



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis de las prestaciones de un radar LFM CW persistente
para la detección de blancos elusivos en un entorno marítimo*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Álvaro Paz Armada

DIRECTORES: Rubén Nocelo López

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis de las prestaciones de un radar LFMCW persistente
para la detección de blancos elusivos en un entorno marítimo*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

Los sistemas de radar convencionales, conocidos como radares pulsados, tienen limitaciones en la detección de objetos debido a su principio de funcionamiento. La necesidad de escanear constantemente todo el volumen de cobertura radar con un haz de radiación estrecho afecta el tiempo de iluminación del blanco y la actualización de la información entre exploraciones. Para mejorar la detección de blancos con pequeña sección radar o moviéndose lentamente, se necesita maximizar el tiempo de iluminación del objetivo. Reducir la velocidad de giro de la antena es una solución, pero limita la velocidad de renovación de la información.

Los radares persistentes de onda continua ofrecen una alternativa interesante a los radares pulsados. Estos utilizan una antena con un haz de radiación muy ancho para iluminar toda la escena en transmisión y sintetizan múltiples haces simultáneos en recepción mediante el uso de un array de antenas. Esto permite crear un haz más estrecho y evitar la necesidad de escanear constantemente. De este modo se puede iluminar el blanco de forma ilimitada en tiempo y renovar la velocidad de información sin restricciones.

El objetivo del trabajo de final de grado (TFG) es analizar las prestaciones que puede alcanzar un radar de onda continua modulado linealmente en frecuencia (LFMCW) persistente en la detección de amenazas en un entorno marítimo. El análisis se realizará mediante simulaciones con señales sintéticas de LFM en un entorno controlado.

PALABRAS CLAVE

Radar, Beamforming Digital, LFMCW, Detección de Blancos, DEM

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de final de grado representa el final de una etapa importante en mi vida, cinco años de enseñanza y preparación en la Escuela Naval Militar que han dejado huella en mi formación como persona y como militar. A lo largo de estos cinco años, he vivido situaciones memorables, pero también he enfrentado dificultades y desafíos que hubieran sido diferentes sin la ayuda y compañía de las personas que voy a nombrar a continuación.

Agradezco en primer lugar y de manera más importante a mi familia. En especial a mi padre, quien ha sido, es y será siempre un modelo a seguir tanto en lo militar como en lo personal. Su ejemplo de dedicación y sacrificio en el servicio a la Patria ha sido una inspiración constante en mi vida. A mi madre Lule, quien a pesar de haber soportado la ausencia de su marido en los diferentes destinos y navegaciones que ha tenido, ha sabido ser una mujer valiente y un pilar fundamental para toda la familia. A mi hermano Iñaki, quien es mi referente más cercano y un ejemplo a seguir, siempre apoyándome y estando presente en todo momento. Y, por último, a mis hermanas Lourdes y María, quienes han sabido estar a la altura y cuidar de mi madre en los momentos más difíciles cuando ni su marido ni sus dos hijos estaban en casa.

No puedo terminar de expresar mi agradecimiento a mi familia sin mencionar a mis abuelos, Salvador y Alvaro, quienes son los verdaderos responsables de que haya escogido esta profesión y a quienes admiro y valoro profundamente.

También quiero expresar mi agradecimiento a mis amigos y compañeros, quienes han sido un gran apoyo para mí durante estos cinco años y no me han dejado solo en ningún momento. En especial, me gustaría agradecer a Ignacio de Gandarillas y a Guillermo Cervantes.

Por último, y como no podía ser de otra manera, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi excepcional tutor, Rubén, quien ha trabajado en este proyecto con mucha dedicación y esfuerzo y nunca ha escatimado en tiempo ni esfuerzo para ayudarme a resolver cualquier duda. Gracias a su guía y apoyo, este trabajo refleja todo el tiempo y esfuerzo que le ha dedicado al proyecto y a los alumnos.

Con todo, deseo dedicar el siguiente trabajo a mi mejor amigo de siempre, Pablo Ugarte, y a mis dos abuelas, Kurula y África, quienes desde el Cielo continúan brindándome su apoyo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	7
Lista de acrónimos.....	9
1 Introducción y objetivos	11
1.1 Contextualización.....	11
1.2 Motivación	12
1.3 Objetivos	12
1.4 Estructura	13
2 Estado del arte	15
2.1 Antecedentes	15
2.1.1 Contexto histórico.....	15
2.1.2 Investigaciones actuales del radar persistente	19
2.2 Clasificación radar	20
2.3 Radar de vigilancia basado en onda pulsada.....	23
2.3.1 Principio de funcionamiento.....	23
2.3.2 Exploración de haz estrecho	23
2.3.3 Ventana deslizante	24
2.4 Radar de vigilancia basado en onda continua CW.....	26
2.5 Radar de onda continua modulado en frecuencia (FMCW)	32
2.6 Radar LFM CW persistente	34
2.6.2 Aplicaciones del radar persistente	36
2.7 Ventajas del radar de onda continua frente al radar de onda pulsada	37
2.8 Fuentes de interferencia/ruido en un radar.....	39
3 Fundamentos de un radar LFM CW	41
3.1 Relación señal a ruido de un radar de onda pulsada	41
3.2 Radar de onda continua.....	44
3.3 Radar de onda continua modulado en frecuencia	47
3.3.1 Principio de medición	47
3.3.2 Modulación en forma de diente de sierra.....	48
3.4 Modos de transmisión y técnica de beamforming	53

4 Escenario y resultados.	59
4.1 Escenario	59
4.2 Radar LFM CW	61
4.2.1 Sistema de transmisión	61
4.2.2 Sistema de recepción	63
4.2.3 Mapa Doppler	67
4.3 Radar pulsado.....	67
4.4 Análisis de las prestaciones del sistema.....	69
5 Conclusiones y líneas futuras	77
5.1 Conclusiones	77
5.2 Líneas futuras	78
6 Bibliografía.....	81
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	85
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	87
Anexo III: Señal transmitida en Matlab	89
Anexo IV: Mapa doppler y CFAR	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Radar Wurzburg-Riese alemana, de la Segunda Guerra Mundial [7].	16
Figura 2-2. Imagen radar con (izquierda) y sin (derecha) anti clutter [9].	16
Figura 2-3. Phased array radar [10].	17
Figura 2-4. Radar de apertura sintética (SAR) [11].	18
Figura 2-5. Efecto doppler [12].	18
Figura 2-6. Radar de onda pulsada y radar de onda continua [6].	20
Figura 2-7. Diseño general de radar biestático y monoestático [17].	21
Figura 2-8. Pulsos transmitidos y recibidos en el radar pulsado [8].	23
Figura 2-9. Principio de funcionamiento de exploración mecánica o eléctrica [19].	24
Figura 2-10. Funcionamiento de ventana deslizante [19].	25
Figura 2-11. Radar AN/SPG-62 [20].	27
Figura 2-12. Cabeza del misil SM-2 [20].	28
Figura 2-13. Radar doppler en el cañón Mk-45 de las F100 [19].	29
Figura 2-14. Radar CW monoestático con una antena [22].	29
Figura 2-15. Radar CW monoestático con dos antenas [22].	30
Figura 2-16. Radar CW biestático con dos antenas en dos emplazamientos [22].	31
Figura 2-17. Radar Traffipax Speedophot [23].	31
Figura 2-18. Modulación en diente de sierra (fuente: propia).	33
Figura 2-19. Modulación triangular (fuente: propia).	33
Figura 2-20. Diagrama de bloques típico de un radar ubicuo [19].	36
Figura 3-1. Relación SNR en función del umbral de detección y el ruido [8].	42
Figura 3-2. Relación SNR en el receptor [8].	43
Figura 3-3. Criterios para calcular el ancho de banda [8].	43
Figura 3-4. Modulación de la señal transmitida [8].	46
Figura 3-5. Ejemplo de dos blancos moviéndose y la LOS [8].	47
Figura 3-6. Forma de onda de diente de sierra lineal FMCW (fuente: propia).	49
Figura 3-7. Adquisición del doppler objetivo utilizando FFT (fuente: propia).	50
Figura 3-8. Respuesta de un radar FMCW referente a un blanco estático (fuente: propia).	51
Figura 3-9. Respuesta de un radar LFM CW frente a blancos en acercamiento (fuente: propia).	52
Figura 3-10. Respuesta de un radar LFM CW frente a blancos en alejamiento (fuente: propia).	52
Figura 3-11. Antena transmisora con poca ganancia y poca directividad (fuente: propia).	54
Figura 3-12. Antena receptora con mucha ganancia y mucha directividad (fuente: propia).	54

Figura 3-13. Array del radar SPY-1D de las fragatas F-100 [31].	55
Figura 3-14. Elemento radiante fijo del array [31].	56
Figura 3-15. Radar Lanza-Naval con array plano [31].	56
Figura 3-16. Ejes de un array [31].	57
Figura 3-17. Esquema de beamforming [19].	58
Figura 4-1. Escenario sintético con tres blancos sobre un DEM (fuente: propia).	60
Figura 4-2. Espectrograma de la señal triangular LFM CW transmitida (fuente: propia).	62
Figura 4-3. Señal temporal LFM CW transmitida (2 periodos de barrido) (fuente: propia).	62
Figura 4-4. Diagrama de radiación de la antena transmisora y receptora (fuente: propia).	63
Figura 4-5. Diagrama de radiación de la antena receptora en diferente azimuth (fuente: propia).	64
Figura 4-6. Señal transmitida y recibida para un Blanco a 2 km (fuente: propia).	65
Figura 4-7. Señal transmitida y recibida para un blanco a 5,2 km (fuente: propia).	65
Figura 4-8. Señal recibida en tiempo para un Blanco a 2 km (fuente: propia).	66
Figura 4-9. Señal recibida en tiempo para un blanco a 5 km (fuente: propia).	66
Figura 4-10. Ancho de haz en función del número de elementos del array (fuente: propia).	68
Figura 4-11. Relación SNR en función del número de elementos del array (fuente: propia).	69
Figura 4-12. Relación SNR en función de la RCS del blanco (fuente: propia).	70
Figura 4-13. Posición del Blanco 3 en $t=0$ s (fuente: propia).	72
Figura 4-14. Posición del Blanco 3 en $t=80$ s (fuente: propia).	72
Figura 4-15. Posición del Blanco 3 en $t=160$ s (fuente: propia).	72
Figura 4-16. Posición del Blanco 3 en $t=240$ s (fuente: propia).	73
Figura 4-17. Posición del Blanco 3 en $t=320$ s (fuente: propia).	73
Figura 4-18. Posición del Blanco 3 en $t=400$ s (fuente: propia).	73
Figura 4-19. Posición del Blanco 3 en $t=480$ s (fuente: propia).	74
Figura 4-20. Posición del Blanco 3 en $t=560$ s (fuente: propia).	74
Figura 4-21. Posición del Blanco 3 en $t=640$ s (fuente: propia).	74
Figura 4-22. Posición del Blanco 3 en $t=720$ s (fuente: propia).	75
Figura 4-23. Posición del Blanco 3 en $t=800$ s (fuente: propia).	75
Figura 4-24. Recorrido completo del Blanco 3 (fuente: propia).	75
Figura 4-25. Velocidad del blanco respecto al radar (fuente: propia).	76
Figura A4-1. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=0$ s (fuente: propia).	91
Figura A4-2. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=80$ s (fuente: propia).	91
Figura A4-3. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=160$ s (fuente: propia).	91
Figura A4-4. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=240$ s (fuente: propia).	92
Figura A4-5. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=320$ s (fuente: propia).	92
Figura A4-6. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=400$ s (fuente: propia).	92

Figura A4-7. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=480$ s (fuente: propia).	92
Figura A4-8. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=560$ s (fuente: propia).	93
Figura A4-9. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=640$ s (fuente: propia).	93
Figura A4-10. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=720$ s (fuente: propia).	93
Figura A4-11. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=800$ s (fuente: propia).	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 0-1. Lista de acrónimos empleados en el TFG.....	9
Tabla 2-1. Banda de frecuencia de los sistemas radar.....	22
Tabla 4-1. Requisitos del sistema.....	60
Tabla 4-2. Parámetros de la señal triangular transmitida LFMCW.....	61
Tabla 4-3. Parámetros de la señal transmitida en un radar pulsado.	68

LISTA DE ACRÓNIMOS

Abreviatura	Significado
CFAR	<i>Constant-false-alarm-rate</i> (Tasa constante de falsas alarmas)
CUD	Centro Universitario de la Defensa
DEM	<i>Digital Terrain Model</i> (Modelo Digital del Terreno)
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting-Terrestrial</i> (Difusión de Video Digital-Terrestre)
ECM	<i>Electronic Countermeasure</i> (Contramedidas Electrónicas)
EMI	<i>Electronic Interference</i> (Interferencia Electromagnética)
ENM	Escuela Naval Militar
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápidas de Fourier)
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i> (Modulación por desplazamiento de Frecuencia)
FM-CW	<i>Frequency Modulated Continuous Wave</i> (Onda Continua Modulada en Frecuencia)
GSM	<i>Global System for Mobile</i> (Sistema Global para las Comunicaciones móviles)
HF	<i>Hight Frequency</i> (Alta Frecuencia)
I+D	Investigación y Desarrollo
LFMCW	<i>Linear Frequency Modulated Continuous Wave</i> (Onda Continua modulada linealmente en frecuencia)
LOS	<i>Line-of-sight</i> (Línea de vision)
LPI	<i>Low Probability of Intercept</i> (Baja probabilidad de interceptación)
MTI	<i>Moving Target Indicator</i> (Indicador de Blancos Móviles)
PM-CW	<i>Phase Modulated Continuous Wave</i> (Onda Continua Modulada en fase)
PRF	<i>Pulse Repetition Frequency</i> (Frecuencia de Repetición de pulsos)
RCS	<i>Radar Cross Section</i> (Sección Equivalente de Radar)
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i> (Radar de Apertura Sintética)
SNR	<i>Signal-to-Noise</i> (Relación Señal a Ruido)
TFG	Trabajo de Final de Grado
TX-RX	Transmisor-Receptor
VHF	<i>Very High Frequency</i> (Muy Alta Frecuencia)

Tabla 0-1. Lista de acrónimos empleados en el TFG.

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contextualización

La detección de amenazas de pequeño tamaño, con baja sección radar y/o moviéndose a poca velocidad como pueden ser vehículos aéreos no tripulados o pequeñas embarcaciones juegan un papel importante en el contexto de Defensa y de la Armada.

La detección de estas amenazas usando tecnología radar (del acrónimo inglés *radio detection and ranging*) puede ser alcanzada tanto por sistemas radar activos como por sistemas radar pasivos [1]. Los sistemas radar pasivos carecen de transmisor propio y utilizan señales de transmisión de terceros (señales de radiodifusión como FM, DVB-T, GSM, ...) para detectar los objetos. Entre los inconvenientes de tal sistema radar está que la señal transmitida no está específicamente diseñada para operaciones radar, sino para tareas de comunicación. Esto lleva aparejado que la resolución, tanto en términos espaciales como en términos de velocidad, de tal detección de amenazas no esté optimizada [2].

Los sistemas radar activos, que disponen de transmisor propio, son un sistema electromagnético que en su modo de funcionamiento más básico permite detectar tales amenazas y medir la distancia a la que se encuentran y la velocidad a la que se mueven transmitiendo señales a ráfagas (radar activo pulsado) o señales radio de forma continua (radar activo de onda continua) y midiendo el retardo que sufre la señal al propagarse hasta el blanco, reflejarse y volver al radar.

El funcionamiento y las prestaciones de un radar activo dependen de una gran cantidad de variables. Entre ellas, cabe destacar el tiempo que un determinado blanco es iluminado por el radar en cada escaneo y la velocidad con la que se actualizan los datos entre escaneos consecutivos. En un radar activo pulsado convencional, tanto de exploración mecánica como de exploración electrónica, maximizar el tiempo de iluminación de un blanco conlleva minimizar el tiempo de actualización de los datos y viceversa ya que un mismo haz es el que transmite el pulso y recibe los ecos.

Como alternativa a los radares pulsados, los radares persistentes o ubicuos permiten iluminar el blanco de forma continuada, al utilizar un haz muy ancho en transmisión que abarque toda el área de interés y múltiples haces simultáneos en recepción si se dispone de un “array” de antenas, sin afectar al tiempo de refresco de la información. De esta forma se consiguen maximizar ambos parámetros y mejorar la capacidad de detección.

Además, al estar el blanco iluminado mucho más tiempo se consigue una ganancia de integración más alta que con un radar pulsado, permitiendo que la potencia transmitida necesaria para detectar un mismo objetivo sea mucho menor dando lugar a un sistema de baja probabilidad de interceptación.

1.2 Motivación

La vigilancia marítima es una tarea crucial para la seguridad y la defensa de cualquier nación. Para ello, el uso de tecnología radar es una herramienta fundamental para la detección de amenazas, como embarcaciones no identificadas o tráfico ilegal. Actualmente, existen numerosos aspectos que motivan el análisis de las prestaciones de los radares persistentes de onda continua modulados linealmente en frecuencia (LFMCW) en un entorno marítimo, tales como el propio interés mostrado por Defensa dentro del programa de Cooperación en Investigación Científica y Desarrollo en Tecnologías Estratégicas (COINCIDENTE) [3]. Este programa tiene como principal objetivo aprovechar tecnologías desarrolladas en el ámbito del Plan Nacional de I+D para incorporar soluciones tecnológicas innovadoras de interés para Defensa, como es el proyecto ART-DAR [4].

La motivación para analizar este tipo de radar enfocado en la detección de amenazas marítimas incluyen numerosos aspectos [5]:

- Proteger la seguridad de la embarcación mediante la detección temprana de barcos y los periscopios de los submarinos hostiles en el área de operaciones.
- Identificar y clasificar los objetivos detectados para determinar si representan una amenaza inmediata.
- Proporcionar información de posición y rumbo de los objetivos detectados para permitir contramedidas.
- Monitorear y proteger las rutas marítimas críticas para garantizar la seguridad de la embarcación durante su navegación.
- Proporcionar información de inteligencia para apoyar la toma de decisiones en situaciones de emergencia.
- Proporcionar información táctica para la coordinación y la cooperación con otras embarcaciones y sistemas de defensa marítima.

A nivel individual, la motivación de este Trabajo Fin de Grado (TFG) radica en la idea de poder afianzar los conocimientos adquiridos en las asignaturas de Sistemas de Radiocomunicación y Sensores Navales, principalmente en los temas referentes a sistemas radar (pulsado y de onda continua) y los diferentes elementos que configuran los medios de transmisión y recepción (antenas de comunicaciones, técnicas beamforming, ...).

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es evaluar las prestaciones y las limitaciones de un radar persistente de onda continua en banda X (9.4 GHz) modulado linealmente en frecuencia a la hora de detectar blancos marítimos elusivos¹ de pequeño tamaño que generalmente llevan asociados una limitada sección radar y moviéndose a baja velocidad. Para ello, se simulará un escenario con señales sintéticas en el entorno de MATLAB que permita realizar una comparación entre la detección de blancos a partir de un radar ubicuo y la detección de blancos a partir de un radar pulsado.

La evaluación de las prestaciones alcanzadas con el radar ubicuo se medirá en términos de relación señal a ruido (SNR) necesaria para la detección de blancos elusivos con la sección radar lo más pequeña posible y moviéndose a una velocidad mínima posible todo ello para una potencia transmitida lo más baja posible. Entre las diferentes variables a tener en cuenta, se debe considerar especialmente el número de elementos de la antena receptora tipo array que nos permitirá aumentar la SNR disponible considerablemente.

¹ Blanco elusivo: un blanco elusivo se refiere a algo que es difícil de alcanzar, atrapar o comprender. En el ámbito militar se refiere a un blanco que se mueve con rapidez y evita ser detectado o atacado [6].

Como objetivo final del TFG, se implementará una interfaz sobre un modelo digital del terreno (DEM) que permita la representación de los blancos detectados por el radar LFMCW y asociar unívocamente velocidad, distancia y dirección de la detección radar con posicionamiento real.

1.4 Estructura

El presente documento comienza con una breve contextualización de la problemática que se pretende resolver en este TFG, la motivación que nos ha llevado a ello y cuáles serán los objetivos planteados. La estructura de desarrollo del TFG se resume en los siguientes puntos:

- **Capítulo 1. Introducción y objetivos:** en este capítulo se pretende contextualizar la problemática a resolver y a exponer los objetivos que se pretenden alcanzar.
- **Capítulo 2. Estado del arte:** en este capítulo se describirán los principales avances en tecnología radar desde los orígenes hasta la actualidad. En esta descripción se matizarán los conceptos que diferencian un radar de onda continua de un radar pulsado y que los hacen óptimos para la detección de blancos elusivos. Y, ya dentro de los radares de onda continua, se analizará en particular el avance en los radares cuya frecuencia transmitida es modulada linealmente.
- **Capítulo 3. Fundamentos de un radar LFMCW:** en este capítulo se explicarán los fundamentos básicos de un radar de onda continua modulado linealmente en frecuencia y qué ventajas aporta sobre un radar pulsado convencional para la detección de blancos marítimos elusivos.
- **Capítulo 4. Escenario y resultados:** este capítulo será destinado a la exposición de los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo. En primer lugar, se presentará el escenario de medidas, a continuación, se compararán las prestaciones de los radares pulsados con los radares de onda continua y finalmente se mostrará un ejemplo de detección de un blanco con pequeña sección radar moviéndose a una velocidad relativamente baja.
- **Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras:** en este capítulo se analizarán los principales resultados obtenidos en el desarrollo del TFG y se plantearán líneas de desarrollo abiertas para el futuro.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hará un breve repaso de los principales avances en tecnología radar desde los orígenes hasta la actualidad. En esta descripción, se profundizará en los conceptos fundamentales que diferencian un radar de onda continua de un radar pulsado y que los hacen óptimos para la detección de blancos elusivos. Y, ya dentro de los radares de onda continua, se analizará en particular el avance en los radares cuya frecuencia transmitida es modulada linealmente que centrará nuestro interés.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Contexto histórico

El término radar procede del acrónimo inglés *Radio detecting and ranging* (“Detección y localización por radio”). La tecnología radar es un sistema que se ha convertido en una herramienta esencial en diversas aplicaciones militares, de aviación y de navegación. Sin embargo, el origen del radar se remonta a finales del siglo XIX, cuando Heinrich Hertz demostró que las ondas radio se reflejan en conductores y dieléctricos en 1886. Posteriormente, en 1903, Christian Hülsmeyer descubrió que las ondas de radio se reflejaban en barcos, lo que sentó las bases para el desarrollo del radar como una herramienta de detección. Antes del radar, la detección de objetos a distancia se realizaba principalmente mediante la vista o mediante el uso de dispositivos ópticos, como telescopios y binoculares. Sin embargo, estos métodos eran limitados en tiempo nublado o de noche.

En 1922, Guglielmo Marconi propuso el uso de ondas de radio para detectar objetos, lo que fue un avance significativo en el desarrollo del radar. Ese mismo año, Taylor y Young detectaron barcos de madera con un radar de onda continua (*Continuous Wave –CW–*) de 60 MHz. Casi una década después, en 1930, Hyland detectó aviones utilizando un radar de onda continua interferométrico a 33 MHz, lo que demostró la viabilidad de utilizar el radar para la detección de aviones. En 1934, Page y Sir Watson-Watt demostraron la viabilidad de los radares pulsados, lo que abrió nuevas posibilidades para la detección de objetos con mayor precisión. En 1936 se desarrolló el primer altímetro radar, que permitió la medición de la altitud de los aviones. Sin embargo, el verdadero impulso para el desarrollo del radar se produjo debido a la inminencia de un gran conflicto armado. Durante la Segunda Guerra Mundial, se desarrollaron radares, como el de la Figura 2-1, de 200 MHz, en buques y aviones de combate, lo que permitió a las fuerzas armadas detectar y rastrear objetivos enemigos.

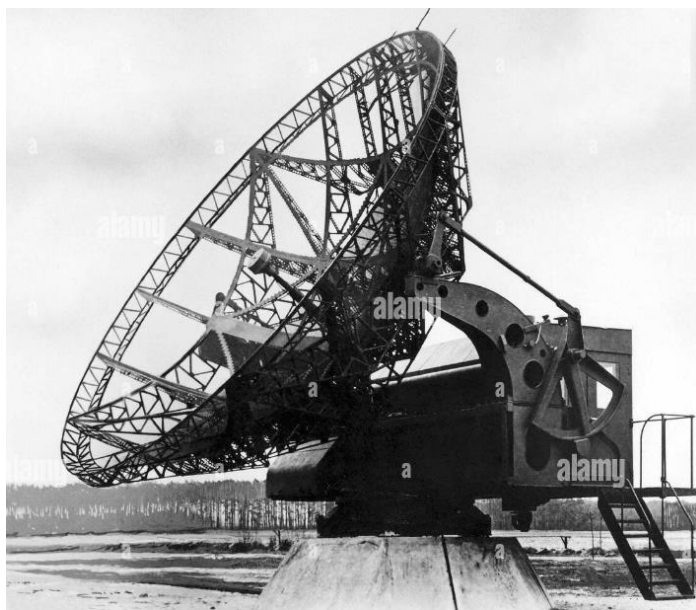


Figura 2-1. Radar Würzburg-Riese alemana, de la Segunda Guerra Mundial [7].

Al año siguiente de finalizar la Segunda Guerra Mundial (1940), se desarrolló el radar de microondas anglo-americano, que permitió la interceptación aérea y el control de fuego antiaéreo. El magnetrón, que tuvo su origen en la Segunda Guerra Mundial, permitió la producción en masa de radares de microondas. Después de finalizar la guerra, el laboratorio de Radio-Lab del MIT publicó 28 volúmenes con lo investigado en el campo de las aplicaciones militares de microondas. Esto impulsó el desarrollo de aplicaciones civiles del radar, que incluyen la navegación aérea, la vigilancia del tráfico aéreo y la detección de tormentas [8].

Tras la Segunda Guerra Mundial, las tecnologías del radar habían experimentado importantes avances que les había permitido mejorar significativamente su eficacia y precisión. Entre estas tecnologías destacan el filtrado MTI, el procesado digital de la información, los conjuntos de antenas, *phased arrays*, controlados electrónicamente, los osciladores de potencia en estado sólido, el transmisor coherente tipo klystron, el radar de navegación, el SAR y la radioastronomía [8].

El filtrado MTI es una técnica que permite borrar de la pantalla del radar todo lo que sean blancos fijos, como edificios o terrenos, conocido en la jerga radar como *clutter*, dejando únicamente los móviles, como aviones o barcos, como se expone en la Figura 2-2. Esto mejora significativamente la capacidad del radar para detectar y rastrear objetivos móviles en ambientes con mucho ruido.

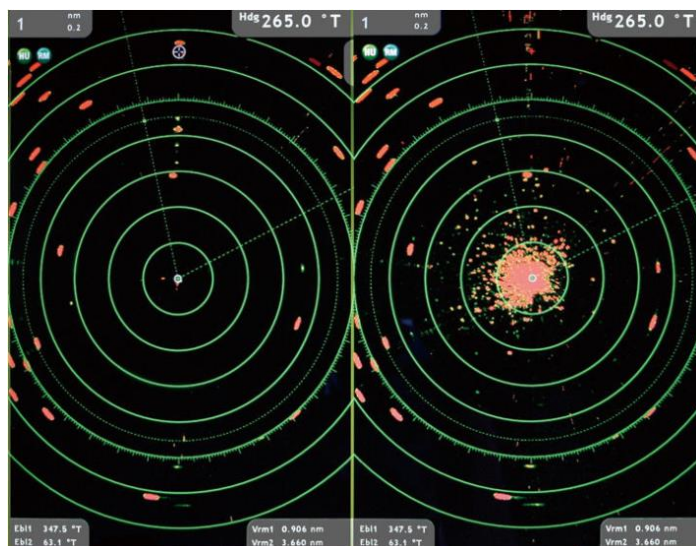


Figura 2-2. Imagen radar con (izquierda) y sin (derecha) anti clutter [9].

El procesamiento digital es otra tecnología que ha revolucionado el radar tras la Segunda Guerra Mundial, ya que permite analizar la información recogida por el radar de forma mucho más eficiente y precisa, mejorando la capacidad de detección y reduciendo los errores de detección. Los *phased arrays*, como el de la Figura 2-3, controlados electrónicamente son una tecnología que permite el apuntamiento del radar de forma electrónica. Esta tecnología permite controlar las direcciones en las que se emiten y reciben la señal radar sin necesidad de mover físicamente la antena del radar evitando todos los errores de precisión de tipo mecánico que ello conlleva. Esta tecnología mejora la eficacia y precisión del radar en la detección de objetivos.



Figura 2-3. *Phased array* radar [10].

Los osciladores de potencia en estado sólido son una tecnología que permite el uso de señales de radar más potentes y precisas. Estos osciladores tienen un tamaño y consumo de energía reducidos en comparación con los osciladores de tubo, lo que los hace más económicos y eficientes. Además, con la llegada de transmisores coherentes tipo klystron, que son transmisores que transmiten la señal en fase se facilitó su implementación en los *phased arrays* ya que uno de sus principales problemas era disponer de señales coherentes en los diferentes elementos de la antena. Los radares basados en transmisores klystron son capaces de generar señales de microondas a alta potencia, requerimiento especialmente útil en radares de largo alcance y alta precisión.

Entre otras posibles aplicaciones radar, cabe citar el radar de navegación que es un tipo de radar que se utiliza para el control de la trayectoria seguida por barcos y aviones, ya que proporciona información sobre la distancia y la dirección de los objetivos, lo que es esencial para la navegación en situaciones de baja visibilidad; el radar SAR (*Synthetic Aperture Radar*) de la Figura 2-4 que es una tecnología que permite crear imágenes de alta resolución de la superficie terrestre utilizando ondas de radar, siendo especialmente útil en aplicaciones militares y de vigilancia, así como en la investigación científica; los radares de radioastronomía donde se utilizan técnicas de radar para estudiar los objetos celestes permitiendo importantes descubrimientos en la astrofísica, como la detección de ondas gravitacionales.



Figura 2-4. Radar de apertura sintética (SAR) [11].

En conclusión, el desarrollo del radar fue un proceso largo y complejo que comenzó a finales del siglo XIX, a través de diversos avances tecnológicos se ha vuelto fundamental en aplicaciones militares, tanto aérea como marítima. El contexto histórico del radar está marcado por la inminencia de conflictos bélicos y por la necesidad de desarrollar tecnologías que permitieran a las fuerzas armadas detectar y rastrear objetivos enemigos. Después de la guerra, el radar se ha convertido en una herramienta esencial en aplicaciones civiles, lo que ha impulsado su desarrollo y evolución hasta la actualidad.

Con el tiempo, la tecnología del radar ha evolucionado para incluir una variedad de modos de operación, como el radar de búsqueda, el radar de seguimiento y el radar de navegación. También se han desarrollado radares de baja y alta frecuencia, así como radares de banda estrecha y ancha. El tipo de radar más utilizado es el radar pulsado, el cual se especificará más detenidamente en apartados posteriores, Su funcionamiento básico consiste en transmitir un pulso y medir el tiempo de retardo dando una estimación de la distancia a la que se encuentra un blanco. Como alternativa al radar pulsado, un radar de onda continua es un tipo de radar que transmite una señal de forma ininterrumpida en lugar de a ráfagas. Una de sus principales características es la mejora de la precisión y la capacidad que tiene de poder detectar la velocidad de un objeto en movimiento respecto al radar pulsado.

Un radar CW utiliza el principio de Doppler para medir la velocidad de un objeto en movimiento. El principio de Doppler es un fenómeno físico que se produce cuando una señal de onda, como una onda de radio, es reflejada por un objeto en movimiento. La frecuencia de la señal reflejada aumenta o disminuye, dependiendo de si el objeto se está acercando o alejando del radar como se expone en la Figura 2-5.



Figura 2-5. Efecto doppler [12].

Para medir la velocidad de un objeto con un radar de onda continua, el radar transmite una señal hacia el objeto y recibe el eco de la señal reflejada. Comparando la frecuencia entre las dos señales estima la frecuencia Doppler y de ahí directamente la velocidad del objeto.

Los radares persistentes o ubicuos (denominación particular de radares de onda continua), que serán objeto de gran parte de este trabajo, son una tecnología relativamente nueva que se ha desarrollado en las últimas décadas. Los antecedentes de esta tecnología también se remontan a la Segunda Guerra Mundial, cuando se utilizaron los primeros radares para detectar aviones enemigos. Estos primeros radares eran grandes y costosos, y se utilizaban principalmente en instalaciones militares y aeropuertos. A medida que la tecnología de los radares se desarrolló, se comenzaron a utilizar para una variedad de aplicaciones, como la navegación, la detección de objetos en el mar y la detección de objetos en el espacio. Los radares se volvieron cada vez más pequeños y eficientes, lo que permitió su uso en una variedad de plataformas, como barcos, aviones y satélites.

