



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Detección de blancos marítimos mediante radar pasivo basado
en señales GNSS*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Javier Guillermo Ceballos Montes

DIRECTORES: Rubén Nocelo López
José María Núñez Ortuño

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Detección de blancos marítimos mediante radar pasivo basado
en señales GNSS*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Un radar pasivo es un sistema de detección que, a diferencia de los radares convencionales, no emite señales propias, sino que aprovecha emisiones existentes en el entorno, procedentes de fuentes comúnmente conocidas como iluminadores de oportunidad. Este tipo de radar es especialmente útil en aplicaciones que requieren discreción, ya que no revela la posición del receptor.

Entre los distintos iluminadores de oportunidad disponibles, como transmisiones de radio, televisión digital terrestre (DVB-T) o señales de telefonía móvil, las señales GNSS ofrecen ventajas destacables. Su amplia cobertura global, alta estabilidad temporal y disponibilidad continua las convierten en una alternativa atractiva para sistemas de radar pasivo, especialmente en entornos marítimos donde otras fuentes pueden ser menos fiables.

En este proyecto se empleó un sistema de radar pasivo basado en señales GNSS, utilizando un algoritmo en MATLAB para procesar las señales recibidas. Dicho algoritmo permite realizar la correlación cruzada entre la señal directa y la reflejada, estimar el desplazamiento Doppler y generar el correspondiente mapa distancia-Doppler para localizar objetivos.

Los resultados experimentales, obtenidos tanto con señales sintéticas como con datos reales captados en la Ría de Pontevedra, demostraron la eficacia del sistema. Se logró detectar con éxito un blanco de carácter civil y un barco militar, validando así la viabilidad del radar pasivo GNSS para la vigilancia y seguridad marítima.

PALABRAS CLAVE

Radar pasivo, Doppler, PRN, Iluminador de oportunidad, GNSS.

AGRADECIMIENTOS

Tras estos 5 años, desde aquel 10 de septiembre que ingresé con mis compañeros en la Escuela Naval, si pudiese contarle al yo de aquel día todo lo que viviría, no se lo creería. Este trabajo de fin de grado no es únicamente el cierre a la carrera universitaria que aquí se imparte, supone el fin de una etapa muy importante. Una etapa de aprendizaje e ilusión, llena de dificultades, pero también de alegrías muchos más grandes.

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores, Rubén Nocelo López y José María Núñez Ortuño, por el compromiso mostrado, su guía y la infinita paciencia que han tenido conmigo, no son pocas las horas pasadas en el laboratorio. Aprovecho para mencionar a todos aquellos profesores, oficiales y alumnos que de alguna manera han aportado a mi formación académica y militar.

Debo mencionar a mis compañeros de la promoción 425-155, promoción marcada por haber ingresado en el año de la COVID-19. Donde unos lo ven como un aspecto negativo, yo lo veo como una cualidad única, no hay otra promoción igual, de la misma manera que fuimos los primeros, y hasta la fecha *únicos*, en cruzar el Cabo de Hornos con el Juan Sebastián de Elcano. El sufrimiento une, y afrontarlo con éxito en equipo, une aún más.

Por último, quiero agradecerle a mi familia, pilar fundamental de mi vida, son ellos los que me han enseñado el amor a la patria y a sentirme orgulloso de ser español. A mi padre, que despertó mi vocación por la Armada, y que ha velado siempre por mi formación como persona. A mi madre, que como tantas otras madres sufre en silencio la lejanía de su hijo, por su dedicación y sacrificio incansable a su familia. Y a mis hermanos, que nunca han dudado en corregirme y en apoyarme, por su ejemplo y cariño.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Contexto y motivación	8
1.2 Objetivos	9
1.3 Estructura de la memoria	10
2 Estado del arte	11
2.1 El radar pasivo	11
2.1.1 Definición	11
2.1.2 Contexto histórico.....	12
2.1.3 Principio básico de funcionamiento.....	13
2.1.4 Doppler	15
2.1.5 Doppler biestático.....	15
2.1.6 Ecuación del radar biestático.	16
2.2 GNSS	16
2.2.1 Justificación del uso de GNSS.....	17
2.2.2 Funcionamiento GPS	18
2.2.3 PRN.....	20
2.2.4 Acceso múltiple por división de código (CDMA).....	23
2.3 Procesado de señales	24
2.3.1 Preprocesado.....	25
2.3.2 Filtro adaptativo	25
2.3.3 Función de ambigüedad cruzada/Correlación cruzada	25
2.3.4 Detección y estima.....	26
2.3.5 Seguimiento y localización.....	26
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Escenario del radar pasivo	27
3.2 Hardware utilizado	28
3.2.1 Antena de referencia. Spartan MA600	28
3.2.2 Antena de vigilancia. Banda L de Nolle Engineering.	29
3.2.1 EVK-M8T.....	30
3.2.1 ADALM-PLUTO	31
3.2.1 HackRF One	32

3.2.2 USRP X310	32
3.2.3 LBE-1421	33
3.3 Software utilizado	33
3.3.1 u-center	33
3.3.2 Matlab	34
3.3.3 GNU Radio	34
3.4 Implementación del Procesado de Señal GNSS	35
3.4.1 Lectura y conversión de datos	35
3.4.2 Generación del código C/A	35
3.4.3 Procesado y correlación de la señal	35
3.4.4 Función de ambigüedad cruzada (CAF, cross ambiguity function)	36
3.4.5 Generación del mapa distancia-Doppler	36
3.5 Pruebas previas	36
3.5.1 Recepción de Señal sintética	36
3.5.2 Pruebas realizadas con antena de referencia	39
3.5.3 Pruebas realizadas con dos antenas de manera simultánea	40
3.5.4 Prueba realizada con antena de referencia y antena de vigilancia	43
4 Resultados y validación	48
4.1 Resultados con blancos sintéticos	48
4.1.1 Simulador de escenarios y señal sintética	48
4.1.2 Procesado de señales reales	53
4.1.2.1 Apuntamiento a un barco civil	53
4.1.2.2 Medición del S-81 Isaac Peral	56
5 Conclusiones y líneas futuras	60
5.1 Viabilidad del uso de satélites GPS como iluminador de oportunidad	60
5.1.1 Detección de objetivos	60
5.1.2 Robustez frente a señales débiles	61
5.1.3 Ventajas de un entorno marítimo libre de interferencias	61
5.2 Limitaciones observadas	61
5.2.1 Sensibilidad a la geometría del sistema biestático	61
5.2.2 Sensibilidad del sistema en condiciones de baja SNR	61
5.3 Líneas futuras	62
5.3.1 Integración de múltiples satélites	62
5.3.2 Beamforming y procesamiento espacial	62
5.3.3 Ampliación del tiempo de toma de muestras	62
6 Bibliografía	63

Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, y Ambientales	67
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	68
Anexo III Explicación matemática de los códigos PRN	69
Anexo IV: Código de procesamiento y correlación de la señal	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Geometría del radar biestático [8]	12
Figura 2-2 Diagrama de principio de uso del sistema “Klein Heidelberg” [9].	13
Figura 2-3: Esquema de geometría biestática básica [6].	14
Figura 2-4 Representación del sistema GNSS, incluyendo las 4 constelaciones disponibles: GPS, GLONASS, Galileo y Beidou/Compass [22].	17
Figura 2-5 Configuración del experimento realizado en china y resultados obtenidos [19].	18
Figura 2-6 Esfera centrada en un satélite que define la posición del receptor en la superficie [30].	19
Figura 2-7 Intersección de tres esferas [30].	19
Figura 2-8 Formato del mensaje de navegación de un satélite GPS [32].....	20
Figura 2-9 Esquema de generación de un código C/A [35].	21
Figura 2-10 Configuración del Generador de Registro de Desplazamiento G1 [36].	21
Figura 2-11 Configuración del Generador de Registro de Desplazamiento G2 [36].	22
Figura 2-12 Asignaciones de desplazamiento (1/2).	22
Figura 2-13 Asignaciones de desplazamiento (2/2).	22
Figura 2-14 Cálculo de retardo de la señal GPS [37].	23
Figura 2-15 Diagrama de bloques del procesado en de una señal en radar pasivo.	25
Figura 3-1 Esquema del montaje propuesto.	27
Figura 3-2 Antena Spartan MA600	28
Figura 3-3 Especificaciones antena Spartan MA600.	29
Figura 3-4 Antena RHCP de Nolle Engineering y sus especificaciones.	30
Figura 3-5 Receptor GNSS EVK-M8T de UBLOX.	31
Figura 3-6 Especificaciones del EVK-M8T.	31
Figura 3-7 Dispositivo SDR ADALM-Pluto y sus especificaciones.	32
Figura 3-8 Transceptor SDR HackRF-One.	32
Figura 3-9 USRP X310.	33
Figura 3-10 Oscilador disciplinado LBE-1421.	33
Figura 3-11 Funcionamiento general del procesado y correlación de las señales recibidas.	36
Figura 3-12 Funcionamiento general del código que genera el mapa distancia-Doppler.	36
Figura 3-13 Escenario de la prueba: Tx antena transmisora Rx antena receptora.	37
Figura 3-14 Módulo generador de la señal en sintética en GNU Radio.....	38
Figura 3-15 Espectro de la señal PRN transmitida a 498 MHz con una ganancia de 20 dB.	38
Figura 3-16 Correlación de la señal sintética.	39
Figura 3-17 Antena Spartan MA600.	40

Figura 3-18 Montaje para prueba con HackRF y 1 antena de referencia.	40
Figura 3-19 ADALM-Pluto con 2 entradas y 2 salidas.	41
Figura 3-20 ADALM-Pluto conectado a GPSDO y a las dos antenas.	42
Figura 3-21 Programa para capturar la señal de las 2 antenas de referencia.	42
Figura 3-22 Mapas de correlación: antena de referencia 1 (izquierda), antena de referencia 2 (derecha).	43
Figura 3-23 Montaje con antena de referencia y antena de vigilancia.	43
Figura 3-24 Programa de recolección de datos de antena de vigilancia y referencia.	44
Figura 3-25 Potencia recibida de los satélites con la antena de referencia.	44
Figura 3-26 Antena de vigilancia ajustada a la posición del satélite.	45
Figura 3-27 Potencia recibida de los satélites con la antena de vigilancia apuntando.	45
Figura 3-28 Correlación de la antena de referencia (izquierda) y de la antena de vigilancia (derecha).	46
Figura 3-29 Posición de la antena de referencia (Ref) y vigilancia (Vig).	46
Figura 3-30 Antena de vigilancia a nivel del mar, más cerca de la escollera.	47
Figura 3-31 Mapa distancia-Doppler apuntando a un entorno sin blanco.	47
Figura 4-1 Ajuste de parámetros en código.	49
Figura 4-2 Escenario 3D simulado en Matlab.	49
Figura 4-3 Función de ambigüedad cruzada simulada para un iluminador a 20 kilómetros de distancia.	50
Figura 4-4 Mapa distancia-Doppler simulado para un iluminador a 20 kilómetros de distancia.	50
Figura 4-5 Función de ambigüedad cruzada simulada para un iluminador a 200 kilómetros de distancia.	51
Figura 4-6 Mapa distancia-Doppler simulado para un iluminador a 200 kilómetros de distancia.	51
Figura 4-7 Función de ambigüedad cruzada simulada para satélite a 20000 kilómetros de distancia.	52
Figura 4-8 Mapa distancia-Doppler simulado para satélite a 20000 kilómetros de distancia.	52
Figura 4-9 USRP X310 conectado a antena de referencia y vigilancia.	53
Figura 4-10 Barco de 80 m de eslora y 15 m de manga.	54
Figura 4-11 Gráfica comparativa del SNR de cada satélite en dB para señal de referencia (izquierda) y señal de vigilancia (derecha) para apuntamiento al mercante.	54
Figura 4-12 Figuras de correlación para el satélite 14 de la constelación GPS. Canal de referencia (izquierda) y canal de vigilancia (derecha).	55
Figura 4-13 Función de ambigüedad cruzada para satélite 1.	56
Figura 4-14 Mapa distancia-Doppler para satélite 14.	56
Figura 4-15 Apuntamiento al S-81 Isaac Peral y lancha pequeña rápida.	57
Figura 4-16 Gráfica comparativa del SNR de cada satélite en dB para señal de referencia (izquierda) y señal de vigilancia (derecha) para apuntamiento al S-81.	57

Figura 4-17 Figuras de correlación para el satélite 31 de la constelación GPS. Canal de referencia (izquierda) y canal de vigilancia (derecha). 58

Figura 4-18 Función de ambigüedad cruzada para satélite 31. 58

Figura 4-19 Mapa distancia-Doppler para satélite 31. 59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ejemplo de los primeros 10 ciclos de actualización en G1.....	70
Tabla 2 Ejemplo de los primeros 10 ciclos de actualización en G2.....	71
Tabla 3 Ejemplo de aplicación del desfase para 5 ciclos.	71
Tabla 4 Ejemplo de los primeros 5 bits generados.....	71

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

El crecimiento del tráfico marítimo y la necesidad de mejorar los sistemas de vigilancia y control han llevado al desarrollo de tecnologías innovadoras que permitan detectar y rastrear embarcaciones de manera eficiente y discreta. En este contexto, los radares pasivos se han convertido en una alternativa estratégica a los radares activos tradicionales, ya que operan sin necesidad de emisión propia, aprovechando fuentes de radiación existentes.

El Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada (AJEMA) recalca que la modernización de la flota y la incorporación de nuevas tecnologías son elementos clave para mantener la superioridad en el entorno marítimo y asegurar la defensa nacional en un contexto de creciente complejidad operativa.

El tráfico marítimo internacional ha experimentado un crecimiento sostenido en las últimas décadas. Según [1], el comercio marítimo global alcanzó 12.292 millones de toneladas en 2023, con una proyección de crecimiento del 2% anual hasta 2028. Este incremento ha generado una demanda creciente de sistemas de detección avanzados, capaces de optimizar la gestión del tráfico, mejorar la seguridad y reducir los riesgos de colisión en rutas congestionadas.

Los radares activos han sido históricamente la principal herramienta para la detección y seguimiento de embarcaciones. Sin embargo, presentan desafíos como altos costos operativos, consumo energético elevado y vulnerabilidad ante interferencias y guerra electrónica. En este sentido, el uso de radares pasivos ofrece una alternativa viable y eficiente para la detección discreta de embarcaciones y su integración en los sistemas de vigilancia marítima de las Fuerzas Armadas.

La detección de objetivos mediante radar pasivo se ha convertido en una tecnología en expansión dentro del ámbito militar y de defensa, ya que permite identificar blancos sin necesidad de emitir señales propias. En lugar de generar su propia radiación, estos sistemas aprovechan señales ya existentes en el entorno, conocidas como iluminadores de oportunidad (IO). Tradicionalmente, estas señales provienen de emisores terrestres como transmisiones de radio FM o televisión digital terrestre (DVB-T), los cuales presentan limitaciones en su cobertura, especialmente en zonas marítimas o alejadas de áreas urbanas [2].

Dentro de las distintas implementaciones del radar pasivo, el uso de señales GNSS (*Global Navigation Satellite System*) como iluminadores de oportunidad representa una ventaja clave, ya que estas señales están disponibles globalmente, son altamente estables y permiten la detección de objetivos en el entorno marítimo [3]. Sin embargo, la integración de ambas tecnologías también presenta una serie de desafíos técnicos y operacionales.

El radar pasivo ha despertado un gran interés en el ámbito militar, especialmente debido a su capacidad de detección discreta y su resistencia a la guerra electrónica. A diferencia de los radares activos, que pueden ser detectados por sistemas de inteligencia adversarios, los radares pasivos no emiten señales propias, lo que les otorga una ventaja estratégica en operaciones de vigilancia y reconocimiento.

Tal como menciona el AJEMA, la disuasión sigue siendo la principal baza para defender los intereses nacionales y evitar enfrentamientos. En este sentido, la Armada debe potenciar su capacidad de proyección de poder naval y asegurar la interoperabilidad con otras fuerzas aliadas [4]. La implementación de radares pasivos en los sistemas de defensa naval refuerza esta estrategia, al proporcionar herramientas de detección eficaces sin comprometer la posición de las unidades operativas.

En el ámbito de la defensa marítima, la capacidad de detectar embarcaciones enemigas sin ser detectado proporciona una herramienta esencial para la protección de fronteras y activos estratégicos.

Las fuerzas armadas han explorado el uso de radares pasivos en buques de guerra y sistemas costeros para monitorear el tráfico marítimo en zonas de alto riesgo, donde la presencia de piratería o actividades ilícitas representa una amenaza.

En este contexto, el presente Trabajo de Fin de Grado busca el análisis y el desarrollo de un prototipo de radar pasivo capaz de detectar embarcaciones en el entorno marítimo utilizando la constelación de satélites GNSS como iluminadores de oportunidad. A diferencia de los iluminadores terrestres tradicionales, los satélites GNSS presentan la particularidad de ser fuentes no estáticas, lo que introduce nuevos desafíos y oportunidades en la implementación de este sistema.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es desarrollar un sistema de radar pasivo basado en señales GNSS para la detección de blancos marítimos. A través de este trabajo, se busca evaluar la viabilidad de esta tecnología como una solución eficiente, discreta y de bajo costo para la vigilancia marítima. En particular, se aprovechará la disponibilidad global y la estabilidad de las señales GNSS, específicamente las del sistema GPS (*Global Positioning System*), como fuente de iluminación pasiva para la detección de embarcaciones.

Para alcanzar este objetivo general, se plantea en primer lugar el diseño e implementación de un sistema de radar pasivo que utilice señales GNSS como iluminador de oportunidad. Este desarrollo incluirá la configuración de una arquitectura de radar que permita la recepción de señales GNSS tanto directas como reflejadas en objetivos, centrándose en embarcaciones que naveguen por la ría de Pontevedra. Para ello, se garantizará una adecuada adquisición y sincronización de las señales, lo que permitirá su posterior procesamiento y análisis.

Asimismo, se buscarán mejoras en los algoritmos de procesamiento de señales, como la correlación cruzada, la estimación Doppler y el análisis espectral desarrollados en proyectos de investigación como [5] con el fin de mejorar la capacidad del sistema para detectar y localizar blancos marítimos. Se busca optimizar el procesamiento de datos para mejorar la precisión y resolución del radar pasivo en la identificación y seguimiento de embarcaciones.

Para garantizar la funcionalidad del radar pasivo, se llevará a cabo un proceso de validación del sistema mediante simulaciones y pruebas con datos reales. En esta etapa, se realizarán ensayos con señales GNSS sintéticas y capturadas en condiciones reales, evaluando la capacidad del sistema para detectar blancos.

Finalmente, como objetivo inherente al trabajo se busca también integrar y aplicar los conocimientos adquiridos durante la formación académica y militar en la Escuela Naval. Se pondrán en práctica conceptos estudiados en asignaturas como Radiocomunicaciones y Sensores Navales, así como fundamentos del radar en Maniobra y Navegación y Comunicaciones. De esta manera, se destaca la

importancia del aprendizaje técnico en el ámbito militar y su aplicación en el desarrollo de soluciones innovadoras para las Fuerzas Armadas.

El cumplimiento de estos objetivos permitirá demostrar la viabilidad del uso de señales GNSS en la detección pasiva de embarcaciones, sentando las bases para el desarrollo de futuras aplicaciones en seguridad marítima, defensa naval y control del tráfico marítimo.

1.3 Estructura de la memoria

Una vez se ha establecido el marco en el que se encuentra este trabajo de fin de grado y habiendo definido los objetivos esperados, este punto tratará sobre la estructura que va a seguir la memoria. La memoria se ha estructurado con el objetivo de presentar el trabajo realizado de una manera fácil de seguir y comprender. El presente documento se compone de 6 capítulos y de anexos que sirven de apoyo para la memoria. La distribución es:

- Capítulo 1 Introducción y objetivos. En este segmento se expone la creciente necesidad del uso del radar pasivo y la utilización de señales GNSS como iluminador de oportunidad. También se plantean los objetivos a conseguir con el trabajo
- Capítulo 2 Estado del arte. En este capítulo se explican los fundamentos teóricos que rigen el trabajo, entre los que se encuentran:
 - Introducción al radar pasivo, su evolución a lo largo de la historia y principios de funcionamiento.
 - Introducción de las señales GNSS, se expone su uso como iluminador de oportunidad en este trabajo, destacando la elección de la constelación GPS. También se explica el concepto de PRN, detallando cómo se generan y para qué sirven.
 - Explicación detallada paso a paso sobre cómo los sistemas de los radares pasivos procesan las señales recibidas desde el preprocesado hasta el seguimiento y localización.
- Capítulo 3 Desarrollo del TFG. En este tercer capítulo se comenta el escenario del radar pasivo y se presentan tanto el hardware como el software utilizado. Además, se explica el código utilizado y las pruebas realizadas previamente al experimento final.
- Capítulo 4 Resultados y validación. En este apartado se exponen y analizan de manera detallada los resultados obtenidos. Se describen las tendencias observadas y se evalúa la consistencia de los datos.
- Capítulo 5 Conclusiones y líneas futuras. En este capítulo se exponen las conclusiones sacadas de todo el desarrollo del trabajo y se exponen líneas futuras de investigación con la finalidad de conseguir una detección radar más efectiva.
- Capítulo 6 Bibliografía y anexos. Por último, se adjuntan todas las fuentes utilizadas para la elaboración del trabajo, así como los anexos referentes a las implicaciones sociales, económicas ambientales, sociales y éticas. También se adjunta el código principal utilizado.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hace una breve introducción al radar pasivo como objeto del trabajo y su funcionamiento utilizando los sistemas de posicionamiento global por satélite GNSS como iluminadores de oportunidad. El radar pasivo es una opción más atractiva en el ámbito militar debido a su discreción, bajo coste operativo y la no necesidad de asignación de frecuencia.

2.1 El radar pasivo

2.1.1 Definición

El radar (*radio detection and ranging*) es un sistema tecnológico utilizado para la detección, localización y seguimiento de objetos estáticos o móviles en los entornos marítimo, terrestre y aéreo. Su principio de funcionamiento se basa en la emisión de una señal electromagnética que, al reflejarse sobre un objeto vuelve al receptor permitiendo realizar los cálculos referentes a su posición y movimiento.

El radar pasivo es una tecnología que permite localizar los objetos sin la necesidad de utilizar un transmisor activo. Los radares pasivos a diferencia de los convencionales, que emiten una señal y analizan el eco reflejado, utilizan fuentes de señal no cooperativas denominadas iluminadores de oportunidad como transmisores de radio, televisión digital terrestre o sistemas GNSS [6].

Hoy en día no existe una única definición de radar biestático, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) define el radar biestático como un radar cuyas antenas de transmisión y recepción están separadas una distancia considerable, aunque sin cuantificar dicha separación. No obstante señala que debe ser lo suficientemente grande como para que exista una variación entre los ángulos que unen a las antenas con el objetivo [7].

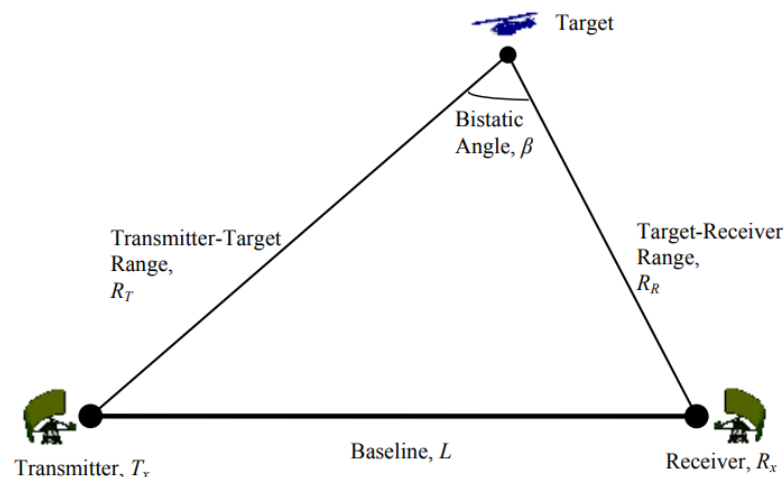


Figura 2-1 Geometría del radar biestático [8]

2.1.2 Contexto histórico

El concepto de radar pasivo se remonta a los inicios del desarrollo de los radares en el siglo XX, uno de los primeros experimentos fue el de Sir Robert Watson-Watt conocido como el experimento de Daventry, en Reino Unido. En su experimento, Sir Robert usó la señal proveniente del transmisor del servicio de radio inglés *British Broadcasting Corporation* (BBC) para poder detectar un bombardero Heyford a una distancia de 8 km. Este experimento demostró que era posible detectar aeronaves sin un transmisor propio. Las investigaciones de Sir Robert Watson-Watt sirvieron para la posterior instalación de radares activos en las costas sur y este de Inglaterra, conocida como “*Chain Home radars*”.

Durante la Segunda Guerra Mundial tanto los aliados como las potencias del eje exploraron y desarrollaron las tecnologías del radar pasivo. En respuesta al “*Chain Home*” de los ingleses los alemanes implementaron un sistema de radares pasivos a lo largo del canal de la Mancha conocido como los receptores “Klein Heidelberg”. Estos radares pasivos explotaban las emisiones del “*Chain Home*” y su rebote en aeronaves inglesas, siendo la robustez ante *jamming* su principal ventaja sobre los radares activos alemanes [9].

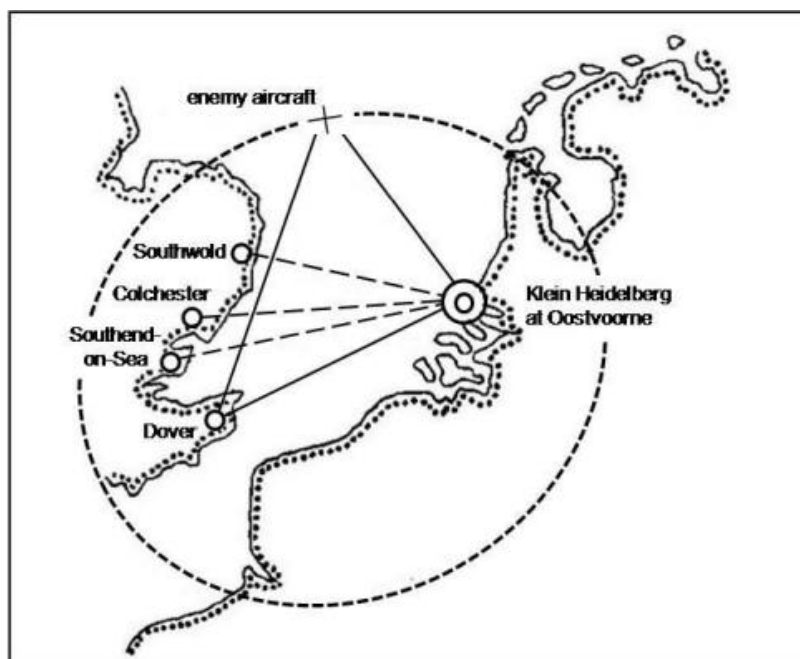


Figura 2-2 Diagrama de principio de uso del sistema “Klein Heidelberg” [9].

