



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo software y simulación de radar pasivo

Autor: Raúl González Gómez

Director: Carlos García de la Cueva

Codirector: Javier Matanza Domingo

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Desarrollo y simulación radar pasivo

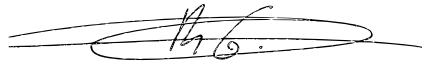
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Raúl González Gómez

Fecha: 23/06/2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Carlos García de la Cueva

Fecha: 23/06/2022



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo software y simulación de radar pasivo

Autor: Raúl González Gómez

Director: Carlos García de la Cueva

Codirector: Javier Matanza Domingo

Madrid

Agradecimientos

Agradecimientos a mis padres y directores, sin su ayuda y apoyo no habría sido posible este proyecto.

DESARROLLO SOFTWARE Y SIMULACIÓN RADAR PASIVO

Autor: González Gómez, Raúl.

Director: García de la Cueva, Carlos.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo consiste en el diseño de algoritmos de procesamiento digital de señal aplicados a un sistema de radar pasivo (basado en el estándar DVB-T [1]).

Un radar convencional es capaz de detectar e identificar la posición de un blanco a partir de los ecos electromagnéticos de la señal transmitida. El receptor, partiendo del conocimiento de dicha señal, maximiza la relación señal a ruido de la señal reflejada mediante la aplicación de un filtro adaptado a la misma.

Sin embargo, los radares pasivos no emiten radiación electromagnética y se aprovechan de fuentes de señal no cooperativas, denominadas iluminadores de oportunidad (como es el caso de los emisores de radiodifusión terrestre DVB-T). Debido a ello, el receptor deberá reconstruir la señal de referencia para poder posteriormente compararla con los ecos recibidos.

En este proyecto se han desarrollado las etapas de: adaptación de la frecuencia de muestreo, reconstrucción de la señal de referencia y generación de la matriz radar.

El objetivo del remuestreo es adaptar la frecuencia de reloj del convertidor analógico-digital a un múltiplo de la tasa de muestras por segundo empleada por el iluminador de oportunidad. La generación de la matriz radar se obtiene mediante el cómputo de la matriz de ambigüedad cruzada entre la señal de referencia reconstruida y la señal de observación (ecos no contaminados por la señal de referencia).

Los radares pasivos tradicionales obtienen las señales de referencia y observación con cadenas de recepción independientes. Para minimizar la interferencia entre ambos canales, la señal de referencia se obtiene con una antena directiva que apunta hacia el iluminador de oportunidad; y la señal de observación, mediante una antena semi-omnidireccional con un nulo en la dirección de llegada de la señal de referencia.

En el sistema radar pasivo presentado en este documento, se propone emplear una única cadena de recepción. Y a partir de la señal recibida se separan las señales de referencia y observación mediante técnicas digitales.

Palabras clave: Radar, radar pasivo, guerra electrónica, vigilancia, procesamiento de señal

1. Introducción

Los sistemas radar tienen un papel cada vez más importante debido al creciente número de aparatos autónomos como drones y vehículos no tripulados, de los que es necesario conocer su posición y estado. Disponer de una tecnología que permita la localización de todos los elementos aéreos que no entre en conflicto, ni genere interferencias en ninguno de los sistemas ya desplegados, es uno de los objetivos actuales de las empresas desarrolladoras de sistemas de defensa.

Los radares pasivos representan una gran ventaja a la hora de implementarlos en entornos urbanos y sensibles con el espectro radioeléctrico, puesto que, al no emitir radiación electromagnética, no generan conflictos con las infraestructuras de comunicaciones ya desplegadas.

Por ello son una de las tecnologías radar con más auge en el mercado y que presentan más perspectiva de crecimiento en los próximos años. Ya existen sistemas de radar pasivo desplegados, centrándose su uso principal en el sector de la defensa de posiciones estratégicas [2].

2. Definición del Proyecto

En este trabajo fin de grado se va a realizar el desarrollo software de un radar pasivo realizando la simulación de este en un entorno con objetivos sintéticos. Como parte de la simulación se van a incluir etapas de generación de señales OFDM, basadas en el estándar DVB-T. Así mismo se van a simular los efectos de canal para la señal de referencia y para los ecos rebotados.

El simulador desarrollado es flexible a la hora de implementar diferentes blancos, es transparente al de blancos presentes, y a la trayectoria seguida por estos.

En el receptor del radar pasivo, se va a implementar toda la cadena de procesado digital de señal para poder realizar una correcta reconstrucción de la señal de referencia, así como la separación de los canales de vigilancia y observación, mediante algoritmos de estimación de canal y la diferencia de las señales.

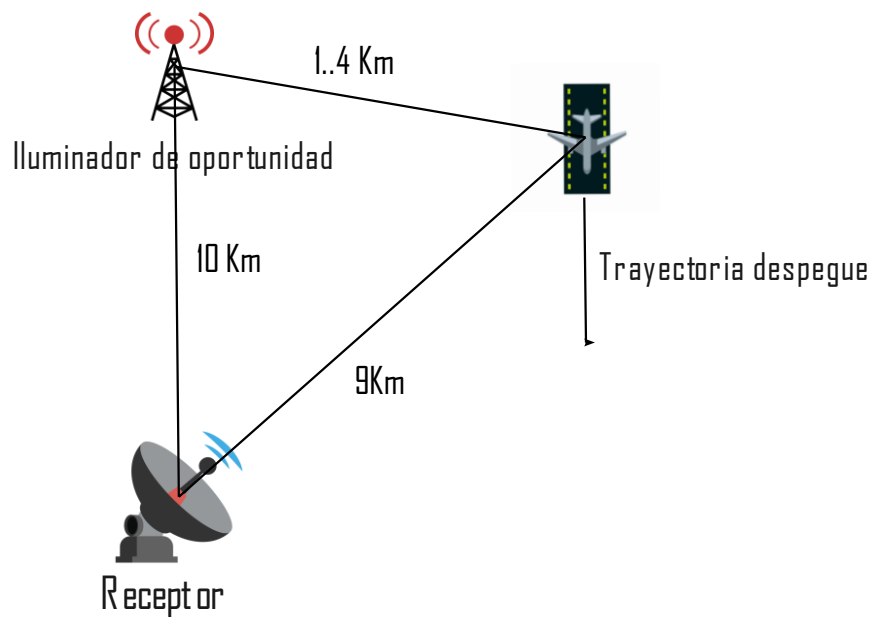


Ilustración 1 Diagrama del entorno 3D empleado en la verificación de los algoritmos propuestos

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Como se ha explicado en el apartado anterior, en este trabajo se va a realizar el desarrollo de un sistema de radar pasivo con un único canal de recepción. Esto implica que la cadena de procesado de señal debe realizar la reconstrucción de la señal de referencia recibida, y eliminar la parte de la señal que contiene los ecos reflejados de los blancos. Esto se hace para simplificar el material requerido en una posible futura implementación y para abaratar los costes.

Este sistema radar tiene varias etapas de procesado con el fin de realizar un acondicionamiento correcto de la señal recibida. La cadena de procesado realizada es la siguiente:

1. Adaptación de frecuencia de muestreo
2. Sincronismo de símbolo
3. Separación de canales
4. Cálculo función de ambigüedad

Para realizar la simulación del escenario representado en la *Ilustración 1*, se ha dividido el tiempo de total de simulación en iteraciones, las cuales permiten representar un funcionamiento realista del radar, ya que de esta forma se consigue emular el tiempo de integración (el tiempo de recepción de señal).

Por cada iteración de la simulación se ha obtenido una matriz radar (función de ambigüedad cruzada), representando la velocidad biestática, y la distancia biestática del objetivo detectado.

Se ha introducido un avión describiendo una trayectoria de despegue en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado en la simulación. De esta forma se puede verificar el correcto funcionamiento del sistema en conjunto con un escenario realista.

El escenario se describe con detalle en la *Ilustración 1*

4. Resultados

Al realizar la simulación del entorno, se ha conseguido generar una función de ambigüedad por cada iteración de la simulación.

Al analizar la sucesión de matrices radar se puede conocer la trayectoria seguida por el objetivo, así como la progresión de velocidades que ha tenido. En este caso por el avión en la trayectoria de despegue

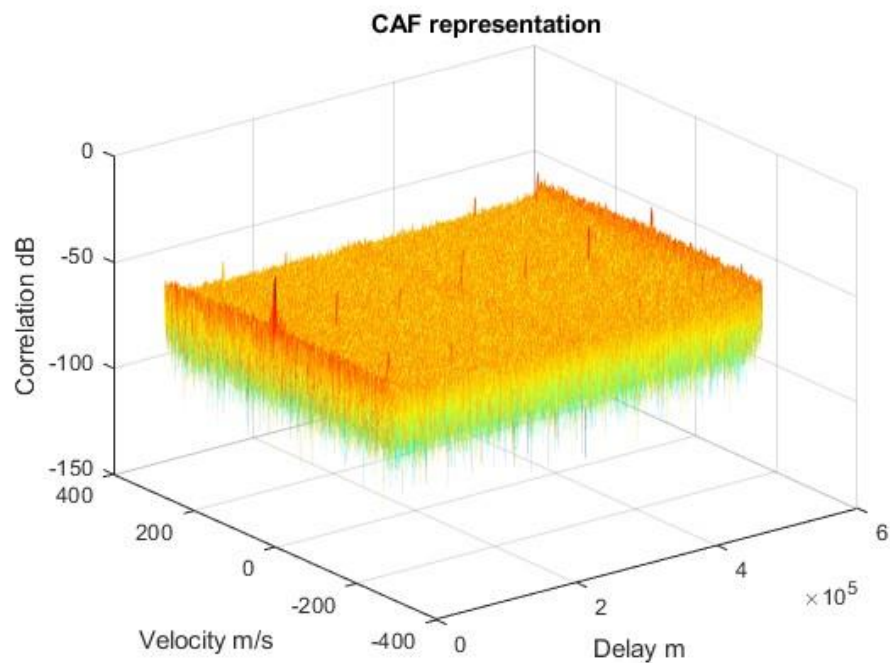


Ilustración 2 Matriz de ambigüedad cruzada obtenida en la primera iteración de la simulación

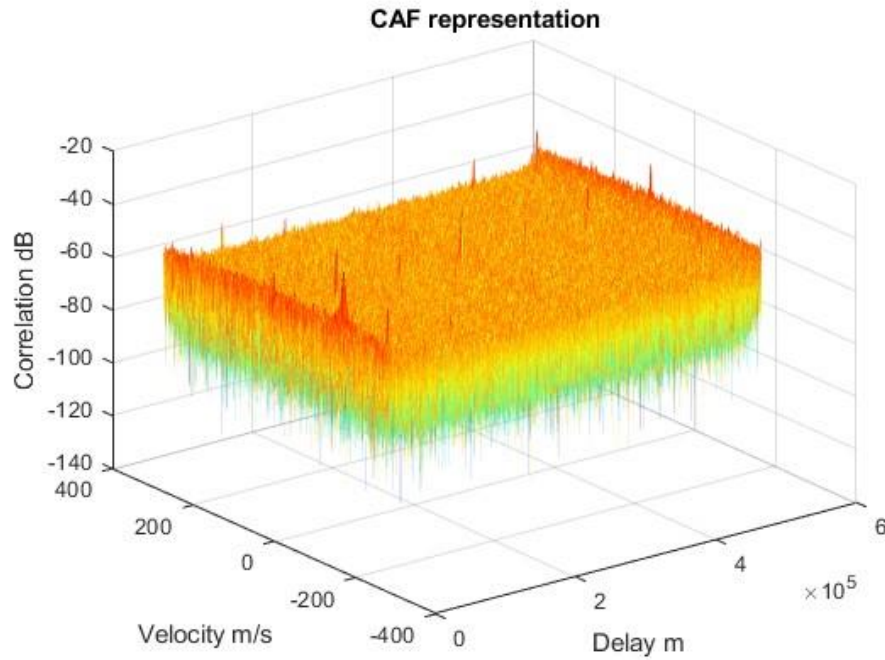


Ilustración 3 Matriz de ambigüedad cruzada obtenida en la iteración 130 de la simulación

Se puede comprobar que inicialmente el avión tiene velocidad 0 m/s, y por ello desplazamiento en frecuencia nulo, pero que, en posteriores etapas de la simulación, la velocidad aumenta y con ello el desplazamiento en frecuencia observable en la matriz radar.

5. Conclusiones

Este trabajo demuestra que es posible realizar un sistema de radar pasivo con un único canal de recepción, además pone de manifiesto que con herramientas de programación al alcance de cualquier usuario básico es posible realizar una simulación realista sin emplear toolboxes o código externo.

También demuestra que los radares pasivos son realizables y que este tipo de tecnologías puede presentar una gran diferencia en el mercado actual de radares. Además, este trabajo permite el futuro desarrollo de nuevos algoritmos y mejoras, ya que se ha realizado en un entorno de programación base, sin complementos software.

6. Referencias

[ETSI, Digital Video Broadcasting Framing structure, channel coding and modulation for
1 digital terrestrial television, Sophia Antipolis Cedex: ETSI, 2015.
]

[J. M. N. García, «defensa.com,» Edefa S.A, [En línea]. Available:
2 <https://www.defensa.com/industria/radar-pasivo-hensoldt-muestra-capacidades-otan>.
] [Último acceso: 26 6 2022].

[gnuradio, «gnuradio,» [En línea]. Available: <https://www.gnuradio.org/>. [Último acceso:
3 2022 6 26].
]

[A. E. Fuste, J. V. Tarres, A. B. Ibars y A. A. Sole, *GEOMETRIA DE LOS SISTEMAS*
4 *RADAR BIESTATICOS*, Barcelona: Dpt. de Teoria de la Sefial y Comunicaciones. Grupo
] A.H.R. E. T.S. Ing. Telecom. de Barcelona. U.P.C.

[Indra, «indracompany,» 7 2 2013. [En línea]. Available:
5 [https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-desarrolla-sistrema-radar-pasivo-alta-](https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-desarrolla-sistrema-radar-pasivo-alta-resolucion)
] [resolucion](https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-desarrolla-sistrema-radar-pasivo-alta-resolucion). [Último acceso: 27 6 2022].

[J. M. Pérez, *Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático para aplicaciones*,
6 Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
]

[Wikipedia, «Wikipedia,» 27 8 2021. [En línea]. Available:
7 [https://es.wikipedia.org/wiki/Acceso_m%C3%BAltiple_por_divisi%C3%B3n_de_frecu-](https://es.wikipedia.org/wiki/Acceso_m%C3%BAltiple_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales)
] [encias_ortogonales](https://es.wikipedia.org/wiki/Acceso_m%C3%BAltiple_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales). [Último acceso: 26 6 2022].

[F.Pieralice, F. Santi, D. Pastina, M. Bucciarelli, M. A. H. Ma y M. Cherniakov, *GNSS-*
8 *Based Passive Radar for Maritime Surveillance: Long Integration Time MTI Technique*,
] Roma.

[Analog Devices, «analog.com,» [En línea]. Available:
9 <https://www.analog.com/en/products/ad9363.html>. [Último acceso: 26 6 2022].

]

[J. H. McClellan y T. W. Parks, *FIR Digital Filter Design Techniques Using Weighted*
1 *Chebyshev Approximation*, IEEE, 1975.

0

]

[O. Mahfoudia, F. Horlin y X. Neyt, *On the feasibility of DVB-T based passive radar with*
1 *a single receiver channel*, IEEE.

1

]

[C. MOSCARDINI, D. PETRI, A. CAPRIA, M. CONTI, M. CONTI y F. BERIZZI,
1 *Batches Algorithm for Passive Radar: A Theoretical Analysis*, Roma: IEEE, 2013.

2

]

[C. E. Hajjar, *Synchronization Algorithms for OFDM Systems (IEEE802.11a, DVB-T)*,
1 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg , 2007.

3

]

[C.-W. Kuang, *Timing Synchronization for DVB-T System*, Chiao Tung : Institute of
1 Electronics Engineering National Chiao Tung University.

4

]

[Wikipedia, «Wikipedia,» 27 4 2022. [En línea]. Available:
1 https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecue

5 [ncias_ortogonales#:~:text=La%20multiplexaci%C3%B3n%20por%20divisi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecue)

]

%20de,en%20QAM%20o%20en%20PSK. [Último acceso: 26 6 2022].

SOFTWARE DEVELOPMENT AND SIMULATION PASSIVE RADAR

Author: González Gómez, Raúl.

Supervisor: García de la Cueva, Carlos

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This work consists of the design of digital signal processing algorithms applied to a passive radar system (based on the DVB-T standard [1]).

A conventional radar is capable of detecting and identifying the position of a target from the electromagnetic echoes of the transmitted signal. The receiver, based on knowledge of said signal, maximizes the signal-to-noise ratio of the reflected signal by applying a filter adapted to it.

However, passive radars do not emit electromagnetic radiation and take advantage of non-cooperative signal sources, called opportunity illuminators (as is the case with DVB-T terrestrial broadcasters). Due to this, the receiver will have to reconstruct the reference signal to be able to later compare it with the received echoes.

In this project, the following stages have been developed: adaptation of the sampling frequency, reconstruction of the reference signal and generation of the radar matrix.

The purpose of resampling is to adapt the clock frequency of the analog-to-digital converter to a multiple of the sample rate per second used by the opportunity illuminator. The generation of the radar matrix is obtained by computing the cross-ambiguity matrix between the reconstructed reference signal and the observation signal (echoes not contaminated by the reference signal).

Traditional passive radars obtain the reference and observation signals with separate receive chains. To minimize the interference between both channels, the reference signal is obtained with a directional antenna pointing towards the illuminator of opportunity; and the observation signal, by means of a semi-omnidirectional antenna with a null in the direction of arrival of the reference signal.

In the passive radar system presented in this document, it is proposed to use a single receive chain. And from the received signal, the reference and observation signals are separated using digital techniques.

Keywords: Radar, Passive radar, surveillance, signal processing, electronic war

1. Introduction

Radar systems play an increasingly important role due to the growing number of autonomous devices such as drones and unmanned vehicles, whose position and status must be known. Having a technology that allows the location of all aerial elements that does not come into conflict or generate interference in any of the systems already deployed, is one of the current objectives of defense system development companies.

Passive radars represent a great advantage when implementing them in urban and sensitive environments with the radioelectric spectrum, since, by not emitting electromagnetic radiation, they do not generate conflicts with the communications infrastructures already deployed.

For this reason, they are one of the fastest growing radar technologies on the market and have the greatest growth prospects in the coming years. There are already deployed passive radar systems, focusing their main use in the sector of defense of strategic positions [2].

2. Project definition

In this end-of-grade project, the software development of a passive radar will be carried out, simulating it in an environment with synthetic objectives. As part of the simulation, OFDM signal generation stages will be included, based on the DVB-T standard. Likewise, the channel effects for the reference signal and for the bounced echoes will be simulated.

The developed simulator is flexible when it comes to implementing different targets, it is transparent to the number of targets present, and to the trajectory followed by them.

In the passive radar receiver, the entire digital signal processing chain will be implemented in order to carry out a correct reconstruction of the reference signal, as well as the separation of the surveillance and observation channels, by means of channel estimation algorithms and the difference of the signals

3. System description

As explained in the previous section, in this work the development of a passive radar system with a single reception channel will be carried out. This implies that the signal processing chain must perform the reconstruction of the received reference signal and eliminate the part of the signal that contains the reflected echoes of the targets.

This is done to simplify the material required in a possible future implementation and to reduce costs.