En los años 80 y 90 [13], con el desarrollo de la tecnología de los sensores, se empezaron a utilizar los radares persistentes para detectar objetos en el suelo y en la atmósfera, como vehículos terrestres y aeronaves. Esto permitió una mayor vigilancia y seguridad en las fronteras y en las zonas de conflicto. A finales del siglo XX, con el desarrollo de los sistemas de comunicaciones inalámbricos y la miniaturización de los sensores, se comenzó a investigar sobre la posibilidad de crear una red de radares persistentes que cubrieran un área geográfica.

En resumen, los radares persistentes o ubicuos son una tecnología reciente que se ha desarrollado a partir de los radares tradicionales. Esta tecnología permite una mayor vigilancia y seguridad en las fronteras, la detección de incendios forestales, el seguimiento de vehículos y la monitorización de la fauna. Sin embargo, también existen preocupaciones sobre la privacidad y la seguridad de los datos recogidos por los radares persistentes o ubicuos. Existe el riesgo de que esta tecnología sea utilizada para vigilar a individuos y grupos sin una causa legítima o sin el debido proceso legal. También existe el riesgo de que los datos recogidos por los radares persistentes o ubicuos sean vulnerables a ataques cibernéticos y sean utilizados de manera maliciosa. Es importante establecer regulaciones y protocolos claros para garantizar su uso adecuado y seguro.

2.1.2 Investigaciones actuales del radar persistente

Los sistemas radar persistentes son una tecnología en constante evolución que busca mejorar la detección, seguimiento y localización de objetos en un área de interés. Estos sistemas permiten detectar objetos en las superficies aéreas, marítimas y terrestres, y se caracterizan por ser capaces de operar de manera continua en un área específica. Los avances más recientes en el campo de los sistemas radar persistentes se enfoca en el desarrollo de tecnologías de baja potencia y bajo costo para su implementación en drones y robots (sistemas de baja probabilidad de interceptación (LPI)). Estos sistemas de baja potencia permiten que los drones y robots operen de manera autónoma durante períodos prolongados de tiempo, lo que los hace ideales para aplicaciones de vigilancia y seguridad [4].

Otro avance importante se enfocó en mejorar la capacidad de los sistemas radar persistentes para detectar objetos en condiciones de baja visibilidad, como en niebla o en ambientes con alta densidad de nubes. Esto se logró mediante el uso de tecnologías de polarimetría e interferometría radar, que permiten la detección de objetos en condiciones de baja visibilidad. Además, se está trabajando en el desarrollo de sistemas radares persistentes que sean capaces de detectar y seguir objetos en movimiento en tiempo real [14]. Estos sistemas utilizan técnicas de procesamiento de señal avanzadas para filtrar y clasificar señales de radar, lo que permite identificar objetos en movimiento en un área de interés. Finalmente mencionar que se está tratando de mejorar la capacidad de los sistemas radares persistentes para detectar y seguir objetos en movimiento en ambientes con alta interferencia electromagnética, como en entornos urbanos o cerca de instalaciones industriales. Esto se logra mediante el uso de técnicas de procesamiento de señal avanzadas para reducir la interferencia electromagnética y mejorar la señal-ruido [15].

2.2 Clasificación radar

Los radares se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios [16], como puede ser la forma de la onda transmitida, el número de antenas utilizadas, la frecuencia de trabajo o el tipo de emisión realizada. Así, por ejemplo, disponemos de las siguientes clasificaciones:

- En función de la **forma de la onda**, los radares se pueden dividir en dos grandes grupos, como se puede observar en la Figura 2-6.
 - **Radar de onda pulsada:** envía señales cortas (a ráfagas), pero de alta potencia del orden de kilovatios, lo que los hace de tamaño relativamente grande. Su principal característica es que requiere de un tiempo de escucha (tiempo donde no transmite y solo recibe ecos) entre los diferentes pulsos transmitidos.
 - **Radar de onda continua (CW):** utiliza señales ininterrumpidas en tiempo en lugar de ráfagas cortas. La capacidad de medir la distancia del blanco está vinculada al ancho de banda en este tipo de radar. Si es necesario estimar tanto la velocidad como la distancia del blanco, se debe modular la señal radiada con el fin de disponer de una marca de referencia temporal. En general, la señal transmitida puede estar modulada tanto en frecuencia (FM-CW) como en fase (PM-CW).

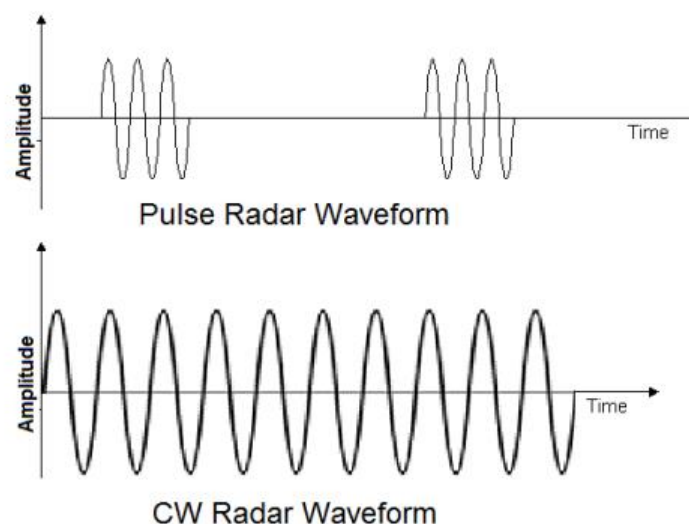


Figura 2-6. Radar de onda pulsada y radar de onda continua [6]

- En función del criterio del **número de antenas**, se pueden clasificar en tres tipos de sistemas radar, como se expone en la Figura 2-7.
 - **Monoestático:** transmisor y receptor están emplazados en el mismo punto.
 - **Biestático:** transmisor y receptor están localizados en diferentes emplazamientos.
 - **Multiestático:** combina la información recibida por receptores en varios emplazamientos.

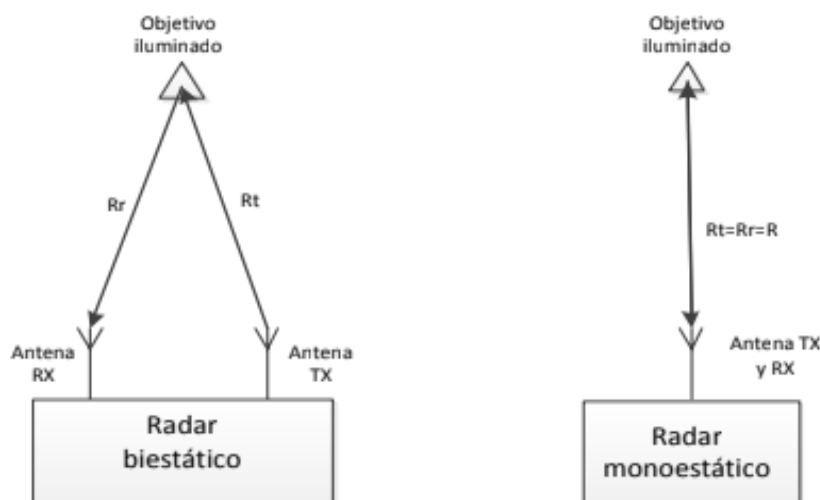


Figura 2-7. Diseño general de radar biestático y monoestático [17].

- En función de la **disponibilidad de transmisor** propio o no, los radares se pueden clasificar en dos tipos.
 - **Radar activo:** tiene su propio transmisor sincronizado con el receptor.
 - **Radar pasivo:** no dispone de transmisor propio y utiliza un “iluminador de oportunidad”.
- **Frecuencia de trabajo:** La frecuencia de trabajo determina en muchos casos la utilización y la precisión del radar. Por esta razón, existen diferentes bandas de frecuencia, que se pueden observar en la Tabla 2-1, para los sistemas radar, las cuales definen el propósito para el cual serán utilizados.

Las bandas de frecuencia HF y VHF son dos de las bandas de radio más utilizadas en todo el mundo. La HF (*High Frequency*) se encuentra en el rango de 3 a 30 MHz, mientras que la VHF (*Very High Frequency*) se encuentra en el rango de 30 a 300 MHz. Ambas bandas se utilizan para comunicaciones de radio de larga distancia, pero tienen diferencias significativas en cuanto a su propagación y uso.

La banda de frecuencia HF es conocida por su capacidad de propagación de onda de cielo a tierra. Las ondas de radio HF rebotan en la ionosfera y se reflejan de vuelta a la tierra, lo que permite a los operadores de radio de HF comunicarse a largas distancias sin necesidad de repetidores. Por otro lado, la banda de frecuencia VHF es conocida por su capacidad de propagación de línea de vista. Las ondas de radio VHF se mueven en línea recta y pueden ser bloqueadas por obstáculos físicos, lo que limita su alcance [18].

Nombre de la banda	Frecuencia (GHz)	Longitud de onda
HF	0,003-0,03	10-100 m
VHF	0,05-0,33	0,9-6 m
UHF	0,3-1	0,3-1 m
L	1-2	15-30 cm
S	2-4	7,5-15 cm
C	4-8	3,75-7,5 cm
X	8-12	2,5-3,75 cm
Ku	12-18	1,67-2,5 cm
K	18-27	1,11-1,67 cm
Ka	27-40	0,75-1,11 cm
mm	40-300	7,5-1 mm
Q	40-60	7,5-5 mm
V	50-75	6-0,4 mm
E	60-90	6-3,33 mm
W	75-100	4-2,4 mm

Tabla 2-1. Banda de frecuencia de los sistemas radar.

- En función de la **misión** a realizar, los radares se pueden clasificar en dos tipos.
 - **Radar de búsqueda:** exploran un volumen de espacio en búsqueda de potenciales blancos.
 - **Radar de alerta temprana:** su objetivo es detectar posibles blancos a gran distancia permitiendo la activación de los sistemas de defensa. Se utilizan por ejemplo para detectar posibles misiles balísticos.
 - **Radar de guiado de armas:** se usa el eco recibido del blanco para dirigir su rumbo permitiendo al radar mantener al blanco iluminado.
 - **Radares meteorológicos, detectores de movimiento, velocímetros, multipropósito, ...**

En el trabajo desarrollado en este TFG, el interés recae en un radar de búsqueda o de vigilancia dentro de un área, ya que no hay información de partida de posibles blancos; de onda continua en Banda X (9.4 GHz), ya que la señal utilizada está diseñada para ser transmitida ininterrumpidamente en tiempo;

activo ya que se dispone de capacidad de transmisión de señal radar; y monoestático ya que la antena transmisora y receptora están emplazadas en el mismo punto (zona de los laboratorios de investigación del CUD), aunque son antenas diferentes.

Llegados a este punto, es importante entender el término radar de búsqueda o *search radar*. Este tipo de radar se utiliza principalmente para detectar objetivos desconocidos o previamente no identificados en un área determinada. En base a esto, se puede describir el radar de vigilancia o *surveillance radar* como un tipo de radar de búsqueda que se utiliza para mantener un conocimiento constante del tráfico en un área designada [19].

2.3 Radar de vigilancia basado en onda pulsada

Los radares de vigilancia convencionales, basados en radares pulsados, obtienen información del área de interés en cada giro azimutal completo que hace la antena, iluminando de los diferentes tramos azimutales en función del ancho de haz de radiación. Estos radares utilizan técnicas como la exploración de haz estrecho y ventana deslizante para determinar la posición del blanco. En las siguientes secciones se profundiza un poco más en estas técnicas, ya que nos permitirán conocer las principales diferencias de escaneo entre un radar pulsado y un radar de onda continua.

2.3.1 Principio de funcionamiento

El funcionamiento básico del radar de onda pulsada, como se expone en la Figura 2-8 consiste en emitir un pulso corto de energía electromagnética en una dirección específica y medir la cantidad de energía que regresa después de haber sido reflejada por un objeto. En contraste con los radares continuos, el transmisor se apaga durante el período de escucha. Este proceso de detección en el radar pulsado se caracteriza por la emisión de pulsos de ondas de radio muy cortos, con una duración de alrededor de 0,1 a 1 μ s, seguidos de un período de escucha mucho más largo de 1 ms. Se determina la distancia al objetivo mediante el tiempo de ida y vuelta de la señal en el caso de un radar fijo o al contrastar la frecuencia Doppler entre la señal que se emite y el eco en relación con la distancia en el caso de un radar en movimiento. Los radares pulsados son primordialmente diseñados para la detección de larga distancia y por lo tanto emiten pulsos de gran potencia. [20].

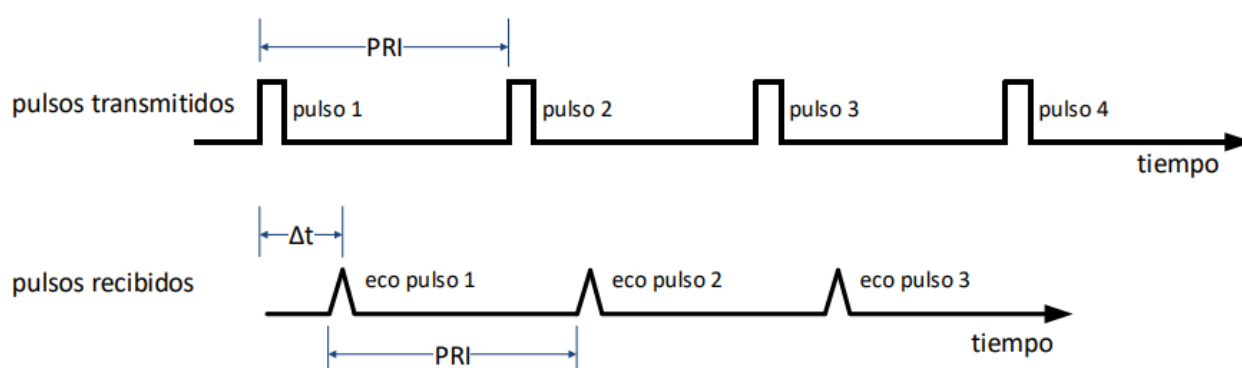


Figura 2-8. Pulsos transmitidos y recibidos en el radar pulsado [8].

2.3.2 Exploración de haz estrecho

La técnica de haz estrecho de exploración, que se puede ver el funcionamiento en la Figura 2-9 es un método utilizado por los radares de vigilancia convencionales para determinar la posición de los objetivos. En esta técnica, el radar emite un haz de radiación muy estrecho que se mueve en un patrón predeterminado. Cuando el haz incide en un objeto, parte de la energía es reflejada de regreso al radar.

La cantidad de energía reflejada y el tiempo que tarda en llegar al radar se utilizan para determinar la posición del objeto, este dato es conocido como *plot* [19]. La precisión de este parámetro aparte de depender de la rapidez de giro de la antena (velocidad de rotación de la antena), también depende del periodo en el que el objetivo se haya dentro del haz de exploración de la misma durante su rotación (tiempo de iluminación).

En esta técnica, se considera que una prolongación del tiempo de iluminación mejora el alcance del sistema y reduce la amplitud espectral, proporcionando una mayor claridad en la identificación de objetivos en presencia de interferencia. Sin embargo, la desventaja es que requiere más tiempo para cubrir un área amplia, ya que el haz estrecho solo ilumina una pequeña porción de la misma en cada giro. Estos sistemas, en general presentan un tiempo de iluminación reducido, lo cual limita su capacidad al depender de la velocidad de rotación de la antena y consiguiente, de renovación de la información, limitando así la capacidad del procesador Doppler para diferenciar entre objetivos.

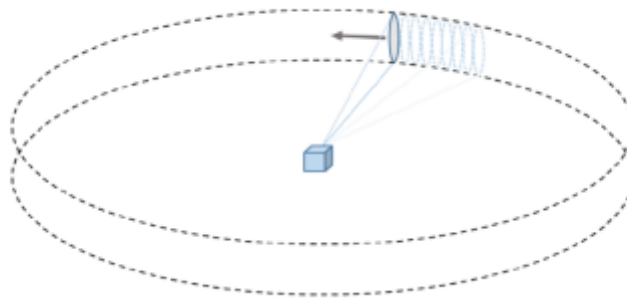


Figura 2-9. Principio de funcionamiento de exploración mecánica o eléctrica [19].

2.3.3 Ventana deslizante

En sistemas cuyo haz de transmisión es estrecho, la técnica de ventana deslizante puede ser empleada como un sistema de almacenamiento de datos. La idea es almacenar los datos recopilados en cada vuelta de la antena dentro de una ventana temporal móvil. Esa información se guarda en una matriz cuyas dimensiones son la distancia y el ángulo de azimut a través de la representación con "0" y "1". El tamaño de la ventana dependerá de la anchura del haz del radar, mientras que el tamaño de las celdas que conforman la ventana dependerá de la anchura del pulso emitido [19].

En la Figura 2-10, se puede ver el movimiento seguido por la ventana. Durante cada escaneo realizado a la velocidad de rotación de la antena, se aumenta el número de "1" cuando se detecta un objetivo dentro del haz transmitido. Se establece un valor en azimut correspondiente al umbral de detección del objetivo, M . De esta manera, se almacenan los datos recibidos. Si el número de ecos coincide con el valor umbral M , se determina que hay un objetivo. La presencia del objetivo termina cuando el número de "1" en la ventana pasa de M a $M-1$. Luego, a medida que se mueve la ventana, los datos antiguos son descartados y reemplazados por los más recientes. De esta manera, se mantiene un registro de la información más actual en cada momento, mejorando la capacidad de seguimiento y resolución de objetivos.

Finalmente, se necesita conocer el centro del objetivo en azimut (θ_{Blanco}) que se calcula a partir del punto medio entre el azimut en el que se decide la presencia de un objetivo (θ_i), y el punto donde se alcanza el final de la detección del objetivo (θ_f), véase la ecuación (2-1).

$$\theta_{blanco} = \frac{\theta_i + \theta_f}{2} \quad (2-1)$$

Al utilizar una ventana deslizante en lugar de almacenar todos los datos recopilados, se puede reducir la cantidad de información que debe ser procesada y almacenada por el sistema, lo que mejora su eficiencia y velocidad.

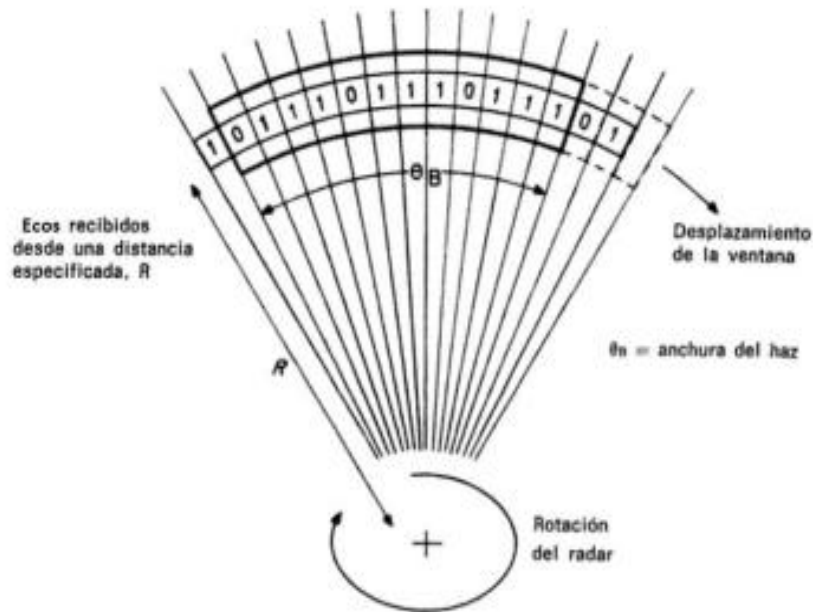


Figura 2-10. Funcionamiento de ventana deslizante [19].

En los sistemas de radar convencionales, además de factores como el tiempo de iluminación y la velocidad de actualización de la información (la cual tiene relación con la velocidad de rotación de la antena), también es importante considerar el tipo de onda utilizado. Este sistema debe proporcionar un ancho de banda adecuado y ser compatible con otras funciones del sistema.

En los sistemas de vigilancia convencionales, el alcance radar es proporcional a la energía transmitida (comúnmente conocido en la jerga radar como que “ R^4 es proporcional a la energía”). Para el caso de radar pulsado, se debe tener en cuenta el número de pulsos recibidos, representada mediante la ecuación (2-2), durante el tiempo que el blanco es iluminado por el radar, que dependen de la velocidad de rotación de la antena.

$$N_p = \frac{\theta_B \cdot PRF}{6 \cdot \Omega(rpm)} = PRF \cdot T_i \quad (2-2)$$

Donde N_p es el número de pulsos recibidos, θ_B el ancho de haz de la antena en grados, PRF es la frecuencia con la que se transmiten los diferentes pulsos (Hz), Ω es la velocidad de rotación de la antena (revoluciones por minuto, rpm) y T_i es el tiempo de integración (s) o lo que es lo mismo el tiempo que el blanco es iluminado por el radar.

El alcance del sistema depende, por lo tanto, del número de pulsos recibidos, o lo que es lo mismo, del tiempo de iluminación y de la velocidad de rotación de la antena.

El sistema decidirá si detecta un blanco o no en función de la relación entre el nivel de la señal recibida y el nivel de ruido presente (conocido como relación señal a ruido, SNR). En este caso, el nivel de señal recibida dependerá de la cantidad de ecos recibidos (del número de pulso recibidos), mediante un umbral de detección. Por eso, estos sistemas utilizan un haz de exploración y la técnica de ventana deslizante para detectar y determinar la presencia de un objetivo. Siguiendo el mismo principio de cálculo de SNR para igualar el alcance radar, los sistemas con onda continua necesitan radiar menos potencia porque el tiempo de iluminación del blanco o por consiguiente el número de pulsos recibidos es muy superior. Esto se debe a que en la onda continua, el "pulso" transmitido dura todo el tiempo de la señal [19].

Los radares de onda pulsada han demostrado ser herramientas muy útiles para diversas aplicaciones. En particular, estos radares son muy eficaces para la detección a larga distancia y, por lo tanto, son muy utilizados en aplicaciones militares para la vigilancia y la detección de objetivos en el aire, la tierra o el mar. Además de su uso militar, los radares de pulso son ampliamente utilizados en la gestión del tráfico aéreo para evitar colisiones y asegurar un vuelo seguro. Estos radares pueden detectar la posición y la velocidad de los aviones y proporcionar información crítica para garantizar que los aviones se mantengan a una distancia segura entre sí. Además, los radares de onda pulsada se han utilizado en meteorología para predecir el clima. Estos radares pueden detectar la precipitación en el aire y medir su intensidad, lo que es esencial para prever los fenómenos meteorológicos extremos.

Por último, los radares de onda pulsada también se han utilizado para la detección de satélites en órbita. La capacidad de estos radares para detectar objetos en movimiento y medir su velocidad y dirección los hace muy útiles para monitorear el espacio y rastrear satélites en órbita. En general, los radares de onda pulsada son herramientas valiosas para una variedad de aplicaciones en diferentes campos [20].

2.4 Radar de vigilancia basado en onda continua CW

El radar de onda continua se diferencia de otros radares en que emite una señal de radio de forma ininterrumpida en lugar de pulsos repetitivos. Esto significa que la señal de radio está constantemente activa y puede ser utilizada para monitorear objetos en tiempo real. Además, esta tecnología es más eficiente en términos de energía que los radares pulsados, ya que no requiere una pausa entre las señales para detectar ecos.

A lo largo de los años, el radar de onda continua ha sido perfeccionado y mejorado, y se ha utilizado en una amplia variedad de aplicaciones. Una de las primeras aplicaciones fue el control de encendido y apagado de semáforos. En este caso, el radar detecta la presencia de un vehículo y activa el cambio de semáforo correspondiente. Además, el radar de onda continua también ha sido utilizado para contar el número de vehículos que pasan por una carretera y para controlar su velocidad. En este caso, el radar detecta la velocidad del vehículo y activa una señal de advertencia si excede el límite establecido.

Otras aplicaciones del radar de onda continua incluyen la detección de intrusos en áreas restringidas. En este caso, el radar se utiliza como una alarma de intrusión, detectando la presencia de un objeto en un área protegida y activando una señal de alarma si se detecta un movimiento sospechoso. Los radares de onda continua también se han utilizado para detectar y monitorear patrones climáticos y para predecir el clima futuro, como en el caso de los radares meteorológicos.

Finalmente, el radar de onda continua se ha utilizado para el guiado de misiles, ya que puede detectar la posición y la velocidad de un objetivo en movimiento y proporcionar la información necesaria para que el misil lo alcance. En general, el radar de onda continua ha demostrado ser una herramienta útil y versátil para una variedad de aplicaciones en diferentes campos. En la actualidad, esta tecnología sigue evolucionando y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones en todo el mundo.

El radar de onda continua emite una señal generalmente de frecuencia elevada. La recepción y procesamiento de la señal eco también se realiza sin interrupción. Para utilizar este tipo de radar, hay que abordar dos problemas: evitar la interferencia de la potencia emitida por el transmisor en el receptor, conocido como retroalimentación generalmente mediante el uso de antenas transmisora y receptora independientes, y enlazar las señales temporales entrantes en el receptor para calcular el desfase de señales [21].

Estos problemas se pueden solucionar de diversas maneras, como utilizando dos antenas transmisora y receptora independientes, pero en un único punto, separando las antenas emisoras y receptoras en diferentes ubicaciones, como en los sistemas de defensa antiaérea que utilizan un transmisor potente para el objetivo y un receptor en un misil que se dirige hacia él. También se pueden utilizar diferentes

frecuencias entre el transmisor y el receptor, como con un desplazamiento de frecuencia Doppler en sistemas de medición de velocidad.

Tal vez, el uso más extendido de un radar de onda continua, es el de la estimación de velocidad de un objeto (por ejemplo, el usado por la policía para controlar la velocidad de los vehículos). En este tipo de radares, el alcance o distancia exacta hasta el objetivo incumplidor no es esencial, por lo que no se requiere una medición precisa del tiempo de retardo, solamente de frecuencia Doppler. En este caso, la señal transmitida será continua en tiempo de frecuencia constante (generalmente una señal senoidal pura). Veremos más adelante, que si se desease obtener información sobre la distancia, debería utilizarse una técnica de modulación en frecuencia o un ajuste de fase en la señal transmitida para calcular el tiempo de retardo.

En resumen, el radar de onda continua sin modulación brinda únicamente lecturas de velocidad basadas en el efecto Doppler. Con este tipo de radar, no es viable medir la distancia al objeto y resulta imposible distinguir entre varios objetos reflectantes. La manera más común de habilitar radares de onda continua es empleando las alteraciones en el espectro de la señal reflejada causadas por el efecto Doppler. Un ejemplo de radar de onda continua, que podemos relacionar con nuestras fragatas, en concreto, las fragatas clase F-100, es el radar de CW (iluminador) AN/SPG-62 del Sistema de Dirección de Tiro MK-99 que se puede ver en la Figura 2-11. El receptor, que se puede observar en la Figura 2-12, se encuentra en la cabeza del misil SM-2, de guiado semi-activo con radares CW [22].



Figura 2-11. Radar AN/SPG-62 [20].



Figura 2-12. Cabeza del misil SM-2 [20].

2.4.1 Efecto Doppler

La señal de sondeo de radar continuo de frecuencia y amplitud constante es enviada sin ser modulada. La señal reflejada puede tener una frecuencia idéntica o ser alterada por la cantidad de desplazamiento Doppler en caso de que el reflector se mueva a una velocidad radial distinta de cero. Los radares que se crean para medir de forma específica el desplazamiento Doppler se denominan radares Doppler, como el de Figura 2-13.

En el ámbito de la detección por radar, se ha observado que aquellos objetos que no presentan desplazamiento Doppler, es decir, que no muestran un movimiento radial relativo al radar y permanecen estáticos en relación al receptor, no son detectados por el equipo de radar, es lo que se da a llamar “estar ciego”. Existen dos casos específicos en los cuales se puede dar esta circunstancia. En primer lugar, cuando el blanco se mueve en la misma dirección y a la misma velocidad que el radar, como puede ser el caso en una persecución aérea entre dos aviones caza. En segundo lugar, cuando el objeto blanco circunvala el radar, es decir, se mueve tangencialmente respecto al mismo. En ambos casos, se produce un desplazamiento Doppler cero, lo que implica que el radar no es capaz de detectar el objeto blanco en cuestión [22].

Con base en las frecuencias comunes de los radares aéreos y las velocidades de los aviones, es común observar desplazamientos Doppler con magnitudes menores a 50 kHz. Si un radar de onda continua (CW) busca capturar todo el rango de estos desplazamientos, tanto positivos como negativos, se requiere un ancho de banda de aproximadamente 100 kHz. Por otro lado, los radares pulsados típicamente requieren anchos de banda que oscilan en varios MHz. El reducido ancho de banda de los radares CW implica una menor limitación debida al ruido, lo que se traduce en una mayor relación señal-ruido (SNR) en comparación con los radares pulsados. Asimismo, es posible reducir aún más el ruido si se filtra para evitar los retornos no deseados de blancos como el mar, la tierra (*clutter*) o cualquier otro objeto indeseado.

Como comentamos anteriormente, los radares diseñados para medir la velocidad Doppler en general no miden la distancia al reflector, por lo que no miden el tiempo de retardo. No obstante, si se precisa de esta información, se puede establecer una relación temporal utilizando la modulación de la señal reflejada y de la señal transmitida. Detectar el instante en que se produce la variación de uno de los parámetros de la señal, gracias a la modulación, posibilita la medición del tiempo de retardo. Este enfoque da lugar a una clase distinta de radar que utiliza diferentes tipos de modulación, como la modulación en frecuencia (radar FMCW) o la modulación en fase (radar PMCW). En resumen, un radar

que emite señales sin modulación solo puede estimar la velocidad de un objeto debido al efecto Doppler, y no puede calcular su distancia ni identificar diferentes objetivos en una misma demora [21].



Figura 2-13. Radar doppler en el cañón Mk-45 de las F100 [19].

2.4.2 Configuraciones del radar de onda continua

En este apartado, vamos a realizar un breve resumen de las distintas configuraciones de radar de onda continua, aunque en algunos casos ello no difiera del radar pulsado.

- **Radar CW monoestático con una antena**

La configuración de un radar CW monoestático con 1 antena, como el que se puede observar de forma esquemática en la Figura 2-14, presenta ciertas características particulares que es importante tener en cuenta. En primer lugar, este tipo de radar se caracteriza por un elevado acoplamiento transmisor (TX)-receptor (RX), lo que puede tener un impacto en la eficacia de la transmisión y la recepción de señales.

Además, la configuración de un radar CW monoestático con 1 antena también se asocia con una resolución limitada, lo que implica que la capacidad para distinguir entre objetivos cercanos puede ser reducida. Esto puede tener implicaciones importantes en términos de precisión y fiabilidad de las mediciones realizadas por el radar.

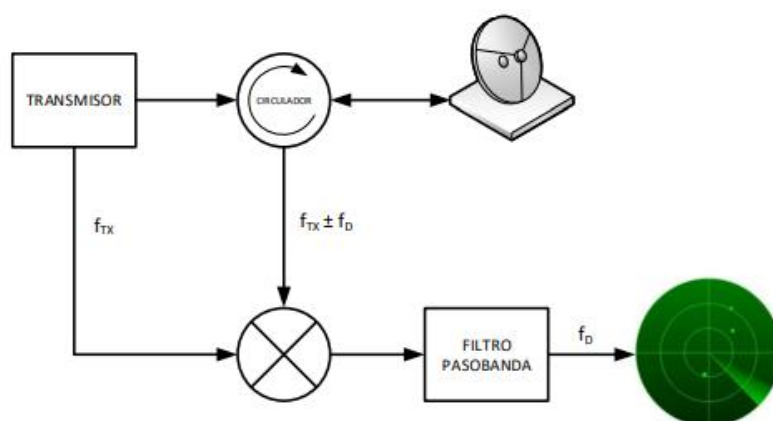


Figura 2-14. Radar CW monoestático con una antena [22].

- **Radar CW monoestático con dos antenas**

En comparación con un radar CW monoestático con 1 antena, la configuración de un radar CW monoestático con 2 antenas, como el que se puede ver de forma esquemática en la Figura 2-15, presenta algunas características particulares que es importante considerar. En primer lugar, el acoplamiento TX-RX en este tipo de radar depende del haz de la antena y los lóbulos secundarios, lo que puede tener un impacto importante en la eficacia del sistema para la transmisión y recepción de señales.

Además la potencia TX debe ser limitada, ya que la energía transmitida desde una antena puede interferir con la recepción de señales en la otra antena. Es importante tener en cuenta que esta interferencia puede ser más pronunciada cuando la distancia entre las antenas es menor.

Aunque este tipo de radar puede proporcionar una mayor resolución que un radar CW monoestático con 1 antena, también es importante considerar cuidadosamente las limitaciones asociadas con su configuración antes de utilizarlo en una aplicación particular.

