



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Calibración de un array de antenas para beamforming en radar
pasivo*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jaime Calvo Argos

DIRECTORES: Rubén Nocelo López

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Calibración de un array de antenas para beamforming en radar
pasivo*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Un radar pasivo es un sistema de detección que suele presentar una estructura biestática en la que el transmisor y el receptor se encuentran en posiciones diferentes. El transmisor, también denominado Iluminador de Oportunidad, es el encargado de emitir las ondas electromagnéticas que, mediante rebotes en los blancos, son captadas por el receptor y procesadas mediante un sistema de recepción multicanal.

La distancia se puede obtener a través de la geometría biestática, aunque haría falta determinar la dirección de la señal. Para ello, es necesario disponer de un array que esté conformado por al menos dos o más antenas para que permita estimar una diferencia de fase entre canales cuando se reciba la señal. Sin embargo, el sistema receptor generalmente presenta desajustes de diferentes tipos que dan lugar a errores de apuntamiento, y por consiguiente, de posicionamiento de blancos. Por lo tanto, se requiere previamente de un algoritmo que calibre las antenas del array.

Para lograr el objetivo, se ha desarrollado un método que permite la calibración de un array de antenas, haciendo uso de una señal cosenoidal pura emitida por una baliza de posición y frecuencia conocida y la transformada de Fourier. Se ha probado en blancos que navegaban por la ría de Pontevedra, haciendo comparativas entre su posicionamiento antes y después de aplicar las correcciones obtenidas del algoritmo.

PALABRAS CLAVE

Array de Antenas, Transformada de Fourier, Radar Pasivo, Calibración y Beamforming.

AGRADECIMIENTOS

Esta parte de este trabajo me gustaría dedicarla a todos aquellos que me han ayudado y acompañado a lo largo de mi carrera como estudiante y que, tanto de forma directa como indirecta, han hecho posible la realización de este trabajo. Sin ellos no podría haber llegado hasta aquí.

En primer lugar, mencionar a mis padres y mi hermano, ya que son la razón principal y los que más me han impulsado y apoyado a lo largo de mi vida. No tenían mucho conocimiento acerca de la calibración de un radar pasivo mediante técnicas de beamforming, ya que no es su campo, pero siempre han estado ahí cada vez que lo necesitaba.

En segundo lugar, a mi profesor y tutor Rubén Nocelo porque ha sido el que más me ha guiado en el desarrollo de este trabajo, y también por enseñar con ímpetu y entusiasmo las asignaturas referentes a las radiocomunicaciones que se nos impartieron a lo largo de la carrera.

Finalmente, agradecer a mi promoción, al colegio Torreánaz donde cursé Primaria, la E.S.O. y Bachillerato, a mi pareja y amigos de Santoña, porque en este trabajo no solo se refleja información y experimentos prácticos, sino también a uno mismo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Objetivos	7
1.3 Estructura	7
2 Estado del arte	9
2.1 Antecedentes (onda electromagnética)	9
2.2 Antenas.....	11
2.3 Array de antenas y beamforming	15
2.3.1 Beamforming	16
2.4 Problemática y solución planteada.....	18
2.5 Aplicación a radar pasivo.....	19
2.5.1 Geometría biestática	20
2.5.2 Alcance radar biestático.....	22
2.5.3 Iluminador de Oportunidad (IO).....	23
2.6 Comportamiento de la luz	23
2.7 Fuentes sonoras irradiadas por fuentes múltiples de sonido	24
2.8 Estudios y trabajos de actualidad	24
2.9 Programas de análisis.....	24
2.9.1 MATLAB	24
2.9.2 GNU RADIO (SDR).....	25
3 Beamforming.....	27
3.1 ULA (Uniform Linear Array o Array Lineal Uniforme)	27
3.1.1 Estrechamiento/reducción de array o array tapering	31
3.1.2 Radiación direccional	32
4 Calibración de un array de antenas a partir de una baliza	34
4.1 Fundamento teórico.....	34
4.2 Señal recibida en el array	35
4.2.1 Desarrollo del problema	35
4.3 Materiales y metodología a emplear	37
4.3.1 Materiales	37

4.3.2 Procedimiento – fase inicial.....	38
4.4 Funcionamiento baliza de tipo coseno	40
4.4.1 Señal emitida por la baliza.....	40
4.4.2 Sistema de correlación de datos recibidos	41
4.5 Detección y representación gráfica de las señales	43
4.6 Corrección/calibración del array	44
4.6.1 Obtención del ángulo y los desfases	45
5 Resultados	46
5.1 Análisis de resultados.....	46
5.1.1 Primera campaña de muestreo	46
5.1.1.1 Espectros de tres antenas	46
5.1.1.2 Calibración de tres antenas	48
5.1.1.3 Gráficas obtenidas en un escenario real	49
5.1.2 Segunda campaña de muestreo	52
5.1.2.1 Espectros de cuatro antenas.....	52
5.1.2.2 Calibración de cuatro antenas.....	52
5.1.2.3 Gráficas obtenidas en un escenario real	54
6 Conclusiones y líneas futuras	57
6.1 Comparación de resultados y conclusiones	57
6.1.1 Efectividad del algoritmo de calibración	57
6.1.2 Utilidad de la Transformada de Fourier.....	57
6.2 Líneas futuras	58
6.2.1 Calibración en amplitud y frecuencia de un array de antenas	58
6.2.2 Ocultación de la señal mediante correlación	59
6.2.3 Aplicación en tiempo real y automatización del algoritmo	59
7 Bibliografía.....	60
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	63
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	64
Anexo III: Algoritmo de calibración	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Esquema sinóptico del documento	8
Figura 2-1: Descomposición onda electromagnética [1].....	9
Figura 2-2: Espectro electromagnético [4].	10
Figura 2-3: Ancho de haz [7].	12
Figura 2-4: Tipos de polarización [8].	12
Figura 2-5: Diagrama de radiación 2D y 3D de una antena [9] [10].....	13
Figura 2-6: Antena de dipolo [12] [13].	13
Figura 2-7: Antena monopolo (Torre Guardamar) [14] [15].....	14
Figura 2-8: Antena Yagi [16].	14
Figura 2-9: Array lineal [18] [19].....	15
Figura 2-10: Array plano [18].	15
Figura 2-11: Array cilíndrico [20].....	16
Figura 2-12: Conformación analógica del diagrama de la antena [22].	17
Figura 2-13: Conformación digital del diagrama de la antena [22].	18
Figura 2-14: Sistema calibrado (izquierda) y sin calibrar con error considerable (derecha).	18
Figura 2-15: Ejemplo error pequeño. Sistema sin calibrar (izquierda) y comparación con el calibrado.....	19
Figura 2-16: Funcionamiento radar pasivo biestático [23] [24].....	20
Figura 2-17: Esquema posicionamiento del blanco en radar biestático.	21
Figura 2-18: Representación tridimensional de un elipsoide [25].	21
Figura 2-19: Representación del ángulo biestático y la ortogonalidad entre su bisectriz y la tangente a la elipse en el blanco.	22
Figura 3-1: Geometría de un array lineal de 4 elementos (antenas) [40].	27
Figura 3-2: Diagrama de radiación de array de N elementos (derecha completo e izquierda ampliado).	29
Figura 3-3: Diagramas de radiación variando la separación entre elementos (para N=4).	30
Figura 3-4: Diagrama de radiación para N=4 y blanco situado a 0°.	30
Figura 3-5: Diagrama de radiación para N=4 y blanco situado a 30°.	31
Figura 3-6: Diagrama de radiación para N=4 y blanco situado a 60°.	31
Figura 3-7: Diagrama de radiación de un elemento (izquierda) y el de varios elementos (N=8 y $d=0,5\lambda$) [40].	33
Figura 4-1: Efecto de un sistema lineal e invariante sobre funciones exponenciales y senoidales..	35
Figura 4-2: Esquema de calibración de un receptor multicanal	36
Figura 4-3: Array pasivo de 4 antenas sobre la azotea del edificio de investigación con antena Televés.	38

Figura 4-4: Antena emisora (IO) en Poio	38
Figura 4-5: Localización GPS del IO y el array pasivo.	39
Figura 4-6: Dispositivo Keysight (izquierda) y espectro de canales TDT transmitido por la emisora de Poio (derecha).	39
Figura 4-7: Baliza emisora de la señal coseno	40
Figura 4-8: Señal recibida por antena auxiliar.	40
Figura 4-9: Diagrama SDR de emisión de la señal coseno.	41
Figura 4-10: Señal coseno emitida por la baliza. Controlada mediante el SDR.	41
Figura 4-11: Sistema de correlación de datos.....	42
Figura 4-12: Programa de recolección de datos del array.	43
Figura 4-13: Espectro recibido por una de las antenas en tiempo real.	43
Figura 4-14: Señal coseno dentro del ancho de banda de un canal TDT.	44
Figura 4-15: Colocación de la baliza respecto del array	45
Figura 5-1: Espectro captado por la antena 1	47
Figura 5-2: Espectro captado por la antena 2	47
Figura 5-3: Espectro captado por la antena 3	47
Figura 5-4: DOA de la baliza con array calibrado	49
Figura 5-5: Escenario real. Dos contactos navegando por la ría de Pontevedra.	49
Figura 5-6: Diferencia de azimut.....	50
Figura 5-7: Captación de los blancos mediante Doppler.....	50
Figura 5-8: Comparativa DOA del blanco 1	51
Figura 5-9: Comparativa DOA blanco 2	51
Figura 5-10: Espectros de frecuencia simultáneos de cuatro antenas	52
Figura 5-11: Colocación baliza frente al array (0°)	53
Figura 5-12: DOA de la baliza con array calibrado	54
Figura 5-13: Blanco 3 en las proximidades de la ENM	54
Figura 5-14: Diferencia en azimut.....	55
Figura 5-15: Distancia biestática del blanco 3	55
Figura 5-16: Ángulo DOA del blanco 3 (con y sin calibración)	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Espectro frecuencial de radio ondas según la ITU [5] [6].....	10
Tabla 2: Comparativa entre diferentes IO [27] [28] [29] [30] [31] [32].	23
Tabla 3: Parámetros de diferentes ventanas tapering para N=16 [40].	32
Tabla 4: Resultados de 3 antenas en la primera campaña	48
Tabla 5: Resultados de 4 antenas en la segunda campaña	53

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Un array de antenas consiste en un conjunto de dos o más elementos (antenas) iguales que, dispuestas espacialmente de una forma determinada y regular, consiguen mejorar las capacidades de detección y discriminación de diferentes blancos a diferencia de si el sistema estuviera conformado por una sola. Para que el array se comporte como una única antena, cada una de ellas debe de estar calibrada correctamente, ya que dependiendo de donde se encuentre el blanco a localizar, va a aparecer un desfase proporcional entre ellas (α , 2α , $3\alpha\ldots$), el cual va a permitir medir la demora o dirección del objetivo.

Si el array no está calibrado, cada antena va a presentar un desfase o error de carácter aleatorio, el cual conlleva que no se sepa dónde está apuntando (error grande) o apunte de forma desajustada (error pequeño). Esto se observa en el diagrama de radiación del array, en el que la distribución de lóbulos reflejará si el resultado es el esperado o no. En otras palabras, para que el array funcione correctamente, los datos obtenidos entre las antenas deben de ser coherentes entre sí. Cuando esto ocurre, se puede diferenciar de forma clara los diferentes lóbulos presentes en dicho diagrama.

Hay que tener en cuenta que la calibración no se realiza de forma general, sino que cada antena debe de ser ajustada de forma individual; aunque se trate de la misma antena y teóricamente no debería de haber diferencia, la realidad es que hay ligeros desajustes que conllevan a variaciones en el desfase, como los elementos que conforman la antena, la longitud del cable o incluso el desgaste que tengan los acoples empleados. Todo ello se recalibra empleando una antena emisora de referencia, de la que se conoce su posición y frecuencia en la que trabaja. Eso es en lo que se va a basar este trabajo.

El array a emplear está formado, en principio, por cuatro antenas pasivas dispuestas en la azotea del edificio de investigación donde se encuentra el laboratorio, en la Escuela Naval Militar. El grupo de antenas será usado para conocer la posición de los diferentes blancos (embarcaciones) que navegan por la ría de Pontevedra, mediante Doppler. Dado que estas únicamente son capaces de recibir, y no de transmitir, requieren que exista otra antena capaz de emitir con la suficiente potencia y amplitud como para que las ondas lleguen a los contactos, reboten y sean recibidas por el array. Para ello, se aprovecha la señal de televisión TDT emitida por un transmisor situado en la localidad de Poio, el cual emite los diferentes canales de TV en un rango de frecuencias comprendida entre los 490 MHz y 690 MHz. Para llevar a cabo la calibración, se hará uso de un señuelo (baliza) basado en otra antena que emitirá una señal conocida de tipo coseno cerca en la banda de frecuencia de televisión TDT, de forma que sea fácil de detectar.

El señuelo estará colocado de tal forma que se facilite lo máximo posible el cálculo de los desfases. Una vez que el array haya sido calibrado, será capaz de detectar las embarcaciones que naveguen por la ría, con una tasa de error despreciable. Cabe destacar que no se trata de un sistema de detección en

tiempo real, sino que el tiempo que tarda en recibir la información y procesarla es demasiado alto en comparación con otros sistemas. No obstante, el objetivo no es crear un sistema de detección de tal capacidad, sino un sistema de calibración efectivo y genérico.

