pueden llegar a generar otros dispositivos de telecomunicaciones inalámbricos que trabajen a la misma frecuencia o a frecuencias adyacentes.

2.2.1.2. Diseño de las antenas

Elegida la frecuencia central de la tarjeta USRP se diseñó un arreglo de antenas (figura 2-2) utilizando tecnología microstrip, pues los materiales para su fabricación son accesibles y los precios son relativamente económicos. Para este diseño se trató de obtener similares características de una antena de apertura, en vista de que estas antenas son las que se utilizan en los sistemas radares.

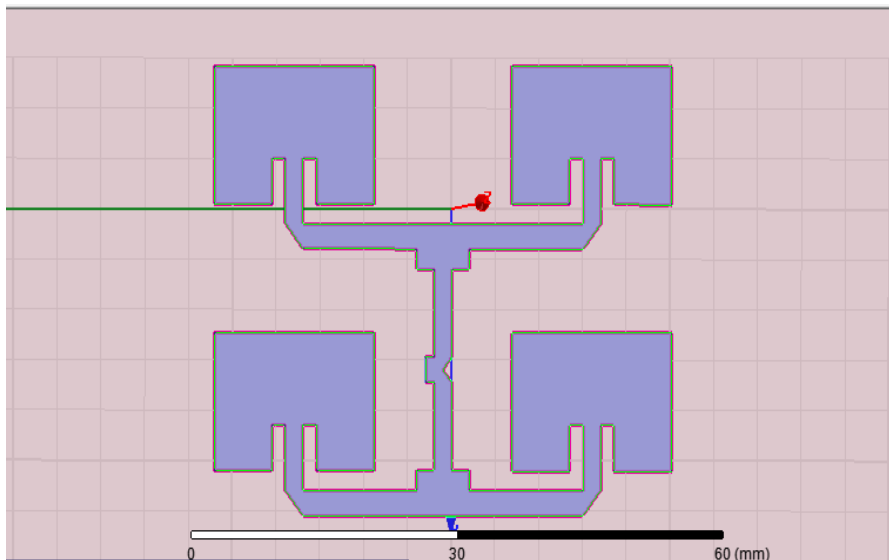


Figura 2-2 Arreglo de 4 antenas con tecnología microstrip

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

En la figura 3-2 se aprecia el lóbulo de radiación en 3D de una antena de apertura simulada a una frecuencia de operación de 5GHz y en la figura 4-2 se muestra el lóbulo de radiación de la antena microstrip diseñada para el prototipo radar.

Los parámetros como la directividad y la ganancia del arreglo de antenas microstrip se pueden apreciar en la figura 5-2.

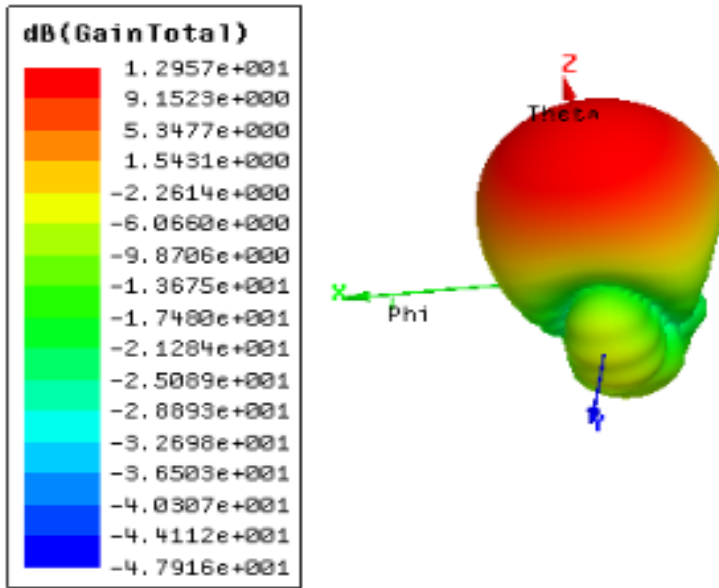


Figura 3-2 Diagrama de radiación 3D de una antena de apertura

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

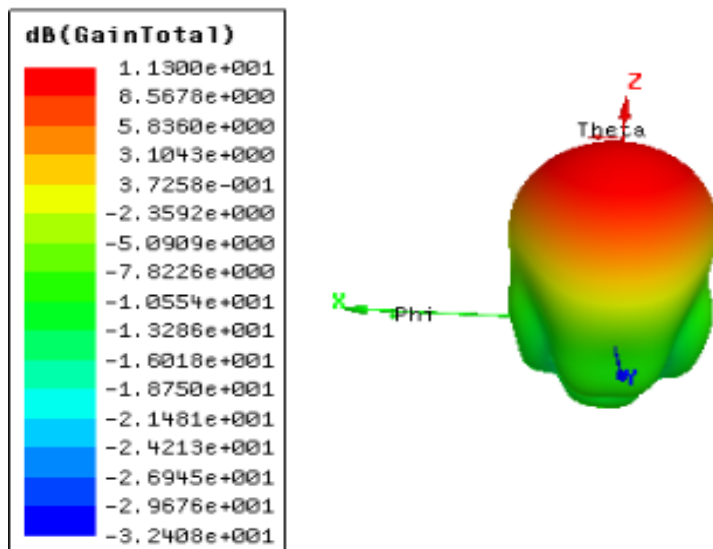


Figura 4-2 Diagrama de radiación 3D del arreglo de antenas microstrip

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

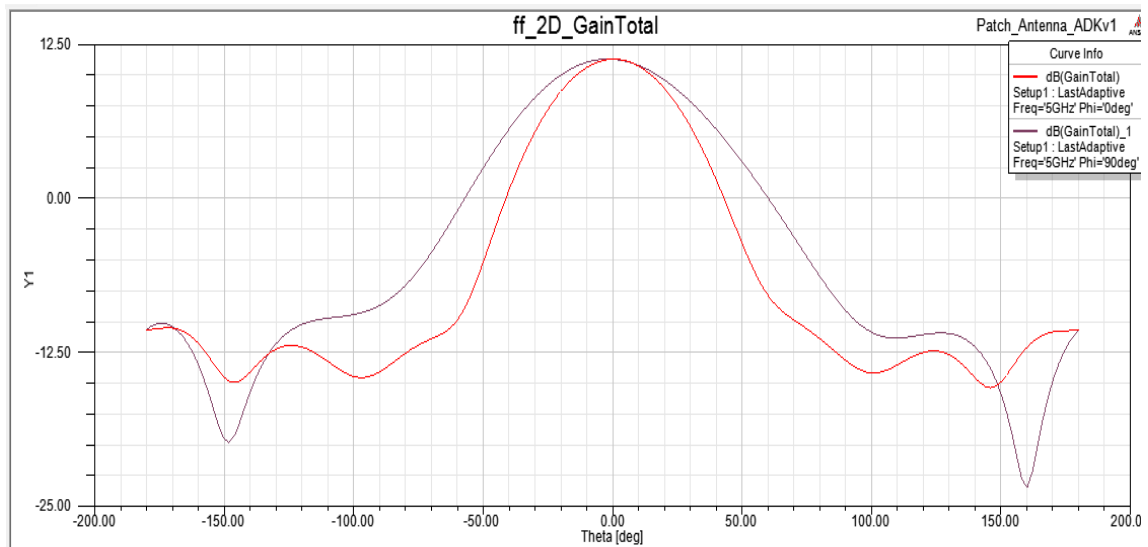


Figura 5-2 Ganancia total del arreglo de antenas microstrip

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

2.2.1.3. Ganancia del Tx/Rx

La ganancia del transmisor se eligió dependiendo del alcance máximo que se requería obtener con el sistema radar, la tarjeta USRP B210 soporta un valor máximo de potencia de transmisión 80 dBm. El prototipo radar fue diseñado para realizar mediciones en ambientes internos en el que se fijó una ganancia de 30 dBm, este valor es lo suficiente como para detectar la presencia de objetos que se encuentran a una distancia menor a los 30 m.

La ganancia del receptor se determinó de acuerdo a la sensibilidad necesaria para el sistema radar, la tarjeta utilizada tiene la capacidad de ser configurada con una sensibilidad desde los 0dBm hasta los -76 dBm. La sensibilidad se fijó en los -30 dBm de esta manera se logró controlar que se reciban solo las señales que se encuentran sobre cierto nivel de ruido.

A demás de controlar el alcance máximo del radar estos parámetros de ganancia del Tx y Rx nos ayuda a que la señal que se transmite no sea detectada por el receptor como si se tratara de un enlace de radio punto a punto.

2.2.1.4. Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo es una parte primordial para que la tarjeta trabaje de manera correcta, la tarjeta USRP B210 presenta una frecuencia mínima de muestreo de 5 Msps y una máxima de 61.44 Msps tanto para conversión analógica digital, así como conversión digital analógica, pero

esta se ve disminuida debido a que en aplicaciones radar se utiliza transmisiones full dúplex (envía y recibe la información al mismo tiempo).

Esta tarjeta es capaz de trabajar con señales analógica con un ancho de banda máximo de 56 MHz lo que idealmente nos daría una idea de la resolución que nos presentaría el sistema radar si utilizamos una señal FMCW, en donde la resolución del radar depende directamente del ancho de banda. Para determinar la frecuencia de muestro esta no solo depende del ancho de banda sino de otros factores como veremos a continuación.

La tarjeta USRP trabajan con señales complejas (componentes en cuadratura I/Q) las cuales 8 bits se utilizan para la componente Q y 8 bits para la componente I, con estos valores cada muestra que envíe o reciba la tarjeta serán muestras de 2 Bytes. Generalmente se usan valores de 8 bits, pero también es posible utilizar señales complejas de 16 bit por lo que cada muestra se incrementaría a 4 Bytes.

La limitación más grande de la frecuencia de muestreo se presentó al momento de pasar la información entre la tarjeta y la computadora, por ejemplo, el estándar USB 2.0 limita su tasa de datos a 32 MB/s en el que si utilizáramos señales complejas de 8 bits la máxima frecuencia de muestreo que podríamos definir sería de 16 Msps ($16\text{Msps} \cdot 2\text{Bytes} = 32\text{ MB/s}$) en una conexión half dúplex (envía y recibe la señal, pero de manera no simultánea).

Al utilizar la tarjeta en modo full dúplex la frecuencia de muestreo se reduce aún a la mitad. El modo full dúplex tiene la capacidad de transmitir y recibir las señales en modo bidireccional simultáneamente, lo que permite al radar procesar las señales en tiempo real, pero reduce la capacidad del medio de transmisión a la mitad de su máximo valor de transferencia de datos, esto solo se logra utilizando conexión USB 3.0 o el cable de red ethernet.

Para alcanzar una frecuencia de muestreo correcta se utilizan parámetros como la interpolación y el diezmado, los cuales ayudan a no saturar el medio de transmisión que sirve para enviar y recibir los datos entre la tarjeta USRP y la computadora. (Kenington, 2005, p.10)

2.2.1.5. Diezmado

El diezmado lo realiza internamente el FPGA con el objetivo de transferir los datos digitales de las señales en banda base por el USB hasta el computador, de esta manera se consigue no saturar la interfaz USB con la desventaja que se disminuye la tasa de muestreo. Este prototipo radar la frecuencia de muestreo máxima quedó determinada por la máxima tasa de muestreo que permite la interfaz USB.

El factor de diezmado es programable puede tomar valores enteros de 1 a 256 y de ahí en adelante valores enteros divisibles para 4 hasta llegar a un valor máximo de 512. La tasa de transferencia de las muestras digitales de las señales que la tarjeta envía al computador se calcula dividiendo la frecuencia de muestreo (f_s) para un factor de diezmado (N).

Por ejemplo, si se desearía diseñar un receptor FM se podría utilizar una frecuencia de muestreo de 20 MHz con un factor de diezmado igual a 100, con esto se consigue el ancho de banda necesario de 200 KHz que opera una radio FM.

2.2.1.6. Interpolación

La interpolación es el proceso contrario al diezmado, se lo realiza para el caso de transmisión una vez que la señal se encuentra en el FPGA con el objetivo de aumentar la frecuencia de muestreo, luego se aplica el proceso de DAC y se procede a enviar la señal al aire.