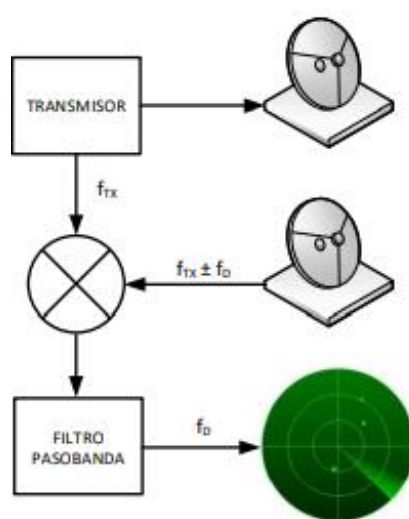


Figura 2-15. Radar CW monoestático con dos antenas [22].

- **Radar CW biestático con dos antenas en dos emplazamientos**

La configuración de un radar CW biestático con 2 antenas, como el de Figura 2-16, es una opción que presenta algunas ventajas sobre otras configuraciones. En primer lugar, a diferencia de otros tipos de radar, en este caso no hay acoplamiento TX-RX, lo que significa que la señal transmitida no afecta a la señal recibida. Esto puede tener un impacto importante en la calidad de las mediciones realizadas por el radar, ya que se reduce la interferencia entre las señales transmitidas y recibidas.

Además, la configuración de un radar CW biestático con 2 antenas no tiene limitación de potencia, lo que significa que se puede utilizar la potencia necesaria para obtener mediciones precisas. Este tipo de radar también se caracteriza por tener una gran resolución, lo que se traduce en una reducción significativa del ruido en las mediciones realizadas.

En general, la configuración de un radar CW biestático con 2 antenas es una opción interesante para aplicaciones que requieren mediciones precisas y una reducción significativa del ruido en las señales recibidas. Es importante tener en cuenta que, aunque esta configuración tiene algunas ventajas sobre otras, también puede tener limitaciones en términos de su alcance y capacidad para detectar objetos en movimiento rápido. Por lo tanto, al seleccionar un radar para una aplicación específica, es importante considerar cuidadosamente las características de la configuración del radar y cómo estas pueden afectar su rendimiento en el contexto de la tarea específica en la que se utilizará.

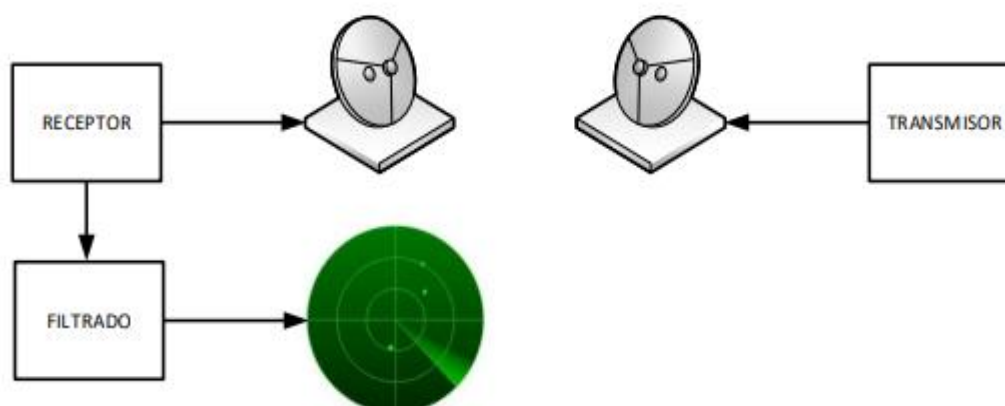


Figura 2-16. Radar CW biestático con dos antenas en dos emplazamientos [22].

2.4.3 Aplicaciones de los radares de onda continua

- **Medidor de velocidad de control de movimiento**

Los radares de continuidad (CW) son especialmente diseñados para la medición de velocidad utilizando el efecto Doppler. Se emplean frecuencias extremadamente elevadas debido a que la frecuencia Doppler está sujeta a la longitud de onda de la señal, tal como se exhibe en la Figura 2-17, que presenta el radar Traffipax Speedophot de ROBOT Visual Systems GmbH con una frecuencia operativa de 24.125 GHz [21].



Figura 2-17. Radar Traffipax Speedophot [23].

Mide la velocidad de los vehículos que entran y salen por la derecha e izquierda de la calle. Puede ser instalado en un vehículo o en un trípode y se puede usar una cámara de alta resolución para registrar la infracción.

- **Detector de movimiento por radar Doppler**

Los sensores de radar Doppler, que son asequibles y simples de utilizar, pueden emplearse para activar dispositivos de alerta, sistemas de emergencia o como interruptores de encendido/apagado de puertas o luces.

- **Control de movimiento**

Si la señal proveniente del mezclador posee una componente invariable y los amplificadores posteriores no eliminan dicha componente, se puede utilizar un radar de continuidad sin modulación para medir con gran precisión la distancia a objetivos fijos. Aunque este tipo de radar no mide el desplazamiento Doppler, estima la variación de fase entre la señal emitida y recibida. Durante la trayectoria entre el radar y el reflector y viceversa, se produce un número específico de longitudes de onda. Si cambia la longitud de este recorrido, aunque sea de forma mínima, también cambia la diferencia de fase. La medición del alcance no es exacta porque no se conoce la cantidad de longitudes de onda que se deben agregar al valor de la diferencia de fase. Por consiguiente, este tipo de radar se emplea para detectar alteraciones en la distancia a un objeto.

Es posible utilizar esta técnica de medición para la vigilancia sin contacto de la frecuencia cardíaca y la respiración en pacientes en unidades de cuidados intensivos. Se realiza la calibración del radar en el pecho del paciente, con el fin de supervisar la distancia con una precisión milimétrica. La variación en la discrepancia de fase entre las señales transmitidas y recibidas son mostradas en un gráfico temporal en un osciloscopio. Una computadora procesa los datos obtenidos de la variación de fase para determinar la frecuencia cardíaca del paciente. Si no se observan oscilaciones en la discrepancia de fase, se activa una alarma.

- **Espoletas de radar para misiles y proyectiles**

No existe un rango mínimo para el radar de pulsos que impida la medición mediante el radar, lo que lo convierte en un sistema apto para la creación de espoletas de radar para misiles y proyectiles de artillería. En este contexto, la señal de baja frecuencia aumenta en amplitud a medida que se acerca al objetivo, mientras que la frecuencia Doppler disminuye abruptamente justo antes del impacto. Una vez que la señal entra en el filtro de baja frecuencia, el detonador del radar activa la cabeza de combate.

2.5 Radar de onda continua modulado en frecuencia (FMCW)

El radar FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*) es una tecnología radar que difiere del radar de onda continua CW en el sentido que la frecuencia de la señal transmitida varía en el tiempo al estar modulada. La diferencia en frecuencia entre la señal transmitida y la recibida (reflejada) se determina mezclando las dos señales, produciendo una nueva señal que puede medirse para determinar la distancia y/o la velocidad de un blanco. A diferencia del radar de onda continua sin modular, esta medición es posible ya que la modulación nos va a proporcionar una marca de tiempo que nos habilitará la opción de medir un retardo temporal. Dentro de las posibles formas de modulación existen varias alternativas como son la función diente de sierra, la función triangular, la función rectangular, ... El radar FMCW emite una señal RF que suele barrerse linealmente en frecuencia. La señal recibida se mezcla con la señal emitida, y debido al retraso causado por el tiempo de vuelo para la señal reflejada, habrá una diferencia de frecuencia que se puede detectar como una señal en el rango de baja frecuencia y como se conoce la frecuencia transmitida en cada instante de tiempo se puede conocer el retardo y con ello la distancia del objeto.

Las características del radar FMCW son: la medición de distancia se realiza comparando la frecuencia de la señal recibida con una referencia (generalmente directamente la señal de transmisión), la duración de la señal de transmisión es sustancialmente mayor que el tiempo de recepción requerido para el rango de medición de distancia instalado. Además, tiene la capacidad de medir rango y velocidad de un objetivo simultáneamente, una alta precisión en la medición de rango y una simplificación en el procesamiento de señales debido a la mezcla en un rango de frecuencia baja [24].

2.5.1 Patrón de modulación

Existen diversos patrones de modulación que pueden emplearse para cumplir distintos objetivos de medición:

- **Modulación en forma de diente de sierra**

El tipo de modulación representado en la Figura 2-18 se utiliza para mediciones de distancia en rangos relativamente largos con un impacto mínimo de la frecuencia Doppler (como en un radar de navegación marítima).

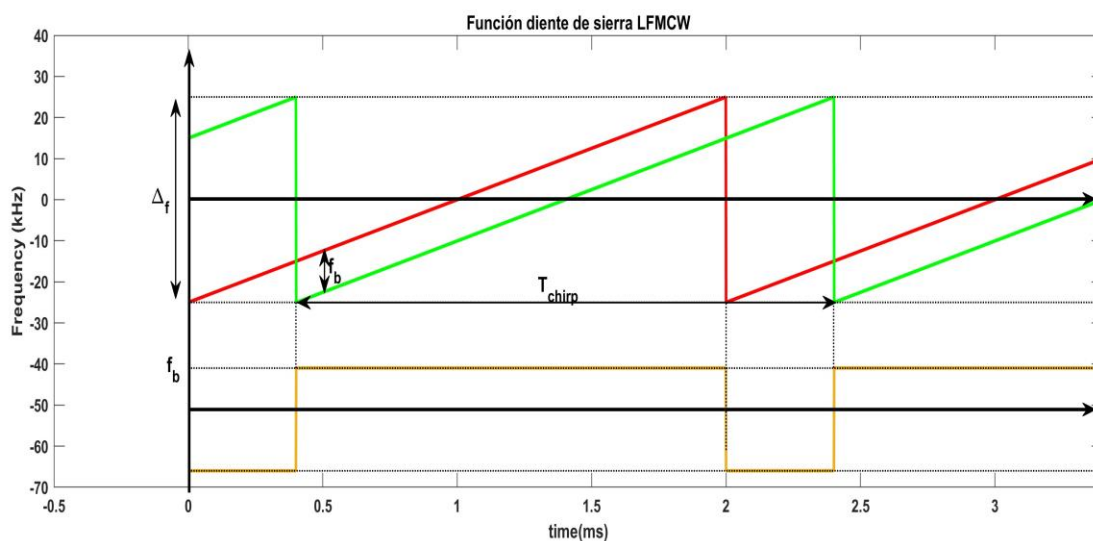


Figura 2-18. Modulación en diente de sierra (fuente: propia).

- **Modulación triangular**

Esta modulación representada en la Figura 2-19 permite una separación sencilla entre la diferencia de frecuencia (Δf) y la frecuencia Doppler (f_D). Será la modulación utilizada en el desarrollo del TFG.

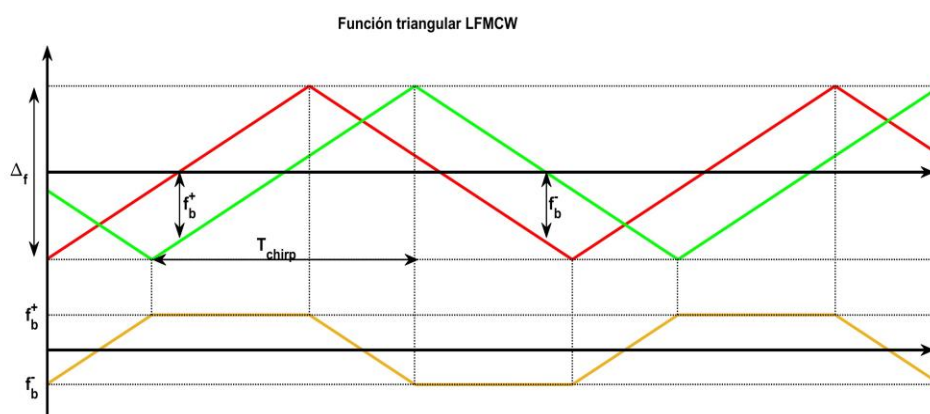


Figura 2-19. Modulación triangular (fuente: propia).

- **Modulación rectangular (modulación por desplazamiento de frecuencia única, FSK)**

Esta modulación se utiliza para mediciones de distancia muy precisas a corta distancia mediante la comparación de fase de ambas señales de eco de frecuencia. Tiene la desventaja de que no es posible

separar las señales de eco de varios objetivos y sólo permite un rango de medición reducido sin ambigüedades.

- **Modulación en escalera**

Las mediciones interferométricas permiten ampliar el rango de medición sin ambigüedades.

- **Modulación sinusoidal**

En el pasado también se utilizaba la modulación sinusoidal, que se lograba mediante un motor que hacía girar una placa de condensador en la cámara de resonancia del oscilador transmisor. Sólo se empleaba la parte relativamente lineal cercana al cruce cero en función de seno.

2.5.2 Ventajas de modular la señal en un radar de onda continua

Modular la señal en frecuencia en un radar de onda continua CW tiene varias ventajas, una de las principales es la mejora en la capacidad de detección de distancia [25]. La modulación en frecuencia permite al radar variar la frecuencia de la señal transmitida de forma sistemática, lo que permite al radar medir la distancia al objeto detectado mediante el uso del principio de tiempo de ida y vuelta, la variación en la frecuencia también permite discriminar entre señales reflejadas de diferentes objetos, lo que mejora la capacidad de detección y reduce la interferencia, además al utilizar diferentes frecuencias para la transmisión y la recepción se pueden obtener informaciones adicionales como la velocidad angular del objeto detectado. Otra ventaja que se presenta al utilizar la modulación en frecuencia es que se puede aprovechar mejor la potencia de transmisión del radar, lo que se traduce en un mayor alcance y una mejor sensibilidad. También permite una mayor capacidad de codificación ya que se pueden utilizar diferentes patrones de variación de frecuencia para transmitir información codificada solo legible para el receptor autorizado, aumentando así la seguridad de la información transmitida. En resumen, la modulación en frecuencia en un radar de onda continua permite mejorar la capacidad de detección de distancia, discriminación de señales, eficiencia en el uso de la potencia de transmisión, codificación de información y detección de velocidad angular del objeto detectado.

2.6 Radar LFMCW persistente

Actualmente, los sistemas de radar de vigilancia que emplean técnicas de exploración de haz estrecho presentan ciertas limitaciones a la hora de maximizar el tiempo de iluminación de un objetivo para aumentar el alcance radar y las posibilidades de detección. Por esta razón se está investigando un sistema de radar persistente en banda X, a 9,4 GHz, como una opción de radar de vigilancia superficial. Los sistemas de vigilancia de este tipo se destacan por no tener un barrido que dependa de la velocidad de giro de la antena transmisora. En su lugar, el enfoque está en iluminar de forma continua todo el escenario y los ecos son recogidos con un array digital y técnicas de beamforming digital. Una de las grandes ventajas de este sistema de vigilancia es su habilidad para detectar rápidamente cualquier blanco potencial de interés [19].

Hay varias variables a considerar al evaluar el rendimiento y las prestaciones de un radar, pero dos de ellas son particularmente importantes [26]:

- El tiempo de iluminación (o el tiempo durante el cual el haz ilumina un objetivo)
- La velocidad de actualización de la información (que es la velocidad de giro del haz de antena en los radares de exploración mecánica o electrónica, la cual tiene importancia en la velocidad de actualización de los datos de un blanco)

Para mejorar el alcance del sistema, una opción es maximizar el tiempo de iluminación, ya que esto aumenta la energía transmitida y mejora la capacidad de eliminar el *clutter* (interferencia). Además, al aumentar el tiempo de iluminación, se puede mejorar la precisión del análisis espectral de los ecos y la resolución Doppler, es decir, la capacidad del sistema para distinguir objetos basándose en pequeñas diferencias en su velocidad radial.

Sin embargo, al utilizar un sistema de radar con escaneo mecánico o electrónico, al aumentar el tiempo de iluminación, la velocidad de actualización de la información también aumenta, lo cual disminuye la frecuencia de escaneo y empeora las habilidades de seguimiento y filtrado. Un problema importante con este tipo de sistemas es que deben escanear a velocidades muy bajas para detectar amenazas específicas (como objetos moviéndose a poca velocidad), lo que puede llevar a periodos de escaneo de decenas de segundos.

En resumen, el uso de un sensor radar convencional (de barrido mecánico o electrónico) para detectar ciertas amenazas como blancos de baja velocidad o de baja sección radar, tienen un impacto negativo en las prestaciones del sistema, lo que dificulta la detección de otros objetos. Se está considerando como otra opción el radar permanente, en el cual el sistema de transmisión no ejecuta un escaneo basado en la velocidad de rotación de la antena transmisora. En su lugar, este sistema se enfoca en iluminar continuamente toda el área, evitando así la necesidad de realizar un escaneo.

La principal diferencia entre el radar convencional y el radar ubicuo es que en el primero, un solo haz se utiliza para transmitir y recibir la señal (con un escaneo secuencial) y el tiempo de iluminación depende del ancho del haz y de la velocidad del escaneo, mientras que en el radar persistente se utiliza un haz ancho para transmitir y múltiples haces estrechos y simultáneos para recibir [26]. Evidentemente, esto se consigue si se dispone de una antena receptora de tipo *phased array*. Este nuevo tipo de radar se define como *looks everywhere all the time*, es decir, a todas partes, todo el tiempo [19] y entre sus principales ventajas se encuentra la capacidad de detección instantánea de todos los objetos potenciales en la escena, mejorando la capacidad de seguimiento y la precisión en la clasificación de los objetos detectados. Además, al no depender del escaneo, el radar persistente tiene una mayor velocidad de actualización de la información, lo que permite detectar objetos en movimiento rápido. En la Figura 2-20 se puede observar el diagrama de bloques típico de un radar ubicuo.

Las aplicaciones de los radares ubicuos están estrechamente relacionadas con el campo militar. Los sistemas de defensa aérea pueden ser utilizados tanto para rastrear objetivos a larga distancia con una renovación de datos lenta, como para monitorear objetivos a corta distancia con una renovación de datos rápida. Además, el uso de radares ubicuos en la vigilancia aérea presenta la ventaja de una baja probabilidad de interceptación. En el ámbito civil, estos sistemas son ampliamente utilizados en el control de tráfico aéreo, el monitoreo meteorológico e incluso para detectar y reconocer la concentración de aves cerca de aeropuertos, lo que no es posible con los radares de vigilancia convencionales.

Es justamente la disponibilidad de múltiples haces de recepción la que permite alcanzar la cobertura deseada en el plano azimutal, generalmente en rangos sectoriales en torno a 90 grados. Estos haces son direccionados a través de la técnica de beamforming digital.

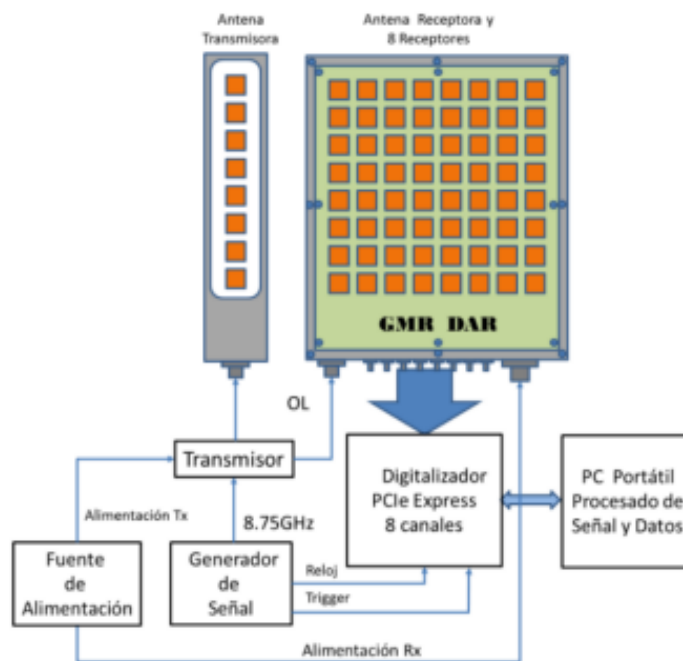


Figura 2-20. Diagrama de bloques típico de un radar ubicuo [19].

En resumen, el radar persistente es una tecnología emergente que promete mejorar la capacidad de detección y seguimiento de amenazas marítimas, superando las limitaciones de los sistemas de radar tradicionales.

2.6.1 Proceso del radar persistente

La mayor parte de los radares convencionales utilizan un solo haz para transmitir y recibir la señal, lo que requiere un tiempo de revisión que depende del ángulo, la velocidad de escaneo y el ancho del haz. En cambio, los radares persistentes tienen un haz ancho para transmitir y varios haces más estrechos y simultáneos para recibir, lo que se traduce en una habilidad para detectar de manera prácticamente instantánea a todos los objetivos potenciales deseados [26].

Para lograr esta capacidad de detección instantánea, se utiliza una antena transmisora de baja ganancia (también conocida como sistemas LPI o de baja probabilidad de interceptación), lo que reduce el nivel de interferencia. Cada haz recibido también tiene su propia cadena de procesamiento. Sin embargo, esta reducción en la energía radiada requiere períodos de procesamiento más largos, aumentando así los requisitos de procesamiento (en términos de tasa de datos y memoria).

Es importante tener en cuenta que la resolución Doppler, que es inversamente proporcional a la duración del tiempo de iluminación, es el ancho de banda de una sola línea espectral. Esta resolución Doppler determina la diferencia mínima en la frecuencia Doppler entre señales de dos objetivos con igual amplitud, permitiendo distinguirlos, y también proporciona la diferencia mínima de velocidades que se puede resolver. Por lo tanto, en un radar ubicuo, el tiempo de iluminación debe ser muy largo para lograr un procesamiento Doppler con alta resolución en velocidad, lo que mejora sus prestaciones y simplifica su uso, incluso más que los radares de tráfico [26].

2.6.2 Aplicaciones del radar persistente

Los radares persistentes o ubicuos son una tecnología cada vez más popular que ofrece soluciones innovadoras para una amplia gama de industrias. Estos radares tienen la capacidad de monitorear un área de manera constante y proporcionar información en tiempo real, lo que los convierte en una herramienta valiosa en diversos campos. Desde la seguridad militar y civil hasta la industria, los radares persistentes

están demostrando ser útiles en una variedad de aplicaciones. Por ejemplo, se utilizan para detectar intrusiones en seguridad, monitorear la fauna en parques naturales, seguimiento de vehículos y bienes en logística y transporte, y detección de fallos en la industria [27].

Además, esta tecnología está en constante evolución y se espera que se desarrollen nuevas aplicaciones en el futuro. En cualquier caso, los radares persistentes están ganando terreno en la industria debido a su capacidad única para monitorear y proporcionar información en tiempo real.

Las aplicaciones de los radares persistentes tienen necesidades distintas a las de los radares de vigilancia convencionales.

- **Precisa menos alcance** lo que le permite trabajar en bandas de frecuencia X, Ku, Ka y W.
- **Detecta y rastrea objetivos de baja velocidad y tamaño radar** debido a su naturaleza, objetivos como caminantes son muy difíciles (o casi imposible) de detectar con sistemas radar de exploración sin comprometer el rendimiento para otros objetivos más comunes como personas, vehículos o drones.
- **Mejor resolución requerida** para superar la limitación de su sensibilidad a menudo causada por el clutter y no por el ruido.
- **Fácil implementación de técnica monopulso en elevación** lo que permite diferenciar entre objetivos en tierra y objetivos en el aire (como drones o aviones de baja altura de vuelo).

El sistema de vigilancia aquí planteado tiene como principal objetivo la detección de blancos elusivos en un entorno marítimo, pero esta tecnología es adaptable a una variedad de usos. En los últimos años, los radares de vigilancia terrestre se han convertido en un elemento clave de los sistemas de vigilancia multi-sensor que se implementan para satisfacer una amplia gama de necesidades en seguridad y defensa. Algunos ejemplos de aplicaciones incluyen la vigilancia de infraestructuras críticas, la protección de fronteras terrestres no reguladas, y la protección de avanzadas bases operativas de las fuerzas armadas.

Además, el sistema desarrollado es muy efectivo en la detección de micro/mini drones debido a su capacidad de discriminar blancos de baja sección radar en entornos con un alto nivel de interferencia. Sin embargo, esta evolución también plantea una nueva amenaza global en términos de privacidad, seguridad y seguridad aérea. La fácil accesibilidad y usabilidad de los drones puede representar un riesgo potencial para la privacidad y seguridad de las personas, y también puede ser aprovechada por terroristas para cometer ataques más efectivos y menos expuestos [26].

2.7 Ventajas del radar de onda continua frente al radar de onda pulsada

Existen dos tipos principales de radar: el radar de onda continua y el radar de onda pulsada. Si bien ambos sistemas tienen sus aplicaciones específicas, el radar de onda continua tiene una serie de ventajas significativas en comparación con el radar de onda pulsada.

El radar de onda continua emite una señal sin interrupción en tiempo, al igual que la recepción y análisis de la señal de eco. Por lo tanto, el radar de onda continua ofrece la capacidad de detectar objetivos móviles constantemente, lo que lo convierte en la opción ideal para aplicaciones que requieren vigilancia en tiempo real y de largo alcance.

En contraposición, el radar de onda pulsada utiliza breves pulsos de energía para medir la distancia y velocidad de los objetivos, con un periodo de escucha para recibir la señal de eco. Durante este periodo de escucha, el transmisor se apaga, lo que significa que no se puede detectar ningún objeto que se mueva mientras el transmisor está apagado.

En resumen, el radar de onda continua ofrece una capacidad de detección constante, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren una vigilancia constante y en tiempo real. A continuación, se explorarán con más detalle las ventajas del radar de onda continua sobre el radar de onda pulsada [28].

- **Detección constante:** El radar de onda continua emite una señal sin interrupción y puede proporcionar una detección constante de objetivos móviles. En cambio, el radar de onda pulsada solo puede detectar objetos cuando el transmisor está activo, lo que resulta en una menor capacidad de detección constante.
- **Rango de detección:** El radar de onda continua tiene un rango de detección más amplio que el radar de onda pulsada, lo que lo hace ideal para aplicaciones de vigilancia de largo alcance.
- **Mayor precisión:** El radar de onda continua puede proporcionar una mejor precisión en la medición de la velocidad y la distancia de los objetivos, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren alta precisión.
- **Resolución mejorada:** El radar de onda continua también puede proporcionar una resolución mejorada en la detección de objetos, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren una mejor identificación.
- **Menor susceptibilidad al ruido:** El radar de onda continua es menos susceptible al ruido en comparación con el radar de onda pulsada, lo que puede mejorar su capacidad para detectar objetivos en entornos ruidosos.

2.7.1 Ventajas potenciales de los radares persistentes

Los radares persistentes o ubicuos son sistemas de vigilancia que ofrecen una amplia gama de ventajas para diversas aplicaciones en seguridad y defensa. Estos radares son capaces de monitorear de manera continua un área específica, lo que les permite detectar y rastrear objetos en movimiento en tiempo real. Además, su capacidad para operar en diferentes condiciones climáticas y en entornos con un alto nivel de interferencia les permite desempeñarse de manera efectiva en una amplia variedad de aplicaciones.

A continuación, se enumeran los aspectos positivos de los radares persistentes en comparación con los sistemas clásicos:

- **Detección de objetivos a baja velocidad:** se puede lograr aumentando el tiempo de iluminación y mejorando la resolución Doppler sin comprometer la tasa de renovación.
- **Actualización rápida de la posición de los objetivos:** debido a la alta frecuencia de actualización de la información, que puede llegar hasta 5-10 veces por segundo, lo que permite una mayor eficacia y fiabilidad en los algoritmos de seguimiento. Esto permite, que de forma indirecta, se aumente la capacidad de reacción reduciendo el tiempo de confirmación de las amenazas.
- **Mejora en la relación señal-ruido (SNR):** gracias al procesamiento Doppler y la duración de integración.
- **Bajo Riesgo de ser interceptado:** debido a la baja potencia transmitida.
- **Funcionamiento múltiple:** Puede realizar varios trabajos simultáneamente, sin la necesidad de hacerlos secuencialmente.
- **Procesamiento adaptativo en recepción:** Los errores en fase y amplitud de la parte analógica pueden corregirse en la parte digital.

Otro aspecto importante es la capacidad de los radares persistentes para operar en una amplia gama de frecuencias, lo que les permite ser compatibles con una amplia variedad de sistemas y sensores, mejorando la integración en sistemas de defensa aérea y terrestre.

2.7.2 Desventajas del radar persistente

Los radares persistentes o ubicuos también presentan ciertas desventajas. Una de ellas es la invasión potencial de la privacidad de las personas. Al estar constantemente monitoreando un área, estos sistemas

pueden recoger información confidencial o personal sobre las actividades y comportamientos de las personas. También pueden resultar costosos tanto en términos económicos como en términos de recursos, ya que se requiere de una infraestructura sofisticada y mantenimiento continuo. Además, existe el riesgo de interrupciones o fallas en el sistema, lo que puede resultar en una pérdida de información valiosa o una falta de seguridad en un momento crucial.

A continuación, se describen algunas desventajas de la tecnología utilizada:

- **Requisitos precisos de calibración:** Para compensar las diferencias en amplitud y fase de cada canal [26].
- **Alto poder de procesamiento:** Es necesario contar con una capacidad de procesamiento en tiempo real muy elevada para realizar el procesamiento Doppler del cubo de datos radar.
- **Requerimientos de tiempo real:** La tasa de procesamiento debe ser suficientemente alta para lograr un procesamiento coherente (CPI) en tiempo real.
- **Costo:** El radar persistente puede ser más costoso de implementar y mantener debido a la necesidad de una red de sensores y tecnologías avanzadas de procesamiento de señal [29].
- **Complejidad:** El radar persistente puede ser más complejo de operar y mantener debido a la necesidad de coordinar y sincronizar una red de sensores y manejar grandes cantidades de datos.
- **Interferencia:** El radar persistente puede ser más propenso a interferencias debido a la necesidad de utilizar una amplia variedad de frecuencias y tecnologías para cubrir un área más amplia [30].
- **Privacidad:** El uso del radar persistente puede generar preocupaciones sobre la privacidad debido a la posibilidad de recolectar datos sobre personas y objetos sin su conocimiento.

Sin embargo, con el avance de la tecnología, se espera que estos problemas sean abordados en el futuro. Por ejemplo, la tecnología de procesamiento de señal y el aprendizaje automático se están utilizando para mejorar la precisión y la eficiencia del radar persistente, mientras que las técnicas de cifrado y seguridad están siendo desarrolladas para proteger la privacidad.

2.8 Fuentes de interferencia/ruido en un radar

El rendimiento de un sistema radar puede verse comprometido por diversas fuentes de interferencia o ruido, tanto externas como internas, que pueden degradar sus prestaciones. A continuación, se detallan algunas de las fuentes más comunes de interferencia/ruido en un radar [8].

- **Fuentes externas:**

Clutter: Esta es la mayor fuente de ruido externo en un radar. El clutter es generado por los objetos naturales y artificiales que rodean al radar, como la costa, la orografía, el oleaje, los hidrometeoros, entre otros. Este ruido se refleja en la señal del radar, lo que dificulta la detección de objetivos. Para mitigar este efecto, se pueden utilizar técnicas de filtrado MTI (Moving Target Indication) para eliminar parcialmente la señal del clutter.

EMI (*Electromagnetic Interference*): Este tipo de interferencia es producido por los propios sistemas electrónicos del radar, generando señales que pueden ser captadas por el receptor del radar. El spillover, o fuga de señal del transmisor al receptor, también puede ser una fuente de EMI. Para minimizar los efectos de esta interferencia, es necesario asegurar un correcto aislamiento entre los sistemas y aplicar filtros adecuados.

ECM (*Electronic Countermeasure*): Las interferencias ECM son producidas por sistemas hostiles que tratan de cegar o engañar al radar emitiendo señales de interferencia. Para evitar estos efectos, se

pueden aplicar técnicas de modulación de frecuencia o de amplitud en la señal del radar para evitar su detección.

- **Fuentes internas:**

Ruido térmico: El ruido térmico es una fuente de interferencia interna generada por el propio sistema del radar debido a las fluctuaciones de temperatura. Este ruido se suma a la señal del radar y puede degradar su capacidad de detección. Para minimizar este efecto, se pueden aplicar técnicas de filtrado o reducción de ruido en el receptor del radar.

En cualquier sistema electrónico, por el simple hecho de estar encendido, genera ruido térmico debido a la agitación térmica de los electrones, lo que produce fluctuaciones en las señales eléctricas que se transmiten por el sistema. En el caso de los radares, el ruido térmico puede ser generado por diferentes componentes electrónicos, como amplificadores, transistores o resistencias.

Es importante tener en cuenta que el ruido térmico no puede ser eliminado por completo, pero sí minimizado y controlado. Su efecto puede ser especialmente importante en sistemas de baja señal, como los radares, ya que puede generar falsas alarmas o enmascarar blancos, dificultando la detección de objetivos. El nivel de ruido térmico en un sistema electrónico depende directamente de la temperatura, es decir, a mayor temperatura, mayor será el nivel de ruido térmico. Por este motivo, es fundamental mantener la temperatura del sistema lo más baja posible para reducir el efecto del ruido térmico. Además, es posible aplicar técnicas de filtrado y reducción de ruido en el receptor del radar para minimizar el efecto del ruido térmico.

