



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

SISTEMA DE RADAR PASIVO EN BANDA X EMPLEANDO UN TRANSMISOR COLABORATIVO EMBARCADO

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Aarón Montesa Foncillas

DIRECTORES: José María Núñez Ortuño

Rubén Nocelo López

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

SISTEMA DE RADAR PASIVO EN BANDA X EMPLEANDO UN TRANSMISOR COLABORATIVO EMBARCADO

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El avance de las tecnologías afecta en gran medida a las capacidades de defensa de un país, es por ello que es una obligación de cada país invertir en el desarrollo o adquisición de las tecnologías que le permitan mantener una capacidad de defensa competitiva.

Este trabajo se centra en el desarrollo de un sistema de radar pasivo en banda X (8.2-12.4 GHz) que aproveche las señales emitidas por un emisor colaborativo (la fuerza amiga) embarcado en una plataforma naval. Con la implementación de la tecnología del radar pasivo se pretende aportar una alternativa a una situación táctica aumentando las probabilidades de no ser detectado por la fuerza enemiga.

La plataforma receptora contará con un array de antenas que permitirá calcular la posición y la velocidad del blanco. Para conseguir determinar la posición del blanco se va a aplicar la tecnología, ya desarrollada, de las distancias biestáticas y el beamforming para determinar el azimuth (DoA, *Direction of Arrival*) de llegada de la señal recibida. Por otro lado, se usará la frecuencia Doppler para determinar la velocidad del blanco generando así la información necesaria para poder reaccionar ante la amenaza.

La ventaja que propone este proyecto se basa en la discreción, elemento fundamental en la táctica militar. La implementación de un radar pasivo además de garantizar la discreción de quien lo use también permite mantener las capacidades de los buques incrementando la operatividad de los mismos.

PALABRAS CLAVE

Radar pasivo, problema biestático, táctica naval, beamforming, doppler.

AGRADECIMIENTOS

Acordarme de la gente que ha seguido el desarrollo de este proyecto, gracias a todos por vuestro apoyo, especialmente mi familia y los que han estado conmigo día a día.

Contenido

Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Desarrollo.....	8
1.3 Origen del trabajo planteado	8
1.4 Explicación táctica de la posible aplicación del trabajo	9
1.5 Objetivos	9
1.6 Estructura	10
2 Estado del arte	11
2.1 Aparición del radar.....	11
2.1.1 Contribuciones a la aparición del radar	11
2.1.2 Inicios del radar	12
2.1.3 Desarrollo y crecimiento de la tecnología del radar	13
2.2 Definición de radar.....	14
2.2.1 Generación de ondas electromagnéticas	14
2.2.2 Propagación de las ondas electromagnéticas	15
2.2.3 Interacción con los cuerpos	15
2.3 Elementos que configuran un radar	16
2.3.1 Transmisor	16
2.3.2 Sincronizador.....	17
2.3.3 Receptor.....	17
2.3.4 Antena.....	17
2.3.5 Procesador de señales	18
2.4 Parámetros de las antenas	19
2.4.2 Potencias de trabajo	20
2.4.3 Diagrama de radiación.....	21
2.4.4 Ancho de haz	21
2.4.5 PRF/PRI.....	21
2.4.6 Ganancia	22
2.4.7 Resolución en distancia y azimutal.....	22
2.4.8 Ecuación radar	23
2.4.10 Polarización	25

2.5 Clases de radar	25
2.6 Beamforming y apuntamiento electrónico	26
2.7 Radar pasivo, diferencias y funcionamiento	27
2.8 Aplicaciones del radar pasivo y ventajas	29
2.8.1 Ventajas generales	29
2.8.2 Ventajas en el mundo militar	30
3 Desarrollo del TFG.....	31
3.1 Secuencia a seguir	31
3.2 Calibrado de antenas	32
3.2.1 Primer sistema	33
3.2.2 Segundo sistema	35
3.3 Sincronización de señales	37
3.4 Correlación de señales	39
3.4.1 Explicación teórica	39
3.4.2 Aplicación en el proyecto	41
3.5 Frecuencia doppler	42
3.6 Generación de los diagramas esperados.....	44
3.7 Software utilizado	45
3.7.1 GNU Radio	45
3.7.2 Matlab	45
3.8 Iluminador de oportunidad.....	46
3.8.1 Radiación del iluminador de oportunidad.....	46
3.8.2 Identificación del iluminador de oportunidad.....	48
3.9 Diagrama de radiación del array de antenas	50
4 Resultados / Validación / Prueba.....	51
4.1 Resultados obtenidos.....	51
4.1.1 Datos esperados	51
4.1.2 Primer sistema	56
4.1.3 Segundo sistema	61
4.1.4 Aplicación del Beamforming.....	65
4.1.5 Determinación de distancias	68
5 Conclusiones y líneas futuras	72
5.1 Evaluación de los objetivos.....	72
5.2 Líneas futuras	73
6 Bibliografía.....	74

*SISTEMA DE RADAR PASIVO EN BANDA X EMPLEANDO UN TRANSMISOR COLABORATIVO
EMBARCADO*

Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	78
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Telemobiloscopio [9].....	12
Figura 2-2 Onda electromagnética[20].....	14
Figura 2-3 Componentes de un radar [26].....	16
Figura 2-4 Tipos de modulaciones [28].....	17
Figura 2-5 Caracterización de las ondas [34].....	19
Figura 2-6 Frecuencias utilizadas en radar [36]	20
Figura 2-7 Diagrama de radiación[40]	21
Figura 2-8 Onda continua frente a onda pulsada [42]	22
Figura 2-9 Resolución en distancia [43].....	22
Figura 2-10 Distancia máxima no ambigua[45].....	24
Figura 2-11 Distancia máxima horizonte [46].....	24
Figura 2-12 Disposición campo eléctrico y magnético [21]	25
Figura 2-13 Beamforming [51]	26
Figura 2-14 Incidencia del frente de onda [52]	27
Figura 2-15 Estructura radar biestático [54].....	28
Figura 2-16 Problema trigonométrico radar pasivo [14].....	28
Figura 3-1 “Down-converter” frontal.....	33
Figura 3-2 “Down-converter” layout.....	33
Figura 3-3 Frecuencia antena 1	34
Figura 3-4 Frecuencia antena 2	34
Figura 3-5 Frecuencia antena 3	35
Figura 3-6 Espectro de la señal transmitida	35
Figura 3-7 Antena HB100 [56]	36
Figura 3-8 Antena splitter [57].....	36
Figura 3-9 Mezclador de RF [58].....	36
Figura 3-10 Frecuencia antenas segundo sistema	37
Figura 3-11 ADALM-PLUTO [60].....	37
Figura 3-12 Traslación de señales del primer sistema.....	38
Figura 3-13 Señales no sincronizadas	38
Figura 3-14 Señales sincronizadas	39
Figura 3-15 Señales sincronizadas del segundo sistema	39
Figura 3-16 Incidencia de la señal en el array de antenas [63]	40
Figura 3-17 Correlación de señales[65]	41
Figura 3-18 Correlación de señales del primer sistema.....	42
Figura 3-19 Correlación de señales del segundo sistema.....	42

Figura 3-20 Frecuencia Doppler.....	43
Figura 3-21 Mapa doppler.....	44
Figura 3-22 Medición LLII A) Medición 1. B) Medición 2. C) Medición 3. D) Medición 4. E) Medición 5.	47
Figura 3-23 Iluminador de oportunidad	48
Figura 3-24 Tiempo de iluminación del Radar marino FURUNO 1824C-BB	49
Figura 3-25 Velocidad de rotación Radar marino FURUNO 1824C-BB	49
Figura 4-1 CAF 2D Sin velocidad.....	52
Figura 4-2 CAF 3D Sin velocidad.....	52
Figura 4-3 CAF 3D Eje XZ sin velocidad.....	53
Figura 4-4 CAF 3D Eje YZ sin velocidad.....	53
Figura 4-5 CAF 2D Con velocidad	54
Figura 4-6 CAF 3D Con velocidad	55
Figura 4-7 CAF 3D Eje XZ con velocidad.....	55
Figura 4-8 CAF 3D Eje YZ con velocidad.....	56
Figura 4-9 A) CAF 2D Sin perturbación. B) CAF 3D Sin perturbación.....	57
Figura 4-10 Escenario prueba con movimiento	57
Figura 4-11 CAF 2D Inicio	58
Figura 4-12 CAF 2D A) Alejamiento. B) Acercamiento	58
Figura 4-13 CAF 3D A) Alejamiento. B) Acercamiento.	59
Figura 4-14 A) CAF 2D Velocidad mínima. B) CAF 3D Velocidad mínima.	60
Figura 4-15 CAF 3D A) Doppler. B) Doppler y tiempo	61
Figura 4-16 A) CAF 2D sin movimiento. B) CAF 3D sin movimiento.....	61
Figura 4-17 CAF 2D Segundo sistema con movimiento	62
Figura 4-18 CAF 2D Movimiento rápido.....	63
Figura 4-19 A) CAF 2D Ventilador rápido. B) CAF 3D Ventilador rápido	64
Figura 4-20 A) CAF 2D Ventilador lento. B) CAF D Ventilador lento	64
Figura 4-21 Primer escenario beamforming.....	65
Figura 4-22 Beamforming 1	66
Figura 4-23 Segundo escenario beamforming.....	67
Figura 4-24 Beamforming 2	67
Figura 4-25 Visualización en tiempo A) Beamforming 1. B) Beamforming 2.....	68
Figura 4-26 Escenario biestático	69
Figura 4-27 Señal de referencia VS Eco recibido	69
Figura 4-28 Retardo entre señales	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos técnicos iluminador de oportunidad 46

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Actualmente el mundo naval se encuentra familiarizado con la tecnología radar (*Radio Detecting And Ranging*) de tal manera que no se entiende sin este tipo de dispositivos, esta tecnología se basa en la emisión de ondas electromagnéticas y posterior recepción tras haber incidido en algún objeto con el objetivo de interpretar el tiempo transcurrido entre la señal enviada y la recibida pudiendo determinar así la presencia de objetos.

Además de localizar objetos es capaz de decir a que distancia se encuentran, en qué dirección, con qué velocidad de desplaza el objeto y más información de gran utilidad para garantizar seguridad en la navegación, control de paso de buques, monitorización de contactos de interés y muchas más aplicaciones.

El radar se usa tanto a bordo de los buques como en estaciones costeras, su objetivo principal es el de aportar información que permita asegurar la seguridad en la navegación. En los buques militares además de ser de ayuda en la seguridad a la navegación se disponen de otros tipos de radares que con configuraciones diferentes se encargan de detectar aeronaves, otros buques y misiles en vuelo. Incluso ayudan en el guiado de misiles o sirven como direcciones de tiro para otras armas.

Uno de los principios básicos de la táctica es la discreción, esto implica, detectar al enemigo pero que este no lo haga; es por ello que se intenta reducir al máximo las radiaciones de los buques militares. Una de las maneras de reducir estas emisiones es apagar los radares para que dejen de emitir, esto es como dejar ciego al buque lo que puede suponer una pérdida de su capacidad operativa.

Con la intención de no ser detectado, pero mantener la capacidad operativa surge este trabajo, en el que se pretende instalar un radar pasivo en las unidades que mayor riesgo tengan en caso de ser detectadas debido a la proximidad con la amenaza o por la función que estén desempeñando.

Los radares pasivos son capaces de recibir las reflexiones en los blancos de las señales emitidas por otras antenas que se encuentran en otro emplazamiento físico e interpretar la señal. Hay una gran variedad de radares pasivos en función de su utilidad.

En el presente proyecto se va a constituir un radar pasivo que permita localizar (con demora y distancia) y medir la velocidad de los blancos. La intención es aplicarlo en el mundo militar, sin embargo, puede encontrar cabida en muchos otros escenarios.

1.2 Desarrollo

Este trabajo va a tratar de aplicar la tecnología del radar pasivo a la táctica naval de una forma diferente a la que se acostumbra. Para ello primero se va a realizar una labor de documentación y posterior explicación de los conceptos que son necesarios conocer para poder llevar a cabo este trabajo.

Después de la documentación se realizará en el laboratorio el montaje de la antena transmisora, que es la que actuará como iluminador de oportunidad. Posteriormente, se procederá a montar el array de antenas que es la pieza angular del trabajo. En función de la información que se obtenga de ellas se determinará la viabilidad de aplicar esta tecnología en los buques militares o si por el contrario carece de sentido debido a que no aporte ninguna ventaja táctica.

Previo a poner en práctica el sistema del radar pasivo, compuesto por la antena transmisora y el array de antenas, se realiza una comprobación del conjunto antena para comprobar la frecuencia de salida del “Down-converter” en cada antena y así poder corregirla con el objetivo de que sean todas iguales para que no introduzca errores en la interpretación.

Una vez montado el iluminador de oportunidad y el array de antenas receptoras se procede a probar el sistema en el laboratorio, donde se conocen las ubicaciones de ambas partes del sistema y el escenario en el que se desarrolla la prueba es controlado, con ello se quiere comprobar si el sistema funciona correctamente y sobre todo si el array de antenas es capaz de interpretar la señal recibida debido a que los osciladores de cada elemento del array puede introducir una variación en la frecuencia que imposibilite la interpretación de la señal.

Tras haber sido comprobado, se pasará a testear el sistema en un ambiente más real, esta vez el emplazamiento será al aire libre, pero conociendo de antemano la situación de ambas partes del sistema y permaneciendo ambas en estático.

Con estos dos primeros tipos de experimentos y pruebas se persigue determinar si el sistema es capaz de detectar blancos y en caso de hacerlo medir su velocidad mediante la frecuencia doppler.

Por último, se realizará una prueba en un ambiente lo más real posible para acercar el montaje en lo máximo posible a lo que se puede encontrar en la situación táctica planteada. Para poder llevar a cabo esta prueba se emplearán las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval Militar. El iluminador de oportunidad será el radar instalado a bordo de las mismas, siendo este el Radar marino FURUNO 1824C-BB.

Con la intención de aproximar la prueba al escenario real que se plantea se utilizarán buques reales, con una cinemática real, además las distancias en las que se reproducirán los ensayos serán significativamente mayores a las anteriores.

En esta última prueba se pretende determinar el azimut o dirección de llegada de la señal que ha incidido en el blanco para poder determinar mediante la resolución del problema biestático la posición del blanco.

Después de cada prueba se procederá a interpretar los datos recogidos y grabados por el digitalizador de señales para determinar el funcionamiento del sistema, hacer un seguimiento de cómo evoluciona y decidir si los datos recogidos por el array de antenas son válidos o no, es decir si la precisión en la determinación de la posición es la suficiente para la aplicación táctica que se persigue.

Con todos los datos y evaluaciones recogidas a lo largo de las pruebas se procederá a realizar una valoración que consistirá en una conclusión desarrollando los resultados obtenidos

1.3 Origen del trabajo planteado

El trabajo surge a raíz de querer añadir una solución alternativa a una situación táctica con la intención de reducir el riesgo de las unidades y de obtener una ventaja frente al enemigo ya que con la implementación del radar pasivo planteado en este trabajo de fin de grado se pretende evitar que las

unidades que se encuentren próximas al peligro reduzcan sus emisiones electromagnéticas lo máximo posible para disminuir la probabilidad de ser detectados ya que una de las primeras emisiones que se captan con los sensores de guerra electrónica son los radares que montan los buques.

Una vez visto que se puede conseguir una ventaja táctica se comenzó a buscar herramientas que pudieran ayudar a llevarla a cabo, es ahí donde surge la idea de utilizar un radar pasivo ya que es una herramienta que se ha estudiado a lo largo de la carrera y que puede encajar perfectamente en la idea principal debido a que al usar un radar pasivo se reducen las emisiones y con ello la probabilidad de ser detectado por el enemigo.

1.4 Explicación táctica de la posible aplicación del trabajo

El presente trabajo pretende aportar una solución diferente a una situación táctica que puede tener lugar en un conflicto entre dos fuerzas navales. Esta solución se aprovecha de tecnologías ya existentes y ampliamente utilizadas tanto en el mundo militar como en el civil como es el uso de radar pasivo.

La situación táctica en la que se pretende aplicar el radar pasivo en aquella en la que hay dos fuerzas navales enemigas y en conflicto abierto, es decir, ya se han abierto o se van abrir hostilidades entre ambas.

La situación en la que se encuentran es la que se va a describir a continuación, sin embargo, no se limita solo a la situación que se va a explicar, es decir, puede haber variaciones.

Ambas fuerzas se encuentran separadas por una distancia mayor a la distancia horizonte por lo que los sensores de los buques no son capaces de detectar a la fuerza contraria, se conoce la dirección de la amenaza, pero no su posición exacta.

Para poner solución al hecho de no tener la localización exacta de la fuerza enemiga se suele destacar una unidad la cual se despega del grueso de la fuerza y avanza en dirección de la amenaza hasta una distancia de entre 60 y 100 millas náuticas con el objetivo de detectar y localizar a la amenaza antes de que esta haga lo mismo con las fuerzas amigas.

Con el objetivo de que esta unidad que se destaca de la fuerza amiga detecte a la fuerza enemiga reduciendo la probabilidad de que la detección sea reciproca surge este trabajo de fin de grado y es ahí donde juega un papel clave el radar pasivo.

La aplicación del radar pasivo planteado consiste en que la unidad destacada aproveche las emisiones de otros buques, como las emisiones de la fuerza amiga, para detectar y localizar a la fuerza enemiga, así ella permanece discreta, pero mantiene las capacidades.

Otra situación donde tiene gran cabida este proyecto es la que se describe a continuación. Para poder hacer un enfrentamiento con misiles sin tener al contacto que se desea derribar en los sensores propios es necesario destacar una unidad o un grupo de ellas que se acerquen hasta una distancia que permita localizar a la fuerza enemiga y transmitir su posición a la unidad que va a realizar el enfrentamiento.

Estas unidades que se acercan son las que se exponen ya que pueden ser enfrentadas por el enemigo, poniéndose en un mayor riesgo debido a que la probabilidad de ser detectado aumenta; es en esas unidades donde encuentra cabida este trabajo.

1.5 Objetivos

Debido a que se trata de un proyecto que requiere una investigación previa además de pruebas experimentales en las que se desconocen sus resultados y sobre todo el proceso de interpretación de los resultados, los objetivos que se establecen son progresivos, de manera que, conforme avance el desarrollo del proyecto, se vayan cumpliendo hitos y se vayan interpretando los diferentes resultados se procederá al cumplimiento del siguiente objetivo establecido

Para poder entender los objetivos que se persiguen con este proyecto es necesario que quede patente la solución alternativa que se propone a la situación táctica explicada en el apartado 1.4 Explicación táctica de la posible aplicación del trabajo ya que es la razón y la motivación de este trabajo de fin de grado. Sobre todo, se persigue conseguir que el proyecto se vea como una opción real y que de verdad puede traer mejoras a la situación táctica explicada.

El primer objetivo práctico es lograr constituir un montaje que dentro del laboratorio sea capaz de detectar blancos móviles ya que esto servirá de base para todo el desarrollo que vendrá después.

Una vez se logrado el objetivo anterior, se pasará a perseguir el objetivo de interpretar los datos recogidos por el sistema utilizado en un escenario menos ideal que el laboratorio y más parecido al escenario para el que se ha pensado este proyecto.

Posteriormente se procederá a determinar la posición de los blancos, así como su velocidad ya que es la labor principal que tiene que realizar el radar pasivo planteado. En primera instancia se realizará esta localización sin usar medios embarcados para poder controlar los factores que afectan a la toma de datos y a su interpretación y poder aprender de ellos para después realizar las pruebas en la mar.

Como último objetivo se estable lograr la correcta utilización del sistema planteado en la mar, esto implica hacerlo a bordo de una de las Lanchas de Instrucción con las que cuenta la Escuela Naval Militar (ENM) para el adiestramiento de los alumnos. Este objetivo implica utilizar un buque como iluminador de oportunidad y gracias a sus señales transmitidas lograr localizar y posicionar otros buques sin la necesidad de transmitir con ninguno de los sensores propios.

1.6 Estructura

La estructura de la memoria se ha planificado de tal manera que se facilite al lector lo máximo posible el seguimiento y comprensión del trabajo de fin de grado. Es por ello que la presente memoria va a seguir una estructura que se adapta a lo explicado en el apartado 1.2 Desarrollo.

En el primer punto, 1 Introducción y objetivos, se procede a desarrollar una introducción al tema que se trata durante el proyecto, seguido de la cronología que se va a seguir, así como de las motivaciones y objetivos.

En el segundo punto, 2 Estado del arte, se procede a explicar y desgranar los conocimientos que se consideran necesarios para poder llegar a comprender y seguir con claridad el trabajo realizado, así como la interpretación de resultados y las conclusiones extraídas.

Durante el desarrollo del punto 3 Desarrollo del TFG, se explican las pruebas y experimentos que se realizan con la intención de alcanzar los objetivos planteados. Además, se realiza una explicación de porqué se realizan las pruebas que llevan a cabo.

En el cuarto punto, 4 Resultados / Validación / Prueba, se procede a comentar los datos obtenidos como resultado de los experimentos y pruebas explicadas en el punto anterior.

Por último, en el apartado de 5 Conclusiones y líneas futuras se procede a extraer las conclusiones de los datos obtenidos en el punto anterior y a raíz de las conclusiones extraídas se realiza una valoración en función de los objetivos cumplidos y de los no alcanzados. También es en este punto donde se dejan por escrito posibles continuaciones al presente proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se van a describir todos los antecedentes de los radares, tanto pasivos como activos, centrándose en los radares pasivos que son el motivo de este trabajo, así como su importancia en el mundo actual, tanto civil como militar. Para poder llevar a cabo este apartado es necesario que se deje constancia de los trabajos previos en los que se ha apoyado este documento para conseguir los objetivos perseguidos, para ello se van a comentar los trabajos que comenzaron con esta investigación o cuyas investigaciones han contribuido en la elaboración del mismo.

Además, también van a ser explicados todos los conceptos necesarios para el desarrollo y comprensión del trabajo con el objetivo de que el proyecto sea capaz de llegar al máximo número de personas sin la necesidad de que estas tengan un gran conocimiento de la materia.

2.1 Aparición del radar

2.1.1 Contribuciones a la aparición del radar

Como va a ser explicado más adelante en detalle, el radar es una tecnología que gira alrededor de las leyes del electromagnetismo y las ondas radio, es por ello que hasta que los científicos y físicos no exploraron estos campos e hicieron descubrimientos y describieron leyes no se pudo concebir este tipo de dispositivo, sin el cual el mundo actual no sería igual.

El primero fue el James Clerk Maxwell, un matemático y científico escocés que estableció las Ecuaciones de Maxwell, las cuales describen los fenómenos electromagnéticos. Hablan del flujo eléctrico, el flujo magnético, la variación del flujo magnético y su relación con la corriente eléctrica inducida y como la variación de campos eléctricos crea campos magnéticos [1].

$$\begin{aligned}\nabla \cdot E &= \frac{\rho}{\varepsilon} & 2-1 [2] \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times B &= \mu J + \mu \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}\end{aligned}$$

La segunda aportación fundamental fue llevada a cabo por Heinrich Hertz que fue un físico del Imperio Alemán que además de otros descubrimientos, estudió la propagación de las ondas así como las formas de crearlas y detectarlas [3]. Demostró de manera experimental, basándose en los estudios realizados por James Maxwell y Michael Faraday, que las ondas electromagnéticas son capaces de viajar usando el aire libre o el mismo espacio como medio de transporte, además fue capaz de construir en su laboratorio un emisor y un receptor, lo que le permitió demostrar su teoría de manera empírica [4].

Watson se le considera como el precursor y creador del radar, sin embargo otros científicos usaron y estudiaron las ondas electromagnéticas, estudios que el propio Watson uso para el desarrollo del mismo [12].

Así como otros grandes inventos con gran repercusión en la vida civil, el radar nace como aplicación para defensa; tiene sus orígenes en la II Guerra Mundial [8]. Fue Alemania el primer país que comenzó a investigar la aplicación de esta tecnología estudiada en años anteriores a la táctica como forma de revolucionar la guerra, sus investigaciones se centraron en las ondas sonoras capaces de detectar objetos sumergidos, lo que se considera como el precursor del sonar (Sound Navigation And Ranging). Simultáneamente investigaron con ondas de radio y como estas rebotaban en una superficie, recogiendo el eco de la señal rebotada con una antena parabólica, sin embargo, debido a la falta de presupuesto y la falta de una tecnología capaz de amplificar la señal recibida, se acabó por desestimar el proyecto.

Paralelamente a los estudios de Alemania, el Reino Unido quiso desarrollar un sistema, que fuese capaz de derribar las amenazas aéreas que sobrevolaran el territorio británico debido al acoso que estaban recibiendo por parte de Alemania, es en este momento cuando deciden contratar a Robert Watson-Watt. Lo contratan con la idea de que elabore un rayo que sea capaz de derribar aeronaves, sin embargo, este aprovecha para realizar investigaciones, las cuales concluyen con un dispositivo que fue capaz de detectar un avión a 27 km de distancia, creándose así en 1935 lo que se considera el primer radar de la historia.

En 1939, aparece un nuevo material, el magnetrón resonante con el cual se consigue mejorar las capacidades del radar creado por Robert Watson ya que se consigue radiar señales de alta potencia y gran frecuencia, consiguiendo radares con mayor similitud a los actuales [13].

Los orígenes del radar pasivo tuvieron lugar como consecuencia de la indiscreción que creaban los radares activos, es por ello que Robert Watson-Watt en 1935 se ayudó de una antena situada en la ciudad de Daventry para localizar a un bombardero a una distancia de ocho kilómetros de donde se encontraba la antena transmisora [14]. Con el éxito de este experimento, Gran Bretaña instaló numerosos radares pasivos en sus costas reduciendo así en gran medida los ataques del ejército alemán.

El radar pasivo tuvo un rápido desarrollo durante los años de la II Guerra Mundial, pero luego se vio estancando, hasta que los ejércitos de varios países decidieron desempolvar esta tecnología y desarrollarla hasta lo que es hoy en día.

2.1.3 Desarrollo y crecimiento de la tecnología del radar

Durante el desarrollo de la guerra se encontraron numerosas aplicaciones para esta nueva tecnología, en su comienzo se utilizó para la detección de aeronaves, más tarde se utilizó como dirección de tiro, más centrados en la distancia al blanco que en la adquisición del propio blanco [15], interceptación aérea y fueron muy usados para la detección de submarinos, frenando así la novedosa táctica usada por los submarinos alemanes y frenando la masiva destrucción de buques británicos tal y como explicó el Almirante Karl Dönitz en su libro “diez años y veinte días” [16].

Tras finalizar la II Guerra mundial, se frena el desarrollo del radar en el mundo militar y se extrapola al mundo civil, donde encuentra rápidamente una función en la rama de la meteorología y la predicción del tiempo.

Actualmente los radares se basan en el mismo funcionamiento que en sus orígenes, sin embargo, sus capacidades se han visto enormemente agrandadas debido a la aparición de nuevas tecnologías, como se explicará más adelante y por el uso de materiales que permiten usar frecuencias más altas y un menor calentamiento del equipo.

Sus cometidos más habituales se centran en el control de tráfico aéreo, sistemas anti misiles, sistemas de defensa aérea, predicción del tiempo, navegación terrestre, marítima y aérea y control del tráfico [17].

2.2 Definición de radar

El radar (Radio Detecting and Ranging) es un dispositivo que basa su funcionamiento en las ondas electromagnéticas, en como estas se propagan en el medio y como rebotan en las superficies. Básicamente un antena radia, es decir, emite una onda electromagnética la cual viaja por el espacio, degradándose como ya se verá más adelante, se encuentra con un objeto o cuerpo, incide en él y se refleja, volviendo (no siempre) por el mismo camino hasta encontrar la antena, dicha onda es recibida por el receptor y teniendo en cuenta el tiempo que ha tardado la onda en recorrer el espacio comprendido entre la antena-objeto y objeto-antena se estima la distancia a la que se encuentra dicho cuerpo.

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad 2-2$$

Siendo d la distancia en metros, c la velocidad de la luz (3000000000 m/s) y t el tiempo que está viajando la onda electromagnética.

Como se ha comentado en los apartados anteriores, el funcionamiento del radar se basa en el empleo de las ondas electromagnéticas, es por eso que para poder entender de manera clara el funcionamiento de un radar es necesario comprender primero que son las ondas electromagnéticas y cómo se comportan.

La Real Academia Española (RAE) define las ondas electromagnéticas como “perturbación periódica en un campo electromagnético, que se propaga a través del espacio y que, según su intervalo de frecuencia, recibe denominaciones especiales; por ejemplo, ondas radioeléctricas, microondas, rayos infrarrojos, espectro visible, rayos ultravioletas, rayos X, rayos gamma, etcétera”.

Para que pueda ser entendido de manera más sencilla, las emisiones electromagnéticas son generadas por partículas eléctricas y magnéticas moviéndose al mismo tiempo de manera perpendicular entre sí; además las ondas electromagnéticas están formadas por paquetes muy pequeños de energía llamados fotones, en función de la energía que tengan estos fotones se establece la frecuencia que va a tener la onda. La energía que tienen estos fotones se genera por la vibración de los electrones [18].

En la rama de la física [19], se considera onda al proceso mediante el cual una perturbación o pulso se propaga con una velocidad determinada por el espacio, lo importantes es que lo hacen sin que haya transporte de materia, solo se transporta energía y cantidad de movimiento.