This radar system has several processing stages in order to carry out a correct conditioning of the received signal. The processing chain performed is as follows:

1. Sampling rate adaptation
2. Symbol sync
3. Channel separation
4. Calculation function of ambiguity

To carry out the simulation of the scenario represented in Illustration 1, the total simulation time has been divided into iterations, which allow to represent a realistic operation of the radar, since in this way it is possible to emulate the integration time (the time of signal reception).

For each iteration of the simulation, a radar matrix (cross ambiguity function) has been obtained, representing the bistatic speed, and the bistatic distance of the detected target.

An aircraft describing a take-off path in a uniformly accelerated rectilinear motion has been entered into the simulation. In this way, the correct operation of the system can be verified in conjunction with a realistic scenario.

The scenario is described in detail in *Illustration 4*

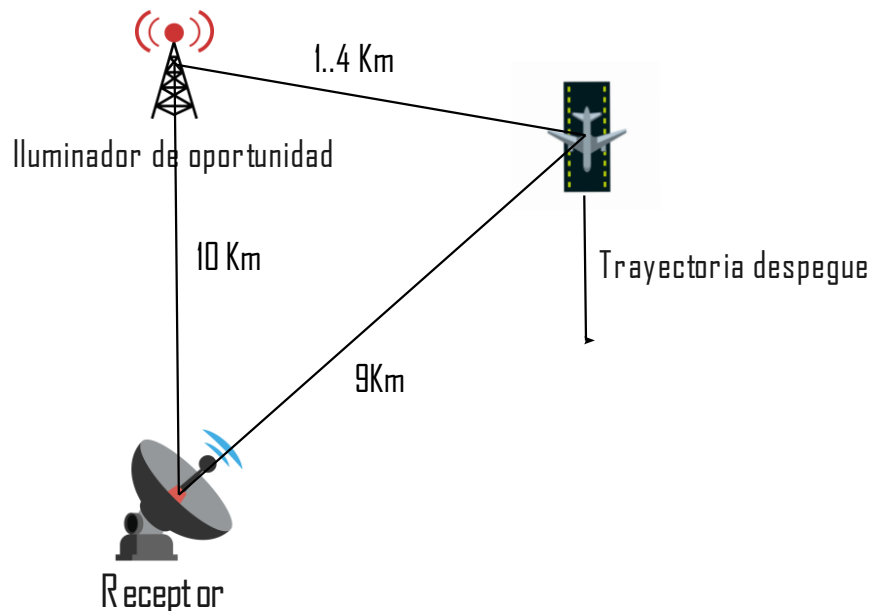


Illustration 4 Simulation environment for the verification of the proposed algorithms

4. Results

By simulating the environment, it has been possible to generate an ambiguity function for each iteration of the simulation.

By analyzing the succession of radar arrays, it is possible to know the trajectory followed by the target, as well as the progression of speeds it has had. In this case by the aircraft on the takeoff path

It can be verified that initially the plane has a speed of 0 m/s, and therefore null frequency displacement, but that, in later stages of the simulation, the speed increases and with it the observable frequency displacement in the radar array.

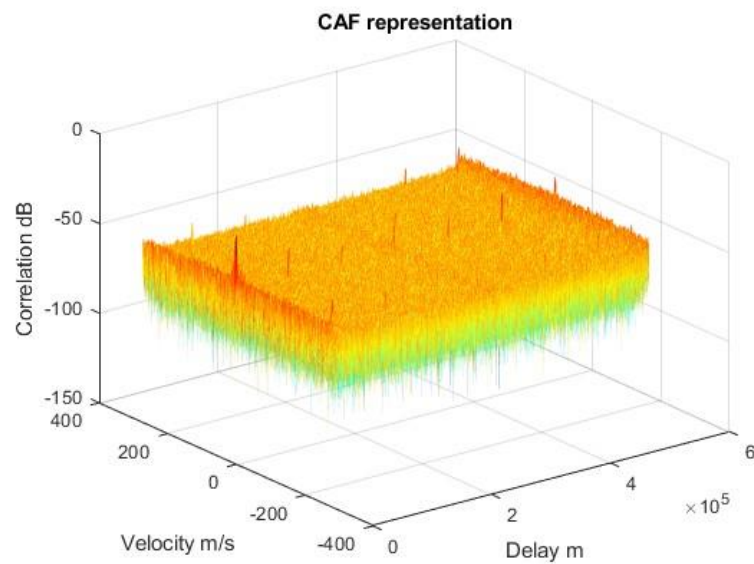


Illustration 5 Cross ambiguity function resulted from the execution of the first iteration of the simulation

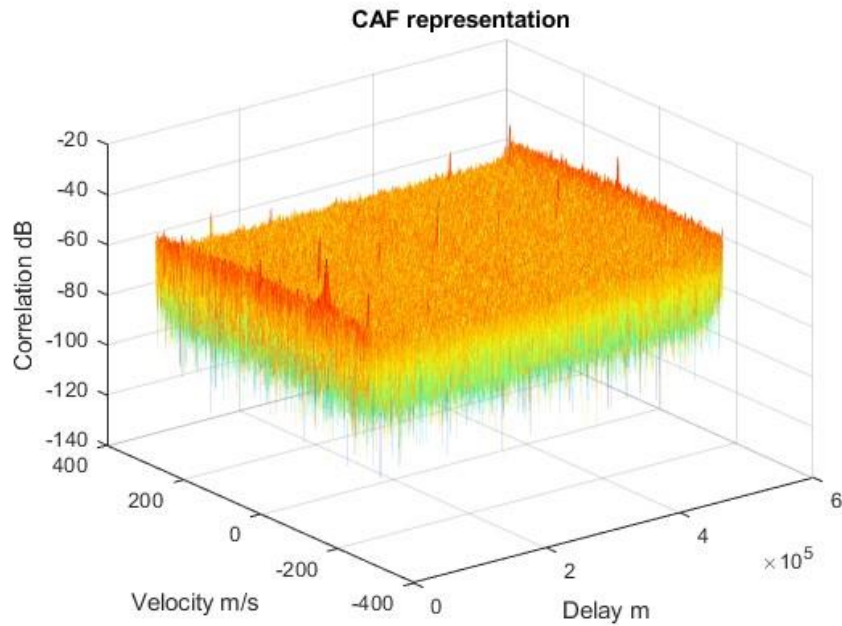


Illustration 6 Cross ambiguity function resulted from the execution of the iteration 130 of the simulation

5. Conclusions

This work demonstrates that it is possible to create a passive radar system with a single reception channel and shows that with programming tools available to any basic user, it is possible to carry out a realistic simulation without using toolboxes or external code.

It also demonstrates that passive radars are feasible and that these types of technologies can make a big difference in today's radar market. In addition, this work allows the future

development of new algorithms and improvements, since it has been carried out in a basic programming environment, without software add-ons.

Mentions

[ETSI, Digital Video Broadcasting Framing structure, channel coding and modulation for 1 digital terrestrial television, Sophia Antipolis Cedex: ETSI, 2015.

]

[J. M. N. García, «defensa.com,» Edefa S.A, [En línea]. Available:
2 <https://www.defensa.com/industria/radar-pasivo-hensoldt-muestra-capacidades-otan>.
] [Último acceso: 26 6 2022].

[gnuradio, «gnuradio,» [En línea]. Available: <https://www.gnuradio.org/>. [Último acceso:
3 2022 6 26].
]

[A. E. Fuste, J. V. Tarres, A. B. Ibars y A. A. Sole, *GEOMETRIA DE LOS SISTEMAS*
4 *RADAR BIESTATICOS*, Barcelona: Dpt. de Teoria de la Sefial y Comunicaciones. Grupo
] A.H.R. E. T.S. Ing. Telecom. de Barcelona. U.P.C.

[Indra, «indracompany,» 7 2 2013. [En línea]. Available:
5 [https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-desarrolla-sistrema-radar-pasivo-alta-](https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-desarrolla-sistrema-radar-pasivo-alta-resolucion)
] [resolucion](https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-desarrolla-sistrema-radar-pasivo-alta-resolucion). [Último acceso: 27 6 2022].

[J. M. Pérez, *Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático para aplicaciones*,
6 Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
]

[Wikipedia, «Wikipedia,» 27 8 2021. [En línea]. Available:
7 [https://es.wikipedia.org/wiki/Acceso_m%C3%BAltiples_por_divisi%C3%B3n_de_frecu-](https://es.wikipedia.org/wiki/Acceso_m%C3%BAltiples_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales)
] [encias_ortogonales](https://es.wikipedia.org/wiki/Acceso_m%C3%BAltiples_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales). [Último acceso: 26 6 2022].

[F.Pieralice, F. Santi, D. Pastina, M. Bucciarelli, M. A. H. Ma y M. Cherniakov, *GNSS-*
8 *Based Passive Radar for Maritime Surveillance: Long Integration Time MTI Technique*,
] Roma.

[Analog Devices, «analog.com,» [En línea]. Available:
9 <https://www.analog.com/en/products/ad9363.html>. [Último acceso: 26 6 2022].
]

[J. H. McClellan y T. W. Parks, *FIR Digital Filter Design Techniques Using Weighted*
1 *Chebyshev Approximation*, IEEE, 1975.

0

]

[O. Mahfoudia, F. Horlin y X. Neyt, *On the feasibility of DVB-T based passive radar with a single receiver channel*, IEEE.

1

]

[C. MOSCARDINI, D. PETRI, A. CAPRIA, M. CONTI, M. CONTI y F. BERIZZI, *Batches Algorithm for Passive Radar: A Theoretical Analysis*, Roma: IEEE, 2013.

2

]

[C. E. Hajjar, *Synchronization Algorithms for OFDM Systems (IEEE802.11a, DVB-T)*, Friedrich-Alexander-Universität at Erlangen-Nurnberg , 2007.

3

]

[C.-W. Kuang, *Timing Synchronization for DVB-T System*, Chiao Tung : Institute of Electronics Engineering National Chiao Tung University.

4

]

[Wikipedia, «Wikipedia,» 27 4 2022. [En línea]. Available:
1 [https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecue](https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales#:~:text=La%20multiplexaci%C3%B3n%20por%20divisi%C3%B3n%20de,en%20QAM%20o%20en%20PSK)
5 [ncias_ortogonales#:~:text=La%20multiplexaci%C3%B3n%20por%20divisi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales#:~:text=La%20multiplexaci%C3%B3n%20por%20divisi%C3%B3n%20de,en%20QAM%20o%20en%20PSK)
] [%20de,en%20QAM%20o%20en%20PSK](https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales#:~:text=La%20multiplexaci%C3%B3n%20por%20divisi%C3%B3n%20de,en%20QAM%20o%20en%20PSK). [Último acceso: 26 6 2022].

Índice de la memoria

1	Introducción	6
1.1	Motivación	7
2	Descripción de las Tecnologías	9
2.1	Radars pulsados	9
2.2	Radars pasivos	11
2.3	Ecuación radar	13
2.4	Función de ambigüedad.....	15
3	Estado de la Cuestión	16
3.1	Iluminador de oportunidad	17
3.1.1	Telefonía móvil.....	20
3.1.2	Televisión terrestre.....	20
3.1.3	Fuentes satelitales	21
4	Definición del Trabajo	23
4.1	Justificación.....	23
4.1.1	Ausencia de radares pasivos mono canal.....	23
4.1.2	Reducida información de radares pasivo.....	23
4.2	Objetivos	24
4.2.1	Objetivos didácticos	24
4.2.2	Objetivos técnicos.....	24
4.3	Metodología.....	24
4.4	Planificación y Estimación Económica	25
5	Arquitectura del receptor digital	26
5.1	Descripción bloques	27
5.1.1	Bloque adaptación frecuencia de muestreo.....	27
5.1.2	Bloque sincronismo símbolo.....	31
5.1.3	Bloque separación señales	31
5.1.4	Bloque cálculo función de ambigüedad.....	32
5.1.5	Bloque detección	33

6	<i>Reacondicionamiento Señal de referencia</i>	34
6.1	Métodos de sincronismo de símbolo	34
6.1.1	<i>Sincronismo primitivo</i>	34
6.1.2	<i>Sincronismo fino</i>	36
6.1.3	<i>Detección fase pilotos dispersos</i>	38
6.2	Algoritmo separación señal referencia	40
7	<i>Cálculo función de ambigüedad</i>	44
8	<i>Generación de escenario</i>	52
8.1	Parámetros simulación	52
8.2	Escenario simulación.....	55
9	<i>Análisis de Resultados</i>	58
10	<i>Conclusiones y Trabajos Futuros</i>	62
11	<i>Bibliografía</i>	63
	ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS	66

Índice de figuras

Ilustración 1 Diagrama del entorno 3D empleado en la verificación de los algoritmos propuestos.....	11
Ilustración 2 Matriz de ambigüedad cruzada obtenida en la primera iteración de la simulación	12
Ilustración 3 Matriz de ambigüedad cruzada obtenida en la iteración 130 de la simulación	13
Illustration 4 Simulation environment for the verification of the proposed algorithms.....	18
Illustration 5 Cross ambiguity function resulted from the execution of the first iteration of the simulation	19
Illustration 6 Cross ambiguity function resulted from the execution of the iteration 130 of the simulation	20
Ilustración 7 Despliegue radar pasivo de uso militar	7
Ilustración 8 Radar civil pulsado	10
Ilustración 9 Ejemplo radar pulsado multiestático	10
Ilustración 10 Representación geometría biestática	12
Ilustración 11 Óvalos de Cassini	13
Ilustración 12 Comparación funcionamiento radar pulsado vs radar pasivo.....	13
Ilustración 13 Función ambigüedad obtenida a partir de una señal pulso rectangular.....	15
Ilustración 14 Despliegue radar pasivo HENSOLDT	16
Ilustración 15 Estación telefonía	18
Ilustración 16 Función ambigüedad señal modulada en FM.....	19
Ilustración 17 Función de ambigüedad obtenido con señales DVB-T	19
Ilustración 18 Ejemplo antena televisión digital	21
Ilustración 19 Ejemplo uso GNSS para radar pasivo	22
Ilustración 20 Planificación tareas expuesta en un diagrama de Gant	25
Ilustración 21 Cadena de recepción empleada	26
Ilustración 22 Espectro de la señal OFDM después de la interpolación	28

Ilustración 23 Respuesta en frecuencia filtro reconstrucción empleado en la adaptación de frecuencia de muestreo	29
Ilustración 24 Espectro señal OFDM después del diezmado	30
Ilustración 25 Función ambigüedad para señal DVB-T	33
Ilustración 26 Representación prefijo cíclico en símbolos DVB-T.....	34
Ilustración 27 Resultado algoritmo correlación prefijo cíclico	35
Ilustración 28 Patrón pilotos dispersos acorde al estándar DVB-T.....	37
Ilustración 29 Ejemplo respuesta al impulso obtenida con los pilotos dispersos.....	38
Ilustración 30 Matriz de ambigüedad obtenida sin detección de fase de pilotos dispersos	39
Ilustración 31 Matriz de ambigüedad obtenida con detección de fase de pilotos dispersos	40
Ilustración 32 Constelación 64 QAM.....	41
Ilustración 33 Símbolo OFDM recibido antes y después de la corrección	42
Ilustración 34 Constelaciones del símbolo OFDM recibido antes y después de la corrección	43
Ilustración 35 Diagrama para el cálculo de la CAF por medio del primero algoritmo no optimizado	45
Ilustración 36 Segmentación señales	46
Ilustración 37 Simulación objetivo retardado.....	50
Ilustración 38 Simulación objetivo retardado y desplazado en frecuencia	51
Ilustración 39 Velocidad instantánea avión.....	56
Ilustración 40 Gráfico evolución altura avión	56
Ilustración 41 Matriz de ambigüedad resultado de la ejecución de la primera iteración de la simulación.....	58
Ilustración 42 Matriz de ambigüedad resultado de la ejecución de la iteración 25 de la simulación.....	59
Ilustración 43 Matriz de ambigüedad resultado de la ejecución de la nonagésimo quinta iteración de la simulación	59
Ilustración 44 Matriz de ambigüedad resultado de la ejecución de la última iteración de la simulación.....	60
Ilustración 45 Evolución del objetivo en el entorno simulado	60

Ilustración 46 Objetivos desarrollo sostenible 66

Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros filtro reconstrucción 29

Tabla 2 Tiempos ejecución..... 49

Tabla 3 Parámetros simulación empleados 54

Tabla 4 Parámetros entorno simulación 57

1 INTRODUCCIÓN

En un mundo en el que el espectro radio eléctrico cada vez se encuentra más solicitado debido al aumento de los dispositivos conectados y al incremento de sistemas de comunicación, es imprescindible reducir al mínimo la posible saturación de este.

Los sistemas radar de largo alcance representan una problema para el espectro en las zonas en las que se encuentran desplegados, ya que requieren de frecuencias con baja atenuación, empleando altas potencias de transmisión, reservando en exclusividad ciertas frecuencias, desaprovechadas para el resto de las aplicaciones de comunicaciones.

Por el contrario, los radares pasivos no requieren de reserva de frecuencias para su funcionamiento y localización de objetivos, convirtiéndolos en uno de los sistemas radar más investigados de la actualidad. Para la ubicación de blancos, se hace uso fuentes de señal no cooperativas, denominadas iluminadores de oportunidad (como es el caso de los emisores de radiodifusión terrestre DVB-T [1]).

Además, la capacidad de detección sin emisión de impulsos electromagnéticos, les dota de unas características furtivas excelentes para su uso militar. Hoy en día la gran mayoría de los radares pasivos se emplean en ambientes militares y de inteligencia. Las grandes potencias invierten en el desarrollo e implementación de este tipo de radares, puesto que al desplegarlos en el campo de batalla el enemigo no puede conocer la localización de este, haciendo que sea también uno de los radares más seguros para operar desde el punto de vista táctico.

Un sistema de radar pasivo se puede desplegar en todo tipo de entornos urbanos o sensibles a las interferencias radioeléctricas ya que, al no emitir señales, no saturan el espectro, ni generan interferencias. Esta es una de las características por las cuales los radares pasivos están aumentando en popularidad, además, de no necesitar licencias ni permisos para desplegarse.

En este trabajo fin de grado se va a realizar el desarrollo software de un radar pasivo realizando la simulación de este en un entorno con objetivos sintéticos. Como parte de la simulación se van a incluir etapas de generación de señales OFDM, basadas en el estándar DVB-T. Así mismo se van a simular los efectos de canal para la señal de referencia y para los ecos rebotados.



Ilustración 7 Despliegue radar pasivo de uso militar

En el desarrollo del sistema únicamente se va a emplear un canal de recepción a diferencia de los que se acostumbra a ver en uso comercial, en los que se emplea un canal para la recepción de la señal obtenida directamente del iluminador de oportunidad, y otro para la señal reflejada del avión. Se ha escogido este compromiso hardware para abaratar aún más los costes, y minimizar el hardware lo máximo. Esto hace que, en el procesado de señal del receptor, se tenga que incluir una etapa de separación y diferenciación de la señal recibida, y la de observación.

1.1 MOTIVACIÓN

Este trabajo surge del deseo de profundizar en el diseño y desarrollo de algoritmos de procesado de señal orientados a un sistema de radar pasivo.

Se ha decidido implementar un sistema radar pasivo, debido a las excelentes características de invisibilidad que tiene frente a los sistemas de guerra electrónica, su bajo coste, y su fácil despliegue.

Gracias a que el sistema de radar pasivo emplea iluminadores de oportunidad ya presentes en el terreno en el que se va a desplegar, no es necesario que se le asigne ninguna frecuencia en específico para su uso, como sí que ocurre en un radar convencional. Siendo este uno de los motivos por los cuales se ha escogido este tipo de radar para el trabajo.

