

ULL

Universidad
de La Laguna

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería
Sección de Náutica, Máquinas y
Radioelectrónica Naval



EPSI, Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

TRABAJO DE FIN DE GRADO

CURSO 2016 2017

**NUEVAS TECNOLOGÍAS
DEL RADAR DE
NAVEGACIÓN**

Tutor: Antonio Ceferino Bermejo Díaz.

Alumna: Alba Alonso Frey.

Grado: Náutica y Transporte Marítimo.

RESUMEN

La palabra RADAR proviene del acrónimo inglés “Radio Detection And Ranging”, algo así como detección y medición de ondas de radio. Se denomina radar al dispositivo que sirve para la detección de objetos, así como la determinación de su posición mediante la medición de direcciones o distancias, aprovechando las propiedades de las ondas electromagnéticas de radio. Fue creado durante la segunda guerra mundial y actualmente forma parte de uno de los equipos fundamentales de la navegación marítima. El radar utilizado en los buques ha experimentado una evolución tecnológica importante desde sus orígenes, pero este desarrollo siempre ha estado limitado a la tecnología original basada en la modulación por impulsos, en el que el emisor transmite cada cierto tiempo un impulso de corta duración. Sin embargo en los últimos años se ha desarrollado una tecnología radar nueva en el ámbito marítimo basada en la transmisión continua de la señal radar pero cambiando continuamente la frecuencia en la que se emite y utilizando dos antenas una para la emisión y otra para la recepción continua de la señal. Esto es justamente la tecnología FMCW acrónimo inglés de “Onda Continua de Frecuencia Modulada”. Muchos fabricantes de radares marinos están apostando por el desarrollo de esta tecnología, pues las ventajas que presentan son numerosas.

ABSTRACT

The word RADAR comes from the acronym “Radio Detection And Ranging”. Radar is an object-detection system that uses radio waves to determine the range, angle, or velocity of objects. Radar was developed secretly for military use by several nations in the period before and during World War II and is currently part of one of the main maritime navigation equipment. Radar used on ships has undergone significant technological evolution since its inception, but this development has always been limited to the original technology based on pulse modulation, in which the transmitter transmits from time to time a pulse of short duration. However, in the last years a new radar technology has been developed in the maritime field, which is based on the continuous transmission of the radar signal but continuously changing the emission frequency and using two antennas one for the emission and another for the continuous reception of the signal. This new technology is based on the use of FMCW techniques (Frequency Modulated and Continuous Wave). Many manufacturers of marine radars are betting on the development of this technology, and this is due to the numerous advantages that this technology presents.

ÍNDICE

ÍNDICE DE IMÁGENES	8
ÍNDICE DE TABLAS	11
ACRÓNIMOS	12
INTRODUCCIÓN.....	14
JUSTIFICACIÓN	16
CAPÍTULO I: SISTEMAS RADAR	19
1.1. Introducción a los sistemas Radar.....	20
1.2. Funcionamiento del Radar.....	20
1.3. Clasificación de los sistemas Radar.....	21
1.3.1. Radares de onda pulsada.....	21
1.3.2. Radar de Onda Continua.....	22
1.4 Bandas de frecuencias utilizadas por el radar	23
CAPÍTULO II: RADAR CONVENCIONAL DE ONDA PULSADA	25
2.1. Orígenes del sistema Radar.....	26
2.2. Fundamentos del Radar.....	29
2.3. Bandas de trabajo del sistema RADAR convencional.....	31
2.4. Unidades que componen un equipo radar de onda pulsada	32
2.5. Evolución histórica del sistema RADAR-ARPA.....	34
2.5.1 Marco normativo del sistema RADAR-ARPA.....	35
CAPÍTULO III: RADAR FMCW	38
3.1. Radar de onda continua y frecuencia modulada.....	39
3.2. Historia del radar FMCW.....	40
3.3. Ventajas y aplicaciones del radar FMCW.....	42
3.4. Aplicaciones donde se utiliza el radar FMCW.....	44
3.5. Funcionamiento Radar FMCW	47
3.5.1. Modulación lineal de la frecuencia.....	47
3.6. Componentes de un radar FMCW.....	58
3.6.1 Diagrama de bloques del sistema.....	59

3.6.2. Componentes de radiofrecuencia.....	60
CAPÍTULO IV: RADAR DE PULSO VS RADAR FMCW	64
4.1. Desarrollo de tecnológico del radar marino	65
4.2. Cómo funciona la nueva tecnología radar	66
4.3. Diferencias entre el radar de onda pulsada y el radar FMCW	71
4.4. Resumen de las diferencias entre ambas tecnologías.	77
CAPÍTULO V: RADARES FMCW ACTUALES EN EL MERCADO	78
5.1. Diseño de la nueva tecnología Radar	79
5.2. Principales modelos de radar FMCW	80
5.2.1. Broadband Radar.....	80
5.2.2. Chirp Pulse Compression Radar	88
CONCLUSIÓN	93
BIBLIOGRAFÍA	95

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1.1. Diagrama de bloques de un radar de pulso. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.1. El primer RADAR informatizado del mundo. Fuente: Kongsberg maritime.

Figura 2.2. Representación de una pantalla actual de un sistema RADARARPA. Fuente: Maritraining.

Figura 3.1. Diagrama de bloque del radio altímetro de Bentley. Fuente: "Fundamentals of short-range FM radar".

Figura 3.2. Frecuencia instantánea de las señales emitidas y recibidas. Fuente: "Fundamentals of short-range FM radar".

Figura 3.3. Radar medidor de nivel. Fuente: "Fundamentals of short-range FM radar".

Figura 3.4. Zonas de cobertura del sistema de aviso de colisión de vehículos. Fuente: "Fundamentals of short-range FM radar".

Figura 3.5. Modulación lineal diente de sierra (up-chirp) Fuente: "Diseño y validación de un radar CW-FM a 94 GHz".

Figura 3.6. Modulación lineal diente de sierra (down-chirp). Fuente: "Diseño y validación de un radar CW-FM a 94 GHz".

Figura 3.7. Modulación lineal triangular. Fuente: "Diseño y validación de un radar CW-FM a 94 GHz".

Figura 3.8. Configuración homodina de un radar FMCW. Fuente: "Diseño y validación de un radar CW-FM a 94 GHz".

Figura 3.9. Diagrama de bloque de un radar FMCW. Fuente: "Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W".

Figura 3.10. Señal de batido a la salida del Mixer (Mezclador). Fuente: "Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W".

Figura 3.11. Respuesta frecuencial $S_b(f)$ para un único blanco. Fuente: “Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W”.

Figura 3.12. Respuesta de un radar FMCW con modulación triangular a un blanco estático. Fuente: “Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W”.

Figura 3.13. Respuesta de un radar FMCW frente a blancos no estáticos. Fuente: “Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W”.

Figura 3.14. Diagrama de bloque de un radar FMCW. Fuente:): Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad.

Figura 3.15. Diagrama de bloques del sistema. Fuente: Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad.

Figura 3.16. Respuesta en frecuencia de un filtro pasa banda. Fuente:): Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad.

Figura 3.17. Diagrama de bloques de un filtro pasa banda. Fuente:): Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad.

Figura 3.18. Respuesta de un filtro pasa bajos. Fuente:): Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad.

Figura 4.1. Diagrama básico radar con las señales de entrada /salida para la lectura de datos en la pantalla del radar. Fuente: “Electrónica Marina”.

Figura 4.2. Esquema del envío y recepción de la señal de un radar de pulso. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3. Esquema del envío y recepción de la señal de un radar FMCW. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.4. Gráfico de la transmisión de la frecuencia radar FMCW. Fuente: “Aztec Sailing.”.

Figura 4.5. Representación pantalla radar FMCW. Fuente: “Aztec Sailing”.

Figura 4.6. Comparativa discriminación de blancos. Fuente: Simrad.

Figura 4.7. Anulación de las interferencias. Fuente: “Simrad”.

Figura 5.1. Emisiones extremadamente bajas Broadband Radar. Fuente: “Navico Broadband Radar Essential Guide”.

Figura 5.2. Comparativa discriminación de rango. Fuente: “Navico Broadband Radar Essential Guide”.

Figura 5.3 Antena de un Broadband Radar de Simrad. Fuente: Simrad.

Figura 5.4 Antena de un Broadband Radar de Northstar. Fuente: Simrad.

Figura 5.3 Antena de un Broadband Radar de Lowrance. Fuente: Lowrance.

Figura 5.3. Comparativa de rendimiento a corto y largo alcance. Fuente: Trimer.

Figura 5.4. Antena del HALO™-3 Pulse Compression Radar. Fuente Simrad.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Bandas de Frecuencias Radar.

Tabla 2.1. Comparación de pulsos para diferentes situaciones.

Tabla 4.1. Resumen de las diferencias entre radar de pulso y radar FMCW

Tabla 5.1. Características específicas BROADBAND RADAR 4G de simrad.

Tabla 5.1. Características específicas BROADBAND RADAR de Northstar.

Tabla 5.1. Características específicas BROADBAND RADAR de Lowrance.

Tabla 5.4. Características principales del HALO™-3 Pulse Compression Radar.

Tabla 5.5. Características específicas del HALO™-3 Pulse Compression Radar.

ACRÓNIMOS

RADAR RAdio Detection and Ranging, (Detección y medición de distancias por radio).

ECDIS Electronic Chart Display and Information System.

AIS Automatic Identification System (Sistema de Identificación Automática).

GPS Global Positioning System.

FMCW Frequency Modulated Continuous Wave.

PRF Pulse Repetition Frequency (frecuencia de repetición de pulso).

CW Continuous wave (Onda Continua).

IMO International Maritime Organization (Organización Marítima Internacional).

ARPA Automatic Radar Plotting Aid, (Radar de Punteo Automático).

RVP Residual Video Phase, (Fase de Video Residual).

DFT Discrete Fourier Transform, (Transformada discreta de Fourier).

FFT Fast Fourier Transform. (Transformada rápida de Fourier).

LMF Lineal Modulation Frequency, (Modulación lineal de la Frecuencia).

VCO Voltage Controlled Oscillator, (Oscilador Controlado por Voltaje).

LNA Low Noise amplifier, (Amplificador de bajo Ruido).

ADC Analog to Digital Converter, (Convertidor de analógico a Digital).

BPF Band Pass Filter, (Un filtro pasa banda).

LPF Low Pass Filter, (Filtro Pasa bajos).

INTRODUCCIÓN

El radar es una herramienta primordial e indispensable en la navegación marítima actual, tanto de la marina mercante, como deportiva. A bordo de un buque hablar de radar, es hablar de uno de los equipos de ayuda a la navegación más importante del puente. Para el oficial de navegación supone una ayuda primordial en materia anti-colisión, así como en malas condiciones de visibilidad o nocturnidad o incluso en navegación costera el radar es el reflejo más cercano y claro del entorno.

En la última década se han producido grandes avances tecnológicos que han significado que el equipo radar presente actualmente en los buques mercantes diste mucho de sus originarios. Y es que se han producido grandes mejoras en cuanto a las prestaciones que estos ofrecen, siendo capaces de manipular las señales de eco recibidas y, en particular de digitalizarlas. Obviamente este avance ha ido de la mano del avance de la computación, pues gracias a ello una gran cantidad de datos pueden ser ahora procesados y almacenados, siendo lo más significativo la capacidad de integrar y mostrar las imágenes de radar con datos de otros sensores como ECDIS, AIS, GPS, etc. A pesar de estos avances importantísimos, el desarrollo del radar marino siempre ha estado limitado al uso de la tecnología convencional de pulso. Esto ha hecho que, aún con las indiscutibles mejoras mencionadas, estos se hayan quedado atrás en comparación al desarrollo presentado en radares utilizados en el campo militar e incluso la industria civil aeronáutica.

Sin embargo, en los últimos años, esto ha comenzado a cambiar, ya que fabricantes de radar como Simrad, Navico, Raymarine, entre otros están apostando por el desarrollo de nuevos radares marinos utilizando tecnología de estado sólido, que usa técnicas FMCW (Onda continua y frecuencia modulada). Esto supone un enfoque nuevo y novedoso de la tecnología radar dentro de la industria marítima, aunque, cabe mencionar que no se trata de una tecnología nueva, pues se ha usado en la industria de la aviación por décadas.

Esta nueva tecnología se le conoce como Radar de Estado Sólido (por el uso de transmisores de estado sólido), Broadband Radar (el nombre comercial más generalizado), Pulse Compression Radar (Radar de comprensión de pulsos) y Chirp.

Hay algunas variaciones entre ambos, pero todos operan usando onda continua y frecuencia modulada. Por lo que, al margen de los nombres comerciales, esta nueva tecnología responde por el nombre de Radar FMCW.

El radar FMCW prescinde del uso del característico magnetrón del radar tradicional de onda pulsada, en su lugar utiliza transmisores de estado sólido de banda ancha que generan una señal limpia y estable, que a su vez está acoplado a un receptor con una banda más precisa de frecuencias que elimina gran parte del ruido de fondo.. Y es que, en vez de transmitir un poderoso y breve pulso, el nuevo radar transmite una onda continua de frecuencia ascendente, es decir, una onda modulada en frecuencia (FMCW). El transmisor emite una señal continua la cual va variando linealmente la frecuencia. El método para calcular la distancia varía, de manera que en vez de calculando el tiempo que tarda el impulso reflejado en volver de vuelta a la antena, en este caso, se hace mediante una diferencia de frecuencias (La frecuencia que se está transmitiendo y la frecuencia que se está recibiendo en la antena receptora).

Esta nueva tecnología presenta numerosas ventajas entre las que destacan la gran resolución de imagen, la capacidad de detectar blancos a pocos metros del radar, gran discriminación de blancos, así como su baja radiación y consumo, entre otros.

Aunque cabe mencionar que estos nuevos radares están aún enfocados a pequeñas embarcaciones de la náutica de recreo, su gran acogida y sus grandes prestaciones han hecho que su salto a la marina comercial esté cada vez más cerca.

JUSTIFICACIÓN

En la elección del presente trabajo, una de las premisas clave que me han hecho decidirme es la importancia que tiene el sistema radar en el ámbito marítimo. Y es que, como futura oficial de la marina mercante, el radar, es una herramienta idónea en la ejecución de mi labor diaria a bordo de un buque. Me pareció interesante desarrollar como trabajo de fin de grado la investigación sobre la Nueva tecnología de radar marino, en la que a diferencia de los radares de onda pulsada, emiten de manera continua modulando linealmente la frecuencia.

Para ello el trabajo se ha organizado de manera que consta de cinco capítulos:

CAPÍTULO I: SISTEMAS RADAR

En este capítulo hago una introducción sobre el sistema radar y los diferentes tipos que existen según determinados factores.

CAPÍTULO II: RADAR CONVENCIONAL DE ONDA PULSADA

En este capítulo desarrollo el radar de onda pulsada que es el que actualmente predomina a bordo de los buques. Llevo a cabo una explicación de su funcionamiento y sus partes para poder entender las diferencias con la nueva tecnología.

CAPÍTULO III: RADAR FMCW

En este capítulo se hace una introducción de esta tecnología radar, su historia, sus aplicaciones más comunes, así como su funcionamiento práctico y teórico y por último los elementos que lo componen.

CAPÍTULO IV: RADAR DE PULSO Vs RADAR FMCW

En este capítulo llevo a cabo una comparativa entre ambas tecnologías radar en orden desarrollar tanto las ventajas y desventajas de una tecnología frente a otra.

CAPÍTULO V: RADARES FMCW ACTUALES EN EL MERCADO

En este capítulo hago una presentación de algunos radares de diferentes fabricantes dotados de la nueva tecnología. En ellos se presentan las prestaciones generales y puntuales de cada radar en concreto.

He considerado oportuno hacer dicha división para adentrarnos en el tema de una manera organizada, de modo que los capítulos van de una visión general de los sistemas radar y su clasificación, hacia una visión más específica del radar convencional de onda pulsada y el radar FMCW, para seguir con una comparativa entre ambos y finalizar con la presentación de los radares actuales en el mercado que utilizan esta nueva tecnología radar.

En cuanto a la metodología utilizada, al tratarse de un trabajo de documentación ha sido mayormente mediante la consulta de fuentes bibliográficas como libros, trabajos de fin de grado, trabajos de fin de máster, y sobre todo, de artículos relacionados con el tema.

CAPÍTULO I: SISTEMAS RADAR

1.1. Introducción a los sistemas Radar.

El radar es un dispositivo cuya función es la detección de objetos y la determinación de su posición mediante la medición de direcciones y/o distancias, haciendo uso de las propiedades de las ondas electromagnéticas de radio.

El reglamento Internacional de Telecomunicaciones, lo define como: “*Sistema de radio determinación basado en la comparación entre las señales de referencia y las señales radioeléctricas reflejadas o retransmitidas desde la posición a determinar*”

1.2. Funcionamiento del Radar.

El funcionamiento del radar parte de una idea muy simple: Se transmite una señal, esta es reflejada en un objeto y devuelta al sistema. Es un efecto similar al eco producido por nuestra voz. La diferencia, el radar transmite ondas electromagnéticas, conocidas también como ondas de radio, de ahí el origen de su nombre Radio Detection And Ranging (Sistema de Detección y Distancia radio).

El radar emite una señal en forma de onda que incide en un objeto y es devuelta al radar. Una vez el radar recibe la onda emitida, calcula la información que sea útil de esta como el tiempo tardado en recibir la onda de vuelta, el cambio de frecuencia que sufre esta señal o la potencia a la que la recibimos, dependiendo del principio de funcionamiento del radar en cuestión. Esta información es procesada, extrayéndose datos tales como posición, velocidad, etc.

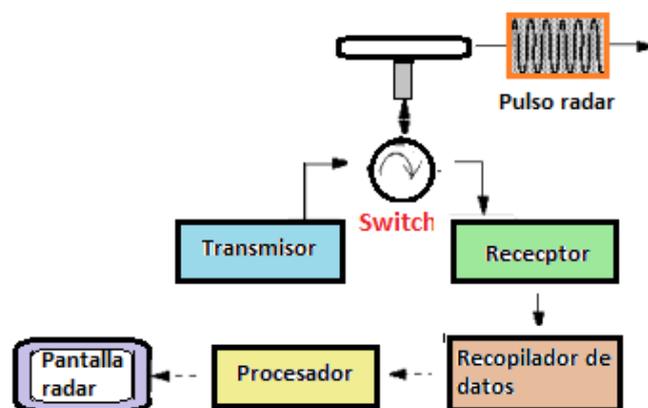


Figura 1.1. Diagrama de bloques de un radar de pulso. Fuente: Elaboración propia.

Una forma elemental de radar está formado por los siguientes componentes: transmisor, receptor, procesador y presentador. Todo empieza con la transmisión mediante la antena transmisora (en el caso de la ilustración la misma que la recepción). Esta emite una radiación electromagnética con una determinada potencia generada por algún tipo de oscilador. A continuación el conmutador (switch), hace que la antena cese la transmisión y pase a modo recepción (podrían ser dos antenas independientes siendo innecesario el conmutador). Parte de la señal transmitida incide en un objeto, esta es reflejada en él e irradiada en todas direcciones, una de las cuales será la dirección devuelta al radar. La antena receptora recibe la energía devuelta y la envía al receptor, de ahí al procesador, donde tras procesar la señal, se extrae información la cual será presentada de la forma que corresponda.

Los radares se pueden clasificar atendiendo a diversos criterios; según el número de antenas, según la frecuencia de trabajo, según su función (exploración aérea, exploración de superficie), según su objetivo (localización, detección, medida de velocidad, etc). Pero quizás la clasificación más oportuna enfocada al trabajo presente e incluso la más importante sea la clasificación según su modo de funcionamiento, dividiéndolos en radares de onda continua y radares de onda pulsada.