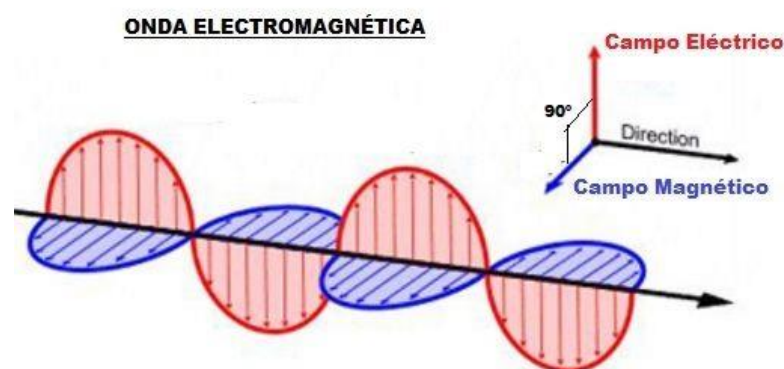


Figura 2-2 Onda electromagnética[20]

2.2.1 Generación de ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas son producidas cuando coexisten en el espacio un campo eléctrico y otro magnético, ambos perpendiculares entre sí, siendo además variables en el tiempo. Estas ondas se propagan por el medio, pudiendo ser este el vacío, a la velocidad de la luz, es decir 3000000000 m/s.

Cuando se habla de antenas, el dispositivo encargado de la producción de las ondas electromagnéticas es el generador de ondas, dichas ondas reciben el nombre de señal de radiofrecuencia (RF); el generador de pulsos/ondas se encarga de crear pulsos de voltaje, los cuales son mantenidos durante un periodo de tiempo determinado y vuelve al estado de inactividad.

2.2.2 Propagación de las ondas electromagnéticas

Como ha sido explicado anteriormente, una onda electromagnética está formada por un campo eléctrico y otro magnético variables en el tiempo, si se considera que la variación de dichos campos es sinusoidal [21], habrá puntos en los que ambos campos se anulen y otros en los que se sumen alcanzando un máximo, esto produce un frente ondas, que es un plano ortogonal a ambos campos y que indica el sentido de propagación.

Esta propagación de las ondas es diferente en el vacío que en la atmósfera, donde se puede aproximar a la transmisión de ondas sobre una materia [22], esto crea dispersión, reflexión, refracción y absorción, por el contrario cuando la onda se propaga en el vacío lo hace de forma ideal.

La velocidad de propagación de onda que no lo hace por el vacío se ve afectada por el medio en el que lo hace, quedando la expresión de su velocidad de la siguiente manera:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad 2-3$$

Siendo “c” la velocidad de la luz, “ε” la permitividad del material y “μ” permeabilidad del material. Cuando se trata del vacío la permitividad es de $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ y la permeabilidad del vacío tiene un valor de $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.

La dispersión de las ondas electromagnéticas ocurre cuando un frente de ondas tiene diferentes frecuencias, esto provoca que al propagarse cada una de sus componentes monocromáticas lo hagan a una velocidad diferente [22], logrando así que el pulso se distorsione.

El fenómeno de absorción se produce cuando la onda atraviesa un material ya que la onda transmite parte de su energía (dependiendo del material y la frecuencia) al material, lo que se traduce en una reducción de su amplitud. Es un factor que limita en gran medida los enlaces debido a que puede llegar a suponer una alta pérdida de energía.

La reflexión y la refracción ocurren cuando una onda atraviesa una superficie la cual hace de medio separador entre dos medios distintos [22], la onda reflejada no llega a atravesar dicha superficie y rebota deshaciendo el trayecto, mientras que la onda refractada es la que consigue penetrar en la superficie y pasar al otro medio.

2.2.3 Interacción con los cuerpos

En este apartado se va a explicar cómo inciden las ondas en los cuerpos y como esto afecta a la capacidad del radar para detectar el objeto/cuerpo sobre el que inciden los pulsos. Para poder explicar esto es necesario hablar de la RCS (Radar Cross Section) o área equivalente radar.

Cuando las ondas electromagnéticas emitidas por una antena se encuentran en su camino con una superficie que interrumpe su propagación, estas se ven dispersadas en todas las direcciones, produciéndose el fenómeno de dispersión. La RCS es la comparación entre la potencia del campo electromagnético reflejado por el cuerpo en el que ha incidido la onda con la potencia del campo electromagnético que reflejaría una esfera perfecta de 1m^2 [23]. Este término ayuda a definir la probabilidad que se tiene de detectar un blanco [24], es decir, cuanto mayor sea la RCS de un contacto mayor será la probabilidad de detectarlo. La RCS se expresa en unidades de superficie, m^2 .

Los parámetros que definen el área equivalente radar de un contacto son diversos, van desde la frecuencia y dirección del pulso emitido hasta la forma, tamaño y material de la superficie del objeto sobre el que inciden [25].

Generalmente, cuando las frecuencias usadas por los radares son más altas, la RCS del contacto es menor, ya que la dimensión del objeto se puede aproximar al tamaño de la longitud de onda empleada. Asimismo, la dirección de la onda tiene gran importancia ya que según el ángulo de incidencia se producirá más reflexión o más refracción.

Por otro lado, la forma del objeto también es un factor limitante, ya que superficies lisas reducen la RCS y superficies con un gran número de aristas elevan la probabilidad de que las ondas se reflejen hacia la antena del radar. El material con el que esté fabricado el objeto determinará qué cantidad de energía absorbe la superficie cuando el pulso incide sobre la misma, si se trata de un material muy absorbente, apenas se producirá reflexión, por el contrario si el material refleja gran parte de la energía recibida, se eleva la probabilidad de detección.

Es por todo lo explicado en los párrafos superiores, por qué hay tantos estudios que intentan reducir las RCS de las unidades, una gran ventaja táctica reside en la sorpresa, lo que implica no ser detectado.

2.3 Elementos que configuran un radar

El radar es un dispositivo electrónico, que ha avanzado a pasos de gigante desde su creación. Es una herramienta ampliamente utilizada tanto en el sector civil como en el militar, donde dio sus primeros pasos.

Como se ha explicado en el apartado anterior, el radar se aprovecha de las propiedades de las ondas electromagnéticas para conseguir sus objetivos, es por ello que este dispositivo tiene que ser capaz de producir dichos pulsos, radiarlos en la dirección necesaria, ser capaz de recibir una señal con una potencia muy reducida e interpretarla.

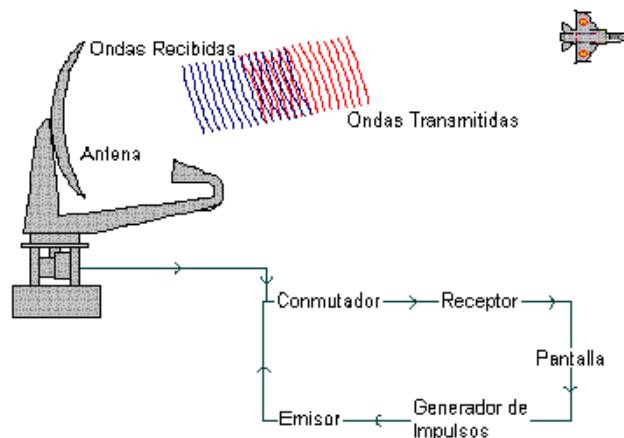


Figura 2-3 Componentes de un radar [26]

Para conseguir todo lo anterior el radar está constituido por diferentes elementos (Figura 2-3 Componentes de un radar [26]), cada cual tiene una función crucial para el correcto funcionamiento del radar; es por ello que en este apartado se van a describir los principales elementos que configuran un radar convencional.

2.3.1 Transmisor

La intención principal del transmisor es la de emitir la suficiente energía en forma de onda electromagnética, la cual suele ser bastante grande [27], para que más adelante el receptor y procesador de señales puedan cuantificar la energía que ha sido reflejada y resolver el problema de detectar y localizar los contactos.

El transmisor genera un pulso, que puede ser continuo o pulsado, en función de las necesidades, una vez que se ha generado el pulso entra en la ecuación el modulador. El modulador es un componente del transmisor que se encarga de dar “forma” a la señal para que esta pueda ser interpretada más adelante, básicamente, consiste en introducir “marcas” dentro de una señal senoide. Las modulaciones más comunes son AM (amplitud modulada), FM (frecuencia modulada) o PM (fase modulada) [28].

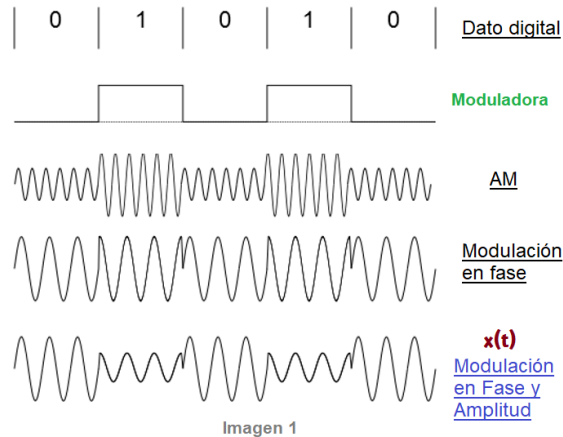


Figura 2-4 Tipos de modulaciones [28]

Tras ser modulada la señal [19], esta se introduce dentro de otra señal llamada señal portadora, desplazando su contenido espectral a frecuencias mayores permitiendo la multiplexación en frecuencia de varias señales haciendo un uso más eficiente del espectro.

Esta suma de señales tiene que ser amplificada para poder ser usada como pulso hasta alcanzar los valores de energía necesarios.

Una vez hecho todo lo anterior ya se puede enviar la señal a la antena, sin embargo, en ocasiones se realizan filtrados para eliminar partes de la señal no deseados o conversiones de frecuencia para adaptar la señal a la requerida, lo que se realiza con un mezclador o convertidor de frecuencia.

2.3.2 Sincronizador

Este elemento actúa como un relé, es decir, conecta la antena y el transmisor cuando se va a transmitir y cuando el sistema va a recibir o está esperando hacerlo, desconecta la conexión de la antena con el transmisor y la conecta al receptor.

De esta manera se simplifica la estructura de un radar y se evitan interferencias entre el transmisor y el receptor, ya que con el sincronizador se consigue que con una misma antena se pueda transmitir y recibir desde el mismo montaje.

2.3.3 Receptor

Como ha sido explicado anteriormente, durante la propagación de las ondas y la reflexión de las mismas en objetos se produce una degradación de la energía de la onda electromagnética, esto se traduce en que la energía que llega al radar tras ser reflejada es una pequeña parte de la que ha sido radiada.

Para solucionar este problema, se utiliza el receptor, que se encarga de amplificar los ecos recibidos para que puedan ser interpretados y procesados más adelante.

2.3.4 Antena

Una de las partes más reseñables de un radar es su antena ya que de ella dependen una gran variedad de características de los radares. Se trata de un dispositivo constituido por un conjunto de conductores [22]; si estos conductores están conectados a una fuente de energía son capaces de radiar ondas electromagnéticas convirtiéndose en una antena transmisora, por el contrario si este conjunto de

conductores se encuentra conectado a una impedancia la antena es capaz de recibir ondas electromagnéticas actuando como receptor.

En la recepción convierte las ondas electromagnéticas en una onda eléctrica y en la transmisión ocurre lo contrario, convierte una señal eléctrica en ondas electromagnéticas.

De la forma y tamaño de la antena son consecuencia un gran número de parámetros que afectan a las capacidades de la misma como es la *Signal Noise Ratio* (SNR) o la ganancia. Para poder mejorar su rendimiento se usa lo que se conoce como array de antenas.

Un array de antenas es un conjunto de antenas que permite estrechar el lóbulo ganando así directividad en la radiación. En función del diagrama de radiación que se quiera conseguir se utiliza una disposición de las antenas que componen los array de antenas u otra [29].

- Array plano
- Array plano
- Array conformado

Un elemento importante que hay que tener en cuenta cuando se habla de array de antenas es el factor de array (f_a), este factor define el diagrama de radiación de una agrupación de elementos radiantes que es lo que se quiere modificar y mejorar al usar array de antenas [30].

Si se quiere modificar dicho factor de array se puede conseguir modificando la configuración geométrica de las antenas (lineal, circular, rectangular...), la distancia existente entre las antenas y la amplitud o fase de excitación de las antenas.

2.3.5 Procesador de señales

Tras la recepción de la señal que ha incidido en el blanco por parte de la antena y del receptor, es necesario interpretar y analizar la señal electromagnética recibida, primero de todo para determinar si se trata de una señal de interés para el sistema. Una vez que se ha determinado que se trata de una señal de interés se procede a hacer los cálculos para determinar la información del contacto.

Esta información comienza con la determinación de la distancia y demora a la que se encuentra el objeto [31]. Una vez determinado esto, se vuelve a radiar sobre el blanco sucesivas veces. Con los datos recogidos en sucesivas radiaciones se determina el rumbo y velocidad del mismo, información crucial para poder tener una situación clara de los contactos que rodean a las unidades y poder crear un plan de acción.

Para poder procesar las señales que son recibidas, es necesario aplicar un procesamiento digital de señales (*Digital Signal Processor*, DSP). Los DSP son elementos que son capaces de procesar una gran cantidad de información y realizar cálculos matemáticos a gran velocidad gracias a su microprocesador.

Los DSP trabajan con señales digitales, por ello necesitan de un conversor analógico digital a su entrada [32]. Una vez que ya cuentan con una señal digital se le aplica un filtro para intentar reducir al máximo aquellas partes de la señal que no se precisan necesarias, como puede tratarse de las interferencias o del ruido, posteriormente se realiza una corrección de fase, ya que durante la propagación de las ondas y tras su incidencia en números medios esta puede haber sido ligeramente modificada.

Por último y como gran avance tecnológico que ha permitido incrementar en gran medida las características de los radares, es realizar una compresión de pulsos. La compresión de pulsos permite reducir la potencia pico radiada por el radar, maximizando la SNR, y obtener una resolución más precisa, es decir, una mejor discriminación de la distancia entre blancos [33].

La SNR indica la relación entre la potencia transmitida y la potencia de ruido existente, lo que da una referencia numérica de cuanto se puede degradar la señal para que pueda seguir siendo interpretada por el radar. Se mide en dB.

2.4 Parámetros de las antenas

En la actualidad existen una gran variedad de radares y con aplicaciones muy diferentes, todos ellos se basan en los mismos principios, sin embargo, cada tipo de radar es capaz de operar con un objetivo diferente; esto es posible gracias a la configuración de todos los parámetros que se pueden configurar para conseguir esta versatilidad de aplicaciones.

En función del tipo de aplicación que se quiere conseguir se modifican los parámetros, sin embargo, no es tan sencillo, ya que, al modificar un parámetro para conseguir mejorar un aspecto, muchas veces se empeora otro aspecto, es por ello que es importante entender qué características tiene un radar y como estas afectan al resultado.

2.4.1 Caracterización de una onda

Para poder caracterizar cualquier tipo de onda se distinguen generalmente cuatro elementos, los cuales se presentan gráficamente en la Figura 2-5

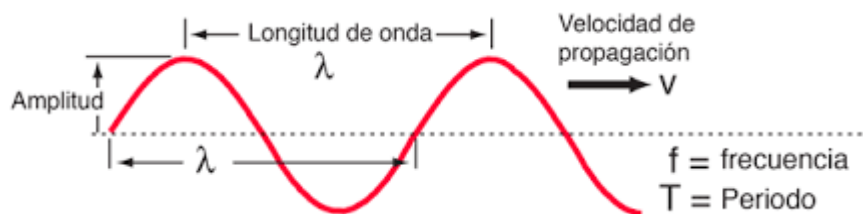


Figura 2-5 Caracterización de las ondas [34]

La frecuencia es una característica principal y responsable de muchos factores de cualquier tipo de onda, la frecuencia[35], generalmente representada por la letra f , es la cuantificación del número de ciclos de la onda por unidad de tiempo, es decir, cuantas veces la onda alcanza el mismo valor de amplitud por unidad de tiempo. Se mide en Hercios (Hz), que traducido en unidades del Sistema Internacional son s^{-1} .

Por otro lado, pero con una relación directa se encuentra la longitud de onda. La longitud de onda es la distancia que existe entre dos puntos homólogos de la onda, es decir, dos puntos donde la onda tiene el mismo valor. Generalmente se representa por la letra λ y mide en metros (m).

Como se ha comentado en los párrafos previos la frecuencia y la longitud de onda tienen una relación directa.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 2-4$$

Donde c es la velocidad de propagación del sonido en el medio. Generalmente se emplea la velocidad del sonido en el vacío, siendo esta de 300000000 m/s.

En la fórmula anterior se puede ver la relación directa que existe entre la frecuencia y la longitud de onda, a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa.

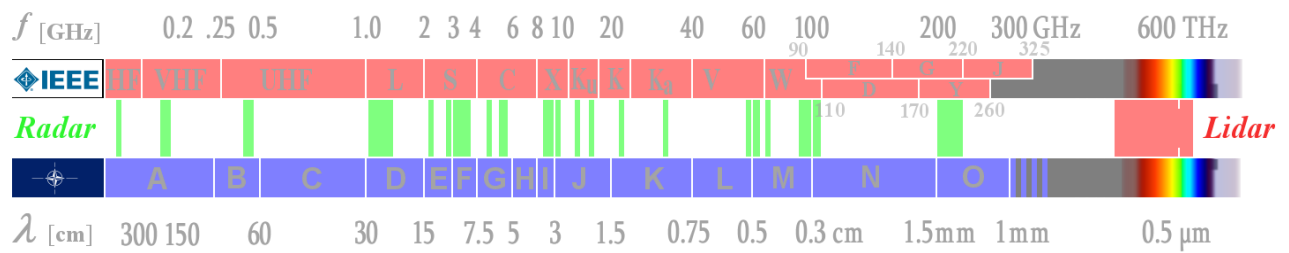


Figura 2-6 Frecuencias utilizadas en radar [36]

En la Figura 2-6 Frecuencias utilizadas en radar [36], se observa el reparto de anchos de banda en función de la frecuencia y de la longitud de onda según la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y la OTAN (Organización del Tratado Atlántico Norte). El primer reparto de ancho de bandas pertenece al mundo civil y el de la OTAN al mundo militar.

Este trabajo se va a centrar en la banda X que trabaja en el rango de frecuencias comprendido entre 8.2 y 12.4 GHz.

El ancho de banda de un radar indica en qué rango de frecuencias puede trabajar debido a sus características, es importante conocerlo ya que según el ancho de banda con el que cuente puede ser utilizado para unos objetivos u otros, además en el mundo militar es de gran importancia para determinar con que sensores se puede radiar para evitar ser detectado por el enemigo, además por inteligencia y la recepción de señales enemigas se puede determinar de quién se trata.

La amplitud de onda (A), indica la distancia vertical que hay entre una cresta y el paso por cero de la onda, es decir, es el ancho de la onda. Se mide en metros (m).

Fase de la onda (ϕ), da un valor cuantitativo de la oscilación con la que cuenta la onda en un punto determinado, es decir, indica la posición exacta de la propia onda en un momento exacto. Se mide radianes (rad) o grados ($^{\circ}$).

2.4.2 Potencias de trabajo

Como en cualquier ámbito de la física, la potencia es la energía utilizada por unidad de tiempo, en el caso de los radares y de las ondas electromagnéticas, la potencia se define como la cantidad de energía de cada señal/pulso radiada por unidad de tiempo [19].

Cuando se habla de radares de navegación y exploración o búsqueda se considera que estos son de onda pulsada, esto quiere decir que no transmiten de manera constante, transmiten un pulso, que es una radiación limitada en el tiempo, esperan un tiempo sin transmitir y vuelven a enviar otro pulso. Este tiempo de transmisión recibe el nombre de ancho de pulso (τ).

La potencia transmitida durante el ancho de pulso recibe el nombre de potencia de pulso, por el contrario la potencia media es la energía radiada durante el uso del radar en un tiempo determinado, llamado ciclo de trabajo que es el producto de la tasa de repetición de pulsos y el ancho del pulso [37].

La potencia de pico determina el alcance de detección de los blancos, ya que como se verá en el apartado de Ecuación radar, a mayor potencia de pico transmitida mayor alcance tendrá el radar debido a que esta onda será capaz de perder energía debido a la propagación y aun así obtener una relación de potencia en el receptor válida.

La relación de potencia es el cociente entre la potencia recibida y el ruido del receptor, esto indica que a mayor relación de potencia se está recibiendo más potencia que la del ruido del receptor [38]. Para poder demodular la señal recibida es necesario una relación de potencia mínima.

Además, la potencia está estrechamente relacionada con la sensibilidad y precisión de radar. La sensibilidad es el nivel mínimo de energía que se debe recibir en el receptor para poder demodular e interpretar la señal.

2.4.3 Diagrama de radiación

Es la forma de representar gráficamente como reparte la energía de transmisión una antena. En estas representaciones se presentan los siguientes parámetros de gran importancia para la eficiencia de las antenas[39]:

- Dirección de apuntamiento, que indica en qué dirección es en la que más energía se radia, obteniendo la directividad y la ganancia.
- Lóbulo principal, es el área que comprende la dirección de máxima radiación.
- Lóbulos secundarios, aquellas áreas que comprenden una radiación inferior a la del lóbulo principal.

Gracias a la utilización de los diagramas de radiación puede obtenerse de manera sencilla la relación de lóbulo principal a secundario (SLL) que es la relación entre la potencia de lóbulo principal y la potencia del lóbulo secundario más grande.

Además, permite obtener la relación delante-detrás que es el cociente entre la potencia del lóbulo principal y la potencia del lóbulo que se encuentra a 180° del principal.

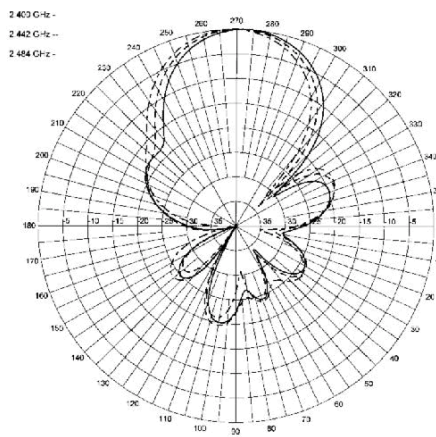


Figura 2-7 Diagrama de radiación[40]

2.4.4 Ancho de haz

Se trata de un parámetro estrechamente relacionado con el diagrama de radiación, indican en grados (°) el intervalo angular en el que se radia o recibe la energía [41]. Generalmente se define el ancho de haz a -3dB, esto indica el ángulo existente entre los puntos del diagrama de radiación donde la potencia de la señal se reduce a 3dB (la mitad en unidades naturales) respecto al punto máximo del haz principal.

El ancho de lóbulo se relaciona con la directividad ya que un lóbulo más estrecho da lugar a una antena más direccional ya que la energía se concentra en una dirección más específica lo que también se traduce en una mejor resolución y mayor alcance debido al reparto más eficiente de energía en el espacio.

2.4.5 PRF/PRI

El *Pulse Repetition Frequency* (PRF) indica el número de pulsos que se transmiten por segundo (Hz). Como se ha explicado anteriormente los radares que van a ser tratados en este trabajo no son radares de onda continua, son radares de onda pulsada, esto quiere decir que no transmiten la onda de manera continua en el tiempo si no lo que lo hacen de manera intermitente (Figura 2-8), dando lugar a lo que se conoce como pulsos.

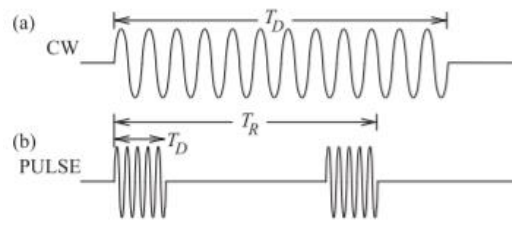


Figura 2-8 Onda continua frente a onda pulsada [42]

Después de haber transmitido un pulso el radar permanece en escucha esperando el eco de vuelta, llegue o no un eco al receptor el radar vuelve a transmitir es por ello que el alcance del radar depende de ese tiempo en el que el radar no transmite, también depende del tiempo en el que el radar está transmitiendo ya que durante ese tiempo no puede recibir nada ya que no sería capaz de interpretarlo, debido a esto es de vital importancia establecer un PRF determinado según el objetivo que tenga el radar.

El *Pulse Repetition Interval* (PRI) es el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso y el siguiente, además es la inversa del PRF.

2.4.6 Ganancia

La ganancia es un parámetro de toda antena que expresa relación entre la densidad de potencia radiada en la dirección de máxima potencia y la densidad de potencia que radiaría una antena ideal en las mismas condiciones de funcionamiento [41].

La ganancia de una antena se expresa en dB o dBi si dicha ganancia se refiere a una antena isotrópica. La ganancia es un factor a tener en cuenta ya que afecta al alcance del radar, este parámetro depende de la forma de la antena, de la frecuencia de trabajo y la eficiencia del sistema que tienen en cuenta las posibles pérdidas.

2.4.7 Resolución en distancia y azimutal

La resolución azimutal o angular indica hasta qué diferencia angular es capaz de distinguir entre dos blancos diferentes el radar, esto está directamente relacionado con las características de la antena ya que depende del ancho de lóbulo.

La resolución en distancia es un concepto similar a la resolución angular, esta resolución indica la capacidad del radar para distinguir entre dos blancos que se encuentran cercanos entre sí.

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad 2-5$$

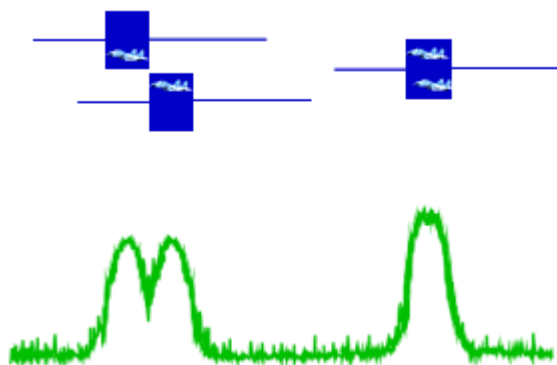


Figura 2-9 Resolución en distancia [43]

Como se muestra en la Figura 2-9, la resolución en distancia depende directamente del ancho de pulso.

2.4.8 Ecuación radar

Una de las formas de medir el alcance efectivo con el que cuenta un radar, sin tener en cuenta la curvatura de la tierra, es mediante la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida, es por ello que la ecuación radar es la base fundamental de la teoría de los radares[44].

Esta ecuación permite observar como la potencia de la señal transmitida se va degradando en su propagación hacia el blanco y en el camino de vuelta debido a factores tanto externos como internos.

$$Pr = \frac{PtGtGr\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad 2-6$$

- Pr es la potencia recibida en el receptor del radar, después de que la señal haya incidido en el blanco.
- Pt es la potencia transmitida por el radar.
- Gt es la ganancia de transmisión
- Gr es la ganancia en la recepción del radar.
- λ es la longitud de onda de la señal, la que como se explica en el apartado 2.4.1 Caracterización de una onda, depende directamente de la frecuencia.
- σ es la RCS del blanco en el que ha incidido la señal.
- R es la distancia al blanco, es decir, el camino que tiene que recorrer la señal desde que sale de la antena del radar hasta que vuelve al mismo.
- L son las pérdidas de propagación por el medio, estas dependen del medio y de la frecuencia de la señal.

A esta expresión indicada anteriormente se le pueden añadir más términos en el denominador, los cuales hacen referencia a pérdidas que van desde factores que afectan al receptor hasta las despolarizaciones que sufren las señales en su trayecto debido al medio de propagación u otros factores como la reflexión o la refracción.

Despejando de esta expresión puede obtenerse el alcance máximo en recepción, como se observa depende de la potencia recibida, ya que como se ha comentado en apartados anteriores, los radares necesitan de una potencia mínima en recepción para poder interpretar la señal, es por ello que la potencia recibida se relaciona con la potencia mínima que puede recibir el radar para poder procesar la señal mediante la sensibilidad, S_{min} .

2.4.9 Distancia máxima no ambigua y distancia máxima horizonte

En el apartado anterior se presenta la ecuación radar como la base teórica de los radares, además como se ha explicado a raíz de ella se obtiene el alcance máximo en recepción, sin embargo, por mucho que este alcance sea importante, hay otros alcances que pueden limitar el alcance práctico del radar como se va a ver a continuación.

La distancia máxima no ambigua resuelve el problema de saber si el eco recibido pertenece al último eco transmitido o a algún pulso anterior, en caso de que el radar interprete un eco perteneciente a la señal transmitida hace dos pulsos situará al blanco a la distancia teniendo en cuenta el tiempo transcurrido desde la última señal transmitida y no desde la señal transmitida a la que pertenece el eco recibido, como se puede observar en la Figura 2-10.

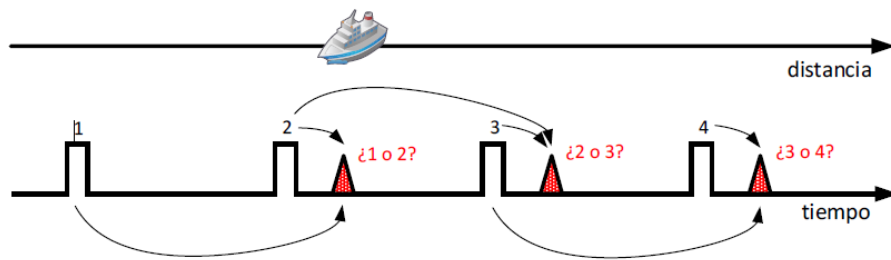


Figura 2-10 Distancia máxima no ambigua[45]

Si se relaciona el intervalo de repetición de pulsos, PRI, con la velocidad de la señal, se obtiene la distancia máxima no ambigua, es decir, hasta que distancia el radar va a interpretar las señales recibidas como corresponde.

$$Ru = \frac{c \cdot PRI}{2} \quad 2-7$$

Por otro lado, se encuentra otra limitación en cuanto al alcance máximo del radar si se tiene en cuenta la curvatura de la tierra cuando se emplean sistemas con onda de espacio.

$$R_{hor} = \sqrt{2 \cdot h_t \cdot k \cdot R_t} + \sqrt{2 \cdot h_r \cdot k \cdot R_t} \quad 2-8$$

Donde:

- h_t y h_r son las alturas de las antenas de transmisión y recepción simultáneamente.
- K es un factor que depende del medio de propagación, generalmente en la atmósfera tiene un valor de $4/3$.
- R_t es el radio de la Tierra.

