



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

PROYECTO TÉCNICO:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE RADAR
DE OBJETIVOS MÓVILES CON RADIO DEFINIDA POR
SOFTWARE Y GNURADIO**

AUTORES:

**MARCO ANDRÉS SILVA YÁNEZ
JUAN JOSÉ CARTAGENA IZQUIERDO**

TUTOR:

LENIN E. CEVALLOS-ROBALINO, PhD.

GUAYAQUIL – ECUADOR

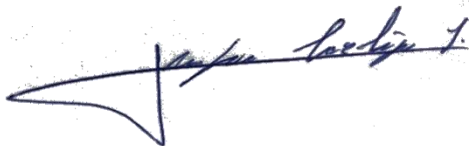
2021

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación

Nosotros, Marco Andrés Silva Yáñez y Juan José Cartagena Izquierdo, estudiantes de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana certificamos que los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente proyecto de titulación son de exclusiva responsabilidad de los autores y es propiedad intelectual de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, junio del 2021

(f) 
MARCO ANDRES SILVA YANEZ
C.I. 0919091017

(f) 
JUAN JOSÉ CARTAGENA IZQUIERDO
C.I. 0925127706


Certificado de cesión de derechos de autores

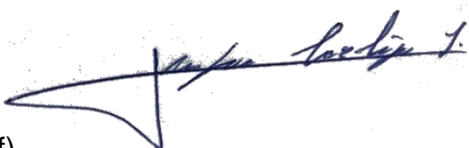
Nosotros, Marco Andrés Silva Yáñez y con documento de identificación N.º 0919091017 y Juan José Cartagena Izquierdo con documento de identificación N.º 0925127706, manifestamos nuestra voluntad de ceder a la Universidad Politécnica Salesiana los derechos patrimoniales en calidad de autores del proyecto de titulación titulado “Diseño e implementación de un prototipo de radar de objetivos móviles con radio definida por software y GNURadio”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de ingeniero electrónico con énfasis en telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la ley de propiedad intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada.

En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, junio del 2021


(f) _____
MARCO ANDRES SILVA YANEZ
C.I. 0919091017


(f) _____
JUAN JOSÉ CARTAGENA IZQUIERDO
C.I. 0925127706

Certificado de dirección del trabajo de titulación

Por medio de la presente doy a conocer que el proyecto de titulación “Diseño e implementación de un prototipo de radar de objetivos móviles con radio definida por software y GNURadio” presentado por Marco Andrés Silva Yáñez y Juan José Cartagena Izquierdo para optar por el título de ingeniero electrónico con énfasis telecomunicaciones, se ajusta a las normas establecidas por la Universidad Politécnica Salesiana, por tanto, autorizo su presentación ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, junio del 2021

**LENIN
ESTUARDO
CEVALLOS
ROBALINO**
f. Docente tutor

Firmado digitalmente
por LENIN ESTUARDO
CEVALLOS ROBALINO
Fecha: 2021.06.17
02:31:22 +02'00'

(f) _____
LENIN E. CEVALLOS-ROBALINO, PhD.
DIRECTOR DE PROYECTO DE TESIS

Agradecimiento

Agradezco a Dios por guiarme y cuidarme siempre, por darme paciencia, tolerancia y determinación permitiéndome terminar mi carrera y por siempre cuidar de mi familia.

A mi madre Jenny Yáñez por su apoyo incondicional, por creer en mí y acompañarme en cada paso de mi vida. Gracias por tanto amor y cariño que me das día a día y por enseñarme a ser valiente ante cualquier obstáculo. Gracias por enseñarme a ser un luchador. A mi padre Juan Carlos Balandra por su apoyo constante, gracias por ayudarme a cumplir un sueño más, gracias por amar tanto a mi mamá y gracias por querernos como sus propios hijos. A mi papá Marco Silva por su amor infinito, por los consejos y a guía hacia el camino del bien y por cada valor humano inculcado desde joven.

A mis abuelitos por tenerme siempre en sus oraciones, motivándome día a día a salir adelante, por ese amor y ese granito de esperanza depositado en mí el cual hoy da frutos. Gracias abuelito Lucho por siempre cuidarme desde el cielo, por enseñarme el valor de la humildad y la sencillez. Gracias por siempre llevarme sano y salvo a casa. A mi hermana Natahly Silva Yáñez por ser mi ejemplo de perseverancia y superación. Por estar siempre ahí para mí y a pesar de todo, brindarme siempre ese amor incondicional. A la Universidad Politécnica Salesiana por todas enseñanzas impartidas, por la formación profesional, personal y espiritual recibida durante todos estos años. A mi familia por esa voz de aliento y por esos consejos que nunca estuvieron de más, los cuales me han acompañado durante mi carrera universitaria

MARCO ANDRES SILVA YANEZ

Quisiera agradecer en primer lugar a Dios por haberme permitido completar esta etapa de mi vida y mantenerme con salud para poder gozar este momento. Agradezco a mi madre por ser siempre el sostén de mi vida, por haberme dado las herramientas para ser un hombre de bien y jamás permitirme que me dé por vencido y ayudarme durante toda mi carrera universitaria. A mis abuelos que han sido ejemplo de perseverancia y de amor máximo para mí. A mis hermanos que, con su ejemplo, me han demostrado que con esfuerzo todo es posible. A mis tías Alexandra y Gisella, por haberme aconsejado y enseñarme a ser un profesional con una buena ética para mis compañeros y mi trabajo. Por último y no menos importante, quisiera agradecer y dedicar este logro a mi hija Valentina y mi futura esposa Lidice, son ustedes las que me han impulsado a mejorar día a día, me han enseñado por medio del amor y la dedicación a ser un mejor hombre y padre. Quiero que este triunfo personal se vuelva colectivo ya que cada uno de los que están en este texto me han ayudado de una manera indescriptible, a ustedes les digo, gracias.

A la Universidad Politécnica Salesiana le agradezco haberme acogido durante todos estos años y permitirme conocer a las fantásticas personas que hoy forman parte de mi vida, a los que con orgullo puedo llamar mis amigos.

JUAN JOSÉ CARTAGENA IZQUIERDO

Resumen del proyecto

Año	Alumnos	Tutor de Proyecto de titulación	Proyecto de titulación
2021	Marco A. Silva Y. Juan J. Cartagena I.	Lenin E. Cevallos Robalino, PhD.	Diseño e implementación de un prototipo de radar de objetivos móviles con radio definida por software y GNURadio.

El proyecto de investigación tiene como principal objetivo el diseño de un prototipo de radar de objetivos móviles utilizando radio definida por software y GNU Radio para el uso práctico en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil. Con este desarrollo de prototipo se abre el camino para futuras investigaciones que pueden ser desarrolladas por estudiantes, docentes e investigadores de la carrera de telecomunicaciones, en la cual se puede desarrollar sistemas de radares de distancia y velocidad para aplicación en detección de objetivos a distancia y detección de velocidad utilizando técnicas de radar FMCW.

Se desarrollará un prototipo de radar con aplicación para laboratorio donde se realizarán pruebas de test de distancia y velocidad y las configuraciones necesarias para afinar el radar a objetivos móviles. Para conseguir esto se utilizará una radio definida por software como el USRP B200mini-i full dúplex en banda de frecuencia que va desde los 70 MHz hasta los 6Ghz, antenas tipo cornetas rectangulares, cables coaxiales, software open source GNU Radio, un PC con monitor, teclado, mouse, y un objetivo móvil con rieles para el desarrollo de la práctica. Durante las pruebas de laboratorio se realizarán todos los ajustes del radar para que pueda probarse en campo cerrado ya que el prototipo se entregará al laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil. Cabe mencionar que el prototipo no será instalado en campo, como entregable de esta investigación se desarrollará un manual de práctica donde se explica el funcionamiento y armado del prototipo y se realizará un entregable del CPU con el desarrollo del software.

Como conclusión del trabajo de esta investigación los estudiantes de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, profesores e investigadores del área de telecomunicaciones se ven beneficiados ya que tienen a su disposición un manual de prácticas y módulo de pruebas de radar móvil donde podrán realizar prácticas de laboratorio y plantearán sus conocimientos teóricos de las radios definidas por software con aplicaciones de radar y software open source GNU Radio.

Abstract

Year	Students	Degree Project Tutor	Technical Degree Project
2021	Marco A. Silva Y. Juan J. Cartagena I.	Lenin E. Cevallos Robalino, PhD.	Prototype design of mobile target radar with software-defined radio and GNU Radio

The main objective of the research project is to design a prototype mobile lens radar using software-defined radio and GNU Radio for practical use in the telecommunications laboratory of the Salesian Polytechnic University headquarters Guayaquil. This prototype development opens the way for future research that can be developed by students, faculty, and researchers from the telecommunications race, in which distance and speed radar systems can be developed for application in remote target detection and speed detection using FMCW radar techniques.

A prototype radar with laboratory application will be developed where distance and speed test tests and the configurations needed to fine-tune the radar to mobile targets will be carried out. To achieve this, a software-defined radio such as the USRP B200mini-i full duplex in frequency band ranging from 70 MHz to 6Ghz, rectangular bugle antennas, coaxial cables, GNU Radio opensource software, a PC with monitor, keyboard, mouse, and a mobile lens with rails for the development of practice will be used. All radar adjustments will be made during laboratory tests so that it can be tested in the closed field as the prototype will be delivered to the telecommunications laboratory of the Salesian Polytechnic University headquarters Guayaquil. It should be mentioned that the prototype will not be installed in the field, as deliverable of this research will be developed a practice manual explaining the operation and assembly of the prototype and will perform a deliverable CPU with the development of the software.

As a conclusion of the work of this research the students of the career of engineering in telecommunications of the Polytechnic University Salesiana headquarters Guayaquil, professors and researchers of the area of telecommunications are benefited since they have at their disposal a manual of practices and module of tests of mobile radar where they can carry out laboratory practices and will raise their theoretical knowledge of the radios defined by software with applications of radar and software open source GNU Radio..

Índice general

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	ii
Certificado de cesión de derechos de autores	iii
Certificado de dirección del trabajo de titulación	iv
Agradecimiento.....	v
Resumen del proyecto.....	vi
Abstract	vii
Índice general	viii
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xiv
Introducción	1
1. El problema.....	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Antecedentes	2
1.3. Importancia y alcance.....	2
1.4. Delimitación.....	3
1.4.1. Delimitación temporal	3
1.4.2. Delimitación espacial.....	3
1.4.3. Delimitación académica.....	3
1.5. Beneficiarios de la propuesta.....	3
1.6. Propuesta de solución	3
1.7. Innovación e impacto del proyecto.....	4
1.8. Objetivos	4
1.8.1. Objetivo general	4
1.8.2. Objetivos específicos.....	4
2. Fundamentos teóricos.....	5
2.1. Radar	5
2.2. Breve historia del radar.....	5
2.3. Principios del funcionamiento del radar	7
2.4. Propagación y reflexión de ondas electromagnéticas.....	8
2.5. Sección transversal del radar.	10
2.6. Ecuación del radar.....	11
2.7. Radar Doppler.....	14
2.8. Efecto Doppler.....	14
2.9. Radar de Pulso Doppler	16
2.10. Radar biestático	17
2.11. Forma de onda continua	18
2.12. Onda continua modulada por frecuencia.....	20
2.13. Radar FMCW	21
2.13.1. Rango y resolución	23
2.13.2. Patrón de modulación	25
2.13.3. Modulación en forma de sierra.....	26
2.13.4. Modulación triangular.....	26
2.13.5. Modulación rectangular (incrustación por desplazamiento de frecuencia única, FSK).....	26
2.13.6. Modulación de escalera	26
2.13.7. Modulación sinusoidal.....	26
2.13.8. El cambio de frecuencia lineal de los dientes de sierra	26

2.13.9.	Cambio de frecuencia triangular	27
2.13.10.	El cambio de frecuencia en forma de rectángulo.....	29
2.13.11.	El cambio de frecuencia de la escalera.....	31
2.13.12.	Diagrama de bloques	31
2.13.13.	Radar de imágenes FMCW.....	34
2.13.14.	Radar FMCW sin imagen.....	35
2.14.	Antena de bocina	36
2.15.	Bocinas sectoriales	37
2.16.	Antena de bocina piramidal.....	38
2.17.	Bocina rectangular	39
2.18.	Aplicaciones de antenas de bocina piramidal.....	41
2.19.	USRP B200mini-i	42
2.20.	GNU Radio.....	43
2.21.	Instalación de GNU Radio en Ubuntu.....	44
2.21.1.	Arquitectura general de USRP	45
2.21.2.	Ancho de banda analógico.....	46
2.21.3.	Ancho de banda de procesamiento FPGA	47
2.21.4.	Ancho de banda del host	48
2.21.5.	Cálculo del ancho de banda del USRP	49
2.22.	Características de RF del USRP B205mini	50
2.22.1.	Instalar y configurar las herramientas de software en su computadora host	51
2.22.2.	Conexión del USRP a la computadora host	51
2.22.3.	Prueba y verificación del funcionamiento del USRP.....	51
2.22.4.	Consideraciones legales	51
2.22.5.	Afinación y ganancias	52
2.22.6.	Indicadores LED	53
2.22.7.	Conexiones externas	54
2.23.	Antena WR-159	54
2.24.	Calculadora de rango máximo de radar	55
3.	Marco metodológico.....	56
3.1.	Tipo de investigación	56
3.2.	Diseño de investigación.....	56
3.3.	Enfoque de la investigación	56
3.4.	Metodología de investigación	57
3.5.	Proyectos de investigación vinculados	57
3.5.	Título de la propuesta	57
3.6.	Descripción de la propuesta	57
3.7.	Elementos del prototipo	59
3.7.1.	Antena corneta	59
3.7.2.	Simulación de Antena Horn (corneta) con MATLAB	67
3.7.3.	CPU con Ubuntu 20.....	74
3.7.4.	Conexión del USRP B205 mini-i.....	75
3.7.5.	Objetivo móvil para pruebas de radar	75
3.7.6.	Instalación del prototipo de radar.....	77
4.	Resultados.....	81
4.1.	Selector QT GUI	81
4.2.	USRP Sink	82
4.3.	Generador de señales	84
4.4.	Señal VCO (Señal Chirp).....	84
4.5.	USRP Source	85
4.5.1.	Variables y widgets de GUI	85

4.5.2. Mensajes	85
4.6. AGC	87
4.7. Pruebas en espacio cerrado y resultados obtenidos del radar FMCW.	87
4.8. Pruebas en espacio abierto del radar FMCW.	95
4.9. Cálculo de distancia teórica	100
4.10. Cálculo de distancia con simulador web Pasternack	101
4.11. Cálculo de pérdidas en espacio libre.....	102
4.12. Cálculo de velocidad teórica	103
5. Análisis de resultados	104
5.1. Comparaciones de pruebas de campo abierto y campo cerrado	106
6. Conclusiones	107
7. Recomendaciones	108
Bibliografía.....	109
Anexos	112
Guías de prácticas de laboratorio:	112
Especificaciones del FPGA del dispositivo USPM B200mini-i	132
Script en Matlab de la simulación de antena	133
Código Python del radar FMCW.	134

Índice de figuras

Figura 2.1 Radar.....	5
Figura 2.2 Radar en la guerra.....	7
Figura 2.3 Principio básico de un radar.....	8
Figura 2.4 Ecuaciones de Maxwell	8
Figura 2.5 Dirección de propagación de la onda electromagnética	9
Figura 2.6 Transmisión y reflexión de ondas incidentes en un límite plano entre dos materiales	10
Figura 2.7 Geometría de un radar y un objetivo en la derivación del desplazamiento de frecuencia Doppler.....	16
Figura 2.8 Diagrama de bloques del radar FMCW con receptor homodyne.....	16
Figura 2.9 Radar Biestático	17
Figura 2.10 Diagrama de bloque de Radar CW Doppler	19
Figura 2.11 Relación frecuencia-tiempo en un radar FMCW con modulación de frecuencia triangular lineal	21
Figura 2.12 Determinación de la distancia con un radar FMCW	22
Figura 2.13 Patrones de modulación comunes para un radar FMCW	25
Figura 2.14 Relaciones con la modulación triangular	28
Figura 2.15 Objetivos fantasmas, solución gráfica	29
Figura 2.16 La diferencia de fase $\Delta n(\varphi)$ es una medida de cuántas veces la longitud de onda es el doble de la distancia (camino de ida y vuelta)	30
Figura 2.17 Diagrama de bloques de un radar FMCW	32
Figura 2.18 Diagrama de bloques FMCW	33
Figura 2.19 ART Midrange, un radar FMCW con antenas separadas para transmisión y recepción	33
Figura 2.20 Conjunto de antenas de parche de un radar de navegación FMCW en banda X.....	35
Figura 2.21 Pantalla analógica de un altímetro de radar	36
Figura 2.22 Antena de bocina.....	36
Figura 2.23 Funcionamiento de antena de bocina	37
Figura 2.24 Bocinas de sección rectangular, a) sectorial de plano E, b) sectorial de plano H, c) piramidal.....	38
Figura 2.25 Bocina piramidal alimentada por una guía rectangular	39
Figura 2.26 Bocina rectangular	39
Figura 2.27 Directividad de la bocina rectangular	40
Figura 2.28 Calculo de dimensiones de antena bocina piramidal.....	40
Figura 2.29 USRP B200mini-i.....	43
Figura 2.30 Diagrama de bloques USRP B200mini-i	43
Figura 2.31 Diagrama de bloques GNU Radio.....	44
Figura 2.32 Arquitectura general de USRP	46
Figura 2.33 Mainboard del USRP B205 mini-i.....	50
Figura 2.34 Diagrama esquemático del USRP.....	52
Figura 2.35 Calculadora de rango máximo de radar	55
Figura 3.1 Prototipo de radar con USRP y GNURadio	58
Figura 3.2 Antena Horn de marca Pasternack	59
Figura 3.3 Características técnicas de la antena Horn Pasternack	59
Figura 3.4 Diagrama en CAD de la antena	60
Figura 3.5 Adaptador para conector coaxial.....	61

Figura 3.6 Datasheet del adaptador.....	61
Figura 3.7 Datasheet del adaptador, return loss	62
Figura 3.8 Diagrama del adaptador de la antena	63
Figura 3.9 Antena de corneta, frontal.....	64
Figura 3.10 Antena de corneta, perfil.....	64
Figura 3.11 Antena corneta, interior.....	65
Figura 3.12 Conector SMA	65
Figura 3.13 Antenas cornetas, RX y TX.....	66
Figura 3.14 Cable minicoaxial de minicircuits	66
Figura 3.15 Matlab 2021	67
Figura 3.16 Antena horn	67
Figura 3.17 Medidas de antena horn	68
Figura 3.18 Parámetros de medidas de la antena horn.....	69
Figura 3.19 Resultados del diseño de antena horn	70
Figura 3.20 Vista frontal de antena	70
Figura 3.21 Distribución de corriente en antena.....	71
Figura 3.22 Diagrama de radiación de antena	71
Figura 3.23 Diagrama de impedancia	72
Figura 3.24 Parámetros S.....	72
Figura 3.25 Patrón de radiación en Azimut	73
Figura 3.26 Patrón de radiación en elevación	74
Figura 3.27 CPU HP Compaq.....	74
Figura 3.28 USRP B205 mini-i conexión USB.....	75
Figura 3.29 Objetivo móvil metálico con rieles	76
Figura 3.30 Movimientos del objetivo metálico.....	76
Figura 3.31 Objetivo móvil con rieles	77
Figura 3.32 Alineación de antenas.....	77
Figura 3.33 Altura de las antenas	78
Figura 3.34 Distancia de las antenas	78
Figura 3.35 Ajustes de las antenas.....	79
Figura 3.36 Ajustes de los cables coaxiales.....	79
Figura 3.37 Revisión de continuidad y corto en las antenas	80
Figura 4.1 Diagrama de bloques de la programación en GNU Radio.....	81
Figura 4.2 Selector QT GUI	82
Figura 4.3 USRP Sink opciones generales	83
Figura 4.4 USRP Sink RF Options.....	83
Figura 4.5 Generador de señales	84
Figura 4.6 Señal VCO Chirp	85
Figura 4.7 USRP Source general.....	86
Figura 4.8 USRP Source RF options	86
Figura 4.9 AGC.....	87
Figura 4.10 Pruebas en espacio cerrado con objetivo móvil	87
Figura 4.11 Pruebas a 2 metros de distancia.....	88
Figura 4.12 Definición de la programación del radar FMCW.....	88
Figura 4.13 Pruebas en interior a 3 mts de distancia	89
Figura 4.14 Objetivo móvil a 3 mts de distancia	89
Figura 4.15 Señal recibida en dominio del tiempo.	90
Figura 4.16 Señal recibida en dominio de la frecuencia.....	90
Figura 4.17 Señal recibida mostrada en mapa de calor.	91
Figura 4.18 Señal en dominio del tiempo.....	91
Figura 4.19 Señal en diagrama de constelación.	91
Figura 4.20 Promedio de distancia del objetivo alcanzado por el radar.....	92

Figura 4.21 Objetivo visto desde un desplazamiento de fase	92
Figura 4.22 Objetivo visto desde un desplazamiento de fase, modificado	92
Figura 4.23 Datos de velocidad y distancia.....	93
Figura 4.24 Comunicación del USRP y Python.....	93
Figura 4.25 Comunicación USRP	93
Figura 4.26 Comunicación del USRP.....	94
Figura 4.27 Ejecución del programa	94
Figura 4.28 Revisión del programa	95
Figura 4.29 Pruebas en campo abierto	96
Figura 4.30 Revisión de resultados obtenidos	96
Figura 4.31 Ajustes de pruebas en campo.....	97
Figura 4.32 Ajustes de radar.....	97
Figura 4.33 Ajustes en altura de antenas.....	98
Figura 4.34 Ajustes en altura y distancia de antenas	98
Figura 4.35 Pruebas con objetivo móvil	99
Figura 4.36 Pruebas de movimiento de objetivo	99
Figura 4.37 Señal de radar FMCW	100
Figura 4.38 Simulación web de distancia de radar.....	102
Figura 4.39 Cálculo de pérdidas en el espacio libre.....	103
Figura 5.1 Resultados del radar FMCW	104
Figura 5.3 Bloque para guardar datos de velocidad.....	105
Figura 5.4 Bloque para guardar datos de distancia.....	106

Índice de tablas

Tabla 2.1. Ancho de banda analógico	47
Tabla 2.2. Ancho de banda de procesamiento FPGA	48
Tabla 2.3. Ancho de banda del host	49
Tabla 2.4 Indicadores LED del B200mini	53
Tabla 2.5. Conexiones externas del B200mini	54
Tabla 5.1 Mediciones del radar en espacio cerrado	105
Tabla 5.2. Tabla comparativa entre campo abierto y campo cerrado	106

Introducción

La tecnología de radar ha experimentado un período de resurgimiento impulsado por la demanda de tecnología compacta, rentable y de alta potencia para aplicaciones militares, comerciales y de control de tráfico. Esto también ha llevado a la reevaluación de cómo se debe utilizar la tecnología para lograr soluciones de radar robustas y económicas. Además, la tecnología innovadora, como los vehículos aéreos no tripulados (UAV), los automóviles autónomos, así como una variedad de aplicaciones comerciales, se basan en un radar de estado sólido, donde la programación y la fabricación se han rediseñado para satisfacer las necesidades del mercado. Para responder a formas y ondas de radar inteligentes y complejas, está surgiendo la aparición de la radio y el radar cognitivos que ha sido habilitado por los sistemas de radio definidos por software (SDR). (CHIAO, 2019)

Uno de los sistemas de radar más utilizadas en las ciudades son los sistemas de radar de velocidad, los cuales son aplicados hoy en día en las principales carreteras y vías del Ecuador como medida preventiva y correctiva al exceso de velocidad en los automotores que circulan por las carreteras del país. La CTE (Comisión de Tránsito del Ecuador) cuenta con 20 radares de velocidad móviles y más de 500 radares fijos instalados en todas las carreteras del país, con lo cual se ha bajado el índice de accidentes en las vías. La ANT (Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador) ha adquirido radares de última tecnología para el control de velocidad en las carreteras de la ciudad de Guayaquil Ecuador. (El Telégrafo, 2018)(ANT, 2019)

Las empresas hoy en día requieren de ingenieros con conocimientos prácticos en este campo de las telecomunicaciones por tal motivo es indispensable que los estudiantes de la carrera de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana tengan en sus laboratorios un prototipo de radar con el cual se pueda desarrollar prácticas que permita aplicar todos sus conocimientos teóricos del radar en prototipos y equipamiento para tal fin.

En ese contexto se propone un prototipo de radar de objetivos móviles con SDR (Radios definidas por software) y GNU Radio que sirva como objeto de práctica y experimentación a los futuros ingenieros en el campo de las telecomunicaciones, específicamente a los estudiantes de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, con la finalidad de realizar prácticas de radares móviles mediante radios definidas por software y que a futuro sus desarrollos permitan crear herramientas y aplicaciones en beneficio de la sociedad.

Este trabajo de investigación se clasifica de la siguiente manera, en el primer capítulo se explica el problema, antecedentes, importancia y alcance, delimitación, beneficiarios de la propuesta, propuesta de solución y objetivos. En el segundo capítulo se refiere a los fundamentos teóricos de radares, el capítulo tres se refiere al marco metodológico, tipo de investigación. El capítulo 4 trata sobre los resultados de la investigación. El capítulo 5 trata sobre los análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones. Finalmente se agregan los anexos que corresponde al manual de práctica.

1. El problema

1.1. Descripción del problema

Uno de los problemas principales en el estudio de los sistemas de radares en materias como redes inalámbricas, antenas o comunicaciones digitales de la carrera de Ingeniería en Electrónica énfasis Telecomunicaciones y en la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, es la poca práctica existente que refuerce el conocimiento teórico adquirido en las mencionadas materias y que ayuden al futuro ingeniero en adquirir habilidades prácticas en el campo específico de los radares.

La importancia de este trabajo de investigación para el estudiante de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones es muy elevada, ya que ayudará a complementar los conocimientos de sistemas de radares mediante la práctica en diseños de diferentes prototipos de radares mediante radios definidas por un software y antenas especializadas.

1.2. Antecedentes

La Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil se ha caracterizado por ser una universidad que desarrolla investigación en el área técnica específicamente en el área de telecomunicaciones se han desarrollado algunos prototipos y proyectos de investigación a beneficio de la sociedad en común, esto se puede corroborar revisando el dspace de la universidad donde se encuentra la bibliografía de tesis que han desarrollado proyectos innovadores en la carrera de electrónica énfasis telecomunicaciones.

Uno de los desafíos en el área de investigación de telecomunicaciones es el desarrollo de radares aplicados para la investigación y en beneficio de la sociedad en común. Es por este motivo que se propone un desarrollo de prototipo de radares de velocidad utilizando radios definidas por software y software Open Source como GNU Radio.

1.3. Importancia y alcance

Con el aporte de esta propuesta, la sociedad en general se verá beneficiada al contar con investigaciones y prototipos aplicados a los radares realizado por estudiantes e investigadores de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, de igual manera se verá beneficiados los estudiantes de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones los cuales podrán poner en práctica los conocimientos adquiridos en las diferentes materias aplicando la teoría de los radares y las comunicaciones inalámbricas con el prototipo de radar móvil con radios definidas por software.

1.4. Delimitación

1.4.1. Delimitación temporal

El proyecto de investigación es desarrollado durante 1 año, su finalización es en el mes de junio del 2021.

1.4.2. Delimitación espacial

El trabajo de investigación “Diseño e implementación de un prototipo de radar de objetivos móviles con radio definida por software y GNURadio.” se realiza en el domicilio del autor del tema de tesis Juan José Cartagena, posteriormente a las pruebas y experimentación se realiza la entrega del prototipo de antenas para el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil ubicada en el edificio F, barrio Cuba dirección Chambers 227 y 5 de enero.

1.4.3. Delimitación académica

El trabajo de investigación consta de módulos interactivos que son capaces de dar a conocer información sobre el diseño de radares mediante software Ettus USRP y el software Open Source GNU Radio para la interacción de los radares. Además, el contenido del desarrollo investigativo se muestra en las prácticas resueltas.

1.5. Beneficiarios de la propuesta

En el ámbito educativo aporta significativamente en la preparación del futuro Ingeniero en Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil ya que el alumno se prepara en las nuevas tecnologías de radares utilizando equipos configurables como las radios definidas por software, antenas de bocina y software open source como GNU Radio para la fabricación de prototipos de radares aplicados a control de velocidad o de distancia.

1.6. Propuesta de solución

La propuesta de este proyecto de investigación consiste en el diseño de un prototipo de radar de objetivos móviles mediante radios definida por software Ettus USRP B200mini-i, antenas de bocinas y software open source GNU Radio para aplicación de radar de distancia y velocidad donde el valor de la distancia y la velocidad será visualizado en el software programado con GNU Radio.

Se realiza la entrega del prototipo del radar y un manual de práctica que servirá para el uso de estudiantes en laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

1.7. Innovación e impacto del proyecto

El desarrollo de esta investigación tiene un nivel de innovación alto, debido a que la realización de la programación del radar mediante software open source GNU Radio para obtener la información de la distancia y velocidad de un objetivo móvil, se realiza de una manera experimental e inédita. El impacto del proyecto es elevado permitiendo cimentar las bases de un prototipado para futuras investigaciones en el campo de los radares, e inclusive experimentar con la fabricación de radares de bajo costo, realizados en el país a beneficio de la comunidad.

1.8. Objetivos

1.8.1. Objetivo general

Diseño e implementación de un prototipo de radar de objetivos móviles con radio definida por software y GNURadio.

1.8.2. Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo de radar utilizando radio definida por software Ettus USRP B205 mini-i.
- Realizar la fabricación de antenas cónicas para el uso del radar de velocidad de bajo costo.
- Realizar un manual de práctica del funcionamiento y uso del radar de objetivos móviles mediante radios definidas por software.
- Diseñar software de radar de velocidad en GNU Radio.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Radar

El nombre del sistema RADAR proviene del término "Radio Detection and Ranging". Si se define por las funciones que realizan y cómo se realizan, se puede decir que son un sistema cuyo objetivo es encontrar que el objetivo se encuentra a cierta distancia al detectar los ecos que generan en respuesta a la emisión de señales electromagnéticas. Pueden ser diferentes tipos (forma de onda) de señales, estas señales se envían a través de antenas con una directividad evidente.

Además de la existencia de solo objetivos, suele ser necesario comprender ciertas características de estos objetivos, como la posición, velocidad, forma, etc. Respecto a los dos primeros, se observa que, fundamentalmente, la posición está determinada por el tiempo de retardo de la llegada del eco, y la velocidad depende del desplazamiento Doppler de la señal recibida como el eco relativo al eco transmitido. Para comprender otros aspectos del objetivo, se puede considerar la fuerza del eco (Universidad de Alcalá, 2020).

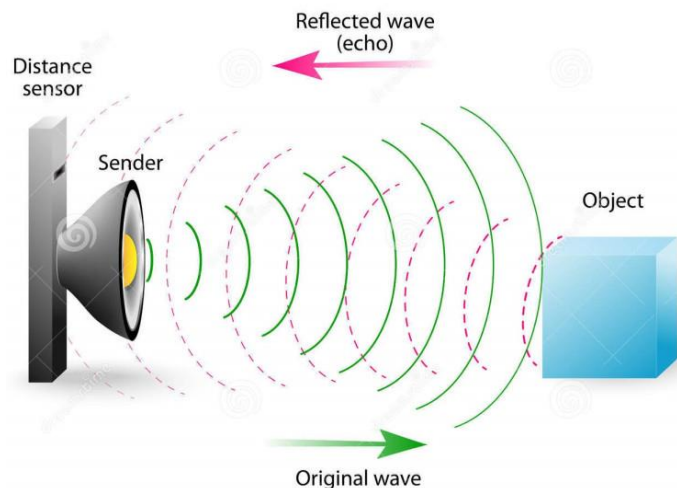


Figura 2.1 Radar
Fuente: (radaruax, 2020)

2.2. Breve historia del radar

En los primeros días del radar (1920-1950), la función principal de los sistemas de radar se limitaba a detectar objetivos y estimar su alcance. Desde entonces, los avances en el hardware y software de los sistemas de radar han permitido que los sistemas de radar detecten, distingan, clasifiquen, imaginen y rastreen simultáneamente el alcance, la altura, la dirección o la velocidad de múltiples objetivos fijos o móviles.

El sistema de radar se desarrolló originalmente para aplicaciones militares. Las aplicaciones de radar actuales son muy amplias, incluida la navegación de

aeronaves, barcos y naves espaciales, sistemas para evitar colisiones de automóviles, monitoreo de precipitaciones meteorológicas, radioastronomía y observación geológica, y aplicaciones militares, como sistemas de defensa aérea, sistemas antimisiles y sistemas misiles guiados (Boric-Lubecke, Park, Lubecke, Droitcour, & Singh, 2015).

Todos los sistemas de radar utilizan transmisores de radio de alta frecuencia que emiten haces de radiación electromagnética con longitudes de onda que van desde unos pocos centímetros hasta aproximadamente 1 m. Los objetos en la trayectoria del haz reflejan las ondas de regreso al transmisor. El radar se basa en la ley de la reflexión de ondas de radio, que está implícita en las ecuaciones que controlan el comportamiento de las ondas electromagnéticas, y fue propuesto en 1864 por el físico británico James Clerk Maxwell. Estas leyes se probaron por primera vez en 1886. Las opiniones experimentales del físico alemán Heinrich Hertz. El ingeniero alemán Christian Hülsmeier fue el primero en sugerir que este tipo de eco debería aplicarse a equipos de detección diseñados para evitar colisiones en la navegación marítima, se recomienda utilizar este tipo de eco. En 1922, el inventor italiano Guglielmo Marconi desarrolló un instrumento similar.

En 1924, el físico británico Edward Víctor Appleton utilizó el eco de ondas de radio para determinar la altura de la ionosfera, una capa ionizada de la atmósfera más alta capaz de reflejar las ondas de radio más largas. Al año siguiente, los físicos estadounidenses Gregory Breit y Merle Antony Tuve utilizaron tecnología de pulso de radio que luego se incorporó a todos los sistemas de radar para obtener los mismos resultados para la ionosfera. Su desarrollo fue imposible hasta que la tecnología y los equipos electrónicos se perfeccionaron en la década de 1930.

El primer sistema de radar útil fue construido en 1935 por el físico británico Robert Watson Watt. Su investigación colocó a Inglaterra en una posición de liderazgo en la aplicación de esta tecnología estratégica. En 1939, tenía una serie de estaciones de radar en las costas sur y este, capaces de detectar ataques aéreos y marítimos. En el mismo año, dos científicos británicos realizaron los avances más importantes en tecnología de radar durante la Segunda Guerra Mundial.

El físico Henry Boot y el biofísico John T. Randall inventaron un tipo de tubo de electrones llamado magnetrón de cavidad resonante. Este tipo de tubo es capaz de generar pulsos de radio de alta frecuencia con gran cantidad de energía, permitiendo el desarrollo de radares de microondas que utilizan láseres para operar en una banda muy pequeña con una longitud de onda menor a 1 cm.

El radar de microondas, también conocido como LIDAR (Light Detection and Ranging), se utiliza ahora en el campo de las comunicaciones para medir la contaminación del atmosférica. El sistema de radar de más rápido crecimiento construido en la década de 1930 jugó un papel decisivo en la Batalla de Gran Bretaña desde agosto de 1940 hasta octubre de 1940, y la Luftwaffe de Adolf Hitler estaba tratando de adueñarse de espacio aéreo británico. Aunque los alemanes tienen sus propios sistemas de radar, los ejércitos británico y estadounidense aún pueden

mantener sus ventajas tecnológicas hasta el final de la guerra (Pérez Vega, 2010).



Figura 2.2 Radar en la guerra
Fuente: (radaruax, 2020)

2.3. Principios del funcionamiento del radar

Cuando un sistema de radar emite un pulso de energía de radiofrecuencia (RF), una pequeña parte de esa energía se reflejará en los objetos en la trayectoria del pulso transmitido. Debido a que la velocidad de las ondas electromagnéticas en el espacio libre es la misma que la velocidad de la luz, el alcance del objeto se puede calcular a partir del tiempo entre la transmisión del pulso y la recepción del reflejo. Si el sistema de radar está configurado para medir la frecuencia de la señal electromagnética reflejada, la velocidad del objeto se puede calcular a partir del cambio de frecuencia de la señal transmitida a la señal recibida. La potencia de la señal reflejada proporciona información sobre el tamaño, la geometría y la composición del objeto.

Una de las principales ventajas de los sistemas de radar de microondas y radio es que las ondas electromagnéticas en este rango de frecuencia pueden penetrar las nubes, la niebla y el polvo, por lo que se pueden detectar objetos invisibles (Boric-Lubecke et al., 2015).

Un sistema de radar generalmente consta de un transmisor, una antena, un receptor y una unidad de procesamiento de señales. El transmisor genera ondas electromagnéticas y las amplifica a la potencia requerida. La antena direccional concentra la onda en la dirección del objetivo y puede determinar la dirección del objetivo. Para ello, se suelen utilizar conjuntos de antenas ajustables electrónicamente. El receptor convierte la señal de la frecuencia de transmisión a una frecuencia intermedia o banda base, separa la señal del ruido y la interferencia y amplifica la señal lo suficiente para la digitalización y / o visualización. El procesamiento de señal se utiliza para rechazar el desorden y otros ruidos, al tiempo que se discrimina la señal deseada de la interferencia, y para extraer información de la señal. En principio, el radar puede funcionar en cualquier radiofrecuencia. Sin embargo, las consideraciones reales del tamaño de la antena, la potencia del

transmisor, el alcance del objetivo y la resolución del radar determinan el límite de la frecuencia operativa. El rango de radiofrecuencia suele estar entre 3 kHz y 300 GHz, y la frecuencia de funcionamiento del radar estándar está en el rango de 3 MHz-300 GHz, que está definido por el estándar de notación de letras de banda de frecuencia de radar IEEE (Boric-Lubecke et al., 2015).

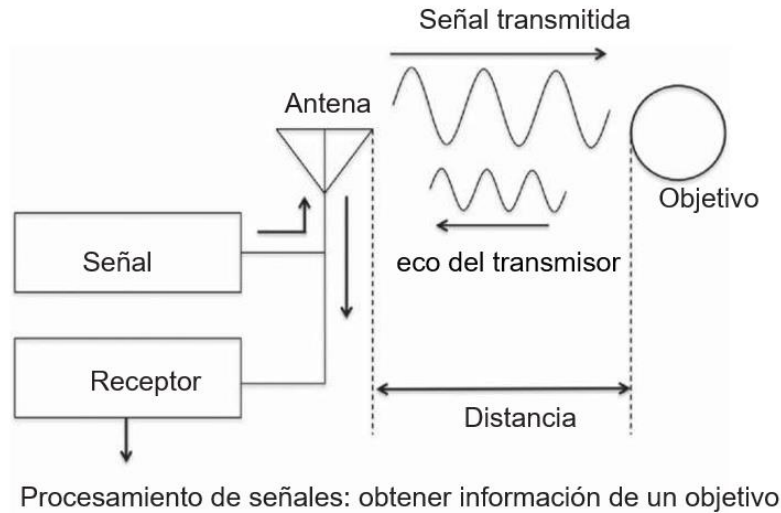


Figura 2.3 Principio básico de un radar
Fuente: (Boric-Lubecke et al., 2015)

2.4. Propagación y reflexión de ondas electromagnéticas.

La energía electromagnética viaja en el aire a la velocidad de la luz de 3×10^8 m / s. Si las ondas electromagnéticas encuentran materiales con diferentes constantes dieléctricas, se reflejan. Los sistemas de radar tienen receptores diseñados para detectar estas ondas reflejadas, lo que indica que los objetos tienen diferentes constantes dieléctricas en la dirección de propagación. El alcance máximo de un sistema de radar se ve ligeramente afectado por las condiciones atmosféricas y climáticas, porque a medida que el vapor de agua absorbe energía electromagnética, aumenta la pérdida de potencia de señal. Generalmente, a medida que aumenta la frecuencia de las ondas electromagnéticas, aumenta la pérdida de energía, excepto en varias regiones de frecuencia que resuenan con el vapor de agua. Las propiedades del campo electromagnético se describen en las ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot E &= \frac{\rho}{\epsilon} \\ \nabla \cdot H &= 0 \\ \nabla \times E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \times H &= \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + j\end{aligned}$$

Figura 2.4 Ecuaciones de Maxwell
Fuente: (Boric-Lubecke et al., 2015)

Estas ecuaciones describen el comportamiento de los campos electromagnéticos. La interpretación simplificada de cada ecuación es que la carga es la fuente del campo eléctrico (ley de Gauss), no hay monopolo magnético (la ley del magnetismo de Gauss), el campo magnético variable en el tiempo induce un campo eléctrico (ley de Faraday) y el campo eléctrico variable en el tiempo y / o la corriente lo hará.

