



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de técnicas de beamforming en 3D para apuntamiento
de satélites GNSS*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Antonio Guerrero Vázquez

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

*Desarrollo de técnicas de beamforming en 3D para apuntamiento
de satélites GNSS*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado estudia la aplicación de técnicas de *beamforming* para mejorar la recepción y localización de señales GNSS mediante el uso de arrays de antenas. Se ha analizado cómo la geometría del array y la separación entre elementos afectan al rendimiento del sistema, con el objetivo de optimizar la precisión en la estimación de la dirección de llegada de las señales satelitales y minimizar la presencia de interferencias.

Para ello, se ha diseñado un sistema basado en *Software Defined Radio* (SDR) y procesamiento digital de señales, empleando herramientas como GNU Radio y MATLAB para la captura y análisis de datos. Se han implementado diferentes configuraciones de arrays, como *Uniform Linear Array* (ULA) y *Uniform Circular Array* (UCA), evaluando sus ventajas e inconvenientes.

A partir de pruebas experimentales, se ha validado la efectividad del sistema, comparando los resultados obtenidos con resultados teóricos. Finalmente, se presentan conclusiones sobre la eficacia del método propuesto y se sugieren posibles mejoras para optimizar su aplicación en entornos reales.

PALABRAS CLAVE

Beamforming, GNSS, Arrays de antenas, Apuntamiento 3D, Procesamiento de señales.

AGRADECIMIENTOS

Esta sección de mi trabajo me gustaría dedicarla a todas aquellas personas que, de una u otra forma, han contribuido a mi desarrollo tanto académico como sobre todo personal.

En primer lugar, agradecer a Dios, por permitirme seguir consiguiendo mis objetivos y por su protección en cada uno de mis pasos.

En segundo lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores por su infinita paciencia, dedicación, vocación y cercanía a lo largo de todo el proyecto.

A mi familia, gracias por vuestros ánimos, llamadas y apoyo incondicional, especialmente a mis padres, por su ejemplo, confianza y sacrificio, que me han permitido llegar hasta aquí.

A Almudena, por ser mi pilar constante, por su paciencia y comprensión, y por acompañarme en cada nueva etapa.

Por último, agradecer a mis amigos, en especial a mi camareta 217 y a Ceballos, por todos los momentos compartidos, por las risas y por el apoyo mutuo en los momentos complicados.

CONTENIDO

Contenido.....	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	7
1.3 Estructura	8
2 Estado del arte	9
2.1 Sistemas GNSS	9
2.1.2 Fundamentos de los satélites GNSS.....	9
2.1.3 Técnicas de Acceso múltiple.....	11
2.1.4 CDMA.....	11
2.2 <i>Beamforming</i>	13
2.2.1 ULA (Uniform Linear Array)	15
2.2.2 UCA (Uniform circular array)	18
2.2.3 UCA 3D (Uniform Circular Array)	21
2.2.4 Conclusiones	25
3 Desarrollo del proyecto	26
3.1 Software	26
3.1.1 GNU Radio (SDR)	26
3.1.2 MATLAB	27
3.1.4 Antenas utilizadas	28
3.2 Creación de la señal sintética	31
3.3 Uso de señal GNSS	35
3.3.1 Identificación y detección de satélites con una única antena	35
3.3.2 Identificación y detección de satélites con dos antenas	37
3.4 Empleo de un UCA para identificación y detección de satélites	39
3.4.1 Selección del número de elementos y distribución	39
4 Resultados.....	42
4.1 Pruebas previas.....	42
4.1.1 Detección e identificación con una única antena	42
4.2 <i>Beamforming</i> en 3D	48
4.3 Discusión de los resultados obtenidos.....	51

4.3.2 Justificación Beamforming en 3D.....	54
4.4 Mejoras efectuadas	56
5 Conclusiones y líneas futuras	60
5.1 Introducción	60
5.2 Rendimiento del array circular (UCA) con separación $\lambda/2$ y precisión del <i>beamforming</i>	60
5.3 Coherencia entre la correlación PRN y los satélites visibles	61
5.4 Limitaciones del sistema y de las antenas utilizadas.....	61
5.5 Propuestas de mejora.....	61
5.6 Líneas futuras de investigación	62
5.7 Conclusión Final	62
6 Bibliografía.....	64
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	66
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales.....	67
Anexo III: Generación códigos PRN	68
Anexo IV: Algoritmo de Matlab	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esfera de radio "d" que contiene la ubicación deseada en algún punto [4]	10
Figura 2-2 Intersección de las 3 esferas de distancia de los 3 satélites en 2 puntos [4].	10
Figura 2-3 Constelación NAVSTAR [6].	11
Figura 2-4 Esquema conceptual del funcionamiento de CDMA[9].	12
Figura 2-5 Esquema conceptual del funcionamiento de FDMA[9].	12
Figura 2-6 PRN comparación de códigos[12]	13
Figura 2-7 Esquema de beamforming en un array de antenas [14]	14
Figura 2-8 Geometría de un array lineal de 4 antenas [15].	15
Figura 2-9 Patrón de radiación ULA para 2,4 y 8 elementos.	16
Figura 2-10 Patrón de radiación ULA variando la distancia entre elementos (N=8)	17
Figura 2-11 Patrón de radiación ULA para $\phi=0^\circ$, 30° , 60° . (N=8, $d=0,5\lambda$)	17
Figura 2-12 Geometría de un array circular de 8 elementos.	18
Figura 2-13 Patrón de radiación UCA para N= 4,8,16 y $d=0,4\lambda$	19
Figura 2-14 Patrón de radiación UCA variación de radio y N=8	20
Figura 2-15 Patrón de radiación para diferentes ángulos de incidencia	20
Figura 2-16 Geometría de un UCA en 3D.....	21
Figura 2-17 Patrón de radiación UCA 3D para N=4, en azimuth, elevación y 3D	22
Figura 2-18 Patrón de radiación UCA 3D para N=8, en azimuth, elevación y 3D	22
Figura 2-19 Patrón de radiación UCA 3D para N=16, en azimuth, elevación y 3D	22
Figura 2-20 Patrón de radiación UCA 3D para N=32, en azimuth, elevación y 3D	23
Figura 2-21 Patrón de radiación UCA 3D para $r=0,4\lambda$, en azimuth, elevación y 3D	23
Figura 2-22 Patrón de radiación UCA 3D para $r=0,5\lambda$, en azimuth, elevación y 3D	23
Figura 2-23 Patrón de radiación UCA 3D para $r=0,6\lambda$, en azimuth, elevación y 3D	24
Figura 2-24 Patrón de radiación UCA 3D para $\phi=0^\circ$ y $\theta=0^\circ$ en azimuth , elevación y 3D	24
Figura 2-25 Patrón de radiación UCA 3D para $\phi=20^\circ$ y $\theta=0^\circ$, en azimuth, elevación y 3D	24
Figura 2-26 Patrón de radiación UCA 3D para $\phi=0^\circ$ y $\theta=20^\circ$, en azimuth, elevación y 3D	25
Figura 2-27 Patrón de radiación UCA 3D para $\phi=0^\circ$ y $\theta=0^\circ$, en azimuth, elevación y 3D	25
Figura 3-1 Antena Taoglas Spartan MA600.....	28
Figura 3-2 Dispositivo Hack RF one	29
Figura 3-3 Dispositivo Pluto SDR.....	29
Figura 3-4 Dispositivo U-blox EVK-M8T-0-01	30
Figura 3-5 Placas USRP X310	30
Figura 3-6 Dispositivos GPSDO utilizados.....	31
Figura 3-7 Escenario de generación de la señal sintética	32

Figura 3-8 Espectro de una señal PRN en recepción con diferentes ganancias de transmisión a) 40 dB; b) 30 dB; c) 20 dB; d) 10 dB.	32
Figura 3-9 Validación algoritmo para identificación de satélite por su PRN	34
Figura 3-10 Validación del algoritmo para la realización de beamforming en 2D en MATLAB ...	35
Figura 3-11 Montaje HackRF One	36
Figura 3-12 Configuración en GNU Radio de la medición realizada mediante una antena y un dispositivo Hack RF	36
Figura 3-13 Configuración en GNU Radio de la medida efectuada con una única antena y utilizando un dispositivo PlutoSDR	37
Figura 3-14 Montaje medición con dos antenas	37
Figura 3-15 Montaje ULA de 4 elementos	38
Figura 3-16 Configuración en GNU Radio de medición con 4 antenas	39
Figura 3-17 Patrón de radiación prototipo N=4.....	40
Figura 3-18 Patrón de radiación prototipo N=6.....	40
Figura 3-19 Patrón de radiación prototipo N=8.....	40
Figura 3-20 Montaje UCA de 4 elementos.....	41
Figura 4-1 Satélites visibles en ucenter en el momento de la medición con una única antena	42
Figura 4-2 Satélites identificados mediante la correlación de PRN en MATLAB de la medida con una única antena	43
Figura 4-3 Satélites visibles en u-center en el momento de las medidas	43
Figura 4-4 Correlación exitosa y fallida para dos satélites diferentes	44
Figura 4-5 Resultado identificación ULA de 2 elementos	44
Figura 4-6 Resultado beamforming ULA de 2 elementos para satélites 1 (izquierda) y 2 (derecha)	45
Figura 4-7 Resultado identificación ULA de 4 elementos	45
Figura 4-8 Resultado correlación y posterior corrección en Doppler y fase para el satélite 1	46
Figura 4-9 Resultado correlación y posterior corrección en Doppler y fase para el satélite 2	47
Figura 4-10 Resultado beamforming ULA de 4 elementos para satélites 1 (derecha) y satélite 2 (izquierda)	48
Figura 4-11 Resultado correlación UCA de 4 elementos	48
Figura 4-12 Resultado correlación y posterior corrección en Doppler y fase para el satélite 8.....	49
Figura 4-13 Resultado correlación y posterior corrección en Doppler y fase para el satélite 1	50
Figura 4-14 Resultado beamforming en 3D para el satélite 2 con UCA de 4 elementos	51
Figura 4-15 Resultado beamforming en 3D para satélite 8 con un UCA de 4 elementos	51
Figura 4-16 Resultado teórico (izquierda) y práctico corregido (derecha) del beamforming para un ULA de 2 elementos apuntando al satélite número 1.....	52
Figura 4-17 Diagrama de radiación para el apuntamiento de un UCA de 2 elementos al satélite 2	52

Figura 4-18 Resultado teórico (izquierda) y práctico corregido (derecha) del beamforming para un ULA de 4 elementos apuntando al satélite número 1.....	53
Figura 4-19 Diagrama de radiación teórico para el apuntamiento en azimut de un UCA de 4 elementos al satélite número 2	53
Figura 4-20 Diagrama de radiación teórico para el apuntamiento de un UCA de 4 elementos al satélite 8	54
Figura 4-21 Resultado práctico corregido del beamforming en 3D para un UCA de 4 elementos apuntando al satélite 8.....	54
Figura 4-22 Diagrama de radiación teórico para el apuntamiento de un UCA de 4 elementos al satélite 2	55
Figura 4-23 UCA de 4 elementos separados a $\lambda/2$	56
Figura 4-24 Satélites visibles en el momento de la medición para un UCA de 4 elementos separados $\lambda/2$	56
Figura 4-25 Resultado correlación PRN UCA de 4 elementos separados $\lambda/2$	57
Figura 4-26 Resultado correlación para el satélite 8 en cada antena del array.....	57
Figura 4-27 Resultado beamforming en 3D para un UCA de 4 elementos apuntando al satélite 8	58
Figura 4-28 Diagrama de radiación teórico para el apuntamiento de un UCA de 4 elementos con $d = \lambda/2$. al satélite 8.....	58
Figura 4-29 Resultado corregido del beamforming de un UCA de 4 elementos con $d = \lambda/2$ apuntando al satélite 8.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de los posibles arrays 39

Tabla 2 Generador de código C/A satélite 7.....70

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Las técnicas de apuntamiento de haces o *beamforming* han sido ampliamente utilizadas en el ámbito de las telecomunicaciones y la radiofrecuencia con el objetivo de mejorar la recepción y transmisión de señales. Su principio básico radica en la combinación coherente de las señales recibidas por diferentes elementos de un array de antenas, ajustando sus fases y amplitudes para reforzar la dirección deseada y minimizar interferencias provenientes de otras direcciones.

Esto permite aumentar la relación señal-ruido (*SNR*), mejorar la capacidad de detección y suprimir señales no deseadas, lo que lo convierte en una herramienta fundamental en aplicaciones como radares, sistemas de comunicaciones inalámbricas y, en particular, en la recepción de señales de navegación satelital GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Tradicionalmente, el *beamforming* se ha implementado en sistemas que ajustan la dirección del haz en un solo plano, bien sea en azimut o en elevación, permitiendo mejorar la recepción en una de estas dos dimensiones. Sin embargo, con el crecimiento del número de constelaciones GNSS (*GPS*, Galileo, *GLONASS*, BeiDou, entre otras) y la necesidad de optimizar la recepción de señales en entornos con alta interferencia o con visibilidad parcial del cielo, surge la necesidad de desarrollar sistemas de *beamforming* tridimensional (*3D beamforming*). Esta técnica permite ajustar la dirección del haz en ambos planos simultáneamente (azimut y elevación), ofreciendo una mayor precisión en la detección y seguimiento de satélites en movimiento.

El interés en el desarrollo de *beamforming* 3D radica en su capacidad para mejorar el rendimiento de los receptores GNSS en escenarios donde la señal se ve afectada por obstrucciones o interferencias externas, lo que puede comprometer la precisión en la determinación de la posición. De esta manera, el uso de arrays de antenas capaces de realizar *beamforming* tridimensional proporciona una ventaja significativa en comparación con métodos convencionales de recepción de señales GNSS.

En este contexto, este Trabajo de Fin de Grado se enfoca en el diseño e implementación de un sistema de apuntamiento de haces tridimensional basado en un array de antenas capaz de realizar dicho apuntamiento. Se analizarán las diferentes configuraciones del array, su impacto en la capacidad de detección de la dirección de llegada de la señal y su rendimiento con sistemas convencionales.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este TFG es diseñar e implementar un sistema de apuntamiento de haces tridimensional (*3D beamforming*) para la detección y seguimiento de satélites GNSS. Para ello, se

utilizará un array de antenas que permita estimar la dirección de llegada de las señales en azimut y elevación, optimizando así la recepción de señales GNSS y mejorando su precisión.

Para lograr este propósito, en primer lugar, se realizará un estudio detallado sobre el *beamforming* tridimensional en arrays de antenas, poniendo especial énfasis en su aplicación en la recepción de señales GNSS. A continuación, se procederá al diseño de array, con el objetivo de garantizar una cobertura eficiente y una correcta estimación de la dirección de llegada de las señales. Se evaluará la separación óptima entre elementos del array y su impacto en la capacidad de apuntamiento.

Posteriormente, se desarrollarán algoritmos en *MATLAB* para la detección y seguimiento de satélites GNSS mediante técnicas de *beamforming*. Estos algoritmos serán implementados y probados con señales sintéticas y reales para verificar su funcionamiento y precisión.

Para verificar la precisión de los resultados obtenidos con los algoritmos desarrollados, se utilizará el software u-center, el cual permitirá comparar los datos obtenidos en *MATLAB* con los proporcionados por un receptor GNSS comercial. Se analizarán aspectos como la identificación de los PRN de los satélites detectados, la intensidad de la señal y la estimación de azimut y elevación, con el objetivo de determinar la efectividad del *beamforming* en la recepción de señales GNSS.

Finalmente, se comparará el rendimiento del sistema propuesto con la detección convencional de GNSS, evaluando su precisión y robustez en distintos escenarios de recepción. Se analizará la capacidad del sistema para mejorar la relación señal-ruido y mitigar interferencias, lo que permitirá extraer conclusiones sobre la viabilidad y el uso de *beamforming* tridimensional en la mejora de la recepción de señales GNSS.

1.3 Estructura

El presente Trabajo de Fin de Grado está organizado en distintos apartados siguiendo la siguiente estructura. En primer lugar, se realiza una introducción donde se expone la contextualización del proyecto, así como los objetivos específicos que se pretenden alcanzar. Seguidamente, el estado del arte presenta un análisis exhaustivo de los antecedentes teóricos y técnicos que sustentan el desarrollo del trabajo, haciendo énfasis en las técnicas de *beamforming* aplicadas a sistemas GNSS y en las diferentes configuraciones de antenas empleadas habitualmente.

En el tercer apartado, correspondiente al desarrollo del proyecto, se explica detalladamente la metodología adoptada, incluyendo la descripción de los dispositivos utilizados, tales como el *USRP X310*, *Pluto SDR* y *GPS Disciplined Oscillator (GPS DO)*. Aquí también se describe el montaje y configuración tanto del array lineal (ULA) como del array circular (UCA), destacando las diferencias técnicas y la justificación en la elección de dichos arrays.

Posteriormente, en el apartado de resultados experimentales, se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante ensayos prácticos realizados en escenarios reales, empleando softwares especializados como *MATLAB* y *GNU Radio*. Finalmente, el documento incluye un apartado de conclusiones, donde se sintetizan los principales logros y se valoran críticamente los resultados obtenidos en relación con los objetivos inicialmente establecidos. Además, se proponen líneas futuras que podrían explorarse para continuar avanzando en la temática desarrollada en este trabajo. El TFG se completa con bibliografía y varios anexos que recogen información complementaria para la comprensión y ampliación del estudio realizado.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Sistemas GNSS

2.1.1 Historia y evolución de los satélites GNSS

La navegación por satélite tiene su origen en la Guerra Fría cuando las potencias mundiales buscaban la mejora de sus capacidades militares. El primer acontecimiento reseñable fue el lanzamiento del satélite soviético Sputnik en 1957, el cual dio comienzo a la era espacial y probó que los satélites también eran útiles para determinar ubicaciones en la Tierra. Tras este hallazgo se promulgó el primer sistema de navegación por satélite conocido como TRANSIT, aunque surgió la necesidad de crear un sistema más rápido y preciso, fue ahí donde se llegó al desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). El primer satélite GPS, llamado NAVSTAR, fue lanzado en 1978, en su comienzo tenía un fin militar, como lo son la navegación de submarinos, tropas y aviones. Fue en 1983 cuando tras el incidente del vuelo *Korean Air Lines*, el presidente Ronald Reagan autorizó el uso del GPS para aplicaciones civiles, para posteriormente en 1993 ser declarado plenamente operativo con una constelación de 24 satélites [1].

2.1.2 Fundamentos de los satélites GNSS

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), permite obtener información precisa sobre ubicación, velocidad y tiempo en cualquier lugar del mundo. Este sistema consta de múltiples constelaciones de satélites que operan en conjunto para proporcionar datos de posicionamiento. Estos satélites operan en órbitas MEO (*Medium Earth Orbit*) transmitiendo datos de navegación de forma simultánea. Entre los conjuntos de satélites más destacados se encuentran los siguientes [2]:

- **GPS** (*Global Positioning System*): Desarrollado por Estados Unidos, es el sistema GNSS más conocido y utilizado a nivel mundial.
- **GLONASS** (*Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema*): Es un sistema ruso de navegación por satélite que ofrece cobertura global.
- **Galileo**: Sistema europeo de navegación por satélite, diseñado para ser interoperable con otros sistemas GNSS y proporcionar mayor precisión
- **BeiDou**: Sistema chino de navegación por satélite que ha expandido su cobertura para ofrecer servicios globales.

Los sistemas de navegación por satélite tienen una estructura muy definida, que podemos subdividir en tres segmentos diferentes: el segmento espacial, el de control y el de usuarios. Este sistema no se entiende sin alguno de los tres segmentos [3]:

- **Segmento espacial**: Es el segmento que está compuesto por los satélites que conforman el sistema, tanto de navegación como de comunicación.

- **Satélites de Navegación:** El sistema GNSS debe tener el suficiente número de satélites de navegación de forma que sea posible garantizar una cobertura global en todo momento. Los satélites además deben estar distribuidos en los distintos planos orbitales de tal manera que se realice una cobertura total de la Tierra. Actualmente el GPS, garantiza un mínimo de 5 satélites visibles en cualquier parte del mundo.
- **Satélites de comunicación:** Forman parte de lo que se denomina sistemas de aumento, particulares de cada país, su función es la retransmisión de la información con correcciones procedente del segmento de control con el fin de aumentar la precisión del sistema.
- **Segmento de Control:** Se encuentra formado por el conjunto de estaciones en tierra que recopilan los datos emitidos por los satélites. Su función es garantizar las prestaciones del sistema mediante la monitorización del segmento espacial, aplicando las correcciones de posición y temporales a los satélites.
- **Segmento de Usuario:** Por último, el segmento de usuario, está conformado por los equipos GNSS que reciben las señales del segmento espacial como es el caso la antena receptora.

El funcionamiento básico de los sistemas GNSS se basa en la emisión de señales radio por parte de los satélites, las cuales son recibidas por un receptor en Tierra. Estas señales contienen información sobre la posición del satélite y el tiempo exacto de emisión. Para encontrar una ubicación, los satélites emiten una señal radio y mediante el tiempo que tarda en llegar al receptor, calculan la distancia que existe hasta este. Una vez conocida esta distancia, alrededor del satélite se puede decir que se genera una esfera de radio esa distancia en la que sabemos que la ubicación del receptor estará en algún punto de dicha esfera como podemos apreciar en la Figura 2-1.

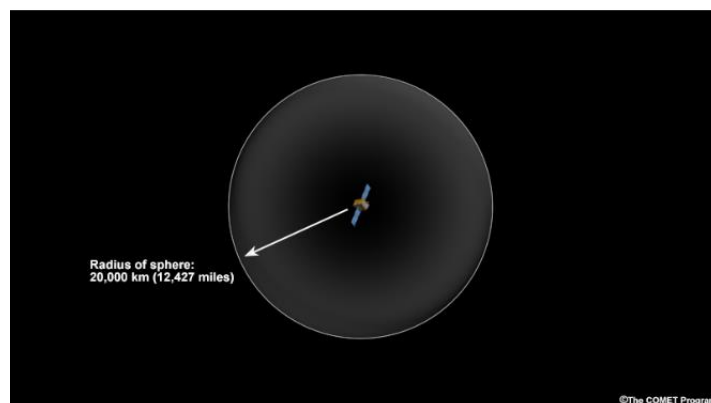


Figura 2-1 Esfera de radio "d" que contiene la ubicación deseada en algún punto [4]

Si en lugar de recibir una única señal de un satélite, se recibiera de tres, daría lugar a tres esferas que únicamente intersectarían en dos puntos como se puede apreciar en la Figura 2-2, de entre los cuales es factible identificar la posición deseada.

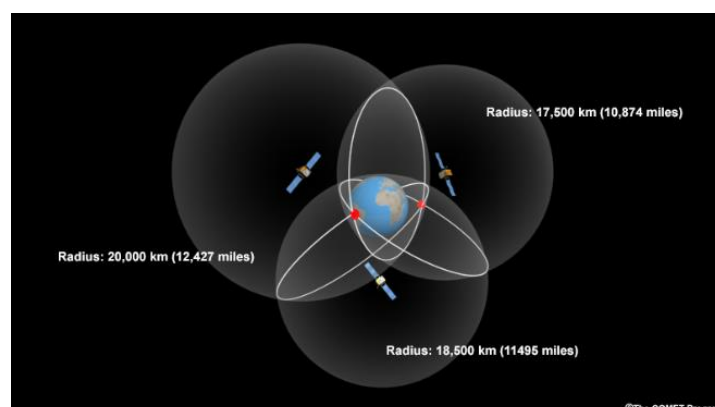


Figura 2-2 Intersección de las 3 esferas de distancia de los 3 satélites en 2 puntos [4].

En resumen, los sistemas GNSS son fundamentales en la vida moderna, ya que permiten aplicaciones muy diversas, proporcionando datos esenciales para una amplia variedad de industrias y servicios.

El sistema GPS fue una creación de la Defensa de Estados Unidos con el objetivo de construir un sistema de navegación preciso para el ámbito militar. El sistema GPS cuenta con una red de 27 satélites operativos, distribuidos en seis planos orbitales, en cada uno de estos planos se distribuyen 4 satélites regularmente distribuidos. Los planos tienen una inclinación de 55° con el plano del ecuador y se nombran como A, B, C, D, E, F, de forma que la constelación queda distribuida como se refleja en la Figura 2-3[5].



Figura 2-3 Constelación NAVSTAR [6].

2.1.3 Técnicas de Acceso múltiple

Prácticamente todos los satélites GNSS utilizan en la actualidad lo que se denomina como CDMA (*Code Division Multiple Access*), mientras que los GLONASS hacen uso de la técnica FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). Las técnicas de acceso múltiple son utilizadas en los sistemas de comunicación con el objetivo de permitir a los usuarios compartir el mismo medio para transmitir. En GNSS los satélites transmiten sus señales en el mismo medio físico en la banda L. Teniendo este dato en cuenta es posible afirmar que:

- Cada satélite GNSS transmite un código pseudoaleatorio llamado PRN (*Pseudo-Random Noise*) que es único para ese satélite y es independiente de los demás datos transmitidos.
- La señal emitida ocupa un ancho de banda que es más ancho de lo que es necesario para enviar los datos de navegación.

Una vez el receptor recibe la señal, esta es correlada con una réplica que tiene en almacenamiento, lo que permite obtener la información de la señal original reduciendo de forma notable el efecto del ruido y las interferencias. Las señales GNSS emplean técnicas de espectro ensanchado, un método en el que la señal original se distribuye sobre un ancho de banda mayor del necesario para la transmisión de datos. Esto permite reducir de forma significativa el efecto del ruido y las interferencias, asegurando una comunicación robusta y fiable.

Para ello en GNSS se utilizan dos posibles técnicas, CDMA o FDMA. La diferencia existente entre cada una de estas técnicas reside en que en el caso de FDMA todos los satélites transmiten el mismo PRN pero en diferente frecuencia, mientras que en el caso del CDMA, cada satélite tiene su PRN y todos lo transmiten en la misma frecuencia portadora. Esto consigue hacer que los satélites puedan transmitir sin interferirse entre sí, facilitando la correcta identificación de cada uno en el receptor. En los siguientes apartados se explicará más detalladamente cada una de estas técnicas [7].

2.1.4 CDMA

La técnica de acceso múltiple por división de código, también denominada CDMA, tiene como objetivo permitir que múltiples señales sean transmitidas a la misma vez en una misma frecuencia

portadora como podemos apreciar en la Figura 2-4. Con ese objetivo, a cada satélite le será asignado un código pseudoaleatorio (PRN), el cual es elegido en base a su baja correlación con el PRN de los demás satélites. Estos códigos pseudoaleatorios, aunque se explicarán con mayor detalle en posteriores apartados, tienen como objetivo principal garantizar una alta autocorrelación y una baja correlación cruzada. La alta autocorrelación permite que el receptor desensanche correctamente la señal y recupere su versión original correlacionando la señal recibida con el código PRN deseado, por otro lado una baja correlación cruzada entre secuencias PRN garantiza estar prácticamente libre de interferencias de las señales de otros satélites [8]. Para conseguir que el receptor pueda desensanchar de forma correcta la señal recibida, es esencial que los PRN asignados a cada satélite, sean ortogonales entre sí.

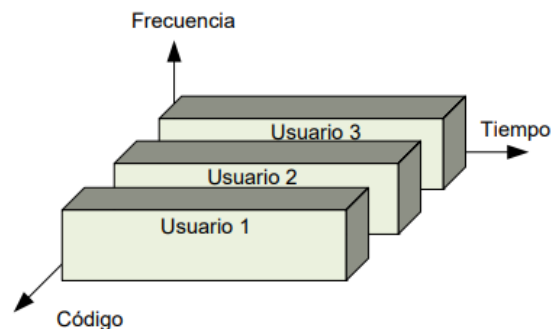


Figura 2-4 Esquema conceptual del funcionamiento de CDMA[9].

2.1.5 FDMA

La técnica de acceso múltiple por división de frecuencia o FDMA, se basa en asignar a cada satélite una frecuencia portadora como se aprecia en la Figura 2-5. Su principal ventaja con respecto a CDMA es que garantiza una separación entre señales ya que cada una es transmitida en una frecuencia diferente de forma que se evitan también de esta manera las interferencias entre las señales emitidas por los diferentes satélites. La capacidad del sistema FDMA reside en el ancho de banda disponible y el ancho del canal de frecuencia asignado incluyendo las bandas de respeto necesarias para evitar interferencias entre los canales adyacentes[10]. Por otro lado, requiere de una mayor complejidad a la hora de diseñar la antena y el receptor, debido a la utilización de diversos filtros de paso banda y de calibración. FDMA es únicamente utilizado en las señales heredadas de GLONASS principalmente por razones históricas, sin embargo, en los últimos años GLONASS ha utilizado más señales CDMA en su estructura de transmisión [7].

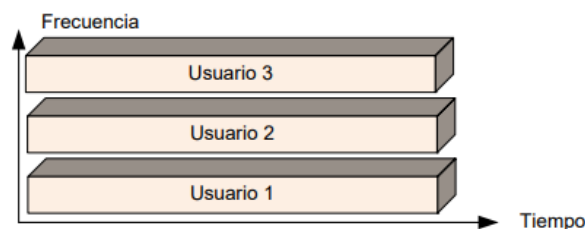


Figura 2-5 Esquema conceptual del funcionamiento de FDMA[9].

2.1.6 Señales GPS

Para conseguir completar el objetivo de realizar *beamforming* en 3D para apuntamiento de satélites GPS, es esencial antes que nada conocer la identidad de los satélites que emiten cada una de las señales que se reciben. Los satélites pertenecientes a la constelación NAVSTAR (Figura 2-3) pueden ser identificados de diversas maneras. Para conseguirlo dentro de la señal de navegación que emite el satélite se envía un código único para cada satélite que es conocido como código de ruido pseudoaleatorio o

código PRN[6]. Las señales GPS están conformadas por tres partes. Una señal portadora, el código pseudoaleatorio y el mensaje de navegación

La señal Portadora: Es una onda senoidal en banda L con una frecuencia distinta para cada caso, según sea L1, L2 o L5. La frecuencia L1 (1575.42 MHz), es usada para proporcionar el código de Adquisición Aproximada (C/A o *Coarse Acquisition*) y los códigos de cifrado de precisión P(Y). Por otro lado, la frecuencia L2 (1227.6 MHz), es utilizada para transportar el código P(Y). Estas son las frecuencias en las que el receptor GPS debe estar en sintonía para recibir la información GPS[11].