1.2 Objetivos

En este trabajo se pretende desarrollar un algoritmo de calibración genérico para arrays pasivos, de forma que las señales recibidas por cada una de las antenas se sincronicen de manera coherente. Una de las propiedades principales que debe reunir este algoritmo de calibración es que debe ser independiente de la frecuencia de la señal utilizada, es decir debe ser independiente del servicio de radiocomunicación del que se trate. Si bien es cierto que para realizar la validación del algoritmo se recurrirá a la señal de TDT disponible en nuestra área de ensayo y que permitirá determinar la posición de contactos (en este caso, aquellos barcos que naveguen por la ría de Pontevedra) de forma precisa, eliminando las incongruencias y desajustes que las antenas o el propio emplazamiento puedan presentar. Asimismo, destacar como objetivo secundario la elaboración de un Trabajo Fin de Grado ajustado a la normativa y enfocado como un proyecto de investigación en el que se llevarán a cabo una serie de pruebas para desarrollar el algoritmo y justificar su funcionamiento.

Como objetivo inherente en este trabajo está el de poner en práctica los conocimientos adquiridos en las asignaturas de Radiocomunicaciones y Sensores Navales, además de aquellas que aportaban información útil sobre este entorno y que se encuentran comprendidas a lo largo de toda la carrera, tanto la universitaria como la militar. De esta forma se consigue afianzar y darle uso a lo mencionado, así como aprender nuevos conceptos referentes a este ámbito, muy presente en los barcos y el medio donde se desenvuelven, la mar. Para ello, un objetivo subyacente del trabajo será la generación y transmisión de una señal propia que nos sirva de referencia o baliza de la cual se conocerá la posición exacta del transmisor, la frecuencia de la señal transmitida y principalmente el ángulo de incidencia en los diferentes elementos del array.

A pesar de que la parte más voluminosa y visible del trabajo sea el array en sí, no hay que dejar de lado que el epicentro del proyecto es justificar el funcionamiento de un algoritmo de calibración genérico para arrays pasivos.

1.3 Estructura

El presente trabajo de calibración de un array de antenas para tareas de beamforming en general y para detección de blancos en radar pasivo en particular se puede estructurar de la siguiente manera:

1. Introducción y objetivos: corresponde con los apartados de introducción, en el que se hace una reseña general del trabajo a modo de contextualización, también con los objetivos que motivan la elaboración del mismo y con el apartado de la estructura que sigue.
2. Estado del arte: se mencionan diferentes estudios y trabajos previos. También se ofrece información acerca de los programas empleados para llevar a cabo las simulaciones y el funcionamiento del array; resaltar los apartados donde se explica cómo funciona de forma teórica este tipo de array, el array lineal, reflejando las diferentes fórmulas matemáticas que dan pie a los diferentes resultados.
3. Beamforming: en este apartado se estudia la teoría que da lugar al beamforming y se analizan las magnitudes del error cometido cuando el array no está correctamente calibrado.
4. Calibración: en este tema se expone la teoría de la calibración de un array de antenas a partir de una baliza externa.
5. Resultados: en este apartado se muestran los resultados en dos escenarios diferentes: con el array de antenas en dos posiciones diferentes y tras dos montajes independientes. Además, se comparará la posición final de los blancos identificados que se obtiene con y sin calibración del array.

6. Conclusiones y líneas futuras: en este apartado se evaluarán los resultados obtenidos y se plantearán posibles líneas de futuro en el tema de calibrado de array de antenas.
7. Bibliografía: finalmente, es este último apartado se recogerán todas las referencias bibliográficas consultadas para la realización del trabajo.

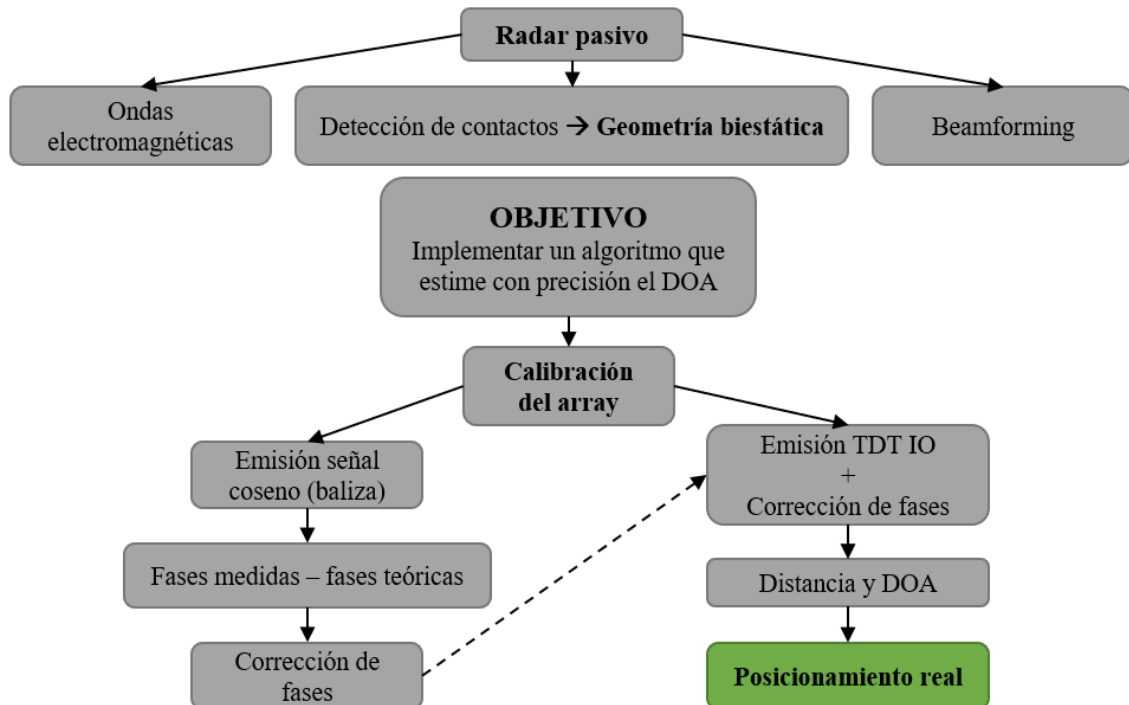


Figura 1-1: Esquema sinóptico del documento

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes (onda electromagnética)

Las ondas electromagnéticas son el elemento fundamental por el que existen las antenas, radares y, por ende, los arrays. Se trata de una forma en la que la energía viaja a través del espacio, y son creadas a partir de vibraciones (variaciones temporales) de un campo eléctrico o un campo magnético, de ahí el nombre. Ambos campos son perpendiculares entre sí, así como también lo son respecto de la dirección de propagación de la onda.

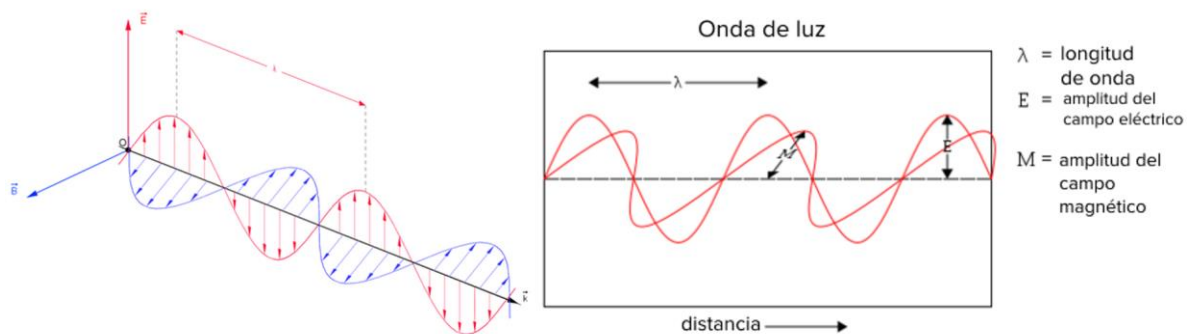


Figura 2-1: Descomposición onda electromagnética [1].

Las ondas electromagnéticas se caracterizan a partir de 2 parámetros interrelacionados como son la longitud de onda y la frecuencia. La frecuencia hace referencia al número de veces que cambia el sentido del campo en la unidad de tiempo en un punto dado. Se mide en ciclos por segundo, o hercios. A menor longitud de onda, mayor es la frecuencia. Por ejemplo, una banda de radiodifusión de amplitud modulada tiene una frecuencia de 1 MHz y una longitud de onda de aproximadamente 300 m. Los hornos de microondas trabajan a una frecuencia de 2,45 GHz y tienen una longitud de onda de 12 cm [2]. Ambos parámetros se relacionan a partir de la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2-1)$$

Donde λ es la longitud de onda, c es la velocidad de propagación en el medio (se considera el vacío, donde $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) y la f es la frecuencia de la onda.

Las ondas electromagnéticas son capaces de desplazarse por cualquier tipo de medio, incluso por el vacío. La agrupación de diversas frecuencias da lugar a lo que se conoce como espectro electromagnético, el cual abarca desde las ondas largas de frecuencias bajas, como las ondas radio y las microondas, hasta las ondas cortas de frecuencias altas, como son los rayos X y gamma. La luz, por

ejemplo, se mueve dentro del rango visible que se encuentra entre los 700 - 390 nm, o bien desde los 430 THz hasta los 700 THz [3].

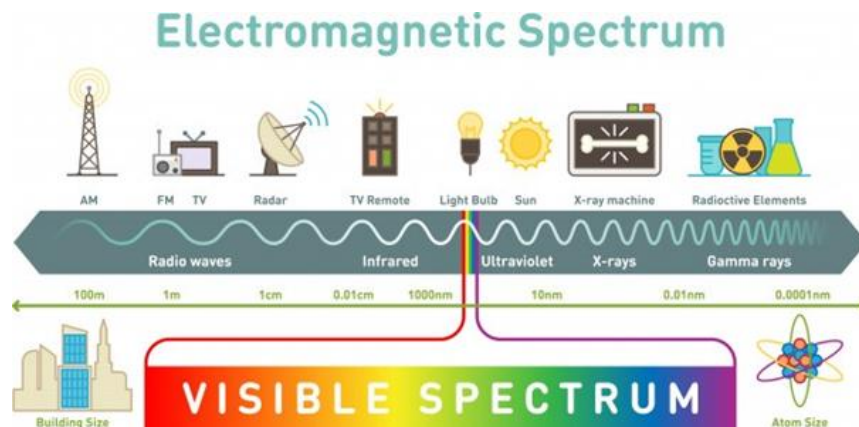


Figura 2-2: Espectro electromagnético [4].

Las ondas electromagnéticas están constituidas por agrupaciones ínfimas de energía que son los fotones, cuya energía es directamente proporcional a la frecuencia de la onda; a mayor frecuencia, mayor es la cantidad de energía almacenada por fotón. Las ondas electromagnéticas de baja frecuencia se denominan campos electromagnéticos, y las de muy alta frecuencia radiaciones electromagnéticas. Se clasifican como radiaciones ionizantes o radiaciones no ionizantes en función de la frecuencia y la energía. Estas últimas constituyen la parte del espectro electromagnético cuya energía es demasiado pequeña para deshacer los enlaces atómicos, como la radiación ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja, los campos de radiofrecuencias y microondas, los campos de frecuencias extremadamente bajas y los campos eléctricos y magnéticos estáticos [2].

En el ámbito de las radiocomunicaciones, las frecuencias son ligeramente bajas, inferiores a las del rango visible. El espectro comprende rangos que van desde los 30 Hz hasta los 300 GHz, y la International Telecommunications Union (ITU) lo divide en las siguientes bandas frecuenciales:

Banda	Acrónimo	Rango de frecuencia
Frecuencia extremadamente baja	ELF	30 – 300 Hz
Frecuencia de voz / ultra baja	VF / ULF	300 Hz – 3 kHz
Frecuencia muy baja	VLF	3 – 30 kHz
Frecuencia baja	LF	30 – 300 kHz
Frecuencia media	MF	300 kHz – 3 MHz
Frecuencia alta	HF	3 – 30 MHz
Frecuencia muy alta	VHF	30 – 300 MHz
Frecuencia ultra alta	UHF	300 MHz – 3 GHz
Frecuencia súper alta	SHF (microondas)	3 – 30 GHz
Frecuencia extra alta	EHF (microondas)	30 – 300 GHz

Tabla 1: Espectro frecuencial de radio ondas según la ITU [5] [6].

También existen otro tipo de ondas con características diferentes a las electromagnéticas, pero con comportamientos similares. Se trata de las ondas elásticas (sonido) cuya principal diferencia recae en que necesitan de un medio material para propagarse, aunque ambas satisfacen la ecuación de ondas de D' Alembert o ecuación del movimiento ondulatorio. Dicha expresión se trata de una de las ecuaciones

básicas de la matemática, ya que describe todos los tipos de movimiento ondulatorio en donde la velocidad es constante:

$$\nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (2-2)$$

En esta ecuación diferencial, la ξ es una perturbación (altura de una ola, un campo eléctrico oscilante, etc.) y v es la velocidad de propagación. La solución general se consigue mediante el método de D' Alembert:

$$\xi = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad (2-3)$$

Donde f_1 y f_2 son funciones arbitrarias:

- $f_1(x - vt)$ representa una onda con velocidad constante (v) y sin distorsión en la dirección positiva del eje OX.
- $f_2(x + vt)$ representa una perturbación con velocidad constante (v) y sin cambio de forma en la dirección negativa del eje OX.