Con la aparición del duplexor y tras la Segunda Guerra Mundial los radares pasivos pasaron a un segundo plano y se potenció el desarrollo de radares monoestáticos activos.

En la década de los 90 un estudio por parte de un grupo de investigación de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) reavivó el interés en los radares pasivos. Este estudio destacó que los radares pasivos, además de ser discretos, eran eficaces para contrarrestar las medidas de sigilo utilizadas por aviones furtivos, ya que estas técnicas estaban diseñadas para reducir la *Radar Cross Section* (RCS) solo ante radares monoestáticos [6].

Investigaciones en la *University College London* (UCL) analizaron la detección de aeronaves utilizando transmisiones de televisión analógica (TV) como iluminadores de oportunidad. En 2001, se llevó a cabo una demostración de detección de blancos con radar pasivo utilizando la iluminación de un radar de vigilancia ruso 18 VHF realizado por una empresa alemana en colaboración con la agencia de tecnología húngara [6].

También se exploraron las señales radio FM como iluminadores de oportunidad. El primer prototipo comercial basado en radio FM fue desarrollado por Lockheed-Martin con el nombre “*Silent Sentry*” haciendo referencia a la gran ventaja de los radares pasivos [10].

En Francia, la empresa Communication et Téléphonie desarrolló el sistema Occiu, precursor del HA100 de Thales, un radar pasivo con 100 km de alcance [11].

Los avances en digitalización de señales RF y software mejoraron el procesamiento de datos, facilitando la aplicación del radar pasivo [6].

2.1.3 Principio básico de funcionamiento

En un radar pasivo se explota el uso de iluminadores de oportunidad. Como a priori estas señales no son conocidas por el receptor, se tiene que medir tanto la señal directa que proviene del transmisor como la reflejada en el objetivo a detectar. El radar entonces se encarga de preprocesar las dos señales, correlacionarlas y detectar al objetivo. La geometría básica del principio de operación se puede observar en la Figura 2-1.

El receptor del radar mide la diferencia de tiempo de llegada o TDOA (*time difference of arrival*) entre la señal directa y el eco reflejado. Esta diferencia en el tiempo de propagación se debe a que la señal reflejada sigue una trayectoria más larga que la señal directa. La distancia biestática es calculada con el TDOA considerando la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. La correlación cruzada entre la señal directa y la reflejada da como resultado la matriz de rango Doppler. Diferentes réplicas del Doppler modulado de la señal directa son correlacionadas con la señal reflejada y por consiguiente el radar pasivo es capaz de estimar la frecuencia Doppler biestática. Una medida de distancia biestática sitúa al objetivo en un elipsoide cuyos focos son el transmisor y el receptor como se puede observar en la Figura 2-3.

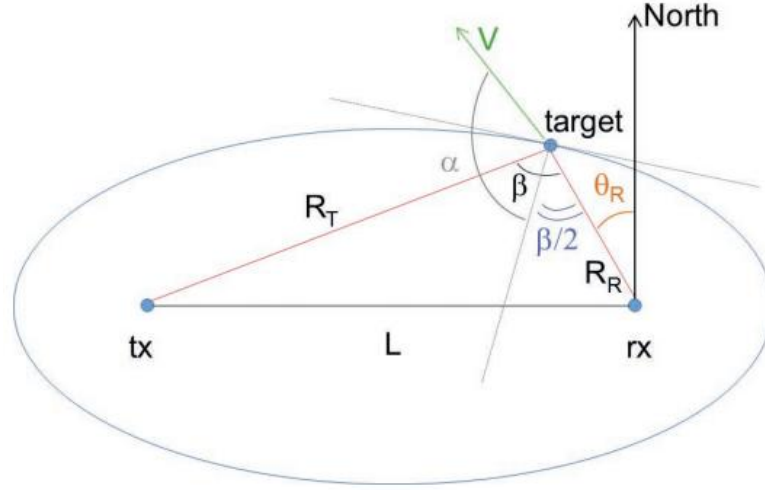


Figura 2-3: Esquema de geometría biestática básica [6].

Para entender esta geometría se definen los siguientes elementos:

- Línea Base (L): es la distancia directa entre el transmisor y el receptor.
- R_T : distancia desde el transmisor hasta el objetivo.
- R_R : distancia desde el objetivo hasta el receptor.
- Ángulo Biestático (β): ángulo formado entre el transmisor y el receptor con vértice en el objetivo.
- Distancia biestática (R_{bist}): distancia efectiva medida por el radar pasivo.

El blanco se puede encontrar en cualquier punto de la elipse. En base a la Figura 2-3 se puede observar la distancia entre transmisor, receptor y blanco. La distancia biestática es calculada como:

$$R_{bist} = R_T + R_R - L \quad 1$$

$$R_R = \frac{R_{bist} - L^2}{2(R_{bist} - L \cdot \cos(\beta))} \quad 2$$

La localización precisa de los objetivos en un espacio cartesiano local implica el uso conjunto de medidas de rango biestático y el ángulo de llegada o DOA (*direction of arrival*). Cuando se dispone de un único satélite transmisor, la localización del objetivo se realiza mediante la intersección del elipsoide con el cono determinado por el ángulo de llegada estimado. Alternativamente, en configuraciones multiestáticas que emplean múltiples satélites simultáneamente, se utiliza la técnica de multilateración basada en el cálculo de intersecciones de múltiples elipsoides generados por cada par transmisor-receptor [6].

Una limitación significativa del radar pasivo basado en GNSS es la interferencia directa del camino o DPI (*direct path interference*), causada por la señal directa del satélite, que tiene una potencia considerablemente superior a las señales reflejadas por los objetivos. Esta interferencia, altamente correlacionada con la señal de referencia, debe mitigarse mediante técnicas avanzadas de filtrado adaptativo y espacial para posibilitar la detección efectiva de objetivos.

Dado que las señales GNSS presentan baja potencia y múltiples señales simultáneas debido al esquema CDMA (2.2.4), es fundamental reconstruir la señal transmitida por el satélite. Esto implica un proceso de detección y seguimiento del código pseudoaleatorio (2.2.3), lo cual permite separar las señales provenientes de distintos satélites y reconstruir la señal de referencia necesaria para la correlación posterior.

Existen múltiples soluciones al problema del cálculo del ángulo de llegada como el *beam scanning*, métodos de superresolución [12], o algunos más simples como técnicas de *beamforming* asumiendo la dirección angular del objetivo [13].

2.1.4 Doppler

El efecto Doppler es un aparente cambio de frecuencia en una onda, producida cuando el foco de ésta tiene movimiento relativo al receptor [14]. En el caso de las señales satelitales se refiere al cambio aparente en la frecuencia de una onda electromagnética debido al movimiento relativo entre el satélite emisor y el receptor en la Tierra. Este fenómeno es crucial, ya que afecta la precisión y el procesamiento de las señales recibidas. La frecuencia Doppler se expresa como:

$$f_d = f_0 \left[1 + \frac{2 \cdot v}{c} \right] \quad 3$$

donde:

- f_d : es la frecuencia Doppler.
- f_0 : es la frecuencia original de la señal.
- v : es la velocidad relativa del objeto.
- c : es la velocidad de la luz.

En radares pasivos basados en señales GNSS, se necesita una reconstrucción precisa de la señal directa para poder detectar el blanco por correlación cruzada con la señal reflejada. El efecto Doppler provoca una variación dinámica en la frecuencia del satélite que requiere un seguimiento continuo para reconstruir con precisión la señal de referencia [15].

El desplazamiento Doppler es fundamental para separar los ecos de los blancos respecto de la señal directa, especialmente cuando estos ecos son débiles. Debido a las diferencias de velocidad entre el blanco y el satélite, cada blanco generará una firma Doppler específica. Esto facilita la detección y permite distinguir blancos en diferentes velocidades relativas respecto al receptor.

La técnica principal para detectar blancos en radares pasivos GNSS es mediante la generación de la función de ambigüedad cruzada (CAF, *Cross Ambiguity Function*). Esta función se obtiene por la correlación entre la señal de referencia reconstruida y la señal de vigilancia. Debido al Doppler, los blancos aparecen en diferentes posiciones dentro del mapa Rango-Doppler, según sus velocidades relativas y geometrías biestáticas.

2.1.5 Doppler biestático

El Doppler biestático se define como la distancia biestática en función del tiempo normalizada por la longitud de onda de la portadora [8] y se calcula como:

$$f_{bist} = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{d}{dt} R_{bist(t)} \right] = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{d}{dt} R_{T(t)} + \frac{d}{dt} R_{R(t)} \right] \quad 4$$

siendo λ la longitud de onda o $\frac{1}{f_0}$.

Como se puede ver, el Doppler biestático depende del movimiento relativo entre el transmisor y el objetivo, y del relativo entre el receptor y el objetivo [6].

2.1.6 Ecuación del radar biestático.

La ecuación del radar biestático establece la base para analizar el rendimiento en la detección de un sistema radar pasivo. Esta ecuación permite calcular la relación señal a ruido (SNR, *signal to noise ratio*) esperada en función de la posición del objetivo, su RCS y las características del transmisor y el receptor, como la potencia emitida y los diagramas de las antenas. Además, facilita la estimación del alcance máximo de detección del sistema radar, considerando los niveles deseados de probabilidad de detección y de falsa alarma[16]. La ecuación de máximo alcance del radar biestático se expresa como:

$$(R_T R_R)_{max} = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma_b F_T^2 F_R^2}{(4\pi)^3 K T_s B_n (S/N)_{min} L_T L_R}} \quad 5$$

donde:

- $(R_T R_R)_{max}$: producto de rango biestático máximo.
- P_T : potencia del transmisor.
- G_T : ganancia del transmisor.
- G_R : ganancia del receptor.
- λ : longitud de onda.
- σ_b : sección transversal radar (RCS).
- F_T : factor de propagación del transmisor al blanco.
- F_R : factor de propagación del blanco al receptor.
- K : constante de Boltzmann.
- T_s : ruido por temperatura del sistema receptor.
- B_n : ancho de banda del ruido del filtro del receptor.
- $(S/N)_{min}$: relación señal-ruido mínima para detección.
- L_T : pérdidas de transmisión.
- L_R : pérdidas de detección.

2.2 GNSS

El Sistema Global de Navegación por Satélite es un término general que engloba a todas las constelaciones de satélites que proporcionan servicios de posicionamiento, navegación y sincronización a nivel global o regional. Estos sistemas permiten a los receptores GNSS calcular su posición en la Tierra mediante la recepción de señales de múltiples satélites [17].

Actualmente, existen varios sistemas GNSS operativos a nivel global, obsérvense las constelaciones principales en la Figura 2-4. GPS, desarrollado y operado por Estados Unidos, es el más utilizado en todo el mundo. GLONASS, gestionado por Rusia, ofrece una cobertura similar [18]. BeiDou, de China, alcanzó cobertura global en 2020 con una constelación de 35 satélites [19]. Por su parte, Galileo, operado por la Unión Europea, comenzó a funcionar en 2016 y tiene 27 satélites operativos en la actualidad [20]. Además de estos sistemas globales, existen opciones regionales que mejoran la precisión y cobertura en

áreas específicas, como NavIC, que opera en la India y sus alrededores, y QZSS, gestionado por Japón, que complementa al GPS en Asia Oriental y Oceanía.

Los sistemas GNSS tienen aplicaciones en diversos sectores. En navegación, facilitan el posicionamiento de vehículos terrestres, marítimos y aéreos. En agricultura de precisión, optimizan la siembra y cosecha. También son clave en geodesia y topografía, permitiendo mediciones detalladas de la superficie terrestre. En telecomunicaciones, garantizan la sincronización de redes, y en gestión de emergencias, ayudan en operaciones de búsqueda y rescate. La combinación de múltiples sistemas GNSS mejora la precisión, disponibilidad y confiabilidad de los servicios de geolocalización en todo el mundo [21].

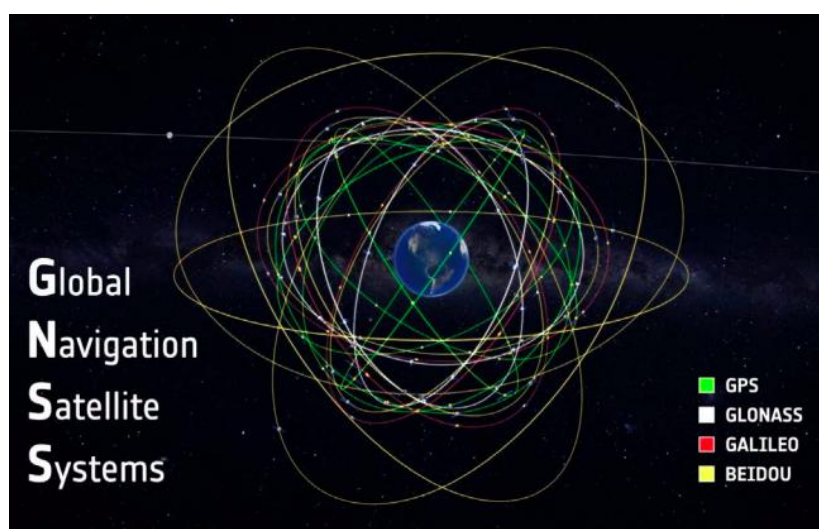


Figura 2-4 Representación del sistema GNSS, incluyendo las 4 constelaciones disponibles: GPS, GLONASS, Galileo y Beidou/Compass [22].

2.2.1 Justificación del uso de GNSS

El uso de GNSS como iluminador de oportunidad es una opción atractiva para la vigilancia aérea, marítima y terrestre, si bien en este trabajo se estudiará su viabilidad en el entorno marítimo. En comparación a otras fuentes de iluminación como radio FM, DVB-T y redes móviles, presenta una serie de ventajas que permiten mejorar la cobertura, precisión y fiabilidad del sistema.

GNSS proporciona una cobertura global, en cualquier momento cada una de las constelaciones GNSS garantiza que al menos 4 satélites estén iluminando cualquier punto de la tierra que se considere desde distintos ángulos. Cobertura que aumenta a 9 satélites si se tienen en cuenta GPS, GLONASS y Galileo [23].

Lo más relevante es que todas estas señales pueden ser captadas por un solo receptor y, debido a sus bajos niveles de potencia, pueden separarse en el procesamiento de señales sin necesidad de aplicar medidas para reducir interferencias que la señal pueda generar al alcanzar directamente el receptor, algo que sí es necesario en la mayoría de los radares pasivos. Esto es posible porque cada constelación GNSS utiliza un esquema de acceso múltiple generalmente basado en CDMA o FDMA (*frequency division multiple access*), lo que permite distinguir la señal de cada satélite. Esta característica es la que hace que los sistemas GNSS puedan considerarse como radares multiestáticos, ya que cuentan con múltiples transmisores distribuidos espacialmente y un único receptor. Esta configuración es ventajosa para la teledetección, pues se ha demostrado que la diversidad espacial de los transmisores mejora significativamente la resolución espacial en imágenes SAR basadas en GNSS[24].

Las señales GNSS permiten realizar cálculos de rango y Doppler con alta precisión, lo que facilita la identificación de objetivos en movimiento como UAVs (*unmanned aerial vehicles*), embarcaciones y aeronaves furtivas. Experimentos realizados en China han demostrado que, con satélites BeiDou, se

pueden proporcionar imágenes de radar pasivo con resolución suficiente para detectar y rastrear embarcaciones en entornos marítimos [25].

En dicho trabajo, se obtienen imágenes de objetivos marítimos con éxito usando tres satélites de la constelación BeiDou. En la Figura 2-5 se observa que el objetivo se diferencia claramente del ruido, así ofreciendo una detección fiable y demostrando la efectividad de este tipo de radares [25].

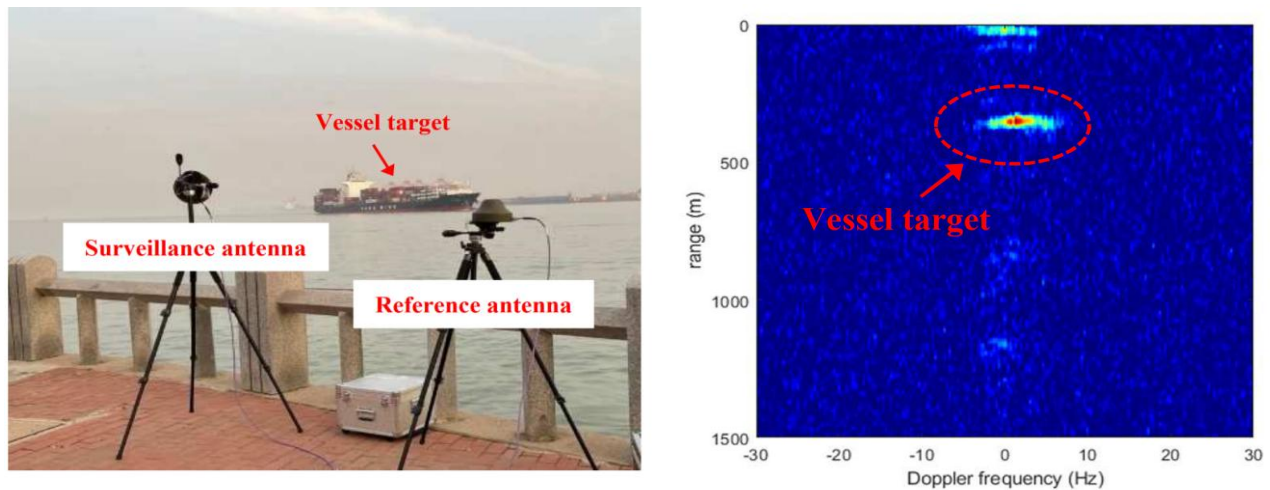


Figura 2-5 Configuración del experimento realizado en china y resultados obtenidos [19].

Otra ventaja clave es la capacidad de integración de múltiples señales. A diferencia de algunos iluminadores terrestres, el uso de GNSS permite aprovechar simultáneamente varios satélites, lo que aumenta la calidad de la señal recibida y mejora el procesamiento de imágenes de radar. Además, se han desarrollado algoritmos de integración a largo plazo que optimizan la relación señal-ruido y maximizan la detección de objetivos en entornos de baja señal.

El uso de GNSS también se traduce en una menor vulnerabilidad a interferencias naturales y humanas. Al emplear códigos pseudoaleatorios o PRN (*pseudo random noise*), es posible filtrar el ruido de fondo y mejorar la detección de blancos en comparación con fuentes como radio FM y DVB-T, que son más susceptibles a interferencias electromagnéticas y congestión del espectro [25].

A pesar de estas ventajas, el uso de GNSS en radar pasivo también enfrenta desafíos que deben resolverse para optimizar su desempeño. En [24], se menciona que la densidad de potencia de las señales GNSS es extremadamente baja cuando llegan a la superficie terrestre, debido a la distancia a la que se encuentran los satélites (aproximadamente 20.000 km para GPS y 35.786 km para satélites geoestacionarios) y las limitaciones en la potencia de transmisión. En estos casos la densidad de potencia recibida puede ser del orden de -135 dBW/m², lo que dificulta la detección e imagen de objetivos. Esta densidad de potencia tan baja reduce el rango de detección en comparación con fuentes de iluminación terrestres como DVB-T o radio FM, que operan con señales más fuertes y cercanas a la superficie.

Para afrontar este problema existen estudios que proponen esquemas de procesamiento digital avanzados, como *beamforming* y filtro adaptativo, que mejoran la detección de objetivos mediante la ampliación selectiva de señales útiles y supresión de ruido [26].

2.2.2 Funcionamiento GPS

Aunque todos los sistemas GNSS operan de manera similar, el presente trabajo se centrará en el sistema estadounidense *Global Positioning System* (GPS) [27].

El funcionamiento de estos sistemas se basa en la medición de distancias entre los satélites de la constelación y el receptor, utilizando el método de trilateración. La trilateración es un procedimiento que permite determinar la posición de un punto en la superficie terrestre a partir de la medición de distancias con respecto a tres puntos de referencia conocidos [28].

Los satélites emiten radioseñales con una frecuencia portadora primaria L1 (1575.42 MHz), L2(1227.60 MHz) y L5 (1176.45 MHz) [27]. Conociendo el tiempo que tarda la señal en llegar al receptor, es posible calcular la distancia entre ambos. A partir de esta distancia, se genera una esfera centrada en el satélite, cuyo radio es la distancia calculada, como se muestra en la Figura 2-6. Cuando se utilizan señales de tres satélites, las esferas correspondientes se intersecan en dos puntos, uno de los cuales generalmente se encuentra fuera de la Tierra [29]. Esta intersección se puede observar en la Figura 2-7.

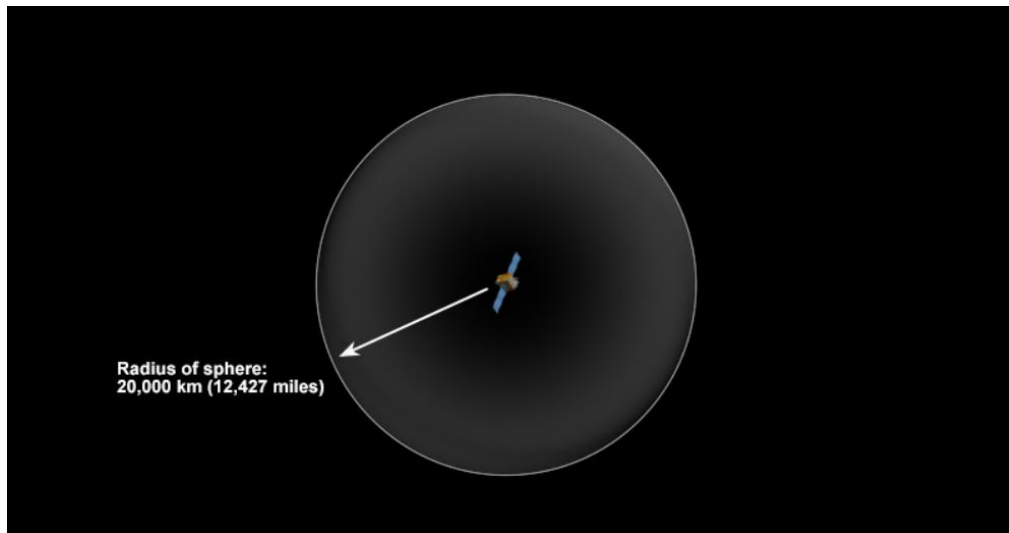


Figura 2-6 Esfera centrada en un satélite que define la posición del receptor en la superficie [30].

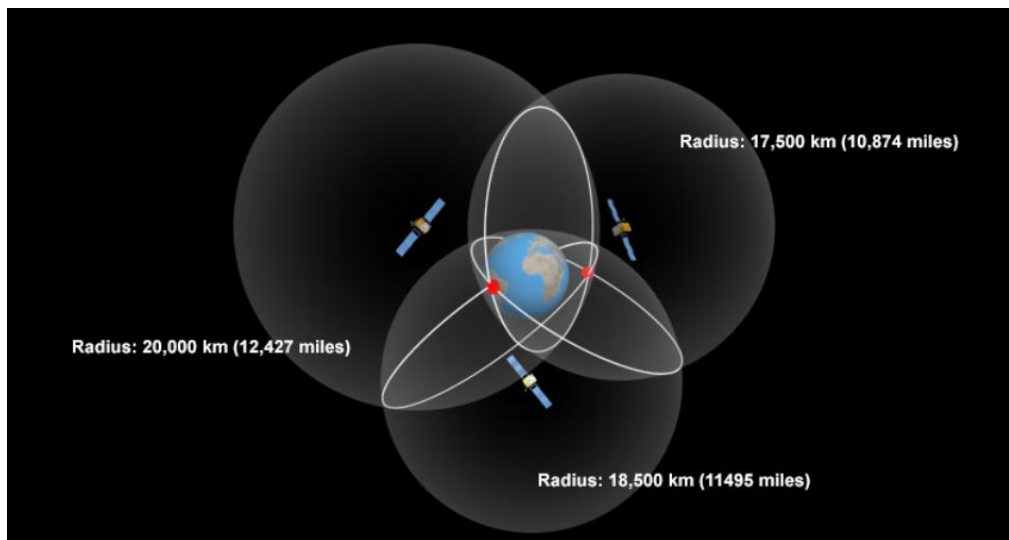


Figura 2-7 Intersección de tres esferas [30].

Para que la trilateración sea efectiva, el receptor debe conocer la posición exacta de cada satélite en el momento en que se emitió la señal. Según, los satélites transmiten un mensaje de navegación como el de la Figura 2-8, el cual contiene información que permite identificar al satélite y determinar su posición aproximada. Este mensaje incluye, entre otros datos, la efeméride (parámetros orbitales del satélite), información sobre la hora del satélite y su estado actual [31].

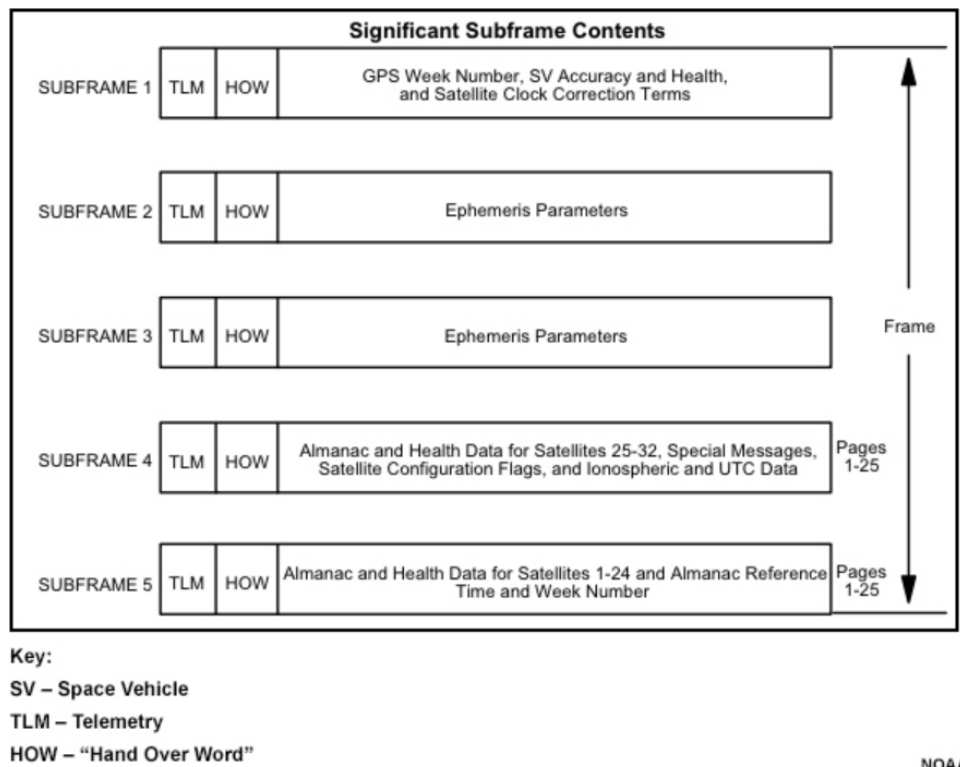


Figura 2-8 Formato del mensaje de navegación de un satélite GPS [32]

El receptor identifica de qué satélite proviene la señal gracias a unos códigos llamados códigos de ruido pseudoaleatorio. Estos códigos juegan un papel fundamental en el funcionamiento del sistema GPS y se explicarán en detalle en secciones posteriores.