Los códigos PRN (Pseudo-Random Noise): Son secuencias binarias, aunque generadas de forma determinista, presentando propiedades similares al ruido aleatorio. En los satélites GNSS como es el caso del GPS, cada satélite emite un código PRN único que permite a los receptores identificar y distinguir las señales de diferentes satélites a través de la técnica de acceso al medio CDMA, previamente mencionada. Estos códigos poseen características que garantizan una alta autocorrelación y una baja correlación cruzada, lo que facilita la sincronización y minimiza la interferencia entre satélites, ya que son ortogonales entre sí por lo que es muy difícil confundir unos con otros, como se aprecia en la Figura 2-6, el receptor compara el PRN de la señal recibida con el de cada uno de los satélites que tiene en librería hasta que consiga encontrar el PRN del satélite que sea igual que el incidente [11].

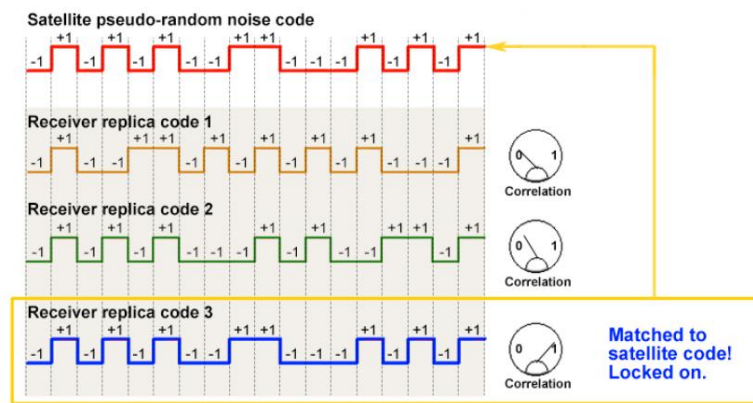


Figura 2-6 PRN comparación de códigos[12]

Mensaje de navegación: El mensaje de navegación transmite información que se puede clasificar en 3 subgrupos:

- Mensaje de tiempo: La fecha y hora del GPS además del estado del satélite y su salud.
- Las efemérides: Consisten en una información orbital precisa que permite al receptor estimar la posición del satélite, es un dato transmitido por cada satélite y que tiene una validez de 4 horas desde su emisión.
- Almanaque: Son unos datos que contienen información del estado y posición estimada de todos los satélites. Son unos datos que tienen una validez de 24 horas desde su emisión. Cada satélite transmite datos de almanaque para todos los satélites [11].

2.2 Beamforming

El *beamforming* es una técnica clave en sistemas de arrays de antenas, cuyo objetivo principal es mejorar la relación señal-ruido (SNR) en la recepción de señales y poder estimar la dirección de llegada, comúnmente conocida como DoA (*“Direction of Arrival”*) de la propia señal. Además, permite suprimir interferencias no deseadas y dirigir la recepción en la dirección de interés, maximizando la potencia de la señal útil. Esta técnica es fundamental en múltiples aplicaciones de telecomunicaciones y posicionamiento, incluyendo los sistemas GNSS [13].

Para aplicar técnicas de *beamforming* de manera efectiva, es necesario considerar que la señal proveniente de cualquier fuente transmisora, como podría ser un satélite, no llega simultáneamente en

fase a todos los elementos del array de antenas. Esto se debe a que la distancia entre la fuente y cada elemento es diferente en función del DoA, lo que introduce desfases en la llegada de la onda. Si estos desfases no se corrigen, las señales recibidas podrían sumarse de manera destructiva, reduciendo la intensidad de la señal útil y degradando el rendimiento del sistema.

El ajuste de fase es, por tanto, un aspecto esencial del *beamforming*. Este proceso consiste en modificar la fase de la señal recibida en cada antena para alinearlas correctamente, permitiendo su suma coherente y maximizando la potencia en la dirección deseada, mientras se minimizan las interferencias en otras direcciones. La cantidad exacta de ajuste de fase depende de la geometría y la disposición del array, lo cual se analizará en los siguientes apartados (Figura 2-7).

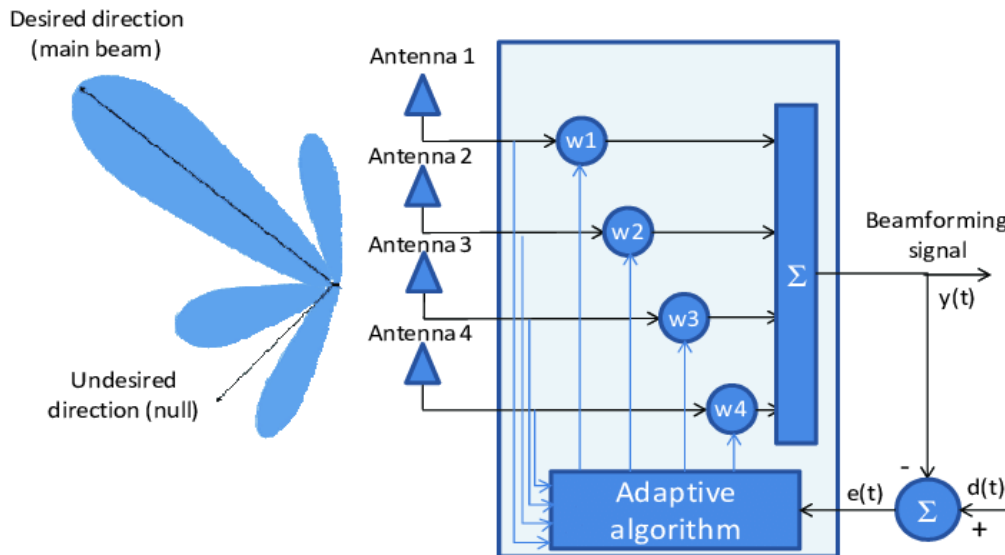


Figura 2-7 Esquema de beamforming en un array de antenas [14]

El patrón de radiación del array dependerá de su geometría y de los coeficientes de *beamforming* aplicados. El *beamforming* se realiza sumando las señales recibidas en cada antena después de aplicarles un peso complejo w_n . El factor de array resultante se expresa como:

$$F(\phi, \mathbf{w}) = \sum_{n=1}^N \mathbf{w}_n^* \mathbf{a}_n(\phi) = \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\phi), \quad (2-1)$$

donde w_n es un vector de coeficientes de *beamforming*, $\mathbf{a}(\phi)$ es el vector de direccionamiento (*steering vector*), el cual modela los desfases en la llegada de la señal a cada antena en función de su dirección de incidencia y N el número de elementos del array.

Para comprender mejor el *beamforming*, es fundamental entender la relación entre estos dos elementos:

- Vector de direccionamiento $\mathbf{a}(\phi)$: Describe el conjunto de desfases que experimenta la señal al incidir en cada elemento del array.
- Coeficientes de *beamforming* w_n : Su función es compensar estos desfases para lograr la suma coherente de las señales recibidas.

El *beamforming* es una técnica muy utilizada en sistemas de arrays de antenas y es clave en tecnologías de comunicaciones avanzadas, como MIMO, 5G, LTE y WLAN. En los siguientes apartados, se analizarán los diferentes tipos de arrays de antenas, sus ventajas e inconvenientes, así como su rendimiento en diversas aplicaciones. Esto permitirá comprender las características y aplicaciones de cada configuración en el contexto del *beamforming* para GNSS [15].

2.2.1 ULA (Uniform Linear Array)

Los arrays lineales son un tipo de array de antenas caracterizado por disponer de N elementos situados en línea sobre un eje, separados entre sí por una distancia constante d . Este tipo de configuración representa uno de los sistemas más simples de arrays de antenas, pero también uno de los más utilizados en diversas aplicaciones, debido a su diseño sencillo y su versatilidad.

Los parámetros que definen el comportamiento de un array de antenas lineal son los que se muestran en la Figura 2-8, el número de elementos, 4 en esta figura, la distancia entre los elementos (d , que será un valor igual para todos los elementos del array y que normalmente será función directa de la longitud de onda utilizada) y el ángulo entre la dirección de la onda incidente y la normal del array denotado como ϕ . La longitud total de nuestro array viene dada por $L = (N - 1)d$.

Para un ángulo de incidencia $\phi = 0$, la onda de la señal recibida llega a todos los elementos al mismo tiempo, por lo tanto, todos los elementos del array tendrán la misma fase. Sin embargo, si el ángulo de incidencia de la señal es distinto de 0, existirá una diferencia de fase entre los elementos del array. Este desfase puede ser calculado considerando la geometría representada en la Figura 2-8

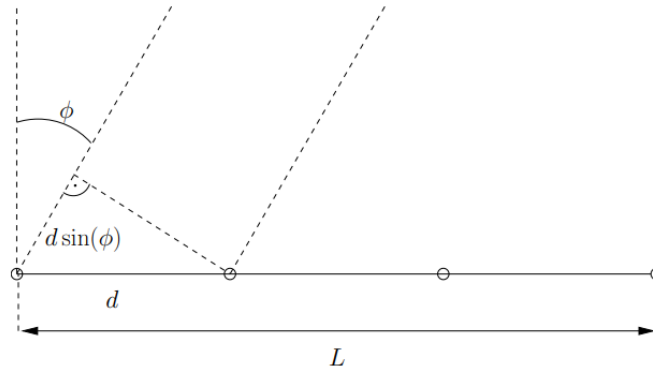


Figura 2-8 Geometría de un array lineal de 4 antenas [15].

El desfase lo podemos entender como la distancia de más que recorre la onda para llegar a una antena, respecto a otra antena tomada como referencia. Esa distancia de más que recorre la señal recibida puede ser calculada como $d \sin(\phi)$. Esa distancia da lugar a un desfase entre elementos de $\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \phi$, utilizando el mismo será posible calcular el desfase para el n -ésimo elemento respecto al elemento tomado como referencia, este desfase puede ser calculado como:

$$\alpha_n = \frac{2\pi}{\lambda} d(n - 1) \sin \phi \quad (2-2)$$

El desfase puede ser utilizado para calcular el vector de dirección que en el caso del array lineal viene dado por la siguiente ecuación:

$$\alpha_n(\phi) = e^{j \alpha_n} = e^{\frac{2\pi d}{\lambda} (n-1) \sin \phi} \quad (2-3)$$

Este vector de dirección representa los desfases que experimenta una onda plana con una dirección de incidencia (ϕ) en cada antena del array.

Por otro lado, como ya fue comentado antes, para el cálculo del factor de array, es necesario el cálculo de unos coeficientes de *beamforming* que tienen como objetivo corregir en fase y amplitud la onda incidente en cada elemento para poder sumar todas ellas coherentemente. De forma simplificada, las amplitudes de los coeficientes de *beamforming* $|w_n|$ de todos los elementos son iguales e iguales a 1, lo que ocurriría en el caso que la señal recibida lo hiciera con un ángulo de incidencia perpendicular a

la superficie del array ($\phi = 0$). De esa manera y con el objetivo de orientar el haz en una dirección en específico, se ha de introducir un desfase a los coeficientes que será calculado dependiendo del ángulo de incidencia de la onda ($\phi \neq 0$). Para este caso, se sumará de forma coherente la amplitud de la onda, de forma que esta se maximiza. El vector de coeficientes *beamforming* se calcula mediante la siguiente expresión:

$$w_n = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(n-1)\sin(\phi_0)} \quad (2-4)$$

A continuación, se muestran diversos diagramas de radiación variando diversos parámetros del array lineal. De esta manera, se analizará cual es el comportamiento del array ante diferentes variaciones en número de elementos, ángulo de apuntamiento y distancia entre elementos.

Para comenzar como se aprecia en la Figura 2-9, se refleja el patrón de radiación para un array lineal con un número de elementos cambiante $N = 2, 4$ y 8 y una distancia entre elementos $d = \frac{\lambda}{2}$.

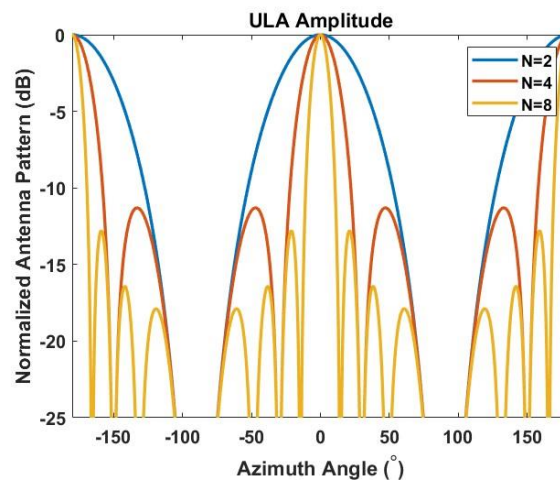


Figura 2-9 Patrón de radiación ULA para 2,4 y 8 elementos.

En la figura se aprecia como todos los patrones de radiación tienen un denominador común, un haz principal que apunta a $\phi = 0^\circ$ rodeado por una serie de lóbulos secundarios. Dentro del gráfico cabe destacar que, a mayor número de elementos, podemos apreciar que el lóbulo principal será más directivo y mayor será también la diferencia en ganancia entre el lóbulo principal y los secundarios, cuyo nivel se encuentra en 0 dB, -11.3 dB y -12.8 dB.

A continuación, como refleja la Figura 2-10 se realizará un análisis del diagrama de radiación del array lineal variando en esta ocasión la distancia entre elementos ($d = 0.25\lambda, 0.5\lambda$ y λ) y manteniendo constante el número de elementos ($N = 8$).

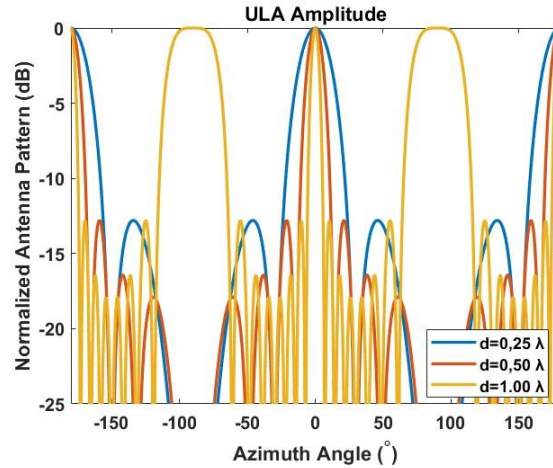


Figura 2-10 Patrón de radiación ULA variando la distancia entre elementos ($N=8$)

En la Figura 2-10 se puede apreciar sobreimpresionado el diagrama de radiación para $d = 0.25, 0.5\lambda, 1.0\lambda$. De acuerdo con la gráfica se puede apreciar como cuanto mayor es la distancia entre elementos más estrecho se hace el lóbulo principal, sin embargo, una distancia entre elementos demasiado grande puede también traer consigo algunos inconvenientes como por ejemplo la aparición de lóbulos reticulados (“*grating lobes*”). Los lóbulos reticulados son un tipo de lóbulos secundarios que tienen la misma ganancia que el lóbulo principal y cuyo inconveniente principal es que no permitirían la correcta identificación del satélite. Cabe mencionar que este tipo de lóbulos son visibles con $d = 1.0\lambda$ para ángulos $\pm 90^\circ$.

Para una mejor comprensión de la aparición de los lóbulos reticulados, estos aparecen cuando la separación entre elementos es demasiado grande en comparación con la longitud de onda, esto se debe a un efecto de solapamiento que forma parte de la teoría de muestreo de Nyquist. Para hacer frente a dicho efecto, la distancia máxima de separación no ha de ser mayor a $d = 0.5\lambda$.

Teniendo en cuenta lo estudiado en las Figura 2-9 y Figura 2-10, en la Figura 2-11 vemos representado un tercer análisis donde mantendremos constante el número de elementos ($N = 8$) y la distancia entre elementos ($d = 0.5\lambda$) y se comprobará la capacidad de apuntamiento de los haces variando el ángulo de incidencia (ϕ). Para una correcta comprensión de los resultados obtenidos en este caso, es necesario reseñar que la incidencia de la onda con un ángulo distinto de $\phi = 0^\circ$, conlleva la aparición de lóbulos secundarios en $180 - \phi$.

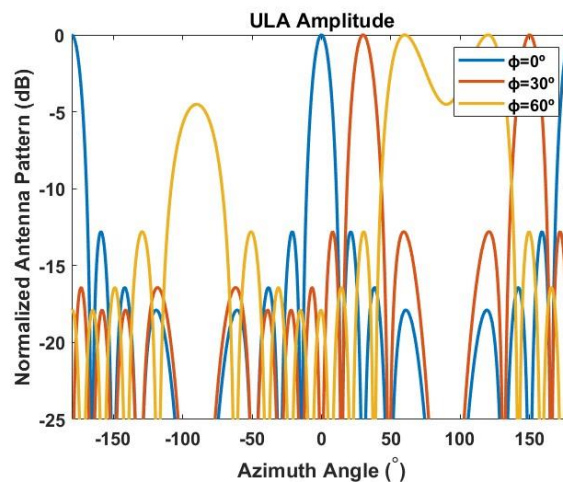


Figura 2-11 Patrón de radiación ULA para $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$. ($N=8, d=0.5\lambda$)

En la Figura 2-11 se puede observar que para un ángulo de incidencia de 0° , no se aprecian modificaciones ni apariciones de haces secundarios importantes, para 30° se aprecia la aparición de picos en 150° y que para 60° sucede lo propio en 120° . Por lo tanto es posible afirmar que cuanto más cercano a 0° , se tendrá un lóbulo principal más estrecho y que conforme ese ángulo de incidencia se va aproximando a 90° , el lóbulo principal y el lóbulo secundario, se encuentran más cercanos haciendo el haz principal cada vez más ancho y menos preciso. De esta manera es posible afirmar como el diagrama de radiación del ULA se ve afectado por el ángulo de incidencia y por consiguiente del ancho de haz, siendo este último uno de los más determinantes a la hora de realizar una correcta recepción de señales, ya que, a mayor ancho de haz, menor será la precisión y por tanto menor será la capacidad de identificar el satélite deseado.

2.2.2 UCA (Uniform circular array)

Una vez explicados los arrays lineales, otra configuración común para las antenas son los arrays circulares. Dada la simetría radial de los arrays circulares, la dependencia entre la forma del haz y el ángulo de apuntamiento se ve considerablemente reducida en relación con el caso de los ULA, pese a esto también cuenta con inconvenientes como son, la aparición de grandes lóbulos laterales, así como un lóbulo principal relativamente ancho. En este apartado se realizarán análisis del comportamiento del UCA en diferentes casuísticas, realizando a su vez también comparaciones con el ULA.

Los parámetros que caracterizan el comportamiento y rendimiento de los UCA se muestran en la Figura 2-12, el número de elementos, 8 en este caso, el radio del array (r), la distancia entre elementos (d) y la separación angular entre elementos ($\Delta\phi = 2\pi/N$). Así mismo el ángulo del n -ésimo elemento del array viene dado por la ecuación $\phi_n = \frac{2\pi n}{N} = \Delta\phi \cdot n$.

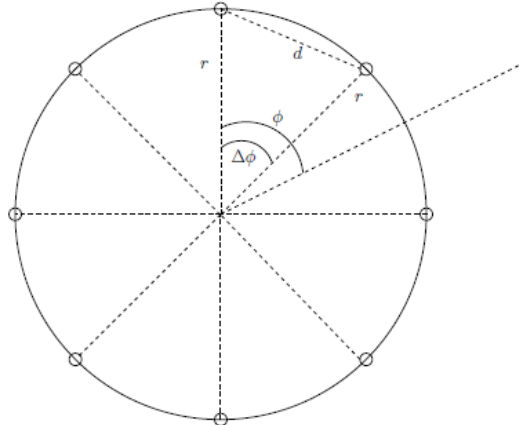


Figura 2-12 Geometría de un array circular de 8 elementos.

Al igual que en el caso de los arrays lineales, en caso de contar con una señal cuya onda tenga un ángulo de incidencia $\phi = 0^\circ$, la señal llegará a todos los elementos del array en el mismo instante, es decir, todos los elementos se encontrarán en fase. Sin embargo, si el ángulo de incidencia es $\phi \neq 0^\circ$, existe un desfase de señal en el n -ésimo elemento respecto al eje de referencia en el array que viene dada por:

$$\alpha_n = \frac{2\pi}{\lambda} r \cos(\phi_n - \phi) \quad (2-5)$$

Con el cálculo del desfase es posible hallar el vector desplazamiento como se mencionó con anterioridad, que para el caso del UCA se calcula de la siguiente manera:

$$a_n(\phi) = e^{ja_n} = e^{\frac{j2\pi}{\lambda} r \cos(\phi_n - \phi)} \quad (2-6)$$

El diagrama de radiación de un UCA se calculará de igual manera que en el caso de un ULA, mediante la ecuación (2-7) donde $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]'$ son los coeficientes de *beamforming*. Para conseguir el apuntamiento de haz en la dirección deseada, será necesario ajustar las fases de los coeficientes w_n para conseguir compensar las fases del vector de direccionamiento en la dirección deseada. Esos coeficientes de *beamforming* que permiten el apuntamiento deseado del haz en el caso del UCA vienen dados por la siguiente expresión:

$$w_n = e^{\frac{j2\pi}{\lambda} r \cos(\phi_n - \phi)} \quad (2-7)$$

De igual forma que en el caso de los ULA, el diagrama de radiación de los UCA, viene determinado por el número de elementos y la distancia entre los mismos. Para comprender de forma más clara la influencia de dichos parámetros, se realizará un análisis del diagrama de radiación en diferentes casuísticas.

En este primer ejemplo, se realiza un análisis de la influencia del número de elementos en el diagrama de radiación del UCA. Para ello, se estudiará el diagrama de radiación para $N = 4, 8, 16$ elementos, manteniendo constante la distancia entre elementos en $d = 0.4\lambda$. En este caso a diferencia del caso de los ULA, esta separación entre elementos constante y un número cambiante de elementos, traerá consigo un radio específico para cada número de elementos que viene dado por la siguiente expresión:

$$r = \frac{d}{2 \sin(\frac{\Delta\phi}{2})} \quad (2-8)$$

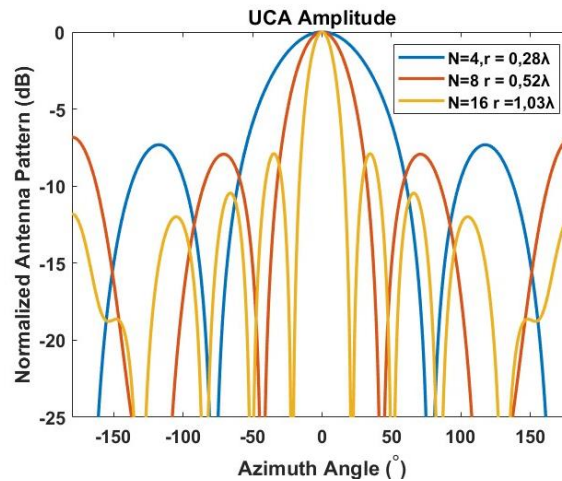


Figura 2-13 Patrón de radiación UCA para $N= 4,8,16$ y $d=0,4\lambda$

En la Figura 2-13 se realiza un estudio de la influencia del número de elementos en el diagrama de radiación, de forma general se puede apreciar como independientemente del número de elementos que configuren el array el nivel de los lóbulos secundarios se mantiene en torno a los -8 dB . Por otro lado es también reseñable como cuanto mayor es el número de elementos que conforman el array, mayor es también la capacidad de apuntamiento del lóbulo principal, siendo este más estrecho cuanto mayor es el número de elementos del que goza el UCA.

Continuando con el análisis de la influencia de los diferentes parámetros que caracterizan la geometría de los UCA, en el siguiente ejemplo se realizará el análisis de la influencia del radio del UCA

en su diagrama de radiación. Para ello se mantendrán fijos el número de elementos ($N = 8$) y se estudiará el diagrama de radiación para $r = 0.4\lambda, 0.5\lambda, 0.6\lambda$.

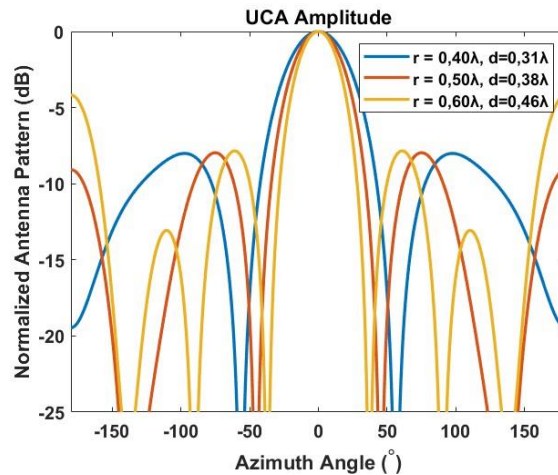


Figura 2-14 Patrón de radiación UCA variación de radio y $N=8$

En la Figura 2-14 es posible apreciar la influencia del tamaño de radio de un UCA en su diagrama de radiación, es posible a su vez afirmar que para $r = 0.4\lambda$ y 0.5λ , el nivel de lóbulos secundarios se mantiene constante en $-8dB$. Por otro lado, para $r > 0.5\lambda$, comienzan a aparecer lóbulos reticulados en $\pm 140^\circ$. Este ejemplo también revela una importante propiedad de los UCA, ya que al contrario que los ULA, carecen de lóbulo espejo en su diagrama de radiación, ya que su propio diagrama elimina las radiaciones secundarias no deseadas.

Tal y como se aprecia en la Figura 2-14, para $r > 0.5\lambda$, comienza la aparición de los lóbulos reticulados, es por ello que para el siguiente ejemplo se mantendrá constante tanto el número de elementos ($N = 8$) como el radio del UCA ($r = 0.5\lambda$), con el objetivo de estudiar la capacidad de apuntamiento del UCA ante la recepción de señales con diferente ángulo de incidencia y cómo afecta a su diagrama de radiación.

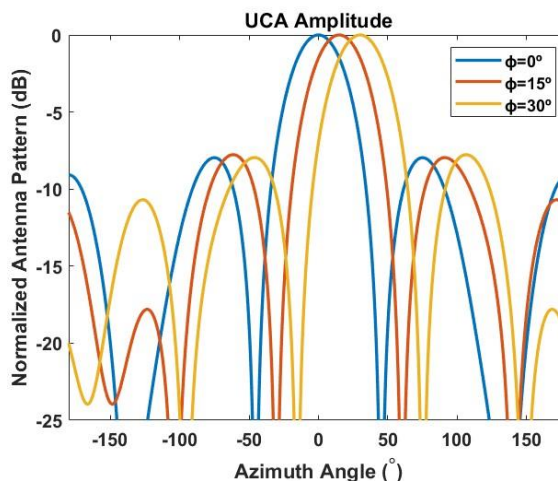


Figura 2-15 Patrón de radiación para diferentes ángulos de incidencia

Como se puede apreciar en la Figura 2-15 el diagrama de radiación para $\phi = 0^\circ, 15^\circ$ y 30° , no cambian de forma realmente significativa unas de otras, ni tampoco se aprecia un nivel de lóbulos secundarios llamativo. Esto se debe a la simetría radial de los UCA, por lo que este supuesto y resultados se repetirán para todo $\frac{2\pi}{N}$.

2.2.3 UCA 3D (Uniform Circular Array)

Teniendo en cuenta lo apuntado al final del apartado anterior sobre los arrays tanto lineales como circulares en dos dimensiones, y dada la necesidad de apuntar en elevación a los satélites se hace necesaria la utilización de un array que nos permita apuntar en tres dimensiones. Es ahí donde aparece la figura del UCA 3D, que nos permite no solamente apuntar en azimut si no también hacer lo propio en elevación. En este apartado se analizarán las características de este array, al igual que se hizo en los apartados del ULA (*Uniform Linear Array*) y UCA (*Uniform circular array*) y posteriormente se sacarán unas conclusiones.

Para una correcta realización del *beamforming* en 3D, y como ya fue comentado en los apartados anteriores, en caso de contar con una señal cuya onda incidente lo haga con un ángulo $\phi = 0^\circ$, la señal llegará a todos los elementos del array en el mismo instante, es decir, no existen desfases entre las señales que reciben los diferentes elementos del array. Sin embargo, si el ángulo de incidencia es $\phi \neq 0^\circ$, existe un desfase de señal en el n -ésimo elemento respecto al eje de referencia en el array que se corresponde con:

$$\alpha_n = \frac{2\pi}{\lambda} r \sin(\theta) \cos(\phi_n - \phi) \quad (2-9)$$

Con el cálculo de dicho desfase, el vector de desplazamiento para un UCA en 3D viene dado por:

$$a_n(\phi) = e^{\frac{j2\pi}{\lambda} r \sin(\theta) \cos(\phi_n - \phi)} \quad (2-10)$$

Al igual que en los casos previamente expuestos y con el objetivo de realizar un correcto apuntamiento de haz en la dirección deseada, será necesario ajustar las fases de los coeficientes w_n para conseguir compensar las fases del vector de direccionamiento en la dirección deseada. Dichos coeficientes de *beamforming* para un UCA vienen dados por la siguiente expresión:

$$w_n = e^{\frac{j2\pi}{\lambda} r \sin(\theta) \cos(\phi_n - \phi)} \quad (2-11)$$

Los parámetros que caracterizan el comportamiento y rendimiento de los UCA en 3D son los representados en la Figura 2-16, el número de elementos, N en este caso, el radio del array (r), la distancia entre elementos (d), la separación angular entre elementos ($\phi_n = 2\pi/N$) y los ángulos de azimut y elevación.

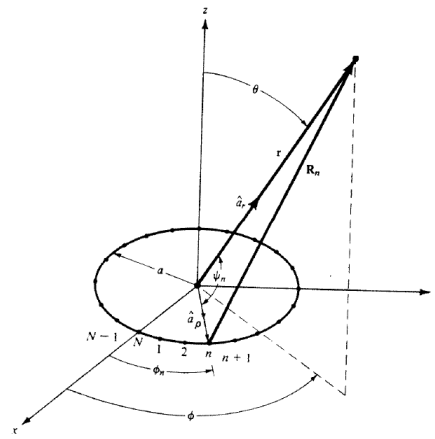


Figura 2-16 Geometría de un UCA en 3D

Si bien se introduce el concepto de UCA 3D, este no representa una nueva geometría de array, sino una extensión del UCA convencional con la incorporación de una nueva dimensión angular. En la práctica, esto significa que las antenas pueden distribuirse en distintas alturas o niveles dentro de la estructura circular, lo que permite mejorar la resolución en elevación al aplicar técnicas de *beamforming* en tres dimensiones

Para comenzar, se realizará un análisis de cómo la variación del número de elementos afecta al diagrama de radiación del UCA (3D)(Figura 2-17, Figura 2-18, Figura 2-19, Figura 2-20). Para ello se han tomado como constantes los valores de separación entre elementos ($d = 0.4\lambda$), el ángulo de incidencia en azimuth ($\phi = 0^\circ$) y en elevación ($\theta = 0^\circ$), y se realiza el análisis con $N = 4, 8, 16$ y 32 .