Se induce un campo magnético (ley de Ampere). Juntas, la ley de Faraday y la ley de Ampere muestran que los campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo se inducirán entre sí, lo que da como resultado un campo electromagnético variable en el tiempo que se propaga con la onda.

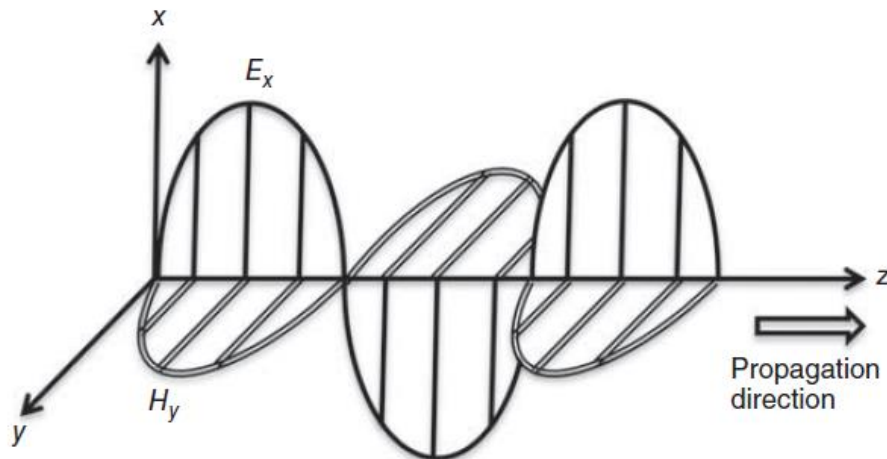


Figura 2.5 Dirección de propagación de la onda electromagnética

Fuente: (Boric-Lubecke et al., 2015)

La dirección de propagación de la onda electromagnética es ortogonal al plano de los campos eléctricos y magnéticos, como se muestra en la Fig. 2.5 En este caso, el campo eléctrico es el componente x E_x , el campo magnético es el componente y H_y , y la onda se propaga a lo largo del eje z .

Si hay una discontinuidad en la constante dieléctrica del medio a la que se propaga la onda electromagnética, se transmitirá parte de la onda y se refleja alguna, dependiendo de las propiedades de los dos materiales. Esta situación se ilustra en la Fig. 2.6.

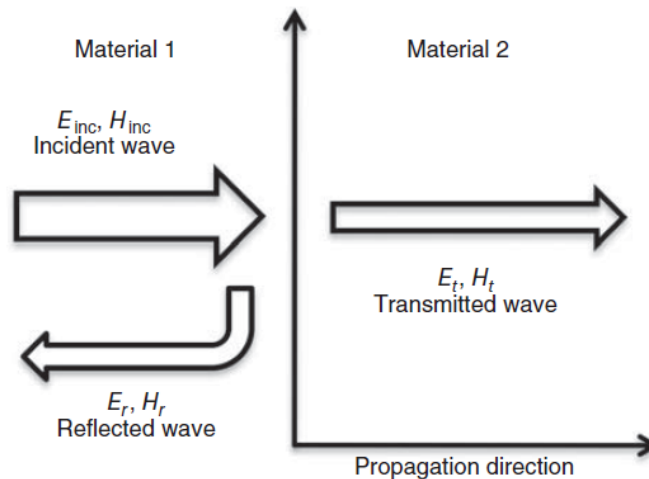


Figura 2.6 Transmisión y reflexión de ondas incidentes en un límite plano entre dos materiales

Fuente: (Boric-Lubecke et al., 2015)

2.5. Sección transversal del radar.

La sección transversal del radar (RCS) “Radar Cross Section” es la propiedad de un objeto de dispersión, u objetivo, que representa la fracción de la señal de eco devuelta al radar por el objetivo en comparación con el eco que sería reflejado por una esfera perfectamente conductora con un área transversal de 1 metro cuadrado.

Una definición del RCS también puede expresarse en términos de dispersión electromagnética como:

$$\sigma = \frac{\text{Powe reflected toward source/UnitSolid angle}}{\text{Incident power density}/4\pi} = 4\pi R^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2}$$

donde R es el alcance al objetivo, E_r es la intensidad de campo eléctrico de la señal de eco en el radar, y E_i es el incidente de intensidad de campo eléctrico en el objetivo.

Se asume en esta ecuación de que el objetivo está lo suficientemente lejos del radar que la onda incidente puede considerarse plana en lugar de esférica.

A veces el RCS se describe como el área transversal en la ubicación objetivo necesaria para interceptar la cantidad de potencia, que, si se dispersa uniformemente en todas las direcciones, produciría una potencia de eco en el receptor de radar igual a la producida en el radar por el objetivo real.

Los objetivos reales, por supuesto, no dispersan la energía incidente uniformemente en todas las direcciones. En general, hay dos condiciones extremas de RCS en

términos de longitud de onda. En primer lugar, si la longitud de onda es grande en comparación con las dimensiones del objeto, la dispersión se encuentra en la región de Rayleigh.

El RCS en la región de Rayleigh está determinado más por el volumen del dispensador que por su forma. En el otro extremo, donde la longitud de onda es pequeña en comparación con las dimensiones del objeto, la dispersión se encuentra en la región óptica. La dispersión de aeronaves o buques a frecuencias de microondas generalmente se encuentra en la región óptica donde el RCS se ve más afectado por la forma del objeto que por su área proyectada.

Entre el Rayleigh y la región óptica se encuentra la región de resonancia donde la longitud de onda del radar es comparable a las dimensiones del objeto (Boric-Lubecke et al., 2015).

2.6. Ecuación del radar.

La ecuación de radar se utiliza para estimar la potencia recibida en un sistema de radar, para un objetivo con propiedades dadas y rango desde el transceptor, y se puede utilizar para ayudar a determinar los límites teóricos del sistema.

La potencia recibida estimada se basa en la potencia transmitida, el rango al objetivo y las propiedades de la antena de transmisión, el objetivo y la antena de recepción.

Si una antena isotrópica irradia una onda electromagnética, la onda se propaga uniformemente en todas las direcciones, y la densidad de energía se propaga esféricamente. Por lo tanto, en un punto a la distancia R del radar, la potencia total se distribuirá a través de la superficie A .

$$A = 4\pi R^2$$

Por lo tanto, la densidad de potencia es inversamente proporcional al radio de la esfera. La densidad de potencia de la antena isotrópica S_i en el rango R_1 se puede calcular como:

$$S_i = \frac{P_t}{4\pi R_1^2} [W/m^2]$$

donde P_t es la potencia transmitida.

Mientras que un segmento esférico o antena isotrópica emite la misma radiación en todas las direcciones (a potencia de transmisión constante), si la potencia transmitida se centra para proporcionar más radiación en una dirección mediante el uso de una antena direccional, el aumento de la densidad de potencia en la dirección enfocada de la radiación se denomina ganancia de antena. La direccional densidad de potencia, S_g , se da como:

$$S_g = S_i * G$$

donde G es la ganancia de antena.

El objetivo del radar intercepta una parte de la potencia radiada y la refleja, parcialmente en la dirección de la antena receptora del radar. El RCS, σ , se determina por la cantidad de incidente de energía en el objetivo que se vuelve a irradiar hacia la antena.

Esta cantidad depende de varios factores, pero generalmente es cierto que un área más grande refleja más potencia que un área más pequeña. La potencia reflejada P_d en el objetivo se puede expresar por la densidad de potencia S_i , la ganancia de antena G , y el RCS σ :

$$P_d = S_i \cdot G \cdot \sigma = \frac{P_i * G * \sigma}{4\pi R_1^2} [W]$$

Con el fin de simplificar el análisis, el objetivo puede considerarse como una fuente que radiación de la potencia reflejada. Puesto que la potencia reflejada se puede considerar con las mismas condiciones que la potencia transmitida, la densidad de potencia produjo en el receptor S_r es dada por:

$$S_r = \frac{P_d}{4\pi R_2^2} [W/m^2]$$

donde S_r es la densidad de potencia en el receptor, P_d es la potencia reflejada por el objetivo en vatios, y R_2 es el rango entre el objetivo y la antena receptora en metros.

En la antena de radar, la potencia recibida depende de la densidad de potencia en el receptor S_r y del área de antena efectiva A_e :

$$P_r = S_r * A_e$$

donde P_r es la potencia en el receptor en vatios, y A_e es el área efectiva de la antena en metros cuadrados.

El área efectiva de la antena determina la porción de la energía radiada que la antena receptora puede capturar. La potencia recibida es igual a la densidad de potencia en la antena, multiplicada por el área de captura efectiva de la antena receptora.

Las diferencias entre el área real de la antena y el área efectiva de la antena son causadas por pérdidas, de modo que la potencia recibida en la antena no es igual a la potencia de entrada. El área efectiva de la antena se puede calcular a partir del área geométrica de la antena como:

$$A_e = A * K_a$$

donde A_e es el área efectiva de la antena en metros cuadrados, A es el área geométrica de la antena en metros cuadrados, y K_a es la eficiencia de la antena. A partir de las ecuaciones anteriores, la potencia recibida, P_r , se calcula entonces como:

$$P_r = \frac{P_d A_e}{4\pi R_2^2} [W]$$

de las ecuaciones anteriores, la potencia recibida puede expresarse como:

$$P_r = \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 R_1^2 R_2^2} [W]$$

Ahora, suponiendo que el rango R_2 (del objetivo a la antena) y el rango R_1 (de la antena al objetivo) son iguales, la ecuación se puede expresar como:

$$P_r = \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 R^4} [W]$$

donde G es la ganancia de antena en términos de la longitud de onda y el área de antena efectiva:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

Resolviendo para A y sustituyendo las ecuaciones, después de la simplificación se produce lo siguiente:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} [W]$$

Finalmente, resolviendo la ecuación para el rango R , la ecuación del rango de radar se da como:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{P_r (4\pi)^3}} [m]$$

donde, en general, los parámetros P_t , G , y λ pueden considerarse constantes en un sistema de radar dado.

Una aplicación de la ecuación de radar es determinar la distancia máxima a la que se puede detectar un objetivo. La potencia recibida más pequeña que puede ser detectada por el radar se llama P_{\min} y es una función del receptor y la electrónica de digitalización (Boric-Lubecke et al., 2015).

El rango máximo R_{\max} se calcula como:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{P_{r\max} (4\pi)^3}} [m]$$

2.7. Radar Doppler.

El radar Doppler se utiliza normalmente para detectar objetivos en movimiento y estimar su velocidad. Las aplicaciones comunes del radar Doppler incluyen detección de imágenes meteorológicas y detección de velocidad de vehículos. Los detectores de movimiento de los sistemas de seguridad y los controladores de puertas son otros usos comunes de los detectores de movimiento basados en radar Doppler (Boric-Lubecke et al., 2015).

2.8. Efecto Doppler.

El efecto Doppler, o desplazamiento Doppler, es el cambio en la frecuencia de las ondas recibidas cuando un observador se mueve en relación con la fuente de la onda.

Este fenómeno fue descubierto por el físico alemán Christian Doppler y se aplica a todo movimiento de onda, incluyendo el sonido, la luz y las ondas electromagnéticas.

Si la frecuencia de un sonido de una fuente se mantiene constante, y tanto la fuente como el observador del sonido permanecen estáticos, el sonido permanece en la misma frecuencia porque el observador recibe el mismo número de ondas por segundo que la fuente está produciendo.

Si la fuente o el observador se mueve hacia el otro, el observador percibirá el sonido a una frecuencia más alta que la que se generó porque el observador captura más ondas por segundo. Alternativamente, si la fuente y el observador se están alejando entre sí, el observador percibirá una frecuencia más baja porque el observador captura menos ondas por segundo.

Si el rango al objetivo es R , entonces el número total de longitudes de onda en el trayecto bidireccional del radar al objetivo y el retorno es $2R/\lambda$.

Cada longitud de onda corresponde a un cambio de fase de 2π radianes. El cambio de fase total en la ruta de propagación bidireccional es entonces:

$$\phi = 2\pi * \frac{2R}{\lambda} = 4\pi R/\lambda$$

Si el objetivo está en movimiento en relación con el radar, R está cambiando y también lo hará la fase. La diferenciación con respecto al tiempo proporciona la tasa de cambio de fase, que es la frecuencia angular:

$$\omega_d = \frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR}{dt} = \frac{4\pi v_r}{\lambda} = 2\pi f_d$$

donde $v_r = \frac{dR}{dt}$ es la velocidad radial (m/s), o la velocidad de cambio de rango con el tiempo.

Si, como se muestra en la figura 2.7, el ángulo entre el vector de velocidad del objetivo y la línea de visión del radar hasta el objetivo es θ , entonces $v_r = v \cos \theta$, donde v es la velocidad, o magnitud de la velocidad vectorial.

La velocidad de cambio de Φ con el tiempo es la frecuencia angular $\omega_d = 2\pi f_d$, donde f_d es el desplazamiento de frecuencia Doppler. Así desde:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2f_t v_r}{c}$$

donde f_t es la frecuencia del radar y c es la velocidad de la luz o 3×10^8 m/s.

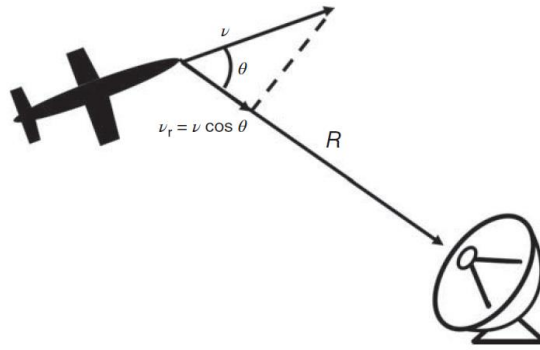


Figura 2.7 Geometría de un radar y un objetivo en la derivación del desplazamiento de frecuencia Doppler

Fuente: (Boric-Lubecke et al., 2015)

2.9. Radar de Pulso Doppler

El radar de pulso Doppler es el sistema de radar más utilizado. Un sistema de radar de pulsos transmite pulsos estrechos con una gran potencia máxima a una frecuencia de repetición de pulsos (PRF) y analiza los ecos recibidos retardados en el tiempo reflejados a partir de objetos de destino. El radar de pulsos que utiliza el desplazamiento Doppler para detectar objetivos móviles es un radar de indicación de objetivo móvil (MTI) o un radar Doppler de pulso (Skolnik et al., 1980).

El radar de pulso tradicional, que se muestra en la Fig. 2.8, tiene la ventaja de un rango de medición, además de la información de velocidad. El método común para medir el rango con un radar es medir el retardo de tiempo entre la transmisión y la recepción de un pulso. Dado que la energía de RF viaja a la velocidad de la luz, c a 3×10^8 m/s.

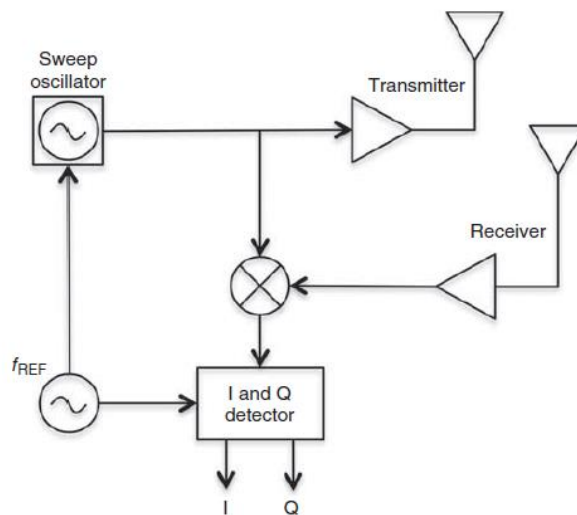


Figura 2.8 Diagrama de bloques del radar FMCW con receptor homodyne.

Fuente: (Boric-Lubecke et al., 2015)

2.10. Radar biestático

Hay dos configuraciones básicas de radar basadas en la relación espacial entre las antenas transmisoras y receptoras: mono estáticas y biestáticas.

En una configuración biestática, las antenas de transmisión y recepción están separadas por una distancia en el orden de la distancia de una de las antenas al objetivo (Barton & Leonov Editors, 1998).

En los casos en que hay dos antenas separadas, pero no están separadas por un gran ángulo, el sistema puede ser referido como "pseudo monoestático." Un radar multiestático tiene al menos dos transmisores y un receptor o al menos un transmisor y dos receptores, o transmisores múltiple y receptores múltiples (Doughty, 2008).

Un transmisor de radar generalmente transmite una señal electromagnética de alta potencia para asegurar que la señal reflejada del objetivo será lo suficientemente grande como para detectar; para aplicaciones de larga distancia, los niveles de potencia de onda electromagnética pueden ser de hasta cientos de kilovatios o incluso megavatios. Además, el receptor es un dispositivo muy sensible, diseñado para detectar pequeñas señales del orden de los milivoltios a los nano vatios que vienen de objetivos pequeños o distantes. En los sistemas de radar mono estático, la alta potencia de transmisión a veces se acopla directamente al receptor, causando auto jamming, saturación, o daño al receptor. Una configuración básica es más eficiente que lo mono estática en términos de auto-jamming ya que la distancia física o el aislamiento de circuitos pueden proporcionar suficiente aislamiento entre las trayectorias de transmisión y recepción.

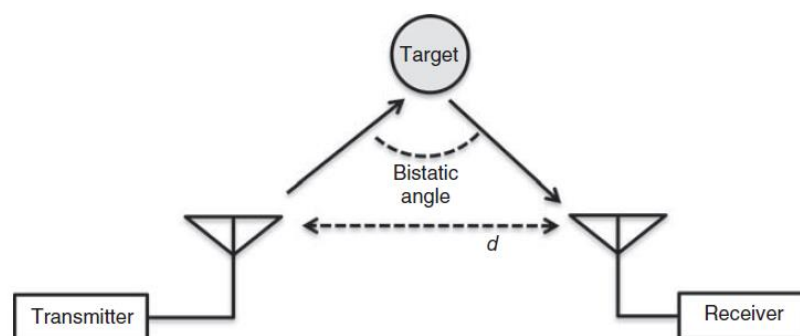


Figura 2.9 Radar Biestático
Fuente: (Boric-Lubecke et al., 2015)

A pesar de estos desafíos, muchos radares modernos son mono estáticos debido a la arquitectura simple habilitada por un sistema mono estático. Para obtener suficiente aislamiento entre los circuitos de transmisión y recepción, se utilizan algunos dispositivos especiales, incluidos los circuladores de ferrita y los dúplex de

cavidad resonante o guía de onda. En los sistemas de radar pulsado, el transmisor y el receptor no funcionan al mismo tiempo, lo que proporciona un gran grado de aislamiento adicional.

Hay varias aplicaciones para las configuraciones biestáticas. Por ejemplo, un misil semiactivo sólo tiene la parte receptora en el sistema de crucero, mientras que el transmisor está en otra plataforma. El transmisor está irradiando señal primaria a un objetivo, mientras que el misil está recibiendo la señal reflejada para estimar la ubicación de un objetivo. El radar biestático también se puede utilizar para aumentar la capacidad de detectar alquitrán sigiloso. Una de las técnicas para crear objetivos sigilosos es hacer un objetivo en forma para maximizar la dispersión de ondas y minimizar la señal de retroversión hacia el radar mono estático. Sin embargo, esa señal reflejada desviada generalmente proporciona un gran RCS en alguna dirección biestática, que puede ser utilizado para detectar ese objetivo sigiloso (Richards, Scheer, Scheer, & Holm, 2010).

Los sistemas de radar biestáticas y multiestático también se utilizan a menudo para el funcionamiento encubierto del receptor, la portabilidad del receptor o para evitar problemas en la electrónica. Los sistemas multiestáticos pueden utilizar la diversidad espacial para mejorar la detección, resolución y rechazo de efectos multitrayecto.

2.11. Forma de onda continua

Un sistema de radar de onda continua (CW) transmite y recibe constantemente una señal de ancho de banda muy estrecha. El transceptor de radar CW tiene una topología simple, que consiste en una fuente de señal utilizada para la transmisión y recepción, y un receptor de heterodino u homodino. Puesto que un sistema CW transmite y recibe constantemente, no hay necesidad de que un switch controle un terminal de transmisión/recepción, como se requiere en el sistema de radar pulsado.

Un radar CW utiliza una sola antena con un dúplex o un circulador para aislar las señales de transmisión y recepción, o utiliza antenas separadas para transmitir y recibir.

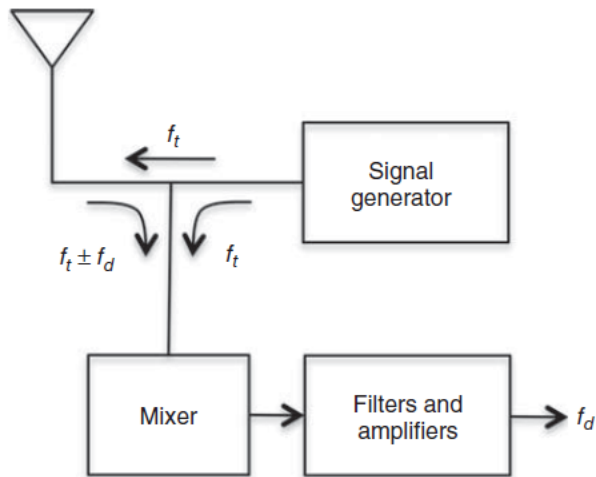


Figura 2.10 Diagrama de bloque de Radar CW Doppler
Fuente: (Boric-Lubecke et al., 2015)

Debido a su ancho de banda extremadamente estrecho, se pueden utilizar filtros simples en cada etapa del receptor. La señal de ancho de banda estrecho hace que sea sencillo detectar el desplazamiento Doppler en un sistema de radar CW; un sistema de radar CW puro puede medir inequívocamente la velocidad de los objetivos en cualquier rango y moviéndose a cualquier velocidad.

La principal desventaja de los resultados del radar CW es la fuga del transmisor al receptor, que es un efecto secundario causado por el transmisor y el receptor que se encuentran en constante durante toda la operación. Una parte de la señal transmitida se filtra desde el transmisor al receptor, ya sea a través del acoplamiento entre los circuitos de transmisión y recepción, o directamente a través de las antenas. Esta fuga inyecta el receptor del radar con una señal grande a la frecuencia de transmisión que no se ha reflejado fuera del objetivo. Además, el desorden, o los objetos no de movimiento no dirigidos, refleja algunas de las bandas laterales de señal y ruido de vuelta al receptor, inyectando el receptor con más señal en la frecuencia de transmisión. Estas señales no deseadas dan lugar a un desplazamiento de CC y ruido de baja frecuencia si no se eliminan antes de que se detecte la señal.

Un sistema de radar CW con un receptor de extremo único similar, no puede distinguir los objetivos que se acercan y retroceden porque tanto Doppler positivos como negativos se pliegan en una banda de frecuencia tras la señal de downconversion a banda base. Debe utilizarse un receptor de heterodino coherente o un receptor de cuadratura homodino para evitar el plegado del espectro y distinguir la dirección o el movimiento del objetivo (Boric-Lubecke et al., 2015).

2.12. Onda continua modulada por frecuencia

Un sistema de radar CW Doppler puede determinar la velocidad del objetivo en movimiento porque el sistema puede detectar el desplazamiento de frecuencia en la señal CW recibida. Para detectar el rango al objetivo, la señal debe tener algún tipo de marcador de sincronización tal que el tiempo de tránsito pueda ser más seguro.

Tanto la velocidad como el rango se pueden medir con sistemas de radar que modulan la señal CW con cualquiera de varios métodos, incluyendo FMCW, onda continua de frecuencia escalonada (SFCW), modulación codificada (CM), modulación de ruido (NM), modulación de pulso sintetizado (SPM), modulación holográfica (HM) o modulación de amplitud (AM) (Daniels, 2009)

La modulación de frecuencia es comúnmente triangular para los sistemas FMCW, de modo que la frecuencia varía gradualmente. La figura 2.11. muestra un ejemplo de la modulación en un radar FMCW. La señal transmitida se muestra mediante la forma de onda triangular sólida y la curva discontinua representa la frecuencia de la señal de eco recibida de un objetivo estacionario. La delta frecuencia, Δf , o el ancho de banda de la señal FMCW, determina la precisión de la medición del rango. La modulación de frecuencia a una velocidad, f_m , determina el rango máximo que se puede detectar inequívocamente.

La señal transmitida llega de nuevo al radar después de un tiempo de retardo:

$$T = \frac{2R}{c}$$

donde R es el alcance del objetivo. La señal recibida y la señal transmitida se multiplican en un mezclador para producir la diferencia de frecuencia. Se asume que el único cambio de frecuencia es que, debido al rango objetivo, fr.

A partir de la geometría de la Fig. 2.11, el cambio de frecuencia debido al rango se puede mostrar que fr

$$\frac{4Rf_m\Delta F}{c}$$

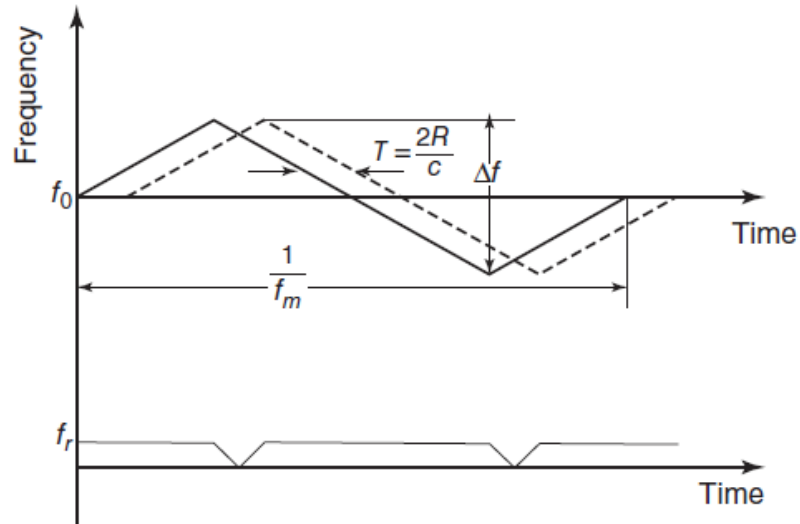


Figura 2.11 Relación frecuencia-tiempo en un radar FMCW con modulación de frecuencia triangular lineal

Fuente: (Boric-Lubecke et al., 2015)

Si hay un desplazamiento de frecuencia Doppler f_d del movimiento de destino, la diferencia de frecuencia total es $f_r + f_d$ durante la mitad del período de modulación y $f_r - f_d$ durante la otra mitad del período de modulación.

El rango objetivo se puede obtener promediando estas dos diferencias de frecuencia durante el período $1/f_m$. La resolución de alcance de un radar FMCW es dada intrínsecamente por:

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f}$$

donde Δf es el ancho de banda del barrido.

Un ejemplo de un sistema de radar para que utilice FMCW para la detección de rango es un altímetro para detectar la altitud de un avión sobre la Tierra. (Skolnik et al., 1980)

2.13. Radar FMCW

El radar de onda continua de frecuencia modulada (radar FMCW) es un sensor de radar especial que emite señales de transmisión continua como un radar de onda continua simple (radar CW). A diferencia de este radar FMCW, el radar FMCW puede cambiar su frecuencia operativa durante la medición: es decir, la señal transmitida se modula en frecuencia. Estos cambios en la frecuencia hacen que otras posibilidades de medición sean técnicamente posibles mediante mediciones de tiempo de vuelo.

La desventaja del radar de onda continua simple (radar CW) es que no puede medir la distancia debido a la falta de una referencia de tiempo. Sin embargo, la referencia de tiempo para medir la distancia de objetos estacionarios se puede generar mediante la modulación de frecuencia de la señal transmitida. Con este método se emite una señal que cambia periódicamente de frecuencia. Si se recibe una señal de eco, este cambio de frecuencia tiene un retraso de tiempo Δt como un radar de pulso. (radartutorial.eu, 2021)

Las características básicas de un radar FMCW son:

- Capaz de medir una distancia de objetivo muy pequeña (el rango de medición mínimo está dentro del rango de longitud de onda);
- Puede medir la distancia y la velocidad radial al mismo tiempo;
- Muy alta precisión en la medición de distancias;
- Realizar procesamiento de señales en el rango de baja frecuencia después de la mezcla, lo que simplifica enormemente el circuito;
- Dado que no hay una alta potencia de pulso, tiene una alta confiabilidad operativa.

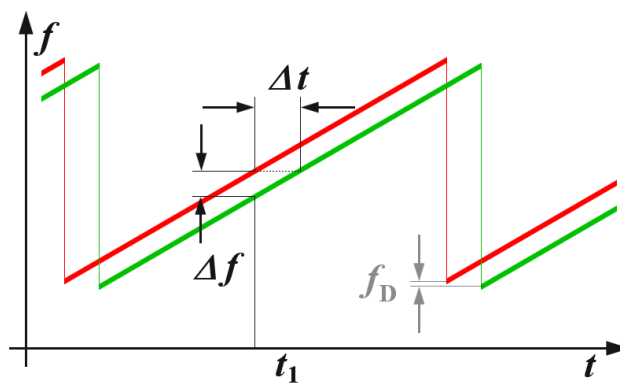


Figura 2.12 Determinación de la distancia con un radar FMCW
Fuente: (radartutorial.eu, 2021)

Las características de un radar FMCW son:

- La medición de la distancia se realiza comparando la frecuencia de la señal recibida con una referencia (normalmente directamente la señal transmitida).

- La duración del período de modulación T es considerablemente mayor que el tiempo (tiempo de funcionamiento) necesario para el rango de medición de distancia instalado Δt .

$$R = \frac{C_0 |\Delta f|}{2} = \frac{C_0 |\Delta f|}{2 \left(\frac{df}{dt} \right)}$$

- C_0 = velocidad de la luz = $3 \cdot 10^8$ m/s
- Δt = tiempo de propagación [s]
- Δf = diferencia de frecuencia medida [Hz]
- R = distancia antena - objeto [m]
- df/dt = desviación de frecuencia por unidad de tiempo

Si el cambio de frecuencia es lineal en un amplio rango, la distancia dentro de este rango puede ser determinada por una simple comparación de frecuencias Δf . Dado que sólo se puede medir la cantidad de la diferencia de frecuencia, los resultados de un aumento lineal del cambio de frecuencia en un escenario estático son iguales a un cambio de frecuencia decreciente.

Si el objeto reflectante tiene una velocidad radial en relación con la antena de transmisión/recepción, se impone una frecuencia Doppler f_D (causada por la velocidad) a la señal de eco además de la diferencia de frecuencia Δf a la frecuencia de transmisión actual (causada por el tiempo de tránsito). Según la dirección del movimiento y la dirección de la modulación lineal, el radar mide entonces sólo la suma o la diferencia entre la diferencia de frecuencia como portadora de la información de alcance y la frecuencia Doppler como portadora de la información de velocidad. Cuando el objeto reflectante se aleja del radar, la frecuencia de la señal de eco se reduce por la frecuencia Doppler.

Si la medición se hace ahora con un diente de sierra como se muestra en la Fig. 2.12, la señal recibida se desplaza hacia la derecha no sólo por el tiempo de tránsito, sino también hacia abajo por la frecuencia Doppler. La frecuencia de diferencia medida Δf es mayor por la frecuencia Doppler f_D de lo que debería ser según el tiempo de tránsito. Si la medición se realiza con un borde descendente de un diente de sierra, entonces la frecuencia Doppler f_D se resta del cambio de frecuencia por el tiempo de propagación.

2.13.1. Rango y resolución

Mediante una selección adecuada de la desviación de frecuencia por unidad de tiempo, el poder de resolución y el máximo rango de medición posible pueden determinarse por la duración del aumento de la frecuencia. La duración del aumento de la frecuencia lineal determina la máxima distancia de medición sin ambigüedades

posible. La inclinación de la subida lineal determina el poder de resolución y la precisión de la medición de la distancia. La máxima desviación de frecuencia y la pendiente pueden variar según las posibilidades del circuito técnicamente implementado.

El alcance máximo posible está determinado por el necesario solapamiento temporal de la señal recibida con la señal transmitida. Esto suele ser mucho mayor que el rango energético, es decir, la limitación por la atenuación del espacio libre.

El ancho de banda BW de la señal transmitida es decisivo para la resolución del alcance de un radar FMCW (como en el caso del llamado Chirp radar). Esta es simplemente la diferencia entre la frecuencia de corte superior e inferior de la señal transmitida. Las posibilidades de la Transformación Rápida de Fourier están limitadas por los límites de tiempo (aquí por la duración del diente de sierra T). El poder de resolución del radar FMCW está determinado por el cambio de frecuencia que se produce dentro de este límite de tiempo.

$$\Delta f_{FFT} = \frac{1}{T} = \frac{d(f)}{d(t) * (f_{up} - f_{down})}$$

- Δf_{FFT} = transformada de Fourier rápida
- $d(f)/d(t)$ = frecuencia sobre tiempo
- f_{up} = frecuencia alta
- f_{down} = frecuencia baja

El valor recíproco de la duración del impulso de dientes de sierra da como resultado la frecuencia más baja posible que se puede detectar. Esta frecuencia puede ser insertada en la fórmula (1) como $|\Delta f|$ y lleva a una resolución de alcance del radar FMCW. El problema es que la duración del diente de sierra también debe ser suficiente como tiempo para una transformación de Fourier. Cuanto más tiempo se pueda aplicar la Transformación Rápida de Fourier, más exacto será el resultado. Esto depende principalmente del ancho de banda: Cuánto tiempo puede aplicarse este cambio de frecuencia por unidad de tiempo $d(f)/d(t)$ sin salir de los límites de la banda de frecuencias utilizada. Otras restricciones de tiempo pueden ser causadas por superposiciones desfavorables (demasiado cortas) de los flancos de los dientes de sierra utilizados para la medición.

Por ejemplo, un radar con un aumento lineal de frecuencia de más de 1 ms de duración tiene teóricamente un alcance de medición máximo posible y sin ambigüedades de menos de 150 km. Esto resulta de la necesaria superposición restante de la señal transmitida con la señal de eco para medir una diferencia de frecuencia. En la mayoría de los casos, este rango de medición nunca puede ser alcanzado, ni siquiera energéticamente. Esto deja tiempo suficiente para una medición de la diferencia de frecuencia.

Si la máxima desviación de frecuencia para la modulación del transmisor es de 250 MHz, esto da como resultado una diferencia de tiempo de tránsito de 4 ns para una diferencia de frecuencia de 1 kHz con este aumento de frecuencia. Esto corresponde entonces a una resolución de distancia de 0,6 m.

Este ejemplo demuestra de manera impresionante la ventaja del radar de FMCW: Un radar de pulsos tiene que medir esta diferencia de tiempo de tránsito de 4 ns, lo que significa un esfuerzo técnico considerable. Una diferencia de frecuencia de 1 kHz es mucho más fácil de medir en el rango de audio.

Como con cualquier radar en general, la resolución angular del radar de FMCW depende de la directividad (mitad de ancho a mitad de máximo) de la antena utilizada.

2.13.2. Patrón de modulación

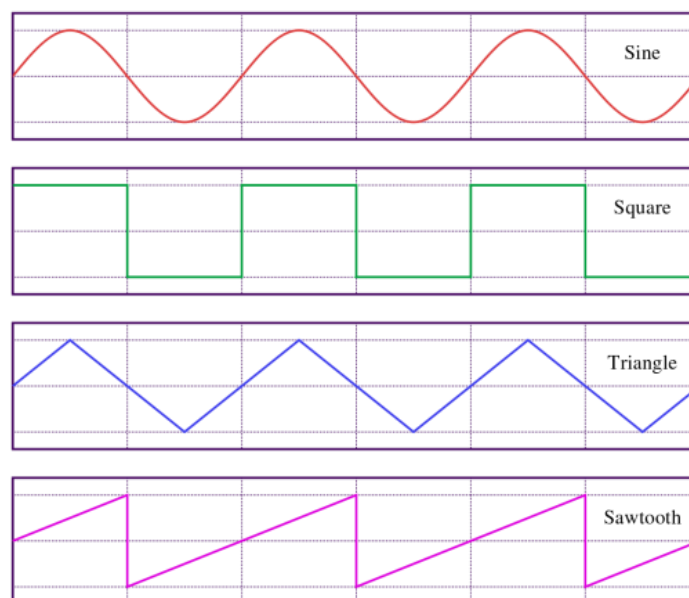


Figura 2.13 Patrones de modulación comunes para un radar FMCW
Fuente: (radartutorial.eu, 2020)

Son posibles varios patrones de modulación, que pueden utilizarse para diferentes propósitos de medición:

2.13.3. Modulación en forma de sierra

Esta modulación se utiliza para un rango de medición relativamente grande (distancia máxima) con una influencia insignificante de una frecuencia Doppler (por ejemplo, en un radar de navegación marítima).

2.13.4. Modulación triangular

Esta modulación permite una simple separación de la diferencia de frecuencia Δf de la frecuencia Doppler f_D .

2.13.5. Modulación rectangular (incrustación por desplazamiento de frecuencia única, FSK)

Esta modulación se utiliza para una medición de distancia muy precisa en el rango cercano por comparación de fase de ambas frecuencias de señal de eco. Tiene la desventaja de que las señales de eco de varios objetivos no pueden separarse entre sí y que este método sólo permite una pequeña distancia de medición sin ambigüedades.

2.13.6. Modulación de escalera

Las mediciones interferométricas amplían el rango de medición sin ambigüedades.

2.13.7. Modulación sinusoidal

En el pasado, también se utilizaban formas de modulación sinusoidal. Esto podría realizarse simplemente por un motor que hace girar una placa de condensador en la cámara de resonancia del oscilador del transmisor. Sólo la parte relativamente lineal cerca del cruce de cero fue entonces utilizada por la función seno.

2.13.8. El cambio de frecuencia lineal de los dientes de sierra

En el caso de un cambio de frecuencia lineal en forma de diente de sierra, la señal de eco se desplaza en el tiempo (es decir, a la derecha en la imagen) por el tiempo de funcionamiento. Esto da como resultado una diferencia de frecuencia entre la frecuencia de transmisión actual y la señal de eco retardado, que es una medida de la distancia del objeto reflectante. Una frecuencia Doppler que se produce ahora desplazaría toda la señal de eco en frecuencia hacia arriba (movimiento hacia el radar) o hacia abajo (movimiento de alejamiento del radar).

El receptor no tiene posibilidad de separar ambas frecuencias con esta forma de modulación. Por lo tanto, la frecuencia Doppler sólo se producirá como un error de medición en el cálculo de la distancia. Al seleccionar una desviación de frecuencia

óptima, puede tenerse en cuenta desde el principio que las frecuencias Doppler que cabe esperar sean lo más pequeñas posibles, o al menos que el error de medición siga siendo lo más pequeño posible.

Este será el caso de los radares de navegación marítima, por ejemplo: Los vehículos acuáticos se mueven en las zonas costeras a una velocidad limitada, en relación con cada uno de ellos quizás un máximo de 10 metros por segundo. En la banda de frecuencias de estos radares (normalmente la banda X) la máxima frecuencia Doppler que se puede esperar es, por lo tanto, de 666 Hz. Si el procesamiento de la señal de radar utiliza una resolución en el rango de los kilohercios por metro, esta frecuencia Doppler es insignificante. Un radar de navegación marítima FMCW en un aeródromo tendría dificultades para ver estas aeronaves, dadas las velocidades de despegue y aterrizaje de hasta 200 m/s que se producen allí, ya que durante una aproximación el error de medición debido a la frecuencia Doppler puede ser mayor que la distancia a medir. El signo del objetivo debería aparecer entonces teóricamente en la pantalla a una distancia negativa, es decir, antes del comienzo de la desviación.

2.13.9. Cambio de frecuencia triangular

En el caso de un cambio de frecuencia triangular, la medición de la distancia puede realizarse tanto en el borde ascendente como en el descendente. Una señal de eco se desplaza a la derecha en la imagen en comparación con la señal actual transmitida debido al retraso. Sin una frecuencia Doppler, la cantidad de la diferencia de frecuencia Δf en el flanco ascendente es igual a la medición en el flanco descendente.

Una frecuencia Doppler desplaza la señal de eco en la imagen en altura. La suma de la diferencia de frecuencia Δf y la frecuencia Doppler f_D aparece en el flanco ascendente, mientras que la diferencia entre las dos frecuencias aparece en el flanco descendente. Esto abre la posibilidad de determinar la distancia exacta a pesar del desplazamiento de frecuencia causado por la frecuencia Doppler, que entonces consiste en la media aritmética de ambas mediciones. Al mismo tiempo, la frecuencia Doppler exacta también puede determinarse a partir de ambas mediciones. La diferencia de ambas frecuencias de diferencia resulta en el doble de la frecuencia Doppler. Sin embargo, como ambas frecuencias diferentes no están disponibles simultáneamente, esta comparación requiere el procesamiento de la señal digital.