Puesto que una onda electromagnética está compuesta por un campo eléctrico y uno magnético, ambos oscilantes, cada uno presenta su propia ecuación de propagación (idénticas entre sí). La ecuación correspondiente al campo eléctrico es la siguiente:

$$A_t = A_e \sin(2\pi f t + \phi) \quad (2-4)$$

Donde A_t es la magnitud del campo eléctrico en base al tiempo t , A_e es la amplitud máxima del campo, f es la frecuencia de la onda y ϕ es el ángulo de fase (y será uno de nuestros parámetros básicos de análisis en este trabajo), de modo que la A_t no siempre vale 0 cuando $t = 0$. La ecuación del campo magnético es idéntica al eléctrico; solo cambiaría la A_e por A_m .

2.2 Antenas

Las antenas son los elementos físicos empleados para la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas. Su tamaño y forma varían dependiendo de la frecuencia y la manera en la que emitan o reciban, aunque todas se rigen en base a los mismos principios básicos.

Estos dispositivos pueden funcionar de dos maneras, opuestas entre sí:

- **Transmisión:** hace uso del potencial eléctrico para transformarlo en ondas electromagnéticas, que luego se propagan a través del espacio.
- **Recepción:** captura las ondas electromagnéticas que inciden en los bornes de las antenas y las convierte en corriente eléctrica.

Dichos procesos son posibles gracias al principio de reciprocidad de las antenas, que indica que las antenas presentan las mismas propiedades tanto en transmisión como en recepción.

Las características que definen su funcionamiento varían dependiendo el objetivo para el que se hayan fabricado, desde la detección de blancos aéreos a una distancia considerable hasta la recepción de una antena de televisión TDT, siendo las principales las siguientes:

- a) **Ancho de banda:** rango de frecuencias en donde trabaja la antena.
- b) **Directividad:** capacidad para enfocar la energía (transmisión) o de recibirla (recepción) de una dirección particular.
- c) **Ganancia:** relación entre la densidad de potencia en una dirección concreta a la salida en comparación con la que tendría una antena isotrópica (omnidireccional) medidas ambas a una misma distancia.

d) **Ancho de haz (beamwidth):** ángulo comprendido entre dos puntos del haz principal, situados 3 dB por debajo de la potencia pico o entre nullos. Hay que tener en cuenta que está definido por dos vectores:

- Vertical: perpendicular a la superficie terrestre
- Horizontal: paralelo a la superficie terrestre

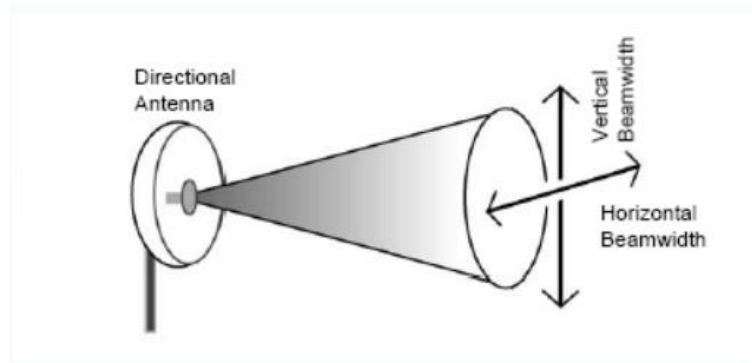


Figura 2-3: Ancho de haz [7].

e) **Polarización:** dirección que toma el campo eléctrico emitido. Para conseguir que la potencia de transferencia sea lo mayor posible, la polarización entre la antena emisora y receptora tiene que ser la misma. Cuando esto no ocurre, la potencia recibida disminuye, y por lo tanto disminuye la eficiencia. La polarización de una antena puede ser:

- Lineal: vertical, horizontal u oblicua.
- Circular
- Elíptica

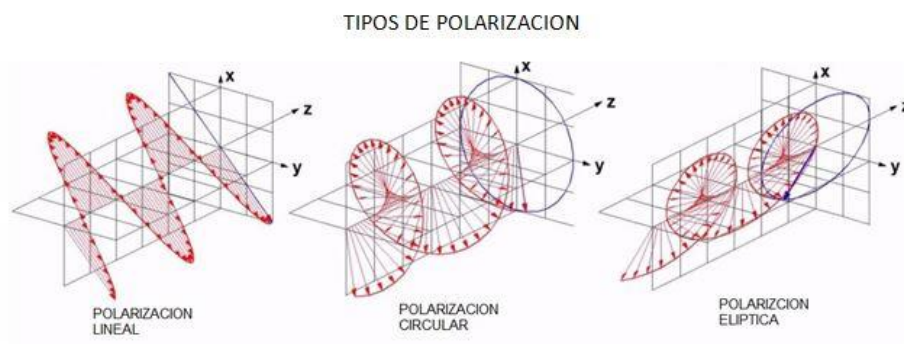


Figura 2-4: Tipos de polarización [8].

El conjunto de estos parámetros conformará el **diagrama de radiación de la antena**, el cual determinará en gran medida si se ha cumplido con los objetivos de diseño de la misma. Se trata de la forma relativa de la potencia radiada por la antena en el espacio, una gráfica de la intensidad del campo emitido en función del ángulo que por lo general está centrada en el lóbulo principal.

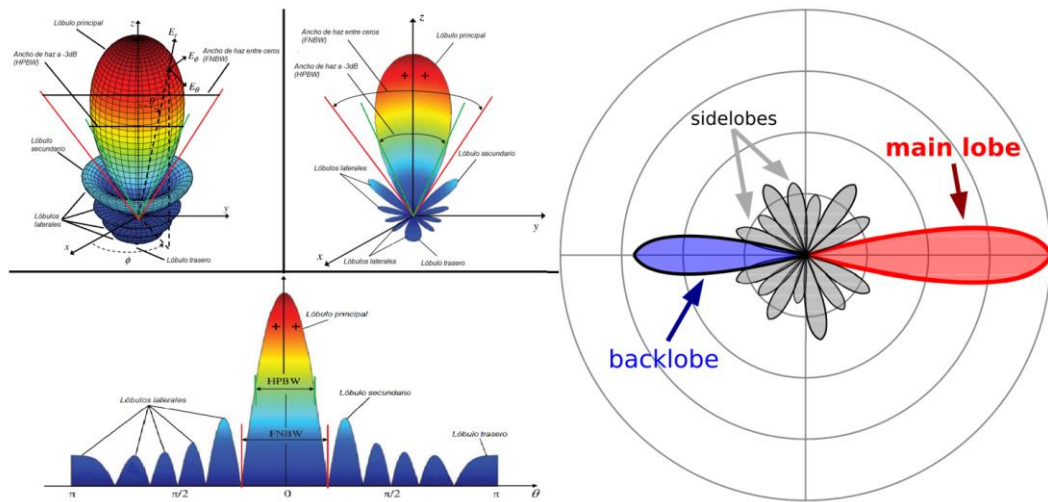


Figura 2-5: Diagrama de radiación 2D y 3D de una antena [9] [10].

Los factores previamente mencionados son de gran relevancia en el correcto desempeño de la antena, aunque carecen de funcionalidad si esta no presenta un diseño adecuado. Este es fundamental para su funcionamiento; tanto la forma como el tamaño pueden llegar a variar dependiendo la longitud de la onda que se quiera transmitir/recibir, además de que cada antena está diseñada para funcionar a una frecuencia específica, es decir, son resonantes a una frecuencia. Cuando trabajan en rangos alejados del predeterminado generalmente pierden eficiencia y bajan sus prestaciones [11].

Hay una gran variedad de antenas diseñadas en base a su propósito. Los tipos más comunes son:

- a) **Antenas de dipolo o antenas de media onda:** de los tipos más simples de antena, básicamente un dipolo es un alambre recto alimentado en el centro.

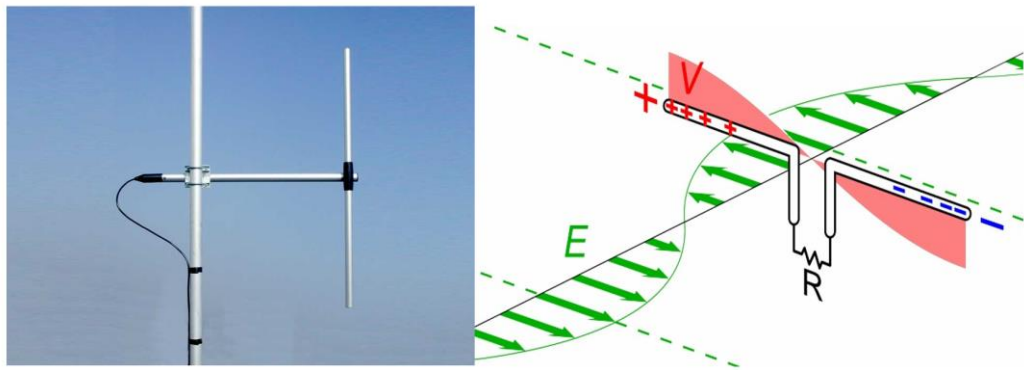


Figura 2-6: Antena de dipolo [12] [13].

- b) **Antenas de monopolo:** similares a las antenas tipo dipolo, con la diferencia de que solo presentan un hilo conductor porque la otra mitad se cambia por una tierra conductora, siendo esta un suelo real o simulado.

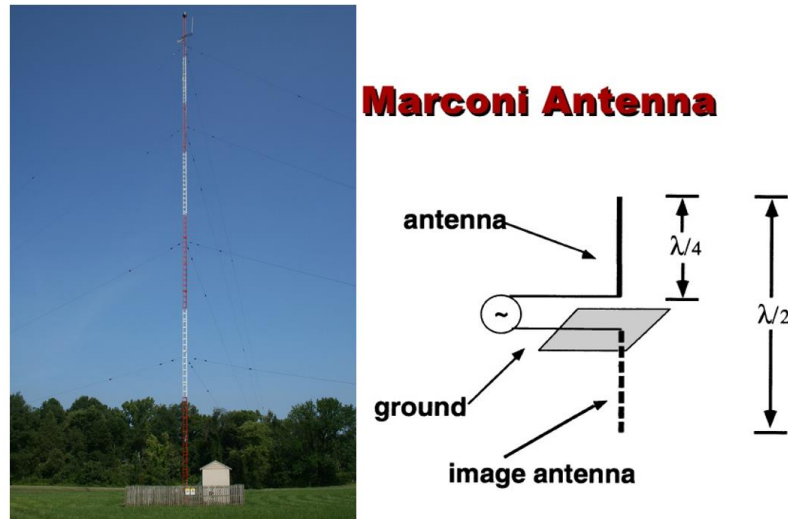


Figura 2-7: Antena monopolo (Torre Guardamar) [14] [15].

- c) **Antenas de Yagi:** antenas direccionales empleadas comúnmente en la televisión terrestre y en conexiones Wi-Fi de largo alcance. Consisten en el agrupamiento de varios dipolos donde únicamente uno de ellos es radiado mientras los demás ejercen de directores/reflectores de la señal.

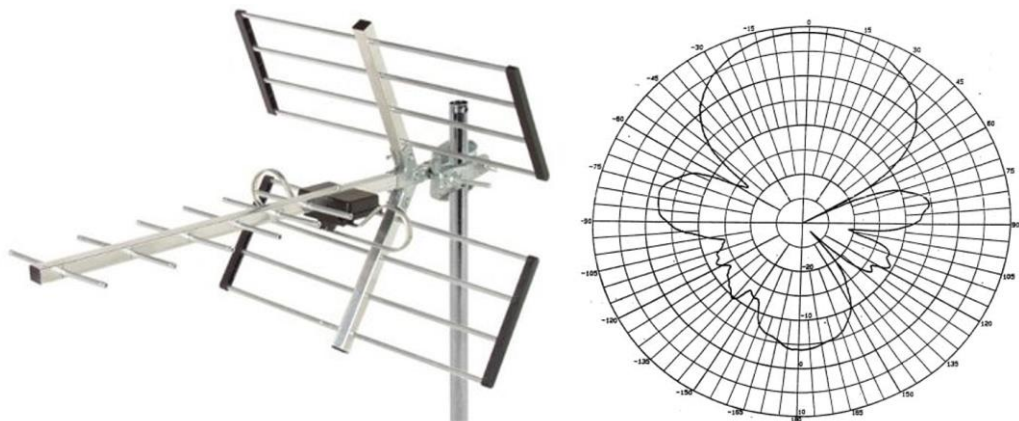


Figura 2-8: Antena Yagi [16].

El tamaño de la estructura que hace de soporte físico de las antenas, no significa necesariamente que estas sean más grandes o que emitan mayor potencia. Del mismo modo, tampoco está directamente relacionado el tamaño de las antenas con la potencia que irradian las mismas. Si lo que se quiere es que la antena tenga un mayor alcance, de forma que se dé cobertura a una determinada región geográfica, se tratará de emplazarlas en zonas de elevada altura consiguiendo así mayores alcances y menor atenuación debido a edificios urbanos. Los reglamentos y normas de seguridad para este tipo de emplazamientos, en cuanto a límite de altura, balizamiento, etc. están establecidos por diferentes organismos [17].