El factor de interpolación al igual que el de diezmado es programable puede tomar valores enteros de 1 a 256 y de ahí en adelante valores enteros divisibles para 4 hasta llegar a un valor máximo de 512. La frecuencia de muestreo (f_s) se calcula multiplicando la tasa de transferencia por un factor de interpolación (N).

Por ejemplo, si se desearía diseñar un transmisor FM sabiendo que el ancho de banda necesario para que opere una radio FM es de 200 KHz se podría utilizar una frecuencia de muestreo de 20 MHz con un factor de interpolación igual a 100. (Arslan, 2007, p. 110-120)

Para este trabajo la frecuencia de muestreo se estableció en un valor de 10 MHz (figura 6-2) debido a que si se utilizan valores más altos la tarjeta presenta inestabilidad e incluso llega a consumir todos los recursos del computador. La frecuencia de reloj de la tarjeta, así como los parámetros de diezmado e interpolación los calcula automáticamente GNURadio como se muestra en la figura 7-2.

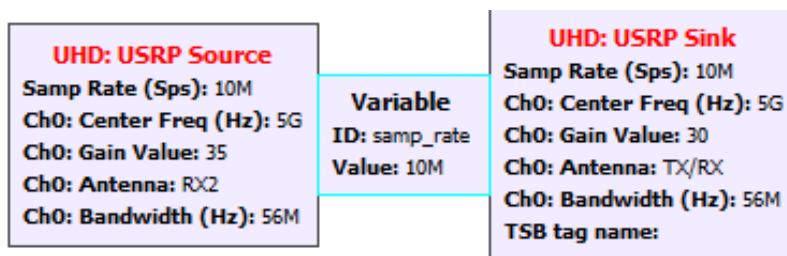


Figura 6-2 Configuración de la frecuencia de muestreo en GNURadio

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

```

-----
-- Setting master clock rate selection to 'automatic'.
-- Asking for clock rate 40.000000 MHz...
-- Actually got clock rate 40.000000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass
-- Performing timer loopback test... pass
set_min_output_buffer_on_block_1_to_1024
-----

```

Figura 7-2 Frecuencia de reloj determinada por GNURadio

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

2.2.2. *Máxima Resolución de la tarjeta para aplicaciones radar*

Para este proyecto se utilizó una señal FMCW en donde la resolución del radar depende directamente del ancho de banda. Según el teorema de muestreo de Nyquist la frecuencia de muestreo (f_s) debe ser igual o superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear por lo que el ancho de banda sería:

$$f_s = 2 * B$$

$$B = \frac{f_s}{2}$$

$$f_s = 5 \text{ MHz}$$

Utilizando la ecuación 10-1 de la resolución de sistemas radares

$$\rho_r = \frac{c}{2B}$$

$$\rho_r = 30 \text{ m}$$

Esta resolución obtenida es una gran limitante para realizar las mediciones en ambientes internos debido a que el radar no puede identificar con claridad en rango frontal los distintos objetos que se encuentran en el ambiente.

2.2.3. *Generación de la Señal FMCW en MatLab*

Para la generación de la señal FMCW se utilizó el software MatLab, pues este presenta grandes ventajas para realizar el procesamiento de las señales, si bien en MatLab existen librerías que permiten realizar una fácil programación de la tarjeta utilizando bloques de Simulink (figura 8-2), presento un problema al momento de trabajar con las señales en tiempo real debido al alto consumo de recursos que utiliza el computador.

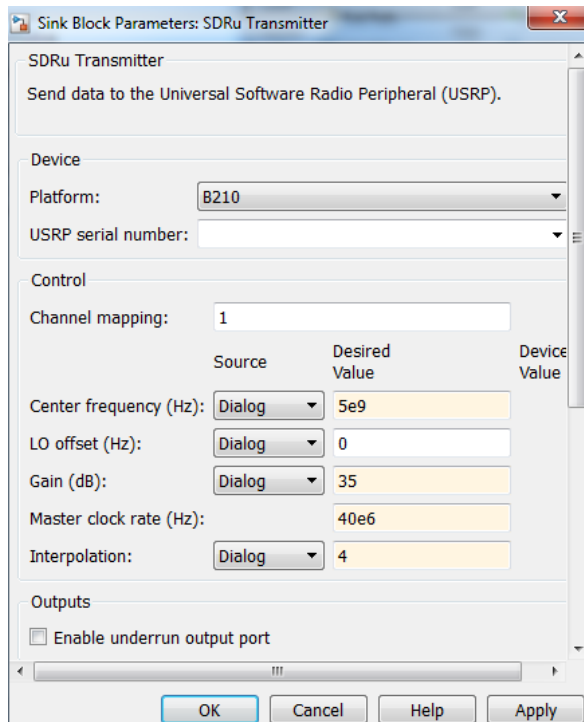


Figura 8-2 Configuración de la tarjeta USRP con Simulink

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

De igual manera se generaron errores si se utilizaban las librerías `comm.SDRuTransmitter` y `comm.SDRuReceiver` para realizar el envío y recepción de las señales respectivamente, estos errores se generaron cuando se trataba de utilizar un ancho de banda superior a los 200 KHz en modo full dúplex. Con este ancho de banda la resolución del radar es muy grande y no se lograron hacer las respectivas mediciones.

La señal FMCW en banda base se la creó utilizando los parámetros que se muestran en la tabla 1-2.

Tabla 1-2 Parámetros de configuración para la generación de una señal FMCW

Parámetros	Valor
Ancho de banda	5 MHz
Frecuencia de muestreo	10 MHz
Tiempo de duración	25 μ s
Numero de muestras	250

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

La señal banda base chirp en el dominio del tiempo se observa en la figura 9-2, la misma es generada con la función propia de MatLab `phased.FMCWWaveform`.

%Generacion de la Señal FMCW

```
senfmcw = phased.FMCWWaveform('SampleRate',10e6,'SweepTime',25e-6,...  
'SweepBandwidth',5e6,'SweepDirection','Up','NumSweeps',1);
```

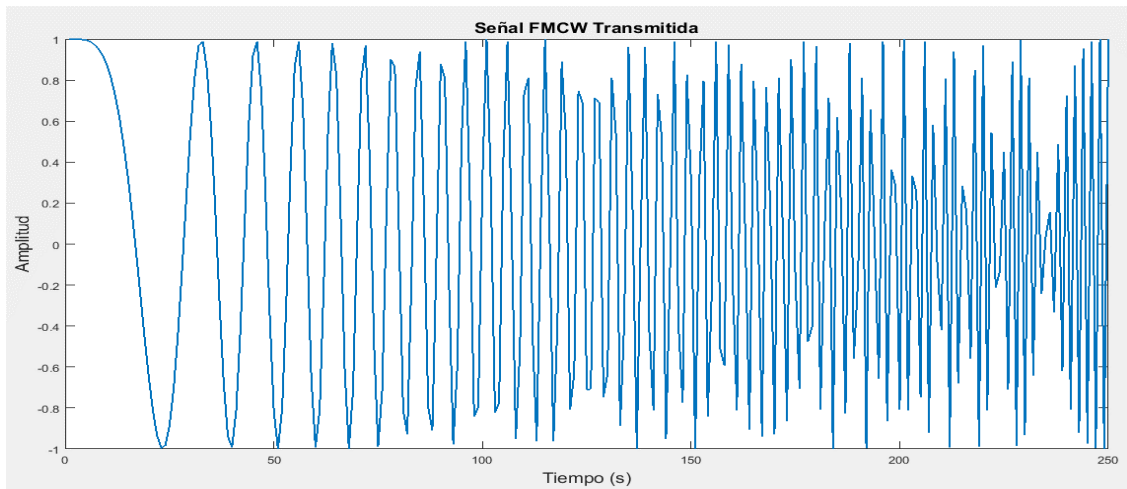


Figura 9-2 Señal FMCW en el dominio del tiempo

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

Como ya se mencionó la tarjeta presenta inestabilidad al momento de transmitir y recibir las señales en un tiempo corto, por esta razón se aumentó el número de muestras de la señal enviando de manera repetida la misma señal con un tiempo de guarda igual al de la duración de la señal chirp, de esta manera se logró estabilizar por más tiempo la tarjeta. La señal se envió en una sola muestra repetida 8 veces como se muestra en la figura 10-2. El código completo se lo presenta en el anexo A.

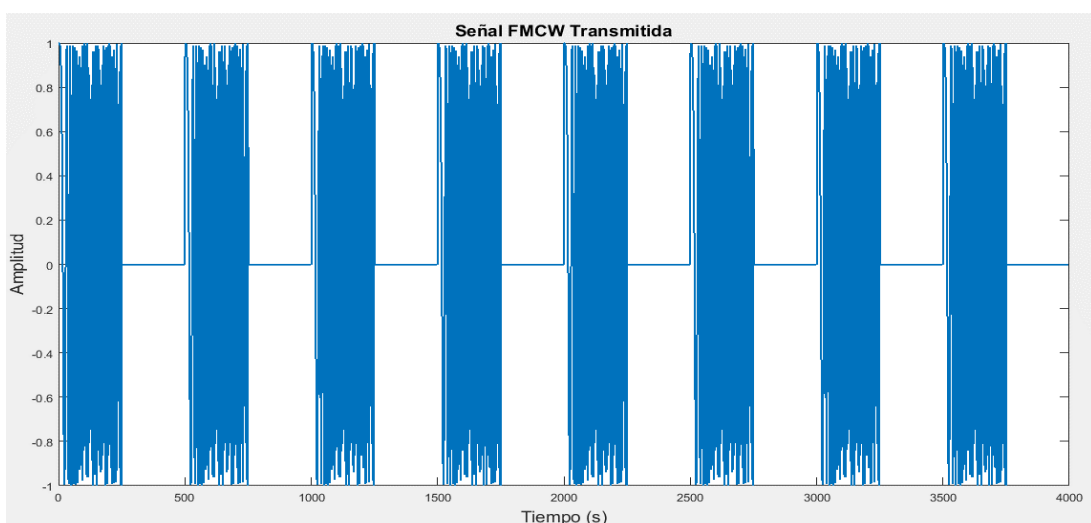


Figura 10-2 Señal chirp repetida 8 veces

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

2.2.4. Envío de datos de MatLab a GNURadio

GNURadio permite realizar diferentes modulaciones y demodulaciones, pero no contiene bloques para generar señales que se utilizan en radares es por eso que se utilizó MatLab para generar la señal. Una vez generada la señal compleja en MatLab esta se procedió a guardar en dos archivos con extensión .dat, el uno contiene la parte real (**fmcwr.dat**), el otro la parte imaginaria (**fmcwi.dat**). El código completo se lo puede obtener del Anexo B.

%Separacion de señal FMCW parte real e imaginaria IQ

```
sgenerada_real = real(sgenerada);  
sgenerada_imag = imag(sgenerada);
```

%Envio de la señal FMCW a GNURADIO

```
var_auxiliar1 = fopen ('fmcwr.dat', 'w');  
v_aux1= fwrite (var_auxiliar1, sgenerada_real, 'float');  
fclose (var_auxiliar1);  
var_auxiliar2 = fopen ('fmcwi.dat', 'w');  
v_aux2= fwrite (var_auxiliar2, sgenerada_imag, 'float');  
fclose (var_auxiliar2);
```

2.2.5. Transmisión y Recepción de la señal con GNURadio

Para transmitir la señal FMCW esta se procedió a unir las componentes real e imaginaria de la señal como se muestra en la figura 11-2, posteriormente se configuraron los parámetros descritos anteriormente (frecuencia de muestreo, frecuencia de central, ganancias del transmisor y receptor), como se observa en la figura 12-2.