Para calcular correctamente la posición del receptor, se necesitan al menos tres satélites. Sin embargo, en la práctica se requiere un cuarto satélite para corregir los errores de sincronización del reloj del receptor. Según [33], los relojes de los receptores GPS comerciales no cuentan con la precisión de los relojes atómicos de los satélites, lo que introduce errores en los cálculos de distancia.

La solución a este problema es la incorporación de un cuarto satélite, que permite calcular y corregir la diferencia en el tiempo del reloj del receptor. Este proceso se conoce como solución de tiempo y posición, y es fundamental para garantizar mediciones precisas en aplicaciones de navegación, cartografía y posicionamiento en tiempo real [34].

2.2.3 PRN

Los códigos de ruido pseudoaleatorio (PRN) son secuencias binarias determinísticas que, aunque generadas mediante algoritmos específicos, presentan propiedades similares al ruido aleatorio. En el contexto del Sistema de Posicionamiento Global, cada satélite emite un código PRN único, lo que permite a los receptores identificar y distinguir las señales de diferentes satélites.

Los códigos PRN se generan utilizando Registros de Desplazamiento con Retroalimentación Lineal (LFSR, *linear feedback shift register*). Un LFSR es una secuencia de registros de bits donde la siguiente salida depende de una combinación lineal de los valores actuales [35].

El Código de Adquisición Gruesa (C/A, *coarse acquisition*) es el tipo de secuencia pseudoaleatoria utilizada en GPS. Es un código del tipo Gold, que se genera mediante la combinación de dos secuencias pseudoaleatorias obtenidas de registros de desplazamiento de 10 bits, como se muestra en la Figura 2-9.

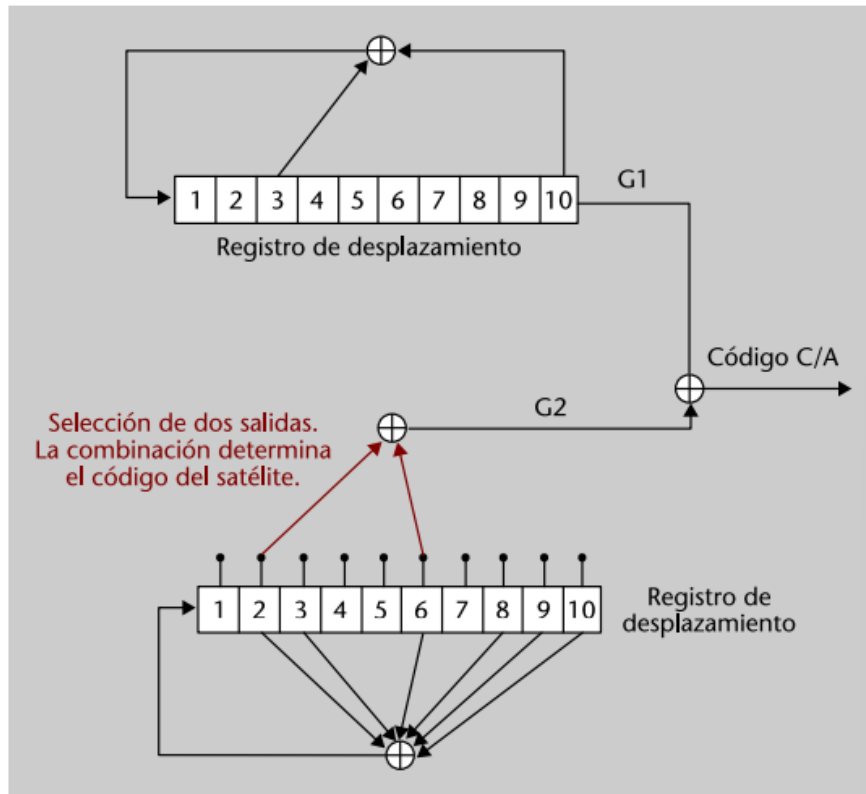


Figura 2-9 Esquema de generación de un código C/A [35].

El código C/A se repite cada 1 milisegundo y está compuesto por 1023 bits, lo que significa que se transmite a una velocidad de 1.023 Mb/s. Su generación se basa en dos registros de desplazamiento (LFSR) que producen secuencias pseudoaleatorias.

Cada uno de estos polinomios define cómo los bits dentro de los registros se desplazan y se combinan para generar la secuencia de salida. Los registros de desplazamiento G1 y G2 operan con polinomios primitivos [36]. Se puede entender mejor el funcionamiento de estos polinomios en la Figura 2-10 y Figura 2-11. Adicionalmente se adjunta en los anexos la explicación matemática de cómo se generan los códigos PRN.

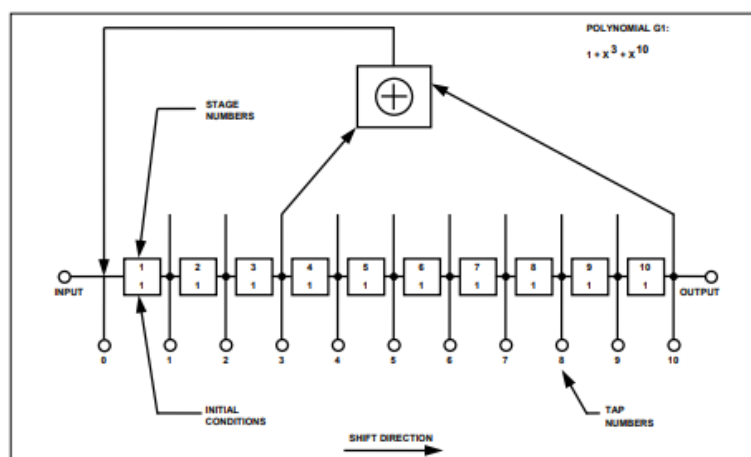


Figura 2-10 Configuración del Generador de Registro de Desplazamiento G1 [36].

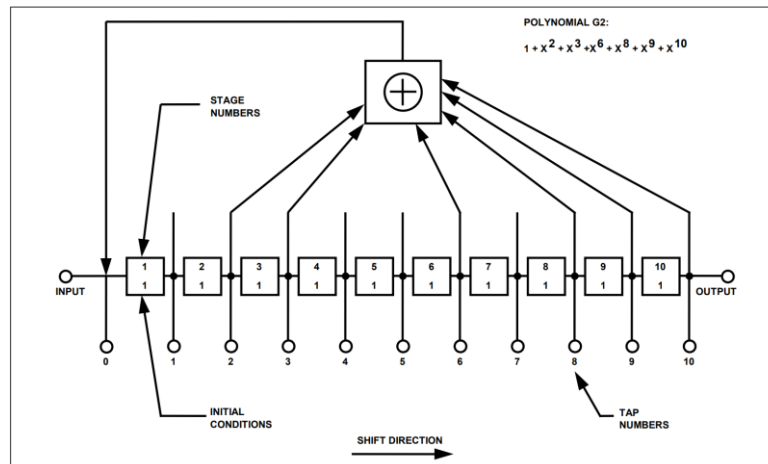


Figura 2-11 Configuración del Generador de Registro de Desplazamiento G2 [36].

La Figura 2-12 y Figura 2-13 muestran los valores oficiales de desplazamiento G2 asignados a cada satélite GPS. Estos valores han sido extraídos directamente de la versión más reciente del documento IS-GPS-200N, disponible en el sitio web oficial del GPS [36] y son los que se usan en Matlab para obtener la correlación de cada satélite.

SV ID No.	GPS PRN Signal No.	Code Phase Selection		Code Delay Chips		First 10 Chips Octal* C/A	First 12 Chips Octal P
		C/A(G2)**	(X2 _i)	C/A	P		
1	1	2 ⊕ 6	1	5	1	1440	4444
2	2	3 ⊕ 7	2	6	2	1620	4000
3	3	4 ⊕ 8	3	7	3	1710	4222
4	4	5 ⊕ 9	4	8	4	1744	4333
5	5	1 ⊕ 9	5	17	5	1133	4377
6	6	2 ⊕ 10	6	18	6	1455	4355
7	7	1 ⊕ 8	7	139	7	1131	4344
8	8	2 ⊕ 9	8	140	8	1454	4340
9	9	3 ⊕ 10	9	141	9	1626	4342
10	10	2 ⊕ 3	10	251	10	1504	4343
11	11	3 ⊕ 4	11	252	11	1642	
12	12	5 ⊕ 6	12	254	12	1750	
13	13	6 ⊕ 7	13	255	13	1764	
14	14	7 ⊕ 8	14	256	14	1772	
15	15	8 ⊕ 9	15	257	15	1775	
16	16	9 ⊕ 10	16	258	16	1776	
17	17	1 ⊕ 4	17	469	17	1156	
18	18	2 ⊕ 5	18	470	18	1467	
19	19	3 ⊕ 6	19	471	19	1633	4343

* In the octal notation for the first 10 chips of the C/A code as shown in this column, the first digit (1) represents a "1" for the first chip and the last three digits are the conventional octal representation of the remaining 9 chips. (For example, the first 10 chips of the C/A code for PRN Signal Assembly No. 1 are: 1100100000).

** The two-tap coder utilized here is only an example implementation that generates a limited set of valid C/A codes.

⊕ = "exclusive or"

NOTE #1: The code phase assignments constitute inseparable pairs, each consisting of a specific C/A and a specific P-code phase, as shown above.

Figura 2-12 Asignaciones de desplazamiento (1/2).

SV ID No.	GPS PRN Signal No.	Code Phase Selection		Code Delay Chips		First 10 Chips Octal* C/A	First 12 Chips Octal P
		C/A(G2)****	(X2 _i)	C/A	P		
20	20	4 ⊕ 7	20	472	20	1715	4343
21	21	5 ⊕ 8	21	473	21	1746	
22	22	6 ⊕ 9	22	474	22	1763	
23	23	1 ⊕ 3	23	509	23	1063	
24	24	4 ⊕ 6	24	512	24	1706	
25	25	5 ⊕ 7	25	513	25	1743	
26	26	6 ⊕ 8	26	514	26	1761	
27	27	7 ⊕ 9	27	515	27	1770	
28	28	8 ⊕ 10	28	516	28	1774	
29	29	1 ⊕ 6	29	859	29	1127	
30	30	2 ⊕ 7	30	860	30	1453	
31	31	3 ⊕ 8	31	861	31	1625	
32	32	4 ⊕ 9	32	862	32	1712	
33	33***	5 ⊕ 10	33	863	33	1745	
34	34***	4 ⊕ 10	34	950	34	1713	
35	35	1 ⊕ 7	35	947	35	1134	
36	36	2 ⊕ 8	36	948	36	1456	
37	37**	4 ⊕ 10	37	950	37	1713	4343

* In the octal notation for the first 10 chips of the C/A-code as shown in this column, the first digit (1) represents a "1" for the first chip and the last three digits are the conventional octal representation of the remaining 9 chips. (For example, the first 10 chips of the C/A-code for PRN Signal Assembly No. 1 are: 1100100000).

** C/A-codes 34 and 37 are identical.

*** PRN sequence 33 is reserved for other uses (e.g. ground transmitters).

**** The two-tap coder utilized here is only an example implementation that generates a limited set of valid C/A-codes.

⊕ = "exclusive or"

NOTE #1: The code phase assignments constitute inseparable pairs, each consisting of a specific C/A and a specific P-code phase, as shown above.

Figura 2-13 Asignaciones de desplazamiento (2/2).

Los códigos PRN generados mediante esta configuración tienen propiedades clave. Debido a que su período es de 1023 bits cada secuencia se repite exactamente cada 1 milisegundo (ms). Esta repetición cíclica facilita la correlación en el receptor GPS, permitiendo una adquisición rápida de la señal. Esta estructura permite que el receptor compare continuamente la señal recibida con una versión interna del código PRN, identificando el desfase y calculando la distancia al satélite [37].

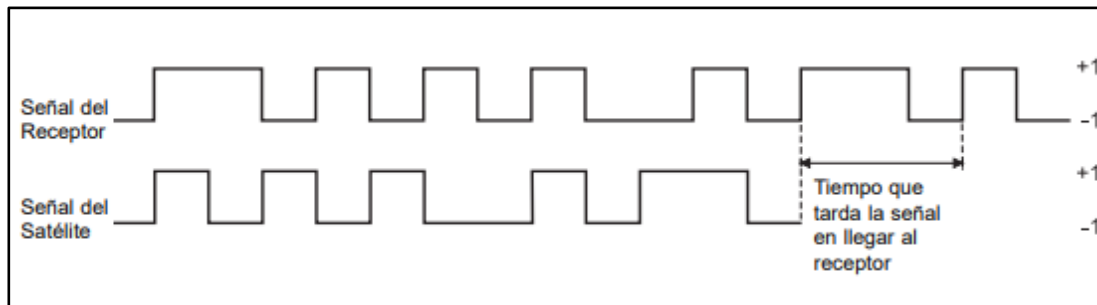


Figura 2-14 Cálculo de retardo de la señal GPS [37].

Además, los códigos PRN presentan una alta autocorrelación, lo que significa que la señal solo coincide consigo misma cuando está perfectamente alineada en el tiempo. Esta propiedad es esencial para la detección y sincronización de la señal en entornos con ruido. Asimismo, estos códigos tienen una baja correlación cruzada, es decir, la interferencia entre códigos de diferentes satélites es mínima.

Otra propiedad relevante es la facilidad de sincronización. Debido a su corta longitud y su repetición cada 1 ms, los receptores GPS pueden adquirir y sincronizar la señal rápidamente. Esta característica es de vital importancia en aplicaciones en tiempo real, pues permite determinar precisa y velozmente la posición sin necesidad de secuencias de gran tamaño. La estructura de los códigos PRN facilita una correlación eficiente, lo que es esencial para la rápida adquisición de la señal en los receptores GPS [37].

2.2.4 Acceso múltiple por división de código (CDMA)

El Acceso Múltiple por División de Código o CDMA (*code division multiple access*) es una técnica esencial en los sistemas de navegación por satélite, ya que permite la coexistencia de múltiples transmisiones en la misma frecuencia sin interferencias notables. Esto es posible gracias a que cada usuario transmite su información usando un código único y específico, previamente conocido tanto por el transmisor como por el receptor. Según un estudio de la NASA (2019), [38], el CDMA es una de las técnicas más eficientes para gestionar el espectro de señales en sistemas de radionavegación, ya que emplea códigos de ruido pseudoaleatorio para asignar identificaciones únicas a cada satélite, permitiendo que los receptores diferencien y procesen cada una de estas señales.

El CDMA se basa en la multiplexación por código, donde cada satélite transmite utilizando un código PRN exclusivo. Este método permite la transmisión simultánea de señales en la misma frecuencia sin interferencias significativas. CDMA facilita la discriminación de señales de diferentes satélites sin necesidad de asignar frecuencias distintas, lo que optimiza el uso del espectro y mejora la eficiencia en la transmisión de datos [39].

Matemáticamente, la señal transmitida por un satélite i en un sistema CDMA se representa mediante la siguiente ecuación:

$$S_i(t) = A_i d_i(t) C_i(t) \cos(2\pi f_c t + \theta_i) \quad 6$$

donde:

- A_i es la amplitud de la señal del satélite i .
- $d_i(t)$ representa los datos de navegación transmitidos.
- $C_i(t)$ es el código PRN del satélite i .
- f_c es la frecuencia portadora.

- θ_i es la fase de la señal.

El receptor GPS recibe una superposición de señales de múltiples satélites con ruido de fondo. Para extraer la información de un satélite en particular, el receptor realiza una correlación cruzada con una réplica del código PRN del satélite objetivo:

$$R_i(\tau) = \int_0^T r(t)C_i(t - \tau)dt \quad 7$$

donde:

- $R_i(\tau)$ es el resultado de la correlación entre la señal recibida $r(t)$ y una réplica local del código PRN.
- $r(t)$ es señal recibida, que incluye las señales de múltiples satélites, ruido y posibles interferencias.
- $C_i(t - \tau)$ es el código PRN del satélite i , desplazado por un tiempo τ , el cual el receptor usa como referencia.
- τ representa el retardo temporal que se aplica al código PRN en el receptor para alinear la señal recibida con su referencia.
- T es el intervalo de integración, el tiempo durante el cual se realiza la operación de correlación.

El receptor GPS calcula esta integral para determinar el nivel de coincidencia entre la señal recibida $r(t)$ y el código PRN almacenado. Si la correlación es alta, significa que la señal de ese satélite está presente en $r(t)$ y que el retardo τ es un estimador del tiempo de propagación de la señal desde el satélite al receptor. Con este tiempo se calcula la pseudodistancia, que es clave para determinar la posición del receptor [15].

El uso de CDMA en GNSS presenta diversas ventajas. En primer lugar, permite que varios satélites operen en la misma frecuencia sin generar interferencias significativas, lo que optimiza la utilización del espectro radioeléctrico. Además, debido a la baja correlación cruzada entre los códigos PRN, se minimizan las interferencias entre señales de distintos satélites, mejorando la precisión del sistema.

Otro beneficio clave del CDMA es su alta resistencia a interferencias y ataques de *jamming*, ya que la estructura pseudoaleatoria de los códigos PRN dificulta la detección y perturbación intencionada de las señales GNSS. Asimismo, la redundancia presente en las señales CDMA permite la recuperación de datos incluso en condiciones adversas, garantizando un nivel de fiabilidad elevado en entornos operacionales difíciles [17].

A pesar de sus ventajas, el CDMA también enfrenta ciertos desafíos. Uno de los principales es el problema "cerca-lejos", el cual se produce cuando una señal de un satélite cercano es significativamente más fuerte que la de un satélite más distante. Esto puede dificultar la recepción de señales más débiles y afectar la precisión del receptor. Para mitigar este problema, se implementan ajustes dinámicos en la ganancia del receptor y se utilizan algoritmos avanzados de filtrado y cancelación de interferencias [15].

Otro desafío importante radica en la sincronización y procesamiento de señales en entornos con alta densidad de satélites y usuarios. La necesidad de mantener una correlación eficiente entre la señal recibida y la réplica del código PRN almacenado en el receptor puede incrementar la carga computacional y los requerimientos de hardware. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías avanzadas ha permitido optimizar estos procesos, reduciendo la latencia y mejorando la eficiencia del sistema GNSS [39].

2.3 Procesado de señales

Las señales que recibe un radar pasivo están compuestas por la señal directa, las reflexiones de objetos en movimiento, las reflexiones de objetos estáticos y el ruido. Para poder distinguir el objetivo en movimiento de las reflexiones no deseadas de objetos estacionarios, se realiza un procesamiento por

etapas que permite finalmente generar la trayectoria del objetivo. Este proceso incluye la correlación cruzada entre la señal directa y las señales de eco, que se describe mediante la función de ambigüedad. Posteriormente, se emplean esquemas de detección que separan los ecos del objetivo del ruido, y finalmente se lleva a cabo el seguimiento de las detecciones, primero en el dominio rango-Doppler y luego en el dominio cartesiano [40]. Normalmente el procesamiento de señales de un sistema de radar pasivo sigue el siguiente esquema:

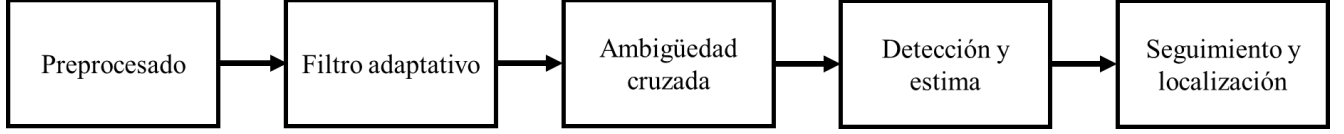


Figura 2-15 Diagrama de bloques del procesamiento de una señal en radar pasivo.

2.3.1 Preprocesado

El objetivo principal del preprocesado es mejorar la calidad de la señal antes de las etapas posteriores de análisis. Esta fase incluye operaciones como el filtrado preliminar, diezmado y la formación de haces digitales (*digital beamforming*)[41].

2.3.2 Filtro adaptativo

Uno de los mayores desafíos en sistemas de radar pasivo es la amplia dinámica del entorno. Las señales de eco útiles suelen ser muy débiles y están enmascaradas por la potente señal directa y el ruido ambiental (*clutter*). El filtrado adaptativo permite mejorar el rango dinámico del radar mediante la supresión de la señal directa y el *clutter*. Esta operación es posible gracias a que los componentes no deseados suelen ser estacionarios o variar lentamente en el tiempo, mientras que los objetivos móviles introducen un desplazamiento Doppler considerable en el eco. Esta diferencia permite que el filtro adaptativo distinga entre las señales de interés y las interferencias [6] [40] [42].

2.3.3 Función de ambigüedad cruzada/Correlación cruzada

La correlación cruzada mide la similitud entre la señal directa y la señal reflejada [6]. La función de ambigüedad cruzada es el equivalente en radar pasivo al filtrado adaptado combinado con el procesamiento Doppler [6] [40] [42]. Esta operación se define mediante la siguiente expresión:

$$X(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{vig}(t) S_{ref}^*(t - \tau) e^{-j2\pi f_d t} dt \quad 8$$

donde:

- $S_{vig}(t)$: es la envolvente compleja de la señal recibida en el canal de vigilancia.
- $S_{ref}(t)$: es una réplica (limpia) de la señal transmitida.
- τ : es el posible TDOA del eco del objetivo.
- f_d : es el posible desplazamiento Doppler biestático.
- S^* : denota el conjugado complejo de S .

Dado que las señales de oportunidad de los satélites suelen tener baja robustez Doppler, la señal de eco se correlaciona con múltiples versiones desplazadas en frecuencia de la señal de referencia. Esto genera un banco de filtros de compresión en rango, cada uno diseñado para detectar un posible desplazamiento Doppler, lo que permite estimar de forma precisa tanto el alcance biestático como el desplazamiento Doppler. En el procesamiento digital, la función de ambigüedad se aproxima mediante la suma discreta de N muestras:

$$X(\tau, f_d) = \sum_{n=0}^{N-1} S_{vig}(nT_s) S_{ref}^*(nT_s - \tau) e^{-j2\pi f_d nT_s/N} \quad 9$$

donde T_s es el intervalo de muestreo. Para optimizar el cálculo, esta correlación se implementa frecuentemente en el dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), conocida como el "Algoritmo de Correlación FFT". Este método transforma la correlación en una multiplicación en el dominio de la frecuencia:

$$X(\tau, f_d) = IDFT \{S_{vig, f_d}[k] S_{ref}^*[k]\} \quad 10$$

donde las transformadas de Fourier de las señales de vigilancia y referencia solo se requieren calcular una vez para todas las líneas Doppler, optimizando así la eficiencia computacional.

2.3.4 Detección y estima

La detección de objetivos se realiza tras calcular la función de ambigüedad cruzada, normalmente utilizando técnicas como el detector CFAR (*Constant False Alarm Rate*). La estimación de parámetros como el alcance biestático, la velocidad del objetivo y, en algunos casos, el ángulo de elevación y azimut se realiza en esta etapa.

La dimensión del objetivo en el mapa de retardo/Doppler depende tanto del tamaño físico del blanco como de la resolución del radar en rango y Doppler [41].

2.3.5 Seguimiento y localización

El seguimiento se realiza en dos etapas. Primero, en el dominio de retardo/Doppler para reducir las falsas alarmas, y posteriormente en el dominio cartesiano para localizar geográficamente el objetivo y suavizar la trayectoria.

El seguimiento en retardo/Doppler emplea algoritmos como el filtro de Kalman, que gestiona detecciones obtenidas tras el proceso de agrupación.

3 DESARROLLO DEL TFG

Tras haber elegido los satélites GNSS, concretamente GPS, como iluminadores de oportunidad debido a las ventajas anteriormente expuestas en el ámbito de aplicación que se quiere estudiar. En el presente apartado se expondrá el escenario de trabajo para el radar pasivo, los recursos utilizados, y una breve descripción del código propuesto para el procesado y detección de blancos.

3.1 Escenario del radar pasivo

Como ya se ha explicado previamente, a diferencia de los radares activos, que emiten su propia señal, el radar pasivo aprovecha fuentes de radiación ya existentes. El objetivo del sistema es detectar y rastrear objetivos en un entorno determinado, analizando las señales reflejadas desde los iluminadores de oportunidad.

El dispositivo propuesto cuenta con dos canales: el canal de referencia, que recibe directamente la señal GNSS de los satélites y sirve como base para el procesamiento, y el canal de vigilancia, que capta la señal GNSS reflejada en los objetivos. Comparando ambas señales, se puede determinar la posición de blanco mediante diferencias en el tiempo de llegada y el efecto Doppler, permitiendo su detección sin necesidad de emisión activa.

Las medidas se han llevado a cabo en un entorno marítimo en la Ría de Pontevedra, concretamente en la Escuela Naval Militar situada en Marín.

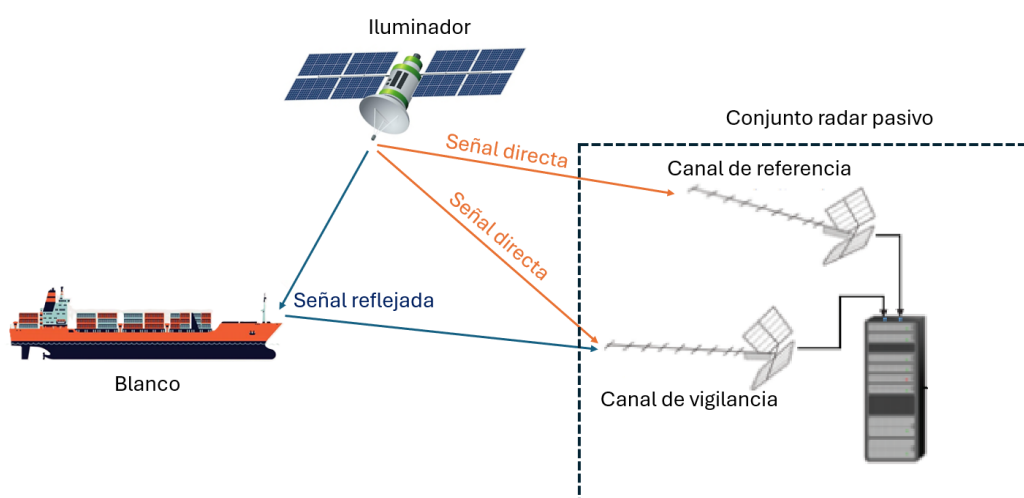


Figura 3-1 Esquema del montaje propuesto.