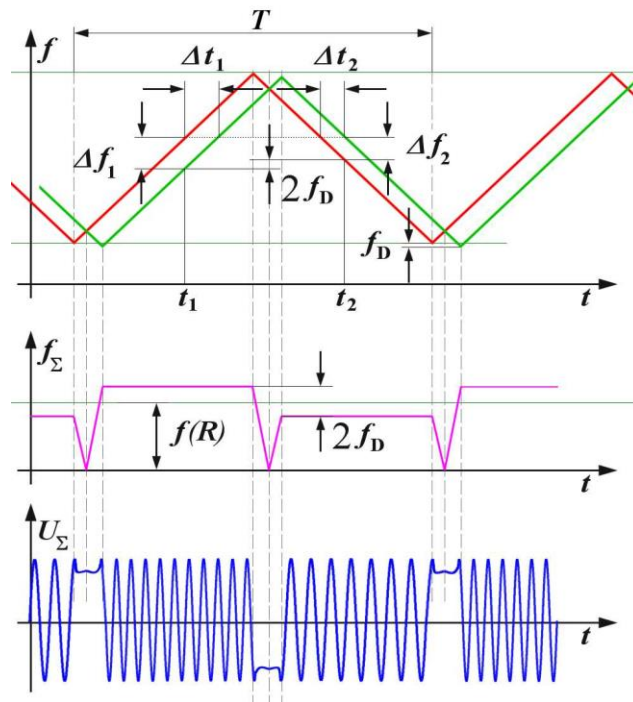


Figura 2.14 Relaciones con la modulación triangular
Fuente: (radartutorial.eu, 2020)

La frecuencia ajustada por la frecuencia Doppler para la determinación de la distancia, así como la frecuencia Doppler de un objetivo en movimiento se calcula a partir de:

$$f(R) = \frac{\Delta(f_1) + \Delta(f_2)}{2}$$

$$f(D) = \frac{\Delta(f_1) - \Delta(f_2)}{2}$$

- $f(R)$ = frecuencia como medida para la medición de la distancia
- f_D = frecuencia Doppler como medida para la medición de la velocidad
- Δf_1 = diferencia de frecuencia en el borde ascendente
- Δf_2 = diferencia de frecuencia en el borde descendente

La frecuencia $f(R)$ puede entonces ser insertada como $|\Delta f|$ en la fórmula para calcular la distancia exacta.

Sin embargo, este método tiene la desventaja de que, en el caso de varios objetos reflectantes, las frecuencias Doppler medidas no pueden asignarse inequívocamente a un solo objetivo. La asignación de la frecuencia Doppler incorrecta a un objetivo a una distancia incorrecta puede conducir a objetivos fantasmas. La figura 2.15 muestra una solución gráfica. La posición de un primer objetivo resulta de las

funciones $[-\Delta f_1]1 + f_D$ y $[\Delta f_2]1 - f_D$.

El punto de intersección de las dos líneas es la posición del objetivo 1. Si se añade un segundo objetivo, ambos pares de líneas dan como resultado un total de cuatro intersecciones, dos de las cuales son los objetivos fantasmas. La posición de estos objetivos fantasmas también depende de la pendiente de la forma de modulación.

Por lo tanto, el problema puede resolverse mediante ciclos de medición con diferente inclinación de los bordes: sólo se visualizan entonces aquellos objetivos cuyas coordenadas apuntan a la misma posición en ambos ciclos de medición.

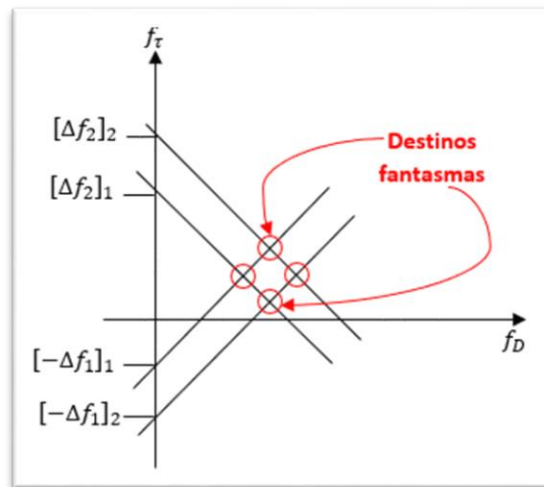


Figura 2.15 Objetivos fantasmas, solución gráfica
Fuente: (radartutorial.eu, 2020)

2.13.10. El cambio de frecuencia en forma de rectángulo

Este método también se llama Frequency Shift Keying (FSK) FMCW radar. El transceptor simplemente se conmuta cíclicamente entre dos frecuencias de transmisión usando un voltaje de onda rectangular. Hay dos formas básicas de procesar la señal de salida del transceptor. La primera posibilidad es medir el tiempo de tránsito del cambio de frecuencia. A la salida del transceptor aparece una señal cuya envoltura es un pulso, con una duración de pulso como medida de la distancia.

Sin embargo, esta medición es una medición de tiempo pura como la del radar de pulsos y, por lo tanto, es inexacta o tecnológicamente muy costosa.

Una segunda posibilidad es comparar la posición de fase de las señales de eco de ambas frecuencias. Dentro del techo de pulso el radar opera con la primera frecuencia de transmisión, dentro de la pausa de pulso con la segunda frecuencia de

transmisión. Durante estos tiempos en el rango de los milisegundos, el radar opera como con el radar de CW. A la salida del convertidor descendente (véase el diagrama de bloques) aparece una tensión continua como medida de la diferencia de fase entre la señal recibida y su señal transmitida. La diferencia de fase entre ambas señales de eco de las diferentes frecuencias de transmisión (técnicamente: la diferencia de voltaje a la salida del mezclador) es una medida de la distancia. Una vez más, ambas señales de eco no están presentes simultáneamente, los valores de voltaje deben ser almacenados digitalmente.

Sin embargo, debido a la periodicidad del voltaje sinusoidal, este método sólo tiene una distancia de medición muy limitada e inequívoca, que resulta de la mitad de la longitud de onda de la diferencia de frecuencia entre las dos frecuencias de transmisión. Una diferencia de frecuencia de 20 MHz da como resultado una distancia de medición inequívoca de sólo 15 m. En el caso de varios objetivos a corta distancia, esta posición de fase se superpone para formar un solo voltaje de salida en el que el objetivo más fuerte domina en el mejor de los casos.

Si se utilizan simultáneamente ambos métodos de evaluación (temporal y por fases), se puede determinar una distancia aproximada mediante la evaluación temporal. La longitud de onda completa puede entonces añadirse al resultado exacto de la evaluación de la fase hasta que el resultado esté lo suficientemente cerca de la distancia de la evaluación del tiempo. De este modo se evita la distancia de medición poco clara de la medición de la fase.

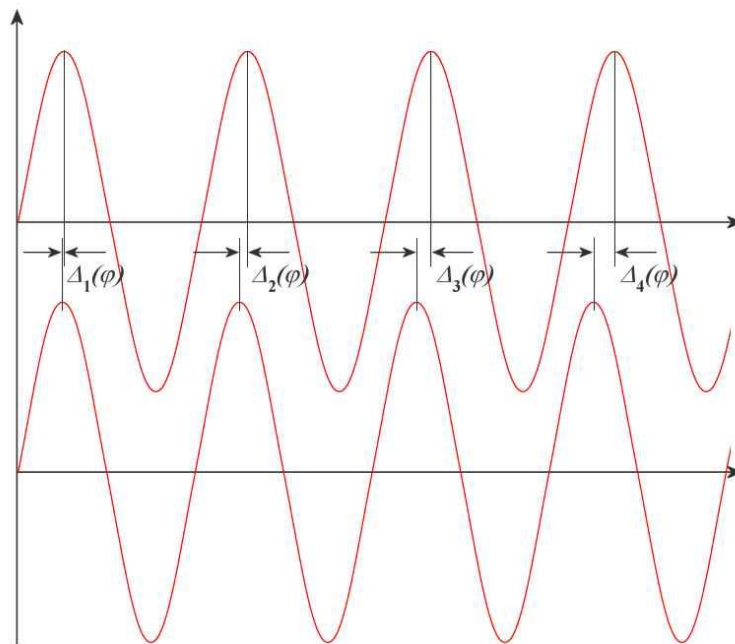


Figura 2.16 La diferencia de fase $\Delta n(\varphi)$ es una medida de cuántas veces la longitud de onda es el doble de la distancia (camino de ida y vuelta)

Fuente: (radartutorial.eu, 2020)

2.13.11. El cambio de frecuencia de la escalera

En general, aquí se aplican las mismas ventajas y desventajas que en el procedimiento con una modulación rectangular. Sin embargo, el radar de FMCW ahora trabaja con varias frecuencias sucesivas. Se mide la posición de una fase en cada una de estas frecuencias individuales. Sin embargo, la distancia de medición sin ambigüedades se amplía considerablemente, ya que las relaciones de fase entre varias frecuencias deben repetirse ahora para crear ambigüedades.

Este método se vuelve muy interesante si se pueden observar resonancias para frecuencias parciales individuales en superficies irregulares del objeto reflectante. Este método de medición es entonces un campo de interferometría.

2.13.12. Diagrama de bloques

Un radar de corto alcance de FMCW consiste esencialmente en el transceptor y una unidad de control con un microprocesador. El transceptor es un conjunto compacto y normalmente también contiene la antena transmisora y receptora, que está diseñada como una antena de parche. La generación de alta frecuencia se realiza con un oscilador controlado por voltaje, que alimenta directamente la antena transmisora o cuya potencia se amplifica adicionalmente. Una parte de la frecuencia de radio se desacopló y se alimentó a un mezclador, que mezcla la señal de eco recibida y amplificada en la banda base.

El tablero de control contiene un microprocesador que controla el transceptor, convierte las señales de eco en un formato digital y (generalmente a través de un cable USB) asegura la conexión a una computadora. Un convertidor de digital a analógico proporciona el voltaje de control para el control de la frecuencia. El voltaje de salida del mezclador está digitalizado.

Debido al procedimiento (transmisión y recepción simultáneas), un circulador de ferrita debe separar el camino de transmisión y el de recepción cuando se utiliza una sola antena. Sin embargo, con las antenas de parche que se usan comúnmente hoy en día, el uso de antenas de transmisión y recepción separadas es mucho más barato. En un sustrato común, la antena transmisora y la receptora están montadas como conjuntos de antenas directamente una encima de la otra. La dirección de la polarización está girada 180° una contra la otra. A menudo una placa de blindaje adicional reduce la „diafonía” directa (es decir, el acoplamiento directo de ambas antenas). Dado que la medición se realiza como una diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la recibida, la señal resultante de este acoplamiento directo puede ser suprimida debido a la misma frecuencia.

En una aplicación de radar FMCW pura, sólo es necesario procesar la frecuencia Doppler. En el caso de un sensor de radar de FMCW que opera en la banda K (alrededor de 24 GHz), éste sólo contiene frecuencias de hasta un máximo de 16,5 KHz si se van a detectar velocidades de hasta 360 km/h. Por lo tanto, un simple procesador de audio estéreo puede utilizarse como microprocesador aquí, que se

utiliza en grandes cantidades, por ejemplo, en tarjetas de sonido para computadoras domésticas. Incluso en el proceso de FSK (forma de modulación rectangular), dicho procesador puede utilizarse todavía de forma limitada.

Por el contrario, una aplicación de radar de FMCW requiere que casi toda la desviación de frecuencia del transmisor pueda ser procesada en el receptor para la medición de la distancia. Por lo tanto, se pueden esperar frecuencias de hasta 250 MHz en la señal recibida. Esto tiene una influencia significativa en el ancho de banda de los amplificadores de bajada y en la frecuencia de muestreo necesaria del convertidor analógico-digital. Esto hace que el tablero de procesamiento de señales de un radar FMCW sea considerablemente más caro que el de un radar CW.

En la actualidad hay en el mercado muchos módulos de radar FMCW de bajo costo o sensores de radar FMCW que contienen un transceptor completo con un conjunto de antenas de parche integradas como el llamado Front-End de una unidad de radar. Estos módulos suelen contener el módulo MMIC TRX_024_xx de la compañía Silicon Radar con una potencia de salida de hasta 6 dBm. Este chip funciona en la banda K (24,0 ... 24,25 GHz) y puede utilizarse como sensor para mediciones de velocidad y rango.

La modulación o un cambio de frecuencia depende de un voltaje de control y se lleva a cabo con un circuito externo, ya sea un voltaje fijo (en cuyo caso el dispositivo funciona como un radar FMCW) o está controlado por un procesador y se basa en el voltaje de salida de un convertidor digital-analógico. La señal de salida del mezclador directo se suele proporcionar como una señal de I&Q y tiene que ser amplificada considerablemente antes de la conversión analógica a digital.

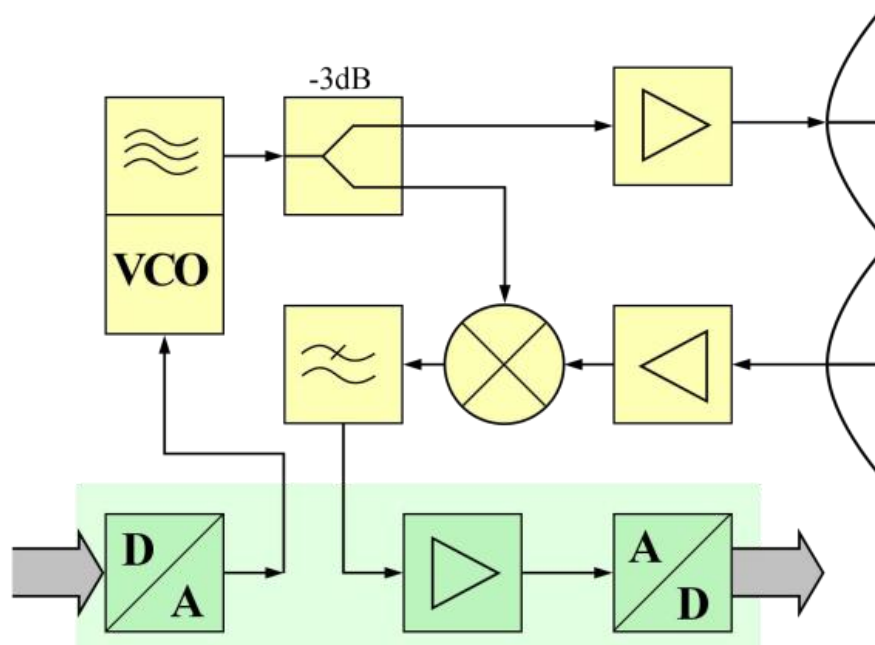


Figura 2.17 Diagrama de bloques de un radar FMCW
Fuente: (radartutorial.eu, 2020)

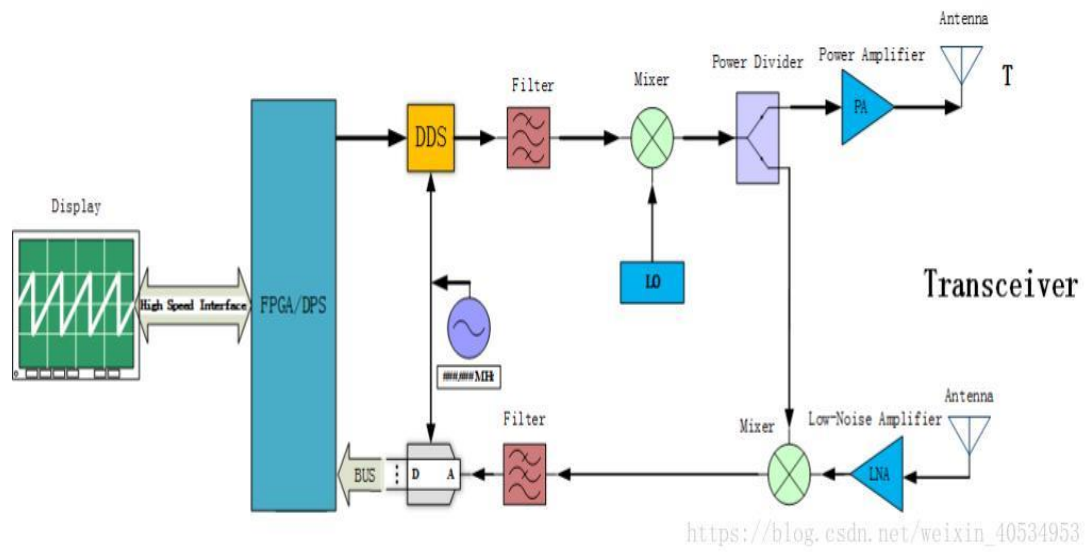


Figura 2.18 Diagrama de bloques FMCW
Fuente: (radartutorial.eu, 2020)



Figura 2.19 ART Midrange, un radar FMCW con antenas separadas para transmisión y recepción
Fuente: (radartutorial.eu, 2020)

2.13.13. Radar de imágenes FMCW

Este método de radar se utiliza en la llamada Broadband-Radar™ como radar de navegación para aplicaciones marítimas. Aquí, sin embargo, el barrido de frecuencia se detiene después de alcanzar la máxima distancia de medición posible. Por lo tanto, la señal transmitida se parece más a un radar de pulso con modulación intrapulso. Esta pausa no tiene influencia directa en la máxima distancia de medición posible.

Sin embargo, es necesario leer los numerosos datos medidos de una memoria intermedia y transmitirlos a la unidad de visualización a través de una línea de banda estrecha sin pérdida. Debido a su modo de funcionamiento - la comparación de frecuencia de la señal de eco recibida con la señal transmitida, que está disponible en todo el rango de desviación - sigue siendo un radar de FMCW; sólo se apaga durante unos pocos milisegundos intermedios, ya que simplemente no se requieren más datos.

Un sistema de radar de imágenes debe realizar una búsqueda de alcance para cada punto de la pantalla. Por lo tanto, la resolución de la distancia aquí depende más del tamaño de un píxel en esa pantalla y de la capacidad del procesamiento de la señal para proporcionar los datos a la velocidad requerida. Se requiere una pantalla de alta resolución con la resolución de píxeles necesaria, en la que deben estar disponibles al menos dos píxeles por cada diferencia de distancia, de modo que, aunque la señal de medición se encuentre exactamente entre la posición de dos píxeles, ambos píxeles se iluminen y si el objetivo se mueve, el número de píxeles utilizados y, por lo tanto, el brillo relativo del objetivo sigue siendo el mismo.

Se pueden obtener buenos valores con el Broadband-Radar mencionado como ejemplo con una desviación de frecuencia de 65 MHz por un milisegundo. Para una medición inequívoca del tiempo de vuelo, sólo puede medirse un máximo de 500 μ s, lo que corresponde a una posible distancia de medición de un máximo de 75 km.

La desviación de frecuencia de 65 MHz por milisegundo corresponde a un cambio de frecuencia de 65 Hertz por nanosegundo. Si los siguientes filtros son técnicamente capaces de resolver diferencias de frecuencia de 1 kHz, entonces es posible medir diferencias de tiempo de 15 nanosegundos, lo que corresponde a una resolución de distancia de unos 2 metros.

Si la máxima frecuencia de diferencia que puede ser procesada por el circuito de evaluación es de dos megahercios, lo que incluso los microordenadores más simples de un solo chip pueden hacer, entonces se pueden medir distancias de hasta 4000 metros. (Sin un microcontrolador, 4000 filtros individuales diferentes tendrían que funcionar en paralelo).

Debido al método de medición, la precisión de la medición es aproximadamente igual a la resolución de la distancia y está limitada aún más por la resolución de la escala de la pantalla.

Por lo tanto, este radar FMCW puede lograr una alta resolución espacial con poco esfuerzo técnico. Para que un radar de pulsos alcance la misma resolución, debe ser capaz de medir tiempos en el rango de los nanosegundos. Esto significaría que el ancho de banda del transmisor de este radar de pulsos debe ser de al menos 80 MHz y se debe utilizar una frecuencia de muestreo de 166 MHz para digitalizar la señal de eco (radartutorial.eu, 2020).



Figura 2.20 Conjunto de antenas de parche de un radar de navegación FMCW en banda X
Fuente: (radartutorial.eu, 2020)

2.13.14. Radar FMCW sin imagen

El resultado de la medición de este radar FMCW se muestra como un valor numérico en un instrumento indicador o se digitaliza como una visualización alfanumérica en una pantalla. Esto significa que sólo se puede medir un único objeto dominante, pero con una precisión muy alta hasta el rango de los centímetros. Este tipo de determinación de la distancia se utiliza, por ejemplo, en los aviones como radio altímetro.

Incluso un instrumento puntero analógico puede utilizarse como pantalla para la altitud de un radar de FMCW. Este instrumento de bobina móvil tiene una impedancia inductiva más alta para frecuencias más altas y por lo tanto muestra una desviación que depende de la frecuencia, pero no es lineal.



Figura 2.21 Pantalla analógica de un altímetro de radar
Fuente: (radartutorial.eu, 2020)

2.14. Antena de bocina

Una antena es un sistema conductor metálico capaz de radiar y capturar ondas electromagnéticas. Las antenas son para conectar las líneas de transmisión con el espacio libre, el espacio libre a líneas de transmisión, o ambas cosas. En esencia, una línea de transmisión acopla la energía de un transmisor o de un receptor con una antena, que a su vez acopla la energía con la atmósfera terrestre, y de la atmósfera terrestre a una línea de transmisión. En el extremo transmisor de un sistema de radiocomunicaciones con el espacio libre, una antena convierte la energía eléctrica que viaja por una línea de transmisión en ondas electromagnéticas que se emiten al espacio. En el extremo receptor, una antena convierte las ondas electromagnéticas en el espacio en energía eléctrica en una línea de transmisión (Tomasi, 2003).

La utilización como radiadores de las bocas de guía monomodo, rectangulares y circulares, permite alcanzar directividades moderadas, pero presentan una desadaptación en la boca de la guía. Para mejorar su directividad y adaptación tenemos que aumentar sus dimensiones eléctricas, asegurando que la estructura siga siendo monomodo; para ello el agrandamiento tiene que hacerse gradualmente, en forma de bocina (Aznar, 2002).



Figura 2.22 Antena de bocina
Fuente: (Electronics-notes.com, 2020)

La antena de bocina se puede considerar como un transformador de RF o una coincidencia de impedancia entre el alimentador de guía de onda y el espacio libre que tiene una impedancia de 377 ohmios. Al tener un extremo cónico o acampanado de la guía de ondas, se forma la antena de bocina y esto permite que la impedancia coincida. Aunque la guía de ondas irradia sin una antena de bocina, esto proporciona una coincidencia mucho más eficiente.

Además de la coincidencia mejorada proporcionada por la antena de bocina, también ayuda a evitar que las señales que viajan a través de modos no deseados en la guía de ondas se irradien.

Sin embargo, la principal ventaja de la antena de bocina es que proporciona un nivel significativo de directividad y ganancia. Para mayores niveles de ganancia, la antena de bocina debe tener una gran apertura. Además, para lograr la ganancia máxima para un tamaño de abertura dado, el cono debe ser largo para que la fase del frente de onda sea lo más constante posible a través de la abertura. Sin embargo, llega un punto en el que proporcionar incluso pequeños aumentos en la ganancia, el aumento en la longitud se vuelve demasiado grande para hacerlo sensible. Por lo tanto, los niveles de ganancia son un equilibrio entre el tamaño de apertura y la longitud. Sin embargo, los niveles de ganancia para una antena de bocina pueden ser de hasta 20 dB en algunos casos.

Cuando la bocina debe usarse con coaxial, se requiere una pequeña sección de guía de onda en la que se encuentra una transición de guía de onda a coaxial.

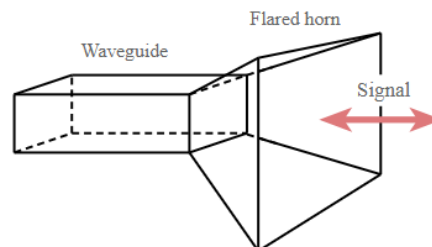


Figura 2.23 Funcionamiento de antena de bocina
Fuente: (Electronics-notes.com, 2020)

2.15. Bocinas sectoriales

Las bocinas, geometrías de sección creciente producidas por abocinamiento de una guía de ondas, son estructuras radiantes muy utilizadas, y las derivadas de la guía rectangular son principalmente de tres tipos. La bocina de plano E se obtiene abriendo las placas anchas, las perpendiculares al campo eléctrico en la guía, manteniendo la anchura de la guía a . La bocina de plano H abre las placas estrechas,

que son las perpendiculares al campo magnético, manteniendo la altura b de la guía. La piramidal abre simultáneamente los dos pares de placas. (Aznar, 2002)

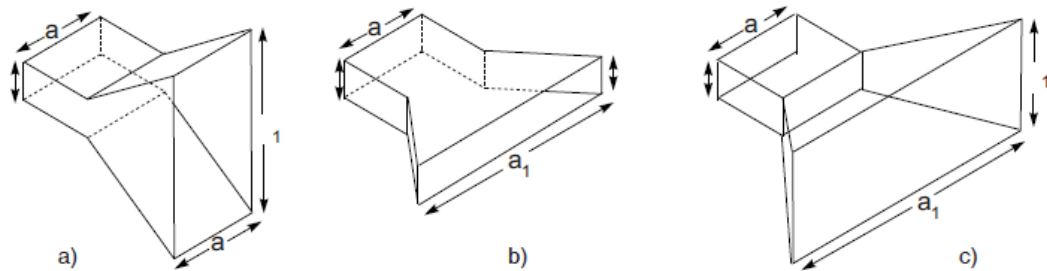


Figura 2.24 Bocinas de sección rectangular, a) sectorial de plano E, b) sectorial de plano H, c) piramidal

Fuente: (Aznar, 2002)

2.16. Antena de bocina piramidal.

Es la configuración habitual y en ella se abren ambos planos; el campo iluminante vale.

$$E_y = E_0 \cos \frac{\pi}{a_1} x e^{j\beta(\delta(x)+\delta(y))}$$

Con los parámetros de las bocinas sectoriales se tiene:

$$\delta(x) + \delta(y) = \frac{a_1^2}{8\ell_H} + \frac{b_1^2}{8\ell_E} - \frac{x^2}{2\ell_H} - \frac{y^2}{2\ell_E}$$

y su directividad resulta ser aproximadamente el producto de la de una bocina de plano E y la de una de plano H; está dada por la expresión.

$$D_{piramidal} = \left[D_E \frac{\lambda}{a_1} \left[D_H \frac{\lambda}{b_1} \frac{\pi}{32} \right] \right]$$

De esta relación y de las eficiencias de iluminación de las bocinas sectoriales correspondientes resulta, para la bocina piramidal óptima.

$$s = \frac{b_1^2}{8\lambda\ell_E} = \frac{1}{4}, \quad t = \frac{a_1^2}{8\lambda\ell_H} = \frac{3}{8}$$

$$\Delta\theta_{-3dB}^E \approx 56 \frac{\lambda}{b_1} (^{\circ}), \quad \Delta\theta_{-3dB}^H \approx 78 \frac{\lambda}{a_1} (^{\circ})$$

$$NPLS^E \approx 10dB, \quad NPLS^H \approx 12dB$$

$$D = 6,4 \frac{a_1 b_1}{\lambda^2}, \quad n_{il} = 0,51$$

Las bocinas comerciales responden con gran aproximación a estos valores, y es posible obtener fácilmente directividades de hasta 20 dB. En la figura 2.25 se representa la geometría de la bocina que se analiza a continuación:

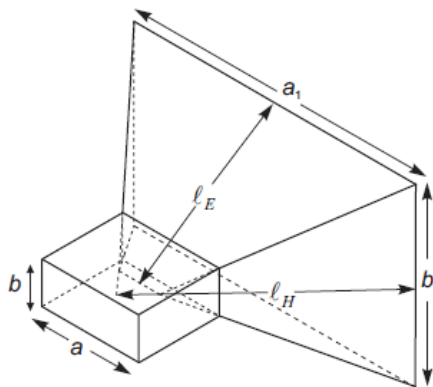


Figura 2.25 Bocina piramidal alimentada por una guía rectangular
Fuente: (Aznar, 2002)

2.17. Bocina rectangular

Esta bocina se caracteriza porque se abre en los dos ejes. Se puede estudiar a partir de las respectivas bocinas sectoriales

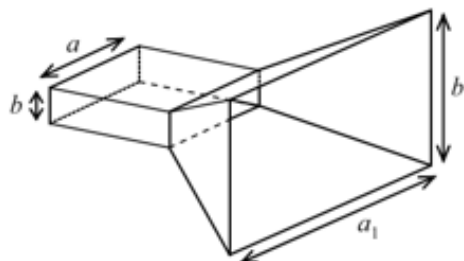


Figura 2.26 Bocina rectangular
Fuente: (Aznar, 2002)

Directividad de la bocina piramidal:

$$D_p = \frac{\pi}{32} \left(\frac{\tau}{a_1} D_E \right) \left(\frac{\tau}{b_1} D_H \right)$$

A, b, a_1, b_1, l_E, l_H : dimensiones de la bocina de acuerdo con la figura 2.26

D_p : directividad de la bocina piramidal

D_E : directividad de la bocina plano-E equivalente

D_H : directividad de la bocina plano-H equivalente

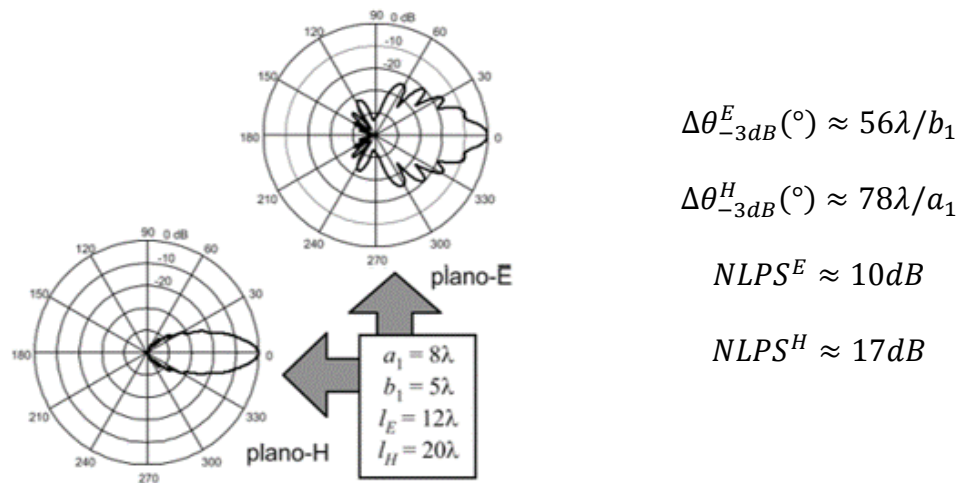


Figura 2.27 Directividad de la bocina rectangular

Fuente: (Aznar, 2002)

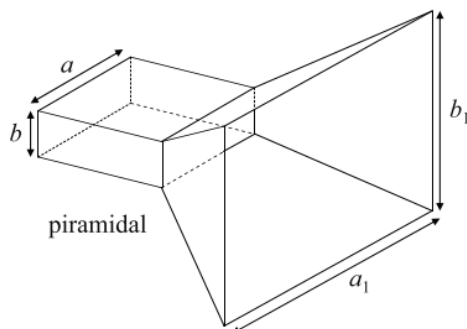


Figura 2.28 Calculo de dimensiones de antena bocina piramidal.

Fuente: (Electronics-notes.com, 2020)

Piramidal:

$$D_p = \frac{\pi}{32} \left(\frac{\lambda}{a_1} D_E \right) \left(\frac{\lambda}{b_1} D_H \right)$$

Donde:

a, b, a_1, b_1, l_E, l_H : dimensiones de la bocina de acuerdo con la figura 2.28;

D_p : directividad de la bocina piramidal;

D_E : directividad de la bocina plano-E equivalente;

D_H : directividad de la bocina plano-H equivalente.

2.18. Aplicaciones de antenas de bocina piramidal

La antena de bocina de microondas es relativamente simple en apariencia y, como resultado, se pueden pasar por alto sus ventajas.

Sin embargo, la antena de bocina es muy útil como resultado de las propiedades que posee:

- Ancho de banda amplio: la antena de bocina no posee elementos resonantes y, por lo tanto, puede funcionar en un ancho de banda amplio.
- Interfaz fácil a la guía de onda: por la naturaleza misma de su forma, estas antenas son muy fáciles de interconectar a la guía de onda, aunque también se pueden diseñar con una transición para que también se pueda utilizar el alimentador coaxial estándar.
- Construcción simple: la antena de bocina consiste simplemente en una bocina acampanada. Como resultado, son relativamente fáciles de construir. Las antenas de bocina se usan en muchas áreas, no solo porque son convenientes, sino porque poseen una serie de características que las hacen ideales en muchas aplicaciones.

Algunas de las principales aplicaciones para antenas de microondas con bocina son:

- **Alimentadores para antenas reflectoras parabólicas:** la antena de bocina proporciona un método excelente para alimentar antenas reflectoras parabólicas. Los reflectores parabólicos necesitan otra antena para "iluminar" el elemento reflector de la antena y la antena de bocina proporciona un método muy conveniente para lograr esto. En esta aplicación, la antena de bocina se conoce como una 'bocina de alimentación' y puede diseñarse para proporcionar suficiente directividad para iluminar el reflector de manera suficientemente uniforme sin demasiado derrame sobre el borde del plato. El uso de la antena de bocina

también minimiza las respuestas espurias de la antena reflectora parabólica a las señales que no están en el lóbulo principal.

- **Sistemas de radar de corto alcance:** un uso particular de las antenas de bocina es el uso en cámaras de control de velocidad. Aquí la antena de bocina proporciona una cantidad útil de directividad para evitar que otras reflexiones interfieran con la respuesta requerida.
- **Obtenga estándares:** La antena de bocina es una forma muy conveniente de antena de microondas que se puede utilizar. Como tiene un ancho de banda muy amplio, su rendimiento varía poco en un amplio rango de frecuencias. La antena de bocina a menudo se puede usar en este tipo de aplicación para EMC y otras medidas similares.

La antena de bocina solo se ve en frecuencias de microondas porque sería demasiado grande para su uso en frecuencias más bajas. Cuando se usa, la antena de bocina proporciona una antena efectiva que es relativamente fácil de implementar y fabricar. (Electronics-notes.com, 2020)

2.19. USRP B200mini-i

El USRP B200mini-i ofrece una radio cognitiva SDR del tamaño de una tarjeta de crédito. Con un amplio rango de frecuencias desde 70 MHz a 6 GHz y un FPGA Xilinx Spartan-6 XC6SLX75 de grado industrial programable por el usuario, esta plataforma flexible y compacta es ideal para aplicaciones de radio aficionados. El extremo frontal de RF (radiofrecuencia) utiliza el transceptor RFIC AD9364 de Analog Devices con 56 MHz de ancho de banda instantáneo. La placa está alimentada por bus mediante una conexión USB 3.0 de alta velocidad para transmitir datos a la computadora host. El USRP B200mini-i también incluye conectores para GPIO, JTAG y sincronización con una referencia de reloj de 10 MHz o señal de entrada de referencia de tiempo PPS. La API de software USRP Hardware Driver (UHD) es compatible con todos los productos USRP y permite a los usuarios desarrollar aplicaciones de manera eficiente y luego realizar una transición perfecta de diseños entre plataformas a medida que se expanden los requisitos. (Ettus, 2020b)



Figura 2.29 USRP B200mini-i
Fuente: (Ettus, 2020b)

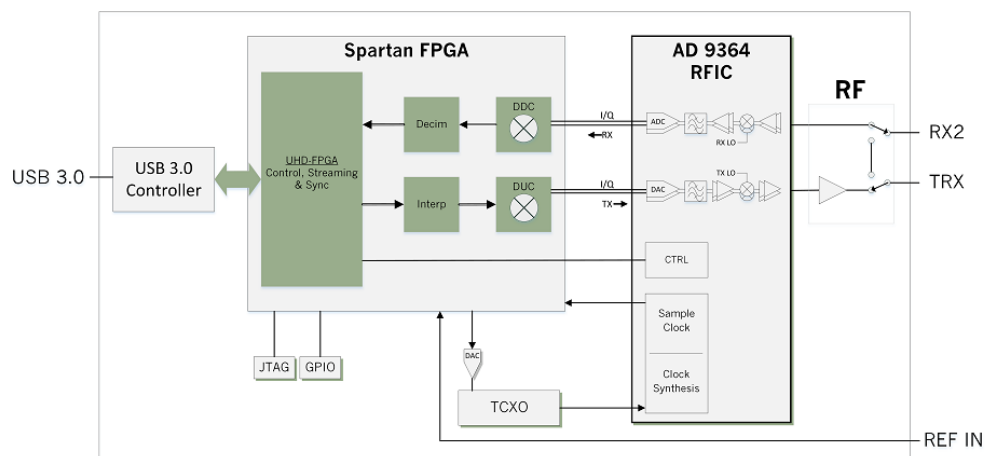


Figura 2.30 Diagrama de bloques USRP B200mini-i
Fuente: (Ettus, 2020b)

2.20. GNU Radio

Es un software de desarrollo libre y abierta que provee bloques de procesamiento de señal para implementar sistemas de radio definida por software.

Puede utilizarse con hardware de RF de bajo costo para crear radios definidas por software, o sin hardware en un ambiente de simulación.

Es utilizada extensivamente por ambientes académicos, aficionados y comerciales para dar soporte a la investigación en comunicaciones inalámbricas y en sistemas de radio en el mundo real (GnuRadio, 2020).

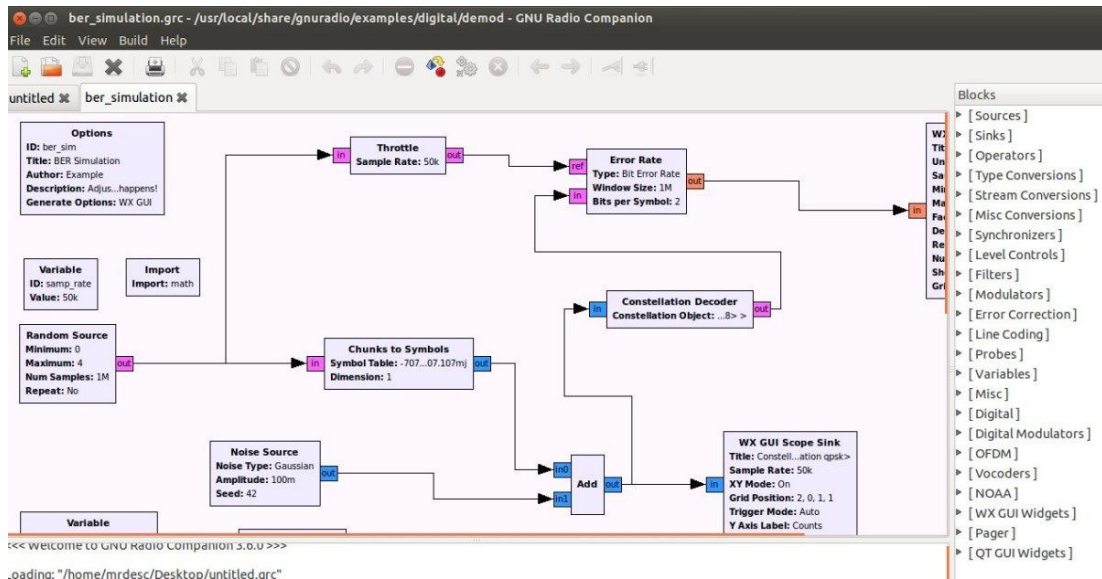


Figura 2.31 Diagrama de bloques GNU Radio
Fuente: (GnuRadio, 2020)

2.21. Instalación de GNU Radio en Ubuntu

La forma recomendada de instalar GNU Radio en la mayoría de las plataformas es utilizando paquetes binarios ya disponibles (consulte Instalación de Ubuntu PPA).

Para algunas plataformas, no hay binarios proporcionados por los administradores de paquetes disponibles o el proyecto GNU Radio. En estos casos, póngase en contacto con el responsable de mantenimiento del administrador de paquetes o con el proyecto de GNU Radio para encontrar una forma sensata de proporcionar binarios para su plataforma.

Además de usar binarios, GNU Radio se puede instalar:

- Desde la fuente (para aquellos que quieren un control total).
- Usando PyBOMBS (para aquellos que quieren que se compile desde la fuente y / o se instale en un directorio específico usando un script)

Por lo general, no es necesario crear GNU Radio a partir del código fuente a menos que desee modificar GNU Radio en lugar de simplemente usarlo. La forma recomendada de instalar GNU Radio en la mayoría de las plataformas es utilizando paquetes binarios ya compilados.

La instalación binaria debería ser suficiente para la mayoría de los usuarios, y ciertamente para cualquiera que sea nuevo en GNU Radio. Sin embargo, si tiene requisitos especiales o un paquete binario no está disponible para su sistema, es posible que deba instalar GNU Radio desde la fuente.

En resumen: en las versiones de Ubuntu desde la 9.10, use:

- `sudo add-apt-repository ppa: gnuradio / gnuradio-releases`
- `sudo apt-get update`
- `sudo apt-get install gnuradio`

2.21.1. Arquitectura general de USRP

Si bien algunas características y especificaciones varían de un modelo a otro, todos los dispositivos USRP utilizan la misma arquitectura general. En muchos casos, la interfaz de RF, los mezcladores, filtros, osciladores y amplificadores necesarios para traducir una señal del dominio de RF y la banda base compleja o señales de FI. Los ADC muestrean la banda base de las señales de FI y las muestras digitales se sincronizan en un FPGA.