Las antenas abarcan una extensa variedad de funcionalidades, permitiendo la comunicación inalámbrica a distancias muy diversas que van desde pocos metros hasta miles de kilómetros. Entre ellas destacan:

- Telefonía móvil
- Televisión y radio
- Wi-Fi
- Satélites

Cabe destacar su función en el ámbito de la radiodetección, en donde es importante conocer la diferencia entre radar y antena, entendiéndose el primero como el equipo de detección y medición de distancias mediante ondas electromagnéticas, mientras que las antenas son las que llevan a cabo casi de forma simultánea la emisión de los haces de ondas y recepción de sus rebotes.

2.3 Array de antenas y beamforming

Un array de antenas es una antena conformada por un número de radiadores idénticos y equiespaciados entre sí, alimentados con amplitudes y fases adecuadas de manera que se obtiene un diagrama de radiación concreto. Cuando se emplea en transmisión permite conformar dicho diagrama para transmitir con mayor potencia en una dirección, reduciendo así las pérdidas por radiar hacia zonas no deseadas. Por el contrario, en recepción permite amplificar las señales procedentes de determinadas direcciones y atenuar aquellas que provienen de zonas que no interesan. Esto se logra gracias a la combinación de las señales provenientes de cada elemento que conforma el array de antenas.

Esto se resume en una notoria mejora respecto de la antena individual, ya que aumenta la ganancia en base al número de antenas que conformen el array (la ganancia final es igual a la de una antena multiplicada por $\log_2(N)$, siendo N igual al número de antenas), y permite medir el ángulo DOA (“Direction Of Arrival”) de la señal recibida, es decir, del objetivo, lo cual solo es posible empleando dos o más antenas.

Existen 3 tipos de arrays empleados según el objetivo:

- **Lineales (ULA):** nombre que recibe cuando se agrupan N antenas en línea recta.

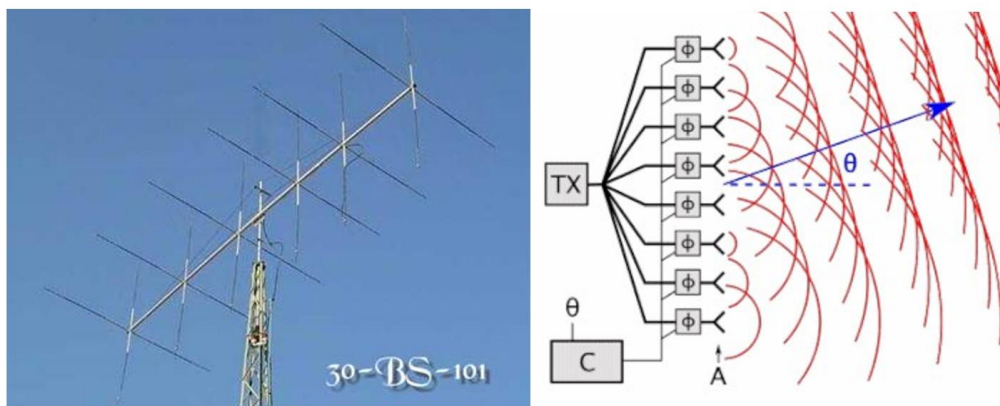


Figura 2-9: Array lineal [18] [19].

- **Planos:** los elementos se disponen en 2D sobre un plano permitiendo así una mayor directividad y control del diagrama. El haz principal se puede apuntar en cualquier dirección como si fuera un pincel. Los más comunes son los reticulares y los circulares.

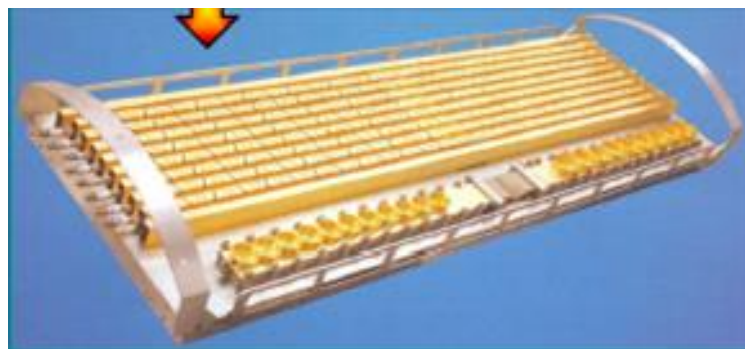


Figura 2-10: Array plano [18].

- **Conformados (cilíndrico, esférico):** los elementos se disponen sobre una superficie curva, véase un cilindro, cono, esfera u otras superficies.



Figura 2-11: Array cilíndrico [20].

Las ondas esféricas producidas por cada uno de los radiadores (antenas) se suman de forma coherente en determinadas direcciones y se cancelan en otras, siendo la amplitud total de la señal el producto de la onda por un factor de interferencia. Para entender esto mejor, se analizará los conceptos de interferencia constructiva y destructiva:

- **Interferencia constructiva:** la variación de caminos es el múltiplo entero de longitud de onda. La amplitud de la señal será igual a N veces el número de elementos.
- **Interferencia destructiva:** la diferencia de fase es un múltiplo impar de π y la amplitud de la señal será nula.

El campo radiado de un conjunto de antenas es la suma de los campos radiados por elementos individuales (campos parciales). Para conseguir diagramas de radiación muy directivos es necesario que los campos individuales interfieran coherentemente en la dirección deseada y de forma no coherente en el resto de puntos [21].

En la suma del campo total radiado se puede sacar como factor común el campo radiado por el elemento individual de referencia, resultando el producto de este por un sumatorio, el cual incluye efectos de posición y de alimentación de los distintos elementos que conforman el array. A este sumatorio se le denomina **factor de array**, que es una variable que se verá en profundidad en el apartado 3.1 (ver ecuación (3-3)). Se puede definir también como el producto del número de elementos, de sus respectivas señales de entrada (magnitud y fase) y de la disposición geométrica de los mismos.

Puesto que la pretensión final es obtener un diagrama de radiación del array determinado, se puede resumir en 5 los métodos para llevarlo a cabo [21]:

1. Disposición geométrica (linear, rectangular, circular, etc.)
2. Separación relativa de los elementos
3. La amplitud de excitación individual
4. Fase de excitación individual
5. Diagrama de radiación individual

2.3.1 Beamforming

La conformación de haces o “Beamforming” es una tecnología empleada en antenas avanzadas para enfocar una señal inalámbrica en una dirección específica, en vez de transmitir a un área amplia. Es una

técnica esencial para los sistemas con múltiples sensores, incluidos sistemas de comunicaciones inalámbricas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) tales como 5G, LTE y WLAN. Se utiliza frecuentemente en aplicaciones de radar, sonar, imágenes médicas y audio. Se emplea para dirigir señales transmitidas desde un array de sensores en una dirección específica, mejorando la detección de forma que se suman las señales de manera coherente a través de los elementos de los arrays.

Existen dos modelos referentes a la metodología Beamforming, uno analógico y otro digital:

- **Analogue Beamforming (ABF):** se basa en que las señales recibidas de cada elemento de antena de un array se suman en fase y amplitud ya en la antena para procesar una señal común en diferentes receptores centralizados. Estos receptores amplifican la señal y la convierten a una frecuencia intermedia o inmediatamente en la banda base. Los convertidores analógico-digitales (ADC) digitalizan la señal de frecuencia intermedia (FI) o de vídeo.

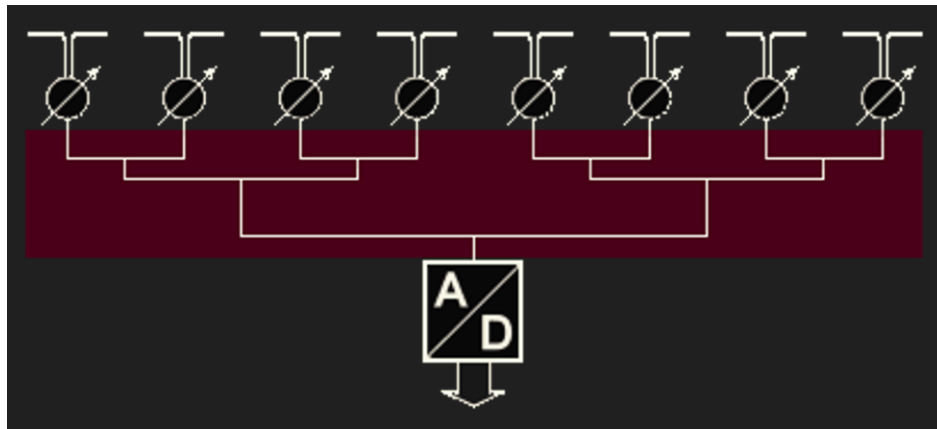


Figura 2-12: Conformación analógica del diagrama de la antena [22].

- **Digital Beamforming (DBF):** arquitectura de receptores en la que se conecta uno por cada elemento de antena o a pequeños grupos de antenas del array en fase (“phased array”). La conversión a un formato digital también se realiza de forma individual para cada elemento y la suma se hace digitalmente en un procesador especial. El ruido inherente y la distorsión de la señal en cada receptor individual no están correlacionados en la suma. Con esta configuración se puede obtener varios haces principales independientes apuntando en diferentes direcciones para cada tiempo de recepción. Entre las ventajas de este modelo de conformación destacan:

- Una mejor dinámica de los receptores
- Cambios de patrón de recepción rápidos
- Un control más rápido y mejor de las amplitudes y posiciones de fase de la señal

Si se emplean conexiones inalámbricas a Internet para el control y la alimentación del reloj de los módulos de antena, se habla de formación de haces digital inalámbrica (Wireless Digital Beamforming, WDBF). Con esto se consigue la posibilidad de distribuir los elementos de la antena para formar un sistema de radar distribuido.

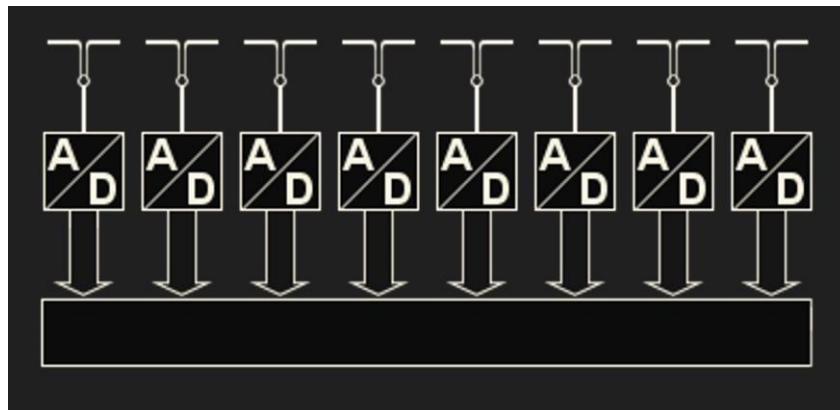


Figura 2-13: Conformación digital del diagrama de la antena [22].

Esta posibilidad de organizar diferentes patrones de antena de forma simultánea solo es posible con la tecnología de un receptor digital, ya que solo las señales digitales pueden copiarse tantas veces como se desee sin pérdidas. En la práctica, la señal recibida se convierte en una FI y se digitaliza inmediatamente. En cambio, con una FI de 75 MHz, el convertidor analógico-digital requeriría de una frecuencia de muestreo de 100 MHz [22].

2.4 Problemática y solución planteada

Uno de los problemas que acarrearán el empleo de array de antenas es la correlación coherente de la información que transmiten. Cada uno de los elementos presenta un desfase que puede ser igual o distinto de 0, dependiendo de la posición del blanco, pero siempre coherente entre ellos; cuando están calibrados correctamente, el array presenta un diagrama de radiación bien definido. No obstante, cuando ocurre el caso contrario el sistema no trabaja de la manera deseada, y se pueden llegar a dar dos tipos de problemas.

Como ya se ha comentado, cada elemento presenta un desfase. Cuando la diferencia entre desfases no es coherente, lo que ocurre es que el diagrama de radiación es totalmente aleatorio y sin ningún patrón definido. De esta manera resulta imposible detectar cualquier tipo de blanco, y las mejoras en las prestaciones buscadas al utilizar un array de antenas desaparecerían.

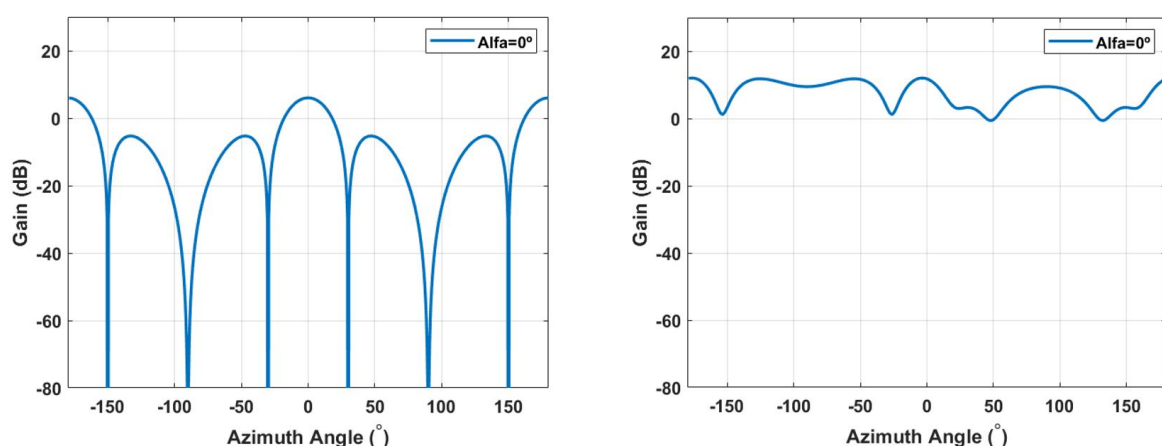


Figura 2-14: Sistema calibrado (izquierda) y sin calibrar con error considerable (derecha).