Las fuentes de interferencia/ruido en un radar pueden ser muy variadas y su correcta gestión es clave para garantizar un rendimiento óptimo del sistema. Es necesario aplicar técnicas adecuadas de filtrado y aislamiento, así como implementar medidas de protección contra las interferencias hostiles para asegurar el correcto funcionamiento del radar en todas las condiciones.

3 FUNDAMENTOS DE UN RADAR LFMCW

En este capítulo se explicarán los fundamentos básicos de un radar de onda continúa modulado linealmente en frecuencia y qué ventajas aporta sobre un radar pulsado convencional para la detección de blancos marítimos elusivos. Además, se definirán los parámetros de interés para nuestro trabajo a la hora de evaluar el sistema como es la resolución en distancia, la resolución Doppler o la relación señal a ruido.

3.1 Relación señal a ruido de un radar de onda pulsada

Como se ha mencionado en el apartado 2.3 los radares de onda pulsada envían una señal periódica de alta intensidad y frecuencia elevada. Después sigue un periodo de descanso más extenso, durante el cual se pueden captar los ecos antes de enviar una nueva señal de transmisión. Se pueden calcular la distancia (alcance), la ubicación y, si es necesario, la altura del objeto en base a la ubicación de la antena y el tiempo de viaje de la señal.

La señal emitida puede ser descrita mediante una fórmula matemática conocida como ecuación (3-1) de forma de onda transmitida.

$$s(t) = A(t) \cdot \sin[2\pi f(t) \cdot t + \varphi(t)] \quad (3-1)$$

donde la función $A(t)$ representa la variación de la amplitud del pulso con el tiempo, es decir, su modulación, $f(t)$ la frecuencia de funcionamiento del radar y $\varphi(t)$ un posible desfase temporal. En una situación simple, el emisor envía señales durante periodos cortos de duración τ y está inactivo el resto del tiempo. Por lo tanto, $A(t)$ vale 1 durante τ y 0 en caso contrario. La función de tiempo se establece por la frecuencia de repetición de los pulsos y el ciclo de trabajo. Debido a que los ecos devueltos al radar experimentan diversas atenuaciones, una modulación de amplitud diferente de la señal no proporciona beneficios en su detección en el receptor.

La frecuencia de repetición de los pulsos (PRF) o su inverso intervalo temporal entre repetición de pulsos (PRI, de duración T), la duración de cada pulso (τ) y el tiempo de escucha ($T-\tau$) tienen un impacto en el rendimiento del radar: en la distancia mínima de detección y en el alcance máximo no ambiguo. Además, la duración del pulso (τ) también afecta a la resolución en distancia (ΔR) del radar, véase ecuación (3-2).

$$\Delta R = \frac{C \cdot \tau}{2} \quad (3-2)$$

Cuanto más breve sea el pulso, más eficaz será el radar en distinguir dos objetivos que se encuentren uno detrás del otro, en lugar de registrar un solo objeto de gran tamaño. Sin embargo, a medida que la duración del pulso disminuye, el ancho de banda de la señal portadora (B_{HF}) aumenta. Esto se puede expresar como la expresión (3-3).

$$B_{HF} = \frac{1}{\tau} \quad (3-3)$$

Además, acortar el pulso también tiene un impacto en el alcance máximo en circunstancias simples. La siguiente afirmación explica por qué una señal medible puede ser menos probable de recibir en el radar cuando la longitud de un pulso es menor, debido a que la energía (E_p) presente en el pulso está directamente relacionada con su longitud. Por lo tanto, cuanto menor sea la longitud del pulso, menor será la energía en una distancia específica del radar. Por consiguiente, para obtener el alcance máximo, la energía es un factor importante, más que la propia potencia pico de transmisión y viene dada por la expresión (3-4),

$$E_p = P_p \cdot \tau = \frac{P_{av}}{PRF} \quad (3-4)$$

siendo P_p la potencia de pico transmitida y P_{av} la potencia media transmitida.

La Sección Equivalente de radar (*Radar Cross Section* -RCS-) es otro factor fundamental que afecta al alcance máximo de un radar. La RCS de un blanco se refiere a la cantidad de energía reflejada por un objeto hacia un radar. Se mide como la cantidad de energía reflejada por unidad de ángulo sólido en relación a la energía incidente en el objeto y se puede comparar con la cantidad de energía reflejada por una esfera perfecta de 1 metro cuadrado. Esta medida es el resultado de la combinación de tres factores: la sección proyectada, la reflectividad y la directividad. La RCS se denota mediante la letra σ y se mide en m^2 . Esta Sección Equivalente de Radar es un parámetro característico del blanco y depende de diversos factores, como la geometría del blanco, su material de construcción, la frecuencia a la que opera el radar, la polarización de las ondas transmitidas y recibidas y la posición del radar en relación al objeto. En situaciones militares, es importante disminuir la RCS para dificultar la detección y se manipulan factores como la geometría y material para usar materiales absorbentes para reducirla.

Otro factor importante es la relación señal a ruido (SNR), que se puede observar de manera esquemática en la Figura 3-1. El nivel mínimo de señal detectable se establece en función del umbral de detección configurado en el radar, que debe superar el ruido del sistema. Al fijar el umbral de detección, también se determina una relación señal a ruido mínima (SNR).

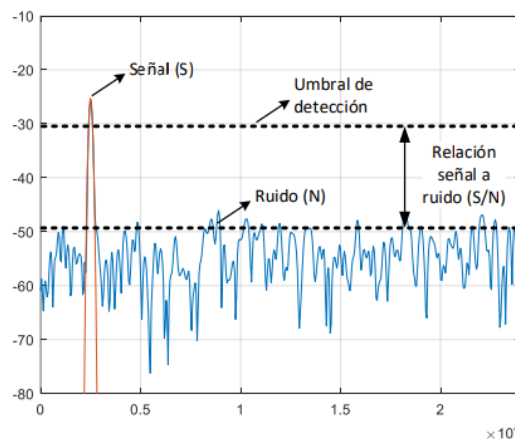


Figura 3-1. Relación SNR en función del umbral de detección y el ruido [8].

La relación señal a ruido, o más específicamente el nivel de ruido, dependerá en gran medida de las características del receptor. La relación señal a ruido a la entrada del receptor (SNR_{in}) y la relación señal a ruido a la salida (SNR_{out}) será diferente y está dada por un parámetro que se denomina figura de ruido (véase la Figura 3-2).

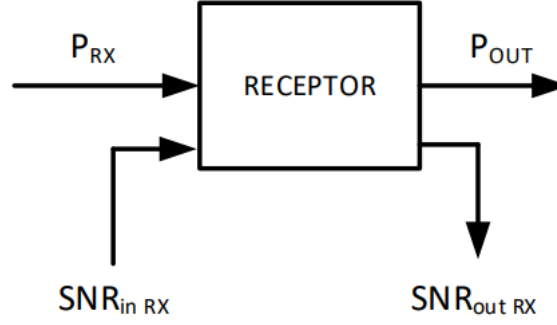


Figura 3-2. Relación SNR en el receptor [8].

La figura de ruido está dada por la expresión (3-5),

$$F = \frac{SNR_{in RX}}{SNR_{out RX}} \quad (3-5)$$

mientras que el ruido del sistema se calcula mediante la ecuación (3-6),

$$N = k \cdot T \cdot B \quad (3-6)$$

donde k es la constante del Boltzman y T es la temperatura equivalente de ruido en $^{\circ}K$. Habitualmente se emplea $k \cdot T = 4 \cdot 10^{-21} W/Hz$, donde B es el ancho de banda del sistema en Hz y depende de la señal transmitida. Hay dos criterios, reflejados en la Figura 3-3, para calcular B en función de la señal transmitida:

- Ancho de banda de primer nulo, $B = \frac{2}{\tau}$
- Ancho de banda a -3 dB, $B \approx \frac{1}{\tau}$

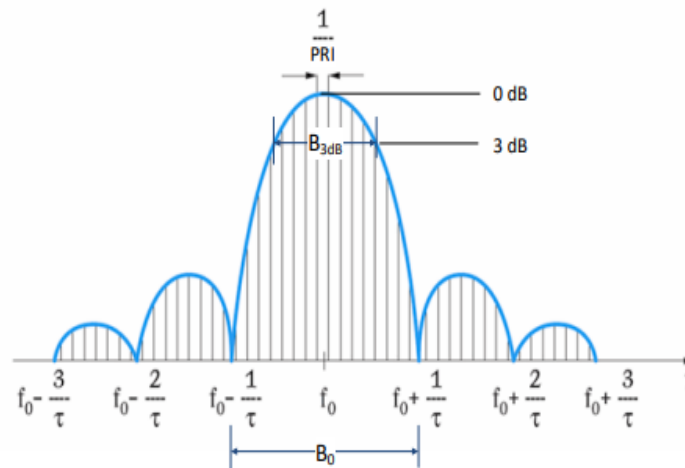


Figura 3-3. Criterios para calcular el ancho de banda [8].

Con todos estos parámetros, la ecuación de relación señal a ruido para un radar de onda pulsada queda representada mediante la ecuación (3-7),

$$SNR_{min} = \frac{p_{TX} \cdot g^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot E_i \cdot N_p}{(4\pi)^3 \cdot L \cdot (K \cdot T \cdot B \cdot F) \cdot Rmax^4} \quad (3-7)$$

siendo g la ganancia de la antena radar (transmisora y receptora), λ la longitud de onda (m), L las pérdidas totales del sistema, $Rmax$ la distancia a la que se encuentra el blanco y N_p el número de pulsos integrado dados por la ecuación (2-2). E_i representa la eficiencia de integración de pulsos cuyo valor es 1 cuando tenemos suma coherente de pulsos y varía entre 0 y 1 cuando la suma se realiza de forma no coherente.

3.2 Radar de onda continua

En el sistema de detección de ondas continuas, se establece el cambio de fase φ entre la señal transmitida y la recibida. Dicho cambio se puede expresar matemáticamente como la diferencia de fase que experimenta la señal mientras se propaga hacia y desde un objetivo situado a una distancia r determinada. En el caso de una oscilación sinusoidal, la amplitud del cambio de fase se define por la relación entre la distancia recorrida por la onda y la longitud de onda, multiplicada por $(2 \cdot \pi)$. El valor de $(2 \cdot \pi)$ se refiere a la variación de fase que experimenta la onda al recorrer una distancia equivalente a su propia longitud de onda. Si la distancia al objetivo se mantiene constante, el cambio de fase permanecerá estable y se puede calcular aplicando la fórmula (3-8),

$$\varphi = -2\pi \frac{2r}{\lambda} \quad (3-8)$$

donde φ es la diferencia de fase en radianes, r es la distancia entre la antena en metros y el dispersor y λ la longitud de onda de la señal emitida también en metros.

El factor “2” en la variable r indica que la onda debe viajar dos veces la distancia (ida y vuelta). La representación negativa refleja el cambio de fase de 180 grados producido por la reflexión. No es posible determinar directamente la distancia debido a la ambigüedad en los resultados obtenidos. El cálculo preciso de la distancia al objeto es solo válido cuando la diferencia de fase está comprendida entre 0 y 360 grados ($\varphi < 360^\circ$). En caso contrario, el resultado será ambiguo.

Si el dispersor se encuentra a una distancia en constante movimiento respecto a la fuente emisora, entonces la diferencia de fase también varía en el tiempo siguiendo la expresión (3-9).

$$\varphi = -4\pi \frac{r(t)}{\lambda} \quad (3-9)$$

La variación en el tiempo de la diferencia de fase entre dos señales sinusoidales con diferentes frecuencias, que es constante durante el período de medición, adopta una forma sinusoidal. Esta frecuencia se puede medir y se conoce como frecuencia Doppler. La mayoría de las veces, esta frecuencia se encuentra dentro del rango de frecuencias bajas (audibles). Con una frecuencia transmisora constante, la frecuencia Doppler es proporcional a la velocidad radial del dispersor.

La ecuación de relación señal a ruido en un radar de onda continua, no difiere demasiado de la ecuación del radar de onda pulsada, véase la ecuación (3-10).

$$SNR_{min} = \frac{p_{TX} \cdot g_{TX} \cdot g_{RX} \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot T_s}{(4\pi)^3 \cdot L \cdot (K \cdot T \cdot B \cdot F) \cdot Rmax^4} \quad (3-10)$$

En este caso, la ganancia de la antena transmisora y receptora no tiene que coincidir. El término T_s es el equivalente al tiempo de repetición de pulsos del radar continuo y cuanto mayor sea este tiempo mayor será el número de pulsos y por consiguiente mayor será la SNR (es decir, es la maximización del tiempo de iluminación de un blanco). En terminología radar, al producto $T_s \cdot B$ es conocido como la ganancia del procesado del LFM CW.

3.2.1 Efecto doppler

El efecto Doppler, del cual ya se ha hablado en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es un fenómeno físico que se produce cuando una onda, ya sea sonido o luz, se refleja en un objeto en movimiento. En el caso de los radares, este efecto se utiliza para medir la velocidad de los objetos en movimiento. Cuando una señal de radar se envía sin modulación, es decir, con una frecuencia y amplitud constante, la señal de eco recibida puede verse afectada por el desplazamiento Doppler si el objeto reflejado se mueve a una velocidad radial no nula. Los radares diseñados específicamente para medir este desplazamiento se conocen como radares Doppler. No obstante, si se necesita conocer la distancia al objeto, se emplea la técnica de modular la señal de eco recibida y la señal transmitida para establecer una relación temporal y medir el retraso en el tiempo. Esto conduce a la utilización de un tipo de radar diferente, que hace uso de diversas formas de modulación, como la modulación de amplitud al 100% o la modulación de frecuencia, para determinar la distancia y velocidad del objeto.

La señal transmitida, representada mediante la expresión (3-11), por el radar se representa mediante una función coseno de frecuencia constante (f_0) y amplitud unitaria [22].

$$s_t(t) = \cos(2\pi f_0 t) \quad (3-11)$$

Cuando la señal reflejada por el objeto en movimiento es recibida por el radar, la señal resultante, expresión (3-12), experimenta un desplazamiento en fase,

$$s_t(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi_D) \quad (3-12)$$

donde φ_D es la cantidad de desplazamiento en fase causada por el movimiento del objeto [22]. Si se conoce la distancia entre el radar y el objeto, se puede calcular el número total de longitudes de onda (λ) correspondientes al camino de ida y vuelta de la señal radar, que es igual a dos veces la distancia entre el radar y el objeto dividido por la longitud de onda. Como cada longitud de onda corresponde a un desplazamiento angular de 2π radianes, el desplazamiento angular total de la onda electromagnética, reflejada en la expresión (3-13), en su camino de ida y vuelta al objeto en movimiento será igual a 2π multiplicado por el número total de longitudes de onda.

$$\varphi_D = 2\pi \frac{2r}{\lambda} \quad (3-13)$$

La señal recibida por el radar puede expresarse como una combinación de una onda coseno y una onda seno que están desfasadas por φ_D , como se puede observar en la expresión (3-14).

$$s_t(t) = \cos(2\pi f_0 t) \cdot \cos(\varphi_D) - \sin(2\pi f_0 t) \cdot \sin(\varphi_D) \quad (3-14)$$

Sin embargo, en la mayoría de los casos, φ_D es muy pequeño, lo que hace que el término $\sin(\varphi_D)$ sea insignificante y se pueda descartar. Entonces, la señal recibida puede aproximarse como la ecuación (3-15),

$$s_t(t) = \cos(2\pi f_0 t) \cdot \cos(\varphi_D) \quad (3-15)$$

lo que indica que la señal recibida es una modulación de la señal transmitida con una amplitud igual a $\cos(\varphi_D)$, como se puede observar en la Figura 3-4.

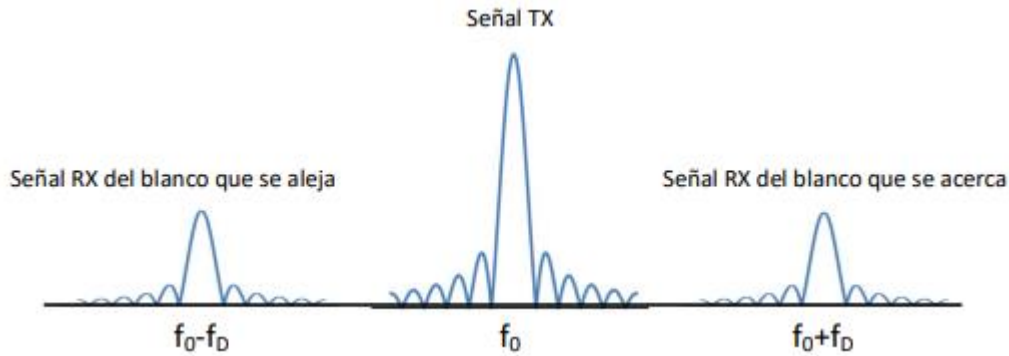


Figura 3-4. Modulación de la señal transmitida [8].

Cuando el objetivo se mueve, tanto la distancia R como el ángulo φ varían de manera continua, lo que provoca una variación en la fase de la señal recibida, lo que se conoce como el efecto Doppler. La frecuencia Doppler se define como el cambio en la frecuencia de la señal debido al movimiento del objetivo, y se puede calcular como la derivada temporal de la fase. En general, la frecuencia Doppler se puede expresar en términos de la velocidad radial del objetivo y la frecuencia de transmisión del radar, mediante la ecuación (3-16).

$$f_D = \frac{2 \cdot v_r}{\lambda} \quad (3-16)$$

El signo del efecto Doppler depende de si el objetivo se acerca o se aleja del radar. Si el objetivo se acerca al radar, la frecuencia recibida será mayor que la frecuencia de transmisión, y si se aleja, la frecuencia será menor.

En términos generales, en los radares monoestáticos, la frecuencia Doppler que se detecta cuando un objetivo se encuentra en un ángulo θ con respecto al radar es igual a la ecuación (3-17).

$$f_D = \frac{2 \cdot v_r}{\lambda} \cdot \cos\theta \quad (3-17)$$

Cuando tanto el receptor del radar como el objetivo se están moviendo (como en un radar montado en un avión), el cálculo de la frecuencia Doppler tiene en cuenta la velocidad relativa entre ellos en relación con la línea de visión (LOS, *line-of-sight*) del radar, se puede observar en la Figura 3-5. Esta velocidad se puede calcular sumando la velocidad del receptor del radar multiplicada por el coseno del ángulo que forma su movimiento con la línea de visión del radar, y la velocidad del objetivo multiplicada por el coseno del ángulo que forma su movimiento con la línea de visión del radar, como se puede observar en la ecuación (3-18).

$$v_{LOS} = v_1 \cdot \cos\theta_1 + v_2 \cdot \cos\theta_2 \quad (3-18)$$

La frecuencia Doppler se calcula entonces como (3-19).

$$f_D = \frac{2 \cdot v_{LOS}}{\lambda} \quad (3-19)$$

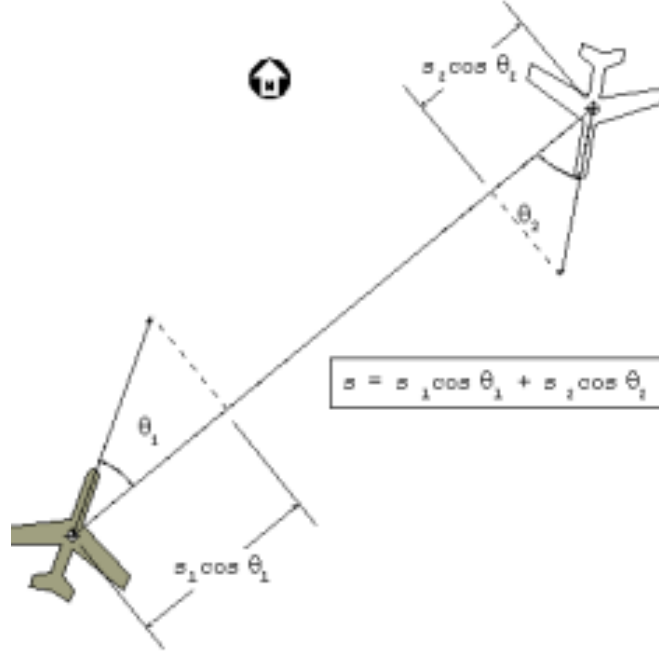


Figura 3-5. Ejemplo de dos blancos moviéndose y la LOS [8].

3.3 Radar de onda continua modulado en frecuencia

3.3.1 Principio de medición

Las propiedades de un radar FMCW incluyen:

- La determinación de la distancia, expresada mediante la ecuación (3-20), que se logra comparando la frecuencia de la señal recibida con un punto de referencia (generalmente la señal emitida).
- El tiempo de modulación T que es significativamente mayor que el tiempo (duración de funcionamiento) requerido para la medición de la distancia deseada Δt ,

$$R = \frac{c|\Delta t|}{2} = \frac{c|\Delta f|}{2 \left(\frac{d(f)}{d(t)} \right)} \quad (3-20)$$

donde c es la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), Δt es el tiempo de propagación (s), Δf es la diferencia de la frecuencia medida (Hz), R es la distancia antena-objeto (m) y $\frac{d(f)}{d(t)}$ es la desviación de frecuencia por unidad de tiempo.

Si la variación de la frecuencia es progresiva en un amplio intervalo, se puede calcular la distancia dentro de dicho intervalo a través de una comparación sencilla de frecuencias Δf . Ya que solo es posible medir la magnitud de la diferencia de frecuencia, los resultados obtenidos por un descenso lineal de la variación de frecuencia en un escenario sin movimiento son idénticos a los de un aumento de frecuencia.

Si el objeto reflejante presenta una velocidad radial en relación con la antena de transmisión/recepción, se agrega una frecuencia Doppler f_D (provocada por la velocidad) a la señal de eco, además de la frecuencia Δf que resulta de la diferencia con la frecuencia de transmisión actual (ocasionada por el tiempo de tránsito). Dependiendo de la dirección del movimiento y de la modulación lineal, el radar solo mide la suma o la diferencia entre la frecuencia Δf como portadora de información de alcance y la frecuencia Doppler como portadora de información de velocidad. Si el objeto reflejante se aleja del radar, la frecuencia de la señal de eco disminuye por causa de la frecuencia Doppler.

3.3.2 Modulación en forma de diente de sierra

La forma de la señal transmitida por un radar de onda continua en forma de sierra se está dada por la ecuación (3-21),

$$s(t) = A \cos[w_0 t + \theta(t) + \phi_0] \quad (3-21)$$

donde la frecuencia de esta señal se determina por la expresión (3-22),

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \left[w_0 + \frac{d}{dt} \theta(t) \right] \quad (3-22)$$

siendo $\theta(t)$ un término lineal de fase.

La señal recibida se puede obtener como la expresión (3-23),

$$s_r(t) = \alpha A \cos[(w_0 + w_D)(t - t_d) + \theta(t - t_d) + \phi_0] \quad (3-23)$$

donde α es un factor de atenuación, $t_d = 2R/c$ es el retardo de ida y vuelta hacia el objetivo, $w_D = 2\pi f_D = \frac{2V \cos \theta}{\lambda}$ es el desplazamiento doppler siendo $V \cos \theta$ la velocidad radial y λ la longitud de onda.

La frecuencia de la señal recibida se determina por la ecuación (3-24).

$$f_r(t) = f_0 + f_D + \frac{1}{2\pi} \left[\frac{d}{dt} \theta(t - t_d) \right] \quad (3-24)$$

Queda claro que, como se puede ver en la Figura 3-6, la diferencia entre la forma de onda transmitida y la forma de onda recibida constituye una onda senoidal idealmente pura llamada señal mezcla o señal de batido con frecuencia f_b . Esta señal de batido es proporcional al retardo entre la onda transmitida y la onda recibida o, en otras palabras, la distancia al objetivo. Además, la forma de onda recibida tendrá un desplazamiento positivo en el de ordenadas (para un objetivo alejándose) con respecto a la onda transmitida. Esto se debe al Doppler del objetivo y tiene un valor f_D . El período de la forma de onda de diente de sierra se llama tiempo de barrido T_s (generalmente llamado también T_{chirp}). Se debe tener en cuenta que es el retardo de tiempo de ida y vuelta hacia el objetivo y se mide a lo largo del eje x, mientras que su contraparte en la frecuencia o el eje y es f_b , la señal de batido.

Ahora necesitamos extraer esta señal de batido f_b . Esto se puede lograr restando las formas de onda transmitidas y recibidas. Esto se implementa mezclando (multiplicando) ambas señales y filtrando la banda lateral inferior para retener la diferencia de las frecuencias. La frecuencia de la señal de batido viene dada por la expresión (3-25).

$$f_b(t) = f(t) - f_r(t) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{d}{dt} \theta(t) \right] - \frac{1}{2\pi} \left[\frac{d}{dt} \theta(t - t_d) \right] - f_D \quad (3-25)$$

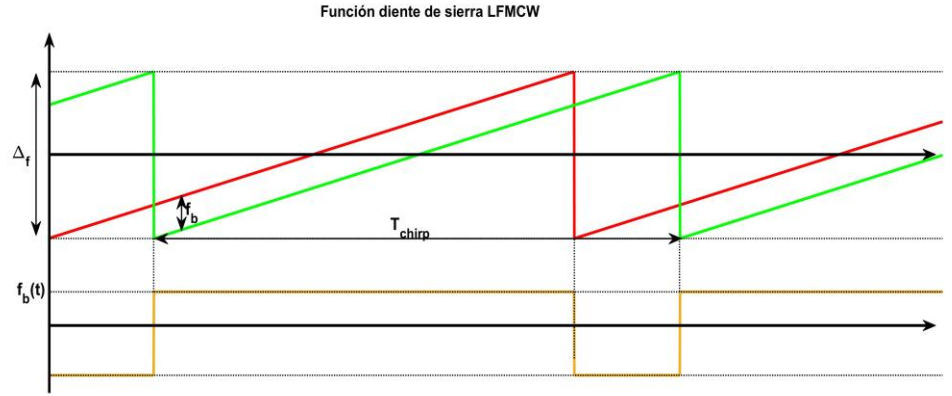


Figura 3-6. Forma de onda de diente de sierra lineal FMCW (fuente: propia).

Por lo tanto, la señal recibida experimenta un cambio de frecuencia en comparación con la que se transmitió debido a los siguientes factores:

- Retardo de tiempo de ida y vuelta $t_d = 2R/c$.
- Desplazamiento Doppler $f_D = 2V \cos \theta / \lambda$.

Como se puede deducir del escenario presentado en la Figura 3-7, la función diente de sierra genera dos frecuencias de batido debido a los saltos en frecuencia. Estas frecuencias de batido están dadas por las expresiones (3-26) y (3-27).

$$f_b^+ = \frac{\Delta f}{T_s/2} t_d - f_D = \frac{4\Delta f}{cT_s} R - f_D \quad (3-26)$$

$$f_b^- = -\frac{\Delta f}{T_s/2} - f_D = -\frac{4\Delta f}{cT_s} R - f_D \quad (3-27)$$

Por lo tanto, tenemos dos ecuaciones (3-28) y (3-29) con dos incógnitas, R y f_D , con la solución,

$$R = \frac{cT_s}{8\Delta f} \frac{(f_b^+ - f_b^-)}{2} \quad (3-28)$$

$$f_D = -\frac{(f_b^+ + f_b^-)}{2} \quad (3-29)$$

Aplicando la transformada de Fourier a la señal mezclada es posible obtener estas frecuencias de batido, f_b^+ y f_b^- y con ello estimar directamente R y f_D .

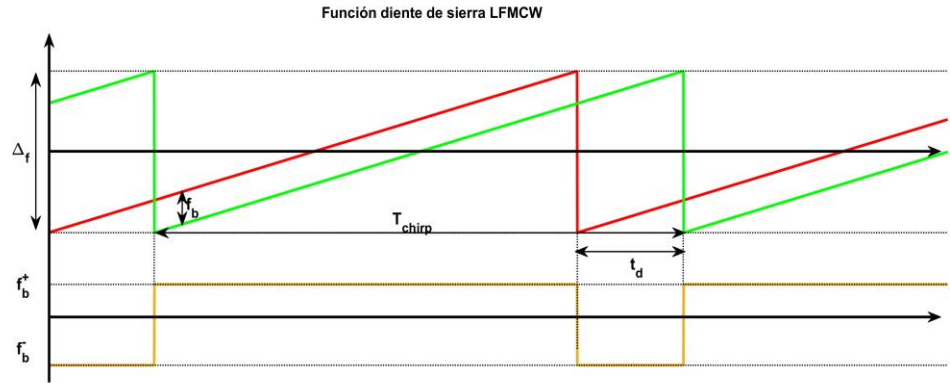


Figura 3-7. Adquisición del doppler objetivo utilizando FFT (fuente: propia).

3.3.3 Modulación triangular

El procesamiento de señales utilizando Linear Triangular FMCW, al igual que con la forma de onda de diente de sierra, los primeros pasos son los mismos. En el caso de la forma de onda de diente de sierra, la señal que se recibe viene dada por la ecuación (3-30).

$$f_b(t) = f(t) - f_r(t) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{d}{dt} \theta(t) \right] - \frac{1}{2\pi} \left[\frac{d}{dt} \theta(t - t_d) \right] - f_d \quad (3-30)$$

La frecuencia de batido proporciona información sobre la distancia de un objetivo que está en estático y es iluminado por una señal de chirp, mediante la ecuación (3-32).

$$f_b = kT = \frac{\Delta f}{T_s} \frac{R_t + R_r}{c} \quad (3-31)$$

Esta ecuación depende del ancho de banda o rango de frecuencia de la señal chirp (Δf). Como cada eco que llega al receptor tiene su propia frecuencia, es sencillo determinar la distancia de cada objetivo iluminado por el radar utilizando la siguiente fórmula (3-34).

$$R = R_t = R_r = R \quad (3-32)$$

$$f_b = \frac{\Delta f}{T_s} \frac{2R}{c} \quad (3-33)$$

$$R = \frac{cT_s}{2\Delta f} f_b \quad (3-34)$$

El segundo parámetro a considerar es el ancho de banda espectral (Δf_b). Este parámetro establece la capacidad del radar para diferenciar entre dos objetos de potencia similar que están muy próximos entre sí en términos de distancia con respecto al radar, lo que se conoce como resolución frecuencial. Si la señal chirp ilumina dos o más objetos cercanos, la señal que se produce en la salida del mezclador estará compuesta por varios tonos muy cercanos entre sí. Este parámetro Δf_b es importante para determinar si los lóbulos en frecuencia estarán superpuestos o si cada tono tendrá su propio lóbulo.

En consecuencia, la expresión que permite establecer la resolución en la dirección de propagación de la energía del radar es determinada mediante la expresión (3-35).

$$\Delta R = \frac{cT_s}{2\Delta f} \Delta f_b \quad (3-35)$$

Al analizar la fórmula anterior, podemos notar que además de Δf_b , otros parámetros como el período de la señal chirp y Δf afectan directamente a la resolución en distancia, pero están limitados por la construcción del radar. En otras palabras, cuanto mayor sea Δf , mejor será la resolución en distancia.

Como se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, si el blanco que se desea localizar está en reposo o estático, la señal recibida del eco no presentará un desplazamiento de frecuencia debido al efecto Doppler. En este caso, no habrá cambio en la frecuencia de la señal y la medición de la velocidad del objeto se realizará mediante otros métodos de detección y medición de distancia

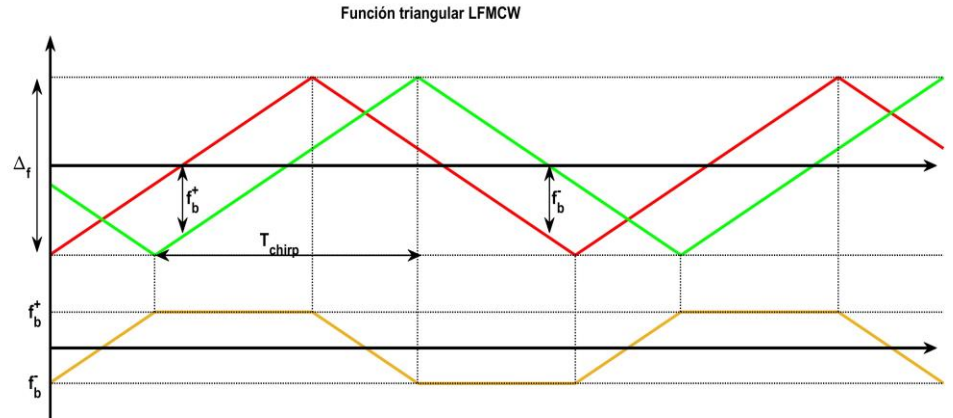


Figura 3-8. Respuesta de un radar FMCW referente a un blanco estático (fuente: propia).