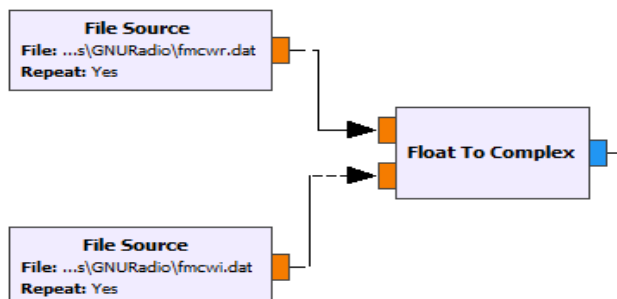


Figura 11-2 Concatenación de la señal real e imaginaria

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

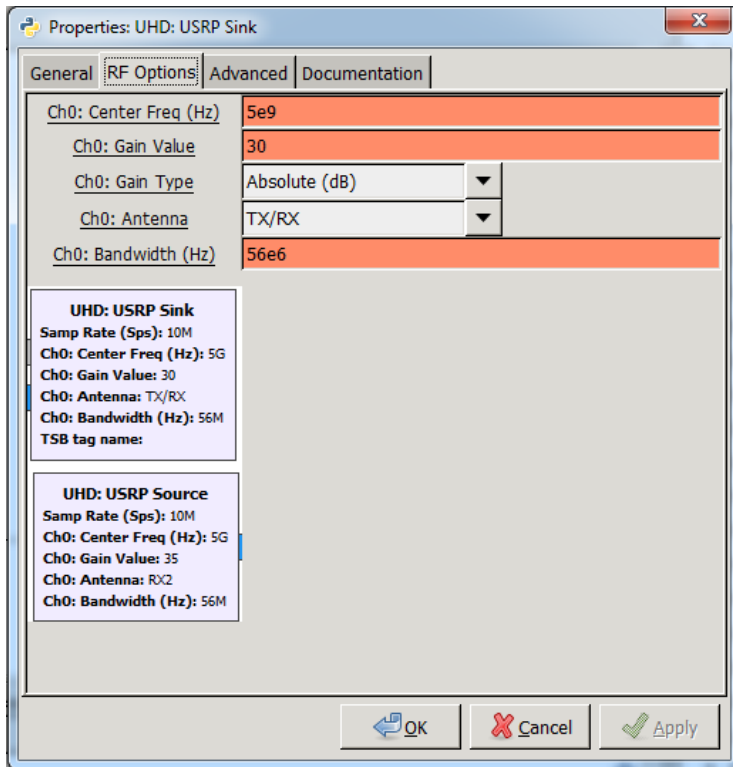


Figura 12-2 Configuración de los parámetros del radar

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

2.2.6. Envío de datos de GNURadio a MatLab

Una vez que se tiene la señal chirp en GNURadio se realizó las respectivas mediciones, y cada una de estas son almacenadas un archivo .dat como se observa en la figura 13-2, para posteriormente sean procesados en MatLab.

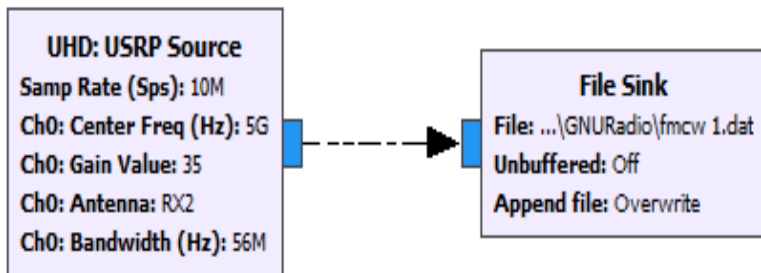


Figura 13-2 Envío de la señal desde GNURadio a MatLab

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

En la figura 14-2 se aprecia el diseño completo de los bloques del transmisor y receptor en GNURadio.

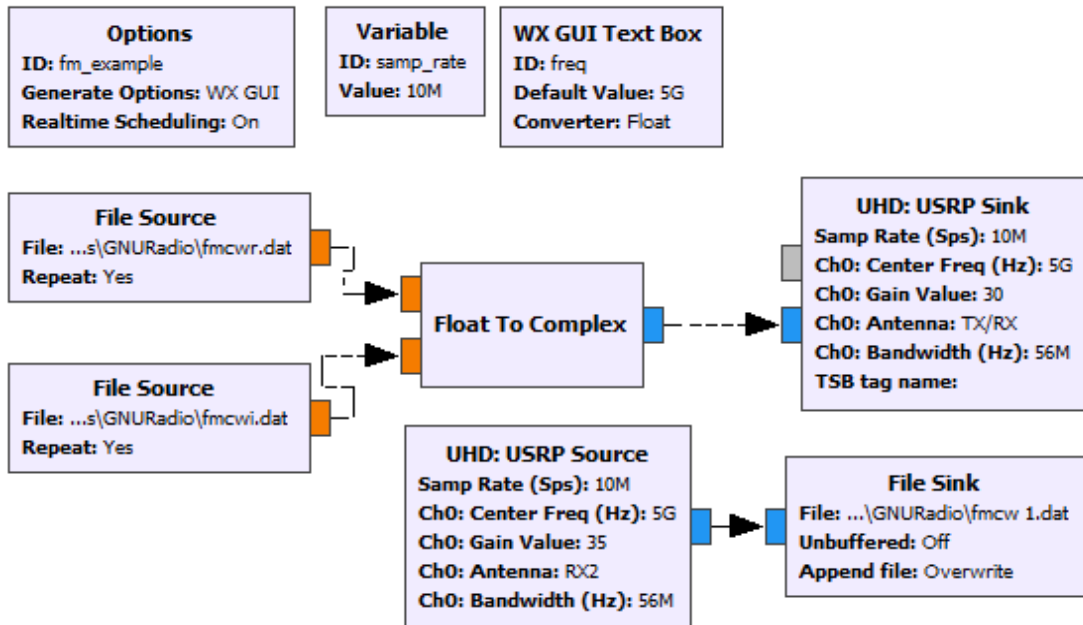


Figura 14-2 Diseño del transmisor y receptor radar en GNURadio

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

Una vez finalizada las mediciones se procedió a convertir el archivo .dat en una matriz de datos en MatLab. El código completo se lo puede obtener del anexo C.

%Recepcion de la señal FMCW desde GNURADIO

```

longitud=N+1;
var_auxiliar = fopen('fmcw 1.dat', 'rb');
recibida = fread (var_auxiliar, [2, longitud], 'float');
srecibida = complex(recibida(1,:),recibida(2,:)); %Formación de la señal IQ
fclose (var_auxiliar);

```

2.2.7. Algoritmo de mejoramiento de la resolución del radar

Este algoritmo se viene desarrollando de manera simultánea con un trabajo de titulación presentada por el Sr. Julio Mejía en la ESPOCH denominada: Desarrollo de un algoritmo en MATLAB para la optimización de la resolución de una tarjeta USRP b210 para aplicaciones SDRadar, en donde se pretende mejorar la resolución de tarjetas SDR aplicadas a sistemas radares.

Este algoritmo utiliza varias mediciones de un mismo objetivo variando el ancho de banda de la señal FMCW con lo cual se consigue variar la resolución del radar, almacena los datos en una

matriz y se procede a aplicar aproximaciones sucesivas para determinar la distancia más exacta del radar al objetivo.

Como se ilustra en la figura 16-2 si consideramos un $\Delta x = 2 \text{ m}$. En primer lugar, se tendría una resolución del radar de 2 m, por lo tanto, el radar estimaría que el objetivo se encuentra a una distancia de 4 m y que no sobrepasa los 6 m.

En segundo lugar, disminuyendo el ancho de banda como resultado obtendríamos un incremento de la resolución. Suponiendo que se logra incrementar la resolución 1.5 veces del valor inicial, entonces la nueva resolución para realizar las mediciones sería 3 m. En este caso la distancia estimada por el radar sería 3 metros.

Finalmente incrementando el valor inicial a 2.5 veces se logra una resolución de 5m, con la cual el nuevo dispositivo radar estima la distancia del objetivo a 5m, este es el valor más preciso de la ubicación del objetivo con respecto al sistema radar. Véase el código en MatLab en el Anexo D.

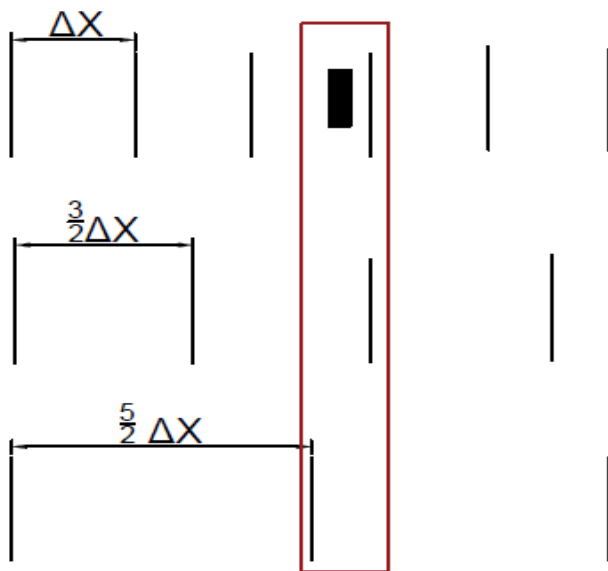


Figura 15-2 Estimación de la distancia del radar

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

Al aplicar este método de mejora de la resolución, en este ejemplo se puede lograr incrementar la resolución del dispositivo radar al doble, con esto se determinarían objetivos que se encuentren a una distancia de 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9,10 m, con excepción de valores como 1 m y 7 m, como se observa en la figura 17-2.

Este algoritmo puede mejorar la resolución del sistema radar dependiendo de la ubicación del objetivo, es decir si el objetivo se encuentra en un punto entre la máxima resolución y cero, este algoritmo no tiene ningún efecto positivo.



Figura 16-2 Mejora de la resolución del radar de 2m a 1m

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

En este trabajo el algoritmo del mejoramiento de la resolución del radar se aplicó para resolver la problemática en donde el radar puede llegar a confundir o estimar mal una distancia como se observa en la figura 15-2 no se puede estimar si la distancia es 4.4 m o 4.45 m.

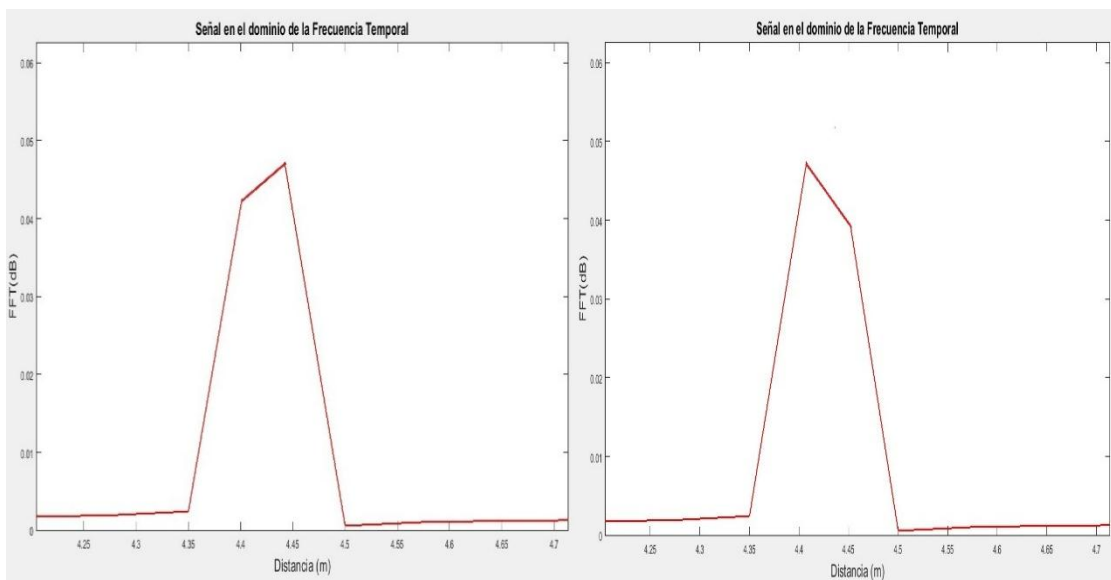


Figura 17-2 Estimación errónea de la distancia con el radar grama

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

2.2.8. *Procesamiento de los datos para generar la imagen SAR*

Una vez generadas las señales en software y configurado el prototipo radar se procedió a realizar las mediciones y se aplicó el algoritmo RMA para la formación de la imagen SAR, para lo cual se siguen los siguientes pasos:

1. Elegir la longitud transversal (L) y su respectivo espaciamiento (ΔX)
2. Se procede a realizar la medición enviando y recibiendo la señal.
3. Se varia la resolución del sistema radar y se realiza una segunda medición.
4. Se aplica el algoritmo de mejoramiento de la resolución del sistema radar con los datos que se obtienen en el paso 2 y el paso 3.
5. Se realiza un desplazamiento transversal ΔX del sistema radar.
6. Se repite el paso 2, 3, 4 y 5 hasta completar el número de mediciones transversales.
7. Una vez alcanzado la longitud transversal L, aplicar el algoritmo RMA de la matriz de datos, esta se divide en 4 pasos
 - 7.1 Emplear la transformada discreta de Fourier a cada medición.
 - 7.2 Utilizar el filtro coincidente
 - 7.3 Usar el slot de interpolación
 - 7.4 Aplicar la transformada rápida inversa de Fourier en 2 dimensiones
8. Finalmente mostrar los resultados en una imagen.