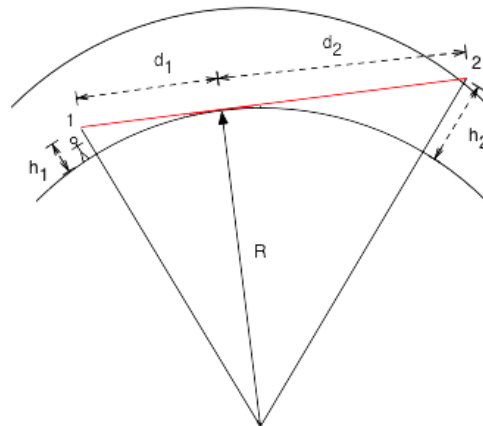


Figura 2-11 Distancia máxima horizonte [46]

Es por todo esto que ha sido explicado que la distancia efectiva de un radar depende de numerosos factores, los cuales hay que modificar o escoger en función de los fines a los que vaya a ser aplicado el radar. Para concluir se puede decir que la distancia máxima depende de la ecuación radar, la distancia máxima no ambigua y la distancia máxima horizonte.

2.4.10 Polarización

Como se ha explicado en el apartado 2.3, una onda electromagnética está constituida por la variación de un campo eléctrico y la variación de un campo magnético, ambos perpendiculares entre sí; además son perpendiculares a la dirección de propagación.

Lo expuesto anteriormente permite crear una idea de cómo se constituye una señal electromagnética, sin embargo y como se muestra en para una misma dirección de propagación puede haber infinitas disposiciones del campo eléctrico y magnético, es por ello que se llama polarización a las diferentes configuraciones de los campos eléctricos y magnéticos.

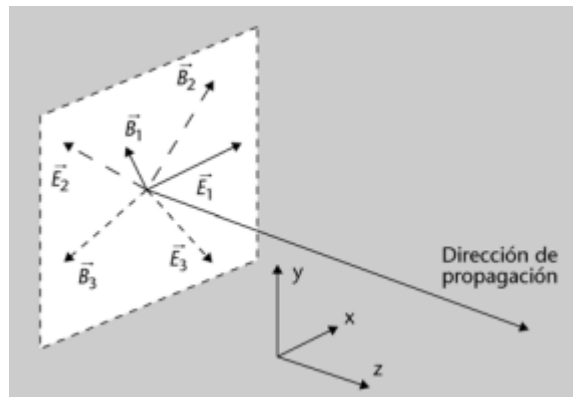


Figura 2-12 Disposición campo eléctrico y magnético [21]

En función de cómo se dispongan los campos eléctricos y magnéticos y de sus características se puede distinguir entre [22]:

- Polarización lineal, tiene lugar cuando ambos campos magnéticos tienen la misma amplitud y fase, es decir, alcanzan los máximos y mínimos al mismo tiempo o misma amplitud y la fase contraria, es decir, desfasada π radianes.
- Polarización circular, se da cuando ambas señales tienen la misma amplitud y se encuentran desfasadas $\pi/2$ radianes, por lo que cuando una señal alcanza su máximo la otra se encuentra en su mínimo y viceversa.
- Polarización elíptica, se da cuando la amplitud de las señales es la misma, pero se encuentran desfasadas un valor comprendido entre 2π y π sin incluirse.

2.5 Clases de radar

Como ha sido expuesto a lo largo de todos los apartados anteriores, en función de cómo se ajusten los factores que intervienen en un radar y de la interpretación que se haga de la información recogida se pueden diferenciar una gran variedad de radares.

- Radares de control del tráfico, que se basan en la tecnología doppler para monitorizar la velocidad de los vehículos.
- Radares meteorológicos.
- Radares de Vigilancia aérea, tanto para el ámbito civil como para el militar.
- Radares destinados a la detección de objetos
- Radares con aplicaciones médicas, capaces de crear imágenes.
- Radares espaciales, destinados a monitorizar la superficie de la Tierra desde satélites.
- Radares de navegación, en los cuales se va a centrar este trabajo y que pueden ser destinados a controlar la superficie del mar para ayudar a la navegación, detectando contactos y gracias a su paramétrica proporcionar información de gran ayuda para favorecer la seguridad. También los hay destinados a las aeronaves con fines similares.

Dentro de los radares de navegación se puede distinguir entre radares de seguimiento cuyo objetivo principal es monitorizar de manera constante y automática a los blancos y los radares de búsqueda que como su propio nombre indica se dedican a la exploración de la superficie con la intención de detectar contactos con diferentes objetivos que van desde la seguridad a la navegación, imprescindible en cualquier buque, hasta aplicaciones tácticas como ocurre en el caso de los usos militares [47].

Además puede hacerse otra gran distinción entre los tipos de radares en función de si se trata de un radar de pulsos o un radar de onda continua [48]. Los radares de onda pulsada emiten señales con una gran potencia, seguida por una espera con la intención de recibir un eco durante ese tiempo sin transmitir, por el contrario, los radares de onda continua (*Continuous Wave, CW*), transmiten una señal sin ninguna espera, es decir, lo hacen de manera continua.

2.6 Beamforming y apuntamiento electrónico

El Beamforming es una tecnología que se encuentran en gran desarrollo debido a las ventajas que tiene frente a los métodos tradicionales, el beamforming consiste en un método de conformado electrónico del haz de un array de antenas.

Esto consiste en crear un haz estrecho [49], es decir, con gran apuntamiento a través del desfase de señal entre las diferentes antenas, además gracias a este desfase entre señales es capaz de dirigir el haz en una dirección específica.

Además de dirigir toda la energía del array de antenas en la dirección deseada, esta tecnología consigue aumentar la SNR ya que reduce los lóbulos laterales en función de la distancia que haya entre las diferentes antenas que constituyen el array empleado [50].

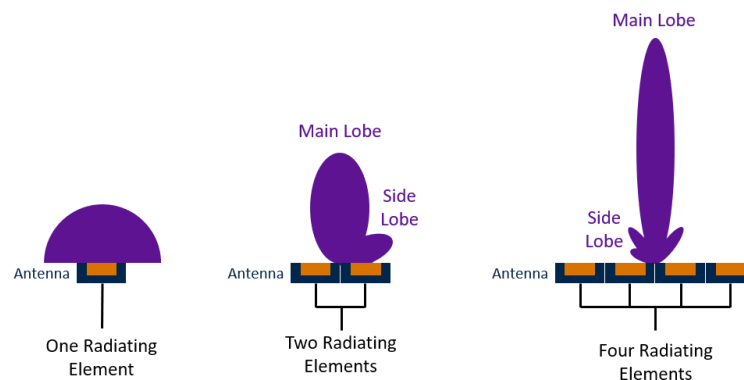


Figura 2-13 Beamforming [51]

Básicamente lo que consigue el beamforming es concentrar la energía de todo el array de antenas en una dirección específica ajustando la amplitud y la fase de la señal de cada antena en lugar de radiar todas las direcciones.

En este trabajo interesa conocer cómo funciona el beamforming en recepción ya que es lo que se va a aplicar. Para ayudar a entender cómo funciona se va a usar la Figura 2-14.

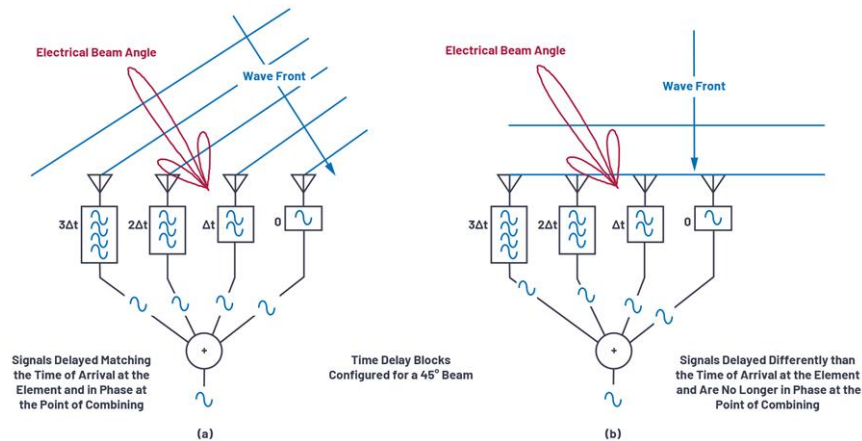


Figura 2-14 Incidencia del frente de onda [52]

Cuando el frente de onda incide sobre el array de antenas con un cierto ángulo se produce un desfase temporal en la recepción en las diferentes antenas que constituye el array, es decir, la onda llega primero a una antena que a otras.

En el tiempo que la onda incide en la primera antena, el frente de onda continua viajando hasta encontrar otra antena, durante este tiempo la onda va cambiando su fase, es por ello que la segunda antena recibe la onda más tarde y con diferente fase que la antena anterior. Caracterizando esa diferencia de fase se logra determinar la dirección de la que proviene el frente de onda.

Para conseguir apuntar el frente de onda donde se quiere el apuntamiento electrónico se basa en el control electrónico de los transmisores de la antena, además de utilizar conjuntos de antenas que reciben el nombre de matrices de antenas [53].

2.7 Radar pasivo, diferencias y funcionamiento

Tal y como se observa en el título que da nombre a este trabajo, el radar pasivo es la base del mismo, es por ello que anteriormente se ha expuesto toda la información necesaria para poder comprender el funcionamiento de la tecnología radar.

El radar pasivo se basa en la tecnología biestática [14], ya que la antena transmisora y la receptora se encuentran en diferentes localizaciones y a una determinada distancia. A continuación, se va a explicar cómo este sistema puede determinar la posición de los blancos, tanto en azimut como en distancia.

Lo primero de todo es determinar la distancia a la que se encuentra el blanco, y posteriormente con otro método se determina el azimut, estableciendo así la posición del mismo. Para conseguir esto es necesario que la antena receptora reciba tanto la señal rebotada del blanco como la señal directa de la antena transmisora, sin realizar ningún rebote, lo que se conoce como señal de referencia.

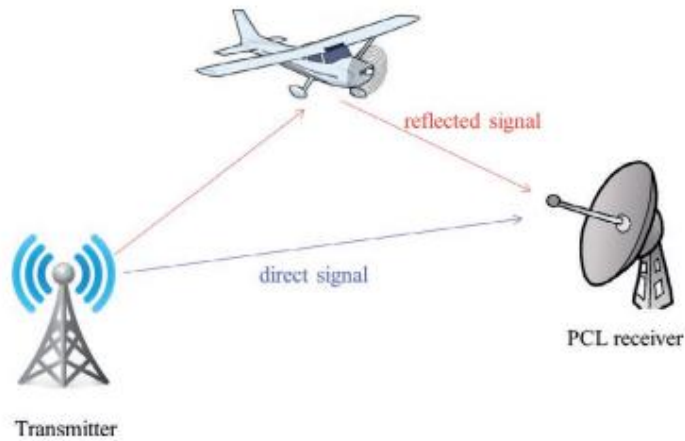


Figura 2-15 Estructura radar biestático [54]

Para determinar la distancia se compara la distancia entre el iluminador de oportunidad y la antena receptora (descrita como “L”) y la distancia existente entre el iluminador de oportunidad, blanco y antena receptora ($R_t + R_r$) como se muestra en la Figura 2-16.

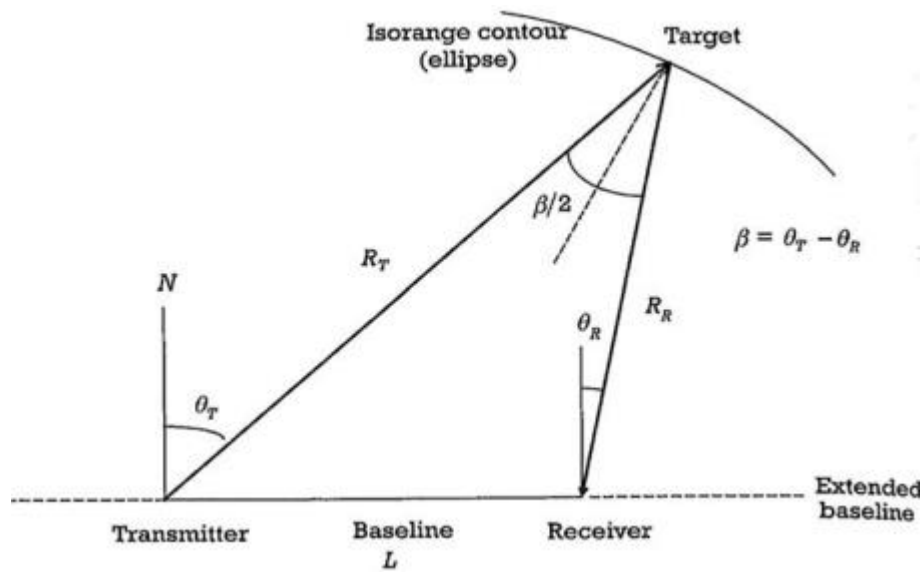


Figura 2-16 Problema trigonométrico radar pasivo [14]

Mediante estas distancias que se conocen desde el momento en el que la antena receptora recibe ambas señales, la de referencia y la que ha incidido en el blanco, se traza una elipse, en la cual las antenas actúan como focos de la elipse. Esta elipse recibe el nombre de Óvalos de Cassini en cualquier punto de dicha elipse se puede encontrar el blanco, ya que todos los puntos de esa elipse cumplen la condición de que la distancia recorrida por la onda es la misma [55].

Para dar solución al problema biestático se desarrolla la siguiente ecuación que permite determinar la distancia entre el receptor y el blanco. Primero se especifica que la distancia recorrida por la onda electromagnética desde su salida del transmisor, rebote en el blanco y llegada al receptor recibe el nombre de distancia biestática (R_b).

$$Rr = \frac{Rb^2 - L^2}{2 \cdot (Rb - L \cdot \cos\theta)} \quad 2-9$$

Donde R_r es la distancia que interesa determinar para determinar la posición de un blanco respecto al receptor, R_b es la distancia total que recorre la señal, llamada distancia biestática. L es la distancia lineal entre el transmisor y el receptor, camino utilizado por la señal de referencia

Una vez que se tiene al blanco sobre esa elipse es necesario determinar en qué punto de ella se encuentra, para ello se pueden aplicar técnicas de beamforming, determinando así el azimut por el que la antena ha recibido la señal. Cruzando la demora con la elipse se tiene la posición del blanco.

Para conocer el alcance máximo de este sistema es necesario aplicar lo explicado en el apartado Ecuación radar de manera más compleja, ya que en este caso la distancia recorrida es la suma de las distancias transmisor-blanco-receptor por lo que el problema no es tan trivial. Para encontrar solución se emplean elipses que “circunscriben” al transmisor, al receptor y al blanco, a lo que se le conoce como geometría biestática.

Esta tecnología es mayoritariamente usada por el mundo militar, puede funcionar sin conocer el emplazamiento o localización de la fuente emisora con la intención de obtener la presencia y demora de la señal, sin embargo, en este trabajo se parte del conocimiento de la posición de la fuente emisora, para así poder determinar tanto azimut como distancia al blanco.

En este campo a la fuente emisora se la conoce como iluminador de oportunidad [55], donde nace uno de los principales inconvenientes de esta tecnología ya que el receptor no conoce los parámetros de la señal que está siendo radiada por el iluminador de oportunidad. En este trabajo se va a utilizar una fuente de emisión conocida por lo que también se evita este problema.

A pesar de contar con grandes ventajas tácticas, esta tecnología cuenta con menor precisión por lo que la localización de los objetivos es menos fiable debido a la separación entre el emisor y el receptor por lo que como se ha explicado antes hay que resolver un problema de trigonometría [55].

2.8 Aplicaciones del radar pasivo y ventajas

El uso de los radares pasivos está muy extendido en el mundo civil, pero sobre todo en el mundo militar en el que proporciona una serie de ventajas que pueden ser vitales para el desarrollo de un conflicto militar como se va a explicar a continuación, sin embargo, las ventajas que aporta la implementación de un radar pasivo pueden ir más allá de las militares.

2.8.1 Ventajas generales

Las ventajas generales que se van a comentar a continuación también son aplicables al mundo militar, pero estas son ventajas que afectan tanto al mundo civil como al mundo militar ya que provienen directamente de las propias características del radar pasivo y de sus componentes.

Los radares pasivos son más económicos que los radares activos desde su desarrollo hasta su utilización y mantenimiento ya que su diseño es más simple debido a que requieren menos componentes para su funcionamiento, además presentan la oportunidad debido a su mayor sencillez de operar con componentes comerciales salidos del estante (COSE).

Otro punto clave con el que cuentan los radares pasivos es que no tienen la necesidad de trabajar con una frecuencia determinada, lo que elimina la necesidad de la asignación de frecuencia. Los radares activos deben operar en una frecuencia determinada lo que puede suponer interferencias con otros equipos que trabajen en la misma señal necesitando una coordinación de frecuencias.

Además, debido a que estos no emiten señales electromagnéticas no contribuyen a la saturación del medio, por lo que son más adecuados para operar en zonas urbanas o entornos militares donde se encuentran diversos sistemas de comunicaciones y radares.

Por último, la portabilidad se presenta como una gran oportunidad ya que debido a su diseño más simple y no requerir de grandes fuentes de energía pueden ser transportados o instalados en diferentes plataformas o entornos.

2.8.2 Ventajas en el mundo militar

Uno de los principios más básicos en la táctica militar y por ende en la naval es la discreción, evitar darse a conocer y ocultar la posición permite garantizar la sorpresa lo que puede traducirse en encontrar al enemigo desprevenido y sin prepararse.

Que el enemigo no conozca la situación o las intenciones de la fuerza amiga le suprime en gran medida la capacidad de reacción y en un enfrentamiento las reacciones tienen que ser rápidas y precisas si se quiere garantizar la supervivencia y reducir al máximo los daños causados, tanto materiales como humanos.

El radar pasivo que se pretende desarrollar en este trabajo de fin de grado se trata de un radar pasivo al uso, lo que lo hace diferente es el tipo de utilidad que se le quiere dar tal y como se explica en el apartado Explicación táctica de la posible aplicación del trabajo.

Las ventajas tácticas que puede dotar a las unidades que empleen un radar pasivo van desde la discreción que aporta este sistema ya que no se requiere emitir ninguna onda electromagnética hasta reducir la probabilidad de ser impactado por un misil que cuente con un radar pasivo como sistema de guiado ya que una de las reacciones ante la detección de un misil (según su clasificación) es apagar los sistemas que radian para evitar ser detectados, sin embargo, si se cuenta con un radar pasivo se puede realizar el seguimiento del misil por si es necesario neutralizarlo.

A pesar de aportar diferentes ventajas, en la que se centra este proyecto es en la discreción que aporta, generalmente cuando un buque quiere pasar desapercibido, sin ser detectado lo hace a base de un coste como es la pérdida de sensores lo que afecta en gran medida a su capacidad de detectar otros buques o incluso a su capacidad artillera.

Lo interesante de este proyecto es que permite obtener el grado de discreción deseado, pero mantiene la capacidad de seguir detectando al enemigo, realizar su seguimiento y en caso de que fuese necesario enfrentarlo.

Por último, otro punto fuerte que implica la adopción de este sistema y que va más allá de la táctica es el coste que tiene su implementación. El uso de los radares pasivos es más barato que el uso de un radar que sí que emite, son más simples por lo que deberían fallar menos y además de requieren menos espacio para almacenar sus sistemas, lo cual está muy valorado en el mundo naval.

3 DESARROLLO DEL TFG

En este apartado se va a describir todo el proceso seguido hasta conseguir implementar el sistema de un radar pasivo con el objetivo de detectar a una fuerza enemiga de la manera más discreta posible.

Se va a comentar todo el proceso hasta llegar a la implementación del mismo para luego poder obtener unas conclusiones que demuestren si es viable y rentable la incorporación de este sistema en los buques de la Armada desde un punto de vista táctico.

Como ha sido comentando en el Capítulo 1, el sistema inicial que se va a elaborar consiste en un array de antenas de dos elementos, representados en este primer sistema por antenas Yagi, que actúan como antenas receptoras, además para poder poner a prueba el sistema en el laboratorio y hacer las pruebas pertinentes antes de embarcarlo y hacer la prueba final se necesita una antena transmisora que actúe como iluminador de oportunidad, esta antena trabaja a la frecuencia de 9410 MHz, que es la frecuencia a la que trabaja el radar Furuno de las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval Militar que es donde se van a realizar las últimas pruebas que decidirán si es viable o no la aplicación de este proyecto.

Como método alternativo se plantea otro sistema, también constituido por dos antenas, pero se elimina el “Down-converter” y la traslación de frecuencia se realiza mediante un oscilador local común para los dos elementos del array de antenas. Esto evita que los osciladores independientes oscilen en frecuencias similares, pero distintas, además se garantiza que las frecuencias y las fases del oscilador local de cada uno de los elementos del array de antenas sea siempre la misma.

3.1 Secuencia a seguir

En este apartado se van a explicar los ensayos y pruebas realizados durante el desarrollo del proyecto. Estas pruebas van desde simple calibraciones, pruebas de software utilizado hasta los ensayos en los que se pone en práctica los sistemas planteados durante el proyecto para comprobar su utilidad y viabilidad.

El desarrollo seguido durante la elaboración del proyecto es muy similar en los dos sistemas planteados, la diferencia entre ellos es el tipo de pruebas que se realiza, pero el motivo por el que se realizan y su objetivo es el mismo.

Lo que determina que prueba hacer con cada sistema está fijado por las características del mismo, ya que por ejemplo el primer sistema, en el que se cuenta con un oscilador independiente para cada elemento, la antena transmisora tiene mayor potencia de emisión que la del radar HB100 empleada en el segundo sistema, lo que le permite realizar ensayos donde la antena transmisora y el array de antenas se encuentren separados por una distancia mayor.

Como se ha indicado anteriormente el primero de los pasos es la determinación de la frecuencia que reciben las antenas sin la presencia del oscilador local, para determinar así que frecuencia es la necesaria para reducir la señal recibida.

Posteriormente se procede a realizar los primeros ensayos que determinan la viabilidad del sistema planteado, no en función de su precisión en la determinación de la posición si no en base a la capacidad de correlación ya que será un factor clave en el desarrollo de los ensayos posteriores. Por ejemplo, la antena empleada en el segundo sistema HB100 no cuenta con una gran ganancia ni potencia de radiación lo que limita el alcance del sistema.

Una vez que se observan cuáles son los límites y el entorno en el que hay que trabajar para realizar las mediciones en el laboratorio se procede a realizar las primeras pruebas de cada uno de los sistemas planteados.

Estas primeras pruebas consisten en realizar una grabación de las señales recibidas por las antenas que componen el sistema en primera instancia y realizar así una correlación de señales, comprobando que la correlación obtenida es apta para continuar con el desarrollo del proyecto, ya que una mala correlación imposibilita obtener la velocidad gracias al doppler y la determinación de la demora del objeto a través del beamforming.

Para la realización del mismo se dispone el array de antenas enfrentado con la antena transmisora, en apuntamiento mecánico, ya que es la disposición más básica y donde menos errores se introducen.

Una vez se comprueba que las señales correlan de manera exacta y es posible determinar la frecuencia doppler y con ella la velocidad se procede a cambiar la disposición del sistema, siendo esta una posición relativa entre transmisión y recepción más parecida a lo que se va a enfrentar el sistema en la situación real que pretenden abarcar este trabajo de fin de grado.

Manteniendo esta posición relativa entre la antena transmisora y el array de antenas se proceden a realizar diversas pruebas en las que se cambian las distancias entre blanco y antenas o entre antenas, además se prueba el sistema en otras localizaciones.

En caso del primer sistema planteado se realizan dos tipos de ensayo fuera del laboratorio con la intención de cambiar el escenario y comprobar cómo afectan estos cambios al sistema y acerca así los ensayos lo máximo posible a la situación real que se quiere conseguir.

Uno de las últimas pruebas que se realizan es la de cambiar la antena transmisora utilizada en el laboratorio y sustituirla por el iluminador de oportunidad que se va a utilizar, esto permite comenzar a interpretar datos con señales donde la potencia es mucho superior a la utilizada en el laboratorio además se deja de usar una onda continua y se experimenta con una onda pulsada.

La prueba final antes de instalar el sistema en un buque y comprobar su funcionamiento en el ambiente real para el que se ha diseñado es realizar experimentos para determinar el azimut de llegada del frente de onda mediante la técnica del beamforming explicado anteriormente.

3.2 Calibrado de antenas

Para llevar a cabo el proyecto se va a constituir un array de antenas de tres elementos, el proyecto cuenta con cuatro antenas, pero una de ellas se utiliza como señal de referencia.

Los ensayos se van a realizar con sistemas planteados, la diferencia entre ellos se encuentra en la forma de realizar la reducción de frecuencia. En el primero de los sistemas está se realiza mediante los “Down-converter”, uno por elemento del array de antenas, estos cuentan con un oscilador independiente y se quiere comprobar si esto afecta o no a la viabilidad de este primer sistema.

Por otro lado, se tiene el segundo sistema que va a ser probado en el que la reducción de frecuencia se realiza a través de un mezclador, donde se emplea un oscilador local para todos los elementos del array de antenas.

3.2.1 Primer sistema

La banda de trabajo del sistema, es la banda X y más concretamente 9410 MHz, esta frecuencia es muy alta para ser procesada por el digitalizador de señales con el que se cuenta por lo que es necesario reducirla y trasladar la frecuencia central hasta las centenas de MHz o unidades de GHz, pero esta frecuencia central no puede exceder los 6 GHz que es la frecuencia máxima con la que pueden trabajar los digitalizadores de señales, es por ello que a la antena Yagi se le acopla un “Down-converter” que se ocupa de ello.

El “Down converter” mostrado en la Figura 3-1 cuenta con un oscilador local que traslada la frecuencia a los 600 MHz, sin embargo, este dispositivo introduce cierto error. Cada antena cuenta con un oscilador diferente por lo que al trasladar la frecuencia cada antena entrega una señal con una frecuencia diferente, lo que afecta en gran medida al procesado de señales.



Figura 3-1 “Down-converter” frontal



Figura 3-2 “Down-converter” layout

El software se encarga de realizar la correlación las tres señales recibidas por el array para posteriormente compararla con la señal de referencia; si las frecuencias de las tres no es la misma, no se obtiene una señal con la potencia necesaria para poder compararla con la señal de referencia.

Hay que tener en cuenta que el trayecto de las ondas recibidas por el array es mucho mayor que la onda de referencia, por lo tanto, la intensidad de la señal es mucho menor, hasta el punto que casi no es aprovechable para su tratamiento y posterior interpretación.

Para poder realizar la correlación las tres señales de la manera correcta y poder compararla es necesario que las tres entreguen la misma frecuencia. Con la intención de determinar qué frecuencia entrega cada antena después de ser procesadas por el “Down converter” se realiza una medición de la señal de cada antena que va a constituir el array con un analizador de espectros.

La antena que actúa como emisora es la misma que se va a utilizar en los siguientes ensayos para no introducir más errores en la medición.