La imagen FPGA estándar proporciona una funcionalidad de conversión descendente digital, que incluye sintonización de frecuencia fina y varios filtros.

Después de muestrear, las muestras sin procesar u otros datos se transmiten a una computadora host a través de la interfaz de host. El proceso inverso se aplica a la cadena de transmisión.

El ancho de banda del dispositivo USRP varía en cada punto de la cadena de señal. Tres tipos generales de especificaciones de ancho de banda son el ancho de banda analógico, el ancho de banda de procesamiento FPGA y el ancho de banda del host.

El ancho de banda del sistema es generalmente el mínimo de la placa hija de RF, el procesamiento FPGA y el ancho de banda del host. También se debe tener cuidado para evitar un ancho de banda analógico que sea mayor que la frecuencia de muestreo ADC / DAC de cualquier dispositivo (Ettus, 2021).

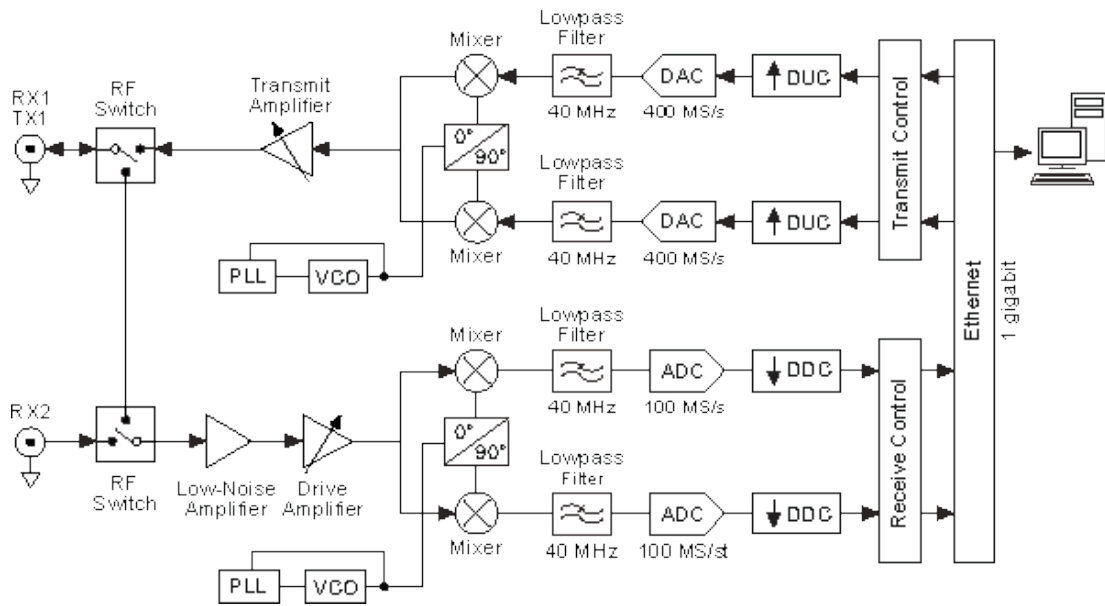


Figura 2.32 Arquitectura general de USRP
Fuente: (kb.ettus.com, 2020)

2.21.2. Ancho de banda analógico

El ancho de banda analógico es la cantidad de ancho de banda útil (3 dB) entre el puerto de RF y la interfaz de banda base / FI de un canal de RF.

Por lo general, este ancho de banda se establece mediante filtros de banda base o IF en la placa secundaria, que están diseñados para evitar el alias cuando se combinan con una placa base USRP con frecuencias de muestreo ADC / DAC determinadas.

Tabla 2.1. Ancho de banda analógico

Tarjeta hija	Cobertura de frecuencia	Ancho de banda analógico
<u>WBX-120</u>	50 MHz - 2,2 GHz	120 MHz
<u>SBX-120</u>	400 MHz - 4,4 GHz	120 MHz
<u>CBX-120</u>	1,2 GHz - 6 GHz	120 MHz
<u>UBX-160</u>	10 MHz - 6 GHz	160 MHz
<u>WBX</u>	50 MHz - 2,2 GHz	40 MHz
<u>SBX</u>	400 MHz - 4,4 GHz	40 MHz
<u>CBX</u>	1,2 GHz - 6 GHz	40 MHz
<u>UBX-40</u>	10 MHz - 6 GHz	40 MHz
<u>TVRX2</u>	50 MHz - 860 MHz	Configurable: 1,7 a 10 MHz
<u>DBSRX2</u>	800 MHz - 2,3 GHz	Configurable - 8 a 80 MHz
<u>BasicRX</u> / <u>BasicTX</u>	1 - 250 MHz	* Determinado por las frecuencias de muestreo de ADC / DAC. Requiere filtro externo.
<u>LFRX</u> / <u>LFTX</u>	DC-30 MHz	30 MHz

Fuente: (Ettus, 2021)

2.21.3. Ancho de banda de procesamiento FPGA

El ancho de banda de procesamiento de FPGA es la frecuencia de muestreo proporcionada por los ADC y DAC en la placa base USRP. Esto establece el ancho de banda digital máximo hipotético de un sistema basado en el USRP. La FPGA del USRP X300 / X310 envía y recibe muestras a 200 MS / s de los DAC y ADC respectivamente.

El diseño de FPGA estándar de todos los dispositivos USRP incluye cadenas DSP que proporcionan cambio de frecuencia, diezmado de los flujos recibidos e interpolados de los flujos de transmisión. Estas cadenas DSP operan en el ancho de banda de procesamiento FPGA especificado, ver tabla 2.2 (Ettus, 2021).

Tabla 2.2. Ancho de banda de procesamiento FPGA

Modelo USRP™	Ancho de banda de procesamiento ADC (MS / s)	Ancho de banda de procesamiento DAC (MS / s)
<u>USRP B200mini</u> / <u>USRP B205mini</u>	61,44 MS / s (simplex)	61,44 MS / s (simplex)
<u>USRP B200</u> / <u>USRP B210</u>	61,44 MS / s (simplex)	61,44 MS / s (simplex)
<u>USRP E310</u> / <u>USRP E312</u>	61,44 MS / s (simplex)	61,44 MS / s (simplex)
<u>USRP N200</u> / <u>USRP N210</u>	100 MS / s	400 MS / s
<u>USRP X300</u> / <u>USRP X310</u>	200 MS / s	800 MS / s

Fuente: (Ettus, 2021)

2.21.4. Ancho de banda del host

La interfaz de host permite que los datos fluyan entre la FPGA de un dispositivo USRP y una PC host. La mayoría de las aplicaciones transmiten datos I / Q hacia y desde el dispositivo USRP. En la tabla 2.3 se muestra un resumen de las diversas opciones de interfaz que están disponibles con la línea de productos USRP. Se muestra la frecuencia de muestreo del host con muestras I&Q de 16 bits. La mayoría de los modelos USRP también brindan la opción de transmitir muestras de 8 bits, duplicando efectivamente el ancho de banda del host en términos de muestras / segundo.

En este contexto, "dúplex completo" significa que la interfaz puede transmitir en ambas direcciones a las velocidades especificadas simultáneamente. Algunas interfaces, como USB 3.0, no proporcionan rutas de datos separadas para transmitir y recibir datos, pero reutilizan un solo transporte en un modo "semidúplex".

En este caso, el ancho de banda total de la interfaz se compartiría entre las funciones de transmisión y recepción de un USRP.

El rendimiento de transmisión real dependerá de la capacidad de procesamiento de la computadora host, la complejidad de la aplicación / DSP y otros factores. Esta tabla simplemente representa el rendimiento teórico máximo de cada interfaz de host.

Tabla 2.3. Ancho de banda del host

Interfaz	Dispositivos USRP™	Frecuencia de muestreo del host (MS / s @ I / Q de 16 bits)	Dúplex medio / completo
USB 2.0	USRP™ 1, B100	8	Medio dúplex
USB 3.0	B200 / B210 / B200mini / B205mini	61,44	Medio dúplex
Gigabit Ethernet	N200 / N210	25	Dúplex completo
10 Gigabit Ethernet	X300 / X310	200	Dúplex completo
PCI-Express (tarjeta PCIe de 4 carriles)	X300 / X310	200	Dúplex completo
PCI-Express (ExpressCard de 1 carril)	X300 / X310	50	Dúplex completo
OMAP GPMC	E100 / E110	4	Medio dúplex

Fuente: (kb.ettus.com, 2020)

Es importante cumplir con los requisitos de filtrado y ancho de banda para evitar el alias. Las tarjetas hijas de ancho de banda extendido WBX-120, CBX-120 y SBX-120 fueron diseñadas para funcionar con USRP X300 / X310 y cualquier producto futuro con suficientes frecuencias de muestreo ADC / DAC.

Estas placas no son compatibles con dispositivos que incorporan ADC / DAC de menor tasa por debajo de 200 MS / s.

2.21.5. Cálculo del ancho de banda del USRP

El ancho de banda del sistema basado en USRP depende de la implementación específica y la asignación funcional.

Un sistema que utiliza un USRP X300 / X310 con una interfaz de 10 GigE, una aplicación totalmente basada en host y una placa secundaria de 40 MHz proporciona un ancho de banda utilizable de 40 MHz. El límite lo establece la placa hija.

Un sistema que usa un USRP N200 / N210 con una interfaz de 1 GigE, una aplicación completamente basada en host que requiere muestras de 16 bits y una placa

secundaria de 40 MHz proporciona un ancho de banda utilizable de ~ 20 MHz. El límite lo establece la interfaz del host: 1 GigE puede transmitir hasta 25 MS / s, lo que se traduce en ~ 20 MHz de ancho de banda utilizable.

Un sistema que usa un USRP X300 / X310 con una interfaz de 1 GigE para comando / control, procesamiento FPGA completo de los vapores Rx / Tx y una placa secundaria de 120 MHz puede proporcionar un ancho de banda utilizable de hasta 120 MHz. La FPGA puede procesar muestras a 200 MS / s. La placa hija es el factor limitante. (Ettus, 2021)

2.22. Características de RF del USRP B205mini

Las principales características de RF del USRP B205mini son las siguientes:

- FPGA Xilinx Spartan-6 XC6SLX150 de grado industrial
- Transceptor de conversión directa RFIC AD9364 de Analog Devices
- Rango de frecuencia: 70 MHz - 6 GHz
- Hasta 56 MHz de ancho de banda instantáneo
- Dúplex completo, SISO (1 Tx y 1 Rx)
- Conectividad USB 3.0 rápida y conveniente alimentada por bus

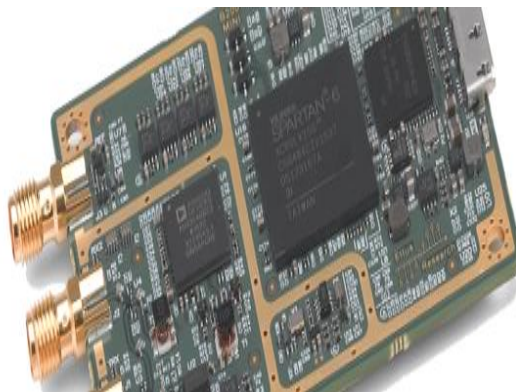


Figura 2.33 Mainboard del USRP B205 mini-i
Fuente: (Ettus, 2021)

Para la conexión del equipo se necesita una computadora host con un puerto USB 2.0 o 3.0 disponible.

2.22.1. Instalar y configurar las herramientas de software en su computadora host

Para utilizar el periférico de radio de software universal (USRP™), debe tener las herramientas de software correctamente instaladas y configuradas en su computadora host.

Se requiere la versión 3.8.4 o posterior del controlador de hardware USRP, UHD. Se recomienda utilizar la última versión estable de UHD disponible.

2.22.2. Conexión del USRP a la computadora host

El cable USB 3.0 incluido proporciona conectividad de datos y alimentación para la serie de bus USRP. El lado del host del cable debe conectarse a un puerto USB 2.0 o 3.0.

Tenga en cuenta que el enlace USB 2.0 proporciona menos ancho de banda que el enlace USB 3.0. También tenga en cuenta que se debe conectar una fuente de alimentación de CC externa si utiliza un GPSDO (solo B200 / B210).

2.22.3. Prueba y verificación del funcionamiento del USRP

Una vez que las herramientas de software estén instaladas en la computadora host, o usando el entorno Live SDR, verifique el funcionamiento correcto del USRP ejecutando los programas de utilidad en la computadora host. (Ettus, 2021)

2.22.4. Consideraciones legales

Todos los países tienen leyes que rigen la transmisión y recepción de señales de radio. Los usuarios son los únicos responsables de asegurarse de que utilizan su sistema USRP de conformidad con todas las leyes y regulaciones aplicables. Antes de intentar transmitir y / o recibir en cualquier frecuencia, le recomendamos que determine qué licencias pueden ser necesarias y qué restricciones pueden aplicarse.

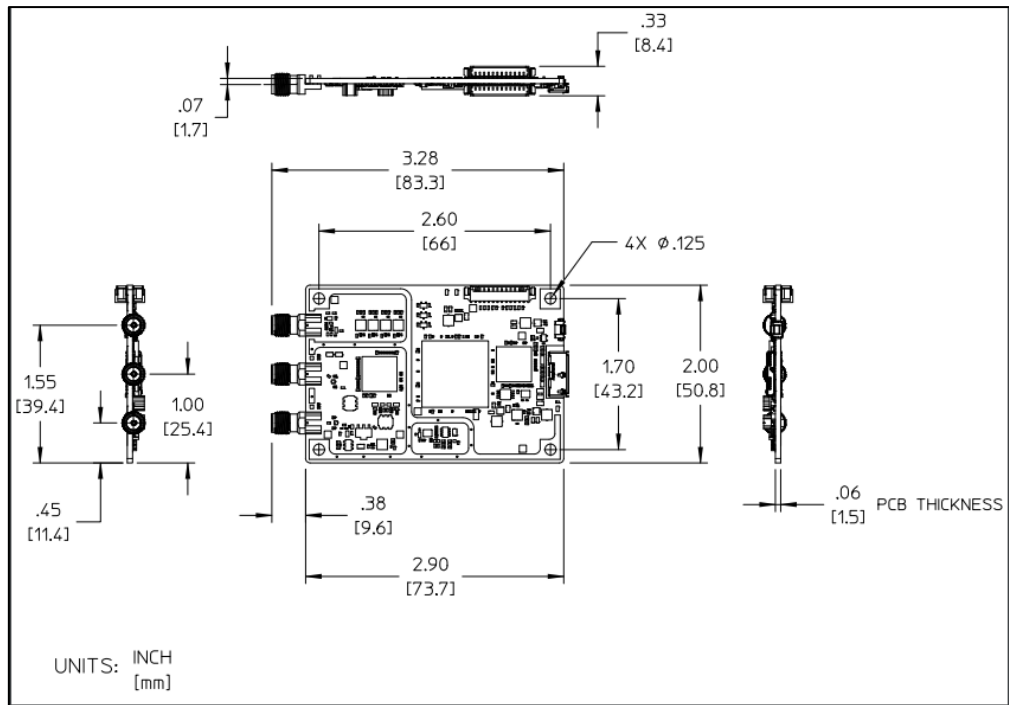


Figura 2.34 Diagrama esquemático del USRP
Fuente: (kb.ettus.com, 2020)

2.22.5. Afinación y ganancias

La interfaz de RF tiene cadenas de transmisión y recepción sintonizables individualmente. En el B200 y B200 mini, hay una interfaz de RF de transmisión y otra de recepción. En el B210, tanto la transmisión como la recepción se pueden utilizar en una configuración MIMO. Para el caso de MIMO, ambos front-ends de recepción comparten el RX LO, y ambos front-ends de transmisión comparten el TX LO. Cada LO se puede sintonizar entre 50 MHz y 6 GHz.

Todas las interfaces tienen controles de ganancia analógicos individuales. Las interfaces de recepción tienen 76 dB de ganancia disponible; y las interfaces de transmisión tienen 89,8 dB de ganancia disponible. Los ajustes de ganancia son específicos de la aplicación, pero se recomienda que los usuarios consideren usar al menos la mitad de la ganancia disponible para obtener un rango dinámico razonable.

La interfaz analógica tiene un ancho de banda perfectamente ajustable de 200 kHz a 56 MHz.

Generalmente, al solicitar cualquier frecuencia de reloj maestro posible, UHD configura automáticamente los filtros analógicos para evitar cualquier aliasing (RX) o emisiones fuera de banda mientras deja pasar la señal más limpia posible.

Sin embargo, si se tiene una interferencia muy fuerte dentro de la mitad de la frecuencia de reloj maestro de su frecuencia RX LO, es posible que desee reducir este ancho de banda analógico. Puede hacerlo llamando a `uhd :: usrp :: multi_usrp :: set_rx_bandwidth (bw)`.

La propiedad para controlar el ancho de banda RX analógico es `ancho de banda / valor`.

UHD no le permitirá establecer anchos de banda mayores que su frecuencia de reloj maestro actual. (Ettus, 2021)

2.22.6. Indicadores LED

A continuación, se muestra en la tabla 2.4 los indicadores LED del B200mini y sus significados:

Tabla 2.4 Indicadores LED del B200mini

ID de componente	Descripción	Detalles
LED PWR	Indicador de encendido	apagado = no hay energía aplicada (externa o USB) encendida = energía aplicada (externa o USB)
LED TRX	Actividad TX / RX	apagado = sin actividad verde = recibiendo rojo = transmitiendo naranja = cambiando entre transmisión y recepción
LED RX2	Actividad de RX2	apagado = sin actividad verde = recibiendo
LED S0	Bloqueo de referencia	apagado = sin actividad verde = bloqueado
LED S1	Presente de referencia	apagado = nivel de referencia bajo o no presente verde = nivel de referencia alto

Fuente: (Ettus, 2020a)

Los indicadores LED TX están encendidos cuando se transmiten datos y apagados cuando no hay muestras disponibles para transmitir. Los indicadores LED de RX se encienden cuando se envían muestras al host y se apagan cuando no se puede. Esto significa que los indicadores LED de actividad TX / RX parpadea en una condición de subdesbordamiento temporal de transmisión o desbordamiento de recepción, lo que indica que el host no está enviando o recibiendo muestras lo suficientemente rápido. El anfitrión será notificado de la condición y también emitirá una "U" u "O". (Ettus, 2021)

2.22.7. Conexiones externas

A continuación, se muestra en la tabla 2.5 que muestra las conexiones externas del B200mini y la información de alimentación respectiva:

Tabla 2.5. Conexiones externas del B200mini

ID de componente	Descripción	Detalles
USB3	Conector USB	USB 3.0
J1	TRX	Potencia TX +20 dBm máx. Potencia RX -15 dBm máx.
J2	RX2	Potencia RX -15 dBm máx.

Fuente: (Ettus, 2020a)

2.23. Antena WR-159

La antena de bocina de ganancia estándar PE9860 / SF-20 (también conocida como antena de bocina de guía de ondas) es parte de nuestra gran selección de antenas de guía de ondas. La antena de trompeta de ganancia estándar Pasternack se fabrica con una entrada WR-159 y un adaptador de transición de guía de ondas a coaxial. Nuestra antena de bocina de ganancia estándar WR-159 tiene una transición de guía de ondas a adaptador coaxial con una entrada de conector SMA que es de género femenino.

La antena de guía de ondas de bocina de ganancia estándar WR-159 con entrada SMA tiene una frecuencia mínima de 4.9 GHz y una frecuencia máxima de 7.05 GHz. La antena de ganancia estándar de bocina de guía de ondas Pasternack PE9860 / SF-20 WR-159 tiene una ganancia nominal de 20 dB. Nuestra antena de guía de ondas WR-159 de bocina de ganancia estándar de 20 dB con adaptador SMA tiene un ancho de haz vertical de 16,9 y horizontal de 14,3 grados a 3 dB.

Pasternack es el lugar donde comprar una antena de bocina de ganancia de guía de ondas estándar WR-159 con entrada WR-159. Esta antena de bocina de ganancia es solo una parte de más de 40,000 componentes RF, microondas y guías de ondas milimétricas disponibles y en stock en nuestro almacén de Irvine, CA, Estados Unidos.

La antena de bocina de guía de ondas estándar WR-159 con interfaz SMA hembra puede enviarse a todo el mundo el mismo día en que se compra como con nuestras otras piezas de RF disponibles.

2.24. Calculadora de rango máximo de radar

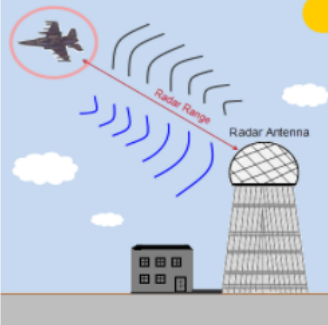
La calculadora de rango máximo de radar de Pasternack produce un rango máximo ideal de una antena de radar utilizando las propiedades de la antena.

Radar Output Power:	70	dBm	▼
Antenna Gain (linear):	10		
Frequency:	5	GHz	▼
Radar Cross-Sectional Area:	2	Sq. Meters	▼
Minimum Detectable Signal:	-30	dBm	▼

Calculate

Result:

Maximum Range: 43.64 m



$$Range = \sqrt[4]{\frac{P_r * \sigma * c^2 * G_r^2}{(4\pi)^3 * f_o^2 * P_{min}}}$$

Figura 2.35 Calculadora de rango máximo de radar
Fuente: (Pasternack, 2020b)

El alcance máximo del radar se determina, idealmente hablando, solo en las propiedades de la antena. Una señal a cierta frecuencia se transmite, se refleja y, con suerte, se detecta. Debido a la propagación tridimensional de las ondas de radar, la frecuencia tiene el mayor peso en la determinación del rango. A menudo, el consumo de energía y el alcance deben equilibrarse para una máxima usabilidad (pasternack.com, n.d.).

3. Marco metodológico

3.1. Tipo de investigación

El proyecto se basa en una investigación exploratoria, que busca una visión general o amplia de la realidad, caracterizada por su carácter preparatorio.

Se realiza una investigación exploratoria porque las variables de estudio no se estudian de manera práctica en la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil; por este motivo, es necesario realizar un análisis de algunos aspectos relacionados con las señales de radares (Arturo et al., 2011).

Además, esto es experimental porque ciertas cosas se verán afectadas positivamente al observar las consecuencias. (Ouali, Poon, Lee, & Romaiti, 2016).

Es decir, se realizan prácticas experimentales en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana. Durante el desarrollo del prototipo de radar, se configuran los equipos, se aplican los conocimientos del uso y tratamiento de señales de radiofrecuencia del radar.

Por tanto, es descriptivo porque describe los resultados obtenidos durante el proceso de desarrollo del prototipo (Camacho & Marcano, n.d.).

3.2. Diseño de investigación

Se utiliza para investigaciones de tipo experimental porque según (Arias, 2012), esto permite manipular un objeto o grupo de personas, sometiéndolas a diferentes condiciones y estímulos para poder observar los resultados. Esta investigación se basa en información extraída de diferentes artículos científicos con la misma o similar temática; además, la investigación se basa en el análisis de diferentes prototipos de radares con USRP encontrados en una búsqueda bibliográfica correspondiente al estado del arte.

3.3. Enfoque de la investigación

En la investigación en este campo, dado que las variables se consideran a partir de dos partes básicas, se adopta un método mixto de cualitativo y cuantitativo. Por ejemplo, revisión teórica, que se realiza a partir de diversas fuentes a través de la investigación bibliográfica, tales como: libros, trabajos relacionados, artículos científicos y otras publicaciones, en las que se analiza cualitativamente la información obtenida.

Por otra parte, se realiza un estudio experimental, en otras palabras, se realiza una investigación de campo, donde se obtienen datos cuantitativos, debido al análisis de las señales de radiofrecuencia de radares, lo cual permite que el estudio de estas se realice con un máximo de aprendizaje práctico (Cadena-Iñiguez, la Cruz-Morales, del Rosario, & Ma, n.d.).

3.4. Metodología de investigación

En cuanto al método de investigación, se trabaja con un método inductivo, para buscar la inducción del pensamiento a través de la generación de ideas particulares que en conjunto forman una generalidad del pensamiento, otorgando la posibilidad de obtener conclusiones relacionadas al estudio (Rodríguez Moguel, 2005).

En este caso, a partir de configuraciones y pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos se logra establecer conclusiones generales para el diseño e implementación del prototipo de radar con radio definida por software (Rodríguez Moguel, 2005).

3.5. Proyectos de investigación vinculados

El prototipo de radar de objetivos con radios definidas por software tendrá como proyectos vinculados las siguientes tesis de investigación: “Diseño de un prototipo de pruebas de un radar monoestático utilizando radio definida por software”, “Diseño e implementación de un prototipo georradar GPR, para análisis de subsuelo en búsqueda de personas vivas con SDR USRP RIO” y “Estudio de un sistema de transmisión digital mimo 4x4 basado en los módulos USRP 2920”. los cuales se relacionan con la investigación que se lleva a cabo en este trabajo de investigación

3.5. Título de la propuesta

Diseño de prototipo de radar de objetivos móviles con radio definida por software y GNU Radio.

3.6. Descripción de la propuesta

La propuesta de este proyecto de investigación consiste en el diseño de un prototipo de radar de objetivos móviles mediante radios definida por software Ettus USRP B200mini-i, antenas de bocinas y software open source GNU Radio para aplicación de radar de distancia y velocidad donde el valor de la velocidad y distancia de un objetivo móvil será visualizado, con la finalidad de aplicar en un futuro este dispositivo como radar de bajo costo.

Este prototipo de radar será probado y validado en la casa del tesista Marco Silva y posteriormente será entregado al laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil para prácticas de los estudiantes

de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones; se pretende realizar pruebas de test de distancia y velocidad con un objetivo móvil para tomar datos y realizar el estudio, análisis y uso del prototipo.

Para la instalación del software open source se utiliza una PC con procesador Dual Core, para la visualización de la programación y parámetros de radiofrecuencia del radar, así como la velocidad del objetivo móvil se observa mediante un monitor de CPU.

Las pruebas iniciales se realizan con un objetivo móvil que consiste en una pizarra o un disco metálico mediante el cual se reflejan la señal transmitida y se podrá hacer cálculo en base al efecto Doppler utilizando técnicas de radar FMCW.

La programación se realizó mediante el software open source GNU Radio el cual consiste en unir módulos de radiofrecuencia y programar el prototipo para controlar al mini USRP, el cual es el encargado de emitir y recibir las señales de radiofrecuencia a baja potencia.

Al realizar las pruebas en entorno laboratorio, se utilizó un objetivo móvil metálico para determinar la posición y velocidad.

Como entregables se realizó un manual de funcionamiento del prototipo de radar a manera de práctica para que los estudiantes de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones apliquen sus conocimientos adquiridos en materias como medios de transmisión y redes inalámbricas.

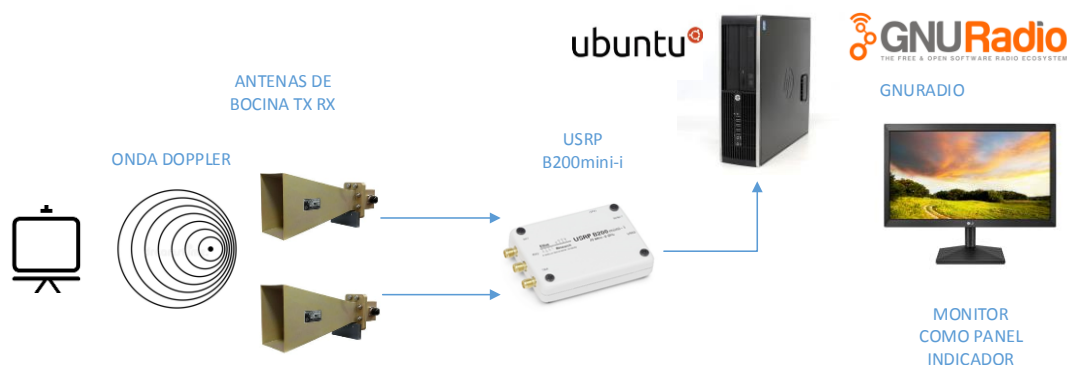


Figura 3.1 Prototipo de radar con USRP y GNURadio

3.7. Elementos del prototipo

3.7.1. Antena corneta

Para empezar con el desarrollo de este proyecto de investigación y de acuerdo con la propuesta planteada se realiza en primera instancia el diseño de las antenas cónicas las mismas que servirán para la transmisión y recepción de las señales del radar FMCW.

Durante la investigación se determina que las antenas de marca Pasternack son de buena calidad y alta eficiencia sin embargo el costo de estas antenas es elevado a un costo de \$1642 cada antena, lo que implicaba que se saliera del presupuesto del proyecto.

Para evitar este inconveniente se realiza una réplica de las antenas Pasternack y como resultado se obtuvo una buena eficiencia en transmisión y recepción.



Figura 3.2 Antena Horn de marca Pasternack
Fuente: (Pasternack, 2020b)

Se describe a continuación los parámetros de la antena Pasternack PE9860/SF-20.

Configuration				
Design	WR-159 Standard Gain Horn			
Pattern	Directional			
Polarization	Linear			
Coaxial Interface	SMA Female			
Electrical Specifications				
Description	Minimum	Typical	Maximum	Units
Frequency Range	4.9		7.05	GHz
Impedance		50		Ohms
Waveguide Standard Gain Horn				
Gain		20		dB
Horizontal Half Power Beam Width		16.9		Degrees
Vertical Half Power Beam Width		14.3		Degrees
Waveguide to Coaxial Adapter				
Input VSWR			1.25:1	
Mechanical Specifications				
Size				
Weight	2.433 lbs [1.1 Kg]			
RF Connector				
Type	SMA Female			
Waveguide Interface				
Waveguide Size	WR-159			

Figura 3.3 Características técnicas de la antena Horn Pasternack
Fuente: (Pasternack, 2020b)

La antena Pasternack es una antena tipo corneta de rango de frecuencia desde los 4,9 GHz hasta los 7,05 GHz con una ganancia nominal de 20 db, con conector SMA hembra, de material acero galvanizado.

Se muestra a continuación el diagrama en CAD de la antena Horn Pasternack PE9860/SF-20

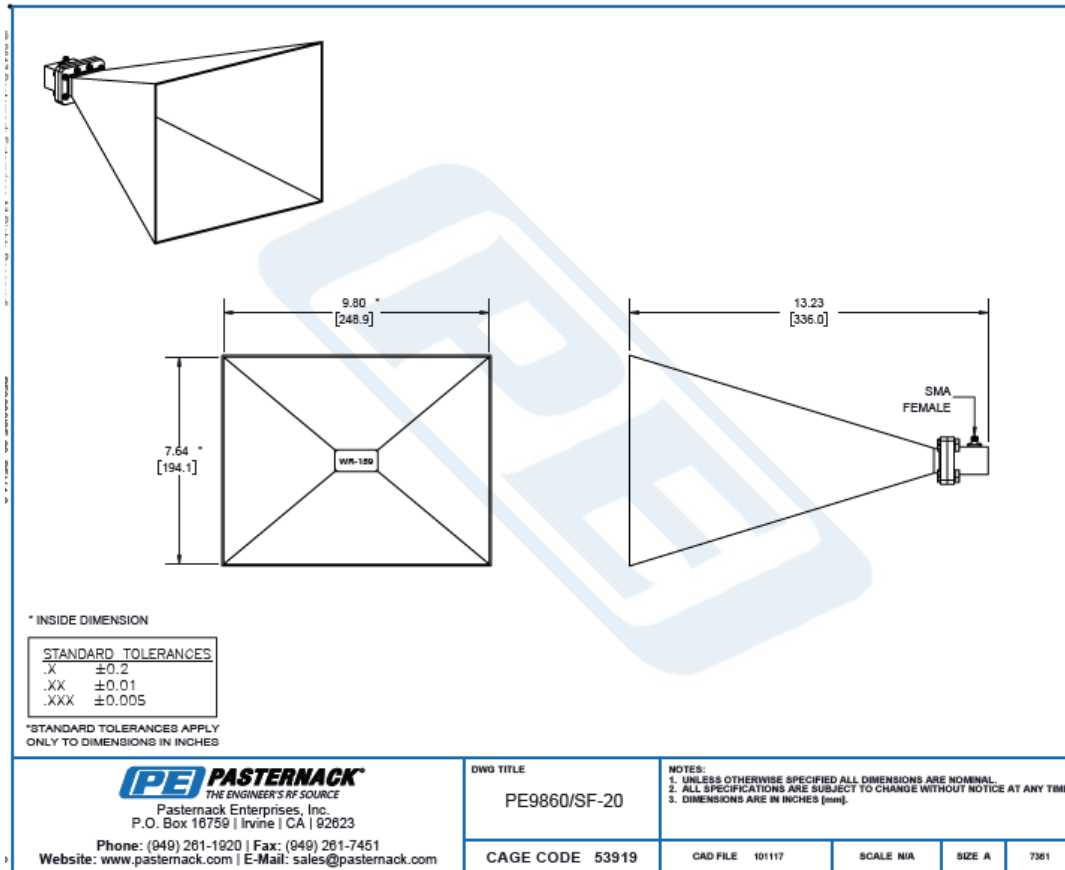


Figura 3.4 Diagrama en CAD de la antena
Fuente: (Pasternack, 2020b)

La antena tipo corneta se debe acoplar a un adaptador de conector coaxial, a continuación, se describe el adaptador indicado por el fabricante Pasternack.



Figura 3.5 Adaptador para conector coaxial
Fuente: (Pasternack, 2020a)

Datasheet técnico del adaptador coaxial que opera en un rango de 4,9 GHz a 7,05 GHz.

Configuration

Waveguide Size	WR-159
Flange	CMR-159
RF Connector	SMA Female
Impedance	50 Ohms
Body Geometry	Right Angle

Electrical Specifications

Description	Minimum	Typical	Maximum	Units
Frequency Range	4.9		7.05	GHz
VSWR			1.3:1	
Input Power (Peak)			100	Watts

Mechanical Specifications

Size	
Length	1.77 in [44.96 mm]
Width	2.5 in [63.5 mm]
Height	1.5 in [38.1 mm]
Weight	0.2505 lbs [113.62 g]

RF Connector

Connector Type	SMA Female
Body Material and Plating	Stainless Steel

Waveguide Interface

Waveguide Type	WR-159
Flange Type	CMR-159
Body Material and Plating	Aluminum

Figura 3.6 Datasheet del adaptador
Fuente: (Pasternack, 2020a)

Environmental Specifications

Temperature

Operating Range

-40 to +85 deg C

Compliance Certifications (see [product page](#) for current document)

Plotted and Other Data

Notes:

- Values at +25 °C, sea level unless stated otherwise

Typical Performance Data

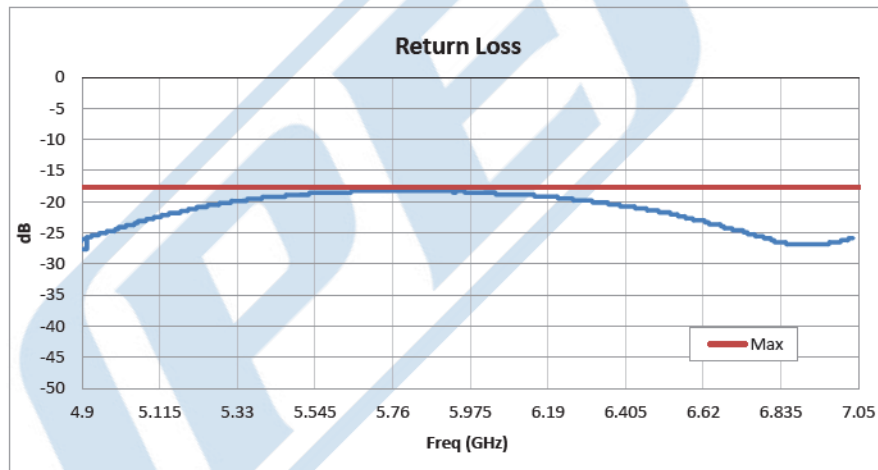


Figura 3.7 Datasheet del adaptador, return loss

Fuente: (Pasternack, 2020a)

Diagrama en CAD del adaptador de la antena.

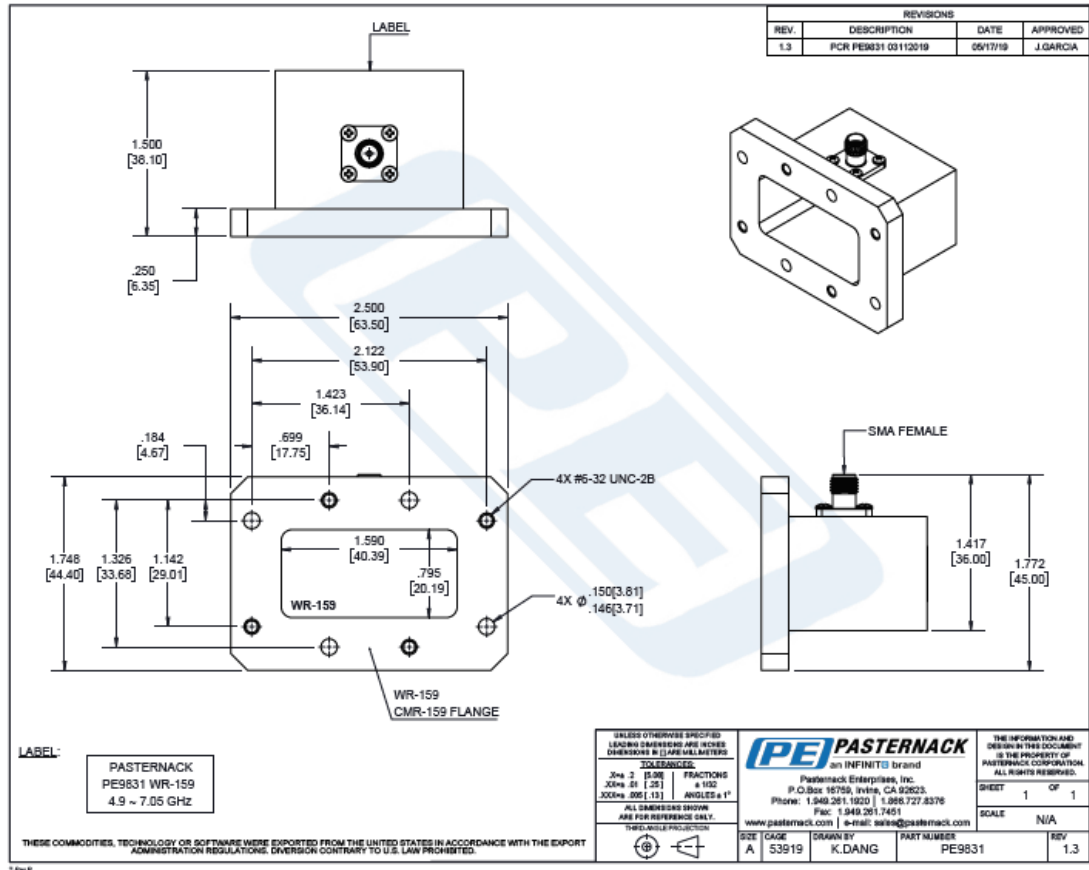


Figura 3.8 Diagrama del adaptador de la antena
Fuente: (Pasternack, 2021a)

Como se había indicado se realizó una réplica basándose en el datasheet de la antena y el adaptador de la marca Pasternack.

A continuación, en las figuras del 3.9 al 3.14, se muestran las evidencias fotográficas de las antenas réplicas realizadas en material metal inoxidable, con conector SMA y cable de 100 cmts marca minicircuits, fijadas en dos pedestales.



Figura 3.9 Antena de corneta, frontal



Figura 3.10 Antena de corneta, perfil



Figura 3.11 Antena corneta, interior



Figura 3.12 Conector SMA



Figura 3.13 Antenas cornetas, RX y TX



Figura 3.14 Cable minicoaxial de minicircuits

3.7.2. Simulación de Antena Horn (corneta) con MATLAB

Para validar la construcción de la antena Horn o corneta de acuerdo con las necesidades del proyecto se realiza una simulación de diseño de antena con Matlab 2021.

Se instala Matlab 2021 y la APP Antenna Designer para el diseño de la antena horn.