Actualmente no existen proyectos *Open Source* completos que incluyan una simulación de un radar pasivo, limitándose los existentes únicamente a la implementación hardware final con herramientas de radios definidas por software como GNU Radio [3].

2 DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Se define como sistema radar a todo aquel sistema que permita la localización de objetivos al enviar una serie de pulsos electromagnéticos, los cuales rebotan en el objetivo, y son analizados en una estación base.

Dependiendo del funcionamiento del radar se distinguen dos tipos de radares:

2.1 RADARES PULSADOS

Se trata del radar más común implementado en la actualidad. Se emplea tanto para uso civil como para uso militar.

En este tipo de radares, se envía un pulso en una dirección conocida empleando una antena altamente directiva, a una alta potencia. Al recibir el pulso rebotado del blanco, es posible conocer la posición del blanco y la velocidad de este.

Son sistemas con un gran alcance, y con una gran precisión. Al enviar y recibir una señal conocida, el procesado de señal necesario en la recepción de la señal es muy reducido. Además, por lo general son sistemas con una gran resiliencia, puesto que suelen emplear modulaciones y formas de onda favorables para su aplicación concreta.



Ilustración 8 Radar civil pulsado

Normalmente estos sistemas radar cuentan con el emisor y el receptor de la señal en la misma localización, en el caso de que este sea el caso, reciben el nombre de radares monoestáticos, es la configuración más común, pero si, por el contrario, el emisor y receptor se encuentran desacoplados en diferentes localizaciones, se conocen como radares multiestáticos.

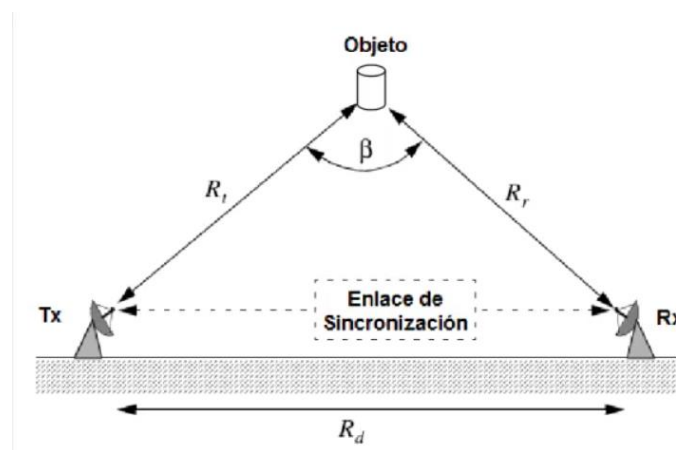


Ilustración 9 Ejemplo radar pulsado multiestático

El principio de localización de este tipo de radares puede variar en función de la tecnología que empleen, por lo general, se basan en el análisis de los ecos recibidos desde un objetivo que refleja las ondas incididas en él. A partir de la señal reflejada es posible obtener gran

cantidad de información, incluyendo la velocidad del objetivo, la distancia a este, o incluso de que objetivo se trata.

2.2 RADARES PASIVOS

Este tipo de radares son los menos comunes en la actualidad, se suelen emplear para uso militar, aunque también es posible destinarlos a uso civil.

El principio de funcionamiento es diferente a los radares convencionales. En este tipo de radares no se cuenta con un emisor conocido, por el contrario, únicamente se reciben señales provenientes de localizaciones desconocidas.

Este tipo de radares hacen uso de generadores de señal no cooperativos, destinados inicialmente a otros usos, son conocidos como iluminadores de oportunidad.

Son estos iluminadores de oportunidad no cooperativos los que generan el gran inconveniente de los radares pasivos, y es que estos no pueden escoger ni variar la forma de onda o modulación que se está empleando para la detección. Por lo general se emplean iluminadores de oportunidad no cooperativos, esto es que son fuentes de señal no conocen el uso de localización que está realizando el radar pasivo.

Los radares pasivos son casi indetectables en un entorno hostil, motivo por el cual son muy empleados en situaciones bélicas, haciendo que la mayoría de desarrollo actuales sean por parte de empresas dedicadas al armamento.

Al no poder escoger la forma de la señal emitida por el iluminador de oportunidad, los radares pasivos presentan requieren de un procesamiento en el receptor, de forma que se pueda reconstruir la señal de origen.

La precisión de estos sistemas es menor que la de los sistemas equivalentes convencionales, haciendo que la localización se objetivos sea menos fiable en la mayoría de los casos.

Derivado de la separación del emisor y del receptor, surge una nueva geometría, a la hora de analizar las distancias a los objetivos. Ya no es posible emplear geometría circular, basada en coordenadas polares, en este caso es necesario hacer uso de geometría biestática [4].

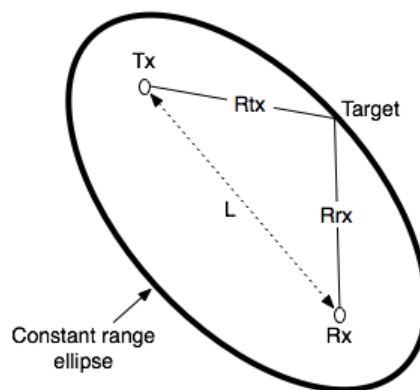


Ilustración 10 Representación geometría biestática

Para localizar a los objetivos se emplean elipses, como se puede apreciar en la *Ilustración 10* y no circunferencias como en sistemas radares pulsados monoestáticos. Estas elipses reciben el nombre de óvalos de Cassini, son consecuencia del uso de geometría biestática. Esto hace que las ecuaciones que describen el rendimiento y funcionamiento del radar también se vean modificadas con respecto a radares convencionales.

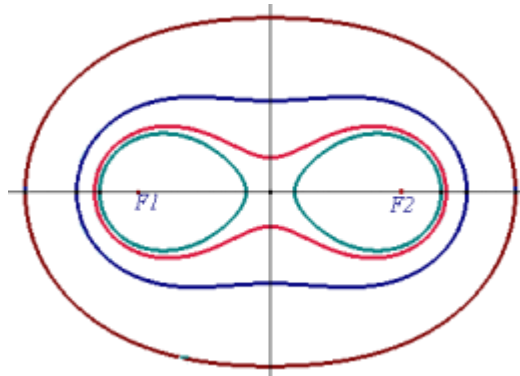


Ilustración 11 Óvalos de Cassini

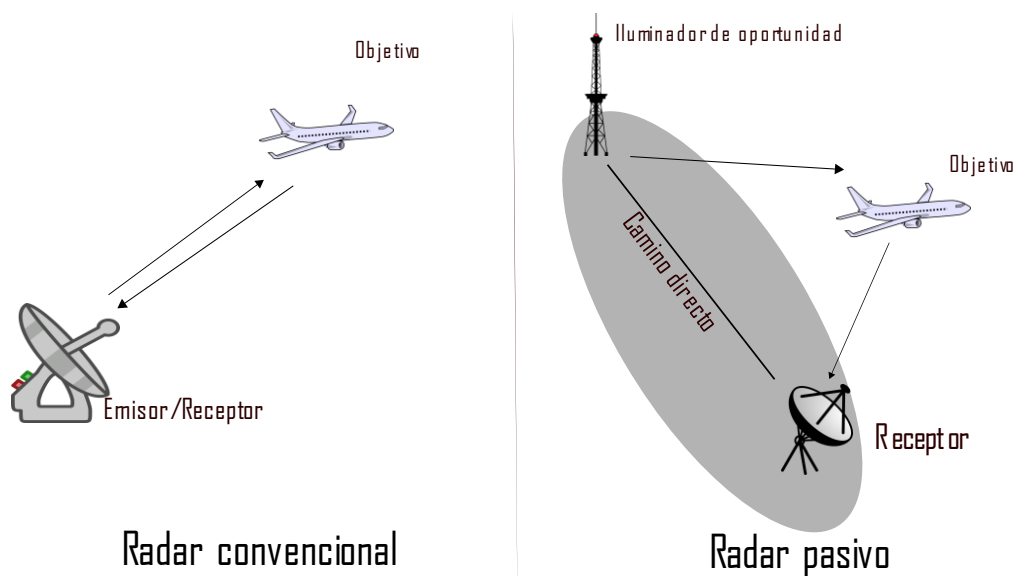


Ilustración 12 Comparación funcionamiento radar pulsado vs radar pasivo

2.3 ECUACIÓN RADAR

Una de las consideraciones más importantes que se deben realizar a la hora de desarrollar una simulación de un sistema radar, independientemente del tipo que sea, es conocer la ecuación radar que se va a emplear para realizar los cálculos de potencia recibida y alcance del sistema.

Para este trabajo se ha decidido emplear la siguiente fórmula:

$$R \leq \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G_r \cdot G_t \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_r}}$$

Donde:

- P_r es la potencia transmitida (W)
- G_r es la ganancia antena receptora
- G_t es la ganancia antena transmisora
- λ es la longitud de onda de la señal empleada (m)
- R es la distancia biestática (suma distancia emisor-objetivo objetivo-receptor) (m)

De esta forma se consigue conocer cuál es el alcance máximo biestático teórico del sistema radar. Distancia biestática se refiere a la suma de las distancias emisor-objetivo y objetivo-receptor, las cuales en un inicio se consideran desconocidas.

Se ha decidido emplear esta fórmula de cálculo de potencia recibida puesto que tiene en cuenta todos los efectos que sufre la señal en el canal de transmisión, en el caso de que rebote en un objetivo.

A fin de simplificar la simulación, se ha decidido establecer una serie de parámetros predeterminados, entre ellos, emplear una sección radar equivalente de 40 m², puesto que es un valor típico en aviones comerciales, asumir una potencia transmitida de la señal de 5W, una ganancia de la antena de transmisión de 40 dB, y una ganancia de la antena receptora de 20 dB.

Estos valores se han escogido basándose en las diferentes soluciones que existen en el mercado de antenas y emisores, así como en la normativa española para la emisión radioeléctrica en la banda de uso del radar.

2.4 FUNCIÓN DE AMBIGÜEDAD

Una función de ambigüedad es una función bidimensional del retardo de propagación y frecuencia Doppler, proporciona información sobre su capacidad para medir distancias y velocidades.

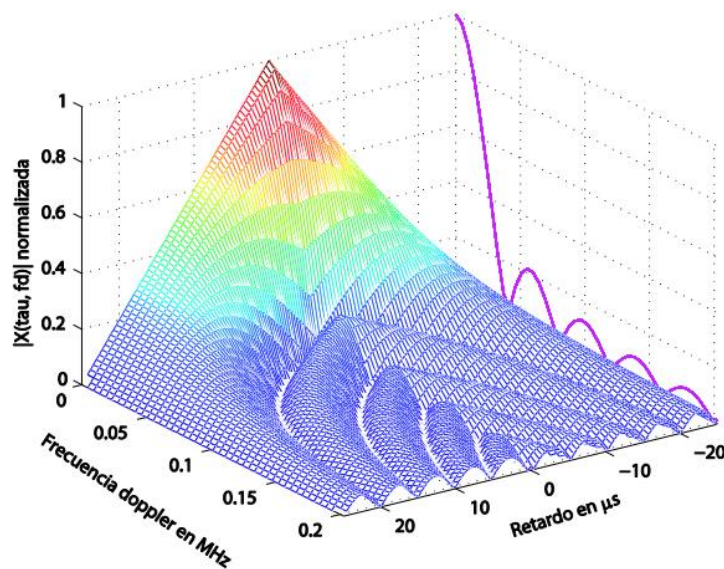


Ilustración 13 Función ambigüedad obtenida a partir de una señal pulso rectangular

Para obtener la máxima precisión no tendría que haber ninguna ambigüedad en la detección del instante y de la frecuencia en que la señal ha sido recibida, es por ello que la función de ambigüedad ideal es una función delta de Dirac bidimensional o función de "chincheta"; es decir, una función que es infinita en (0,0) y cero en el resto de posiciones.

A la hora de elegir el iluminador de oportunidad para el sistema radar, es crítico escoger uno que emita una señal con una función de ambigüedad favorable a la aplicación del radar. Por ello las señales analógicas se descartan casi por completo, ya que no presentan periodicidad en sus tramas, y por lo tanto una función de ambigüedad son máximos destacables.

3 ESTADO DE LA CUESTIÓN

Los sistemas de radar pasivo reciben este nombre al ser sistemas que permiten la localización de objetivos por medio de la utilización de señales no conocidas, por lo general, por el receptor. Los sistemas de radar pasivo utilizan señales emitidas por emisores (iluminadores de oportunidad) no cooperantes, es decir que no emiten señales con la funcionalidad final de localizar objetivos y que por lo tanto no emplean señales con características idóneas para sistemas radar. Un ejemplo de iluminador de oportunidad empleado para la localización son las señales emitidas en radiodifusiones de radio musical o televisión.

En la actualidad existen desarrollos en funcionamiento de radares pasivos realizados por empresas privadas. La mayoría de las empresas que desarrollan radares pasivos, lo hacen desde un punto de vista militar, puesto que como se ha comentado antes, los radares pasivos cuentan con una capacidad furtiva que hace que sean prácticamente indetectables por el enemigo.



Ilustración 14 Despliegue radar pasivo HENSOLDT

Actualmente existen varias empresas que han desarrollado un radar pasivo, la primera de ellas fue Indra, consiguiendo desarrollar en 2013 un sistema de radar pasivo de alta precisión, el primero de su clase [4]. Otro ejemplo de compañía es Hensoldt, empresa que ha desarrollado el radar TwInvis, capaz de detectar blancos hasta a 300 Km [2]. Además, su implementación es portable, lo que hace que sea uno de los radares pasivos más completos hasta el momento.

Por otro lado, no es fácil conocer la situación del sector con este tipo de tecnologías, puesto que la mayoría de los proyectos se mantienen en secreto, y no se especifica por completo que tipo de sistemas se emplean para la localización de los blancos.

Uno de los elementos más importantes empleados en la actualidad en radares pasivos, son los iluminadores de oportunidad.

3.1 ILUMINADOR DE OPORTUNIDAD

Se considera iluminador de oportunidad a todo aquel generador de señal no cooperativo, empleado por un sistema de radar pasivo para la localización de objetivos.

Los iluminadores de oportunidad son uno de los elementos más importantes a la hora de desarrollar un radar pasivo. Son la fuente de señal, la cual el radar pasivo no puede controlar ni influir para generar señales favorables a la detección. Por lo general se tratan de estaciones de radio, telefonía o televisión, diseñadas para un uso civil.

Tienen la ventaja de que se encuentran distribuidos a lo largo de grandes extensiones de terreno, y que suelen estar diseñados para cubrir grandes extensiones, por lo cual los radares pasivos pueden explotar estas características para conseguir grandes distancias de detección.

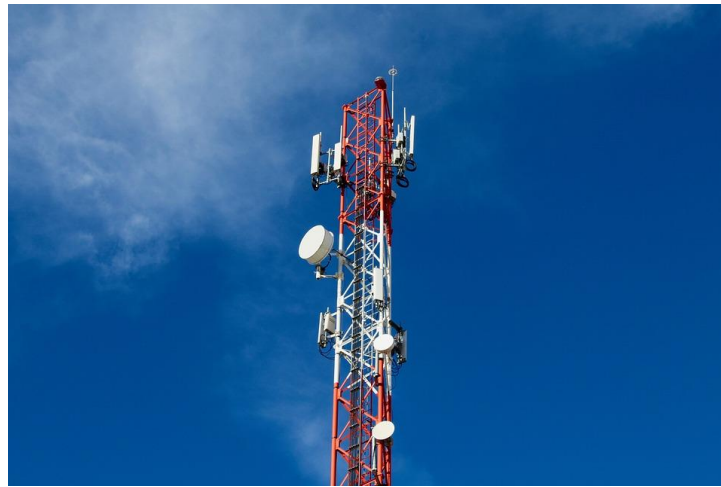


Ilustración 15 Estación telefonía

Dentro de los iluminadores de oportunidad, se pueden encontrar dos grupos, los que emplean modulación analógica, y los de modulación digital.

Debido a las características de la señal enviada por los iluminadores de oportunidad de modulación digital, estos suelen ser los escogidos. En las modulaciones digitales, la señal recibida puede ser procesada y reconstruida por el receptor por medio de sistemas digitales de procesado. Por el contrario, en el caso de las modulaciones analógicas, la señal ha de ser reconstruida por un circuito analógico, haciendo que la implementación sea más compleja, costosa, y menos fiable.

Además, las modulaciones analógicas proporcionan una precisión mucho menor que las digitales, el ancho de banda de una señal FM de radio es de 200Khz, mientras que el ancho de banda de una señal DVB-T es de 8 MHz. Esto es que la señal DVB-T proporciona 40 veces más precisión a la hora de identificar un blanco que una señal FM.

Por último, las señales analógicas presentan una función de ambigüedad poco favorable para la detección de blancos, a diferencia del resto de señales digitales.

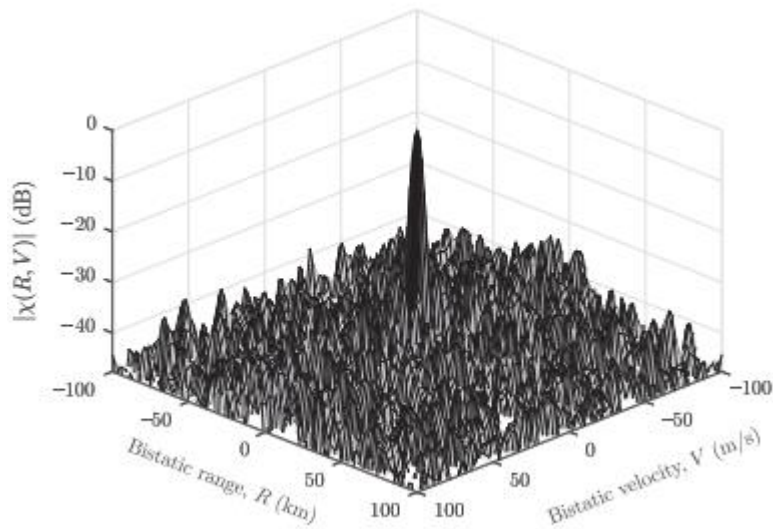


Ilustración 16 Función ambigüedad señal modulada en FM

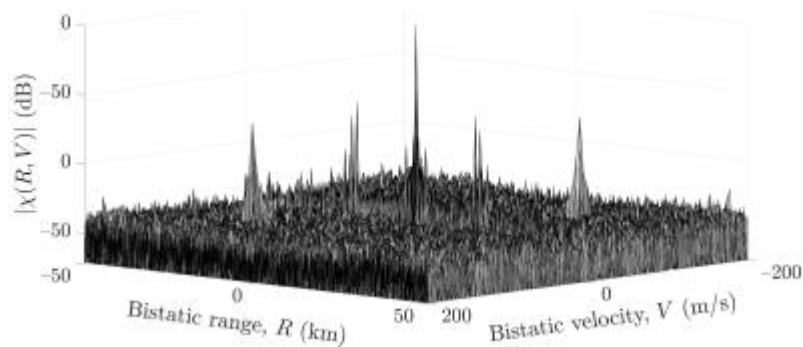


Ilustración 17 Función de ambigüedad obtenido con señales DVB-T

Las tecnologías más empleadas como iluminadores de oportunidad en un radar pasivo son las siguientes:

3.1.1 TELEFONÍA MÓVIL

Son todas aquellas fuentes de señal cuya función principal es la de proporcionar conectividad a todos los dispositivos móviles. Suelen tener gran alcance, pero las antenas no suelen apuntar en dirección horizontal en el plano de elevación, si no que suelen inclinarse ligeramente en el plano de elevación, puesto que la mayoría de los dispositivos que usan las antenas se encuentran a baja altura.