Si el blanco que se desea localizar se mueve a una velocidad v , la señal recibida del eco también presentará un desplazamiento de frecuencia debido al efecto Doppler. Este cambio, denominado f_d , es directamente proporcional a la velocidad radial del objeto Figura 3-9. Respuesta de un radar LFM CW frente a blancos en acercamiento Dependiendo de si el objeto se está acercando (véase Figura 3-9) o alejando al radar (véase Figura 3-10).

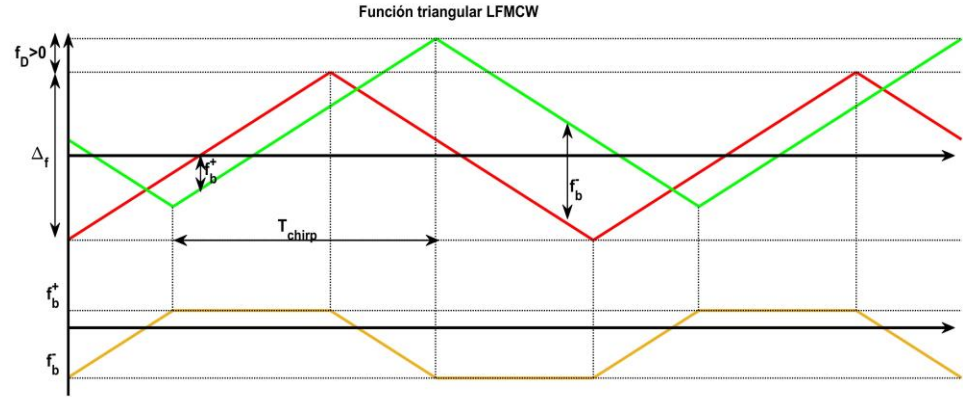


Figura 3-9. Respuesta de un radar LFM CW frente a blancos en acercamiento (fuente: propia).

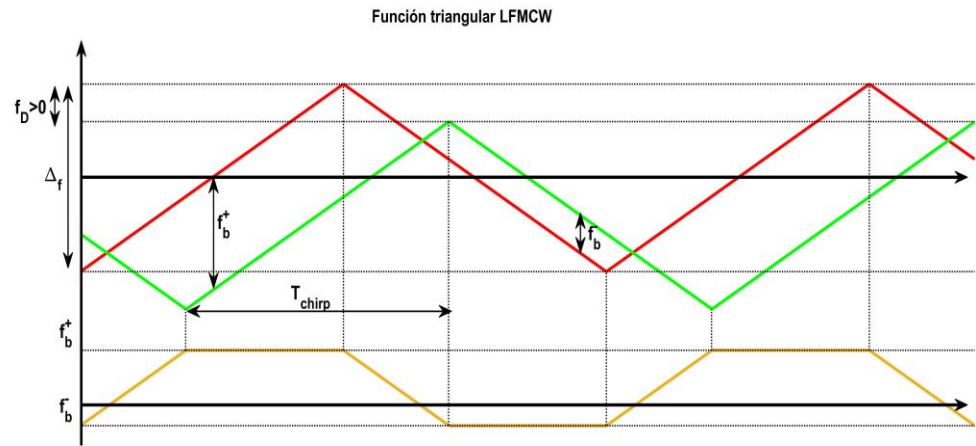


Figura 3-10. Respuesta de un radar LFM CW frente a blancos en alejamiento (fuente: propia).

Para poder determinar la distancia y velocidad de un objeto en movimiento, se requerirá el conocimiento de las frecuencias de batido f_b^+ y f_b^- , expresadas en (3-36) y (3-37), respectivamente.

$$f_b^+ = f_b - f_d \quad (3-36)$$

$$f_b^- = f_b + f_d \quad (3-37)$$

Por lo tanto, al sustituir estos parámetros en la ecuación para objetos estáticos, se podrá calcular la distancia al objeto según la ecuación (3-38).

$$R = \frac{cT_{chirp}}{2\Delta f} \frac{(f_b^+ - f_b^-)}{2} \quad (3-38)$$

La velocidad se calcula según la ecuación (3-39).

$$v = \frac{\lambda f_d}{2} = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{f_b^- - f_b^+}{2} \right) \quad (3-39)$$

En la Figura 3-9 se pueden observar algunos aspectos importantes, si el objetivo se acerca al radar, entonces tenemos una situación llamada *up-Doppler*. Por el contrario, si el objetivo se aleja del radar (Figura 3-10), tenemos una situación llamada *down-Doppler*. En la situación *up-Doppler*, la forma de onda recibida se mueve hacia arriba en el eje y (eje de frecuencia). Esto se debe a que la señal de ritmo básica aumenta el Doppler del objetivo. Esto significa que la señal de ritmo aumentará en frecuencia en comparación con su valor nominal, si no hubiera Doppler del objetivo (objetivo estático). Por el contrario, durante el *down-Doppler*, la forma de onda recibida se mueve hacia abajo en el eje de frecuencia, disminuyendo la frecuencia de la señal de ritmo. Por lo tanto, para resumir, *up-Doppler* aumenta la señal de ritmo desde su verdadero valor nominal (que depende de la distancia del objetivo), mientras que *down-Doppler* disminuye la frecuencia de la señal de ritmo.

3.4 Modos de transmisión y técnica de beamforming

En el contexto de la transmisión de señales, la antena transmisora juega un papel crítico en la cobertura y la calidad de la señal. Es uno de los factores clave para garantizar una transmisión adecuada, ya que es responsable de emitir la señal desde el punto de origen y transportarla a su destino.

En zonas amplias, una antena transmisora con poca ganancia y un ancho de haz grande puede ser una opción ideal para cubrir grandes áreas con una cantidad mínima de señal, como se puede observar de forma esquemática en la Figura 3-11. Esta opción es especialmente efectiva cuando se requiere transmitir una señal a una audiencia amplia o en áreas que son difíciles de cubrir con una antena más direccional. Por otro lado, la antena receptora es el elemento encargado de recibir y procesar la señal transmitida. Para ello, se necesita una antena muy direccional y con mucha ganancia, como la Figura 3-12, ya que esta es responsable de recibir la señal y transportarla al receptor para su procesamiento.

Una técnica utilizada para construir antenas receptoras altamente directivas es el uso de un array de antenas y la aplicación de técnicas de beamforming. El beamforming es un proceso en el que las señales recibidas por varias antenas individuales se combinan y se procesan para mejorar la eficiencia de la recepción de señales. En general, el uso de técnicas de beamforming y array de antenas puede mejorar significativamente la calidad y la eficacia de las comunicaciones, especialmente en entornos en los que la cobertura y la calidad de la señal son críticas.

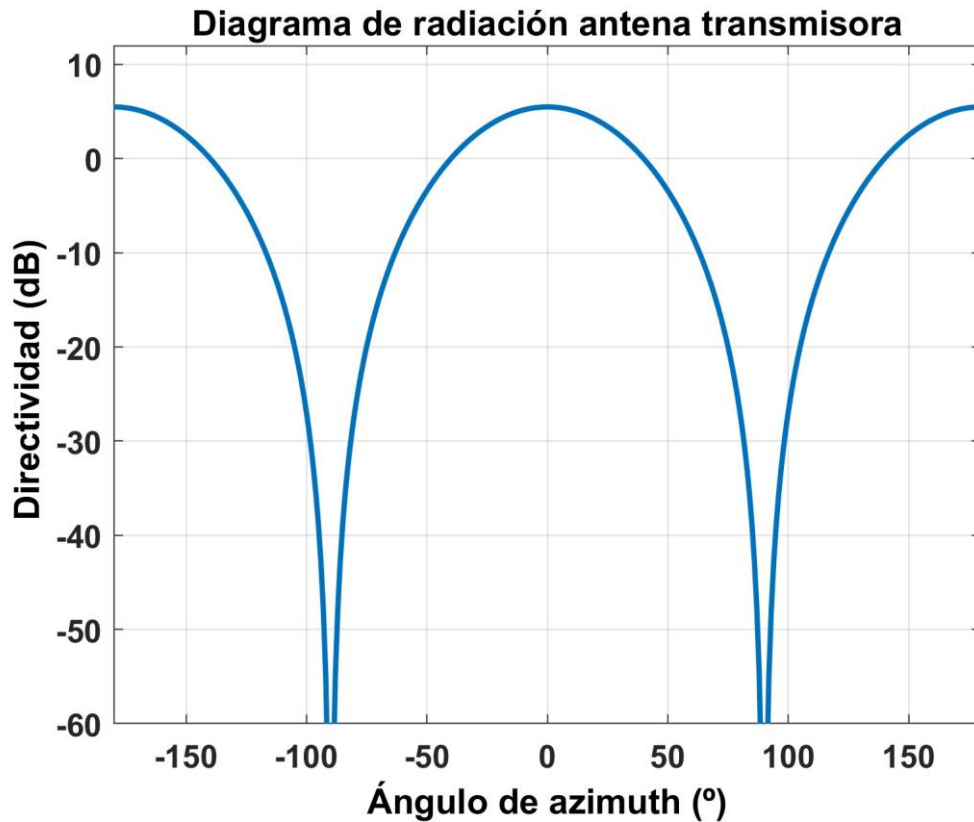


Figura 3-11. Antena transmisora con poca ganancia y poca directividad (fuente: propia).

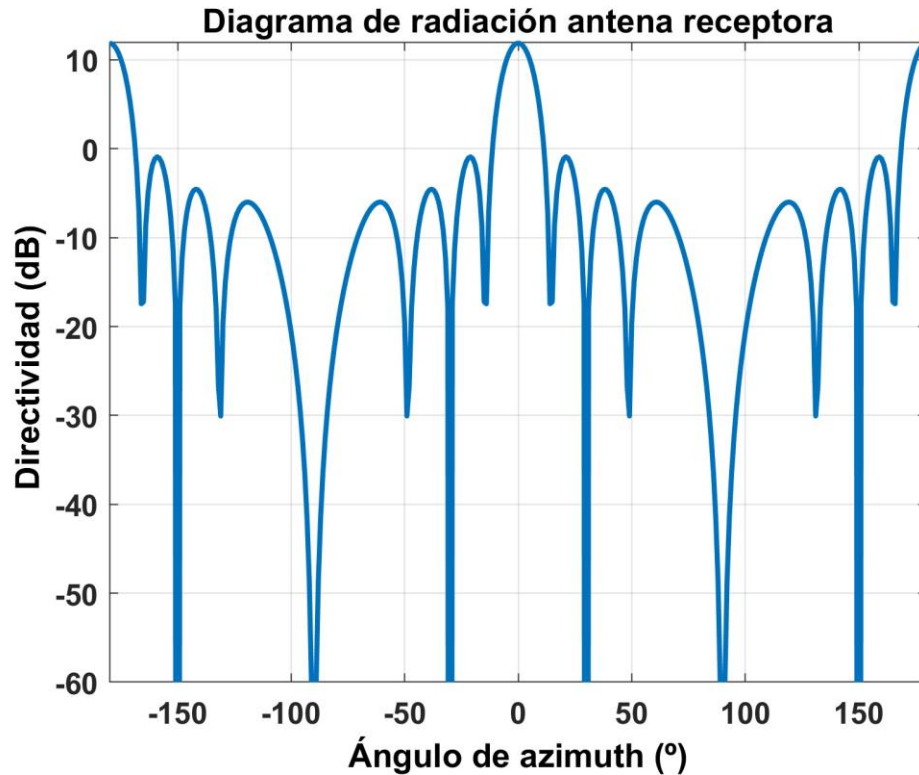


Figura 3-12. Antena receptora con mucha ganancia y mucha directividad (fuente: propia).

El radar ubicuo se caracteriza por utilizar el beamforming digital como su técnica principal, para crear y enfocar haces de radiación en diferentes radiaciones. Esta técnica crea los haces de forma digital y simultánea, logrando así la cobertura azimuthal necesaria. La conformación de los haces se realiza de

forma digital y simultánea, utilizando un array de receptores que captan los ecos de la señal emitida por el radar [19]. Además, a diferencia de los radares convencionales, todo el procesamiento y síntesis de la señal es digital, lo que permite una mayor velocidad y precisión en la detección de objetivos. Además, la técnica es flexible y adaptable, lo que significa que puede ser optimizada para cumplir con los requisitos específicos de cada sistema de radar.

La técnica de beamforming digital se basa en la manipulación de la fase y amplitud de la señal emitida por el radar, para crear haces precisos y enfocados. La señal emitida por el radar es recibida por el array de receptores, que convierten los ecos recibidos a formato digital para su posterior procesamiento. Un array es una antena compuesta por múltiples elementos radiantes idénticos organizados regularmente y alimentados para generar un patrón de radiación predefinido. Existen diversos tipos de conjuntos. Los arrays lineales tienen los elementos dispuestos en una sola línea. Los arrays planos son agrupaciones bidimensionales cuyos elementos están en un plano. Los arrays conformados tienen los elementos radiantes dispuestos en una superficie curva, como la forma de un avión.

Los arrays tienen la ventaja de que se puede controlar la amplitud y la fase de cada elemento radiante para modificar el patrón de radiación. Además, se puede hacer que los parámetros de la antena dependan de la señal recibida mediante circuitos asociados a los elementos radiantes, como en el caso de las agrupaciones adaptativas. Se puede tomar como caso ilustrativo el radar SPY-1D presente en las fragatas F-100, que consta de cuatro arrays de dispositivos radiantes (véase la Figura 3-13). Cada array está compuesto por 4.350 elementos radiantes inmóviles (véase la Figura 3-14), que se controlan de manera individual mediante la fase de alimentación para lograr un haz estrecho y orientable de tipo pincel.

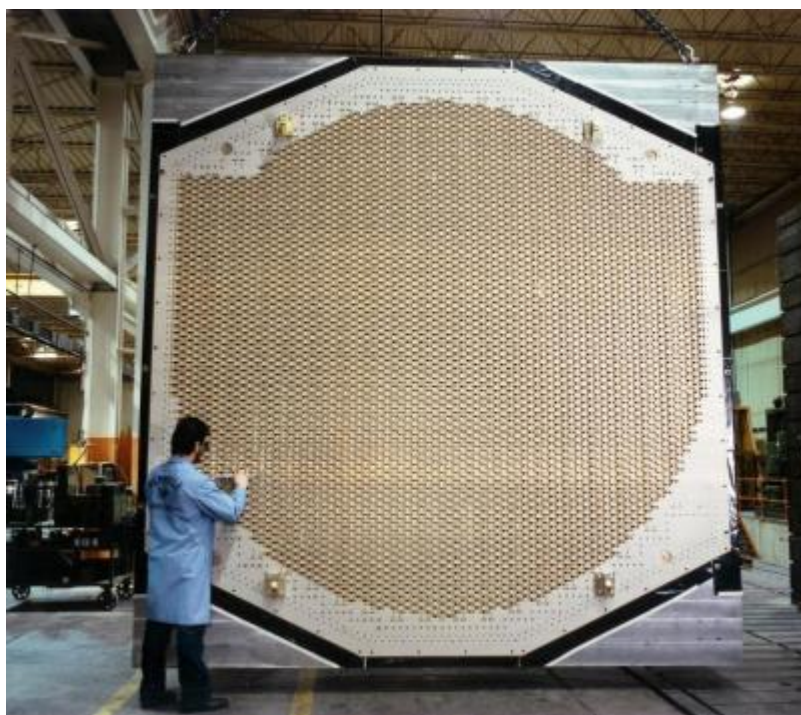


Figura 3-13. Array del radar SPY-1D de las fragatas F-100 [31].



Figura 3-14. Elemento radiante fijo del array [31].

El LHD Juan Carlos I (L-61) dispone Radar Lanza-Naval (Figura 3-15) con una antena de array plano.



Figura 3-15. Radar Lanza-Naval con array plano [31].

En términos generales, el diagrama de radiación de un conjunto es el resultado de multiplicar el diagrama de radiación de uno de los elementos radiantes por el llamado factor de agrupación o factor de array. Este factor depende no solo de la geometría constructiva del conjunto, sino también de la excitación de los elementos radiantes (amplitud y fase) que lo integran.

En un array lineal y uniforme, la expresión que describe el campo generado por un radiador isotrópico ubicado en el origen de coordenadas y polarizado en el plano θ es la siguiente (3-40).

$$E_{\theta} = I_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (3-40)$$

Ahora consideremos un array cuyos elementos se distribuyen uniformemente en el eje Z con una separación d , como se puede observar en la Figura 3-16. Las corrientes que alimentan los elementos son idénticas en amplitud, pero con una fase ϕ_i diferente para cada elemento, donde $i=1,.., N$ es el número total de elementos que componen el array.

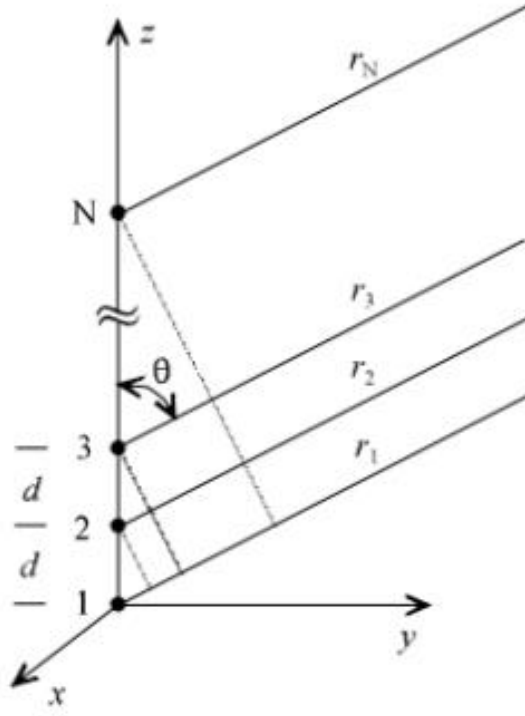


Figura 3-16. Ejes de un array [31].

La suma de los campos producidos por cada uno de los elementos del conjunto a una distancia considerable dará lugar al campo total generado por el array. Es decir, el campo total será la superposición de los campos individuales de cada elemento del conjunto, mediante la expresión (3-41).

$$\begin{aligned} E_{\theta} &= E_{\theta 1} + E_{\theta 2} + E_{\theta 3} + \dots + E_{\theta N} \\ &= E_0 + E_0 e^{j(\phi_2 + k d \sin \theta)} + E_0 e^{j(\phi_3 + 2 k d \sin \theta)} + \dots + E_0 e^{j(\phi_N + (N-1) k d \sin \theta)} \\ &= E_0 \cdot AF \end{aligned} \quad (3-41)$$

Donde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda, d es la distancia entre elementos y AF es el factor de array que responde a la siguiente expresión (3-42).

$$AF = [1 + e^{j(\phi_2 + k d \sin \theta)} + e^{j(\phi_3 + 2 k d \sin \theta)} + \dots + e^{j(\phi_N + (N-1) k d \sin \theta)}] \quad (3-42)$$

La fase de síntesis de haces en el proceso de beamforming implica agregar las señales de los canales de recepción y ajustar la fase de las señales correspondientes a cada canal, de acuerdo con la separación entre los elementos receptores y los distintos ángulos de dirección deseados.

El número de direcciones de apuntamiento y de haces generados por el beamforming digital es determinado por el ancho de haz de cada uno de ellos, en azimut. En general, se cubren sectores azimutales de aproximadamente 90 grados.

El beamforming digital, su esquema puede ser observado en la Figura 3-17, es una técnica avanzada y cada vez más utilizada en los sistemas de radar, debido a sus ventajas y su capacidad para cumplir con los requisitos de detección de objetivos en un entorno dinámico y complejo. La técnica se encuentra en constante evolución y desarrollo, y se espera que siga siendo un componente clave en los sistemas de radar en el futuro.

Para lograr la formación de haces, se requiere agregar las señales de los 8 canales de recepción, las cuales deben estar desfasadas en proporción a la distancia entre los elementos receptores y los ángulos de apuntamiento deseados., véase la ecuación (3-43).

$$\phi_n = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot \Delta_x \cdot \sin\theta \quad (3-43)$$

Siendo λ la longitud de onda de la señal transmitida, Δ_x la separación entre los elementos que generalmente se diseña para que sea menor que $\lambda/2$ con el objetivo de evitar apuntamientos no deseados, n el número de canales en recepción y θ el ángulo de apuntamiento.

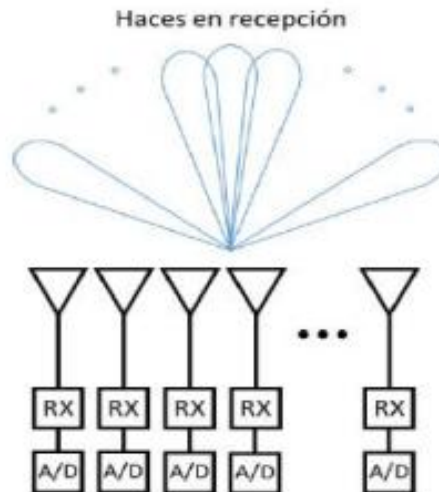


Figura 3-17. Esquema de beamforming [19].

4 ESCENARIO Y RESULTADOS.

En este capítulo, se presentará un escenario de trabajo donde se han llevado a cabo las diferentes simulaciones para evaluar las prestaciones de un radar LFMCW en comparación con un radar pulsado. Con el objetivo de dar cierto valor añadido al trabajo realizado y una vez evaluadas las prestaciones del radar de onda continua, diferentes blancos detectados en el área de interés son representados en una interfaz sobre un modelo digital del terreno DEM [32].

4.1 Escenario

En este escenario de trabajo, la tarea principal es detectar y localizar blancos marítimos mediante el uso de un sistema radar LFMCW. Sin pérdida de generalidad, el sistema radar se encuentra ubicado en el laboratorio del CUD (Centro Universitario de la Defensa), dentro de la Escuela Naval Militar (ver Figura 4-1). Dentro de las características principales de un radar LFMCW, está la detección de blancos a distancias relativamente cortas. Por esta razón, en este TFG se limitó esta distancia máxima a un alcance de 5 km. Tanto la antena transmisora como la antena receptora tipo array, se encuentran ubicadas en el mismo sitio, lo que permite detectar objetos cercanos y obtener información detallada sobre su ubicación. En concreto con una antena receptora tipo array se puede obtener información de la distancia a la que se encuentra el blanco y el ángulo azimutal sobre el que se encuentra, lo que nos permite determinar específicamente su posición (por ejemplo, longitud y latitud). Para la evaluación de las prestaciones se han utilizado tres blancos, dos de ellos colocados en la dirección *broadside* de la antena receptora (dirección perpendicular al array de antenas) y que están en posición estática y un tercer blanco adicional que se encuentra en el límite del ancho de haz disponible de la antena transmisora y que se hará cruzar por el escenario. Es importante destacar que el número de elementos de la antena receptora representado en este escenario no es representativo, ya que es uno de los parámetros que se evaluará.

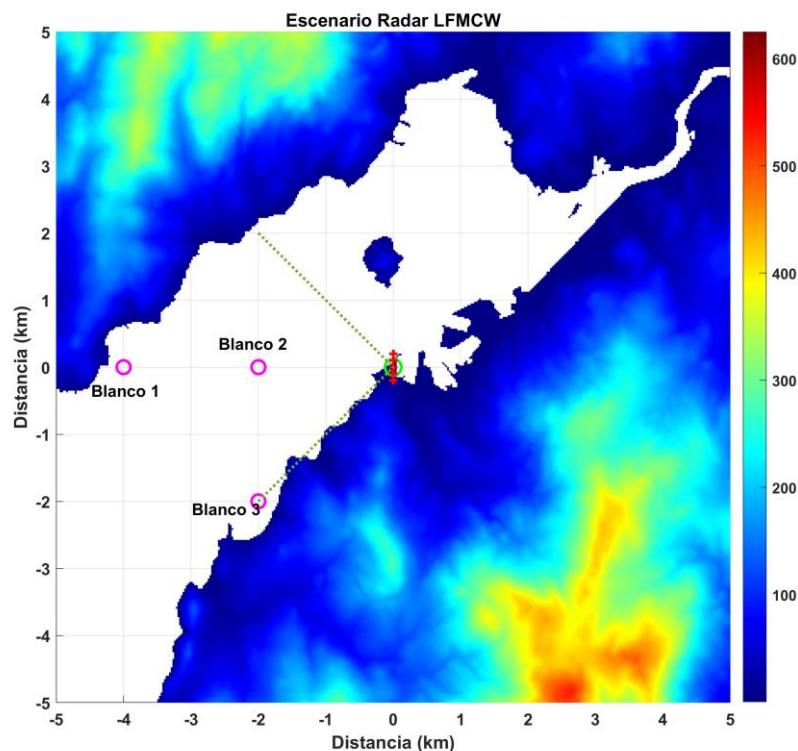


Figura 4-1. Escenario sintético con tres blancos sobre un DEM (fuente: propia).

A la hora de comparar radar pulsado y radar de onda continua, se han de exigir unas prestaciones mínimas para un correcto funcionamiento del sistema. Estos requisitos incluyen la ya mencionada anteriormente distancia máxima del alcance radar de 5 km, una frecuencia de operación de 9,4 GHz (Banda X), una resolución entre blancos de 25 m y una velocidad máxima del blanco de 150 km/h, por lo que el sistema será capaz de detectar y localizar objetos en la ría con una precisión muy alta, lo que la convierte en una herramienta esencial para el análisis y la toma de decisiones en situaciones críticas, sobre todo en la ría de Pontevedra y más en concreto, en la cercanía de la Escuela Naval Militar. La Tabla 4-1 resume los requisitos exigidos para el correcto funcionamiento del sistema radar.

Parámetros	Valores
Frecuencia de operación (GHz)	9,4
Alcance máximo (m)	5000
Resolución en distancia (m)	25
Velocidad máxima del blanco (km/h)	150

Tabla 4-1. Requisitos del sistema.

Por otro lado, el uso de dos antenas diferentes en el mismo lugar permite maximizar la cobertura de la ría y obtener información detallada sobre los objetos detectados. La antena transmisora con poca ganancia y un ancho de haz grande permite cubrir o iluminar zonas amplias, mientras que la antena receptora con mucha ganancia y direccionalidad permite recibir señales simultaneas de objetivos específicos en diferentes direcciones azimutales gracias a la utilización de técnicas beamforming. Esto hace posible una detección temprana de objetos con pequeña sección radar y una navegación más segura en la ría. Para evitar la aparición de lóbulos no deseados, conocidos como “*grating lobes*”, en direcciones de escaneo no deseadas, la distancia de separación entre elementos del array ha sido seleccionada a $\lambda/2$,

que a la frecuencia de trabajo resulta en una antena receptora de muy pequeñas dimensiones (del orden de cm y en función del número de elementos del array).

4.2 Radar LFM CW

4.2.1 Sistema de transmisión

La señal que se transmite en un radar LFM CW es una señal modulada linealmente en frecuencia, es decir, una señal cuya frecuencia transmitida varía a lo largo del tiempo. En particular, para una modulación triangular, la frecuencia de la señal transmitida aumenta durante el flanco positivo de la señal triangular moduladora y disminuye durante el flanco negativo de la señal moduladora. La señal en cuestión está definida principalmente por el ancho de banda del barrido (diferencia entre la frecuencia máxima transmitida de la señal LFM CW y la frecuencia mínima) y el tiempo de barrido (tiempo necesario para transmitir todo el rango de frecuencias). Ambos parámetros se pueden obtener a partir de los requerimientos exigidos al sistema. El ancho de banda del barrido depende directamente de la resolución máxima requerida (3-2) (3-3) y para una resolución de 25 m se corresponde con un ancho de banda de 12 MHz. Por otro lado, el tiempo de barrido está directamente relacionado con la distancia máxima a la que queremos detectar los blancos para evitar ambigüedades, y en este caso, para blancos localizados a una distancia máxima de 5 km, el tiempo de barrido de la señal debe ser de 33 μ s. Es importante destacar que la velocidad máxima de los objetos que se desean detectar en este escenario se ha establecido en 150 km/h, aunque el objetivo principal es detectar blancos a velocidades muy reducidas. Los diferentes parámetros de la señal LFM CW son mostrados en la Tabla 4-2.

Parámetros	Valores
Tiempo de barrido (μ s)	33
Ancho de banda del barrido (MHz)	12
Potencia transmitida (W)	200
Frecuencia de muestreo (MHz)	24

Tabla 4-2. Parámetros de la señal triangular transmitida LFM CW.

En el contexto del muestreo de señales, es necesario establecer una frecuencia de muestreo adecuada que permita satisfacer el criterio de *Nyquist* y, por tanto, garantizar una correcta reconstrucción de la señal original. Este criterio exige que la frecuencia de muestreo sea, al menos, el doble del ancho de banda utilizado por la señal. De esta forma, se garantiza una correcta reconstrucción de la señal original y se evitan problemas de “*aliasing*”, que pueden afectar negativamente a la calidad de la señal muestreada. Es evidente que se pueden conseguir resoluciones mayores a los 25 m sin más que aumentar el ancho de banda de la señal triangular. Sin embargo, ello lleva consigo aumentar también la frecuencia de muestreo, lo que hace aumentar el tiempo de simulación y de recursos disponibles.

El espectrograma de la señal transmitida por un sistema radar LFM CW se puede observar en la Figura 4-2. Como se puede ver, la señal triangular ocupa un ancho de banda de 12 MHz, mientras que el tiempo de barrido es de 33 μ s. Los parámetros que definen esta señal sintética en Matlab a partir de los requerimientos del sistema se pueden encontrar en el Anexo III: Señal transmitida en Matlab.

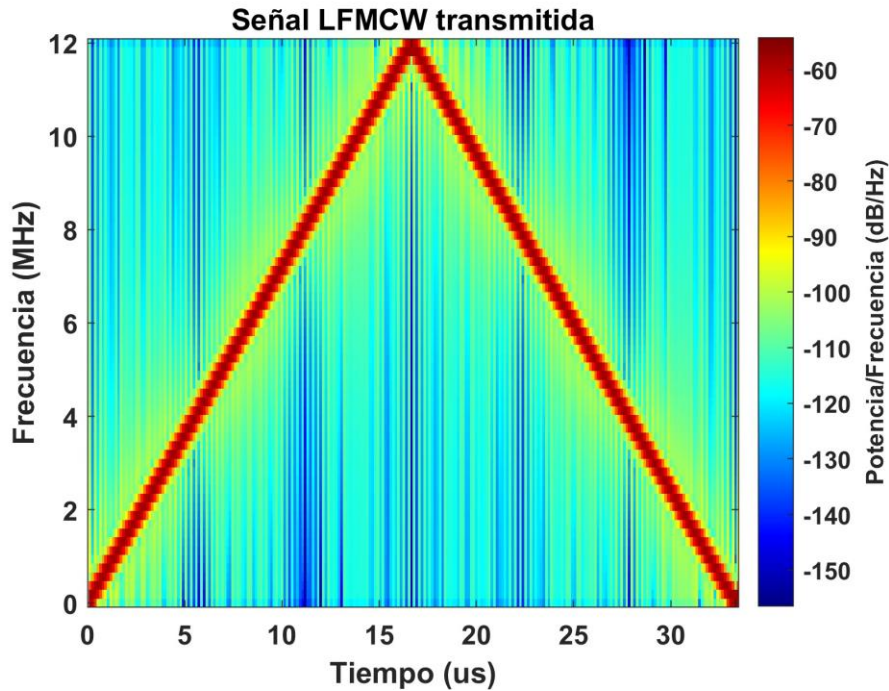


Figura 4-2. Espectrograma de la señal triangular LFM CW transmitida (fuente: propia).

En la Figura 4-3 se puede observar esta misma señal transmitida durante dos periodos de barrido, pero en el dominio del tiempo. Como se puede observar, para $t \approx 0 \mu s$, $33 \mu s$ y $66 \mu s$ la frecuencia de la señal transmitida, que se corresponde con la parte inferior del triángulo, es mucho menor que la frecuencia de la señal en $t \approx 16,6 \mu s$ y $50 \mu s$ (pico del triángulo).

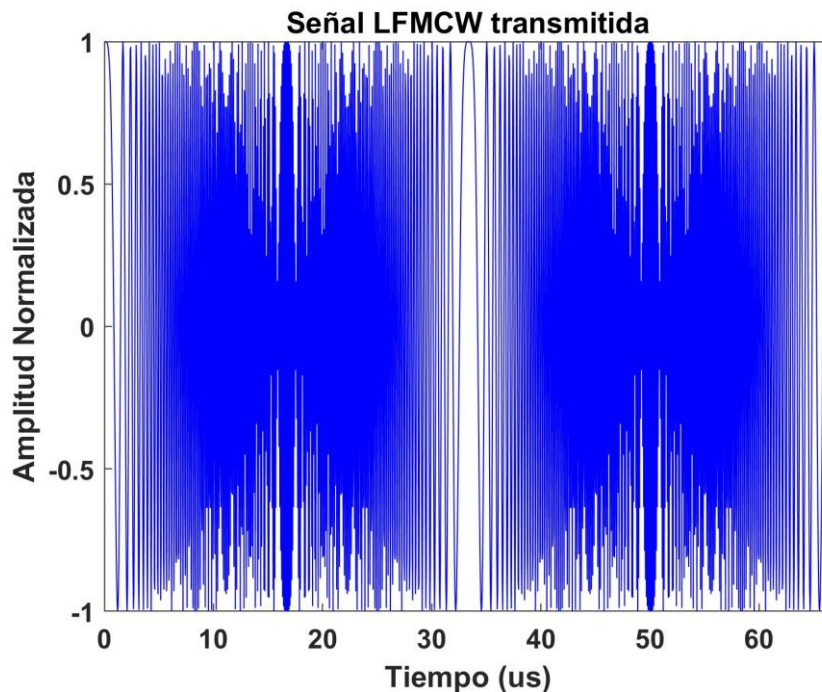


Figura 4-3. Señal temporal LFM CW transmitida (2 periodos de barrido) (fuente: propia).