1.3. Clasificación de los sistemas Radar.

1.3.1. Radares de onda pulsada

Los radares de onda pulsada son bien conocidos por los marinos, pues estos son los radares predominantes a bordo de los buques mercantes. Estos radares se caracterizan por transmitir una señal de muy alta frecuencia con una gran potencia de forma pulsada. Tras este pulso le sigue un tiempo de silencio más largo con el fin de recibir la señal transmitida y escuchar el eco de la señal antes de volver a transmitir otro pulso. Con este tipo de radares se puede obtener dirección, distancia, velocidad del blanco, etc.

Estos radares pueden clasificarse a su vez según:

- **La frecuencia de repetición de pulso PRF:**
 - PRF alto (mayor que 30kHz)

- PRF medio (entre 3 y 30 kHz)
- PRF bajo (igual o menor a 3 kHz)

Hay que destacar que PRF bajos aportan gran precisión, grandes alcances y buenos resultados en medición de distancia, pero no son recomendados para medición del Doppler (velocidad).

Por otro lado, los PRF altos presentan la ventaja de que la potencia media de transmisión es superior y son muy aptos para la eliminación del clutter. Pero como contrapartida son muy imprecisos en la medición de distancia.

Debido a estas diferencias entre el uso de PRF alto y bajo, se suelen utilizar PRF medios para solucionar estas ambigüedades tanto en distancia como en velocidad.

- **La preservación de fase:**

- Radares coherentes, aquellos que preservan la fase.
- Radares incoherentes, aquellos cuya fase es arbitraria pulso a pulso.

En general, en los radares de onda pulsada hay tener en cuenta diferentes factores como son la distancia no ambigua, las distancias ciegas y la máxima velocidad no ambigua.

1.3.2. Radar de Onda Continua

La principal diferencia a destacar de este radar con respecto al de onda pulsada es que los radares de onda continua transmiten de forma ininterrumpida. Basan su funcionamiento en el efecto Doppler (variación aparente de la frecuencia debido al movimiento de los blancos). Pudiéndose clasificar según:

- **El número de antenas:**

- Biestático: Una antena de transmisión y otra de recepción.
- Monoestático: La antena de transmisión y recepción es la misma.
- Quasi-monoestático: La antena transmisora y la receptora están tan juntas que desde el punto de vista del blanco parece que sólo hay una antena.
- Multiestático: Combina la información recibida de varias antenas.

- **La forma de onda (en onda continua):**

-Sin modular (CW): Están basados en el desplazamiento de la frecuencia entre la señal recibida y la señal transmitida producido por el movimiento del blanco. Está basado en el efecto Doppler, y no es posible calcular la distancia, sólo velocidad del blanco.

-Modulado (FMCW): El sistema transmite una señal que varía dentro de un rango determinado de frecuencias durante un periodo de tiempo determinado por una señal de modulación. Entre las modulaciones más habituales se encuentran: Sinusoidal, diente de sierra o triangular.

- **Identificación del objetivo:**

-Radar primario: Basado en el funcionamiento básico, en el cual se detecta un blanco y se recibe el eco correspondiente.

-Radar secundario: La señal que proviene del blanco es la producida por una baliza, un repetidor o un transpondedor, obteniéndose cierta información de utilidad como es la identificación de aeronaves.

- **La finalidad del radar:**

-Radar de seguimiento: Destinados al seguimiento automático del objetivo.

-Radar de búsqueda: utilizados para la detección de blancos dentro de una zona de interés. Pueden ser utilizados para corto, medio y largo alcance.

1.4 Bandas de frecuencias utilizadas por el radar

Por último es importante tener en cuenta la frecuencia de trabajo del radar, pues la resolución del radar es determinada por esta. Es por ello que se distinguen diferentes bandas de trabajo de los sistemas radar, que a su vez, delimitan el tipo de aplicación para el que será utilizado. Las bandas de frecuencias son intervalos de frecuencias del espectro electromagnético asignados a diferentes usos dentro de las telecomunicaciones (tabla). Su uso está regulado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

En la tabla a continuación se puede ver las diferentes bandas de frecuencias utilizadas por el radar:

BANDA	RANGO DE FRECUENCIA NOMINAL	RANGO DE FRECUENCIA ESPECIFICADO PARA RADARES BASADOS EN ITU
HF	3-30 MHz	
VHF	30-300MHz	138-144 MHz 216-225 MHz
UHF	300-1000 MHz	420-450 MHz 850-942 MHz
L	1-2 GHz	1215-1400 MHz
S	2-4 GHz	2300-2500 MHz 2700-3700 MHz
C	4-8 GHz	5250-5925 MHz
X	8-12 GHz	8500-10680 MHz
Ku	12-18 GHz	13,4-14 GHz 15,7-17,7 GHz
K	18-27 GHz	24,05-24,25 GHz
Ka	27-40 GHz	33,4-36 GHz
V	40-75 GHz	59-64 GHz
W	75-110 GHz	76-81 GHz 92-100 GHz
mm	110-300 GHz	126-142 GHz 144-149 GHz 231-235 GHz 238-248 GHz

Tabla. 1.1. Bandas de Frecuencias Radar.

CAPÍTULO II: RADAR CONVENCIONAL DE ONDA PULSADA

2.1. Orígenes del sistema Radar.

Para conocer los orígenes del RADAR debemos remontarnos a la aparición de la rama de la física que lo hace posible, el electromagnetismo. Faraday es mejor conocido por su trabajo relacionado con electricidad y el magnetismo. Los estudios de Faraday tuvieron una transcendencia tal que sirvieron para que, en 1864, James Clerk Maxwell describiera las leyes del electromagnetismo mediante una famosa presentación oral presentada en la Royal Society.

Si bien su definición no es igual que aquella con la que contamos hoy día, sus aportes fueron suficientes para que más tarde, en 1888, el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz demostrara mediante una serie de experimentos que las ondas de radio (ondas electromagnéticas) se reflejaban en objetos sólidos. Con el descubrimiento de que era posible producir y recibir ondas electromagnéticas comenzó una nueva era de investigación respecto a las ondas electromagnéticas y su uso.

El primer sistema anticolidión de buques utilizando ondas electromagnéticas conocido aparece en Alemania en 1904, de la mano del inventor alemán Christian Hülsmeier (Medel, 2). Este sistema fue llamado 'Telemobiloscopio', y, aunque se conozca como el primer sistema anticolidión de buques, no se considera el primer sistema RADAR, ya que no era posible conocer la distancia al eco presentado. Tras el gran desastre del Titanic en 1912, se comprobó que las radio comunicaciones durante el hundimiento del mismo fueron útiles, por lo que el uso de ondas de radio vio incrementada su popularidad.

En los años anteriores a la segunda guerra mundial, los experimentos y descubrimientos que se llevaron a cabo fueron realizados de forma secreta, lo que conllevó a que en distintas partes del mundo se alcanzaran descubrimientos diferentes.

Alemania: El científico Prof. Dr. Hans E. Hollmann, en colaboración con su buen amigo el Científico Hans-Karl von Willisen crearon la compañía GEMA junto con el Sr. Guenther Erbsloeh. Estos tres señores se dedicaron al estudio de las ondas electromagnética, y para 1935 habían desarrollado el primer RADAR útil. Este RADAR, conocido con el nombre de *Freya*, era para uso terrestre. Realizando un

cambio en la longitud de onda, y usando el mismo sistema, consiguieron realizar un RADAR de uso marino, que se conoció bajo el nombre de *Seetakt*.

Inglaterra: En 1935 Robert Watson-Watt consiguió detectar y seguir un avión a una distancia de 38 millas. En 1936, el mismo Watt construyó la primera red de detección de Inglaterra, que se conoció como *Chain Home*. Este RADAR desarrollado por Watt fue una ventaja notable para las fuerzas aéreas británicas y de hecho, ese modelo constituye la base del actual RADAR (Medel, 2-3). En 1940, John Randall y Harry Boot realizaron un prototipo funcional de radar que más tarde se instaló en todos los bombarderos de Inglaterra.

El desarrollo del mangetrón de cavidades resonantes ideado por el también británico Eric Stanley Megaw dio a los equipos RADAR la posibilidad de trabajar en la banda de ondas centimétricas, lo que redujo el tamaño de los equipos y aumentó la precisión de los mismos.

Estados Unidos: En 1922 los científicos Albert Hoyt Taylor y Leo Crawford Young llevaron a cabo un experimento en el río Potomac, en el que a una orilla pusieron un transmisor y a la otra un receptor. Observaron que al paso de una embarcación, ésta provocaba interferencias en la señal. Ante este descubrimiento, se pensó que podría usarse este sistema para detectar buques en situaciones de baja visibilidad.

El término RADAR es acuñado por Estados Unidos en el año 1940 como significado de Radio Detection And Ranging.

Finalizada la guerra, se seguirá investigando sobre el RADAR, y éste comenzará a utilizarse en los buques mercantes. El tamaño de los aparatos se vio drásticamente reducido después de que, en 1947, se inventara el transistor en los laboratorios Bell.



Figura 2.1. El primer RADAR informatizado del mundo. Fuente: Kongsberg maritime.

Con el nacimiento de los componentes microelectrónicos en la década de 1960, y lo barato que resultaba su fabricación, la tecnología avanzó a pasos agigantados, lo que trajo mejoras en los equipos de navegación. Uno de esos equipos de navegación fue el RADAR, que presenció cómo aparecía su componente más clásico, el sistema ARPA, que fue comercializado por primera vez en 1969 por la empresa *Norcontrol* (Kongsberg norcontrol). Este RADAR sería conocido como *El primer RADAR informatizado del mundo*, e incluía un RADAR con un sistema de punteo automático capaz de calcular las características cinemáticas del objetivo.

2.2. Fundamentos del Radar.

El radar, tal como se usa en la navegación, es una herramienta que permite determinar distancia mediante la medición del tiempo que transcurre entre la emisión de una señal y la recepción de la señal reflejada en un objeto o blanco. El sistema de modulación empleado en el radar marino convencional es de modulación por impulsos, en el que el emisor cada cierto tiempo transmite un impulso de corta duración de radio frecuencia.

El pulso de transmisión de un sistema RADAR-ARPA, es la cantidad de energía que la antena del equipo emite. Esto permite que, a más energía, la señal tenga más alcance, produciendo un mayor resalto de los ecos (este resalto será proporcional a la cercanía del mismo). Las propiedades que caracterizan un impulso son las siguientes:

- **Duración:** El tiempo que transcurre tras la emisión de un impulso. La duración del mismo condiciona directamente el alcance mínimo del radar, pues mientras está emitiendo no puede recibir las señales reflejadas. La duración para escalas pequeñas suele ser entre 0,05 y 1 microsegundo.
- **Frecuencia de repetición:** Es el número de impulsos transmitidos en un segundo. Esta cantidad depende de la velocidad de giro de la antena, ya que a mayor velocidad de giro, deberá corresponder una mayor frecuencia de repetición de impulsos. El valor superior lo fija el alcance máximo deseado por el radar. Habrá que esperar un tiempo suficiente para que puedan regresar los impulsos reflejados a la distancia máxima que deseamos alcanzar. A mayor alcance corresponderá una menor frecuencia de repetición de impulsos. En los radares marinos su valor es de 750 a 3000 impulsos por segundo. Se le conoce por la abreviatura anglosajona PRF (Pulse Repetition Frequency)
- **Potencia pico:** Es la potencia máxima de emisión, de ella dependerá el alcance, ya que al ser mayor ésta, con mayor intensidad se recibirá la señal reflejada. La potencia pico sólo se alcanza en el instante de la emisión, descansando durante los relativamente largos periodos de recepción. Los valores pueden alcanzar los 1000 kW.

En el equipo radar convencional de un buque mercante actual encontramos dos tipos de impulso, un pulso corto y otro pulso largo, que dependiendo del equipo tendrá unas características (energía transmitida, frecuencia, longitud de pulso, velocidad de rotación de la antena, etc.). Cada equipo puede diferir en estas características respecto a otro, aunque los valores son bastante parecidos ya que deben cumplir los valores mínimos de la resolución de la IMO A.477 (XII): Estándares de funcionamiento de los equipos RADAR. En la siguiente tabla se comparan ambos pulsos para diferentes situaciones:

	IMPULSO CORTO	IMPULSO LARGO
Detección a gran distancia	Pobre	Buena
Detección a corta distancia	Buena	Pobre
Interferencia por olas	El riesgo de enmascaramiento es menor	El riesgo de enmascaramiento es mayor
Interferencias por precipitación	El riesgo de enmascaramiento es menor	El riesgo de enmascaramiento es mayor pero la capacidad de detectar blancos que se encuentren detrás de los chubascos aumenta.
Efectos sobre el dibujo del eco	Los blancos situados a corta distancia se presenta con claridad	Los blancos situados a distancias medias y largas presentan claridad notable
Discriminación de distancia	Buena	Pobre

Tabla 2.1. Comparación de pulsos para diferentes situaciones.

2.3. Bandas de trabajo del sistema RADAR convencional

El concepto banda de trabajo hace referencia a las frecuencias en las que un equipo (en este caso el RADAR) transmite. Dependiendo de la banda en la que se encuentre la emisión, se le otorgará una clasificación. Esta clasificación comprende un rango de frecuencias y de longitudes de onda, aunque la longitud de onda se puede considerar implícita, ya que la clasificación solo habla de las frecuencias.

El sistema RADAR ofrece la posibilidad de trabajar en dos frecuencias. Ambas frecuencias se clasifican en el espectro de S.H.F. (Super High Frequency), que incluye las frecuencias desde 3GHz, hasta 30GHz. En nuestro caso, (Radar convencional de pulso) encontraremos dos posibilidades: La Banda S (de 3GHz de frecuencia y 10cm de longitud de onda), o la Banda X (de 9.4 GHz de frecuencia y 3cm de longitud de onda), cada una tiene sus ventajas, y sus preferencias en función de la situación, no siendo posible transmitir en ambas a la vez. Por ejemplo, el SART2 emite en banda X, por lo que para asegurarnos la recepción de dicha señal, será necesario que nosotros estemos en esa banda de trabajo.

En función de la situación, una banda presenta mejores prestaciones que la otra, como podemos ver a continuación. Por esta razón los buques mercantes están dotados de dos radares uno en banda X y otro en Banda S.

- **Detección de blancos:** La banda X presenta los ecos de forma más nítida.
- **Horizonte RADAR:** La banda S nos permitirá un horizonte algo mayor que la banda X.
- **Interferencias del mar:** Ante una posible interferencia producida por el mar, la banda S es la que tendrá menos problemas, es decir, se necesitará condiciones muy desfavorables del mar para que éste produzca interferencias en banda S.
- **Atenuación por la precipitación:** Ante una precipitación, la atenuación producida será menor en la banda S que en la banda X.
- **Discriminación en demora:** La capacidad para diferenciar ecos depende del ancho de señal con el que cuente la emisión, cuanto mayor sea éste, más difícil será que diferencie dos ecos muy juntos a una distancia media. Ante esta característica, cabe

destacar que el ancho del haz horizontal en banda S es unas 3 veces mayor que el que hay en banda X.

Estructura vertical del haz: En el caso del haz vertical, ocurre exactamente lo mismo que en su componente horizontal. Depende del ancho que tenga el haz vertical, el buque contará con un sector ciego o con otro, y esto permitirá detectar ecos más cercanos o menos, y diferenciarlos o confundirlos, como veíamos en la ilustración anterior en el caso del haz horizontal. En este caso también en la banda S contaremos con un haz vertical de unas 3 veces superior al de la banda X.

• **Interferencia por lluvia:** Si usamos la banda S, será más difícil que un eco se nos enmascare debido a la lluvia.

2.4. Unidades que componen un equipo radar de onda pulsada

Fuente de alimentación: Es la encargada de proporcionar todos los voltajes necesarios para la operación de los componentes del sistema.

Transmisor: Genera la energía de radiofrecuencia en forma de cortos y poderosos impulsos. Está formado por una unidad disparadora (trigger), un modulador, un magnetrón y una guía de ondas.

- La unidad disparadora determina y controla la frecuencia de repetición de los impulsos o cadencia de los mismos, de acuerdo con la base de tiempo, su valor suele ser de 400 a 4000 impulsos por segundo.
- Modulador: Es el encargado de asegurar que todos los circuitos conectados con el sistema radar operen perfectamente sincronizados entre sí y controla los impulsos de radiofrecuencia que se van a emitir, determinando la forma, duración, frecuencia y potencia de los mismos.
- Magnetrón: Se trata de un oscilador especial encargado de la generación de un impulso de radiofrecuencia de muy corta duración.
- Guía de ondas: Diseñada para conseguir una adecuada conducción de las ondas y es que a través de ella los impulsos de radiofrecuencia llegan a la

antena. Consiste en un tubo de cobre cuyas dimensiones dependerán de la longitud de onda empleada.

Sistema de antena: La misión de la antena es recibir la energía de radiofrecuencia del transmisor y radiar esta energía en una emisión altamente direccional y giratoria, así como recibir los ecos o reflexiones de los impulsos emitidos desde los blancos, y enviarlos al receptor.

Receptor: Su misión es amplificar los débiles ecos recibidos, a fin de que puedan distinguirse en la pantalla, por encima del ruido de fondo, y pasarlos luego a la unidad de presentación visual, para ello el receptor está provisto de un amplificador de frecuencia intermedia FI, necesario para la producción de señales de video, utilizadas en la U.P.V.

Unidad de presentación: Produce la indicación visual de los pulsos de eco, en forma tal que proporciona la información deseada con una presentación visual de las demarcaciones y distancias de los ecos que recibe del Radar. Costa de un tubo de rayos catódicos, con sus accesorios como el flip-flop, la base de tiempo, el indicador de proa y el amplificador de video.

2.5. Evolución histórica del sistema RADAR-ARPA

El sistema ARPA es una herramienta que se encuentra totalmente integrada en la vida diaria del puente de navegación de prácticamente cualquier buque. Este sistema, integrado en el RADAR, nos realiza de forma automática el seguimiento de un eco preseleccionado, manteniéndonos informados de sus rumbos verdadero y relativo, velocidades verdaderas y relativas, situación en la pantalla, demora, y, en definitiva, cualquier información cinemática de dicho objetivo y cualquier información que nos pueda ser de utilidad.

El RADAR da el terreno de juego al ARPA, siendo éste el encargado de traducirnos en una pantalla la información recibida por la antena de ondas electromagnéticas. La antena RADAR emitirá ondas electromagnéticas que, al encontrarse con un obstáculo en el que puedan reflejarse, devolverán dicha onda y ésta llegará a la antena RADAR receptora. Ese reflejo de la onda electromagnética, que no es más que una interferencia de la señal emitida, llegará a un equipo traductor, que se encargará de mostrarnos la señal tal como nosotros la vemos en nuestra pantalla RADAR.