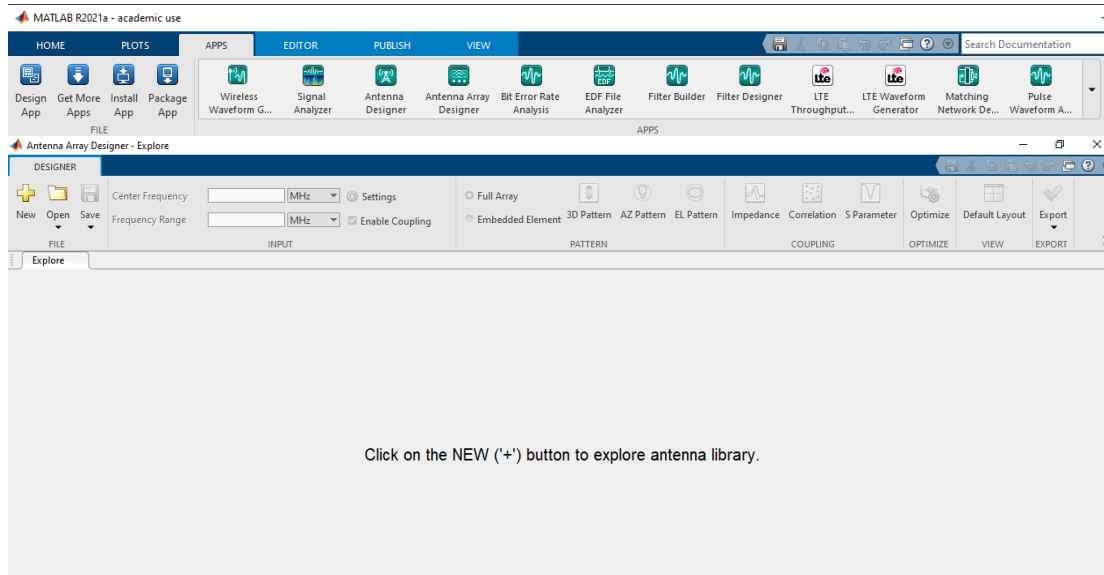


Figura 3.15 Matlab 2021

En la figura 3.16 se observa las configuraciones principales para el diseño de la antena, se debe seleccionar la frecuencia de operación de 3Ghz y se debe dar click en aplicar, por defecto saldrán valores predeterminados para el diseño de la antena horn.

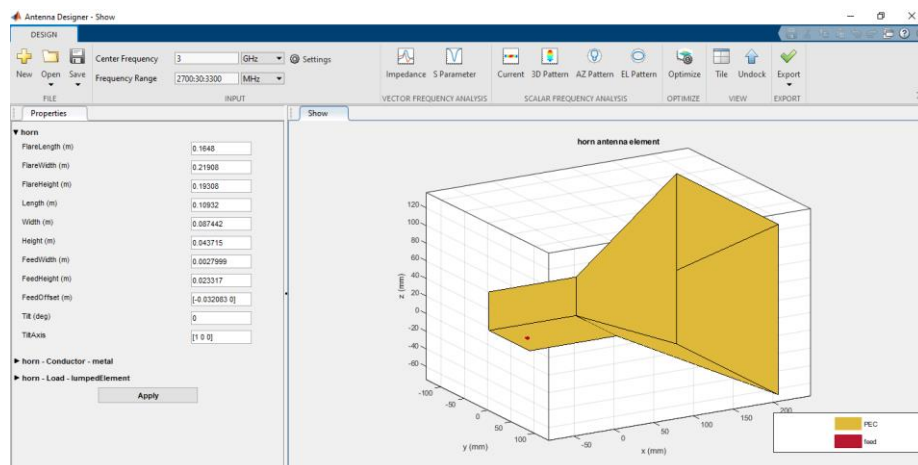


Figura 3.16 Antena horn

El horn objeto es una antena de cuerno piramidal con una ganancia estándar de 15 dBi. La antena de bocina predeterminada opera en la banda X-Ku, que varía de 10 GHz a 15 GHz. De forma predeterminada, la alimentación de la antena de bocina es una guía de ondas rectangular WR-75 con una frecuencia de funcionamiento de 7,87 GHz.

Para ángulos de destello de la bocina y dimensiones de la guía de ondas dados, utilice la *hornangle2size* función de utilidad para calcular el ancho y la altura de destello equivalentes de la bocina. En la figura 3.17 se observa las principales medidas para el diseño de este tipo de antenas.

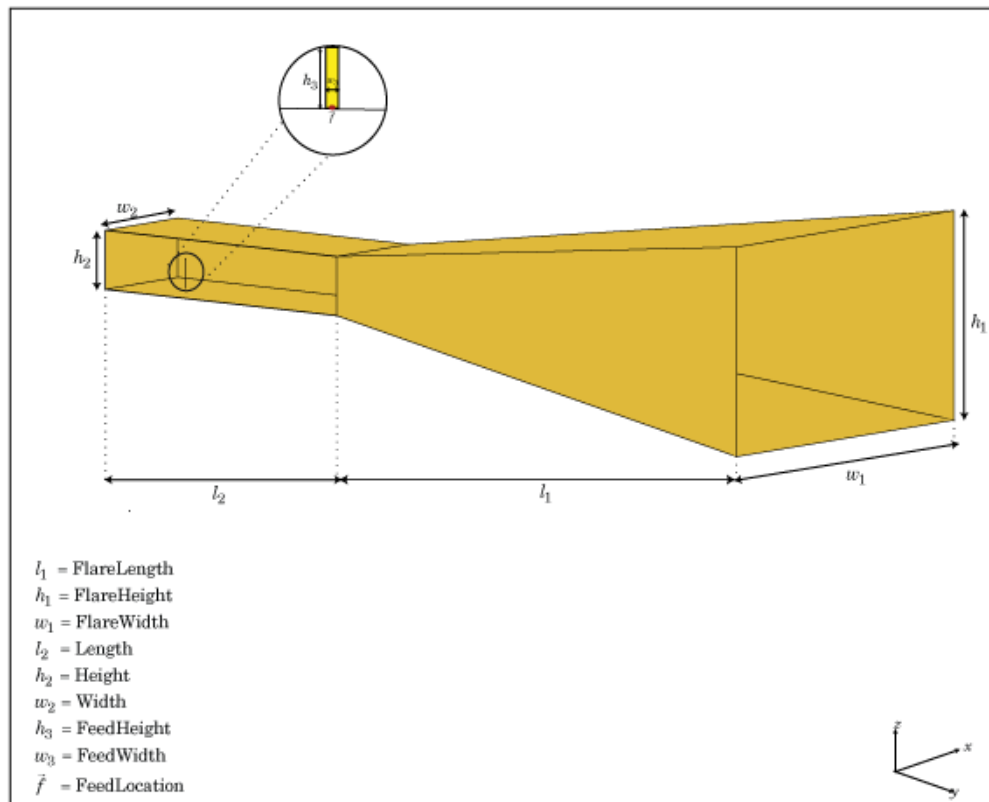


Figura 3.17 Medidas de antena horn
Fuente: (Matlab, 2021)

Se setea las configuraciones como se muestran en la figura 3.18.

The image shows a software interface titled "Properties" for a "horn" antenna. It contains several sections of parameters, each with a label and a corresponding input field:

- ▼ horn**
 - FlareLength (m): 0.315
 - FlareWidth (m): 0.24
 - FlareHeight (m): 0.195
 - Length (m): 0.04
 - Width (m): 0.07
 - Height (m): 0.05
 - FeedWidth (m): 0.002
 - FeedHeight (m): 0.04
 - FeedOffset (m): [-0.001 0]
 - Tilt (deg): 180
 - TiltAxis: [1 0 0]
- ▼ horn - Conductor - metal**
 - Catalog: Steel (dropdown menu)
 - Name: Steel
 - Conductivity (S/m): 6990000
 - Thickness (m): 0.001
- ▶ horn - Load - lumpedElement**

An "Apply" button is located at the bottom center of the dialog box.

Figura 3.18 Parámetros de medidas de la antena horn

El resultado de la simulación de la antena horn se puede observar en la figura 3.19. Se observa centrada la antena y el dipolo previamente seteado en los parámetros de la antena, así como también se puede apreciar el cambio de color de la antena debido a que se seleccionó el material de fabricación de metal.

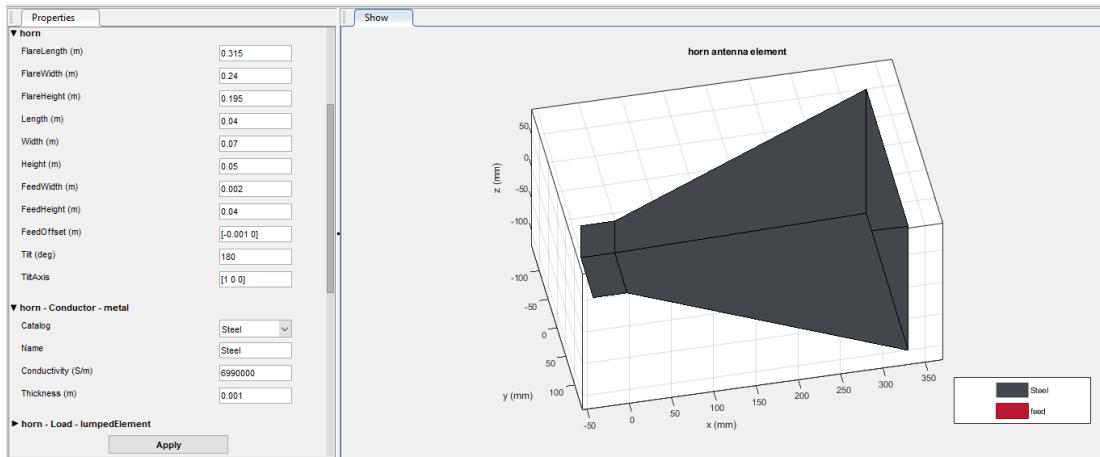


Figura 3.19 Resultados del diseño de antena horn

En la figura 3.20 se observa la vista frontal de la antena, donde se puede apreciar el dipolo en el centro del acoplador de antena.

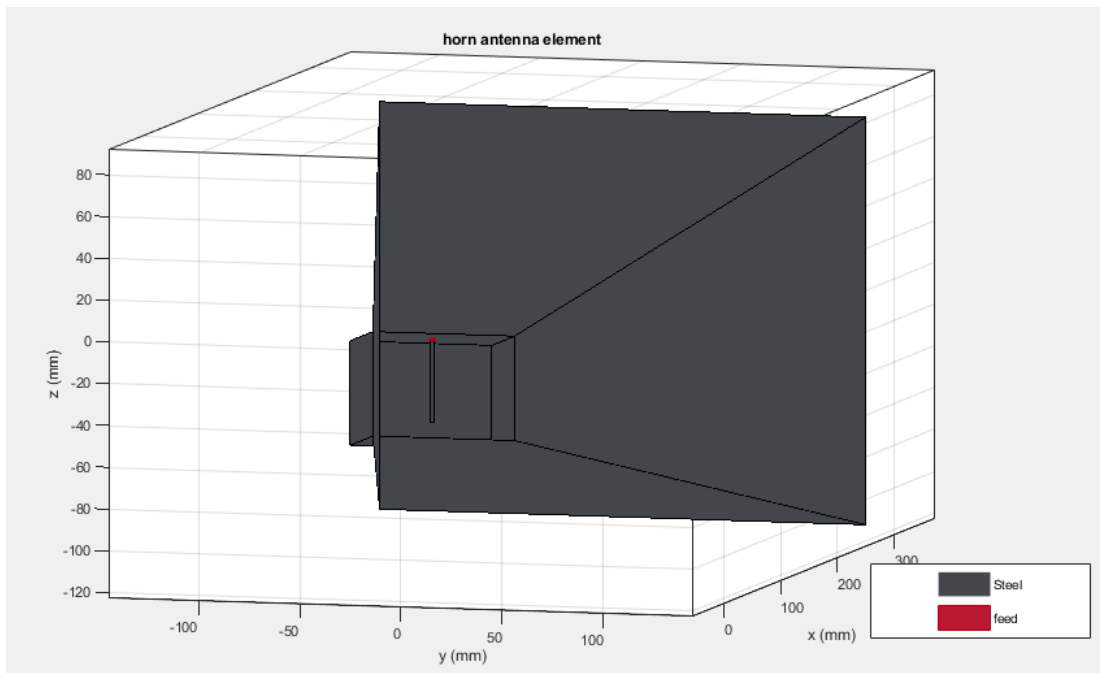


Figura 3.20 Vista frontal de antena

La figura 3.21 es el resultado de la distribución de corriente en la antena, como se observa en el dipolo está la mayor concentración de corriente según el diseño.

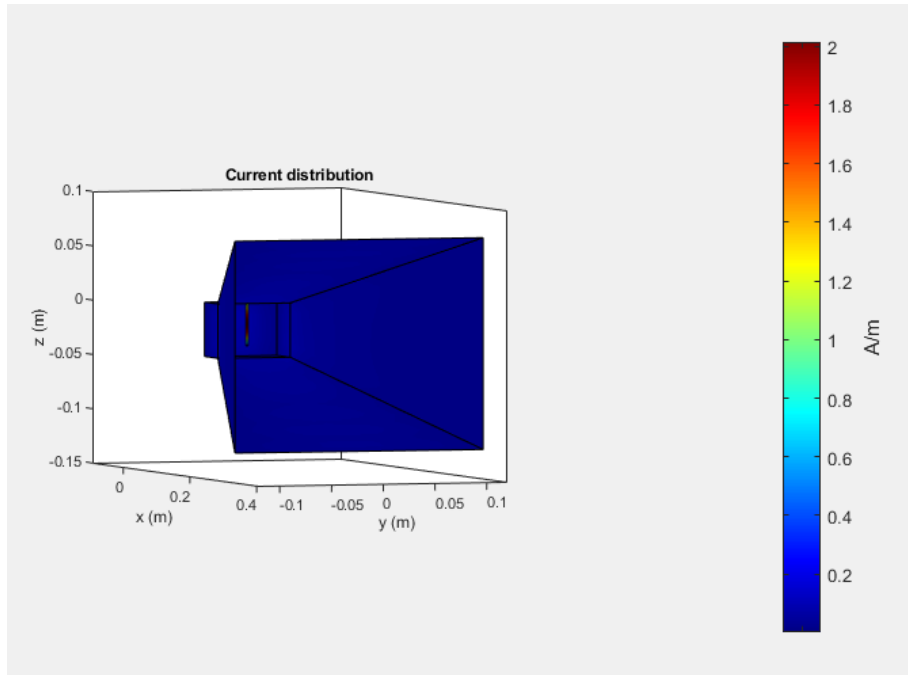


Figura 3.21 Distribución de corriente en antena

En la figura 3.22 se observa el diagrama de radiación de la antena horn, se puede concluir que la mayor cantidad de radiación se encuentra en sus distancias laterales y mas cercanas, el rojo representa mayor cantidad de radiación.

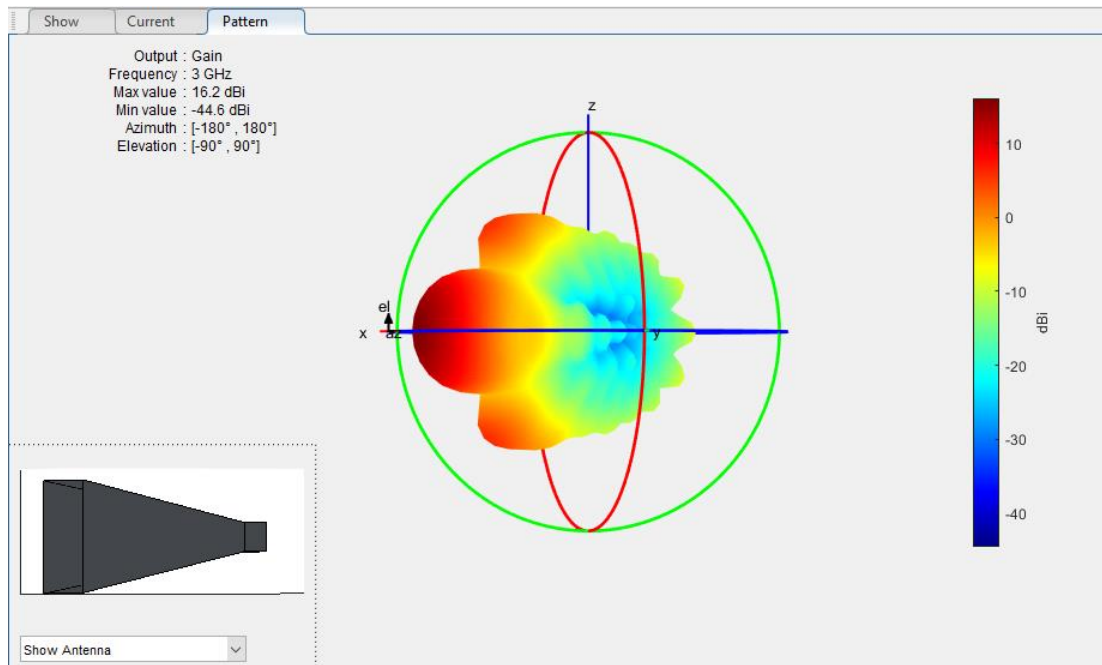


Figura 3.22 Diagrama de radiación de antena

En la figura 3.23 se observa el diagrama de impedancia de la antena en sus dos elementos resistivo y reactivo, a mayor frecuencia de operación baja la impedancia aplicada.

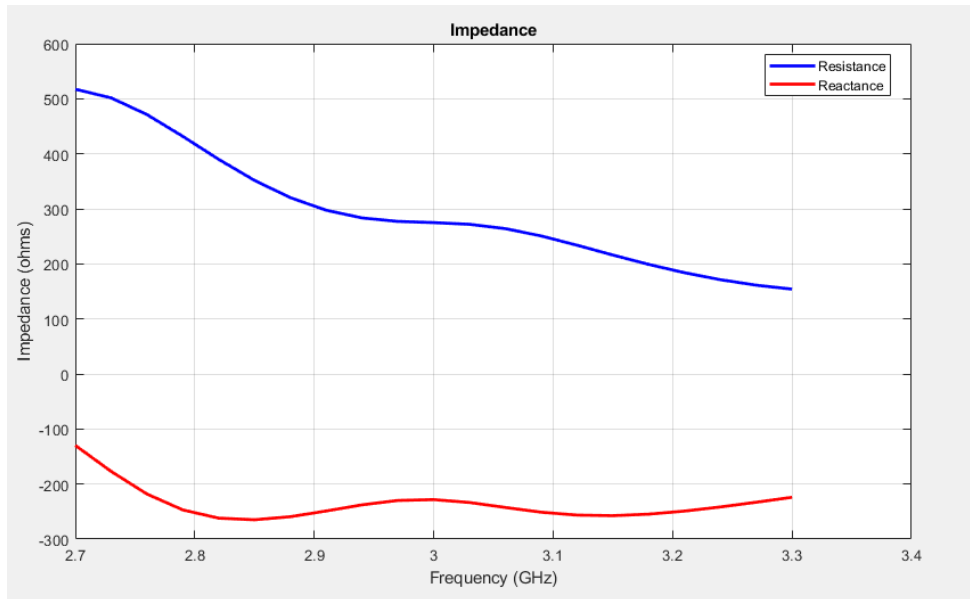


Figura 3.23 Diagrama de impedancia

En la figura 3.24 se observan los parámetros S de la antena, este se relaciona entre la potencia db de magnitud de la antena y la frecuencia de operación, la información obtenida determina que a la frecuencia de operación de la antena de 3Ghz la magnitud de potencia es menor.

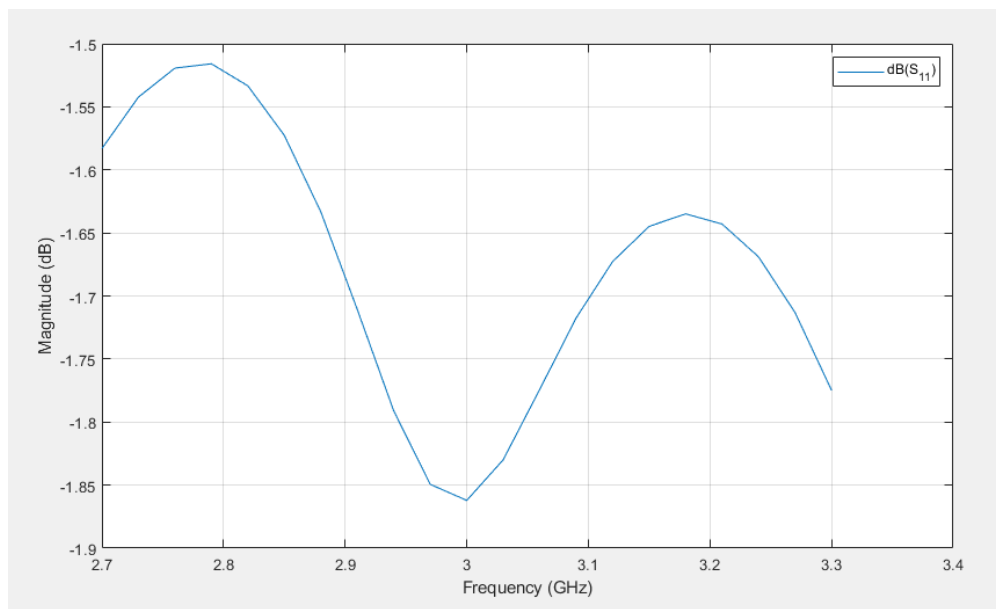


Figura 3.24 Parámetros S

En la gráfica 3.25 se observa el patrón de radiación en azimuth de la antena horn, dando como resultado una radiación de aproximadamente 60 grados en campos lejanos.

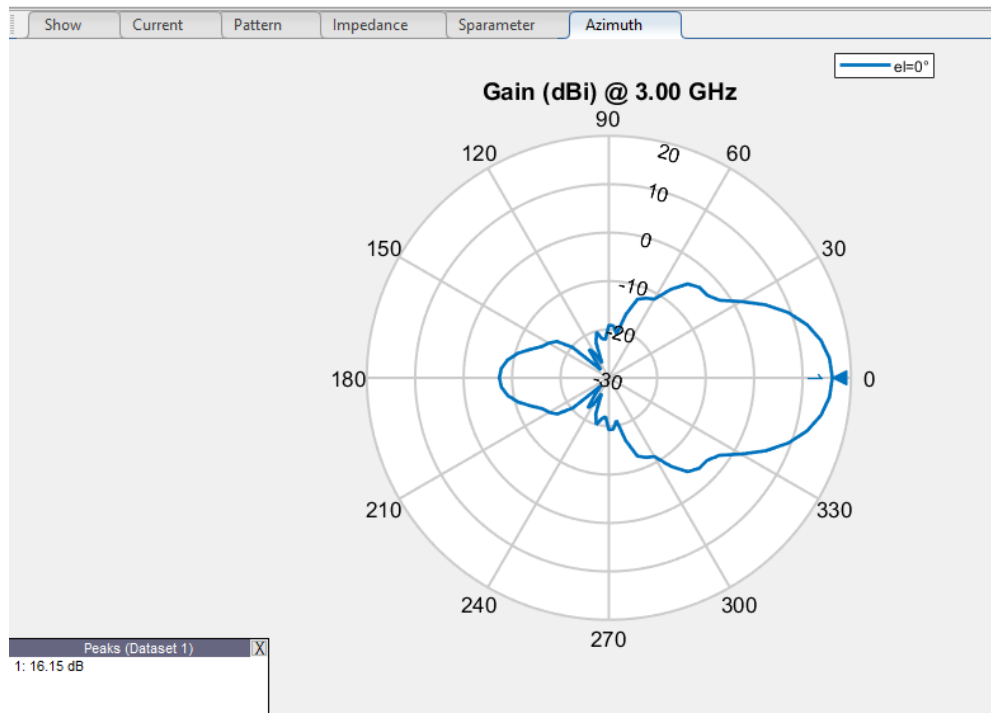


Figura 3.25 Patrón de radiación en Azimut

En la gráfica 3.26 se observa el patrón de radiación en elevación de la antena horn, dando como resultado una radiación de aproximadamente 120 grados en campos lejanos.

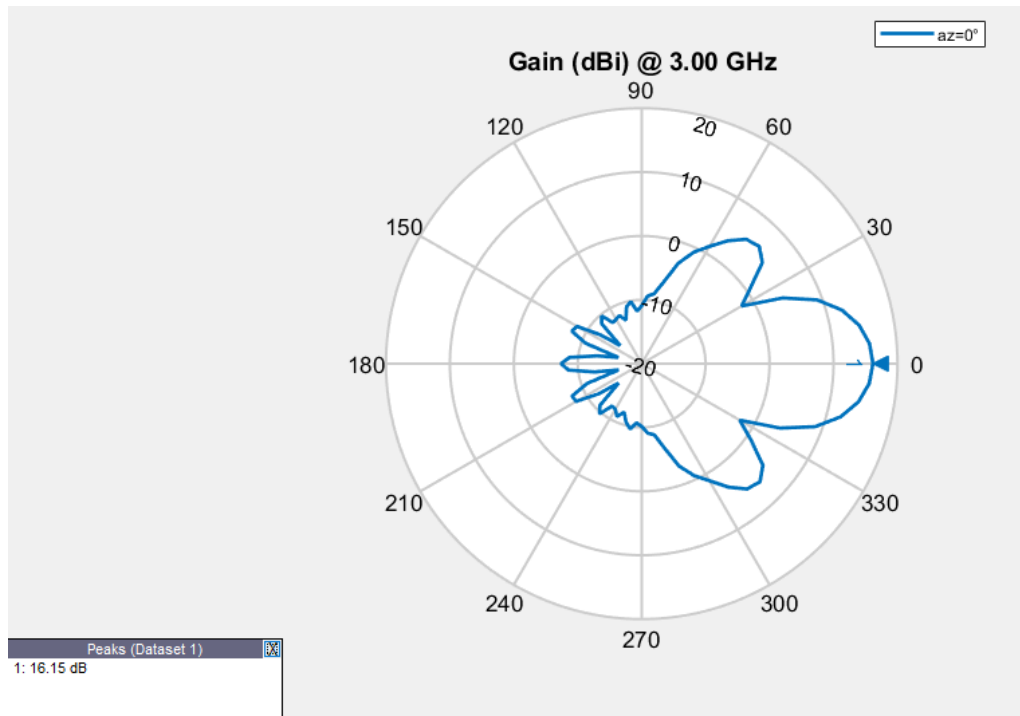


Figura 3.26 Patrón de radiación en elevación

3.7.3. CPU con Ubuntu 20

Otro elemento importante del prototipo del radar es el CPU con sistema operativo Ubuntu el cual ejecuta el software GNU Radio con la programación realizada para el funcionamiento del radar FMCW.

Para este prototipo se utilizó un CPU HP Compaq 4000 PRO con disco duro de 500 Gb, memoria de 4 Gb, procesador Dual Core E5800 tal como se observa en la figura 3.27.



Figura 3.27 CPU HP Compaq
Fuente: (HP, 2021)

Se eligió este CPU por su precio y su alta eficiencia para trabajos de alto rendimiento como el caso de pruebas de radares. Adicionalmente se utiliza mouse, teclado y monitor para el uso del CPU.

Se instaló el sistema operativo Ubuntu 20.04.1 LTS con todas las actualizaciones hasta el momento de la entrega de este proyecto de investigación.

Para la configuración del radar se utilizó el software GNURadio.

3.7.4. Conexión del USRP B205 mini-i

En capítulos anteriores ya se detalla sobre el equipo USRP B205 mini-i por lo tanto en esta sección solo se explica cuál es la forma de conexión con el CPU.

El USRP tiene una conexión de alta velocidad de USB 3.0, sin embargo, no quiere decir que no se pueda conectar con un CPU que tenga puertos USB 2.0, lo que hay que considerar es que depende de la programación y del máximo uso eficiente del equipo para que se requiera la mayor alta de transferencia de datos en los puertos USB.



Figura 3.28 USRP B205 mini-i conexión USB

3.7.5. Objetivo móvil para pruebas de radar

Se realiza la fabricación de un objetivo móvil de material metálico de tamaño 1,30 mts por 1 metro el cual se sostiene en un riel de 3 metros para su movimiento controlado que servirá para el control de distancia, así como también de la velocidad que marcará el radar. El área del objetivo móvil es de 1,30 metros cuadrados. En las figuras del 3.29 al 3.31 se observa el objetivo móvil en diferentes distancias.



Figura 3.29 Objetivo móvil metálico con rieles



Figura 3.30 Movimientos del objetivo metálico



Figura 3.31 Objetivo móvil con rieles

3.7.6. Instalación del prototipo de radar

Para ecualizar y afinar la programación del radar, se realiza en primer lugar pruebas de laboratorio en espacio reducido y cerrado.

Se alinean las dos antenas frente a un objetivo en este caso una pared de cemento.



Figura 3.32 Alineación de antenas

Las antenas deben estar a una altura similar en este caso a 93 cmts del piso.

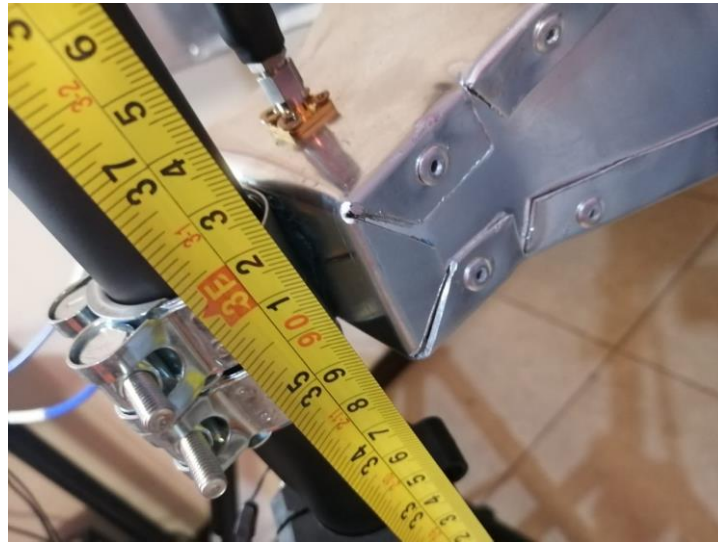


Figura 3.33 Altura de las antenas

La distancia entre las dos antenas tiene una separación de 45 cmts.



Figura 3.34 Distancia de las antenas

Es importante considerar que luego del ajuste de altura y distancias se debe ajustar los tornillos de sujeción de las antenas con los pedestales, para no tener problemas con los movimientos que se realice posteriormente. Los cables coaxiales también deben estar ajustados con una presión considerable en sus conectores. En las figuras 3.35 y 3.36 se observan los ajustes en

cuanto a distancias y mediciones previas antes de realizar las pruebas.



Figura 3.35 Ajustes de las antenas



Figura 3.36 Ajustes de los cables coaxiales

Como última medida de precaución se realiza mediciones de continuidad entre las puntas de los conectores con la finalidad de determinar si la antena se encuentra en cortocircuito ya que esto podría dañar el USRP y el radar no funcionaría como se espera.



Figura 3.37 Revisión de continuidad y corto en las antenas

4. Resultados

Se realiza la configuración en GNU Radio del sistema FMCW de radar para objetivos móviles, en la figura 4.1 se muestra diagrama de configuración en GNU Radio.

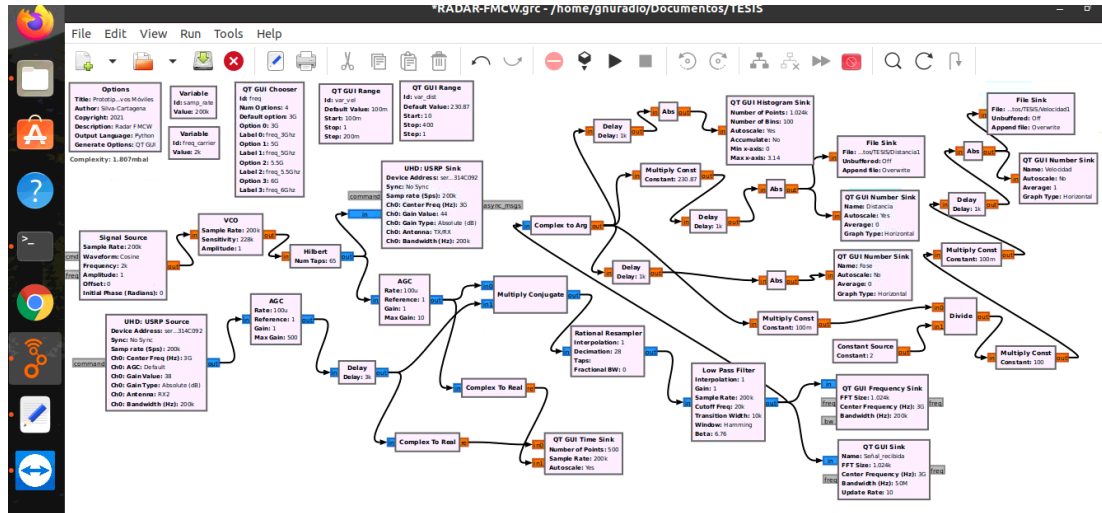


Figura 4.1 Diagrama de bloques de la programación en GNU Radio.

Como se puede observar en el diagrama anterior, la programación en GNU Radio se basa en diagramas de bloques que deben ser configurados con parámetros que se establecen en base a la teoría de comunicaciones digitales y en este caso en base a al radar FMCW que se va a programar.

Se detalla a continuación cada uno de los diagramas de bloques utilizados:

4.1. Selector QT GUI

Este bloque crea una variable con opciones enumeradas. El widget de interfaz gráfica de usuario se implementa como un cuadro combinado o un grupo de botones de opción. Cuando la etiqueta se deja en blanco, la opción se utiliza como etiqueta. Establezca el número de opciones en "lista" para ingresar una única lista de opciones y etiquetas.

Se establece como tipo de dato flotante, el ID de la variable es "freq", como frecuencia por defecto se establece en 3 GHz y diferentes frecuencias alternativas para pruebas las cuales son: 5, 5.5 y 6 GHz. El selector es en forma de caja.

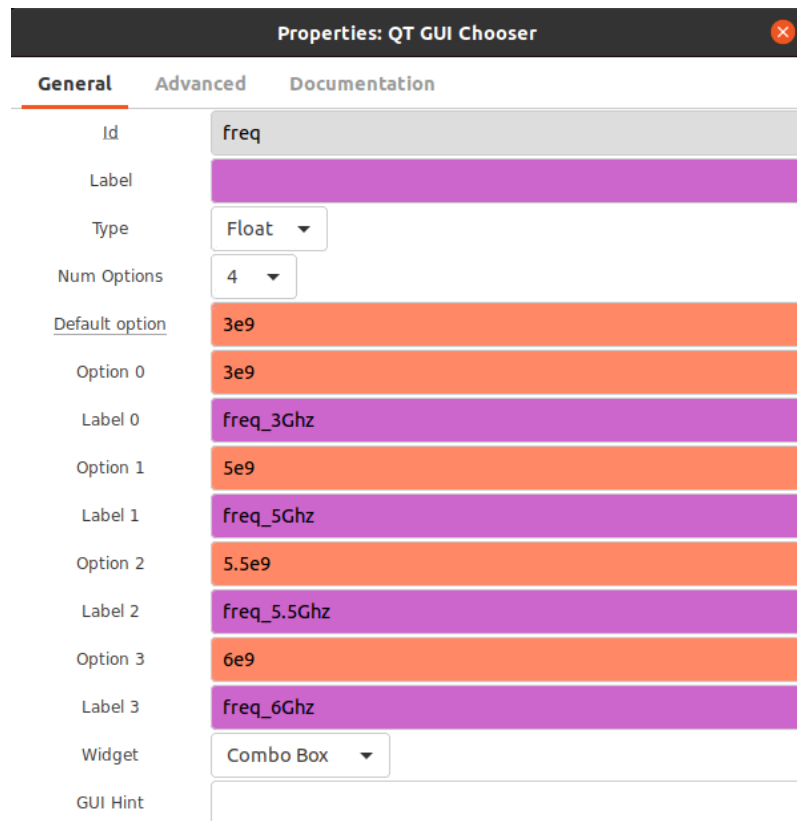


Figura 4.2 Selector QT GUI

4.2. USRP Sink

Bloque utilizado para transmitir muestras a un dispositivo USRP (es decir, actuar como transmisor).

Para ajustar parámetros como la frecuencia central mientras se ejecuta, utilice QT GUI Range u otro control. No es necesario utilizar un bloque de acelerador cuando se utiliza un fregadero de hardware como un fregadero de USRP, porque el USRP actúa como el acelerador (GnuRadio, 2021).

El puerto de mensajes de entrada llamado "comando" se puede utilizar para cambiar la frecuencia, la ganancia y otros parámetros mediante el paso de mensajes. Una disposición común es usar el puerto de mensajes de salida de QT GUI Frequency Sink y conectarlo al puerto de entrada USRP Source / Sink, de modo que cuando un usuario hace doble clic dentro de la GUI para cambiar la frecuencia, el cambio se propaga al USRP dispositivo.

La configuración realizada en device address corresponde al serial del mini usrp, el cual es 314C092. Sync= No Sync, Input Type: Complexfloat32.

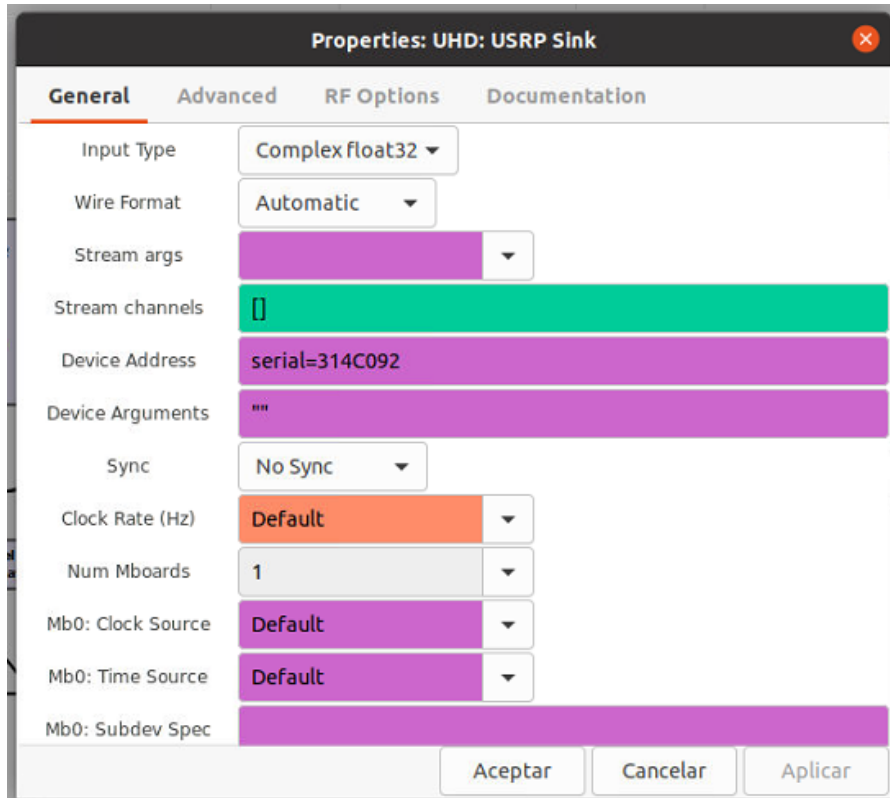


Figura 4.3 USRP Sink opciones generales

En las opciones de RF se configura la variable “freq” como frecuencia central, ganancia de transmisión de 44 db, antena TX/RX y el ancho de banda se setea la variable “samp_rate”.

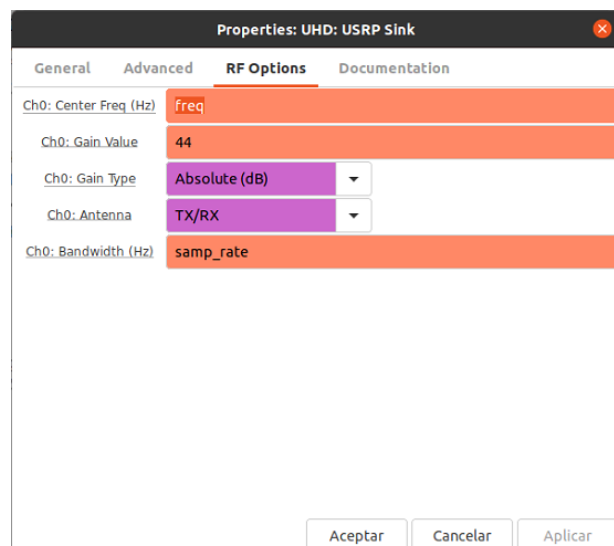


Figura 4.4 USRP Sink RF Options

4.3. Generador de señales

El bloque generador de señales genera una variedad de señales como señales seno, coseno, cuadrado, diente de sierra, triangular, y una constante. Para nuestra configuración se utiliza señal coseno (GnuRadio, 2021).

En la configuración de muestras se coloca la variable "samp_rate", forma de onda coseno, frecuencia "freq_carrier", la amplitud es un valor por defecto de 1, offset y fase inicial en radianes en "0".

El sample rate configurado es de 200 kHz. La señal seleccionada es de forma Coseno.

La frecuencia de carrier (portadora) es de 2 kHz.