En un sistema radar ubicuo al requerir de una cobertura angular muy elevada, la antena transmisora presenta generalmente una baja directividad y una ganancia reducida lo que lo convierte en un sistema con baja probabilidad de interceptación o LPI. En general la potencia transmitida es muy inferior a la requerida por un radar pulsado para las mismas prestaciones. A lo hora de comparar se ha

tomado como referencia una potencia de 200 W, aunque se verá que para alcanzar la misma SNR, el radar de onda continua podría transmitir mucha menos potencia que el radar pulsado. El diagrama de radiación de la antena transmisora se puede observar en la Figura 4-4 (área de color azul). Se ha requerido de una antena sectorial que disponga de un ancho de haz a -3 dB azimutal aproximado de 80°-90° para cubrir un área amplia.

Al tener un ancho de haz grande, la antena transmisora puede cubrir una zona amplia de la ría y, por lo tanto, puede detectar objetos que se encuentren en áreas más amplias. Esto es particularmente útil en situaciones en las que la detección temprana de objetos es esencial, como en la vigilancia marítima o en la prevención de colisiones en la navegación.

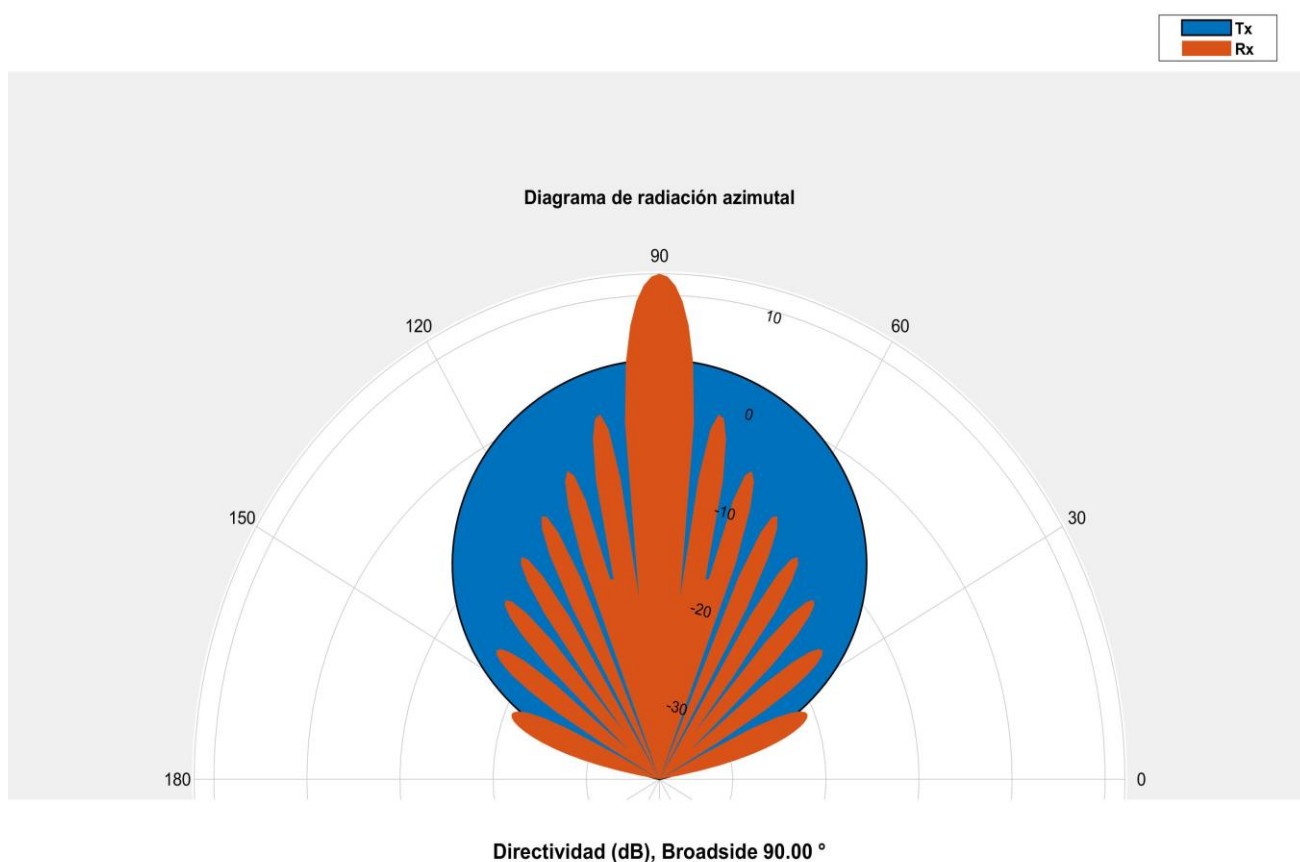


Figura 4-4. Diagrama de radiación de la antena transmisora y receptora (fuente: propia).

4.2.2 Sistema de recepción

Uno de los puntos determinantes para el correcto funcionamiento de un sistema radar LFM CW está en la antena receptora. Para poder detectar blancos con suficiente resolución azimutal y determinar la posición angular en donde se encuentra situado, la antena receptora debe disponer de un elevado número de haces, que sean mucho más estrechos que el haz transmitido y que se permita de una detección casi instantánea en cualquier dirección. Para conseguir alcanzar estos requisitos, la antena receptora debe estar constituida por un array de elementos, que al emplear técnicas de beamforming permitan dirigir el haz en cualquier dirección azimutal. Además, al utilizar un array de antenas se consigue aumentar la directividad y la ganancia del sistema. En el escenario presentado, la antena receptora está ubicada en el mismo lugar que la antena transmisora (laboratorio del CUD). En la Figura 4-4 se puede observar el

diagrama de radiación de la antena receptora para un array de 4 elementos apuntando en la dirección “broadside”.

Al disponer de una alta ganancia, la antena receptora es capaz de captar señales débiles y, por lo tanto, puede detectar objetos a mayores distancias u objetos con una RCS menor. Además, al ser direccional, la antena receptora es capaz de enfocarse en objetivos específicos y recibir señales con mayor resolución.

El sistema de recepción de este escenario está diseñado para detectar objetivos en movimiento y proporcionar información detallada sobre su posición y velocidad. Se dispone de una antena tipo array, que es la encargada de realizar el escaneo simultáneo en diferentes ángulos azimutales, como se puede observar en la Figura 4-5, lo que le permite al sistema tener una visión panorámica del entorno.

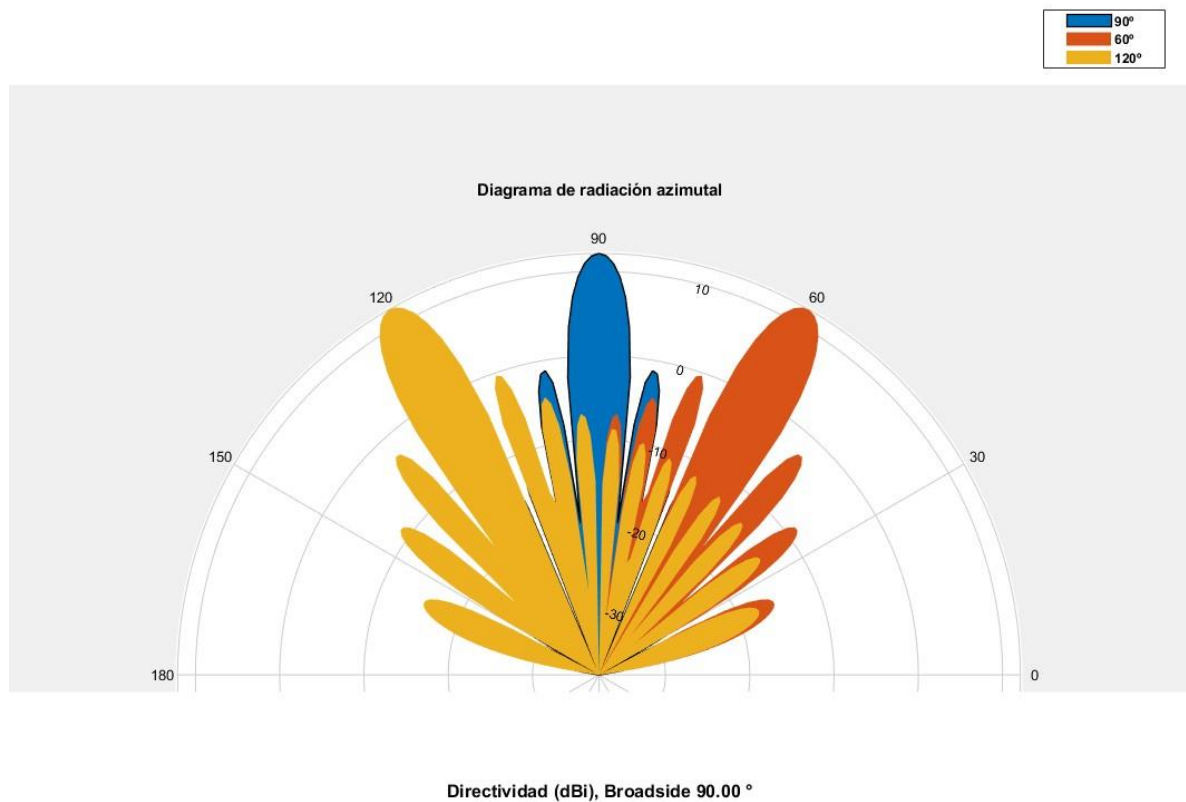


Figura 4-5. Diagrama de radiación de la antena receptora en diferente azimuth (fuente: propia).

En la Figura 4-6 se muestra el espectrograma de la señal recibida para el Blanco localizado a 2 km del radar. Se puede comprobar que el retardo entre la señal transmitida y la señal recibida obedece a la ecuación (4-1). Este retardo es esencial en el funcionamiento de los sistemas de radar y determina la distancia entre el radar y el blanco. Es importante destacar que no existe ninguna ambigüedad en la distancia calculada, ya que el eco recibido corresponde al último pulso transmitido.

$$\Delta_t = \frac{T_{ch}}{B} f_r \quad (4-1)$$

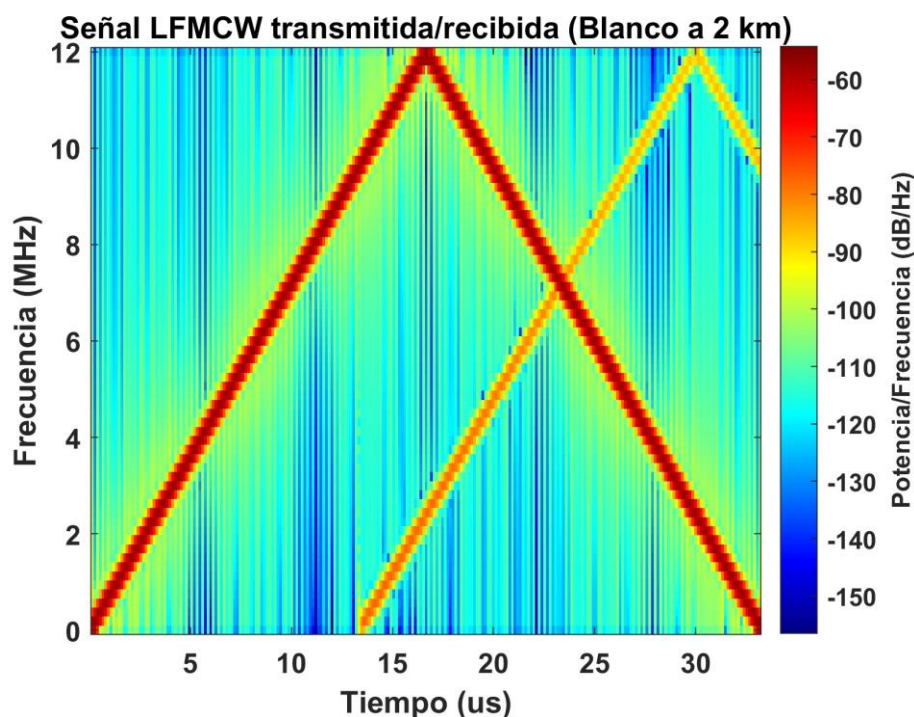


Figura 4-6. Señal transmitida y recibida para un Blanco a 2 km (fuente: propia).

La Figura 4-7 muestra una situación semejante, pero en la cual el sistema radar no puede determinar con certeza la distancia del objeto reflejado (en realidad, determinará erróneamente la posición del blanco). En particular, se muestra que, para un blanco ubicado a una distancia de 5,2 km, existe ambigüedad en la distancia. El sistema radar atribuirá el eco recibido al último pulso transmitido, cuando se correspondería realmente con un eco de un pulso anterior, correspondiente a un objeto más lejano. Determinará por lo tanto que el blanco está a 0.2 km cuando realmente está a 5.2 km.

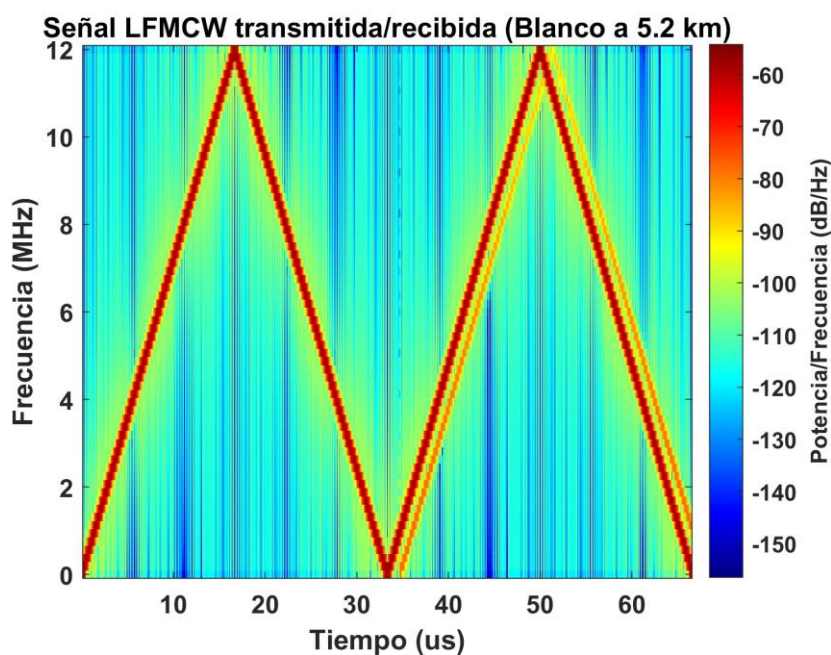


Figura 4-7. Señal transmitida y recibida para un blanco a 5,2 km (fuente: propia).

En la Figura 4-8 y en la Figura 4-9 se muestran las señales temporales recibidas para dos blancos situados a 2 km y 5 km, donde se puede identificar también el problema de ambigüedad en distancia.

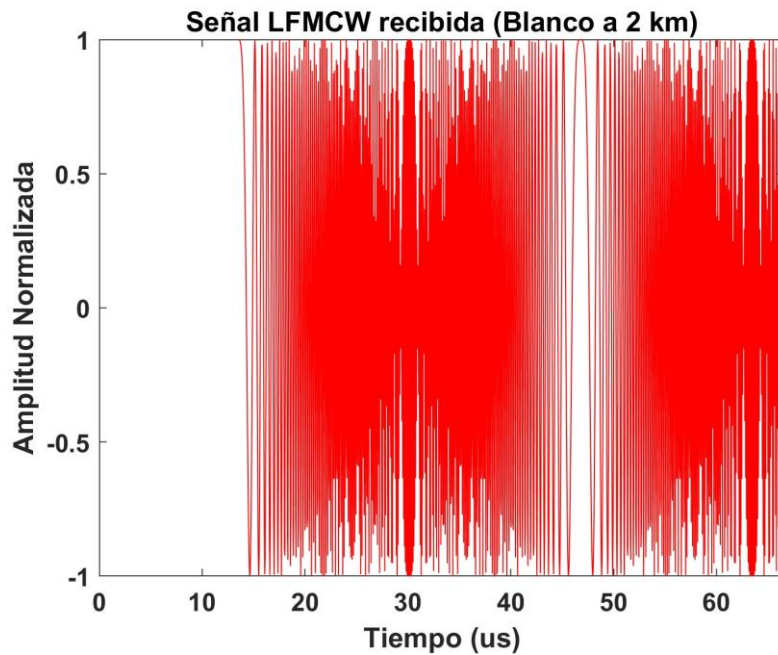


Figura 4-8. Señal recibida en tiempo para un Blanco a 2 km (fuente: propia).

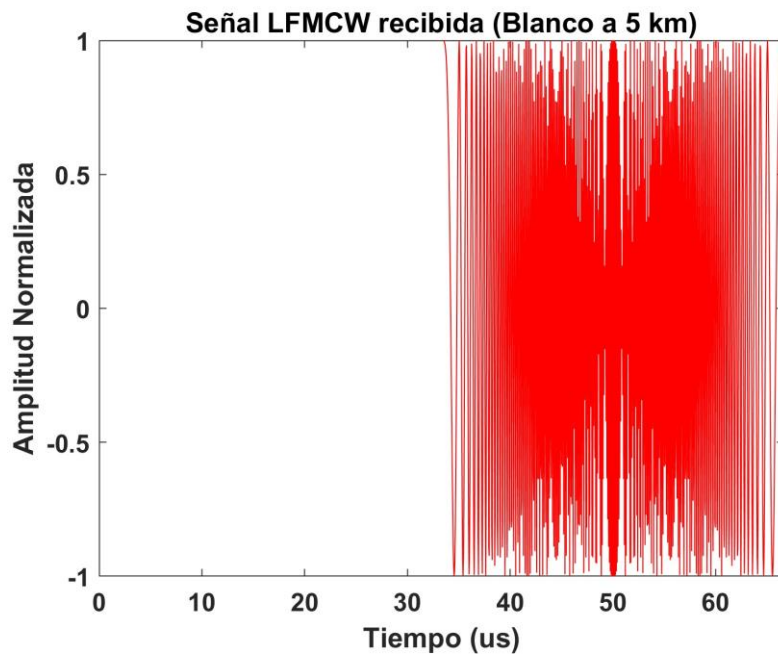


Figura 4-9. Señal recibida en tiempo para un blanco a 5 km (fuente: propia).

La ambigüedad en la distancia está relacionada directamente con el PRF de una señal pulsada o con el tiempo de barrido de una señal de onda continua, como se puede observar en la ecuación (4-2). Cuanto mayor sea la frecuencia de repetición de pulsos, menor será el tiempo de barrido equivalente t_w y, por lo tanto, menor será la distancia máxima no ambigua que se puede medir [8]. Además, este tiempo de barrido no se puede aumentar sin restricciones, ya que lleva aparejado la velocidad máxima de detección sin ambigüedad.

$$R_u = \frac{c}{2 \cdot PRF} = \frac{c \cdot t_w}{2} \quad (4-2)$$

Una solución a este problema es usar PRF múltiples o entrelazados (*PRF staggering*), lo que implica variar la frecuencia de repetición de pulsos en diferentes secuencias. De esta manera, se puede aumentar la distancia máxima no ambigua a la vez que se mantiene la velocidad máxima no ambigua.

Otra solución es variar otras características de la señal de radar, como la frecuencia, la polarización, la amplitud, etc. Al variar estas características, se puede evitar que la señal radar se solape con el eco de otros objetos en la misma frecuencia y, por lo tanto, se puede reducir la ambigüedad en la distancia.

4.2.3 Mapa Doppler

El objetivo final de todo sistema radar es proporcionar un mapa o interfaz que nos permita identificar los blancos detectados con distancias y velocidades medidas.

Para la detección de blancos a partir de un radar de onda continua con un sistema receptor tipo array, en general se recurre a un procesamiento espacio-tiempo en tres dimensiones denominado *Radar Data Cube* [33] que combina información de distancia, velocidad y ángulo de apuntamiento azimutal. El desarrollo de este algoritmo presenta cierta complejidad y no está dentro de los objetivos de este trabajo, por lo que se recurrió a la transformada de Fourier como herramienta matemática que nos permite identificar sobre un mapa *Range-Doppler* diferentes picos espectrales que se corresponden con posiciones y velocidades de blancos. Estos picos o blancos se harán pasar a través de un algoritmo de detección como puede ser el *constant-false-alarm-rate* (CFAR) que determinará la existencia o no del blanco. La combinación de la información de la distancia, la velocidad y el ángulo azimutal de la señal recibida proporciona una imagen completa y precisa del entorno y permite tomar decisiones informadas sobre la presencia y el movimiento de los objetivos.

4.3 Radar pulsado

4.3.1 Sistema de transmisión y recepción del radar pulsado

La principal desventaja que presenta el radar pulsado, en comparación al radar de onda continua presentado en este trabajo, radica en que si se pretende maximizar el tiempo de iluminación de un blanco para aumentar el alcance radar, directamente se va a reducir la velocidad con que se va a renovar la información y viceversa.

Teniendo en cuenta los parámetros típicos de un radar pulsado en Banda X de PRF de 3000 Hz, un ancho de pulso de 33 μ s (ciclo útil del 10%) y una velocidad de rotación de 20 rpm [34] se puede calcular el tiempo que es iluminado un blanco puntual en cada escaneo del radar, mediante la expresión (4-3). El número de pulsos transmitidos en un radar se refiere a la cantidad de pulsos de ondas de radio que se emiten durante el tiempo de observación, como se puede ver en la ecuación (4-4). El número de pulsos transmitidos es importante porque determina la resolución temporal y la sensibilidad del radar para detectar objetos.

$$t_{obs} = \frac{\theta_H(^{\circ})}{6 \cdot N(rpm)} \quad (4-3)$$

$$N_p = t_{obs} \cdot PRF \quad (4-4)$$

Para una velocidad de giro de la antena típica de 20 rpm, resulta en un tiempo de observación de 0,0167 μ s durante 50 pulsos, donde se utilizó un ancho de haz a -3dB de 2° como se puede observar en la Figura 4-10.

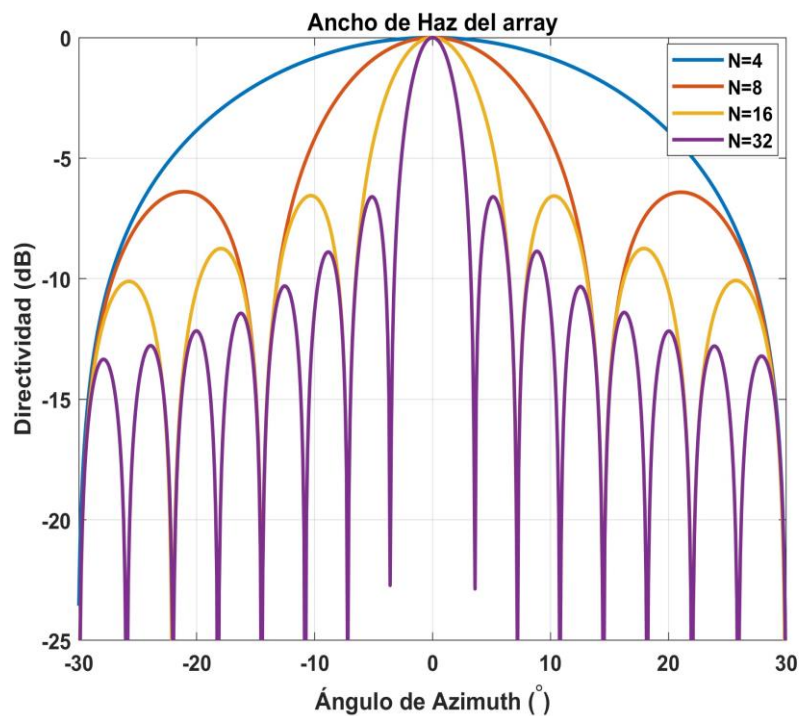


Figura 4-10. Ancho de haz en función del número de elementos del array (fuente: propia).

En conclusión, se ha llevado a cabo una comparación rigurosa entre el radar de onda continua y un radar pulsado típico. En la Tabla 4-3 se mencionan los parámetros adecuados para que la comparación sea justa y representativa. Esto ha permitido una evaluación objetiva de las prestaciones de ambos sistemas.

Parámetros	Valores
Frecuencia de operación (GHz)	9,4
PRF (Hz)	3000
Ancho de pulso (μ s)	33
Velocidad máxima de giro (rpm)	20
Tiempo de observación (μ s)	0,0167
Número de pulsos	50
Potencia transmitida (W)	200

Tabla 4-3. Parámetros de la señal transmitida en un radar pulsado.

Los parámetros que definen esta señal sintética en Matlab a partir de los requerimientos del sistema se pueden encontrar en el Anexo III: Señal transmitida en Matlab.

4.4 Análisis de las prestaciones del sistema.

4.4.1 SNR en función del número de elementos del array.

Como se puede observar en la Figura 4-11, a medida que se incrementa el número de elementos en el array, se produce un aumento en la relación señal a ruido tanto en el radar de onda continua como en el radar pulsado. Sin embargo, se ha notado una diferencia significativa en la relación señal a ruido entre ambos sistemas. Se ha constatado que, en el radar de onda continua, la relación señal a ruido es 10 dB superior a la del radar pulsado, para el mismo nivel de potencia transmitida. Este resultado concuerda con la ecuación teórica de la SNR dadas por las ecuaciones (3-7) y (3-10).

El fenómeno descrito se produce debido a que la relación señal a ruido está directamente relacionada con el tiempo de iluminación del blanco por parte del radar, lo que es considerablemente superior en el caso del radar de onda continua.

Cuando se incrementa el número de elementos en un array, la relación señal a ruido mejora, ya que se reduce el efecto de ruido en la señal recibida debido a que se promedia en el tiempo, a la vez que la señal deseada se suma coherentemente [35]. En el radar pulsado, la señal se transmite en ráfagas, lo que significa que la señal y el ruido solo se pueden promediar durante la duración de cada pulso. Esto significa que la relación señal a ruido en el radar pulsado está limitada por la duración del pulso y la tasa de repetición de pulsos.

En conclusión, se ha evidenciado que el incremento del número de elementos del array produce un aumento en la relación señal a ruido, tanto en el radar de onda continua como en el radar pulsado. Sin embargo, se ha demostrado que la relación señal a ruido del radar de onda continua es significativamente mayor que la del radar pulsado para un nivel de potencia transmitida equivalente.

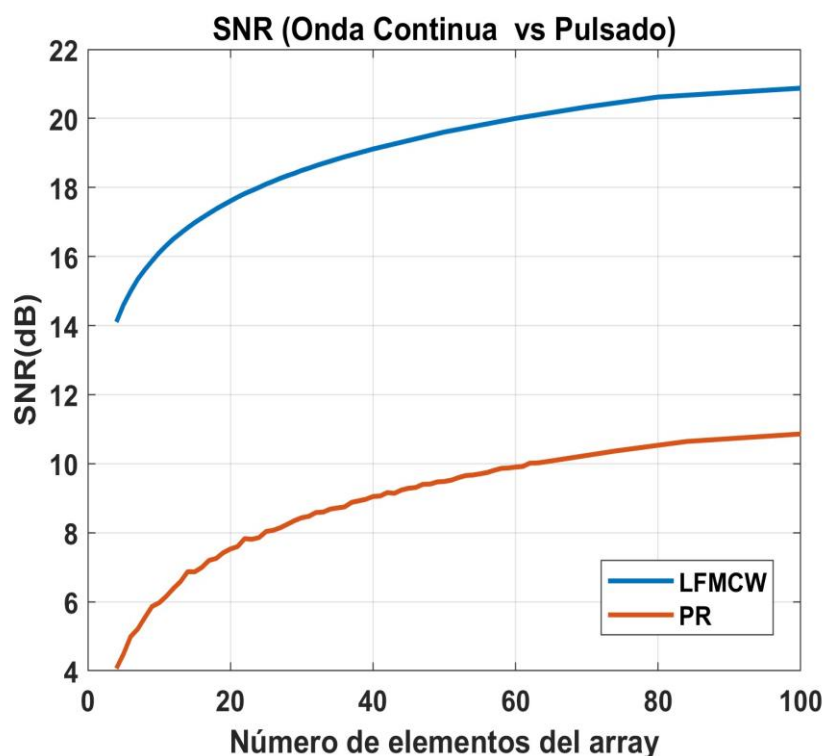


Figura 4-11. Relación SNR en función del número de elementos del array (fuente: propia).

4.4.2 SNR en función de la RCS del blanco

En la Figura 4-12, se muestra la relación señal a ruido disponible en el receptor radar para determinados valores de RCS. Como se puede observar y como era esperado a partir de las ecuaciones (3-7) y (3-10), el radar de onda continua puede detectar blancos con una menor Sección Equivalente de Radar en comparación con un radar pulsado.

El radar de onda continua emite una señal continua en tiempo, que se mantiene constante durante todo el tiempo de operación. Esto permite una mayor cantidad de energía transmitida por el radar, lo que a su vez mejora la probabilidad de detección de blancos con RCS más pequeños. Además, el radar de onda continua no necesita esperar a que la señal de retorno del objeto llegue antes de transmitir la siguiente señal, lo que permite una tasa de repetición de pulso más alta y, por lo tanto, una mayor probabilidad de detección de blancos de menor RCS.

Por otro lado, el radar pulsado emite una señal en pulsos cortos y separados en el tiempo. Aunque la potencia de pico de cada pulso es mayor que la del radar de onda continua, la cantidad total de energía transmitida es menor debido a la duración de los pulsos y el tiempo de espera entre ellos. Esto hace que sea más difícil detectar objetos con RCS más pequeños.

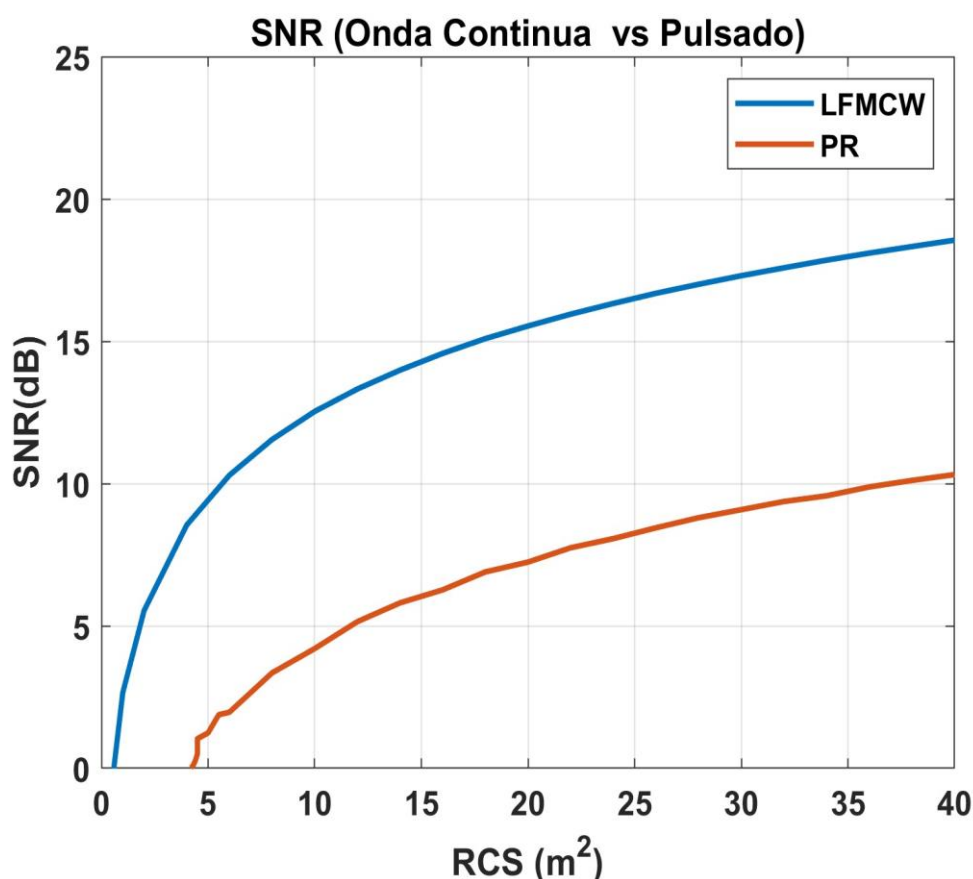


Figura 4-12. Relación SNR en función de la RCS del blanco (fuente: propia).