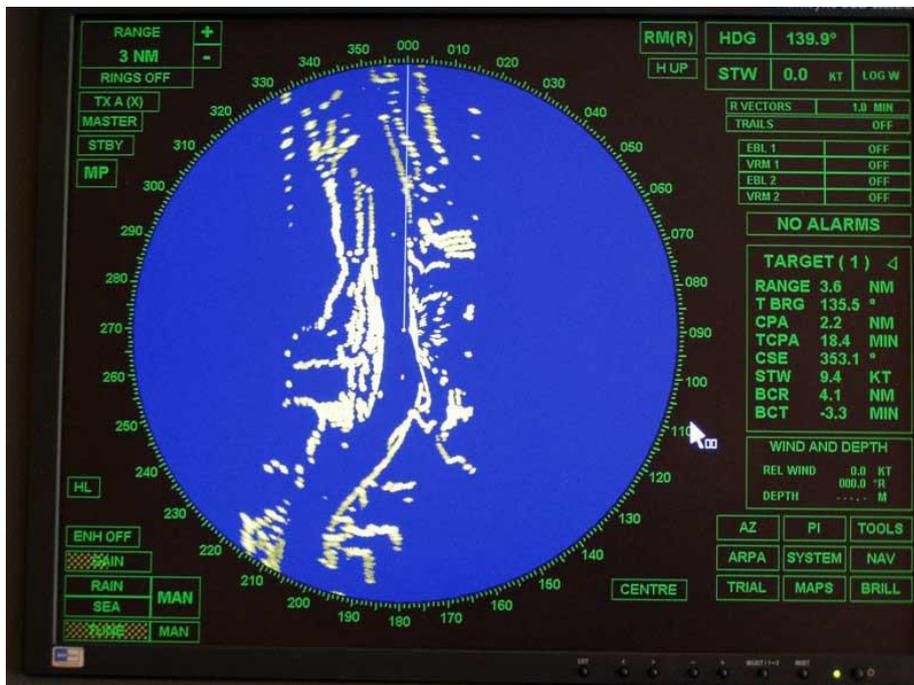


Figura 2.2: Representación de una pantalla actual de un sistema RADARARPA.
Fuente: Maritraining.

2.5.1 Marco normativo del sistema RADAR-ARPA

El sistema ARPA aparece como obligatorio para buques a partir de 10,000 GT en la regla 19, 2.8.1, del capítulo V del SOLAS. Concretamente entró en vigor el 5 de diciembre del año 2000, mediante una enmienda al texto de 1974, que prácticamente modificó el capítulo V entero y en el que se incluyó, entre otras cosas, este apartado 2.8.1. en el que se referencia al ARPA.

En el SOLAS además podemos encontrar varios anexos. En concreto el Anexo 16, llamado *Equipamiento Radar*, habla sobre las características mínimas que debe tener el ARPA a usar: Los equipos ARPA deben de ser capaces de adquirir objetivos de forma manual o automática y debe ser capaz de llevar a cabo el seguimiento automático y mostrar la información de al menos 20 objetivos para la toma de decisiones anticolidión. También deberán contar con la opción de maniobra de pruebas (IMO).

El Reglamento Internacional Para Prevenir los Abordajes en la mar (RIPPA en sus siglas) hace referencia al ARPA en varias de sus reglas, si bien no nombrándolo directamente ya que es un reglamento general para buques, y recordamos que el sistema tratado solo es obligatorio para buques de 10,000 GT o más.

- Regla 5: Vigilancia. Aquí se incluiría el ARPA como medio para la evaluación de la situación y del riesgo de abordaje.
- Regla 6: Velocidad de seguridad. Aquí existe un apartado (el b) exclusivo para buques con un RADAR funcionando correctamente. En las características del mismo habría que incluir el sistema ARPA si el buque estuviera obligado a llevarlo.
- Regla 7: Riesgo de abordaje. En esta norma se insta a los buques a utilizar todos los medios a bordo para determinar si existe o no existe riesgo de abordaje. Como ocurría en la regla 5, habrá que incluir el equipo ARPA si el buque tiene la obligatoriedad de llevarlo.
- Regla 19: Conducta de los buques en condiciones de visibilidad reducida. La norma dicta que se usará el RADAR para determinar si existe una situación de aproximación excesiva o de riesgo de abordaje. Habrá que incluir el uso del ARPA si el buque está obligado a llevarlo

El Convenio sobre normas de formación, titulación, y guardia para la gente del mar (STCW por sus siglas en inglés) contiene las directrices y los requisitos a seguir para la formación de los usuarios del equipo ARPA, siendo éste curso obligatorio para todos los oficiales de marina mercante de buques que tengan la obligación de llevar dicho equipo (IMO). Aunque hoy día es recomendable para todos los oficiales de buque, ya que el sistema ARPA está instalado en la mayoría de los buques por su utilidad y por el hecho de que el equipo RADAR hoy día casi siempre se vende como equipo RADAR-ARPA.

La IMO2 tiene una serie de recomendaciones para la guardia en la navegación, y en ellas aparece el RADAR de la misma forma que ocurría en el RIPPA.

- Sección I.

- Disposiciones para la guardia (4). Aquí se comenta que habrá que tener en cuenta en la

2 *International Maritime Organization* (Organización Marítima Internacional en español). toma de decisiones los equipos y ayudas a la navegación, incluyendo el RADAR, que será ARPA obligatoriamente si es de 10,000GT o más.

- Navegación (8). Se insta a comprobar la situación del buque usando los equipos disponibles a bordo.

- Sección II.

- Ayudas electrónicas a la navegación (13). Cuando se habla de que el oficial deberá estar perfectamente familiarizado con los equipos que hay en el barco, debemos incluir el

RADAR, y el sistema ARPA si el buque lo lleva.

- Radar (16-20). Se habla del uso del radar, en qué condiciones y con qué fines, y teniendo en cuenta sus capacidades y limitaciones. Aquí podría incluirse el ARPA si el buque lo llevara.

(De Simón 2008, 122-9).

Por último, la asamblea de la IMO, a lo largo de los años ha sacado una serie de resoluciones que hacen referencia directa al ARPA, y que establecen preceptos en lo que respecta a su uso, sus características, o el aprendizaje que deben recibir los usuarios, entre otros.

- Resolución A.422 (XI). Estándares de actuación del ARPA.
- Resolución A.482 (XII). Entrenamiento en el uso del ARPA.
- Resolución A.813 (19). Requisitos generales de compatibilidad electromagnética para todos los equipos electrónicos y eléctricos del buque.

CAPÍTULO III: RADAR FMCW

3.1. Radar de onda continua y frecuencia modulada.

En un sistema radar, la detección y el cálculo de la distancia a un objetivo se realiza mediante la transmisión de energía electromagnética y observando la señal del eco reflejada por el objeto. Un sistema radar utiliza señales pulsadas u ondas continuas.

Cómo expliqué en el capítulo anterior, en los radares pulsados el transmisor emite una ráfaga corta de energía electromagnética y el receptor del sistema escucha la señal del eco después de transmitir la señal. A partir de la señal de eco recibido se puede conocer la situación de un objetivo, ya que mediante la diferencia de tiempo entre la señal transmitida y la recepción de la señal del eco, podemos obtener fácilmente la distancia.

Sin embargo, en el caso de un radar de onda continua (CW), el transmisor está enviando continuamente una señal, por lo que la obtención de información mediante la diferencia entre la señal transmitida y la señal recibida no es posible, ya que no hay ráfagas de señales transmitidas y recibidas.

Para poder obtener información de la distancia a un blanco en los radares de onda continua es necesaria una técnica factible, es decir, una marca de tiempo, para separar la señal recibida de la señal transmitida y poder calcular la diferencia de tiempo entre ellos.

Esto no quiere decir que un sistema radar sea mejor que otro pues, en algunas aplicaciones, los radares pulsados tienen más ventajas sobre los radares de CW y en otras aplicaciones los de onda continua presentan mejores ventajas que los pulsados. Dentro de este grupo de radares CW se pueden diferenciar dos opciones según:

No modulados: en algunas aplicaciones de medida de velocidad, esta puede obtenerse mediante la observación del desplazamiento Doppler de las señales reflejadas por blancos móviles. La emisión de una portadora no modulada es suficiente en este caso, simplificando así el diseño del radar. Sin embargo, al no existir referencias temporales en la señal no es posible determinar la distancia de los blancos.

Modulados: en aquellas aplicaciones que requieren estimar tanto la velocidad como la distancia del blanco es preciso introducir una modulación en la señal radiada. En un sistema CW la amplitud de la señal es constante y la modulación habitualmente utilizada es una de frecuencia lineal. Ambos radares, tanto los de onda continua modulados y los no modulados tienen numerosas áreas de aplicación

3.2. Historia del radar FMCW.

La idea de usar señales de frecuencia modulada para reflejar en un blanco (objetivo) es de todo menos nueva, pues ya por la década de 1920 estas señales fueron utilizadas para la investigación de la Ionosfera. La aplicación práctica del radar de onda continua y frecuencia modulada (FMCW) comenzó en 1928, cuando J.O Bentley archivó la patente estadounidense en un “Sistema de indicación de altitud de un avión”.

El radar de Bentley era muy simple (figura 4.1). La frecuencia del transmisor se modula mediante una modulación triangular de la onda (figura 4.2), utilizando un motor eléctrico que gira con un condensador ajustable.

La energía transmitida es irradiada hacia la superficie. El aislamiento existente entre la antena de transmisión y la antena receptora es limitado por lo que una pequeña fracción de la energía transmitida (la señal directa) entra en la antena receptora junto con la señal reflejada desde la superficie. El circuito de entrada del receptor se sintoniza para que coincida, en cualquier momento, con la frecuencia del transmisor.

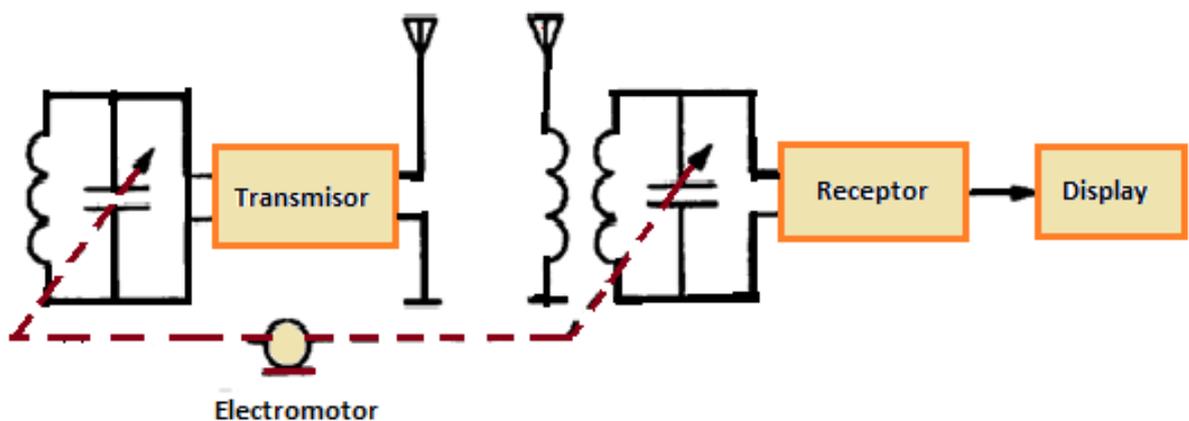


Figura 3.1. Diagrama de bloque del radio altímetro de Bentley. Fuente:

“Fundamentals of short-range FM radar”.

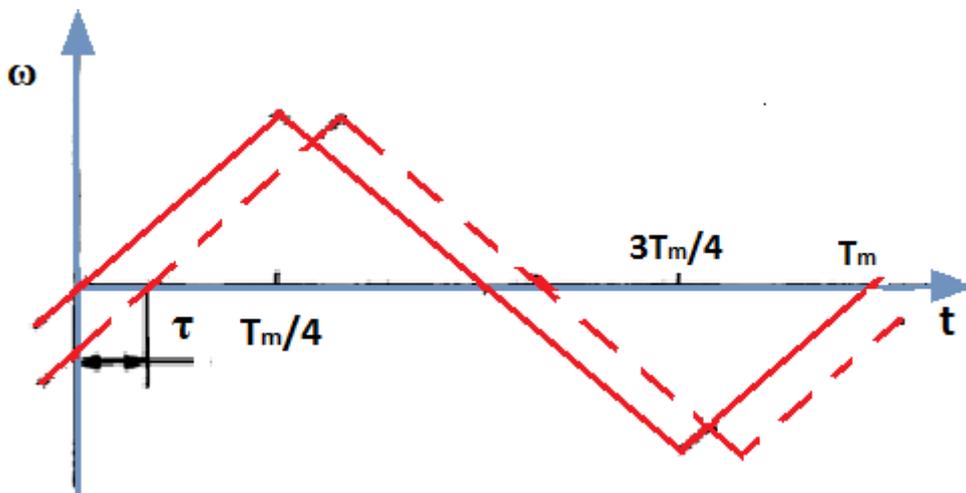


Figura 3.2. Frecuencia instantánea de las señales emitidas y recibidas. Fuente: “Fundamentals of short-range FM radar”.

Como se puede observar en la figura 4.2, la frecuencia de la señal reflejada difiere ligeramente de la de la transmisión, siendo retrasada por un tiempo τ que es constante, excepto para intervalos cortos.

Las aplicaciones industriales de esta idea comenzaron a finales de la década de 1930, cuando la banda de ultra alta frecuencia comenzó a explotarse. La agilidad mecánica del transmisor permitió el desvío de frecuencia necesario (De -20 a 30 MHz). El procesamiento de la señal tras pasar el mezclador se realizó en una banda de muy baja frecuencia. Antes de la segunda Guerra mundial, primeramente aviones militares y posteriormente aeronaves civiles, empezaron a aplicar Radio-altímetros de FMCW (Onda continua y frecuencia modulada). La razón básica de esta amplia aplicación fue que el radar ilustrado era muy simple y por lo tanto confiable.

En la actualidad, un radio-altímetro de baja altitud de FMCW es un elemento imprescindible dentro de los equipos de la mayoría de aeronaves militares y civiles, y también para las operaciones de aterrizaje de los vehículos espaciales.

La mayor parte de los trabajos teóricos sobre el radar de onda continua y frecuencia modulada (FMCW) se publicaron durante el periodo de los años 40 a los años 60. Y

es que además de la radio altimetría, los radares FMCW se desarrollaron para muchas áreas de la industria civil, como por ejemplo la marina mercante.

Por otro lado, la teoría y la ingeniería del radar de pulso comenzaron a desarrollarse poco después de finales de los años treinta. A partir de ese momento la mayor parte del desarrollo posterior de la ingeniería radar fue enfocado al radar de pulso, que cumplía con la mayoría de los requisitos de la ingeniería militar y civil así como aplicaciones industriales.

El radar de FMCW, se encontró pues, a la sombra del radar de pulso. Fue en gran parte olvidado, y sólo se recurría a él cuando se necesitaba medir rangos muy pequeños, de fracciones de un metro a algunos metros.

Ejemplos primarios de su uso en el campo militar son los fusibles de proximidad para proyectiles de artillería, misiles y para sistemas de detección de blancos móviles. Los principales avances han sido respaldados gracias al desarrollo de la tecnología basada en longitudes de onda de centímetro y milímetro y la microelectrónica.

En la industria civil, por su parte, se ha desarrollado y aplicado a gran escala para medir niveles de líquidos, pastas o productos parecidos a polvos en tanques cerrados. A este equipo se le denomina “Radar de medición de nivel”.

3.3. Ventajas y aplicaciones del radar FMCW.

El uso del radar de FMCW está presente en numerosos campos tanto civil como militar, Pero antes de hablar de ellos es necesario presentar las ventajas que hacen de esta tecnología una forma atractiva de resolver problemas de detección y localización:

- Capacidad para medir con alta precisión rangos muy pequeños al objetivo, siendo el rango mínimo medido comparable a la longitud de onda transmitida.

- Capacidad para medir simultáneamente la distancia al objetivo y la velocidad relativa del mismo con respecto al sistema radar.
- Pequeño error de medida de alcance, que con algunos métodos de procesamiento está dentro de centésimas de un por ciento.
- El procesamiento de la señal después de la mezcla se realiza en un rango de frecuencias, conmensurable con la frecuencia de modulación, es decir, en una banda de frecuencias de cientos de hercios hasta cientos de kilohercios, esto simplifica considerablemente la realización de los circuitos de procesamiento.
- Mayor seguridad debido a la ausencia de radiación de pulso.
- La modulación de estos radares es compatible con transmisores de estado sólido, y además representa un mejor uso de la potencia de salida disponible en estos dispositivos.
- Compactidad, las dimensiones de un radar usando tecnología moderna están determinadas por las dimensiones del bloque de microondas.
- Pequeño peso y bajo consumo de energía debido a la ausencia de altas tensiones en el circuito.
- Buen funcionamiento para diferentes tipos de clima y condiciones atmosféricas como lluvia, nieve, humedad, niebla y condiciones de polvo.
- Puede detectar gran variedad de materias no metálicas, como madera, hormigón, ladrillos, polímeros, etc. Por lo que hace que el radar FMCW se adecuado para detectar objetivos a través de ellos.
- Sus reducidas dimensiones, su simplicidad y la economía de los sistemas del radar FMCW fueron las razones básicas de su amplia aplicación en muchas áreas como la aviación, militar, la seguridad, la navegación, la automoción, etc.

3.4. Aplicaciones donde se utiliza el radar FMCW

Radio altímetro

El altímetro de radar es una de las primeras aplicaciones del radar FMCW que mide la altitud sobre el terreno y se utiliza para aviones o naves espaciales. Proporciona la distancia entre el plano y el suelo. Este tipo se utiliza especialmente para aterrizar en condiciones de baja visibilidad. También es muy crítico en los vuelos de baja altitud y se utiliza como sistema de evitación del terreno.

Fusible de proximidad

Un fusible de proximidad está diseñado para detonar un explosivo automáticamente cuando la distancia a la blanco llega a ser menor que un valor predeterminado. El fusible de proximidad fue inventado en el Reino Unido pero desarrollado principalmente por los EE.UU. (con la colaboración británica) durante la Segunda Guerra Mundial.

Radar medidor de nivel

Los radares de medición de nivel se utilizan con mayor frecuencia en tanques de líquidos. El funcionamiento es muy simple: La antena del transceptor se coloca en la tapa del tanque. El ancho del haz de la antena no es muy grande y apunta verticalmente hacia la superficie del líquido. Mide el intervalo R desde arriba hasta el nivel de líquido. Como la distancia H desde la antena hasta el fondo del tanque es conocida, el nivel es del depósito se determina mediante una simple resta: $L = H - R$.

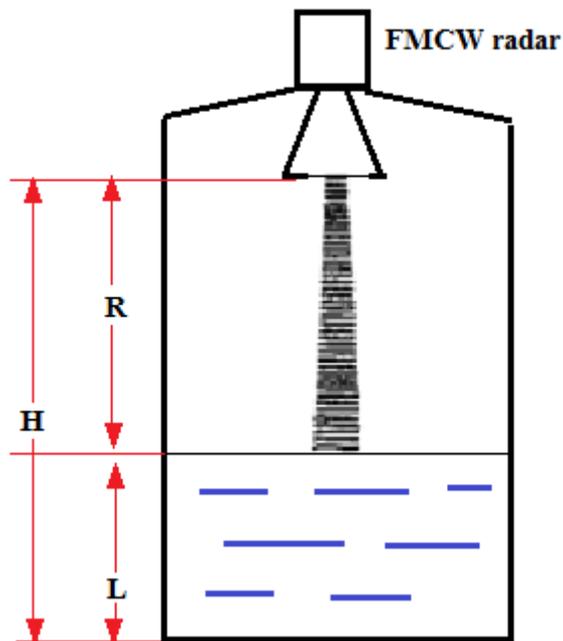


Figura 3.3. Radar medidor de nivel. Fuente: “Fundamentals of short-range FM radar”.

Radares de navegación

El radar de FMCW puede aplicarse a radares de navegación con rangos de hasta varios kilómetros. Esto no quiere decir que el rango de operación del radar FMCW esté intrínsecamente limitado a varios kilómetros, ya que rangos más grandes son totalmente viables, lo que actualmente los radares de pulso son los utilizados para tales fines.