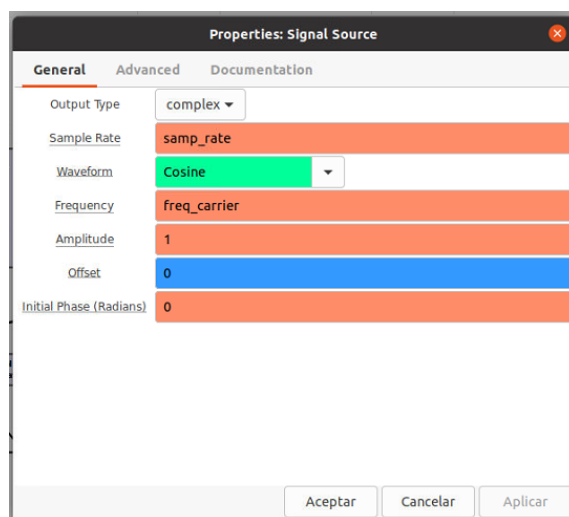


Figura 4.5 Generador de señales

4.4. Señal VCO (Señal Chirp)

La señal VCO es un oscilador controlado por voltaje, produce una señal sinusoidal de frecuencia basada en la amplitud de entrada. Se coloca una señal de sensibilidad de 228 kHz.

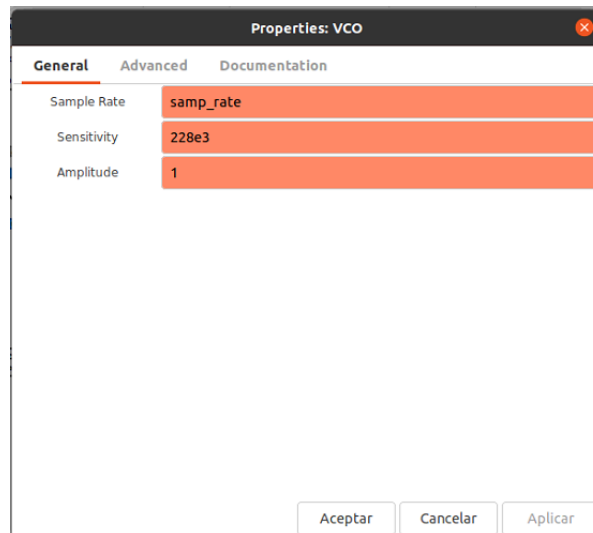


Figura 4.6 Señal VCO Chirp

4.5. USRP Source

El bloque de fuente de USRP se utiliza para transmitir muestras desde un dispositivo de USRP (es decir, actuar como receptor). No es necesario utilizar un bloque de aceleración cuando se utiliza una fuente de hardware como una fuente USRP, porque la USRP actúa como acelerador (GnuRadio, 2021).

Hay dos métodos para configurar los parámetros y ajustarlos mientras se ejecuta.

4.5.1. Variables y widgets de GUI

Los parámetros pueden establecerse mediante un bloque de variables, un widget de GUI como QT GUI Range o directamente en las propiedades del bloque.

4.5.2. Mensajes

El puerto de mensajes de entrada llamado "comando" se puede utilizar para cambiar la frecuencia, la ganancia y otros parámetros mediante el paso de mensajes. Puede encontrar una lista completa de comandos de mensajes en Teclas de comando comunes. Una disposición común es usar el puerto de mensajes de salida del QT GUI Sink para conectarse al puerto de entrada de la fuente USRP, de modo que cuando un usuario hace doble clic dentro de la GUI para cambiar la frecuencia, el cambio se propaga al dispositivo USRP (GnuRadio, 2021).

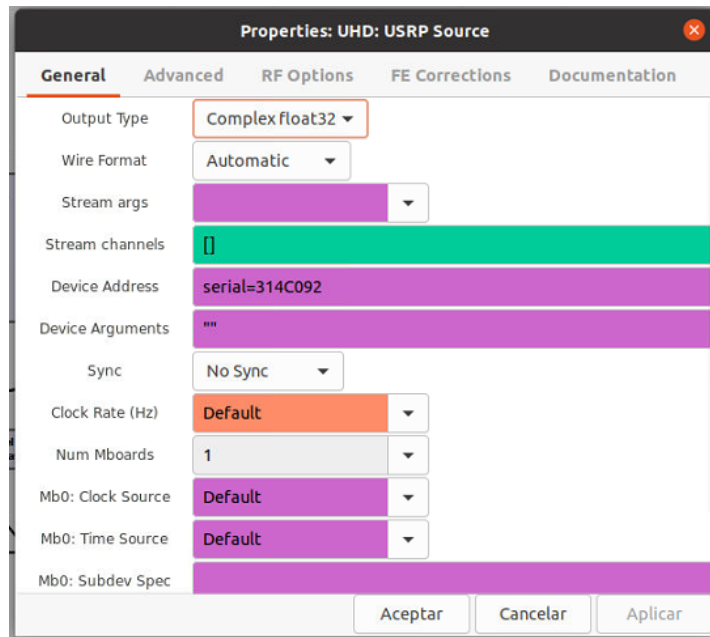


Figura 4.7 USRP Source general

Al igual que el USRP Source se setea los parámetros en “Complexfloat32”, se coloca el serial del dispositivo, “No Sync”. En parámetros de radiofrecuencia se coloca como frecuencia central la variable “freq”, ganancia de recepción de 38 db, antena RX2, y ancho de banda “samp_rate”.

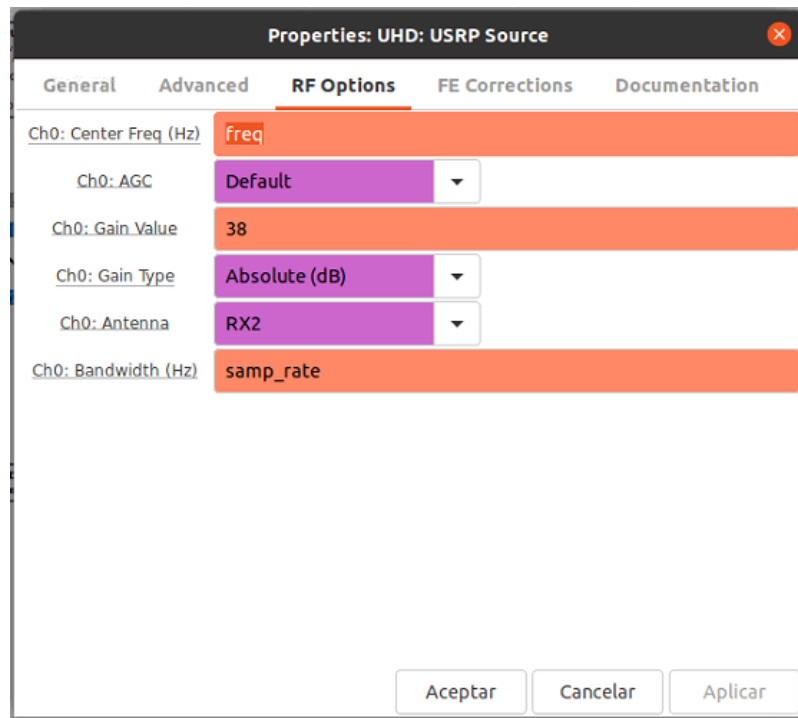


Figura 4.8 USRP Source RF options

4.6. AGC

Control automático de ganancia de alto rendimiento. La potencia se aproxima por valor absoluto. Se setea los valores indicados en la figura 4.9.

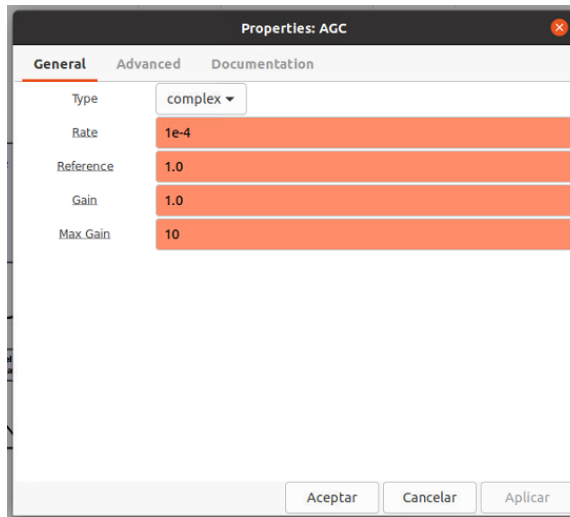


Figura 4.9 AGC

4.7. Pruebas en espacio cerrado y resultados obtenidos del radar FMCW.

Se realizan pruebas en espacio cerrado con las antenas y el USRP.

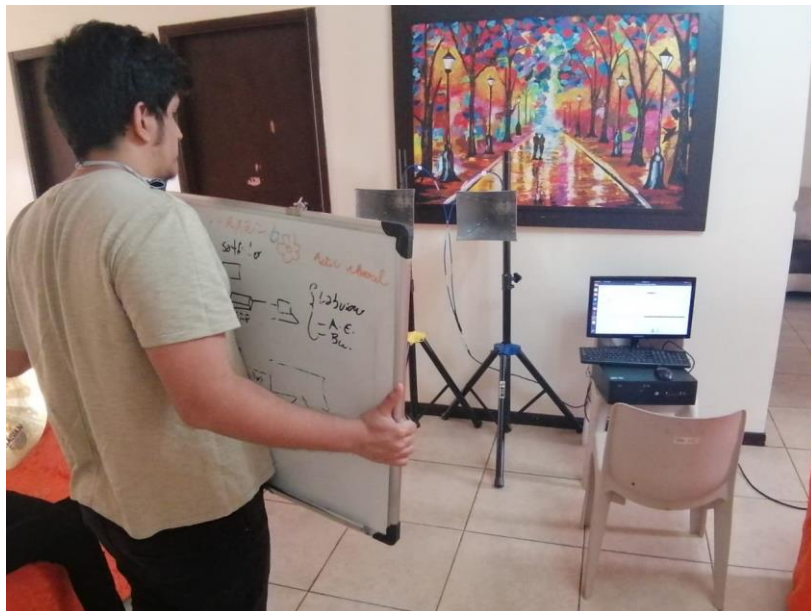


Figura 4.10 Pruebas en espacio cerrado con objetivo móvil

En la figura 4.11 se observa que en las primeras pruebas se utilizó una pizarra metálica para afinar el radar en espacio cerrado.



Figura 4.11 Pruebas a 2 metros de distancia

Las configuraciones iniciales para arrancar el sistema de GNURadio se las realiza mediante consola de Linux.

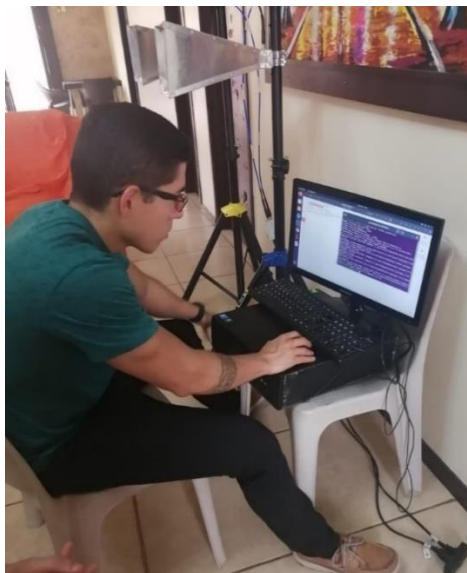


Figura 4.12 Definición de la programación del radar FMCW

Se observa en las figuras 4.13 y 4.14 el banco de pruebas del radar, con el riel, el objetivo móvil, las antenas, cables, el USRP y la PC, estas pruebas fueron en espacio cerrado dentro de una vivienda.

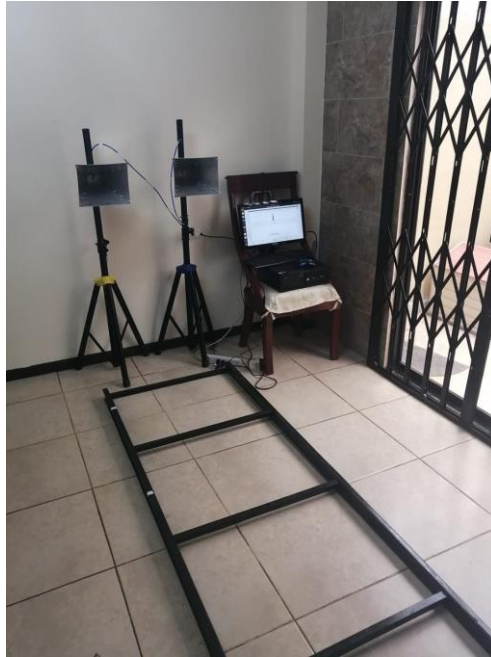


Figura 4.13 Pruebas en interior a 3 mts de distancia



Figura 4.14 Objetivo móvil a 3 mts de distancia

Como resultado a la programación realizada se observan las siguientes gráficas las cuales se detallan en las figuras del 4.15 al 4.19.

Se observa la señal sinusoidal desfasada en el dominio del tiempo, esta representa la señal transmitida y la señal recibida.

Adicional se observa la señal recibida en el dominio de la frecuencia.

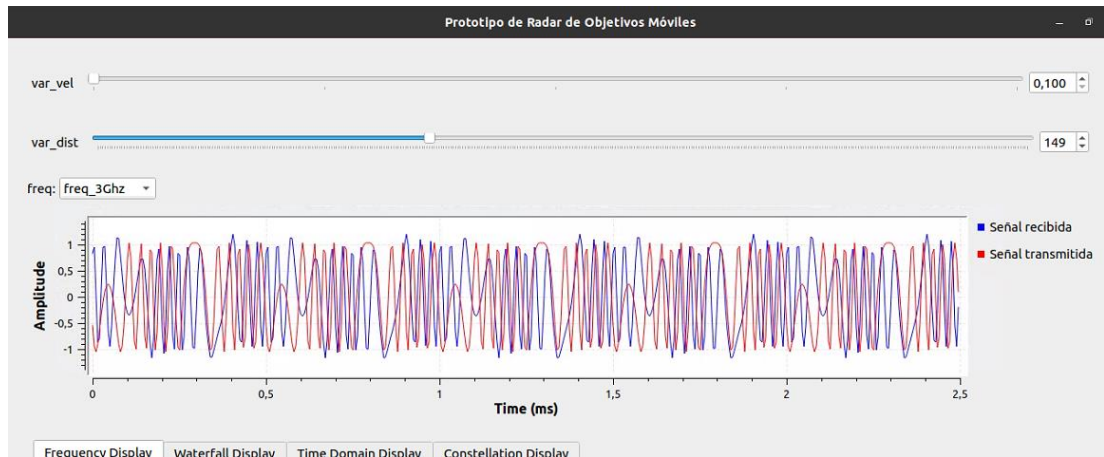


Figura 4.15 Señal recibida en domino del tiempo.

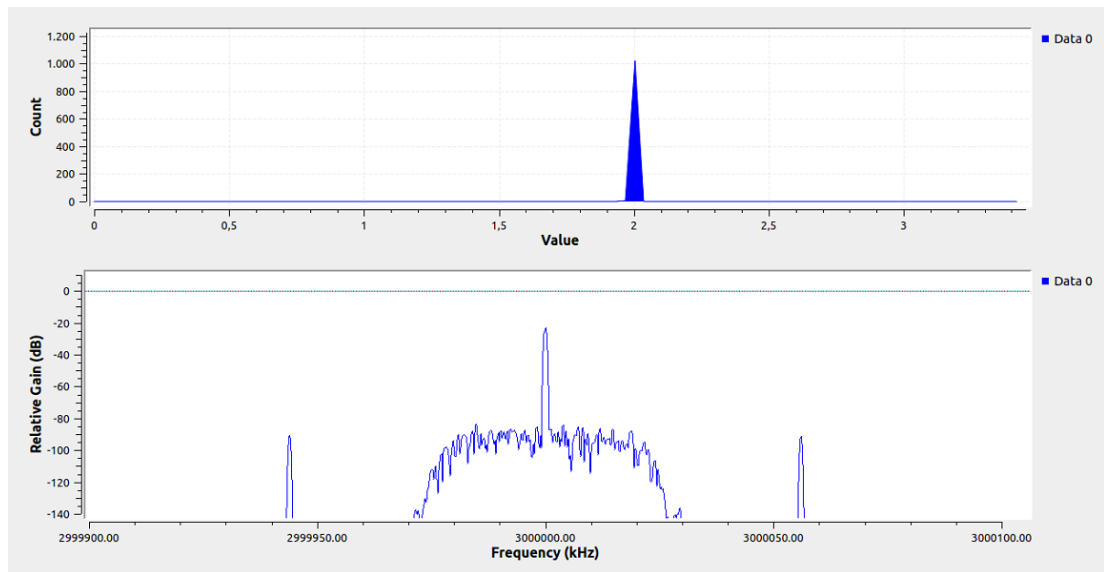


Figura 4.16 Señal recibida en domino de la frecuencia

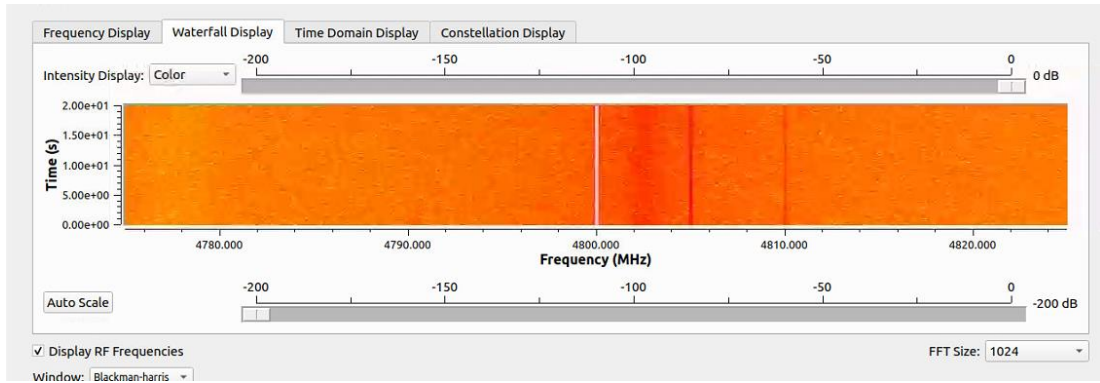


Figura 4.17 Señal recibida mostrada en mapa de calor.

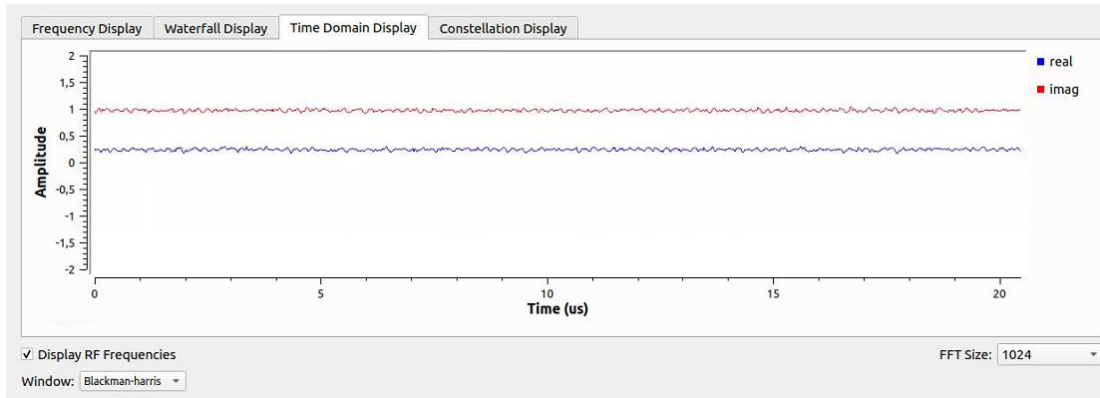


Figura 4.18 Señal en dominio del tiempo.

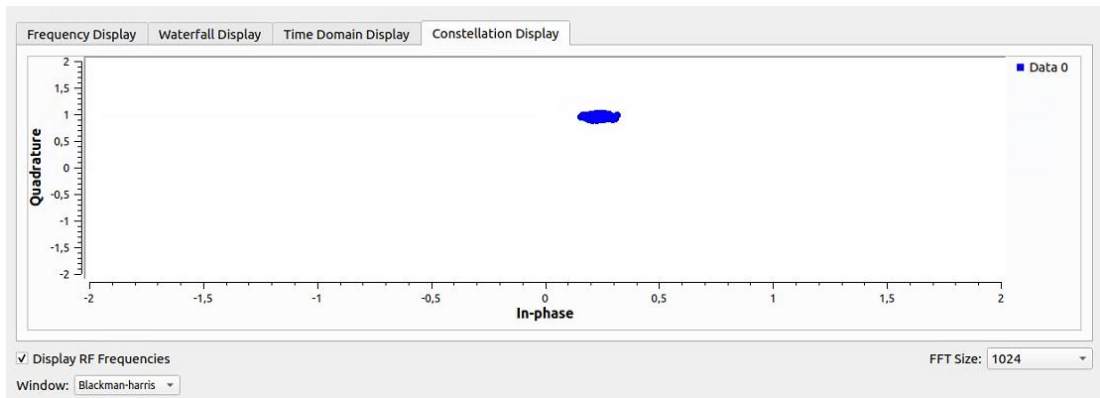


Figura 4.19 Señal en diagrama de constelación.

Para el cálculo de la distancia y la velocidad se usan las fórmulas explicadas en el capítulo de fundamentos teóricos, a nivel de programación se realiza la operación con los cuadros de bloques y como resultado se obtienen valores bien aproximados en distancia y velocidad del objetivo.

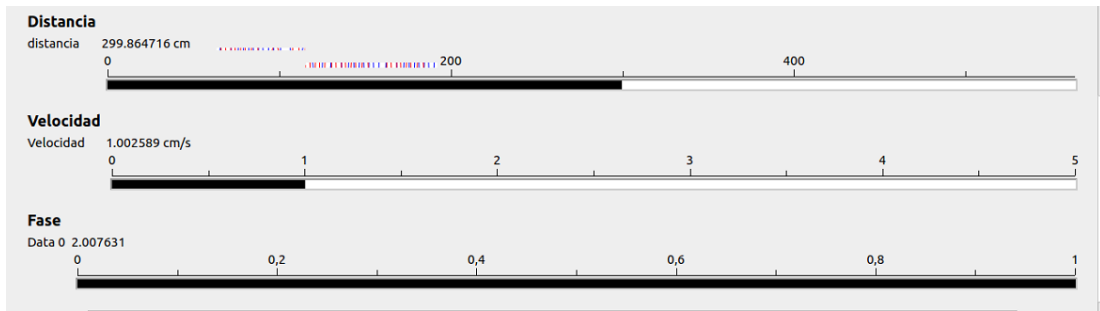


Figura 4.20 Promedio de distancia del objetivo alcanzado por el radar.

El objetivo alcanzado por el radar es mostrado en su desplazamiento de fase mediante las siguientes gráficas, se debe considerar un rango de 3 mts como inicial ya que las pruebas iniciales realizadas en espacios cerrados se situaron en una pared ubicada a 130 cm de las antenas. Al desplazar un objeto reflectante se pudo validar que la distancia variaba, de igual manera la velocidad.

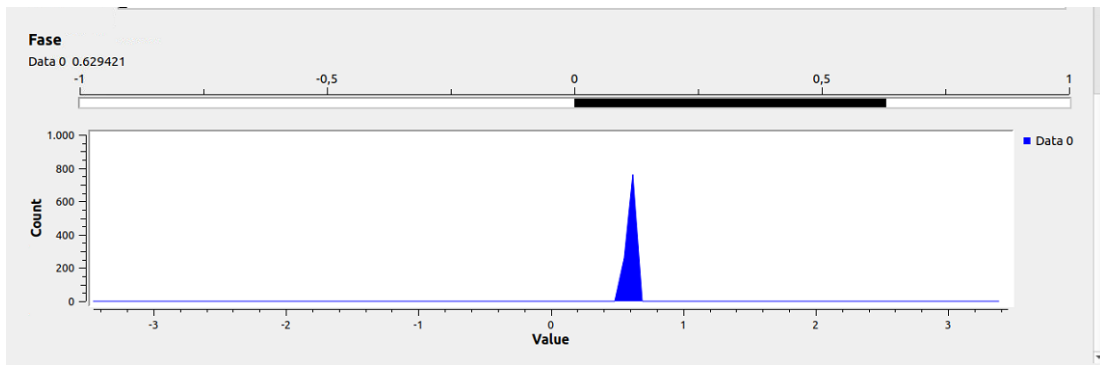


Figura 4.21 Objetivo visto desde un desplazamiento de fase

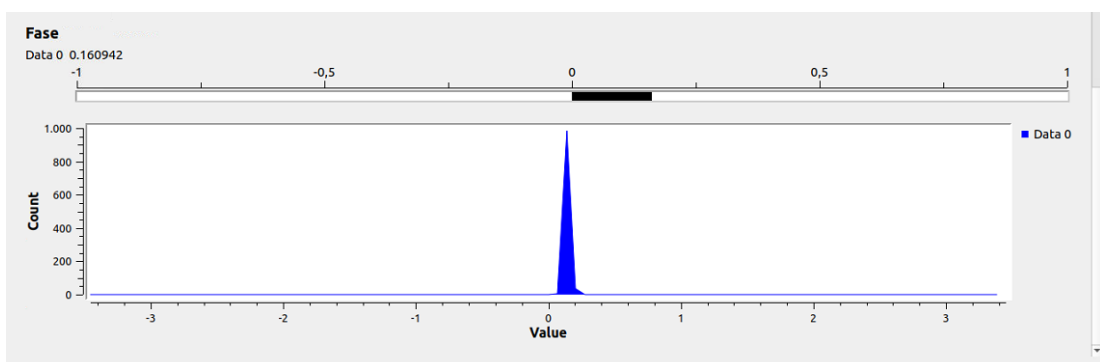


Figura 4.22 Objetivo visto desde un desplazamiento de fase, modificado

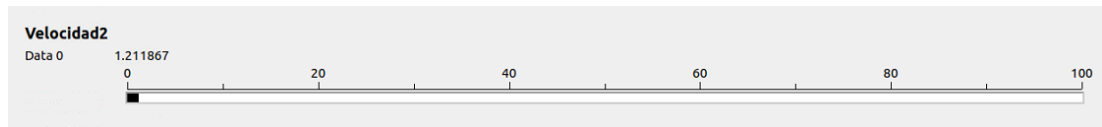


Figura 4.23 Datos de velocidad y distancia

Al ejecutar el programa se puede visualizar la comunicación que se lleva a cabo entre el USRP y el programa.

```
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 9.3.0; Boost_107100; UHD_3.15.0.0-62-g7a3f15
16
[INFO] [B200] Detected Device: B205mini
[INFO] [B200] Operating over USB 2.
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...
[INFO] [B200] Initialize Radio control...
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Setting master clock rate selection to 'automatic'.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 16.000000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 16.000000 MHz.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 51.200000 MHz.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...
[INFO] [B200] OK
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...
[INFO] [B200] OK
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...
[INFO] [B200] OK
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...
[INFO] [B200] OK
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...
[INFO] [B200] OK
```

Figura 4.24 Comunicación del USRP y Python

Id	Value
Imports	
Variables	
freq	<Open Properties>
freq_carrier	10e3
samp_rate	200e3

Figura 4.25 Comunicación USRP

```
[INFO] [B200] Asking for clock rate 16.000000 MHz...  
[INFO] [B200] Actually got clock rate 16.000000 MHz.  
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...  
[INFO] [B200] Actually got clock rate 51.200000 MHz.  
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...  
[INFO] [B200] OK  
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...  
[INFO] [B200] OK  
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...  
[INFO] [B200] OK  
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...  
[INFO] [B200] OK  
[INFO] [B200] Asking for clock rate 51.200000 MHz...  
[INFO] [B200] OK  
  
>>> Done
```

Figura 4.26 Comunicación del USRP

La programación en GNURadio es previa a las pruebas realizadas, observar figura 4.27 y 4.28.

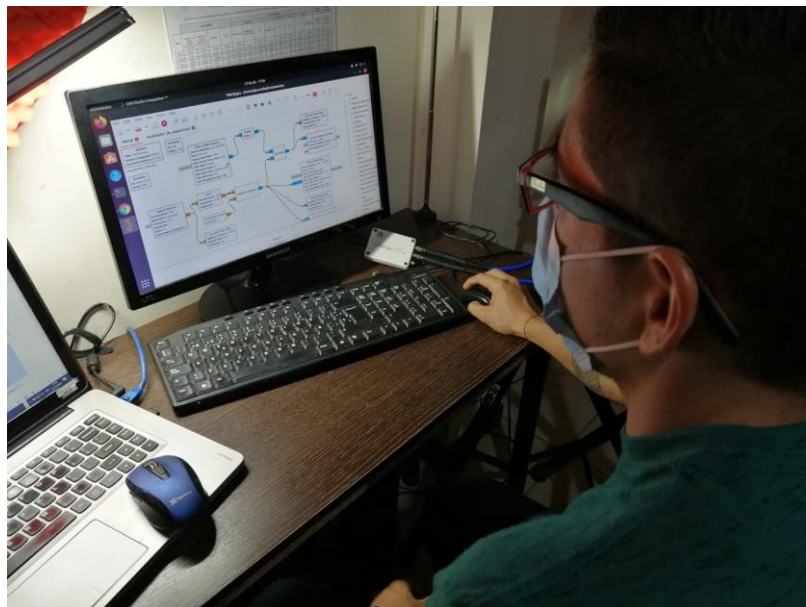


Figura 4.27 Ejecución del programa



Figura 4.28 Revisión del programa

4.8. Pruebas en espacio abierto del radar FMCW.

Las pruebas en campo abierto se realizaron en ciudadela cerrada, se considera el objetivo fijo la montaña ubicada a 50 metros de las antenas, ver figuras 4.29 y 4.30, se realizaron los ajustes necesarios para que se pueda tomar valores aproximados durante las pruebas. Sin embargo, hubo varios factores que determinaban que los resultados sean muy dispersos.

En primer lugar, la potencia de transmisión del USRP es una limitante para campos abiertos debido a que solo se tiene 0 dbm de potencia de salida de transmisión.

Se utilizó frecuencias de 3 GHz y de 5 GHz para verificar mejores resultados sin embargo la información obtenida era muy dispersa por tal motivo se concluye que el prototipo de radar es útil en espacios cerrados específicamente con aplicaciones de prácticas de laboratorio de telecomunicaciones.

Para espacios abiertos se debe disponer de amplificador de potencia para el USRP y trabajar con frecuencias altas en el rango de los 25 GHz. Esta limitante de frecuencia y potencia encarecen el proyecto.



Figura 4.29 Pruebas en campo abierto



Figura 4.30 Revisión de resultados obtenidos

En las figuras del 4.31 al 4.34 se observa los ajustes realizados previos a la radiación de la señal, a pesar de realizar los mismos ajustes realizados en espacios cerrados, no se obtuvo los resultados esperados.



Figura 4.31 Ajustes de pruebas en campo



Figura 4.32 Ajustes de radar



Figura 4.33 Ajustes en altura de antenas



Figura 4.34 Ajustes en altura y distancia de antenas



Figura 4.35 Pruebas con objetivo móvil



Figura 4.36 Pruebas de movimiento de objetivo

4.9. Cálculo de distancia teórica

Los radares FMCW funcionan básicamente a frecuencias de 24 y 77 GHz en la industria automotriz. Para corto alcance de unas decenas de metros es posible utilizar un radar de 24 GHz, mientras que para un largo alcance de alrededor de 250 metros se utiliza un radar a 77 GHz.

Se han llevado a cabo varios trabajos de investigación desde una perspectiva técnica para evaluar diferentes FMCW sistemas de radar, tanto a los 24 como a los 77 GHz, para su uso en la industria automotriz. Sin embargo, en este trabajo de investigación se evalúa con la frecuencia de 3 GHz, debido a que es la frecuencia de operación del USRP y la que mejor se adapta a las pruebas realizadas en campo.

Con el fin de procesar y obtener posición, velocidad y ángulo es necesario considerar diferentes ecuaciones. Estas ecuaciones se derivan de la siguiente idea general acerca del funcionamiento de un radar FMCW. El radar transmite una señal con una frecuencia que varía linealmente (TX) y con un ancho de banda determinado, esta señal se refleja por un cuerpo situado en el espacio radiado de la antena y llega como señal a la antena receptora (RX) con un tiempo de retardo proporcional a la distancia del objeto.

Estas señales se mezclan para obtener una señal de frecuencia intermedia (IF), cuya frecuencia es proporcional a la distancia del objetivo. Por lo tanto, los objetos a diferentes distancias generan señales IF de diferentes frecuencias. Por otro lado, pequeñas diferencias de posición generan diferentes fases de las señales IF que permite determinar la velocidad de los objetivos.

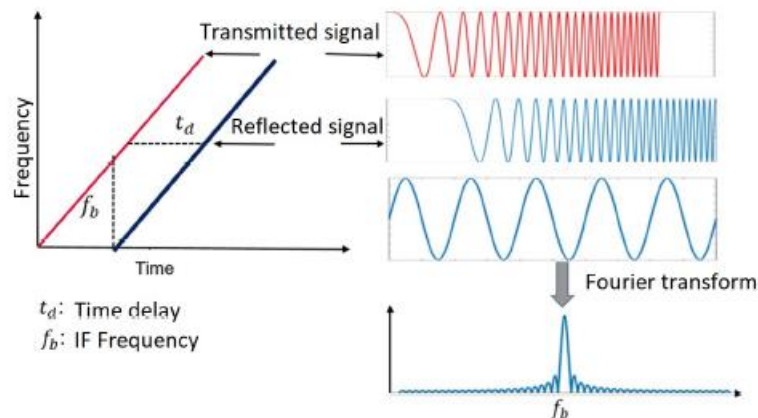


Figura 4.37 Señal de radar FMCW
Fuente: (radartutorial.eu, 2020)

Para los cálculos de distancia y velocidad se toma en cuenta las fórmulas del radar para determinar estos valores.

Para calcular la distancia se toma en cuenta lo siguiente:

$$R = \frac{cT_c f_b}{2B}$$

Donde.

- R es la distancia del objetivo.
- C la velocidad de la luz.
- Tc el tiempo de la señal Chirp.
- fb la frecuencia de la señal IF.
- B el ancho de banda (Bandwith)

Remplazando los valores de acuerdo con las pruebas realizadas en GNURadio se obtiene lo siguiente:

- C = 300000000 m/s
- Frecuencia Chirp = 2 kHz
- Tc (tiempo de señal Chirp) = 0,5 ms
- Fb = es la misma señal de frecuencia de muestreo, 200 kHz.
- B = ancho de banda es el doble de la frecuencia de muestreo, 400 kHz.

$$R = \frac{c T_c f_b}{2B}$$

$$R = \frac{3e^8 \times 0,5e^{-3} \times 200e^3}{2 \times 400e^3}$$

$$R = 37,5 \text{ Km}$$

De acuerdo con la teoría del radar y los valores seteados se necesita un amplificador de potencia suficiente para llegar a la distancia obtenida teóricamente que es de 37 km.

4.10. Cálculo de distancia con simulador web Pasternack

De acuerdo con la página <https://www.pasternack.com/t-calculator-radar-range.aspx> Se puede calcular la distancia del radar considerando la potencia de transmisión, ganancia de antena, frecuencia RF, RCS (radar cross section) y la potencia de recepción.

Considerando que la potencia del USRP es de 44 dbm, no se debe colocar esta potencia en el simulador web, ya que en RF se considera siempre la mitad de potencia por las pérdidas producidas por conectores, cable RF, acoplamiento y distancia del cable. Por lo tanto, se toma en consideración la mitad de potencia 22

dbm.

Calculation

Radar Output Power:

Antenna Gain (linear):

Frequency:

Radar Cross-Sectional Area:

Minimum Detectable Signal:

CALCULATE

Result:
Maximum Range: 3.028 m

Figura 4.38 Simulación web de distancia de radar

De acuerdo con la simulación realizada de la antena en Matlab, se obtiene una ganancia teórica de 16 dbi, el radar cross section del objetivo móvil es de 1,30 metros cuadrados, la potencia mínima de recepción vista en las pruebas es de -25 dbm.

$$Range = \sqrt[4]{\frac{P_r * \sigma * c^2 * G_r^2}{(4\pi)^3 * f_0^2 * P_{min}}}$$

El rango máximo de radar se determina, idealmente hablando, solo en las propiedades de la antena. Una señal a una determinada frecuencia se transmite, se refleja y, con suerte, se detecta. Debido a la propagación tridimensional de las ondas de radar, la frecuencia tiene el peso más alto en la determinación del rango. A menudo, el consumo de energía y el alcance deben equilibrarse para una máxima usabilidad (pasternack.com, n.d.).

4.11. Cálculo de pérdidas en espacio libre

Para el cálculo de pérdidas en el espacio libre se toma en consideración los mismos datos de las pruebas realizadas. El resultado es de 54,52 db de pérdidas lo que significa que para espacio libre se requiere de un amplificador mínimo de 50 Watts para minimizar las pérdidas ocasionadas por el espacio libre donde viajará la onda

del radar. En el siguiente link se pueden realizar estos cálculos <https://www.pasternack.com/t-calculator-fspl.aspx>

The image shows a web-based calculator for Free Space Path Loss (FSPL). It has the following fields and values:

- Distance: 3 Meters
- Frequency: 3 GHz
- Transmitter Gain (dB): 22
- Receiver Gain (dB): -25
- Result: Free Space Path Loss: 54.52 dB

Figura 4.39 Cálculo de pérdidas en el espacio libre
Fuente: (pasternack.com, n.d.)

$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) - G_t - G_r$$

Los cálculos de pérdida de trayectoria en el espacio libre (FSPL) se utilizan a menudo para ayudar a predecir la intensidad de la señal de RF en un sistema de antena. La pérdida aumenta con la distancia, por lo que comprender el FSPL es un parámetro esencial para los ingenieros que trabajan con sistemas de comunicaciones de RF.

4.12. Cálculo de velocidad teórica

La velocidad máxima teórica que se puede obtener se determina de acuerdo con la siguiente formula:

$$V_r = \frac{fd \times c}{2 f}$$

$$v_r = \frac{2KHz \times 3e^8 \text{ m/s}}{2 \times 3 \text{ Ghz}}$$

$$V_r = 100 \text{ m/s}$$

En la práctica el código en GNURadio está seteado para que se mida la velocidad en cm/seg, sin embargo, el oscilador del USRP y las reflexiones que hay cerca del obstáculo impiden capturar una velocidad correcta, por tal motivo el código hace una estimación de velocidad con respecto al movimiento del objetivo.

5. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos con el prototipo fueron satisfactorios a cortas distancias en espacios cerrados y se cumplieron los objetivos planteados al inicio de la investigación.

Es importante indicar que las pruebas se realizaron en un entorno de laboratorio en espacio cerrado y posteriormente en espacio abierto, donde el ruido, la potencia, la frecuencia y la atenuación de las señales fueron un factor determinante para que los resultados difieran entre espacio cerrado y abierto. Por lo tanto, se concluye que en espacio cerrado el prototipo da resultados satisfactorios con respecto a la distancia.

Con respecto a la velocidad se observó que los cambios mínimos en el entorno, las reflexiones y el oscilador del USRP afectaban las mediciones de la velocidad, por lo tanto, se estimó los valores medidos y se presentaron en la pantalla del GNU Radio valores aproximados que oscilan entre los 1 y 2 cmts/seg.