- Para $N=4$

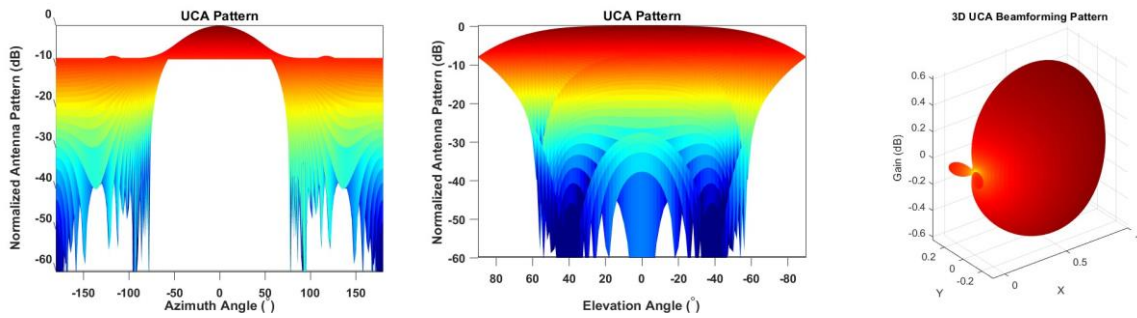


Figura 2-17 Patrón de radiación UCA 3D para $N=4$, en azimuth, elevación y 3D

- Para $N=8$

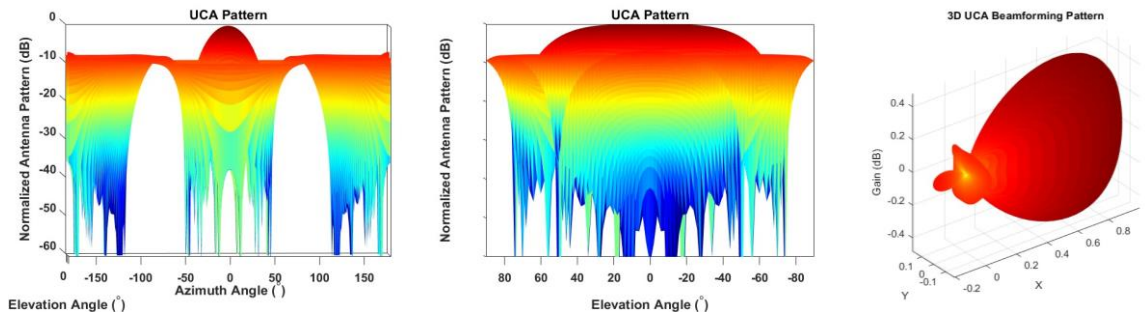


Figura 2-18 Patrón de radiación UCA 3D para $N=8$, en azimuth, elevación y 3D

- Para $N=16$

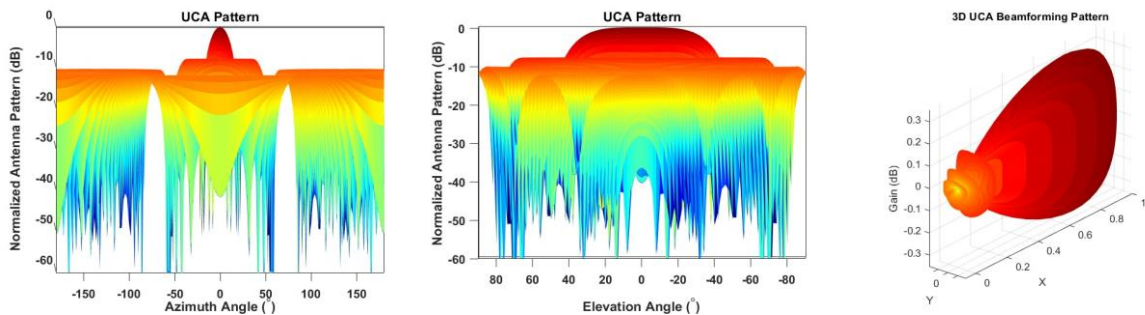


Figura 2-19 Patrón de radiación UCA 3D para $N=16$, en azimuth, elevación y 3D

- Para $N=32$

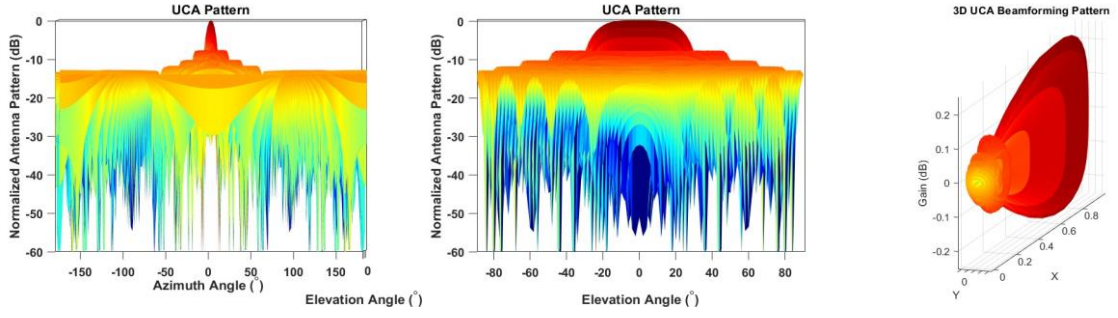


Figura 2-20 Patrón de radiación UCA 3D para $N=32$, en azimuth, elevación y 3D

Una vez expuestos los resultados de los distintos diagramas de radiación resultantes para los diferentes números de elementos, es posible llegar a la conclusión de que a mayor número de elementos más directivo será el haz del array. Por otro lado, es destacable también la diferencia en cuanto a resolución angular que existe entre el diagrama de radiación en azimuth y en elevación, ya que se puede observar como en el más directivo de los casos expuestos, en este caso para $N=32$, en el diagrama en azimuth es posible alcanzar un ancho de lóbulo a -3dB de unos 8° y en elevación ese ancho de lóbulo a -3dB crece hasta los 60° . Es por ello que el array tendrá mayor directividad y resolución angular en el plano azimuthal que en elevación.

Siguiendo con el análisis del diagrama de radiación de un UCA según los diferentes parámetros, en este caso se analizará cómo afecta el cambio en el radio del array en dicho diagrama (Figura 2-21, Figura 2-22, Figura 2-23), para ello se mantendrá el número de elementos constante ($N=8$) y los ángulos de incidencia en azimuth ($\phi = 0^\circ$) y en elevación ($\theta = 0^\circ$).

- Para $r = 0.4\lambda$:

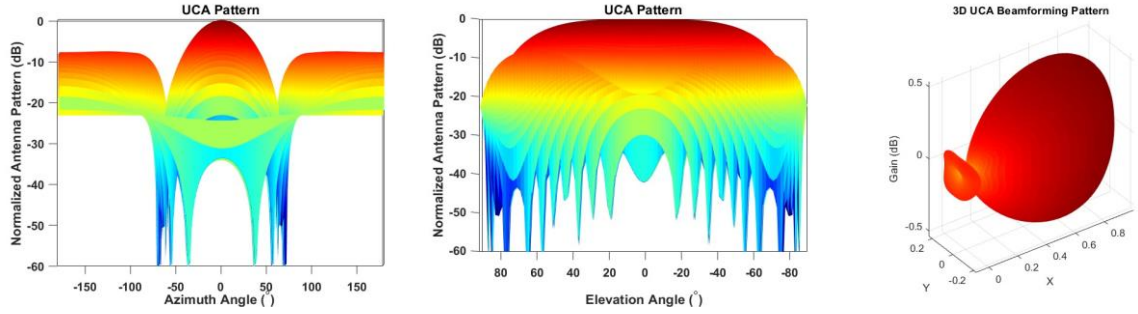


Figura 2-21 Patrón de radiación UCA 3D para $r=0,4\lambda$, en azimuth, elevación y 3D

- Para $r = 0.5\lambda$:

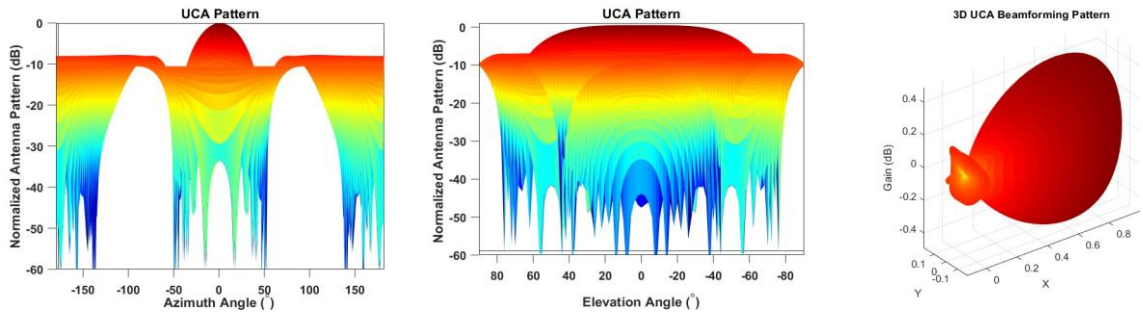


Figura 2-22 Patrón de radiación UCA 3D para $r=0,5\lambda$, en azimuth, elevación y 3D

- Para $r = 0.6\lambda$:

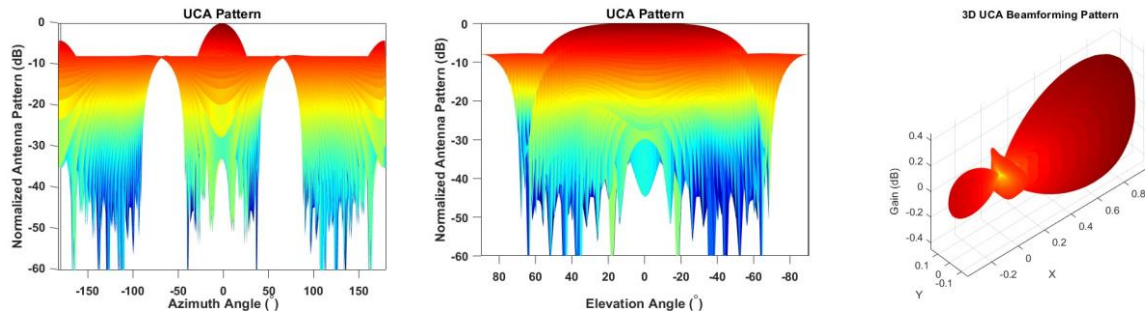


Figura 2-23 Patrón de radiación UCA 3D para $r=0,6\lambda$, en azimuth, elevación y 3D

Una vez realizadas las simulaciones y atendiendo a las gráficas resultantes, es posible afirmar que cuanto mayor sea el radio del UCA, más estrecho será también el lóbulo principal, a la misma vez que surgirán un mayor número de lóbulos secundarios. Este estrechamiento en el lóbulo principal es mucho más notorio en el plano azimutal que en elevación por lo que pese a gozar de una mayor capacidad de apuntamiento en azimuth, seguirá existiendo una baja relación señal-ruido en elevación. Por tanto, es posible ver como cuando el radio es mayor que 0.5λ , se hacen mucho más notorios los lóbulos secundarios, lo que podría ser perjudicial a la hora de realizar un correcto apuntamiento.

Continuando con el estudio de los diversos parámetros del array, en este caso se realizará una comprobación de cómo varia dicho diagrama de radiación conforme cambia el ángulo de incidencia de la señal tanto en azimuth como en elevación (Figura 2-24, Figura 2-25, Figura 2-26, Figura 2-27). Para llevar a cabo dichas puestas en práctica se harán cuatro probaturas, la primera será $\phi = 0^\circ$ y $\theta = 0^\circ$, la segunda será $\phi = 20^\circ$ y $\theta = 0^\circ$, la tercera $\phi = 0^\circ$ y $\theta = 20^\circ$ y para concluir se hará lo propio con $\phi = 20^\circ$ y $\theta = 20^\circ$. Además de dichos ángulos, se mantendrán como constantes, $r = 0.5\lambda$ y $N = 8$.

- Para $\phi = 0^\circ$ y $\theta = 0^\circ$.

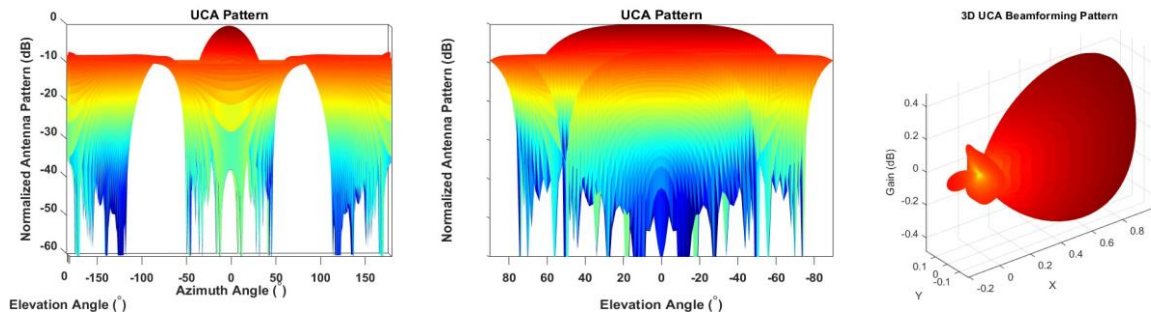


Figura 2-24 Patrón de radiación UCA 3D para $\phi=0^\circ$ y $\theta=0^\circ$ en azimuth , elevación y 3D

- Para $\phi = 20^\circ$ y $\theta = 0^\circ$.

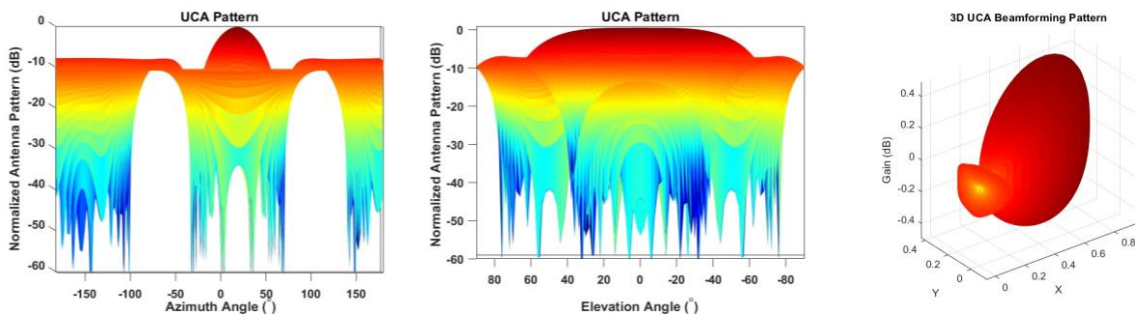


Figura 2-25 Patrón de radiación UCA 3D para $\phi=20^\circ$ y $\theta=0^\circ$, en azimuth, elevación y 3D

- Para $\phi = 0^\circ$ y $\theta = 20^\circ$

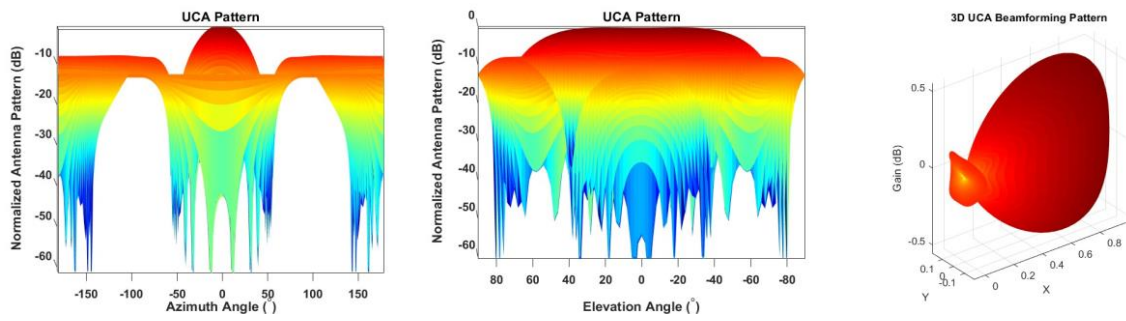


Figura 2-26 Patrón de radiación UCA 3D para $\phi=0^\circ$ y $\theta=20^\circ$, en azimuth, elevación y 3D

- Para $\phi = 20^\circ$ y $\theta = 20^\circ$

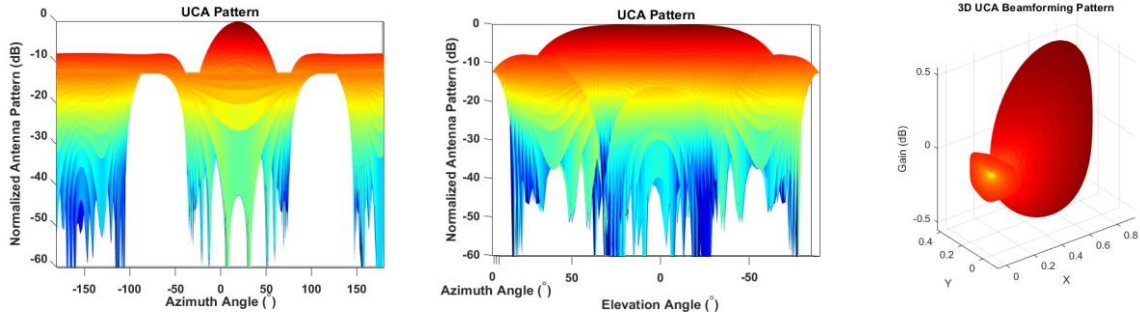


Figura 2-27 Patrón de radiación UCA 3D para $\phi=20^\circ$ y $\theta=20^\circ$, en azimuth, elevación y 3D

Una vez analizadas las diferentes gráficas según las variaciones en azimuth y elevación, es posible observar como el ancho de haz a -3dB, cuando el azimuth es 0° y la elevación es 0° es significativamente más directiva que en el caso en que el azimuth es 20° y la elevación es 20° , a la misma vez que cuanto mayor es el ángulo de incidencia mayor es también el tamaño de los lóbulos secundarios. Es posible comprobar como el diagrama de radiación se deteriora mucho más en elevación que en azimuth, teniendo por tanto en azimuth una mucho mejor resolución angular.

2.2.4 Conclusiones

Tras la realización de diversas pruebas tanto en ULA, como en UCA (2D y 3D), es posible realizar una serie de conclusiones sobre los resultados obtenidos en dichos análisis.

- Resolución angular: Se ha comprobado como por lo general el ULA proporciona un patrón de radiación con mayor directividad en una única dimensión, pero esta es insuficiente para el apuntamiento en 3D de satélites que se requiere.
- Directividad en elevación: En los arrays UCA 3D, se ha observado que, aunque permiten el apuntamiento en elevación, la resolución angular en dicha dimensión es mucho peor a la que se obtiene en azimuth.

Por lo general se ha podido apreciar como el diagrama de radiación en todos los casos se iba haciendo más directivo conforme mayor era el número de elementos, así como se deterioraba el mismo para distancias mayores de $d = 0.5\lambda$. Teniendo en cuenta la necesidad de detectar la posición de los satélites tanto en azimuth como en elevación, se ha optado por elegir el UCA 3D, siendo esta la solución más efectiva para realizar dicha tarea.

3 DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Software

3.1.1 GNU Radio (SDR)

SDR (*Software Defined Radio*) es una tecnología que combina hardware de radiofrecuencia con procesamiento de señales basado en software. Esto permite diseñar sistemas capaces de operar en un amplio rango de frecuencias y modulaciones de manera flexible [16].

Durante las décadas de 1980 y 1990, surgió la posibilidad de controlar equipos de radio mediante ordenadores, gracias a la incorporación de interfaces de comunicación. Esto permitió gestionar funciones avanzadas que antes solo podían manipularse físicamente en los dispositivos de radio. Además, la introducción de procesadores digitales en señal (DSP) en estos sistemas posibilitó la implementación de filtros y técnicas de reducción de ruido de manera más eficiente que con circuitos analógicos tradicionales.

Este avance llevó al desarrollo de las radios definidas por software (SDR), donde la parte de hardware se reduce al mínimo, mientras que la mayor parte del procesamiento y control se realiza a través de software en un ordenador u otro dispositivo compatible. Es importante señalar que estos sistemas pueden integrarse con herramientas como MATLAB para realizar análisis y simulaciones[17].

En este contexto, GNU Radio se ha convertido en una herramienta de código abierto ampliamente utilizada para el diseño, simulación e implementación de sistemas de radio basados en SDR. Se compone de un conjunto de librerías y aplicaciones que permiten procesar señales de radio digitalmente. GNU Radio puede operar con dispositivos SDR conectados a un ordenador o incluso utilizar la tarjeta de sonido para procesar señales. Su uso es común en entornos educativos, de investigación y en la industria de las telecomunicaciones, siendo compatible principalmente con sistemas operativos GNU/Linux, aunque también puede ejecutarse en otras plataformas[18].

En el contexto de este TFG, GNU Radio se utiliza principalmente para la recepción de señales GNSS en la frecuencia L1 (1575.42 MHz). Esta herramienta, en combinación con un hardware SDR adecuado, posibilita la captación efectiva de las señales provenientes de satélites GNSS para su posterior análisis y procesamiento digital.

Adicionalmente, mediante GNU Radio se establece un flujo de procesamiento completo que contempla tareas fundamentales como el filtrado, la amplificación y el muestreo de la señal recibida. De este modo, se asegura que los datos obtenidos cuenten con las características necesarias para ser posteriormente procesados y analizados con precisión en MATLAB.

Por último, GNU Radio permite la incorporación de filtros digitales específicos que son utilizados con el objetivo de eliminar interferencias no deseadas presentes en la señal recibida. Gracias a esta capacidad de filtrado, es posible mejorar significativamente la relación señal-ruido (SNR), incrementando así la calidad y la fiabilidad de los datos registrados para el posterior análisis mediante algoritmos de *beamforming*.

La utilización de este programa es fundamental para la adquisición y preprocesamiento de señales GNSS, proporcionando una plataforma flexible y potente para el desarrollo de sistemas de radio definidos por software.

3.1.2 MATLAB

MATLAB es un entorno de programación y cálculo numérico ampliamente utilizado en ingeniería y ciencias aplicadas[19]. Ofrece herramientas avanzadas para el procesamiento de señales, simulaciones y visualización de datos lo que lo convierte en una elección adecuada para el desarrollo de algoritmos complejos y análisis de sistemas de comunicaciones.

En este TFG, MATLAB se empleará principalmente para el procesamiento digital de las señales GNSS recibidas. En primer lugar, se utilizará para realizar la correlación de las señales captadas con los códigos PRN característicos de cada satélite, permitiendo su identificación precisa. De esta manera, se podrá discernir claramente qué satélites están siendo recibidos y evaluar la calidad de las señales correspondientes.

Además, se aprovecharán las capacidades de MATLAB para la simulación y visualización de patrones de radiación del array de antenas propuesto. Estas simulaciones permitirán analizar cómo la variación de parámetros del array afecta al rendimiento global, facilitando así una elección fundamentada y optimizada de la configuración final del array de antenas utilizado.

Finalmente, MATLAB permitirá desarrollar y validar los algoritmos de *beamforming* que constituyen uno de los principales objetivos del proyecto. Mediante estos algoritmos será posible realizar el apuntamiento digital del array hacia los satélites GNSS, determinando su posición precisa tanto en azimuth como en elevación, maximizando así la potencia de la señal recibida y minimizando las interferencias. La integración de este programa es esencial para el procesamiento avanzado de señales, simulaciones y análisis, proporcionando herramientas robustas para el desarrollo y validación de técnicas de *beamforming* en 3D aplicadas a sistemas GNSS.

3.1.3 U-Center

U-center es un software desarrollado por u-blox para la configuración, monitorización y análisis de datos provenientes de receptores GNSS[20]. Este programa permite visualizar en tiempo real la señal recibida por un receptor GNSS proporcionando información clave como la identificación de satélites mediante sus PRN (*Pseudo Random Noise*), la intensidad de la señal recibida, azimuth y elevación de cada satélite y su posicionamiento en tiempo real en base a los datos recibidos.

En este proyecto, U-center, se utilizará esencialmente como herramienta de validación para los algoritmos de *beamforming* implementados en Matlab, permitiendo la comparación de distintos parámetros obtenidos mediante ambas técnicas:

- PRN detectados mediante el algoritmo de *beamforming* en MATLAB con el detectado por el programa.
- Intensidad de la señal extraída mediante el procesamiento en MATLAB comparada con la reportada en u-center.
- Estimaciones de azimuth y elevación derivadas del *beamforming* frente a las mediciones proporcionadas por el receptor GNSS.

El uso de u-center facilitará la evaluación de la precisión y eficacia del *beamforming* en la recepción de señales GNSS, proporcionando una referencia directa con datos reales adquiridos por el receptor. Material

3.1.4 Antenas utilizadas

Las antenas que conforman el array para este proyecto son antenas Taoglas Spartan MA600, como las de la Figura 3-1. Se trata de un sistema multibanda compuesto por tres antenas en un solo encapsulado, diseñadas para operar en *WiFi*, telefonía móvil (2G-3G) y GNSS. La sección GNSS de esta antena cubre los servicios L1 C/A de GPS (1575 MHz) y L1 C/A de GLONASS (1602 MHz). Además, ofrece un rechazo de más de 20 dB para señales fuera de banda [21].

Su diseño compacto, con un diámetro de 14,56 cm, permite su integración en un array circular uniforme (UCA) para la implementación de técnicas de *beamforming* en 3D. Además, cuenta con una polarización RHCP (*Right-Hand Circular Polarization*) y un patrón de radiación hemisférico, lo que mejora la relación señal-ruido y la recepción de señales directas, minimizando el impacto de reflexiones no deseadas[22].



Figura 3-1 Antena Taoglas Spartan MA600

La protección IP67 hace que esta antena sea adecuada para experimentación en exteriores, garantizando resistencia a condiciones climáticas adversas. Además, su aislamiento de más de 20 dB entre componentes contribuye a reducir interferencias en la recepción de señales GNSS. Aunque las antenas están integradas en un mismo encapsulado, su diseño optimizado minimiza las interferencias electromagnéticas entre elementos. La baja pérdida de sus cables y su estabilidad de montaje permiten realizar mediciones confiables sin degradación en la señal.

En conclusión, esta antena ofrece alta calidad de señal, resistencia a entornos exigentes y compatibilidad con GNSS, lo que la convierte en una opción ideal para validar las técnicas de *beamforming* en azimut y elevación desarrolladas en este proyecto.

3.1.5 HackRF one

El HackRF One (Figura 3-2) es un transceptor SDR (*Software Defined Radio*) de código abierto, diseñado para transmitir y recibir señales de radiofrecuencia en un amplio rango de 1 MHz a 6 GHz. Su capacidad de operar en frecuencias de GNSS, junto con su flexibilidad para ser controlado por software, lo convierte en una herramienta de gran utilidad para la experimentación y análisis de señales satelitales en este proyecto[23].

Cuenta con un ancho de banda de hasta 20 MHz, su capacidad de trabajar en modo *half-duplex* (solo transmisión o solo recepción en un instante dado) y su compatibilidad con una amplia gama de software SDR como GNU Radio, MATLAB y U-center, todos ellos utilizados en este proyecto, le permiten capturar, procesar y optimizar el procesamiento de señales, lo que es ideal para la aplicación de *beamforming* y detección de satélites GNSS[24].

En este proyecto, el HackRF One se utilizará en la recepción de señales GNSS, permitiendo registrar datos de satélites en tiempo real y proporcionar una entrada de datos real para validar los algoritmos implementados en MATLAB. Su capacidad de captura de señales en diferentes frecuencias y su control preciso del espectro facilitan el estudio del ruido, interferencias y comportamiento de los satélites GNSS, permitiendo comparar las mediciones obtenidas mediante algoritmos de *beamforming* y el software U-center.



Figura 3-2 Dispositivo Hack RF one

3.1.6 Pluto SDR

El Pluto SDR (Figura 3-3), fabricado por *Analog Devices*, es un transceptor definido por software que permite la transmisión y recepción de señales en un amplio rango de frecuencias desde 325 MHz hasta 3.8 GHz. Su capacidad para cubrir las frecuencias empleadas por los sistemas GNSS, especialmente en la banda L1 (1575.42 MHz), así como su facilidad para configurarse mediante software, lo convierte en una herramienta ideal para la experimentación en sistemas de comunicaciones inalámbricas y satelitales, especialmente para aplicaciones en *beamforming* y análisis de señales GNSS[25].



Figura 3-3 Dispositivo Pluto SDR

Entre sus principales ventajas está la posibilidad de operar con una tasa de muestreo máxima de hasta 61.44 MSPS, permitiendo capturar señales GNSS con alta precisión temporal y espectral, esencial para estudios detallados del comportamiento de la señal recibida. Además, Pluto SDR dispone de conectividad USB que facilita la interfaz con software especializado como GNU Radio, MATLAB o U-center, todos ellos empleados en este proyecto, permitiendo así la integración sencilla y efectiva en el flujo de trabajo del procesamiento de señales GNSS[26].

3.1.7 U-blox EVK-M8T-0-01

El EVK-M8T-0-01 (Figura 3-4) es un kit de evaluación desarrollado por u-blox que tiene como objetivo probar y evaluar sus módulos GNSS de la serie M8T, están diseñados para permitir la evaluación y análisis de señales GNSS en tiempo real, facilitando la implementación y validación de técnicas de *beamforming* con un array circular de antenas en 3D[27].



Figura 3-4 Dispositivo U-blox EVK-M8T-0-01

Este dispositivo es compatible con múltiples constelaciones GNSS (GPS, Galileo, GLONASS y BeiDou) y en este proyecto se utilizará en conjunto con el software u-center para verificar que los satélites detectados y las direcciones estimadas mediante *beamforming* coincidan con las posiciones reales de los satélites observados en u-center.

Además, este dispositivo proporciona datos de sincronización de tiempo preciso, lo cual se utilizará para corregir los desfases en la señal con el objetivo de mejorar la precisión a la hora de ubicar los satélites.

3.1.8 Placa USRP X310

La USRP X310 (Figura 3-5) es un transceptor definido por software desarrollado por *Ettus Research*, diseñado para la recepción y transmisión de señales en un amplio rango de frecuencias. Su arquitectura flexible permite la digitalización y procesamiento en tiempo real de señales de radiofrecuencia, cuenta con una gran aplicación en comunicación inalámbrica, radar y sistema GNSS. Gracias a su compatibilidad con software como GNU Radio y MATLAB, permite la recepción y posterior procesamiento de las señales en los diferentes algoritmos de MATLAB dentro de este proyecto [28].