El flujograma del algoritmo se puede apreciar en la figura 18-2, y el respectivo código lo encontramos en el Anexo F.

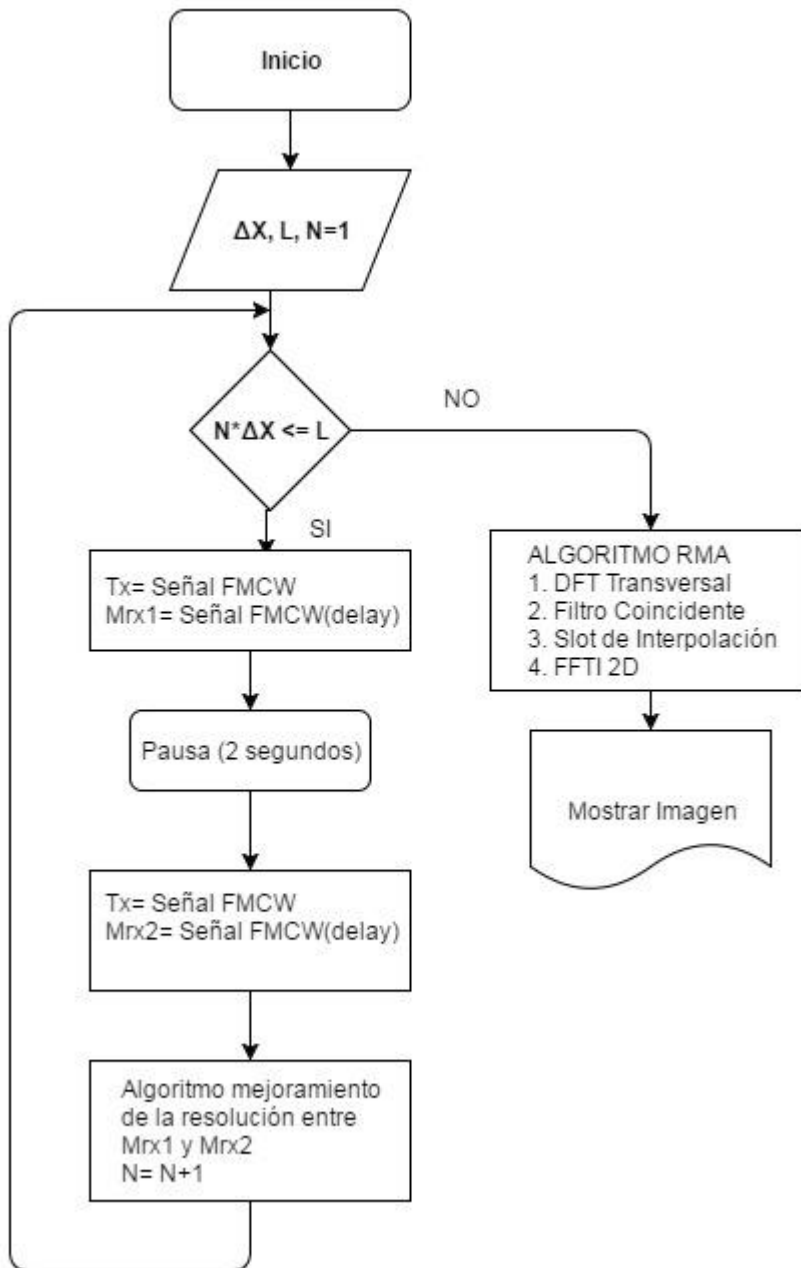


Figura 18-2 Diagrama de flujo del SAR

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

CAPÍTULO III

3. MEDICIONES Y RESULTADOS

3.1. Simulaciones

Con el objetivo de probar el correcto funcionamiento de los algoritmos que controlan el sistema radar y el algoritmo RMA que se utilizó para la formación de las imágenes, primero se procedió a realizar la simulación de un ambiente interno, en donde se encuentran 3 objetivos de prueba cuyas propiedades y características físicas de reflexión para las ondas electromagnéticas son similares.

La ubicación de cada objetivo se puede observar en la figura 1-3 los cuales se encuentran a distintas distancias del sistema radar, el rango frontal y transversal diferente en cada uno de los objetivos A, B, C, queda determinado por la acotación de las medidas que se pueden apreciar en la imagen.

Las mediciones empiezan desde el punto O considerado como el origen y se desplaza hacia la derecha que en un sistema cartesiano de dos dimensiones el origen y cada objetivo se representarían por las coordenadas O (0,0) m, A (1.20,2.925) m, B (0.60,5.925) m y C (3.20,4.425) m.

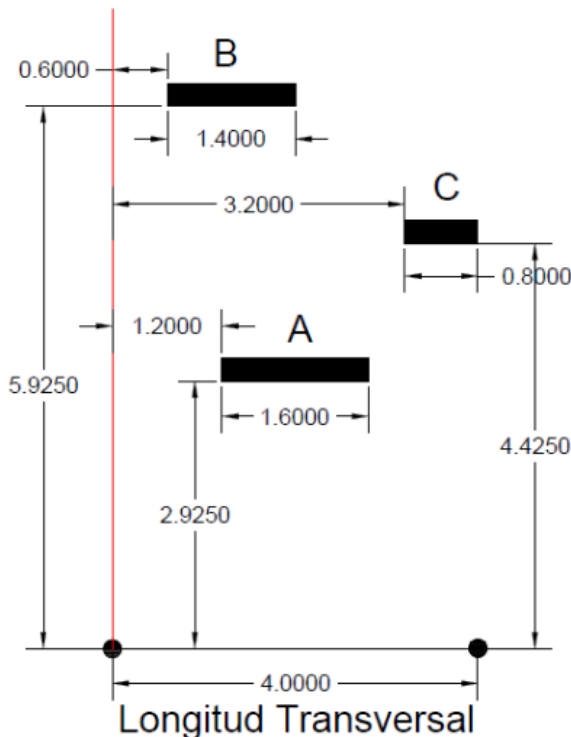


Figura 1-3 Objetivos de prueba

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

Para el envío, recepción y procesamiento de las señales se siguió los procedimientos que se describieron en el capítulo II sección 2.2.3-2.2.6, para esto se utilizaron diferentes parámetros de configuración del sistema radar que lo podemos encontrar en la tabla 1-3.

Como ya es de conocimiento y se lo ha mencionado varias veces en este trabajo, la resolución de los sistemas radares es la principal limitante para obtener excelentes resultados, en este caso particular se utilizó una resolución de 75 milímetros consiguiendo que el sistema radar sea capaz de identificar perfectamente la ubicación de los objetivos.

Tabla 1-3 Parámetros de configuración para la generación de una señal FMCW

Parámetro	Valor
Frecuencia Inicial	2 GHz
Frecuencia Final	4 GHz
Frecuencia Central	3 GHz
Ancho de Banda	2 GHz
Resolución	75 mm
Frecuencia de muestreo	40 GHz
Tiempo de duración de la señal	600 us
Longitud Transversal	4 m
Número de mediciones	40
Espaciamiento Transversal	0.1 m
Alcance Máximo	90 m

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

La figura 2-3 muestra el radar grama de la matriz de mediciones número 18 correspondiente a 1.5 m en rango transversal, en donde se aprecia claramente el rango frontal de cada uno de los objetivos. En esta figura se puede apreciar que el objetivo A se encuentra a una distancia del sistema radar de 2.925 m y el objetivo B a 5.925 m, por consiguiente, la separación entre el objetivo A y B sería 3 m.

En tanto en la figura 3-3 se puede evaluar la medición número 35 que pertenece a 3.5 m en rango transversal, en donde se observa que el objetivo C se encuentra a una distancia del prototipo radar de 4.425 m en rango frontal.

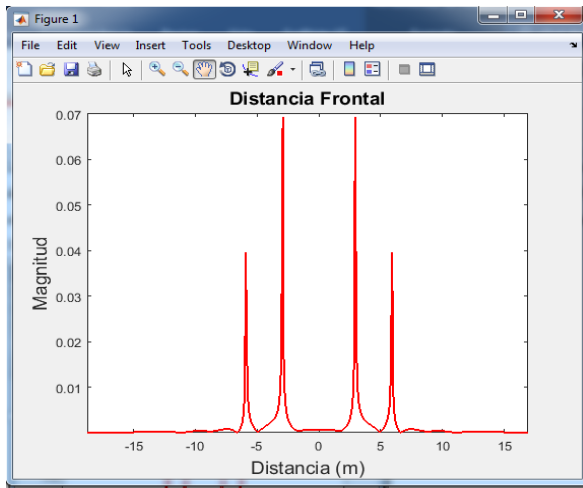


Figura 2-3 Radar grama identificando 2 objetivos

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

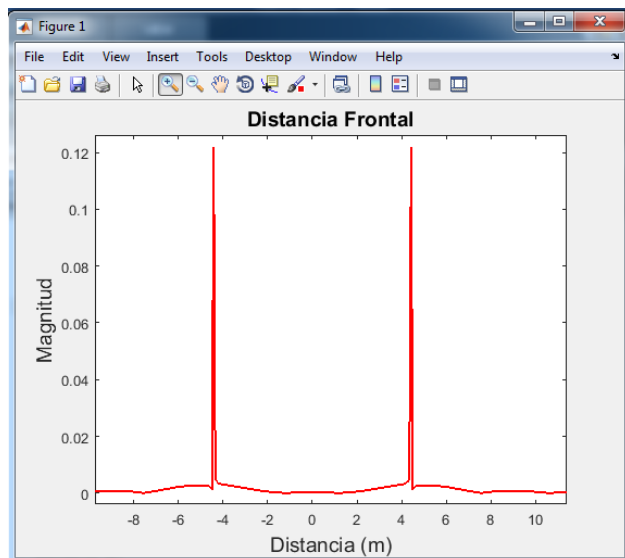


Figura 3-3 Radar grama con un solo objetivo

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

Con los datos que nos entrega el radar grama se logró detectar y ubicar a cada uno de los objetivos, pero solo en rango transversal, es así que para obtener más caracterizas del escenario y de los objetivos se procedió a aplicar el algoritmo RMA a la matriz de las 40 mediciones.

De esta manera se consiguió finalmente la imagen SAR como se muestra en la figura 4-3, en donde ya se puede determinar la ubicación de los objetivos tanto en rango frontal como en rango transversal. Adicionalmente se logró determinar el ancho de cada objetivo, así como también los niveles de concentración de la energía.