3.2 Hardware utilizado

3.2.1 Antena de referencia. Spartan MA600

La antena que se usará para el canal de referencia será la Spartan MA600 de Taoglas, se trata de un conjunto de 3 antenas en 1. Una utilizada para Wifi, otra para telefonía 2G-3G y por último una para GNSS. La antena de GNSS cubre los servicios L1 C/A de GPS (1575 MHz) y L1 C/A de GLONASS (1602 MHz).

En términos de rendimiento, la antena cuenta con una ganancia pasiva de 4.0 dBic en su punto máximo de recepción (Zenith), lo que garantiza una señal fuerte y estable.

Para mejorar aún más la calidad de la señal, la MA600 integra un amplificador de bajo ruido (LNA, *low noise amplifier*), con una ganancia de hasta 32.3 dB, dependiendo del voltaje de alimentación. Su figura de ruido entre 3.1 y 3.4 dB ayuda a mejorar la relación señal-ruido, proporcionando datos GNSS más precisos. Asimismo, la antena está diseñada para minimizar interferencias gracias a un rechazo más de 20 dB para señales fuera de banda. Se recuerda que los satélites GPS trabajan con una frecuencia portadora primaria L1 (1575.42 MHz).

En cuanto a su diseño y resistencia, la MA600 cuenta con protección IP67, lo que la hace resistente al polvo y al agua. Su base está construida en zinc niquelado y su carcasa es de PVC resistente a los rayos UV, lo que la hace ideal para su uso en estaciones de referencia GNSS en exteriores. Además, su rango de operación es de -40°C a 85°C, lo que le permite funcionar en entornos extremos.

Finalmente, la antena ofrece conectividad flexible y fácil instalación. Su sistema de montaje permanente permite fijarla de manera segura sobre superficies metálicas o instalarla en un soporte de pared o poste [43].

Esta antena es la que servirá de referencia puesto que al ser omnidireccional se consigue una mejor recepción de la constelación GPS al completo.



Figura 3-2 Antena Spartan MA600

GPS-GLONASS-GALILEO						
Centre Frequency	1575.42MHz / 1602MHz					
Bandwidth	10MHz					
Radiation Efficiency	50(without cable)					
Passive Gain @ Zenith	4.0 typ(with ψ =140mm ground)					
VSWR	2					
Impedance	50 Ω					
DC Power Input Range	3 ~ 5V					
DC input	3.3V		4.0V		5.5V	
MHz	1575.42	1602	1575.42	1602	1575.42	1602
VSWR	2	2	2	2	2	2
LNA Gain	29.2	29	31	31	32.3	32
Noise Figure	3.1	3.1	3.2	3.2	3.4	3.4
Power Consumption	7.5	7.5	9.4	9.4	15	15
Band Attenuation	1520MHz: -20dB 1642MHz: -20dB		1520MHz: -20dB 1642MHz: -20dB		1520MHz: -20dB 1642MHz: -20dB	
Cable	3m RG-174 standard, fully customizable					
Connector	SMA(M) standard, fully customizable					

Figura 3-3 Especificaciones antena Spartan MA600.

3.2.2 Antena de vigilancia. Banda L de Nolle Engineering.

La antena RHCP-10 de Nolle Engineering es una antena helicoidal optimizada para la recepción de señales en la banda L. Es una antena directiva, cuyo diseño de polarización circular derecha (RHCP), junto con su alta ganancia, la hacen adecuada para aplicaciones en las que se requiere un enfoque preciso en la captación de señales satelitales, tanto directas como reflejadas.

Dado que los sistemas GNSS, como GPS, operan en la banda L, la RHCP-10 es compatible con la recepción de sus señales. Esta antena ha sido diseñada para instalación en sistemas de seguimiento con capacidad de ajuste en azimut y elevación, lo que la hace idónea para el canal de vigilancia, puesto que podremos orientarla hacia los objetivos a detectar, reduciendo las interferencias.

Uno de los aspectos fundamentales de esta antena es su alta ganancia de 21.5 dBi, lo que le permite captar señales GNSS débiles con mayor precisión. Su ancho de haz relativamente estrecho facilita la focalización en un área específica, permitiendo el seguimiento de blancos con una mayor discriminación espacial.

Además, al emplear una polarización circular derecha (RHCP), la antena asegura una mejor recepción de las señales GNSS, reduciendo las pérdidas por polarización debido a que las señales de los satélites también tienen esta polarización. Esto es especialmente relevante en este trabajo, donde debido a la baja potencia de las señales GPS, se requiere eficiencia en la detección de las señales reflejadas por los objetivos de interés [44].



RHCP-10	
Radiating Element	10 turn right handed helix, 3.5mm copper wire
RF Performance	Gain ~21.5dBi FNBW ~33deg
Reception configuration	Direct reception
Mounting Option	Universal mounting via 6 M4 bolts
Dimensions	Length: 521mm Diameter: 180mm
Weight	650 g
Connector	N-type
Applications	Reception of geostationary and LEO satellites when mounted to el/az-rotor Higher gain for low elevation GEO

Figura 3-4 Antena RHCP de Nolle Engineering y sus especificaciones.

3.2.1 EVK-M8T

El EVK-M8T es un kit de evaluación diseñado por u-blox para facilitar el desarrollo y prueba de sistemas basados en tecnología de posicionamiento GNSS de alta precisión. Este dispositivo permite la evaluación de receptores GNSS con soporte para GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou, lo que lo hace muy útil para aplicaciones donde se requiera acceso a datos sin procesar y sincronización de alta precisión.

Una de las principales ventajas del EVK-M8T es su interfaz USB, que no solo permite la transferencia de datos a alta velocidad, sino que también alimenta el dispositivo sin necesidad de una fuente de alimentación externa (es el propio ordenador el que hace de fuente). Es posible usarlo conectado a un PC, gracias a su tamaño y facilidad de uso, el EVK-M8T es una herramienta muy adecuada para pruebas de laboratorio e investigación.

Además, incluye la herramienta de software u-center, que permite la configuración, prueba y análisis en tiempo real [45].



Figura 3-5 Receptor GNSS EVK-M8T de UBLOX.

Parameter	Specification
Serial Interfaces	1 USB V2.0
	1 RS232, max. baud rate 921,6 kBd
	DB9 +/- 12 V level
	14 pin – 3.3 V logic
	1 DDC (I2C compatible) max. 400 kHz
Timing Interfaces	1 SPI – clock signal max. 5,5 MHz – SPI DATA max. 1 Mbit/s
	2 Time-pulse outputs
	1 Time-mark input
Dimensions	105 x 64 x 26 mm
Power Supply	5V via USB or external powered via extra power supply pin 14 (V5_IN) 13 (GND)
Normal Operating temperature	-40°C to +65°C

Figura 3-6 Especificaciones del EVK-M8T.

3.2.1 ADALM-PLUTO

El ADALM-PLUTO, también conocido como PlutoSDR, desarrollado por Analog Devices Inc es un dispositivo portátil diseñado para introducir a estudiantes y profesionales en los fundamentos de la Radio Definida por Software (SDR), Radiofrecuencia (RF) y comunicaciones inalámbricas.

El PlutoSDR cuenta con un canal de transmisión y uno de recepción que pueden operar en full dúplex. Es capaz de generar y adquirir señales analógicas RF en un rango de frecuencia de 325 MHz a 3.8 GHz, con una tasa de muestreo de hasta 61.44 megamuestras por segundo (MSPS) y un ancho de banda de 20 MHz. Además, el PlutoSDR es compatible con diversas plataformas de software, como MATLAB, Simulink y GNU Radio.

Una de sus principales ventajas es su flexibilidad en la recepción y transmisión de señales. Dado que puede captar señales en la banda L, se puede utilizar para monitorizar señales GNSS. Asimismo, su capacidad de transmisión habilita la generación de señales simuladas [46].

A diferencia de otros sistemas SDR más complejos, el PlutoSDR es un dispositivo compacto que se alimenta directamente por USB, sin necesidad de fuentes de alimentación externas. Esto lo hace ideal para este trabajo pues permite su uso en entornos de laboratorio y en aplicaciones de campo, asegurando una integración sencilla con otros equipos de monitoreo y análisis de señales.

Para el desarrollo del trabajo se ha utilizado un PlutoSDR con dos terminales de recepción para poder captar y procesar la señal de referencia y vigilancia simultáneamente.

Specifications	Typical
Power	
DC Input (USB)	4.5 V to 5.5 V
Conversion Performance and Clocks	
ADC and DAC Sample Rate	65.2 kSPS to 61.44 MSPS
ADC and DAC Resolution	12 bits
Frequency Accuracy	± 25 ppm
RF Performance	
Tuning Range	325 MHz to 3800 MHz
Tx Power Output	7 dBm
Rx Noise Figure	<3.5 dB
Rx and Tx Modulation Accuracy (EVM)	-34 dB (2%)
RF Shielding	None
Digital	
USB	2.0 On-the-Go
Core	Single ARM Cortex®-A9 @ 667 MHz
FPGA Logic Cells	28k
DSP Slices	80
DDR3L	4 Gb (512 MB)
QSPI Flash	256 Mb (32 MB)



Figura 3-7 Dispositivo SDR ADALM-Pluto y sus especificaciones.

3.2.1 HackRF One

El HackRF One es un dispositivo SDR (Software Defined Radio) que permite tanto la transmisión como la recepción de señales de radio en un amplio rango de frecuencias, específicamente de 1 MHz a 6 GHz. El HackRF One actúa como un transceptor half-duplex, lo que significa que puede transmitir o recibir, pero no ambas funciones simultáneamente.

El HackRF One ha sido utilizado en este trabajo para la transmisión de señales sintéticas, permitiendo replicar señales GNSS artificiales que simulan el comportamiento de satélites de navegación.



Figura 3-8 Transceptor SDR HackRF-One.

3.2.2 USRP X310

El USRP X300/X310, desarrollado por Ettus Research, es una plataforma de radio definida por software (SDR) diseñada para sistemas avanzados de comunicaciones inalámbricas y procesamiento de señales. Su arquitectura hardware permite cubrir un amplio espectro de frecuencias, desde DC hasta 6 GHz, con un ancho de banda de hasta 160 MHz por canal. El equipo integra una FPGA Kintex-7 programable, lo que proporciona gran capacidad de procesamiento interno. Además, incluye una arquitectura de reloj flexible, destacando especialmente la opción del oscilador disciplinado por GPS.

(GPSDO), que mejora la precisión del reloj interno hasta alcanzar una estabilidad de frecuencia de 20 ppb (0,02 ppm), incluso cuando no está sincronizado directamente con GPS [47].

El USRP X310 ha sido utilizado para la toma de señal cuando se ha apuntado a barcos reales.



Figura 3-9 USRP X310.

3.2.3 LBE-1421

El LBE-1421 es un oscilador disciplinado por GPS (GPSDO, por sus siglas en inglés, *GPS Disciplined Oscillator*) fabricado por Leo Bodnar Electronics que utiliza señales provenientes de satélites GPS para corregir y estabilizar su frecuencia de referencia interna. Este dispositivo proporciona una señal de salida con una precisión de frecuencia típica de 0,000001 ppm (partes por millón). El LBE-1421 se ha utilizado para mejorar la precisión y estabilidad del sistema facilitando la adquisición de las señales.



Figura 3-10 Oscilador disciplinado LBE-1421.

3.3 Software utilizado

3.3.1 u-center

El u-center es un software desarrollado por u-blox para la evaluación, análisis de rendimiento y configuración de módulos y chips GNSS. Se trata de una herramienta intuitiva y muy útil para analizar

el rendimiento de receptores de señales GNSS en tiempo real, permitiendo la captura, visualización y configuración avanzada de señales GNSS.

Una de sus ventajas principales es su interfaz personalizable, que permite definir espacios de trabajo adaptados a cada usuario. Además, su funcionalidad de grabación y reproducción de datos posibilita la revisión y análisis detallado de registros GNSS.

El software u-center permite visualizar la relación portadora a ruido por ancho de banda (C/N_0), expresada en dB-Hz [48]. Esta magnitud se calcula como:

$$C/N_0 = SNR + BW \quad 11$$

donde SNR es la relación señal a ruido y BW es el ancho de banda del receptor.

Junto con el EVK-M8T el software u-center se ha utilizado evaluar y analizar la recepción de las señales satelitales, puesto que en se puede comprobar la potencia y posición de las constelaciones GPS visibles en tiempo real.

3.3.2 Matlab

MATLAB (*Matrix Laboratory*) es un entorno de programación y cálculo numérico desarrollado por MathWorks, ampliamente utilizado en ingeniería y ciencias aplicadas debido a su eficiencia en el manejo de matrices, su extenso conjunto de funciones matemáticas y su capacidad para visualizar datos de manera intuitiva. Su lenguaje, basado en operaciones vectorizadas, permite desarrollar algoritmos de alto rendimiento sin la complejidad de lenguajes de bajo nivel.

Entre sus principales capacidades, MATLAB ofrece herramientas avanzadas para procesamiento de señales, incluyendo filtrado digital, análisis espectral, correlación y transformadas de Fourier, lo que lo hace ideal para aplicaciones en telecomunicaciones, radar y sistemas de navegación. Además, su integración con sistemas de adquisición de datos permite procesar grandes volúmenes de información en tiempo real.

Otra ventaja clave es su entorno interactivo, que facilita la depuración de código y el desarrollo de scripts modulares para experimentación rápida. MATLAB también permite la implementación de algoritmos en paralelo y su optimización mediante técnicas de aceleración con GPU o compilación en código C. Asimismo, su compatibilidad con otros lenguajes como Python y C amplía sus posibilidades de integración en sistemas más complejos.

Gracias a su versatilidad, MATLAB es una herramienta fundamental en áreas como análisis de datos, simulación, modelado matemático y diseño de sistemas de control, permitiendo a los investigadores y desarrolladores implementar soluciones de manera eficiente y precisa. Es por ello que se ha decidió utilizar MATLAB como el entorno de trabajo para el procesamiento de señales GPS y la detección de blancos.

3.3.3 GNU Radio

GNU Radio es un marco de desarrollo de software libre diseñado para la implementación y simulación de sistemas de radio definidos por software (SDR, *Software Defined Radio*). Proporciona un entorno flexible para el procesamiento digital de señales (DSP, *Digital Signal Processing*) y permite la experimentación con comunicaciones inalámbricas, radares y sistemas de radiofrecuencia sin necesidad de hardware propietario [49].

Este software junto con algunos de los dispositivos hardware mencionados ha sido la herramienta utilizada para recibir las señales de referencia y vigilancia para su digitalización y posterior procesamiento.

Una de sus principales ventajas es su arquitectura modular, basada en bloques funcionales que pueden conectarse gráficamente mediante GNU Radio Companion (GRC) o programarse directamente

en Python o C++. Esto ha facilitado enormemente la creación y personalización de flujos de procesamiento para la recepción, demodulación y análisis de señales en tiempo real [50] .

Otra de sus fortalezas es su compatibilidad con una amplia variedad de hardware SDR, como (USRP *Universal Software Radio Peripheral*), RTL-SDR, HackRF, ADALM-PLUTO (PlutoSDR), permitiendo la captura y transmisión de señales en bandas de frecuencia. Además, su integración con otras herramientas como MATLAB o Python lo hace versátil para aplicaciones de aprendizaje automático y optimización de señales.

Gracias a su enfoque flexible, escalable y de código abierto, GNU Radio se ha convertido en una herramienta esencial en este trabajo, facilitando la experimentación y la implementación de sistemas avanzados sin restricciones de hardware propietario.

Antes de llegar al resultado final, se han realizado diferentes configuraciones utilizando distintas antenas y módulos para comprobar el funcionamiento del algoritmo y de posteriores configuraciones.

3.4 Implementación del Procesado de Señal GNSS

En esta sección se describen las funciones empleadas para implementar la cadena de procesado. A continuación, se explica para que se han usado estos códigos.

3.4.1 Lectura y conversión de datos

Para extraer las muestras de la señal se usa una función proporcionada por GNU Radio que abre el archivo binario y utiliza la función de MATLAB `fread` para leer los datos en formato float, interpretándolos como pares de números que representan la parte real e imaginaria de cada muestra. Mediante la operación de combinación, estos valores se convierten en números complejos, lo que permite un tratamiento adecuado en los algoritmos de correlación y análisis espectral.

3.4.2 Generación del código C/A

El código de adquisición C/A se genera mediante una función que utiliza dos registros de desplazamiento lineal (LFSR) para crear una secuencia de 1023 bits. Cada PRN se obtiene combinando las salidas de los LFSR mediante una operación XOR, en función de un conjunto específico de 'taps' definidos para cada satélite (ver 2.2.3). Además, se implementa una opción de '*upsampling*' mediante retención cero, lo que permite aumentar la resolución temporal del código C/A en función de la frecuencia de muestreo del sistema. Esta técnica es crucial para alinear la réplica del código con la señal recibida y así obtener una correlación precisa.

3.4.3 Procesado y correlación de la señal

Este código integra los bloques anteriores. Inicialmente, se extrae la señal compleja, y para cada PRN del 1 al 32 se genera el correspondiente código C/A. Posteriormente, se realiza la correlación entre la señal recibida y la réplica del código utilizando transformadas rápidas de Fourier (FFT) e inversas (IFFT). Este proceso permite determinar la frecuencia Doppler y el retardo de código que maximizan la correlación en cada satélite observado. Los resultados se visualizan mediante gráficos, donde se muestra tanto el espectro de la señal como un mapa de calor que ilustra la magnitud de la correlación en función del desplazamiento y del Doppler, permitiendo determinar qué satélites tienen mejores propiedades de correlación. En este código se deben especificar varios parámetros de entrada, tales como el número de muestras a procesar, la frecuencia de muestreo, el tamaño de los lotes procesados o la frecuencia portadora de la señal. El diagrama de la Figura 3-11 ayuda a entender el funcionamiento general de este código.

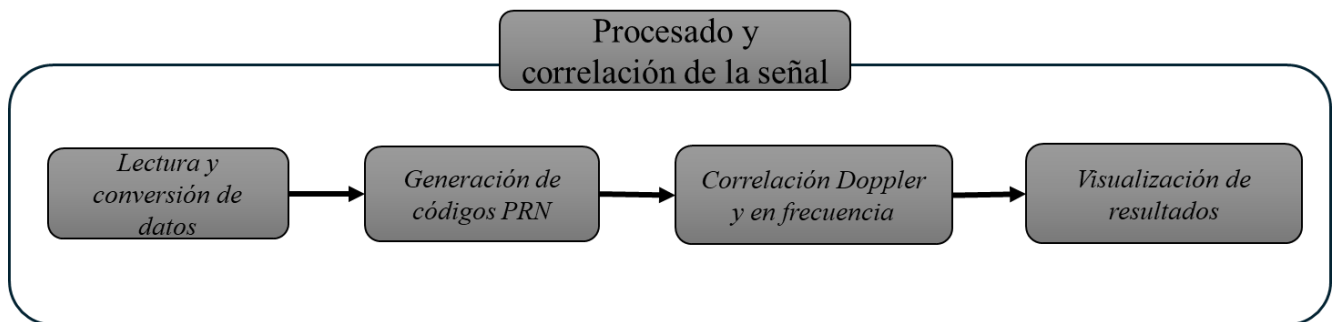


Figura 3-11 Funcionamiento general del procesado y correlación de las señales recibidas.

3.4.4 Función de ambigüedad cruzada (CAF, cross ambiguity function)

Este código calcula la función de ambigüedad cruzada entre la señal de referencia y la señal de vigilancia a lo largo de un rango definido de retardos y desplazamientos Doppler. En esencia, evalúa la correlación entre ambas señales para determinar los valores de retardo (TDOA) y Doppler (FDOA) que maximizan dicha correlación, generando además visualizaciones en 2D y 3D del mapa distancia-Doppler.

3.4.5 Generación del mapa distancia-Doppler

Este último bloque procesa señales GNSS en MATLAB para generar un mapa distancia-Doppler donde detectaremos al barco. Inicialmente, configura parámetros de adquisición y carga las señales de referencia y vigilancia, y para un satélite seleccionado genera su código PRN. Luego, estima la compensación Doppler y la fase del código mediante la correlación en bloques, corrigiendo las señales en consecuencia. Finalmente, utiliza la función CAF para obtener un mapa que identifica picos de correlación y, por ende, la presencia de blancos. En este código también se deben especificar los mismos parámetros de entrada que en el 3.4.3, también se deben especificar los límites de la distancia y frecuencia Doppler que se observan en el mapa dibujado para así poder tener una visualización más clara de los objetivos detectados. En la Figura 3-12 se presenta un diagrama de flujo que refleja el funcionamiento general de este código.

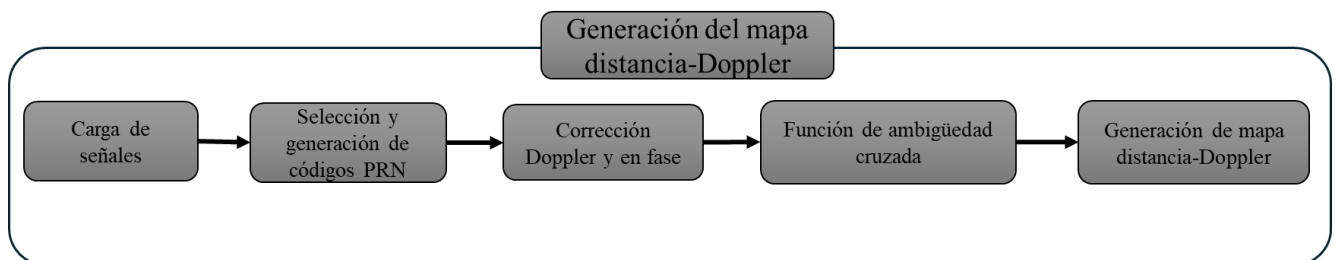


Figura 3-12 Funcionamiento general del código que genera el mapa distancia-Doppler.

3.5 Pruebas previas

3.5.1 Recepción de Señal sintética

Para validar el funcionamiento del algoritmo desarrollado en MATLAB, se generó una señal sintética similar a las señales reales de GPS, mediante el uso de un código pseudoaleatorio. El objetivo de esta señal sintética es evaluar si el algoritmo implementado es capaz de correlacionar correctamente la señal recibida con una réplica generada localmente.

El escenario donde se hizo la prueba fue en las inmediaciones de los laboratorios de investigación del Centro Universitario de la Defensa localizado en la Escuela Naval en Marín, Pontevedra.

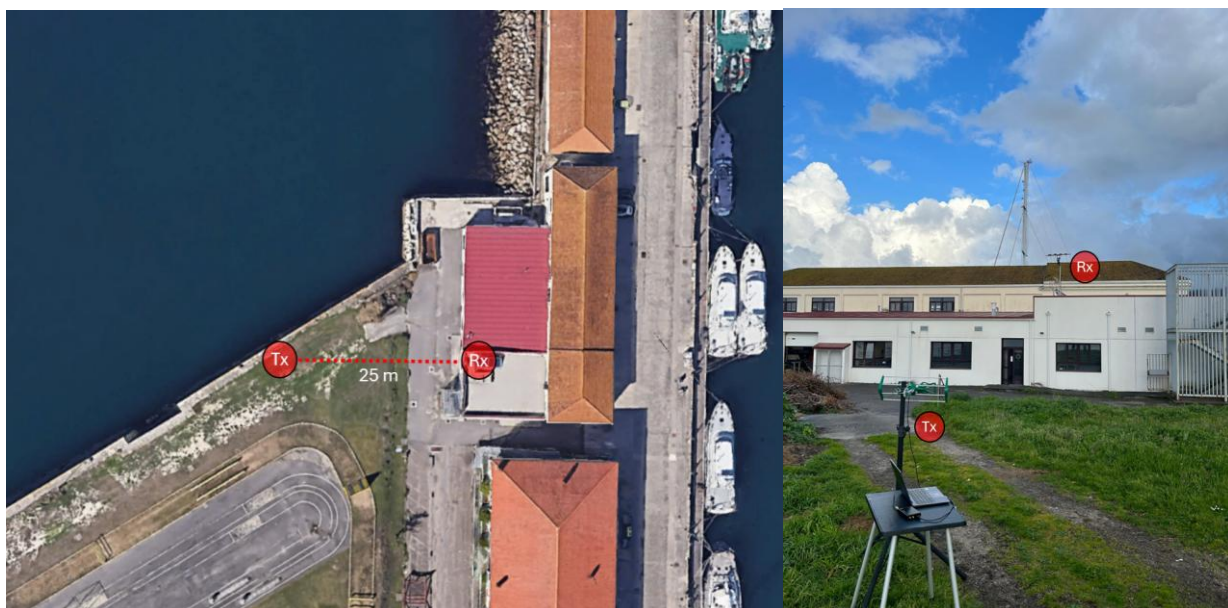


Figura 3-13 Escenario de la prueba: Tx antena transmisora Rx antena receptora.

En esta prueba el receptor (Rx en la Figura 3-13) se encuentra el tejado del edificio, y está compuesto de 4 antenas pasivas Televés Dinova Boss DVB-T orientadas hacia el oeste. Estas antenas están conectadas a un receptor Ettus Research X310. Además, el muestreo ha sido sincronizado por un oscilador disciplinado por GPS.

El transmisor, (Tx en la Figura 3-13) es una baliza basada en un dispositivo HackRF. El SDR se conectó a un ordenador portátil donde la señal se generó usando el software GNU Radio (3.3.3).

En este experimento, se optó por generar un código PRN de 1023 bits modulando una portadora cuya frecuencia se situaba dentro de la banda del canal DVB-T (498 MHz) [51]. Esta elección se hizo para simular una situación real en la que la señal GPS se encuentre embebida dentro del espectro de una señal de radiodifusión digital terrestre, lo que es común en sistemas de radar pasivo que emplean iluminadores de oportunidad.

Con el fin de que el espectro de la señal basada en PRN esté oculto completamente dentro del espectro de la señal DVB-T, se seleccionó una ganancia de transmisión de 20 dB en el HackRF. Este valor se eligió específicamente para que la amplitud de la señal PRN fuera comparable a la del nivel de ruido presente en el canal DVB-T, evitando así que se identificara visualmente en un análisis espectral simple. Esta estrategia busca replicar las condiciones reales en las que las señales GNSS presentan una relación señal a ruido muy baja, característica habitual en la recepción de señales de satélites GPS.