En la Figura 2-14 se observa el diagrama de radiación bien definido (izquierda) cuando el array apunta a una dirección perpendicular a la del plano que forma. No obstante, en la imagen de la derecha se observa como ya no se diferencian correctamente los lóbulos debido a que las antenas no se encuentran calibradas y la señal recibida de la dirección perpendicular es captada por el array con

desfases aleatorios, de modo que el error generado es tan grande que resultaría imposible hacer uso del sistema.

Ahora, cuando la diferencia entre desfases es pequeña (del orden de decimales en grados), el patrón de radiación obtenido es similar al deseado, aunque con un ligero desplazamiento de los lóbulos, en particular del lóbulo principal. Esto se traduce en que cuando se reciben los rebotes procedentes del blanco, el sistema interpreta una dirección o posición no exacta, parecida, pero carente de precisión.

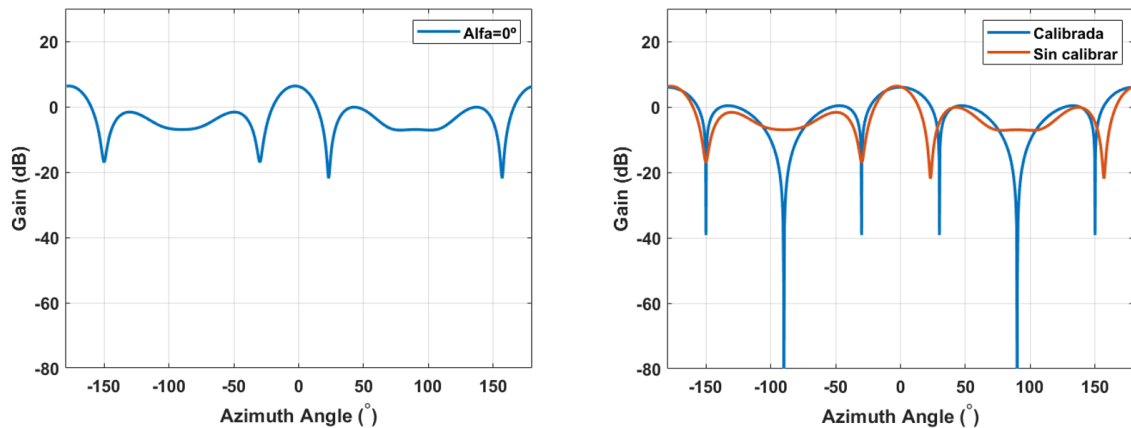


Figura 2-15: Ejemplo error pequeño. Sistema sin calibrar (izquierda) y comparación con el calibrado.

En este caso, el sistema tendría que tener el lóbulo principal apuntando a 0°; como el error que presenta es pequeño este se encuentra desplazado, aunque todavía se puede diferenciar el patrón de radiación. El array sería capaz de detectar blancos, pero no sería de utilidad ya que los posicionaría de forma incorrecta.

Los errores que presenta un sistema sin calibrar se deben a un número elevado de factores, ya sea la longitud de los cables que van desde la antena hasta el sistema receptor propiamente dicho, conexiones dispuestas incorrectamente, componentes desgastados, etc. La solución a este problema sería la implementación de un algoritmo que permite calibrar digitalmente cada elemento del array de forma individual, consiguiendo que la señal recibida y procesada de cada uno sea precisa, dando lugar a un resultado conjunto coherente y acorde a lo deseado.

2.5 Aplicación a radar pasivo

El objetivo principal de este trabajo consiste en realizar una calibración adecuada de los diferentes elementos de un array de antenas para poder realizar técnicas de beamforming independientemente de la frecuencia utilizada por el sistema. Sin embargo, para poder validar adecuadamente la calibración realizada, necesitamos recurrir a un sistema de radiocomunicación específico. En nuestro caso, haremos uso de las señales TDT disponibles en nuestro entorno y que nos permiten realizar tareas de radar pasivo.

El principio de funcionamiento de los radares pasivos consiste en tener la capacidad de detectar objetivos de interés sin la necesidad de transmitir ninguna onda electromagnética, manteniéndose ocultos respecto de otros radares o sensores de detección. Para ello, es necesario una antena receptora y un transmisor, comúnmente denominado Iluminador de Oportunidad (IO).

En el ámbito de los radares, los más conocidos son los activos monoestáticos, en donde el transmisor y el receptor se encuentran en el mismo punto. Sin embargo, en el radar pasivo se usa la tecnología biestática, que consiste en que tanto el receptor como el transmisor están separados una cierta distancia. Es por ello que en este segundo tipo de sistemas es posible utilizar varios transmisores y varios receptores.

Con la tecnología biestática, cabe destacar que la antena receptora, por sí sola, no es capaz de definir la posición del blanco, aunque sí la distancia biestática a la que se encuentra. Para ello, se analizará la geometría de los emplazamientos biestáticos.

2.5.1 Geometría biestática

El método empleado para detectar blancos se basa en comparar dos distancias: la primera viene definida por la formada entre el transmisor y el receptor, y la segunda por la que hay desde el transmisor hasta el blanco y, al rebotar en éste, hasta el receptor. Para ello, se hace uso de la geometría biestática, que no es más que la disposición entre el transmisor (Tx), el receptor (Rx) y el blanco.

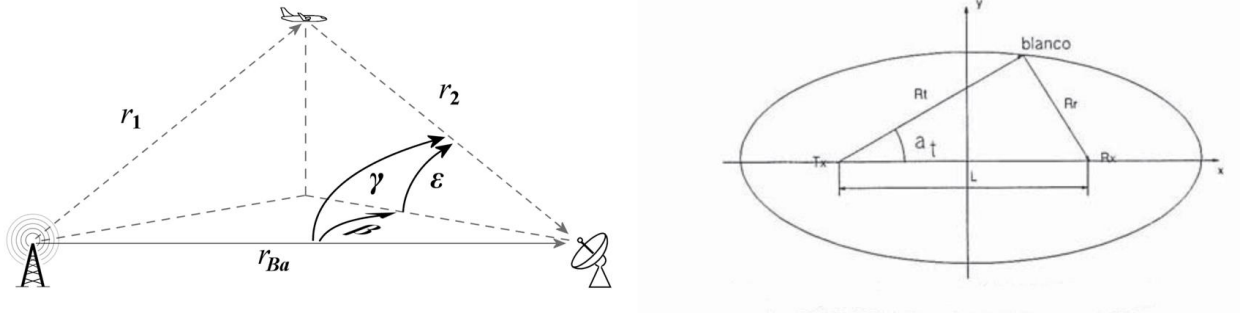


Figura 2-16: Funcionamiento radar pasivo biestático [23] [24].

Se puede observar cómo se genera una elipse, en donde el blanco se puede encontrar en cualquier punto de la misma. En base a la Figura 2-16 (derecha), se puede determinar la distancia entre el transmisor, el blanco y el receptor; sumando R_t y R_r obtenemos una distancia total a la que denominaremos distancia biestática (R_b), que varía con cada blanco:

$$R_b = R_t + R_r \quad (2-5)$$

La parte complicada de estos sistemas es determinar R_r , para lo cual se necesita conocer la distancia que hay entre la antena transmisora y la receptora (L), el tiempo que tarda en recibir el receptor el rebote del blanco (lo que se traduce al final en la distancia biestática), y el ángulo que se forma entre la línea receptor-blanco y receptor-transmisor (θ_r).

Para que todo lo anterior tenga sentido, se necesita conocer la posición del IO y la del receptor. Con estos datos, finalmente se puede llegar a calcular la distancia receptor-blanco (R_r):

$$R_r = \frac{R_b^2 - L^2}{2(R_b - L \cos \theta_r)} \quad (2-6)$$

Para aplicar esta expresión es necesario determinar el ángulo θ_r . Es en este punto donde entra en funcionamiento las diferentes técnicas de beamforming y, por consiguiente, la necesidad de calibración del array, ya que este ángulo solo es posible obtenerlo cuando el array se encuentra bien calibrado y es capaz de apuntar de forma precisa al blanco; si el sistema solo conociese R_b situaría el blanco en cualquier punto del elipsoide.

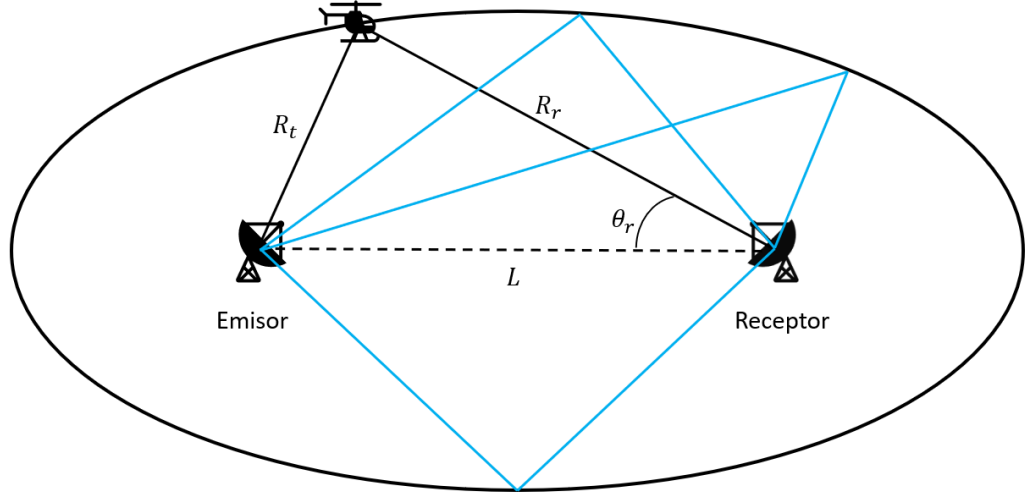


Figura 2-17: Esquema posicionamiento del blanco en radar biestático.

No está de más matizar que en realidad no se trata de una elipse, sino de un elipsoide dado que el escenario real es un escenario tridimensional. No obstante, por simplificación de cálculos y suponiendo un error despreciable, se ha optado por emplear la representación bidimensional.

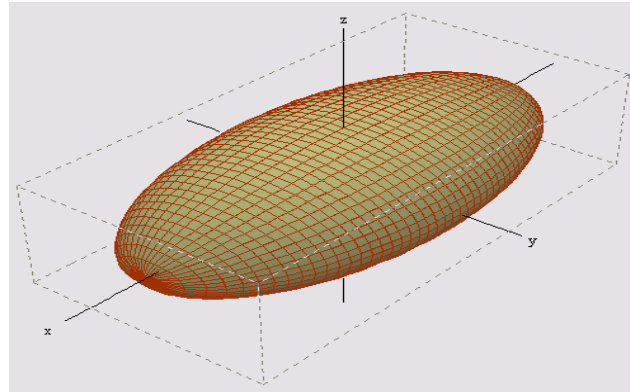


Figura 2-18: Representación tridimensional de un elipsoide [25].

Dentro de la geometría biestática, el ángulo que se forma entre la tangente de la elipse (donde se posiciona el blanco) y la mediatriz del ángulo biestático (β) siempre será ortogonal, siendo este último el formado entre las rectas R_t y R_r . Simplemente se trata de una propiedad trigonométrica propia de esta representación, cuyo uso es de utilidad en la determinación de otros factores.

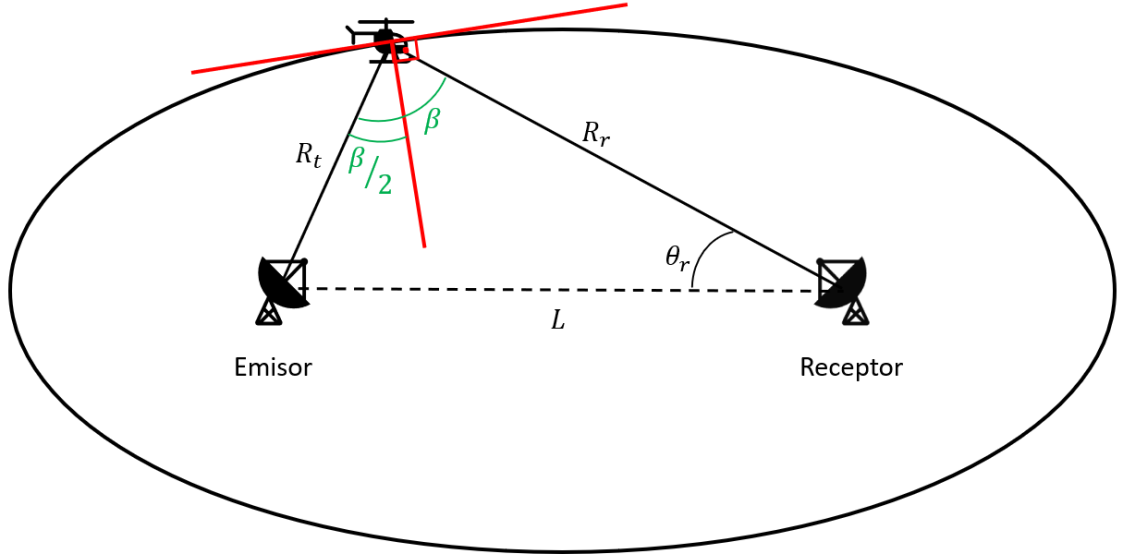


Figura 2-19: Representación del ángulo biestático y la ortogonalidad entre su bisectriz y la tangente a la elipse en el blanco.