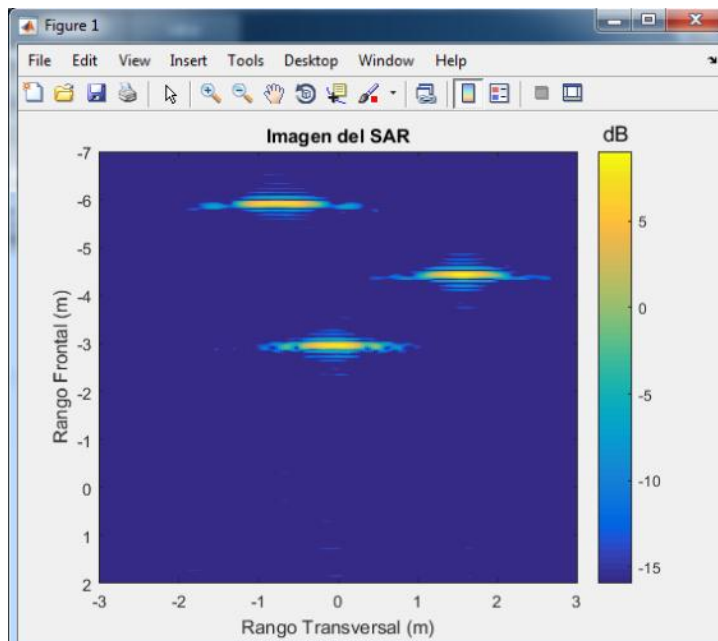


Figura 4-3 Imagen SAR con tres objetivos

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

En la tabla 2-3 se describe la ubicación de los diferentes objetivos en donde se detallan las medidas de rango frontal, rango transversal y el ancho obtenidos de la imagen SAR de la figura 4-3. Como era de esperarse al trabajar con simulaciones de los objetivos estas medidas debían coincidir con los datos que nos entrega la figura 1-3.

Tabla 2-3 Ubicación de los objetivos

	Rango Frontal	Rango Transversal inicial	Rango Transversal Final	Ancho
A	2.925 m	1.20 m	2.80 m	1.60 m
B	5.925 m	0.60 m	2.00 m	1.40 m
C	4.425 m	3.20 m	4.00 m	0.80 m

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

La mayor concentración de energía se encuentra en el centro de cada objetivo como se observa en la figura 4-3. Este valor inicia en los 10 dB que se representa de color amarillo y va disminuyendo hacia los costados terminando en los 0 dB de color verde claro, en este punto se puede considerar como el límite de cada objetivo y a partir de los 0 dB hacia abajo se considera que no existe objetivos al alcance del sistema radar.

Las manchas de color celeste que se encuentran por debajo de los -5 dB se pueden generar por tres motivos, debido al solapamiento de las señales que pueden ocurrir cuando las antenas están muy cercanas entre sí, debido al ruido excesivo que puede generar el ambiente, y tercero al elegir un espaciamiento transversal muy corto que representaría este caso, puesto que se trabajó con simulaciones.

Una vez identificado que el problema se da por el espaciamiento transversal para corregir este error se procedió a realizar una nueva medición, pero incrementando el valor del espaciamiento transversal al doble (0.2 m), en la figura 5-3 se puede observar el resultado en donde la separación de los objetivos permite apreciar de mejor manera su ubicación en rango transversal, así como el tamaño de los mismos.

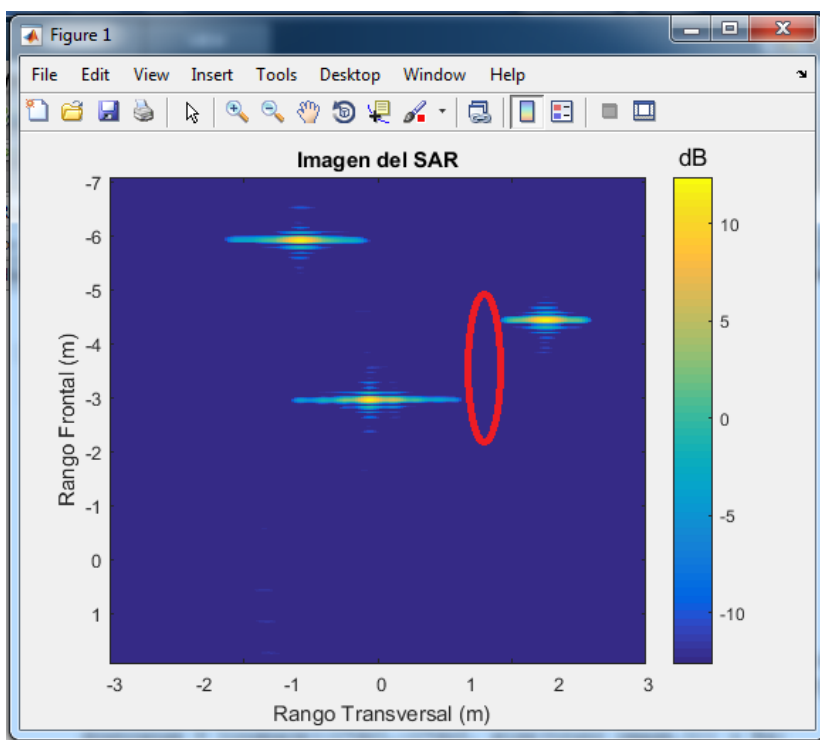


Figura 5-3 Imagen SAR disminuida el solapamiento de señales

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

3.2. Prueba de distancias

3.2.1. Resolución

La resolución del sistema radar depende directamente del ancho de banda que se ocupó para generar la señal, el ancho de banda correspondiente fue de 5 MHz, que al aplicar la ecuación 15-1 la resolución que se obtuvo fue de 30 m.

$$\rho_r = \frac{c}{2B}$$

$$\rho_r = \frac{300e^6}{2(5e^6)}$$

$$\rho_r = 30 \text{ m}$$

Antes de hacer las distintas pruebas de las mediciones se procedió a efectuar la respectiva calibración del sistema radar, para determinar el tiempo de retardo que ocurre al realizar el procesamiento de las señales entre el sistema radar, el medio de transmisión de los datos y el computador.

3.2.2. Tiempo de retardo del sistema radar

Teóricamente un tiempo de vuelo igual a cero se obtendría cuando la distancia del objetivo hacia el sistema radar es cero o cercano a cero, para evitar interferencias y el ruido del ambiente el tiempo de retardo adicional se lo midió conectando directamente el cable coaxial de 50 Ohm entre el transmisor y el receptor como se muestra en la figura 6-3.



Figura 6-3 Prueba de calibración del sistema radar

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

El resultado de esta prueba con una distancia del cable coaxial de 75 cm dio una distancia de 15 m como muestra en el radar grama de la figura 7-3, conocido este valor se procedió a restar los 15 m para mostrar el resultado de las siguientes mediciones.

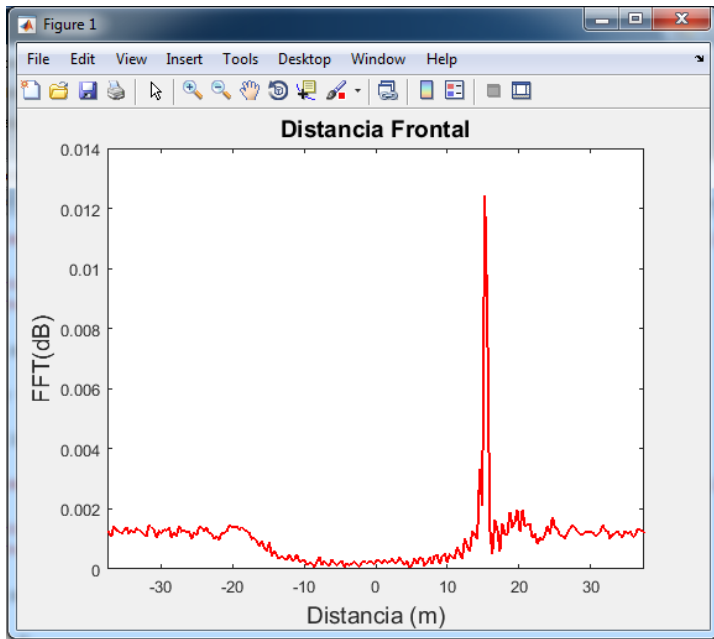


Figura 7-3 Radar grama de calibración del sistema radar

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

El tiempo de retardo que genera todo el sistema radar se puede calcular mediante la ecuación del tiempo de vuelo, en el cual se obtuvo un tiempo de retardo igual a 100 ns.

$$t_r = \frac{2 * distancia}{c}$$

$$t_r = \frac{2 * 15}{3e^8}$$

$$t_r = 100 \text{ ns}$$

3.2.3. Resolución en rango transversal

Esta resolución permite que el radar sea capaz de distinguir distintos objetivos que se encuentren en el rango transversal. Para obtener este resultado se procedió a reemplazar los parámetros de la ecuación 18-1.

$$\rho_{cr} = \frac{\lambda_c R_t}{2L \sin \phi_{dc} \cos(\Delta\theta/2)}$$

$$\Delta\theta = \left[\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{R_t}{(L/2 + x_t)}\right) \right] + \left[\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{R_t}{(L/2 - x_t)}\right) \right]$$

$$\Delta\theta = \left[\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{3 \text{ m}}{(1.2 \text{ m}/2 + 0.3 \text{ m})}\right) \right] + \left[\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{3 \text{ m}}{(1.2 \text{ m}/2 - 0.3 \text{ m})}\right) \right]$$

$$\Delta\theta = \left[\frac{\pi}{2} - \arctan(3.333) \right] + \left[\frac{\pi}{2} - \arctan(10) \right]$$

$$\Delta\theta = [90^\circ - 73.3^\circ] + [90^\circ - 84.3^\circ]$$

$$\Delta\theta = 22.4^\circ$$

$$\rho_{cr} = \frac{(0.06)(3)}{2(1.20)(1)\cos(22.4^\circ/2)}$$

$$\rho_{cr} = 0.0765 \text{ m} = 7.65 \text{ cm}$$

De la ecuación 18-1 se pudo concluir que para mejorar la resolución transversal del dispositivo radar, principalmente se puede incrementar el rango frontal o disminuir la longitud transversal. Incrementar el rango frontal no es lo óptimo, necesariamente para realizar este método se tendría que mover en rango frontal el radar o el objetivo.

En este caso lo más óptimo sería incrementar la longitud transversal con lo que se logra cubrir una mayor longitud simulando una apertura mayor al que normalmente posee la antena y esto es básicamente lo que realiza el radar de apertura sintética. La resolución transversal de 7.65 cm es la distancia mínima para que el sistema radar pueda distinguir entre dos o más objetivos.

3.3. Capturas de datos transversales con el prototipo

Para realizar las respectivas pruebas con el prototipo se utilizó un objeto metálico cuyas características propias del material permite una mayor reflexión de las ondas electromagnéticas. El objeto se procedió a ubicarlo a una distancia de 3 m en rango frontal y a 0.3 m en rango transversal con respecto al sistema radar como se muestra en la figura 8-3 y figura 9-3.



Figura 8-3 Prototipo radar a 3 metros del objetivo

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

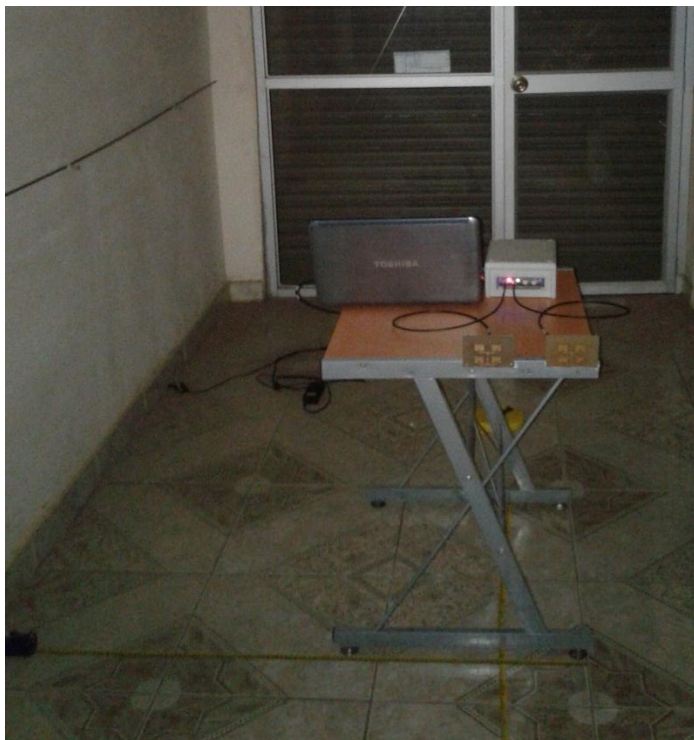


Figura 9-3 Prototipo radar en la posición inicial eje transversal

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

La medición se empieza a realizar empezando en el punto considerado de distancia igual a 0, seguidamente se desplaza hacia la derecha una distancia de 0.05 m. El número total de mediciones en el rango transversal fueron de 24 con un espaciado de 0.05 m de esta manera se logra cubrir una longitud transversal igual a 1.2 m.