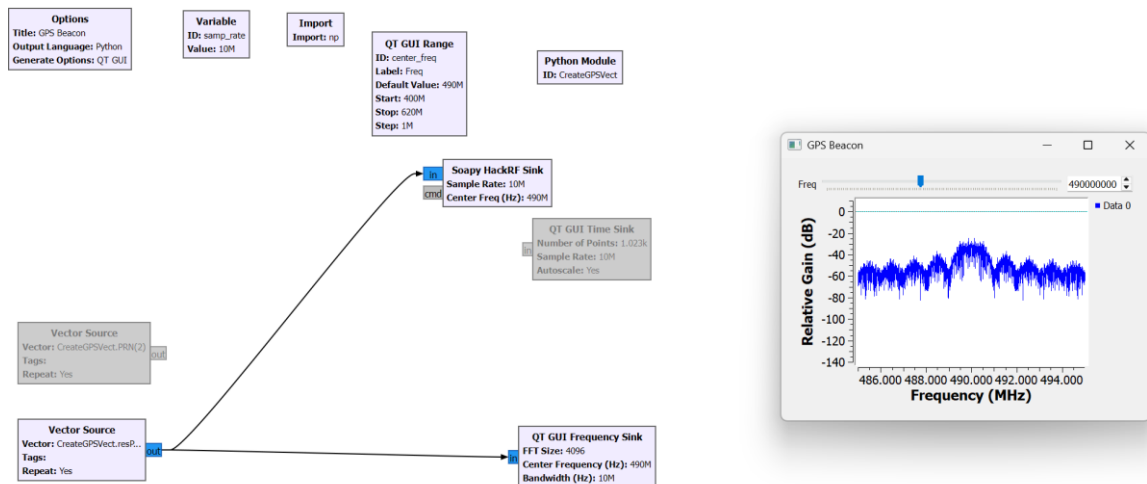


Figura 3-14 Módulo generador de la señal en sintética en GNU Radio.

Como se puede observar en la Figura 3-14 la señal transmitida tiene una frecuencia portadora de 490 MHz estando dentro de la banda del canal DVB-T correspondiente. En la Figura 3-15 se ve el espectro de la señal recibida en una de las antenas del receptor.

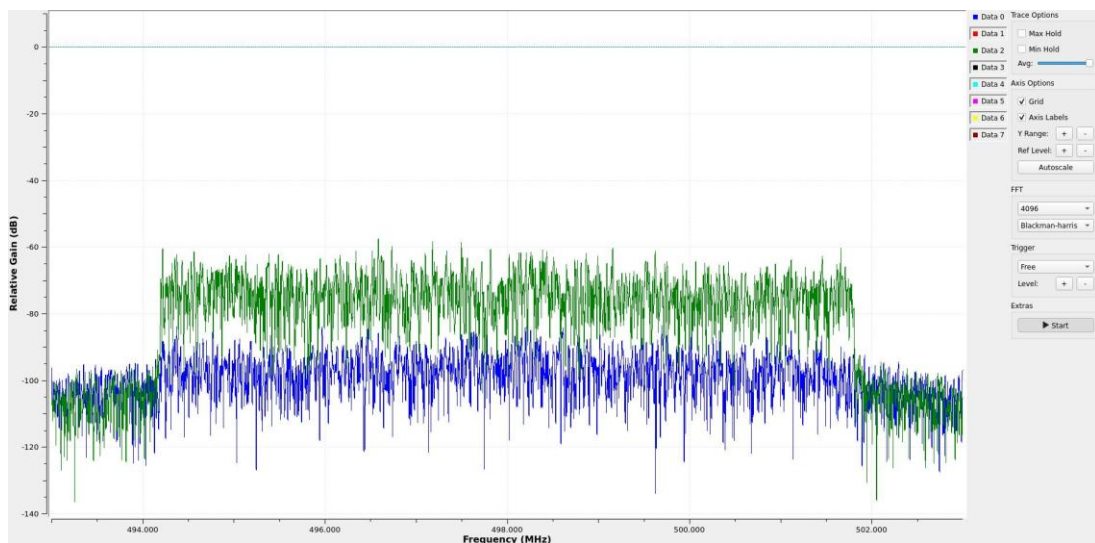


Figura 3-15 Espectro de la señal PRN transmitida a 498 MHz con una ganancia de 20 dB.

Una vez recibida la señal se procede a procesarla con el código desarrollado en MATLAB obteniendo lo que se puede ver en la Figura 3-16. En esta prueba se ha mandado el código PRN correspondiente al satélite 2 de la constelación GPS que coincide con los resultados obtenidos del código.

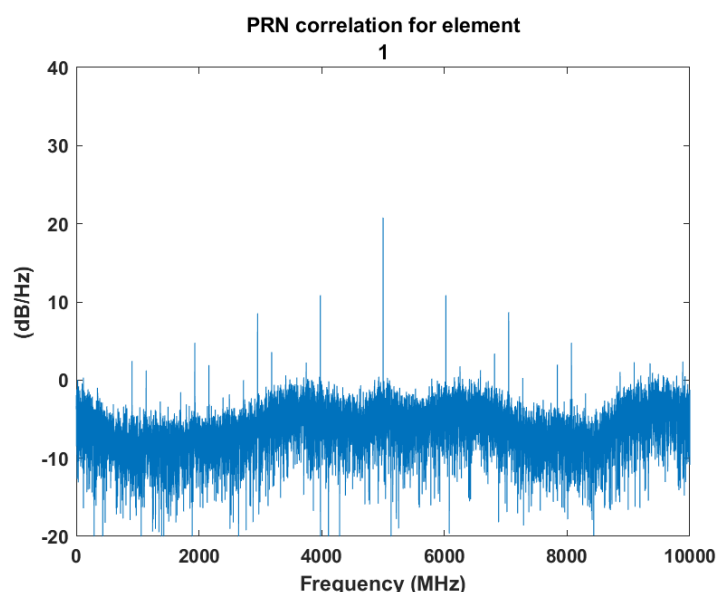


Figura 3-16 Correlación de la señal sintética.

3.5.2 Pruebas realizadas con antena de referencia

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento de la antena Spartan MA600 en la recepción de señales GNSS reales, se diseñó una prueba utilizando tanto el dispositivo HackRF One como el receptor u-blox EVK-M8T, conectados simultáneamente mediante un divisor de señal (splitter de Mini-Circuits). Esta configuración permitió comparar el rendimiento de la antena en ambas plataformas y garantizar que sus características cumplieran con los requisitos del sistema de vigilancia GNSS del proyecto.

El propósito de esta prueba fue confirmar que la antena Spartan MA600 es capaz de captar correctamente señales GNSS reales en la banda L, utilizadas por sistemas de posicionamiento global.

Para llevar a cabo la prueba, primero se realizó el montaje del sistema. La antena Spartan MA600 se conectó al HackRF One y fue instalada en un entorno con visión despejada del cielo, condición necesaria para asegurar una buena recepción de las señales GNSS reales.



Figura 3-17 Antena Spartan MA600.



Figura 3-18 Montaje para prueba con HackRF y 1 antena de referencia.

3.5.3 Pruebas realizadas con dos antenas de manera simultánea

El siguiente paso a seguir es verificar el correcto funcionamiento del sistema con dos antenas. Como el objetivo es tener un sistema con dos canales, uno de referencia y otro de vigilancia, el uso del HackRF One ya no es idóneo, puesto que este únicamente tiene una entrada de recepción. Una alternativa sería conectar dos dispositivos HackRF por separado al ordenador, sin embargo, podrían surgir problemas de

sincronización en la toma de señales. Otra opción, que es la que se ha decidido seguir es usar un dispositivo ADALM Pluto SDR que cuenta con dos canales de recepción.



Figura 3-19 ADALM-Pluto con 2 entradas y 2 salidas.

Cuando se tomaron las primeras medidas con este sistema, se observó que las señales satelitales no se adquirían correctamente puesto que al procesarlas ningún PRN de los satélites mostraba un valor de correlación suficientemente alto. Esto se debe a que el Pluto incorpora un oscilador de referencia interno de 40 MHz, con una estabilidad en frecuencia de ± 25 ppm (partes por millón) como se puede observar en la Figura 3-7.

Las señales GPS requieren de estabilidades de órdenes menores de error por lo que la inestabilidad del Pluto genera problemas al sincronizar y demodular señales, afectando el rendimiento general del sistema. Para mitigar este inconveniente, la solución que se ha optado fue utilizar un oscilador disciplinado por GPS (GPSDO) como fuente de reloj externa. El principio básico de funcionamiento de un GPSDO es recibir señales satelitales y usar la información que contiene para controlar la frecuencia de un oscilador local de cuarzo o rubidio, las señales satelitales son fiables puesto que estas originan de osciladores atómicos [52].

El oscilador que se ha utilizado es el LBE-1421, que tiene una estabilidad de 0,000001 ppm, por lo que al utilizar un GPSDO, la estabilidad del sistema mejora significativamente respecto al oscilador del ADALM-Pluto.



Figura 3-20 ADALM-Pluto conectado a GPSDO y a las dos antenas.

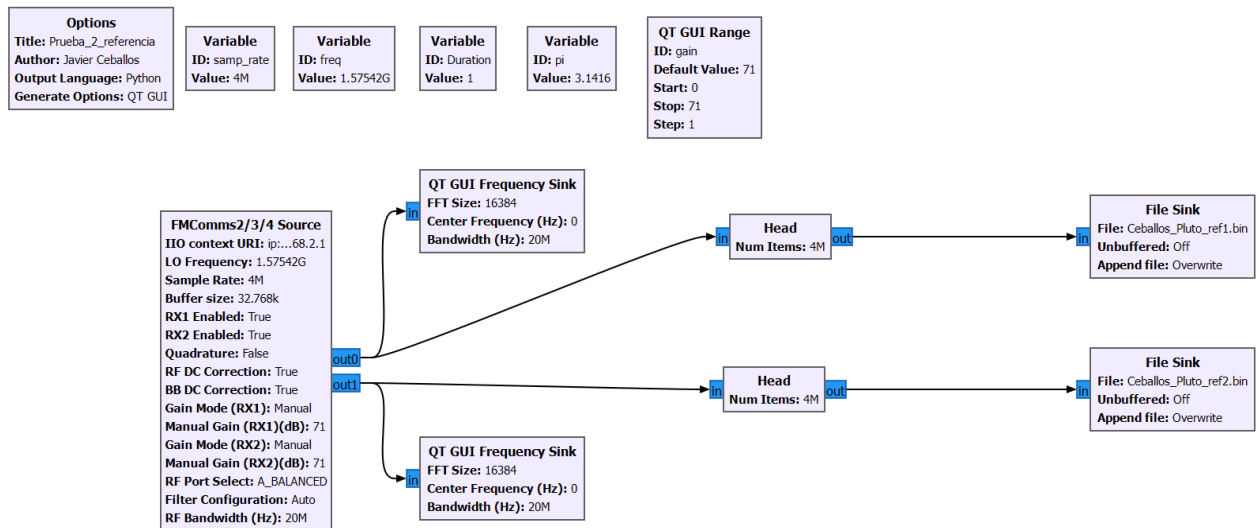


Figura 3-21 Programa para capturar la señal de las 2 antenas de referencia.

Finalmente, al probar de nuevo el sistema con esta mejora, se puede recibir y procesar las señales con exactitud. En la Figura 3-22 se aprecia que, en el momento de realizar la prueba, el de PRN 27 era el que mejores propiedades de correlación ofrecía. Nótese que la magnitud de la correlación viene expresada en unidades naturales adimensionales.

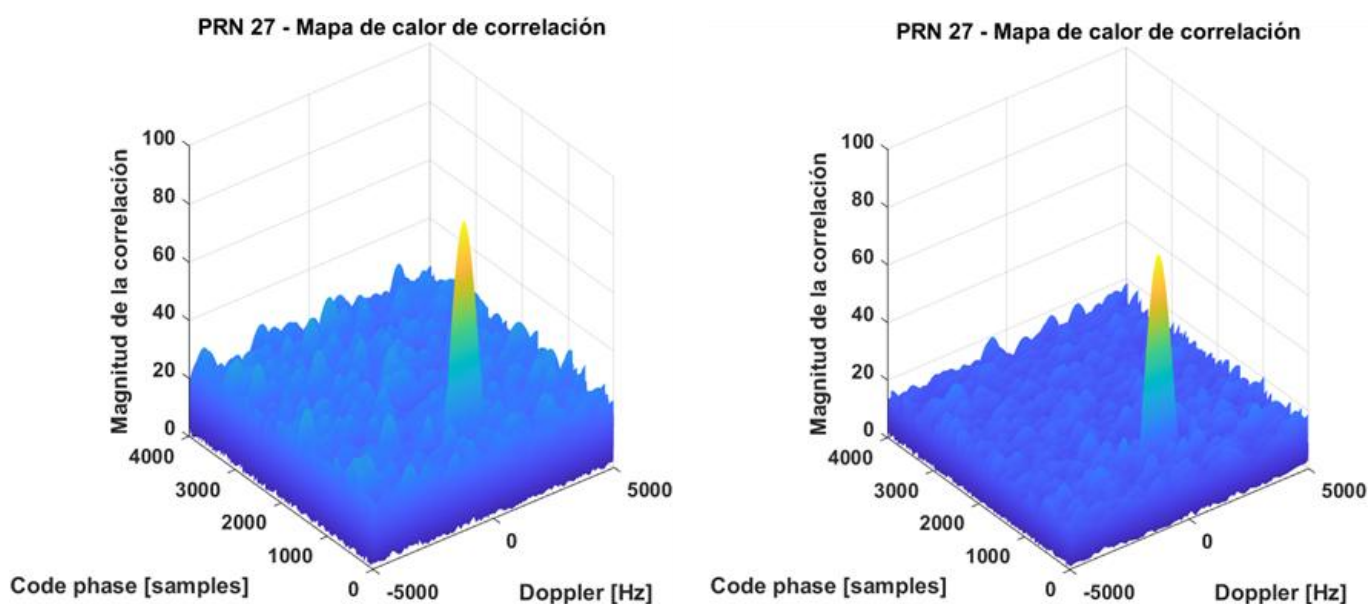


Figura 3-22 Mapas de correlación: antena de referencia 1 (izquierda), antena de referencia 2 (derecha).

3.5.4 Prueba realizada con antena de referencia y antena de vigilancia

El siguiente paso seguido ha sido hacer pruebas con la antena de referencia y la de vigilancia como se ve en la Figura 3-23, para comprobar que la antena de vigilancia capta correctamente las señales de los satélites. En primer lugar, se ha hecho uso del EVK-M8T y la herramienta u-center para ver que satélites apuntar con la antena directiva.



Figura 3-23 Montaje con antena de referencia y antena de vigilancia.

Según los datos obtenidos de la antena de referencia (Figura 3-25) se ha observado que en esta prueba el satélite G25 es una buena opción ya que tiene una elevación de 55° y se encuentra en un azimut 246° . Además, su señal se recibe con un C/N_0 de 46 dB-Hz, siendo la señal más fuerte entre todos los satélites visibles.

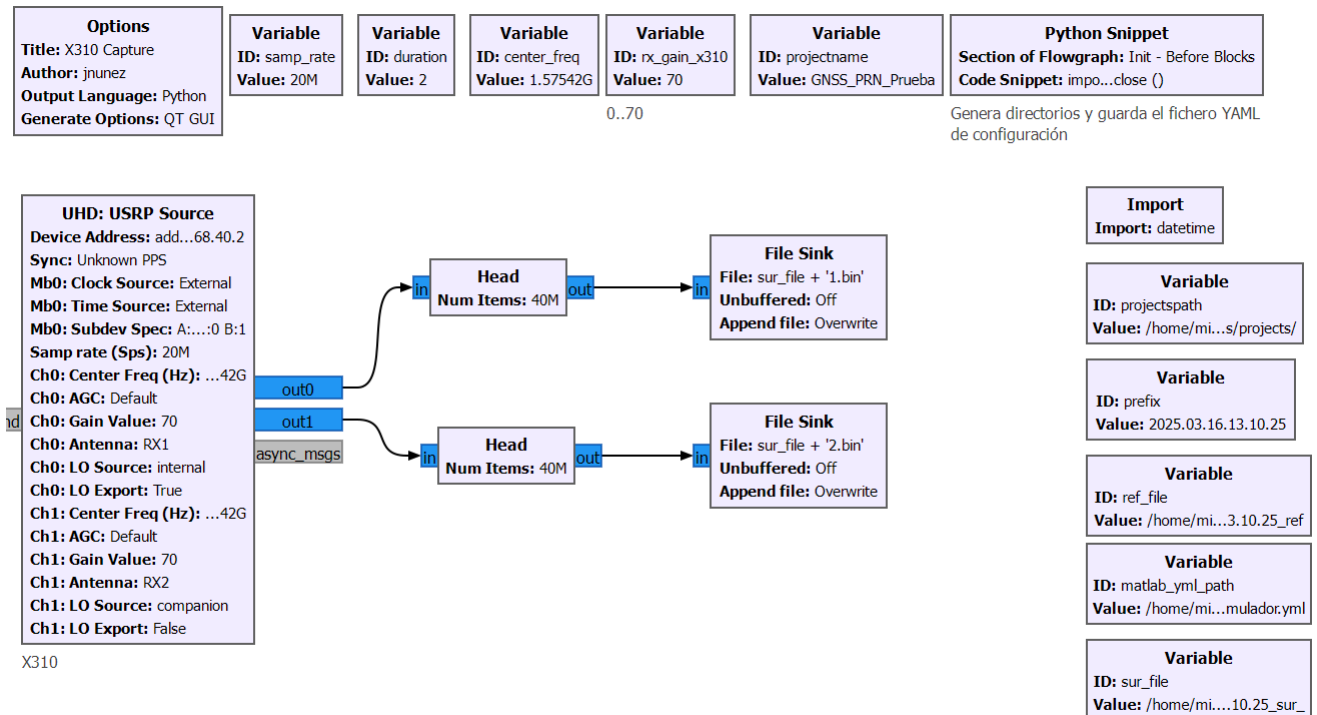


Figura 3-24 Programa de recolección de datos de antena de vigilancia y referencia.

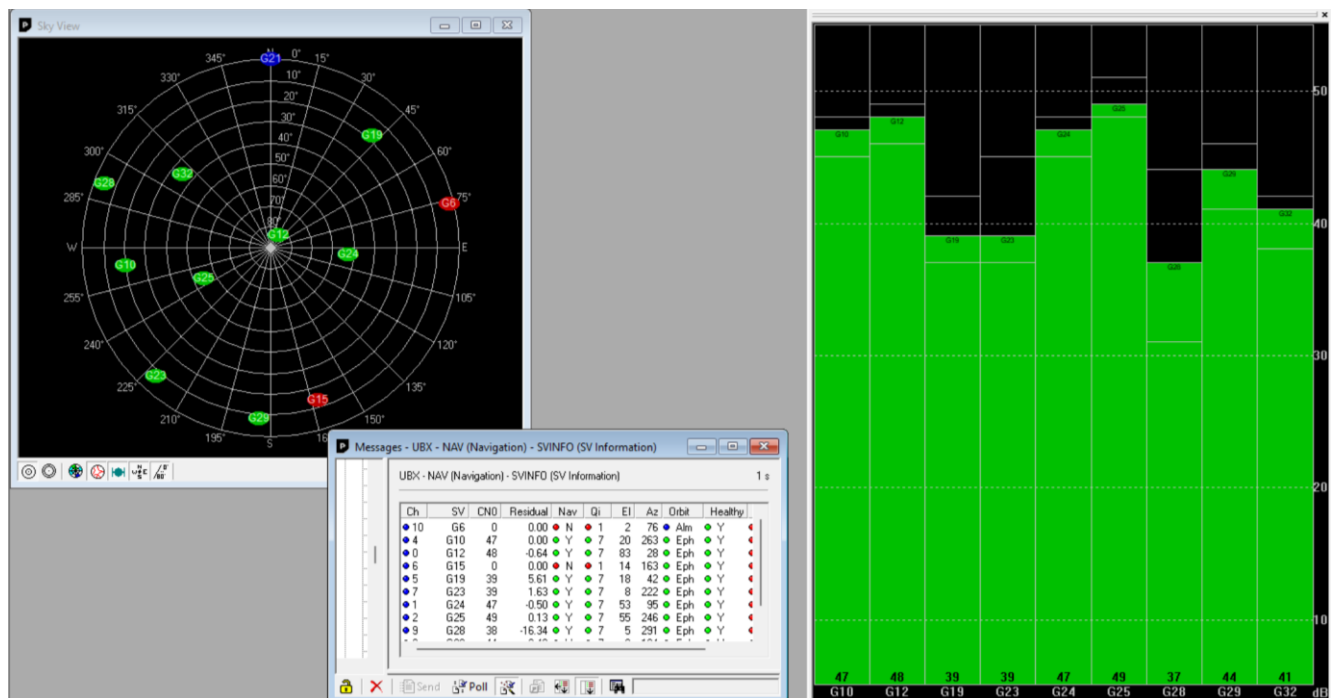


Figura 3-25 Potencia recibida de los satélites con la antena de referencia.

Como sabemos el azimuth y elevación del satélite que queremos apuntar, se procede a mover mecánicamente la antena.



Figura 3-26 Antena de vigilancia ajustada a la posición del satélite.

Al ajustar la antena direccional se obtiene el diagrama de potencias de la Figura 3-27, en la que se aprecia como la C/N_0 del satélite G25 es de 55 dB-Hz aumentando un total de 6 dB-Hz respecto a lo obtenido con la de referencia, y la C/N_0 del resto de satélites es de 42 dB-Hz o menor.

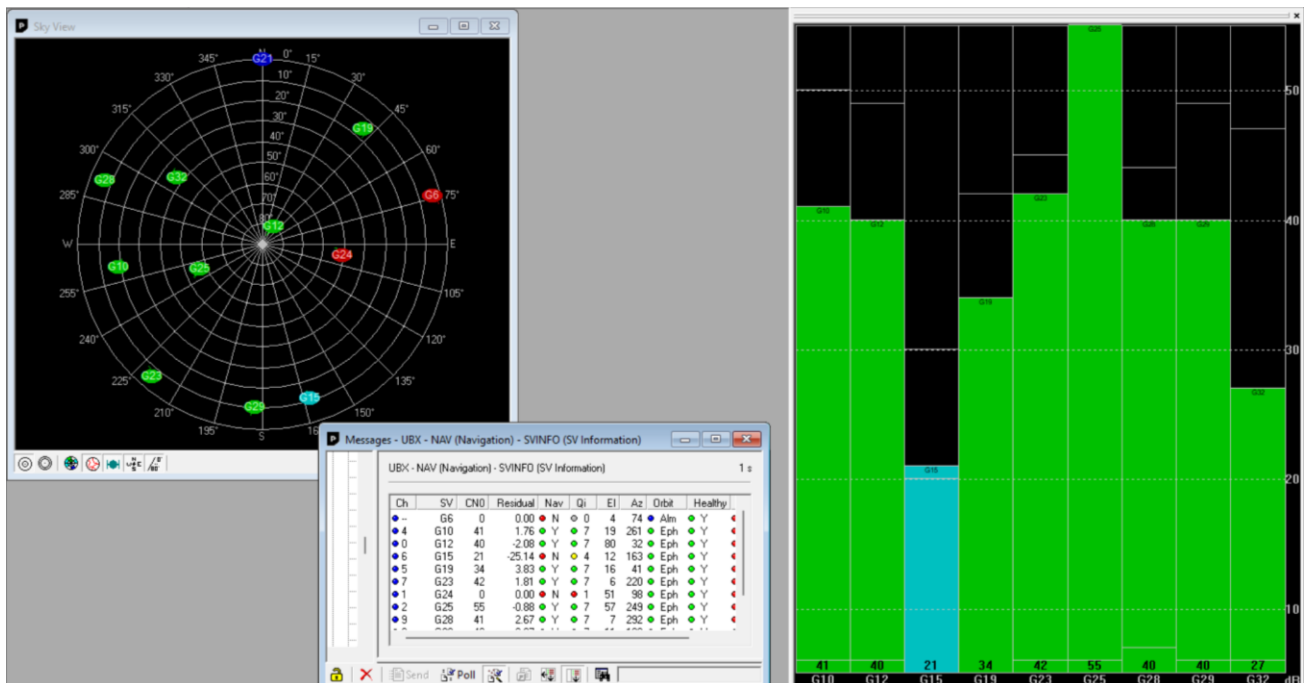


Figura 3-27 Potencia recibida de los satélites con la antena de vigilancia apuntando.

Además, al procesar las señales con el código y correlacionarlas se obtiene:

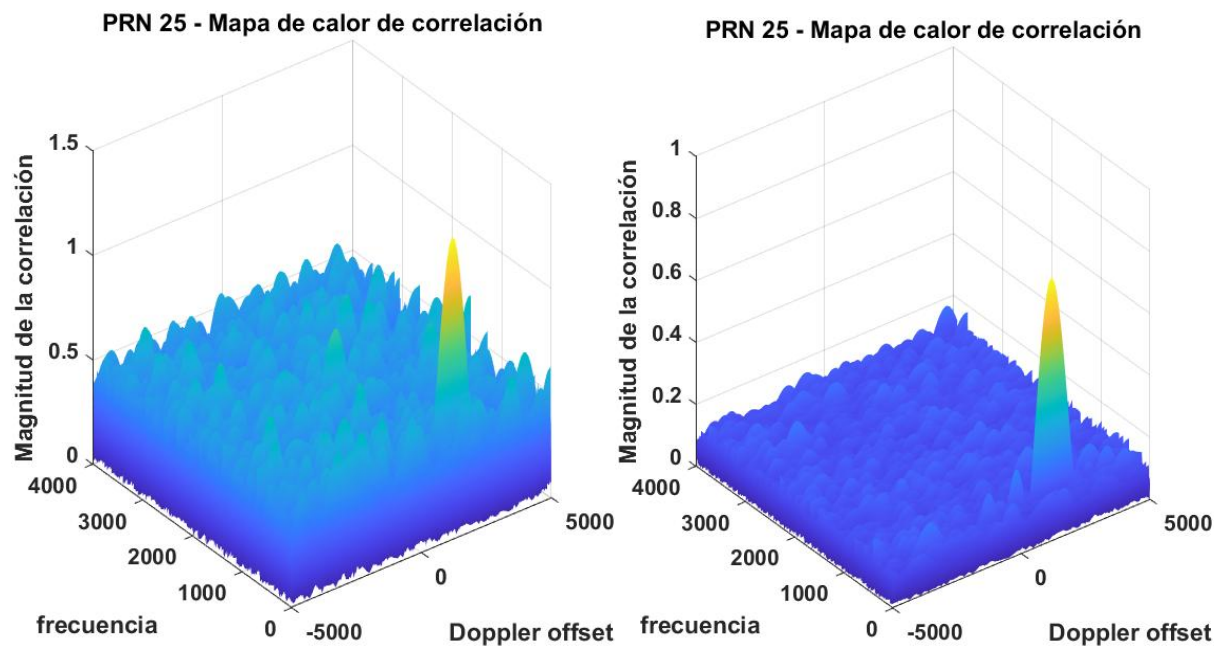


Figura 3-28 Correlación de la antena de referencia (izquierda) y de la antena de vigilancia (derecha).