2.5.2 Alcance radar biestático

Como objetivo de determinar la cobertura máxima de detección se establece la ecuación radar ajustada a sistemas biestáticos, en donde se obtiene la distancia biestática máxima para unas condiciones de trabajo determinadas.

Cabe mencionar que hay determinados factores que no se podrían conocer con exactitud, como es la sección radar eficaz (RCS) del blanco, la cual no depende del tipo de radar a emplear; es una propiedad intrínseca del blanco. No obstante, esta ecuación se emplea más como ayuda o justificación del funcionamiento del radar:

$$R_b = R = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma_B F_T^2 F_R^2}{(4\pi)^3 K T_S B_n \left(\frac{S}{N}\right)_{min} L_T L_R}} \quad (2-7)$$

En donde:

- P_T es la potencia del transmisor (IO).
- G_T y G_R son las ganancias de la antena transmisora y receptora, respectivamente.
- λ es la longitud de onda.
- σ_B es la sección recta o RCS del blanco.
- F_T y F_R son los factores de propagación transmisor-blanco y blanco-receptor.
- K es la constante de Boltzmann.
- T_S es la temperatura del ruido del sistema receptor.
- B_n es el ancho de banda de ruido.
- $\left(\frac{S}{N}\right)_{min}$ es la relación de potencia de señal a ruido mínima requerida por el sistema para cumplir con los requisitos de recepción.
- L_T y L_R son las pérdidas que se pueden encontrar en el transmisor y el receptor.

En estos sistemas los blancos suelen estar en movimiento, por lo que sería necesario comparar diferentes señales obtenidas mediante una correlación cruzada Doppler para conseguir determinar el movimiento y obtener la velocidad del contacto en cuestión [26].

2.5.3 Iluminador de Oportunidad (IO)

Los IO son lo que caracteriza estos radares, ya que sin ellos sería imposible que fuese un sistema de detección pasiva. Son los transmisores propiamente dichos y es de vital importancia saber cuáles elegir, ya que determinan el alcance y la potencia del sistema. Los más usados son los siguientes:

- Señal FM radio.** Trabaja en la banda VHF y los transmisores se encuentran en terrenos elevados.
- Retransmisión digital de audio (DAB).** Sustituto de la radio analógica y con mejores características que la FM, aunque menor densidad de potencia.
- Señal de televisión analógica.** Están siendo sustituidas por las DVB, aunque hay países que emplean ambas.
- Retransmisión digital de vídeo (DVB).** Las más empleadas como IO; gran ancho de banda. Este tipo de iluminador de oportunidad será el empleado para validar la calibración del array de antenas.
- Estaciones de telefonía móvil**

Los primeros iluminadores de transmisión que se utilizaron fueron las emisiones de la radio analógica comercial en FM. No obstante, en función del tipo de información que transmitía la señal (voz, música, etc.) se conseguían mejorar o empeorar las prestaciones. Esto se debía a que, al ser una modulación analógica, el ancho de banda dependía del contenido emitido y por tanto las características del radar pasivo variaban. A continuación, se mostrará una tabla con las diferentes características de las señales (algunas de ellas son parámetros establecidos en España):

	Densidad de potencia	Frecuencia	Ancho de banda	Resolución
Señal FM radio	-54dBW/100 km	87,5-108 MHz	150 kHz	1500 m
DAB	-71dBW/200 km	30 – 3000 MHz Banda III (174-240 MHz) Banda L (1452-1492 MHz)	1500 kHz	97,6 m
Señal de televisión analógica	-	VHF (47-230 MHz) UHF (470-862 MHz)	7000 kHz	30 m
DVB	-	DVB-T o TDT (550-678 MHz) DVB-C (414-846 MHz)	8000 kHz	25 m
Estaciones de telefonía móvil	Tecnología 2G, 3G, 4G y 5G (no se emplea en gran medida como IO)			

Tabla 2: Comparativa entre diferentes IO [27] [28] [29] [30] [31] [32].

2.6 Comportamiento de la luz

En el año 1814, Auguste Jean Fresnel demostró numerosos fenómenos relacionados con la luz polarizada, tanto de forma teórica como experimental. Entre ellos, observó que dos rayos polarizados que se encuentran en un mismo plano interfieren entre sí, pero no lo hacen cuando presentan la misma polarización y se disponen de forma perpendicular. Llegó a la conclusión de que en un rayo polarizado ocurre algo perpendicularmente a la dirección de propagación.

Llevó a cabo una analogía en el ámbito del sonido, definiendo que el rayo reflejado es perpendicular a la onda reflejada, así como el rayo incidente respecto de la onda incidente. De ello se deduce que para evitar lóbulos considerables y que la suma entre las fuentes individuales tenga coherencia, la separación

máxima entre elementos ha de ser menor que la mitad de la longitud de onda de la frecuencia más alta que deben de reproducir [33].

2.7 Fuentes sonoras irradiadas por fuentes múltiples de sonido

En 1992, el doctor Christian Heil presentó el estudio “Fuentes sonoras irradiadas por fuentes múltiples de sonido” en el Audio Engineering Society.

Heil pensó que, si se tiraba una piedra al agua, generaría una onda circular progresiva, y si se tiraban varias piedras, daría lugar a una red de interferencias; la superficie del agua se asemejaría a un campo sonoro caótico. No obstante, si todas esas piedras se meten dentro de un saco y se lanzan al agua, se puede observar una onda circular progresiva.

Con esto desarrolló la tecnología WST (Wavefront Sculpture Technology) cuyo objetivo era crear un sistema con varios altavoces y hacerlo funcionar como una sola fuente sonora capaz de reproducir una onda continua y manejable. En el desarrollo de su teoría observó que el ARF o Factor de Radiación Activo tenía que ser mayor que el 80% del área total del sistema completo, incluida la separación entre elementos. En resumen, la radiación dependerá de la proporción entre la longitud del array y la longitud de onda de la frecuencia reproducida.

Para una frecuencia fija, si aumentamos la longitud del array, el lóbulo principal se estrecha y aparecen lóbulos secundarios. Asimismo, para un tamaño de array fijo, si se aumenta la frecuencia, el lóbulo principal se estrecha y aparecen lóbulos secundarios [33].

2.8 Estudios y trabajos de actualidad

Son muchos los trabajos que se realizan actualmente sobre el beamforming y la calibración de arrays, algunos centrados en el ámbito electromagnético y otros en el sonoro.

La tesis doctoral de Fernando Ibáñez Urzaiz, titulada “Contribución a la integración de cabezales de radiofrecuencia y estructuras radiantes para sistemas radar de exploración superficial con configuración de array digital”, la cual presenta trabajos enmarcados en un proyecto de investigación (TEC2014-53815-R) denominado “Array digital en recepción para radares FMCW de vigilancia superficial (RAD-DAR). Dicha tesis se centra en desarrollar un radar ubicuo de vigilancia superficial, con una arquitectura de array digital en recepción, formado por N antenas receptoras con un receptor asociado a cada una para llevar señales a banda base y realizar así su digitalización y procesado. Además, resalta como factor determinante la estimación de la dirección de llegada de las señales, mencionando la técnica monopulso como una de las más usadas. También menciona que se debe tener en cuenta las tolerancias de los componentes, acoplamientos entre antenas y otros desequilibrios para llevar a cabo una correcta calibración del array, lo cual también se incluye en el array empleado en este TFG [34].

Otro trabajo es el “Beamforming y estimación de dirección de llegada”, trabajo realizado por Miguel Ángel Lagunas [35]. Este se divide en 4 capítulos, siendo el tercero “Estimación del ángulo de llegada” en el que habla sobre técnicas basadas en el manejo del vector de enfoque, además de mencionar los métodos MLM y NMLM de estimación del nivel de potencia y de localización [36].

El trabajo realizado por Jorge Machín Mindán en su TFG titulado “Beamforming, localización de fuentes sonoras mediante arrays de micrófonos” se centra en localizar fuentes acústicas mediante algoritmos beamforming y calibración de nivel y fase del array, y su justificación mediante simulaciones en Matlab [37].

2.9 Programas de análisis

2.9.1 MATLAB

MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico que permite llevar a cabo diferentes cálculos y observar simulaciones que determinan la validez y coherencia de un código; hace

uso de un lenguaje basado en matrices para una expresión más natural de las matemáticas computacionales.

Combina un entorno de perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño, con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente. Además, permite generar automáticamente programas para reproducir o automatizar diferentes funciones o trabajos. Su uso se extiende en una extensa variedad de ámbitos y la instalación se puede realizar en ordenadores corrientes de actualidad; el aprendizaje resulta rápido e intuitivo, por lo que su manejo no es complicado. Con MATLAB es posible (de forma resumida):

- Analizar datos
- Desarrollar algoritmos
- Crear modelos y aplicaciones

Es utilizada por millones de ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos, siendo MathWorks la empresa que ha desarrollado el programa y continúa con sus actualizaciones [38].

Esta herramienta software será utilizada principalmente para detectar la fase recibida en cada una de las antenas del array, calibrar la señal y realizar las tareas de beamforming en radar pasivo.

2.9.2 GNU RADIO (SDR)

SDR (Software Defined Radio) o Radio Definida por Software es una tecnología flexible que combina por un lado hardware (radio frecuencia) y por otro software (procesado en banda base). De esta forma se desarrollan sistemas con la capacidad de trabajar con un amplio rango de frecuencias y modulaciones.

En los años 1980 y 1990 se introdujo la posibilidad de controlar los equipos de radio desde un ordenador, añadiendo a ambos equipos puertos de comunicación o interfaces para la conexión. De esta manera, fue posible gestionar desde el ordenador numerosas funciones del equipo de radio, mejorando lo que se podía hacer desde los controles del propio equipo. Además, se produjo el desarrollo de los chips DSP o "Procesadores Digitales de Señal" en los equipos radio, los cuales permiten mediante técnicas digitales realizar filtros de paso de banda y de supresión de ruidos, entre otras posibilidades, siendo muy eficaces y mejor que los realizados tradicionalmente con circuitos analógicos.

Con el desarrollo de esta tecnología se creó un nuevo concepto, los equipos de radio desarrollados por programa o "radios software", en siglas SDR, en los que la parte hardware (circuitaría) es mínima, y la mayor parte de las funciones de un equipo de radio se controlan por software en un ordenador o de otro tipo, dotado de tarjeta de sonido (requisito necesario). Cabe destacar que estos sistemas presentan conectividad con MATLAB [39].

Por otro lado, GNU Radio una herramienta de desarrollo con licencia tipo GPL (General Public License) o de código abierto que, mediante bloques de procesamiento de señales, permite la construcción y simulación de sistemas de comunicaciones, tanto a nivel simulación como a nivel implementación mediante radios programables. Está conformado por un conjunto de archivos y aplicaciones agrupadas en librerías que permiten gestionar dichas señales radio mediante su procesamiento digital. Haciendo uso de esas librerías, se lleva a cabo el desarrollo de sistemas radio definidos por software si se conecta el PC/Workstation a un SDR, aunque también se puede trabajar con la tarjeta de audio, por ejemplo. GNU Radio corre sobre sistemas operativos GNU/Linux como Ubuntu, aunque también se puede implementar en otros.

Es ampliamente utilizado en entornos aficionados, académicos y comerciales para apoyar tanto la investigación de comunicaciones inalámbricas como los sistemas de radio del mundo real.

Esta herramienta software junto con los dispositivos hardware que se mencionarán en capítulos posteriores serán utilizados en este trabajo para transmitir la señal que actuará como baliza y para recibir

la señal conjunta de TDT y de la baliza, digitalizarla y guardar la información en ficheros para su posterior procesado.

3 BEAMFORMING

En este capítulo se analizarán las principales técnicas de beamforming y se presentará la necesidad de calibración del array de antenas para que la suma de los diferentes elementos se realice de forma coherente. Como se ha comentado anteriormente, existen diferentes tipos de configuración de arrays, aunque en este trabajo nos centraremos en un array lineal. La información presentada está relacionada con el documento elaborado por Mateusz Malanowski [40].

3.1 ULA (Uniform Linear Array o Array Lineal Uniforme)

El array lineal uniforme ULA consiste de N antenas dispuestas de forma lineal y equidistantes sobre un determinado eje. Independientemente del número de antenas (siendo este siempre igual o mayor que dos) recibe el nombre de array lineal uniforme, sus siglas ULA en inglés. Como se comentará posteriormente, en este trabajo se utilizará un array de 4 elementos.

Se trata de uno de los sistemas más simples de configuración de arrays, además de ser de los más usados debido a sus múltiples aplicaciones. Son varios los factores que determinan su distribución espacial y su funcionamiento, entre los que destaca el espacio entre elementos (d , y que debe ser igual para todos los elementos) que se suele expresar en base a la longitud de onda e influye en gran medida en las propiedades del array. También se tiene en cuenta el ángulo que forma la dirección de la onda con la normal al array (ϕ).