Por ello el radar FMCW en la navegación ha tenido una mayor utilidad a intervalos cortos, desde decenas hasta cientos de metros (por ejemplo para la vigilancia del tráfico marítimo, vigilancia del tráfico en los puertos para condiciones de baja visibilidad). Y es que puede utilizarse no solo para buscar en la superficie del agua del puerto sino para medir el alcance y la velocidad relativa de objetivos dentro del mismo. Además, la capacidad de medir rangos muy cortos (fracciones de un metro) lo hacen perfecto para su uso en maniobras de atraque y las maniobras dentro del puerto. Debido a su reducido tamaño, simplicidad y economía se puede colocar un radar FMCW en proa y popa para medir la distancia en este tipo de situaciones,

convirtiéndose en una herramienta muy valiosa para la seguridad del buque en una de las operaciones más críticas como es el atraque.

Aunque como bien dije, el uso del radar de pulso en la marina mercante es de uso generalizado y hasta ahora ha acaparado el mercado, pero eso puede estar cambiando. Ya que fabricantes de radares están apostando por la tecnología FMCW para sustituir a los radares de pulso a bordo. Actualmente está siendo enormemente aceptado por la marina de recreo y pronto comenzaran a verse en los grandes buques mercantes.

Radar anti-colisión para vehículos

Se han desarrollado sistemas de alerta de colisión de vehículos en respuesta al considerable crecimiento del tráfico en las ciudades. Este sistema por lo general incluye cuatro radares ubicados en la parte delantera, la cola y en los retrovisores. El radar frontal es crítico, proporciona rango continuo y velocidad relativa para los objetivos y si es necesario, se genera una señal de peligro que puede activar el sistema de frenos.

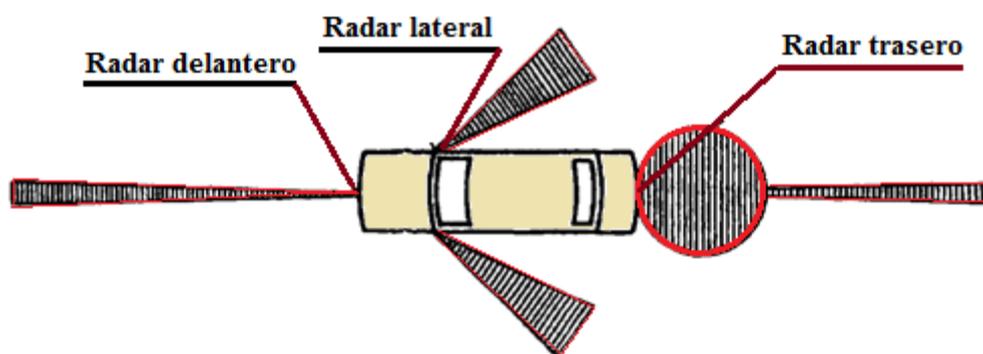


Figura 3.4. Zonas de cobertura del sistema de aviso de colisión de vehículos. Fuente: “Fundamentals of short-range FM radar”.

Medición de movimientos muy pequeños.

Una situación típica donde el rada FMCW hace una función importante es en la observación de vibraciones de varios componentes de máquinas y mecanismos.

Además estas mediciones están expuestas, probablemente a altas temperaturas. Por lo que el radar FMCW es capaz de medir movimientos muy pequeños operando en ambientes y temperaturas agresivas.

Monitorización para objetivos fijos.

El radar FMCW, como ya he dicho está dotado de un buen comportamiento en malas condiciones de intemperie y visibilidad. Esta característica lo convierte en la herramienta perfecta para funciones de vigilancia a la hora de detectar avalanchas y glaciares en la nieve, mediante la instalación de grandes reflectores RCS en la superficie del glaciar o avalancha. Por lo tanto, un radar de FMCW instalado en la cima de una montaña cercana está midiendo automáticamente los cambios de movimiento de los glaciares y posibles avalanchas.

La lista de áreas de aplicación de esta tecnología radar puede seguir aumentando, sin embargo, las aplicaciones citadas son suficientes para mostrar que los radares de onda-continua y frecuencia-modulada tienen un uso extensivo. Pensando en las ventajas y aplicaciones mencionadas, no es sorprendente que la medición de diferentes parámetros de un objetivo utilizando los sistemas radar de FMCW haya sido un área de investigación activa en las últimas décadas.

3.5. Funcionamiento Radar FMCW

3.5.1. Modulación lineal de la frecuencia

A diferencia de los sistemas CW tradicionales, los radares FMCW pueden variar su frecuencia de trabajo durante la medida, es decir, la señal transmitida por este tipo de radar se encuentra modulada en frecuencia. Dicha modulación de la frecuencia proporciona la capacidad para medir distancias ya que la modulación proporciona una referencia temporal.

Si además la frecuencia de modulación es lineal, también conocida como Chirp, el proceso de análisis de las señales de eco se simplifica considerablemente. Comúnmente, en los sistemas rada FMCW se utilizan dos tipos de modulación, diente de sierra y modulación triangular

- **Diente de sierra:**

Puede ser tanto ascendente en tiempo (up-chirp) como descendente (down-chirp). En la figura nº y nº se puede observar la evolución temporal de la frecuencia instantánea y la forma de onda.

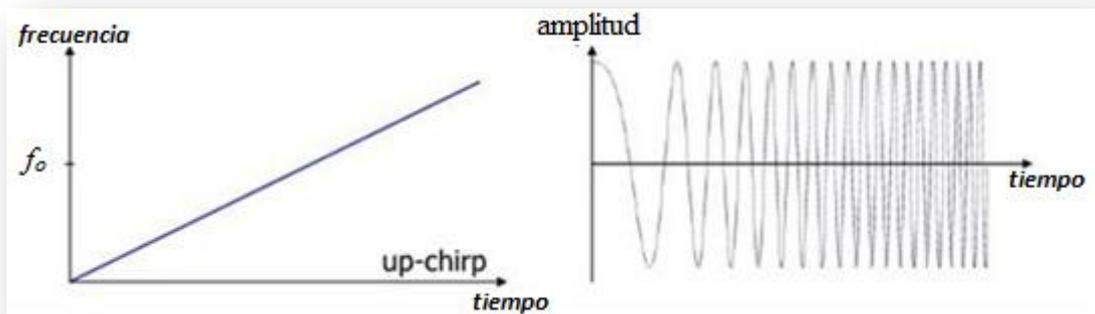


Figura 3.5. Modulación lineal diente de sierra (up-chirp) Fuente: "Diseño y validación de un radar CW-FM a 94 GHz".

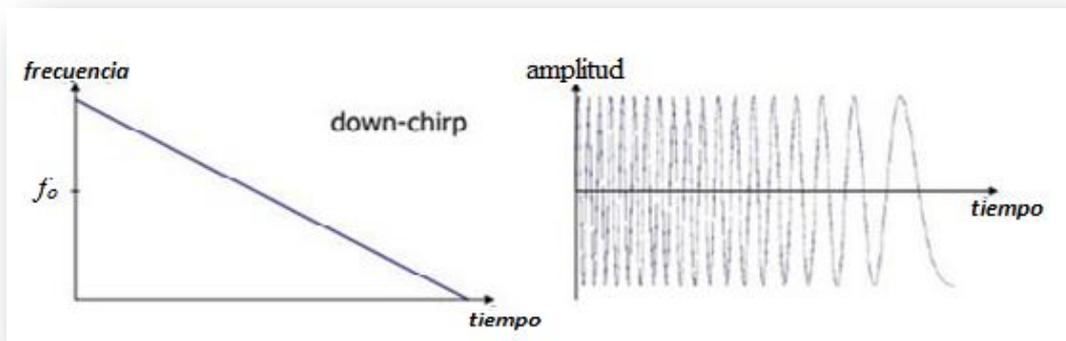


Figura 3.6. Modulación lineal diente de sierra (down-chirp). Fuente: "Diseño y validación de un radar CW-FM a 94 GHz".

- **Triangular:**

Puede entenderse como una combinación de las dos anteriores.

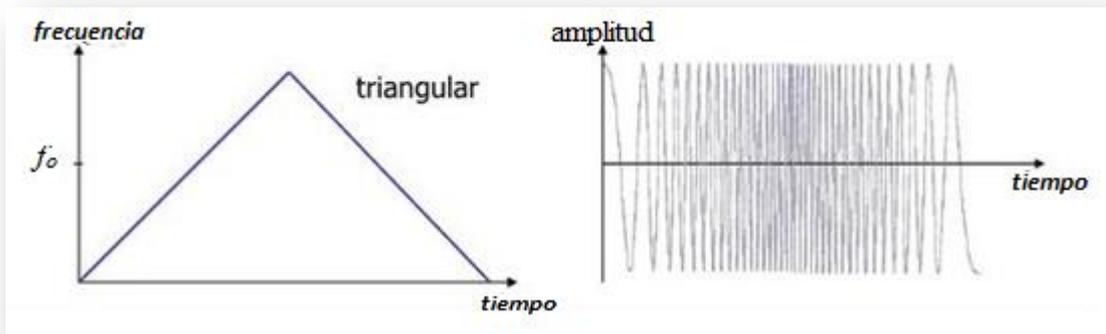


Figura 3.7. Modulación lineal triangular. Fuente: "Diseño y validación de un radar CW-FM a 94 GHz".

Para evitar la digitalización de señales de eco a frecuencias de microondas, en los radares CW-FM es habitual utilizar una cadena receptora con configuración homodina (figura 4.8). En este caso la señal de eco se mezcla con una muestra de la señal transmitida. A la salida del mezclador se obtiene, tras un filtro de paso bajo, una señal de barrido cuya frecuencia es la diferencia entre la frecuencia instantánea de emisión y recepción. De esta forma, la frecuencia de batido es proporcional a la distancia del objeto observado.

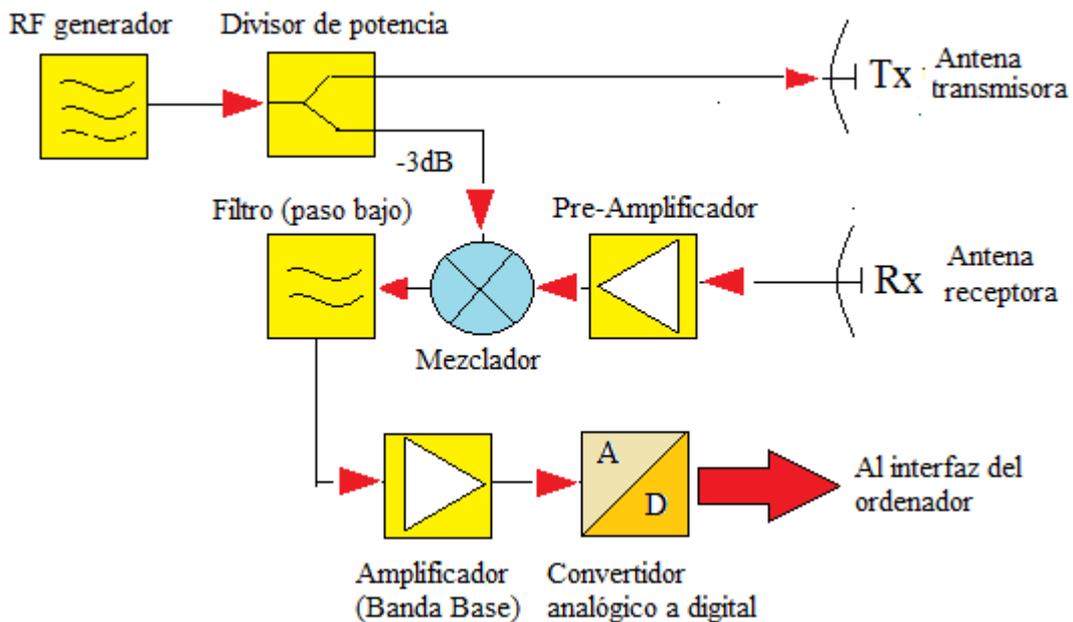


Figura 3.8. Configuración homodina de un radar FMCW. Fuente: "Diseño y validación de un radar CW-FM a 94 GHz".

3.5.2. Desarrollo teórico del funcionamiento de un radar FM-CW lineal

El funcionamiento general de un radar FM-CW es el siguiente: se transmite una señal que va cambiando periódicamente en frecuencia y se reciben los ecos que, correctamente tratados, nos proporcionarán información sobre la escena iluminada.

Si además, esta señal está modulada linealmente en frecuencia, la frecuencia instantánea f_i se incrementa con pendiente k a lo largo de un periodo de tiempo que llamaremos a partir de ahora T_{chirp} . Dicha T_{chirp} será igual al periodo de la señal transmitida τ en el caso de modulaciones *sawtooth* y $\tau/2$ para modulaciones triangulares.

Con objeto de utilizar una formulación compacta se hará uso de la notación equivalente paso bajo de las señales.

$$S_e(t) = A_e \text{Re}\{e^{j\phi}\} \quad (1)$$

$$\phi(t) = \phi_0 + \omega_0 t + kt^2 \quad (2)$$

$$f_i = \frac{\delta\phi}{\delta t} = 2\pi (f_0 + kt) \quad (3)$$

$$\hat{S}_e(t) = A_e \text{Re}\{e^{j\phi_0 + \omega_0 t + kt^2}\} \quad (4)$$

Si se ha enfocado en la dirección adecuada, es decir, si algún objeto (*target*) ha sido iluminado con la señal *chirp* emitida por el radar, en el receptor se recogerá una reproducción de la señal transmitida pero de menor potencia y retardada temporalmente.

Este retardo respecto a la señal transmitida, es equivalente a dos veces la distancia al objeto iluminado en el caso de un radar mono estático (véase la expresión 1) o a la siguiente expresión en el caso de radares biestáticos.

$$T = \frac{R_t + R_r}{c} \quad (5)$$

Siendo R la distancia al objetivo desde cada una de las antenas y c la velocidad de la luz. La expresión que define la señal recibida sería pues:

$$S_r(t) = \alpha S_e(t - T) \quad (6)$$

Siendo $\alpha < 1$, una amplitud que modela las pérdidas de propagación en espacio libre:

$$P_r = P_{rad} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (7)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \vartheta}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2 L} \quad (8)$$

Por tanto, la señal recibida en la antena receptora será de:

$$S_r(t) = A_r e^{j\phi_0 + k(t-T)^2} e^{-j\omega_0(t-T)} \Pi \left(\frac{t-T}{\tau} \right) \quad (9)$$

Cuando se recibe un ECO, éste es filtrado, amplificado y batido a un mezclador junto a la señal transmitida (señal de referencia), por lo que el mezclador no es más que un bloque que realiza las funciones de un filtro adaptado cuya expresión se muestra en la ecuación 2.

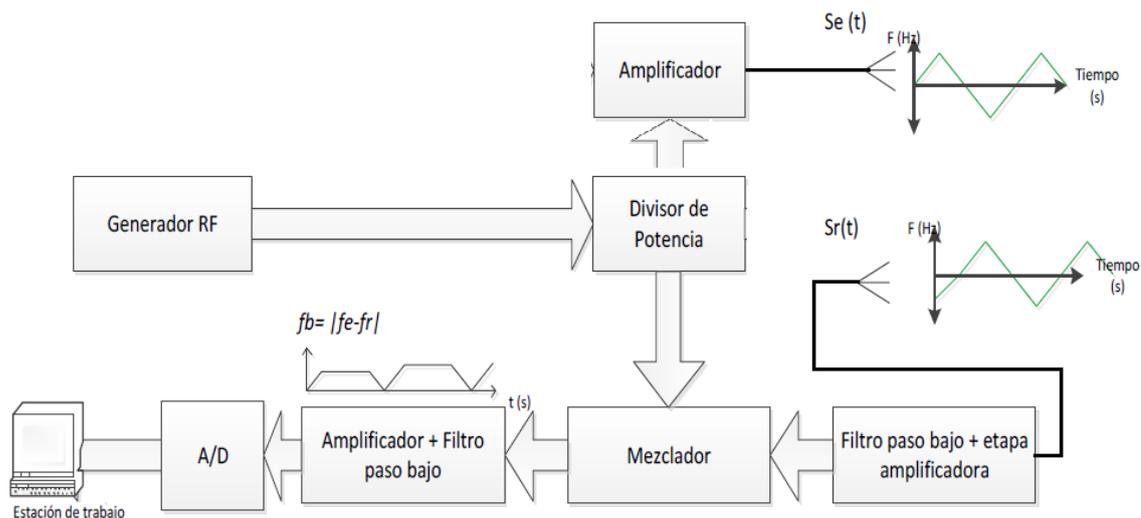


Figura 3.9. Diagrama de bloque de un radar FMCW. Fuente: “Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W”.

$$S_b(t) = A_b e^{j\pi k T^2} e^{-j\omega_0 T} e^{j2\pi k T t} \Pi\left(\frac{t - T}{\tau}\right) \quad (10)$$

La salida de este bloque proporciona una señal generada gracias a la diferencia frecuencial entre ambas tal como podemos apreciar en la ecuación 6.

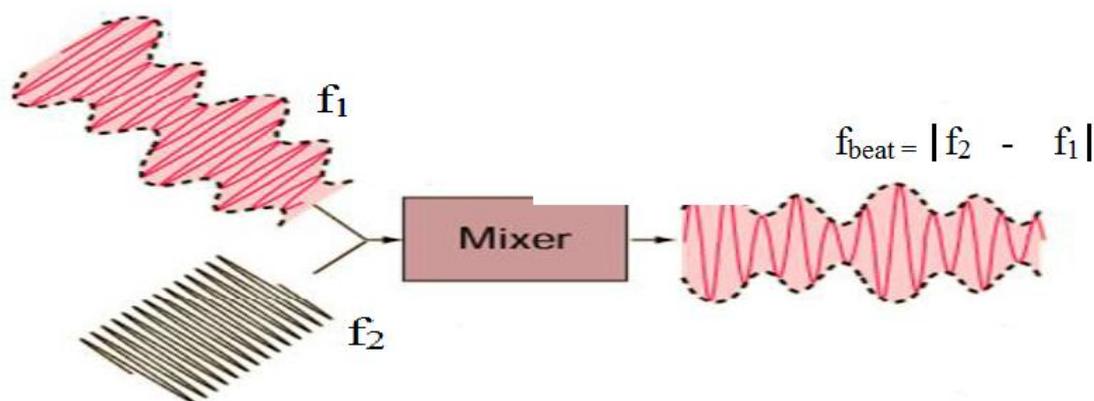


Figura 3.10. Señal de batido a la salida del Mixer (Mezclador). Fuente: “Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W”.

La información referente a la diferencia de frecuencia se encuentra en el término $2\pi kTt$ (también conocido como beating tone). Por otro lado, el primer término de fase que aparece en la expresión 2.10, πkT^2 , hace referencia a un término constante de fase llamado *Residual Video Phase* (RVP) mientras que el segundo término, $\omega_0 T$, hace referencia a la fase lineal causada por el retardo del eco, normalmente expresada como muestra la ecuación 11:

$$\Phi_{echo} = -\omega_0 T = -2kR \quad (11)$$

El término correspondiente al RVP puede despreciarse siempre y cuando sea muy inferior a la fase en el objetivo:

$$RVP \ll \Phi_{echo} \quad (12)$$

En cuyo caso, la ecuación correspondiente a la señal de batido puede expresarse como:

$$S_b(t) = A_b \cos(\omega_b t - \Phi_{echo}) \Pi\left(\frac{t}{\tau_0}\right) \quad (13)$$

Siendo:

$$A_b = \frac{1}{2} A_t A_r \quad (14)$$

$$\tau_0 = \frac{\tau}{2} - T \quad (15)$$

$$\omega_b = \begin{cases} -kT: \text{rampas de pendiente positivas} \\ +kT: \text{rampas de pendiente negativa} \end{cases} \quad (16)$$

Debido a que la información reside en la fase de la señal de batido, resulta más sencillo trabajar con la respuesta frecuencial de la expresión anterior. De esta manera el filtro adaptado al eco recibido puede implementarse mediante la DFT (*Discrete Fourier Transform*) aunque por eficiencia se implementa mediante una FFT (*Fast Fourier Transform*)

$$S_b(f) = TF\{S_b(t)\} = A_r e^{j\pi k T^2} e^{-j\omega_0 T} \left((\tau - 2T) \text{sinc}((f - kT)(\tau - 2T)) \right) \quad (17)$$

Si se representa dicha respuesta, se observa un tono del cual se pueden extraer dos parámetros relevantes: la frecuencia de batido f_b y el ancho espectral Δf_b .