Como se puede observar en la Figura 3-28, la señal recibida del satélite G25 tiene el mismo desplazamiento Doppler en ambas gráficas y el mapa de calor muestra un ruido significativamente menor en la señal obtenida por la antena de vigilancia que en la de referencia.

El siguiente paso que seguir es comparar el Doppler recibido de cada antena apuntando a un entorno sin blanco. Para ello se plantea un sistema similar al anterior con la diferencia de que en este caso la antena de referencia se encuentra en el techo del laboratorio de investigación y la antena de vigilancia se encuentra cerca de la escollera, más alejada de la antena de referencia, como se puede ver en la Figura 3-29. Esto se hace para limitar la potencia de la señal directa recibida en la antena de vigilancia.

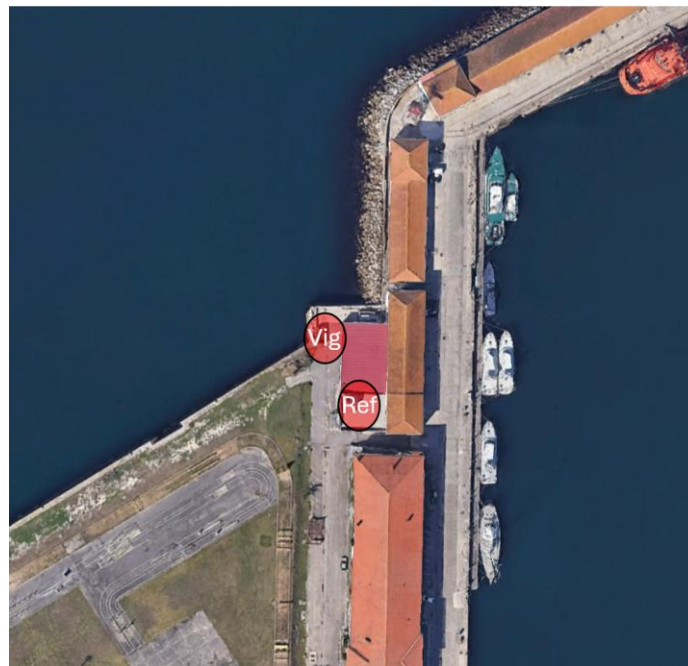


Figura 3-29 Posición de la antena de referencia (Ref) y vigilancia (Vig).



Figura 3-30 Antena de vigilancia a nivel del mar, más cerca de la escollera.

Al aplicar la función de ambigüedad obtenemos el mapa distancia-Doppler de la Figura 3-31, en el eje de abscisas se representa la distancia biestática al blanco apuntado y en el eje de ordenadas se representa la frecuencia Doppler recibida que permite calcular la velocidad a la que se encuentra el blanco. Por último, la barra situada a la derecha representa la intensidad con la que se reciben los ecos. En la Figura 3-31 se observa que se reciben ecos con Doppler 0, lo cual es de esperar puesto que la antena de vigilancia está recibiendo ecos de la cara norte de la ría de Pontevedra que se encuentran estáticos.

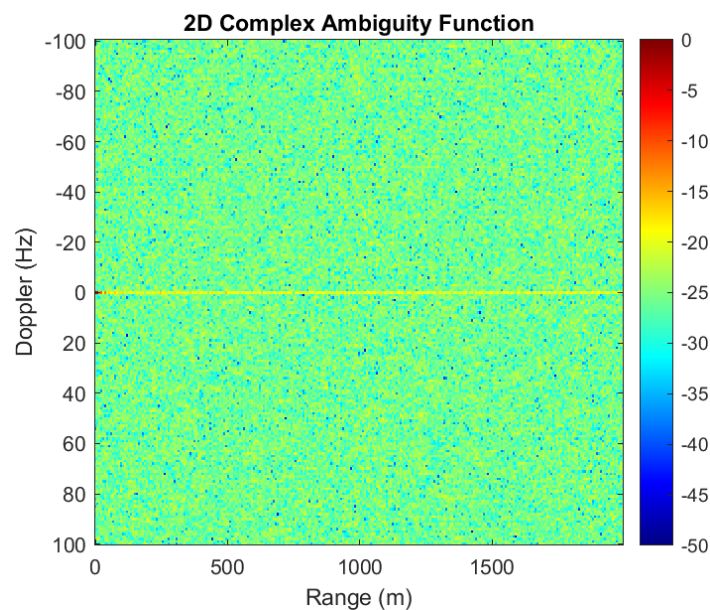


Figura 3-31 Mapa distancia-Doppler apuntando a un entorno sin blanco.

4 RESULTADOS Y VALIDACIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir del procedimiento descrito en el apartado 1, abordando tanto simulaciones con objetivos artificiales como el procesamiento de señales reales. En la primera sección se valida el funcionamiento del código generador del mapa distancia-Doppler mediante la simulación de escenarios controlados en Matlab, Estas simulaciones permiten establecer una base comparativa y verificar la relación entre las distancias reales y las representadas en los mapas, siguiendo las ecuaciones descritas.

Posteriormente, se pasa a la aplicación práctica mediante el procesamiento de señales reales. En esta parte, se evalúa el rendimiento del sistema en la detección de blancos en entornos reales, analizando mediciones sobre blancos civiles y militares y comparando los resultados obtenidos con las expectativas derivadas de las simulaciones. La coherencia entre ambos conjuntos de resultados respalda la validez del enfoque experimental.

4.1 Resultados con blancos sintéticos

En primer lugar, se ha comprobado el funcionamiento del código que genera el mapa distancia-Doppler con distintos blancos creados artificialmente en un código de MATLAB.

El objetivo de esta prueba fue identificar en qué región del mapa distancia-Doppler se produce la detección de un blanco. Es importante destacar que la distancia obtenida en este mapa no corresponde directamente a la distancia real al blanco, aunque sí está relacionada con ella. Esta diferencia se debe a que el sistema utilizado sigue un esquema de radar biestático en lugar de uno monoestático.

En un radar monoestático, el transmisor y el receptor están ubicados en el mismo punto, por lo que la distancia medida corresponde directamente a la distancia real al blanco. Sin embargo, en un radar biestático, el transmisor y el receptor están separados físicamente, lo que introduce un desfase en la distancia estimada. En este caso, la distancia medida corresponde a la suma de las distancias entre el transmisor y el blanco, y entre el blanco y el receptor, conocida como distancia biestática.

Dado que el sistema utilizado en esta prueba emplea un esquema biestático, la distancia reflejada en el mapa distancia-Doppler depende tanto de la posición del blanco como de la geometría del sistema transmisor-receptor.

4.1.1 Simulador de escenarios y señal sintética

El código generador crea un escenario configurable en el que se pueden ajustar diversos parámetros, tales como la posición del satélite transmisor, la ubicación de la antena receptora y la potencia de transmisión. Además, permite crear objetivos y definir sus características como posición, velocidad, entre otros. Esta herramienta es especialmente útil, ya que posibilita la simulación de múltiples escenarios sin necesidad de realizar mediciones reales.

```
# ===== Transmitter =====
tx:
- pos: [0,0,20000000] # Initial position
  latitude: 42.444657 # Latitude tx
  longitude: -8.660041 # Longitude tx
  midpointlatitude: 42.421111 # Latitude Mid Point tx-rx
  midpointlongitude: -8.6833297 # Longitude Mid Point tx-rx
  bearing: 36.2 # Bearing regarding to the radar (degrees)
  az: 45 # Initial orientation azimuth
  el: 0 # Initial orientation elevation
  pow: 20000 # Power
# ===== Receiver =====
rx:
pos: [0,0,0] # Initial position
latitude: 42.397763 # Latitude rx
longitude: -8.706672 # Longitude rx
az: 180 # Initial orientation azimuth
el: 0 # Initial orientation elevation
numarrayelms: 2 # Number of antenna array elements (must be >=2)
gain: 0 # Gain in dB
NF: 1 # Noise figure in dB
REFTEMP: 290 # Reference temperature (in degrees kelvin)
# ===== Simulation =====
sim:
type: EXTERNAL
tsim: 0.5 # Simulation duration
#tsim: 1
dt: 0.001 # Delta simulation time
EXTERNAL:
tspath: gnss.bin # Transport stream file path
LFM:
PRF: 1000 # PRF (the ratio of sampling rate and PRF must be all integers)
bw: 12000000 # Signal bandwidth
tbprod: 20 # Time-bandwidth product
tgt:
- pos: [465, -2665, 0] # [-684, 971, 0] # simulates DSI
  vel: [1, 1, 0]
- pos: [2465, 1465, 0] # [-1831, 1699, 0]
  vel: [-1, 1, 0]
- pos: [0, 0, 2000] # [-2208, 234, 0]
  vel: [0, 0, 0]
```

Figura 4-1 Ajuste de parámetros en código.

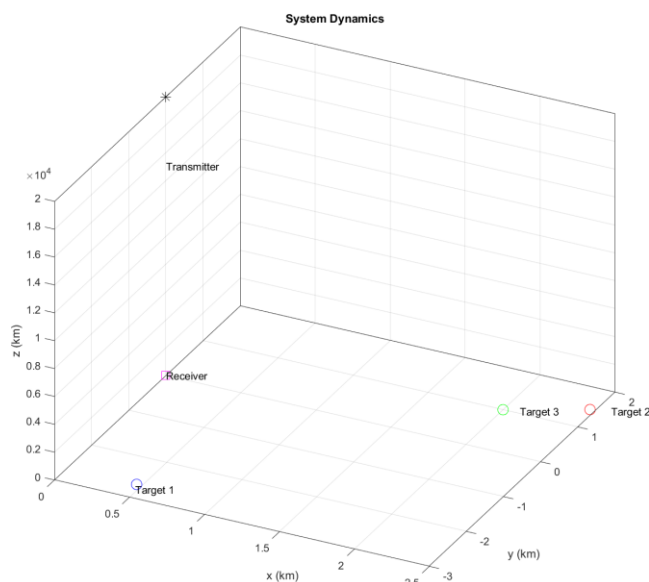


Figura 4-2 Escenario 3D simulado en Matlab.

En la Figura 4-1 se muestran los parámetros empleados en las pruebas. Se simularon tres objetivos con posiciones y velocidades diversas en la ría de Pontevedra como se puede observar en la Figura 4-2. Además, se realizaron varias pruebas ajustando la posición del satélite y modificando su altura para evaluar cómo afectaba a la detección de los blancos. Los resultados obtenidos se describen a continuación:

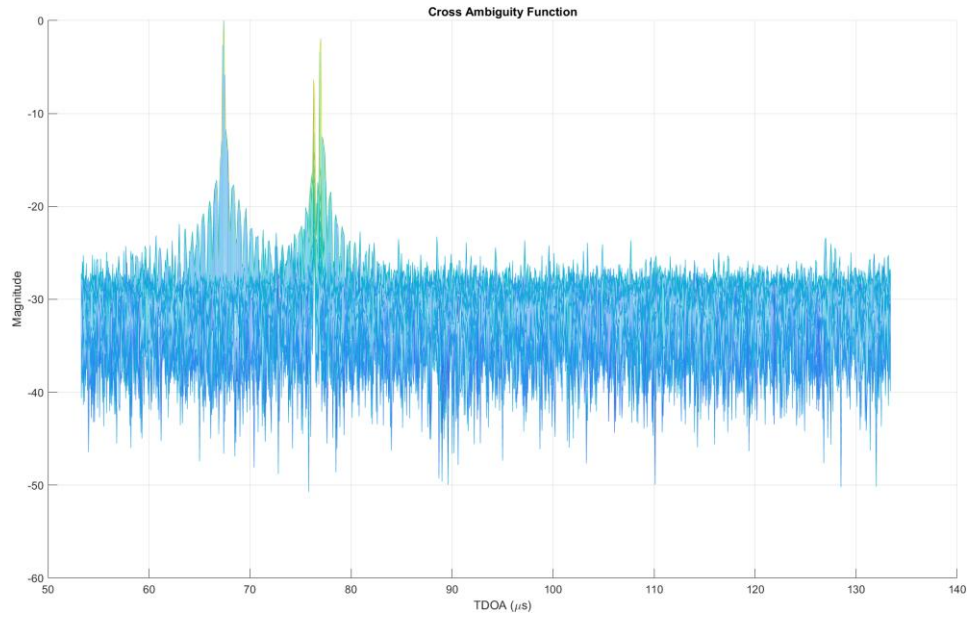


Figura 4-3 Función de ambigüedad cruzada simulada para un iluminador a 20 kilómetros de distancia.

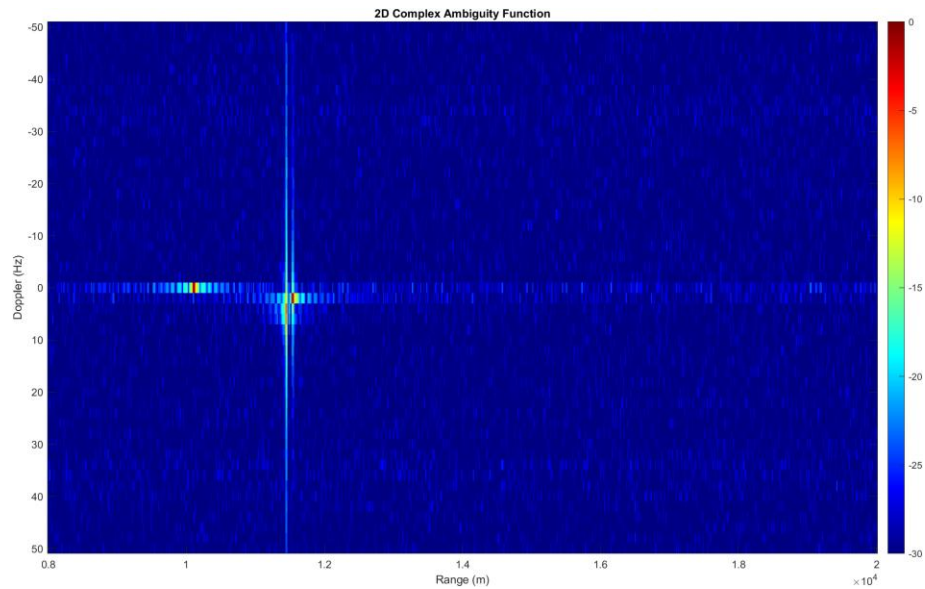


Figura 4-4 Mapa distancia-Doppler simulado para un iluminador a 20 kilómetros de distancia.

La Figura 4-3 y Figura 4-4 son obtenidas a partir de un iluminador a 20 km de distancia. En ellas se puede observar la detección de los tres objetivos obteniendo una distancia de entre 10 y 12 km.

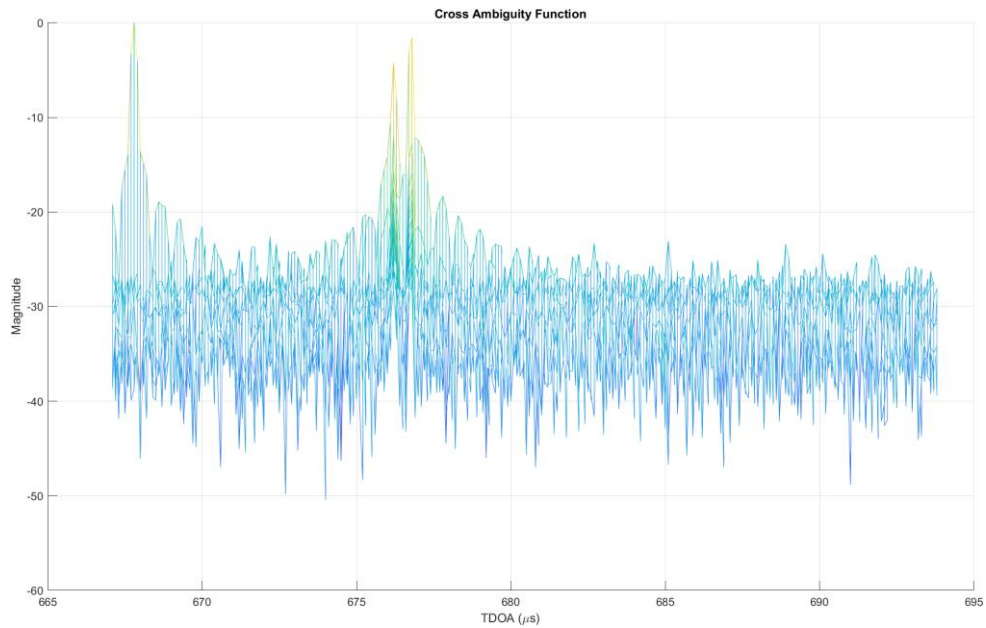


Figura 4-5 Función de ambigüedad cruzada simulada para un iluminador a 200 kilómetros de distancia.

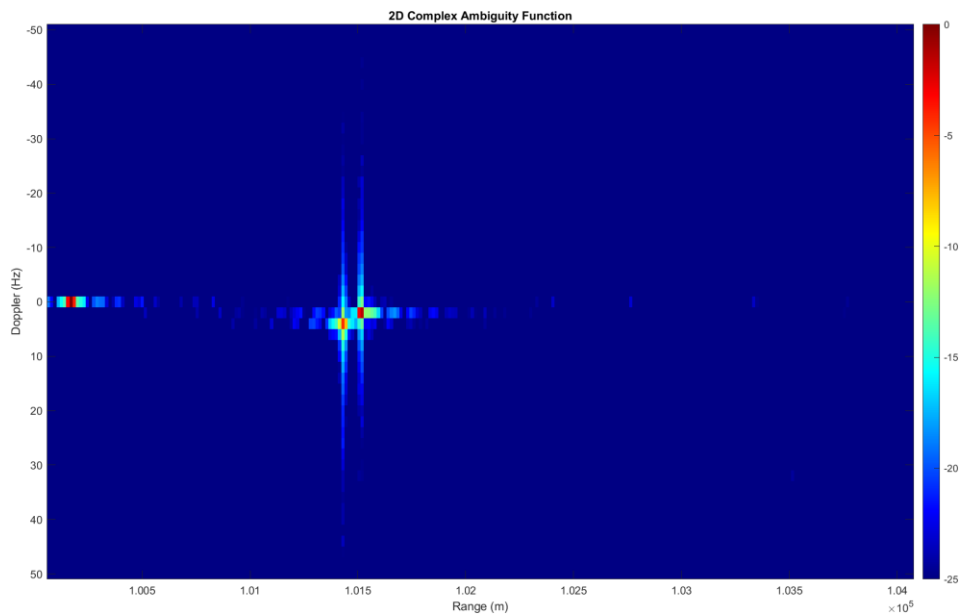


Figura 4-6 Mapa distancia-Doppler simulado para un iluminador a 200 kilómetros de distancia.

En la Figura 4-5 y Figura 4-6 se obtiene una imagen similar a las anteriores, pero en este caso las distancias son entre 101 y 101,5 km.

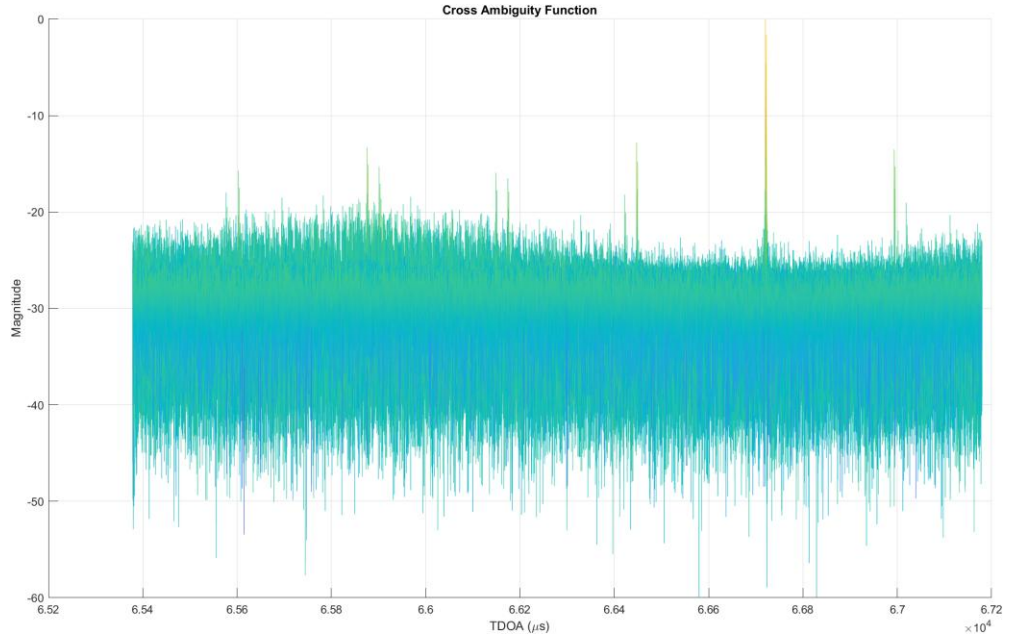


Figura 4-7 Función de ambigüedad cruzada simulada para satélite a 20000 kilómetros de distancia.

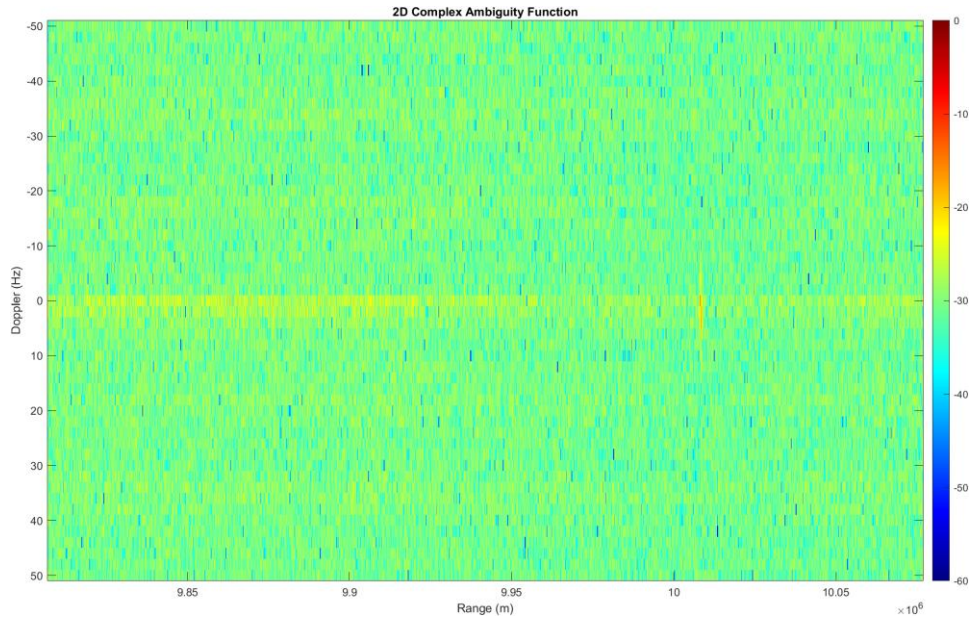


Figura 4-8 Mapa distancia-Doppler simulado para satélite a 20000 kilómetros de distancia.

En la Figura 4-7 y Figura 4-8 se simula un iluminador similar a un satélite real y se obtiene una detección mucho más tenue, detectando los contactos a unos 10.008 km de distancia.

Se puede concluir de las pruebas realizadas con el escenario simulado que el eco recibido del objetivo estará a una distancia igual o ligeramente superior a la mitad de la distancia a la que se encuentra el satélite puesto que la distancia representada en el mapa sigue la siguiente ecuación [53]:

$$R_R + R_T = 2a \quad 12$$

$$a = \frac{R_R + R_T}{2} \quad 13$$

donde R_R es la distancia del receptor al objetivo y R_T la distancia del transmisor al objetivo como se puede observar en la Figura 2-3. La distancia $2a$ es igual al eje mayor de la elipse formada por este escenario. La distancia mostrada en el eje de abscisas de los mapas generados es igual a “ a ”, que depende de la posición del receptor, transmisor y objetivo. Como se ha podido observar en las pruebas realizadas, esta ecuación se cumple, puesto que conforme se aumenta la distancia del satélite, “ a ” también aumenta y los objetivos se detectan a una mayor distancia. Esta distancia es aproximadamente la mitad de R_T debido a que en el escenario se usan satélites GPS que suelen orbitar a unos 20.000 km de altura [54]. Este valor es significativamente mayor que R_R , que ronda los rangos de 200 a 300 metros en las pruebas realizadas. Obteniendo para una distancia de 20 km detecciones a 10-11 km, para 200 km detecciones a 101-101,5 km y para 20.000 km detecciones a 10.008 km.

4.1.2 Procesado de señales reales

Una vez se ha probado y analizado el código en un escenario simulado se ha continuado con el procesado de señales reales.

El objetivo es obtener un mapa distancia-Doppler similar al que obtuvieron en el experimento con satélites BeiDou como el de la Figura 2-5.

El método que se va a seguir es el siguiente: primero se procesan la señal de referencia y la señal de vigilancia para obtener los satélites con mayor correlación y posteriormente se genera la CAF y el mapa distancia-Doppler del eco reflejado para el satélite obtenido.

4.1.2.1 Apuntamiento a un barco civil

En esta primera prueba, el sistema contaba con ambas antenas, de referencia y vigilancia, ubicadas en el tejado de los laboratorios de investigación. Además, el dispositivo SDR utilizado en este caso ha sido el USRP X310, en sustitución del ADALM-Pluto conectado previamente a un GPSDO externo. Esta elección se debe a que el USRP X310 dispone de un Oscilador Disciplinado por GPS interno, lo que elimina la necesidad de utilizar un GPSDO externo y simplifica notablemente la configuración del sistema, además de evitar el uso de una tercera antena adicional para la sincronización GPS. La configuración utilizada se puede ver en la

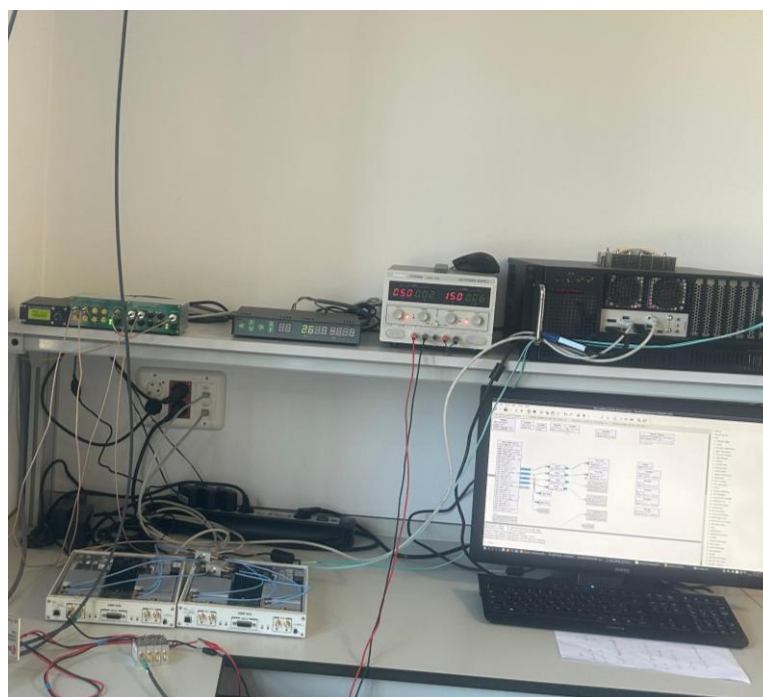


Figura 4-9 USRP X310 conectado a antena de referencia y vigilancia.