Tras medir la frecuencia con el analizador de espectros se obtienen los siguientes resultados:

- Antena 1: 598,65 MHz

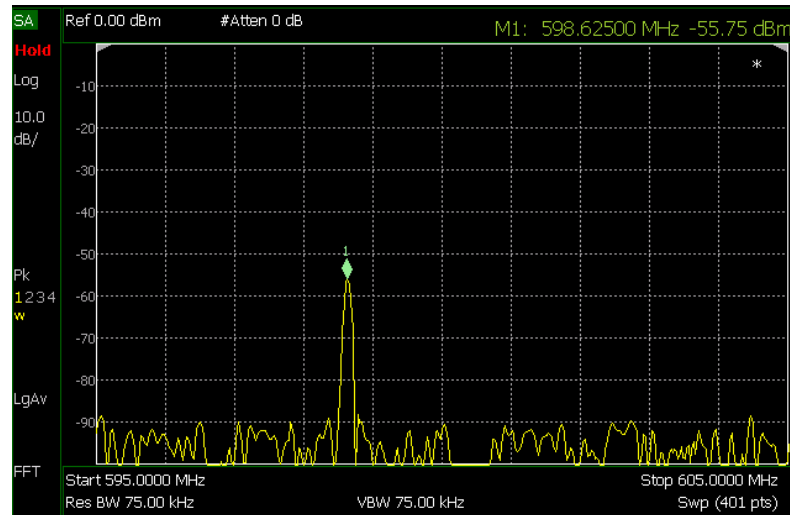


Figura 3-3 Frecuencia antena 1

- Antena 2: 603,25 MHz

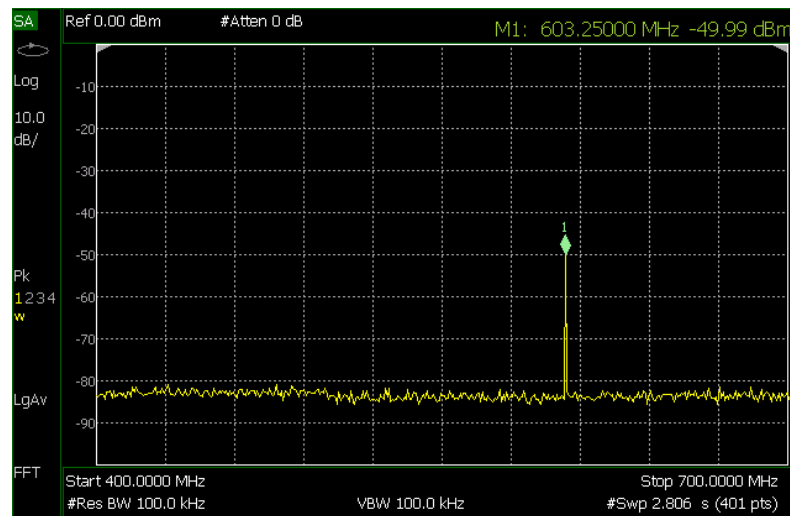


Figura 3-4 Frecuencia antena 2

- Antena 3: 602,50 MHz

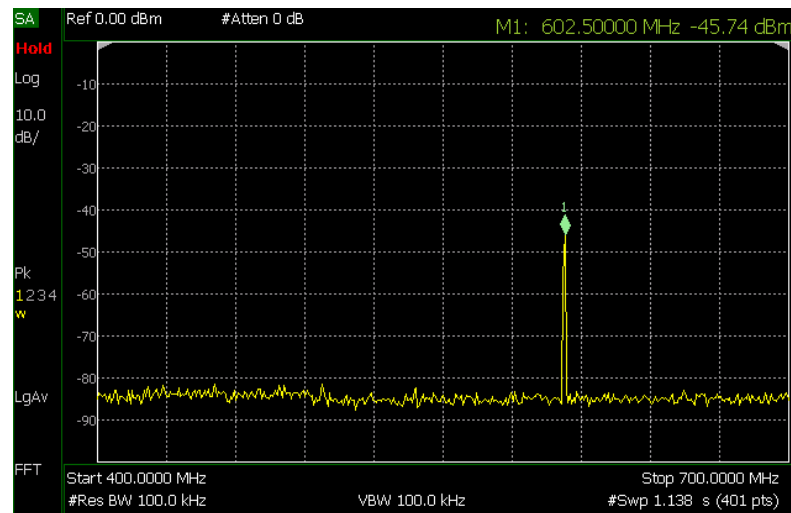


Figura 3-5 Frecuencia antenna 3

- Señal transmitida: 9410MHz

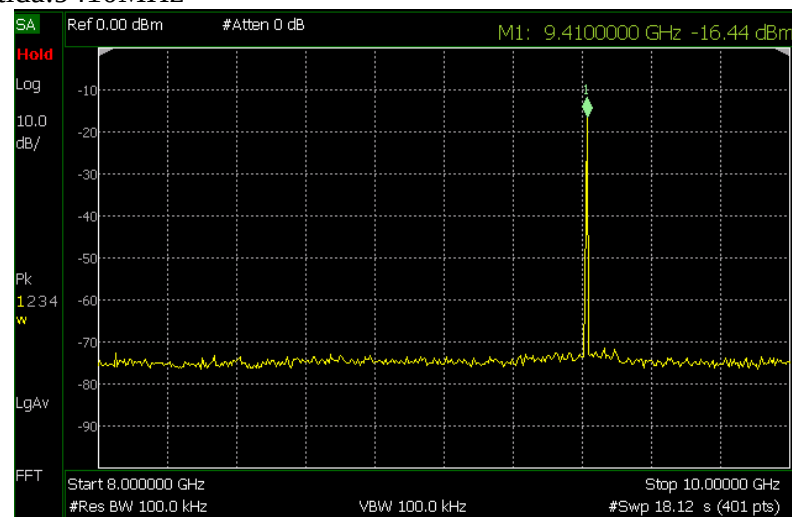


Figura 3-6 Espectro de la señal transmitida

Se observa que, a pesar de utilizar el mismo tipo de antena, mismo tipo de “Down converter” y misma frecuencia a la entrada de la antena, la señal de salida tiene diferente frecuencia, esto se debe en la mayor parte al “Down-converter” y a su oscilador. Para corregir esto se tiene que realizar una traslación de la frecuencia de las distintas señales para que coincidan en el espectro, es decir, centrar la frecuencia de las tres antenas en la misma frecuencia. Esto se realiza de manera digital en el programa GNU Radio.

3.2.2 Segundo sistema

Debido a la deficiente traslación o reducción de frecuencia obtenida con los osciladores se imposibilita la realización de una correlación de las señales procedentes del array antenas ya que la diferencia de frecuencias entre las señales llega a alcanzar los 500 kHz y como se explica más adelante para poder realizar una correlación es necesario que el software encuentre puntos comunes entre las señales por lo que con el sistema planteado es de gran dificultad.

Para solucionar este problema se plantea un nuevo sistema conformado por un único oscilador común a todo el array de antenas, un iluminador de oportunidad que en los ensayos es representado por la antena HB100 [56], dos mezcladores y un repartidor. Además de los equipos y/o dispositivos mencionados se cuenta con otros que hacen de apoyo de los que se hablará en los capítulos posteriores.

La antena HB100 generalmente se emplea como un sensor de movimiento microondas doppler con una gran variedad de aplicaciones. En el caso de este proyecto se utiliza uno que cuenta con una frecuencia de 10,489 GHz y una potencia de 5 mW, suficiente para realizar las primeras pruebas en un entorno controlado y de pequeñas distancias.



Figura 3-7 Antena HB100 [56]

Lo que se realiza para poder solucionar el problema anterior es utilizar un único oscilador local que reduzca la frecuencia de entrada en el array de antenas de manera que se pueda trabajar con las señales con los equipos con los que se cuenta, además trabajar con frecuencias del orden de magnitud empleado en este proyecto introduce grandes valores de pérdidas.

Para poder utilizar un único oscilador para los elementos del array de antenas se emplea un “splitter” o divisor. Este tiene forma de “T”, con tres entradas/salidas, por una de ellas se introduce la señal del oscilador, que en este caso es de 9,510 GHz. La potencia de esta señal se divide por las dos salidas restantes y es esa potencia la que alimenta el siguiente elemento, los mezcladores de frecuencia o “frequency mixer”.



Figura 3-8 Antena splitter [57]

El mezclador de frecuencias es muy similar al “splitter”, cuenta con tres entradas, por una de ellas entra la señal recibida por la antena a la que está conectado, este puerto se llama “RF”; por otra de las entradas llamada “LO” se recibe la señal aportada por el “splitter” y por la última (IF) sale una señal que es la diferencia entre la señal de la antena y del oscilador, reduciendo así la frecuencia de la señal con la que se trabaja.

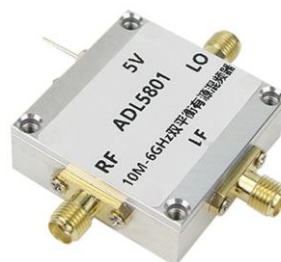


Figura 3-9 Mezclador de RF [58]

Básicamente, un mezclador de frecuencias cuenta en su interior con un circuito eléctrico que genera nuevas frecuencias de salida a través de dos señales entrantes, la nueva señal puede ser la suma de las

dos señales de entrada o la resta de las mismas. En el caso de aplicación para este proyecto se utiliza un “frequency mixer” que realiza la resta entre las frecuencias del oscilador local y la frecuencia recibida por la antena, reduciendo así la frecuencia con la que se va a trabajar desde los aproximadamente 10 GHz hasta los 972 MHz.

Las señales recibidas son grabadas mediante el software GNU Radio gracias al empleo de un SDR ADALM Pluto. Con las señales grabadas es con lo que se realizan todos los tratamientos de señales requeridos para poder determinar la posición y velocidad del blanco. Como se muestra en la Figura 3-10 las frecuencias centrales de ambas antenas es la misma.

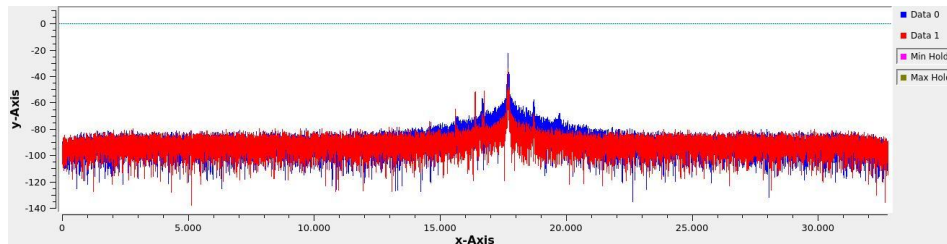


Figura 3-10 Frecuencia antenas segundo sistema

3.3 Sincronización de señales

Para poder determinar la posición de un contacto es necesario comparar las señales recibidas por el array de antenas con la señal de referencia. Para poder realizar esto es necesario que las señales del array de antenas se encuentren centradas en la misma frecuencia, como se ha visto en el apartado anterior esto no ocurre en el sistema planteado, es por ello que se va a utilizar un programa para conseguir sincronizar las señales recibidas.

El GNU Radio es un programa gratuito y de código abierto que permite procesar señales electromagnéticas con el objetivo de implementar sistemas de radio definidos por software [59]. Se apoya en los lenguajes de programación Python y C++, con lo que el programa es capaz de procesar y desarrollar señales radio en tiempo real con un alto rendimiento y de manera sencilla. En este proyecto se usa para sincronizar las señales del array de antenas, es decir, que todas ellas tengan la misma frecuencia central.

Para conectar las antenas de recepción al programa GNU Radio desde el que se sincronizarán las señales es necesario hacer uso del ADALM-PLUTO [60], se trata de un dispositivo para señales de radiofrecuencia que permite aplicar un software, es decir, es el puente entre las antenas y el software de procesado digital.



Figura 3-11 ADALM-PLUTO [60]

La limitación que tiene usar esta herramienta es que tan solo permite procesar dos señales al mismo tiempo, por lo que, para poder sincronizar todas las señales en la misma frecuencia, primero se sincronizan dos de ellas (en el caso de este proyecto, primero fueron las señales correspondientes a las antenas 2 y 3) y posteriormente se sincronizara la antena restante con una de las anteriores.

Para realizar esta sincronización, lo primero que se hace es crear un fichero donde se guardan las señales recogidas por las antenas cuando son afectadas por el iluminador de oportunidad como se muestra en la Figura 3-12. La foto hace referencia al primer grabado de señales que tuvo lugar en el laboratorio del Centro Universitario de la Defensa (CUD), sin embargo, cuando se pruebe en un ambiente real se procederá de la misma manera.

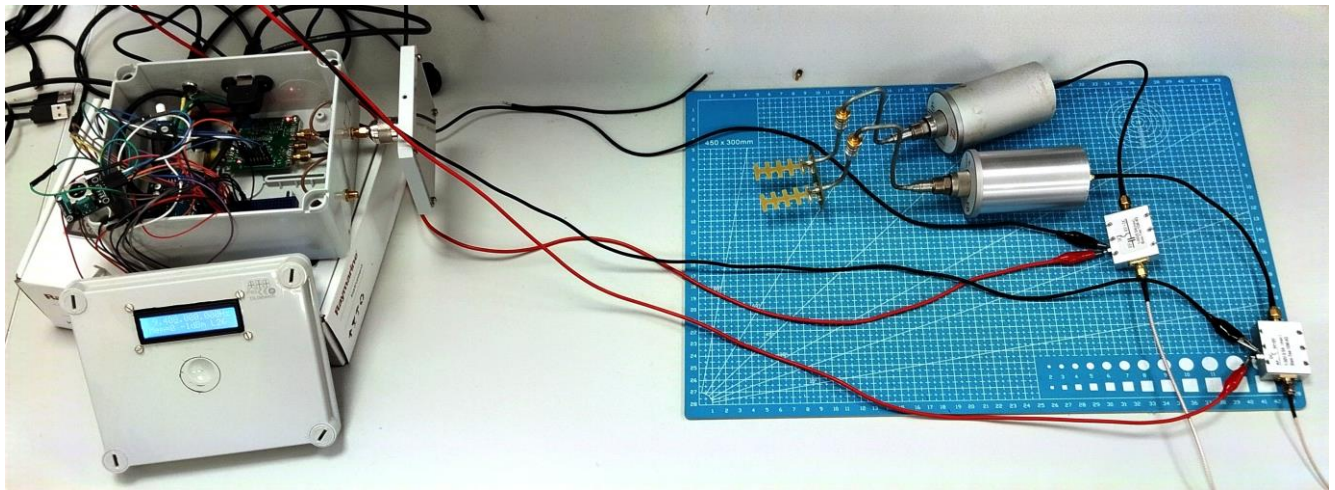


Figura 3-12 Traslación de señales del primer sistema

Posteriormente se procede a crear un código en GNU Radio en el que se centran las señales en la misma frecuencia con el objetivo de que se encuentren en el mismo espectro, para posteriormente poder correlarlas. Como se muestra a continuación las tres señales cuentan con una frecuencia que es diferente entre ellas. Lo que hace el código es medir la variación de la frecuencia en función del tiempo entre los sistemas de la antena 1 y la antena dos y por separado los sistemas de la antena 3 y la antena 2.

Por lo explicado anteriormente, el código sabe en cada momento exacto del tiempo la diferencia de frecuencia entre los sistemas, tomando la frecuencia del sistema 2 como referencia; conocido ese desfase se lo suma o se lo resta a los sistemas 1 y 3 para centrar todas las frecuencias en la frecuencia del sistema 2, sin alterar la fase de la onda.

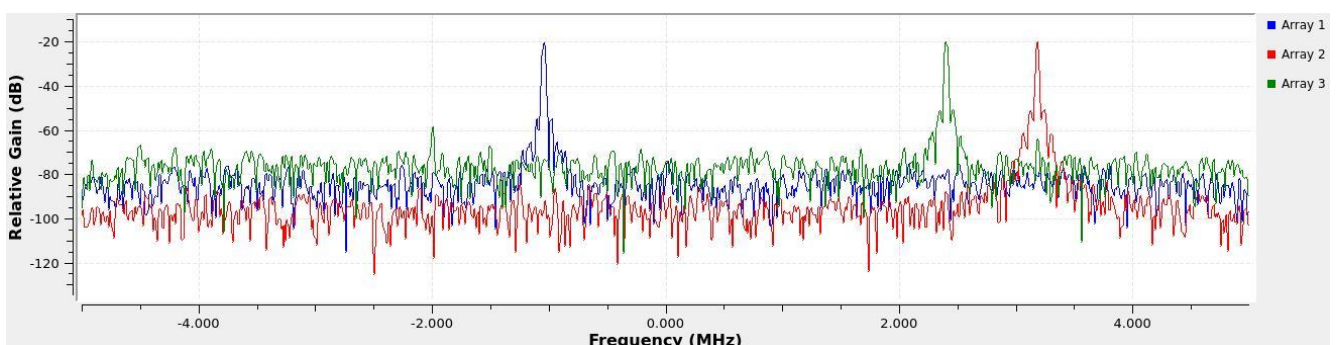


Figura 3-13 Señales no sincronizadas

Como se ha indicado anteriormente, este proceso sería necesario hacerlo con las señales de todas las antenas para poder procesarlas más tarde, con esto se ha conseguido el código que se usará más tarde cuando se vaya a aplicar la correlación de las mismas.

El mismo proceso se sigue para obtener un código que automáticamente sincronice las tres señales como se muestra en la imagen Figura 3-14.

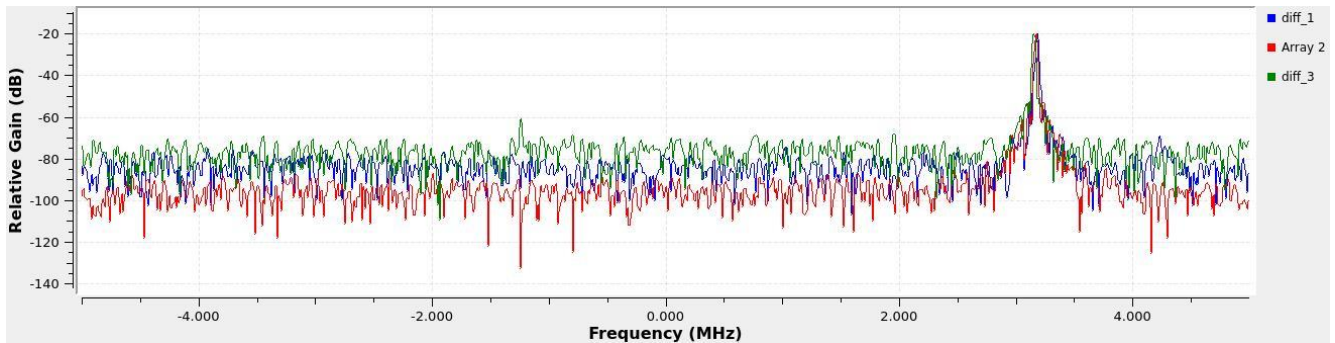


Figura 3-14 Señales sincronizadas

Una vez que se tienen las tres señales centradas en la misma frecuencia, se ha escogido de manera arbitraria siendo esta de 603,25 MHz, se puede proceder con el procedimiento que permitirá localizar indicando una distancia y una demora al contacto. El siguiente paso es la de introducir estas señales en un digitalizador de señales, el cual las sumará para posteriormente compararlas con la señal de referencia.

Para el segundo sistema planteado esta operación no es necesaria ya que como se muestra en la Figura 3-15 la frecuencia central de las señales recibidas es la misma en todos los elementos gracias al empleo de un único oscilador local.

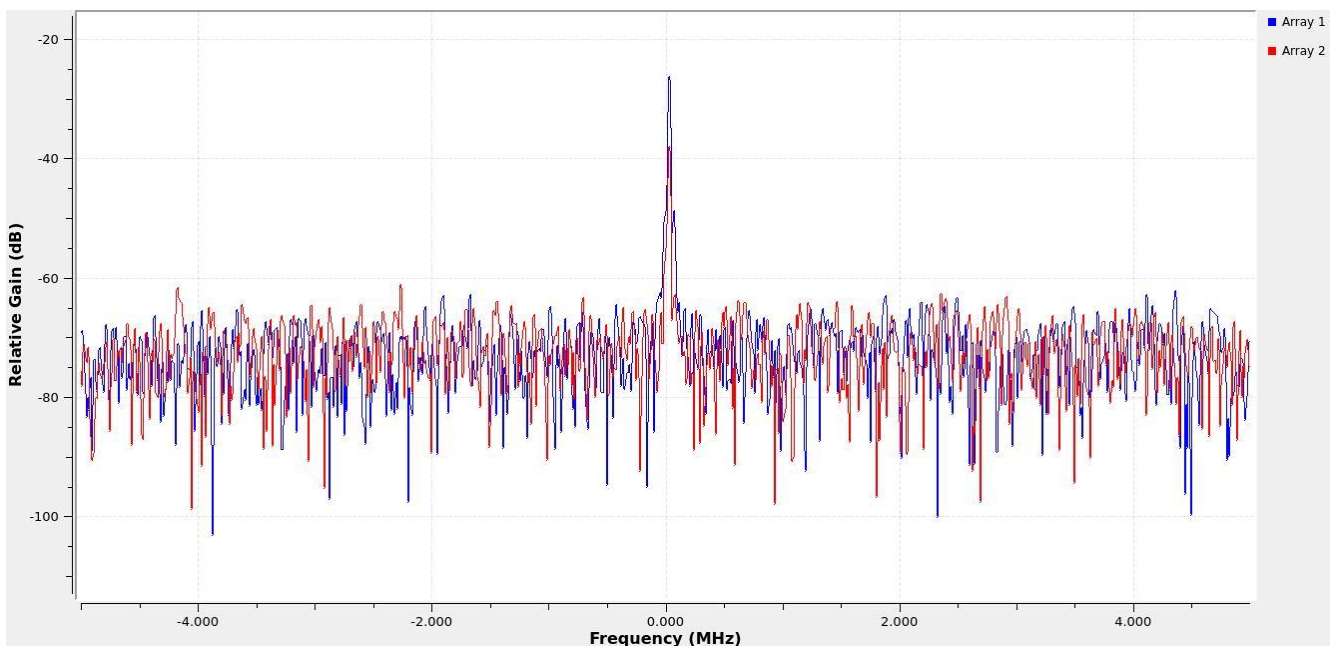


Figura 3-15 Señales sincronizadas del segundo sistema

Mediante el software que proporciona GNU Radio se realiza un programa que mide la diferencia de frecuencias en tiempo real de las señales sincronizadas de ambos sistemas, se observa que para el primer sistema esta diferencia es de valores cercanos a los 50 kHz, sin embargo en el segundo sistema donde la sincronización la realiza el mezclador de radiofrecuencia esta diferencia apenas alcanza la decena de Hz pudiendo comprobar de esta manera como afecta la utilización de un oscilador para cada uno de los elementos que componen el array de antenas.

3.4 Correlación de señales

3.4.1 Explicación teórica

La correlación de señales es un proceso que se apoya en las operaciones matemáticas para poder procesar, analizar, comparar y sacar conclusiones de diferentes señales. Básicamente la correlación de

señales permite obtener la densidad espectral de la energía o potencia de la señales lo que puede dar gran información como se explicará más adelante [61].

En este trabajo de fin de grado se va a usar la técnica de correlación de señales para poder sumar las señales recibidas por los diferentes elementos del array de antenas y así obtener un máximo espectral. El momento temporal en el que ocurra ese máximo quiere decir que todas las señales que están siendo tratadas tienen un pico de potencia en ese instante de tiempo, lo que indica la presencia de un blanco.

El problema es que al tratarse de un array de antenas, existe cierto desfase temporal en la llegada de la señal a los diferentes elementos del array de antenas, para solucionar esta discordancia y que se pueda realizar la correlación de señales se procede a utilizar el software de Matlab [62].

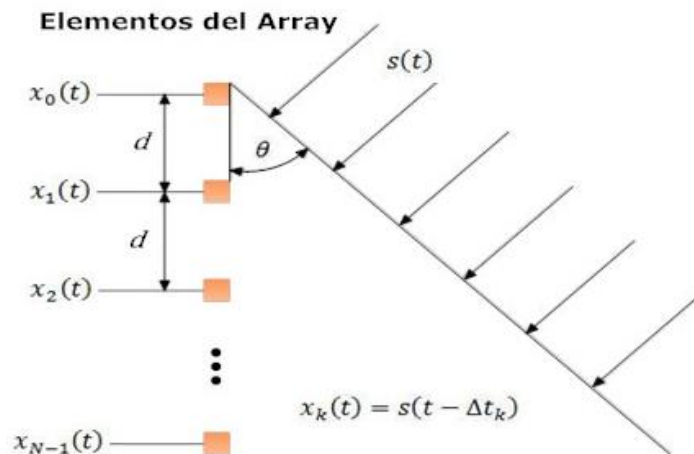


Figura 3-16 Incidencia de la señal en el array de antenas [63]

En la Figura 3-16 Incidencia de la señal en el array de antenas [63], se puede observar como cuando un sistema no se encuentra en la situación en la que el frente de onda incide de manera perpendicular, la señal alcanza primero a un elemento que, a otros, produciendo ese desfase temporal entre los elementos que constituyen el array de antenas.

Concretamente para solucionar el problema explicado previamente se emplea un comando de Matlab, llamado *Xcorr*.

La función *Xcorr* realiza una correlación cruzada entre los datos que se le introducen, en el caso que abarca este proyecto, los datos son tres señales electromagnéticas recogidas por el array de antenas. La correlación cruzada[64] consiste en comparar y medir la similitud entre los datos a medida que una fuente de datos (una señal de un elemento del array de antenas) se desplaza en relación a otra.

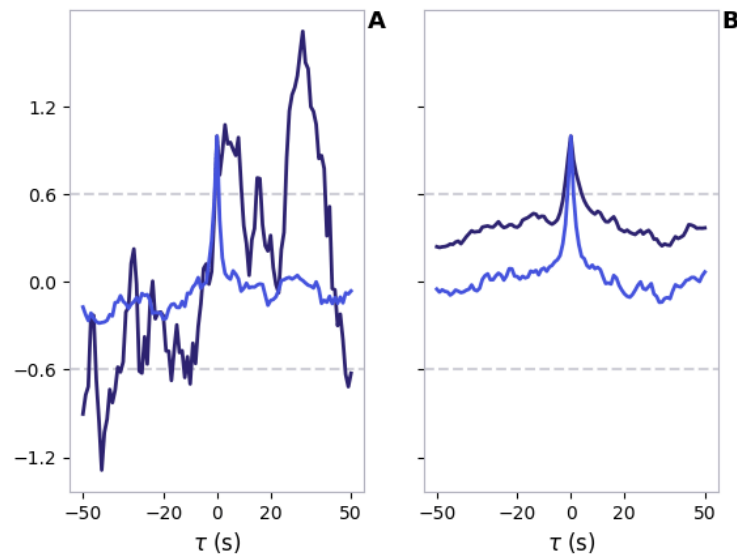


Figura 3-17 Correlación de señales[65]

La correlación se hace ya que es necesario sumar las señales recibidas por el array de antenas para obtener una onda con la suficiente intensidad que pueda ser comparada con la señal de referencia, entonces si se suman señales que no están correladas se obtiene una suma negativa, es decir, no aditiva, por el contrario, si se suman señales que sí que están correladas, al sumarlas se obtiene un pico de intensidad, como se muestra en la Figura 3-17.

3.4.2 Aplicación en el proyecto

Para la aplicación de este proyecto lo que se hace es grabar las señales recibidas por el array de antenas, se graban en el software GNU Radio, creando un fichero para cada elemento que constituye el array de antenas.

Una vez que se tiene estos ficheros se introducen en el programa MATLAB, en un código que además de otras funciones de las que se hablará más adelante realiza la función *Xcorr*, la cual se ha explicado en este apartado.

En función de la similitud y de la sincronización con el que cuentan las ondas se obtiene un diagrama u otro. En el caso de aplicar el primer sistema planteado donde cada elemento del array de antenas cuenta con un osciloscopio independiente encargado de realiza la reducción de frecuencia, este diagrama indica que no hay una buena correlación entre las señales debido a la diferencia de frecuencias entre las distintas señales.

Como se muestra en la Figura 3-18, la sincronización obtenida con el primer sistema puede dificultar en gran medida la correlación de las señales, poniendo en jaque el resto de los resultados.

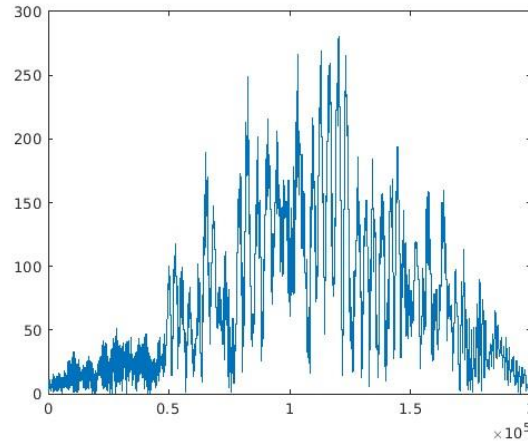


Figura 3-18 Correlación de señales del primer sistema

Por el contrario, con el segundo sistema planteado donde únicamente se trabaja con un oscilador local común para todos los elementos del array de antenas, la función de correlación indica que hay una gran correlación entre las señales como se observa en la Figura 3-19, lo que permite seguir con el desarrollo del proyecto ya que será posible aunar estas señales para después compararla con la señal de referencia y determinar la posición y velocidad de los contactos.

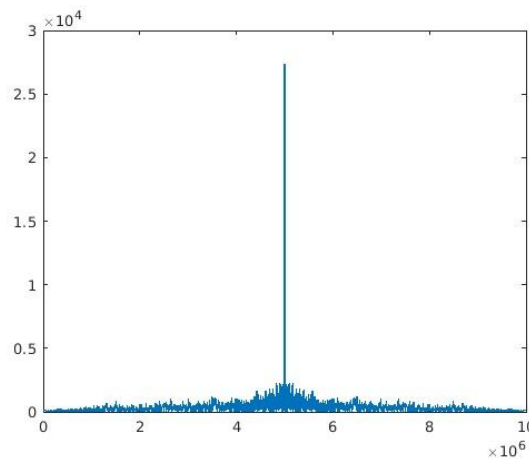


Figura 3-19 Correlación de señales del segundo sistema

3.5 Frecuencia doppler

A través de la determinación de la frecuencia doppler se puede determinar la velocidad con la que cuenta un blanco, además es uno de los métodos más usados tanto en el mundo civil como en el militar debido a su facilidad de implementación y su gran generalización en numerosas aplicaciones.

Cuando un transmisor emite una señal y esta incide en un blanco, su frecuencia se ve alterada en función de la velocidad y dirección relativas respecto a la antena [66], de manera que si un receptor conoce la frecuencia emitida por el transmisor y es capaz de determinar la variación de frecuencia en el frente de onda que recibe, puede calcular la frecuencia doppler.

$$f_d = f_r - f_t \quad 3-1$$

Donde f_d es la frecuencia doppler, f_t es la frecuencia en el momento de la transmisión y f_r en el momento de la recepción. Se observa que la frecuencia doppler es la variación de frecuencia que ha experimentado la onda debido a la velocidad relativa del blanco.

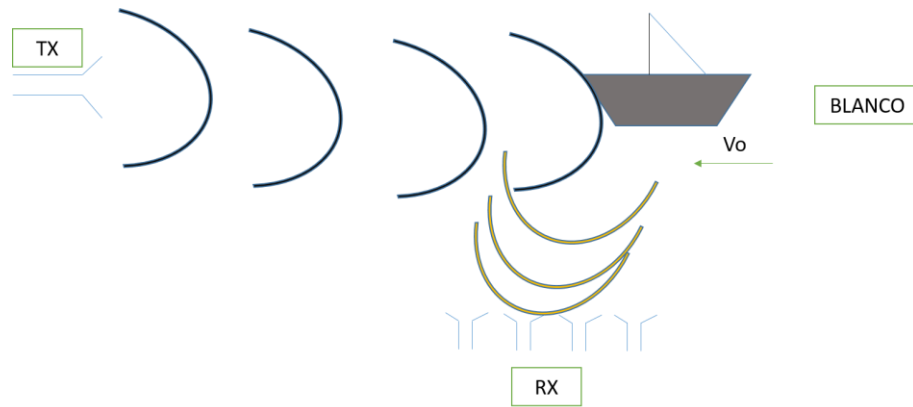


Figura 3-20 Frecuencia Doppler

El frente de ondas tras incidir sobre un blanco que cuenta con una velocidad relativa respecto a la antena transmisora sufre una variación en su frecuencia, esta alteración puede suponer una compresión o una expansión, provocando un aumento o disminución de la frecuencia recibida respectivamente.