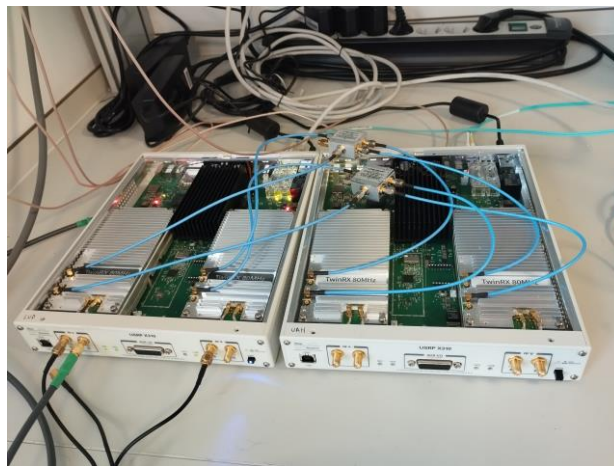


Figura 3-5 Placas USRP X310

En concreto, la placa USRP X310 será de gran utilidad a la hora de grabar las señales recibidas por el UCA y el ULA. Esto se debe a su capacidad para manejar múltiples canales simultáneos con alta

sincronización y precisión temporal, dado que en aplicaciones como el *beamforming* es necesaria una coherencia precisa entre las señales recibidas por las diferentes antenas.

3.1.9 GPSDO

Un *GPS Disciplined Oscillator* (GPSDO) es un dispositivo electrónico que proporciona una señal de referencia estable y precisa, tanto en frecuencia como en tiempo, mediante la sincronización con la señal recibida de los satélites del sistema GPS. Funciona combinando un oscilador local estable con correcciones continuas provenientes del sistema GPS, asegurando así una alta precisión temporal y estabilidad de frecuencia a largo plazo [29].

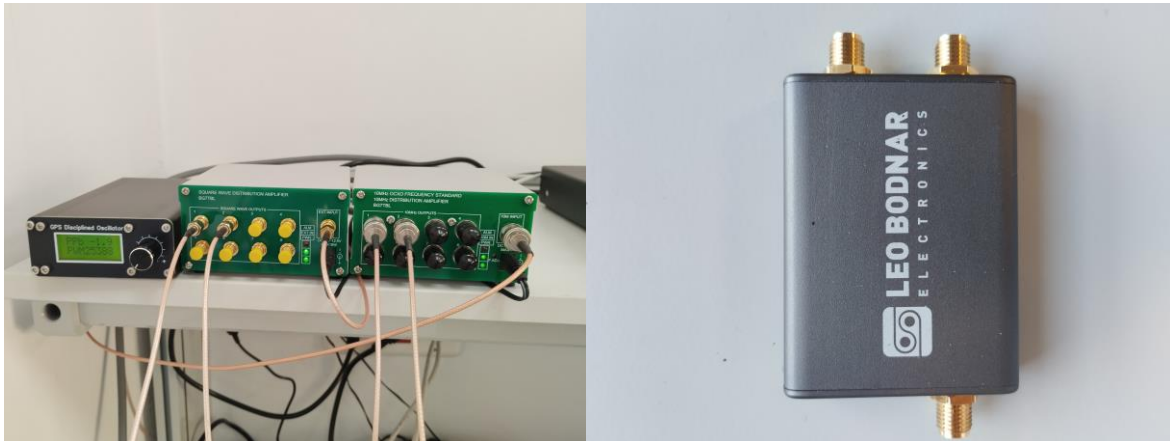


Figura 3-6 Dispositivos GPSDO utilizados

En este proyecto, el GPSDO (Figura 3-6) se utilizará para mantener sincronizados los diferentes canales del sistema receptor USRP X310, así como para una correcta aplicación del PLUTO SDR. El GPSDO cuenta con un papel de gran importancia dentro de las técnicas de *beamforming*, ya que la sincronización que proporciona influye de manera directa en la exactitud en la estimación de la dirección de llegada de las señales GNSS. De esta forma, el GPSDO contribuye a garantizar la fiabilidad en la recepción y procesamiento de señales con el objetivo de conseguir un buen rendimiento en la localización de satélites.

3.2 Creación de la señal sintética

Con el objetivo de validar los algoritmos de *beamforming* implementados en MATLAB es necesario disponer de señales GNSS representativas y controladas, lo cual no siempre es posible conseguir con mediciones reales debido a limitaciones prácticas como interferencias externas, ruido o condiciones ambientales. Por esta razón, en este proyecto se ha decidido generar una señal sintética GNSS controlada, con el objetivo principal de evaluar la precisión y robustez de los algoritmos de *beamforming* desarrollados, proporcionando una referencia precisa y repetible para la validación de resultados.

El proceso para generar la señal sintética consiste en la creación inicial de un código PRN (*Pseudo Random Noise*), tal y como se explica en el Anexo III: Generación códigos PRN. Este código es específico para cada satélite y se genera utilizando la función MATLAB `cacode`, la cual permite obtener una secuencia binaria única asociada al satélite objetivo en base a los valores recogidos en dicha función. Además, estos códigos deben satisfacer dos requisitos, debe haber una correlación cruzada entre elementos prácticamente nula entre los códigos asociados a diferentes transmisores, así como una correlación cero excepto para códigos perfectamente sincronizados.

3.2.1 Configuración del escenario y procedimiento utilizado

El escenario, tal y como muestra la Figura 3-7 se encuentra entre la pista militar de la Escuela Naval Militar, donde se encontraba la antena transmisora, y la azotea del edificio de investigación del CUD donde se encuentra el array de antenas que recibe la señal, la antena transmisora se encontraba en la

dirección de apuntamiento del array de antenas. Dicho array, está compuesto por cuatro antenas pasivas Televés Dinova Boss DVB-T, conformando un array lineal de cuatro elementos con una distancia entre elementos $d = \frac{\lambda}{2}$.



Figura 3-7 Escenario de generación de la señal sintética

Para recibir la señal, las antenas se conectan a un receptor de radio USRP X310. Las operaciones de muestreo se sincronizaron con un reloj oscilador disciplinado GPS externo (GPSDO). La antena transmisora está basada por un dispositivo HackRF-One, el cual se conecta a un ordenador portátil donde se parametrizan y generan las señales utilizando GNU Radio.

En esta prueba, la señal basada en PRN se generó y transmitió en un canal libre dentro de la banda DVB-T, en lugar de utilizar directamente la banda GNSS. Esta elección se debió a restricciones legales, ya que la emisión en la banda L1 de GNSS sin autorización está prohibida y podría interferir con sistemas reales de navegación satelital. El objetivo de esta transmisión en DVB-T fue replicar las condiciones de una señal GNSS en un entorno controlado, permitiendo validar la capacidad de los algoritmos de correlación de PRN y *beamforming* sin afectar sistemas operativos reales. Para aportar un mayor realismo, se buscó extender el espectro de la señal PRN dentro de un canal DVB-T ocupado, similar a una transmisión TDT, reduciendo así su detectabilidad.

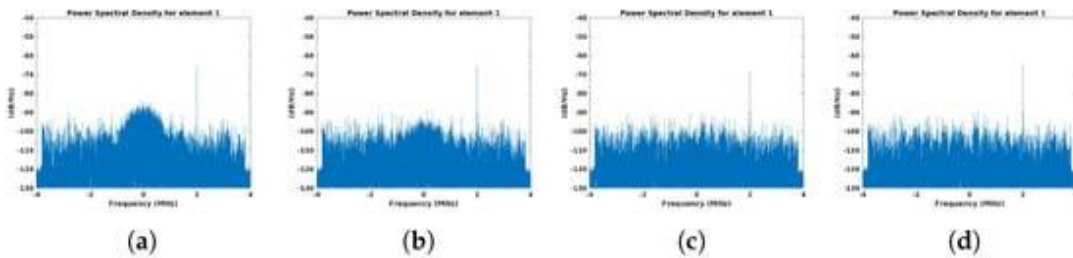


Figura 3-8 Espectro de una señal PRN en recepción con diferentes ganancias de transmisión a) 40 dB; b) 30 dB; c) 20 dB; d) 10 dB.

Para conseguir este objetivo, se transmite el código PRN de 1023 bits en un periodo ininterrumpido de 1 ms mientras se ensancha su espectro en 1 MHz. De esta manera y dependiendo de la ganancia a la que se emita la señal PRN, el espectro resultante podría destacar sobre el espectro de la propia señal TDT, de forma que resulta necesario utilizar una ganancia adecuada para conseguir una baja probabilidad de detección de dicha señal por parte del receptor.

Como se puede apreciar en la Figura 3-8 [30], para ganancias de 40 dB y 30 dB el espectro de la propia señal PRN es mayor que el de la señal del canal DVB-T, por el contrario para unas ganancias de 20 dB y 10 dB, el espectro de la señal PRN se mezcla correctamente con el espectro del canal de forma

que se consigue el objetivo de aportar realismo y favorecer una difícil detección de la señal por parte del receptor.

Una vez grabada dicha señal con el resto de emisiones propias del canal DVB-T, se utiliza para la validación de los algoritmos de MATLAB. A grandes rasgos, el objetivo del postprocesado de la señal es el de averiguar qué satélites están presentes en la señal que recibimos.

Para ello, la primera etapa de adquisición de una señal GPS comienza con la conversión y muestreo de la señal recibida, posteriormente se realiza la generación local de códigos PRN. Para cada satélite GPS, se construye un código C/A de longitud 1023 bits y con una tasa de 1,023 Mbps. En caso que la frecuencia de muestreo difiera de esa tasa, se ajustaría la velocidad de generación del código para que coincida con las muestras de la señal que se están analizando.

Posteriormente, dado el movimiento relativo entre el satélite y el receptor, la señal puede presentar un desplazamiento en frecuencia (Δf) [31]. Para encontrarlo, se barre en un rango de frecuencias (por ejemplo $\pm 5kHz$), generando versiones de la señal corregidas en Doppler de acuerdo con la ecuación (3-1) donde $T_s = 1/f_s$ es el periodo de muestreo.

$$r \Delta f[n] = r[n] \cdot e^{-j2\pi\Delta f n T_s} \quad (3-1)$$

Además de la frecuencia, necesitamos ajustar la fase del código (el retardo con el que llega el PRN). Para ello, se prueban todos los posibles desfases (0 a 1022, si se muestrea a un chip por muestra) o más si se sobre muestrea. De forma que en el dominio del tiempo es:

$$p(\Delta f, \tau) = \sum_{n=0}^{N-1} r \Delta f[n] c_{PRN}[n - \tau]^* \quad (3-2)$$

Donde en la ecuación (3-2), $r \Delta f[n]$ es la señal compensada en Doppler, $c_{PRN}[n - \tau]$ es el código local desplazado τ posiciones y el $*$ indica la conjugación compleja, de forma que el pico de esta función indica la fase de código τ y la frecuencia Doppler Δf que mejor se alinean con la señal real.

A fin de agilizar este proceso, suele utilizarse la transformada de Fourier (FFT). El principio se basa en que la correlación en el dominio del tiempo se convierte en una multiplicación en el dominio de la frecuencia:

$$p(\Delta f, \tau) = F^{-1}(F\{r_{\Delta f}[n]\} \cdot (F\{c_{PRN}[n]\})^*) \quad (3-3)$$

En relación con lo mencionado previamente, en la ecuación (3-3), F denota la transformada de Fourier, F^{-1} a la transformada inversa, dicho producto en frecuencia equivale a la correlación en el tiempo. Tras calcular $p(\Delta f, \tau)$, se busca el máximo:

$$p_{\max} = \max_{\Delta f, \tau} |p(\Delta f, \tau)| \quad (3-4)$$

Para la ecuación ((3-4), si $p_{\max}$ supera cierto umbral, se concluye que dicho satélite (PRN) se encuentra presente en la señal y las coordenadas $(\Delta f, \tau)$ del máximo indican el Doppler y la fase de código de llegada. De esta forma una vez detectado un pico que supera el umbral, se sabrá el PRN del satélite, el desplazamiento Doppler y la fase de código.

Al realizar esta correlación con cada PRN posible, se obtiene un pico claramente diferenciado para el PRN que coincide con el de la señal sintética generada, en contraste, al realizar la misma correlación con otro PRN distinto dicho pico no aparecería, estas correlaciones dan lugar a una gráfica (Figura 3-9)

donde se representan los niveles de correlaciones para cada PRN, donde se ve con claridad que el PRN del satélite número dos emitido por la antena transmisora de la señal sintética es el que ha obtenido mayor correlación por lo que validaría la eficiencia de dicho algoritmo.

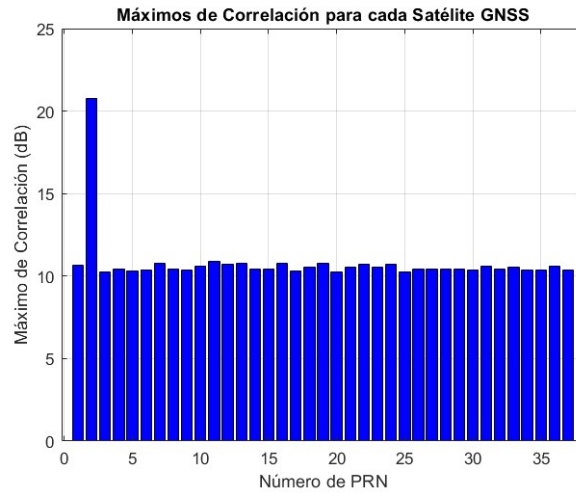


Figura 3-9 Validación algoritmo para identificación de satélite por su PRN

Una vez realizada la identificación del PRN del satélite emitido en la señal sintética, se utiliza dicha señal para realizar una validación del algoritmo de *beamforming*. En este caso el algoritmo comprobado es el perteneciente al ULA, ya que la señal fue grabada por un array lineal de cuatro elementos, como se mencionó al comienzo de este apartado. Tras su correlación, a las señales pertenecientes a cada elemento se les aplican técnicas de *beamforming*, el objetivo es la obtención de la ubicación (en este caso en azimut al tratarse de un ULA) de la antena emisora.

Con ese objetivo, se busca encontrar el ángulo para el cual la potencia de señal recibida es mayor. Para ello, se realiza un barrido en azimut de -90° a 90° de forma que se multiplica la señal recibida ya correlada por el vector de direccionamiento para cada ángulo (2-3).

Para combinar las señales obtenidas por cada uno de los elementos del array al apuntar el haz en una dirección θ , se calcula una señal combinada que viene dada por la ecuación (3-5):

$$y_\theta(t) = w(\theta)^H x(t) \quad (3-5)$$

En dicha ecuación ^{H} hace referencia a la transpuesta conjugada, lo que equivale a multiplicar de señales por el vector de direccionamiento, de forma que se sumen coherentemente las contribuciones de cada antena, maximizando la ganancia en la dirección θ .

Por último, para estimar la potencia de las señales en cada ángulo, se suele hacer una FFT de $y_\theta(t)$ y medir su magnitud en la frecuencia de interés, como indica la ecuación (3-6)

$$P(\theta) = 10 \log_{10} \left(|FFT\{y_\theta(t)\}|_{f_{sample}} \right) \quad (3-6)$$

Al barrer θ de -90° a 90° , se genera un perfil $\{P(\theta)\}$. El ángulo que maximiza $P(\theta)$ se interpreta como la dirección de llegada de la señal correlada de la antena emisora. De este modo, y tal como se indicó al comienzo de este apartado, el primer paso necesario para validar los algoritmos mediante el uso de la señal sintética consiste en la identificación correcta del código PRN del satélite transmitido. En este caso específico, la señal sintética generada incluye el código PRN correspondiente al satélite número dos. Una vez registrada esta señal, se procesa mediante MATLAB aplicando los algoritmos desarrollados para correlacionar dicha señal con distintos códigos PRN.

Al aplicar el algoritmo sobre la señal registrada, se logra determinar la dirección angular en azimuth de la antena emisora de la señal sintética. El resultado obtenido, tal como se muestra claramente en la figura correspondiente, confirma que la estimación angular obtenida mediante MATLAB coincide satisfactoriamente con la ubicación real del emisor (Figura 3-10), validando así la capacidad del algoritmo desarrollado para localizar adecuadamente la antena emisora en azimuth mediante *beamforming*.

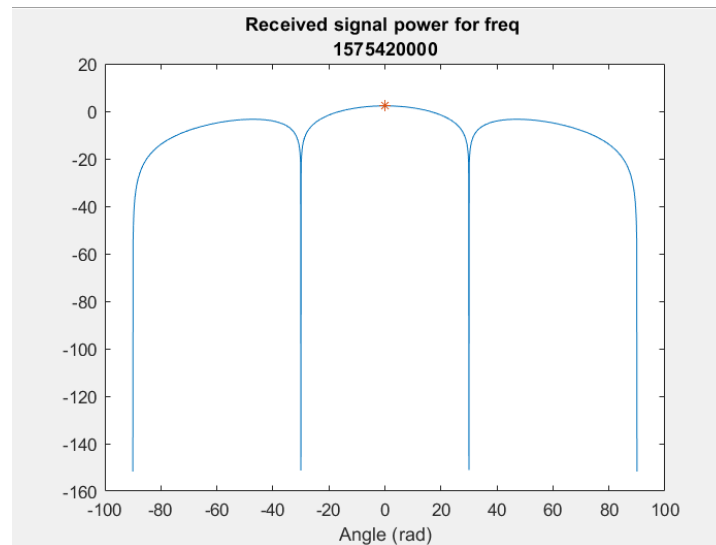


Figura 3-10 Validación del algoritmo para la realización de beamforming en 2D en MATLAB

3.3 Uso de señal GNSS

Una vez validados los algoritmos desarrollados en MATLAB mediante el uso de señales sintéticas, el siguiente paso consiste en verificar su desempeño utilizando señales GNSS captadas en condiciones operativas reales. Para ello, se emplean simultáneamente dos herramientas fundamentales mencionadas previamente en el apartado 3.1. Por un lado, se utiliza la aplicación u-center (apartado 3.1.3) con el objetivo de visualizar en tiempo real las señales GNSS disponibles, permitiendo identificar claramente los satélites visibles mediante su PRN correspondiente, su posición angular en términos de azimuth y elevación, así como la intensidad relativa de sus señales. Por otro lado, mediante el receptor HackRF o Pluto SDR, y la herramienta GNU Radio, se captura la señal GNSS en bruto, proporcionando así un registro detallado que posteriormente puede ser procesado en MATLAB.

Esta metodología combinada permite contrastar directamente los resultados obtenidos mediante el algoritmo de *beamforming* con información precisa y en tiempo real proporcionada por u-center, validando así la capacidad del sistema implementado para identificar correctamente los satélites emisores, estimar con precisión su posición en azimuth y elevación, y evaluar la robustez del método frente a condiciones reales de ruido e interferencias.

3.3.1 Identificación y detección de satélites con una única antena

En primer lugar, se realizó una prueba experimental utilizando una única antena. Para ello, se configuró el sistema utilizando una antena del modelo Spartan Taoglas, conectada al módulo u-blox EVK-M8T. La señal recibida por dicha antena fue enviada simultáneamente a dos equipos diferentes con propósitos específicos:

Por un lado, la señal fue dirigida al software u-center mediante el módulo receptor u-blox, permitiendo así la visualización en tiempo real de información como la posición de los satélites visibles, sus respectivos valores de azimuth y elevación, la intensidad de la señal y el PRN correspondiente a cada satélite. De forma paralela, se utilizó un receptor SDR HackRF One en un montaje como el que se muestra en la Figura 3-11.

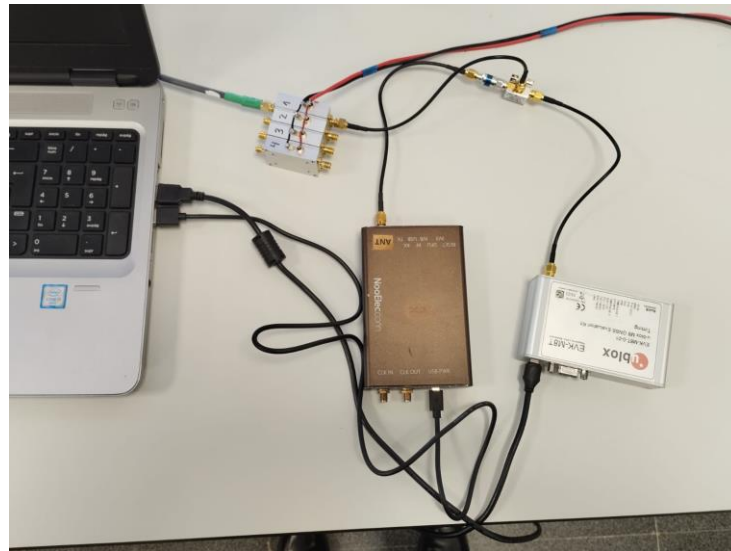


Figura 3-11 Montaje HackRF One

La recepción con este dispositivo se configuró y visualizó mediante GNU Radio, donde se establecieron los parámetros necesarios para una correcta recepción, como la frecuencia de muestreo, la frecuencia central del canal, el ancho de banda y otros parámetros específicos representados en la Figura 3-12. La señal captada en GNU Radio fue grabada en formato binario para posteriormente ser analizada mediante MATLAB.

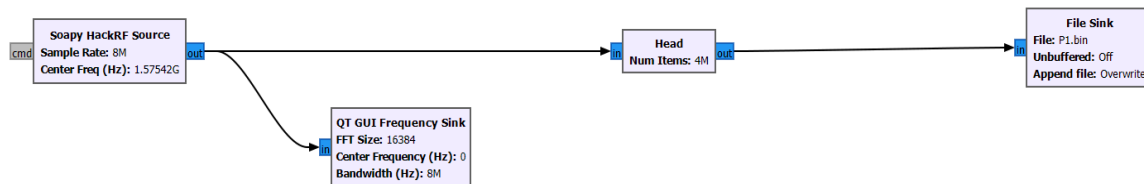


Figura 3-12 Configuración en GNU Radio de la medición realizada mediante una antena y un dispositivo Hack RF

Finalmente, los datos adquiridos con GNU Radio fueron importados a MATLAB, donde se procesaron con los algoritmos previamente validados con señales sintéticas. El objetivo de esta última fase consistió en verificar que los resultados obtenidos mediante MATLAB coincidían con las señales visualizadas en tiempo real con u-center, especialmente en lo referente a la identificación del satélite mediante su código PRN específico. Esta comparación permitió validar experimentalmente la efectividad del algoritmo implementado en condiciones reales de recepción.

Por otro lado, se realizó una segunda prueba experimental en la que se empleó una configuración ligeramente diferente. En este caso, se sustituyó el módulo receptor u-blox y el dispositivo HackRF por un dispositivo Pluto SDR junto con un reloj disciplinado por oscilador (DO), con el fin de mejorar la precisión temporal y estabilidad en frecuencia durante la adquisición de señales. La antena Spartan de Taoglas empleada anteriormente se mantuvo, conectándose directamente al Pluto SDR, mientras que el reloj DO aportaba la referencia de frecuencia necesaria para garantizar la estabilidad y precisión de la recepción.

Al igual que en el caso anterior, la señal obtenida con el Pluto SDR fue configurada, capturada y almacenada usando GNU Radio, ajustando cuidadosamente los parámetros fundamentales como frecuencia central, frecuencia de muestreo, ancho de banda y ganancia del dispositivo, permitiendo así una adecuada captura y grabación en formato binario (Figura 3-13). Posteriormente, la señal grabada fue analizada en MATLAB con los algoritmos previamente validados mediante la señal sintética,

permitiendo realizar una comparación entre los resultados obtenidos con el Pluto SDR y los previamente obtenidos con el HackRF One, verificando así la robustez del sistema frente a cambios en el hardware utilizado.

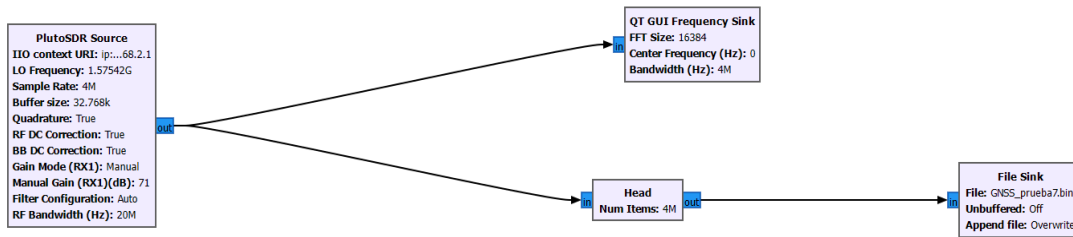


Figura 3-13 Configuración en GNU Radio de la medida efectuada con una única antena y utilizando un dispositivo PlutoSDR

3.3.2 Identificación y detección de satélites con dos antenas

A continuación, se realiza una medición experimental utilizando dos antenas idénticas configuradas en un array lineal uniforme (ULA) de dos elementos. El objetivo principal de esta prueba consiste en verificar, en primer lugar, que ambas antenas reciben simultáneamente la señal proveniente de los mismos satélites visibles y que la identificación de estos satélites mediante su código PRN es coherente en ambas antenas. Para llevar esto a cabo, ambas antenas se conectan al receptor Pluto SDR mediante un dispositivo Bias-Tee, que permite suministrar alimentación DC a las antenas activas, garantizando así su correcto funcionamiento y una adecuada separación entre las señales de radiofrecuencia (RF) y la alimentación continua (DC). Además, el sistema cuenta con un GPS *Disciplined Oscillator* (GPSDO) que proporciona una referencia estable de frecuencia al receptor Pluto SDR. De esta forma el montaje resultante es el que se aprecia en la Figura 3-14.

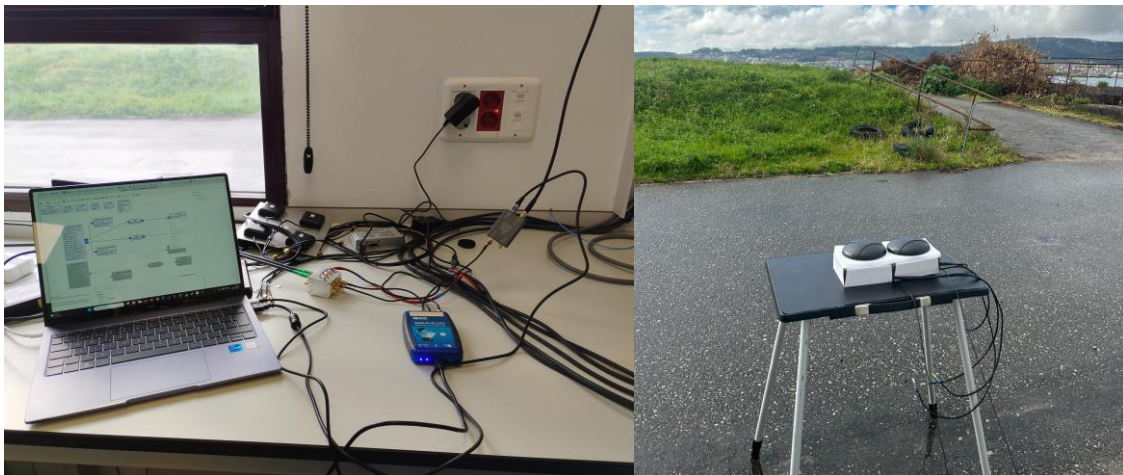


Figura 3-14 Montaje medición con dos antenas

La señal GNSS recibida por ambas antenas se introduce al Pluto SDR, configurado mediante GNU Radio, donde se establecen los parámetros necesarios para una correcta recepción, incluyendo la frecuencia central (1575.42 MHz, frecuencia L1 de GPS), la frecuencia de muestreo, el ancho de banda y la ganancia del receptor. La señal captada se graba en formato binario para su posterior tratamiento en MATLAB.

Simultáneamente, el reloj disciplinado se conecta a un segundo ordenador en el que se ejecuta la aplicación U-center, permitiendo visualizar en tiempo real la información detallada sobre los satélites visibles, incluyendo datos de azimuth, elevación, intensidad de señal y código PRN correspondiente a cada satélite detectado.

Posteriormente, la señal almacenada mediante GNU Radio se procesa en MATLAB, aplicando algoritmos específicos para realizar la correlación con los códigos PRN y efectuar el *beamforming*. Este procedimiento permite calibrar y validar experimentalmente los algoritmos desarrollados, asegurando así una correcta identificación de los satélites.

3.3.3 Identificación y detección de satélites con 4 antenas (ULA)

Para la realización de la prueba de identificación y detección de satélites mediante un array lineal uniforme (ULA) de cuatro elementos, se emplearon cuatro antenas Taoglas Spartan dispuestas en línea con una separación entre elementos de $d = 0.85 * \lambda$. Dicho montaje se instaló en la azotea del



Figura 3-15 Montaje ULA de 4 elementos

edificio de investigación del Centro Universitario de la Defensa, orientándose de forma que su dirección normal apuntaba hacia el oeste, tal y como muestra la Figura 3-15.

El montaje experimental se llevó a cabo como refleja la Figura 3-15. Cada antena estaba conectada a un dispositivo Bias-Tee encargado de alimentar la antena y separar la señal recibida. Las salidas de estos Bias-Tee se conectaban directamente a la placa USRP X310, que a su vez contaba con un *GPS Disciplined Oscillator* (GPSDO) para asegurar una referencia temporal precisa y estable en la adquisición de señales. Finalmente, la placa USRP X310 se conectaba al ordenador, en el cual, mediante la plataforma GNU Radio se configuraban los parámetros necesarios para la recepción de las señales GNSS (Figura 3-16). Las señales adquiridas mediante este ULA se emplearon para verificar posteriormente el algoritmo de *beamforming* en 2D implementado mediante algoritmos de Matlab, cuyos resultados y fiabilidad se tratarán en posteriores apartados.

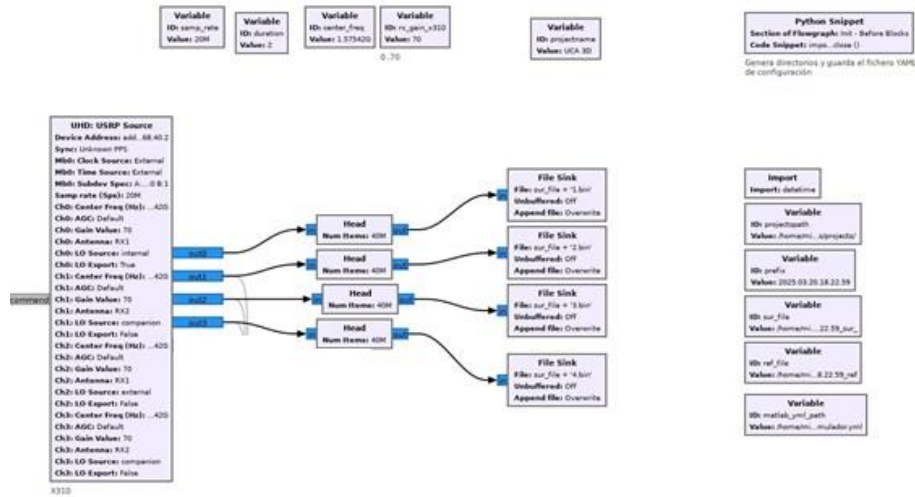


Figura 3-16 Configuración en GNU Radio de medición con 4 antenas

3.4 Empleo de un UCA para identificación y detección de satélites

Para una correcta implementación del *beamforming* en la recepción de señales GNSS, es esencial seleccionar y diseñar adecuadamente la geometría del array de antenas. En este proyecto, se ha optado por un array circular uniforme en 3D (UCA 3D) debido a las ventajas que ofrece frente a otras configuraciones, tal y como se explica en el apartado 2.2.3. La elección de esta geometría se fundamenta en la necesidad de obtener la dirección de llegada de la señal (DoA) en dos dimensiones, ya que, mientras que un array lineal uniforme (ULA) solo permite estimaciones en una única dimensión (azimut o elevación) y un UCA 2D está optimizado para barridos únicamente en azimut, el UCA 3D posibilita un barrido angular completo en ambas dimensiones, azimut y elevación.