3.1.1.1 GSM

Es un sistema global para las comunicaciones móviles 2G. GSM no permite rangos de localización muy precisos, ya que normalmente se obtiene una precisión de 1km aproximadamente no siendo adecuado para su implementación en sistemas radar.

En la actualidad ya existen sistemas de radar pasivo que emplean generadores de señal GSM como iluminadores de oportunidad, como el radar desarrollado por la Universidad de Valencia [4].

3.1.1.2 LTE

LTE (acrónimo de Long Term Evolution) es un estándar para comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad para teléfonos móviles y terminales de datos. Emplea una modulación OFDMA [5] para su transmisión. Este tipo de señales presentan características adecuadas para su uso en radares pasivos. Están siendo investigadas para un uso más optimizado en sistemas de radar pasivo por su largo alcance y sus características favorables.

3.1.2 TELEVISIÓN TERRESTRE

Bajo este término se encuentran todos los transmisores de señal de televisión, que se encuentren establecidos en tierra. Son transmisores con largos alcances, diseñados para cubrir zonas incluso mayores que los transmisores de telefonía móvil, permitiendo que los radares pasivos puedan detectar blancos a mayor distancia.

El estándar más común empleado en televisión terrestres es el estándar DVB-T [1].

3.1.2.1 DVB-T

Estándar para la transmisión de televisión y audio en Europa. Es el más utilizado en radares pasivos por su alta cobertura, por tener una gran potencia de emisión y emplear modulación OFDM, lo que facilita la reconstrucción de la señal en el receptor, ya que tiene características que permiten realizar una estimación del canal por el que se ha transmitido la señal. Su función de ambigüedad resultante es óptima para un sistema radar como se aprecia en la *Ilustración 17*.



Ilustración 18 Ejemplo antena televisión digital

3.1.3 FUENTES SATELITALES

Un tipo de iluminadores de oportunidad muy distintivos, son aquellos que se encuentran en órbita alrededor de la tierra, esto les dota de la propiedad de tener grandes zonas de cobertura.

En función de sus usos, se pueden catalogar en dos grupos:

3.1.3.1 DVBS

Es una tecnología que proporciona televisión por satélite. Tiene el inconveniente de que no tiene tanta cobertura como otras tecnologías satelitales, pero emplea señales con una forma de onda muy favorable para radares pasivos.

No es un iluminador de oportunidad muy común en la actualidad.

3.1.3.2 GNSS

GNSS se refiere a todos los iluminadores de oportunidad que en origen se destinen sistemas de localización global (GPS). Este tipo de iluminadores de oportunidad pueden ser de gran utilidad puesto que tienen un alcance casi ilimitado. Al encontrarse en órbita alrededor de la tierra, pueden alcanzar zonas que los terrestres no.

En su mayoría estos iluminadores de oportunidad se emplean para radares pasivos encargados de detectar barcos y objetivos marítimos como se indica en [6].

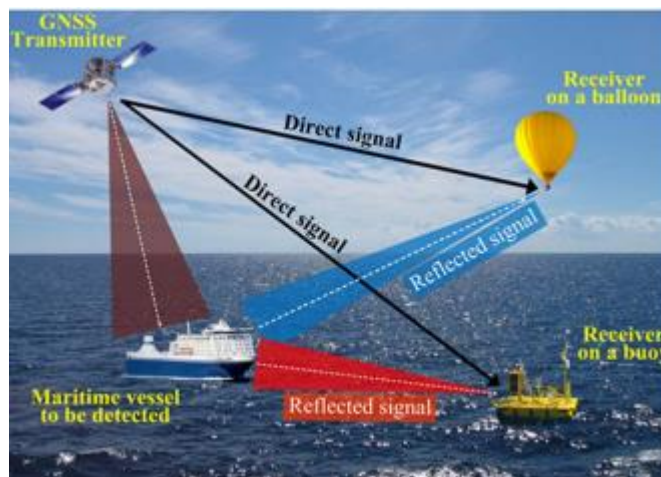


Ilustración 19 Ejemplo uso GNSS para radar pasivo

4 DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

Actualmente, no existen prácticamente proyectos de código abierto dedicados al desarrollo de radares pasivos. Tampoco existen proyectos que compartan de forma pública simuladores generalizados de sistemas radar. Hoy en día no se ha realizado ningún sistema de radar pasivo con un único canal de recepción, ni se ha probado la viabilidad de este tipo de tecnologías, por ello

4.1.1 AUSENCIA DE RADARES PASIVOS MONO CANAL

Como se ha comentado en el párrafo anterior no existe proyectos públicos que demuestren el uso de un único canal para la realización de un sistema de radar pasivo. Por ello trabajo este trabajo tiene como objetivo secundario el probar que se pueden realizar radares pasivos con un único canal de recepción. Esto haría posible una reducción significativa de los costes de implementación de un posible sistema real, ya que la cantidad de hardware se reduce.

4.1.2 REDUCIDA INFORMACIÓN DE RADARES PASIVO

Debido al uso militar de la mayoría de los radares pasivos, no existe una documentación extensa sobre el funcionamiento ni sobre el rendimiento de los radares pasivos, por ello este trabajo pretende averiguar que limitaciones presentan este tipo de sistemas, y que resolución y alcance se puede esperar de un radar pasivo.

4.2 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fin de carrera es el desarrollo de la simulación de un radar pasivo, dentro de este objetivo se pueden diferenciar diferentes objetivos parciales

Los objetivos parciales que se pretenden conseguir se dividen en dos apartados, didácticos y técnicos

4.2.1 OBJETIVOS DIDÁCTICOS

1. Comprender el funcionamiento de un sistema radar genérico
2. Comprender el funcionamiento de un sistema de radar pasivo
3. Conocer la generación de señales OFDM mediante el estándar DVB-T
4. Ampliar conocimientos sobre programación en MATLAB y todas sus funcionalidades
5. Estudiar diferentes técnicas de simulación de sistemas de señales reales

4.2.2 OBJETIVOS TÉCNICOS

1. Desarrollar emisor de señales OFDM
2. Desarrollar entorno de simulación
3. Implantación de un receptor capaz de distinguir objetivos
4. Desarrollar interfaz de visualización gráfica para los objetivos.

4.3 METODOLOGÍA

Para poder realizar el proyecto en fecha, se ha optado por una organización de las tareas en cascada, es decir que antes de poder comenzar con una nueva tarea de las especificadas anteriormente, se ha tenido que completar la anterior.

Además, como se puede observar en el apartado siguiente, ciertas tareas se han solapado, esto se ha hecho porque las tareas solapadas no tenían apenas relación entre sí, o porque los temas tratados en ambos trabajos estaban íntimamente relacionados, y por lo tanto el hecho de solapar las tareas no perjudicaba la finalización de ambas.

4.4 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

A continuación, se presenta un diagrama de Gant con una planificación de las fechas para el comienzo y finalización de las tareas especificada

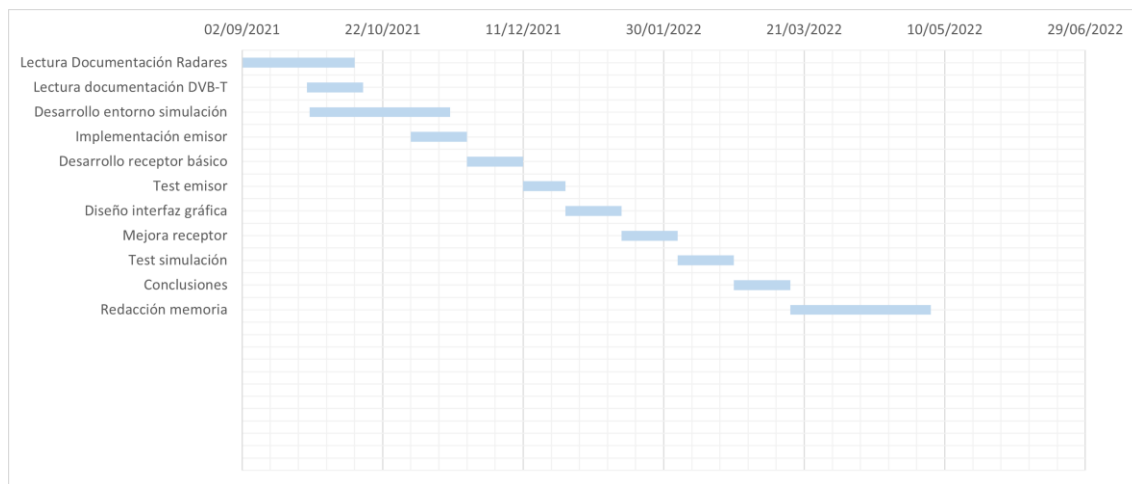


Ilustración 20 Planificación tareas expuesta en un diagrama de Gant

Al tratarse el proyecto de una simulación de un radar pasivo, no se ha realizado la compra de equipo físico para la realización del trabajo.

Por su parte, ha sido necesario contar una licencia del software de cómputo numérico MATLAB. Tampoco se ha empleado ningún toolbox ni añadido del software base, por lo tanto, a la hora de realizar una estimación económica del coste del trabajo, únicamente se ha de considerar el coste de una licencia básica.

El coste final del proyecto sería de 800€, el coste de una licencia de un año.

5 ARQUITECTURA DEL RECEPTOR DIGITAL

La recepción y procesamiento de las señales, se realiza de acuerdo con el siguiente esquema de bloques:

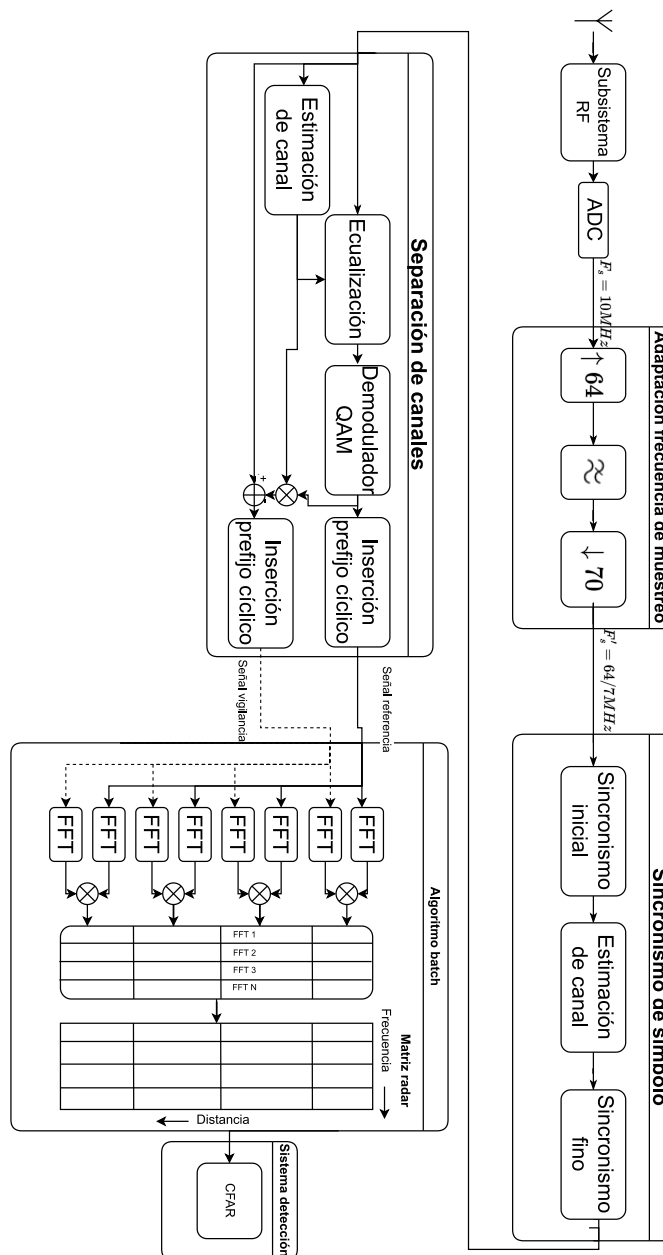


Ilustración 21 Cadena de recepción empleada

5.1 DESCRIPCIÓN BLOQUES

5.1.1 BLOQUE ADAPTACIÓN FRECUENCIA DE MUESTREO

Este bloque es el primero en la cadena de procesado, es el encargado de modificar la frecuencia de muestreo recibida a la descrita en el estándar DVB-T [1].

Este bloque es necesario debido a que la frecuencia de muestreo de la señal emitida por el codificador DVB-T es de 64/7 MHz, es decir 9,14285 MHz. Esta frecuencia no es posible implementarla en un convertor digital analógico, puesto que se trata de un valor decimal.

Para este trabajo, se asume que la señal de entrada proviene de un convertor analógico digital con un ancho de banda de muestreo de 10 MHz, en concreto se ha asumido que el convertor es el AD9363 de la compañía Analog Devices [7].

Por ello en la fase de recepción, es necesario realizar una adaptación de la frecuencia de muestreo, para convertir la frecuencia de muestreo recibida de 10 MHz a la definida en el estándar.

Para realizar esta conversión, primero se realiza un interpolado de la señal, en este caso por un factor de 64, seguido de un filtrado, y un posterior diezmado de la señal por un factor de 70.

Se han escogido estos valores de diezmado e interpolación, de forma que se consiguiera la frecuencia de muestreo definida en el deseada.

$$10e^6\text{Hz} \cdot \frac{64}{70} = 9.14285e^6\text{Hz}$$

En esta fase de conversión es necesario realizar un filtrado de la señal digital entre la interpolación de muestras y el diezmado. Esto se debe a que, al realizar la interpolación de la señal, el espectro digital de esta se comprime y aparecen repeticiones del espectro original a frecuencias superiores.

Este efecto se puede apreciar en la siguiente imagen, en la cual se presenta la señal de entrada después de realizar la fase de interpolación.

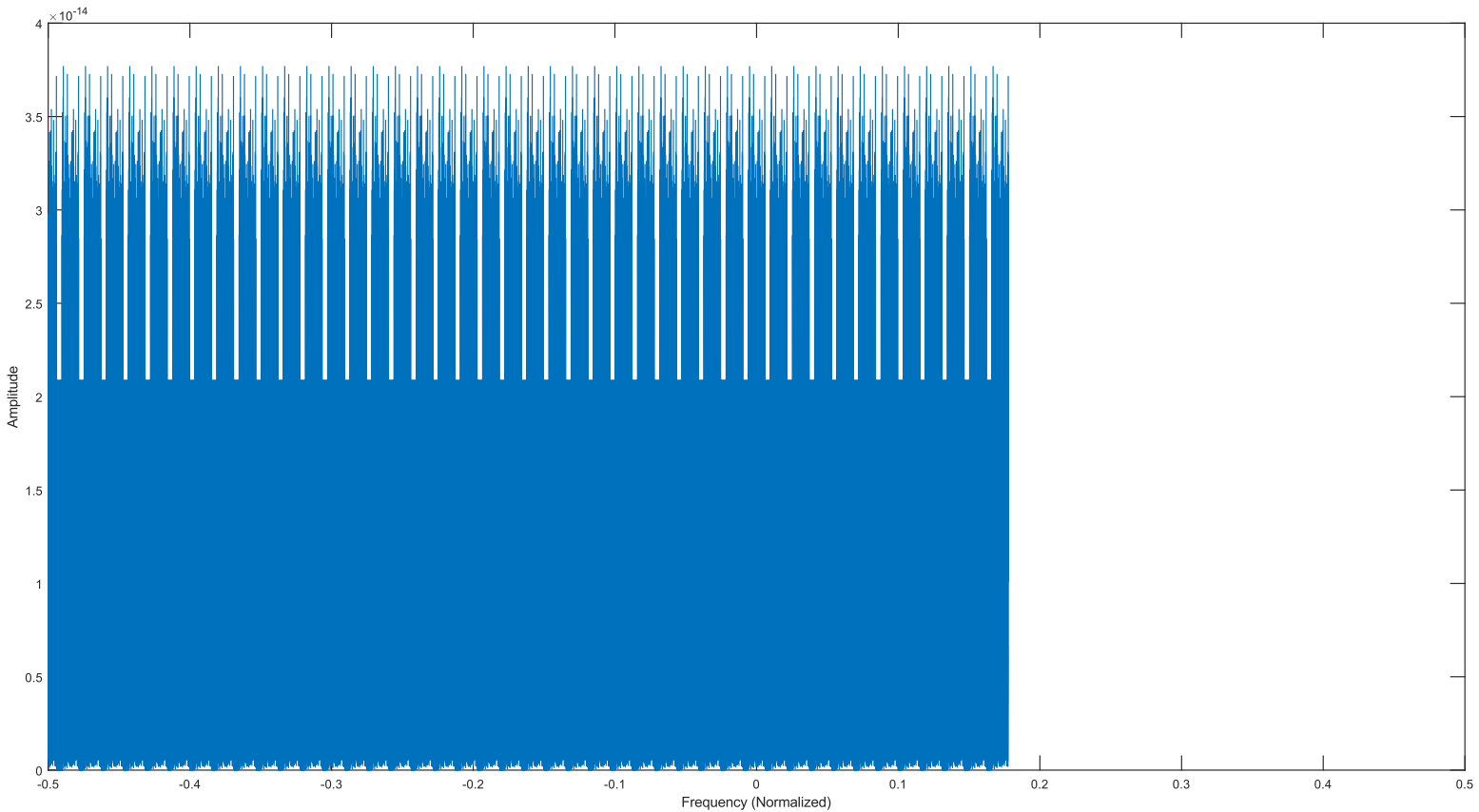


Ilustración 22 Espectro de la señal OFDM después de la interpolación

Son estas repeticiones de alta frecuencia las que hay que eliminar mediante el filtro de reconstrucción. Se ha elegido el método Parks-McClellan [8] para el diseño del filtro por su sencillez, rapidez de ejecución y fácil parametrización.

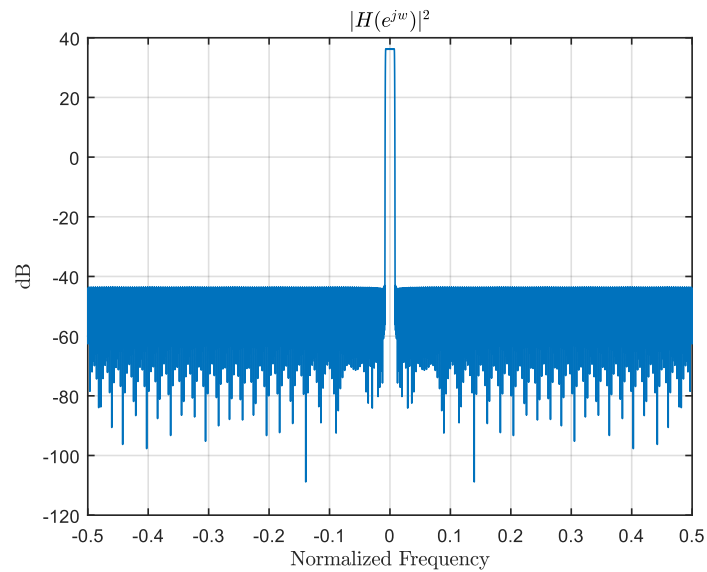


Ilustración 23 Respuesta en frecuencia filtro reconstrucción empleado en la adaptación de frecuencia de muestreo

Este filtro de reconstrucción debe tener una frecuencia de corte tal que elimine las frecuencias superiores a $1/(2 \cdot M)$, siendo M el factor de diezmado posterior. Se escoge este valor para que al realizar el diezmado, y con correspondiente expansión del espectro, no se produzca solapamiento espectral en la señal.