Como se puede observar en la Figura 4-12 y si consideramos sin pérdida de generalidad que un blanco es detectado cuando presenta una SNR mayor que 0 (realmente, el CFAR detectará blancos no solo en función de la SNR, sino también de la probabilidad de falsa alarma y de la probabilidad de detección deseadas), el radar de onda continua empezará a detectar blancos cuando presenten una RCS mayor a aproximadamente $1 m^2$ mientras que el radar pulsado no lo hará hasta que la RCS del blanco sea de aproximadamente $4.5 m^2$.

Una de las formas en que el radar pulsado podría detectar blancos con una Sección Equivalente de Radar pequeña, al igual que el radar de onda continua, es aumentando la potencia del transmisor.

Si se aumenta la potencia del transmisor, se amplifican las señales de retorno más débiles, lo que permite detectar objetos con RCS más pequeños. Además, esto también aumenta la relación señal-ruido (SNR) del radar, mejora el nivel de la señal recibida y reduce el ruido en la detección.

4.4.3 Detección de blancos en movimiento (Blanco 3)

Una vez validado que el radar de onda continua es más efectivo que el radar pulsado para la detección de blancos con una RCS más pequeña, se procederá a mostrar un ejemplo de detección de un blanco en particular en el escenario original. Este blanco, denominado "Blanco 3", se moverá cruzando delante del radar en una dirección determinada.

Es importante destacar que, en un principio, el Blanco 3 se encontrará al límite del barrido del array de la antena, que en este caso varía entre -45° y 45° . Para este escenario hemos establecido que la velocidad lineal del blanco sea de 3,53 m/s ($-2,5$ m/s en la dirección del eje x y 2,5 m/s en la dirección del eje y), lo que equivale a una velocidad de unos 6,4 nudos. Además, se utilizará un array de 4 elementos para llevar a cabo la detección. La sección eficaz del blanco es de 1 m^2 , lo que significa que se trata de un objeto relativamente pequeño. Con esta información, se puede llevar a cabo una detección precisa del Blanco 3 en el escenario original.

Una vez que el Blanco 3 se encuentre dentro del barrido del array de la antena, se espera que sea detectado por el radar de onda continua con mayor facilidad que si se estuviera utilizando un radar pulsado.

En conclusión, el ejemplo de detección del Blanco 3 en el escenario original, cruzando delante del radar, servirá para demostrar la efectividad del radar de onda continua en la detección de blancos con RCS más pequeños. Aunque el Blanco 3 inicialmente se encuentra al límite del barrido del array de la antena, es posible que sea detectado por el radar, aunque no dentro del ancho de haz a -3dB . Una vez que el blanco se encuentre dentro del barrido del array, se espera que sea detectado y seguido con mayor facilidad (en otras palabras, la SNR aumentará a medida que el array se acerque a su dirección "broadside").

Entre la Figura 4-13 y Figura 4-23 se muestra el recorrido realizado por el blanco a una velocidad lineal de 3,53 m/s. En la parte izquierda de las respectivas figuras se muestra su posicionamiento sobre el modelo digital del terreno y en la parte derecha el ángulo de apuntamiento correspondiente de la antena array. Cada gráfica presenta un retardo temporal de 80 s que se corresponde con un movimiento del blanco de 282 m (200 m en el eje de abscisas y 200 m en el eje de ordenadas).

Dentro de las gráficas que determinan el posicionamiento del blanco sobre el modelo digital del terreno, se remarca la posición exacta del blanco con un círculo de color violeta, mientras que la posición estimada por el radar se marca con un asterisco de color azul. Como se puede ver, en escenarios sin otras fuentes de ruido adicionales, la estimación es casi perfecta. La posición exacta del blanco se determina a partir de la posición inicial, de la velocidad a la que se mueve el blanco, de la dirección que sigue y del intervalo de tiempo transcurrido.

Dentro de las gráficas de la dirección de apuntamiento al Blanco 3, la dirección de apuntamiento se obtiene como aquel ángulo que maximiza el factor de array de la antena.

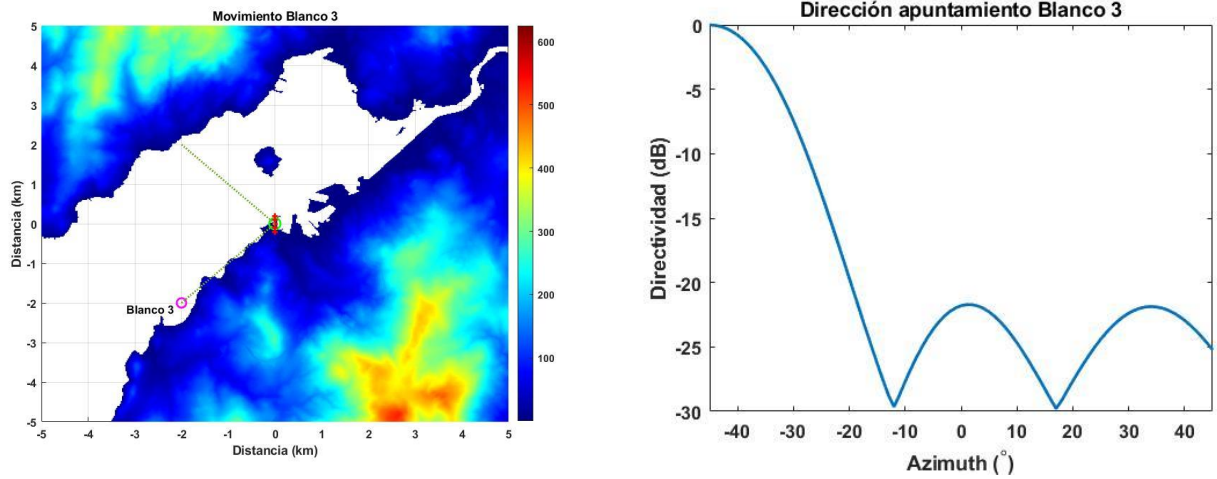


Figura 4-13. Posición del Blanco 3 en $t=0$ s (fuente: propia).

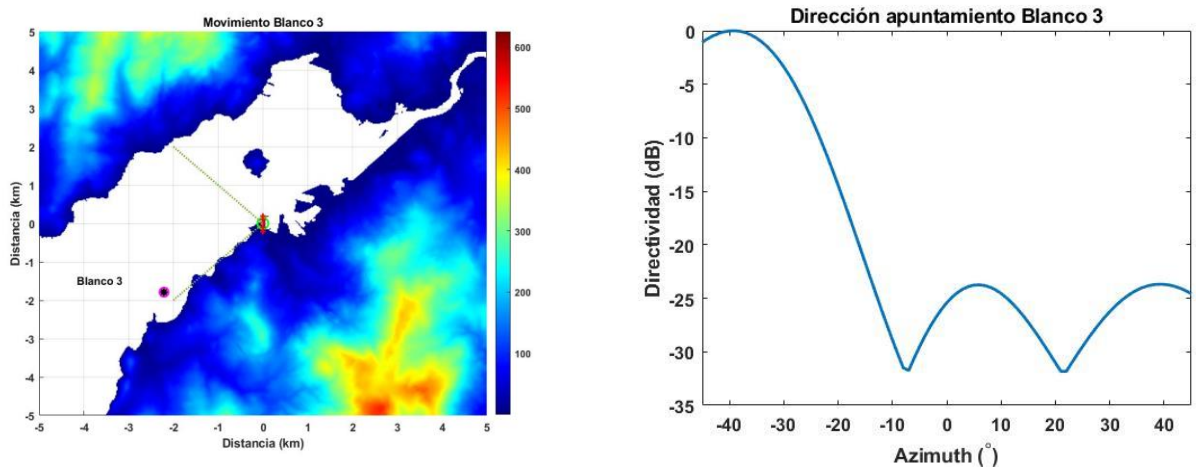


Figura 4-14. Posición del Blanco 3 en $t=80$ s (fuente: propia).

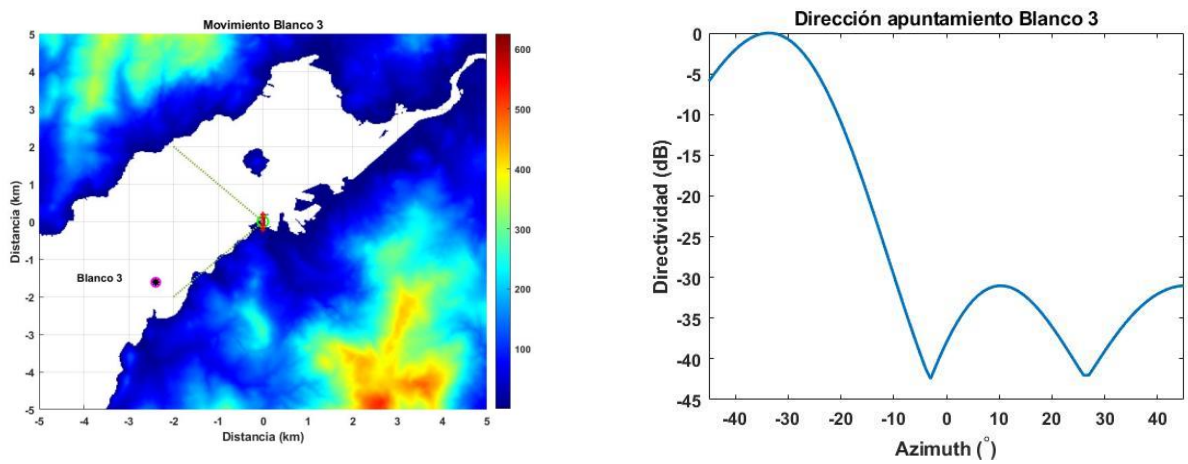


Figura 4-15. Posición del Blanco 3 en $t=160$ s (fuente: propia).

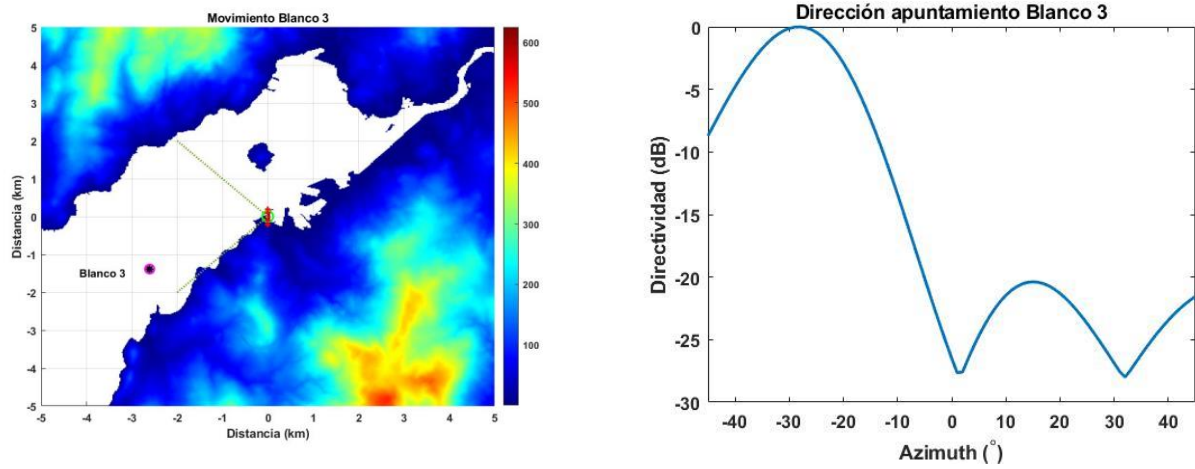


Figura 4-16. Posición del Blanco 3 en $t=240$ s (fuente: propia).

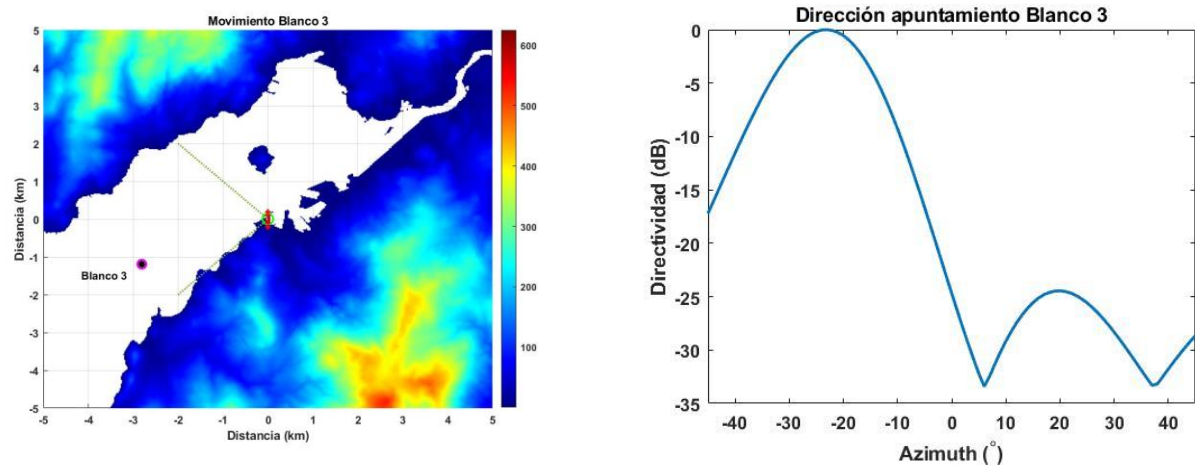


Figura 4-17. Posición del Blanco 3 en $t=320$ s (fuente: propia).

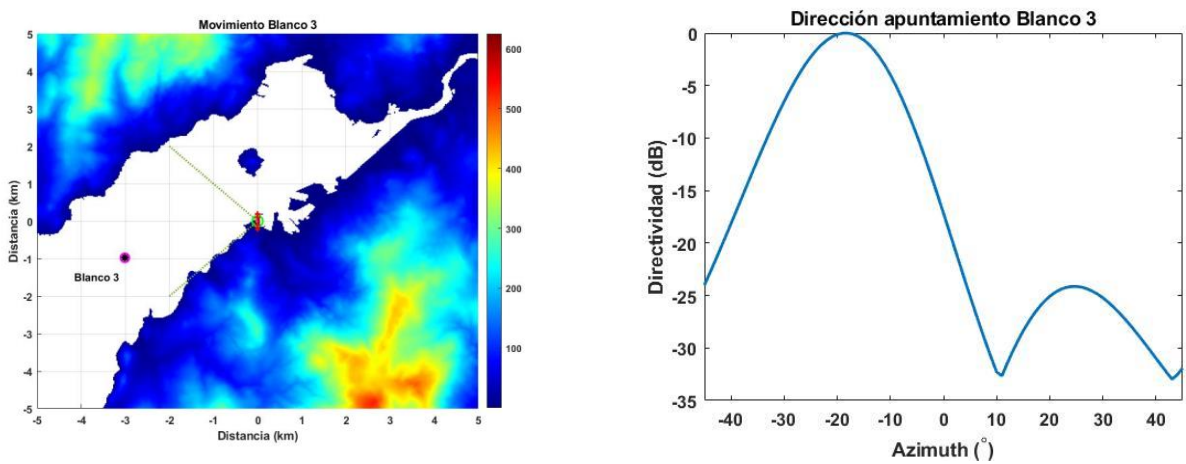


Figura 4-18. Posición del Blanco 3 en $t=400$ s (fuente: propia).

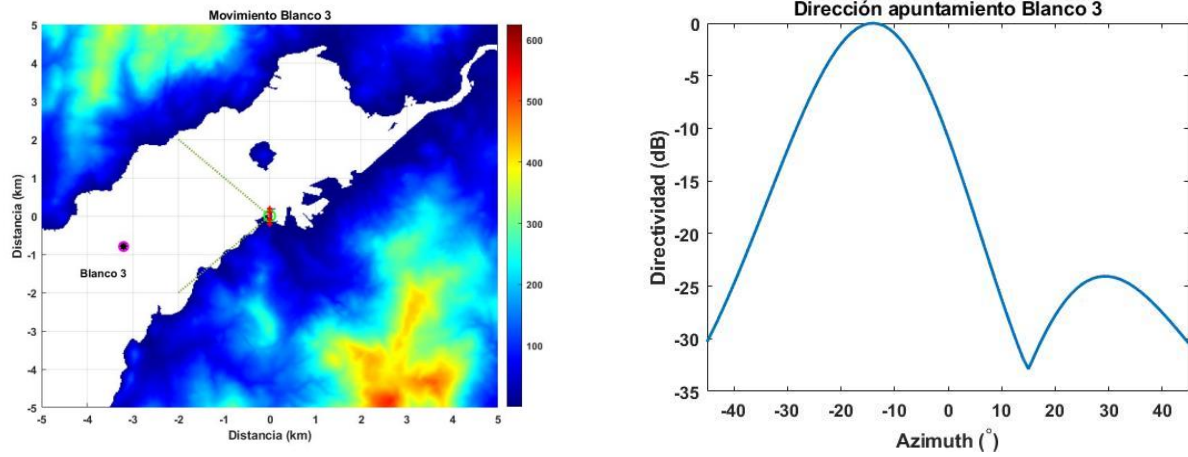


Figura 4-19. Posición del Blanco 3 en t=480 s (fuente: propia).

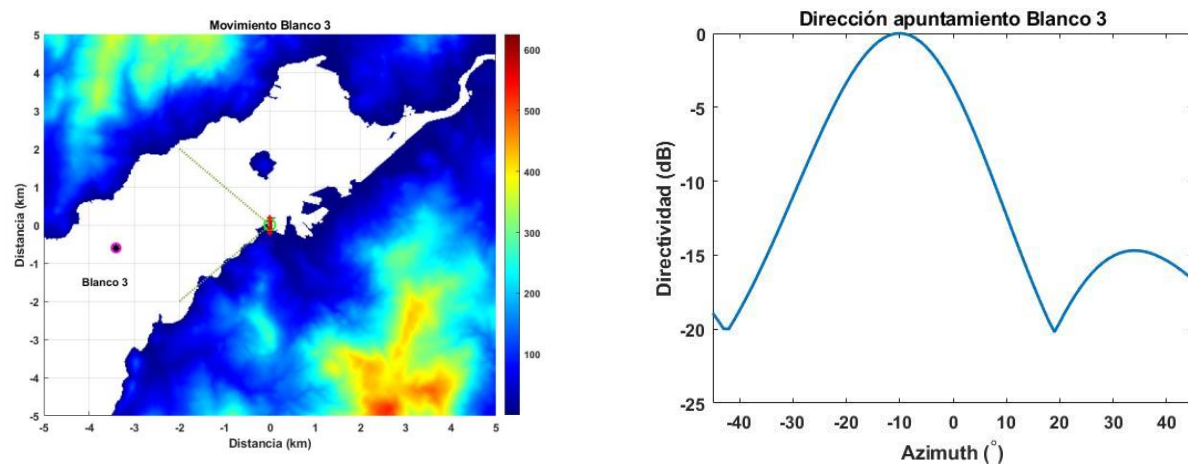


Figura 4-20. Posición del Blanco 3 en t=560 s (fuente: propia).

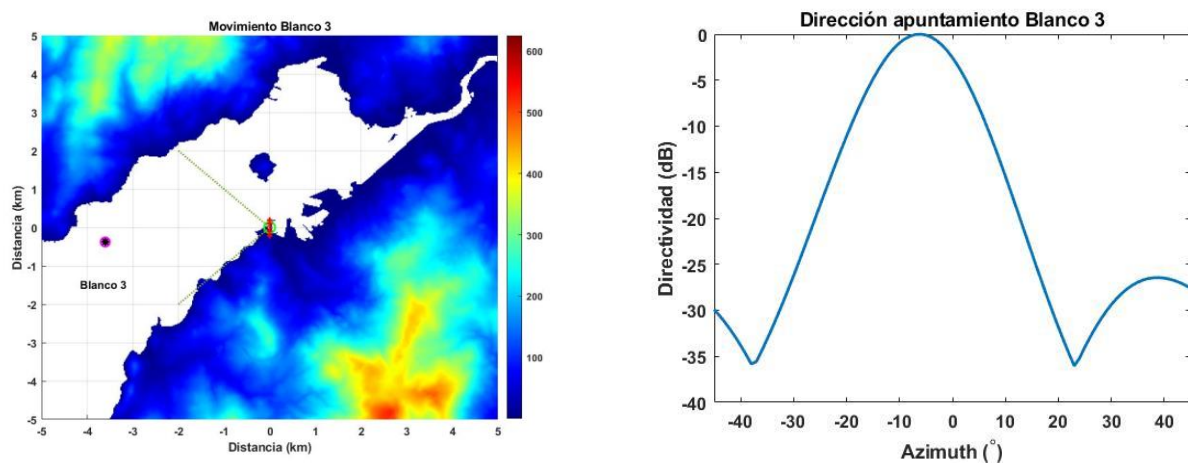


Figura 4-21. Posición del Blanco 3 en t=640 s (fuente: propia).

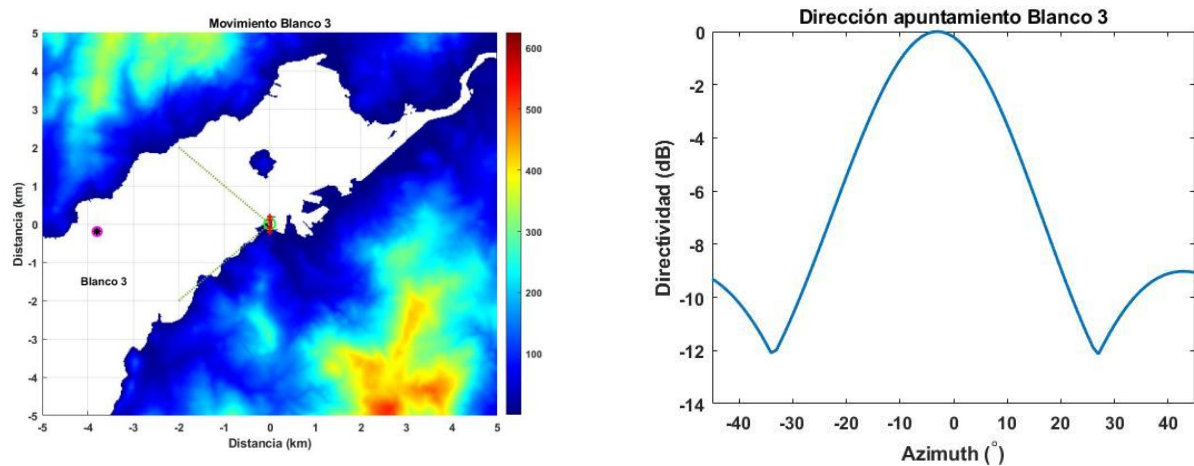


Figura 4-22. Posición del Blanco 3 en $t=720$ s (fuente: propia).

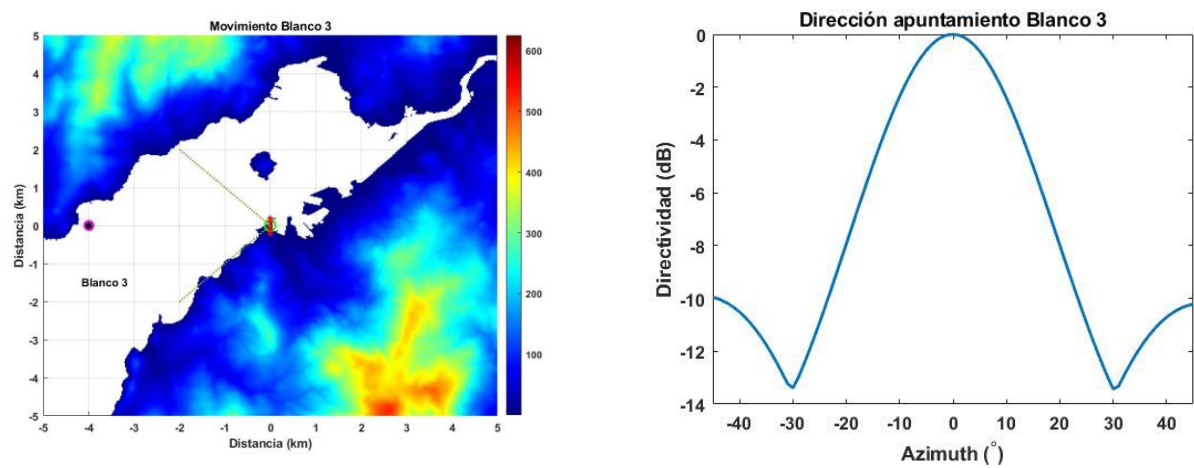


Figura 4-23. Posición del Blanco 3 en $t=800$ s (fuente: propia).

A continuación, en la Figura 4-24 se puede ver el recorrido completo realizado por el Blanco 3 a lo largo de los aproximadamente 13 minutos de recorrido.

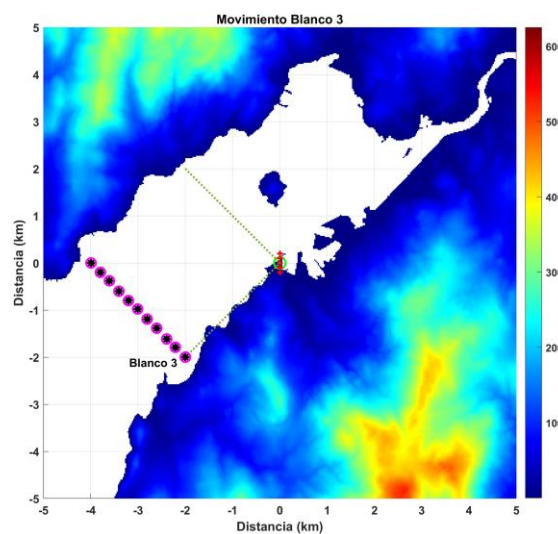


Figura 4-24. Recorrido completo del Blanco 3 (fuente: propia).

La frecuencia o velocidad Doppler relaciona la dirección de movimiento del blanco respecto al radar. Cuando el objeto se acerca al radar, la frecuencia de las ondas que rebotan en él aumenta, lo que se conoce como frecuencia Doppler positiva. Por el contrario, cuando el objeto se aleja del radar, la frecuencia de las ondas que rebotan en él disminuye, lo que se conoce como frecuencia Doppler negativa.

En el caso del Blanco 3 que se mueve a velocidad lineal constante de 3,53 m/s, es importante tener en cuenta que su velocidad radial respecto al radar no es constante como se puede ver en la Figura 4-25. Cabe destacar que justo en el punto de partida inicial, la dirección de movimiento que sigue el Blanco 3 forma un ángulo de 90° respecto a la línea que lo une con el radar, es decir, la velocidad radial (o la frecuencia Doppler) respecto al radar será nula ($f_D = \frac{2}{\lambda} \cdot V_l \cdot \cos \alpha$). Es lo anteriormente mencionado velocidad ciega

Como es de esperar a medida que el blanco avanza a velocidad lineal constante, el ángulo formado entre la dirección seguida por el blanco y la línea que lo une al radar disminuye y el módulo de la frecuencia Doppler estimada aumenta (téngase en cuenta que el blanco se aleja del radar luego la velocidad tendrá signo negativo).

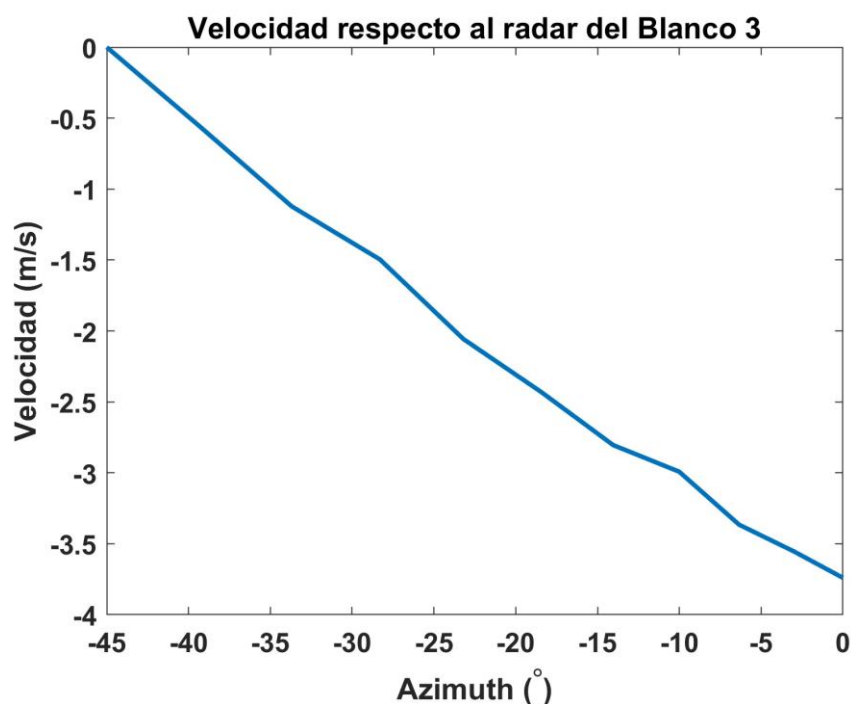


Figura 4-25. Velocidad del blanco respecto al radar (fuente: propia).

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo se presentarán las conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos en el trabajo de final de grado. Se analizará si los objetivos planteados se han cumplido, así como las limitaciones identificadas y las posibles áreas de mejora a considerar en futuros trabajos de investigación. Asimismo, se explorarán las líneas futuras de investigación que podrían desarrollarse a partir de los hallazgos obtenidos en el presente trabajo, destacando la importancia de continuar profundizando en la temática abordada y ampliando el alcance de la investigación en futuros estudios.

5.1 Conclusiones

La principal conclusión de este trabajo es que los radares persistentes mejoran el alcance del sistema radar y permiten la detección de blancos con una pequeña sección radar o moviéndose a baja velocidad. Esto se logra mediante la iluminación de la escena completa con una antena con un haz muy ancho en transmisión, y la sintetización de varios haces simultáneos en recepción utilizando un array de antenas para conformar un haz mucho más estrecho.

Una de las ventajas más destacadas de este tipo de radar es que evita la necesidad de escanear, ya que está en todo momento iluminando la escena de interés. Esto se traduce en una mayor eficiencia y rapidez en la detección de objetivos, lo que resulta especialmente útil en situaciones donde el tiempo es crítico.

Entrando más en detalle en la comparación entre el radar persistente y el radar pulsado, se ha observado que al aumentar el número de arrays de la antena, la relación señal a ruido aumenta en ambos tipos de radares, pero se observa un mayor aumento en el radar persistente ya que la pendiente de la curva es significativamente mayor. La razón por la cual se produce el fenómeno descrito es que la relación entre la señal a ruido está estrechamente ligada con el tiempo que el radar ilumina el objeto en cuestión. En este sentido, el radar de onda continua cuenta con un tiempo de iluminación del blanco significativamente mayor, lo que se traduce en una relación señal a ruido más favorable en comparación con otros tipos de radar.

Otra conclusión relevante que se puede extraer de los resultados obtenidos en este trabajo es que el radar de onda continua tiene una capacidad superior para detectar objetos con un bajo RCS en comparación con los radares pulsados. Esto se debe a que el radar CW emite una señal ininterrumpida a lo largo del tiempo, lo que permite transmitir una mayor cantidad de energía y, por lo tanto, mejorar la probabilidad de detección de blancos con un RCS más reducido.

Otra de las principales conclusiones que se plantea a partir de los resultados obtenidos en este trabajo es que el radar de onda continua puede ser implantado en una estructura móvil, como un barco, para detectar y localizar diferentes tipos de blancos y amenazas en cualquier lugar donde se apunte la antena.

Aunque en este trabajo, se ha planteado el problema teniendo en cuenta que las antenas estaban fijas en el laboratorio del CUD, las posibilidades de esta tecnología son mucho mayores si se implementa en una estructura móvil, como un barco, ya que se podrían detectar y localizar objetos y amenazas en tiempo real y en cualquier dirección, lo que supone una gran ventaja en entornos dinámicos y cambiantes como el marítimo.

Finalmente, se puede concluir que la frecuencia en banda X utilizada en este tipo de radar permite construir dispositivos más pequeños y fáciles de integrar, sin comprometer sus prestaciones y propiedades. Esta es una característica muy valiosa en el diseño y construcción de dispositivos electrónicos, ya que reduce el tamaño y el costo de los componentes, y facilita su integración en dispositivos más complejos.

5.2 Líneas futuras

5.2.1 A corto plazo

Una de las líneas futuras de trabajo en el entorno del radar de onda continua es la construcción de un modelo digital que permita una mayor precisión y eficiencia en la detección y seguimiento de objetos en movimiento. Este modelo digital podría incorporar algoritmos de aprendizaje automático y análisis de datos, que permitirían una mejor interpretación de la información recopilada por el radar y una mayor capacidad para identificar y rastrear objetos en tiempo real.