Es por ello que, si un objeto se acerca, la frecuencia recibida será mayor que la emitida por lo que la frecuencia doppler será positiva, por el contrario si los objetos se alejan la frecuencia doppler será negativa. Por todo esto se define la siguiente ecuación, a través de la cual sabiendo la frecuencia radiada y la recibida se determina la velocidad del blanco.

$$fd = \frac{2 * Vr}{\lambda} \quad 3-2$$

Donde f_d es la frecuencia doppler, siendo esta la diferencia entre las frecuencias emitidas y recibidas como se indica anteriormente. V_r la velocidad relativa entre el blanco y el emisor del frente de onda. Y λ es la longitud de onda de la frecuencia transmitida.

En la aplicación al proyecto, este fenómeno permite determinar la velocidad a la que se desplazan los blancos, esto permite al sistema determinar tanto la distancia, demora y velocidad del blanco pudiendo aportar gran información sobre los blancos sin la necesidad de transmitir ningún pulso, es decir, mantenerse discretamente, lo que es uno de los principales objetivos de los radares pasivos.

En la Figura 3-21, se inserta un mapa doppler genérico, es un mapa obtenido en el laboratorio pero que solamente va a servir para explicar su interpretación y la disposición de los datos que presenta.

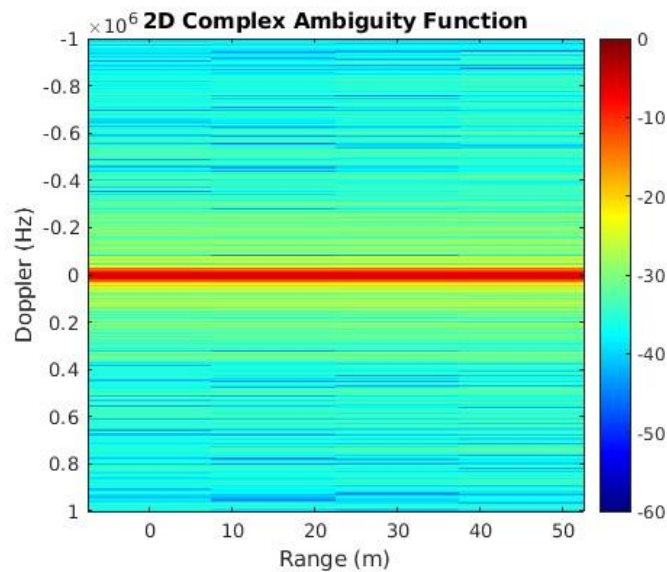


Figura 3-21 Mapa doppler

En el eje de las abscisas se encuentra la distancia a la cual se detecta el blanco, esta escala depende del alcance máximo del radar utilizado. En el eje de las ordenadas se encuentra la frecuencia doppler que presenta los blancos, esta frecuencia indica la velocidad de cada contacto a través de la ecuación 3-2 presentada en este apartado.

Por último, a la derecha de la imagen se observa una escala de colores donde se indica la intensidad del blanco detectado, esto indica que si aparece un contacto de color rojo es muy probable que se trate de un contacto real, por el contrario, si se aparece un contacto de color azul puede indicar que sea ruido o que la potencia con la que se ha recibido ese eco sea mínima.

La línea roja en la frecuencia doppler cero, indica que no se detecta ningún movimiento en todo el rango de alcances con el que cuenta el radar, esto es un efecto común a todos los mapas doppler debido a que las antenas siempre detectan que no hay movimiento, lo inusual para ellas es que lo haya.

3.6 Generación de los diagramas esperados

En este apartado se va a explicar los datos que se deberían obtener de manera ideal. La intención es usar el software de MATLAB para simular un transmisor ideal que hace las veces del oscilador local usado durante la elaboración de este proyecto. Además, se introducen blancos ficticios con la intención de poder constituir un escenario lo más real posible.

También se simula un receptor, un array de antenas constituido por tres elementos, siendo igual que con el que se ha trabajado en el primer sistema, además a este software se le pueden introducir parámetros que alejan a la simulación de algo ficticio y la acercan a parámetros que si bien no son los reales son los más certeros posibles.

La idea es introducir todos los parámetros que acerquen la simulación al escenario real que se ha planteado para el desarrollo de este trabajo de fin de grado para poder comparar los resultados obtenidos de manera real con unos datos que van a considerarse como teóricos.

Para poder realizar la simulación primero se realizan una simulación de las ondas transmitidas por el iluminador de oportunidad teniendo en cuenta que hay tres blancos en el escenario planteado, la frecuencia de la señal simulada es de 9.41 GHz y los blancos se encuentran a una distancia que puede ser cambiada en las distintas simulaciones. Además, se puede introducir velocidad a los blancos y observar así variaciones en la frecuencia doppler.

Una vez simulada la onda transmitida se introduce esa señal en otro software que realiza la función de receptor, además de simular el array de antenas realiza los cálculos que determinan la frecuencia doppler, representando los datos generados en un mapa doppler; estos cálculos incluyen la correlación de las señales del array de antenas dando una idea de cómo se debería observar la correlación de señales en un escenario en el que las distancias son mucho mayores que en el laboratorio y las velocidades de los contactos son velocidades reales con las que se puede encontrar el sistema planteado.

3.7 Software utilizado

En ayuda a la consecución de este proyecto, se han utilizado programas informáticos a modo de software para el tratamiento digital de señales, así como su interpretación. En este apartado no se van a explicar los códigos utilizados, ni su programación, tan solo se va a dejar constancia de que código se ha empleado y con qué intención, además de aclarar dónde se ha utilizado.

Los softwares claves utilizados en la realización de este Trabajo de Fin de Grado han sido dos, por un lado, el software libre que proporciona GNU Radio y por otro lado el software Matlab.

3.7.1 GNU Radio

Con este software se han realizado todas las grabaciones de señales para los ensayos, con el objeto de tener guardadas las mismas para poder realizar pruebas en cualquier momento ya que el software permite crear códigos en los que se pueden crear ficheros en los cuales se almacenan las señales recibidas por las distintas antenas.

Además, ha sido con la ayuda de este software donde se ha podido realizar la sincronización de las señales del primer sistema y comprobar así la eficacia de la sincronización determinando la viabilidad de realizar la correlación de señales del mismo.

Por otro lado, permite observar en tiempo real la potencia recibida, la frecuencia a la que se está recibiendo y la similitud entre las señales recibidas. También se han creado diversos códigos para determinar la diferencia de frecuencias de señal a tiempo real y en valor numérico lo que permite hacerse una idea de la calidad de la sincronización.

3.7.2 Matlab

Matlab es un entorno para el análisis iterativo y procesos de diseño que se ayuda de un lenguaje de programación para expresar las matemáticas con las que operar. Permite el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, visualización de los mismos y calculo numérico [67].

Este programa informático ha sido utilizado en la interpretación y análisis de los datos obtenidos. Se han utilizado diversos programas para cumplir con los objetivos planteados.

Un programa determina la correlación de las señales, otro determina las gráficas CAF (*Complex Ambiguity Function*) en las que una vez realizada la correlación de las señales se obtienen gráficos doppler para determinar la velocidad de los blancos.

Por último, se utiliza un código que permite determinar la dirección de donde viene la señal, utilizando el beamforming. Este software estudia la señal tras ser correlada, para ello repasa todos los azimuts que se le indiquen, buscando pico de potencia, donde haya un pico de potencia implica que en esa dirección se encuentra el blanco que ha hecho rebotar la señal transmitida.

Es gracias a la rapidez que aporta este programa informático que se ha podido realizar numerosos ensayos en función de las necesidades e inquietudes del momento, ya que es capaz de trabajar con ficheros de un tamaño considerable debido a la información que recogen y procesarlos de manera ágil. Además, aporta una gran ayuda con la realización de gráficas que permiten obtener una interpretación de los datos de una manera visual y de forma más sencilla.

Además como esfuerzo adicional se ha utilizado un código programado en el software de Matlab que permite simular el escenario real en el que se pretende aplicar el sistema planteado durante este proyecto como se explica en el apartado 3.6 Generación de los diagramas esperados, este código consta de dos partes, una que realiza la simulación del iluminador de oportunidad obteniendo archivos que simulan el frente de onda; además se pueden introducir diferentes blancos en el escenario con sus respectivas velocidades y distancias,

La segunda parte trata de simular el array de antenas que hace las veces de receptor, siendo un radar pasivo en modo biestático. Esto permite obtener las gráficas CAF comentadas anteriormente para dar información de lo que se debe de esperar a la hora de aplicar el proyecto en el escenario real.

3.8 Iluminador de oportunidad

El iluminador de oportunidad o antena emisora que se va a utilizar para realizar la última prueba del proyecto que permitirá determinar la viabilidad del mismo es el Radar marino FURUNO 1824C-BB, perteneciente a la empresa Furuno y el que equipan las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval Militar [68].

Es necesario la realización de este apartado ya que en él se van a mostrar la información técnica del radar utilizado como iluminador de oportunidad. Esta información técnica es la que va a permitir discriminar resultados, ya que igual se interpretan datos que vienen de otros radares Furuno presentes en el escenario o se interpretan datos de manera incorrecta debido a una incorrecta adquisición de los mismos.

Los parámetros a considerar son el ancho de pulso, el PRF/PRI y frecuencia de trabajo. Además, con estos datos se podrá obtener los distintos alcances que puede tener este sistema.

El ancho de pulso de este radar depende de la escala seleccionada, variando desde 0.08 segundos a una escala de 0.125-1.5MN hasta los 0.8 segundos en la escala de 3-72MN.

El PRF del mismo se encuentra entre 2100 Hz y los 600 Hz en función de la escala seleccionada como se muestra en la Tabla 1 Datos técnicos iluminador de oportunidad

La frecuencia de trabajo es la citada en otros apartados y es de 9410 MHz $\pm$ 30 MHz, por otro lado, un factor relevante en el alcance máximo es la potencia transmitida la cual es de 2.2 kW.

Tabla 1 Datos técnicos iluminador de oportunidad

ESCALA (MN)	ANCHO DE PULSO (s)	PRF (Hz)	FRECUENCIA (MHz)
0.125-1.5	0.08	2100	9410
1.5-3	0.3	1200	9410
3-72	0.8	600	9410

3.8.1 Radiación del iluminador de oportunidad

Se han realizado diversas mediciones del iluminador de oportunidad, que como ya se ha explicado se trata del Radar marino FURUNO 1824C-BB. Estas grabaciones se han realizado en el muelle Almirante Vierna de la Escuela Naval Militar, muelle en el que atracan las Lanchas de Instrucción. Estas mediciones se han realizado en presencia de cuatro de las Lanchas de Instrucción.

Cada una de las Lanchas de instrucción cuenta con dos radares Furuno lo que dificulta la lectura de las mediciones realizadas, sin embargo y debido al PRF y a la velocidad de giro con el que cuentan estos radares ha sido posible realizar mediciones sin demasiadas interferencias.

La prueba se ha realizado cuando se encontraban atracadas ya que así se conoce la posición exacta del iluminador de oportunidad y se puede realizar un apuntamiento directo a dicho iluminador de oportunidad para obtener la máxima información posible, además de esta manera la distancia se reduce al máximo, así como las posibles interferencias que puedan existir en un escenario más abierto con la presencia de otros buques.

Tal y como se especifica en el Manual del Operador del Radar marino FURUNO 1824C-BB [68], la frecuencia central de radiación de este modelo de radar es de 9,410 GHz, sin embargo y como característica común a todas las antenas toda radiación tiene un ancho de banda en el realmente se encuentra la frecuencia de radiación, en el caso de este radar el ancho de banda (BW, Band width) es de 30 MHz.

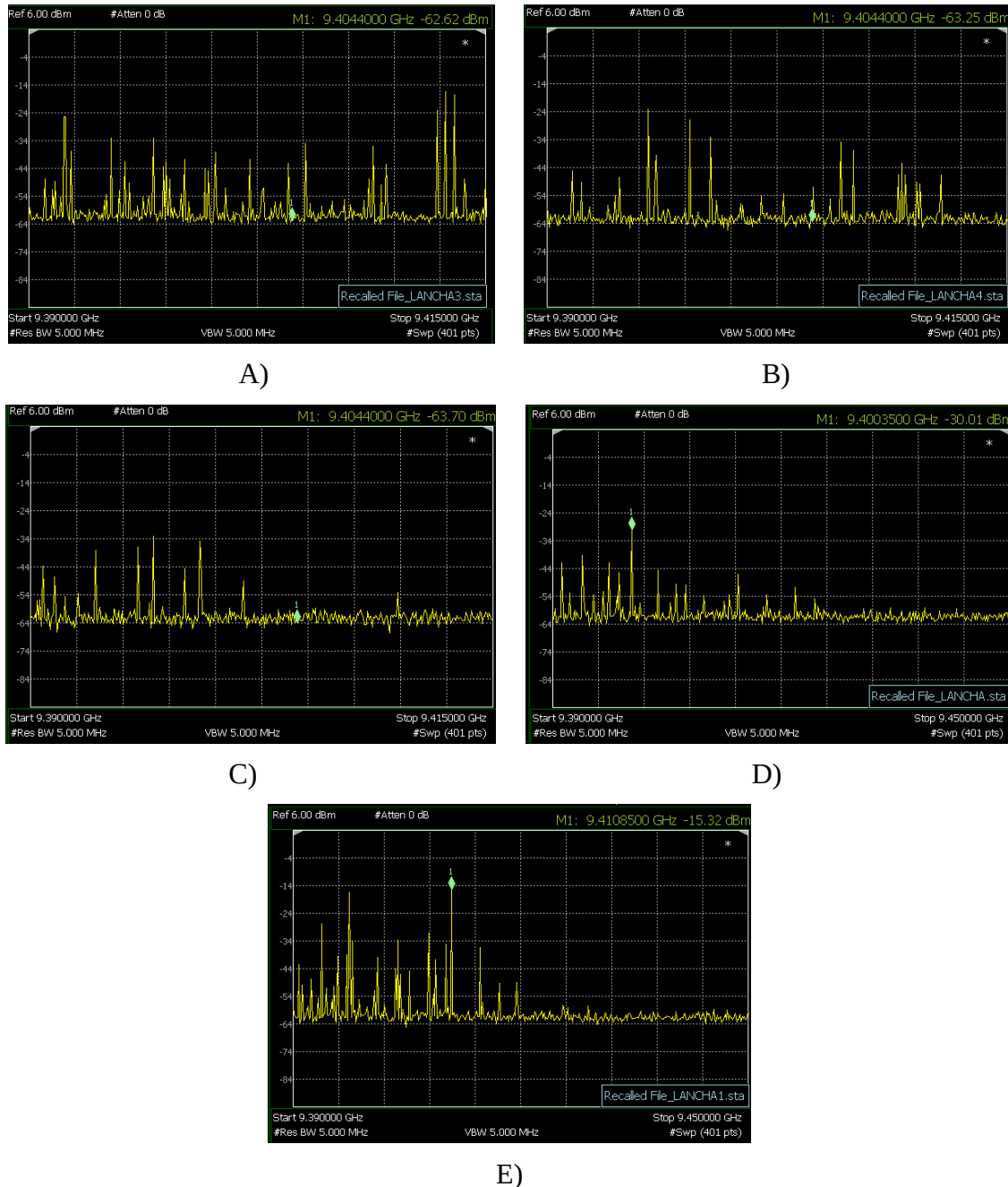


Figura 3-22 Medición LLII A) Medición 1. B) Medición 2. C) Medición 3. D) Medición 4. E) Medición 5.

Como se observa en la Figura 3-22, las mediciones se han realizado observando dos anchos de banda del espectro, uno que comienza en 9,39 GHz y acaba en 9,415 GHz, esto da como resultado un ancho

de banda total de 25 MHz como queda patente en las figuras “A”, “B” y “C”. Por el contrario, se escogió otro ancho de banda mayor que comienza en los 9,39 GHz y finaliza en los 9,45 GHz, lo que da un ancho de banda total 60 MHz, lo que supone un doble del ancho de banda del iluminador de oportunidad.

Tal y como se ha explicado en el párrafo anterior las figuras de la “A” a la “C”, el ancho de banda se ajusta al ancho de banda del iluminador, es por ello que lo que se observa mediante el analizador de espectros es la emisión proveniente de un iluminador de oportunidad.

3.8.2 Identificación del iluminador de oportunidad

La intención de este apartado es permitir identificar el iluminador de oportunidad que se va a utilizar para el desarrollo de este trabajo de fin de grado, ya que al tratarse de un radar comercial hay un gran número de embarcaciones y buques que lo instalan en sus unidades por lo que al intentar realizar alguna prueba es de esperar que haya numerosas interferencias de otros radares similares.

La idea es realizar mediciones reales del Radar marino FURUNO 1824C-BB para encontrar las características que definen un radar ya que estas pueden variar en función del radar debido a diversos motivos para así tener identificado el iluminador de oportunidad y a la hora de realizar experimentos no confundirlo con otro radar que haya en las inmediaciones.

Cabe señalar que como se indica en el apartado Iluminador de oportunidad, el transmisor utilizado para la realización de estas pruebas se corresponde con el Radar marino FURUNO 1824C-BB, el cual a diferencia de los transmisores empleados en los otros experimentos no es de onda continua, se trata de un radar de onda pulsada, el cual tiene un PRI que se muestra en la Figura 3-23.

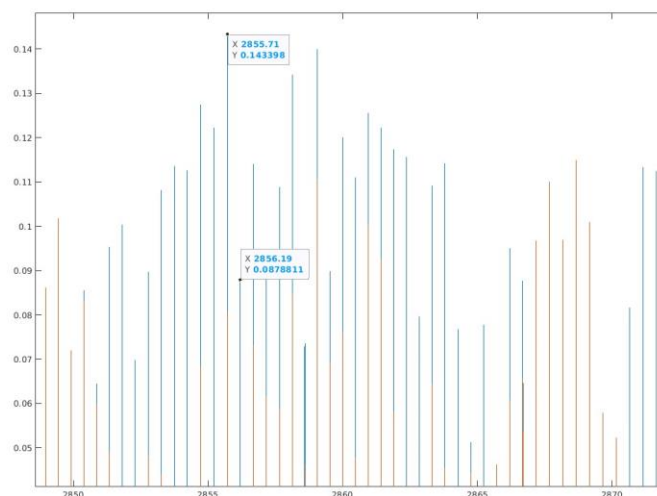


Figura 3-23 Iluminador de oportunidad

El PRI indica el intervalo de tiempo entre dos pulsos consecutivos, como se muestra en la figura superior la diferencia de tiempo entre el final de un pulso y el comienzo del siguiente es 0,48 ms, es decir, cada vez que ocurre ese tiempo se transmite un nuevo pulso. Si se transforma el PRI en unidades de frecuencia se obtiene el PRF, la frecuencia con la que se transmite un pulso. Según la Figura 3-23, el PRF es de 2083 Hz, lo que se asimila en gran medida al PRF utilizado por el radar transmisor, el cual según los datos técnicos es de 2100 Hz.

Por otro lado, también se puede determinar el tiempo que el transmisor está iluminando al receptor, es decir, el intervalo de tiempo durante el cual radar se encuentra transmitiendo una onda electromagnética hacia el array de antenas, para determinarlo se ha aplicado un zoom sobre el pulso recibido obteniendo lo que aparece en la Figura 3-24 en la cual se puede determinar que el tiempo es de 70 ms (milisegundos) lo que implica que se transmiten aproximadamente 145 pulsos en ese tiempo.

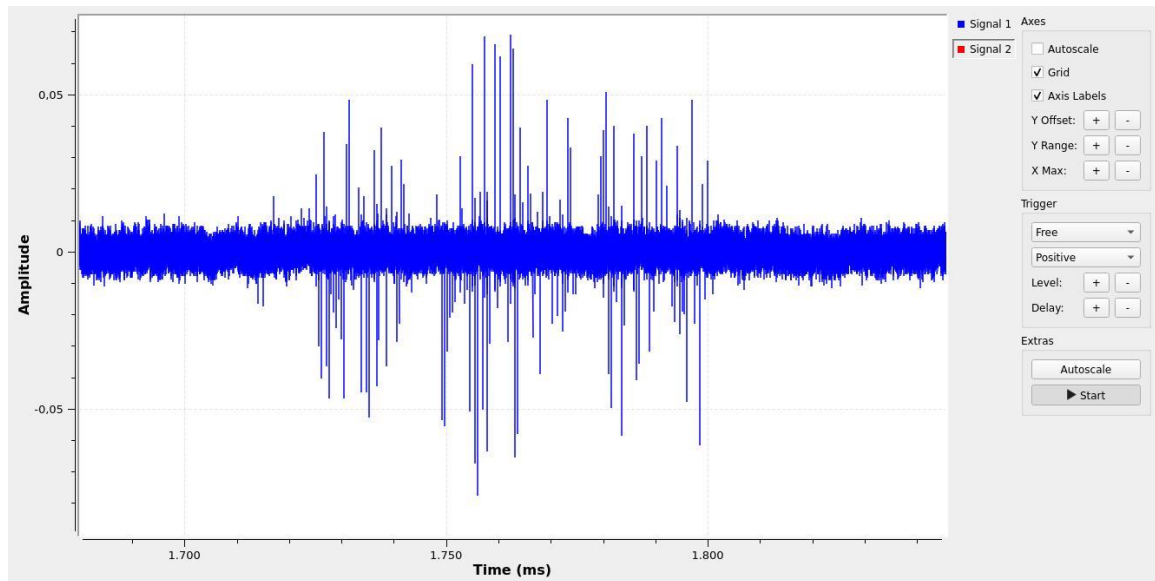


Figura 3-24 Tiempo de iluminación del Radar marino FURUNO 1824C-BB

Otra característica que es importante conocer acerca del iluminador de oportunidad empleado es la velocidad de rotación de la antena, esta característica se puede observar en la Figura 3-25, ya que cada intervalo donde hay picos de potencia se corresponde con un momento en el que el radar esta iluminando directamente el array de antenas, a modo de señal de referencia.

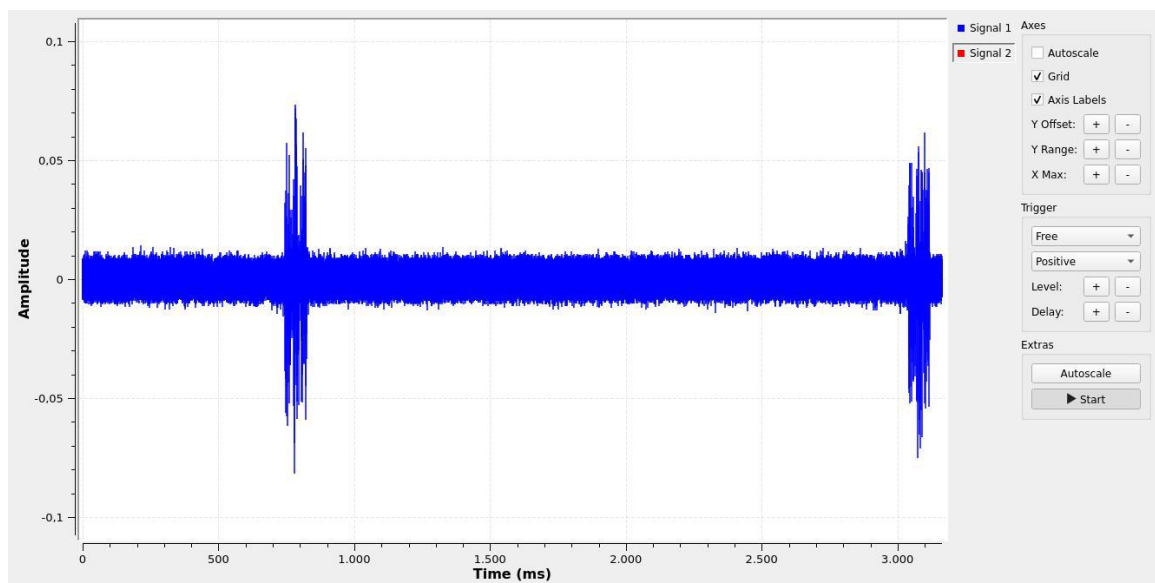


Figura 3-25 Velocidad de rotación Radar marino FURUNO 1824C-BB

Como se puede observar en la Figura 3-25, la diferencia de tiempo entre una iluminación y otra es de 2,1 segundos, esto quiere decir que la antena del radar realiza un barrido completo de 360° en un tiempo de 2,1 segundos.

Otro aspecto a tener en cuenta es el array de antenas que se ha utilizado, en este primer caso se corresponde con el segundo sistema, en el cual la distancia entre elementos es de 8,5 cm, muy superior a lo que sería lo ideal, siendo esto $\lambda/2$ que al utilizar una frecuencia central de 9,41 MHz debería ser de 1,594 cm. Esta distancia entre elementos se debe al tamaño de las antenas utilizadas que imposibilitan reducir la distancia.

3.9 Diagrama de radiación del array de antenas

Un array de antenas no es más que un conjunto de antenas que funcionan como una sola, con la ventaja de que no requieren de componentes mecánicos para el apuntamiento de la antena, sino que se produce de manera electrónica. Para conseguir el apuntamiento electrónico se controla la amplitud de las corrientes y la fase de cada antena lo que provoca que también se altere el diagrama de radiación del array de antenas [41].

Cada elemento que conforma el array de antenas cuenta con un diagrama de radiación propio, como en el array de antenas con el que se trabaja todos los elementos son los mismos, el diagrama de radiación es prácticamente idéntico.

Sin embargo, existe otro elemento que afecta al diagrama de radiación del array de antenas, que es el factor de array[30], este es el diagrama de radiación de una agrupación de elementos isotrópicos.

Para obtener el diagrama de radiación del array de antenas solo es necesario realizar el producto del factor array y del diagrama de radiación de cada elemento; este puede verse afectado según la disposición relativa de los elementos, la amplitud de excitación, la fase de los elementos y mediante la configuración geométrica del mismo.

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

4.1 Resultados obtenidos

Tal y como se indica en el título de este apartado, se van a introducir los resultados obtenidos durante las diferentes pruebas realizadas a cada uno de los sistemas planteados para posteriormente en el apartado Conclusiones y líneas futuras comentar el aprendizaje que se ha obtenido durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado.

Como ya se ha explicado se van a utilizar los datos y gráficas obtenidas mediante el software de simulación como referencia, es decir, los datos simulados van a ser tratados como teóricos mientras que la información recogida en las pruebas realizadas en los diferentes sistemas va a ser considerada como las mediciones reales.

Esto se hace así para poder comparar y obtener conclusiones basadas en datos que se acercan lo máximo posible a la realidad haciendo que este trabajo de fin de grado pueda ser considerado como algo real y que ha sido constatado.

Evidentemente por las limitaciones con las que se cuenta y de que se trata de una idea y no de un proyecto real que se quiera aplicar a los buques de guerra no va a ser posible la implementación de este sistema en los buques de la Armada donde verdaderamente se podría experimentar con su potencial y determinar la viabilidad que persigue este proyecto.

4.1.1 Datos esperados

Tras aplicar el software explicado en el apartado Generación de los diagramas esperados se han obtenido los datos y gráficas que se explican a continuación. Se han realizado diferentes simulaciones en las que se han introducido parámetros distintos en cada una de ellas como se va a mostrar más adelante. El objetivo que se persigue no es otro que obtener datos los cuales han sido producidos en las situaciones ante las que se quiere enfrentar este proyecto.

Primero se va a mostrar los datos obtenidos cuando los blancos no cuentan con ninguna velocidad relativa por lo que su frecuencia doppler debería de ser cero, ya que así se puede comparar con las primeras pruebas realizadas a los sistemas planteados.

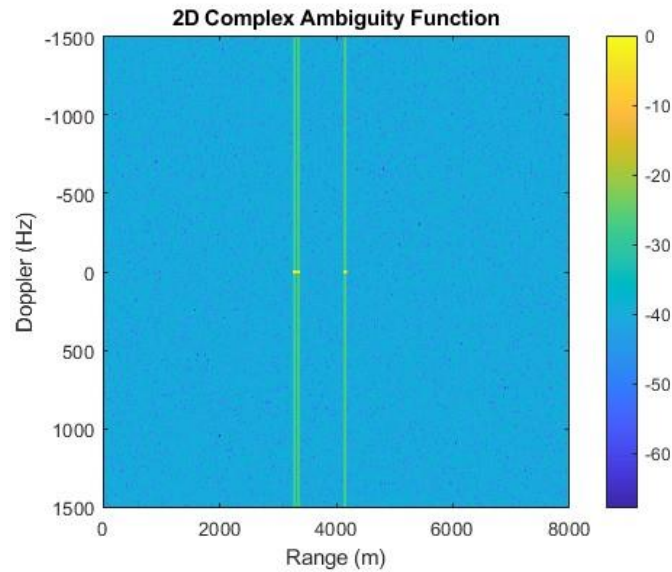


Figura 4-1 CAF 2D Sin velocidad

En esta primera Figura 4-1 se observa el mapa doppler comentando en el apartado anterior Frecuencia doppler. En este se puede observar cómo debería ser un mapa doppler en el caso en el que los blancos carezcan de velocidad relativa respecto al iluminador de oportunidad.