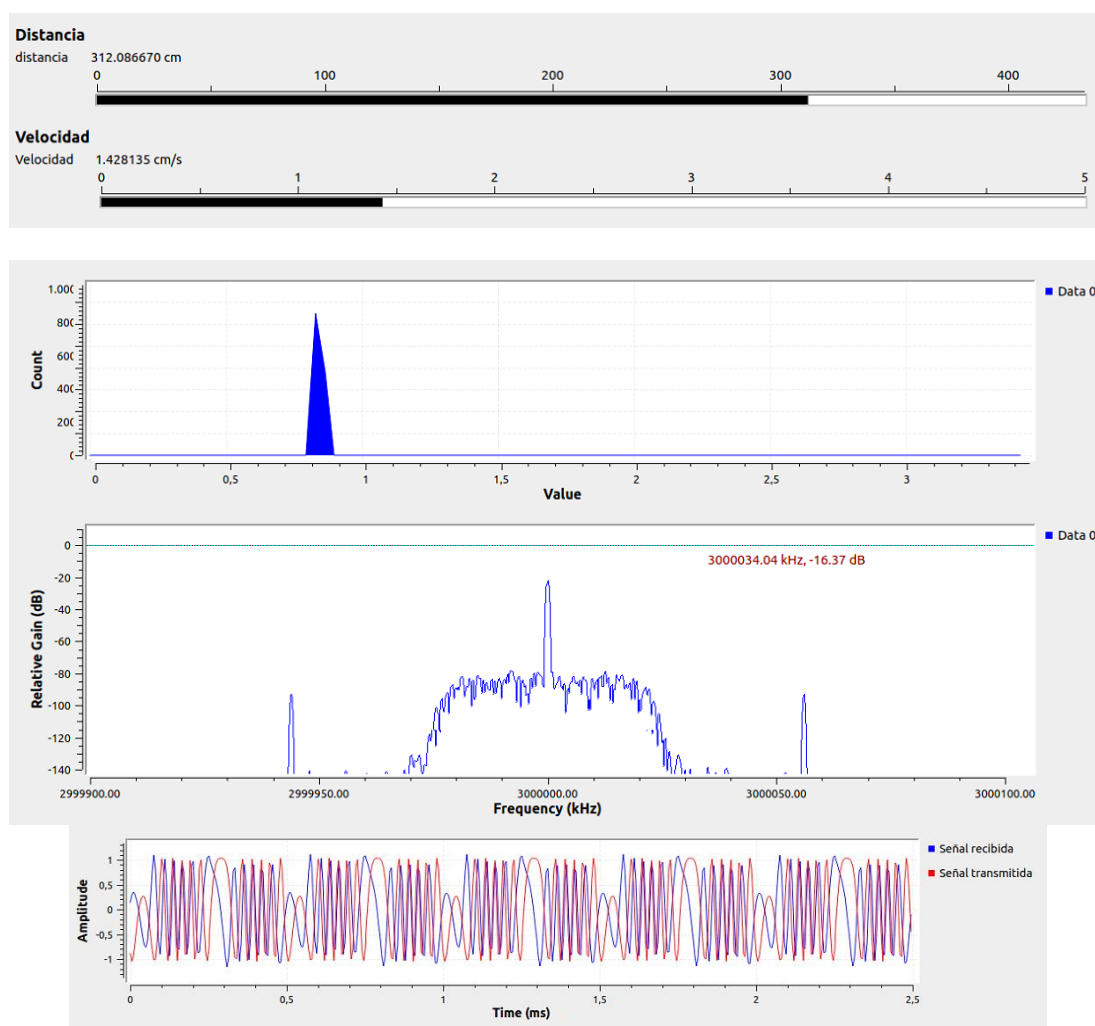


Figura 5.1 Resultados del radar FMCW

Entre los factores determinantes de la investigación está la potencia de transmisión y recepción del USRP ya que estos equipos tienen poca potencia de transmisión, por tal motivo se recomienda conectar un amplificador de RF para poder llegar a mayores distancias y así las pruebas de radares en espacio abierto sea más fiables.

El prototipo de radar de esta investigación se basó en métodos experimentales aplicando la teoría del radar FMCW, mediante el cual se pudo realizar los cálculos de distancia y velocidad y se detectó el objetivo móvil mediante movimientos controlados. Durante las pruebas de movimiento del objetivo se observan los cambios en potencia de las señales recibida.

Tabla 5.1 Mediciones del radar en espacio cerrado

Distancia (cm)	Velocidad (cm/s)	Potencia (dbm)
300	2	-25
200	1	-24
150	1,5	-23
100	1	-22
80	2	-21
50	1,5	-20
20	1	-19

Cabe indicar que todos estos valores obtenidos en el radar se guardan en la PC en formato binario para luego ser analizados con GNU Radio. Los diagramas de bloques para guardar velocidad y distancia son los siguientes:

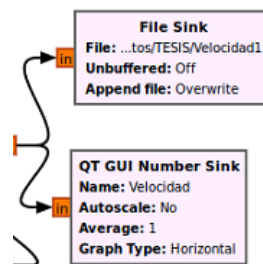


Figura 5.2 Bloque para guardar datos de velocidad

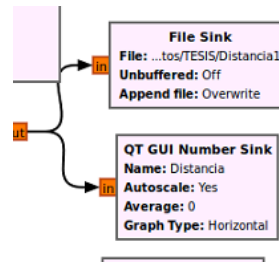


Figura 5.3 Bloque para guardar datos de distancia

Se realizaron pruebas en campo cerrado teniendo mejores resultados que campo abierto ya que se presentaba mucha dispersión de información.

El prototipo de radar de objetivos móviles se calibró para ser utilizado en espacios cerrados adecuado para el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

Mediante técnicas de experimentación también se pudo determinar que la mejor frecuencia de operación es la de 3 GHz, sin embargo, está seteado un selector de frecuencia para que los estudiantes puedan validar resultados con otras frecuencias.

La programación se diseñó para que el estudiante de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones pueda manipular y variar los resultados del radar, en vista que al inicio de la programación se calibra el radar con un objetivo estático y posteriormente se realiza los cálculos de distancias y velocidad del objetivo móvil.

5.1. Comparaciones de pruebas de campo abierto y campo cerrado

Tabla 5.2. Tabla comparativa entre campo abierto y campo cerrado

Pruebas en espacios cerrados	Pruebas en espacios abiertos
Poca dispersión de información.	Gran dispersión de información.
Poco ruido y atenuaciones en el entorno.	Existe más ruido y atenuación en el entorno.
Sin amplificador alcanza poca distancia.	Se necesita un amplificador para alcanzar mayores distancias.
Resultados satisfactorios con respecto a la distancia que se requiere.	Los resultados con respecto a la distancia requerida no fueron satisfactorios
Se trabaja mejor con frecuencias de 3 GHz	Se trabaja mejor con frecuencias altas de 24 GHz.
Se puede medir distancias cortas hasta 3 metros	No se puede medir distancias mayores a 3 metros.
En 3Ghz el RCS es más grande (aviones, barcos)	En 24 GHz el RCS es más pequeño (automóviles)

6. Conclusiones

- Se realizó de manera satisfactoria el cumplimiento del objetivo general que abarca el diseño de un prototipo de radar de objetivos móviles con radio definida por software y GNU Radio. Con este objetivo cumplido se realiza la entrega del proyecto al laboratorio de telecomunicaciones, junto con todos los implementos utilizados en el diseño como es el hardware CPU, cables y antenas para poder utilizarlo con cualquier USRP que se disponga en el laboratorio de telecomunicaciones para los grupos de estudiantes que se dediquen a implementar en futuros trabajos prácticos, la única condición es que el USRP trabaje en rangos desde los 2,4 GHz a 5 GHz, o específicamente con la frecuencia probada en esta investigación de 3 GHz.
- Se realizó el diseño del prototipo de radar utilizando radio definida por software Ettus USRP B205 mini-i, el prototipo es aplicable para utilizarse con cualquier USRP que disponga el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana, sin embargo, para futuros desarrollos se puede adquirir diferentes USRPs de la línea Ettus.
- Se realizó la fabricación de antenas cónicas o horn para el uso del radar de velocidad de bajo costo, con materiales asequibles y de buena calidad, se logra realizar las dos antenas cónicas con un diseño correcto y eficaz de acuerdo con los cálculos obtenidos en los resultados para la fabricación de las antenas que oscilan entre el rango de 3 GHz a 5 GHz de frecuencia.
- Se realizó un manual de práctica del funcionamiento y uso del radar de objetivos móviles mediante radios definidas por software, el entregable del proyecto es el manual para el uso de GNU Radio y el manual para la práctica del radar FMCW de objetivos móviles.
- Se realizó el diseño de un software de radar de velocidad en GNU Radio, mediante la utilización de la codificación por bloques y obteniendo el código de Python, facilitando la codificación siendo un gran aporte cuando se implementa el diseño. Adicional a la investigación se realiza una práctica en simulación con Matlab para obtener datos teóricos con respecto a los radares FMCW para obtener datos simulados para referencia.

7. Recomendaciones

Como recomendaciones se puede detallar las más importantes a continuación:

- El radar FMCW tiene aplicaciones de detección de objetivos y velocidad a larga distancia, muy utilizando para la aeronavegación, por tal motivo se recomienda que para futuras investigaciones se disponga de un amplificador de potencia en la salida del USRP para llegar a objetivos de mayores distancias.
- La fabricación de las antenas se la realizó basándose en los planos de antenas cónicas comerciales, para futuras investigaciones se puede realizar diseño en base a los cálculos de frecuencia, longitud de onda y medidas de la antena. Se realiza simulación con Matlab y APP Antenna Designer para observar los patrones de radiación y diagramas de Azimut y elevación.
- El software GNU Radio configura con código de Python que puede ser utilizado en otras aplicaciones futuras simplificando el uso de CPU o el mismo software GNU Radio que a pesar de ser open source podría suprimirse si solo se utilizara el código de Python con todas las librerías y paquetes necesarios para la ejecución del software.
- El radar FMCW está configurado y calibrado para prácticas en laboratorio en un ambiente controlado, para futuras investigaciones se podría realizar pruebas para ambientes abiertas con distintos objetivos y amplificadores de potencia.

Bibliografía


- "Betancourt Figueroa, B. O., & "Soria Carrascal, F. D. (23 de 1 de 2020). Diseño e implementación de una interface de control para el apuntamiento de una antena en 5.8 GHZ en elevación y Azimut con posición automática y manual.
- "Zuñiga Murillo, S. (11 de 8 de 2014). Diseño e implementación de un sistema de control para generar diagramas de radiación de antenas utilizando la plataforma PXI.
- Andreotti, J. I. (2015). *¿Qué es el BER (Bit Error Rate)?* Buenos Aires - Argentina: Magna Editores.
- Antonio Ricardo Castro, R. J. (2015). *comunicaciones y redes para profesionales en sistemas de informacion*. Mexico DF: alfaomega.
- Antonio Ricardo Castro, R. J. (2020). *comunicaciones y redes para profesionales en sistemas de informacion*. Mexico DF: alfaomega.
- Arias, F. (2013). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica*. Caracas: Editorial Episteme, C.A.
- Arraño, H., & Azurdia, C. (2015). *OFDM: Hoy y en el futuro de las comunicaciones*. Santiago de Chile: XV Congreso Internacional de Telecomunicaciones SENACITEL.
- Cadena Iñiguez, P. (2017). Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias sociales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1603-1617.
- Carlson, A. B., Crilly, P. B., & Rutledge, J. C. (2015). *Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication*. New York: McGraw-Hill Higher Education,.
- Domínguez, A. G. (2012). *calculo de antenas*. Alfaomega.
- EIRL, E. T. (8 de enero de 2017). *Antena Parabolica banda C, Diametro de 2.40 mts*. Obtenido de <http://www.telali.com.pe/antena-parabolica-banda-C-2-40-mts.html>
- El blog de alta definicion HD*. (18 de abril de 2017). Obtenido de <http://altadefinicionbd.blogspot.com/2017/04/movistar-y-el-negro-futuro-de-la-tv-por.html>
- Emilio Monachesi, A. M. (14 de marzo de 2011). *conceptos generales de antenas*. Obtenido de www.edutecne.utn.edu.ar/wlan_frt/antenas.pdf
- Escobar, R. (2016). *Core concepts of GNU Radio*. Obtenido de <http://stg-pepper.blogspot.com/2016/12/iniciando-con-gnu-radio.html>
- Esteban Masque. (2015). *Antenas León*. Obtenido de <http://www.antenasleon.com/>
- Ettus. (2017). *Ettus Research*. Obtenido de https://www.ettus.com/content/images/B205mini-i_Top-Large_1.jpg
- Facal, T. (2015). *GUía para elaborar un proyecto de investigación social*. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Fernández Díaz, J. (2015). *Telecomunicaciones digitales, dispositivos y sistemas*. Nuevo León - México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Forefront.io. (1 de enero de 2013). *la guia absoluta para principiantes de arduino*. Obtenido de <http://forefront.io/a/beginners-guide-to-arduino/>
- Guia usrp 2943. (18 de noviembre de 2016).
- Instrument, N. (28 de agosto de 2016). *USRP RIO*. Obtenido de <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-538>.

- Instrument, N. (1 de abril de 2020). *National instrument*. Obtenido de <http://www.ni.com/white-paper/12985/en/>
- Interfaces y perifericos. (30 de octubre de 2013).
- Joel. (17 de junio de 2015). Motores paso a paso.
- JORGE JAMI, I. V. (2012). Implementación de una guía practica de instalación y operación de un sistema de recepción de televisión satelital banda c para 18 satélites que tienen huella en Ecuador. QUITO, ECUADOR. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4964/1/CD-4503.pdf>
- López Cortez, S. (2015). *Análisis matemático del desempeño de OFDM en función del tiempo de guarda en canales con desvanecimiento selectivo en frecuencia*. Sangolquí - Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas.
- López, E., Zinemanas, P., & Ramos, M. (2016). *Introducción a los sistemas de comunicación*. Rocha - Uruguay: Centro Universitario Regional Este.
- López, J. C. (1 de 11 de 2017). *contaminacion electromagnetica*. Obtenido de <http://www.gigahertz.es/glosario.html>
- López, V. (2016). *Problemas resueltos de electromagnetismo*. Madrid: Editorial Centro de Estudios Ramon Areces S.A.
- Marcano, M. (2018). *Investigación experimental*. Maracaibo - Venezuela: Universidad Fermín Toro.
- Mario. (13 de febrero de 2013). *Neoteo*. Obtenido de <https://www.neoteo.com/electronica-basica-coaxiales/>
- Martínez, E., & Arturo, S. (2012). *Fundamentos de Telecomunicaciones y Redes Convergente*.
- Masero, V. (2015). *Principios de OFDM*. Sevilla - España: Revista de Universidad de Sevilla.
- Muñoz, J. T. (2018). *Comunicaciones digitales 2*. Málaga - España: Editorial RIUMA.
- Patiño, A. C. (10 de mayo de 2007). sistemas de comunicaciones Constantino Perez. 343.
- Prieto Del Amo, C. (2015). *Estimación de canal y desplazamiento de frecuencia en sistemas MIMO-OFDM con prefijo cíclico insuficiente*. Madrid - España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Profesional, t. (8 de mayo de 2015). *Blog tdt profesional*. Obtenido de (<https://www.tdtprofesional.com/blog/lnb-satelites-tipos-y-funcionamiento/>)
- Profesional, t. (8 de mayo de 2020). *Blog tdt profesional*. Obtenido de (<https://www.tdtprofesional.com/blog/lnb-satelites-tipos-y-funcionamiento/>)
- Quesada, P. (2016). *Desarrollo de un sistema de transmisión (emisor-receptor) con módulos bluetooth*. Madrid - España: Universidad Politécnica de Madrid.
- quiminet. (24 de abril de 2006). *quiminet.com*. Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/que-son-los-interruptores-finales-de-carrera-7838.htm>
- Ramirez, D. h. (18 de marzo de 2014). *slide share*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/juandanielhernandezramirez1/tarjeta-de-adquisicin-de-datos>
- Ramirez, D. H. (18 de marzo de 2014). *slideshare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/juandanielhernandezramirez1/tarjeta-de-adquisicin-de-datos>
- Rodríguez, E. (2013). *Metodología de la Investigación*. Villahermosa: Universidad de Juárez Autónoma de Tabasco.

- Rojas, M. (17 de agosto de 2013). *procedimiento de diseño de antenas*. Obtenido de <http://disenoantenas.blogspot.com/>
- Shiloh, M. B. (2016). *Introducción a Arduino*. sites.google.com/. (s.f.). <https://sites.google.com/site/desarrollosticaura/proyecto-de-ict/stdp-y-tba/4-fibra-optica>.
- Suárez, A. (2015). *Sistemas de comunicación digital*. Nuevo León - México: Universidad Autónoma Nuevo León.
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electronicas*. Mexico: prentice hall.
- triana, i. (2 de agosto de 2016). *ingenio triana*. Obtenido de <http://ingenio-triana.blogspot.com/2016/08/control-de-motores-con-arduino.html>
- Universia Costa Rica. (04 de septiembre de 2017). *Tipos de investigación: Descriptiva, Exploratoria y Explicativa*. Obtenido de Universia Costa Rica: <http://noticias.universia.cr/educacion/noticia/2017/09/04/1155475/tipos-investigacion-descriptiva-exploratoria-explicativa.html>
- Uruchima Portilla, A. A. (2016). *Análisis del desempeño de sistemas OFDM con diferentes modulaciones usando Simulink*. Guayaquil - Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Valdeorras, R. (7 de mayo de 2014). *puntitos en el cielo*. Obtenido de <http://puntitosenelcielo.blogspot.com/2014/05/satelites-artificiales-orbitas.html>
- Vazquez Gallardo, S. (2015). Elementos de sistemas de telecomunicaciones.
- Vazquez, S. G. (2015). elementos de sistemas de comunicaciones. 103-105,106. madrid,ESPAÑA: paraninfo.
- Villa, Y. G. (s.f.). www.academia.edu. Obtenido de https://www.academia.edu/22156303/Tarjeta_de_adquisici%C3%B3n_de_datos_DAQ
- Villalpando, J. A. (19 de octubre de 2015). *Antenas*. Obtenido de <http://www.iesromerovargas.es/recursos/elec/sol/est-antenas.htm>
- Viveros, J. (2015). *Principios de comunicaciones digitales*. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Voltimum. (13 de julio de 2010). *voltimum*. Obtenido de <https://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/cable-coaxial>

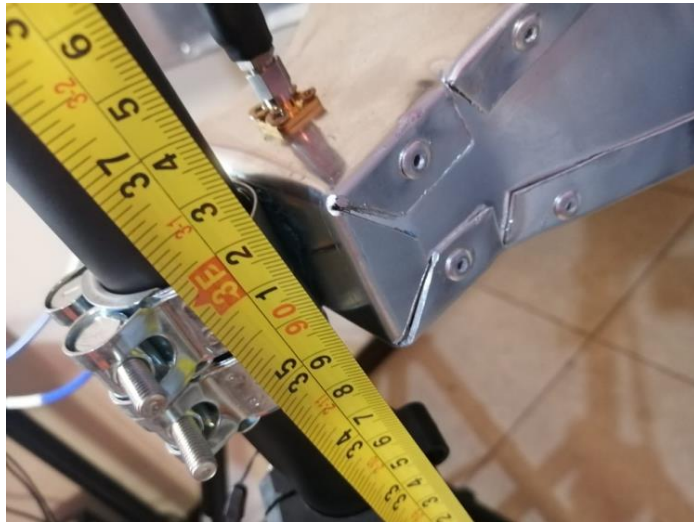
Anexos

Guías de prácticas de laboratorio:

	GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO
CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA	ASIGNATURA: REDES INALÁMBRICAS
NUMERO DE PRÁCTICA: 1	TÍTULO PRÁCTICA: CONFIGURACIÓN DE RADAR FMCW CON GNURADIO Y USRP
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none">• Realizar la configuración del radar FMCW con GNU Radio y el USRP• Configurar el prototipo para la realización de la práctica en laboratorio de telecomunicaciones.• Realizar la configuración de la programación en GNU Radio del radar FMCW.• Analizar los datos obtenidos como velocidad y distancia utilizando las técnicas de radares FMCW.	
PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA <p>En esta práctica se detallan los pasos para la configuración del radar FMCW con Gnuradio y radios definidas por software.</p> <p>Los procedimientos para el desarrollo de la práctica son los siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Realizar la conectorización del prototipo de radar de objetos móviles, verificar que se encuentre de acuerdo con la imagen a continuación:	



2. Con la ayuda de un flexómetro verificar que las distancias entre las antenas (45 cm) y la altura de las antenas (94 cm) estén en parámetros adecuados para las prácticas.



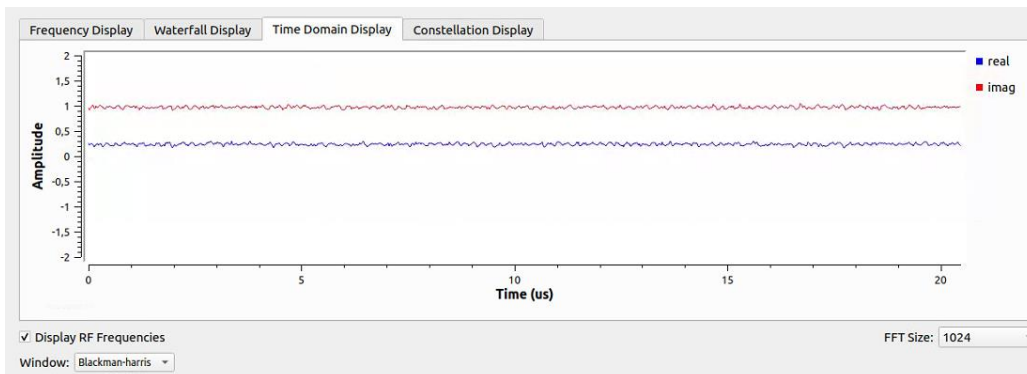
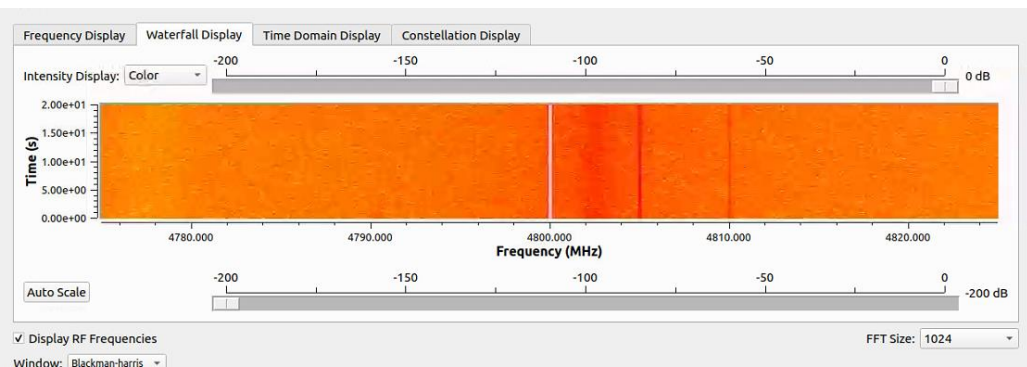
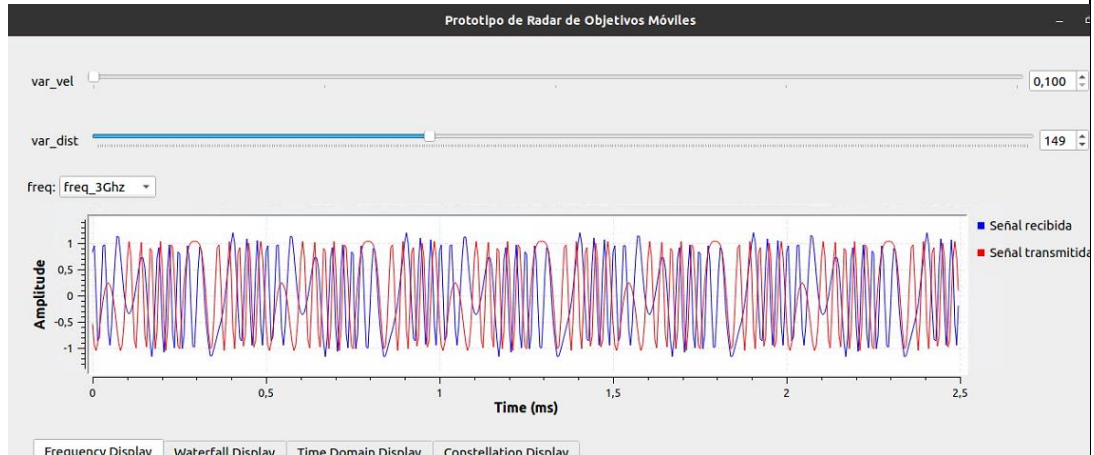


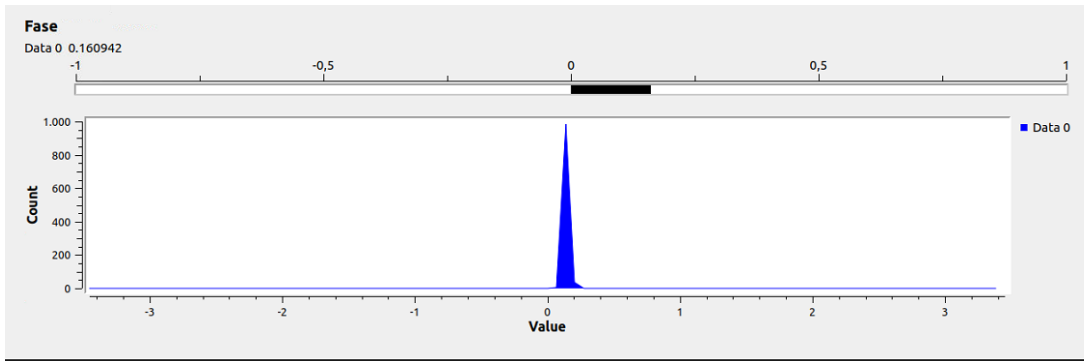
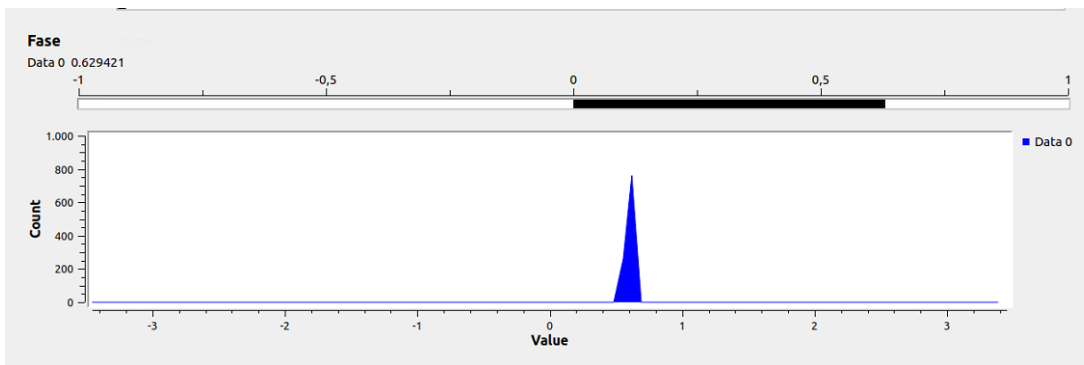
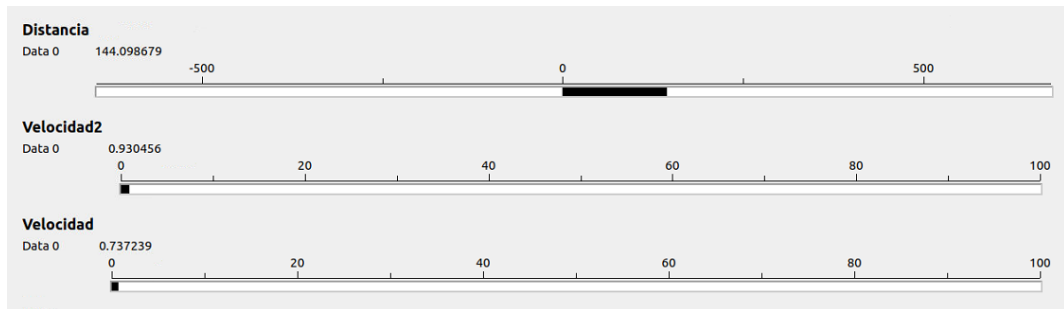
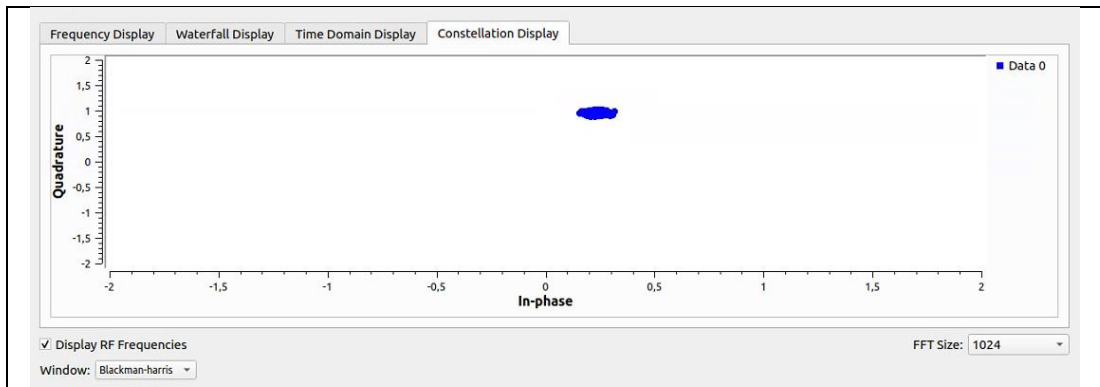
3. Con la ayuda de herramientas verificar que esté ajustadas las antenas y que los conectores estén bien ajustados.

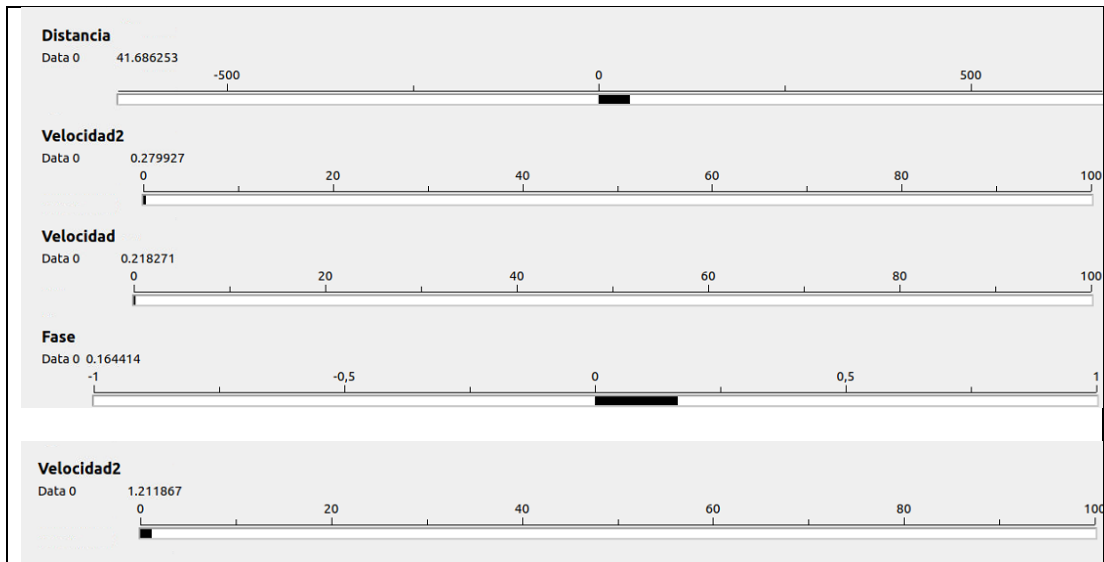


4. Conectar el USRP en el puerto USB 3.0 o 2.0 del CPU (se recomienda puertos USB 3.0).

7. Luego del seteo de los datos en el programa del FMCW de GNU Radio se debe observar las siguientes gráficas como resultados:







- Hay que considerar que el objetivo móvil primero debe ser seteado en una ubicación estática para regular las fórmulas del programa de FMCW. La programación está realizada para un objetivo estático a 300 cmts, el cual al ser movido a otra posición más cercana calcula la distancia y su velocidad. Si se requiere realizar mediciones diferentes se debe reconfigurar el programa de acuerdo con la distancia del objetivo.

Pruebas con el objetivo móvil.

- El estudiante debe realizar pruebas con el objetivo móvil en esta sección de práctica, se debe calibrar el radar para la medida de 3 metros que es el tope máximo del objetivo móvil.







RESULTADO(S) OBTENIDO(S):

El estudiante debe colocar los resultados obtenidos en la práctica con imágenes y descripciones de cada imagen


CONCLUSIONES:

El estudiante debe colocar las conclusiones de las prácticas de acuerdo con los objetivos planteados.

RÚBRICA DE REVISIÓN DE PRÁCTICA:

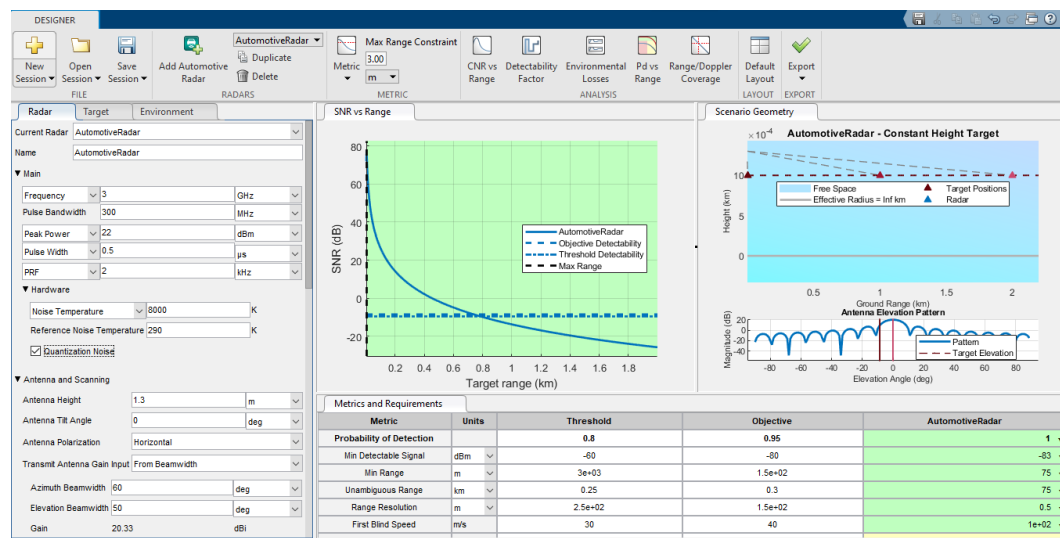
Fecha de realización de la práctica:	
Integrantes del Grupo:	1.- 2.-

	Excelente	Muy Bueno	Bueno	Regular	Malo	Muy Malo	Observaciones
Calidad, orden, evidencia fotográfica y correcta estructuración del desarrollo de la práctica [30% del puntaje]							
Sustentación correcta de las prácticas [30% del puntaje]							
Conclusiones de las prácticas [40% del puntaje]							
PUNTAJE:							/10

	GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO
CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA	ASIGNATURA: REDES INALÁMBRICAS
NUMERO DE PRÁCTICA: 2	TÍTULO PRÁCTICA: SIMULACIÓN CON MATLAB DE RADAR FMCW
<p>OBJETIVOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Simular una práctica de radar FMCW utilizando MATLAB • Utilizar la aplicación Radar Designer de Matlab. • Realizar cálculos con el simulador y analizar resultados del radar FMCW. • Observar las gráficas obtenidas con el radar FMCW simulado en Matlab. 	
<p>PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA</p> <p>En esta práctica se muestra cómo utilizar la aplicación Radar Designer para realizar una simulación de enlaces de radar y diseñar un sistema de radar basado en un conjunto de requisitos de rendimiento.</p> <p>Radar Designer permite a un usuario diseñar un nuevo sistema de radar a partir de uno de los cinco tipos de radar preestablecidos, establecer los requisitos de rendimiento, calcular métricas de radar, configurar el entorno y comparar varios diseños alternativos.</p> <p>La ecuación de rango de radar es una poderosa herramienta que une los principales parámetros de un sistema de radar. Puede dar a un ingeniero de radar una buena idea sobre el rendimiento del sistema sin recurrir a análisis complejos y simulaciones. La ecuación de radar es especialmente útil en las primeras etapas del diseño cuando se informa específicamente sobre varios componentes (por ejemplo, forma de onda transmitida, tamaño o forma de la matriz de antenas, algoritmos de procesamiento de señal, etc.) podría no estar todavía disponible.</p> <p>Aunque la ecuación de radar proporciona sólo resultados aproximados, la fidelidad del análisis se puede mejorar significativamente considerando las pérdidas introducidas por los componentes del sistema de radar y el medio de propagación de la señal.</p> <p>La aplicación Radar Designer es una herramienta para realizar el análisis de ecuaciones de radar también conocido como el análisis presupuestario de enlaces de radar. Proporciona a un usuario muchos parámetros ajustables para el sistema de radar, el objetivo y el medio ambiente, y ofrece un conjunto de visualizaciones para ayudar con una selección de estos parámetros. La aplicación Radar Designer también permite diseñar un sistema de radar basado en un conjunto de requisitos de rendimiento.</p>	

La aplicación Radar Designer se puede iniciar mediante el comando: radarDesigner.

De forma predeterminada, la aplicación permite a un usuario iniciar una sesión nueva o abrir una sesión existente utilizando los botones correspondientes en la pista de herramientas. Una nueva sesión ofrece la elección de uno de los cinco tipos de radares predefinidos: aerotransportado, aeropuerto, automotriz, seguimiento y clima. En esta práctica se utilizará el de automóvil.



Una vez cargada una nueva sesión, la aplicación Radar Designer presenta a un usuario los siguientes grupos de documentos:

- Paneles de radar, objetivo y medio ambiente a la izquierda
- SNR frente a trazados de geometría de rango y escenario en el centro y la derecha
- Tabla de métricas y requisitos en la parte inferior

Como primer paso después de abrir una nueva sesión, cambiamos el nombre del diseño actual en la parte superior del panel Radar a NewDesign.

Métricas y requisitos En este ejemplo tenemos una especificación que detalla el rendimiento del sistema final. Sin embargo, no especifica todos los parámetros de diseño necesarios para alcanzar los niveles de rendimiento requeridos. La mayoría de los parámetros de diseño deben derivarse de los requisitos establecidos en la especificación. La aplicación Radar Designer proporciona una manera de derivar los parámetros de diseño de radar de los requisitos de rendimiento.

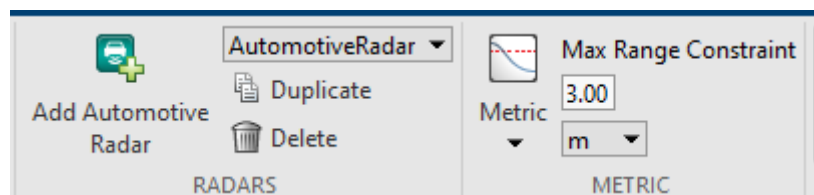
Las métricas de rendimiento y los requisitos correspondientes se encuentran en la

tabla Métricas y requisitos. Para cada métrica de rendimiento, la aplicación tiene dos valores de requisitos:

- Umbral: describe el nivel de rendimiento mínimo para la métrica
- Objetivo: define el valor de la métrica que permitirá al nuevo sistema satisfacer plenamente las necesidades de la misión.

Los valores entre Umbral y Objetivo constituyen el espacio comercial que puede utilizar un ingeniero de radar para equilibrar múltiples requisitos de rendimiento, a veces conflictivos. Las métricas calculadas, que se muestran en la tabla Métricas y requisitos, pueden verse restricciones por el rango máximo o la probabilidad de detección. Una elección de qué variable utilizar como restricción se realiza a través del botón Métrica en la sección Métrica de la tira de herramientas. Seleccionar el rango máximo como restricción significa que las métricas de rendimiento que se muestran en la tabla Métricas y requisitos se calculan en el rango máximo especificado.

Seleccionar la probabilidad de detección como restricción significa que las métricas mostradas se calculan suponiendo el valor especificado de la probabilidad de detección. En este ejemplo se utilizó el rango de 3 metros.



Como siguiente paso rellenamos los valores Umbral y Objetivo de la tabla Métrica y Requisitos con los números especificados en la especificación. En este ejemplo, la especificación proporciona solo un único valor para cada métrica de rendimiento. Utilizamos este valor para establecer el requisito Objetivo. A continuación, establecemos el umbral correspondiente en un valor razonable cercano al Objetivo. Aunque el rendimiento deseado del sistema se define mediante el requisito Objetivo, se considera que el sistema tiene un rendimiento aceptable si se cumple el requisito Umbral.

Esta flexibilidad es necesaria para crear el espacio comercial para seleccionar los parámetros de diseño, que de otro modo podrían ser difíciles o imposibles de elegir. Puesto que, la especificación no proporciona requisitos para todas las métricas que se muestran en la tabla, dejamos los requisitos para estas métricas establecidos en los valores predeterminados.

Metrics and Requirements			
Metric	Units	Threshold	Objective
Probability of Detection		0.75	0.9
Min Detectable Signal	dBm	-70	-90
Min Range	m	5e+02	3e+02
Unambiguous Range	km	8	18
Range Resolution	m	50	30
First Blind Speed	m/s	80	1e+02
Range Rate Resolution	m/s	10	3
Range Accuracy	m	5	2
Azimuth Accuracy	deg	0.4	0.2
Elevation Accuracy	deg	1	0.5
Range Rate Accuracy	m/s	3	1
Probability of True Track		0.95	0.99
Probability of False Track		1e-08	1e-12
Effective Isotropic Radiated Power	MW	1e+03	2.5e+03
Power-Aperture Product	W·m ²	1e+02	2e+02

Parámetros de destino Los parámetros de destino se establecen en el panel Destino.

The screenshot shows the 'Target' configuration panel in the Radar Designer software. It includes the following settings:

- Radar Cross Section:** 1.3 m²
- Swerling Model:** Swerling 0/5
- Height:** 1.3 m
- Max Acceleration:** 10 m/s²

The screenshot shows the 'Environment' configuration panel in the Radar Designer software. The 'Atmosphere and Surface' section is expanded, showing the following options:

- Free Space
- Precipitation

Parámetros de radar después de que se hayan establecido los requisitos y los parámetros de destino, podemos empezar a ajustar los parámetros de diseño del radar de modo que las métricas calculadas cumplan los requisitos establecidos. La aplicación Radar Designer proporciona una forma cómoda de supervisar el estado de las métricas calculadas mientras cambia el valor de los parámetros de diseño.