Se apuntó al barco de la Figura 4-10, que es un carguero de unos 80 m de eslora y 14 m de manga. La frecuencia de muestreo utilizada ha sido de 4 MHz y se han procesado 4000 muestras para estimar el PRN.



Figura 4-10 Barco de 80 m de eslora y 15 m de manga.

Al procesar las señales recibidas para averiguar qué satélite tiene una mayor correlación se obtiene:

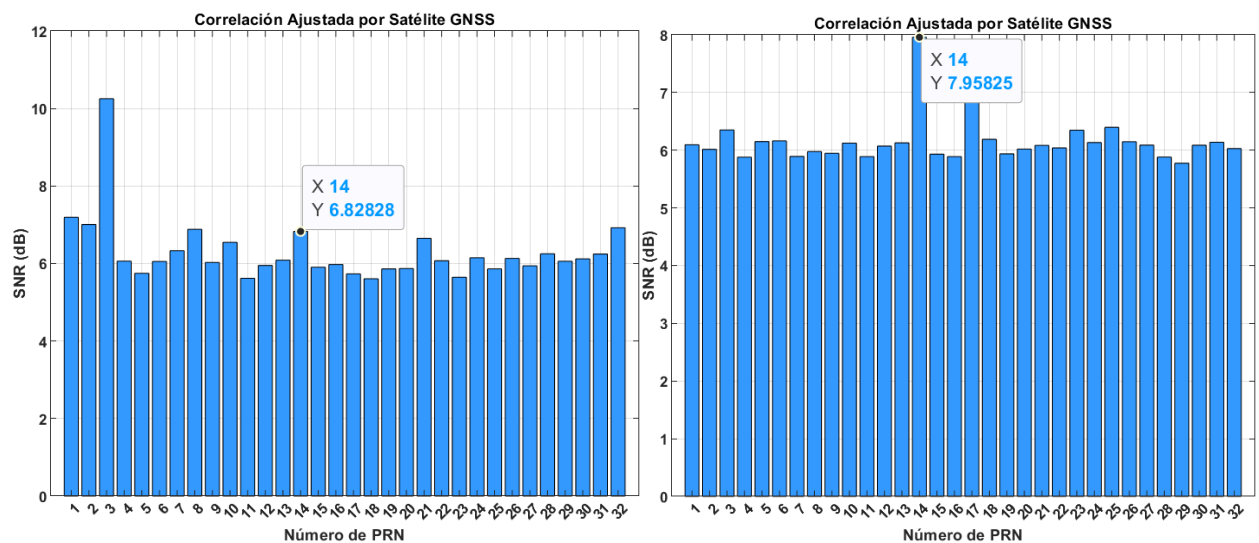


Figura 4-11 Gráfica comparativa del SNR de cada satélite en dB para señal de referencia (izquierda) y señal de vigilancia (derecha) para apuntamiento al mercante.

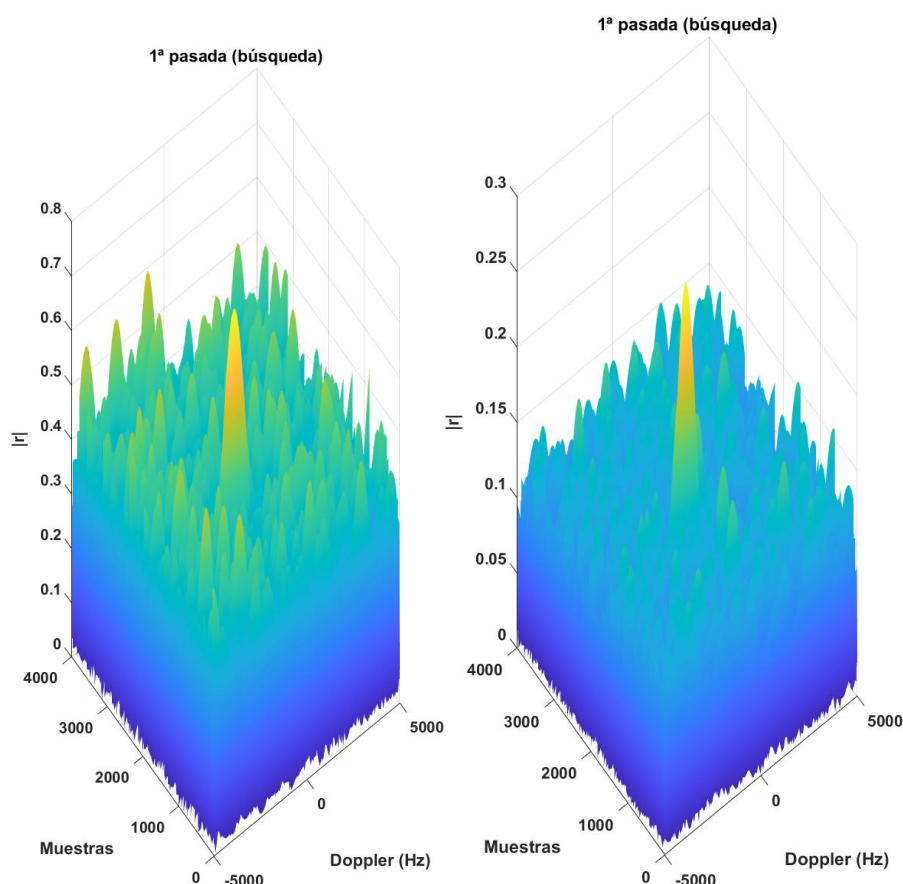


Figura 4-12 Figuras de correlación para el satélite 14 de la constelación GPS. Canal de referencia (izquierda) y canal de vigilancia (derecha).

El satélite que presenta el pico de mayor correlación en el eco reflejado del barco es el 14, también se ve que en el canal de referencia se obtiene una correlación mayor que la media para el satélite 14 (Figura 4-11). Una vez se ha decidido qué satélite usar se ajustan los parámetros en el script que genera el mapa distancia-Doppler, donde ajustamos la frecuencia de muestreo utilizada, el número de muestras, CPI y los límites que queremos observar. Como sabemos que el satélite 14 orbita unos 20.000 km de altura se espera que la detección del barco sea en el rango de 10.000 y 10.060 km.

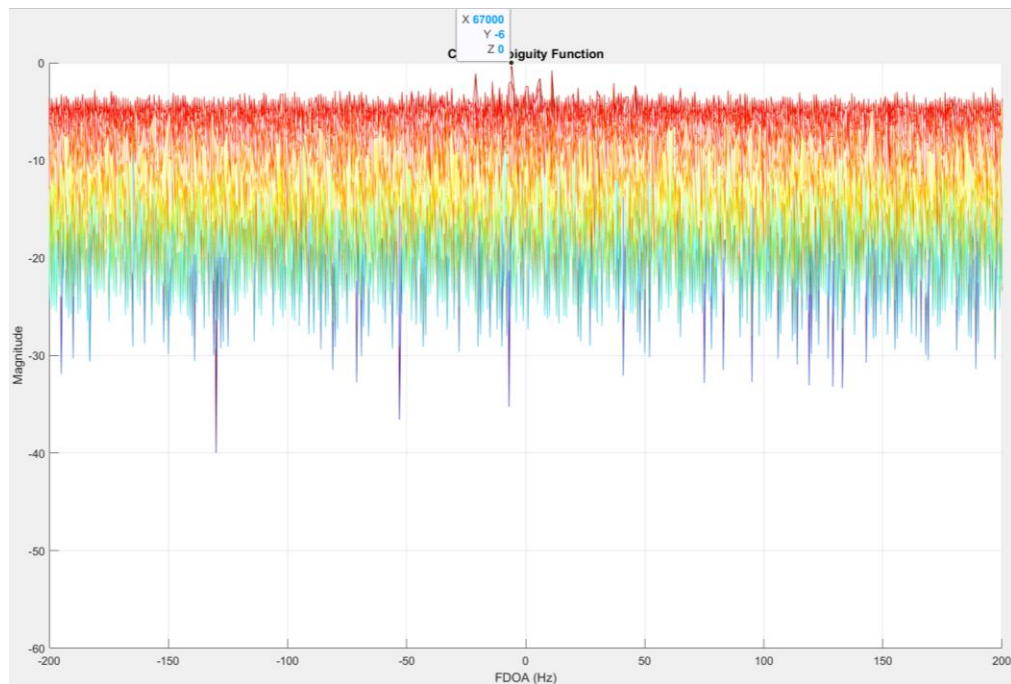


Figura 4-13 Función de ambigüedad cruzada para satélite 1.

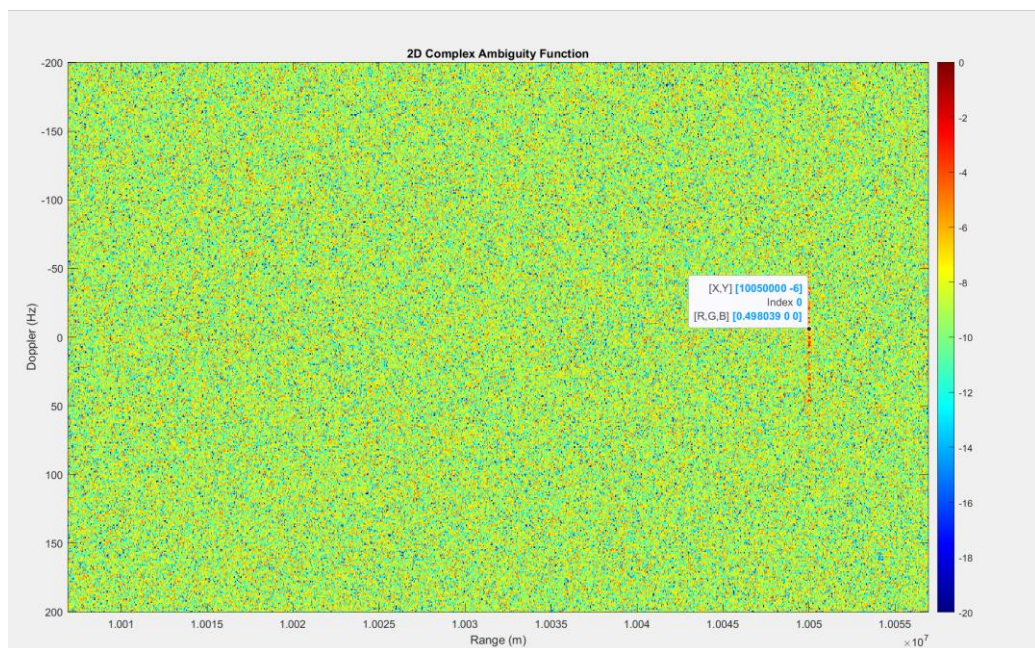


Figura 4-14 Mapa distancia-Doppler para satélite 14.

Se comprueba en ambas figuras que se ha conseguido una detección del barco a 10.050 km con un Doppler de -6 Hz. La distancia a la que se ha obtenido el blanco concuerda con lo esperado según las pruebas realizadas en el escenario simulado y el Doppler de -6 Hz también es el que se puede esperar de un mercante saliendo de la ría.

4.1.2.2 Medición del S-81 Isaac Peral

Una vez se ha obtenido una detección para un barco civil se ha intentado detectar barcos militares. Aprovechando el paso del S-81 Isaac Peral en la Escuela Naval Militar, se han tomado medidas cuando se encontraba navegando en las inmediaciones de la ría de Pontevedra como se aprecia en la Figura 4-15. En este caso se han tomado las medidas con una frecuencia de muestreo de 20 MHz y un número de

muestras que asciende a las 20.000 para conseguir una mayor resolución, aunque también aumentando la carga computacional.



Figura 4-15 Apuntamiento al S-81 Isaac Peral y lancha pequeña rápida.

Una vez captadas las señales se procede de la misma manera que en el apartado 4.1.2.1, primero se obtiene la medida del satélite con mayor correlación en la señal de vigilancia y comprobamos que también se aprecia en la señal de referencia.

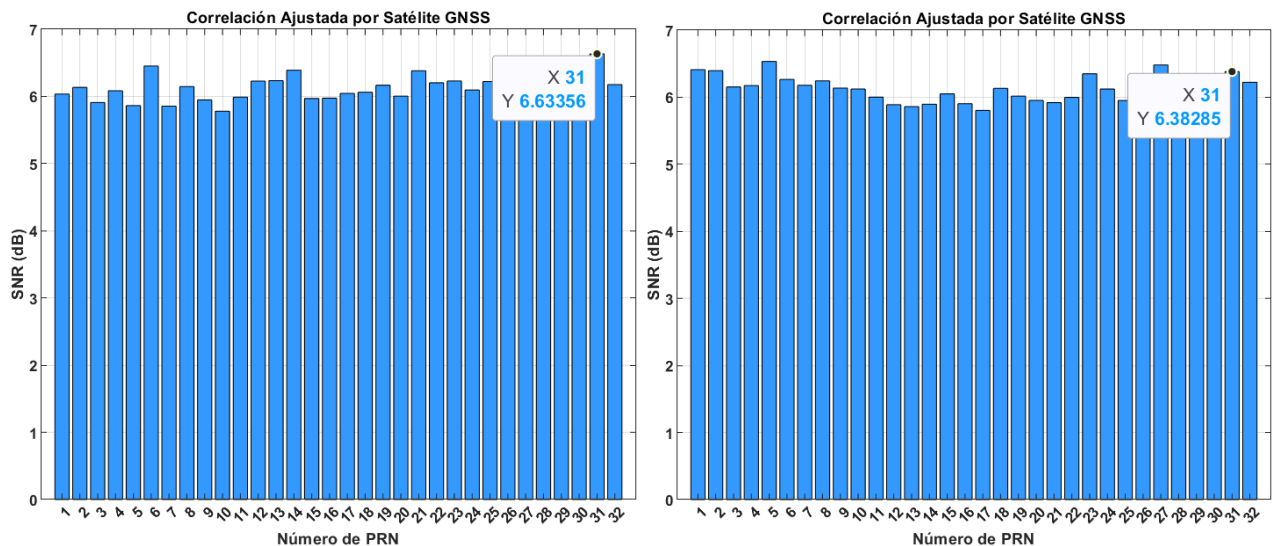


Figura 4-16 Gráfica comparativa del SNR de cada satélite en dB para señal de referencia (izquierda) y señal de vigilancia (derecha) para apuntamiento al S-81.

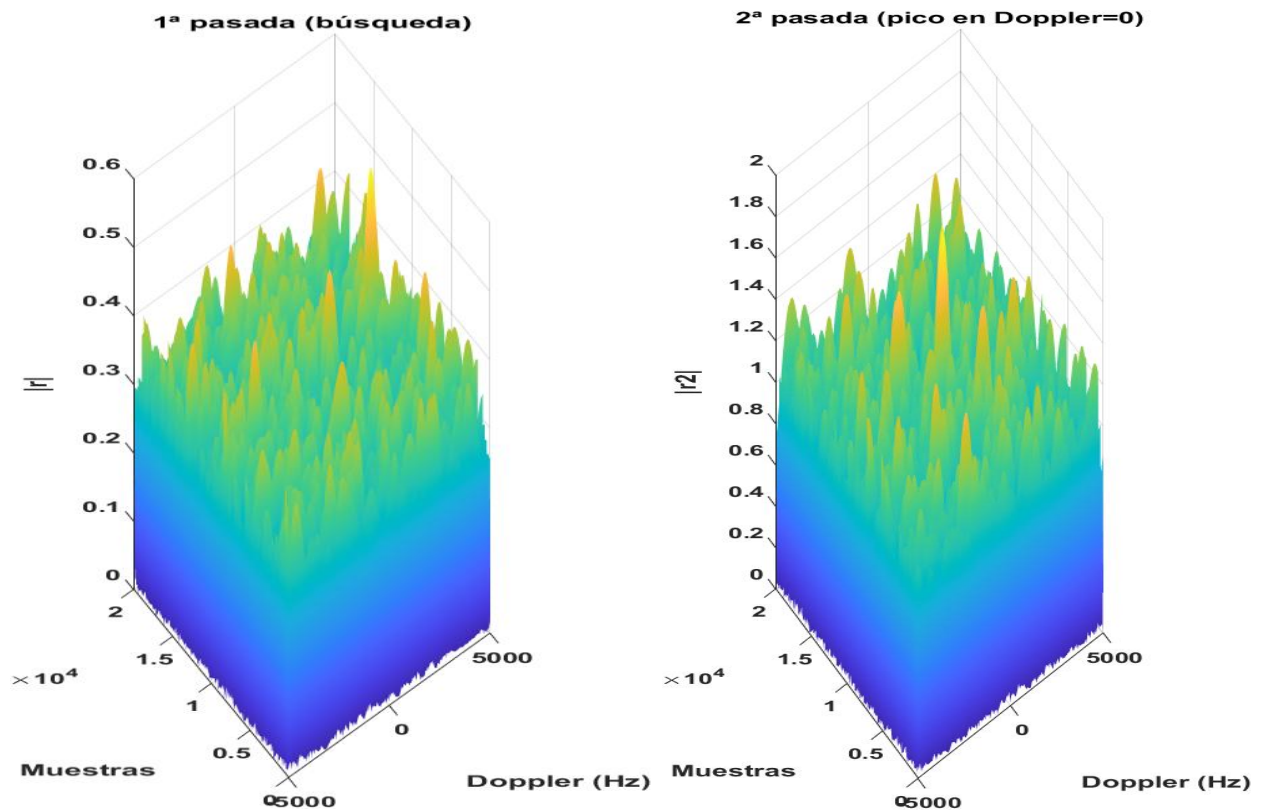


Figura 4-17 Figuras de correlación para el satélite 31 de la constelación GPS. Canal de referencia (izquierda) y canal de vigilancia (derecha).

En este caso que mejores propiedades de correlación ofrece es el de PRN 31. Al ejecutar el código para comprobar si detectamos el submarino obtenemos:

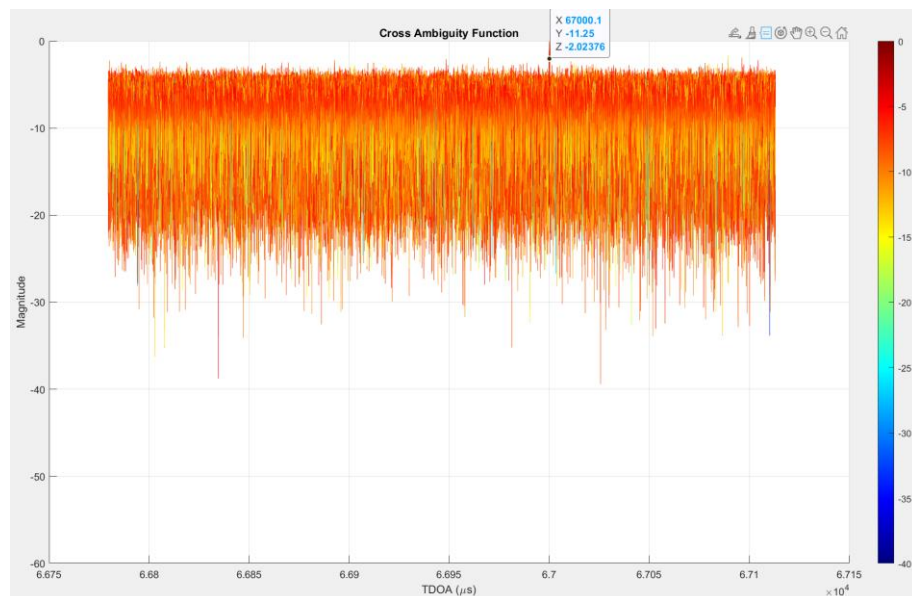


Figura 4-18 Función de ambigüedad cruzada para satélite 31.

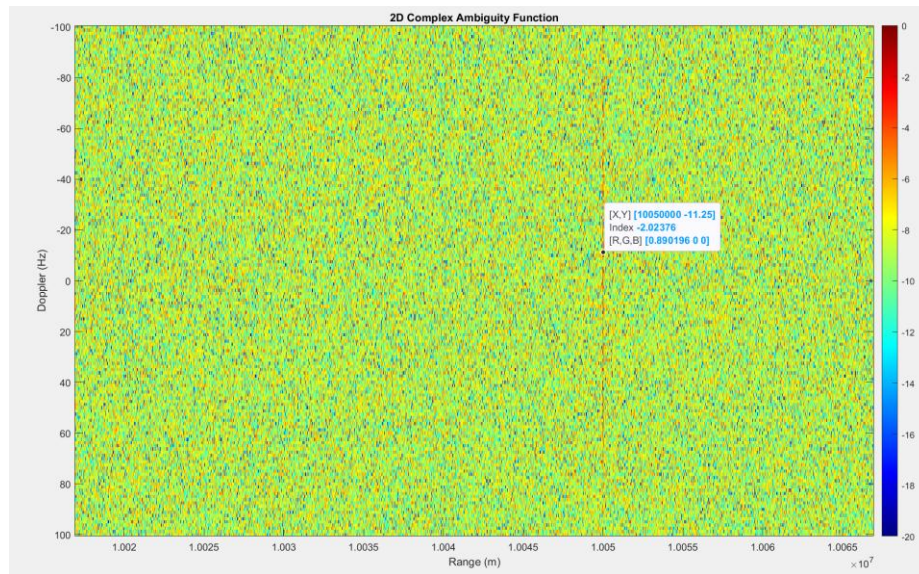


Figura 4-19 Mapa distancia-Doppler para satélite 31.

En este caso se puede apreciar una detección a 10.050 km de distancia con un Doppler de -11,25 Hz, resultados que concuerdan con lo esperado según las simulaciones.

Como era de esperar, ambas detecciones tanto la del barco civil como militar son similares a las obtenidas en el experimento con satélites BeiDou.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este último apartado se valorará todo el trabajo realizado referente al proceso de investigación e implementación del sistema radar pasivo planteado. En este cierre se sintetizan los objetivos planteados inicialmente y su relación con los resultados obtenidos. Además, se discuten las principales dificultades encontradas durante el desarrollo y las estrategias adoptadas para superarlas, evidenciando la viabilidad y las limitaciones del enfoque propuesto. Con estas conclusiones se busca no solo consolidar los logros alcanzados, sino también establecer una base sólida para futuras mejoras y líneas de investigación en el ámbito de la detección pasiva en entornos marítimos.

5.1 Viabilidad del uso de satélites GPS como iluminador de oportunidad

El objetivo principal del trabajo es demostrar la viabilidad del uso de señales GPS como iluminador de oportunidad de un radar pasivo debido a todas las ventajas, especialmente en el ámbito militar que acarrea un sistema de estas características.

5.1.1 Detección de objetivos

Los resultados experimentales han confirmado que el sistema desarrollado es capaz de detectar objetivos en el mapa distancia-Doppler en un entorno marítimo utilizando únicamente las señales GNSS como iluminador de oportunidad. Esto se debe principalmente a la función de ambigüedad cruzada, puesto que el uso de esta función ha permitido identificar la presencia de objetivos mediante el análisis de picos de correlación, permitiendo identificar los patrones de los códigos PRN aún cuando están por debajo del umbral del ruido.

Los resultados obtenidos han permitido detectar dos tipos de blancos: uno de naturaleza civil (4.1.2.1) y otro de carácter militar (4.1.2.2), lo que valida el correcto funcionamiento del sistema desarrollado. En particular, la detección del blanco militar representa un resultado significativo, ya que demuestra la viabilidad del uso de este sistema en entornos operativos reales. Este hallazgo respalda la posible integración de sistemas de radar pasivo basados en señales GNSS a bordo de buques de la flota, permitiendo así aprovechar las ventajas tácticas que ofrecen estos sistemas, como su capacidad para operar de forma discreta y sin emisiones activas, lo que reduce el riesgo de ser detectados por sistemas de guerra electrónica adversarios.

La comparación de los resultados obtenidos, tanto en simulaciones controladas como en estudios previos realizados con sistemas GNSS, revela una coherencia significativa en los resultados. Esta consistencia valida la precisión de la metodología implementada y respalda la fiabilidad del algoritmo de procesamiento de señal empleado.

5.1.2 Robustez frente a señales débiles

Las señales GNSS presentan una potencia extremadamente baja en el momento en que alcanzan la superficie terrestre. Esto supone un desafío adicional para sistemas de radar pasivo basados en estas señales. No obstante, el sistema desarrollado ha demostrado ser capaz de detectar objetivos en condiciones de baja SNR gracias a la integración coherente de datos y a la corrección Doppler.

5.1.3 Ventajas de un entorno marítimo libre de interferencias

En alta mar, la actividad electromagnética es considerablemente menor en comparación con entornos urbanos, portuarios o costeros. El nivel de ruido de fondo se reduce considerablemente. Dado que el sistema de radar pasivo se basa en detectar señales GNSS reflejadas, esta reducción del ruido ambiental permite que la señal reflejada, aunque débil, destaque con mayor claridad frente al nivel de ruido. Además, el entorno marítimo presenta condiciones de propagación más predecibles en comparación con entornos terrestres, donde las irregularidades del terreno, las edificaciones o los obstáculos físicos afectan la trayectoria de las señales GNSS. Sobre la superficie del mar, las señales se propagan con menor atenuación y sin obstrucciones significativas, lo que permite que las señales GNSS lleguen al receptor con una menor degradación.

5.2 Limitaciones observadas

A pesar de haber demostrado la viabilidad del sistema de radar pasivo basado en señales GPS, se identificaron algunas limitaciones que afectan a su eficiencia en ciertos escenarios o condiciones operativas específicas. Estas limitaciones se derivan tanto de las propiedades físicas de las señales GNSS como de aspectos técnicos relacionados con el diseño del sistema.

5.2.1 Sensibilidad a la geometría del sistema biestático

El sistema desarrollado emplea un esquema biestático, en el que el transmisor y el receptor se encuentran en ubicaciones distintas. Esta configuración introduce ciertas complejidades en la interpretación de la distancia medida. En un radar biestático, la distancia estimada no corresponde directamente a la distancia real al objetivo, sino que corresponde a la distancia biestática. Esta ambigüedad hace que la detección del objetivo en el mapa distancia-Doppler no refleje con precisión la posición real del blanco sin un análisis adicional de la geometría del sistema que requiere del conocimiento de la posición exacta del satélite transmisor, el cual se encuentra en constante movimiento.