Cuando la onda incide en el array con un $\phi = 0$, la fase en cada elemento del array (antena) es la misma, ya que la onda llega a cada elemento al mismo tiempo. Si el ángulo resulta ser distinto de 0, aparece un desplazamiento en fase entre las señales recibidas. Este desplazamiento de fase puede ser calculado considerando la geometría del array que, al tratarse de una línea recta, permite que se pueda resolver mediante trigonometría.

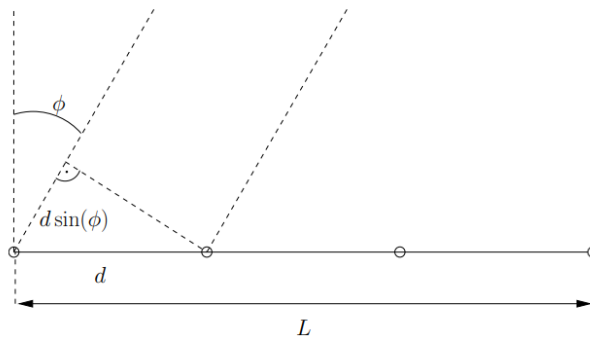


Figura 3-1: Geometría de un array lineal de 4 elementos (antenas) [40].

Como se puede observar en la Figura 3-1, la distancia que difiere en la recepción de la onda entre dos elementos separados una distancia d se calcula mediante la expresión $d \sin(\phi)$. Esta distancia determina que el desplazamiento en fase es igual a $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\phi)$, de forma que se puede calcular el desfase que hay entre el elemento n y el primero como:

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

Los desplazamientos en fase se pueden usar para calcular el vector de dirección $a(\phi) = [a_1(\phi), a_2(\phi), \dots, a_N(\phi)]'$. El apóstrofe ' indica que se trata de la traspuesta de esa matriz (vector columna):

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

El vector de dirección representa los desplazamientos en fase que una onda plana experimenta para una dirección dada (ϕ) en cada una de las antenas.

Inicialmente, se considera que los elementos del array radian de forma isotrópica, de modo que el diagrama de radiación depende exclusivamente de la geometría y del coeficiente beamforming (formación de haces) empleado. Este último concepto se desarrolla mediante el sumatorio de las diferentes señales de los elementos, a los cuales se les aplican determinados pesos (w_n). Considerando esto, se puede calcular el patrón de array o **factor de array**:

$$F(\phi, w) = \sum_{n=1}^N w_n^* \cdot a_n(\phi) = w^H \cdot a(\phi) \quad (3-3)$$

En esta expresión, $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]'$ es un vector de los diferentes coeficientes beamforming complejos, y el exponente H determina la traspuesta hermitiana o conjugada traspuesta. En la práctica, las antenas que conforman el array tendrán un determinado diagrama de radiación y por consiguiente el diagrama de radiación del array (factor de array) va multiplicado por el diagrama individual de cada antena.

En la forma más simplificada, las amplitudes de los coeficientes $|w_n|$ son iguales y de valor 1 (la onda se emitiría/recibiría de la dirección perpendicular, es decir, con $\phi = 0$). Para que la onda tenga una determinada dirección, se debe implementar un desfase a los diferentes coeficientes que se calcula dependiendo de la dirección de procedencia de la onda ($\phi_0 \neq 0$). En este caso, la amplitud de la onda entrante se suma de forma coherente, y por lo tanto se maximiza. El vector de coeficientes beamforming se calcula según la siguiente expresión:

$$w_n = e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d (n-1) \sin(\phi_0)} \quad (3-4)$$

Como se ha mencionado anteriormente, para un $\phi_0 = 0$ la onda llega a la vez a todos los elementos del array, de forma que $w_n = 1$ para $n = 1, \dots, N$. El diagrama de radiación del array puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$F(\phi, w) = \sum_{n=1}^N w_n^* \cdot a_n(\phi) = \sum_{n=1}^N e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d (n-1) \sin(\phi_0)} \quad (3-5)$$

Mediante una serie de cálculos se puede llegar a expresar el diagrama de radiación de la siguiente forma:

$$F(\phi, w) = \frac{\text{sen}(N \frac{\pi d}{\lambda} \text{sen}(\phi))}{\text{sen}(\frac{\pi d}{\lambda} \text{sen}(\phi))} e^{j \frac{\pi}{\lambda} d (N-1)} \quad (3-6)$$

Cuyo valor absoluto será:

$$|F(\phi, w)| = \left| \frac{\text{sen}(N \cdot \frac{\pi d}{\lambda} \text{sen}(\phi))}{\text{sen}(\frac{\pi d}{\lambda} \text{sen}(\phi))} \right| \quad (3-7)$$

Para ángulos de ϕ_0 que tienden a 0, el valor del diagrama $|F(\phi, w)|$ tenderá a valer N; tiene sentido ya que todas las señales de los N elementos son sumadas coherentemente.

Para representar esto de una forma más visual, se van a exponer los diferentes diagramas de radiación para diferentes números de elementos, todos referentes a un sistema ULA. Aquí se observará como cambiando el número de elementos y manteniendo la misma separación entre ellos, los haces cada vez son más estrechos (más directivos).

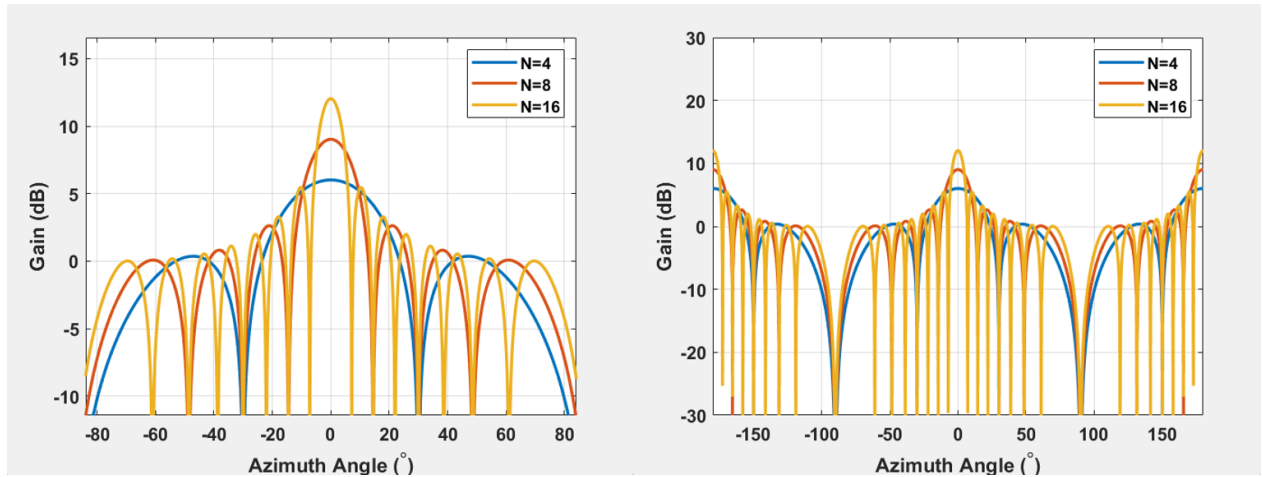


Figura 3-2: Diagrama de radiación de array de N elementos (derecha completo e izquierda ampliado).

Se observa que los haces se hacen más estrechos, es decir, son más directivos. Además, a medida que aumenta N, aumenta la ganancia del conjunto. Sin embargo, el nivel en dB entre el lóbulo principal y el lóbulo secundario se mantiene.

Ahora se representarán otros diagramas que aparentemente son iguales, y en los que se mantiene intacto el número de elementos del array. Lo que se varía únicamente es la distancia de separación entre ellos ($d = 0.25\lambda, 0.5\lambda, 1.0\lambda$). Esto lo podemos ver en la Figura 3-3; cuando aumenta el espacio entre elementos, los haces se hacen cada vez más estrechos, hasta cierto límite, en el que aparecen los llamados lóbulos reticulados (“grating lobes”), que tienen el mismo nivel que los lóbulos principales y son visibles a partir de $d = 1.0\lambda$ para ángulos de $\pm 90^\circ$. Mencionar que este tipo de distribución debe ser evitada ya que no sería posible identificar correctamente la dirección de los blancos.

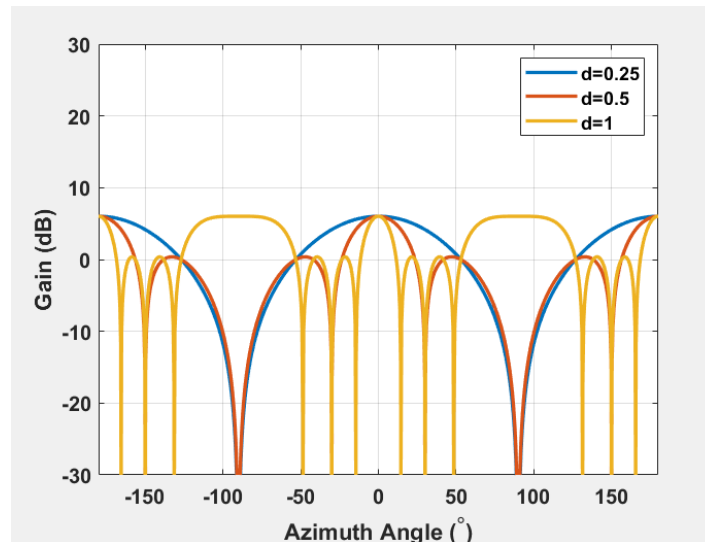


Figura 3-3: Diagramas de radiación variando la separación entre elementos (para $N=4$).

Estos haces se originan cuando la distancia de separación de los elementos es muy alta en comparación con la longitud de onda, y es debido a un efecto de solapamiento perteneciente a la teoría de muestreo de Nyquist. Para evitar este efecto, la distancia máxima de separación no puede exceder de 0.5λ .

En cuanto al apuntamiento de los haces, hay que tener en cuenta que el diagrama de radiación no se comporta como un sistema simétrico, en el que el haz principal se puede dirigir hacia cualquier dirección sin que exista ninguna variación en la distribución de haces. La realidad es que cuando la onda incide con un ángulo distinto de 0, aparecen picos en una dirección igual a $180 - \phi$. Se hará una comprobación con 0° , 30° y 60° , en donde se observará que a 0° no hay variaciones ni aparecen picos, a 30° aparecerán haces en 150° , y a 60° habrá picos en 120° .

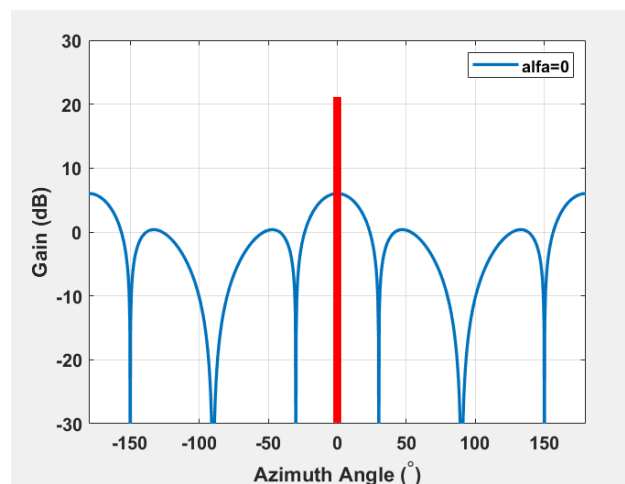


Figura 3-4: Diagrama de radiación para $N=4$ y blanco situado a 0° .

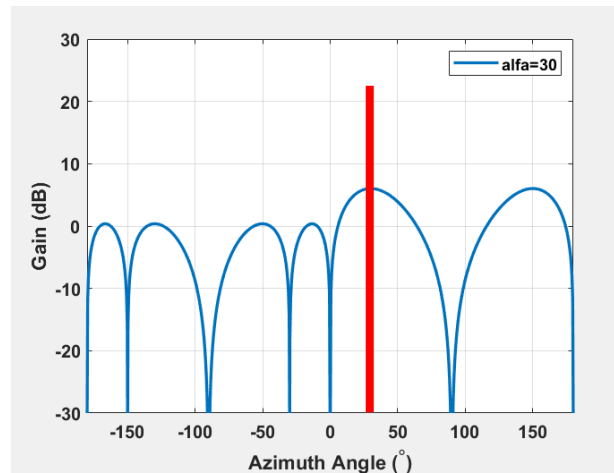


Figura 3-5: Diagrama de radiación para $N=4$ y blanco situado a 30° .

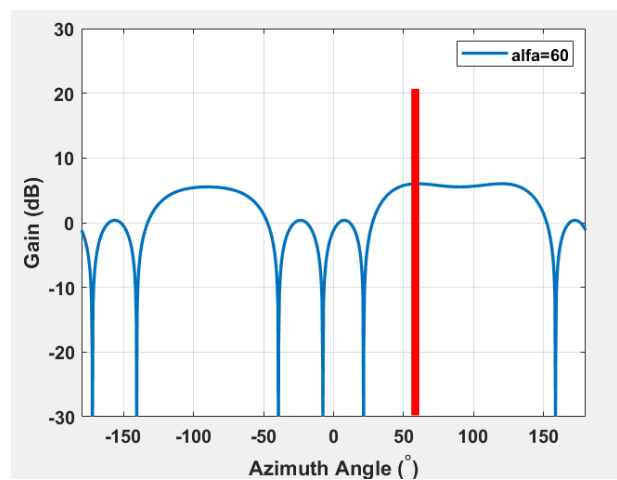


Figura 3-6: Diagrama de radiación para $N=4$ y blanco situado a 60° .