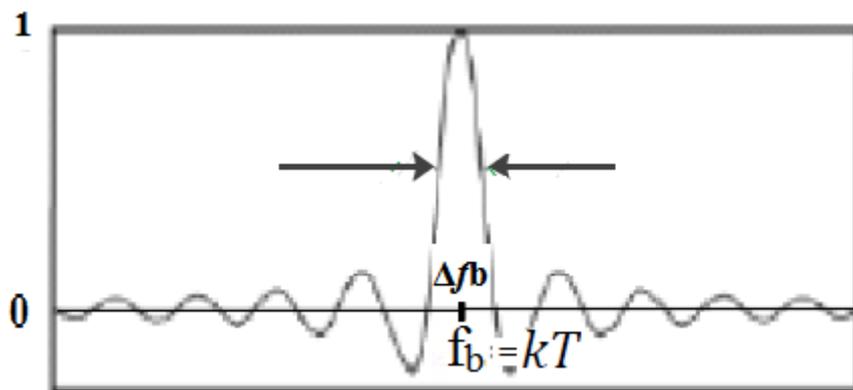


Figura 3.11. Respuesta frecuencial $S_b(f)$ para un único blanco. Fuente: “Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W”.

La frecuencia de batido permite extraer la información sobre a qué distancia se encuentra un objetivo estático iluminado por la señal *chirp* según la expresión:

$$f_b = kT = \frac{\Delta f}{T_{chirp}} \frac{R_t + R_r}{c} \quad (18)$$

Siendo Δf el barrido frecuencial o ancho de banda de la señal *chirp*. Dado que cada eco recibido en el receptor tendrá su propio tono frecuencial, será fácil determinar a qué distancia se encuentran cada uno de los blancos iluminados por el radar mediante la siguiente expresión.

$$R_t \approx R_r \approx R \quad (19)$$

$$f_b = \frac{\Delta f}{T_{chirp}} \frac{2R}{c} \quad (20)$$

$$R = \frac{c T_{chirp}}{2 \Delta f} f_b \quad (21)$$

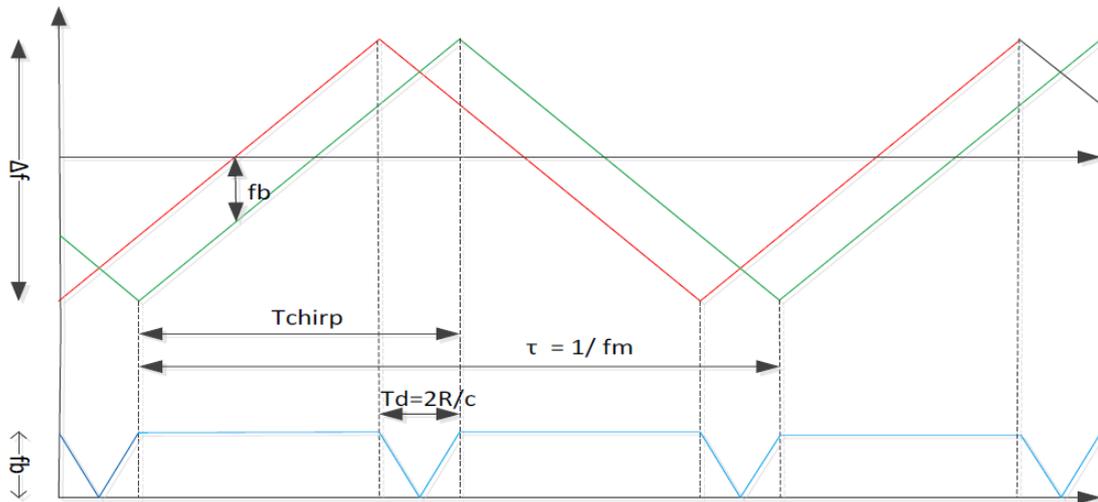


Figura 3.12. Respuesta de un radar FMCW con modulación triangular a un blanco estático. Fuente: “Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W”.

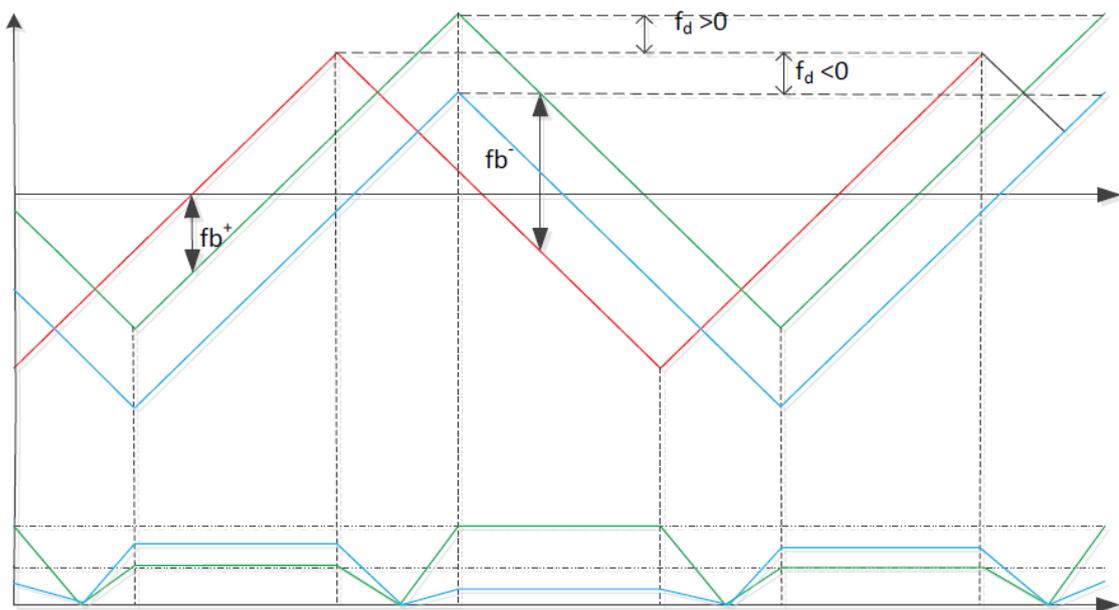
El segundo parámetro es el ancho espectral Δf_b . Este parámetro delimita la resolución frecuencial, o dicho de otro modo, cuantifica la capacidad del radar de distinguir entre dos objetos muy próximos entre ellos de potencia similar. Si dos o más objetos muy próximos en cuanto a lo que distancia al radar se refiere son iluminados por la señal *chirp*, la señal a la salida del mezclador estará compuesta por varios tonos muy próximos. Éste parámetro Δf_b es el que delimita si los lóbulos estarán superpuestos en frecuencia o si por el contrario veremos un lóbulo diferente para cada tono. Por tanto es posible delimitar la resolución en la dirección de

propagación de la energía (también conocida como *range* [1]) ΔR_g del radar mediante la expresión:

$$\Delta R_g = \frac{cT_{chirp}}{2\Delta f} \Delta f_b \quad (22)$$

Analizando la expresión anterior, podemos observar que, además de Δf_b , los otros parámetros que afectan directamente a la resolución en *range* son el periodo de la señal *chirp* y Δf , que son limitaciones de construcción del radar. Dicho de otro modo, cuanto mayor sea Δf mejor resolución en *range*.

Si el objeto que se quiere localizar, además, se desplaza a una velocidad v , la señal de eco recibida presentará además un desplazamiento frecuencial debido al efecto *Doppler*(5), dependiendo de si el objeto se aleja o se acerca al radar. Dicha variación, llamada en adelante f_d , es directamente proporcional a la velocidad radial del objeto, provocando variaciones como las que se pueden apreciar en la expresión 9.



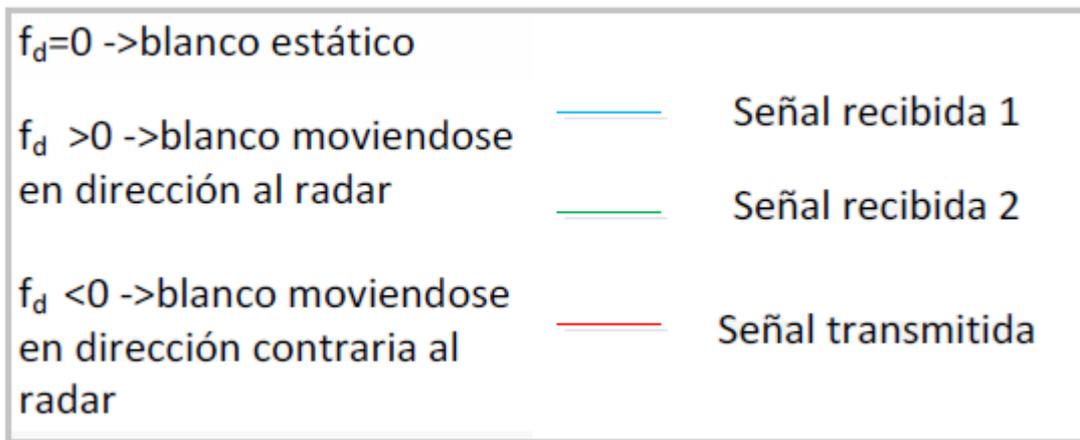


Figura 3.13. Respuesta de un radar FMCW frente a blancos no estáticos. Fuente: “Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W”.

Por tanto, para poder calcular tanto la distancia como la velocidad de un objeto en movimiento será necesario conocer los parámetros f_b^+ y f_b^- :

$$f_b^+ = f_b - f_d \quad (23)$$

$$f_b^- = f_b + f_d \quad (24)$$

De este modo, substituyendo en la ecuación para blancos estáticos, la distancia al objeto se podrá calcular como:

$$R = \frac{cT_{chirp}}{2\Delta f} \left(\frac{f_b^+ + f_b^-}{2} \right) \quad (25)$$

Y la velocidad:

$$v = \frac{\lambda f_d}{2} = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{f_b^- - f_b^+}{2} \right) \quad (26)$$

3.6. Componentes de un radar FMCW

Desde una perspectiva de sistema los radares FMCW están compuestos de cuatro partes importantes. La primera etapa es la encargada de generar el Chirp o señal modulada en frecuencia, la técnica más común de modulación para este sistema es la modulación lineal de frecuencia (LMF). La segunda etapa llamada RF Front End permite transmitir y recibir las señales de alta frecuencia del radar. Para la transmisión los componentes más comunes son un VCO, un LNA, un splitter y una antena de transmisión. Para la recepción los componentes más comunes son un LNA, un mezclador y un filtro pasa bajos, de esta forma el resultado de la parte de recepción del radar es una señal de banda base. La tercera etapa es la adquisición de la señal de banda base para la cual se utiliza un conversor de señal analógica a digital. Y finalmente la cuarta etapa es el almacenamiento de la señal recolectada por el radar.

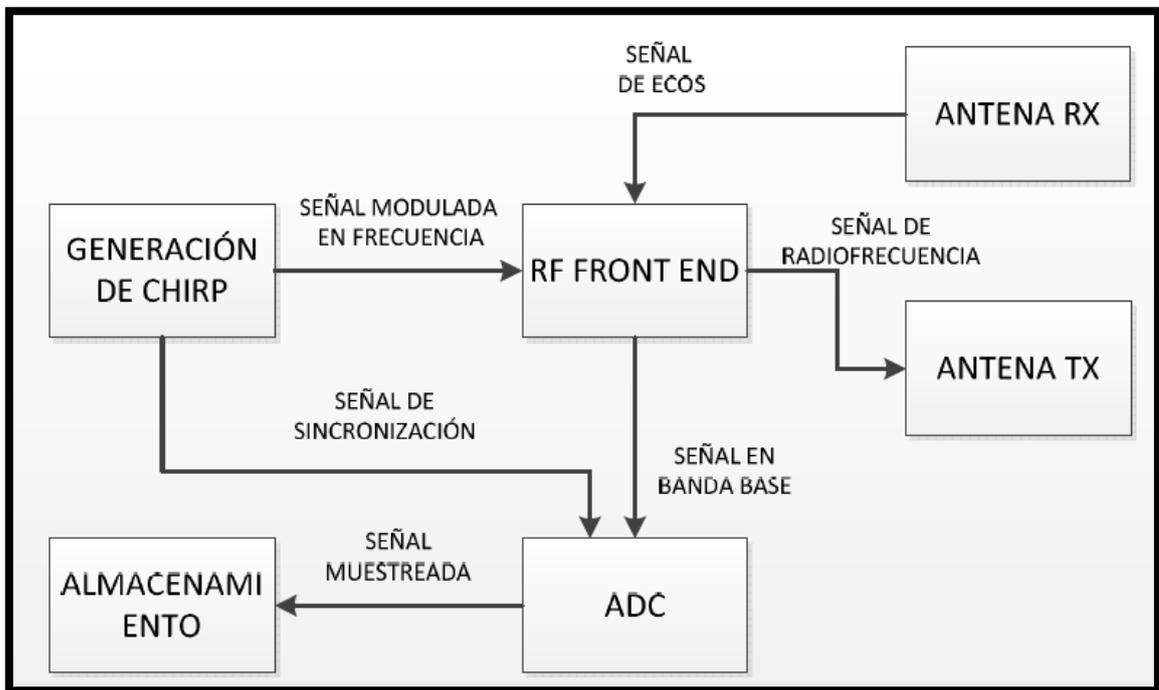


Figura 3.14. Diagrama de bloque de un radar FMCW. Fuente: “Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad”.

3.6.1 Diagrama de bloques del sistema

La figura muestra el diagrama de bloques del sistema de radar FMCW. La mayoría de los bloques contenidos en el recuadro azul a excepción de la Laptop corresponden a la unidad de radar y a la unidad de control. La computadora representada por la Laptop corresponde a la unidad de procesamiento. El recuadro rojo corresponde a la unidad de alimentación que suministra energía a todo el sistema de radar.

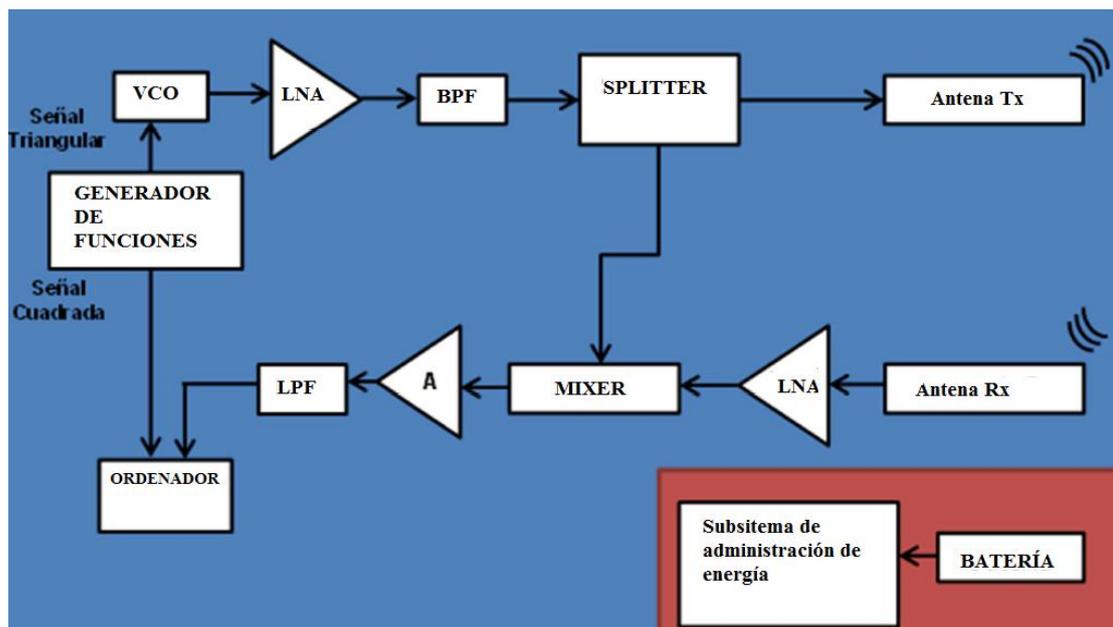


Figura 3.15. Diagrama de bloques del sistema. Fuente: Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad.

El diagrama de bloques está compuesto por la unidad radar, una unidad de control y una unidad de procesamiento.

La unidad radar contiene los siguientes elementos:

- -Un oscilador controlado por voltaje (VCO).
- -Dos amplificadores de bajo ruido (LNA).
- -Un filtro pasa banda (BPF).
- -Un divisor de potencia (Splitter).

- Dos antenas para la transmisión y recepción.
- Un mezclador (Mixer).
 - Un amplificador de baja frecuencia (A).
- Filtro Pasa bajos (LPF).

La unidad de control está compuesta por los siguientes elementos:

- Generador de funciones y la tarjeta de audio del ordenador.

Unidad de procesamiento está compuesta por:

- El ordenador, dónde se usará un software para realizar el procesamiento de la señal de banda base obtenida.

Finalmente una unidad de alimentación la cual está compuesta por baterías y un subsistema para suministrar energía a todos los componentes que lo necesiten.

3.6.2. Componentes de radiofrecuencia

VCO

El componente clave de un sistema radar FMCW es el oscilador controlado por voltaje (VCO), ya que actúa como una fuente de señal del radar. El VCO es un oscilador eléctrico cuya frecuencia de oscilación puede ser controlado por un voltaje de entrada.

Para lograr un buen funcionamiento de un sistema de radar FMCW se necesita que el chirp sea totalmente lineal en frecuencia, sin embargo el componente que se encarga de generar este chirp o señal modulada en frecuencia que es el VCO utiliza un convertidor exponencial y es extremadamente sensible a la temperatura por lo cual su respuesta de frecuencia no será totalmente lineal. Para corregir este problema de los VCOs se suele diseñar un PLL, el cual involucra componentes adicionales como por ejemplo un detector de fase, un pre-escalador y un loop filter.

Amplificador de bajo ruido

Es un tipo especial de amplificador electrónico usado para amplificar señales muy débiles provenientes, por ejemplo, de una antena receptora. Su propósito principal es proporcionar una figura de ruido mínima aunque ello conlleve a una disminución considerable de la ganancia.

En sistemas de recepción es usualmente requerido tener un preamplificador con una figura de ruido lo más reducido posible, debido a que la primera etapa del circuito tendrá el efecto dominante sobre la performance de ruido en todo el sistema.

Los parámetros que lo definen son: tensión de operación, corriente de operación, frecuencia de operación, rango de temperatura de operación.

Mezclador

Un mezclador o mixer es un dispositivo de tres puertos que usa un elemento no lineal variante en el tiempo para poder lograr la conversión. El símbolo del mixer quiere decir que la salida es proporcional al producto de dos señales de entrada que consiste en la suma y diferencia de sus frecuencias. Esto es una idealización de la operación del mixer, ya que en realidad se produce una gran variedad de productos no deseados generados por el comportamiento no lineal del transistor que lo compone. La señal que recibe el mezclador son, una frecuencia relativamente alta del oscilador local (LO) y una frecuencia en banda base o frecuencia intermedia (IF). Por lo que la señal de salida del mezclador está dada por el producto de las señales LO e IF.