También se puede observar cómo aparecen los tres ecos en la frecuencia doppler 0 Hz, apenas hay distancia entre ellos porque para estas primeras simulaciones solo se está cambiando la velocidad de los blancos para facilitar la explicación. La frecuencia doppler 0 Hz hace referencia implica que no hay variación de frecuencia entre las señales transmitidas y las recibidas lo que se traduce en una velocidad radial nula del blanco.

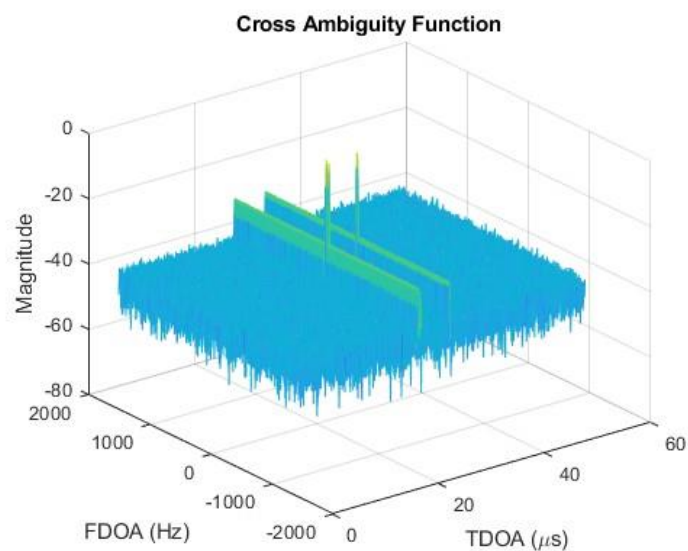


Figura 4-2 CAF 3D Sin velocidad

Este es el gráfico 3D general, en el que se relacionan las frecuencias doppler recibidas, el momento en el que se reciben las señales con la magnitud recibida, la cual se obtiene tras la correlación de las señales recibidas por cada elemento del array de antenas que actúa como receptor. El pico de magnitud implica que se trata de un blanco ya que se trata de un pico común a todas las señales de cada uno de los elementos del array de antenas.

A continuación, se muestran dos figuras más las cuales provienen del gráfico anterior, pero se trata de una vista en la que tan solo se muestran dos ejes, es decir, provienen del gráfico 3D, pero son una representación 2D en función de la información que se quiera representar.

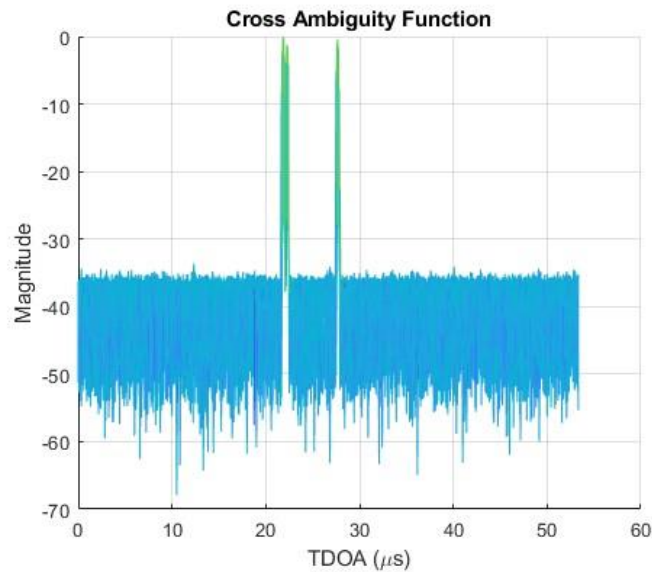


Figura 4-3 CAF 3D Eje XZ sin velocidad

En la Figura 4-3, se muestran los ejes XZ de la Figura 4-2, los cuales representan el momento en el que se reciben las señales. Se puede observar cómo dos de ecos provenientes de dos blancos se reciben prácticamente al mismo tiempo, esto se puede constatar con el mapa doppler, ya que esto indica que esos contactos se encuentran a la misma distancia del receptor, esto no quiere decir que se encuentren juntos ya que para determinar eso habría que aplicar el beamforming y hallar así el azimuth del que proviene cada una de las señales recibidas.

Este tipo de gráfico es el que permite determinar la distancia a la que se encuentran los blancos del receptor, dibujando así los Óvalos de Cassini para cada una de las señales recibidas; más adelante tras aplicar el beamforming se determinará el azimuth y con ello se tendrá la posición (distancia y demora) y a velocidad de cada uno de los contactos.

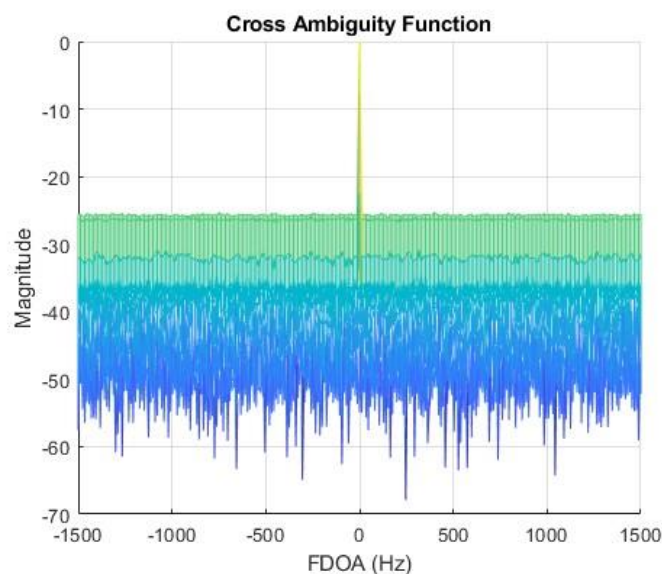


Figura 4-4 CAF 3D Eje YZ sin velocidad

Por otro lado, en la Figura 4-4 se muestra la frecuencia doppler en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la potencia con la que se recibe la señal tras la correlación. Este gráfico aporta una información muy similar al mapa doppler, pero en este se puede observar de manera más exacta las frecuencias doppler recibidas y con su magnitud lo que puede permitir discernir entre lo que realmente es un blanco y lo que no.

En el caso de esta figura se observa como todos los blancos cuentan con una frecuencia doppler 0, ya que ninguno de ellos cuenta con cinemática.

A continuación, se van a insertar los gráficos correspondientes a la recepción de señales por parte del array de antenas cuando los blancos cuentan con velocidad respecto al receptor, este es el caso más real que se puede encontrar en la mar en la situación táctica en la que se quiere aplicar este trabajo de fin de grado debido a que un buque de guerra se encuentre sin cinemática es una desventaja táctica ya que se le hace difícil el reaccionar frente a ataques enemigos.

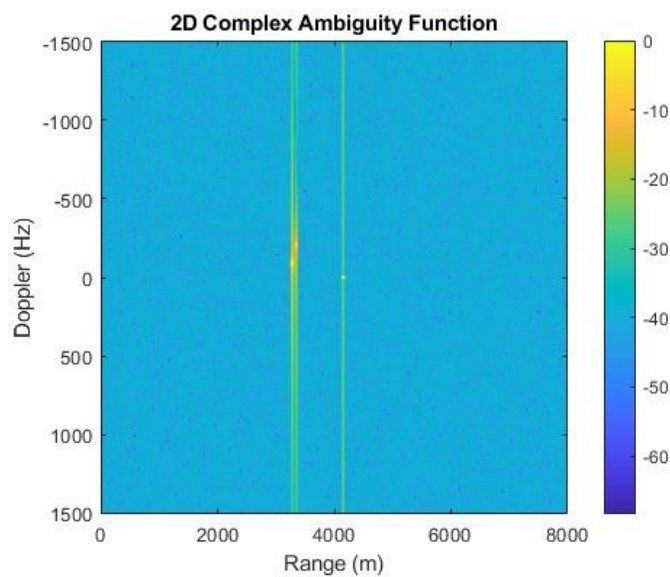


Figura 4-5 CAF 2D Con velocidad

Como se puede observar en la Figura 4-5, el mapa doppler muestra tres contactos, dos de ellos con cierta velocidad mientras que el tercero con frecuencia doppler cero, lo que indica que se encuentra en estado estático o sin velocidad relativa respecto al array de antenas. Aunque en el mapa doppler no se aprecie con exactitud los dos contactos que se desplazan lo hacen con velocidad diferente ya que la frecuencia doppler no es la misma.

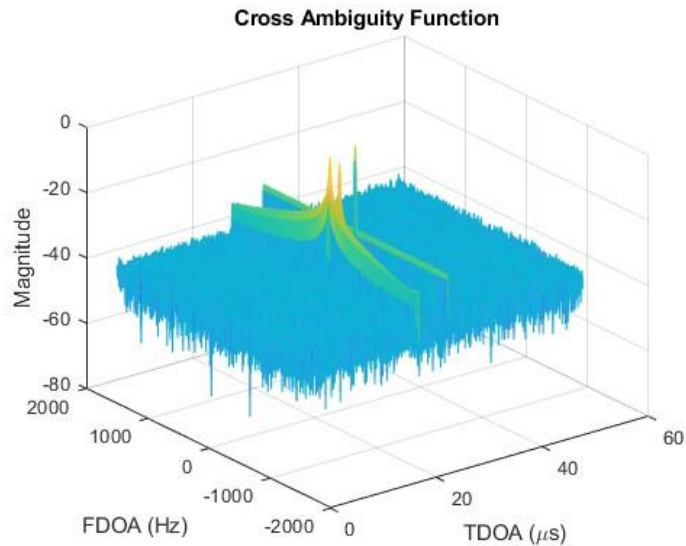


Figura 4-6 CAF 3D Con velocidad

En la Figura 4-6 se puede observar tanto la frecuencia doppler de los diferentes contactos como el tiempo de llegada de las señales al receptor, la información que aporta este gráfico se desgrena con las figuras posteriores.

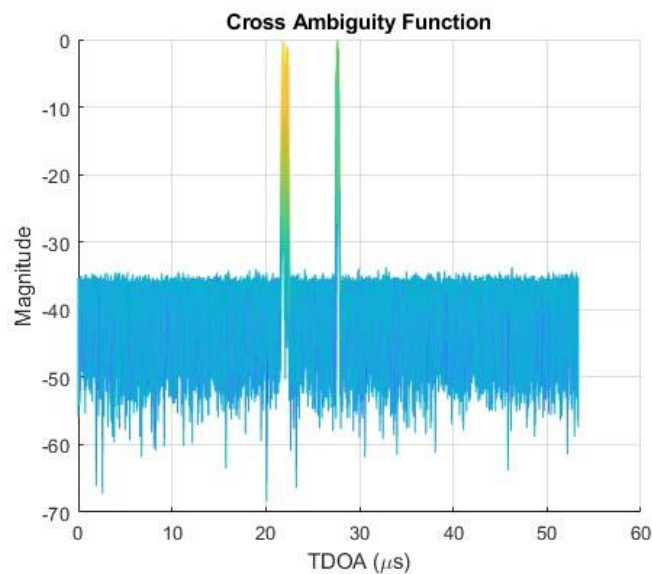


Figura 4-7 CAF 3D Eje XZ con velocidad

Por el contrario, en la Figura 4-7 se muestra el tiempo de llegada de cada uno de las señales mediante las cuales se ha detectado los blancos, como deja patente el gráfico hay dos blancos que se encuentran a la misma distancia del receptor, como ya se ha explicado anteriormente esto no quiere decir que los blancos se encuentren próximos entre sí.

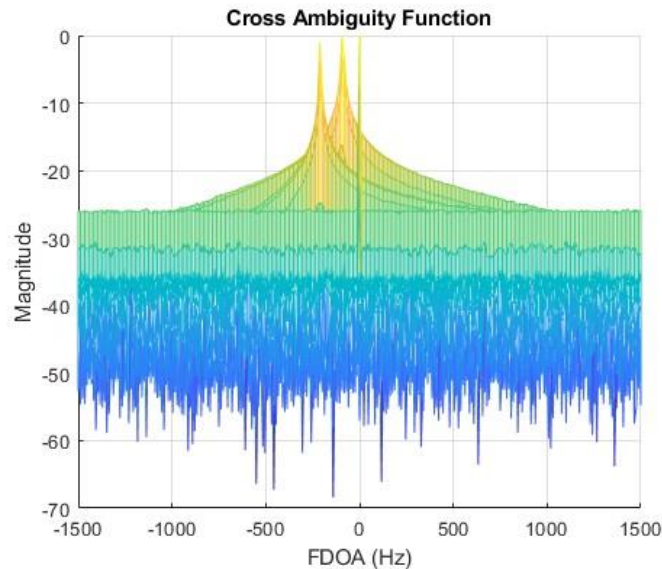


Figura 4-8 CAF 3D Eje YZ con velocidad

Por último, en la Figura 4-8 se puede apreciar la diferencia de frecuencia doppler entre las señales de cada uno de los blancos, donde se puede determinar que uno de los blancos carece de velocidad, otro se crea una frecuencia doppler de 100 Hz lo que implica que se desplaza a una velocidad de 1,6 m/s lo que equivale a aproximadamente 6 km/h. El blanco restante por el contrario es el que se desplaza con mayor velocidad produciendo una frecuencia doppler de 250 Hz, lo que se traduce en aproximadamente 14,5 km/h.

Como se ha explicado en el inicio de este apartado, la intención de mostrar estos datos es la de conocer como son las diferentes gráficas que se han estudiado durante la elaboración de este proyecto. Además, esto permite conocer de ante mano la forma de interpretar las gráficas y la diferente información que puede extraerse de cada una de ellas.

4.1.2 Primer sistema

A continuación, se van a adjuntar los datos recogidos en las diferentes pruebas y experimentos realizados con el primer sistema, es decir, el sistema en el que cada uno de los elementos que constituye el array de antenas cuenta con un “Down-converter” independiente en el que su osciloscopio realiza la adaptación de la frecuencia.

El primer experimento que se realizó una vez que ya se habían realizado las pruebas de sincronización de las frecuencias de las diferentes señales, así como la correlación de las mismas fue enfrentar el sistema planteado a un escenario en el laboratorio en el que el transmisor se encontraba en apuntamiento mecánico con el array de antenas, sin introducir ninguna perturbación al sistema, obteniendo los siguientes datos.

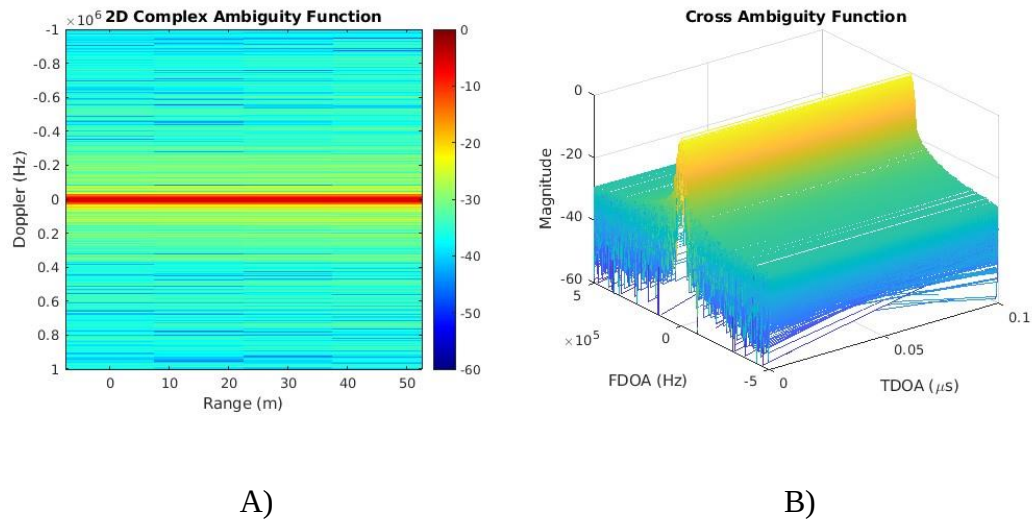


Figura 4-9 A) CAF 2D Sin perturbación. B) CAF 3D Sin perturbación.

Como se ha explicado en el párrafo anterior, al no haber ninguna perturbación el software correla las señales, pero no encuentra en ellas ningún pico de potencia, lo que se traduciría como un blanco. Esto queda patente en las figuras superiores donde tan solo se muestra la frecuencia doppler cero ya que el sistema no recibe ningún movimiento.

En segunda instancia se comenzó a realizar experimentos en los que se introdujo perturbaciones que para el sistema se traducen en blancos con cierta cinemática respecto al receptor; esto es una situación que a gran escala podría encontrarse el sistema en caso de embarcarlo en un buque y usar otro buque con un iluminador de oportunidad de mayor potencia.

El primer experimento con un blanco en movimiento realizado se planteó de manera en la que el receptor se encontraba apuntado hacia la demora del blanco, no de manera precisa, ni siguiendo el movimiento de este, pero sí de manera aproximada tal y como se muestra en la Figura 4-10.

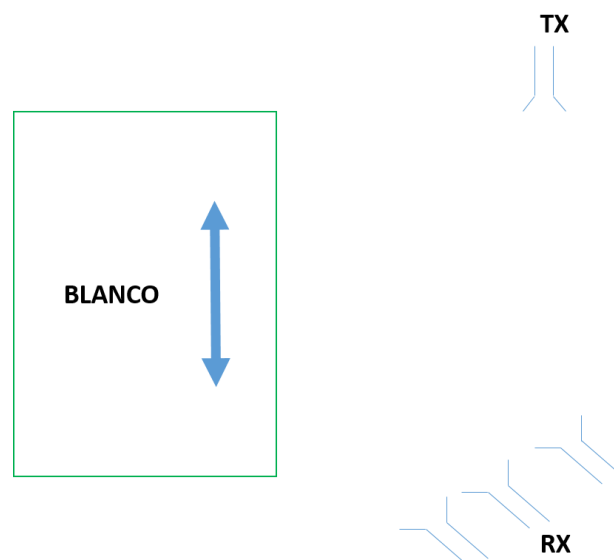


Figura 4-10 Escenario prueba con movimiento

Tras situación de los elementos en su posición se procedió mover el blanco realizando movimientos de acercamiento y alejamiento hacia el receptor con la intención de comprobar si se percibía la frecuencia doppler positiva y negativa en cada uno de los casos. Se realizó una grabación de cuatro segundos de

duración, durante los cuales el primer segundo el blanco permaneció en reposo, mientras que durante los tres segundos restantes comenzó a realizar los movimientos descritos anteriormente.

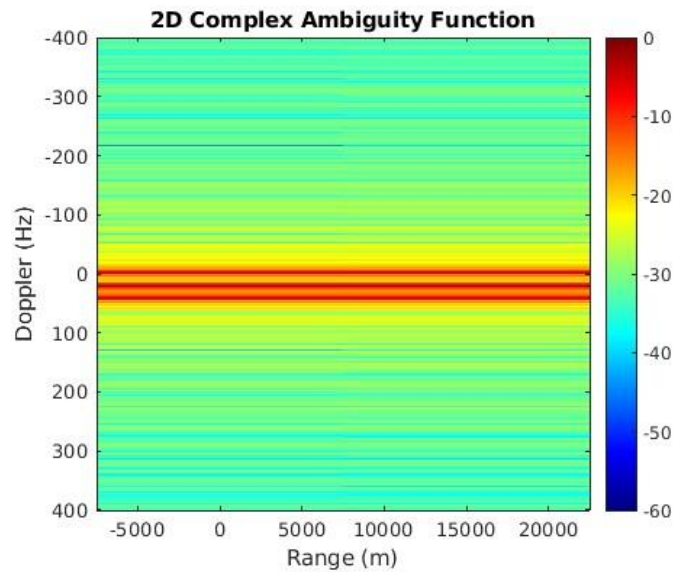


Figura 4-11 CAF 2D Inicio

Tras el procesamiento de las señales recibidas por el array de antenas, primero se estudió el primer segundo de grabación con el objetivo de comprobar si el sistema había funcionado como correspondía y en caso afirmativo seguir adelante con el procesamiento del resto de la grabación.

Tal y como se muestra en la Figura 4-11, al inicio de la grabación el sistema no obtuvo ningún blanco en movimiento ya que en el mapa doppler se observa frecuencia cero.

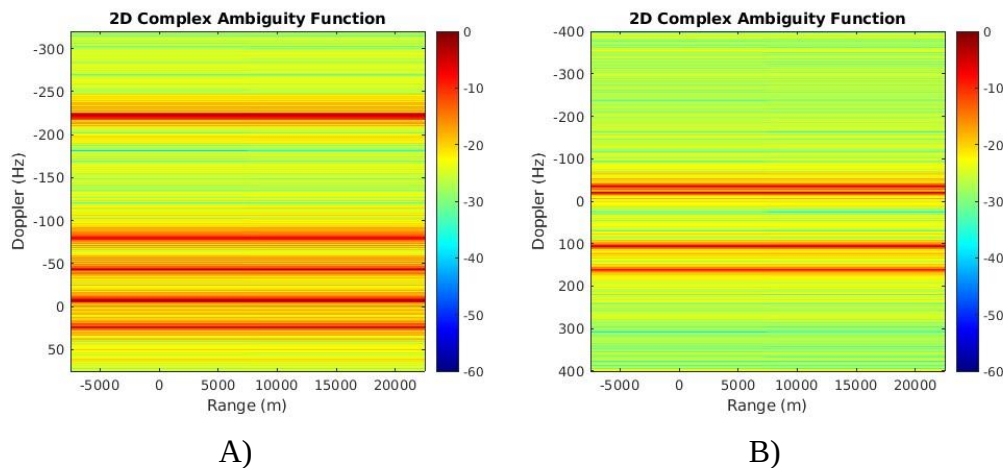


Figura 4-12 CAF 2D A) Alejamiento. B) Acercamiento

Después de analizar el primer segundo de grabación se procedió a analizar el tiempo restante, obteniendo en momentos diferentes los mapas doppler representados en la Figura 4-12.

Se puede interpretar que la figura de la izquierda, donde se recibe frecuencia doppler negativa el blanco se encontraba alejándose hacia el receptor, mientras que en la figura de la derecha el blanco se encontraba realizando el movimiento contrario, es decir, acercándose al receptor puesto que la frecuencia doppler obtenida es positiva.

Como se observa el mapa doppler representa blancos con diferentes velocidad, es decir, diferente frecuencia doppler, esto se debe a que a la hora de interpretar y analizar el archivo de la señal recibida se hace por partes con la intención de detectar los diferentes tipos de movimiento, sin embargo y debido

a la baja potencia del iluminador de oportunidad para poder correlar las señales y que se obtengan picos de potencia relevantes es necesario procesar un intervalo de tiempo en el que el blanco lleva diferentes velocidades.

Como se muestra en el apartado Correlación de señales, en el caso del primer sistema la correlación de señales es muy poco precisa por la deficiente sincronización que se consigue, es por ello que es necesario analizar intervalos de tiempo mayores que en el caso del segundo sistema.

Lo importante de este experimento es interpretar las tres figuras anteriores en conjunto, ya que esto permite observar como el sistema es capaz de detectar contactos y detectar la velocidad a la que estos se desplazan además de si lo hacen alejándose o acercándose.

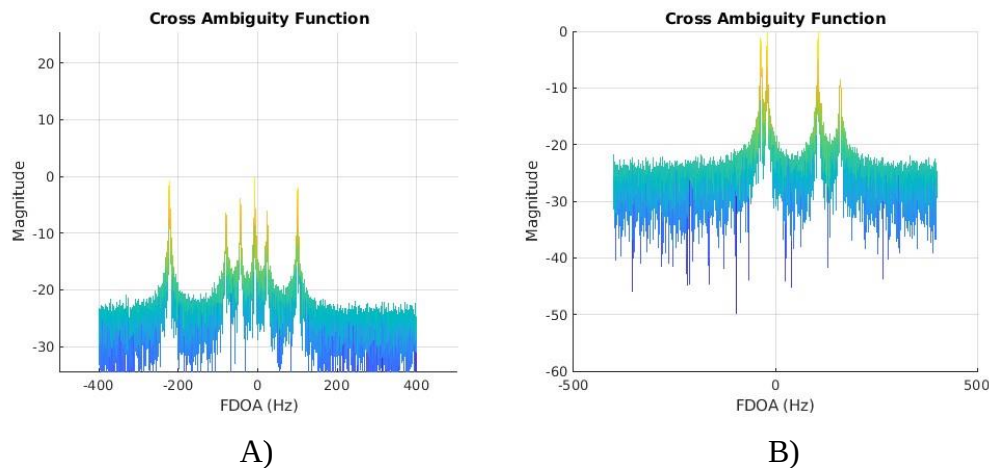


Figura 4-13 CAF 3D A) Alejamiento. B) Acercamiento.

En la Figura 4-13 se presentan los gráficos correspondientes a la representación de la frecuencia doppler. En la figura “A” se puede observar como la mayoría de las señales corresponden con una frecuencia doppler negativa, mientras que en la figura “B” el doppler es positivo. En la figura A) se puede observar que hay determinados picos de potencia en la parte positiva, esto se debe a errores en la correlación de la señal por lo y explicado en otras ocasiones acerca de montaje empleado.

Por último, se realizó un último experimento en el que se interpuso un ventilador de ordenador entre la señal transmitida y la señal recibida. El ventilador está constituido por siete aspas, en dos de ellas se coloca un pequeño elemento de metal que con la intención de que refleje lo máximo posible la señal electromagnética para favorecer así la recepción de señales por parte del receptor. En las aspas que se coloca el perfil metálico se encuentran de manera casi enfrentadas entre sí de tal manera que cuando una se encuentra en el punto más alto la otra lo hace en el punto más bajo y viceversa.

El ventilador se alimenta con una fuente de alimentación aportándole tan solo 4 V (Voltios) ya que así se consigue que este gire a la velocidad mínima, obteniendo los gráficos representados en la siguiente figura:

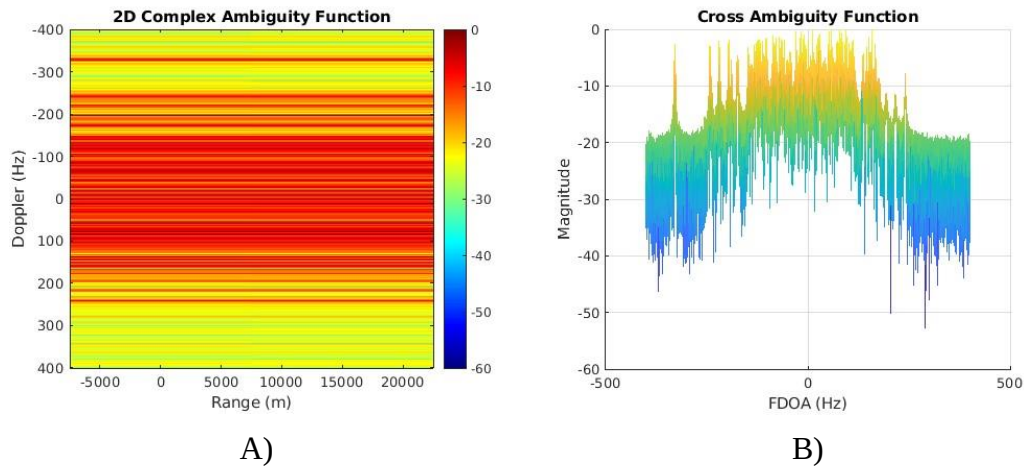


Figura 4-14 A) CAF 2D Velocidad mínima. B) CAF 3D Velocidad mínima.

En la Figura 4-14 “A”, se muestra el mapa doppler, donde aparecen numerosas frecuencias doppler debido a que el ventilador está constituido por siete aspas las que al girar reflejan la señal del transmisor, sin embargo, al tratarse de un material que no refleja toda la señal, la señal recibida por el receptor no permite obtener la velocidad a la que se desplazan. Por el contrario hay dos picos de potencia en las frecuencias doppler -325 Hz y 225 Hz que se corresponden con las señales reflejadas por las aspas en las que se ha insertado una pequeña muestra de metal.

Las frecuencias correspondientes a las aspas con el metal deberían ser simétricas, es decir, deberían tener el mismo valor, pero con signo contrario ya que como se ha explicado esta se encuentran prácticamente enfrentadas por los que realizan movimientos contrarios, sin embargo, al no encontrarse exactamente a 180° entre ellas es asumible esta diferencia.

Estas frecuencias doppler del orden de 225Hz, se corresponden con una velocidad lineal de 3,37 m/s y si se tiene en cuenta la siguiente ecuación y que el radio del ventilador es de 2,5cm.

$$v = \omega * r \quad 4-1$$

Donde v es la velocidad lineal en m/s, ω es la velocidad de giro en rad/s y r el radio del ventilador en metros.

Se obtiene que el ventilador se encuentra girando a 135 rad/s que se traducen en 1290 revoluciones por minuto (rpm), lo que se acerca a las descripciones de velocidad con las que cuenta el ventilador donde se indica que su rango de velocidades se encuentra entre 900 y 1800 rpm. También hay que tener en cuenta que el movimiento de las aspas del ventilador no es lineal respecto al receptor, sino que se produce de manera oblicua, por lo que todo lo calculado previamente son aproximaciones con el objetivo de comprobar el funcionamiento del sistema.

Por otro lado, la figura “B” muestra como la gráfica doppler es prácticamente simétrica, que es lo que se debería obtener con este tipo de ensayo.

Se realizó otra prueba en el que se aumentó la velocidad a su máximo, obteniendo las siguientes graficas doppler.