Debido a que el desplazamiento transversal se lo realizó manualmente se aprovechó ejecutando 2 mediciones en el mismo punto con el objetivo de aplicar el algoritmo para la mejora de la resolución. Para lo cual se procede a variar el ancho de banda de 5 MHz (30m) a 3.33 MHz (45m) con lo que nos aseguramos que el sistema radar estime mejor el rango frontal.

En la figura 10-3 se muestra el radar grama de la medición número 10 luego de aplicar el algoritmo para la mejora de la resolución en la que podemos apreciar una distancia igual a 45 m como era de esperarse.

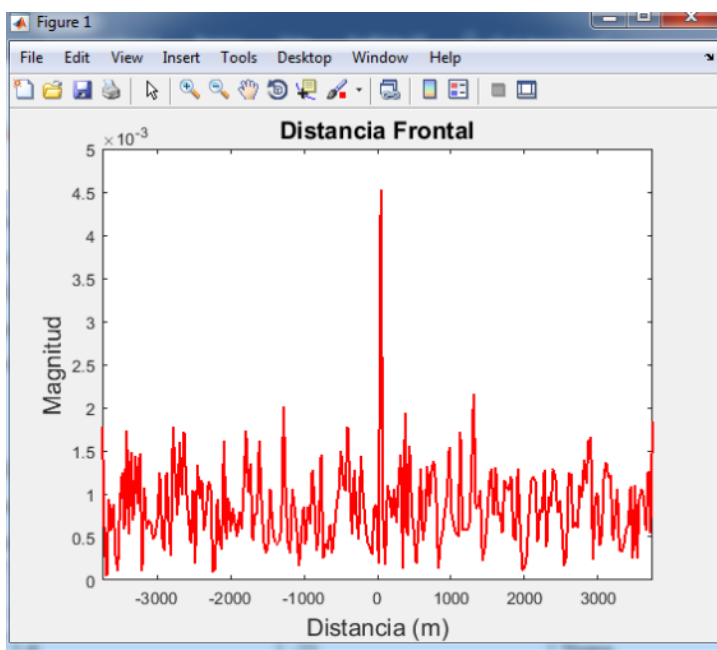


Figura 10-3 Radar grama de la medición número 10

Fuente: LLALAU, Diego, 2017

El ruido del ambiente y las múltiples reflexiones contribuyeron a que el radar grama presente otros picos como si se tratara de diferentes objetivos, pero en nuestro caso no interfiere con el proceso debido a que el pico principal del radar grama presenta mayor potencia de la señal y está perfectamente identificado. En la figura 11-3 se procede a realizar el zoom del pico con mayor potencia del radar grama de la figura 10-3 con la cual la distancia de 45 m queda identificada claramente.

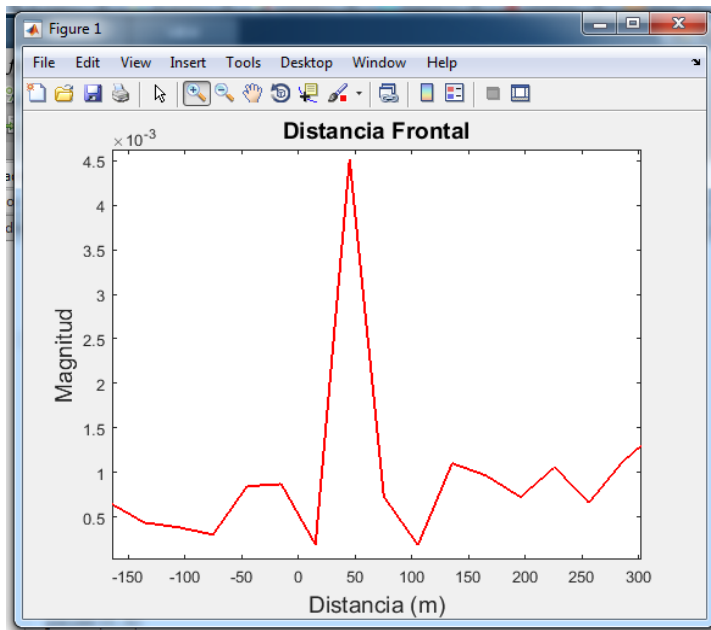


Figura 11-3 Zoom del radar grama de la medición número 10

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

3.4. Procesamiento de los datos para la obtención de la imagen SAR

Finalmente, una vez que se recolectó la información en la matriz se procedió a procesar a todo el conjunto de datos de las mediciones transversales obtenidos con el prototipo radar, para lo cual se aplicó el algoritmo RMA, con esto se consigue la formación de la imagen SAR como se puede observar en la figura 12-3.

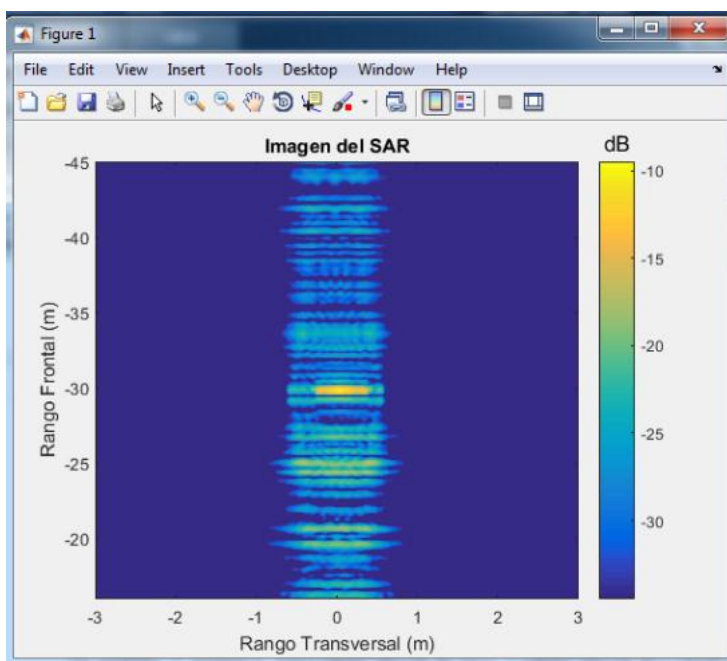


Figura 12-3 Imagen final del SAR

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

En la figura 12-3 se puede distinguir el objetivo que se lo representa de un color amarillo, pero a la vez este presenta mucho ruido ocasionado por el ambiente y las múltiples reflexiones provocados por objetos cercanos en rango frontal.

Para corregir este error se procedió a realizar lo que recomienda CHARVAT, Gregory. En el libro *Small and Short-Range Radar Systems*. (Charvat, 2014, p. 150), en donde el autor dice que se debe realizar una calibración del sistema radar que consiste en:

1. Realizar las mediciones del objetivo
2. Realizar las mediciones del ambiente sin el objetivo
3. Realizar una resta de las mediciones del objetivo menos las mediciones del ambiente.

De esta manera se puede apreciar con más claridad el objetivo como muestra la figura 13-3, si bien no se logró eliminar esas manchas por completo existe una gran diferencia en comparación con la figura 12-3.

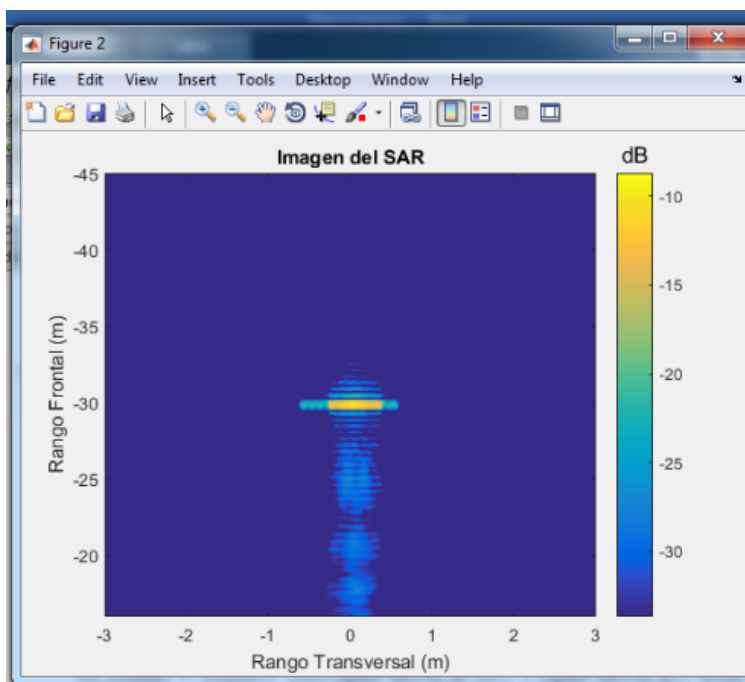


Figura 13-3 Imagen final del SAR mejorada

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

Realizando un acercamiento del objetivo se puede observar de mejor manera las características, lo cual se ilustra en la figura 14-1 y cuyos parámetros se detallan en la tabla 3-3.

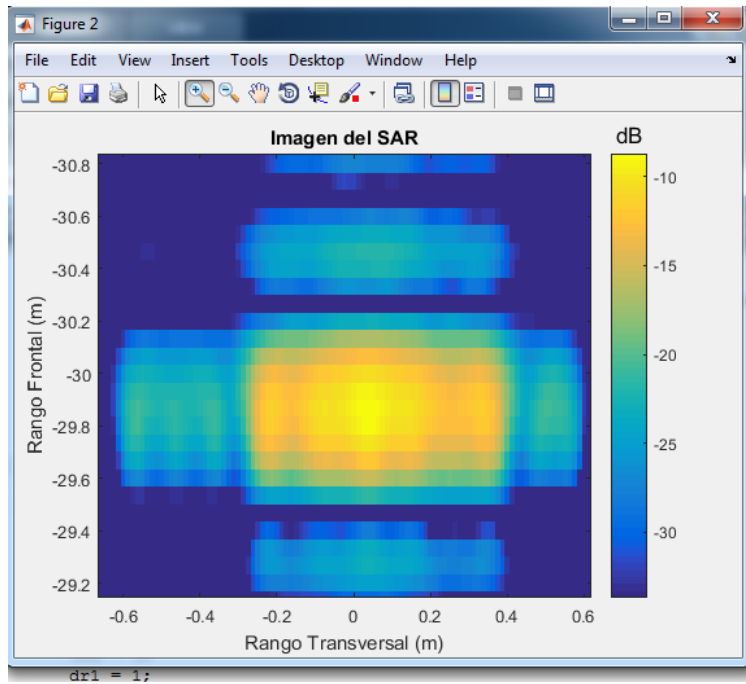


Figura 14-3 Zoom Imagen final del SAR mejorada

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

Tabla 3-3 Resultados de las mediciones del objetivo

Parámetros	Valor Real	Valor Obtenido
Posición Frontal	3 m	30 m
Posición transversal inicial	0.3 m	0.3 m
Posición transversal final	1.0 m	1.0 m
Ancho del Objetivo	0.7 m	0.7 m

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

En la tabla 4-3 encontramos los valores de potencias obtenidos de diferentes números de mediciones, en donde se pudo determinar que energía se incrementa a medida que el sistema radar se acerca al centro del objetivo.

En la figura 14-3 se muestra diferentes niveles de energía encerrados mediante círculos de colores para su mejor apreciación, en donde el nivel más alto de energía corresponde a los -10 dB que pertenece al centro del objeto de prueba.