Los parámetros escogidos a la hora de implementar el filtro de reconstrucción son:

Tabla 1 Parámetros filtro reconstrucción

Rizado de la banda de paso	0.05 dB
Atenuación banda eliminada	80 dB
Frecuencia de corte (normalizada)	$1/(2 \cdot 64)$
Ganancia	70

Se ha escogido este valor de ganancia del filtro, puesto que, al realizar el filtrado de la señal interpolada, se produce una pérdida de potencia espectral de la señal, igual al factor de interpolado, es por ello por lo que en el filtro se introduce una ganancia igual a este factor de interpolado para que la potencia se mantenga constante.

En el diezmado de la señal, al contrario de lo que ocurre en la fase de interpolación, se produce una expansión del espectro de la señal, de forma que el espectro final, queda de la siguiente manera:

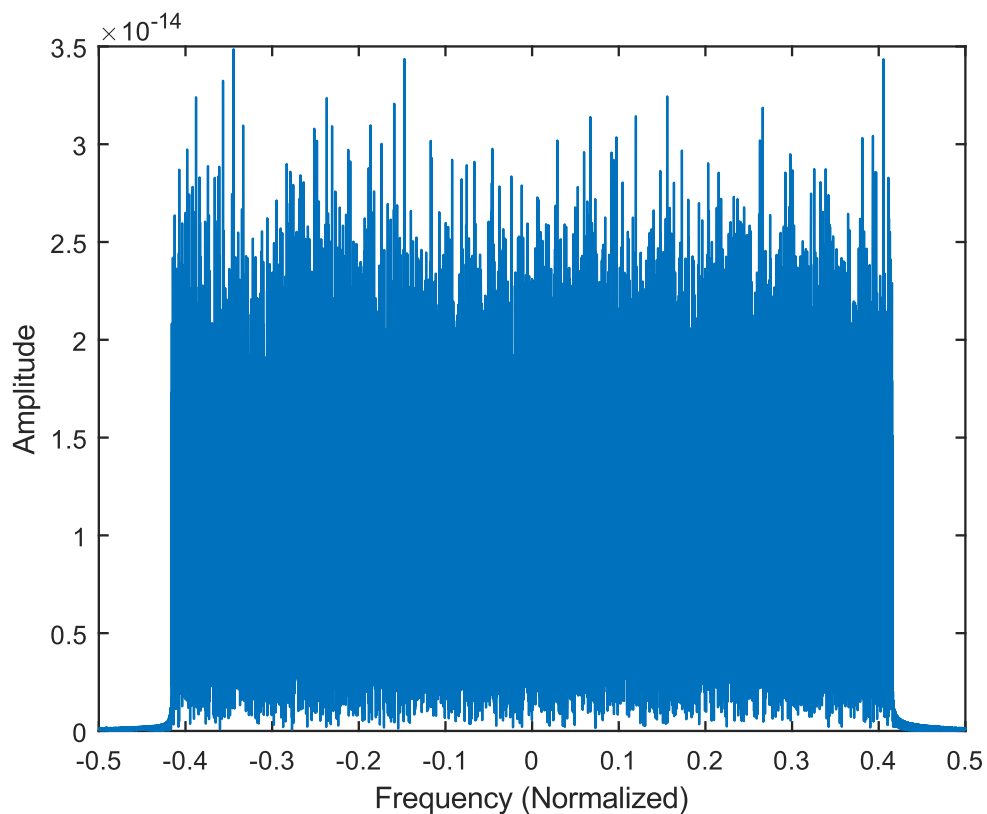


Ilustración 24 Espectro señal OFDM después del diezmado

Es decir, es el espectro correspondiente a una trama OFDM.

5.1.2 BLOQUE SINCRONISMO SÍMBOLO

Este se trata del bloque más relevante a la hora de realizar el acondicionamiento de la señal recibida. Está encargado de recibir una señal con la frecuencia de muestreo adaptada y devolver los símbolos separados corregidos en frecuencia, y correctamente delimitados.

En este bloque se realiza una detección inicial denominada “gruesa” del inicio de cada símbolo OFDM, seguido de una corrección en frecuencia, para poder corregir cualquier desajuste de la frecuencia recibida del símbolo.

Posteriormente se realiza una detección de la fase de los pilotos continuos incluidos en el símbolo DVB-T, de forma que en fases posteriores del procesamiento se pueda realizar una correcta estimación del canal.

Por último, se realiza un sincronismo fino de símbolo, de tal forma que el error que se haya podido cometer en la estimación inicial del inicio del símbolo, se pueda corregir.

5.1.3 BLOQUE SEPARACIÓN SEÑALES

En esta fase del procesado de la señal recibida, se realiza la separación de las señales del camino directo, y la señal reflejada del avión. Por medio del algoritmo explicado en [9] es posible obtener dos señales a partir de la señal obtenida.

Gracias a esta separación es posible reducir considerablemente el coste de hardware del radar pasivo, puesto que no es necesario contar con una antena directiva para recibir la señal del camino directo desde el iluminador de oportunidad, y otra para recibir la señal reflejada del avión.

Además, el hecho de no tener una antena apuntando directamente al iluminador de oportunidad, hace que el radar pasivo sea mucho más flexible a la hora de implementarse en un entorno real, puesto que no es necesario conocer previamente la posición de la antena emisora.

5.1.4 BLOQUE CÁLCULO FUNCIÓN DE AMBIGÜEDAD

En este bloque del procesamiento de la señal recibida, se realiza el cálculo de la función de ambigüedad para la señal recibida. La etapa recibe este nombre puesto que el algoritmo que se ha empleado para calcular dicha función es el *Algoritmo de batch* [10]. Esto se refiere a que la señal ya procesada y sincronizada, se segmenta en bloques de un tamaño de terminado, denominados *batches*. Este algoritmo se explica en el apartado *Cálculo función de ambigüedad*

Aquí se explota la periodicidad intrínseca de los diferentes símbolos enviados por el iluminador de oportunidad. De esta forma si en la señal introducida como señal de vigilancia, se encuentra una señal similar a la introducida como señal de referencia, va a aparecer un máximo en la correlación de estas dos señales para el retardo presente.

Como se puede observar en la *Ilustración 25* no se obtiene un máximo en un único retardo si no que la función presenta un cierto gradiente entorno al pico de correlación, esto es derivado del hecho de que los símbolos reflejados tienen cierto desplazamiento en frecuencia, por el efecto Doppler, y porque todos los símbolos presentan pilotos continuos en los mismos índices, y con los mismos valores, por lo que la correlación puede verse “distorsionada”.

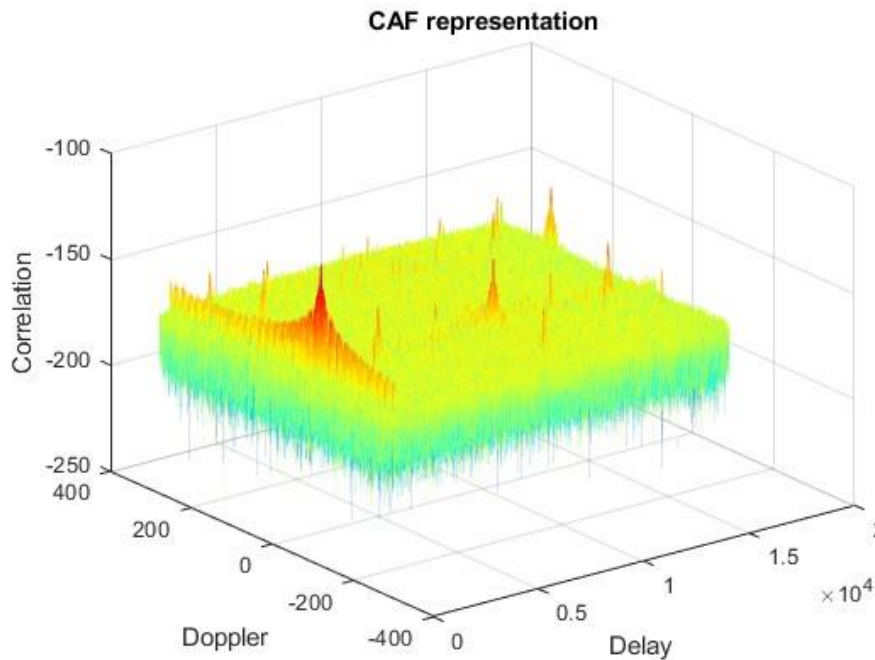


Ilustración 25 Función ambigüedad para señal DVB-T

Este bloque devuelve una función de ambigüedad al siguiente bloque, en la que se puede apreciar si existe señal reflejada por un blanco a un rango biestático concreto, y a una velocidad biestática determinada.

5.1.5 BLOQUE DETECCIÓN

Este es el último bloque en la cadena de procesado, en él se realiza la visualización de los resultados obtenidos en cada iteración, así como la implementación de un algoritmo adaptativo de tasa constante de falsas alarmas (CFAR).

Este algoritmo de CFAR, procesa la función de ambigüedad obtenida en el bloque anterior, con un algoritmo adaptativo, esto es que se va ajustando en función de los valores de entrada, de forma que se minimicen los falsos positivos de detección. Este algoritmo no se ha incluido finalmente en este trabajo, debido a que no se conoce con certeza que tipo de objetivos se van a querer detectar con este sistema radar, y los parámetros del CFAR se deben de adaptar a cada objetivo determinado.

6 REACONDICIONAMIENTO SEÑAL DE REFERENCIA

6.1 MÉTODOS DE SINCRONISMO DE SÍMBOLO

6.1.1 SINCRONISMO PRIMITIVO

El sincronismo primitivo de símbolo se realiza en las primeras fases de procesado de la señal, el objetivo del sincronismo es conocer de forma aproximada el comienzo de cada símbolo OFDM recibido. Esto se hace para poder separar los símbolos y realizar un procesado posterior símbolo a símbolo.

A pesar de que existen múltiples métodos para poder realizar un sincronismo inicial de la señal recibida, en este trabajo se ha decidido realizar esta etapa de acuerdo con el artículo descrito en [11]. Este método hace uso del prefijo cíclico presente en el dominio temporal en los símbolos.

Se ha escogido este método por su simplicidad a la hora de implementar, su rapidez, y su resistencia a desplazamientos en frecuencia. Este algoritmo hace uso del intervalo de guarda introducido al inicio de cada símbolo, en el que se introducen las últimas N muestras de cada símbolo como se puede apreciar en la *Ilustración 26*

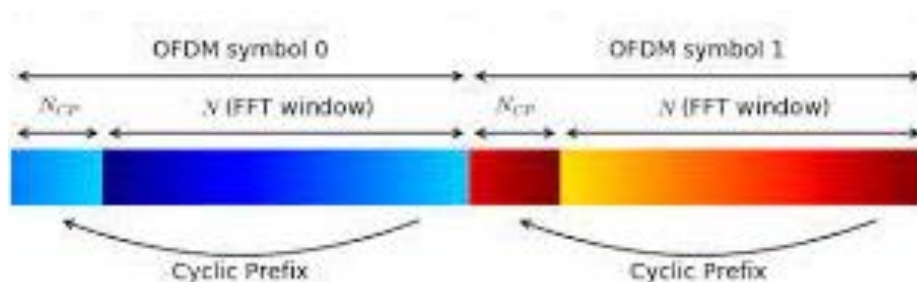


Ilustración 26 Representación prefijo cíclico en símbolos DVB-T

El algoritmo funciona realizando una correlación de la señal recibida consigo misma en ventanas de señal de la longitud del prefijo cíclico, de esta forma si ese segmento de señal es el comienzo de un símbolo, presentará un pico de correlación.

Mediante un posterior análisis de los máximos obtenidos, es posible conocer cuántos símbolos OFDM se han recibido, y estimar el comienzo de estos.

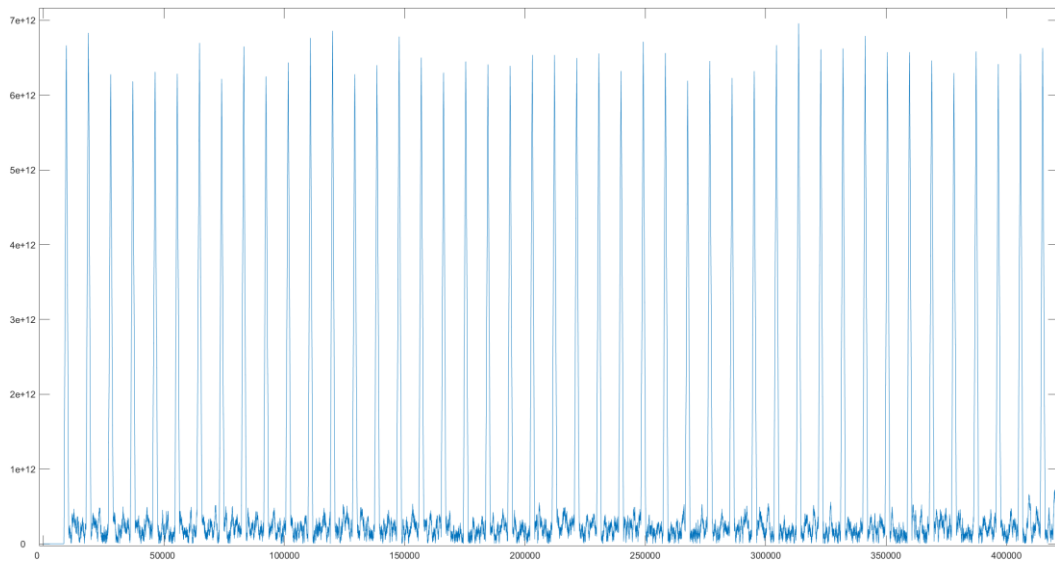


Ilustración 27 Resultado algoritmo correlación prefijo cíclico

A continuación, se describe una justificación matemática del método empleado:

$$x(n) = \sum_{i=0}^{L-1} s(n-i) \cdot s^*(k-i-N)$$

Donde:

- $s(i)$: señal de entrada
- $x(n)$: señal resultada de la correlación, con los picos de correlación
- N : longitud de la trama OFDM
- L : longitud del prefijo cíclico

Este algoritmo presenta errores en su estimación de los símbolos recibidos, puesto que es muy sensible a las características de la señal procesada. Por ejemplo, si la señal de entrada tiene una longitud de prefijo cíclico pequeña, la probabilidad de falsas detecciones y de falso picos de correlación crece. Además, si la señal de entrada se encuentra muy desplazada en frecuencia de la portadora, es posible que este algoritmo falle a la hora de detectar el inicio del prefijo, a pesar de aplicarse en el dominio del tiempo. Este algoritmo únicamente proporciona estimaciones aproximadas de los índices de comienzo de los símbolos.

6.1.2 SINCRONISMO FINO

Debido a que la estimación realizada con el método explicado en el apartado anterior no es lo suficientemente precisa para poder estimar el índice exacto del inicio de cada símbolo, es necesario añadir una etapa de procesado más para conseguir una estimación de símbolo mucho más precisa. Esta segunda etapa, a diferencia de la etapa anterior, se realiza en el dominio de la frecuencia, esto se hace puesto que es necesario obtener una estimación del canal por el que ha pasado la señal recibida.

Esta estimación de canal se puede realizar de dos formas, una es haciendo uso de los pilotos continuos, que se encuentran en el símbolo recibido, siempre en los mismos índices, y con un valor conocido. O por medio de los pilotos dispersos “scatter pilots”, los cuales no se encuentran en la misma posición en todos los símbolos, si no que se repiten en un patrón periódico de 4 símbolos.

En este trabajo se han escogido los pilotos dispersos para la estimación de canal por presentar más número de ellos en el símbolo, y porque su carácter periódico hace que se puedan tomar 4 símbolos seguidos para realizar una estimación de canal mucho más precisa en un futuro, aunque en la actualidad la estimación de canal se realice con un único símbolo.

Al emplearse los pilotos dispersos, es necesario saber que fase de pilotos dispersos presenta el símbolo a procesar, puesto que como se ha explicado antes, un símbolo puede tener 4 fases de pilotos dispersos que se repiten cada 4 símbolos. Para ello se requiere de un detector de

fase de pilotos previo a la realización del sincronismo fino. El algoritmo empleado se explica en *Detección fase pilotos dispersos*

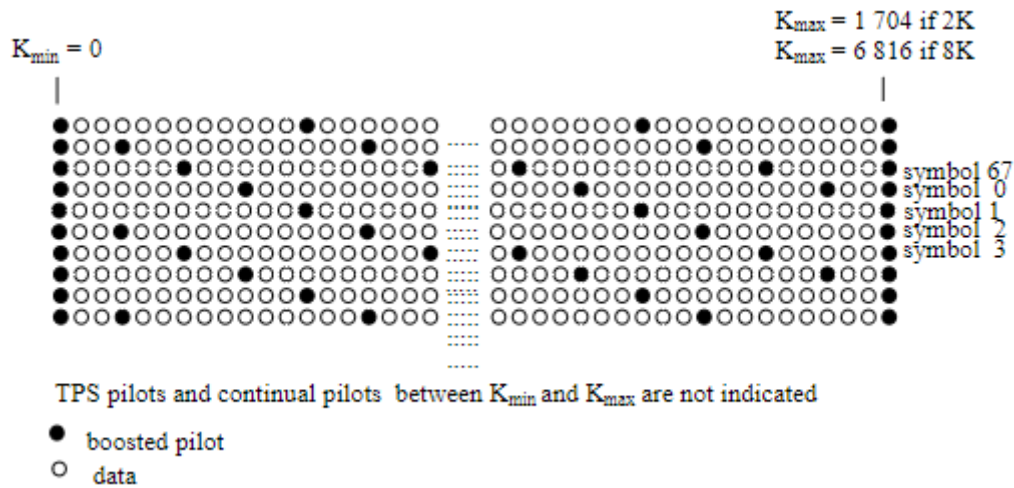


Ilustración 28 Patrón pilotos dispersos acorde al estándar DVB-T

Una vez se ha calculado la estimación del canal del símbolo a tratar, el sincronismo fino de símbolo se consigue analizando el máximo de la respuesta al impulso del canal. Este máximo indica el número de índices que se debe desplazar el símbolo para compensar el error cometido en la etapa anterior. En el caso de que el máximo se produzca en un índice mayor a la mitad de la longitud de un símbolo OFDM, el número de índices a desplazar es el valor obtenido menos la longitud de un símbolo OFDM.