3.4.1 Selección del número de elementos y distribución

El número de elementos del array tiene un impacto directo en el lóbulo principal, la resolución angular y la aparición de lóbulos secundarios. Para este proyecto se han considerado las configuraciones de $N = 4, 6$ y 8 elementos, asegurando que el diseño permita la correcta separación de las antenas para evitar interferencias y *aliasing* espacial. Para evitar dichos efectos y teniendo en cuenta lo estudiado en el apartado 2.2.3, donde se expone que el diagrama de radiación se ve más afectado por la aparición de lóbulos secundarios cuando el radio del array es mayor de 0.5λ .

El problema que surge a continuación, viene dado por el propio tamaño físico de las antenas utilizadas en este proyecto, que como se comentó en el apartado 3.1.4 tienen un diámetro de 15 cm. Teniendo estas características en cuenta y con el objetivo de garantizar que las antenas no interfirieran físicamente las unas con las otras, y tratando de conseguir un radio lo más cercano posible a 0.5λ , se consiguen las posibles configuraciones que vienen recogidas en la Tabla 1:

Número de elementos	Radio del array	Distancia entre elementos
4	0.69λ	0.84λ
6	0.77λ	0.84λ
8	0.82λ	0.84λ

Tabla 1 Características de los posibles arrays

Con el objetivo de mantener un margen de separación entre las antenas del array, pero tratando de que no perjudique al diagrama de radiación del array, se establece una distancia entre elementos de

0.84λ , pese a esto y de acuerdo con los datos recogidos en la Tabla 1, el radio del array distará de los $r = 0.5\lambda$ que se deseaban por las limitaciones del propio tamaño de las antenas, lo que conllevará la aparición de lóbulos secundarios. Para realizar una evaluación y posterior decisión del tipo de array finalmente elegido, a continuación, se realizará una simulación del patrón de radiación de los arrays en estudio:

- Para $N = 4$

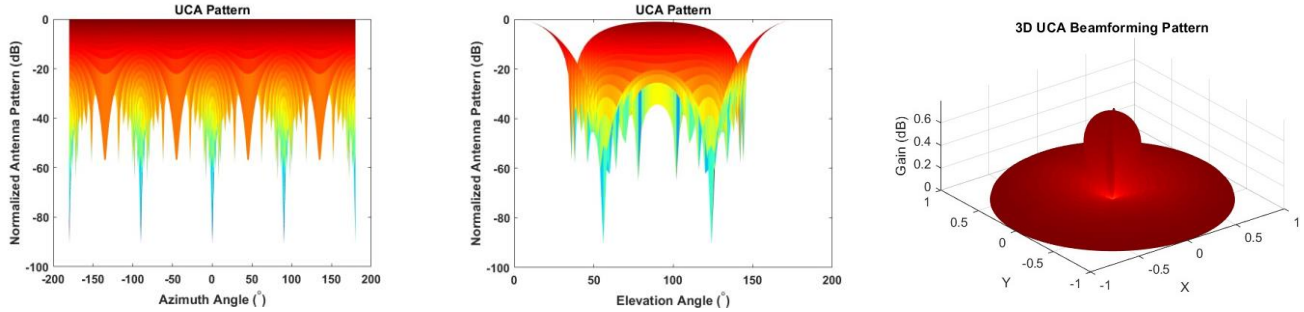


Figura 3-17 Patrón de radiación prototipo N=4

- Para $N = 6$

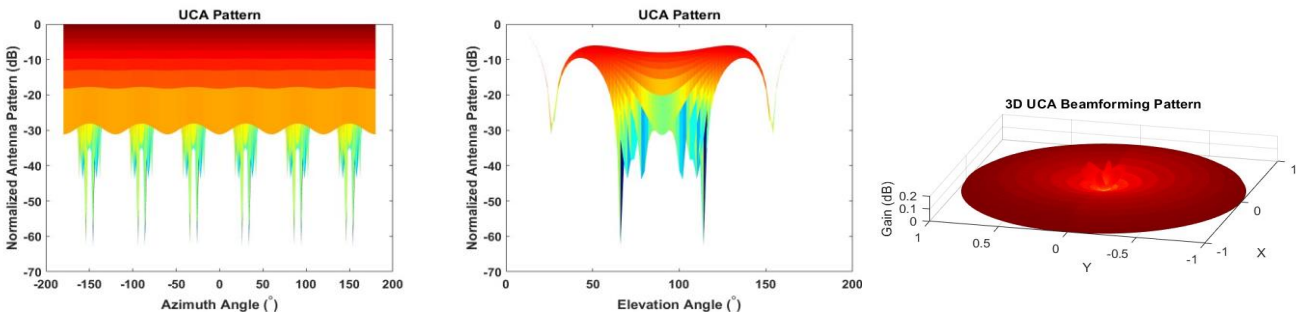


Figura 3-18 Patrón de radiación prototipo N=6

- Para $N=8$

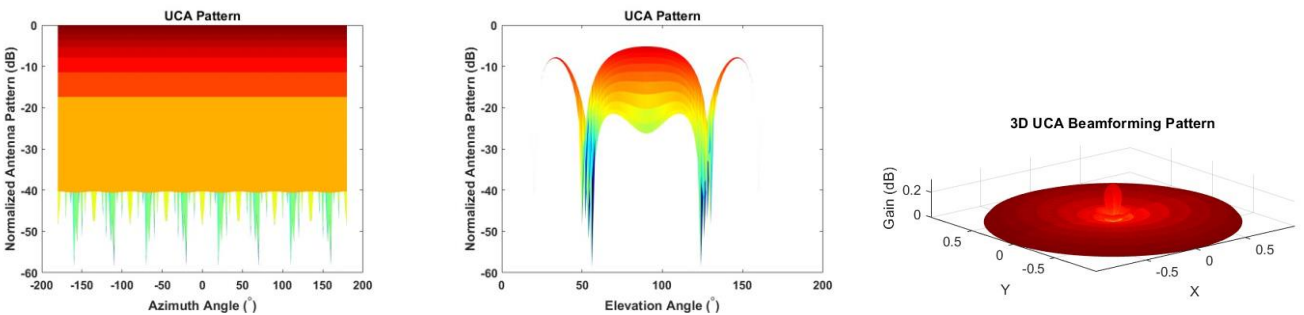


Figura 3-19 Patrón de radiación prototipo N=8

Una vez recogidos los posibles diagramas de radiación (Figura 3-17, Figura 3-18, Figura 3-19) dadas las diferentes configuraciones de UCA posibles y de acuerdo con lo expuesto en el apartado 2.2.4 acerca de la distancia entre elementos, el radio de los UCA y como afectan los mismos en el diagrama de radiación, y sabiendo que por teoría el rendimiento idóneo se alcanza con una separación entre elementos $d = 0.5 \cdot \lambda$, se empleó el UCA de 4 elementos para realizar las medidas y el posterior beamforming.

3.4.2 Montaje empleado

Para la identificación y detección de satélites utilizando un array circular uniforme, se utilizaron cuatro antenas Taoglas Spartan distribuidas uniformemente en una circunferencia de radio $r = 0.69 \cdot \lambda$

distribuidas uniformemente a una distancia $d = 0.85 * \lambda$. El conjunto al igual que anteriormente el ULA (3.3.3) fue colocado en la azotea del edificio de investigación del Centro Universitario de la Defensa, manteniendo su eje vertical orientado hacia arriba, es decir, con su dirección perpendicular al plano horizontal (Figura 3-20).



Figura 3-20 Montaje UCA de 4 elementos

El esquema de conexión empleado fue similar al utilizado con el array lineal. Cada antena fue conectada a un dispositivo Bias-Tee, responsable de alimentar la antena y separarla señal recibida. Dichas señales fueron dirigidas a la placa USRP X310, la cual tenía conectada el GPSDO para garantizar la sincronización precisa en tiempo y frecuencia de todas las señales recibidas. Finalmente, dicha placa fue conectada al ordenador donde, haciendo uso del software GNU Radio, se configuraron los parámetros necesarios para la adquisición y grabación de las señales GNSS. Estas señales se almacenaron para su posterior aplicación en los algoritmos implementados en MATLAB.

4 RESULTADOS

4.1 Pruebas previas

4.1.1 Detección e identificación con una única antena

Tal y como se explicó en el apartado anterior, la primera prueba experimental con señales GNSS reales consistió en la detección e identificación de satélites utilizando una única antena, configurada según lo descrito en el apartado 3.3.1. Una vez realizado el correspondiente montaje, ya fuera utilizando el dispositivo Pluto SDR o el HackRF, se empleó el programa u-center para visualizar en tiempo real los satélites que se encontraban visibles en ese instante Figura 4-1.

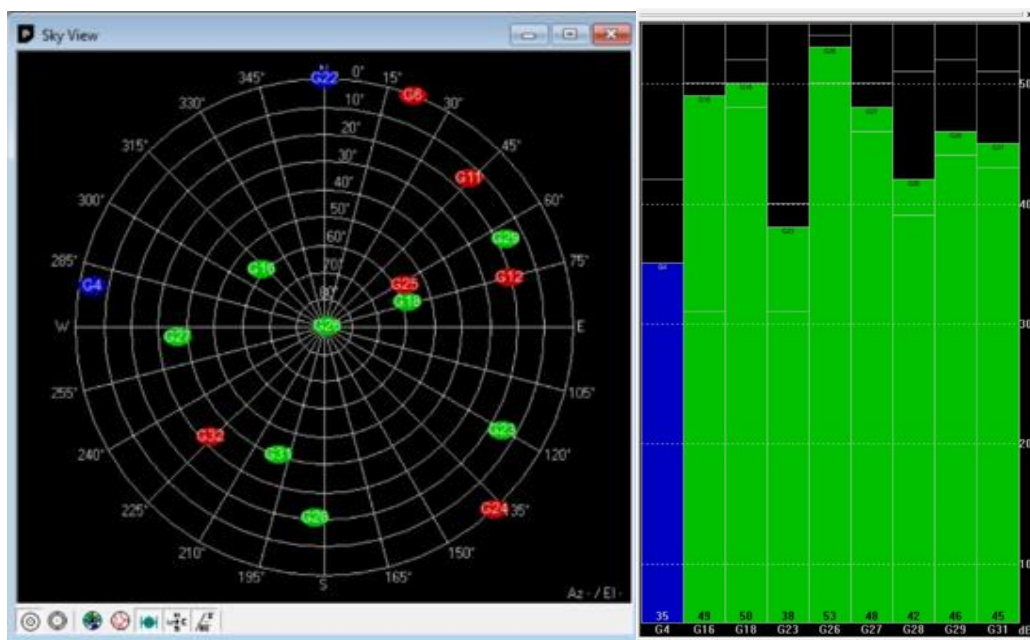


Figura 4-1 Satélites visibles en ucenter en el momento de la medición con una única antena

Posteriormente, utilizando GNU Radio, se grabó la señal percibida para luego realizar su procesamiento mediante la correlación con los códigos PRN, dicha correlación de igual manera que como se explicó para la señal sintética en el apartado 3.2.1 y utilizando los correspondientes algoritmos de MATLAB. El resultado de las correlaciones fueron los recogidos en la Figura 4-2 de forma que se comprobó el correcto funcionamiento del algoritmo de MATLAB.

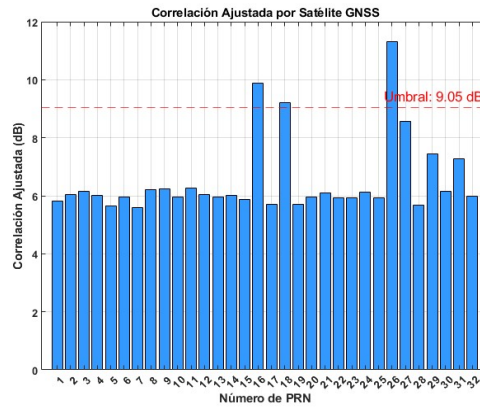


Figura 4-2 Satélites identificados mediante la correlación de PRN en MATLAB de la medida con una única antena

4.1.2 Beamforming en 2D

Antes de realizar el *beamforming* en 3D, se realizaron pruebas realizando *beamforming* en 2D, para ello se utilizaron dos configuraciones diferentes, en un primer lugar se llevó a cabo mediante el uso de un ULA de dos elementos (0) y posteriormente se hizo lo propio utilizando un ULA de 4 elementos (3.3.3).

Para un mejor conocimiento de los satélites visibles en el momento de las mediciones y con el objetivo de poder verificar los resultados de las correlaciones exitosas resultantes del postprocesado en Matlab, mediante el uso del dispositivo u-blox junto con la aplicación u-center los satélites visibles en dicho instante (1, 2, 8, 10, 16, 23, 27 y 30) pueden observarse en la Figura 4-3:

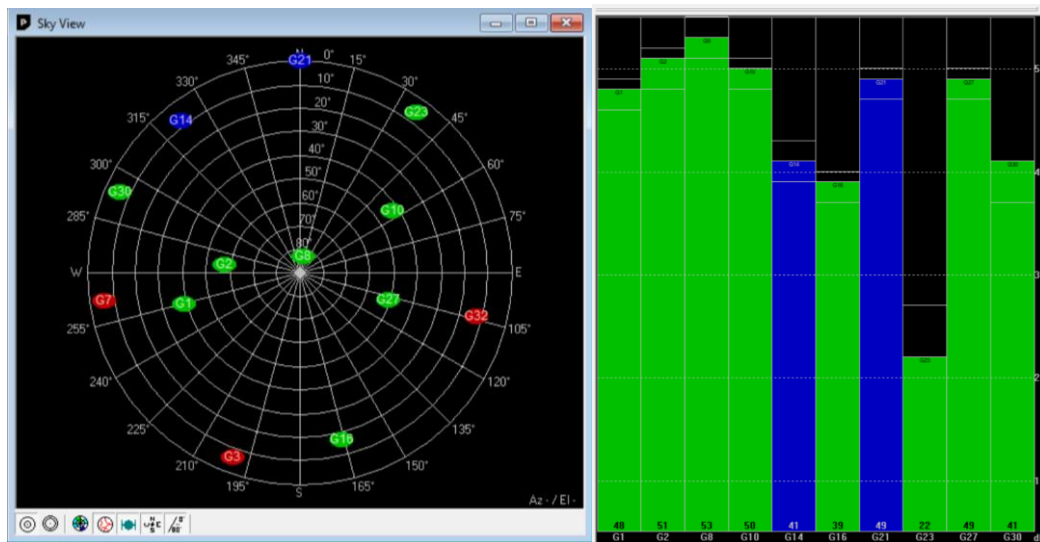


Figura 4-3 Satélites visibles en u-center en el momento de las medidas

Al igual que se describió en el apartado 3.2.1 con la señal sintética, una vez recibida la señal se procede a la identificación de los satélites por su PRN. Para ello, utilizando algoritmos de MATLAB, se realiza la correlación cruzada entre la señal recibida y los códigos PRN conocidos, específicos para cada satélite, dicha correlación permite determinar con precisión el satélite emisor de la señal, identificando el pico máximo de correlación. Una vez identificado el satélite, se efectúan correcciones adicionales en fase y frecuencia Doppler en la señal capturada (Figura 4-4), optimizando así su procesamiento posterior y asegurando una adecuada estimación del satélite.

La diferencia entre una correlación exitosa de un satélite visibles frente a una correlación fallida con un satélite no visible queda claramente reflejada en los resultados obtenidos, lo que facilita una identificación evidente (Figura 4-4).

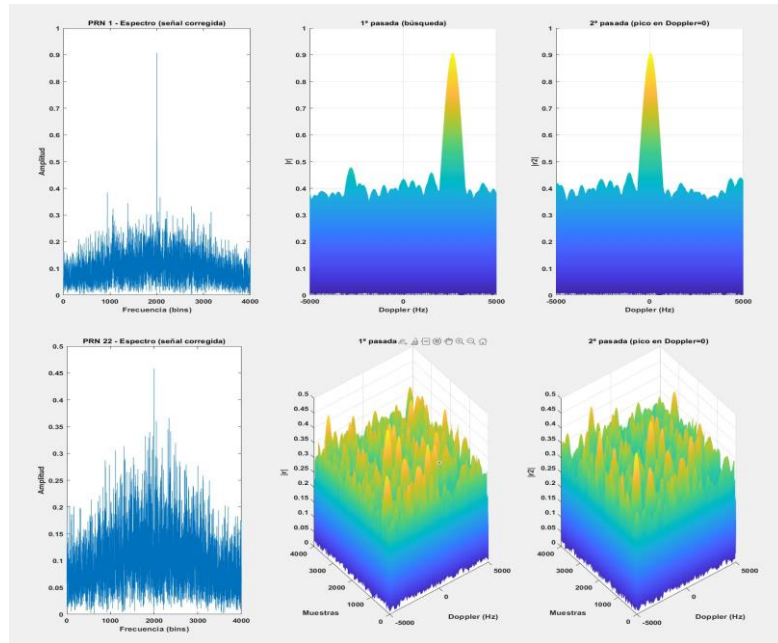


Figura 4-4 Correlación exitosa y fallida para dos satélites diferentes

En este caso para el array de dos antenas, los satélites que se consiguieron identificar fueron los que aparecen en la Figura 4-5, por lo que comparando con la Figura 4-3 es posible verificar la fiabilidad de la correlación efectuada.

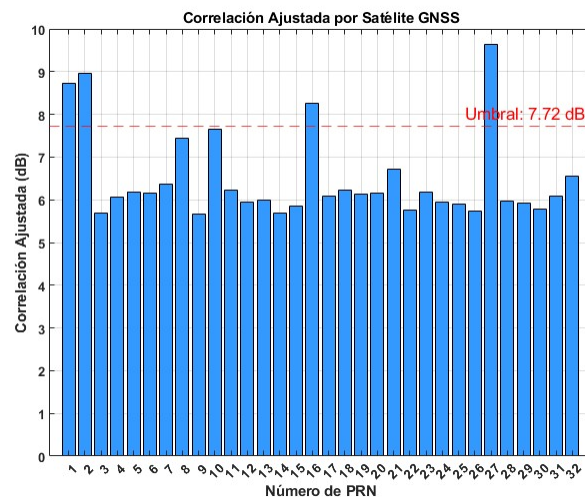


Figura 4-5 Resultado i identificación ULA de 2 elementos

Una vez realizada la identificación de los satélites visibles mediante sus códigos PRN en el momento de la medición, se procede a aplicar las técnicas de beamforming para determinar su ubicación angular. En este caso en específico la ubicación se realizará en dos dimensiones, enfocándose en la estimación del ángulo de azimut. El apuntamiento se realizará tanto al satélite uno como al satélite dos. El resultado obtenido para el beamforming implementado en MATLAB para dichos satélites es el de la Figura 4-6, para el satélite 1 azimut 70° y para el 2 azimut -1° .

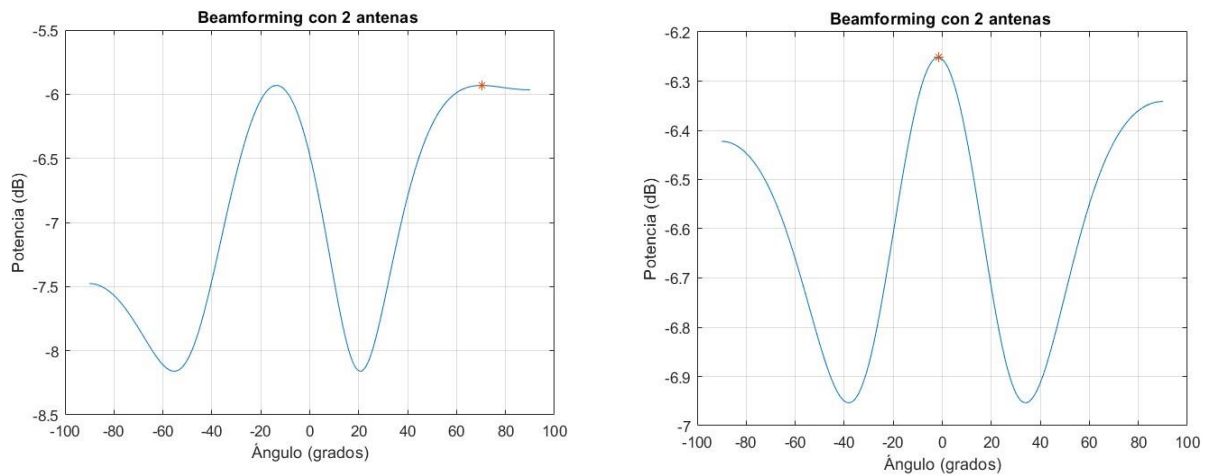


Figura 4-6 Resultado beamforming ULA de 2 elementos para satélites 1 (izquierda) y 2 (derecha)

A continuación, se repite el procedimiento anterior, pero utilizando un array lineal uniforme de cuatro elementos. Para ello, se aplica la misma metodología descrita previamente con el array de dos elementos. Los satélites visibles en la aplicación u-center en el momento de la medición fueron los mismos que los mencionados previamente (Figura 4-3). En este caso el resultado de la identificación de los satélites visibles por medio del PRN es el de la Figura 4-7:

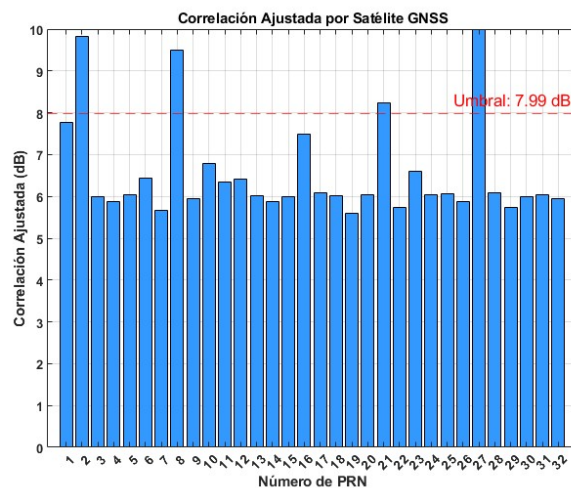


Figura 4-7 Resultado identificación ULA de 4 elementos

Al igual que en el caso del array de dos elementos, tras realizar la identificación de los satélites por su PRN se realiza la corrección por Doppler y fase de la señal. En este caso se volverá a utilizar el satélite 1 y 2 para posteriormente mediante el *beamforming* tratar de encontrar su posición en azimut. El resultado de la correlación y posterior corrección en Doppler y fase es el de la Figura 4-8 y Figura 4-9, en ellas se refleja el resultado de la correlación sin realizar las correcciones de Doppler y fase y una vez corregida, para cada una de las 4 antenas:

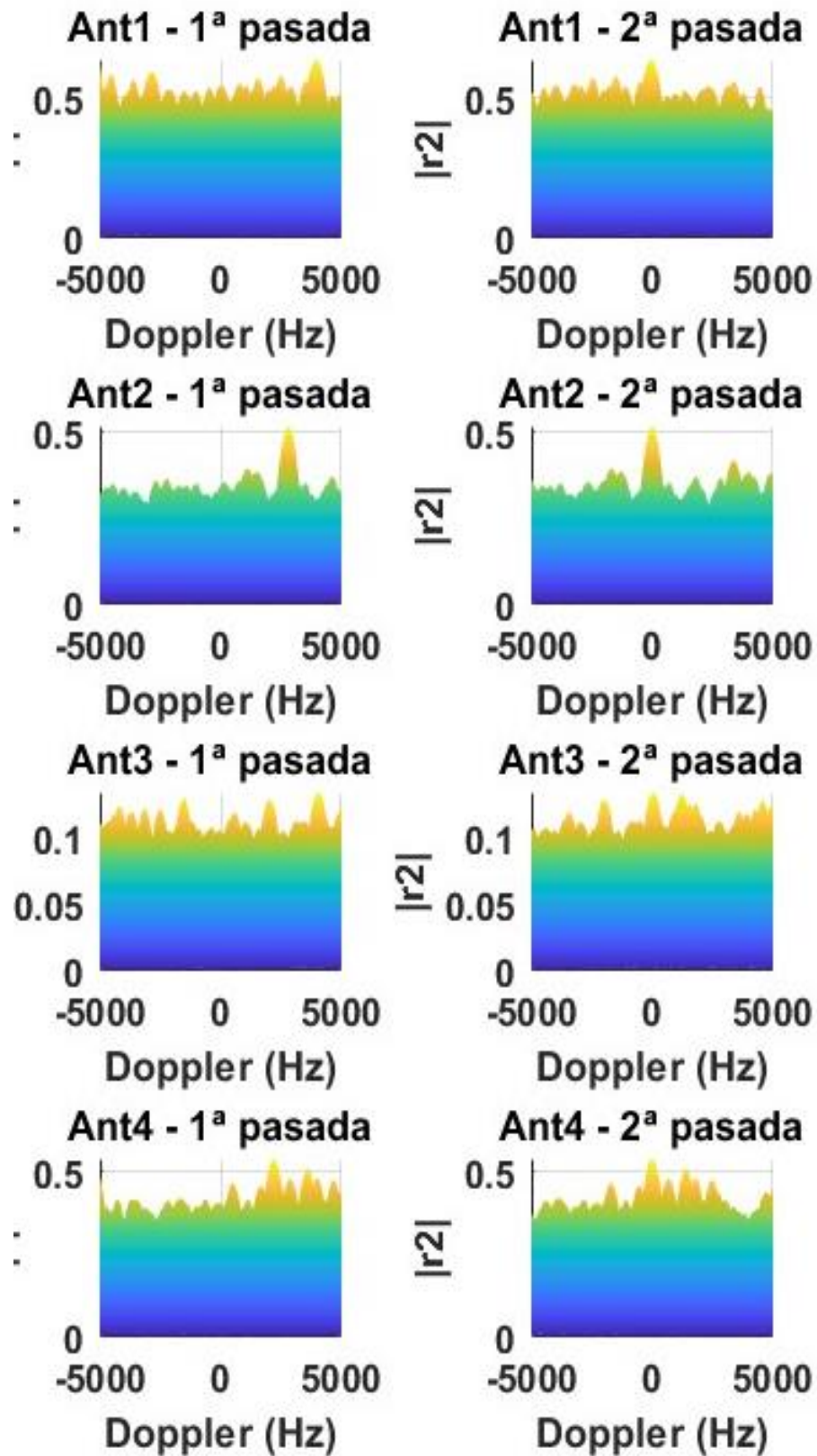


Figura 4-8 Resultado correlación y posterior corrección en Doppler y fase para el satélite 1

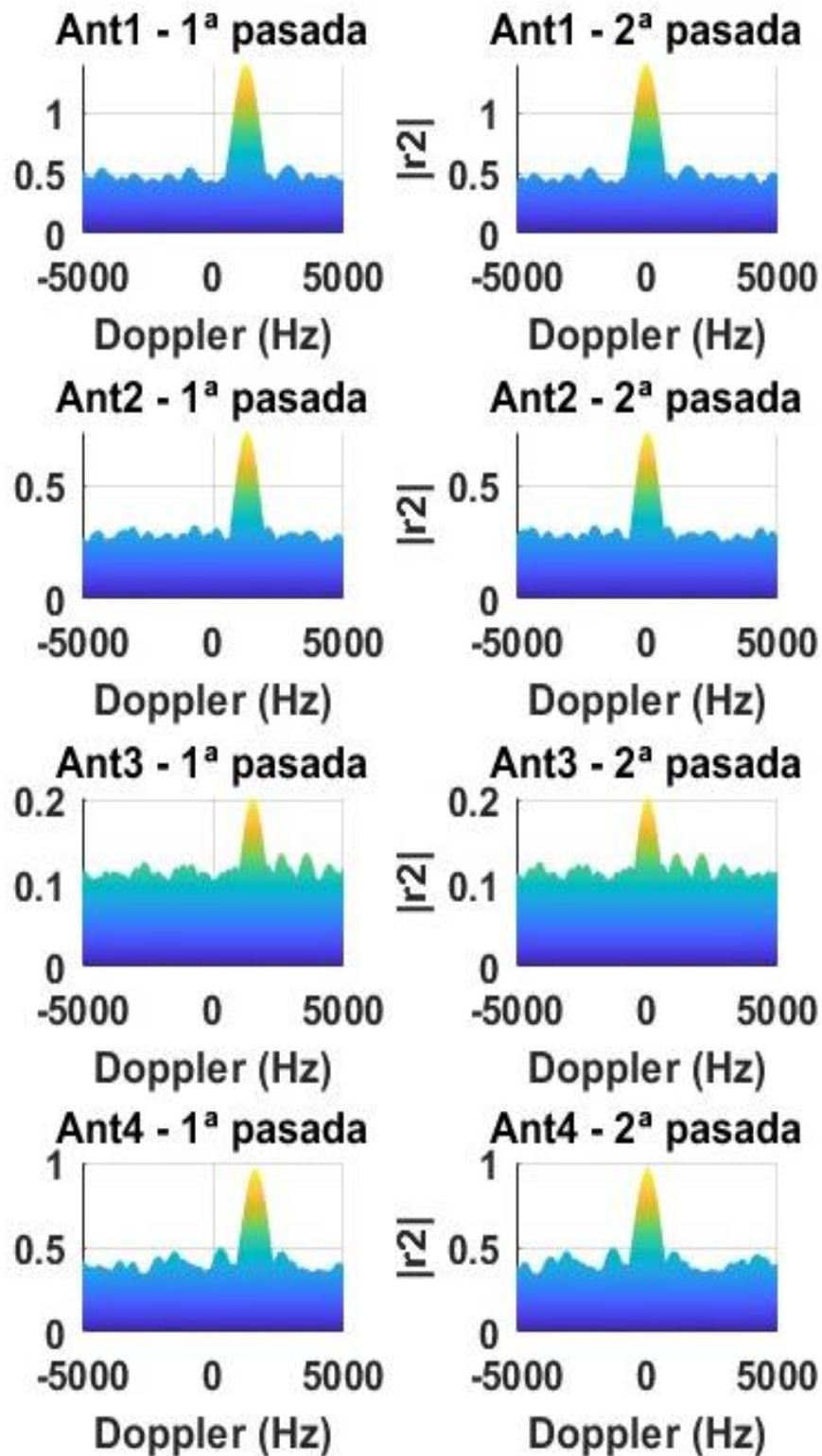


Figura 4-9 Resultado correlación y posterior corrección en Doppler y fase para el satélite 2

Tras realizar la correspondiente correlación de PRN y su corrección en Doppler y fase, utilizando dichas señales corregidas se realizó el *beamforming* para ubicar dichos satélites, cuyo resultado fue el de la Figura 4-10, para el satélite número 2 azimut -1° y para el satélite 1 azimut 36° .