Divisor de potencia

Un divisor de potencia es una simple red de tres puertos que puede ser usada para dividir o combinar la potencia, y puede ser implementada en cualquier tipo de línea de transmisión.

Filtro pasa banda

Un filtro es un dispositivo que deja pasar las señales a una cierta frecuencia o en un rango de frecuencias, mientras que atenúa el paso de las demás. Además, idealmente, un filtro no añadirá nuevas componentes de frecuencia, sino que modificará las amplitudes de las ya existentes.

Un filtro pasa banda es un circuito de frecuencia selectiva que permite dejar pasar las frecuencias en una banda específica, llamada banda de paso, y atenúa las señales que están fuera de dicha banda. Esta banda de paso se establece entre dos puntos de corte denominados frecuencia inferior (f_L) y frecuencia superior (f_H).

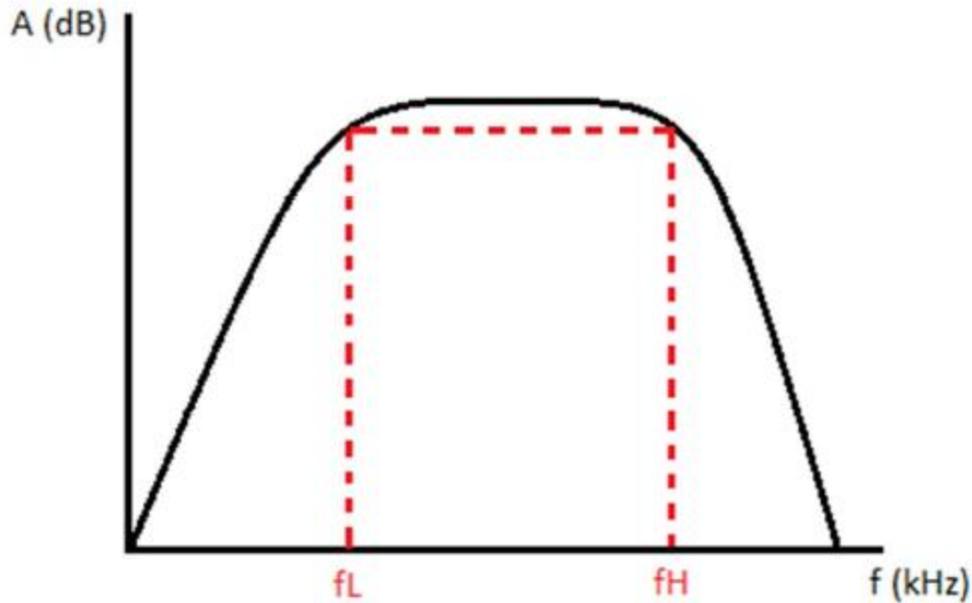


Figura 3.16. Respuesta en frecuencia de un filtro pasa banda. Fuente:): Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad.

Por lo tanto, normalmente, un filtro pasa banda estará compuesto por un filtro pasa alto seguido de un filtro pasa bajos. A continuación se muestra el diagrama de bloques que constituye un filtro pasa banda.

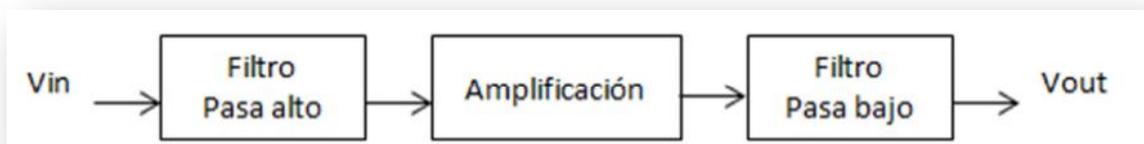


Figura 3.17. Diagrama de bloques de un filtro pasa banda. Fuente: “Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad”.

Como se puede observar, la frecuencia a la que sucede la frecuencia de corte en el filtro pasa bajos es mayor que la frecuencia de corte en el filtro pasa altos. Dicha frecuencia de corte se determina cuando la amplitud de la señal cae -3dB. Por lo tanto, la diferencia entre dichas frecuencias de corte superior o inferior determinarán el ancho de banda del filtro pasa bandas, $BW = f_H - f_L$, y será el rango de frecuencia a la cual la señal pasará idealmente sin atenuación. Además, cabe mencionar que las regiones superiores a f_h e inferiores a f_L serán denominadas las bandas de rechazo o atenuación.

Filtro pasa bajos

Un filtro pasa bajos, idealmente, deja pasar las señales inferiores a su frecuencia de corte y rechaza las frecuencias superiores de dicha frecuencia de corte, tal como se muestra en la figura 4.43. En donde f_c representa la frecuencia de corte, que es el punto a partir del cual se permite el paso o rechazo de las señales al ingresar a través del filtro.

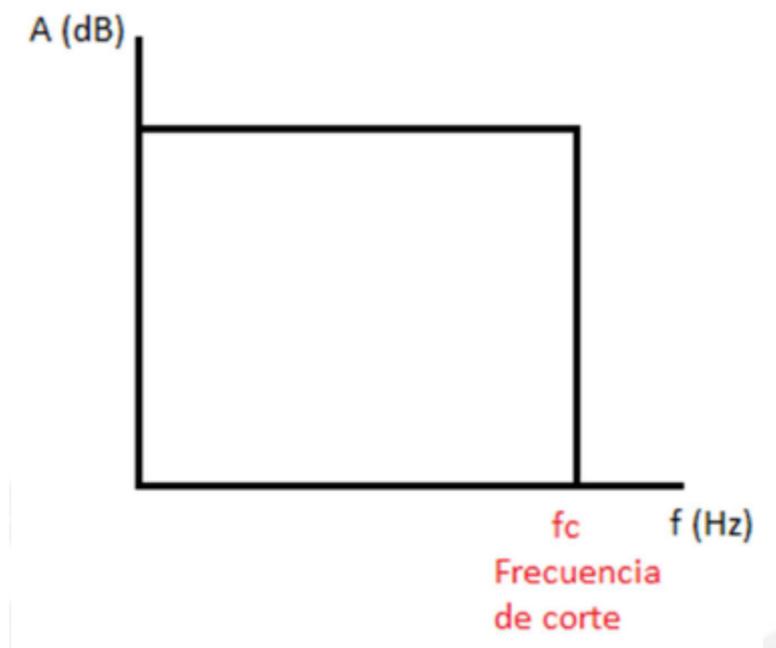


Figura 3.18. Respuesta de un filtro pasa bajos. Fuente:); Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad.

CAPÍTULO IV: RADAR DE PULSO VS RADAR FMCW

4.1. Desarrollo de tecnológico del radar marino

La tecnología radar se ha desarrollado y sofisticado enormemente en los últimos 60 años, y aunque el requisito básico de la marina comercial y la marina militar sigue siendo el mismo: Medir el alcance de un objetivo y llevar a cabo un seguimiento del mismo mediante el sistema ARPA. A pesar de este objetivo común del radar en los campos militar y comercial, las tecnologías usadas por ambos, como ocurre con otros muchos casos, se han ido distanciando.

La evolución del radar marino ha sido dejada en manos de los proveedores de equipos, lo cual significa que la inversión en el desarrollo del radar para uso marítimo ha sido en función de las leyes del mercado. Por lo que no es sorpresa que este haya progresado a un ritmo más lento y en una dirección ligeramente diferente, en relación a la urgencia de sus homólogos militares y de la aviación civil.

A pesar de ello ha habido notables mejoras, que han contribuido a una mejor imagen del radar, añadiendo nuevos instrumentos de importante valor para el navegante como es el sistema RADAR-ARPA. Pero en cuanto a la tecnología radar utilizada, hoy en día la mayoría de los radares marinos utilizados en los buques mercantes están, probablemente en el pináculo de su rendimiento cuando se utiliza la detección convencional “no coherente”, es decir, los radares de onda pulsada (los radares tradicionales que utilizan magnetrones de alta potencia para generar pulsos cortos de energía electromagnética.). Lo que hoy en día es el equivalente al uso de la tecnología original de 1940.

En los últimos años algunas empresas están desarrollando tecnologías de radar de banda X con tecnología de estado sólido que usa técnicas de FMCW, como simarad-northstar-lowrance, otras como kelvin Hughes, o ---- entre otras. Esta nueva tecnología, que realmente no es nueva, lo que sí es nuevo su uso en la navegación mercante, presenta numerosas ventajas como una detección de blancos superior a los radares de pulsos con unos niveles de potencia transmitida muchos más bajos, y una mejor visibilidad de los blancos en orden de 10 veces mejor en comparación con los sistemas actuales. Por esto y otras ventajas ha llevado a la OMI a revisar las normas de desempeño del radar, para fomentar esta tecnología.

4.2. Cómo funciona la nueva tecnología radar

Tras la lectura de los capítulos anteriores, sabemos que los radares transmiten microondas que inciden sobre los objetos que encuentran en su trayectoria, reflejándose en ellos y devolviendo el eco al radar, donde la señal recibida se procesa, se extrae información de la misma como la distancia y velocidad y se presenta en la pantalla, de manera que el usuario pueda entenderlo.

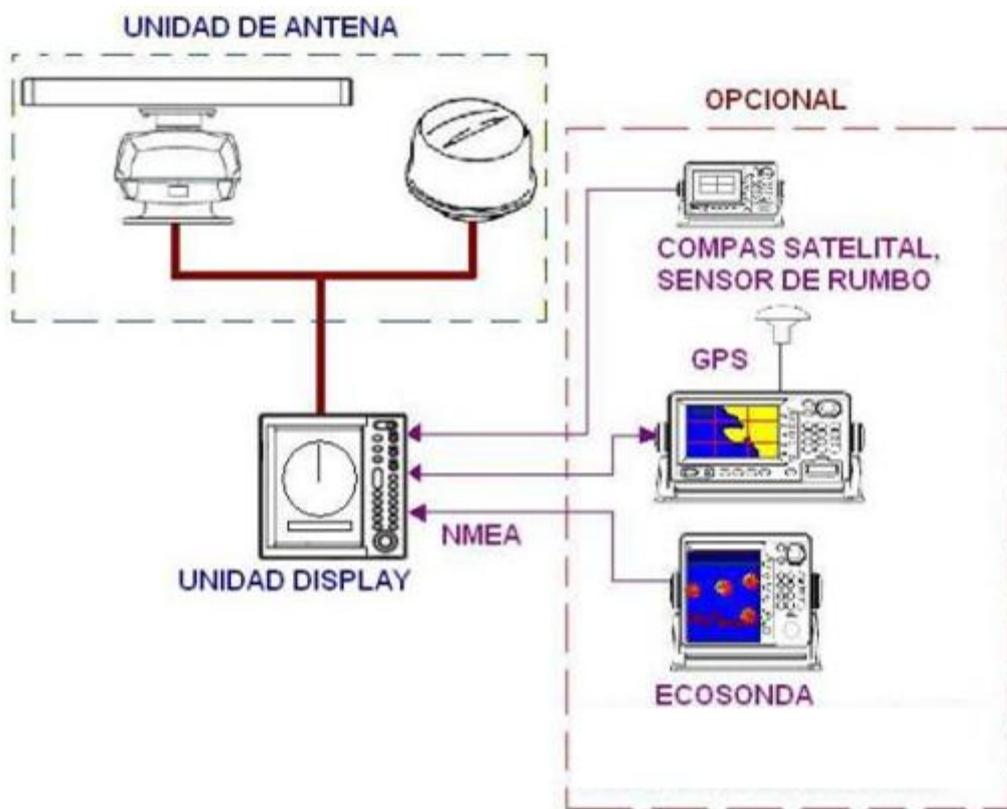


Figura 4.1. Diagrama básico radar con las señales de entrada /salida para la lectura de datos en la pantalla del radar. Fuente: “Electrónica Marina”.

Hasta ahora todos los radares marinos, tanto de la náutica de recreo como de la marina mercante han utilizado el mismo método para calcular la distancia, el cual, como explico en el capítulo III, usa impulsos de microondas en vez de una transmisión continua, midiendo el intervalo de tiempo entre la transmisión del

impulso y la recepción del mismo tras su reflejo en un objeto. La distancia recorrida por el impulso y su eco puede calcularse mediante la fórmula: Distancia = velocidad xTiempo.

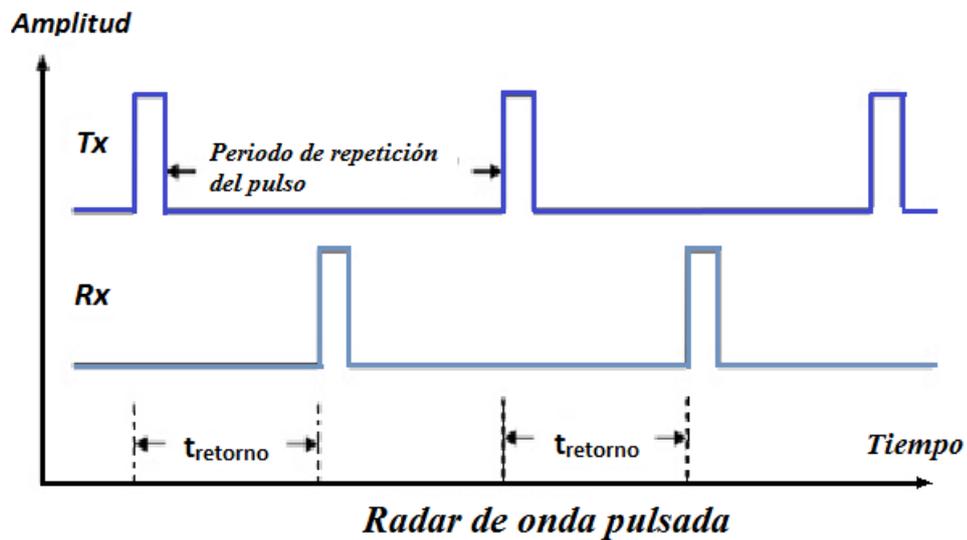


Figura 4.2. Esquema del envío y recepción de la señal de un radar de pulso.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, la tecnología que está comenzando a abrirse camino en la navegación comercial utiliza un método diferente para calcular el rango. Los radares de frecuencia continua modulados en frecuencia utilizan una transmisión continua de microondas. Como expliqué en el capítulo IV, estos radares están escuchando continuamente, es decir, no hay periodos de silencio para la recepción del eco. La frecuencia de la transmisión de microondas va aumentando a una velocidad constante, en un patrón, que generalmente es de diente de sierra (figura):

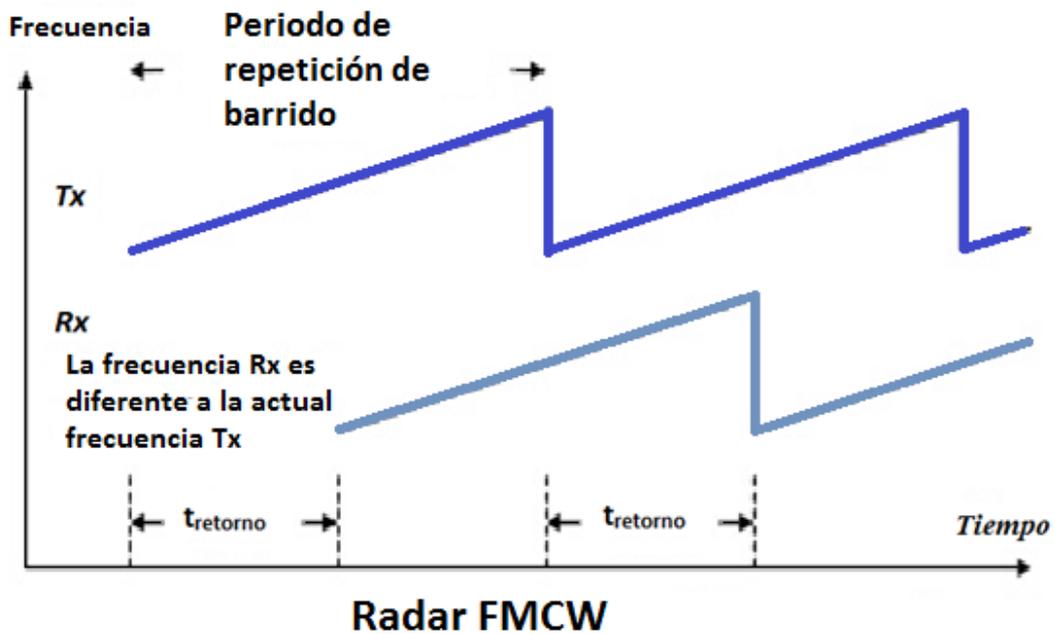
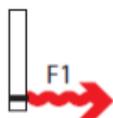


Figura 4.3. Esquema del envío y recepción de la señal de un radar FMCW. Fuente: Elaboración propia.

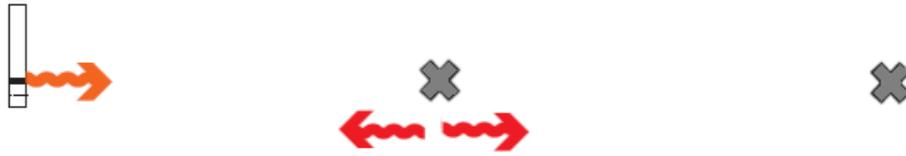
Así que aunque no hay un pulso, todavía tenemos un método de tiempo para calcular el intervalo entre la transmisión de las microondas y la detección de su eco. Una vez que las ondas han dejado la antena de transmisión, su frecuencia no cambia, continúan hasta el objeto, se reflejan en él y regresan a la antena receptora del radar. Para entonces el radar estará transmitiendo en una frecuencia más alta. Es entonces cuando el radar mira la diferencia entre la frecuencia que está transmitiendo actualmente y la frecuencia del eco que está recibiendo, y conociendo la velocidad con la que la frecuencia de transmisión está aumentando, puede calcular el retardo del tiempo. Es pues, a partir de entonces, el cálculo es exactamente el mismo que antes:

RADAR ← 1 milla → BLANCO 1 ← 1 milla → BLANCO 2



Tiempo T: Ondas transmitidas con una frecuencia F1 y a una velocidad correspondiente a la velocidad de la luz (300.000.000 m/s).

RADAR ← 1 milla → BLANCO 1 ← 1 milla → BLANCO 2



T+6 microsegundos: Las ondas con la frecuencia F1 alcanzan el target 1, y retorna el eco. Las ondas F1 continúan hacia el blanco 2. El radar está ahora transmitiendo a mayor frecuencia.

RADAR ← 1 milla → BLANCO 1 ← 1 milla → BLANCO 2



T+12 microsegundos: El primero eco de la frecuencia F1 llega al receptor. El eco del blanco 2 retorna al radar. Ahora el radar se encuentra transmitiendo a una frecuencia F2. Comparando F2 con f1 se clacula el intervalo de tiempo del blanco 1

RADAR ← 1 milla → BLANCO 1 ← 1 milla → BLANCO 2



T+24 microsegundos: El segundo eco correspondiente a la frecuencia F1 llega al receptor. Ahora el radar se encuentra transmitiendo en la frecuencia F3. Comparando la frecuencia F3 con F1 se calcula el intervalo de tiempo para el blanco 2.