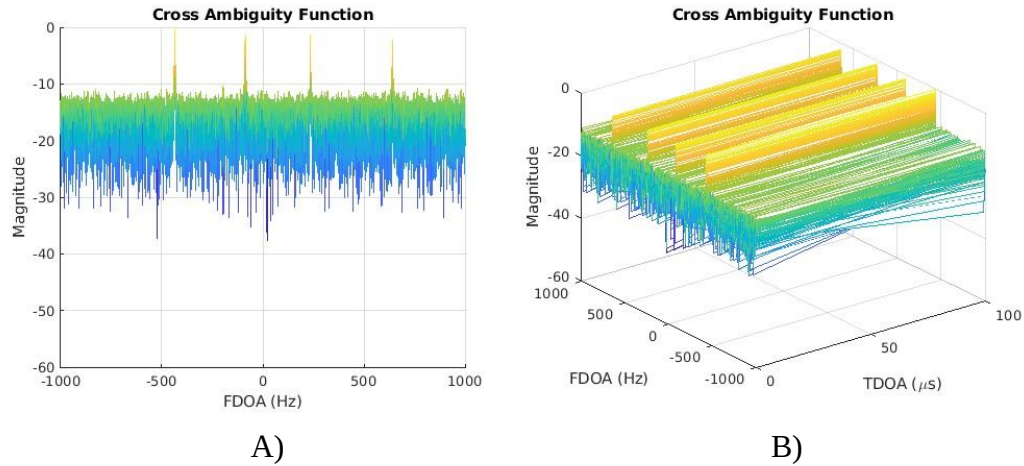


Figura 4-15 CAF 3D A) Doppler. B) Doppler y tiempo

En estas figuras se observa con mejor precisión la simetría entre los valores positivos y negativos, además se ha reducido en gran medida el ruido introducido por el resto de las aspas. Además, también se deja patente el aumento de la velocidad del ventilador ya que se obtienen valores doppler mucho mayores, sin embargo, estos valores de la frecuencia doppler se corresponden con velocidades de giro superiores a las características del ventilador empleado.

4.1.3 Segundo sistema

En este apartado se va a seguir la misma secuencia que en el apartado anterior, con la diferencia de que en este apartado se van a adjuntar los resultados obtenidos con el segundo sistema, el sistema en el que todos los elementos del array de antenas realizan la adaptación de frecuencia con un mismo osciloscopio, mediante la utilización de un mezclador, en el que se juntan la señal recibida por un elemento del array y la señal del oscilador local afinando así la sincronización de las señales.

Primero de todo se realizó una correlación de señales para obtener el mapa doppler sin la ausencia de movimiento para observar los datos obtenidos y poder luego comparar con el resto de los gráficos en los que sí que se introducen blancos con cinemática.

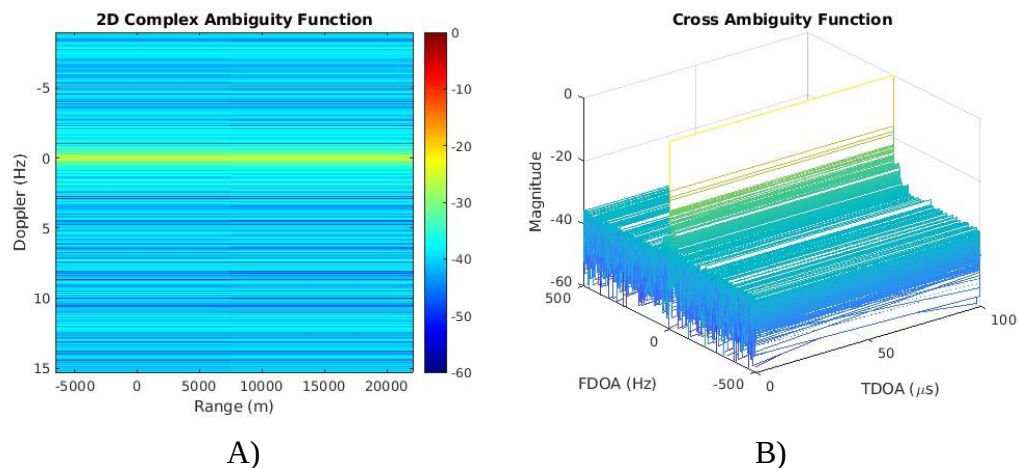


Figura 4-16 A) CAF 2D sin movimiento. B) CAF 3D sin movimiento

En la Figura 4-16 se deja constancia del mapa doppler obtenido durante el ensayo realizado en ausencia de movimiento, es decir, sin introducir ninguna perturbación. Se observa que toda la potencia

recibida por el array de antenas tiene una frecuencia doppler cero, lo que confirma que hay ausencia de movimiento relativo con respecto al receptor.

También se observa como la potencia recibida es menor que en el primer sistema, esto se debe a la menor potencia radiada por el iluminador de oportunidad utilizado en este sistema, el HB 100.

La Figura 4-16 muestra la correlación realizada en las mismas condiciones, pero donde se observan al mismo tiempo la frecuencia doppler recibida, queda patente que es de cero hercios; y el tiempo en el que se reciben donde se muestra que no se recibe nada con velocidad en todo el tiempo que se ha analizado.

Como segunda prueba, se introdujo un blanco con movimiento en el sistema, en un escenario igual al planteado con el primer sistema, obteniendo los datos que se adjuntan a continuación en la Figura 4-17.

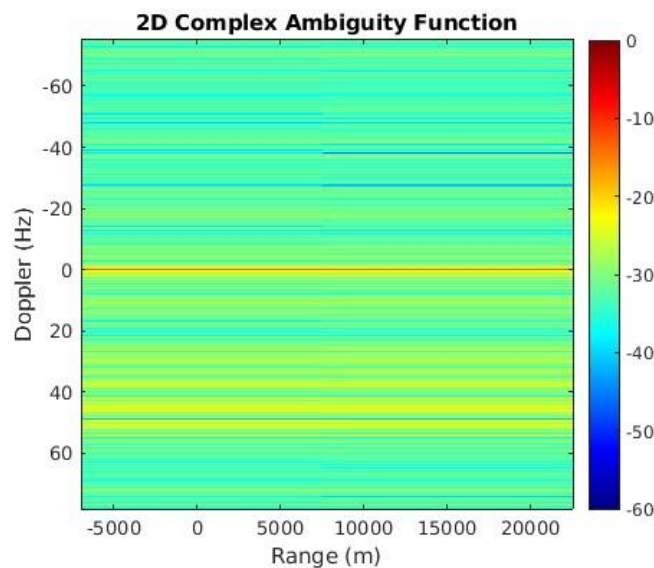


Figura 4-17 CAF 2D Segundo sistema con movimiento

El blanco introducido esta vez fue una persona la cual se desplazaba de forma casi paralela al sistema planteado portando una superficie de metal con la intención de aumentar y favorecer la reflexión de las ondas electromagnéticas emitidas por el transmisor. Como ya que se ha comentado anteriormente debido a la escasa potencia del transmisor utilizado la distancia a la que se realizó este experimento es de apenas un metro de distancia.

Del gráfico se puede determinar que el blanco, una persona, se desplaza a una velocidad de entre 2 y 3 km/h debido a que las frecuencias doppler que más intensidad tienen son aquellas que están entre 40 y 55 Hz. Esta frecuencia doppler positiva indica que el blanco se encuentra acercándose al receptor, ya que la frecuencia transmitida es menor que la recibida.

La determinación de la velocidad no es exacta debido que para poder correlar las señales debido a la reducida potencia de la señal es necesario analizar un intervalo de tiempo mayor por lo que el sistema detecta en repetidas ocasiones el blanco en ese intervalo lo que puede coincidir con los cambios de velocidad del blanco al estar invirtiendo el rumbo.

Como se obtuvo unos datos en los que había que analizar un importante espacio de tiempo debido a la escasa velocidad del blanco y a la poca potencia del iluminador, se decidió realizar un experimento en el que se acercaron las dos partes del sistema y el blanco fue llevado a cabo por una mano sujetando un perfil metálico, agitándola de manera rápida con la intención de conseguir frecuencias doppler altas.

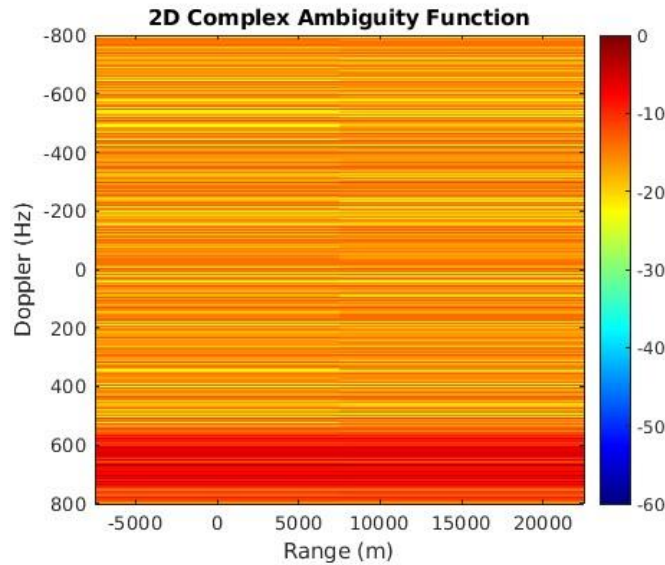


Figura 4-18 CAF 2D Movimiento rápido

En la Figura 4-18, se puede apreciar el mapa doppler de los descritos anteriormente, donde el blanco que genera el movimiento se trata de una mano de una persona sujetando un perfil metálico.

En este caso se ha analizado un espacio de tiempo mucho más reducido que en el caso anterior, en este se analiza 0,1 segundos mientras que en el experimento anterior 1,5 segundos. Sin embargo, debido a la proximidad entre todos los elementos que intervienen en esta prueba se producen numerosas interferencias.

A pesar de las interferencias se puede apreciar donde se encuentra el pico de la correlación de las señales, en una frecuencia doppler de 600 Hz, lo que se traduce en una velocidad de acercamiento de 32,4 km/h.

Como última prueba del sistema, al igual que con el primer sistema, se realizó un ensayo en el que el blanco en movimiento era generado por un ventilador de ordenador, el mismo que el descrito en el apartado Primer sistema.

Para poder comparar más resultado realizados con esta prueba se realizó el mismo experimento tres veces, pero con velocidades de rotación diferentes en cada una de ellas pudiendo comprobar de esta manera como el sistema detecta las variaciones de velocidad.

Para llevar a cabo lo que se ha comentado en el párrafo anterior, se realizó una grabación de las señales recibas por el array de antenas en el que durante dicha grabación se fue alterando la velocidad de rotación del ventilador, es por esto que en las figuras que se van adjuntar a continuación pertenecen todas a la misma grabación, pero cada figura se corresponde con un intervalo de tiempo analizado diferente.

La primera velocidad que se introdujo al ventilador fue la máxima posible, esto quiere decir que se le proporcionó mediante una fuente de tensión 12 V de manera que la velocidad de rotación del ventilador era la máxima según sus prescripciones técnicas. Los datos obtenidos durante esta parte del ensayo se adjuntan en la Figura 4-19.

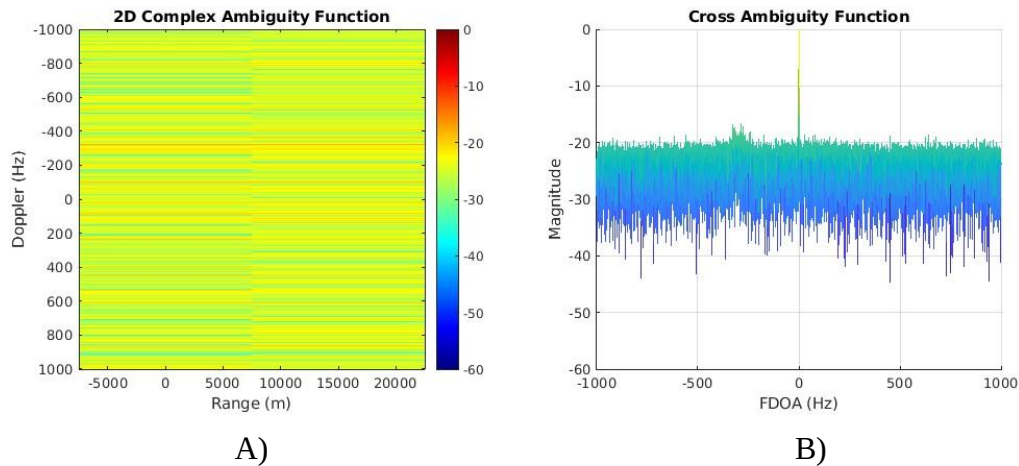


Figura 4-19 A) CAF 2D Ventilador rápido. B) CAF 3D Ventilador rápido

Como se puede apreciar en la figura “A” el sistema percibe el movimiento con una potencia baja lo que dificulta la interpretación de datos y eso que se analizó el periodo máximo de tiempo sin llegar al intervalo de tiempo en el que la velocidad del ventilador cambiaba.

Tanto en la figura “A” como en la “B” se puede observar como el sistema detecta dos frecuencias doppler prácticamente simétricas, esta frecuencia se encuentra entre los 300 Hz hablando en valores absolutos. No merece la pena diferenciar entre acercamiento y alejamiento ya que cuando una de las aspas se acerca hacia el receptor, la otra se aleja tal y como se especifica en la explicación del montaje del ventilador.

Las diferencias de velocidad se deben principalmente en la no simetría de los reflectores radar lo que afecta a su posición y con ello a la frecuencia doppler. Las velocidades observadas se aproximan a los 4,5 m/s. Si se aplica lo explicado en el apartado Primer sistema, se obtienen velocidades de rotación de 180 rad/s lo que se traduce en 1718,87 rpm, velocidades contempladas dentro de los datos técnicos del ventilador utilizado.

De igual manera que se hizo con el sistema anterior, se alimentó el ventilador con la tensión de 4 V, la mínima necesaria para conseguir que el ventilador comience a moverse. Tras ello se obtienen los gráficos pertenecientes a la Figura 4-20.

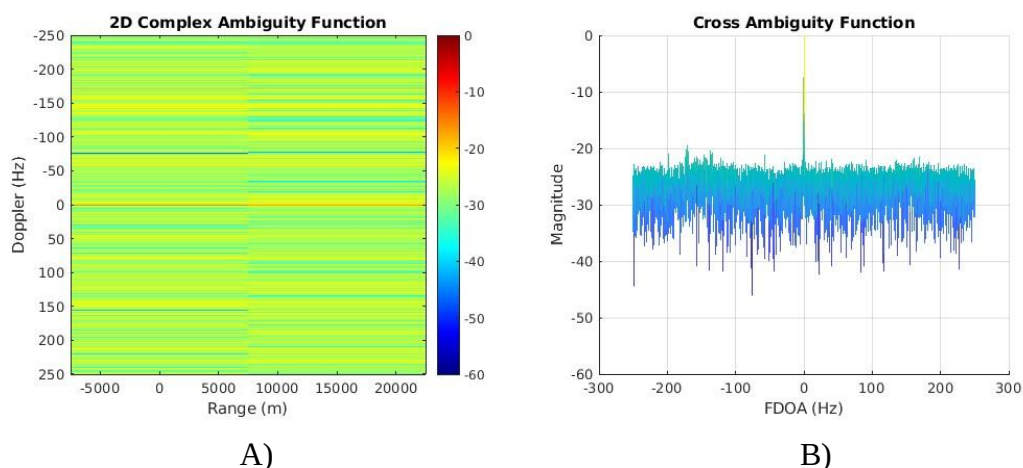


Figura 4-20 A) CAF 2D Ventilador lento. B) CAF D Ventilador lento

Tal y como se puede apreciar tanto en la figura “A” y “B” la potencia recibida llega prácticamente a incapacitar la interpretación de los datos, sin embargo, se puede apreciar como las frecuencias doppler detectadas se reflejan en los valores comprendidos entre los 90 y 150 Hz, hablando de valores absolutos.

Estas frecuencias doppler se corresponden con velocidades de entre 54 y 90 rad/s, lo que se traduce en velocidades de rotación situadas entre 515 y 860 rpm.

4.1.4 Aplicación del Beamforming

En este apartado se van a exponer los datos y resultados obtenidos después de aplicar la tecnología del beamforming explicada en el apartado Beamforming y apuntamiento electrónico. Para obtener estos datos se van a realizar diferentes pruebas y ensayos con el objetivo de determinar el funcionamiento de los sistemas planteados en este proyecto.

Como se ha explicado en capítulos anteriores el objetivo de este trabajo de fin de grado es la implementación de un radar pasivo cuya finalidad es la de determinar la posición y velocidad de los blancos reduciendo al máximo la probabilidad de ser detectado.

Para determinar la posición de un contacto mediante el uso de un radar pasivo, primero es necesario conocer a la distancia a la que se encuentra del receptor, para lo que se aplican los Óvalos de Cassini, donde midiendo la diferencia de tiempo entre la llegada de la señal de referencia y las señales captadas por el array de antenas se puede determinar la distancia a la que se encuentran los blancos.

Una vez determinada la distancia, es necesario conocer la demora, para así poder realizar la intersección de la elipse generada por el problema biestático con una demora obteniendo así una posición. Es aquí donde el beamforming recibe una importancia vital, ya que en este proyecto se emplea como receptor un array de antenas el cual permanece estático.

Debido a que permanece estático es necesario aplicar el beamforming para determinar por qué demora está llegando el frente de ondas procedente del blanco que se pretende localizar y así poder determinar la posición de los blancos pertinentes.

En todos los ensayos realizados en este apartado el iluminador de oportunidad es el Radar marino FURUNO 1824C-BB de las Lanchas de Instrucción, además debido al uso de este radar todos los escenarios tienen lugar en la intemperie, donde se reciben diferentes interferencias provenientes de los radares de otros buques y las condiciones ambientales afectan a la interpretación de los datos.

Para comprobar el funcionamiento del sistema y del software utilizado primero se realiza una prueba en la que el array de antenas permanece apuntado directamente hacia el iluminador de oportunidad. El escenario es el que aparece en la Figura 4-21.

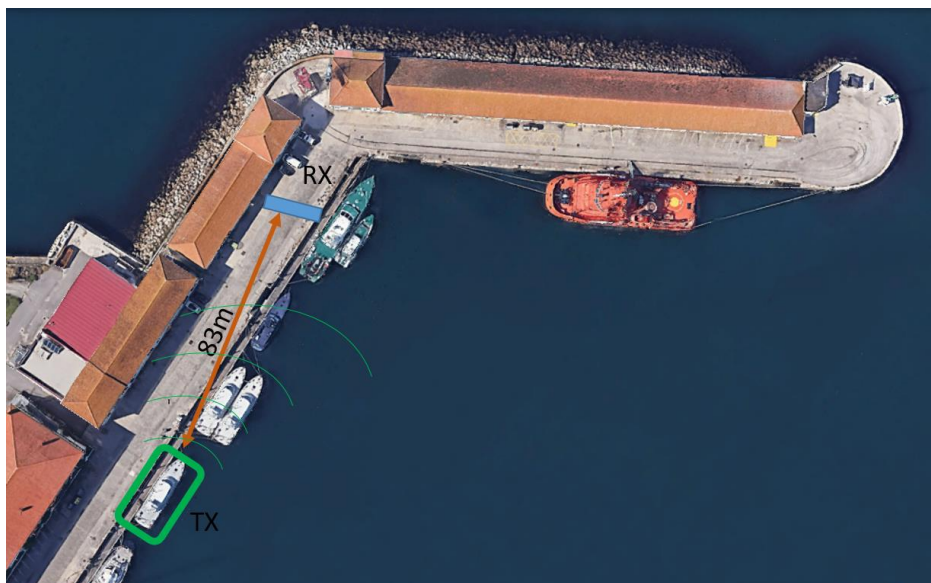


Figura 4-21 Primer escenario beamforming

Este escenario se aproxima más a un radar biestático que al propio funcionamiento de un radar pasivo, pero solo se utiliza esta configuración con la intención de determinar si tanto el sistema como el software son capaces de realizar el beamforming.

Como se puede observar en la Figura 4-21, la distancia entre el transmisor y el receptor es incomparable con la de un escenario real donde la distancia entre estos puede alcanzar decenas de millas náuticas, sin embargo, como ya se ha explicado solo se quiere comprobar la aplicación del beamforming.

Una vez aclarado el escenario en el que se están realizando las pruebas del beamforming se procede a explicar los datos obtenidos.

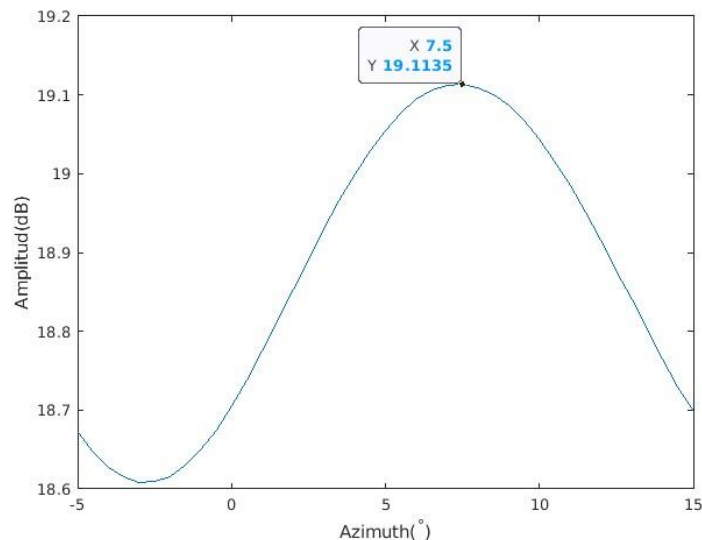


Figura 4-22 Beamforming 1

Lo que se muestra en la Figura 4-22 es el resultado de aplicar el beamforming a la señal recibida en apuntamiento mecánico. En el eje de las ordenadas se tiene la escala de la potencia recibida, mientras que en el eje de las abscisas se tiene el azimut en grados, es decir, la dirección en la que el array de antenas está recibiendo la señal.

Si se mostrase un gráfico donde apareciesen los 360° se representaría el diagrama de radiación del array de antenas, es por ello que en la Figura 4-22 Beamforming 1 se muestra el diagrama de radiación en un margen de 20°, el lóbulo principal que aparece tiene un ancho de aproximadamente 20°, esto se debe a la gran distancia que hay entre los elementos que constituyen el array de antenas, ya que para conseguir la máxima directividad es necesario que estos elementos se sitúen a una distancia de $\lambda/2$, por otra parte, además de perder directividad se produce un aumento de los lóbulos laterales.

El pico de potencia del lóbulo principal debería estar centrado en los 0° ya que esta prueba se realizó en apuntamiento mecánico lo que implica que el receptor se encuentra apuntado directamente hacia el transmisor, sin embargo, lo que indican los datos es que la señal se ha recibido en una demora de 7,5°. Este desvío se debe a varios factores entre los que destacan los siguientes:

- Debido a la localización en la que se realiza esta prueba, puede darse el caso que la señal transmitida por el iluminador de oportunidad llegue al receptor por una demora que no es la esperada en el momento que se analiza la señal recibida ya que esta señal puede viajar rebotando entre las paredes del edificio y los buques que se encuentran atracados tal y como se aprecia en la Figura 4-21 Primer escenario beamforming.
- Como consecuencia de la falta del equipo apropiado el apuntamiento no se realiza de una manera precisa, esto puede producir que haya un desvío de $\pm 2^\circ$ en el apuntamiento del receptor.

- Cuando se implementa un radar pasivo es necesario realizar una calibración de los equipos donde se les indican unos valores de referencia a partir de los cuales interpretan y ajustan los resultados obtenidos, sin embargo, al tratarse de un radar pasivo que va a estar en movimiento en escenarios cambiantes y en el que ambas partes del sistema van a estar en movimiento esta calibración no es tan elemental como en otros casos.

Como segunda prueba se realizó un ensayo en el que se incorpora un blanco en movimiento, en este caso se utiliza una de las antenas para apuntar directamente al iluminador de oportunidad para recibir la señal de referencia, por el contrario, se array de antenas se dirige hacia el centro de la dársena lugar por el cual procederá a realizar movimientos un buque con la intención de detectarlo y obtener su demora.

El escenario en el que se desarrolla el ensayo es el que aparece en la Figura 4-23 tal y como se ha explicado en el párrafo anterior.

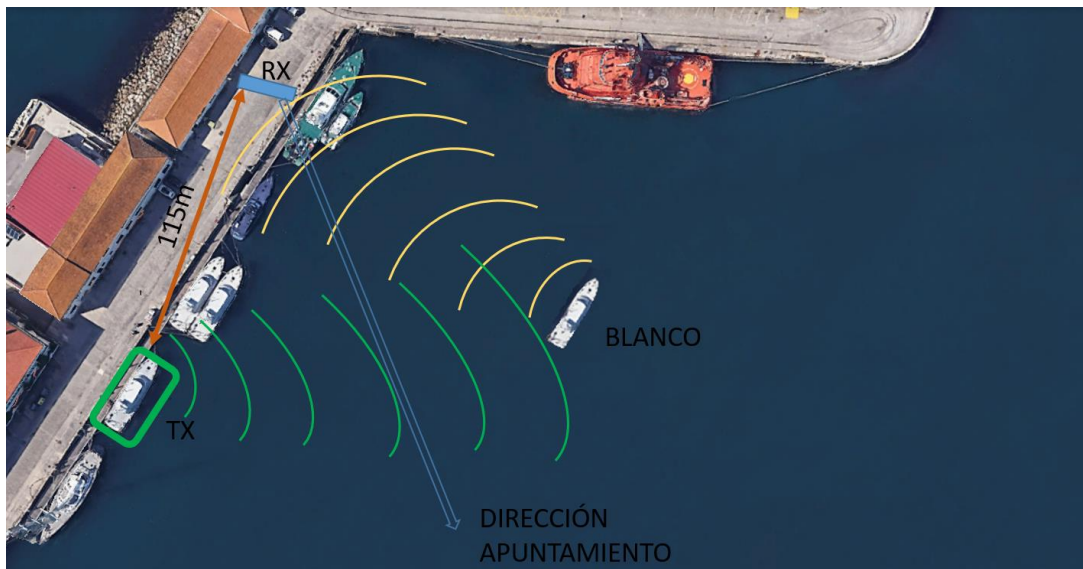


Figura 4-23 Segundo escenario beamforming

Al igual que en la primera prueba de beamforming, en esta también afectan todos los casos mencionados anteriormente que pueden introducir errores en las medidas y en la interpretación de los datos.

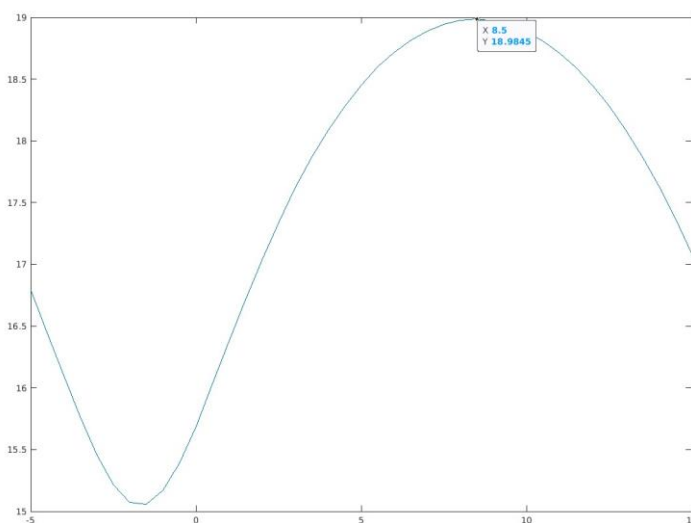


Figura 4-24 Beamforming 2

Como se plasma en la Figura 4-24, la interpretación de los datos determina que el blanco se encuentra a una demora o azimut de 8,5 grados desde la perpendicular del array de antenas. En la Figura 4-23, se pretende dar una idea de cómo es el escenario donde se desarrolla este experimento, sin embargo, en el momento de la grabación el buque utilizado como blanco no se encontraba exactamente ahí.

La demora obtenida está influenciada por numerosos factores que pueden introducir errores como ya se ha explicado, sin embargo, la medida se aproxima en gran medida a la realidad comprobado de manera visual.

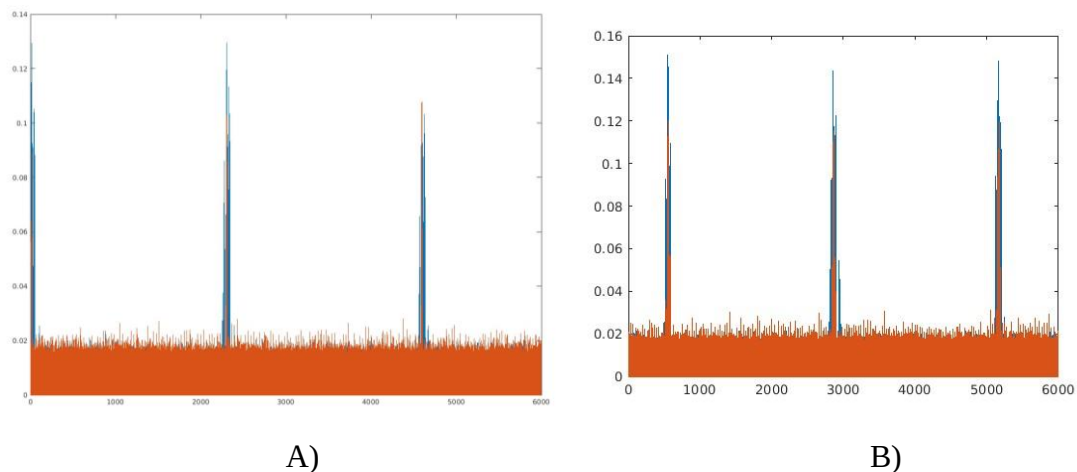


Figura 4-25 Visualización en tiempo A) Beamforming 1. B) Beamforming 2

En la Figura 4-25 se adjuntan la representación temporal de las grabaciones realizadas durante las pruebas. En ellas se puede observar como el sistema recibe ambas señales, por un lado, la señal de referencia de color azul y con un cierto retraso la señal rebotada en el blanco de color naranja.