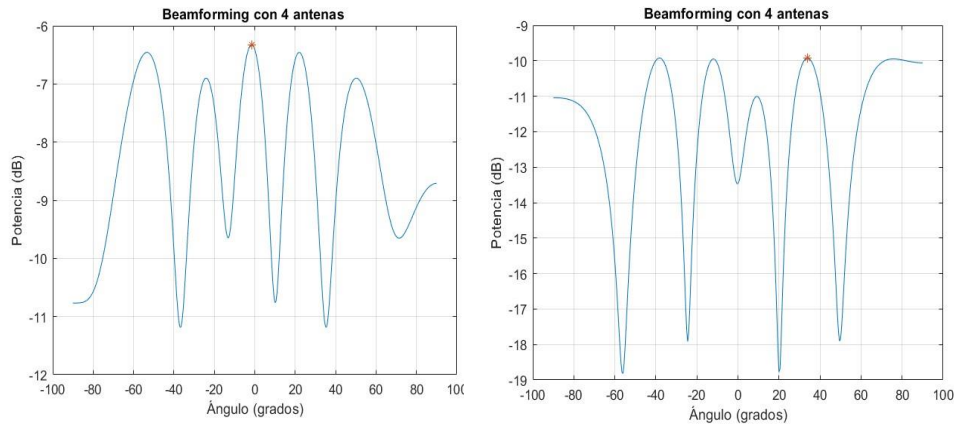


Figura 4-10 Resultado beamforming ULA de 4 elementos para satélites 1 (derecha) y satélite 2 (izquierda)

4.2 Beamforming en 3D

Una vez detallado tanto el procedimiento como los resultados obtenidos con el *beamforming* en dos dimensiones, se continúa ahora con la descripción del método aplicado al *beamforming* en tres dimensiones, así como los resultados obtenidos. El cambio más significativo respecto al *beamforming* en dos dimensiones es la aplicación de un array de antenas circular, compuesto en este caso por cuatro elementos.

Al igual que en el apartado anterior, los satélites visibles en u-center a la hora de hacer las mediciones fueron los de la Figura 4-3. Tras realizar la medición de la señal en GNU Radio y llevar a cabo la correlación PRN en MATLAB, el resultado obtenido de esta correlación se muestra en la Figura 4-11.

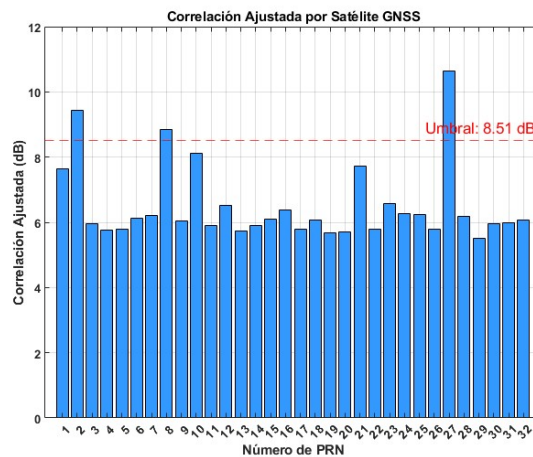


Figura 4-11 Resultado correlación UCA de 4 elementos

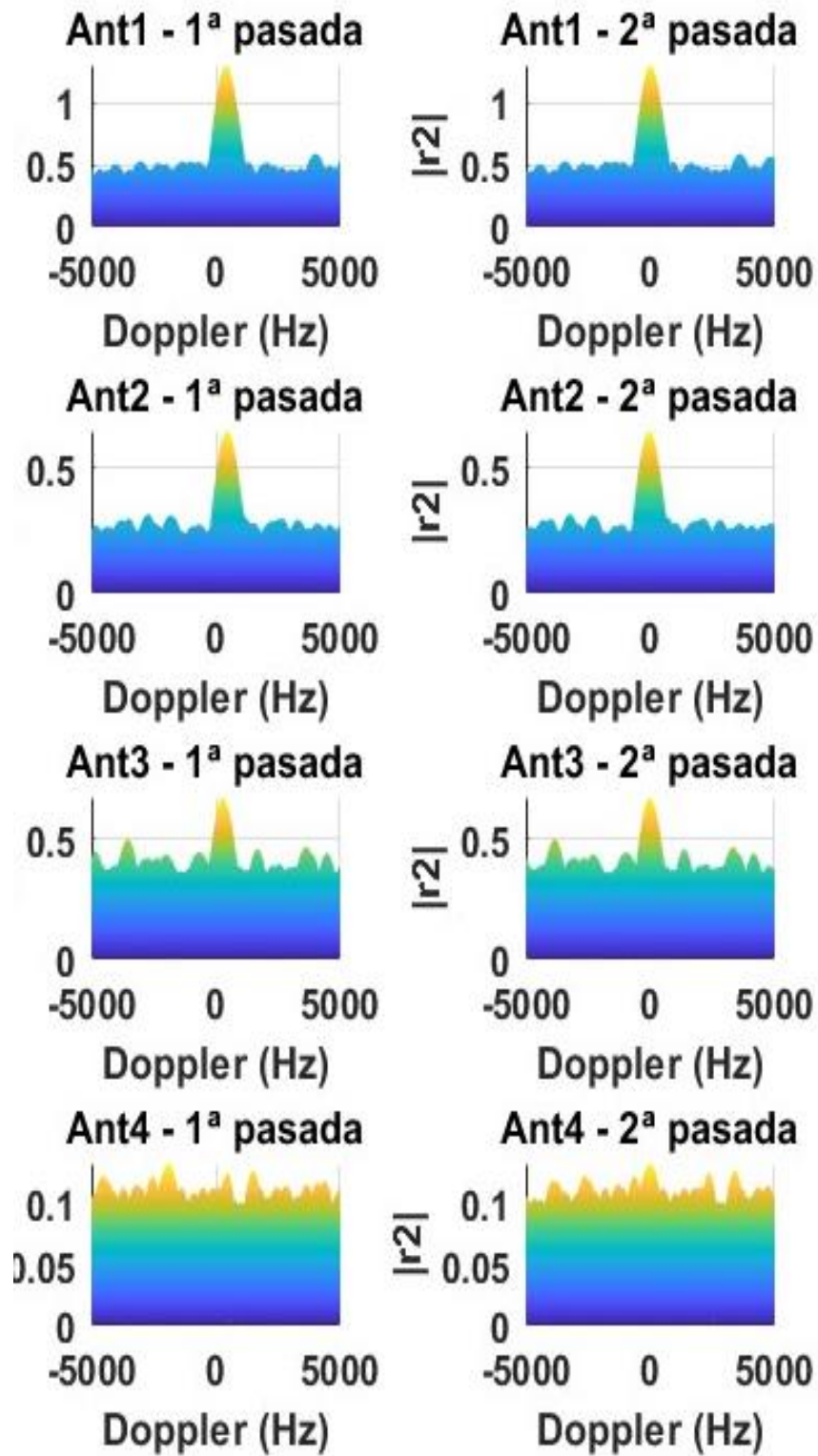


Figura 4-12 Resultado correlación y posterior corrección en Doppler y fase para el satélite 8

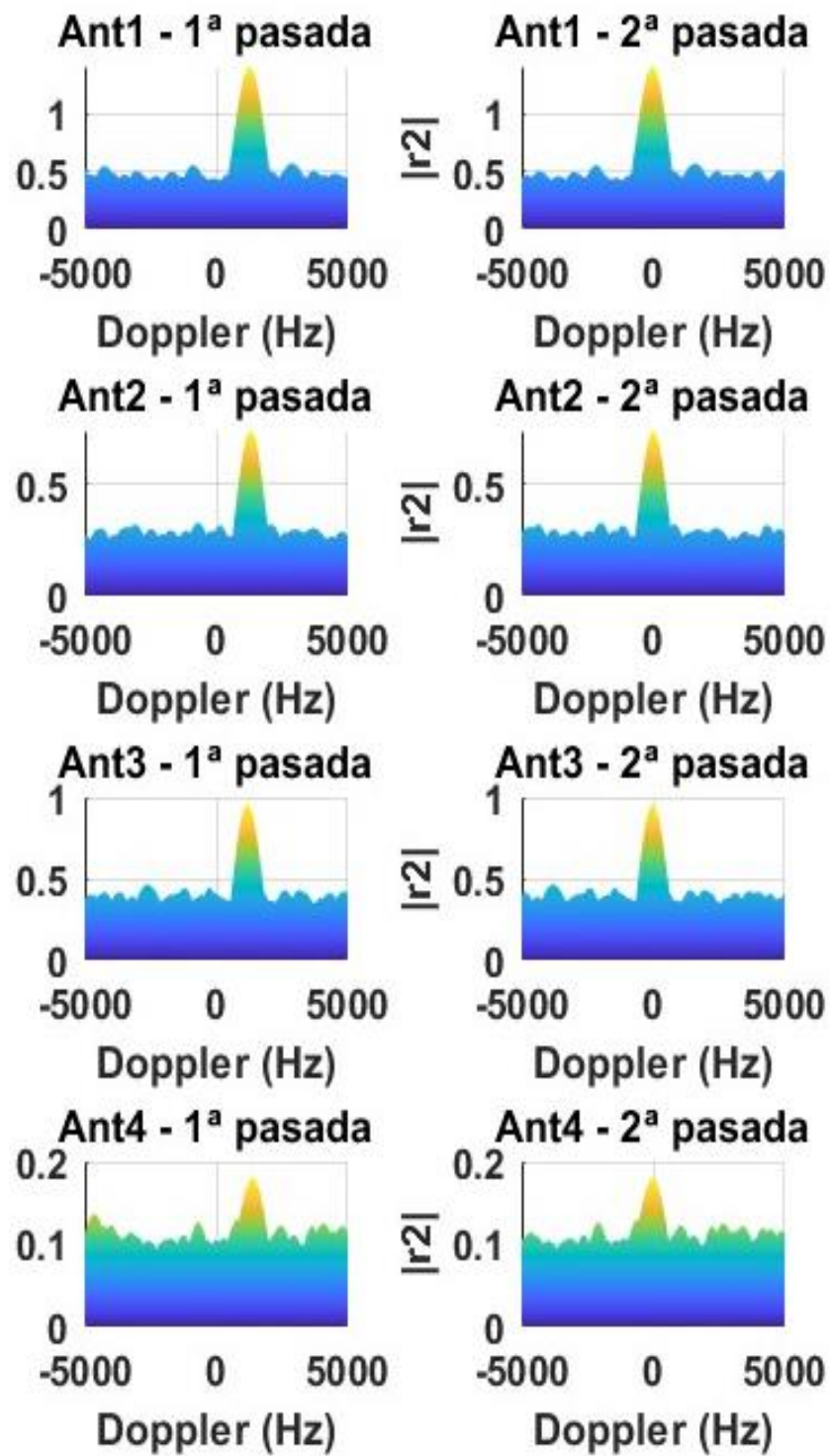


Figura 4-13 Resultado correlación y posterior corrección en Doppler y fase para el satélite 1

De la misma forma que se realizó con la señal en el ULA, tras realizar la correlación de PRN de los satélites se ha de realizar la corrección por Doppler y fase de la señal. Para este caso los satélites a apuntar serán los satélites 2 y 8, primero estudiaremos la correlación para posteriormente proceder a emplear el *beamforming* con el objetivo de ubicarlos en azimut y elevación. El resultado de la correlación y la corrección en fase y Doppler para cada antena es el que muestra la Figura 4-12 y Figura 4-13.

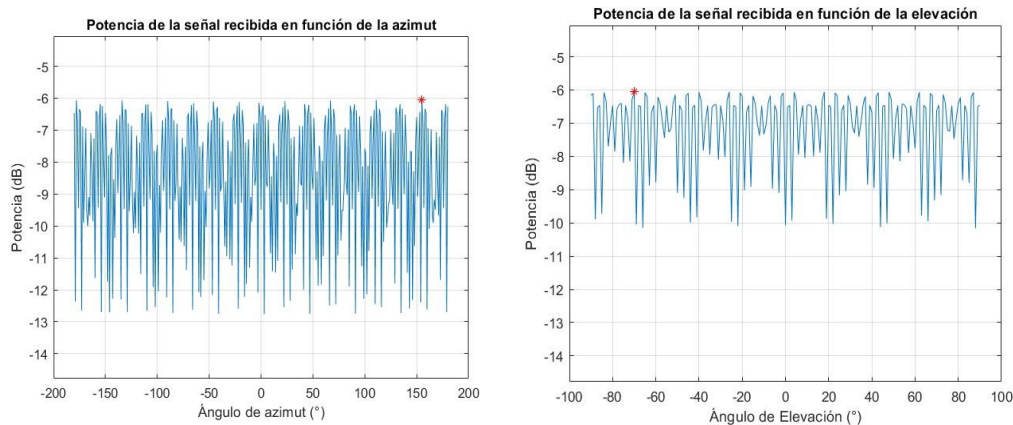


Figura 4-14 Resultado beamforming en 3D para el satélite 2 con UCA de 4 elementos

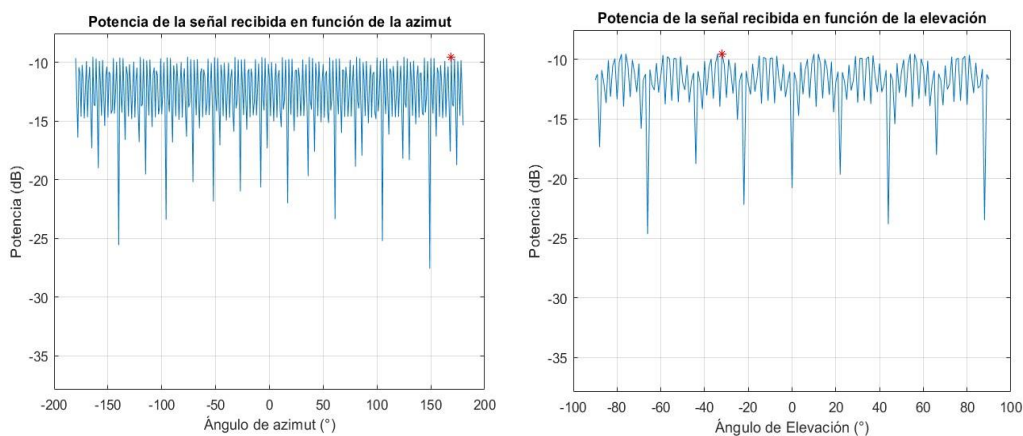


Figura 4-15 Resultado beamforming en 3D para satélite 8 con un UCA de 4 elementos

Una vez realizada la correlación y la posterior corrección en Doppler y fase de código, con esa señal ya corregida se procede a realizar el *beamforming*, para ubicar dichos satélites en 3 dimensiones en este caso, tanto en elevación como en azimut, cuyo resultado es el que aparece en la Figura 4-14 y Figura 4-15 para el caso del satélite 2 el máximo se encuentra en azimut 155° y elevación -70° y para el caso del satélite 8 el resultado es azimut 169° y elevación -32° :

4.3 Discusión de los resultados obtenidos

En este apartado se realizará un análisis y justificación de los resultados obtenidos, con el objetivo de determinar si dichos resultados, tanto positivos como negativos respecto a la realidad observada, eran previsibles o pueden explicarse a partir de los fundamentos teóricos previamente expuestos. Para llevar a cabo dicha discusión, se presentarán gráficamente los resultados esperados según la teoría para cada casuística propuesta. Esto permitirá evaluar críticamente la validez de las soluciones obtenidas y establecer las medidas necesarias para mejorar y alcanzar la solución real del *beamforming*.

4.3.1 Justificación Beamforming en 2D

En primer lugar, la primera configuración empleada fue un array lineal uniforme compuesta por dos elementos, mediante los cuales se realizó el apuntamiento hacia los satélites 1 y 2. Comenzando con el

satélite número 1, situado en un ángulo de azimut de -15° , el resultado teórico esperado para esta configuración y orientación específica se muestra en la Figura 4-16. Como se observa en dicha gráfica debido a que la separación entre elementos es mayor a $d = \lambda/2$, aparecen lóbulos secundarios significativos, fenómeno explicado previamente en el apartado 2.2.3, estos lóbulos secundarios aparecerían en torno a los 70° pudiendo ser mayores que el lóbulo principal, afectando negativamente al resultado de la medición, lo que concuerda con lo obtenido en el resultado de la medición.

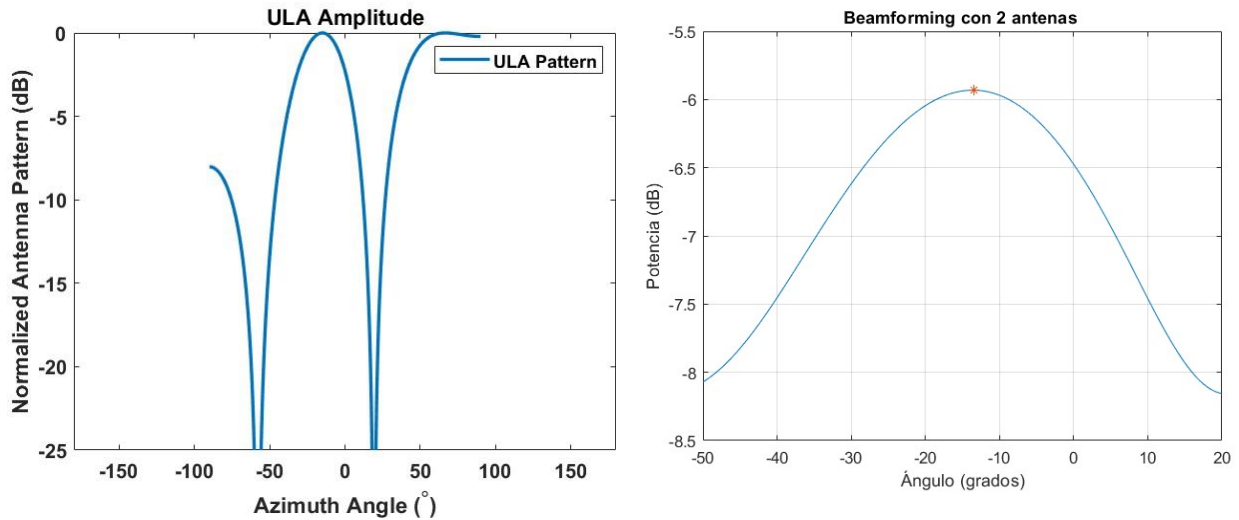


Figura 4-16 Resultado teórico (izquierda) y práctico corregido (derecha) del beamforming para un ULA de 2 elementos apuntando al satélite número 1

Por este motivo, y con el objetivo de apuntar correctamente al satélite número 1 utilizando el lóbulo principal, es imprescindible que el barrido del *beamforming* se realice considerando la ubicación de los nulos del lóbulo principal en el diagrama de radiación, evitando así confundir la posición real con la de un lóbulo secundario. De forma que el resultado obtenido en caso de realizar el barrido entre -50° y 20° es el de la imagen de la derecha de la Figura 4-16, dando como resultado azimut -14° , por lo que la ubicación de dicho satélite en azimut se habría realizado de forma efectiva.

Por otro lado, en el caso del satélite número 2, situado en un ángulo de azimut de 5° , se obtuvo un resultado experimental de -1° , el resultado teórico esperado para ese satélite por su posición en azimut es el de la Figura 4-17, por lo que la diferencia entre lo obtenido y la posición real del satélite puede atribuirse a una posible desalineación en la colocación de las antenas, cuya dirección normal podría no haber estado perfectamente orientada hacia oeste.

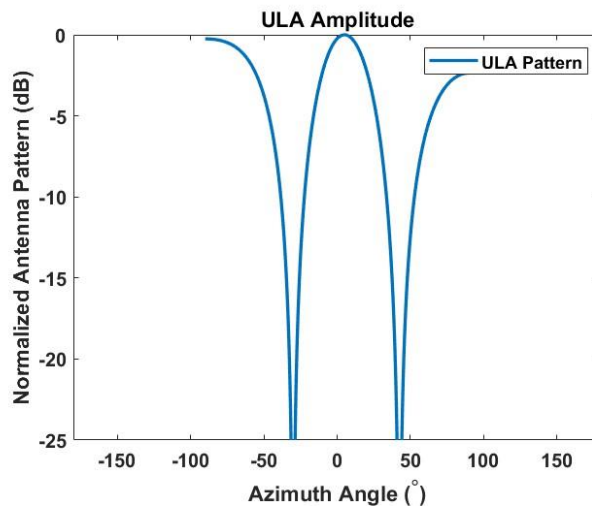


Figura 4-17 Diagrama de radiación para el apuntamiento de un UCA de 2 elementos al satélite 2

La siguiente configuración utilizada fue un array lineal uniforme (ULA) compuesto por cuatro antenas, con el cual también se apuntó hacia los satélites número 1 y número 2. Comenzando por el satélite número 1, ubicado al igual que en el caso anterior en un ángulo de azimut de -15° , el resultado teórico para esta configuración específica se presenta en la gráfica correspondiente. Tal como se observa en dicha gráfica, la separación entre elementos, superior a media longitud de onda ($\lambda/2$), provoca la aparición de lóbulos secundarios significativos, algunos incluso mayores que el lóbulo principal, particularmente en torno a los 55° .

Este resultado teórico coincide plenamente con los resultados experimentales obtenidos, explicando así la dificultad inicial para identificar correctamente la posición real observada en la aplicación u-center. Por este motivo, para apuntar con precisión hacia el satélite número 1 utilizando el lóbulo principal, es necesario realizar el barrido del *beamforming* únicamente entre los nulos que delimitan dicho lóbulo principal, específicamente entre -40° y 0° . El resultado obtenido tras efectuar este barrido se muestra en la Figura 4-18, coincidiendo adecuadamente con los datos visualizados previamente en u-center.

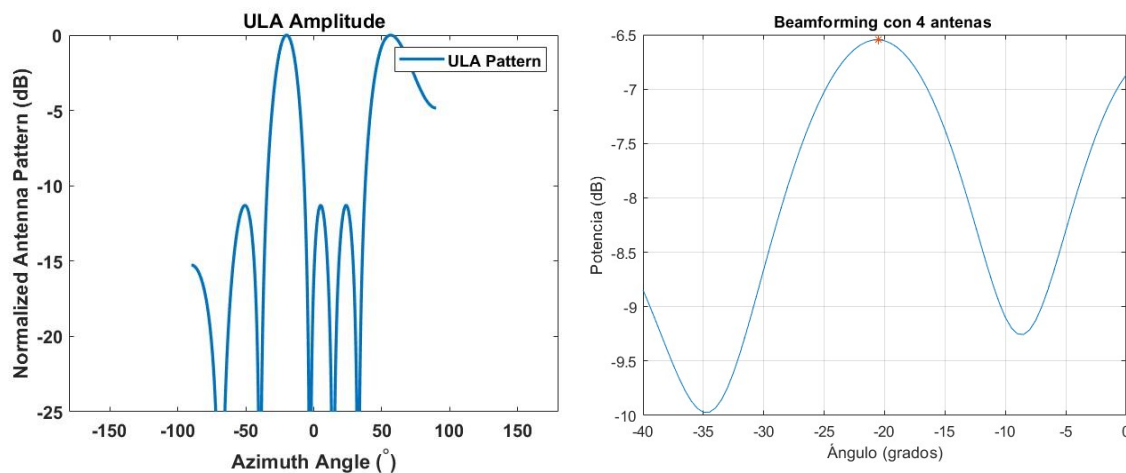


Figura 4-18 Resultado teórico (izquierda) y práctico corregido (derecha) del beamforming para un ULA de 4 elementos apuntando al satélite número 1

En el caso del satélite número 2, que como se mencionó anteriormente se encontraba en un ángulo de azimut de 5° , el resultado teórico esperado para un array lineal uniforme de cuatro elementos con una separación entre elementos de $d = 0.85 \cdot \lambda$ se muestra en la Figura 4-19. Como se observa debido a la separación entre elementos mayor de $d = \lambda/2$, aparecen lóbulos reticulados secundarios, sin embargo, en esta ocasión, al tratarse de un ángulo pequeño con respecto a la dirección normal del array, estos lóbulos no interfieren significativamente en la detección del satélite mediante el lóbulo principal. La leve discrepancia observada entre el resultado experimental obtenido y la posición real registrada en u-center puede atribuirse a posibles imprecisiones en la colocación física del array.

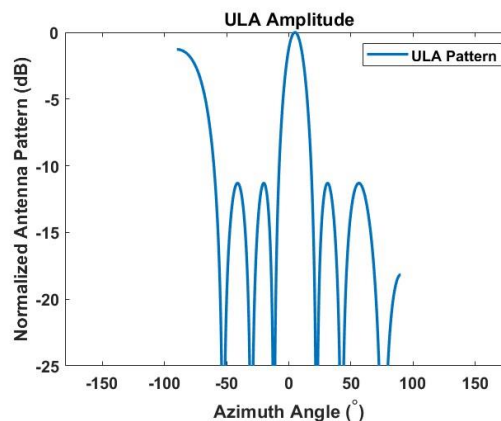


Figura 4-19 Diagrama de radiación teórico para el apuntamiento en azimut de un UCA de 4 elementos al satélite número 2

4.3.2 Justificación Beamforming en 3D

En el presente apartado se analizarán los resultados obtenidos del *beamforming* en 3D empleando un array circular de cuatro antenas con una separación entre elementos $d = 0.85 \cdot \lambda$. En esta ocasión, los satélites observados fueron el número 2 y el número 8. Comenzando con el satélite número 8, según la información obtenida mediante u-center, este se encontraba en una elevación aproximada de 10° y un azimut de 120° . El resultado teórico esperado para un satélite en estas condiciones se muestra en la Figura 4-20, donde se aprecia el diagrama de radiación característico del array circular para la posición específica del satélite número 8. En dicho diagrama, se observan lóbulos secundarios de tamaño similar o incluso mayor que el lóbulo principal, lo que coincide con los resultados obtenidos en la práctica.

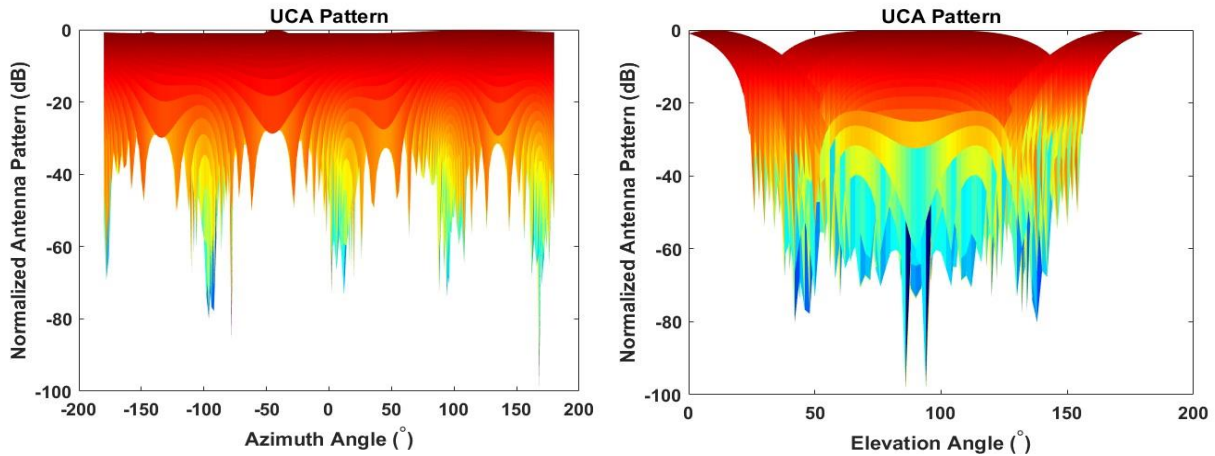


Figura 4-20 Diagrama de radiación teórico para el apuntamiento de un UCA de 4 elementos al satélite 8

Como se explicó con anterioridad en el apartado relativo al UCA 3D (*Uniform Circular Array*), la separación entre elementos en un array 3D resulta crítica debido a la formación significativa de lóbulos secundarios. Por esta razón y con el objetivo de poder apuntar con el lóbulo principal al satélite deseado, será necesario restringir adecuadamente los rangos de barrido angular durante el *beamforming*. En este caso particular, se realiza un barrido en azimut entre 45° y 135° y un barrido en elevación entre 0° y -20° , logrando así un correcto apuntamiento del satélite número 8 con el lóbulo principal. De esta forma, tal y como muestra la Figura 4-21, con un resultado en azimut de 103° y en elevación de 10° se consigue realizar dicho apuntamiento obteniendo unos resultados acordes con lo analizado en u-center.

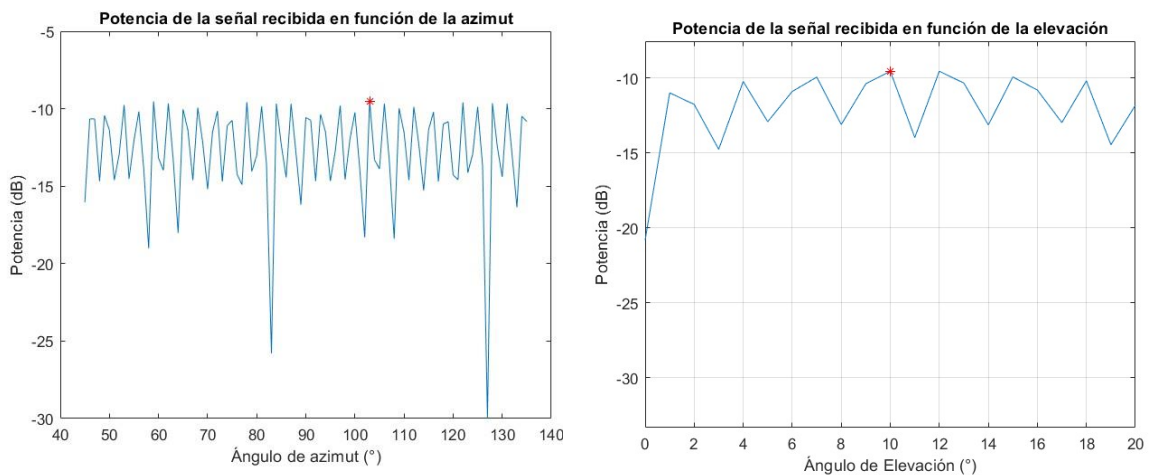


Figura 4-21 Resultado práctico corregido del beamforming en 3D para un UCA de 4 elementos apuntando al satélite 8

Para el caso del satélite número 2, situado en un ángulo de azimut de 5° y una elevación de 35° , se observa un factor clave debido a la separación entre elementos del array anteriormente mencionada.