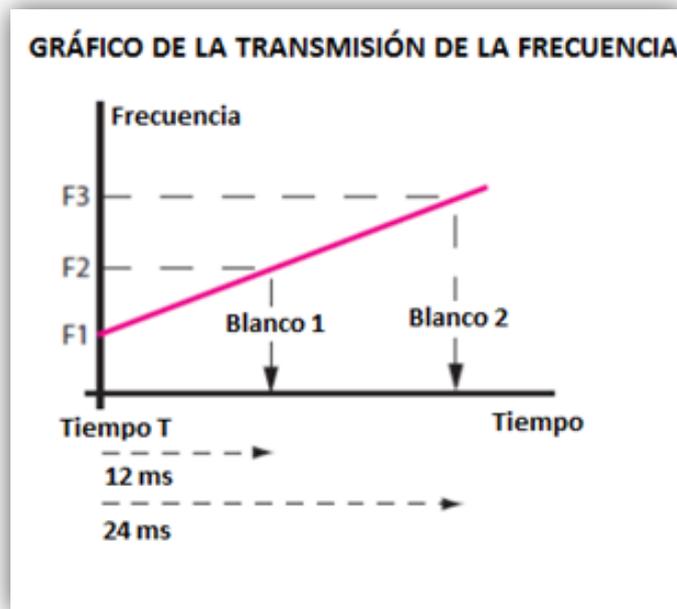


Figura 4.4. Gráfico de la transmisión de la frecuencia radar FMCW. Fuente: “Aztec Sailing.”



Figura 4.5. Representación pantalla radar FMCW. Fuente: “Aztec Sailing”.

Hay que tener en cuenta que en estos radares, el transmisor y el receptor funcionan continuamente, requiriendo antenas separadas contenidas en la misma cúpula. Los radares de pulso, por su parte, cambian de transmitir a recibir, por lo que pueden utilizar la misma antena para ambas funciones.

Por otro lado, uno de los aspectos más importantes es la tecnología que se utiliza para producir las microondas, que es radicalmente diferente, lo cual tiene varias consecuencias que describiré en el siguiente apartado.

4.3. Diferencias entre el radar de onda pulsada y el radar FMCW

La primera cosa a tener en cuenta antes de profundizar acerca de las diferencias entre ambos radares es que la mayor parte del sistema radar, y casi todo lo relacionado con el uso del mismo, no presenta cambios en la nueva tecnología. Es decir, la imagen sigue siendo la misma, todos los datos técnicos sobre el ancho del haz, los lóbulos laterales, los ecos múltiples etc. son iguales. Y la funcionalidad del radar a partir de la integración con otros instrumentos como GPS, AIS y demás sigue siendo la misma.

La principal diferencia de hardware entre los dos tipos de radar es que en los de pulso se utilizan magnetrones para generar la energía que irradian, mientras que los FMCW usan amplificadores de estado sólido, de ahí que algunos se refieran a ellos como radares de estado sólido.

Las áreas que marcan las principales diferencias entre ambos radares son:

- **Tiempo de calentamiento y ajuste.**

El dispositivo que genera los impulsos de microondas se llama magnetrón, y una de las características del magnetrón es que necesita tiempo para calentar, y otra es que su frecuencia de transmisión varía un poco. Para el uso abordo, el periodo de calentamiento significa que cuando se enciende el radar hay que esperar un par de minutos antes de usarlo. Es por ello que estos sistemas radar suelen tener un bajo consumo de energía “standby mode”, para que pueda obtener la imagen inmediatamente seleccionando “transmit” cuando se necesite.

La variación de la frecuencia significa que el receptor tiene que ser afinado a la frecuencia de transmisión, y hay un control de afinación para hacer eso (Tunning control). Aunque esto no es un verdadero inconveniente, porque en los radares actuales esta función se puede realizar automáticamente.

Por el contrario en los el radar FMCW al utilizar transmisores de estado sólido, estos no requieren de un tiempo de calentamiento y la frecuencia de transmisión es estable, por lo que los sistemas están disponibles de manera inmediata tras su encendido, y no requieren de ninguna función de sintonización.

- **Discriminación de rangos y detección de blancos**

Una diferencia menos obvia entre los dos tipos de radar es el ancho de banda que requiere el receptor. Un radar de pulso requiere de un ancho de banda inversamente proporcional al ancho del pulso, es decir, requiere de un ancho de banda más amplio en distancias cortas y al contrario para distancias más grandes.

Por su parte el radar FMCW tiene requisitos opuestos, pues cuanto más corto sea el alcance menor será la diferencia entre las frecuencias transmitida y recibida y menor será el ancho de banda.

Las posibilidades de detectar un objetivo dependen de la cantidad de energía con la que se pueda iluminar un blanco y no la potencia máxima. En el pasado, los fabricantes de radar vendían sus productos basándose en la potencia de su transmisor, de manera que los de 4kW eran mejor que los de 2Kwy los de 12 kW era, por supuesto, mejor que ambos. En física, la unidad de energía es el Joule y un Joule es 1 W/s, al hacer comparaciones entre los radares de pulso y los FMCW, en este caso, vamos a pensar en términos de energía (Julios) y no potencia (Watios).

El radar convencional de 4kW usa normalmente un pulso de 100ns en distancias cortas con una PRF (frecuencia de repetición de pulso) de aproximadamente 3 kHz, multiplicando se establece que irradia 1.2J de energía por segundo.

Un radar de 2w FMCW normalmente tiene un periodo de variación de frecuencia de aproximadamente 1ms, lo que corresponde a un ancho de pulso de 1ms y tiene un PRF de 1kHz. Esto quiere decir que transmite e irradia 2J de energía por segundo todo el tiempo.

En distancias más largas, el radar de pulso puede configurar un PRF de 1kHz que proporciona 4kJ. Por su parte el radar FMCW siempre irradia la misma energía independientemente de la escala seleccionada.

- **Alcances cortos**

Podemos decir que este es el beneficio más importante de la tecnología FMCW.

La discriminación del alcance del radar de onda pulsada depende de la longitud del impulso, mientras que para el radar FMCW no existe límite teórico en cuanto al mínimo alcance. Esto significa que los radares FMCW proporcionan imágenes mucho más nítidas en rango que la imagen equivalente al radar de onda pulsada, particularmente a corto alcance. Además los radares de pulso tienen un rango mínimo sustancial por debajo del cual no pueden detectar nada (entre 40 y 50 metros) pues si el blanco está a esa distancia, cuando el eco llega al radar esté aun se encuentra transmitiendo. En cambio el radar FMCW puede detectar objetivos a una distancia muy corta del barco, ya que no al tener una antena para transmitir y otra para recibir no tiene el problema de los radares convencionales.

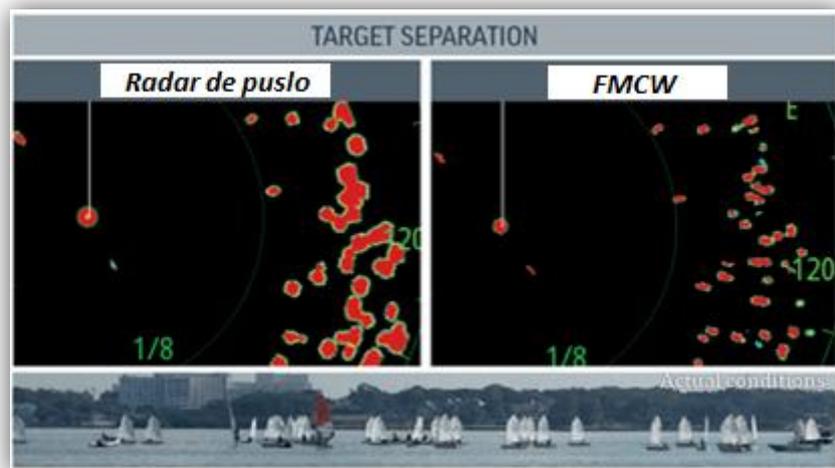


Figura 4.6. Comparativa discriminación de blancos. Fuente: Simrad..

Otro factor que es importante destacar es que, a corto alcance, el radar FMCW es capaz de transmitir más energía para iluminar los blancos, y necesita menos ancho de banda del receptor, que el radar de pulso. Esto significa que la detección de objetivos es inherentemente mejor con FMCW a corto alcance. Así que las imágenes obtenidas a corto alcance son mejores en los FMCW.

En cuanto a la discriminación de la demora, el FMCW no destaca sobre su adversario, pues el ancho del haz tiene la misma relación con el tamaño de la antena en ambos tipos de radares.

- **Grandes distancias**

A mayor distancia, el radar FMCW sigue discriminando el rango con extraordinaria precisión en comparación con el radar de onda pulsada (especialmente cuando estos están usando pulsos más largos para llegar a distancias más grandes).

Sin embargo, la diferencia no es tan clara en la pantalla cuando se están detectando blancos a grandes distancias. En cualquier caso, una discriminación del rango con un precisión de pocos metros no es tan necesaria cuando el blanco esta a varias millas del radar, o se está moviendo.

En términos de potencia, el radar de onda pulsada tienen una potencia de transmisión muy alta (generalmente entra 2 o 4 kW en embarcaciones pequeñas) La cual se utiliza durante un periodo muy corto de tiempo: La duración del pulso. El radar FMCW por su parte, transmite continuamente a una potencia mucho menor (alrededor de 1 o 2 W, aproximadamente mil veces menos).

En distancias cortas el radar FMCW presenta mejores prestaciones que el radar convencional, pues puede transmitir más energía para iluminar los blancos cercanos. El radar convencional de onda pulsada tiene que usar pulsos pequeños para una buena discriminación del rango, claro que pulsos más cortos se traduce menos energía por pulso. Pero a grandes distancias, el radar de pulso puede usar pulsos más largos (aunque menos de ellos por segundo) con una potencia de transmisión muy alta, por lo que dispone de más energía para iluminar los objetivos.

Además de la energía transmitida hay otros factores (ancho de banda del receptor, ruido, pureza de la atmosfera) que también perjudican al radar FMCW para las detecciones a distancias más largas.

Se debe tener en cuenta, que hasta que no se usen está nueva tecnología A pesar de que la nueva tecnología aún no se ha generalizado en los buques mercantes y no se puede saber a ciencia cierta lo bien que funcionan en relación con la tecnología

antigua, si es verdad que para la detección de objetivos a grandes distancia el radar de pulso tienen unas ventajas inherentes.

- **Perturbación del mar (Clutter)**

El término Clutter hace referencia a todos aquellos ecos recibidos por el radar que son, por definición, no deseados. Pueden ser causados por objetos del entorno, tales como: el mar, las precipitaciones (lluvia nieve o granizo, animales (especialmente pájaros).

A una distancia cercana al radar es donde el problema del clutter se incrementa, pues el mar está en un ángulo más vertical. Como expliqué anteriormente el radar FMCW es particularmente bueno para detectar pequeños blancos a distancias cortas, por lo que la perturbación del mar tenderá a mostrarse como una mancha de pequeños ecos. Mientras que con el radar convencional de onda pulsada, para la misma situación, es probable que se muestre como una mancha más extensa de ecos. Es por ello que con el radar FMCW, será más fácil detectar un objetivo más grande, o más fuerte entre la perturbación del mar. Y es que se verá bien diferenciado en comparación con los ecos procedentes del mar, cosa que no ocurre con el radar de pulso.

En el radar de pulso para vencer este inconveniente se reduce la ganancia del receptor para suprimir los ecos que retornan de la superficie del mar. Claro que esto supone un riesgo pues puede suprimir objetivos o blancos reales.

- **Las características de transmisión.**

El radar de onda pulsada tiene una potencia de transmisión de pico muy alta, y esto puede ser peligroso. Por el contrario el radar FMCW transmite a una potencia mucho más baja (más parecida a los teléfonos móviles) y lo hace de manera continua. Es por ello que estos radares pueden utilizarse con seguridad cerca del personal.

Es interesante mencionar que hay mucho menos diferencia entre las respectivas potencias de transmisión media, pues el radar de pulso sólo transmite durante un corto periodo de tiempo (durante los impulsos).

4.3.1. Otros factores

- **Interferencias**

Los radares FMCW pueden sufrir interferencias de fuertes transmisores de microondas como por ejemplo del mismo radar de pulso. Y además pueden producirse reflexiones de la misma superestructura del barco. Estos inconvenientes han sido poco a poco subsanados por los fabricantes., pues actualmente disponen de sintonizadores que automáticamente anulan las interferencias que puedan surgir de otros radares que operen en las inmediaciones. Además, disponen de diferentes niveles para rechazar las interferencias de ruido mediante un Software especial eliminan otros ruidos no deseados del radar, manteniendo una perfecta imagen del alrededor del barco.

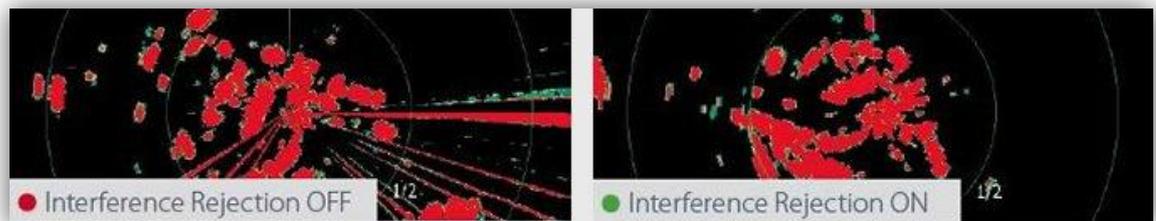


Figura 4.7. Anulación de las interferencias. Fuente: “Simrad”

- **Potencia utilizada**

La detección del blanco depende de la energía transmitida, y como dije anteriormente, no hay mucha diferencia entre las dos tecnologías: En un segundo el radar de pulso 1,2J y 4J, dependiendo del ancho de pulso seleccionado, mientras que el FMCW irradia alrededor de 2J. Por lo que la diferencia entre ellos está en la potencia de pico.

A parte de la diferencia de potencia de los transmisores, se puede apreciar un diferencia en el resto de la electrónica de los radares FMCW., lo que los dotan de un menor consumo.

4.4. Resumen de las diferencias entre ambas tecnologías.

CARACTERÍSTICAS	RADAR FMCW	RADAR DE PULSO
Detección a corta distancia	Mejor	Peor
Detección a grandes distancias	Peor	Mejor
Visibilidad de los ecos cercanos	Mejor	Peor
Resolución acimutal	Igual	Igual
Discriminación del rango	Mejor	peor
Supresión del clutter	Mejor	Peor
Requerimientos de potencia	Similar	Similar
Requiere modo “Stand by”	No	Sí
Vulnerabilidad a interferencias con otros radares	Difícil de resolver	Fácilmente solucionable
Vulnerabilidad a interferencias con los reflectores del propio barco	Supone un problema	No supone un problema
Potencias para un desarrollo futuro	Comenzando su desarrollo	Tecnología ya desarrollada

Tabla 4.1. Resumen de las diferencias entre radar de pulso y radar FMCW.

CAPÍTULO V: RADARES FMCW ACTUALES EN EL MERCADO

5.1. Diseño de la nueva tecnología Radar

Los diseñadores de sistemas radar han de afrontar nuevos retos a la hora de pensar en nuevos dispositivos. La evolución actual y futura de los posibles prototipos conlleva el desafío de conseguir sistemas más ligeros, compactos y con capacidad de multifunción, capaces de obtener gran información sobre el blanco, más allá de su mera posición, dirección y velocidad.

Los sistemas radar convencionales son elementos tremendamente grandes y pesados que acarrear la creación de estructuras adecuadas para su ubicación, funcionamiento y mantenimiento. Una de las principales metas de los nuevos prototipos es hacerlos más ligeros y pequeños para no necesitar estas estructuras para su montaje y además facilitar su transporte y colocación. Aparte de estas características, siempre es interesante conseguir una mayor fiabilidad en los dispositivos, aumentando el tiempo de vida del sistema y, por tanto, abaratando el coste total.

Para conseguir estas nuevas características: obtención de mayor información, flexibilidad, tamaño pequeño, ligero, aumento del tiempo de vida, reducción de coste, etcétera, el diseñador radar se puede aprovechar del desarrollo de dos tecnologías principalmente. Por un lado el desarrollo del procesamiento digital de la señal, que permite al radar FMCW una mejor resolución en grandes distancias. Y, por otro lado, el desarrollo de los circuitos Monolíticos Integrados, gracias a los cuales ya se pueden trabajar en bandas altas de frecuencias como Ka, Ku, V ó W. El procesado digital de la señal ha evolucionado enormemente en los últimos años, el desarrollo de dispositivos de generación Digital Directa de Señal (DDS) junto con el de los Procesadores Digitales de Señal (DSP) de propósito general, han conseguido que se puedan generar modulaciones de gran ancho de banda, muy alta calidad y con un precio razonable. Esto, junto con el desarrollo de receptores capaces de muestrear grandes anchos de banda en recepción y de almacenar y procesar la información obtenida, ha posibilitado el desarrollo de High Resolution Radars (HRR's). Todo esto a un precio razonable puesto que se ha generalizado su uso para múltiples y muy diversas aplicaciones, posibilitando el desarrollo de sistemas versátiles y multifuncionales, es decir, la nueva generación de radares.

5.2. Principales modelos de radar FMCW

Entre los principales modelos de radares marinos basados en la nueva tecnología de FMCW, se puede hacer una diferenciación entre dos grupos principales: Broadband Radar y los Chirp radar.

5.2.1. Broadband Radar

Características generales

En los denominados “ Broadband radar” podemos destacar a Northstar, Simrad, P & G y Lowerance. Todos ellos utilizan la tecnología exclusiva y características de los Broadband Radar, lo cual los convierte en un complemento ideal para casi cualquier barco. Por un lado su sencillo funcionamiento lo hace ideal para las pequeñas embarcaciones de recreo. Y por otro lado, su reducido tamaño, sus mínimos requerimientos de energía, y sus niveles de transmisión más seguras, abren las puertas a su uso en todo tipo de barcos. Las características principales de este tipo de radar a destacar son:

Imagen cristalina: Gracias a la emisión continua de la señal, y de un receptor mucho más sensible al cambio de frecuencia ocasionan una clara señal de retorno, lo que proporciona una imagen tan clara en la pantalla del radar, que lo hace muy fácil de entender, a parte de un nivel operacional muy sencillo.

Bajo consumo de energía: Gracias al uso de la nueva tecnología de estado sólido se reduce la potencia de consume del radar con respecto al convencional.

Emisiones extremadamente bajas: El Broadband Radar emite una quinta parte de las emisiones de un teléfono móvil común, por lo que lo hace sumamente seguro.



Figura 5.1. Emisiones extremadamente bajas Broadband Radar. Fuente: “Navico Broadband Radar Essential Guide”.

Instant ON: Estos radares pueden transmitir instantáneamente tras el encendido del equipo, sin momento de espera.

Sintonización automática: Tienen el modo automático, donde el usuario selecciona según el tipo de navegación, cerca de costa, en alta mar, así como rechazo de perturbaciones.

Rechazo de interferencias: Sintoniza automáticamente las interferencias que puedan provenir de otros radares del entorno, con diferentes niveles de rechazo.

Discriminación de rangos: a 16 millas y menos el Broadband radar tiene 5 veces más capacidad de discriminación de rangos que el radar convencional de 2kW.