5.2.2 Sensibilidad del sistema en condiciones de baja SNR

El sistema desarrollado ha demostrado ser eficaz en la detección de objetivos en condiciones de baja relación señal a ruido, sin embargo, durante las pruebas experimentales se identificaron ciertos límites en su rendimiento cuando la SNR alcanzaba valores muy reducidos.

Dado que las señales GNSS llegan a la superficie terrestre con una potencia extremadamente baja, el eco reflejado por el objetivo es aún más débil, lo que sitúa estas señales cerca del umbral de detección. Esta característica genera ciertos desafíos que limitan la fiabilidad del sistema en determinadas condiciones. Cuando el objetivo era muy pequeño o se encontraba a una distancia muy elevada el sistema no era capaz de detectarlo.

5.3 Líneas futuras

Entre las líneas futuras se vislumbran diversas mejoras que podrían transformar esta tecnología en una solución integral capaz de proporcionar una localización precisa y un seguimiento eficiente de objetivos en tiempo real.

5.3.1 Integración de múltiples satélites

Una de las principales limitaciones observadas en el sistema actual es que solo se utiliza el satélite que genera el mayor pico de correlación en el mapa distancia-Doppler. Esto permite estimar únicamente la distancia biestática del objetivo, una medida que, por sí sola, no proporciona información directa sobre su ubicación precisa. Para mejorar esta capacidad, se plantea incorporar información proveniente de múltiples satélites. Esta ampliación permitiría aplicar técnicas de multilateración, un método que se basa en la intersección de múltiples elipsoides de posición generados a partir de las distintas mediciones biestáticas de manera similar al funcionamiento de sistemas de posicionamiento como GPS.

La incorporación de esta técnica aportaría notables ventajas. Por un lado, permitiría obtener una localización exacta del objetivo en coordenadas 2D o 3D. Además, al combinar las mediciones de varios satélites, se reducirían significativamente los errores asociados a la incertidumbre en la distancia biestática. Esta redundancia también proporcionaría una mayor robustez frente a pérdidas temporales de señal o interferencias en uno de los canales GNSS.

No obstante, esta mejora también plantea ciertos desafíos técnicos, como el diseño de un algoritmo capaz de gestionar eficientemente la combinación de datos de múltiples satélites en tiempo real, así como la necesidad de garantizar una sincronización precisa para evitar distorsiones en la estimación de la posición.

5.3.2 Beamforming y procesamiento espacial

Otra línea de mejora que se plantea es la implementación de técnicas de *beamforming*, que permitirían optimizar la recepción de señales enfocando el haz del sistema en una dirección específica.

Esta técnica se basa en el uso de un conjunto de antenas dispuestas en un array, cuyas señales se combinan de forma que se refuerce la recepción desde la dirección de interés y se atenúen las provenientes de otras direcciones. Su incorporación aportaría beneficios clave en la mejora del SNR. Además, el *beamforming* permitiría mejorar significativamente la resolución angular, facilitando así la distinción entre objetivos cercanos y evitando que se produzcan detecciones erróneas por superposición de ecos.

La implementación del *beamforming*, sin embargo, requerirá el diseño de un sistema de antenas adecuado, así como el desarrollo de algoritmos capaces de controlar dinámicamente el haz de recepción para seguir la trayectoria del objetivo.

5.3.3 Ampliación del tiempo de toma de muestras

Por último, se plantea como mejora la ampliación del tiempo de toma de muestras, una estrategia que puede incrementar significativamente la precisión del sistema en la estimación de la velocidad del objetivo. Actualmente, el sistema emplea un intervalo de observación limitado, lo que restringe la capacidad de detección en condiciones de desplazamiento Doppler reducido. Ampliar este intervalo permitiría obtener una mayor resolución en el dominio Doppler, facilitando así la detección de objetivos que se desplacen lentamente o que presenten variaciones sutiles en su trayectoria. Además, un mayor tiempo de integración permite acumular más energía de la señal GNSS reflejada, lo que mejora la detección de objetivos débiles o de baja reflectividad.

No obstante, esta mejora también exige un mayor tiempo de integración que implica manejar volúmenes considerablemente mayores de información, lo que podría ralentizar el procesamiento del sistema si no se optimizan adecuadamente los recursos computacionales.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNCTAD, «Informe sobre el transporte marítimo 2023 (Panorama general)».
- [2] H. D. Griffiths y C. J. Baker, *An introduction to passive radar*. Artech House, 2022.
- [3] R. Blázquez García, «Passive Radar Techniques based on Emerging Illuminators of Opportunity and Software-Defined Radio», PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2024. doi: 10.20868/UPM.thesis.80591.
- [4] ARMADA, «Líneas Generales de la Armada 2025». [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/html/home/LGenerales2025.pdf>
- [5] José María Núñez Ortuño, José González Coma, María Álvarez Hernández, Francisco M. Troncoso Pastoriza, y Rubén Nocelo López, «Análisis de configuraciones MIMO para la mejora de las prestaciones de RAdares PASivos con aplicación al ámbito MARítimo (MIRAPAMAR).», 2021.
- [6] H. Kuschel, D. Cristallini, y K. E. Olsen, «Tutorial: Passive radar tutorial», *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 34, n.º 2, pp. 2-19, feb. 2019, doi: 10.1109/MAES.2018.160146.
- [7] *IEEE Standard Radar Definitions*. doi: 10.1109/IEEESTD.1998.86185.
- [8] C. L. Teo, «Bistatic Radar System Analysis and Software Development».
- [9] H. Griffiths y N. Willis, «Klein Heidelberg – a WW2 bistatic radar system that was decades ahead of its time».
- [10] J. Baniak, D. G. Baker, A. M. Cunningham, y L. Martin, «Silent Sentry™ Pasive Surveillance».
- [11] H. Kuschel y D. O’hagan, «Passive radar from history to future», presentado en 11-th International Radar Symposium, IEEE, 2010, pp. 1-4.
- [12] R. Wang, Y. Wang, Y. Li, W. Cao, y Y. Yan, «Geometric Algebra-Based ESPRIT Algorithm for DOA Estimation», *Sensors*, vol. 21, n.º 17, p. 5933, sep. 2021, doi: 10.3390/s21175933.

- [13] J. M. Núñez-Ortuño, J. P. González-Coma, R. Nocelo López, F. Troncoso-Pastoriza, y M. Álvarez-Hernández, «Beamforming Techniques for Passive Radar: An Overview», *Sensors*, vol. 23, n.º 7, p. 3435, mar. 2023, doi: 10.3390/s23073435.
- [14] D. Correa, «El Efecto Doppler», 1990.
- [15] P. Gomez-del-Hoyo, N. del-Rey-Maestre, M.-P. Jarabo-Amores, D. Mata-Moya, y M.-C. Benito-Ortiz, «Improved 2D Ground Target Tracking in GPS-Based Passive Radar Scenarios», *Sensors*, vol. 22, n.º 5, p. 1724, feb. 2022, doi: 10.3390/s22051724.
- [16] N. J. Willis, *Bistatic Radar*. SciTech Publishing, 2005.
- [17] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, y E. Wasle, *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [18] «GLONASS Performances - Navipedia». Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Performances
- [19] «GPS.gov: Other Global Navigation Satellite Systems (GNSS)». Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gps.gov/systems/gnss/>
- [20] «Constellation Information | European GNSS Service Centre (GSC)». Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>
- [21] «GPS.gov: GPS Overview». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gps.gov/systems/gps/>
- [22] Simón Fajardo, Dinibel Perez, y N. Hurtado, «MODELADO DEL CONTENIDO TOTAL ELECTRONICO VERTICAL USANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES», 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.19225.75366.
- [23] H. Ma, M. Antoniou, A. G. Stove, J. Winkel, y M. Cherniakov, «Maritime Moving Target Localization Using Passive GNSS-Based Multistatic Radar», *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 56, n.º 8, pp. 4808-4819, ago. 2018, doi: 10.1109/TGRS.2018.2838682.
- [24] F. Santi, M. Bucciarelli, D. Pastina, M. Antoniou, y M. Cherniakov, «Spatial resolution improvement in GNSS-based SAR using multi-static acquisitions and feature extraction».
- [25] Z. Li, C. Huang, J. Wu, y J. Yang, «Investigation and First Experiment of BeiDou-Based Passive Radar Vessel Target Imaging», en *2022 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC)*, Gran Canaria, Spain: IEEE, may 2022, pp. 1-4. doi: 10.23919/AT-AP-RASC54737.2022.9814205.
- [26] «Beamforming». Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/discovery/beamforming.html>

- [27] E. D. Kaplan y C. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition*. Artech House, 2017.
- [28] «Definición de Trilateración | Diccionario SIG». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/trilateration>
- [29] H. E. Azzouzi, «Pratap Misra, Per Enge Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance Ganga Jamuna Press (2006)», *Glob. Position. Syst. Signals Meas. Perform.*, ene. 2006, Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/115253684/Pratap_Misra_Per_Enge_Global_Positioning_System_Signals_Measurements_and_Performance_Ganga_Jamuna_Press_2006_
- [30] «Foundations of Global Navigation Satellite Systems (GNSS)». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.meted.ucar.edu/GIS/GNSS_positioning/navmenu.php?tab=1&page=1-4-0&type=flash
- [31] A. P. Gómez, V. Ríos, J. Lagori, y G. Mansilla, «Recepción de señales de satélites GPS», *Geofísica Int.*, vol. 31, n.º 2, 2012.
- [32] «Foundations of Global Navigation Satellite Systems (GNSS)». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.meted.ucar.edu/GIS/GNSS_positioning/navmenu.php?tab=2&page=1-2-0&type=flash
- [33] R. B. Langley, «Dilution of precision», *GPS World*, vol. 10, n.º 5, pp. 52-59, 1999.
- [34] G. Seeber, *Satellite geodesy*. Walter de gruyter, 2003.
- [35] M. Hernandez-Pajares, J. M. J. Zornoza, y J. S. Subirana, «Procesado de Datos GPS: código y fase Algoritmos, Técnicas y Recetas».
- [36] «IS-GPS-200N.pdf». Accedido: 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf>
- [37] J.-M. Zogg, «GPS basics», *Switz. U-Blox*, 2002.
- [38] B. Ashman, «Global Navigation Satellite Systems and How They Work».
- [39] V. Benigno, «Descripción y representación de las señales GNSS».
- [40] M. Meller, «Efficient Signal Processing Algorithms for Passive Radars».
- [41] W. Feixing, Z. Yongfeng, Z. Hongzhong, y F. Qiang, «Method of Resolving the Range Ambiguity for High PRF Stepped-Frequency Radar», en *2006 CIE International Conference on Radar*, Shanghai, China: IEEE, oct. 2006, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICR.2006.343278.
- [42] R. Klemm, *Principles of Space-time Adaptive Processing*. IET, 2002.
- [43] «MA600.A.ABC.006».

- [44] «L-Band Antenna», nolle.engineering. Accedido: 4 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://nolle.engineering/en/l-band-antenna/>
- [45] «EVK-M8T_UserGuide_(UBX-14041540)».
- [46] «ADALM-PLUTO Overview [Analog Devices Wiki]». Accedido: 4 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto>
- [47] «X300_X310_Spec_Sheet_2024-01-23».
- [48] P. D. Groves y Z. Jiang, «Height Aiding, C/N_0 Weighting and Consistency Checking for GNSS NLOS and Multipath Mitigation in Urban Areas», *J. Navig.*, vol. 66, n.º 5, pp. 653-669, sep. 2013, doi: 10.1017/S0373463313000350.
- [49] «About GNU Radio». Accedido: 1 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gnuradio.org/about/>
- [50] T. F. Collins, R. Getz, D. Pu, y A. M. Wyglinski, *Software-defined radio for engineers*. en Artech House mobile communications series. Norwood, MA: Artech House, 2018.
- [51] Ministerio de Economía y Empresa, *Real Decreto 391/2019, de 21 de junio, por el que se aprueba el Plan Técnico Nacional de la Televisión Digital Terrestre y se regulan determinados aspectos para la liberación del segundo dividendo digital*, vol. BOE-A-2019-9513. 2019, pp. 67225-67311. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/06/21/391>
- [52] M. A. Lombardi, «The Use of GPS Disciplined Oscillators as Primary Frequency Standards for Calibration and Metrology Laboratories», *NCSLI Meas.*, vol. 3, n.º 3, pp. 56-65, sep. 2008, doi: 10.1080/19315775.2008.11721437.
- [53] «Tracking Using Bistatic Range Detections». Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/fusion/ug/track-using-bistatic-range-detections.html>
- [54] «Sistema de Posicionamiento Global (GPS)». Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://lweb.cfa.harvard.edu/space_geodesy/ATLAS/gps_es.html
- [55] R. Fernández-Bravo y M. Ángel, «Impacto sobre la salud de las emisiones electromagnéticas: radares y tecnología 5G».
- [56] M. Boudreau, «Acoustic Rapid COTS Insertion: A Case Study in Modular Open Systems Approach for Spiral Development», en *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, San Antonio, TX: IEEE, abr. 2007, pp. 1-6. doi: 10.1109/SYSOSE.2007.4304229.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

En la realización de cualquier proyecto se deben tener en cuenta los factores sociales, económicos y ambientales que acarrea, de manera que existan principios que lo regulen. Sin estos principios rectores se arriesga impactar negativamente algún factor mencionado obteniendo efectos no deseados. Es por ello por lo que se debe fomentar una metodología y desarrollo favorables y consciente que busque cumplir los objetivos minimizando cualquier riesgo y mejorando el panorama actual.

Como se explica en el primer capítulo del trabajo (Introducción y objetivos), durante el desarrollo del presente TFG se ha tenido en cuenta la posible aplicación del radar pasivo en el ámbito de la seguridad ciudadana y la gestión del tráfico marítimo. Este sistema puede contribuir a mejorar la seguridad de infraestructuras críticas y prevenir incidentes mediante la detección de amenazas potenciales sin necesidad de emitir señales adicionales.

En cuanto a la seguridad y salud, se ha priorizado la protección del operador y del entorno. El sistema radar pasivo no emite radiación activa, lo que minimiza significativamente los riesgos de exposición a radiación electromagnética. Esta característica es especialmente relevante dado que las emisiones electromagnéticas de radares activos pueden generar efectos térmicos adversos sobre el cuerpo humano, tales como el incremento de la temperatura en tejidos expuestos, pudiendo derivar en efectos nocivos tras una exposición prolongada [55].

Desde el punto de vista ambiental, la tecnología de radar pasivo reutiliza señales de navegación por satélite ya existentes, eliminando la necesidad de emisores adicionales y reduciendo así el consumo energético del sistema. Esta solución contribuye a la disminución del impacto ambiental asociado a los sistemas de radar tradicionales, que suelen operar con mayores consumos energéticos y requieren infraestructuras adicionales que impactan en el medio ambiente.

En términos económicos e industriales, el diseño del sistema se ha basado en el uso de componentes “*Commercial-Off-The-Shelf*” (COTS), lo que permite implementar la solución de forma económica. La adopción de tecnología COTS facilita la integración de componentes ya probados y disponibles en el mercado, reduciendo los tiempos de desarrollo y los costos operativos. Esta estrategia ha sido ampliamente documentada en sistemas militares, como el programa *Acoustic Rapid COTS Insertion (ARCI)* [56], que mejoró la capacidad del sistema de sonar de la Marina de los EE. UU. reduciendo costos y optimizando el soporte logístico.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La tecnología del radar pasivo se ha consolidado como una herramienta innovadora en el ámbito de la detección y seguimiento de objetivos sin necesidad de emitir señales propias. Esta capacidad, si bien ofrece ventajas significativas en términos de sigilo y eficiencia energética, también plantea importantes cuestiones éticas y sociales que deben considerarse en su implementación y uso

En este trabajo se estudia el uso del radar pasivo explotando satélites GNSS como iluminadores de oportunidad. Sin embargo, se ha visto que existe la posibilidad de usar emisoras de radio, televisión o incluso dispositivos móviles para detectar objetos en movimiento. Esto plantea interrogantes sobre el posible uso indebido de esta tecnología en actividades de vigilancia no autorizada. Aunque el radar pasivo no registra información personal explícita, su capacidad para rastrear patrones de movimiento podría ser utilizada para identificar individuos o vehículos en determinados entornos.

Por otro lado, el desarrollo de radares pasivos ha ganado atención en el ámbito militar debido a su capacidad para detectar aeronaves o vehículos sin ser detectados, otorgando una ventaja estratégica en operaciones defensivas. Sin embargo, también existe una cara ofensiva al uso de este tipo de sistemas de detección, como es el caso de muchos de los misiles que emplean las grandes potencias.

En resumen, si bien es cierto que estas tecnologías se pueden usar para mejorar y afianzar la seguridad de infraestructuras como aeropuertos o puertos comerciales, es necesario hacerse dos preguntas: ¿Dónde se establece el límite entre el uso legítimo de esta tecnología para la seguridad pública y la posible invasión de la privacidad individual? Y ¿Es éticamente aceptable desarrollar tecnologías que puedan potenciar conflictos militares, incluso si su intención inicial es la defensa?

ANEXO III EXPLICACIÓN MATEMÁTICA DE LOS CÓDIGOS PRN

Como ya se ha explicado en el punto 2.2.3, los PRN se generan utilizando una secuencia de registros de bits donde la siguiente salida depende de una combinación lineal de los valores actuales. Estos registros de desplazamiento G1 y G2 operan con polinomios primitivos de la forma:

$$G1(x) = x^{10} + x^3 + 1 \quad 14$$

$$G2(x) = x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + 1 \quad 15$$

Esto significa que la nueva entrada de G1 se calcula como:

$$G1(x) = G1(n - 3) \oplus G1(n - 10) \quad 16$$

Funcionamiento de G1:

1. Inicialización: se carga un valor inicial en los 10 registros, generalmente todos 1's (1111111111).
2. Desplazamiento: en cada paso de tiempo, el contenido se desplaza una posición hacia la derecha.
3. Generación del nuevo bit: se realiza la operación XOR entre los bits en las posiciones 3 y 10 del instante anterior. Este nuevo bit se introduce en la primera posición del registro y se obtiene el bit de salida correspondiente.

Esta configuración garantiza que se genere una secuencia pseudoaleatoria de 1023 bits antes de repetirse.

G2 es similar a G1, pero tiene una estructura de retroalimentación más compleja, lo que le permite generar secuencias con características distintas.

La nueva entrada de G2 será:

$$G2(x) = G2(n - 2) \oplus G2(n - 3) \oplus G2(n - 6) \oplus G2(n - 8) \oplus G2(n - 9) \oplus G2(n - 10) \quad 17$$

Funcionamiento de G2:

1. Inicialización: se carga un valor inicial en los 10 registros, típicamente todos 1's (1111111111).
2. Desplazamiento: en cada paso de tiempo, los bits se desplazan una posición a la derecha.
3. Generación del nuevo bit: se realiza la operación XOR entre los bits en las posiciones 2, 3, 6, 8, 9 y 10 del instante anterior. El resultado se introduce en la primera posición del registro y se obtiene el bit de salida correspondiente.

Al igual que G1, G2 también genera una secuencia pseudoaleatoria de 1023 bits antes de repetirse.

La ecuación general para obtener el código PRN final de un satélite específico es:

$$PRN(n) = G1(n) \oplus G2(n - D)$$

donde:

- $G1(n)$ y $G2(n)$ son dos secuencias de 1023 bits generadas por registros de desplazamiento de 10 etapas.
- $G2(n - D)$ es una versión desplazada de $G2(n)$ con un retardo específico definido por cada PRN.
- $\oplus$ representa la operación de suma módulo 2 (XOR).
- D es el desplazamiento específico asignado a cada satélite.

Esto permite generar 37 códigos distintos, aunque en la constelación original solo se usaban 32 PRN.

Para ilustrar el proceso de generación de un código PRN, consideremos el caso del PRN 1 de la constelación GPS.

Inicialmente, tanto $G1$ como $G2$ se inicializan con el estado 1111111111 (todos los bits en 1).

Generación de la secuencia $G1$:

$$G1(x) = G1(n - 3) \oplus G1(n - 10)$$

Paso n	Estado G1	Nuevo bit generado (XOR entre G1(3) y G1(10))
0	1111111111	1
1	1111111111	1
2	1111111111	1
3	1111111111	1
4	1111111110	0
5	1111111100	0
6	1111111000	0
7	1111110000	0
8	1111100000	0
9	1111000000	0

Tabla 1 Ejemplo de los primeros 10 ciclos de actualización en G1.

Esta secuencia continúa hasta generar 1023 bits, momento en el que se repite el ciclo.

Generación de la secuencia $G2$:

$$G2(x) = G2(n - 2) \oplus G2(n - 3) \oplus G2(n - 6) \oplus G2(n - 8) \oplus G2(n - 9) \oplus G2(n - 10)$$

Paso n	Estado G2	Nuevo bit generado (XOR entre posiciones 2, 3, 6, 8, 9, 10)
0	1111111111	1
1	1111111111	1
2	1111111111	1

3	1111111111	1
4	1111111110	0
5	1111111100	0
6	1111111000	0
7	1111110000	0
8	1111100000	0
9	1111000000	0

Tabla 2 Ejemplo de los primeros 10 ciclos de actualización en G2.

Al igual que G1, la secuencia G2 continúa hasta completar los 1023 bits.

Para el satélite PRN 1, los valores de desfase son 2 y 6 (Figura 2-12) esto significa que la secuencia G2 se modifica de la siguiente manera:

$$G2(n - D) = G2(n - 2) \oplus G2(n - 6)$$

Paso n	$G2(n - 2)$	$G2(n - 6)$	$G2(n - D)$
0	1	1	0
1	1	1	0
2	1	0	1
3	1	0	1
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 3 Ejemplo de aplicación del desfase para 5 ciclos.

Esta operación se realiza para los 1023 bits de G2.

Finalmente, el código PRN para el satélite PRN 1 se obtiene combinando G1(n) y G2(n-D) mediante XOR:

$$PRN(n) = G1(n) \oplus G2(n - D)$$

Paso n	$G1(n)$	$G2(n - D)$	$PRN(XOR)$
0	1	0	1
1	1	0	1
2	1	1	0
3	1	1	0
4	0	0	0
5	0	0	0

Tabla 4 Ejemplo de los primeros 5 bits generados.

El resultado es una secuencia binaria de 1023 bits, que se repetirá cada milisegundo (ms). Este código PRN será único para cada satélite.

ANEXO IV: CÓDIGO DE PROCESAMIENTO Y CORRELACIÓN DE LA SEÑAL

```
numSamples = 20000; % Número de muestras a procesar
fs = 20e6;          % Frecuencia de muestreo
batchSize = 20000; % Tamaño de lote
numBatches = numSamples / batchSize;
freqs = -5000:100:5000; % Frecuencias de búsqueda (para ambas pasadas)

% Cargar la señal binaria
signals_raw(:,1) =
io.read_complex_gnuradio('GNSS_PRN_Ceballos_Submarino_2025.03.13.09.24.16_sur_1.bin', 0,
numSamples);

% Vectores para almacenar correlación
max_vals= zeros(1, 32);
mean_vals= zeros(1, 32);
margins = zeros(1, 32);

% Bucle para cada PRN (1..32)
for NUM_SAT = 1:32

    %% =====
    %% (BÚSQUEDA)
    %% =====

    % 1) Generar el código PRN
    prn_time = -2*(cacode(NUM_SAT, fs/1.023e6)) + 1;
    prn_freq = conj(fft(prn_time)); % Para la correlación en freq

    zfoPhases = (-2*pi*(0:batchSize-1)/fs).';
    phases = zfoPhases .* freqs; % => [4000 x length(freqs)]

    signal = signals_raw(:,1);

    vv_global = 0; % Valor máx de correlación
    r_global = []; % Guardar la correlación con mayor pico (para graficar)

    for k = 1:numBatches
        range = (k-1)*batchSize+1 : k*batchSize;
        sig_batch = signal(range); % [4000 x 1]
        n = (0:batchSize-1).';
        % Matriz de mezcla Doppler
        x = exp(1j*phases) .* sig_batch; % => [4000 x length(freqs)] .* exp(-1j*2*pi*(-
3000)*n/fs)
        X = fft(x);

        % Correlación
        R = X .* prn_freq; % => [4000 x length(freqs)]
        r = ifft(R); % => [4000 x length(freqs)]

        [vmax, imax] = max(abs(r)); % vmax, imax => [1 x length(freqs)]
        [vv, ii] = max(vmax);

        fd = freqs(ii); % Doppler estimado
        code_phase = imax(ii); % Fase de código estimada

        fprintf('PRN %d (1ª pasada): Doppler = %d, Code_phase = %d\n', ...
```

```
        NUM_SAT, fd, code_phase);

    % Guardar la correlación con mayor pico
    if vv > vv_global
        vv_global = vv;
        r_global = r; % correlación con el pico más alto
    end

    %% Corrección de la señal en Doppler + fase
    n = (0:batchSize-1).';
    signals_corrected = signal .* exp(-1j*2*pi*fd*n/fs);
    prn_shifted = circshift(prn_time, code_phase - 1);

    signals(range,1) = signals_corrected .* prn_shifted;
end

% Guardar resultados
max_vals(NUM_SAT) = vv_global;
mean_vals(NUM_SAT) = mean(abs(r_global(:)));
margins(NUM_SAT)=10*log10(max_vals(NUM_SAT)/mean_vals(NUM_SAT));

%% =====
%% Gráfica final
%% =====
figure(NUM_SAT);

% (A) Espectro de la señal final corregida
subplot(1,3,1);
spec_corr = fftshift(fft(sig_corrected));
plot(abs(spec_corr));
title(['PRN ', num2str(NUM_SAT), ' - Espectro (señal corregida)']);
xlabel('Frecuencia (bins)');
ylabel('Amplitud');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

% (B) Mapa de calor de la 1ª pasada
subplot(1,3,2);
surf(freqs, 1:numSamples, abs(r_global));
shading interp;
title('1ª pasada (búsqueda)');
xlabel('Doppler (Hz)');
ylabel('Muestras');
zlabel('|r|');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

% pause(); % para ver cada figura antes de pasar al siguiente PRN
end

%% Bar chart final
figure;
bar(1:32, margins, 'FaceColor',[0.2 0.6 1]);
grid on;
xlabel('Número de PRN');
ylabel('SNR (dB)');
title('Correlación Ajustada por Satélite GNSS');
xticks(1:32);
xticklabels(1:32);
set(gca, 'FontSize', 8, 'FontWeight','bold');
set(gca, 'XTickLabelRotation',45);
```

```
disp('-----');
disp(' PRN   | Correlación | Media Ruido | Correlación Ajustada');
disp('-----');
for i = 1:32
    fprintf(' %2d   | %16.4f | %10.4f | %18.4f\n', ...
        i, max_vals(i), mean_vals(i), margins(i));
end
disp('-----');
```