En cuanto a la utilidad del radar de onda continua fuera del entorno marítimo, se puede argumentar que este tipo de tecnología sería más útil en áreas donde las amenazas tienen altura, como en el monitoreo del tráfico aéreo o en la detección de objetos en movimiento en áreas urbanas. En estos entornos, la capacidad del radar para detectar objetos a largas distancias y en condiciones de baja visibilidad sería particularmente valiosa.

A partir de este trabajo, una posible línea futura es el desarrollo del *Data Cube*, que consiste en la combinación de dos transformadas rápidas de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) para obtener información adicional sobre los objetivos detectados.

Al utilizar dos FFT, el *Data Cube* permite obtener información sobre la distancia y el azimuth del objetivo detectado, lo que a su vez permite determinar su posición en el espacio tridimensional. Esta técnica es particularmente útil para la detección y seguimiento de objetivos móviles, como aviones, barcos y vehículos terrestres.

El desarrollo del *Data Cube* ofrece varias ventajas significativas sobre las técnicas de detección de radar tradicionales. En primer lugar, la capacidad para determinar la posición tridimensional de un objetivo permite una mayor precisión en la detección y seguimiento de objetivos móviles. En segundo lugar, la utilización de dos FFT permite la detección de objetivos en áreas de alta densidad de tráfico, donde los objetivos pueden estar en movimiento y superpuestos en el espacio.

El uso del *Data Cube* también puede tener importantes aplicaciones en el ámbito de la defensa y la seguridad. Por ejemplo, en situaciones de emergencia o crisis, la capacidad para detectar y seguir objetivos móviles con alta precisión y velocidad puede ser crítica para la toma de decisiones y la coordinación de operaciones militares o de seguridad.

5.2.2 A medio/largo plazo

Una de las líneas futuras a medio/largo plazo es el desarrollo físico del sistema, específicamente la construcción de un radar LFM CW persistente en banda X.

El desarrollo de un radar de este tipo y su futura incorporación a las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar sería beneficioso ya que permitiría mejorar la capacidad de los sistemas de detección y vigilancia. Las lanchas de instrucción son un recurso vital en el adiestramiento y la formación de los alumnos de la ENM y de seguridad en tareas de vigilancia y control marítimo.

El uso de este tipo de radar en las lanchas de instrucción también permitiría una mayor capacidad para la detección de blancos en condiciones climáticas adversas, como lluvia intensa, niebla densa o fuertes vientos. La alta precisión y resolución del radar permitiría detectar objetos pequeños, como botes o lanchas de pesca, incluso en condiciones de baja visibilidad.

Además, la integración de este radar en las lanchas de instrucción podría mejorar la eficiencia y la seguridad en las tareas de control y vigilancia marítima. La capacidad para detectar objetos en tiempo real permitiría una respuesta más rápida y efectiva ante posibles amenazas o situaciones de emergencia.

En resumen, el desarrollo físico del sistema de radar de onda continua con frecuencia modulada en banda X y su futura implantación en las lanchas de instrucción es una línea futura prometedora en el campo de la vigilancia y el control marítimo. Esta tecnología permitiría mejorar significativamente la capacidad de detección y rastreo de objetos en movimiento, incluso en condiciones climáticas adversas, y mejorar la eficiencia y seguridad en las tareas de vigilancia y control marítimo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Laučys *et al.*, «Investigation of detection possibility of UAVS using low cost marine radar», *Aviation*, vol. 23, n.º 2, Art. n.º 2, may 2019, doi: 10.3846/aviation.2019.10320.
- [2] H. Kuschel, D. Cristallini, y K. E. Olsen, «Tutorial: Passive radar tutorial», *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 34, n.º 2, pp. 2-19, feb. 2019, doi: 10.1109/MAES.2018.160146.
- [3] J. Riera y J. Carretero, «Programa COINCIDENTE». <https://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Presentacion/ImasD/Paginas/Coincidente.aspx> (accedido 20 de enero de 2023).
- [4] SOPT, DGAM, y SDG PLATIN, «Boletín de Observación Tecnológica nº 56_vf.pdf». Accedido: 17 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/Lists/Publicaciones/Attachments/225/Boletin%20de%20Observaci%C3%B3n%20Tecnol%C3%B3gica%20n%C2%BA%2056_vf.pdf
- [5] «(PDF) Maritime surveillance radar. I. Radar scattering from the ocean surface». https://www.researchgate.net/publication/3361245_Maritime_surveillance_radar_I_Radar_scattering_from_the_ocean_surface (accedido 2 de febrero de 2023).
- [6] V. Anders, «ELUSIVO», *Etimologías de Chile - Diccionario que explica el origen de las palabras*. <http://etimologias.dechile.net/?elusivo> (accedido 21 de marzo de 2023).
- [7] A. Limited, «Radar Würzburg-Riese alemana, de la Segunda Guerra Mundial Fotografía de stock - Alamy». <https://www.alamy.es/foto-radar-wurzburg-riese-alemana-de-la-segunda-guerra-mundial-49925598.html> (accedido 16 de marzo de 2023).
- [8] «SN_2022_2023_T2_Radares_Pulsados.pdf Jose María Núñez Ortuño». Accedido: 9 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://moovi.uvigo.gal/pluginfile.php/830168/mod_resource/content/14/SN_2022_2023_T2_Radares_Pulsados.pdf
- [9] «Figure 1: Radar image with (left) and without Anti Clutter Sea Control...», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Radar-image-with-left-and-without-Anti-Clutter-Sea-Control-activated-and-adjuste_fig1_236718754 (accedido 16 de marzo de 2023).
- [10] «UHF Phased Array Radar – Custom Military & Aerospace Power Supplies | BC Systems, Inc.». <https://bcpowersys.com/military-programs/uhf-phased-array-radar/> (accedido 16 de marzo de 2023).

- [11] aeroespacio2021, «¿Qué es un radar de apertura sintética (SAR)?», 18 de noviembre de 2021. <https://aevyca.com.ar/2021/11/18/que-es-un-radar-de-apertura-sintetica-sar/> (accedido 16 de marzo de 2023).
- [12] «schoolphysics ::Welcome»: https://www.schoolphysics.co.uk/age14-16/Wave%20properties/text/Doppler_effect/index.html (accedido 16 de marzo de 2023).
- [13] M. O. Kolawole, «Radar Systems, Peak Detection and Tracking», *Radar Systems, Peak Detection and Tracking*, pp. 1-363, ene. 2003.
- [14] A. Aeroespacial, «ART desarrollará para Defensa un radar persistente de aproximación de aeronaves», *Actualidad Aeroespacial*, 25 de octubre de 2021. <https://actualidadaeroespacial.com/art-desarrollara-para-defensa-un-radar-persistente-de-aproximacion-de-aeronaves/> (accedido 3 de febrero de 2023).
- [15] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Interferencias electrónicas». <https://www.radartutorial.eu/16.eccm/ja04.es.html> (accedido 16 de marzo de 2023).
- [16] «Definición de radar - Definicion.de», *Definición.de*. <https://definicion.de/radar/> (accedido 1 de febrero de 2023).
- [17] D. Vargas González, «Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W». marzo de 2014.
- [18] «¿Qué es Radio HF / VHF / UHF? -News-FMUSER Radio FM / TV Proveedor integral». <https://es.fmuser.net/news/2014-5-20/1016.html> (accedido 23 de marzo de 2023).
- [19] P. López Moreno, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE FUNCIONES MONOPULSO EN UN RADAR UBICUO DE VIGILANCIA». 2018.
- [20] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Radar pulsado». <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp05.es.html> (accedido 9 de febrero de 2023).
- [21] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Radar de onda continua». <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp07.es.html> (accedido 13 de febrero de 2023).
- [22] «SN_2022_2023_T3_Radares_CW.pdf Jose María Núñez Ortuño». Accedido: 13 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://moovi.uvigo.gal/pluginfile.php/830178/mod_resource/content/5/SN_2022_2023_T3_Radares_CW.pdf
- [23] «Traffipax speedophot :: Radarfalle.de». <http://www.radarfalle.de/technik/ueberwachungstechnik/traffipax.php> (accedido 11 de febrero de 2023).
- [24] S. P. Gurjar, «FMCW – radar design: by M. Jankiraman, London, ARTECH HOUSE, 2018, 415 pp., \$179 (hardback), ISBN-13: 978-1-63081-567-7», *IETE Journal of Research*, vol. 65, pp. 1-2, jun. 2019, doi: 10.1080/03772063.2019.1615392.
- [25] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Radar FMCW». <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp08.es.html> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [26] J. Riera Sanz y J. Carretero Moya, «DAR: Demostrador tecnológico de un radar persistente». Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
- [27] C. Yuanhao, F. Liu, X. Jing, y J. Mu, *Integrating Sensing and Communications for Ubiquitous IoT: Applications, Trends and Challenges*. 2021.
- [28] W. A. Holm, «Continuous Wave Radar», en *Principles of Modern Radar*, J. L. Eaves y E. K. Reedy, Eds. Boston, MA: Springer US, 1987, pp. 397-421. doi: 10.1007/978-1-4613-1971-9_13.

- [29] J. J. Alter, R. M. White, F. F. Kretschmer, I. D. Olin, y C. L. Temes, «Ubiquitous radar: An implementation concept», may 2004, pp. 65-70. doi: 10.1109/NRC.2004.1316397.
- [30] M. Skolnik, «Systems Aspects of Digital Beam Forming Ubiquitous Radar», p. 43, jun. 2002.
- [31] «GM2-UTTAROS-GM2-PAZ-ARMADA-SRCOM-CUD2021-2022-Practica7 (1).pdf».
- [32] I. G. Nacional, «Instituto Geográfico Nacional», *Geoportal oficial del Instituto Geográfico Nacional de España*. <http://www.ign.es> (accedido 14 de marzo de 2023).
- [33] «Radar Data Cube - MATLAB & Simulink - MathWorks España». <https://es.mathworks.com/help/phased/gs/radar-data-cube.html> (accedido 7 de marzo de 2023).
- [34] «FAR2157_2167-brochure-1.pdf».
- [35] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill, 2001.
- [36] redeweb, «Diseño de radares FMCW para aplicaciones de seguridad activa | Revista Española de Electrónica», 7 de septiembre de 2015. <https://www.redeweb.com/articulos/instrumentacion/disenio-de-radares-fmcw-para-aplicaciones-de-seguridad-activa/> (accedido 14 de marzo de 2023).

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

El uso de un radar persistente LFM CW para la detección de objetivos elusivos con pequeña sección radar o moviéndose a baja velocidad en un entorno marítimo puede tener varias implicaciones sociales, económicas y ambientales. Algunas de ellas son citadas a continuación.

En cuanto a las implicaciones sociales, y sobre todo en términos de seguridad, la utilización de esta tecnología puede mejorar significativamente la seguridad marítima, ya que permite la detección de objetivos que de otra manera podrían pasar desapercibidos. Esto puede resultar beneficioso para las personas que trabajan en el mar, como pescadores y tripulantes de buques, ya que su seguridad se ve directamente afectada por la capacidad de detectar cualquier peligro en el mar. Además, esta tecnología puede tener implicaciones positivas para la seguridad nacional en general [36].

Sin embargo, también existen preocupaciones en torno a la privacidad y la seguridad de los datos recopilados por el radar. El uso de un radar persistente LFM CW implica la recopilación de información sobre los objetos y la actividad en el mar, lo que puede incluir información confidencial sobre la ubicación y el movimiento de los buques y las personas a bordo. Es importante garantizar que la información recopilada por el radar se utilice únicamente para fines legítimos y que se protejan adecuadamente los datos recopilados.

El uso de este tipo de radar también tiene implicaciones económicas importantes. En términos de eficiencia y rentabilidad, la utilización de esta tecnología puede mejorar la eficiencia de la navegación y reducir los costos de mantenimiento y reparación de buques. Al permitir una detección más precisa y oportuna de objetivos, se pueden evitar colisiones y daños a la embarcación, lo que reduce la necesidad de reparaciones costosas y tiempos de inactividad prolongados. Además, al mejorar la eficiencia de la navegación, se pueden reducir los costos operativos y mejorar la productividad.

Sin embargo, la implementación de esta tecnología puede requerir una inversión significativa en equipos y capacitación. El costo de adquirir, instalar y mantener el equipo de radar persistente LFM CW puede ser considerable, lo que puede afectar los costos de la industria marítima. Además, se requerirá capacitación para los operadores y técnicos para garantizar un uso adecuado y seguro de la tecnología. Esto puede implicar un costo adicional para la industria marítima.

El radar persistente LFM CW es una tecnología que tiene un impacto ambiental beneficioso y es debido a su capacidad para operar con una baja probabilidad de interceptación o LPI. Esto significa que son capaces de transmitir señales con niveles de potencia mucho más bajos que los radares pulsados convencionales, lo que los hace menos susceptibles a la detección y la interferencia. Esta capacidad de los radares persistentes LFM CW no solo contribuye a mejorar la seguridad en aplicaciones militares, sino que también reduce su impacto medioambiental al disminuir la radiación electromagnética emitida al ambiente y, por ende, reducir el riesgo para la salud y la vida silvestre.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La investigación y el desarrollo de tecnologías de vigilancia y detección son esenciales en el ámbito de la seguridad y la defensa. Sin embargo, es importante que estas tecnologías se utilicen de manera ética y responsable para evitar consecuencias negativas para las personas y el medio ambiente.

En este sentido, es necesario reflexionar sobre los posibles impactos éticos y sociales del uso de un radar persistente de onda continua modulado linealmente en frecuencia (LFMCW) para la detección de amenazas en un entorno marítimo. En primer lugar, se debe considerar la privacidad de los individuos que se encuentran en la zona de cobertura del radar. Es importante asegurarse de que la información recopilada por el radar se utilice únicamente con fines de seguridad y no se divulgue ni se utilice para otros fines sin el consentimiento de las personas afectadas.

Además, es importante garantizar que el uso del radar no tenga un impacto negativo en el medio ambiente. La emisión de radiación electromagnética puede afectar a la fauna y flora marina, por lo que se debe tener en cuenta el posible impacto ambiental del uso del radar y minimizarlo en la medida de lo posible. Otro aspecto ético a considerar es la precisión del radar y su capacidad para distinguir entre amenazas reales y falsas alarmas. Es importante asegurarse de que el radar tenga una tasa de falsas alarmas baja para evitar situaciones en las que se generen alarmas innecesarias que puedan generar pánico o estrés en las personas.

Por último, es necesario considerar la responsabilidad de los operadores del radar. Es importante asegurarse de que los operadores del radar estén adecuadamente capacitados y formados para utilizar la tecnología de manera responsable y ética. Deben conocer las limitaciones del radar y estar familiarizados con las políticas y procedimientos de uso para evitar errores humanos que puedan tener consecuencias negativas

ANEXO III: SEÑAL TRANSMITIDA EN MATLAB

La señal triangular transmitida por el radar de onda continua en Matlab es generada usando el *Phased Array System Toolbox* de MATLAB a partir del siguiente código:

```
waveform =  
phased.FMCWWaveform('SweepDirection','Triangle','SweepBandwidth',bw,'SweepTime',tm  
, 'SampleRate',fs,'SweepInterval','Positive','NumSweeps',2);
```

Este código utiliza la función `phased.FMCWWaveform` de la biblioteca de procesamiento de señales y antenas *Phased Array System Toolbox* de MATLAB para generar una señal de onda continua modulada por frecuencia (FMCW) para su uso en radares o sistemas de detección de objetos.

Los diferentes parámetros que se pasan a la función `phased.FMCWWaveform` son:

- **SweepDirection:** especifica la dirección de barrido de la señal FMCW, que puede ser *Up*, *Down* o *Triangle*. Para este caso, se ha elegido la dirección de barrido *Triangle*, que es una opción común y produce un barrido de frecuencia simétrico hacia arriba y hacia abajo.
- **SweepBandwidth:** es la cantidad de cambio en la frecuencia de la señal durante un barrido. Este valor se puede ajustar según las necesidades del sistema, en este caso, a la resolución espacial deseada y se especifica como una frecuencia en Hz. El ancho de banda en este escenario es de 12 MHz para una resolución espacial de 25 m.
- **SweepTime:** es el tiempo que se tarda en realizar un barrido completo, que se especifica en segundos. En este caso, se ha fijado a partir de la distancia máxima deseada (5 km), resultando en tiempo de barrido de 33 μ s.
- **SampleRate:** es la tasa de muestreo de la señal, que se especifica en Hz. Este valor debe ser lo suficientemente alto para capturar todas las frecuencias presentes en la señal. Para satisfacer el criterio de *Nyquist* se fija al doble del ancho de banda utilizado, es decir, 24 MHz.
- **SweepInterval:** especifica si los barridos de frecuencia son simétricos (*Symmetric*) o asimétricos (*Positive* o *Negative*). Para este caso, se ha elegido *Positive*, lo que significa que la frecuencia de la señal aumenta durante la primera mitad del barrido y luego vuelve a su valor inicial durante la segunda mitad.
- **NumSweeps:** es el número de barridos de frecuencia que se generan en la señal. En este caso, se han especificado dos barridos.

El resultado de la función `phased.FMCWWaveform` es una señal de onda continua modulada en frecuencia (FMCW) que se puede usar para transmitir y recibir señales de radar y detectar objetos en el camino de la señal (ver Figura 4-2 y Figura 4-3).

La señal rectangular transmitida por el radar de onda pulsado en Matlab es generada a partir del siguiente código:

```
waveform = phased.RectangularWaveform('PulseWidth',tm, ...  
                                     'PRF',PRF,...  
                                     'SweepBandwidth',bw,...  
                                     'SampleRate',fs);
```

El código define un objeto de tipo *RectangularWaveform* en MATLAB que representa una señal de radar rectangular, que es una señal con un ancho de pulso *tm* y una tasa de repetición de pulso (PRF) determinada por la variable PRF.

El objeto también tiene un ancho de banda de barrido (*SweepBandwidth*) y una frecuencia de muestreo (*SampleRate*) especificadas por las variables 'bw' y 'fs', respectivamente.

Los parámetros del objeto *RectangularWaveform* se explican a continuación:

- *PulseWidth*: especifica el ancho de pulso de la señal rectangular, medido en segundos. En este caso, el valor es de 33 microsegundos para igualarlo al caso de onda continua.
- 'PRF': especifica la tasa de repetición de pulso de la señal rectangular, es decir, la frecuencia a la que se emiten los pulsos de radar. Fue fijada a un valor típico en radares pulsados de 3000 Hz.
- *SweepBandwidth*: especifica el ancho de banda de barrido de frecuencia de la señal rectangular, que determina la resolución de rango del radar. Se fijó a un valor de 12 MHz para igualarlo al caso de radar de onda continua.
- *SampleRate*: especifica la frecuencia de muestreo de la señal rectangular, es decir, la frecuencia a la que se toman muestras de la señal en el dominio del tiempo (fijada a 24 MHz).

ANEXO IV: MAPA DOPPLER Y CFAR

A continuación, se muestra el mapa Doppler, así como la estimación de los blancos a través de la técnica CFAR (*Constante False Alarm Rate*) utilizada para identificar el blanco 3 en los 11 intervalos temporales incluidos en la presentación de los resultados.

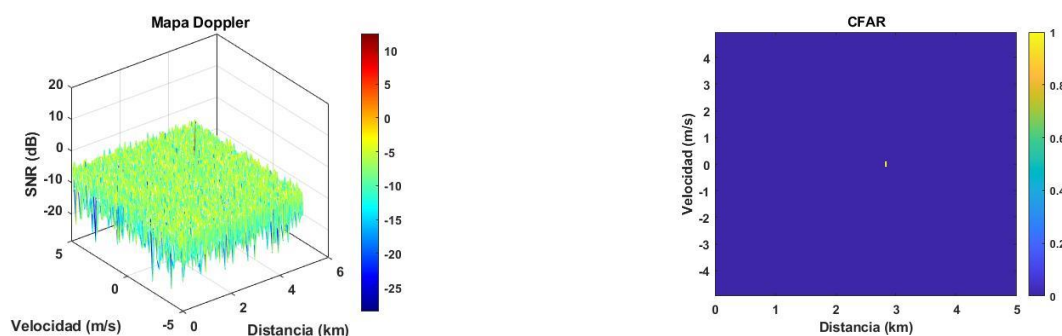


Figura A4-1. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=0$ s (fuente: propia).

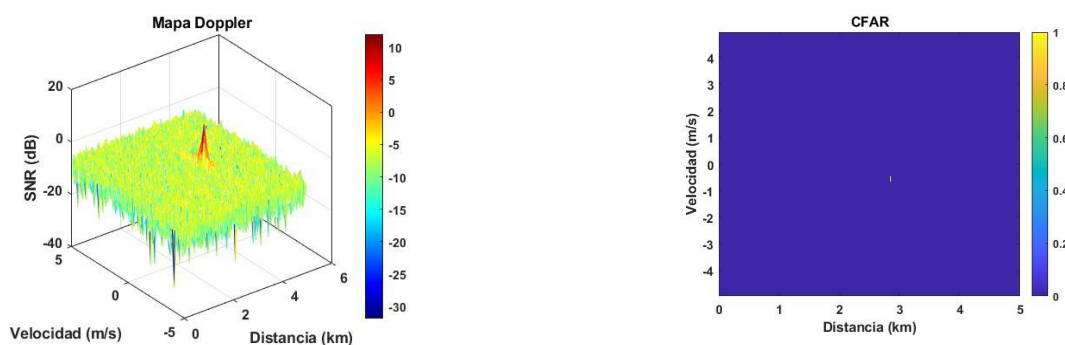


Figura A4-2. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=80$ s (fuente: propia).

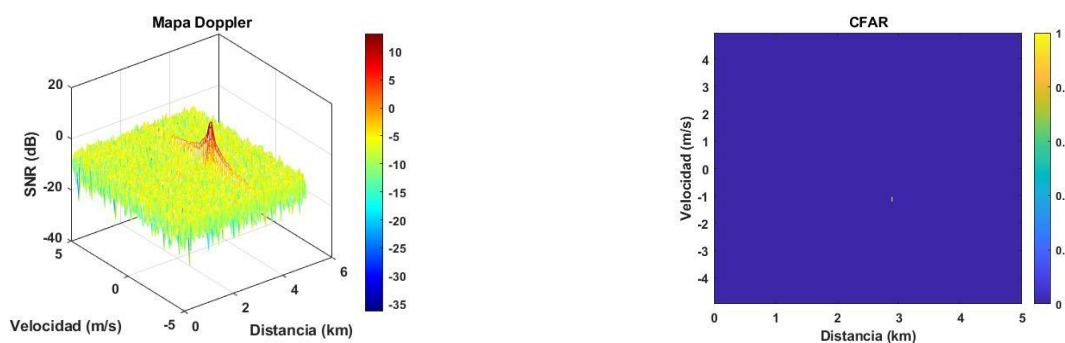


Figura A4-3. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=160$ s (fuente: propia).

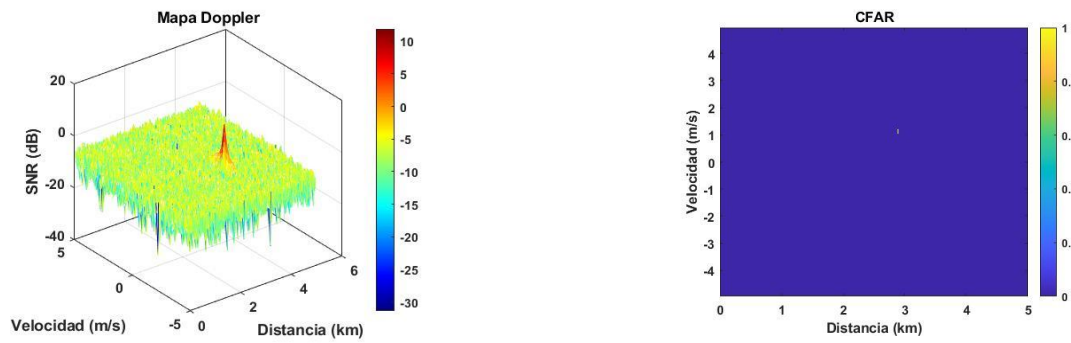


Figura A4-4. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=240$ s (fuente: propia).

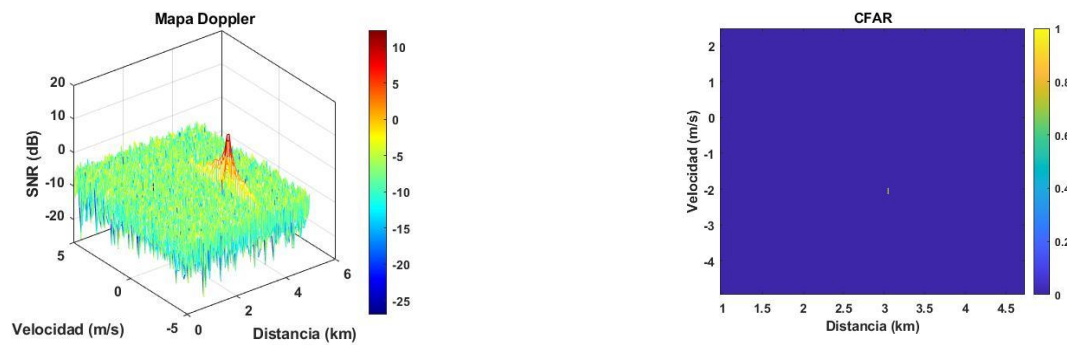


Figura A4-5. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=320$ s (fuente: propia).

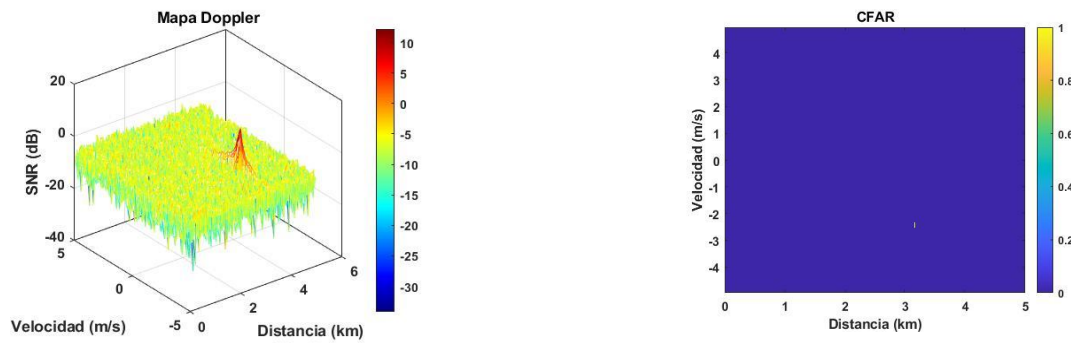


Figura A4-6. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=400$ s (fuente: propia).

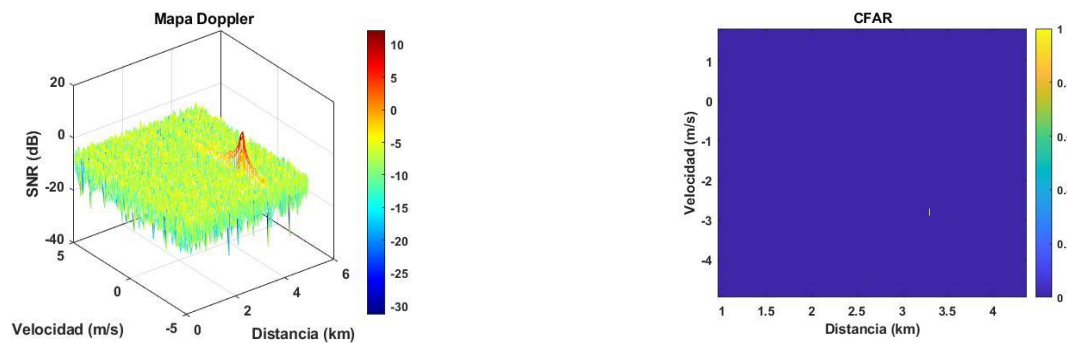


Figura A4-7. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=480$ s (fuente: propia).

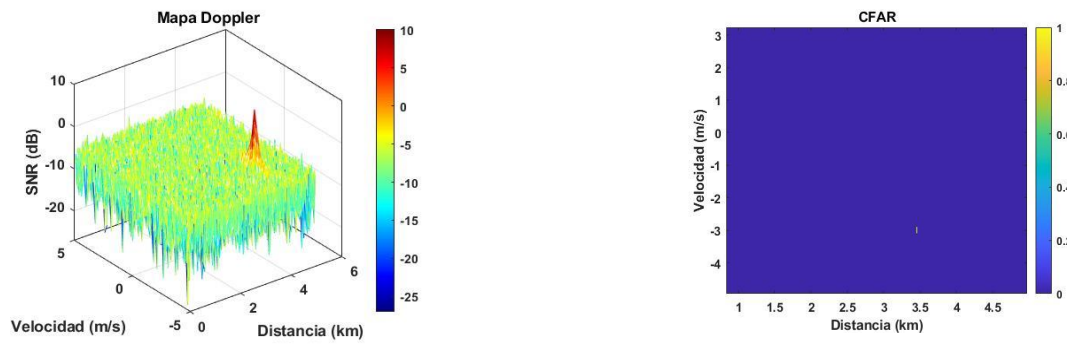


Figura A4-8. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=560$ s (fuente: propia).

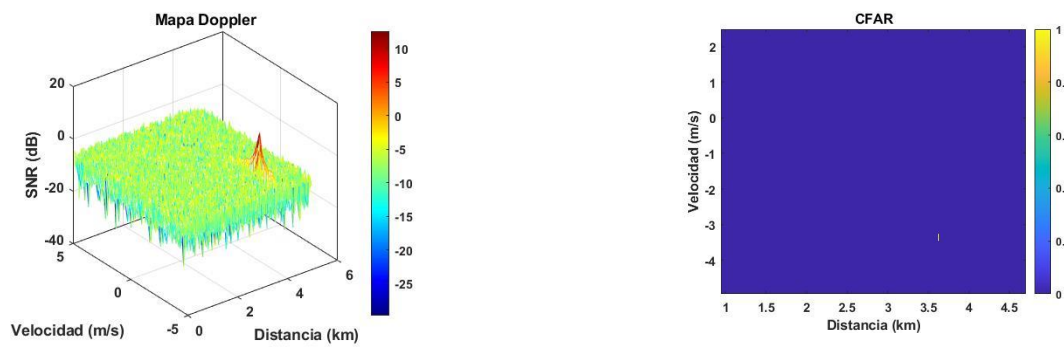


Figura A4-9. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=640$ s (fuente: propia).

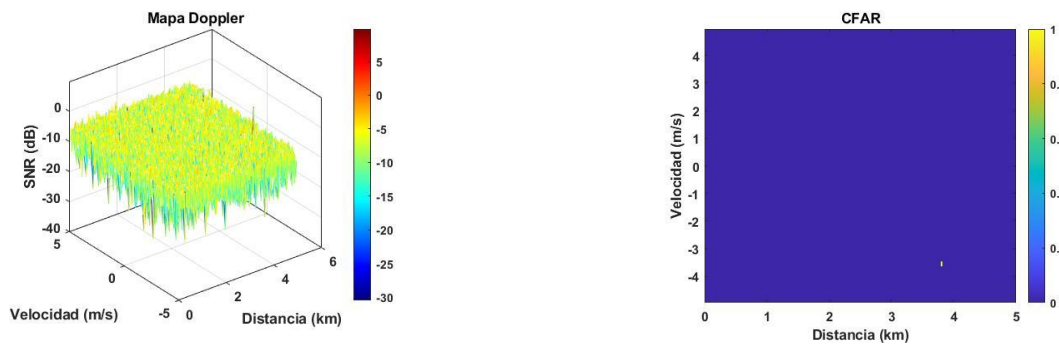


Figura A4-10. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=720$ s (fuente: propia).

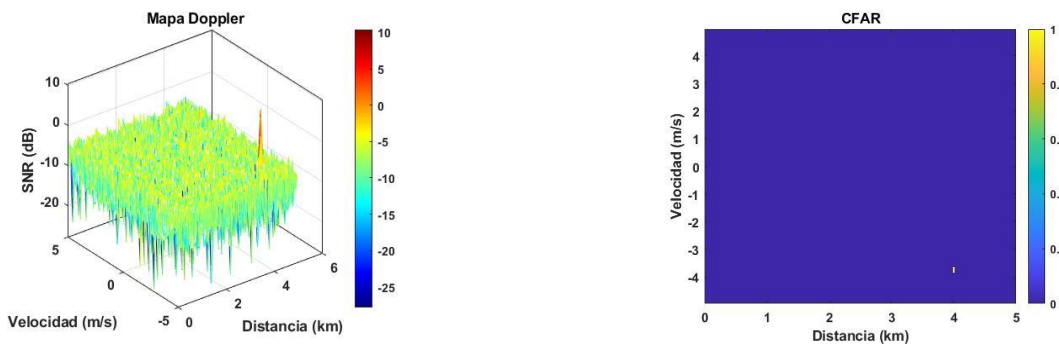


Figura A4-11. Mapa doppler y CFAR para posición del Blanco 3 en $t=800$ s (fuente: propia).