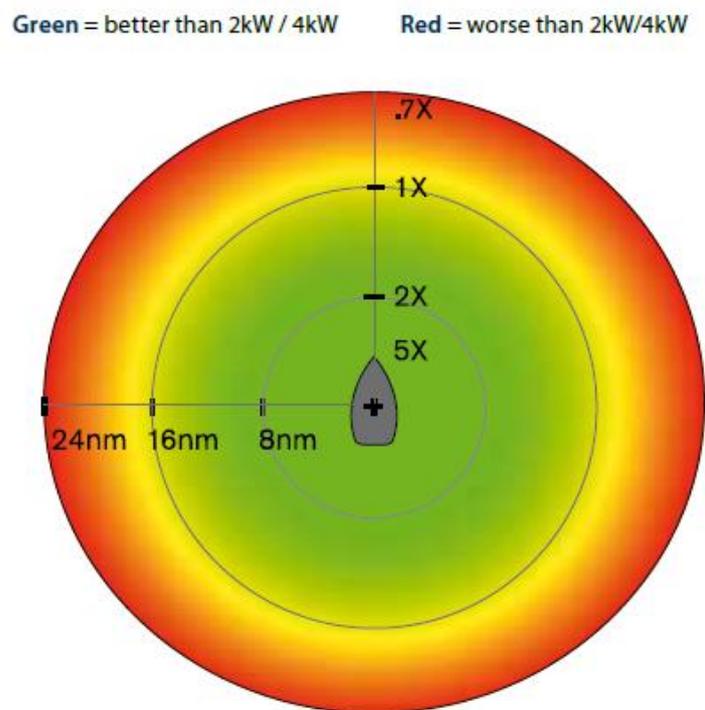


Figura 5.2. Comparativa discriminación de rango. Fuente: “Navico Broadband Radar Essential Guide”.

Gran rendimiento en todas las condiciones meteorológicas: El Rain Clutter reduce el ruido en la imagen asociada a la lluvia, proporcionando una imagen limpia de los objetivos que rodean al radar.

Gran rendimiento en distancias cortas: Mediante la superposición de gráficos de radar se puede determinar cuáles son los objetivos fijos y cuales los móviles

Características específicas:

Simrad Broadband Radar™

DATOS TÉCNICOS/MEDIOAMBIENTALES	
Alto	280 mm / 11 in
Peso	7.4 kg / 16 lbs (no cable)
Temperatura de funcionamiento	-25° to +55°C (-13° to +130°F)
Resistencia del agua	IPX6
Humedad	+35°C (95°F) 95% RH
Estándar de clasificación de impermeabilidad	IPX6
RADAR	
Ancho de haz horizontal de la antena [grados]	5.2°+/-10% (-3dB width) ° (Beam width with target separation on MAX is 2.6°)
Cantidad de ruido del receptor de la antena [dB]	6
Velocidad de rotación de la antena	24/36/48 rpm +/- 10% (mode and MFD model dependent)
Ancho de haz vertical de la antena	25°+/-20% (-3dB width) °
Ancho de haz	Adjustable between 2.6° and 5.2° with target separation control (Simrad, B&G) , 2.6° (Lowrance)
Alcance de distancia [millas náuticas]	36
Resistencia al viento del radar	51 m/sec (Max:100 Knots)
Tiempo de calentamiento del radar [minutos]	0

COMUNICACIONES	
Frecuencia del transmisor	X-band - 9.3 to 9.4Ghz
POTENCIA	
Consumo de energía	20W (Typ.) @ 13.8Vdc (21W in dual range mode) Standby:2.9W
Suministro eléctrico (voltaje de suministro)	9V to 31.2Vdc (12/24 Volt systems) Reverse polarity protection Minimum startup voltage 10.8vDC
OTROS	
Potencia de salida [kW]	(at antenna port) 165mW nominal
Información general	
Descripción	High Performance Broadband Radome
Ancho de antena del radar	19"
Tecnología de radar	Broadband FMCW
Alcance máximo del radar	36nm
Requisitos eléctricos del radar	12v / 20 Watt
Características del radar	MARPA, Guard Zones, InstantON, Dual Range*, High Speed*, Beam Sharpening* *NSE and NSO only.

Tabla 5.1. Características específicas BROADBAND RADAR 4G de simrad.



Figura 5.3. Antena de un Broadband Radar de Simrad. Fuente: Simrad.

Northstar Broadband Radar™

RADAR	
Ancho de haz horizontal de la antena [grados]	5.2°+/-10% (-3dB width) °
Ancho de haz vertical de la antena [grados]	30°+/-20% (-3dB width) °
Velocidad de rotación de la antena	24 rpm +/- 10% RPMs
Ruido del radar	6 dB
Tiempo de calentamiento del radar [minutos]	0 min
Resistencia al viento	51 m/sec (Max:100 Knots)
Frecuencia del transmisor	X-band - 9.3 to 9.4Ghz
Potencia de salida	100mW nominal
COMUNICACIONES	
Data I/O Protocol	High Speed Ethernet
DATOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES	
Montaje	Bolts: 4x30xM8 - 304 stainless steel
Altura	11 in \ 280 mm
Diámetro	19.2 in \ 488 mm
Peso	16.31 lbs \ 7.4 kg
Resistencia a la humedad	+35°C, 95% RH
Temperatura de funcionamiento	-25° to +55°C

POTENCIA	
Suministro eléctrico (voltaje de suministro).	9V to 31.2Vdc (12/24 Volt systems) Reverse polarity protection vDC
Consumo de energía	17W (Typ.) @ 13.8Vdc
Consumo de energía en modo Standby	1.6W (Typ.) @ 13.8Vdc – only 110ma
OTROS	
Interconnection Cable	20m standard with RJ45 thin custom (Max 30m)
Interface Heading	NMEA 2000®/NMEA 0183 with adapter/cable kit into display

Tabla 5.1. Características específicas BROADBAND RADAR de Northstar.



Figura 5.4. Antena de un Broadband Radar de Northstar. Fuente: Simrad.

Lowrance Broadband

Información general	
Max. Range Scale	36 nm
Min. Range Scale	1/32 nm (200 ft.)
Tiempo de calentamiento del radar [minutos]	16 seconds
Velocidad rotación	24/36 RPM
Ancho del Haz (Horz/Vert)	2.6° / 25° (Effective)

DATOS TÉCNICOS/MEDIOAMBIENTALES	
Montaje [S, F, B]	Bolts: 4x30xM8 - 304 stainless steel
Temperatura de funcionamiento	-13° to +131°F/-25° to +55°C
Diámetro [mm]	19.2 in \ 488 mm
Humedad	+95°F/+35°C, 95% RH
Estándar de clasificación de impermeabilidad	IPX6
Altura del producto [mm]	280
Peso	16.31 lbs \ 7.4 kg

POTENCIA	
Consumo de energía	20W (Typ.) @ 13.8vDC
Suministro eléctrico (voltaje de suministro)	9 to 31.2vDC (12/24 Volt systems) Reverse polarity protection vDC
Consumo de energía en espera	2.9W(Typ.) @ 13.8vDC

COMUNICACIONES	
Protocolo de E/S de datos	High Speed Ethernet
Potencia de salida del transmisor	165mW nominal
Frecuencia del transmisor	X-band - 9.3 to 9.4GHz

GENERAL	
Cumplimiento	CE, FCC (ID: RAY3G4G), IC: 4697A-3G4G

OTROS	
Cable de interconexión	33ft/10m standard with RI10 thin custom (Max 30m)
Interfaz: Rumbo	SimNet or NMEA 0183 with cable kit into display

RADAR	
Cantidad de ruido del receptor de la antena [dB]	6
Velocidad de rotación de la antena	24/36 rpm +/- 10% RPMs
Ancho de haz vertical de la antena	25 °
Resistencia al viento del rada	51 m/sec (Max:100 Knots)
Tiempo de calentamiento del radar [minutos]	0

Tabla 5.1. Características específicas BROADBAND RADAR de Lowrance.



Figura 5.3. Antena de un Broadband Radar de Lowrance. Fuente: Lowrance..

5.2.2. Chirp Pulse Compression Radar

Estos nuevos radares marinos también basados en técnicas de FMCW, Proporciona un inigualable rango de detección a corto y largo alcance, una gran definición de objetivos y un clutter mínimo. Esto lo consiguen mediante la compresión de pulsos CHIRP que garantiza la llegada de más energía a cada objeto. Todo ello mediante la combinación de las mejores características de los sistemas radares tradicionales de pulso y los radares FMCW. Entre los modelos a destacar se encuentra el HALO™-3 Pulse Compression Radar.

Características generales

HALO™-3 Pulse Compression Radar

Este Radar dispone de las mejores prestaciones de los nuevos Broadband Radar pero además mejorando los aspectos donde estos fallaban:

Rendimiento a largo alcance: El radar HALO de Simrad proporciona un rendimiento a largo alcance comparable con los radares de pulso tradicionales, además de un rendimiento inigualable a corto alcance por debajo de los 6 metros que hasta ahora solo era efectivo en el radar Broadband. En la figura se muestra la comparativa



Figura 5.3. Comparativa de rendimiento a corto y largo alcance. Fuente: Trimer.

Visualización a larga y corta distancia simultáneamente: Este radar permite visualizar larga y corta distancia en modo “doble alcance”, con pantallas divididas completamente independientes.

Alcance real de 48 millas náuticas mediante una antena abierta de 3 pies.
Enfoque del haz con control de separación de objetivos.
Función de doble alcance. (corto y largo alcance)
Procesamiento avanzado de señal con modos personalizado: puerto, alta mar, Meteorología y aves. (5 modos de utilización)
Funcionamiento a alta velocidad (48 rpm)
InstantOn™: respuesta inmediata luego de su encendido (20 seg aprox.)
Seguimiento de objetivos MARPA: hasta 10 objetivos (20 con doble alcance)
Bajo nivel de emisiones electromagnéticas y radiación.
Bajo consumo energético con un funcionamiento a 12/24 V.
Compatibilidad exclusiva con las pantallas multifunción NSS evo2 y NSO evo2 de Simrad.
Conectividad Ethernet.
Exclusiva iluminación de acento LED azul en el pedestal con control de brillo.

Tabla 5.4. Características principales del HALO™-3 Pulse Compression Radar.

Características específicas

DATOS TÉCNICOS/MEDIOAMBIENTALES	
Alto	448 mm / 17.6"
Peso	Sistema: 26.8Kg// Pedestal: 17.7Kg Antenna 3": 4.1Kg Cable 20m: 2.3Kg
Temperatura de funcionamiento	-25° to +55°C
Resistencia del agua	IPX6
Humedad	+40°C 93% RH
Estándar de clasificación de impermeabilidad	IPX6
Radar	
Ancho de haz horizontal de la antena [grados]	2.4°+/-10% (-3dB width), 2.1/1.9/1.6° with Beam Sharpening mode enable (Low/Med/High)
Cantidad de ruido del receptor de la antena [dB]	5
Velocidad de rotación de la antena	Approx. 24-48 RPM (min 20 RPM at 70 knots)
Ancho de haz vertical de la antena	25°+/-20% (-3dB width)
Vibración del radar	2-100Hz and 20G, 100.000 cycles
Alcance de distancia [millas náuticas]	48
COMUNICACIONES	
Conexión	Ethernet 10/100 BaseT, NMEA2000/NMEA0183

POTENCIA	
Consumo de energía	150W (Peak in 70kt winds)
Suministro eléctrico (voltaje de suministro)	10.8V – 31.2V DC (12/24 Volt DC systems)
INFORMACIÓN GENERAL	
Longitud del cable	20m. optional 10m
Tecnología del Radar	Solid-State X band transceiver eith Pulse Compression Technology
Alcance máximo del radar	100m to 48 NM
Caracterísiticas del radar	Peak Power Output: 25W +/- 10% under any transmit condition Radiation Safe Distance: 100W/m ² (Occupational) at 0m – touch anywhere; 10W m ² (public) measured at 28m, FCC CFR47 Part 2. 1091 calculated public safe distance is 0.80m. (Less than the swing circle of the antenna with either method).

Tabla 5.5. Características específicas del HALO™-3 Pulse Compression Radar.



Figura 5.4. Antena del HALO™-3 Pulse Compression Radar. Fuente Simrad.

CONCLUSIÓN

La nueva tecnología es impresionante y representa, sin lugar a dudas, un cambio genuino en la tecnología radar. Hasta ahora la mayoría de los avances estaban enfocados al sistema de procesamiento y muestreo de la imagen, pero esto es diferente: Los nuevos radares basados en el uso de técnicas FMCW suponen un verdadero cambio tecnológico en la parte del radar encargada de obtener la información. El avance en la última década de la tecnología de estado sólido y la apuesta de los fabricantes radar por aplicarla en los radares marinos ha sido la causante de este importante avance. Obviamente, debemos tener en cuenta, que se trata del inicio de esta tecnología aplicada al ámbito marítimo, por lo que primeramente los fabricantes han hecho un enfoque a la marina de recreo, con tan buenos resultados, que no cabe duda que en los próximos años veamos estos radares en los grandes buques de la marina mercante.

Sin embargo, actualmente el Radar FMCW no tiene todas las ventajas necesarias, y el uso del mismo vendrá en función de las necesidades del comprador. La principal ventaja de esta nueva tecnología es su buen rendimiento y su gran nitidez a corto alcance, por lo que, a día de hoy está más enfocado a buques pequeños. Una de sus desventajas más graves es que la baja potencia de salida del transmisor es insuficiente para detectar una RACON. En los buques mercantes, cuyo uso primario del radar es el de evitar colisiones, con una necesidad de mejores prestaciones a largo alcance, por el momento, el radar de pulso actual sigue siendo muy competente y fiable.

Y es que ahora nos encontramos en el punto de comparación y escepticismo con respecto a los nuevos radares en comparación con el tradicional radar de pulso, que tantos años lleva en los puentes de gobierno facilitando la labor de los oficiales. Pero el progreso tecnológico sigue su marcha, y un buen ejemplo lo tenemos en la aviación civil. Pues cuando el magnetrón fue retirado de los radares meteorológicos muchos expertos afirmaron que la baja potencia de transmisión (25 vatios de potencia máxima, por ejemplo) nunca permitiría cubrir las necesidades establecidas por los mismo. Sin embargo, hoy en día estos radares funcionan excepcionalmente

bien, proporcionando a los pilotos beneficios tales como la detección de turbulencia, algo impensable en los radares de pulso.

El progreso tecnológico en el radar marino no ha hecho otra cosa que empezar, pues la buena estabilidad de la frecuencia que proporcionan los transmisores de estado sólido traerán aun mejores e innovadoras ventajas, tales como análisis Doppler de las rachas de viento, pero habrá que esperar un poco para eso. Sin duda es un buen momento para no perderle la pista a esta tecnología, pues es un nuevo mundo radar lo que se vislumbra por el horizonte.

BIBLIOGRAFÍA

IAN KÜMMERLIN GOTTSCHALD , *el radar ISAR (radar de apertura sintética inversa)*. [Página web], sin fecha. URL: <http://revistamarina.cl/revistas/2001/4/Kummerlin.pdf>

MAURICE RUBIN, *Radar the electronic eye*, 1955.

HAROLD ERNEST PENROSE, REGINALD SIDNEY HENRY BOULDING , *Principles and practice of radar*, sin fecha.

RICARD RODRÍGUEZ, MARTOS DAUER, RICARD JAIME PÉREZ, *Manual del operador de ARPA*, 1996.

L. E. FRANKS, *Teoría de la señal*, 1975.

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ, *Introducción al radar*. [Página web], sin fecha. URL: <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/ittst/rdet/apuntes/handout1.pdf>

MANUEL RICO-SECADES, *Radar*. [Página web], sin fecha. URL: <https://www.unioviedo.es/ate/manuel/ESMC-EyE-Bolonia/TG-RADAR.pdf>

ENRIQUE GARCIA MELÓN-, ANTONIO C.BERMEJO DIAZ, JOSÉ PERERA MARRERO, *El Observador radar*, 1994.

JORGE PARKER SANFUENTES , *Historia del radar* . [Página web], sin fecha. URL: http://www.meteovallirana.es/mediapool/96/966160/data/historia_del_radar.parker.pdf

KASAKOVICH, *Nuevas tecnologías en diseño del radar marino*. [Página web], Abril 2009. URL: <https://kasakovich.wordpress.com/2009/04/20/nuevas-tecnologias-en-diseno-del-radar-marino/>

OSKAR BLUMTRITT, HAMBURT OPETZOLD, WILLIAM ASPRAY, *Traking the history of radar* , 1994.

IMO. International Maritime Organization. 1979. *Resolution A.422(XI)*, adopted on 15 November 1979, *Performance standards for Automatic Radar Plotting Aids (ARPA)*.

IMO. International Maritime Organization. 1981. *Resolution A.477(XII)*, adopted on 19 November 1981, *Performance Standards for RADAR equipment*.

IMO. International Maritime Organization. 1981. *Resolution A.482(XII)*, adopted on 19 November 1981, *Training in the use of Automatic Radar Plotting Aids (ARPA)*.

IMO. International Maritime Organization. 2004. *SN/Circ. 243*. adopted on 15 December 2004. *Guidelines for the presentation of navigation-related symbols, terms and abbreviations*.

IMO. International Maritime Organization. *Solas Chapter V - Annex 16 - Radar Equipment*. [Página web]. URL: <https://mcanet.mcga.gov.uk/public/c4/solasv/Annexes/Annex16.htm>

IGOR V. KOMAROV- SERGEY M.SMOLSKIY, *fundamentals of short-range fm radar*, 2003.

LIAÑO CUQUERELLA, R. (2015): *fabricación y puesta en marcha de un radar FMCW de bajo coste en banda S*. Trabajo de fin de grado. Universidad de Vigo. Grado en Ingeniería Mecánica.

SINAN KURT (2007): *Range resolution improvement of FMCW Radars*. Tesis. Natural and applied sciences of middle east technical University. Máster en ingeniería eléctrica y electrónica.

IVAN LOZANO MARMOL (2007): *Monopulse range-doppler FMCW radar signal processing for spatial localization of moving targets*. Tesis. Universidad Politécnica de Cartagena. Máster en Ingeniería de las Telecomunicaciones.

DANIEL VARGAS GONZALEZ (2014): *Detección y movimiento mediante técnicas Radar CW-FM en banda W*. Proyecto fin de carrera. Universidad Politécnica de Catalunya. Grado en Ingeniería en telecomunicaciones.

DAVID VARELA AGRELO (2013): *Diseño y validacion de un radar cw-fm a 94 GHz*. Proyecto final de carrera. Universidad Politécnica de Catalunya. Grado en Ingeniería en telecomunicaciones.

CESAR ALDO CANELO SOLORZANO, WALTER ALBERTO QUIÑONES BERNAOLA (2015): *Diseño e implementación de un radar de un sistema de radar estático de corto alcance de onda continua en frecuencia modulada para mediciones de rango y velocidad*. Tesis de final de carrera. Universidad Católica del Perú. Licenciatura en Ingeniería Electrónica.

TOM BURDEN, *A new wave of marine Radar* [Página web], 2017. URL: <https://www.westmarine.com/WestAdvisor/New-Radar-Technology>

JASON Y. WOOD, *Solid state radar technology*, [Página web], Junio 2015. URL: http://www.powerandmotoryacht.com/electronics/solid-state_radar_technology

KASAKOVICH, el radar marino. [Página web], Enero 2009, URL: <https://kasakovich.wordpress.com/>

BILL JOHNSON, *A new radar Tecnology- "broadband" Radar explained*. [Página web], sin fecha. URL: <http://www.aztecsailing.co.uk/newaztec/radar/A%20New%20Radar%20Technology.pdf>

NAVICO, *Broadband radar the essential Guide*. [Página web], Sin fecha. URL: https://www.simrad-yachting.com/Root/Essential%20Guides/BR-EssentialGuide_US.pdf

LOWRANCE, SIMRAD, BANDG, *Broadband radar reinventing radar essential guide*, [Página web], Sin fecha. URL: http://www.lowrance.com/Global/Lowrance/Documents/Broadband%20Radar%204G_3G%20Essential%20Guide_3406.pdf

RAYMARINE, *New quantum™ wireless chirp radar*. [Página web], Sin fecha.
URL: <http://www.raymarine.es/uploadedFiles/Products/Radar/Quantum/NEW-Raymarine-Quantum-by-FLIR.pdf>