Como muestra el diagrama de radiación teórico correspondiente (Figura 4-22), en estas condiciones, el lóbulo principal en elevación resulta fusionado con los lóbulos secundarios en un lóbulo de gran amplitud. Esta fusión se debe fundamentalmente al diseño del propio array y a la separación entre elementos, significativamente mayor que $d = \lambda/2$, lo que afecta especialmente a la resolución angular en elevaciones altas respecto a la normal del array. Por lo tanto, el resultado obtenido mediante *beamforming* para un satélite en esta posición específica está justificado y es esperable que difiera considerablemente respecto a lo observado en la aplicación u-center. Esta discrepancia subraya la importancia crítica de optimizar el diseño del array y su separación entre elementos, especialmente cuando se busca una buena resolución angular en elevaciones alejadas de la dirección normal.

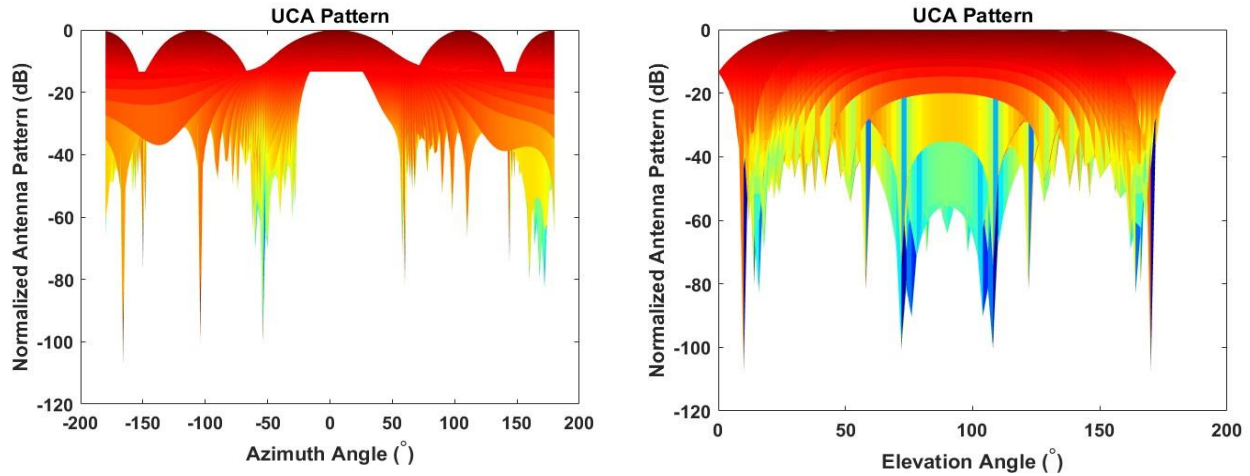


Figura 4-22 Diagrama de radiación teórico para el apuntamiento de un UCA de 4 elementos al satélite 2

4.4 Mejoras efectuadas

Una vez analizados los resultados anteriores y con el objetivo de mejorar la precisión obtenida, se llevó a cabo una medición adicional utilizando un array circular uniforme compuesto por cuatro elementos, mostrado en la Figura 4-23. En esta ocasión, las antenas se colocaron con una separación exacta $d = \lambda/2$.



Figura 4-23 UCA de 4 elementos separados a $\lambda/2$

Durante las mediciones realizadas, los satélites visibles fueron los mostrados en la figura obtenida mediante la aplicación u-center (Figura 4-24). Entre estos satélites visibles, se procedió al análisis específico del satélite número 2 y del número 8.

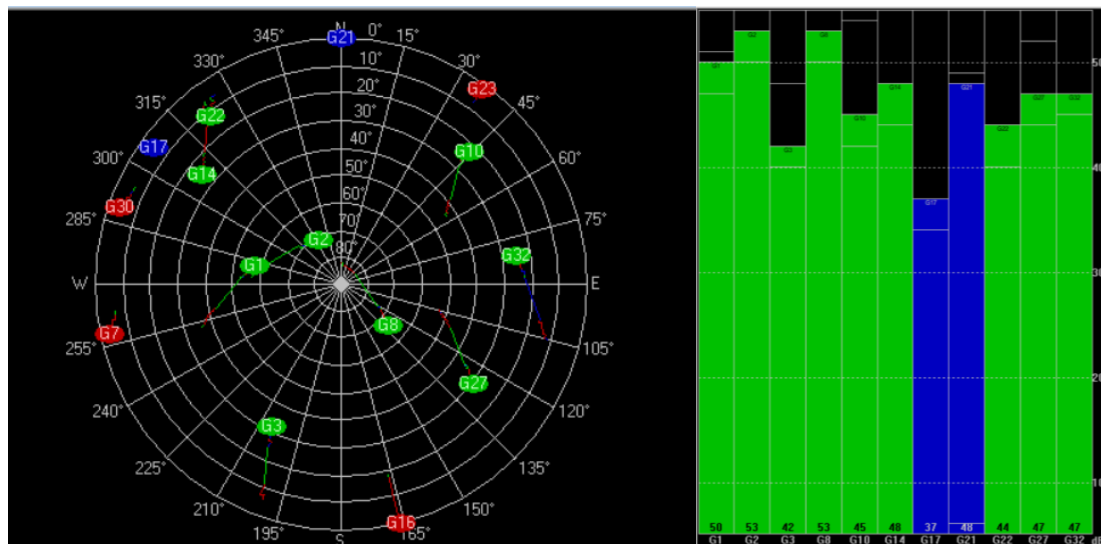


Figura 4-24 Satélites visibles en el momento de la medición para un UCA de 4 elementos separados $\lambda/2$

Una vez reconocidos los satélites visibles mediante la aplicación u-center, al igual que en los casos anteriores, se procedió a identificar los satélites presentes en la señal grabada utilizando GNU Radio. Para ello, se realizó una correlación cruzada con los códigos PRN específicos de cada satélite mediante algoritmos desarrollados en MATLAB. El resultado obtenido de esta correlación se muestra en la Figura 4-25.

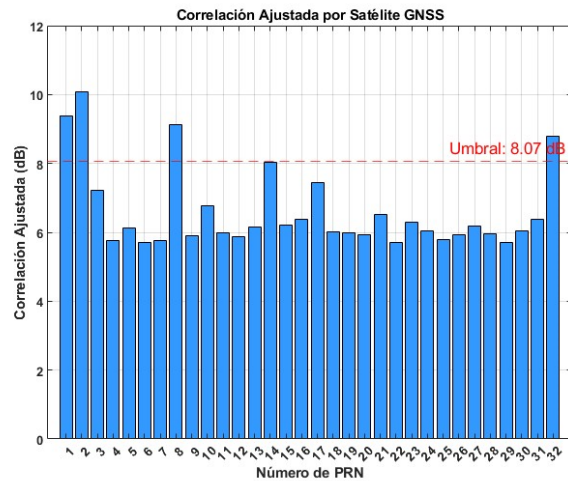


Figura 4-25 Resultado correlación PRN UCA de 4 elementos separados $\lambda/2$

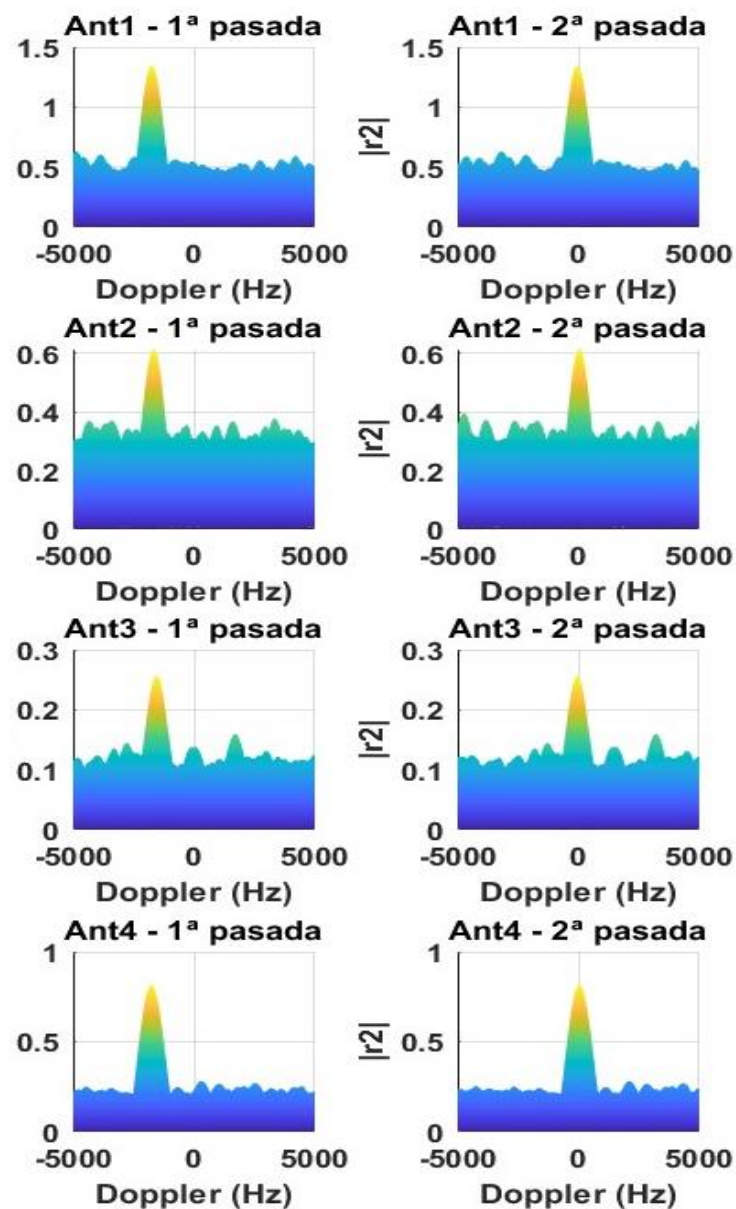


Figura 4-26 Resultado correlación para el satélite 8 en cada antena del array

Tras la correlación de los códigos PRN de los satélites identificados, se procede a realizar la corrección de la señal recibida en términos de frecuencia Doppler y fase. En este caso particular, el satélite seleccionado para apuntar mediante técnicas de *beamforming* es el número 8. Inicialmente, se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos de la correlación, seguido de la corrección en Doppler y de fase, antes de proceder con la aplicación del *beamforming* para estimar su ubicación en términos de azimut y elevación. Los resultados obtenidos tras aplicar la correlación y la correspondiente corrección de Doppler y fase para cada una de las antenas del array se presentan en la Figura 4-26.

Una vez realizada la correlación con los códigos PRN y aplicada la posterior corrección en términos de frecuencia Doppler y fase de la señal recibida, se procede a realizar el *beamforming* utilizando dicha señal corregida. El objetivo es localizar los satélites identificados previamente en tres dimensiones, determinando tanto su ángulo de elevación como de azimut. Los resultados obtenidos tras realizar este *beamforming* se presentan gráficamente en la Figura 4-27, con un resultado en azimut de 82° y elevación -84° :

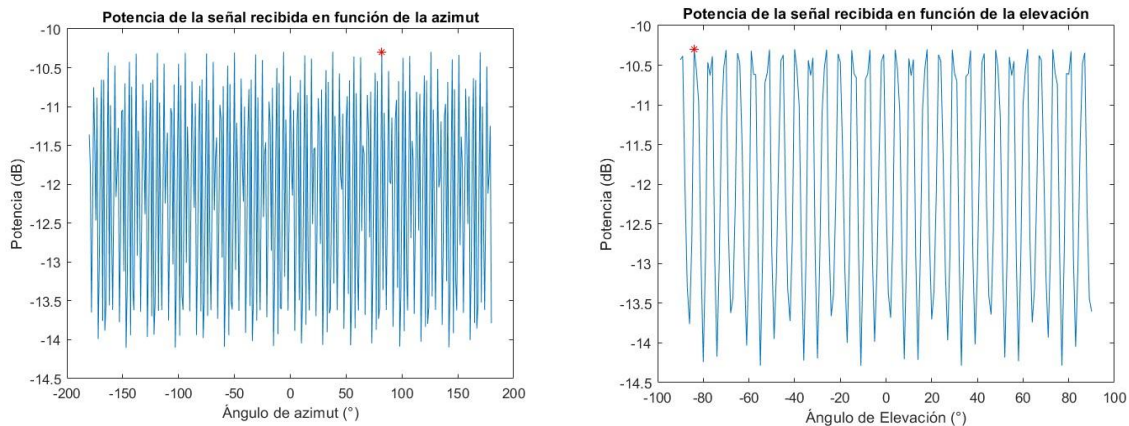


Figura 4-27 Resultado beamforming en 3D para un UCA de 4 elementos apuntando al satélite 8

4.4.1 Análisis de resultados de las mejoras

Para comenzar con el análisis, el satélite número 8 se encontraba ubicado en una elevación de 30° y un azimut de -141° . El resultado teórico correspondiente al diagrama de radiación de un array circular uniforme (UCA) de cuatro elementos con separación $d = 0.5 \cdot \lambda$ es el que se muestra en la Figura 4-28:

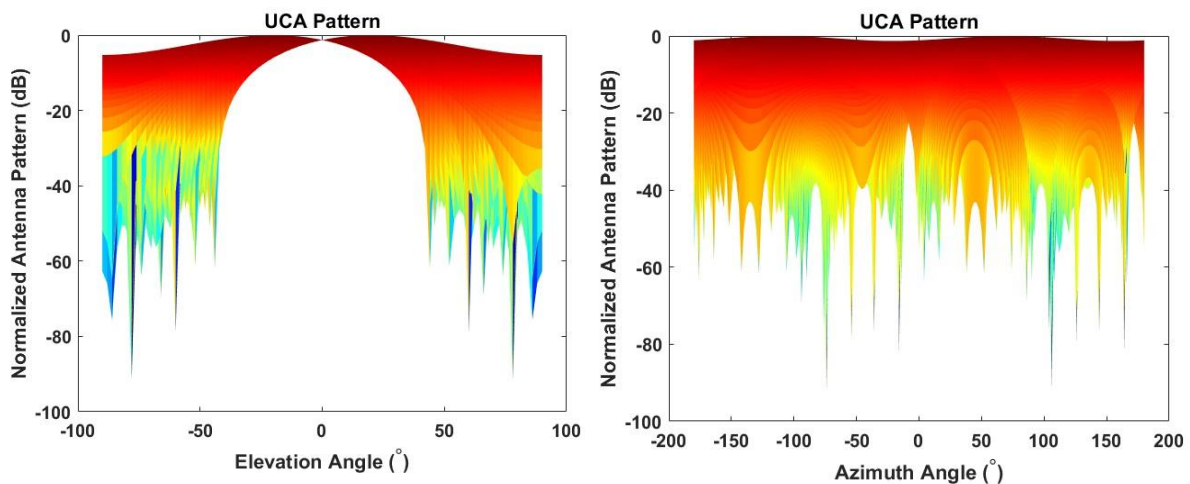


Figura 4-28 Diagrama de radiación teórico para el apuntamiento de un UCA de 4 elementos con $d = \lambda/2$. al satélite 8

En dicho diagrama se observan lóbulos secundarios con amplitud similar a la del lóbulo principal, resultado que corresponde con lo estudiado en el resultado experimental. Por este motivo y con el objetivo de garantizar un correcto apuntamiento utilizando exclusivamente el lóbulo principal, el barrido angular del *beamforming* se realizará estrictamente entre los nulos que delimitan dicho lóbulo principal.

En este caso en específico dicho barrido se realizará en azimut entre -180° y -90° y en elevación entre 0° y 30° . De esta manera, y tal como se aprecia en la Figura 4-29, el resultado en azimut es -141° y en elevación es 29° , gracias al cambio en la configuración del array a una separación entre elementos de $d = \lambda/2$ se logra realizar un apuntamiento preciso utilizando el lóbulo principal hacia un satélite situado en una elevación que, con la configuración previa, resultaba inaccesible. Esto se debe a la reducción considerable de lóbulos secundarios reticulados, lo que incrementa notablemente la resolución angular del sistema.

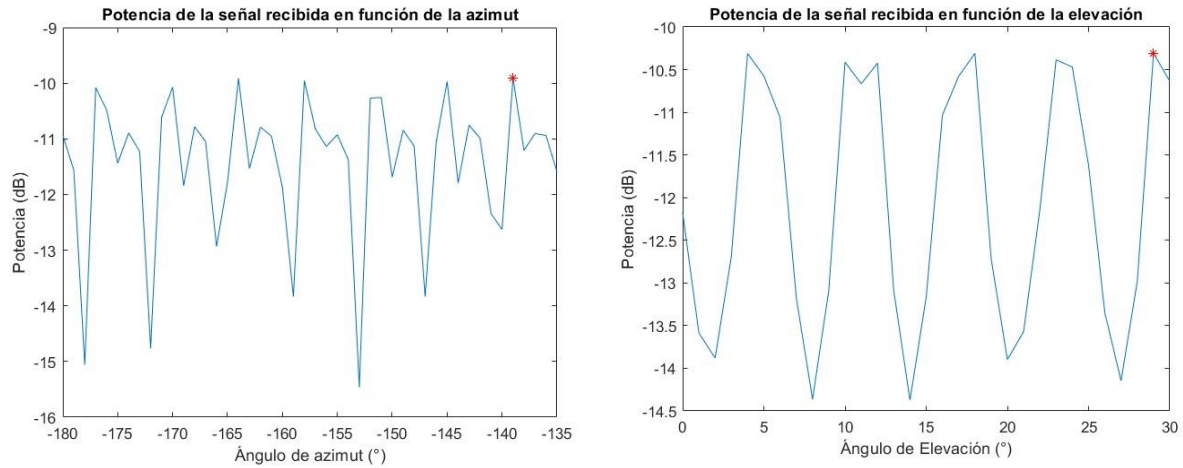


Figura 4-29 Resultado corregido del beamforming de un UCA de 4 elementos con $d = \lambda/2$ apuntando al satélite 8

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas tras el desarrollo completo del proyecto, analizando tanto los resultados experimentales como la base teórica inicial. Se valorará el grado de cumplimiento de los objetivos planteados, destacando los factores más relevantes y examinando las limitaciones encontradas durante la implementación del sistema de *beamforming* con arrays de antenas GNSS. Asimismo, se reflexiona sobre la aplicabilidad de los resultados en escenarios reales y se proponen mejoras para superar las dificultades identificadas. Por último, se sugieren líneas futuras de investigación orientadas a seguir avanzando en el estudio y perfeccionamiento del *beamforming* para sistemas GNSS.

5.2 Rendimiento del array circular (UCA) con separación $\lambda/2$ y precisión del *beamforming*

Los experimentos realizados demuestran que la configuración geométrica del array y, en particular, la separación entre sus elementos, ejerce una gran influencia en la precisión de apuntamiento hacia los satélites GNSS. En la fase inicial del proyecto se comprobó que utilizar separaciones mayores que $\lambda/2$ entre antenas condicionaba el rendimiento del sistema desde el primer momento, debido a la aparición de lóbulos secundarios de radiación significativos que competían en amplitud con el lóbulo principal, este hecho fue posteriormente comprobado en la puesta en práctica.

Esta proliferación de lóbulos indeseados dificultaba la identificación unívoca del satélite objetivo y podía introducir errores en la estimación de su dirección real. Mantener una separación cercana a $\lambda/2$ entre elementos resultó ser fundamental para maximizar la resolución angular del array y minimizar la presencia de lóbulos secundarios.

Al adoptar un *Uniform Circular Array* (UCA) de cuatro elementos con separación de media longitud de onda, se observó un mejor rendimiento del sistema: los lóbulos secundarios disminuyeron notablemente en magnitud, evitando confusiones, y el lóbulo principal pudo dirigirse de forma clara hacia el satélite deseado. En consecuencia, el apuntamiento mediante *beamforming* fue mucho más preciso y acorde a la posición esperada del satélite.

Esto quedó reflejado en los resultados experimentales, donde la dirección estimada con el array coincidió estrechamente con la posición real del satélite objetivo, presentando solo discrepancias mínimas. Dichas pequeñas diferencias se atribuyen a imprecisiones en la colocación física del array o en la calibración, pero no empañan la conclusión central: una configuración de array adecuada mejora sustancialmente la eficacia y precisión del *beamforming* para GNSS.

5.3 Coherencia entre la correlación PRN y los satélites visibles

Un aspecto destacado de los resultados es la coherencia observada entre las señales detectadas mediante procesamiento y los satélites realmente visibles según la herramienta u-center. La identificación de satélites se realizó a través de la correlación cruzada de las señales captadas con los códigos PRN específicos de cada satélite GPS. Este procedimiento demostró ser altamente eficaz, permitiendo discernir qué satélites estaban siendo recibidos por el sistema. Al comparar los PRN detectados en las grabaciones con la lista de satélites visibles proporcionada simultáneamente por un receptor comercial (software u-center de u-blox), se encontró una correspondencia directa: los satélites identificados mediante correlación coincidían con aquellos que efectivamente se encontraban sobre el horizonte durante la medición. En los casos analizados, como por ejemplo los satélites identificados con PRN concretos (Satélite 2, Satélite 8, etc.), la dirección de llegada estimada mediante el lóbulo principal del array concordó con la posición de esos satélites en el cielo en ese momento.

5.4 Limitaciones del sistema y de las antenas utilizadas

A pesar de los resultados satisfactorios alcanzados, durante el proyecto se identificaron varias limitaciones inherentes al sistema de antenas y a su configuración, las cuales afectaron al desempeño global. En primer lugar, se evidenció una alta sensibilidad del sistema a la orientación física y posicionamiento de las antenas. Dado que el método de *beamforming* en 3D requiere conocer con precisión la referencia espacial del array, pequeñas desviaciones o errores en la colocación geométrica se tradujeron en ligeros desajustes en el apuntamiento del lóbulo principal. Esto explica pequeñas discrepancias observadas entre la dirección teórica esperada hacia un satélite y la dirección estimada experimentalmente; aunque fueron diferencias menores, ponen de manifiesto la necesidad de un calibrado cuidadoso de la orientación del array en cada medición.

Asimismo, se confirmó la aparición inevitable de lóbulos secundarios cuando la separación entre elementos supera ciertos límites. Este fenómeno, predicho teóricamente y comprobado en la práctica, fue especialmente problemático en la configuración inicial del array (donde la distancia entre antenas era superior a $\lambda/2$). Los lóbulos secundarios de gran magnitud generados en ese caso introducían ambigüedad, pudiendo enmascarar o confundir la verdadera dirección de llegada de la señal de un satélite. Aunque finalmente se mitigó este efecto reduciendo la separación a $\lambda/2$, la presencia de lóbulos secundarios es una limitación intrínseca de arrays con número reducido de elementos y geometrías subóptimas, y debe tenerse en cuenta en el diseño.

Otra limitación observada fue la precisión angular reducida para satélites de elevación muy alta en el caso del array circular plano. En configuraciones como la inicial, con el UCA situado en un plano horizontal, la capacidad de discriminar la dirección de llegada de señales procedentes de ángulos de elevación elevados (ceranos al cenit) es limitada. Esto se debe a que cuando un satélite está casi sobre la vertical del array, todos los elementos reciben la señal en fase casi idéntica, disminuyendo la eficacia del *beamforming* para distinguir variaciones angulares en ese entorno. En el proyecto, esta situación se notó en la dificultad inicial para apuntar a ciertos satélites de baja elevación con la configuración no optimizada, lo que se resolvió parcialmente ajustando la configuración de barrido angular y luego mejorando la geometría del array.

En resumen, las principales limitaciones detectadas estuvieron relacionadas con la necesidad de una cuidadosa orientación y calibración del array, con la geometría inicial de las antenas, y con las propias características físicas del conjunto. Cada una de estas limitaciones influyó en mayor o menor medida en los resultados, ya sea introduciendo pequeños errores en el apuntamiento o restringiendo la resolución angular y la ganancia del sistema.

5.5 Propuestas de mejora

Para superar las limitaciones identificadas y potenciar el desempeño del sistema, se plantean a continuación varias propuestas de mejora concretas. En primer lugar, sería conveniente optimizar la

configuración física del array de antenas. Esto implica diseñar soportes o estructuras que aseguren una separación exacta de $\lambda/2$ entre elementos y una geometría simétrica, minimizando así la aparición de lóbulos secundarios. También se debería incorporar un mecanismo de referencia para la que garantice que la alineación angular del conjunto es la deseada en cada sesión de medida. De esta forma, se reduciría la dependencia de la colocación manual precisa y se eliminarían errores de apuntamiento debidos a la orientación.

Otra vía de mejora importante es aumentar el número de elementos del array. Ampliar el array a, por ejemplo, 6 u 8 antenas permitiría conformar haces más estrechos y un mayor incremento de ganancia array, mejorando tanto la resolución angular como la sensibilidad del receptor. No obstante, aumentar el número de antenas conlleva más complicaciones de sincronización y procesamiento, por lo que vendría acompañado de la necesidad de hardware SDR más potente y de algoritmos optimizados.

Finalmente, como mejora orientada a la usabilidad en campo, se sugiere desarrollar una interfaz de control y monitorización en tiempo real. Actualmente, el procesamiento se ha realizado de forma diferida en MATLAB; una versión optimizada en lenguaje de bajo nivel podría permitir el *beamforming* en tiempo real, mostrando en vivo los picos de correlación de cada PRN mientras se ajusta el apuntamiento. Esto facilitaría la experimentación y haría más práctico el sistema para usos reales, al convertirlo en un receptor activo capaz de autocalibrarse y adaptarse sobre la marcha.

5.6 Líneas futuras de investigación

Derivado de este trabajo, surgen diversas líneas futuras de investigación que podrían ampliar y profundizar en el uso de *beamforming* para aplicaciones GNSS. Una dirección natural es la extensión del estudio a otras constelaciones y frecuencias. Hasta ahora se ha trabajado con GPS L1, pero sería muy interesante aplicar técnicas similares a satélites de Galileo, GLONASS u otras constelaciones, así como a bandas de frecuencia distintas (por ejemplo, L2, L5, E5), evaluando cómo el *beamforming* mejora la recepción multibanda y multi-constelación. Esto permitiría crear un receptor array universal capaz de combinar las señales de múltiples sistemas GNSS, incrementando la robustez y disponibilidad de la solución de posicionamiento.

Otra línea de trabajo futura consiste en investigar arrays de geometrías no planas o configuraciones 3D para mejorar la cobertura angular. Emplear arreglos de antenas distribuidas en volumen (por ejemplo, una cúpula semiesférica de elementos) podría solventar las limitaciones observadas para satélites en el cenit, proporcionando capacidad de *beamforming* verdaderamente omnidireccional en 3D. Si bien la complejidad constructiva aumentaría, un array volumétrico permitiría apuntar con alta ganancia a cualquier región del cielo, incluso en elevaciones muy altas, sin sacrificar rendimiento en elevaciones bajas.

Por último, una importante línea de desarrollo es llevar este sistema hacia un entorno operacional real. Esto implica diseñar prototipos de receptores GNSS con *beamforming* integrado que puedan funcionar en tiempo real sobre el terreno, quizás a bordo de vehículos o en instalaciones fijas. Ensayos en escenarios dinámicos, por ejemplo, siguiendo satélites desde una plataforma en movimiento, como un buque o un vehículo terrestre, serían muy valiosos para validar la robustez de las técnicas en condiciones no estáticas. En conjunto, estas líneas futuras de investigación buscan no solo perfeccionar la técnica de *beamforming* para GNSS, sino también explorar nuevas aplicaciones donde las capacidades de un array de antenas inteligente aporten un valor añadido significativo en el ámbito de la navegación y la detección satelital.