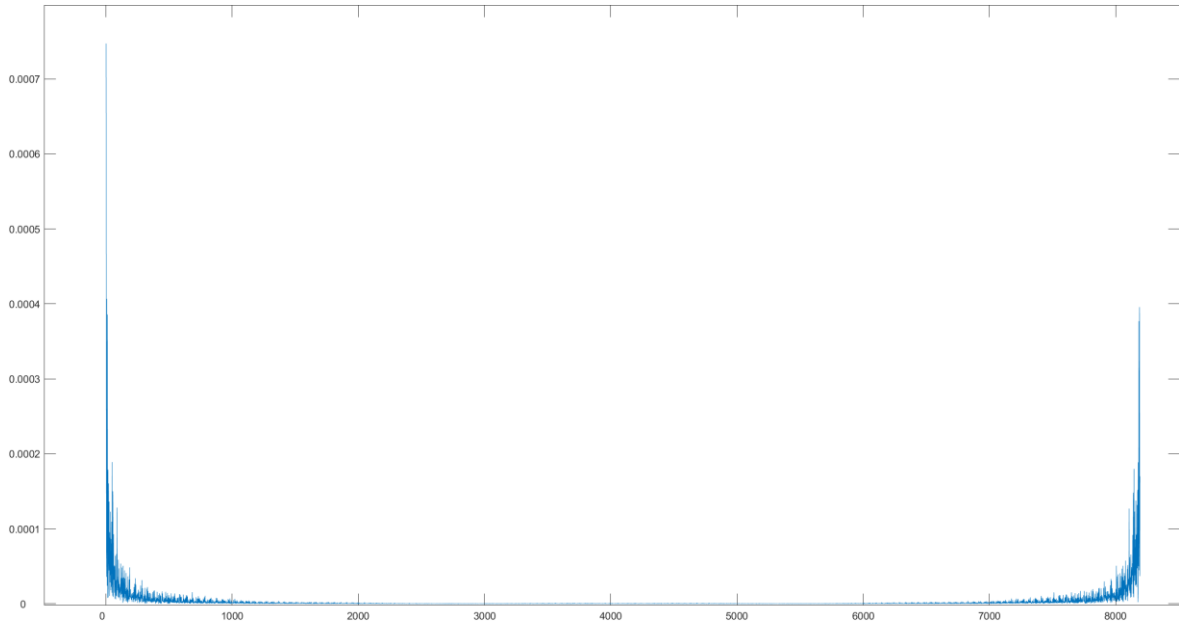


Ilustración 29 Ejemplo respuesta al impulso obtenida con los pilotos dispersos

6.1.3 DETECCIÓN FASE PILOTOS DISPERSOS

Como se ha explicado en el apartado anterior, es necesario conocer en qué fase se encuentran los pilotos dispersos del símbolo que se está analizando para realizar una correcta estimación de canal.

Para realizar el cálculo de la fase, se ha empleado un algoritmo propuesto en [12], el cual realiza la correlación cruzada del símbolo en los índices correspondientes a las cuatro posibles fases de los pilotos en ese símbolo, el valor máximo corresponde a la fase de los pilotos continuos de ese símbolo.

Justificación matemática del algoritmo:

$$SP = \arg \max \sum_{i=0}^{N/12-1} s(3 \cdot k + 12 \cdot i) \cdot z^*(3 \cdot k + 12 \cdot i) \quad k = 0,1,2,3$$

Donde:

- s : señal de entrada
- N : longitud trama OFDM

Este proceso de detección de la fase de los pilotos tiene un gran impacto en la capacidad de detección del radar, a continuación de adjuntan dos funciones de ambigüedad, la primera de ellas calculada sin realizar detección de la fase de los pilotos, y la otra con el proceso de detección:

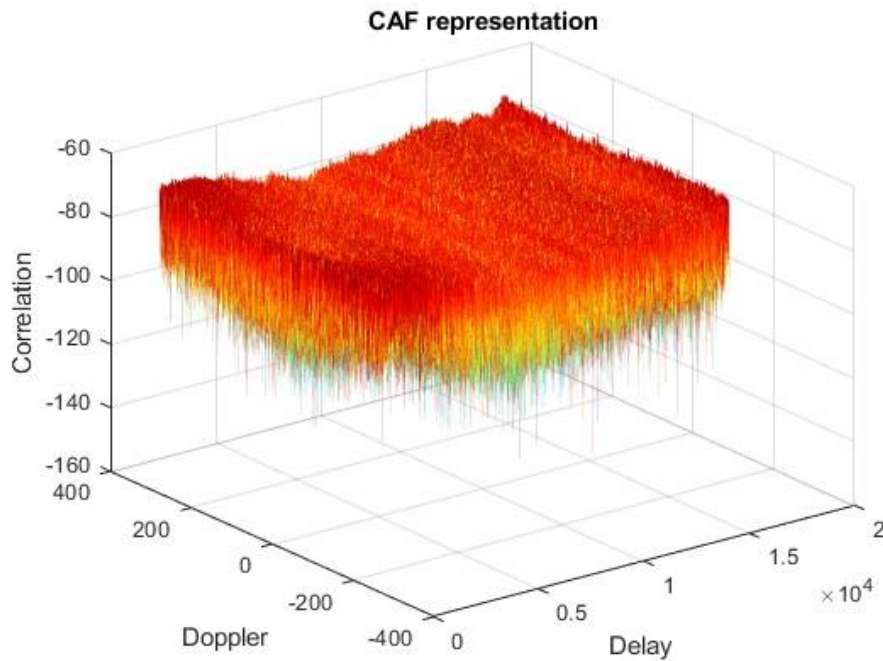


Ilustración 30 Matriz de ambigüedad obtenida sin detección de fase de pilotos dispersos

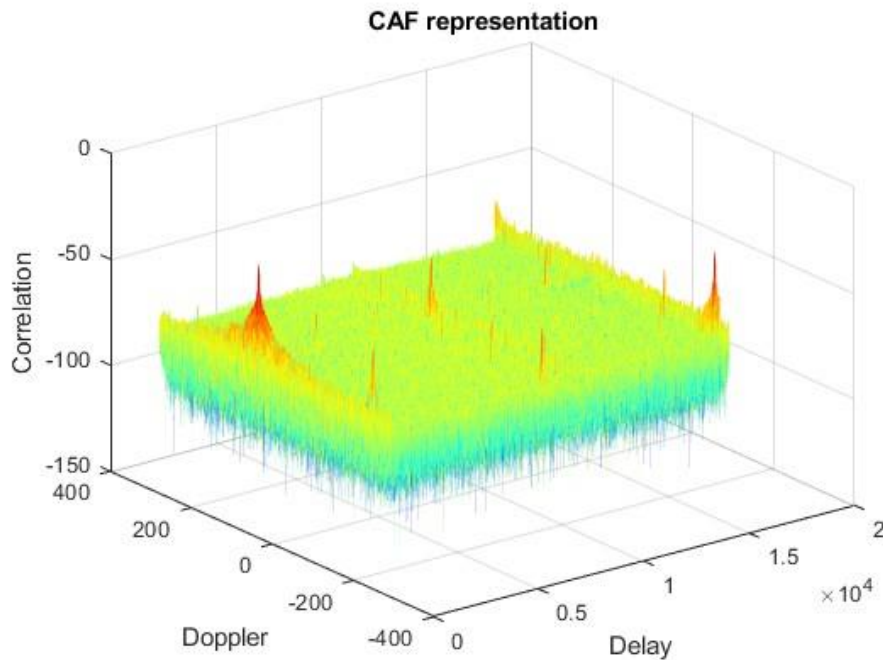


Ilustración 31 Matriz de ambigüedad obtenida con detección de fase de pilotos dispersos

6.2 ALGORITMO SEPARACIÓN SEÑAL REFERENCIA

En este trabajo, se ha considerado que el nodo receptor únicamente cuenta con una antena receptora, para recibir la señal reflejada del objetivo, y la proveniente directamente del emisor.

Por ello una vez que se ya se conoce el comienzo de cada símbolo recibido, y se han sincronizado al índice correcto, es necesario separar la señal recibida en dos señales, una la señal directa desde el iluminador de oportunidad, a partir de ahora referida como señal de referencia, y otra la señal reflejada del objetivo, o señal de vigilancia de aquí en adelante.

Para realizar esta separación de señales se ha empleado el algoritmo definido en [9].

Este algoritmo funciona obteniendo la respuesta en frecuencia del canal por el que ha pasado la señal. Con la estimación del canal, se realiza una ecualización de la señal de entrada, para que el símbolo quede de la forma más similar al producido por el iluminador de oportunidad.

A la señal de entrada ecualizada se le aplica una corrección del símbolo, para ello se demodula cada canal y se aproxima al valor más próximo de la constelación que se esté empleando, se compara la parte real al valor más próximo dentro de la constelación conocida, y la parte imaginaria a su resultado. En la simulación realizada en este trabajo, se ha empleado una modulación 64 QAM, de tal forma que la constelación a la que hay que aproximar los canales demodulados es la siguiente:

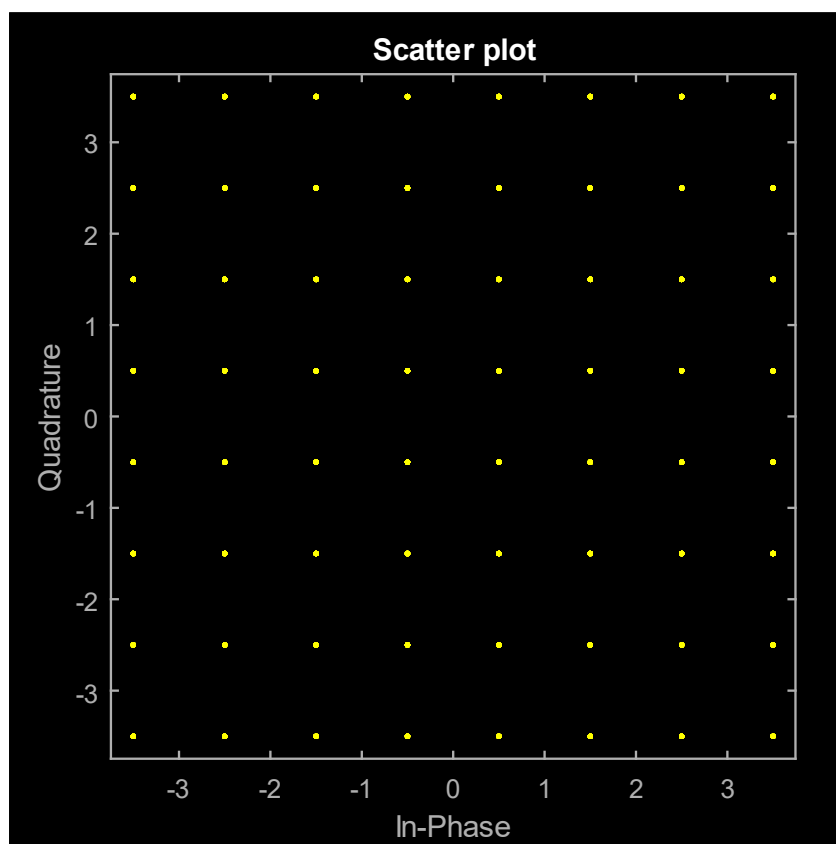


Ilustración 32 Constelación 64 QAM

Al realizar la corrección de los canales, se consigue una versión de la señal emitida por el iluminador de oportunidad, sin el ruido del canal, y sin la señal reflejada del objetivo.

Además, este método de corrección debe tener en cuenta los índices en los que se encuentran los pilotos continuos y los pilotos dispersos, por lo tanto, también debe de conocer la fase en la que se encuentra el símbolo analizado.

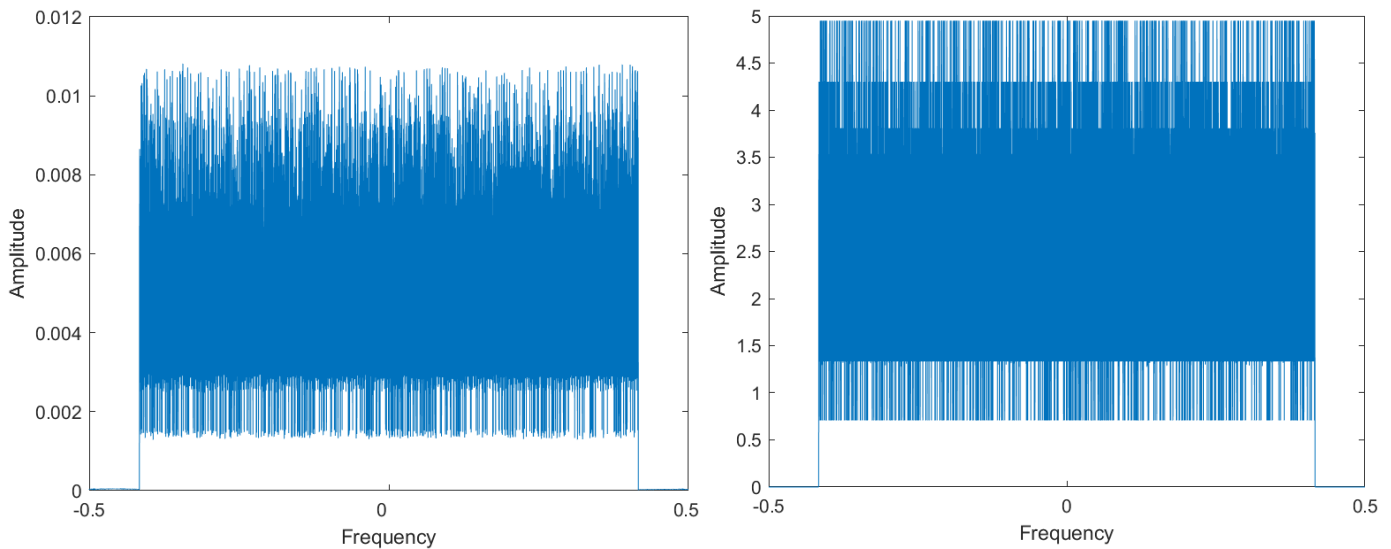


Ilustración 33 Símbolo OFDM recibido antes y después de la corrección

En la *Ilustración 34* se puede observar que la constelación del símbolo recibido contiene cierto ruido, pero que una vez se termina de realizar la corrección, la constelación queda con mucho menos error. Se puede apreciar que los pilotos continuos no se han corregido, por ello los canales de los pilotos continuos siguen teniendo constelaciones más dispersas. Estos pilotos con corregidos más adelante en la fase de multiplicación por la estimación de canal.

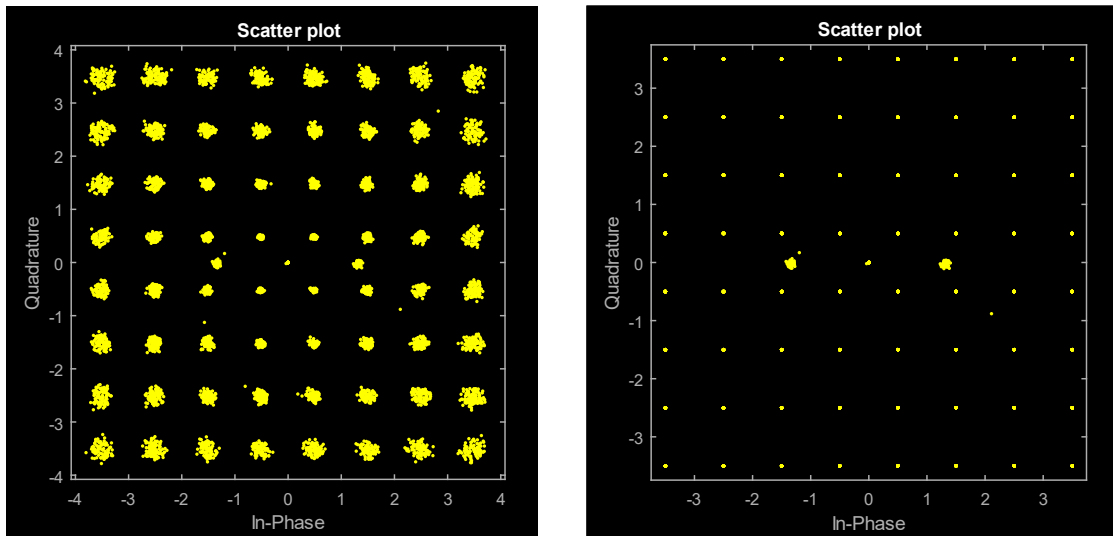


Ilustración 34 Constelaciones del símbolo OFDM recibido antes y después de la corrección

Una vez se tiene una versión de la señal de referencia, se debe restar la señal de referencia de la señal de entrada, para ello se multiplica la señal de referencia por la estimación de canal, obteniendo la señal de referencia enviada por el canal, y posteriormente se realiza la diferencia.

Una vez se ha ejecutado el algoritmo, se toma como señal de referencia la señal obtenida de la corrección de los símbolos, y como señal de vigilancia la obtenida de la diferencia de la señal de entrada con la señal corregida multiplicada por la respuesta del canal.

Esta es la última etapa del procesado en el que la señal recibida se analiza en el dominio de la frecuencia, de aquí en adelante se va a tratar la señal en el dominio del tiempo.

Gracias a este método no es necesario tener dos canales de recepción, haciendo que el coste de una posible futura implementación de este radar pasivo sea menor, así como la complejidad del montaje.

7 CÁLCULO FUNCIÓN DE AMBIGÜEDAD

Como se ha explicado en apartados anteriores, una de las últimas etapas del procesado de la señal de entrada, consiste en obtener una matriz en la que se pueda observar a distancia biestática, y velocidad se encuentra un objetivo. Este proceso se conoce como cálculo de la función de ambigüedad.

Al realizar el cálculo de la función de ambigüedad se obtiene una matriz en la que se presenta el retardo en muestras al que se encuentra un objetivo, y la desviación en frecuencia que este presenta, por lo tanto, es necesario realizar un procesado posterior para convertir el retardo en distancia biestática, y el desplazamiento en frecuencia en velocidad.

La función de ambigüedad consiste en realizar la correlación cruzada de dos señales, una de ellas la de vigilancia, y la otra la obtenida directamente desde el iluminador de oportunidad. Esta correlación cruzada, se realiza para diferentes desplazamientos en frecuencia, se forma que si para un determinado retardo, y un desplazamiento en frecuencia concreto, se produce un pico, significa que en esta posición se encuentra un objetivo.

A modo de analogía con el procesado radar convencional, se puede entender esta etapa como la etapa de cálculo de la matriz radar, en la que se representan los objetivos detectados a una distancia y velocidad determinadas. Sin embargo, como consecuencia de este procesado no se obtiene una matriz radar con un máximo a una distancia del emisor, si no que se obtiene un máximo a una distancia biestática de un blanco, el desplazamiento en frecuencia obtenido también es desplazamiento en frecuencia biestático.

El desplazamiento en frecuencia biestático se produce por el efecto Doppler, al igual que el desplazamiento en frecuencia de los radares convencionales, pero no representa lo mismo. En el caso del desplazamiento en frecuencia convencional, se produce por la velocidad que tiene el objetivo en la proyección del eje entre el objetivo y el emisor. En el caso de la

desviación en frecuencia es una contribución de la variación de las distancias emisor-objetivo y objetivo-receptor.