Cabe destacar, tal y como se explica en el apartado Identificación del iluminador de oportunidad, que los diferentes picos de potencia que aparecen no hacen referencia a un único pulso, sino que se trata de los diferentes momentos en los que el transmisor colaborativo está apuntando al receptor por lo que son numerosos PRFs.

Se puede apreciar como la señal de referencia cuenta con una potencia mucho mayor en comparación con la señal que incide en el blanco, además se intuye como la señal del blanco se recibe con una cierta diferencia de tiempo respecto a la señal de referencia debido a que esta realiza un mayor trayecto.

4.1.5 Determinación de distancias

En este apartado del proyecto se desarrollan los datos obtenidos mediante la resolución del problema biestático explicado en el apartado Radar pasivo, diferencias y funcionamiento.

Mediante la obtención de la distancia entre el blanco y el receptor, el array de antenas empleado, se determina la posición del blanco ya que en los apartados anteriores se desarrolla la obtención de la demora de la señal, además de la velocidad del blanco.

Para determinar la distancia a los blancos se ha utilizado el iluminador de oportunidad embarcado en las Lanchas de Instrucción, es decir, el Radar marino FURUNO 1824C-BB, el receptor se encuentra en tierra. El escenario planteado es el que se muestra en la Figura 4-26.

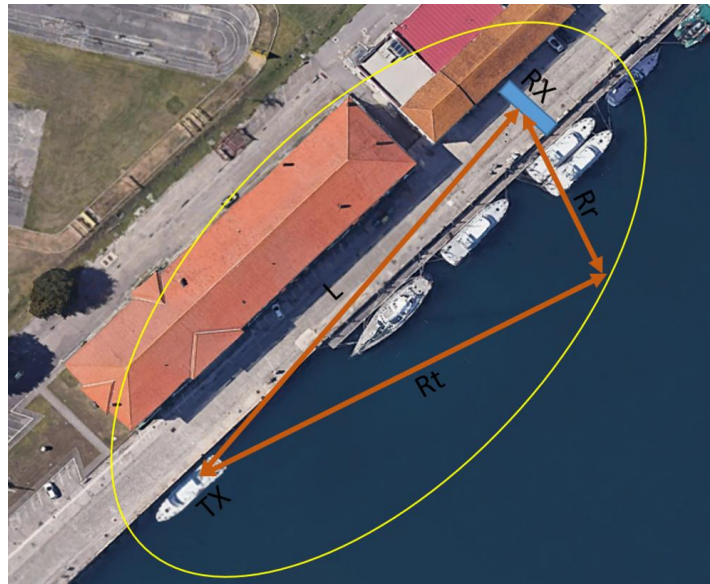


Figura 4-26 Escenario biestático

Tal y como se plasma en la Figura 4-26, en el escenario utilizado se hace un análogo a lo que se muestra en la Figura 2-16, en el que se explica el problema biestático que hay que resolver. En el caso del escenario la distancia entre emisor y receptor (L) es de 120 metros.

Una vez se tiene el escenario se procede a realizar la grabación de señales para su interpretación, cabe señalar que para las grabaciones se aplica una frecuencia de muestreo de 25 MHz, esto quiere decir que se toma una captura cada 0,04 ms de tiempo. Debido a la imposibilidad de realizar una grabación de las señales recibidas a tiempo real, es decir, que recreen fielmente las señales se obtienen ciertos error en el cálculo de las distancias, sin embargo, la frecuencia de muestreo coincide con el ancho de banda de la señal transmitida por lo que el error debe de ser mínimo.

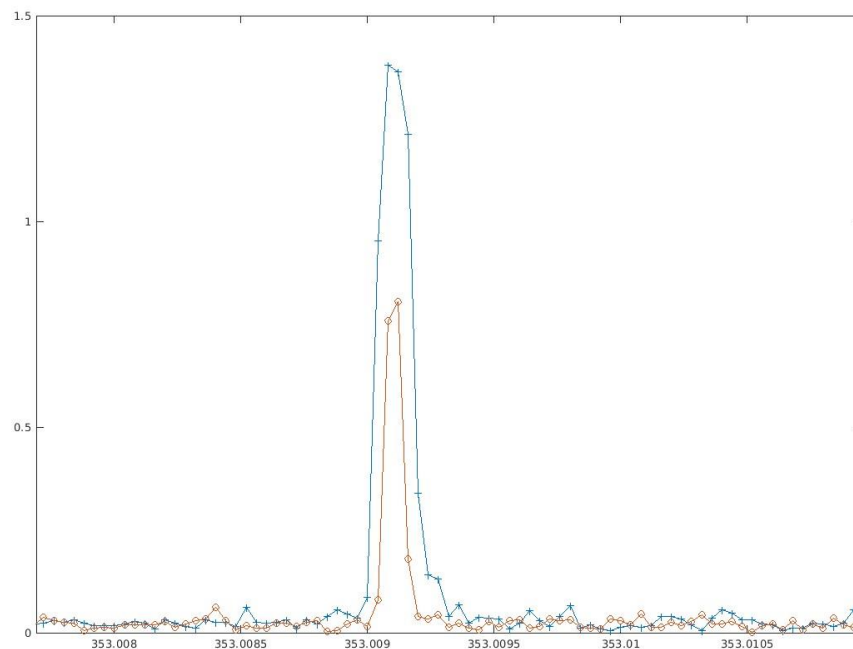


Figura 4-27 Señal de referencia VS Eco recibido

Si se profundiza lo suficiente en la grabación de las señales se pueden encontrar los diferentes pulsos que han sido recibidos por el array de antenas en función del momento en el que el emisor ilumina al receptor y emite los pulsos pertinentes siguiendo su PRF. En la Figura 4-27 se muestra uno de esos pulsos, en el que la señal de color azul pertenece a la señal de referencia y la señal naranja pertenece a la señal que incidido en el blanco.

Se puede observar que la señal que ha incidido en el blanco llega al receptor con una menor intensidad debido a que esta recorre un camino mayor, además de que se degrada al reflejarse en el blanco. También es importante señalar el retraso entre una señal y otra, ya que es la diferencia de tiempo que indica cuanta distancia más ha recorrido el eco.

$$Rr = \frac{Rb^2 - L^2}{2 \cdot (Rb - L \cdot \cos\theta)} \quad 4-2$$

Como se muestra en la Ecuación 4-2, los valores a tener en cuenta para determinar la distancia entre el blanco y el receptor son las distancias entre el receptor y el transmisor (L), la distancia recorrida por la señal en su camino desde el emisor, el blanco y la llegada al receptor (R_b).

Para determinar la distancia recorrida por la señal tratada como un eco se tiene en cuenta el retardo entre la señal de referencia y la señal del eco.

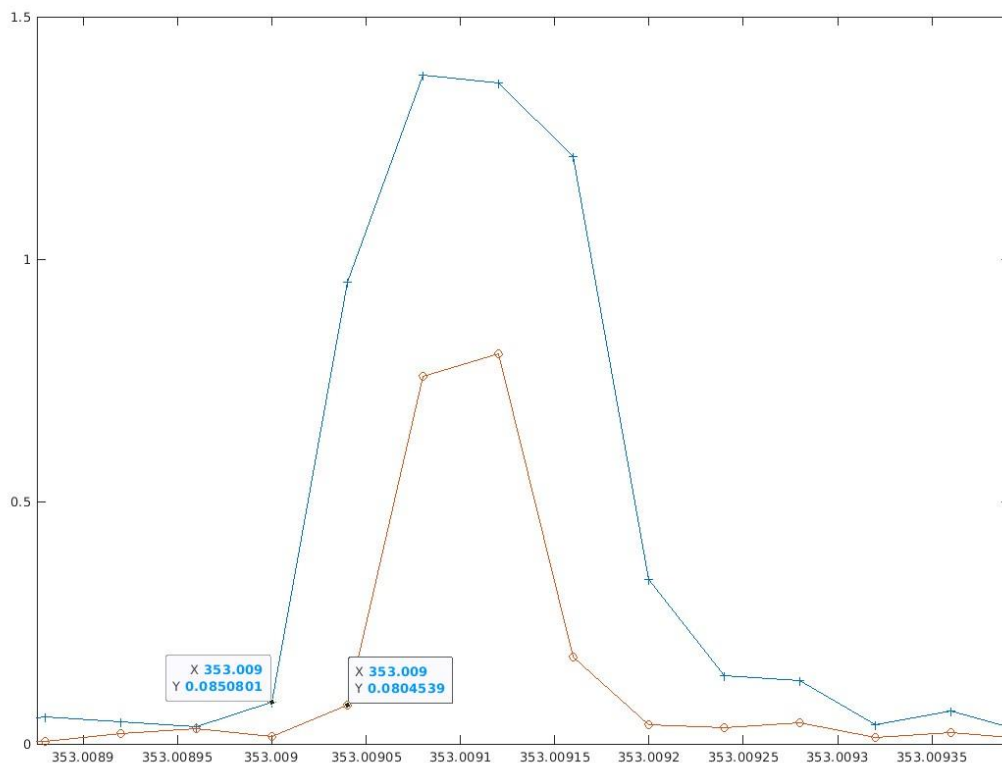


Figura 4-28 Retardo entre señales

En la Figura 4-28, se puede observar la diferencia de tiempo entre ambas señales. Se observa el comportamiento de las ondas por separado, se considera que cuando la señal está siendo recibida por el receptor se produce un cambio de gradiente en las señales recibidas, esto sumado a la frecuencia de muestreo limita la determinación del retardo.

El pulso de la señal de referencia llega al receptor en el instante de 353,009 ms mientras que el pulso del eco se comienza a recibir en el instante de 353,00904 ms; esto permite determinar que hay un retardo de 0,00004 ms.

El retardo indica que cantidad de tiempo ha viajado más el eco que la señal de referencia, y si se tiene en cuenta la velocidad de propagación ese retardo indica cuanta distancia más ha recorrido la señal del eco.

El retardo traducido a distancia indica que la señal de referencia ha recorrido 12 metros más. Como se ha indicado, la distancia recorrida por la señal de referencia es de 120 metros, esto implica que el eco ha recorrido 132 metros hasta llegar al receptor.

Aplicando la ecuación 4-2, teniendo en cuenta que $L=120$ m, $R_b=132$ m, se obtiene que R_r , es decir, la distancia entre el receptor y el blanco, es de 32,06 metros.

Esta distancia indica que el radar pasivo ha detectado un contacto a una distancia de 32,06 metros del receptor por lo que el blanco se puede encontrar en círculo con centro en el receptor y radio R_r , hasta que no se aplique la tecnología del beamforming no se determina la posición del contacto que ha sido detectado

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Así, tal y como se indica en el título de la cabecera de este apartado, se van a obtener las conclusiones tras la realización del proyecto y evaluar si se han cumplido o no los objetivos planteados al inicio del proyecto.

Además, en función de los hitos que se hayan llevado a cabo y de la capacidad de proyección que pueda extraerse de este trabajo de fin de grado se establecen las líneas futuras en las que se puede seguir desarrollando el proyecto, buscando nuevas aplicaciones o mejorando las ya demostradas.

5.1 Evaluación de los objetivos

Debido a la manera en la que se ha estructurado la memoria, se puede observar en el apartado Desarrollo del TFG las diferentes pruebas que se han requerido para el desarrollo del proyecto, estas pruebas no son las únicas que se han realizado, a mayores se han realizado otras diferentes que tras su realización se ha visto que no aportan nada importante al desarrollo de este trabajo de fin de grado.

En función de las pruebas y experimentos realizados se han obtenido unos gráficos y datos que se interpretan y comentan en el apartado Resultados / Validación / Prueba. Es en este apartado donde realmente se comprueba si se han cumplido las expectativas y con ellas los objetivos establecidos en el apartado Objetivos.

El primer objetivo planteado persigue que el proyecto se considere como una opción real, una alternativa que puede aportar mejoras en la situación táctica de las fuerzas amigas, es muy difícil determinar si este se ha alcanzado debido a que se requiere introducir muchas mejoras y realizar más experimentos como se va a explicar en las líneas futuras, es por ello que para determinar si se ha cumplido el objetivo será necesario esperar a ver cómo se desarrollan las próximas investigaciones en caso de que las haya.

En relación a los objetivos que persiguen la constitución de un sistema que sea capaz de detectar y localizar blancos, ya sea en un ambiente controlado como es el laboratorio o en un ambiente lo más parecido al escenario real donde se pretende aplicar este proyecto; se determina que se ha cumplido estos objetivos como se puede mostrar en el apartado Resultados / Validación / Prueba, especialmente si se comparan los datos obtenidos empíricamente y los generados mediante simulación.

Cabe señalar que se han realizado pruebas independientes para la parte de detección y de medición de la velocidad, es decir, se ha podido constatar como de manera independiente sí que se consiguen los objetivos establecidos, sin embargo, debido a la falta de tiempo como consecuencia de los contratiempos surgidos se ha imposibilitado la prueba conjunta.

Los contratiempos más relevantes son aquellos relacionados con la interpretación de los datos y la generación de conclusiones reales a raíz de ellos ya que los diferentes elementos que componen los

sistemas son de una calidad y precisión cuestionables lo que introduce derivas en frecuencia, imposibilita su sincronización, la potencia deficiente de la antena transmisora hace muy difícil la realización de las diferentes pruebas, el uso de un iluminador de oportunidad comercial en una zona de alta densidad naval introduce gran cantidad de interferencias ralentizando el cumplimiento de los hitos establecidos

Por último, es importante señalar que no se ha alcanzado el objetivo de realizar pruebas de los sistemas planteados a bordo de las Lanchas de Instrucción, prueba de gran importancia ya que implica experimentar con el radar pasivo en un ambiente real, con distancias más reducidas, pero en un escenario en el que el blanco que participa (transmisor, receptor y blanco) tienen cinemática independiente por lo que su situación es desconocida.

Esta prueba habría sido el colofón del proyecto, sin embargo, se ha demostrado que era un objetivo demasiado ambicioso ya que además de los contratiempos y retrasos explicados anteriormente, se ha requerido más tiempo de investigación del que se esperaba imposibilitando la realización de la última prueba.

A pesar de no haber completado todos los objetivos planteados al inicio del proyecto, se considera que el trabajo ha alcanzado el cumplimiento del resto de los objetivos con éxito debido a que se ha demostrado como el concepto desarrollado puede aportar una solución alternativa a la situación táctica planteada ya que es capaz de mantener la capacidad artillera completamente permaneciendo en sigilo gracias a la discreción que aporta la utilización de un radar pasivo.

Además ha quedado patente como el sistema planteado es capaz de determinar la posición (distancia y demora) y velocidad de un blanco por lo que se considera que el radar pasivo cumple con las expectativas marcadas.

5.2 Líneas futuras

En este último apartado se van a plasmar posibles líneas de desarrollo que continúen con la investigación que ha comenzado este proyecto y traten de explotar al máximo la capacidad de proyección que tiene la implementación de un radar pasivo en los buques de la Armada.

Las líneas futuras que se van a explicar a continuación son consecuencia de los objetivos no cumplidos y de posibles aplicaciones que han ido surgiendo durante el desarrollo del presente proyecto, pero que han sido imposible de investigar.

Con la intención de mejorar el sistema y de obtener más conocimiento sobre su funcionamiento se propone como línea futura la realización de pruebas que impliquen obtener la detección, localización y medición de velocidad al mismo tiempo, como tendría que ser en caso de una aplicación real del radar pasivo.

La línea futura principal que se plantea es la que supone poner en práctica el objetivo que no se ha cumplido durante la realización de este proyecto, es decir, poner a prueba el sistema en un escenario real, a bordo de las Lanchas de instrucción. Contando con un software que integre la interpretación de todos los resultados necesarios para poder localizar y determinar la velocidad de los contactos.

Como colofón se propone realizar un proyecto que implique la instalación de este sistema en un buque de la Armada y la realización de pruebas. Sería la prueba definitiva, además de ser la única manera de estudiar la viabilidad operativa real del proyecto.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Ecuaciones de Maxwell.», Blog de Jose Antonio Martin. Accedido: 12 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://joseantoniomartin.wordpress.com/2016/02/10/ecuaciones-de-maxwell/>
- [2] «Las leyes de Maxwell».
- [3] «El efecto fotoeléctrico. Museo Virtual de la Ciencia del CSIC». Accedido: 12 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz33.htm>
- [4] «IEEE Xplore Full-Text PDF»: Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1203114>
- [5] «jparkers.pdf». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://revistamarina.cl/revistas/2000/1/jparkers.pdf>
- [6] A. Yuste, «MARCONI: CRÓNICA DE UNA GESTA».
- [7] «HÜLSMEYER, Christian». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://forohistorico.coit.es/index.php/personajes/personajes-internacionales/item/huelsmeyer-christian>
- [8] I. A. Fernández, «El radar durante la II Guerra Mundial».
- [9] «Christian Hülsmeier ¿padre del radar?», Un poco de ciencia, por favor. Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://unpocodecienciaporfavor.com/2023/01/19/christian-hulsmeyer-padre-del-radar/>
- [10] «Biografía de Robert Watson-Watt (Su vida, historia, bio resumida)». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.buscabiografias.com/biografia/verDetalle/5752/Robert%20Watson-Watt>
- [11] C. P. Vega, «INTRODUCCION AL RADAR».
- [12] «An instantaneous direct-reading radiogoniometer - Page 611 - Science Hall of Fame - National Library of Scotland». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://digital.nls.uk/scientists/archive/75132037>
- [13] «Physicspr Explica el Magnetrón». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.physicspr.com/magnetron.html>
- [14] M. Á. P. García, «EL RADAR PASIVO, LA CAPACIDAD DE DETECTAR SIN DEJAR RASTRO».
- [15] Administrador, «Historia del RADAR (Radio Detection And Ranging)», Electrónica Unicrom. Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://unicrom.com/historia-del-radar/>
- [16] «Diez años y veinte días - Librerías Nobel.es». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.libreriasnobel.es/es/libros/diez-anos-y-veinte-dias_ALO0040308
- [17] C. P. LLC, «Definición e Historia del Radar | Historia del Detector de Radar», Storyboard That. Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.storyboardthat.com/es/innovations/radar>

- [18] H. Hertz, *Las Ondas electromagnéticas*. Univ. Autònoma de Barcelona, 1990.
- [19] J. L. Alonso Cerpa, «Introducción a los sistemas de radar y ARPA», 2015, Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/6842>
- [20] <https://www.areatecnologia.com>, «ondas electromagneticas». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.areatecnologia.com/ondas-electromagneticas.htm>
- [21] J. B. Muñoz, «Propagación de ondas electromagnéticas».
- [22] «ONDAS_EM_CONCEPTOS_BASICOS.pdf». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.uco.es/organiza/departamentos/ing-electrica/documentos/ONDAS_EM_CONCEPTOS_BASICOS.pdf
- [23] «RCS.pdf».
- [24] «Formación Radar | Inxpect». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.inxpect.com/es/formacion/funcionamiento/>
- [25] «Optimización de RCS de blancos radar mediante procesamiento gráfico.pdf». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106033/Optimizaci%C3%B3n%20de%20RCS%20de%20blancos%20radar%20mediante%20procesado%20gr%C3%A1fico.pdf?sequence=1>
- [26] «EL RADAR // Componentes del radar». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://elradar.50webs.com/componentes.htm>
- [27] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Transmisor de radar». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/!tx01.es.html>
- [28] «Principios básicos de Modulación digital». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecnologia-informatica.es/Modulacion-Digital/>
- [29] «castro_cuartero_alfredo_manuel_pfc. apuntamiento de antenas.pdf».
- [30] «AGRUPACIONES DE ANTENAS. (ARRAYS)».
- [31] «¿Cuál es el principio de funcionamiento de un sistema de radar?» Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.electricity-magnetism.org/es/cual-es-el-principio-de-funcionamiento-de-un-sistema-de-radar/>
- [32] «alvarado_moya-libre.pdf». Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38910035/alvarado_moya-libre.pdf?1443399860=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DProcesamiento_Digital_de_Senales.pdf&Expires=1706198898&Signature=MpD6tf2c2yFDKO5R~dui3vj3Y1Dcvy9qAdN5mfV9L098lOLdXiBB9PUUIA3OQVWTFtKpaGxxawAlkDLaz10uwSl3UvCr1RE9-2EliHoPsubj9BEs70HZrZZtS-JO8AK69U1-NpQWIWoGmEkVUSH-F3sCEPSukvn1FEayAj8azhoEQieqlaFdwOliUYsfpW-ShLwqjPho1NoI5C5QDdEkm0mPskVnqbCfhmg9YP7GECXOX7S3nv8TtEEUCOdFfd0dEqfV CVv6J88rfFm8z00gXs-VeoYfteNcod9G-JogtILlu2cPQKLWR~vjJ9LAZ~xsfPgrVT-O5D2Y1bG590Rf2A__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [33] E. E. Hernández, V. Ponomaryov, A. Ikuo, y H. Endo, «Uso de FPGA para realizar compresión del pulso de radar».
- [34] «Wave Relationship». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/wavrel.html>
- [35] «Longitud de Onda y Frecuencia | Decodifica Imágenes enviadas desde la ISS». Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://esero.es/practicas-en-abierto/decodifica-imagenes-iss/longitud_de_onda_y_frecuencia.html
- [36] R. D.-J.-A.-B. Colombia, «Fundamentos de radar - Principio Básico de Funcionamiento». Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/07.waves/Ondas%20y%20Rangos%20de%20Frecuencia.es.html>
- [37] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Ciclo de trabajo». Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb53.es.html>

- [38] «En sistemas de radar mejora de la precision de deteccion de objetivos», FasterCapital. Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://fastercapital.com/es/contenido/En-sistemas-de-radar--mejora-de-la-precision-de-deteccion-de-objetivos.html>
- [39] «Diagrama de radiación», Antenas. Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://todoantenas.weebly.com/diagrama-de-radiacioacuten.html>
- [40] «Antena Panel Plano», Antenas. Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://todoantenas.weebly.com/antena-panel-plano.html>
- [41] J. M. Huidobro, «Antenas de telecomunicaciones».
- [42] «5.10: Sistemas de radar», LibreTexts Español. Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Dise%C3%B1o_de_microondas_y_RF/I_-_Sistemas_de_radio_\(Steer\)/05%3A_Sistemas_de_RF/5.10%3A_Sistemas_de_radar](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Dise%C3%B1o_de_microondas_y_RF/I_-_Sistemas_de_radio_(Steer)/05%3A_Sistemas_de_RF/5.10%3A_Sistemas_de_radar)
- [43] R. D.-J.-A.-B. Colombia, «Fundamentos de radar - Resolución de distancia». Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Resoluci%C3%B3n%20de%20distancia.es.html>
- [44] «TRABAJO_PROYECTOJosemanuellyadrian.pdf». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/11008461/helvia/sitio/upload/TRABAJO_PROYECTOJosemanuellyadrian.pdf
- [45] «SN_2023_2024_T2_Radares_Pulsados.pdf».
- [46] «Física recreativa - Horizonte visual». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.carlostapia.es/fisica/horizonte_visual.html
- [47] A. C. B. Díaz y A. A. Frey, «NUEVASNTUEECVNAOS LOGÍAS TEDCENLOLOAGDÍAARS DDEEL NRAAVDEGARACDIEIÓN NAVEGACIÓN».
- [48] J. G. Argañarás, «Clasificación de los Sistemas Radar (1) - Fundamentos de radar». Accedido: 12 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp04.es.html>
- [49] «Beamforming». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/discovery/beamforming.html>
- [50] P. A. Bonet, «Estudio de las técnicas de Beamforming en el estándar 802.11ac».
- [51] Metaswitch, «What is 5G beamforming, beam steering and beam switching with massive MIMO». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-beamforming-beam-steering-and-beam-switching-with-massive-mimo>
- [52] P. Delos, «Phased-Array Antenna Patterns (Part 1)—Linear-Array Beam Characteristics and Array Factor», Microwaves & RF. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21133656/analog-devices-phasedarray-antenna-patterns-part-1lineararray-beam-characteristics-and-array-factor>
- [53] «Dialnet-EstudioYSimulacionDelBeamformingDeUnArregloDeAnten-5432203.pdf».
- [54] H. Kuschel, D. Cristallini, y K. E. Olsen, «Tutorial: Passive radar tutorial», *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 34, n.º 2, pp. 2-19, feb. 2019, doi: 10.1109/MAES.2018.160146.
- [55] «TFG-Gonzalez Gomez,Raul.pdf». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/62292/TFG-Gonzalez%20Gomez%2cRaul.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [56] «Sensor Movimiento Microondas Doppler Radar HB100 10.25GHz», VLC Components s.l. Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://solectroshop.com/es/sensores-de-distancia-proximidad-ir-y-ultrasonidos/897-sensor-movimiento-microondas-doppler-radar-hb100-1025ghz.html>
- [57] «Antenna splitter | SAV 220-000 | Sencor». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sencor.com/antenna-splitter/sav-220-000>
- [58] «Double Balanced Active RF Mixer Module Up-Conversion Down-Conversion Mixer pe66 | eBay». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ebay.es/itm/353639960081>

- [59] «GNU Radio - The Free & Open Source Radio Ecosystem · GNU Radio», GNU Radio. Accedido: 17 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gnuradio.org/>
- [60] «adi-adalm-pluto-large.jpg (617×526)». Accedido: 17 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.es/-/media/Images/Product%20Highlights/A/Analog%20Devices%20Inc/ADALM-PLUTO/adi-adalm-pluto-large.jpg?la=en&ts=3c16372c-2e7f-4ae8-960f-c6ebf75ba4f8>
- [61] A. C. A. Escobar, «INTERFAZ GRÁFICA PARA LA CORRELACIÓN DE SEÑALES RADIOASTRÓNOMICAS», n.º 2013, 2013.
- [62] «MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico». Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- [63] S. Guerra Fernández, Y. Lomaña Padilla, O. A. Guzmán Obregón, y Y. Pérez Arbella, «Optimización de la Estimación de DOA en Sistemas de Antenas Inteligentes usando criterios de Redes Neuronales», *Ing. Electrónica Automática Comun.*, vol. 34, n.º 1, pp. 70-86, abr. 2013.
- [64] C. Chamorro y E. Ovando-Shelley, «Análisis de señales: Aplicación de la correlación cruzada discreta para la determinación del primer arribo de la onda cortante», nov. 2018.
- [65] «Figura 4.1: Función normalizada de correlación cruzada entre la...», ResearchGate. Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-41-Funcion-normalizada-de-correlacion-cruzada-entre-la-componente-vertical-del_fig2_351639834
- [66] C. B. Ruiz y J. de, «APLICACIÓN PRÁCTICA TRANSCEPTOR BGT24MTR11: RADAR DOPPLER».
- [67] «¿Qué es MATLAB? | Innova con MATLAB | Pontificia Universidad Católica del Perú», Innova con MATLAB | Pontificia Universidad Católica del Perú. Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/matlab/que-es-matlab/>
- [68] «MANUAL OP RADAR FURUNO.pdf».

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El desarrollo de las tecnologías conlleva consigo implicaciones técnicas, estratégicas y sociales. El radar pasivo propuesto durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado no se encuentra exento de dichas implicaciones, es por ello que es crucial considerar como puede afectar a la sociedad en general y al ámbito militar en concreto.

Uno de los aspectos sociales más destacados del radar pasivo es su capacidad para aventajar a una fuerza naval, ya que permite a las unidades operar de manera más sigilosa y con mayor discreción al evitar la emisión de señales electromagnéticas que pueden ser detectadas por el enemigo, lo que reduce el riesgo de ser atacados y sufrir daños humanos y materiales.

Además, al contribuir a obtener una ventaja táctica sobre el enemigo, la implementación de un radar pasivo puede permitir una mejor asignación de los recursos empleados. Al tratarse de una tecnología más económica que el radar tradicional reduce el coste de las operaciones militares.

Si se aborda el proyecto desde una perspectiva ambiental, el radar pasivo ofrece ventajas frente al uso del radar convencional, su principal ventaja es la reducción del impacto ambiental ya que no satura ni contribuye a la emisión de ondas electromagnéticas a la atmósfera.

La reducción de emisiones electromagnéticas puede ayudar a proteger a los seres vivos que se encuentren en las zonas de operaciones, además, se minimizan las interferencias electromagnéticas en el entorno.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Todo lo relacionado con el ámbito militar debe implicar unas consideraciones éticas y sociales debido a las consecuencias que pueden conllevar sus actos, es por ello que las innovaciones asociadas al ámbito militar y a la guerra no deben quedar exentas de las mismas reflexiones.

Analizando el presente proyecto desde un punto de vista ético, es necesario fijarse en la responsabilidad que tienen los militares al considerar el uso de las armas y sensores que tienen a su alcance. Esto implica evaluar si el empleo de la tecnología planteada tiene beneficios que superen los posibles daños que puedan causar y para el cual ha sido planteado. Es por ello que los beneficiarios del proyecto deben asegurarse de que el uso del sistema planteado se limite a proteger vidas y preservar la seguridad de España.

Otro aspecto importante que se ha de tener en cuenta es el impacto social que puede traer la materialización y el uso del radar pasivo con la intención planteada en este trabajo de fin de grado. Se debe considerar de que forma el desarrollo y aplicación del radar pasivo puede influir en la percepción pública y del resto de países, es por ello que es crucial informar del propósito y beneficios que se quieren conseguir con la aplicación del radar pasivo.

Es por todo lo anterior que se deben tratar estas cuestiones con total seriedad y responsabilidad, ya que como se ha explicado no tenerlas en cuenta puede provocar reacciones no deseadas. Al tenerlas en cuenta se asegura que el desarrollo y la posible implementación del radar pasivo con el objetivo planteado se lleve a cabo de manera ética y sobre todo de manera fiel a los fundamentos de las Fuerzas Armadas, garantizando la seguridad de la sociedad española y de los intereses de España.