Las entradas de la tabla Métricas y requisitos están codificadas por colores para indicar el estado de las métricas calculadas. Las métricas que cumplen el requisito objetivo correspondiente se colorean en verde, las métricas con los valores entre umbral y objetivo se colorean en amarillo y las métricas que no cumplen el requisito Umbral se colorean en rojo. Los mismos colores también se utilizan en el trazado SNR vs Range y Pd vs Range para mostrar los rangos en los que se cumplen los

requisitos de detección.

Para garantizar que el objetivo RCS de 1.3 m se detecte en el rango deseado de 3 metros, ajustamos los parámetros de diseño del radar para asegurarnos de que la curva SNR en el SNR frente a. El trazado de rango está por encima de la línea detección objetiva en rango máximo.

Los parámetros de diseño del radar se dividen en cuatro secciones. Cada sección se ajusta de la siguiente manera: • Principal. La frecuencia de funcionamiento del radar y la potencia máxima se establecen en los valores dados en la especificación.

The image shows a software interface for configuring a radar system. It has three tabs: 'Radar', 'Target', and 'Environment'. The 'Radar' tab is active. The configuration is organized into several sections:

- Current Radar:** A dropdown menu set to 'AutomotiveRadar'.
- Name:** A text field containing 'AutomotiveRadar'.
- Main:** A section containing five rows of parameters, each with a dropdown menu, a text input field, and a unit dropdown:
 - Frequency: 3 GHz
 - Pulse Bandwidth: 200 kHz
 - Peak Power: 22 dBm
 - Pulse Width: 0.5 ms
 - PRF: 2 kHz
- Hardware:** A section containing:
 - Noise Temperature: 8000 K
 - Reference Noise Temperature: 290 K
 - Quantization Noise
- Antenna and Scanning:** A section with a right-pointing triangle icon.
- Detection and Tracking:** A section containing:
 - Probability of False Alarm: 1e-06
 - Number of Pulses: 256
 - Pulse Integration: Coherent
 - Constant False Alarm Rate (CFAR)
 - Number of CPIs: 1
 - M-of-N CPI Integration

▼ Antenna and Scanning

Antenna Height m

Antenna Tilt Angle deg

Antenna Polarization

Transmit Antenna Gain Input

Azimuth Beamwidth deg

Elevation Beamwidth deg

Gain 17.32 dBi

Use Different Antenna for Receive

Receive Antenna Gain Input

Azimuth Beamwidth deg

Elevation Beamwidth deg

Gain 33.34 dBi

Scan Mode

▼ Detection and Tracking

Probability of False Alarm

Number of Pulses

Pulse Integration

Constant False Alarm Rate (CFAR)

Number of CPIs

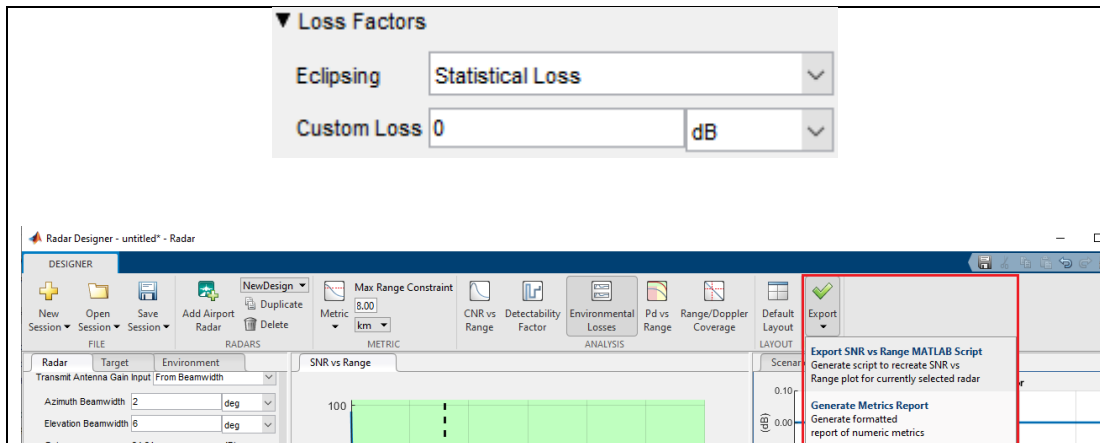
M-of-N CPI Integration

Sensitivity Time Control (STC)

▼ Track Confirmation Logic

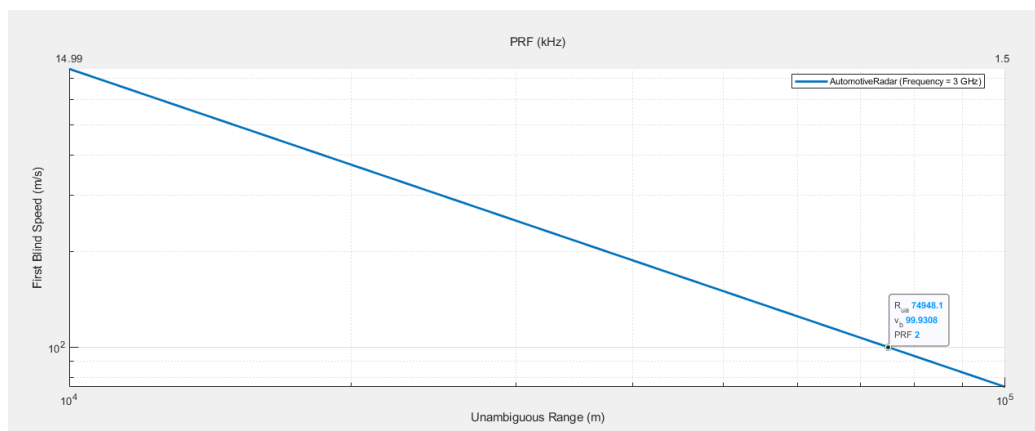
Confirmation Threshold

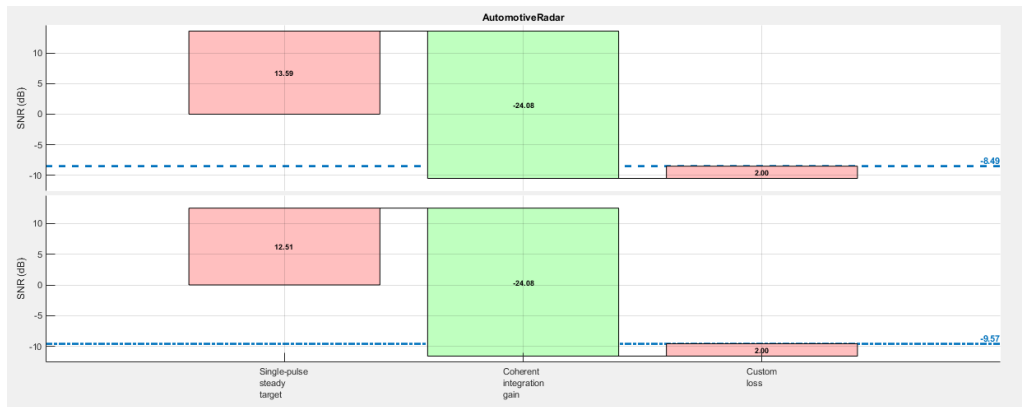
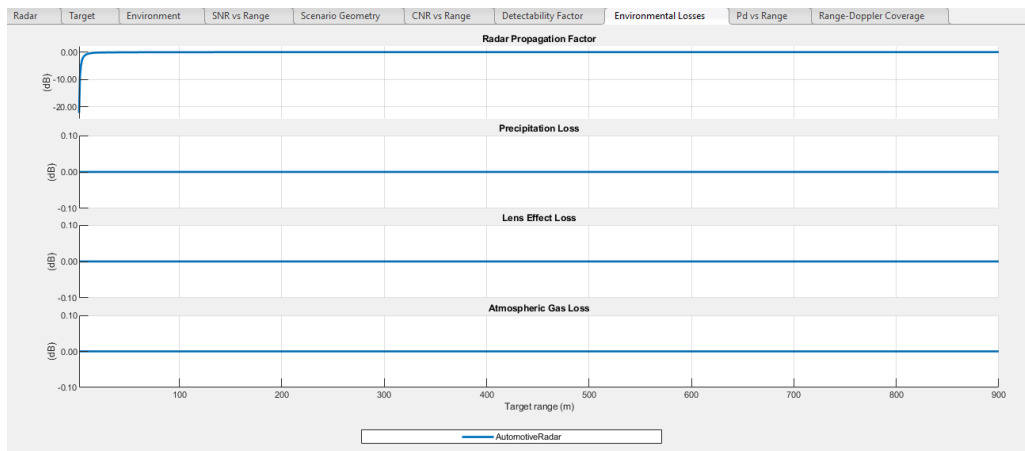
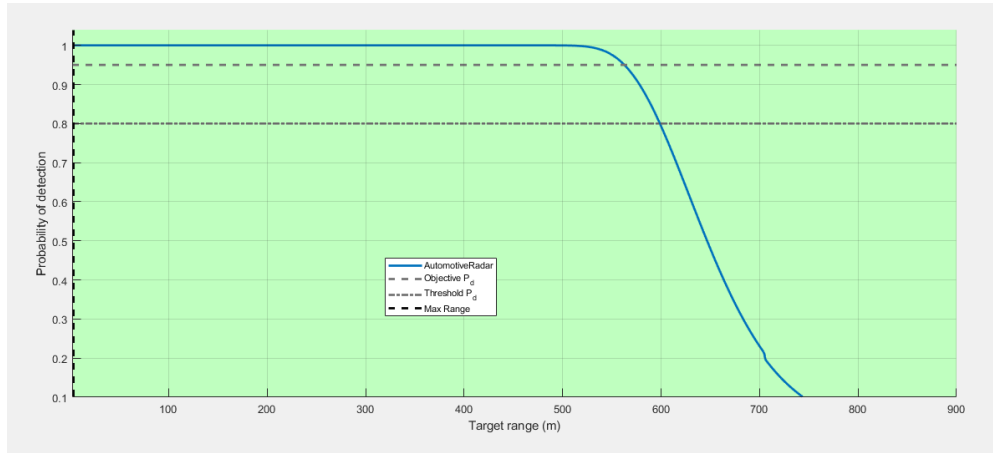
- Pérdidas Factors. To contabilizar pérdidas debido a la eclipsación del pulso añadimos la pérdida estadística eclipsante al análisis del presupuesto de enlaces.

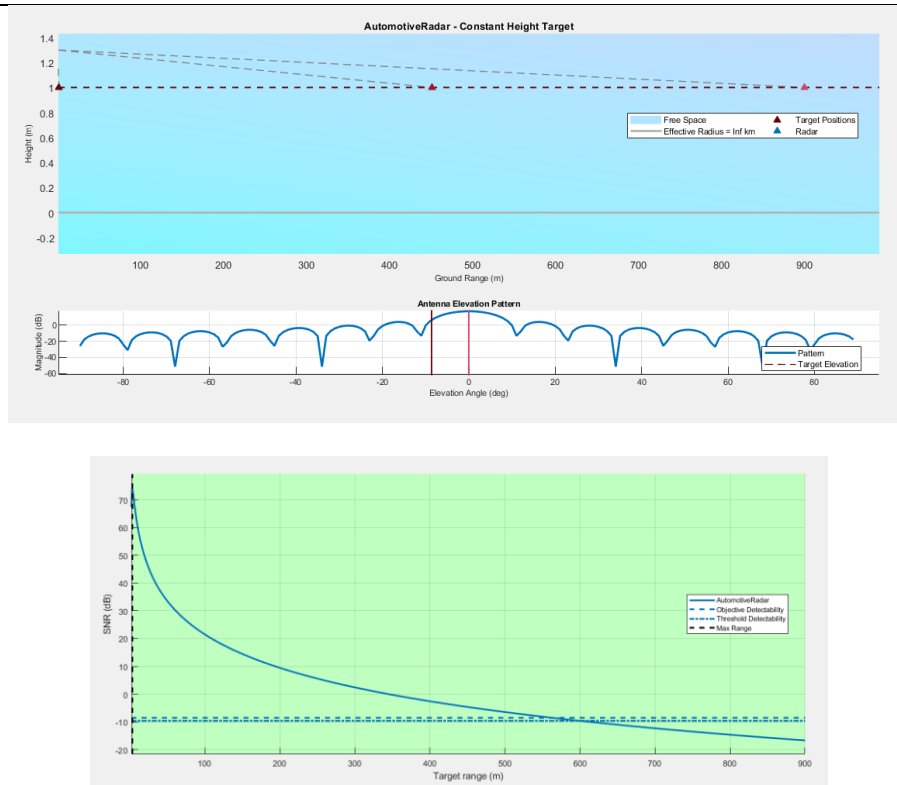


Este ejemplo muestra cómo utilizar la aplicación Radar Designer para realizar un análisis del presupuesto de enlaces de un sistema de radar de vigilancia para detectar objetivos pequeños. El ejemplo comienza con una especificación y un conjunto de requisitos de rendimiento. Muestra cómo establecer los requisitos Objetivo y Umbral en función de los valores proporcionados en la especificación. A continuación, se muestra cómo ajustar los parámetros de diseño del radar con la ayuda de la gráfica SNR vs Range y la codificación de color de semáforo de modo que el diseño cumpla con los requisitos indicados. El ejemplo también muestra cómo cambiar los parámetros de destino para modelar aviones tripulados y no tripulados, y cómo configurar los ajustes del entorno para incluir la pérdida atmosférica debido a la precipitación en el análisis.

Metric	Units	Threshold	Objective	AutomotiveRadar
Probability of Detection		0.8	0.95	1 ✓
Min Detectable Signal	dBm	-60	-80	-83 ✓
Min Range	m	3e+03	1.5e+02	75 ✓
Unambiguous Range	km	0.25	0.3	75 ✓
Range Resolution	m	2.5e+02	1.5e+02	0.5 ✓
First Blind Speed	m/s	30	40	1e+02 ✓
Range Rate Resolution	m/s	1	0.2	0.39 ⚠
Range Accuracy	m	1	0.5	0.025 ✓
Azimuth Accuracy	deg	60	45	3 ✓
Elevation Accuracy	deg	30	15	0.5 ✓
Range Rate Accuracy	m/s	5	3	0.02 ✓
Probability of True Track		0.95	0.99	1 ✓
Probability of False Track		1e-08	1e-12	1e-30 ✓
Effective Isotropic Radiated Power	MW	3e-06	3.4e-06	8.6e-06 ✓
Power-Aperture Product	KW/m²	3.8e-09	4e-09	6.8e-06 ✓







RESULTADO(S) OBTENIDO(S):

El estudiante debe colocar los resultados obtenidos en la práctica con imágenes y descripciones de cada imagen

CONCLUSIONES:

El estudiante debe colocar las conclusiones de las prácticas de acuerdo con los objetivos planteados.

RÚBRICA DE REVISIÓN DE PRÁCTICA:

Fecha de realización de la práctica:	
Integrantes del Grupo:	1.- 2.-

	Excelente	Muy Bueno	Bueno	Regular	Malo	Muy Malo	Observaciones
Calidad, orden, evidencia fotográfica y correcta estructuración del desarrollo de la práctica [30% del puntaje]							
Sustentación correcta de las prácticas [30% del puntaje]							
Conclusiones de las prácticas [40% del puntaje]							
PUNTAJE:							/10

Especificaciones del FPGA del dispositivo USPM B200mini-i

Se presenta a continuación detalle de las estadísticas del FPGA (Ettus, 2021).

Resumen de utilización del dispositivo:

Dispositivo seleccionado: 6slx150csg484-3

Utilización de Slice Logic:

Número de registros de corte: 15949 de 184304 8%

Número de LUT de Slice: 19963 de 92152 21%

Número utilizado como lógica: 16140 de 92152 17%

Número utilizado como memoria: 3823 de 21680 17%

Número utilizado como RAM: 972

Número utilizado como SRL: 2851

Distribución lógica de corte:

Número de pares de flip flop LUT utilizados: 23859

Número con un Flip Flop sin usar: 7910 de 23859 33%

Número con una LUT no utilizada: 3896 de 23859 16%

Número de pares LUT-FF completamente usados: 12053 de 23859 50%

Número de conjuntos de control únicos: 429

Utilización de IO:

Número de IO: 123

Número de IOB vinculadas: 114 de 338 33%

Chanclas / cierres IOB: 147

Utilización de funciones específicas:

Número de bloques RAM / FIFO: 110 de 268 41%

Número que usa solo RAM de bloque: 110

Número de BUFG / BUFGCTRL: 6 de 16 37%

Número de DSP48A1: 76 de 180 42%

Número de PLL_ADV: 1 de 6 16%

Script en Matlab de la simulación de antena

```
% Create a horn antenna
% Generated by MATLAB(R) 9.10 and Antenna Toolbox 5.0.
% Generated on: 04-Apr-2021 16:01:39

%% Antenna Properties

antennaObject = design(horn, 3000*1e6);
antennaObject.FlareLength = 0.315;
antennaObject.FlareWidth = 0.24;
antennaObject.FlareHeight = 0.195;
antennaObject.Length = 0.04;
antennaObject.Width = 0.07;
antennaObject.Height = 0.05;
antennaObject.FeedWidth = 0.002;
antennaObject.FeedHeight = 0.04;
antennaObject.FeedOffset = [-0.001, 0];
antennaObject.Conductor.Name = 'Steel';
antennaObject.Conductor.Conductivity = 6.99*1e6;
antennaObject.Conductor.Thickness = 0.001;
antennaObject.Tilt = 180;
% Show
figure;
show(antennaObject)

%% Antenna Analysis
% Define plot frequency
plotFrequency = 3*1e9;
% Define frequency range
freqRange = (2700:30:3300)*1e6;
% impedance
figure;
impedance(antennaObject, freqRange)
% sparameter
figure;
s = sparameters(antennaObject, freqRange);
rfplot(s)
% pattern
figure;
pattern(antennaObject, plotFrequency)
% azimuth
figure;
patternAzimuth(antennaObject, plotFrequency, 0, 'Azimuth', 0:5:360)
% elevation
figure;
patternElevation(antennaObject, plotFrequency, 0, 'Elevation', 0:5:360)
% current
figure;
current(antennaObject, plotFrequency)
```

Código Python del radar FMCW.

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-

#
# SPDX-License-Identifier: GPL-3.0
#
# GNU Radio Python Flow Graph
# Title: Not titled yet
# Author: gnuradio
# GNU Radio version: 3.8.2.0

from distutils.version import StrictVersion

if __name__ == '__main__':
    import ctypes
    import sys
    if sys.platform.startswith('linux'):
        try:
            x11 = ctypes.cdll.LoadLibrary('libX11.so')
            x11.XInitThreads()
        except:
            print("Warning: failed to XInitThreads()")

from PyQt5 import Qt
from PyQt5.QtCore import QObject, pyqtSlot
from gnuradio import qtgui
from gnuradio.filter import firdes
import sip
from gnuradio import analog
from gnuradio import blocks
from gnuradio import gr
import sys
import signal
from argparse import ArgumentParser
from gnuradio.eng_arg import eng_float, intx
from gnuradio import eng_notation
from gnuradio import uhd
import time

from gnuradio import qtgui

class FMCW2(gr.top_block, Qt.QWidget):

    def __init__(self):
        gr.top_block.__init__(self, "Not titled yet")
        Qt.QWidget.__init__(self)
        self.setWindowTitle("Not titled yet")
        qtgui.util.check_set_qss()
        try:
```

```

        self.setWindowIcon(Qt.QIcon.fromTheme('gnuradio-grc'))
    except:
        pass
    self.top_scroll_layout = Qt.QVBoxLayout()
    self.setLayout(self.top_scroll_layout)
    self.top_scroll = Qt.QScrollArea()
    self.top_scroll.setFrameStyle(Qt.QFrame.NoFrame)
    self.top_scroll_layout.addWidget(self.top_scroll)
    self.top_scroll.setWidgetResizable(True)
    self.top_widget = Qt.QWidget()
    self.top_scroll.setWidget(self.top_widget)
    self.top_layout = Qt.QVBoxLayout(self.top_widget)
    self.top_grid_layout = Qt.QGridLayout()
    self.top_layout.addLayout(self.top_grid_layout)

    self.settings = Qt.QSettings("GNU Radio", "FMCW2")

    try:
        if StrictVersion(Qt.qVersion()) < StrictVersion("5.0.0"):
            self.restoreGeometry(self.settings.value("geometry").toByteArray())
        else:
            self.restoreGeometry(self.settings.value("geometry"))
    except:
        pass

#####
# Variables
#####
self.samp_rate = samp_rate = 200e3
self.freq_carrier = freq_carrier = 10e3
self.freq = freq = 4.8e9

#####
# Blocks
#####
# Create the options list
self._freq_options = (4.8e9, 5e9, )
# Create the labels list
self._freq_labels = ('freq_4.8Ghz', 'freq_5Ghz', )
# Create the combo box
# Create the radio buttons
self._freq_group_box = Qt.QGroupBox('freq' + ": ")
self._freq_box = Qt.QHBoxLayout()
class variable_chooser_button_group(Qt.QButtonGroup):
    def __init__(self, parent=None):
        Qt.QButtonGroup.__init__(self, parent)
        @pyqtSlot(int)
        def updateButtonChecked(self, button_id):
            self.button(button_id).setChecked(True)
self._freq_button_group = variable_chooser_button_group()
self._freq_group_box.setLayout(self._freq_box)
for i, _label in enumerate(self._freq_labels):

```

```

        radio_button = Qt.QRadioButton(_label)
        self._freq_box.addWidget(radio_button)
        self._freq_button_group.addButton(radio_button, i)
        self._freq_callback = lambda i:
Qt.QMetaObject.invokeMethod(self._freq_button_group, "updateButtonChecked",
Qt.Q_ARG("int", self._freq_options.index(i)))
        self._freq_callback(self.freq)
        self._freq_button_group.buttonClicked[int].connect(
            lambda i: self.set_freq(self._freq_options[i]))
        self.top_grid_layout.addWidget(self._freq_group_box)
        self.uhd_usrp_source_0 = uhd.usrp_source(
            ".join(('serial=314C092', "")),
            uhd.stream_args(
                cpu_format="fc32",
                args="",
                channels=list(range(0,1)),
            ),
        )
        self.uhd_usrp_source_0.set_center_freq(freq, 0)
        self.uhd_usrp_source_0.set_gain(60, 0)
        self.uhd_usrp_source_0.set_antenna('RX2', 0)
        self.uhd_usrp_source_0.set_bandwidth(samp_rate, 0)
        self.uhd_usrp_source_0.set_samp_rate(samp_rate)
        # No synchronization enforced.
        self.uhd_usrp_sink_0 = uhd.usrp_sink(
            ".join(('serial=314C092', "")),
            uhd.stream_args(
                cpu_format="fc32",
                args="",
                channels=list(range(0,1)),
            ),
        )
        self.uhd_usrp_sink_0.set_center_freq(freq, 0)
        self.uhd_usrp_sink_0.set_gain(50, 0)
        self.uhd_usrp_sink_0.set_antenna('TX/RX', 0)
        self.uhd_usrp_sink_0.set_bandwidth(samp_rate, 0)
        self.uhd_usrp_sink_0.set_samp_rate(samp_rate)
        # No synchronization enforced.
        self.qtgui_time_sink_x_0 = qtgui.time_sink_f(
            500, #size
            samp_rate, #samp_rate
            "", #name
            2 #number of inputs
        )
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_update_time(0.20)
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_y_axis(-1, 1)

        self.qtgui_time_sink_x_0.set_y_label('Amplitude', "")

        self.qtgui_time_sink_x_0.enable_tags(True)
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_trigger_mode(qtgui.TRIG_MODE_FREE,

```

```

qtgui.TRIG_SLOPE_POS, 0.0, 0, 0, "")
self.qtgui_time_sink_x_0.enable_autoscale(False)
self.qtgui_time_sink_x_0.enable_grid(True)
self.qtgui_time_sink_x_0.enable_axis_labels(True)
self.qtgui_time_sink_x_0.enable_control_panel(False)
self.qtgui_time_sink_x_0.enable_stem_plot(False)

labels = ['Signal 1', 'Signal 2', 'Signal 3', 'Signal 4', 'Signal 5',
'Signal 6', 'Signal 7', 'Signal 8', 'Signal 9', 'Signal 10']
widths = [1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1]
colors = ['blue', 'red', 'green', 'black', 'cyan',
'magenta', 'yellow', 'dark red', 'dark green', 'dark blue']
alphas = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0]
styles = [1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1]
markers = [-1, -1, -1, -1, -1,
-1, -1, -1, -1, -1]

for i in range(2):
    if len(labels[i]) == 0:
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_line_label(i, "Data {0}".format(i))
    else:
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_line_label(i, labels[i])
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_line_width(i, widths[i])
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_line_color(i, colors[i])
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_line_style(i, styles[i])
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_line_marker(i, markers[i])
        self.qtgui_time_sink_x_0.set_line_alpha(i, alphas[i])

self._qtgui_time_sink_x_0_win =
sip.wrapinstance(self.qtgui_time_sink_x_0.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.top_grid_layout.addWidget(self._qtgui_time_sink_x_0_win)
self.qtgui_sink_x_0 = qtgui.sink_c(
    1024, #fftsize
    firdes.WIN_BLACKMAN_hARRIS, #wintype
    freq, #fc
    50e6, #bw
    "Señal_recibida", #name
    True, #plotfreq
    True, #plotwaterfall
    True, #plottime
    True #plotconst
)
self.qtgui_sink_x_0.set_update_time(1.0/10)
self._qtgui_sink_x_0_win = sip.wrapinstance(self.qtgui_sink_x_0.pyqwidget(),
Qt.QWidget)

self.qtgui_sink_x_0.enable_rf_freq(True)

```

```

self.top_grid_layout.addWidget(self._qtgui_sink_x_0_win)
self.qtgui_number_sink_0_2 = qtgui.number_sink(
    gr.sizeof_float,
    0,
    qtgui.NUM_GRAPH_HORIZ,
    1
)
self.qtgui_number_sink_0_2.set_update_time(0.10)
self.qtgui_number_sink_0_2.set_title("Distancia")

labels = [",", " ", " ", " ", " ",
          " ", " ", " ", " ", " "]
units = [",", " ", " ", " ", " ",
         " ", " ", " ", " ", " "]
colors = [("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"),
("black", "black"),
         ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"),
("black", "black")]
factor = [1, 1, 1, 1, 1,
         1, 1, 1, 1, 1]

for i in range(1):
    self.qtgui_number_sink_0_2.set_min(i, -1)
    self.qtgui_number_sink_0_2.set_max(i, 1)
    self.qtgui_number_sink_0_2.set_color(i, colors[i][0], colors[i][1])
    if len(labels[i]) == 0:
        self.qtgui_number_sink_0_2.set_label(i, "Data {0}".format(i))
    else:
        self.qtgui_number_sink_0_2.set_label(i, labels[i])
        self.qtgui_number_sink_0_2.set_unit(i, units[i])
        self.qtgui_number_sink_0_2.set_factor(i, factor[i])

self.qtgui_number_sink_0_2.enable_autoscale(True)
self._qtgui_number_sink_0_2_win = sip.wrapinstance(self.qtgui_number_sink_0_2.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.top_grid_layout.addWidget(self._qtgui_number_sink_0_2_win)
self.qtgui_number_sink_0_0_0 = qtgui.number_sink(
    gr.sizeof_int,
    1,
    qtgui.NUM_GRAPH_HORIZ,
    1
)
self.qtgui_number_sink_0_0_0.set_update_time(0.1)
self.qtgui_number_sink_0_0_0.set_title("Velocidad2")

labels = [",", " ", " ", " ", " ",
          " ", " ", " ", " ", " "]
units = [",", " ", " ", " ", " ",
         " ", " ", " ", " ", " "]
colors = [("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"),
("black", "black")]

```



```

        ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"),
("black", "black")]
        factor = [1, 1, 1, 1, 1,
                  1, 1, 1, 1, 1]

for i in range(1):
    self.qtgui_number_sink_0_0_0.set_min(i, 0)
    self.qtgui_number_sink_0_0_0.set_max(i, 100)
    self.qtgui_number_sink_0_0_0.set_color(i, colors[i][0], colors[i][1])
    if len(labels[i]) == 0:
        self.qtgui_number_sink_0_0_0.set_label(i, "Data {0}".format(i))
    else:
        self.qtgui_number_sink_0_0_0.set_label(i, labels[i])
        self.qtgui_number_sink_0_0_0.set_unit(i, units[i])
        self.qtgui_number_sink_0_0_0.set_factor(i, factor[i])

self.qtgui_number_sink_0_0_0.enable_autoscale(False)
self._qtgui_number_sink_0_0_0_win =
sip.wrapinstance(self.qtgui_number_sink_0_0_0.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.top_grid_layout.addWidget(self._qtgui_number_sink_0_0_0_win)
self.qtgui_number_sink_0_0 = qtgui.number_sink(
    gr.sizeof_int,
    1,
    qtgui.NUM_GRAPH_HORIZ,
    1
)
self.qtgui_number_sink_0_0.set_update_time(0.1)
self.qtgui_number_sink_0_0.set_title("Velocidad")

labels = ["", "", "", "", "",
          "", "", "", "", ""]
units = ["", "", "", "", "",
         "", "", "", "", ""]
colors = [("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"),
("black", "black"),
          ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"),
("black", "black")]
        factor = [1, 1, 1, 1, 1,
                  1, 1, 1, 1, 1]

for i in range(1):
    self.qtgui_number_sink_0_0.set_min(i, 0)
    self.qtgui_number_sink_0_0.set_max(i, 100)
    self.qtgui_number_sink_0_0.set_color(i, colors[i][0], colors[i][1])
    if len(labels[i]) == 0:
        self.qtgui_number_sink_0_0.set_label(i, "Data {0}".format(i))
    else:
        self.qtgui_number_sink_0_0.set_label(i, labels[i])
        self.qtgui_number_sink_0_0.set_unit(i, units[i])
        self.qtgui_number_sink_0_0.set_factor(i, factor[i])

self.qtgui_number_sink_0_0.enable_autoscale(False)

```

```

self._qtgui_number_sink_0_0_win
sip.wrapinstance(self.qtgui_number_sink_0_0.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.top_grid_layout.addWidget(self._qtgui_number_sink_0_0_win)
self.qtgui_number_sink_0 = qtgui.number_sink(
    gr.sizeof_float,
    0,
    qtgui.NUM_GRAPH_HORIZ,
    1
)
self.qtgui_number_sink_0.set_update_time(0.10)
self.qtgui_number_sink_0.set_title("Fase")

labels = ["", "", "", "", ""],
          ["", "", "", "", ""]
units = ["", "", "", "", ""],
         ["", "", "", "", ""]
colors = [("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"),
("black", "black"),
         ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"), ("black", "black"),
("black", "black")]
factor = [1, 1, 1, 1, 1,
          1, 1, 1, 1, 1]

for i in range(1):
    self.qtgui_number_sink_0.set_min(i, -1)
    self.qtgui_number_sink_0.set_max(i, 1)
    self.qtgui_number_sink_0.set_color(i, colors[i][0], colors[i][1])
    if len(labels[i]) == 0:
        self.qtgui_number_sink_0.set_label(i, "Data {0}".format(i))
    else:
        self.qtgui_number_sink_0.set_label(i, labels[i])
        self.qtgui_number_sink_0.set_unit(i, units[i])
        self.qtgui_number_sink_0.set_factor(i, factor[i])

self.qtgui_number_sink_0.enable_autoscale(False)
self._qtgui_number_sink_0_win
sip.wrapinstance(self.qtgui_number_sink_0.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.top_grid_layout.addWidget(self._qtgui_number_sink_0_win)
self.qtgui_histogram_sink_x_0 = qtgui.histogram_sink_f(
    1024,
    100,
    -3.14,
    3.14,
    "",
    1
)

self.qtgui_histogram_sink_x_0.set_update_time(0.10)
self.qtgui_histogram_sink_x_0.enable_autoscale(False)
self.qtgui_histogram_sink_x_0.enable_accumulate(False)
self.qtgui_histogram_sink_x_0.enable_grid(False)
self.qtgui_histogram_sink_x_0.enable_axis_labels(True)

```

```

labels = ["", "", "", "", "",
          "", "", "", "", ""]
widths = [1, 1, 1, 1, 1,
          1, 1, 1, 1, 1]
colors = ["blue", "red", "green", "black", "cyan",
          "magenta", "yellow", "dark red", "dark green", "dark blue"]
styles = [1, 1, 1, 1, 1,
          1, 1, 1, 1, 1]
markers= [-1, -1, -1, -1, -1,
          -1, -1, -1, -1, -1]
alphas = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
          1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0]

for i in range(1):
    if len(labels[i]) == 0:
        self.qtgui_histogram_sink_x_0.set_line_label(i, "Data {0}".format(i))
    else:
        self.qtgui_histogram_sink_x_0.set_line_label(i, labels[i])
        self.qtgui_histogram_sink_x_0.set_line_width(i, widths[i])
        self.qtgui_histogram_sink_x_0.set_line_color(i, colors[i])
        self.qtgui_histogram_sink_x_0.set_line_style(i, styles[i])
        self.qtgui_histogram_sink_x_0.set_line_marker(i, markers[i])
        self.qtgui_histogram_sink_x_0.set_line_alpha(i, alphas[i])

self._qtgui_histogram_sink_x_0_win =
sip.wrapinstance(self.qtgui_histogram_sink_x_0.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.top_grid_layout.addWidget(self._qtgui_histogram_sink_x_0_win)
self.blocks_multiply_xx_0_0 = blocks.multiply_vff(1)
self.blocks_multiply_xx_0 = blocks.multiply_vff(1)
self.blocks_multiply_const_vxx_1 = blocks.multiply_const_ff(238.73)
self.blocks_multiply_const_vxx_0_0 = blocks.multiply_const_ff(80)
self.blocks_multiply_const_vxx_0 = blocks.multiply_const_ff(80)
self.blocks_multiply_conjugate_cc_0 = blocks.multiply_conjugate_cc(1)
self.blocks_divide_xx_0_0 = blocks.divide_ff(1)
self.blocks_divide_xx_0 = blocks.divide_ff(1)
self.blocks_delay_0 = blocks.delay(gr.sizeof_gr_complex*1, 0)
self.blocks_complex_to_real_1_0 = blocks.complex_to_real(1)
self.blocks_complex_to_real_1 = blocks.complex_to_real(1)
self.blocks_complex_to_arg_0 = blocks.complex_to_arg(1)
self.analog_sig_source_x_0 = analog.sig_source_c(samp_rate,
analog.GR_COS_WAVE, freq_carrier, 1, 0, 0)
self.analog_const_source_x_1_0_0 = analog.sig_source_f(0,
analog.GR_CONST_WAVE, 0, 0, 2*freq)
self.analog_const_source_x_1_0 = analog.sig_source_f(0,
analog.GR_CONST_WAVE, 0, 0, 2.99708e8)
self.analog_const_source_x_1 = analog.sig_source_f(0,
analog.GR_CONST_WAVE, 0, 0, 2)
self.analog_const_source_x_0 = analog.sig_source_f(0,
analog.GR_CONST_WAVE, 0, 0, 3e8/(2*freq))
self.analog_agc_xx_0_0 = analog.agc_cc(1e-4, 1.0, 1.0)

```

```

self.analog_agc_xx_0_0.set_max_gain(500)
self.analog_agc_xx_0 = analog.agc_cc(1e-4, 1.0, 1.0)
self.analog_agc_xx_0.set_max_gain(10)

```

```

#####
# Connections
#####
self.connect((self.analog_agc_xx_0, 0), (self.blocks_complex_to_real_1_0, 0))
self.connect((self.analog_agc_xx_0, 0), (self.blocks_multiply_conjugate_cc_0,
0))
self.connect((self.analog_agc_xx_0_0, 0), (self.blocks_delay_0, 0))
self.connect((self.analog_const_source_x_0, 0), (self.blocks_multiply_xx_0, 0))
self.connect((self.analog_const_source_x_1, 0), (self.blocks_divide_xx_0, 1))
self.connect((self.analog_const_source_x_1_0,
0),
(self.blocks_multiply_xx_0_0, 0))
self.connect((self.analog_const_source_x_1_0_0,
0),
(self.blocks_divide_xx_0_0, 1))
self.connect((self.analog_sig_source_x_0, 0), (self.analog_agc_xx_0, 0))
self.connect((self.analog_sig_source_x_0, 0), (self.uhd_usrp_sink_0, 0))
self.connect((self.blocks_complex_to_arg_0, 0), (self.blocks_divide_xx_0, 0))
self.connect((self.blocks_complex_to_arg_0,
0),
(self.blocks_multiply_const_vxx_1, 0))
self.connect((self.blocks_complex_to_arg_0, 0), (self.blocks_multiply_xx_0_0,
1))
self.connect((self.blocks_complex_to_arg_0,
0),
(self.qtgui_histogram_sink_x_0, 0))
self.connect((self.blocks_complex_to_arg_0, 0), (self.qtgui_number_sink_0, 0))
self.connect((self.blocks_complex_to_real_1, 0), (self.qtgui_time_sink_x_0, 0))
self.connect((self.blocks_complex_to_real_1_0, 0), (self.qtgui_time_sink_x_0,
1))
self.connect((self.blocks_delay_0, 0), (self.blocks_complex_to_real_1, 0))
self.connect((self.blocks_delay_0, 0), (self.blocks_multiply_conjugate_cc_0, 1))
self.connect((self.blocks_divide_xx_0, 0), (self.blocks_multiply_xx_0, 1))
self.connect((self.blocks_divide_xx_0_0,
0),
(self.blocks_multiply_const_vxx_0_0, 0))
self.connect((self.blocks_multiply_conjugate_cc_0,
0),
(self.blocks_complex_to_arg_0, 0))
self.connect((self.blocks_multiply_conjugate_cc_0, 0), (self.qtgui_sink_x_0, 0))
self.connect((self.blocks_multiply_const_vxx_0,
0),
(self.qtgui_number_sink_0_0, 0))
self.connect((self.blocks_multiply_const_vxx_0_0,
0),
(self.qtgui_number_sink_0_0_0, 0))
self.connect((self.blocks_multiply_const_vxx_1,
0),
(self.qtgui_number_sink_0_2, 0))
self.connect((self.blocks_multiply_xx_0, 0), (self.blocks_multiply_const_vxx_0,
0))
self.connect((self.blocks_multiply_xx_0_0, 0), (self.blocks_divide_xx_0_0, 0))
self.connect((self.uhd_usrp_source_0, 0), (self.analog_agc_xx_0_0, 0))

```

```

def closeEvent(self, event):
    self.settings = Qt.QSettings("GNU Radio", "FMCW2")
    self.settings.setValue("geometry", self.saveGeometry())
    event.accept()

def get_samp_rate(self):
    return self.samp_rate

def set_samp_rate(self, samp_rate):
    self.samp_rate = samp_rate
    self.analog_sig_source_x_0.set_sampling_freq(self.samp_rate)
    self.qtgui_time_sink_x_0.set_samp_rate(self.samp_rate)
    self.uhd_usrp_sink_0.set_samp_rate(self.samp_rate)
    self.uhd_usrp_sink_0.set_bandwidth(self.samp_rate, 0)
    self.uhd_usrp_source_0.set_samp_rate(self.samp_rate)
    self.uhd_usrp_source_0.set_bandwidth(self.samp_rate, 0)

def get_freq_carrier(self):
    return self.freq_carrier

def set_freq_carrier(self, freq_carrier):
    self.freq_carrier = freq_carrier
    self.analog_sig_source_x_0.set_frequency(self.freq_carrier)

def get_freq(self):
    return self.freq

def set_freq(self, freq):
    self.freq = freq
    self._freq_callback(self.freq)
    self.analog_const_source_x_0.set_offset(3e8/(2*self.freq))
    self.analog_const_source_x_1_0_0.set_offset(2*self.freq)
    self.qtgui_sink_x_0.set_frequency_range(self.freq, 50e6)
    self.uhd_usrp_sink_0.set_center_freq(self.freq, 0)
    self.uhd_usrp_source_0.set_center_freq(self.freq, 0)

def main(top_block_cls=FMCW2, options=None):

    if StrictVersion("4.5.0") <= StrictVersion(Qt.qVersion()) < StrictVersion("5.0.0"):
        style = gr.prefs().get_string('qtgui', 'style', 'raster')
        Qt.QApplication.setGraphicsSystem(style)
    qapp = Qt.QApplication(sys.argv)

    tb = top_block_cls()

    tb.start()

    tb.show()

    def sig_handler(sig=None, frame=None):
        Qt.QApplication.quit()

```

```
signal.signal(signal.SIGINT, sig_handler)
signal.signal(signal.SIGTERM, sig_handler)

timer = Qt.QTimer()
timer.start(500)
timer.timeout.connect(lambda: None)

def quitting():
    tb.stop()
    tb.wait()

qapp.aboutToQuit.connect(quitting)
qapp.exec_()

if __name__ == '__main__':
    main()
```