El cálculo de la función de ambigüedad se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$M(m, k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{vig}(n) \cdot x_{ref}^*(n-m) \cdot \exp\left(-j\frac{2}{N}kn\right)$$

Donde:

- x_{vig} : señal vigilancia, contiene las reflexiones de los blancos
- x_{ref} : señal de referencia, obtenida directamente del iluminador de oportunidad
- m : entero, correspondiente al retardo de la señal en muestras
- k : entero, correspondiente al desplazamiento en frecuencia en digital
- N : longitud de la trama OFDM

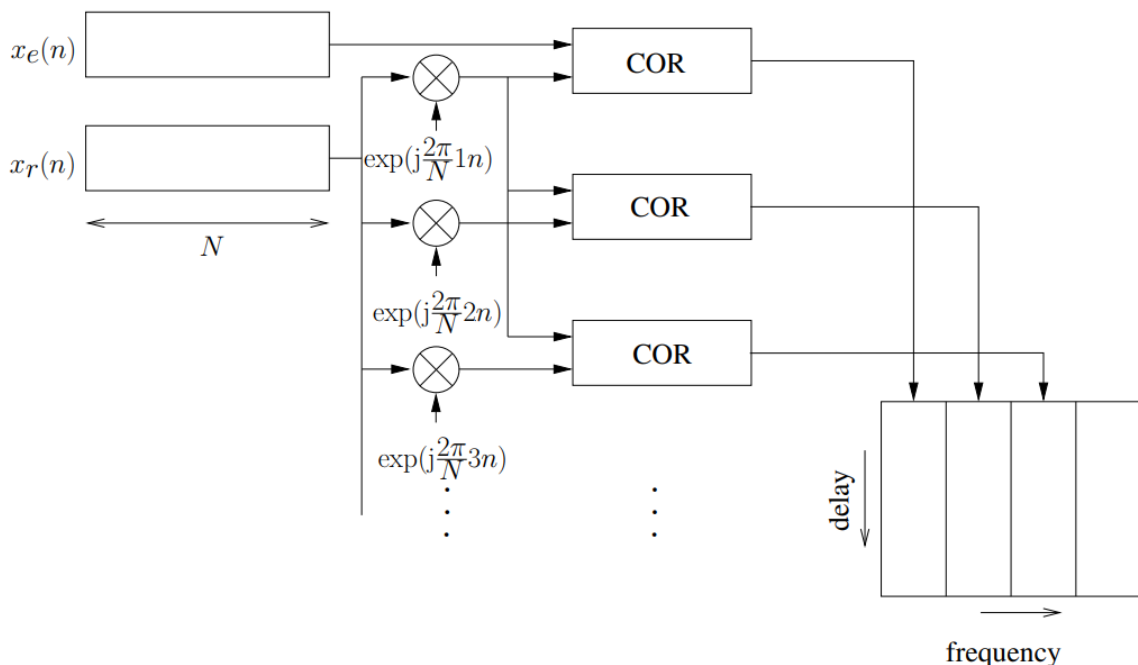


Ilustración 35 Diagrama para el cálculo de la CAF por medio del primero algoritmo no optimizado

Sin embargo, realizar la correlación entre dos señales para cada desplazamiento en frecuencia no es óptimo, y hace que el procesamiento sea muy lento, por ello para este trabajo se ha decidido realizar dicho cálculo mediante el algoritmo de “Batch processing”, o de procesado por bloques.

Este algoritmo comienza segmentando las dos señales de entrada en bloques denominados “batches”. En este algoritmo se asume que en cada bloque de señal no se produce desplazamiento en frecuencia por el efecto Doppler, es decir que todo el bloque pertenece a una misma reflexión de un objetivo, en un mismo instante de tiempo. Esta simplificación va a hacer que el posterior procesado se pueda optimizar con una transformada de Fourier.

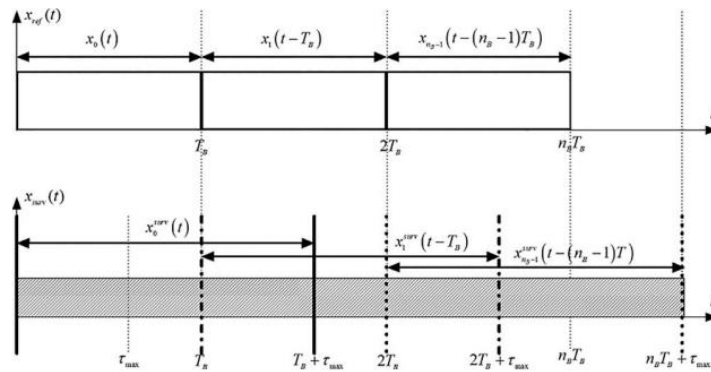


Ilustración 36 Segmentación señales

Al simplificar el problema, la fórmula de la función de ambigüedad presentada al inicio del capítulo se puede reformular de la siguiente manera:

$$FFT\{COR\{x_{vig}(qP + p), x_{ref}(qP + p)\}\} \quad p = 0, \dots, P - 1 \quad q = 0, \dots, Q - 1$$

Donde:

- FFT: representa la transformada de Fourier
- COR: representa la correlación de las señales
- x_{vig} : es la señal de vigilancia
- x_{ref} : es la señal de referencia del iluminador de oportunidad

- P: número de muestras de cada bloque
- Q: número de bloques de señal.

Este algoritmo se puede optimar más si en vez de realizar la correlación cruzada de las dos señales, se realiza la transformada de Fourier de estas, y se multiplican en el dominio de la frecuencia. Esta segunda optimización se puede realizar gracias a la relación que existe entre la correlación cruzada de dos señales, y una convolución.

Esta relación se explica a continuación:

Partiendo de la ecuación de la ecuación de la correlación

$$R_x(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot x^*(n - m)$$

Si se realizan los siguientes cambios de variable

$$y(m - n) = x^*(n - m)$$

$$\tau = m - n$$

Entonces

$$y(\tau) = x^*(-\tau)$$

Por lo tanto, ahora la expresión anterior se puede expresar de la siguiente manera

$$R_x(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot y(m - n)$$

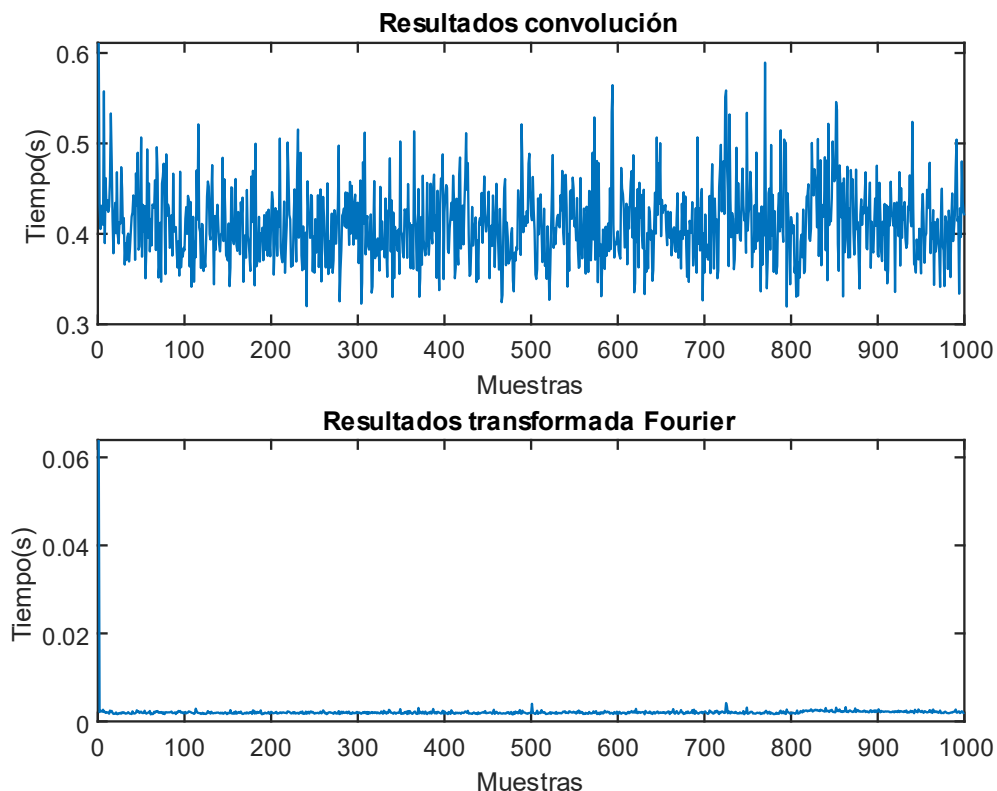
Es decir, una convolución

$$R_x = x(n) * x^*(n)$$

Y como realizar una convolución en el dominio del tiempo es equivalente a realizar una multiplicación en el dominio de la frecuencia, se ha decidido transformar la señal $x(n)$ al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier, y multiplicar el espectro.

Al realizar la multiplicación en el dominio de la frecuencia se consigue mejorar de forma significativa el tiempo de ejecución de este algoritmo, puesto que las convoluciones requieren de mayor tiempo de ejecución que la transformada de Fourier y la multiplicación.

A modo de demostración se adjuntan los tiempos de realizar la convolución de un vector de números aleatorios por medio de la función *conv* nativa de Matlab, frente al tiempo de ejecución por medio del método de la transformada de Fourier.



Los tiempos medios de ejecución son:

Tabla 2 Tiempos ejecución

Convolución	0.4114s
Transformada Fourier	0.0021s

Se puede apreciar una diferencia significativa en cuanto a rendimiento y tiempo de ejecución, por lo tanto, se ha conseguido mejorar el algoritmo propuesto en [10].

Una vez que se ha calculado la correlación de los bloques de señal de entrada por medio del método explicado anteriormente, es necesario realizar otra transformada de Fourier, pero en vez de realizarla bloque por bloque, se ha de realizar en paralelo en todos los bloques. De esta forma se obtiene una matriz de la función de ambigüedad de la señal recibida durante el período de integración.

Un parámetro importante en este algoritmo es el tamaño de los bloques del algoritmo, puesto que de este tamaño depende la velocidad máxima de un objetivo que puede detectar el radar. La relación entre la duración de cada bloque y la velocidad máxima detectable es la siguiente:

$$T_{batch} = 1/(2 \cdot V_{max})$$

Esto se debe a que T_{batch} representa el tiempo de integración de cada bloque, de forma que, si es muy alto, es posible que un objetivo aparezca en dos *slots* de distancia si tiene una velocidad elevada. Por ello cuanto mayor es el tiempo de integración menor es la velocidad máxima que se puede detectar. Sin embargo, si se escogiera un tiempo de integración muy reducido, se perdería resolución en la detección, así como aumentaría de forma muy significativa el tiempo de ejecución.

Para este trabajo se ha escogido un tamaño de 16384 muestras o 0.0017 segundos, de forma que se puedan detectar objetivos de 300 m/s, velocidad típica de los aviones comerciales.

Este valor se ha forzado que se sea de potencia de dos, permitiendo que se pueda emplear la segunda optimización de sustitución de la correlación por una FFT.

A continuación, se adjuntan los resultados de simular un objetivo en dos situaciones distintas:

- Objetivo a 131 Km

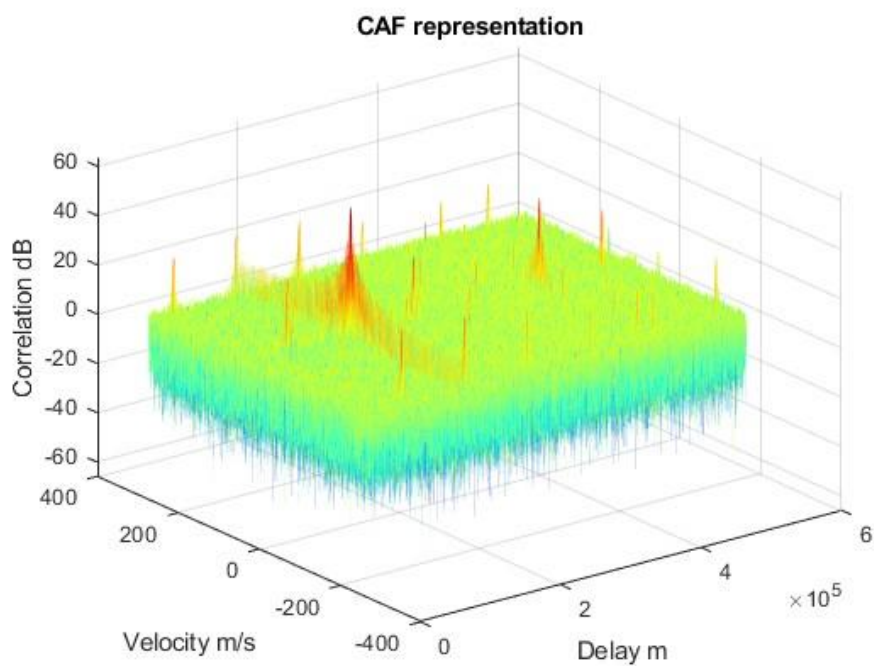


Ilustración 37 Simulación objetivo retardado

- Objetivo a 131 Km y 20Hz de desviación Doppler

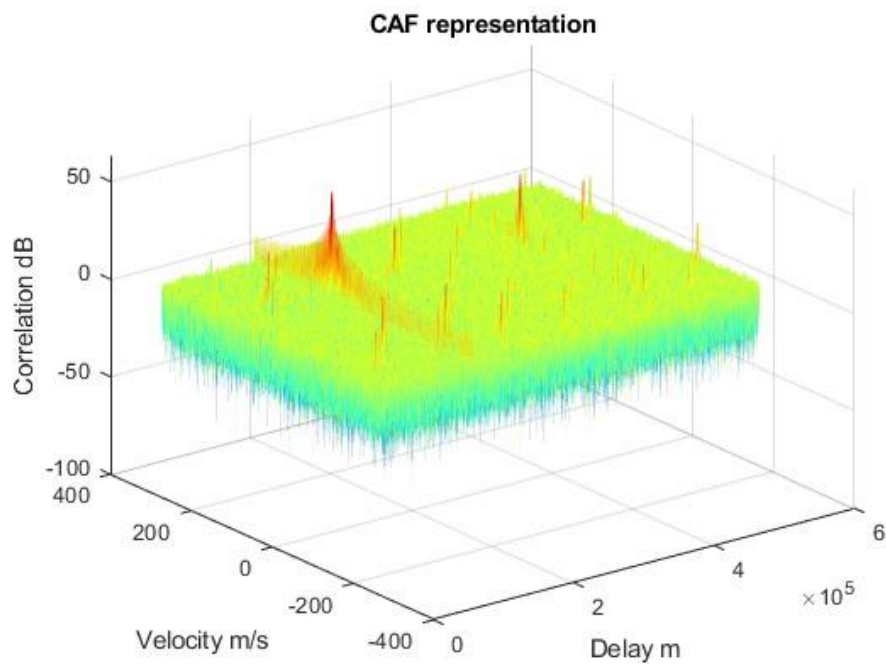


Ilustración 38 Simulación objetivo retardado y desplazado en frecuencia

8 GENERACIÓN DE ESCENARIO

8.1 PARÁMETROS SIMULACIÓN

Para la probar el funcionamiento del sistema de radar pasivo, se ha generado un escenario simulado. Este simulador se ha procurado que fuera lo más genérico posible de forma que consiguiera imitar de la forma más realista las condiciones de un blanco viajando a una determinada velocidad.

Para esta simulación se ha situado una antena emisora en las coordenadas (0,0) del entorno de simulación. La antena receptora se ha situado en punto (10000,0), es decir la distancia del camino directo entre el iluminador de oportunidad y el receptor de 10Km.

Se ha realizado una simulación en iteraciones de 0.2s, por ello, en cada iteración se genera una señal OFDM de 267 símbolos. Este tiempo de simulación es a su vez el tiempo de integración del radar, es decir es el tiempo que el módulo receptor del radar está recibiendo muestras de señal por el canal de recepción. El número de símbolos se ha calculado empleando el número de muestras de cada iteración de la simulación y la longitud en muestras de cada símbolo OFDM.

Para calcular el número de muestras de cada iteración, es necesario conocer el tamaño de cada bloque del algoritmo *Batch*, calculado con la frecuencia de muestreo y T_{batch} , definida en el apartado *Cálculo función de ambigüedad*.

Como resumen se adjuntan los cálculos realizados para calcular todos parámetros de la simulación:

- Número de bloques del algoritmo Batch

$$N_{Bloques} = T_{iteración}/T_{batch}$$

- Tamaño de cada bloque

$$N_{Batch} = 2^{\log_2(T_{Batch} \cdot F_s)} \cdot M/L$$

Donde:

M es el factor de diezmado del receptor

L es el factor de interpolación

- Número muestras en cada iteración

$$N_{Iteracion} = N_{Bloques} \cdot N_{Batch}$$

- Número símbolos OFDM generados

$$N_{Símbolos} = N_{Iteración} / L_{Símbolo}$$

Donde:

- $L_{Símbolo}$ es la longitud de cada símbolo OFDM

Dentro de cada iteración de la simulación, y con el fin de realizar una simulación lo más realista, se divide la señal generada en segmentos de señal de 30 muestras de señal. Cada bloque de señal se suma a una señal de recepción, en función de la posición del blanco en ese instante temporal, es por ello que el desplazamiento en frecuencia por el efecto Doppler aparece de forma inherente en la señal, y no es necesario forzar ningún desplazamiento de forma manual.

Además, a la señal reflejada del blanco se le añade ruido blanco Gaussiano con una relación señal a ruido de 10dB con el fin de intentar representar las condiciones reales que se podrían encontrar si el radar pasivo se desplegara en una situación real.

Como se ha explicado en el apartado *Ecuación radar*, para la realización de la simulación se ha aplicado la ecuación radar para poder calcular las pérdidas de la señal a medida que se propaga por el canal. Únicamente se han tenido en cuenta las pérdidas por el espacio libre, de forma que la señal se corrige antes de insertarla en el receptor, y se adapta la potencia de esta.

Para conseguir un entorno realista se han tomado los valores de ganancia y de potencia transmitida de valores típicos comerciales, puesto que se asume que si en un futuro se realizara un desarrollo físico del proyecto se haría con materiales y tecnologías al alcance del consumidor regular.

Los parámetros finales del entorno de simulación son los siguientes:

Tabla 3 Parámetros simulación empleados

T_{batch}	0.0017s
N_{Bloques}	150
$N_{\text{Iteración}}$	2688000
N_{Batch}	17920
$N_{\text{Símbolos}}$	267
SNR	10dB
G_{Emisor}	40dB
G_{Receptor}	20dB
Sección radar equivalente	40 m ²
Potencia transmitida	5W

8.2 ESCENARIO SIMULACIÓN

Para realizar la prueba del radar, se ha diseñado un escenario en el que se presenta un avión despegando a 1.41 kilómetros del emisor. Se ha aproximado el movimiento de un avión comercial despegando a un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, tanto en el eje vertical, como en el eje de despegue de la pista, por lo tanto, el movimiento del avión en cada instante de tiempo viene definido por la siguiente ecuación:

$$e = 1/2 \cdot a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + e_0$$

Donde:

- e : posición del objetivo en un instante de tiempo
- e_0 : posición inicial del objetivo
- t : tiempo transcurrido en la simulación, se asume que el tiempo inicial es 0
- v_0 : velocidad inicial del objetivo

A cada elemento dentro del entorno de simulación se le han dado unas coordenadas cartesianas, la posición y velocidad se encuentran representadas por un vector de tres valores correspondientes a los tres ejes de coordenadas cartesianas, estos ejes son $[x, y, z]$. Todos los valores descritos se encuentran en unidades del sistema internacional.

Inicialmente el avión se encuentra a una altura de 0 metros, en la coordenada $[1000, 1000, 0]$, y con una velocidad de 0 m/s en todos los ejes. Desde la posición inicial se le imprime una aceleración constante de 10 m/s^2 , tanto en el eje x como en el z , de forma que se simule la secuencia de despegue de un avión comercial. Estos valores de aceleración son ligeramente superiores a los que se pueden encontrar en los aviones comerciales, pero se ha escogido esta aceleración para que se apreciara de forma correcta el movimiento del avión, y el desplazamiento espacial y en frecuencia en las matrices de ambigüedad, con el menor número de gráficas e iteraciones posibles.