Tabla 4-3 Niveles de potencia en la imagen SAR

Numero de medición transversal	Potencia (dB)	Sección Circular
1-6	-25	Negra
7-10	-15	Azul
11-12	-12	Verde
13-14	-10	Roja
15-16	-12	Verde
17-20	-15	Azul
20-24	-25	Negra

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

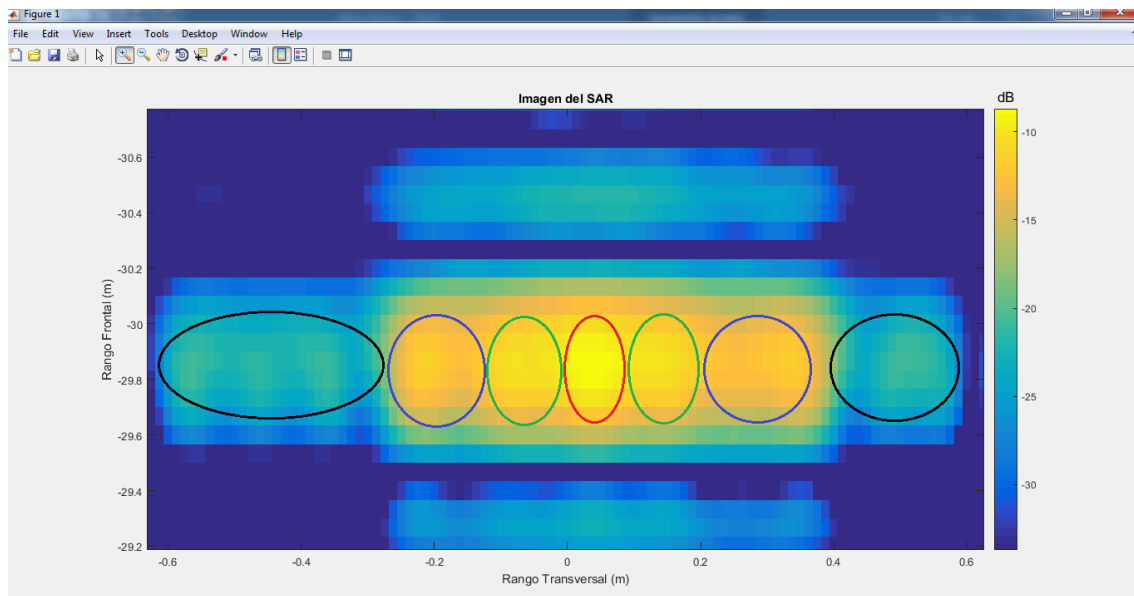


Figura 15-3 Niveles de energía de la imagen SAR

Fuente: LLALAU, Diego. 2017

3.5. Análisis de resultados

La resolución frontal como era de suponerse el radar no iba a estimar de manera correcta puesto que esta depende directamente del ancho de banda que se ocupa para generar la señal FMCW, es así que todo objetivo que el radar detecte en interiores va a considera que se encuentra a 30 m. A diferencia del rango transversal en la que el radar si puede diferenciar objetos que se encuentren a una distancia mínima de 7.65 cm entre ellos.

Al aplicar directamente el algoritmo RMA la imagen final resulta con mucho ruido por lo que fue necesario antes de aplicar dicho algoritmo hacer una calibración realizando una medición del escenario, luego se procede a suprimir todo ese entorno disminuyendo de esta manera el ruido y dejando solo el objetivo.

En la formación de la imagen se identifica claramente como los niveles de potencia varían en diferentes puntos del objetivo, si se obtuvieran patrones de energía con distintas mediciones a diferentes objetivos, podríamos utilizarlos en futuras investigaciones para tratar de determinar de qué material están compuestos cada objetivo.

3.6. Alcances y limitaciones

3.6.1. Alcances

Con esta investigación se cumple los cuatro objetivos específicos presentados:

Los requerimientos del dispositivo USRP B210 para aplicaciones multi radar se analizaron en el capítulo I, aquí se estudia sus características como, frecuencias de operación, frecuencias de muestreo, potencias del transmisor, sensibilidad del receptor, ADC y DAC.

Se desarrolló un algoritmo utilizando Matlab para el mejoramiento de la resolución de la tarjeta USRP B210, con el cual se puede estimar de mejor manera el rango frontal al realizar varias mediciones del mismo objetivo. Este algoritmo es de fácil programación debido a que se trabajó con señales FMCW en donde el rango entre el radar y el objetivo puede ser fácilmente determinado aplicando la FFT.

Se desarrolló un algoritmo con los datos obtenidos mediante la tarjeta USRP B210 para realizar el procesamiento correspondiente de un sistema SAR con lo cual el objetivo se puede detectar, así como determinar su posición claramente mediante el rango transversal, con esto se logra la formación de la imagen y se verifican y validan los resultados.

Con esta investigación se logró obtener un prototipo radar de apertura sintética de bajo costo para la formación de imágenes, con el cual al realizar diferentes modificaciones se podría aplicar en áreas como la seguridad en ambientes poco visibles, tránsito vehicular en lugares donde los factores climáticos no sean los más favorables, obtención de siluetas, etc.

3.6.2. Limitaciones

La resolución frontal de 30 m es la máxima que entrega el sistema radar, la cual limita para hacer las mediciones ya que no se puede detectar la correcta ubicación del objetivo en rango transversal.

La tarjeta es muy inestable al querer aumentar la frecuencia de muestreo, sus características ofrecen una frecuencia de muestreo de 56 MHz, pero la máxima que se consigue como transmisor y receptor es 10 MHz.

El algoritmo del mejoramiento de la resolución no tiene algún efecto si al objetivo se coloca en un lugar menor al máximo de la resolución que entrega el sistema radar. Es decir, este algoritmo va depender de donde se encuentre el objetivo para ayudar a estimar mejor el objetivo.

Los algoritmos funcionan de manera correcta, se los comprueba mediante simulaciones, se podría realizar las respectivas mediciones con una tarjeta USRP con mayores características para conseguir una mejor resolución del sistema radar.

CONCLUSIONES

La máxima resolución frontal que se logra con este prototipo radar utilizando la tarjeta USRP B210 es de 30 m, esto es una gran limitante al momento de realizar las mediciones en ambientes internos. Al objetivo se lo puede detectar y ubicar de manera más precisa en rango transversal debido a que la resolución que entrega el sistema radar es de 7.65 cm, con la cual se logra una correcta formación de la imagen SAR.

El uso del software MatLab junto a GNURadio es necesario para realizar las mediciones, el primero se utiliza para la generación de las señales, aplicación de los algoritmos, el procesamiento de los datos y generación de la imagen SAR, mientras que GNURadio se lo emplea para enviar y recibir las señales en tiempo real debido a que consume menos recursos del computador comparado con MatLab.

El algoritmo para el mejoramiento de la resolución del sistema radar permite que se estime de mejor manera la distancia real existente entre el objetivo y el prototipo radar, ayudando a que las muestras ingresadas a la matriz antes de ser aplicado el algoritmo RMA sean más fiables. Este algoritmo puede mejorar la resolución del sistema radar dependiendo de la ubicación del objetivo, debido a que, si el objetivo se encuentra en un punto entre la máxima resolución y cero, este algoritmo no tiene ningún efecto positivo.

El sistema radar genera un tiempo de retardo provocado por la conexión USB y el procesamiento de los datos que debe realizar tanto el computador como la tarjeta USRP B210, dicho tiempo de retardo produce una distancia adicional de 15 m que se debe considerar al momento de aplicar los algoritmos para obtener la distancia en rango frontal y en la formación de la imagen SAR.

Al aplicar el algoritmo RMA es necesario realizar una calibración del sistema radar que consiste en realizar una resta entre las mediciones que se realizan al objetivo y las mediciones hechas al escenario, de esta manera nos aseguramos que el resultado final de la imagen SAR sea solo el objetivo, además esto permite eliminar las múltiples reflexiones que ocasiona el objetivo y el entorno.

RECOMENDACIONES

Para evitar el solapamiento de las señales es necesario una adecuada separación entre la antena transmisora y la antena receptora, así también se debe seleccionar de manera correcta el espaciamiento transversal, con un valor cercano a la resolución transversal que entrega el prototipo radar.

Una mejor precisión de las mediciones se puede conseguir si utilizamos un motor que controle el desplazamiento transversal y un riel que asegure que el sistema radar se encuentre siempre paralelo al objetivo, esto evita errores de medición como la paralaje que generalmente son ocasionados por el ser humano.

Una variante de este prototipo podría ser utilizando un arreglo de antenas en donde el lóbulo de irradiación puede ser controlado electrónicamente, esto ayuda a obtener una mejor directividad así como una mayor apertura de la que realmente posee la antena, con esto evitamos realizar el movimiento transversal del sistema radar para obtener las diferentes medidas.

Al realizar las mediciones en tiempo real, incluso utilizando GNURadio se produce un incremento del uso de los recursos del computador, se recomienda probar los distintos softwares (GNURadio y MatLab) bajo un sistema operativo como Linux en donde se pueda utilizar menos recursos que los que actualmente consume el sistema operativo Windows.

La tarjeta USRP B210 presenta inestabilidad al trabajar como transmisor y receptor en reiteradas ocasiones, producida por la saturación de la conexión USB entre el computador y la tarjeta. Se podría realizar una modificación de este prototipo radar al utilizar dos tarjetas USRP B210 con dos computadoras que trabajen de manera sincronizada, el un prototipo como transmisor y el otro como receptor.

La resolución frontal de 30 m que se obtuvo con el prototipo radar fue una gran limitante para realizar las diferentes mediciones en ambientes internos, con este prototipo radar se podría realizar nuevas mediciones en exteriores en donde la resolución frontal no sea una limitante para realizar las respectivas pruebas.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

ADC	Analog to Digital Converter (Convertidor Analógico a Digital)
CW	Continuous Wave (Onda Continua)
DRA	Range Doppler Algorithm (Algoritmo de Rango Doppler)
DAC	Digital to Analog Converter (Convertidor Digital a Analógico)
DFT	Discrete Fourier Transform (Transformada discreta de Fourier)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
FMCW	Frequency Modulation Continuous Wave (Onda continua en frecuencia modulada)
FPGA	Field Programmable Gate Array
HF	High Frequency (Alta Frecuencia)
IDFT	The Inverse Discrete Fourier Transform (Transformada Discreta Inversa de Fourier)
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform (Transformada rápida de Fourier inversa)
LFM	Linear Frequency Modulation (Frecuencia Modulada Lineal)
LFMCW	Linear Frequency Modulation Continuous Wave (Onda continua en frecuencia modulada lineal)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales)
PRF	Pulse Repetition Frequency (Frecuencia de repetición de impulsos)
RADAR	Radio Direction and Ranging (Detección y medición de distancias por radio)
RMA	Range Migration Algorithm (Algoritmo de migración de rango)
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar de Apertura Sintética)
SDR	Software Defined Radio (Radio definido por Software)

SDRadar	Software Defined Radar (Radar Definido por software)
SFCW	Stepped Frequency Continuous Wave (Onda continua de frecuencia escalonada)
UHD	USRP Hardware Driver
UHF	Ultra High Frequency (frecuencia ultra alta)
USB	Universal Serial Bus
USRP	Universal Software Radio Peripheral
UWB	Ultra Wide Band (Ultra Banda Ancha)
VHF	Very High Frequency (Muy alta frecuencia)

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ GONZÁLEZ, René Javier, & SHAGÑAY VIMOS, Sandra Isabel. *Sistema radar para análisis y reconstrucción de perfiles topográficos a media escala.* [pdf] (TESIS) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad De Informática y Electrónica, Escuela de Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes. Riobamba-Ecuador. 2015. p 22. [Consulta: 2016-10-09]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/4476/1/98T00071.pdf>

ANDREWS, Larry & PHILLIPS, Ronald. *Laser beam propagation through random media.* Bellingham, WA: SPIE press, 2005. pp 30-40

ARSLAN, Hüseyin. *Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems.* Berlin: Springer, 2007. p 112. [Consulta: 16 diciembre 2016]. Disponible en: http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31896272/Cognitive-Radio.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1481297129&Signature=1vVLPypJKcBjQvc9NuYcyMMlp7o%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DCognitive_Radio_SOFTWARE_DEFINED_RADIO_A.pdf

BARBERÁN MOREIRA, Jeneffer Joselin, & DOMÍNGUEZ OROZCO, Rodrigo Fernando. *Sistema radar para reconstrucción de objetos 3D mediante la utilización del dispositivo KINECT* [pdf] (TESIS) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad De Informática y Electrónica, Escuela de Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes. Riobamba-Ecuador. 2016. p 7. [Consulta: 2016-10-09]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/5412/1/98T00092.pdf>