5.7 Conclusión Final

En definitiva, este proyecto ha validado con éxito el uso de técnicas avanzadas de *beamforming* para la localización y seguimiento preciso de satélites GNSS, evidenciando la importancia fundamental de una adecuada configuración geométrica del array para garantizar un rendimiento óptimo. Los objetivos iniciales del trabajo se han cumplido satisfactoriamente, al demostrarse de forma experimental la

viabilidad de mejorar la identificación y apuntamiento de satélites en un escenario real mediante *beamforming*. A pesar de las limitaciones identificadas durante el desarrollo, los resultados obtenidos han mostrado la validez práctica y la robustez del enfoque propuesto, asentando una base sólida para desarrollos futuros. En conjunto, las conclusiones extraídas y las mejoras propuestas sientan las bases para próximas investigaciones y aplicaciones, encaminadas a aprovechar al máximo el *beamforming* en sistemas GNSS y afrontar con éxito los desafíos que plantea la navegación satelital en entornos cada vez más exigentes.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Historia y Evolución de los Sistemas GNSS - METTATEC». Accedido: 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mettatec.com/es/historia-y-evolucion-de-los-sistemas-gnss/>
- [2] «Componentes del Segmento Espacial en GNSS - METTATEC». Accedido: 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mettatec.com/es/componentes-del-segmento-espacial-en-gnss/>
- [3] Cyberstream, «Los 3 segmentos esenciales del Sistema de Posicionamiento Global (GPS)», Byron Vargas ®. Accedido: 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.byronvargas.com/web/cuales-son-los-3-segmentos-del-gps/>
- [4] «Foundations of Global Navigation Satellite Systems (GNSS)». Accedido: 11 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
- [5] «Capítulos+2F2-+Sistema+de+Navegacion+con+ayuda+de+satélites.pdf». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11417/fichero/Cap%C3%ADtulos+2F2-+Sistema+de+Navegacion+con+ayuda+de+sat%C3%A9lites.pdf>
- [6] «Capítulos+2F2-+Sistema+de+Navegacion+con+ayuda+de+satélites.pdf». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11417/fichero/Cap%C3%ADtulos+2F2-+Sistema+de+Navegacion+con+ayuda+de+sat%C3%A9lites.pdf>
- [7] «CDMA FDMA Techniques - Navipedia». Accedido: 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA_FDMA_Techniques
- [8] J.-L. Sánchez-Ponz, «CDMA: COMUNICACIONES DE ESPECTRO ENSANCHADO».
- [9] «PFC_Juan_Antonio_Becerra_2_CDMA.pdf». Accedido: 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://biblus.us.es/bibing/proyectos/use/abreproy/11835/fichero/PFC_Juan_Antonio_Becerra_2_CDMA.pdf
- [10] «tema_02.pdf». Accedido: 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1970/course/section/1676/tema_02.pdf
- [11] H. el espacio-AEM, «Estructura de las Señales del GPS», Hacia el espacio. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://haciael espacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=350>
- [12] «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

- [13] «Beamforming». Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/discovery/beamforming.html>
- [14] M. A. S. Natera *et al.*, «New Antenna Array Architectures for Satellite Communications», en *Advances in Satellite Communications*, IntechOpen, 2011. doi: 10.5772/22487.
- [15] «Signal Processing for Passive Bistatic Radar Mateusz Malanowski (1).pdf».
- [16] «Introducción a Radio definida por software (SDR)». Accedido: 1 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/discovery/sdr.html>
- [17] «EMISORAS DE RADIO DEFINIDAS POR SOFTWARE-SDR-Software defined radio». Accedido: 1 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ea1uro.com/sdr.html>
- [18] adamgannon, «GNU Radio: Online Processing with MATLAB», Adam Gannon. Accedido: 1 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://adamgannon.com/2014/11/18/gnu-radio-online-processing-with-matlab/>
- [19] «MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- [20] «u-center», u-blox. Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>
- [21] «MA600 Spartan 3in1 Permanent Mount GPS/GLONASS/GALILEO & Cellular & Wi-Fi® Antenna Ø145.6*36mm», Taoglas. Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.taoglas.com/product/spartan-ma600-3in1-permanent-mount-gpsglonass-2g3g4g-wifi-smam-2/>
- [22] «Antena de combinación GPS/Celular/WiFi MA.600 Spartan», DigiKey. Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.es/es/product-highlight/t/taoglas/ma600-spartan>
- [23] J. R. de Haro, «Análisis software y hardware del SDR HackRF One».
- [24] «HackRF Uno», Opencircuit. Accedido: 2 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://opencircuit.es/producto/hackrf-one>
- [25] «5. PlutoSDR en Python | PySDR: A Guide to SDR and DSP using Python». Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pysdr.org/es/content-es/pluto.html>
- [26] «ADALM-PLUTO Evaluation Board | Analog Devices». Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html#eb-overview>
- [27] «EVK-M8T_UserGuide_(UBX-14041540).pdf». Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/EVK-M8T_UserGuide_%28UBX-14041540%29.pdf
- [28] «X300/X310 - Ettus Knowledge Base». Accedido: 15 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://kb.ettus.com/X300/X310>
- [29] «DXPatrol GPS Disciplined Oscillator V3». Accedido: 15 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.wimo.com/es/dxpatrol-gpsdo-v3>
- [30] J. P. González-Coma, R. Nocelo López, J. M. Núñez-Ortuño, y F. Troncoso-Pastoriza, «Beacon-Based Phased Array Antenna Calibration for Passive Radar», *Remote Sens.*, vol. 17, n.º 3, p. 490, ene. 2025, doi: 10.3390/rs17030490.
- [31] «IS-GPS-200K.pdf». Accedido: 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200K.pdf>

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

En este anexo se analizan las implicaciones sociales, económicas y ambientales asociadas al desarrollo y aplicación de técnicas de *beamforming* en la recepción y análisis de señales GNSS. Estas técnicas, que permiten orientar y concretar la recepción de señales de satélite mediante arrays de antenas, ofrecen ventajas significativas en la optimización del uso del espectro radioeléctrico y en la eficiencia de las telecomunicaciones. A continuación, se discuten los principales impactos en la sociedad, la economía y el medioambiente, destacando la relación de estas tecnologías con la sostenibilidad.

- Implicaciones Sociales:

La implementación de técnicas avanzadas de *beamforming* en arrays de antenas GNSS aporta numerosos beneficios sociales, destacando la mejora significativa en la precisión de los sistemas de posicionamiento y navegación. Estas mejoras no solo optimizan servicios cotidianos relacionados con la movilidad y la navegación, sino que también tienen un impacto directo en la seguridad pública al mejorar la eficiencia en aplicaciones críticas como operaciones de emergencia, búsqueda y rescate, y control de tráfico aéreo y marítimo. La posibilidad de localizar y rastrear satélites con mayor precisión contribuye, además, a la mejora de infraestructuras críticas, servicios de emergencias y transporte autónomo, beneficiando directamente a la sociedad mediante una reducción en la probabilidad de accidentes o fallos debidos a errores en la localización.

- Implicaciones económicas:

Desde un punto de vista económico, las técnicas de *beamforming* aplicadas a sistemas GNSS permiten optimizar notablemente el uso del espectro radioeléctrico al reducir interferencias y mejorar la eficiencia espectral. Esto facilita la coexistencia armónica entre diferentes sistemas inalámbricos y maximiza el rendimiento económico del espectro disponible. Sectores clave como el transporte, la logística y las telecomunicaciones pueden aprovechar estas ventajas para mejorar sus operaciones, aumentando la eficiencia y reduciendo significativamente sus costes operativos. Además, la creciente demanda por soluciones precisas de posicionamiento genera nuevas oportunidades comerciales para fabricantes y proveedores de sistemas avanzados, favoreciendo la creación de empleo y fomentando el crecimiento en sectores tecnológico especializados.

- Implicaciones ambientales:

Finalmente, desde el punto de vista ambiental, el uso eficiente del espectro radioeléctrico mediante técnicas de *beamforming* tiene implicaciones positivas relevantes. Al reducir la recepción de señales no deseadas y minimizar interferencias, se optimiza el uso del espectro, lo que implica la reducción en el consumo energético asociado al procesamiento y filtrado de señales. Esta eficiencia energética también beneficia directamente a aplicaciones relacionadas con la sostenibilidad medioambiental, como los sistemas de monitorización ambiental y la gestión eficiente del tráfico vehicular, contribuyendo así a la reducción de emisiones contaminantes y al uso racional de los recursos naturales.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En el presente anexo se abordan consideraciones éticas y sociales relacionadas con el desarrollo de técnicas de *beamforming* y el uso de arrays de antenas GNSS en el ámbito de las telecomunicaciones y el posicionamiento. Dado el impacto que estas tecnologías tienen en la seguridad, la privacidad y el uso responsable del espectro radioeléctrico, resulta fundamental analizar sus implicaciones en la sociedad y la importancia de su aplicación ética y regulada.

Para comenzar, es preciso reflexionar sobre la responsabilidad social inherente al desarrollo e implementación de tecnologías de *beamforming* y sistemas GNSS. Estas herramientas poseen un carácter dual, ya que pueden emplearse con fines legítimos y beneficiosos, como la mejora en la precisión y fiabilidad del posicionamiento, pero también pueden utilizarse con fines ilícitos o perjudiciales. Esta dualidad impone la obligación de asegurar que las innovaciones tecnológicas se apliquen con fines legítimos y en beneficio de la sociedad, minimizando cualquier posible uso indebido.

En el contexto de este TFG, la técnica de *beamforming* con arrays GNSS ha sido concebida para mejorar la recepción de señales de navegación, incrementando la precisión y robustez de los servicios de posicionamiento. Su uso legítimo y ético incluye aplicaciones en aviación, automoción y navegación marítima, donde permite optimizar rutas, mejorar la seguridad y reducir riesgos de accidentes. Sin embargo, no se puede ignorar que tecnologías similares pueden utilizarse con intenciones menos benévolas. Por ejemplo, un receptor avanzado con arrays de antenas podría, en manos malintencionadas, emplearse para rastrear señales de dispositivos de terceros sin autorización, afectando gravemente la privacidad de los usuarios. Asimismo, esta tecnología podría ser utilizada en el ámbito militar para el desarrollo de sistemas de seguimiento de objetivos, lo que plantea interrogantes éticos sobre su uso en conflictos armados.

En la actualidad, muchos sistemas de armas guiadas utilizan GNSS para alcanzar objetivos con alta precisión. Si bien la defensa y la protección ciudadana pueden justificar el uso de estas tecnologías en contextos militares regulados, su proliferación descontrolada plantea serias preocupaciones éticas, especialmente si contribuye a situaciones ofensivas que pongan en riesgo a población civil. Por ello, es crucial que exista un control ético y normativo sobre la aplicación de estas tecnologías, garantizando que sus beneficios no se conviertan en amenazas para la seguridad global.

Asumir la responsabilidad en este ámbito implica diversas acciones concretas. En primer lugar, es imprescindible cumplir con la legislación y regulaciones técnicas aplicables, asegurando el respeto a las licencias del espectro radioeléctrico, evitando la transmisión de señales sin autorización en bandas GNSS y acatando las normativas internacionales que prohíben la interferencia perjudicial. Además, se debe garantizar que sus aplicaciones cumplan con principios de privacidad y protección de datos, asegurando que el manejo de información de posicionamiento se realice de forma segura y ética.

En conclusión, el desarrollo de un array de antenas para *beamforming* en entornos GNSS no solo conlleva retos técnicos, sino también un compromiso ético y social. Es fundamental garantizar la seguridad de las comunicaciones frente a vulnerabilidades como *jamming* y *spoofing*, mantener la privacidad de los usuarios en cualquier manejo de datos de posición y fomentar un uso responsable y regulado de estas tecnologías. Solo integrando estas reflexiones desde la fase de diseño y desarrollo se podrá garantizar que los avances en SDR y GNSS realmente contribuyan al bienestar y progreso de la sociedad, minimizando sus posibles consecuencias negativas.

ANEXO III: GENERACIÓN CÓDIGOS PRN

Cada satélite cuenta con dos secuencias de propagación únicas. La primera de ellas es el *coarse acquisition code* (C/A), y por otro lado el *encrypted precision code* (P(Y)). El código C/A consta de una secuencia de 1023 bits que es repetida cada ms consiguiendo una tasa de bit de 1023 MHz. El código P es un código de $2.35 \cdot 10^4$ bits con una tasa de bit de 10.23 MHz que es repetida cada semana. El código C/A es modulado mediante la portadora L1 y por otro lado el código P(Y) es modulada en L1 y L2.

Las secuencias utilizadas como códigos C/A en GPS, forman parte de una familia de secuencias denominadas *Gold Codes*. Este tipo de secuencias también son conocidas como secuencias de ruido pseudoaleatorias o PRN. Estas secuencias se generan como se puede apreciar en la. La generación de códigos C/A consta de dos registros de desplazamiento que se conocen como G1 y G2. Estos registros están compuestos por 10 celdas con las que se crean 2 secuencias de 1023 bits. El polinomio generador G1, genera una secuencia base utilizada en todos los satélites y tiene la siguiente configuración:

$$G1 = x^{10} + x^3 + 1$$

Por otro lado, el polinomio generador G2 se desplaza con un retardo específico para cada satélite permitiendo que se genere un código único para cada satélite y tiene la siguiente configuración:

$$G2 = x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + 1$$

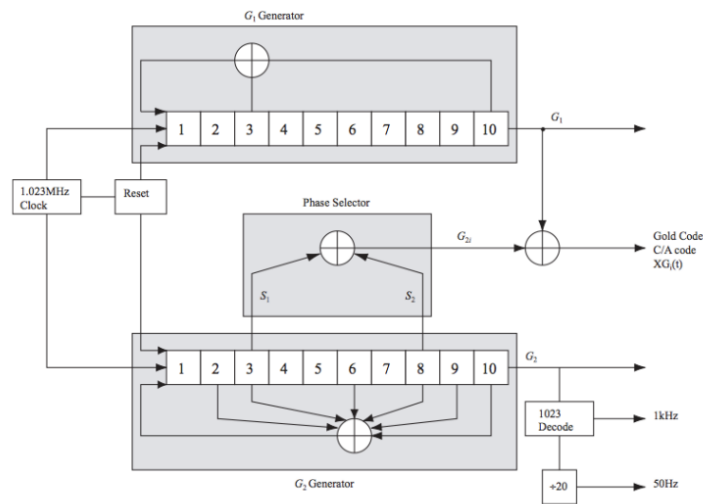


Figura A3- 1 Generador de códigos C/A [31]

A la hora de generar los códigos C/A para cada satélite, se combina la salida del registro G1 es decir el décimo bit de G1 se combina con una versión modificada de la salida del registro G2 a la misma vez que se genera un nuevo valor para el primer bit, de forma que todos los bits se desplazan a la derecha. Esa versión modificada de G2 se consigue mediante la introducción de un retardo específico para cada satélite. Ese retardo específico de cada satélite es el recogido en la Figura A3- 2.

Satellite ID number	GPS PRN signal number	Code phase selection G_2	Code delay chips	First 10 chips octal
1	1	2 ⊕ 6	5	1440
2	2	3 ⊕ 7	6	1620
3	3	4 ⊕ 8	7	1710
4	4	5 ⊕ 9	8	1744
5	5	1 ⊕ 9	17	1133
6	6	2 ⊕ 10	18	1455
7	7	1 ⊕ 8	139	1131
8	8	2 ⊕ 9	140	1454
9	9	3 ⊕ 10	141	1626
10	10	2 ⊕ 3	251	1504
11	11	3 ⊕ 4	252	1642
12	12	5 ⊕ 6	254	1750
13	13	6 ⊕ 7	255	1764
14	14	7 ⊕ 8	256	1772
15	15	8 ⊕ 9	257	1775
16	16	9 ⊕ 10	258	1776
17	17	1 ⊕ 4	469	1156
18	18	2 ⊕ 5	470	1467
19	19	3 ⊕ 6	471	1633
20	20	4 ⊕ 7	472	1715
21	21	5 ⊕ 8	473	1746
22	22	6 ⊕ 9	474	1763
23	23	1 ⊕ 3	509	1063
24	24	4 ⊕ 6	512	1706
25	25	5 ⊕ 7	513	1743
26	26	6 ⊕ 8	514	1761
27	27	7 ⊕ 9	515	1770
28	28	8 ⊕ 10	516	1774
29	29	1 ⊕ 6	859	1127
30	30	2 ⊕ 7	860	1453
31	31	3 ⊕ 8	861	1625
32	32	4 ⊕ 9	862	1712
—	33	5 ⊕ 10	863	1745
—	34	4 ⊕ 10	950	1713
—	35	1 ⊕ 7	947	1134
—	36	2 ⊕ 8	948	1456
—	37	4 ⊕ 10	950	1713

Figura A3- 2 Retardos específicos en los códigos C/A[31]

Para un mejor entendimiento de la generación de códigos C/A, se pone como ejemplo al satélite 7. En este caso como se aprecia en la Figura A3- 2, en el registro G2 se utiliza los desplazamientos 8 y 1, esto significa que los bits en esas posiciones se extraen y combinan con el G1 en una operación XOR, en este caso se actualiza el primer bit siguiendo la ecuación, desplazándose por tanto todos los bits hacia la derecha.

En el estado inicial los registros G1 y G2 se encuentran de la siguiente manera:

$$G1 = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]$$

$$G2 = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]$$

Una vez tomados estos registros, los pasos para la generación del código C/A siguiendo los reflejados en la Figura A3- 1 son:

1. Se toma el bit de salida de G1.
2. Se extraen los bits en las posiciones 8 y 1 del registro G2 y se combinan en una operación XOR.
3. Se realiza XOR entre la salida de G1 y la combinación de los bits de G2.
4. Se guarda el resultado como el siguiente bit del código C/A.
5. Se actualizan los registros G1 y G2 según sus polinomios de retroalimentación.
6. Se repite el proceso 1023 veces para obtener el código completo.

Por tanto, para las diez primeras iteraciones los bits resultantes del código C/A quedarían como se relacionan en la Tabla 2.

Iteración	Salida G1	Bit G2 (8)	Bit G2 (1)	XOR G2(8) + G2(1)	C/A Bit (XOR G2(8) + G2(1) + G1(10))
1	1	1	1	0	1
2	1	1	1	0	1
3	1	1	0	1	0
4	1	0	0	1	1
5	1	0	1	1	0
6	1	1	0	1	0
7	1	1	1	0	1
8	1	0	1	1	0
9	1	1	0	1	0
10	1	1	1	0	1

Tabla 2 Generador de código C/Asatélite 7

En este trabajo, se generó en el receptor el código C/A de todos los satélites GPS disponibles, para a través de una función de correlación identificar de cuál de ellos estamos recibiendo señal para posteriormente poder realizar la técnica del *beamforming*.

ANEXO IV: ALGORITMO DE MATLAB

```

close all;
clear all;

numSamples = 4000;
fs = 4e6;
batchSize = 4000;
numBatches = numSamples / batchSize;
freqs = -5000:100:5000;
fc = 1575.42e6;
lambda = physconst('LightSpeed')/fc;
d = 0.85*lambda;
N = 4;
R = d/(2*sin(pi/N)); % Radio del array circular (ajustado para separación correcta)
k=2*pi/lambda;
% Posiciones de las antenas en coordenadas cartesianas (distribuidas en círculo en XY)
theta_n = linspace(0, 2*pi, N+1);
theta_n = theta_n(1:end-1); % Eliminar el último repetido
x = R * cos(theta_n); % Coordenada X
y = R * sin(theta_n); % Coordenada Y
z = zeros(1, N); % Coordenada Z (array en plano XY)
antenna_positions = [x; y; z];
steering_vector = @(azimut,elevation) (1/sqrt(N)*exp(1.j*k*R*sin(elevation)*cos(azimut-
theta_n)));
% Cargar la señal binaria (dos antenas)
signals_raw1(:,1) =
io.read_complex_gnuradio('GNSS_PRN_Guerrero_UCA_4__2025.03.12.17.29.50_sur_1.bin', 0,
numSamples);
signals_raw2(:,1) =
io.read_complex_gnuradio('GNSS_PRN_Guerrero_UCA_4__2025.03.12.17.29.50_sur_2.bin', 0,
numSamples);
signals_raw3(:,1) =
io.read_complex_gnuradio('GNSS_PRN_Guerrero_UCA_4__2025.03.12.17.29.50_sur_4.bin', 0,
numSamples);
signals_raw4(:,1) =
io.read_complex_gnuradio('GNSS_PRN_Guerrero_UCA_4__2025.03.12.17.29.50_sur_3.bin', 0,
numSamples);
% Vectores de correlación para cada antena
max_vals_ant1= zeros(1, 32);
mean_vals_ant1= zeros(1, 32);
margins_ant1 = zeros(1, 32);

max_vals_ant2= zeros(1, 32);
mean_vals_ant2= zeros(1, 32);
margins_ant2 = zeros(1, 32);

max_vals_ant3= zeros(1, 32);
mean_vals_ant3= zeros(1, 32);
margins_ant3 = zeros(1, 32);

max_vals_ant4= zeros(1, 32);
mean_vals_ant4= zeros(1, 32);
margins_ant4 = zeros(1, 32);
% Para graficar la correlación final
r_global_1 = []; r2_1 = []; sig_corr_1 = [];
r_global_2 = []; r2_2 = []; sig_corr_2 = [];
r_global_3 = []; r2_3 = []; sig_corr_3 = [];
r_global_4 = []; r2_4 = []; sig_corr_4 = [];
% Bucle de antenas

```

```
for ant = 1:4

    % Elegir la señal cruda según antena
    if ant==1
        signals_raw = signals_raw1;
        max_vals    = max_vals_ant1;
        mean_vals   = mean_vals_ant1;
        margins     = margins_ant1;
        antenaName = 'ANT1';
    else
        if ant==2
            signals_raw = signals_raw2;
            max_vals    = max_vals_ant2;
            mean_vals   = mean_vals_ant2;
            margins     = margins_ant2;
            antenaName = 'ANT2';
        else
            if ant==3
                signals_raw = signals_raw3;
                max_vals    = max_vals_ant3;
                mean_vals   = mean_vals_ant3;
                margins     = margins_ant3;
                antenaName = 'ANT3';
            else
                signals_raw = signals_raw4;
                max_vals    = max_vals_ant4;
                mean_vals   = mean_vals_ant4;
                margins     = margins_ant4;
                antenaName = 'ANT4';
            end
        end
    end
end

% Bucle para cada PRN (puedes cambiar el rango si deseas)
for NUM_SAT = 8:8

    %% =====
    %% PRIMERA PASADA (Búsqueda)
    %% =====

    prn_time = -2*(cacode(NUM_SAT, fs/1.023e6)) + 1;
    prn_freq = conj(fft(prn_time));

    zfoPhases = (-2*pi*(0:batchSize-1)/fs).';
    phases = zfoPhases .* freqs;

    % *** Aquí usamos la señal de la antena actual ***
    signal = signals_raw(:,1);

    vv_global = 0;
    r_global = [];

    for k = 1:numBatches
        range = (k-1)*batchSize+1 : k*batchSize;
        sig_batch = signal(range);

        x = exp(1j*phases) .* sig_batch;
        X = fft(x);
```

```

R = X .* prn_freq;
r = ifft(R);

[vmax, imax] = max(abs(r));
[vv, ii] = max(vmax);

fd = freqs(ii);
code_phase = imax(ii);

fprintf('%s - PRN %d (1ª pasada): Doppler=%d, Code_phase=%d\n',...
        antennaName, NUM_SAT, fd, code_phase);

if vv > vv_global
    vv_global = vv;
    r_global = r;
end

% Corrección 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_raw(range,1) = signals_corrected .* prn_shifted;
end

% Guardar resultados de la primera pasada
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));

%% =====
%% SEGUNDA PASADA (Señal Corregida)
%% =====
sig_corrected = signals_raw(:,1);

% Contruir la misma matriz de mezcla
% Ojo: 'sig_batch' se definió en el bucle anterior,
% pero está fuera del 'for' => defínelo de nuevo
n = (0:batchSize-1).';
x2 = exp(1j*phases) .* sig_batch .* exp(-1j*2*pi*(fd)*n/fs);
X2 = fft(x2);
R2 = X2 .* prn_freq;
r2 = ifft(R2);

[vmax2, imax2] = max(abs(r2));
[vv2, ii2] = max(vmax2);
fd2 = freqs(ii2);
code_phase2 = imax2(ii2);

fprintf('%s - PRN %d (2ª pasada): Doppler=%d, Code_phase=%d\n',...
        antennaName, NUM_SAT, fd2, code_phase2);

% Guardar para graficar
if ant==1
    max_vals_ant1(NUM_SAT) = max_vals(NUM_SAT);
    mean_vals_ant1(NUM_SAT) = mean_vals(NUM_SAT);
    margins_ant1(NUM_SAT) = margins(NUM_SAT);

    r_global_1 = r_global;
    r2_1 = r2;
    sig_corr_1 = sig_corrected;

```

```
else
    if ant==2
        max_vals_ant2(NUM_SAT) = max_vals(NUM_SAT);
        mean_vals_ant2(NUM_SAT) = mean_vals(NUM_SAT);
        margins_ant2(NUM_SAT) = margins(NUM_SAT);

        r_global_2 = r_global;
        r2_2 = r2;
        sig_corr_2 = sig_corrected;
    else
        if ant==3
            max_vals_ant3(NUM_SAT) = max_vals(NUM_SAT);
            mean_vals_ant3(NUM_SAT) = mean_vals(NUM_SAT);
            margins_ant3(NUM_SAT) = margins(NUM_SAT);

            r_global_3 = r_global;
            r2_3 = r2;
            sig_corr_3 = sig_corrected;
        else
            max_vals_ant4(NUM_SAT) = max_vals(NUM_SAT);
            mean_vals_ant4(NUM_SAT) = mean_vals(NUM_SAT);
            margins_ant4(NUM_SAT) = margins(NUM_SAT);

            r_global_4 = r_global;
            r2_4 = r2;
            sig_corr_4 = sig_corrected;
        end
    end
end

end

end

end

%% 9) BEAMFORMING
% Suponiendo que tenemos PRN=16 ya corregido => [4000 x 1] en sig_corr_1 y sig_corr_2
signals_corr = [sig_corr_1, sig_corr_2, sig_corr_3, sig_corr_4]; % [4000 x 2]
azimut_Range = 45:1:135;
elevation_Range = 0:1:20;
result_amp = zeros(length(elevation_Range), length(azimut_Range));
freq_sample = floor(numSamples/2);
for el = 1:length(elevation_Range)
    for az = 1:length(azimut_Range)
        steer_vec = zeros(N,1);
        azimut_deg = azimut_Range(az);
        azimut_rad = azimut_deg*pi/180;
        elevation_deg = elevation_Range(el);
        elevation_rad = elevation_deg*pi/180;
        for m = 0:N-1
            phi_m = 2 * pi * m / N;
            steer_vec(m+1) = exp(1j * 2 * pi * (d / (2 * sin(pi/N))) / lambda * ...
                cos((azimut_Range(az)) - phi_m) * sin(elevation_Range(el))) /
sqrt(N);
        end
        filtered_signal = signals_corr * steer_vec;
        filtered_signal_spectrum = fftshift(fft(filtered_signal));

        % Guardar potencia en la matriz result_amp
        result_amp(el, az) = 10 * log10(abs(filtered_signal_spectrum(freq_sample)));
    end
end
el
```

```

end
[max_value, idx] = max(result_amp(:));
[row, col] = ind2sub(size(result_amp), idx);
max_azimut = azimut_Range(col);
max_elevation = elevation_Range(row);
fprintf('Máximo en azimut %.2f° y elevación %.2f°\n', max_azimut, max_elevation);
% Plotear los resultados de azimut
figure;
plot(azimut_Range, result_amp(row, :)); % Graficamos la potencia para cada elevación, con
el azimut fijo en el índice 'col'
title('Potencia de la señal recibida en función de la azimut');
xlabel('Ángulo de azimut (°)');
ylabel('Potencia (dB)');
hold on;
plot(max_azimut, result_amp(row, col), 'r*'); % Marcar el máximo en la gráfica de
elevación
hold off;

% Plotear los resultados de elevación
figure;
plot(elevation_Range, result_amp(:, col)); % Graficamos la potencia para cada elevación,
con el azimut fijo en el índice 'col'
title('Potencia de la señal recibida en función de la elevación');
xlabel('Ángulo de Elevación (°)');
ylabel('Potencia (dB)');
hold on;
plot(max_elevation, result_amp(row, col), 'r*'); % Marcar el máximo en la gráfica de
elevación
hold off;

%% Graficar correlaciones
% FILA 1 => Antena 1
% (A) Espectro antena1
figure;
subplot(4,3,1);
spec_corr_1 = fftshift(fft(sig_corr_1));
plot(abs(spec_corr_1));
title(['PRN ', num2str(NUM_SAT), ' - Ant1 Espectro']);
xlabel('Frecuencia (bins)'); ylabel('Amplitud');
set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'fontsize', 10);

% (B) Mapa 1ª pasada antena1
subplot(4,3,2);
surf(freqs, 1:numSamples, abs(r_global_1));
shading interp;
title('Ant1 - 1ª pasada');
xlabel('Doppler (Hz)'); ylabel('Muestras'); zlabel('|r|');
set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'fontsize', 10);

% (C) Mapa 2ª pasada antena1
subplot(4,3,3);
surf(freqs, 1:numSamples, abs(r2_1));
shading interp;
title('Ant1 - 2ª pasada');
xlabel('Doppler (Hz)'); ylabel('Muestras'); zlabel('|r2|');
set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'fontsize', 10);

% FILA 2 => Antena 2
% (A) Espectro antena2
subplot(4,3,4);
spec_corr_2 = fftshift(fft(sig_corr_2));

```

```
plot(abs(spec_corr_2));
title(['PRN ', num2str(NUM_SAT), ' - Ant2 Espectro']);
xlabel('Frecuencia (bins)'); ylabel('Amplitud');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

% (B) Mapa 1ª pasada antena2
subplot(4,3,5);
surf(freqs, 1:numSamples, abs(r_global_2));
shading interp;
title('Ant2 - 1ª pasada');
xlabel('Doppler (Hz)'); ylabel('Muestras'); zlabel('|r|');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

% (C) Mapa 2ª pasada antena2
subplot(4,3,6);
surf(freqs, 1:numSamples, abs(r2_2));
shading interp;
title('Ant2 - 2ª pasada');
xlabel('Doppler (Hz)'); ylabel('Muestras'); zlabel('|r2|');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

% FILA 3 => Antena 3
% (A) Espectro antena3
subplot(4,3,7);
spec_corr_3 = fftshift(fft(sig_corr_3));
plot(abs(spec_corr_3));
title(['PRN ', num2str(NUM_SAT), ' - Ant3 Espectro']);
xlabel('Frecuencia (bins)'); ylabel('Amplitud');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

% (B) Mapa 1ª pasada antena3
subplot(4,3,8);
surf(freqs, 1:numSamples, abs(r_global_3));
shading interp;
title('Ant3 - 1ª pasada');
xlabel('Doppler (Hz)'); ylabel('Muestras'); zlabel('|r|');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

% (C) Mapa 2ª pasada antena3
subplot(4,3,9);
surf(freqs, 1:numSamples, abs(r2_3));
shading interp;
title('Ant3 - 2ª pasada');
xlabel('Doppler (Hz)'); ylabel('Muestras'); zlabel('|r2|');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

% FILA 4 => Antena 4
% (A) Espectro antena4
subplot(4,3,10);
spec_corr_4 = fftshift(fft(sig_corr_4));
plot(abs(spec_corr_4));
title(['PRN ', num2str(NUM_SAT), ' - Ant4 Espectro']);
xlabel('Frecuencia (bins)'); ylabel('Amplitud');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

% (B) Mapa 1ª pasada antena4
subplot(4,3,11);
surf(freqs, 1:numSamples, abs(r_global_4));
shading interp;
title('Ant4 - 1ª pasada');
xlabel('Doppler (Hz)'); ylabel('Muestras'); zlabel('|r|');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);
```

```

% (C) Mapa 2ª pasada antena4
subplot(4,3,12);
surf(freqs, 1:numSamples, abs(r2_4));
shading interp;
title('Ant4 - 2ª pasada');
xlabel('Doppler (Hz)'); ylabel('Muestras'); zlabel('|r2|');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',10);

%% Bar chart final
figure;
subplot(2,2,1);
bar(1:32, margins_ant1, 'FaceColor',[0.2 0.6 1]);
grid on;
xlabel('Número de PRN');
ylabel('Correlación Ajustada (dB)');
title('Antena 1 - Correlación Ajustada');
...

subplot(2,2,2);
bar(1:32, margins_ant2, 'FaceColor',[1 0.4 0.4]);
grid on;
xlabel('Número de PRN');
ylabel('Correlación Ajustada (dB)');
title('Antena 2 - Correlación Ajustada');
...

    subplot(2,2,3);
bar(1:32, margins_ant3, 'FaceColor',[1 0.4 0.4]);
grid on;
xlabel('Número de PRN');
ylabel('Correlación Ajustada (dB)');
title('Antena 3 - Correlación Ajustada');
...

    subplot(2,2,4);
bar(1:32, margins_ant4, 'FaceColor',[1 0.4 0.4]);
grid on;
xlabel('Número de PRN');
ylabel('Correlación Ajustada (dB)');
title('Antena 4 - Correlación Ajustada');
...

disp('Finalizado.');
```