La velocidad del avión a lo largo del tiempo en el eje horizontal se puede apreciar en la siguiente gráfica:

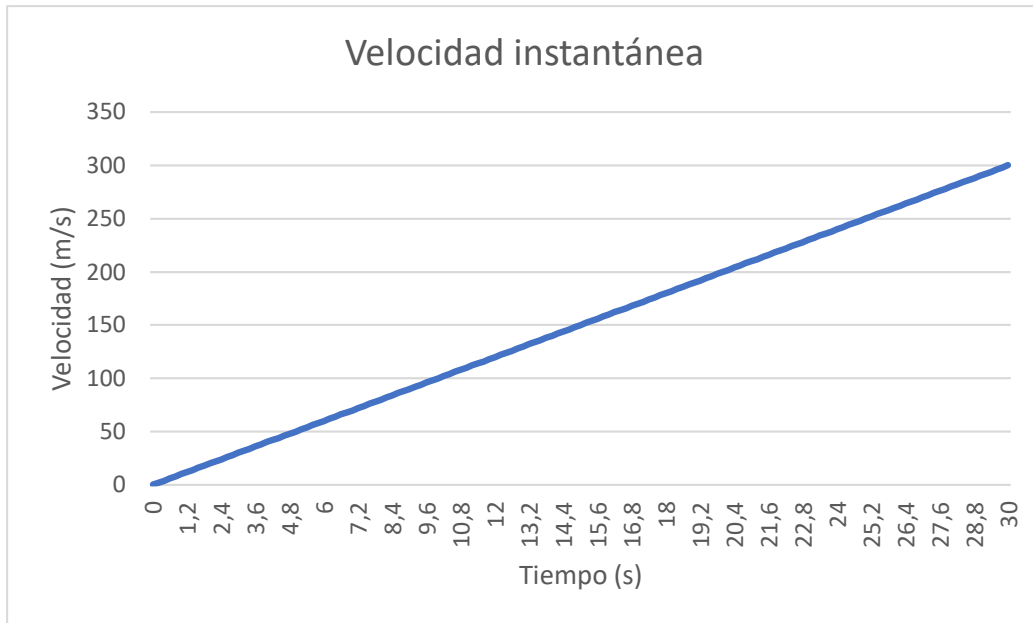


Ilustración 39 Velocidad instantánea avión

La evolución de la altura del avión simulado a lo largo de los 30 segundos de simulación se puede apreciar en el siguiente gráfico:



Ilustración 40 Gráfico evolución altura avión

En total se han simulado 30 segundos del escenario, es decir se ha simulado el movimiento del avión durante 30 segundos. Como el tiempo de integración del radar es de 0,2 segundos, correspondiente en este caso al tiempo de simulación de cada iteración, se han realizado un total de 150 iteraciones, dando lugar a 150 matrices de ambigüedad cruzada.

Como resultado se ha conseguido realizar una detección en tiempo real del avión a medida que describe la trayectoria de movimiento de despegue, en el apartado *Análisis de Resultados* se adjuntan diversas gráficas en las que se puede apreciar a intervalos, el movimiento del avión detectado desde el punto de vista del receptor.

Tabla 4 Parámetros entorno simulación

Aceleración x	10 m/s ²
Aceleración y	0 m/s ²
Aceleración z	10 m/s ²
Posición inicial x	1000 m
Posición inicial y	1000 m
Posición inicial z	0 m
Tiempo integración	0.2 s
Tiempo simulación	30 s
Iteraciones	150

9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como resultado de la simulación realizada, explicada en el apartado *Generación de escenario*, se han obtenido 150 matrices de resultados. A continuación, se presentan algunas de ellas:

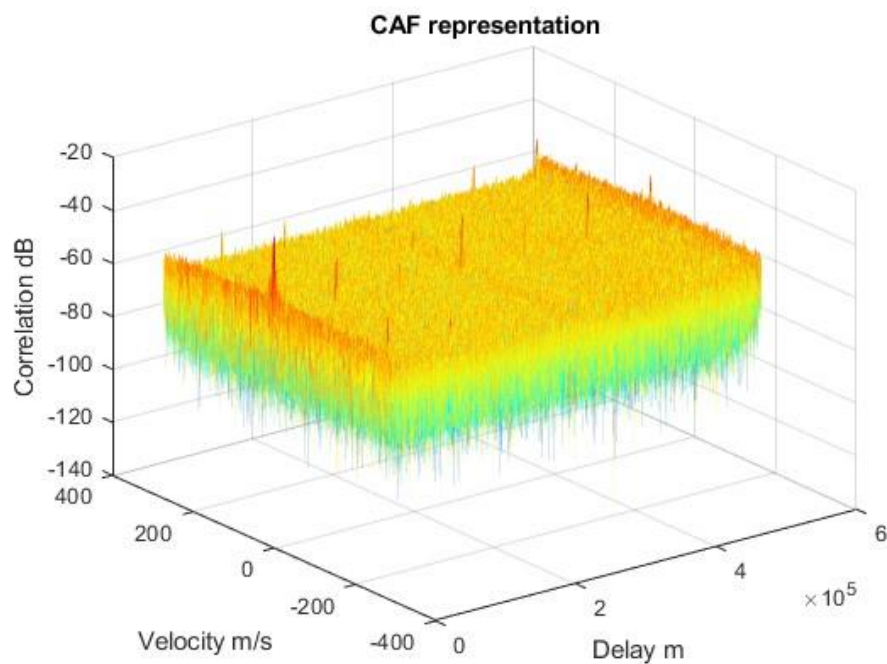


Ilustración 41 Matriz de ambigüedad resultado de la ejecución de la primera iteración de la simulación

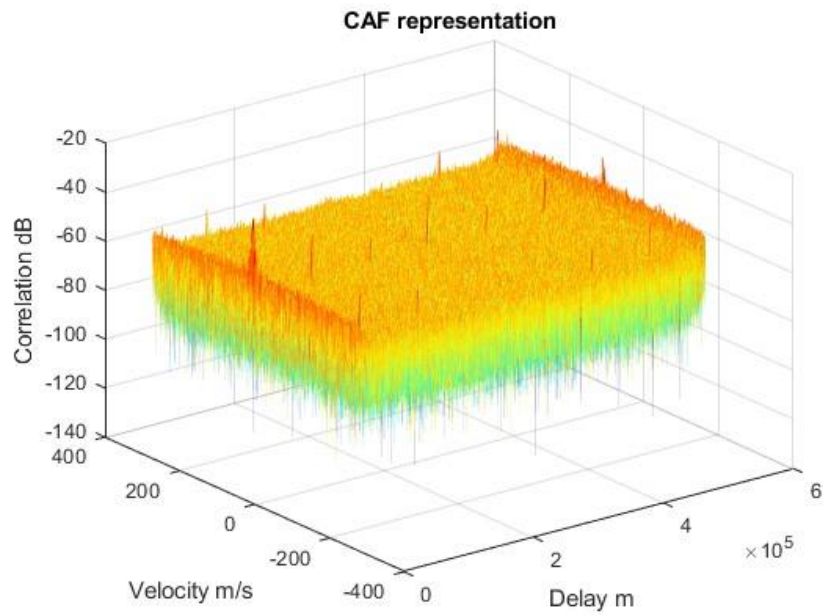


Ilustración 42 Matriz de ambigüedad resultado de la ejecución de la iteración 25 de la simulación

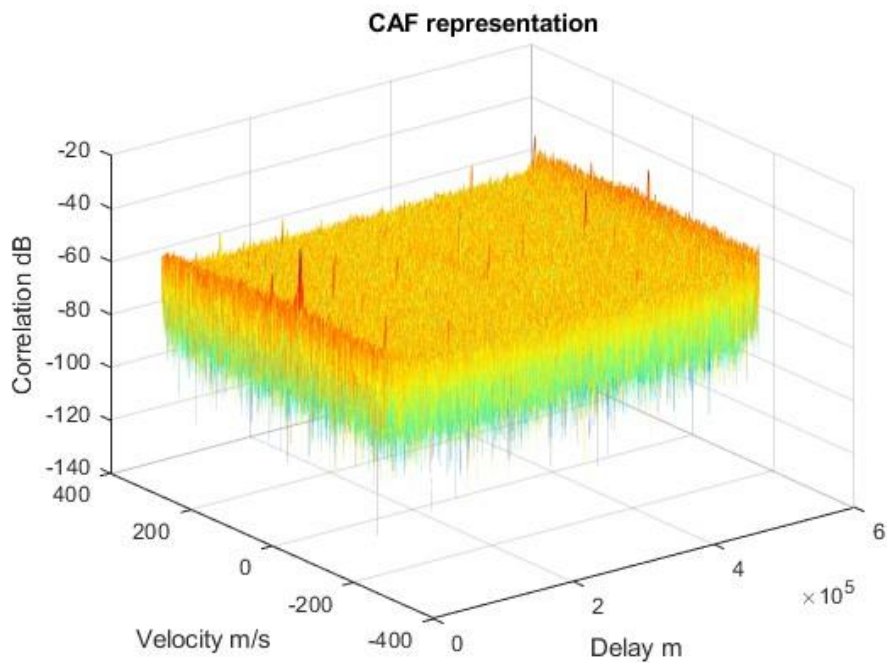


Ilustración 43 Matriz de ambigüedad resultado de la ejecución de la nonagésimo quinta iteración de la simulación

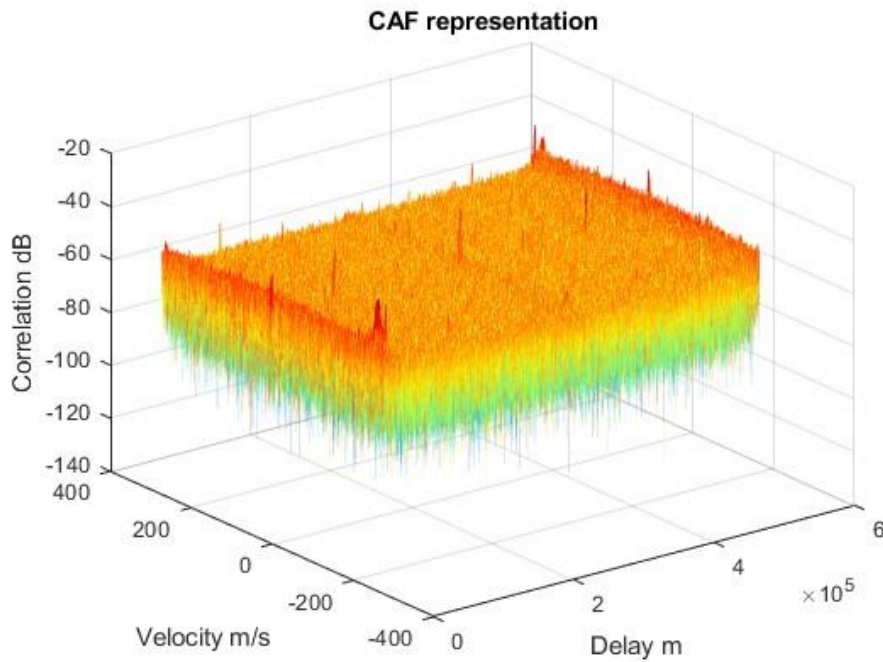


Ilustración 44 Matriz de ambigüedad resultado de la ejecución de la última iteración de la simulación

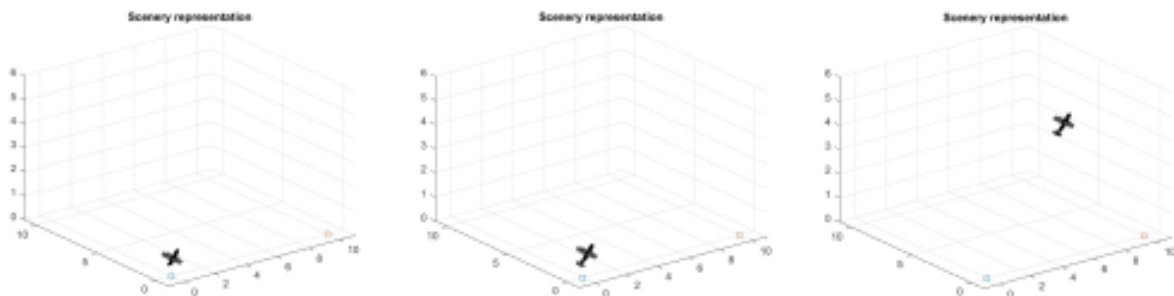


Ilustración 45 Evolución del objetivo en el entorno simulado

Como se puede apreciar, inicialmente el desplazamiento en frecuencia percibido es de 0 Hz, esto se debe a que, inicialmente el avión no tiene velocidad, o la velocidad presente no es suficiente para apreciarse de forma significativa en la perspectiva de la función de ambigüedad.

Debido a que, en las últimas iteraciones, el objetivo alcanza la velocidad máxima detectable, se aprecia que la forma de la función de ambigüedad se distorsiona ligeramente. Esto indica que los cálculos realizados de velocidad máxima son correctos.

En la secuencia de imágenes se puede apreciar que inicialmente el objetivo no presenta una gran distancia, pero que a medida que la simulación avanza, el ritmo de distancia crece de forma significativa. Esto concuerda con lo presentado en la *Ilustración 40*, ya que la distancia no aumenta de forma lineal.

Debido a que se trata de una simulación con un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, la velocidad aumenta de forma lineal a lo largo del tiempo de simulación, esto se puede comprobar en que el desplazamiento en frecuencia aumenta de forma constante en las diferentes funciones de ambigüedad.

Del análisis de la sucesión de matrices radar generadas se puede inferir que el movimiento detectado es un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, y que por lo tanto el sistema desarrollado funciona correctamente.

10 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo demuestra que es posible realizar un sistema de radar pasivo con un único canal de recepción, además pone de manifiesto que con herramientas de programación al alcance de cualquier usuario básico es posible realizar una simulación realista sin emplear toolboxes o código externo.

Como continuación de este proyecto quedaría continuar con el desarrollo de los algoritmos para emplear algoritmos más fiables y que permitieran la detección de objetivos con una relación de señal a ruido mucho menos favorable.

Además, es necesario realizar una posterior revisión del código para conseguir una mayor eficiencia, ya que en ocasiones el tiempo de simulación se puede extender de forma significativa.

Un posible futuro trabajo sería realizar una implementación del trabajo presentado, es decir conectar hardware de radio frecuencia para poder adquirir señales del entorno y procesarlas con los algoritmos presentados. Para realizar dicha implementación sería necesario contar con una antena y un módulo receptores. Por su facilidad de uso, bajo precio y flexibilidad, se recomienda el uso de una radio definida por software, ya que se puede adaptar la frecuencia de la portadora, y realizar cierto preprocesado de la señal antes de inyectarla en los algoritmos.

11 BIBLIOGRAFÍA

[ETSI, Digital Video Broadcasting Framing structure, channel coding and modulation for
1 digital terrestrial television, Sophia Antipolis Cedex: ETSI, 2015.

]

[J. M. N. García, «defensa.com,» Edefa S.A, [En línea]. Available:
2 <https://www.defensa.com/industria/radar-pasivo-hensoldt-muestra-capacidades-otan>.

] [Último acceso: 26 6 2022].

[gnuradio, «gnuradio,» [En línea]. Available: <https://www.gnuradio.org/>. [Último acceso:
3 2022 6 26].

]

[A. E. Fuste, J. V. Tarres, A. B. Ibars y A. A. Sole, *GEOMETRIA DE LOS SISTEMAS*
4 *RADAR BIESTATICOS*, Barcelona: Dpt. de Teoria de la Sefial y Comunicaciones. Grupo

] A.H.R. E. T.S. Ing. Telecom. de Barcelona. U.P.C.

[Indra, «indracompany,» 7 2 2013. [En línea]. Available:
5 [https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-desarrolla-sistrema-radar-pasivo-alta-](https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-desarrolla-sistrema-radar-pasivo-alta-resolucion)

] [resolucion](https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-desarrolla-sistrema-radar-pasivo-alta-resolucion). [Último acceso: 27 6 2022].

[J. M. Pérez, *Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático para aplicaciones*,
6 Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2015.

]

[Wikipedia, «Wikipedia,» 27 8 2021. [En línea]. Available:
7 https://es.wikipedia.org/wiki/Acceso_m%C3%BAltiple_por_divisi%C3%B3n_de_frecu
] encias_ortogonales. [Último acceso: 26 6 2022].

[F.Pieralice, F. Santi, D. Pastina, M. Bucciarelli, M. A. H. Ma y M. Cherniakov, *GNSS-
8 Based Passive Radar for Maritime Surveillance: Long Integration Time MTI Technique,*
] Roma.

[Analog Devices, «analog.com,» [En línea]. Available:
9 <https://www.analog.com/en/products/ad9363.html>. [Último acceso: 26 6 2022].
]

[J. H. McClellan y T. W. Parks, *FIR Digital Filter Design Techniques Using Weighted
1 Chebyshev Approximation*, IEEE, 1975.
0
]

[O. Mahfoudia, F. Horlin y X. Neyt, *On the feasibility of DVB-T based passive radar with
1 a single receiver channel*, IEEE.
1
]

[C. MOSCARDINI, D. PETRI, A. CAPRIA, M. CONTI, M. CONTI y F. BERIZZI,
1 *Batches Algorithm for Passive Radar: A Theoretical Analysis*, Roma: IEEE, 2013.
2
]

[C. E. Hajjar, *Synchronization Algorithms for OFDM Systems (IEEE802.11a, DVB-T)*,
1 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg , 2007.
3
]

[C.-W. Kuang, *Timing Synchronization for DVB-T System*, Chiao Tung : Institute of
1 Electronics Engineering National Chiao Tung University.

4

]

[Wikipedia, «Wikipedia,» 27 4 2022. [En línea]. Available:
1 https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecue
5 [ncias_ortogonales#:~:text=La%20multiplexaci%C3%B3n%20por%20divisi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales#:~:text=La%20multiplexaci%C3%B3n%20por%20divisi%C3%B3n%20de,en%20QAM%20o%20en%20PSK)
] [%20de,en%20QAM%20o%20en%20PSK](https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales#:~:text=La%20multiplexaci%C3%B3n%20por%20divisi%C3%B3n%20de,en%20QAM%20o%20en%20PSK). [Último acceso: 26 6 2022].

ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS

Los objetivos de desarrollo sostenible son ideas que abordan las problemáticas del desarrollo sustentable, es decir, que tienen como objetivo la prosperidad económica, la integridad del medio ambiente y la equidad social. Son objetivos marcados por la Organización de Naciones Unidas, y defendidos por la inmensa mayoría de países.



Ilustración 46 Objetivos desarrollo sostenible

Como se indica en la *Ilustración 46*, los objetivos de desarrollo sostenible son:

- Fin de la pobreza
- Hambre cero
- Salud y bienestar
- Educación de calidad

- Igualdad de genero
- Agua limpia y saneamiento
- Energía asequible y no contaminante
- Trabajo decente y crecimiento económico
- Industria, innovación infraestructura
- Reducción de desigualdades
- Ciudades y comunidades sostenibles
- Producción y consumo responsables
- Acción por el clima
- Vida submarina
- Vida de ecosistemas terrestres
- Paz, justicia e Instituciones sólidas
- Alianzas para lograr los objetivos

Este proyecto se encuentra alineado con los proyectos de desarrollo sostenible de Energía asequible y no contaminante, puesto que, al tratarse de un sistema de radar pasivo, la energía necesaria para operarlo es mucho menor que en el caso de un sistema de radar tradicional. Esto lo consigue al únicamente recibir señales, y no enviarlas. Este tipo de sistemas pueden implicar un ahorro muy significativo, y servir de transición hacia radares mucho más respetuosos con el medio ambiente y eficientes.

Además, este proyecto también cumple con el objetivo de Industria, innovación infraestructura, ya que, al tratarse de tecnología experimental, se fomenta la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías entorno a este tipo de sistemas de radar. Los radares pasivos son el futuro y este trabajo hace que sea más fácil poder innovar, ya que al englobarlo todo en un único entorno de simulación accesible para todos los públicos, hace que cualquier persona pueda implementar sus ideas.