BLOSSOM, Eric. *GNURADIO. Overview - GNU Radio - gnuradio.org.* [blog]. San Francisco, California, United States. 2013. p 1 [consulta 20 de diciembre del 2016]. Disponible en: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio>

CHARVAT, Gregory. *Small and Short-Range Radar Systems*. Boca Raton Miami, USA: Taylor & Francis Group, 2014., pp 1-150

ETTUS RESEARCH. *USRP Software Defined Radio (SDR)*. [en línea]. San Francisco, California, United States. 2016. p 1 [consulta 21 de diciembre del 2016]. Disponible en: <https://www.ettus.com/product/details/UB210-KIT>

FETTE, Bruce. *Communications Engineering: Cognitive Radio Technology*. Burlington, US: Newnes, 2006. p 4 [Consulta: 17 diciembre 2016]. Disponible en: <http://site.ebrary.com/lib/epoch/reader.action?docID=10150490>

JIN, Ya-Qiu., & XU, Feng. *Polarimetric Scattering and SAR Information Retrieval*. Somerset, SG: Wiley-IEEE Press, 2013. pp 90-100

KENINGTON, Peter. *RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio*. Norwood, US: Artech House Books. 2005. pp 1-5 [Consulta: 15 diciembre 2016]. Disponible en: <http://site.ebrary.com/lib/epoch/reader.action?docID=10091341>

LARA JIMÉNEZ, Raúl Andrés & OLIVARES BARRAGÁN, Santiago. *Tecnología de radar aplicada a la detección oportuna del cáncer de mama*. [pdf] (TESIS) (Pregrado) Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones. Veracruz-México. 2013 p. 9 [Consulta:2016-10-07]. Disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/40329/1/larajimenezraul.pdf>

MAHAFZA, Bassem. *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*. Miami, USA: Chapman & Hall/CRC, 2013. pp 16-22

MAXWELL, Michael. *Developing a Generic Software-Defined Radar Transmitter using GNU Radio*. [pdf] (TESIS) (Pregrado). The University of Adelaide School of Electrical and Electronic Engineering. Adelaida-Australia. 2012. pp 30-32 [Consulta: 19 diciembre 2016]. Disponible en: <https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/77826/8/02whole.pdf>

MOHAMED, Elhefnawy & WIDAD, Ismail. “Fundamentals of Synthetic Aperture Radar Systems.” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* [pdf], 2015, pp. 172-178. [Consulta: 11 diciembre 2016]. ISSN 2250-2459. Disponible en: http://www.ijetae.com/files/Volume5Issue9/IJETAE_0915_29.pdf

OZDEMIR, Caner. *Wiley Series in Microwave and Optical Engineering: Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*. Hoboken, USA: Wiley-Interscience, 2012. pp. 51-84

QUI, Xiaolan. & DING, Chibiao. & HU, Donghui. *Bistatic SAR Data Processing Algorithms*. Somerset, SG: Wiley, 2013. pp. 25-27

SATYABRATA, SEN. *Adaptive OFDM radar for target detection and tracking*. [pdf] (**TESIS**) (Doctorado). Washington University in St. Louis, School of Engineering and Applied Science Department of Electrical & Systems Engineering. St. Louis-USA. 2010 pp. 16-25 [Consulta:2017-01-30]. Disponible en: <http://openscholarship.wustl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1317&context=etd>

WANG, Bu-Chin. *Digital signal processing techniques and applications in radar image processing*. Hoboken New Jersey, USA: JOHN WILEY & SONS, INC, 2008. p 147

XU, Xinyu., WU, Ke. & BOSISIO, Renato. “Software defined radio receiver based on six-port technology”. *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International IEEE* [pdf], 2003. pp 1059-1062. [Consulta: 19 diciembre 2016]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Ke_Wu18/publication/4022532_Software_defined_radio_receiver_based_on_Six-Port_technology/links/552ba70f0cf21acb091e54a2.pdf

ANEXOS

Anexo A. Generación de las señales en MatLab

```
fc=5e9;
c=3e8; %(m/s) velocidad de la luz
BW=5e6; %Ancho de Banda (Hz)
fs=10e6; %Frecuencia de Muestreo
tf=25e-6; %Tiempo de duracion de la señal (s)
N=250; %Numero de muestras "N=fs*ts"
t=0:1/fs:(N-1)/fs;
% %Generacion de la Señal FMCW
senfmcw = phased.FMCWWaveform('SampleRate',fs,'SweepTime',tf,...
    'SweepBandwidth',BW,'SweepDirection','Up','NumSweeps',1);
x = (step(senfmcw));
sgenerada=x;
yyy = zeros(length(sgenerada),1); %Concatenacion para generar el
PRI=2*tf;
for i=1:4
    if i==1
        sgenerada = vertcat(sgenerada,yyy);
    else
        sgenerada = vertcat(sgenerada,sgenerada);
    end
end
```

Anexo B. Envío de la señal desde MatLab a GNURadio

```
%Envio de la señal FMCW a GNURADIO
%Separacion de señal FMCW parte real e imaginaria IQ
sgenerada_real = real(sgenerada);
sgenerada_imag = imag(sgenerada);
%Envio de la señal FMCW a GNURADIO
var_auxiliar1 = fopen('fmcwr.dat','w');
v_aux1= fwrite(var_auxiliar1,sgenerada_real,'float');
fclose(var_auxiliar1);
var_auxiliar2 = fopen('fmcwi.dat','w');
v_aux2= fwrite(var_auxiliar2,sgenerada_imag,'float');
fclose(var_auxiliar2);
```

Anexo C.Recepción de la señal desde GNURadio

```
%Recepcion de la señal FMCW desde GNURADIO
longitud=N;
var_auxiliar = fopen('fmcw 1.dat','rb');
recibida = fread(var_auxiliar,[2,longitud],'float');
srecibida = complex(recibida(1,:),recibida(2,:)); %Formación de la
señal IQ
fclose(var_auxiliar);
%Llenado de la matriz para procesar las imagenes SAR.
cont=1;
if cont==1
    cont=cont+1;
    s=dechirp(srecibida',real(x));
    mat=srecibida';
```

```

else
    ss=dechirp(srecibida',real(x));
    s = horzcat(s,ss);
    mat=horzcat(mat,srecibida');
end
%save medicion1 s; %load variable sif %for image data
save escenario s; %load variable sif %for image data

```

Anexo D. Algoritmo para mejorar la resolución de la tarjeta USRP

```

load medicion1 dista1; %Cargar los datos Medicion BW=5MHz
load medicion2 dista2; %Cargar los datos Medicion BW=3.33 MHz
resol(1)=c/(2*5e6);
resol(2)=c/(2*3.33e6);
mdistancia=vertcat(dista1,dista2);
Nmed=length(resol);
MedTrans=length(dista1);
dismin=0;
dismax=0;
% Aplicar Algoritmo mejora de Resolucion a cada medicion
for j=1:MedTrans
    i=1;
    while (i<=Nmed)
        if mdistancia(1,j)==resol(i)
            disfinal(j)=mdistancia(1,j);
            i=Nmed;
        else
            if (i==1)
                dismax=mdistancia(i,j);
                dismin=mdistancia(i,j)-resol(i);
            else
                if(mdistancia(i,j)<=dismax)
                    dismax=mdistancia(i,j);
                else
                    dismin=mdistancia(i,j)-resol(i);
                end
            end
            disfinal(j)=dismin;
        end
        i=i+1;
    end
end
end

```

Anexo E. Calibración del dispositivo Radar

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%CALIBRACION%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%
%*****
load escenario_cl s; %Cargar la medicion solo del escenario sin el
objetivo
% %
% %
%*****
% % %Realizar la substracción del objetivo menos el escenario
sif_sub = s;
load objetivo_cl s; %Cargar las mediciones del objetivo

```

```

s = s-sif_sub; %Realizar la substracción del objetivo menos el
escenario
clear s;
clear sif_sub;

%*****
**
Rs = 3; %(m) Distancia del radar al objetivo
Xa = 0; %(m) Inicio de la posición para la medición
delta_x = 0.1; %(m) antenna spacing
L = delta_x*(size(sif,1)); %(m) Longitud Transversal
Xa = linspace(-L/2, L/2, (L/delta_x)); %(m) Posición del radar en
rango transversal
Za = 0;
Ya = Rs;
t = linspace(0, tf, size(sif,2));
Kr = linspace(((4*pi/c)*(fc - BW/2)), ((4*pi/c)*(fc + BW/2)),
(size(t,2)));

```

Anexo F. Algoritmo RMA

```

%Primero llenar de ceros, para obtener simetria entre le rango
%frontal y el rango transversal
zpad = 128; %cross range symetrical zero pad
szeros = zeros(zpad, size(sif,2));
for ii = 1:size(sif,2)
    index = (zpad - size(sif,1))/2;
    szeros(index+1:(index + size(sif,1)),ii) = sif(:,ii);
end
sif = szeros;
clear ii index szeros;
%Aplicar la Transformada Discreta de Fourier de rango transversal
S = fftshift(fft(sif, [], 1), 1);
clear sif;
Kx = linspace((-pi/delta_x), (pi/delta_x), (size(S,1)));
%*****
*
%Filtro coincidente

for ii = 1:size(S,2)
    for jj = 1:size(S,1)
        phi_mf(jj,ii) = Rs*sqrt((Kr(ii))^2 - (Kx(jj))^2);
    end
end
smf = exp(j*phi_mf);

%Aplicar el filtro coincidente a S
S_mf = S.*smf;
clear smf phi_mf;
clear S;
%*****
*
%Aplicar el slot de Interpolacion
%Para el analisis de los datos
kstart =40; %Para 2 a 6 ghz
kstop = 153.8; %Para 2 a 6 ghz

Ky_even = linspace(kstart, kstop, 512); %Crea un espaciado uniforme Ky

```



```

%                                     para los datos reales
Ky_eeven = linspace(kstart, kstop, zpad); %Hacer el mismo tamaño que
kx
%                                     para encontrar el rango
frontal
clear Ky S_St;
for ii = 1:size(Kx,2)
    Ky(ii,:) = sqrt(Kr.^2 - Kx(ii)^2);
    S_st(ii,:) = (interp1(Ky(ii,:), S_mf(ii,:), Ky_even));
end
S_st(find(isnan(S_st))) = 1E-30; %Poner todos los valores Nan a cero
clear S_mf ii Ky;

%*****
%Realizar la transformada inversa de Fourier 2D
clear v Kr Krr Kxx Ky_even;
v = ifft2(S_st, (size(S_st,1)*4), (size(S_st,2)*4));
xx = sqrt(Kx.^2 + Ky_eeven.^2);
bw = (3E8/(4*pi))*(max(xx)-min(xx));
max_range = (3E8*size(S_st,2)/(bw/2));
for ii=1:size(v,1)
    v(ii,:) = v(ii,:).*linspace(0,max_range,size(v,2)).^(3/2);
end
%Mostrar la imagen final
S_image = dbv(v);
figure;
S_image = rot90(S_image);
cr1 = -3;
cr2 = 3;
dr1 = 1;
dr2 = 30;
dr_index1 = round((dr1/max_range)*size(S_image,1));
dr_index2 = round((dr2/max_range)*size(S_image,1));
cr_index1 = round(( (cr1+zpad*delta_x/(2))
/(zpad*delta_x))*size(S_image,2));
cr_index2 = round((
(cr2+zpad*delta_x/(2))/(zpad*delta_x))*size(S_image,2));
trunc_image = S_image(dr_index1:dr_index2,cr_index1:cr_index2);
downrange = linspace(-1*dr1,-1*dr2, size(trunc_image,1))-15; %15 m
del retardo del dispositivo
crossrange = linspace(cr1, cr2, size(trunc_image, 2));
imagesc(crossrange, downrange, trunc_image,
[max(max(trunc_image))-25, max(max(trunc_image))-0]);
colormap('default');
title('Imagen del SAR');
ylabel('Rango Frontal (m)');
xlabel('Rango Transversal (m)');
cbar = colorbar;
set(get(cbar, 'Title'), 'String', 'dB','fontsize',13);
print(gcf, '-djpeg100', 'final_image_S.jpg');

```