Para ángulos mayores se observa como aumenta considerablemente el ancho del haz principal, fusionándose este con su “reflejo” cuando se alcanzan ángulos de $\pm 90^\circ$. De esta forma se observa como las características del diagrama de radiación de un ULA dependen del ángulo de apuntamiento de los haces, especialmente el ancho de haz, uno de los principales factores que delimitan la detección de blancos (a mayor ancho de haz, menos precisión y mayor probabilidad de perder contactos).

Los ULA suelen usarse para sectores de observación comprendidos entre 60° - 120° (siendo 90° la dirección perpendicular al eje sobre el que se distribuyen los elementos), y el haz reflejado suele atenuarse empleando elementos direccionales que miran en la dirección deseada, además de usar material absorbente de en la parte de atrás del array en algunos casos.

3.1.1 Estrechamiento/reducción de array o array tapering

Se ha observado que cambiando algunas variables del array se pueden obtener diferentes diagramas de radiación. No obstante, hay que tener en cuenta que los haces laterales siguen presentes y generan un impacto negativo en el funcionamiento del mismo. Para paliar sus efectos, se emplean técnicas de estrechamiento o de reducción, denominadas funciones “tapering”. Esto significa que las amplitudes correspondientes a elementos individuales no son iguales.

Con el objetivo de reducir las amplitudes en ambos lados del lóbulo principal se emplean ciertas funciones de ventana, lo cual es un método similar al usado en análisis espectral; una ventana rectangular en el dominio temporal da lugar a grandes lóbulos laterales en el dominio espectral, así como otros tipos de ventanas se aplican en la señal temporal para reducir dichos haces en el dominio de la frecuencia.

Cuando se aplica “tapering”, las señales de amplitud de ciertos elementos (comúnmente los que se encuentran en los extremos) sufren una atenuación que conlleva una pérdida en ganancia. Otra desventaja de esta asignación de pesos o de importancia es el ensanchamiento del haz principal.

Dependiendo del tipo de ventana se puede ajustar el nivel o tamaño de los lóbulos laterales. En la siguiente tabla se reflejan diferentes tipos de ventanas, así como algunos de los parámetros afectados por los mismos, como son el ensanchamiento del lóbulo principal (medido desde los -3 dB), la pérdida de amplitud y de SNR, así como el nivel del lóbulo lateral.

Nombre de la ventana	Factor de ensanchamiento del lóbulo principal	Pérdida de amplitud (dB)	Pérdida de SNR (dB)	Nivel del lóbulo lateral (dB)
Rectangular	1	0	0	13,15
Taylor	1,27	-3,85	-0,69	30
Chebyshev	1,25	-3,70	-0,62	30
Gaussian	1,29	-4,12	-0,78	30,36

Tabla 3: Parámetros de diferentes ventanas tapering para N=16 [40].

Todos estos valores están referenciados en base a un diagrama de radiación al que no se le ha aplicado ningún criterio de pesos. Se puede observar que, dependiendo el tipo de ventana a emplear, el ensanchamiento oscila entre el 25-30% y la pérdida de amplitud puede llegar a ser hasta de más de 4 dB. No obstante, también supone una reducción del ruido. La reducción señal a ruido o SNR también se ve afectada, suponiendo que se puede llegar a perder hasta casi 1 dB.

En cuanto al nivel del lóbulo lateral, el valor reflejado representa la diferencia en amplitud entre el lóbulo principal y el lóbulo lateral con mayor amplitud. Se observa que, para la ventana rectangular, solo hay una diferencia de 13 dB, mientras que, para las ventanas de Taylor, Chebyshev y Gaussian la diferencia alcanza los 30 dB.

Se llega a la conclusión de que las funciones “tapering” permiten reducir de forma considerable la amplitud de los lóbulos laterales, aunque con dos claras desventajas: la primera es el ensanchamiento del lóbulo principal, por lo que se reduce la resolución en azimut, y la segunda las pérdidas en la ganancia y en la SNR, siendo el mayor inconveniente al usar este tipo de medidas.

Aunque las técnicas de tapering cobran un gran sentido teórico cuando se trata con antenas que radian de forma isotrópica, no son tan necesarias en casos prácticos al tener antenas con un diagrama de radiación determinado no isotrópico. En la práctica, el propio diagrama de radiación de la antena individual limita el ángulo de apuntamiento del array y, por consiguiente, también limita la aparición de los lóbulos secundarios.

3.1.2 Radiación direccional

En los análisis realizados se ha supuesto que los elementos del array son antenas isotrópicas. En la práctica, el diagrama efectivo de antena del array $F_{ef}(\phi)$ depende del factor de array $F(\phi)$ y del diagrama de radiación individual de cada elemento $F_{el}(\phi)$. En el caso en que cada elemento presenta el mismo diagrama de radiación, el diagrama efectivo de antena del array se puede calcular como el siguiente producto:

$$F_{ef}(\phi) = F(\phi) \cdot F_{el}(\phi) \quad (3-8)$$

En el caso en que cada elemento es directivo (mira en una dirección), el lóbulo simétrico no deseado del array puede ser eliminado. Se puede observar en la siguiente imagen, en donde el diagrama de radiación del elemento se define como:

$$F_{el}(\phi) = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3-9)$$

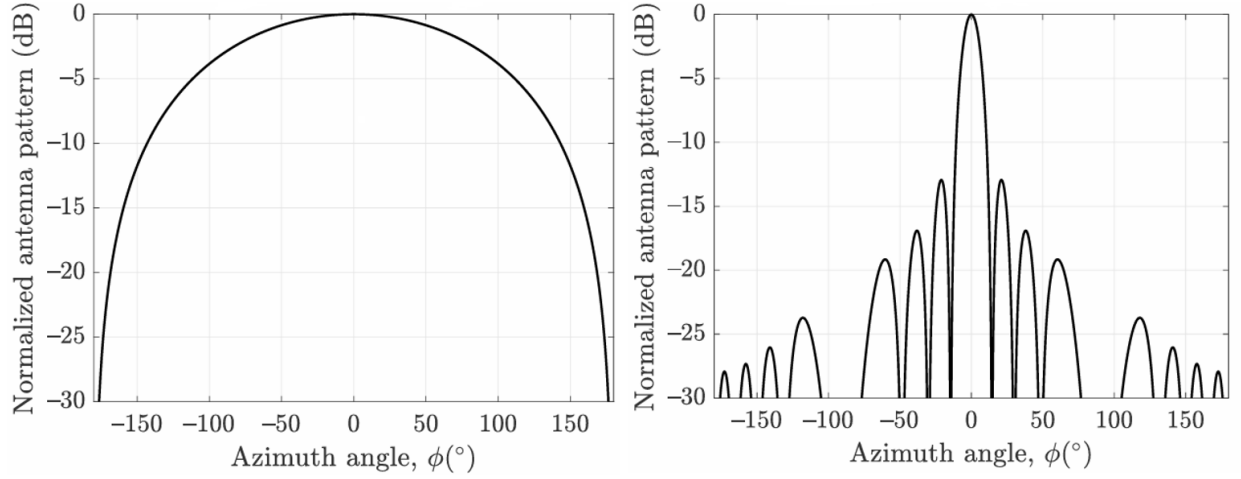


Figura 3-7: Diagrama de radiación de un elemento (izquierda) y el de varios elementos ($N=8$ y $d=0,5\lambda$) [40].

El diagrama de radiación del elemento (izquierda) refleja la situación con un nulo en la dirección opuesta ($\pm 180^{\circ}$). En el diagrama de radiación efectivo (derecha) se observa que el haz a $\pm 180^{\circ}$ se suprime con el diagrama de radiación del elemento simple.

4 CALIBRACIÓN DE UN ARRAY DE ANTENAS A PARTIR DE UNA BALIZA

En este capítulo se planteará el desarrollo teórico necesario para la correcta calibración de un array de antenas a partir de una señal de baliza. Se analizará matemáticamente como identificar en recepción la señal de la baliza transmitida y que información nos proporciona para calibrar el array de antenas. Finalmente se hará una descripción de los materiales utilizados para la calibración.

4.1 Fundamento teórico

La respuesta de un Sistema Lineal Invariable en el tiempo (SLIT), conocido como un sistema que a su salida presenta una versión desplazada y escalada de la señal de entrada, a una función exponencial compleja e^{st} (s es un número complejo) y en particular la respuesta a las exponenciales imaginarias ($e^{j2\pi ft}$) será el objeto de estudio en este apartado. La respuesta de un SLIT a las exponenciales complejas servirá para conocer la respuesta a cualquiera de estas señales.

Se podría emplear funciones senoidales en vez de exponenciales complejas, aunque estas últimas simplifican el tratamiento matemático. La transformada de Fourier permitirá analizar señales desde un punto de vista diferente facilitando la comprensión de muchos procedimientos empleados en telecomunicaciones, tales como la modulación, la multiplexación o la representación digital de señales. En primer lugar, hay que comprobar cuál es la respuesta de un sistema lineal e invariante en el tiempo a la exponencial compleja $e^{j2\pi f_0 t}$ y obtener la respuesta a funciones como el $\cos(2\pi f_0 t)$.

Sea un sistema lineal e invariante en el tiempo caracterizado por su respuesta a un impulso o respuesta impulsional $h(t)$, y sea $H(f)$ la transformada de Fourier de $h(t)$. Al sistema se le aplica:

- Una señal senoidal de $x(t) = \cos(2\pi f_0 t)$, correspondiente a la onda emitida por la baliza y suponiendo un desfase inicial nulo.
- La constante $H(f)$, que hace referencia a la transformada de Fourier del dominio frecuencial a un dominio de fase.

La salida que se obtiene con la combinación lineal:

$$y(t) = |H(f_0)| \cos(2\pi f_0 t + \angle H(f_0)) \quad (4-1)$$

Se puede observar que cuando en un sistema lineal e invariante en el tiempo entra una señal senoidal, la salida es otra señal senoidal de la misma frecuencia. Lo único que hace el sistema es amplificar o atenuar la amplitud y añadir una componente de fase o retardo. Además, lo que ocurre cuando se analiza el espectro frecuencial donde se encuentra la emisión correspondiente a la baliza, la transformada de Fourier permite relacionar ese dominio frecuencial con valores de fase. En este nuevo espectro, aparece

mucho ruido referente a la fase, aunque si se hace un análisis justo en la frecuencia de transmisión de la onda (f_0) se puede obtener la fase con la que llega la onda transmitida. Justamente esta será la que nos permitirá identificar con que fase se recibe la señal en cada uno de los elementos del array, cual se debería de recibir y cuanto es el factor de corrección para calibrar el array [41].

Por ende, si la señal de entrada tuviese una cierta fase $\hat{x}(t) = \cos(2\pi f_0 t + \phi)$ esta se puede expresar como un retardo y aplicarlo a la salida dada la invarianza del sistema, es decir:

$$\hat{x}(t) = \cos(2\pi f_0 t + \phi) = \cos(2\pi f_0 (t + \frac{\phi}{2\pi f_0})) = x(t + t_0) \quad (4-2)$$

Donde $t_0 = \frac{\phi}{2\pi f_0}$, de modo que la salida $\hat{y}(t)$ será $y(t + t_0)$:

$$\hat{y}(t) = y(t + t_0) = |H(f_0)| \cos(2\pi f_0 (t + t_0) + \angle H(f_0)) \quad (4-3)$$

$$\hat{y}(t) = |H(f_0)| \cos(2\pi f_0 t + \phi + \angle H(f_0)) \quad (4-4)$$

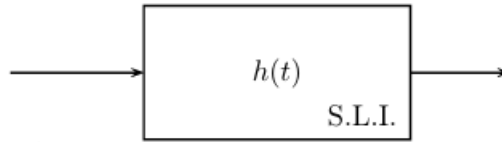


Figura 4-1: Efecto de un sistema lineal e invariante sobre funciones exponenciales y senoidales

En este sistema entra $x(t) = \cos(2\pi f_0 t + \phi)$ y sale $y(t) = |H(f_0)| \cos(2\pi f_0 t + \phi + \angle H(f_0))$.

Como vemos, para la correcta calibración de un array de antenas no es necesario conocer la fase de la señal transmitida (baliza), sino directamente los valores de fase recibidos $\angle H(f_0)$ de cada uno de los diferentes elementos de un array. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta fase podría estar afectada por las señales del sistema de radiocomunicación que se quiera calibrar.

4.2 Señal recibida en el array

En este apartado se analiza el procedimiento de calibración y ajuste de la compensación de fases entre elementos del array una vez que se la señal de la baliza se ha mezclado con la señal de otro servicio de radiocomunicaciones, en nuestro caso de TDT.

Uno de los principales problemas a la hora de calibrar adecuadamente un array de antenas es la cantidad de osciladores locales que participen en la adquisición de los datos. Por ejemplo, en un sistema de recepción multicanal, dichos canales de recepción deberán estar sincronizados en el tiempo o el desfase frecuencial entre canales debería también ser estimado.

El verdadero reto en implementar algoritmos de procesamiento de arrays en cualquier campo (beamforming, radares biestáticos, etc) está relacionado con el problema de hacer que los canales presentes en el sistema de recepción multicanal estén correlacionados correctamente cuando este hace uso de varios receptores. Son muchos los factores que contribuyen a que haya complicaciones en la correlación entre canales, siendo el principal la compensación en fase y frecuencia de los osciladores locales.

4.2.1 Desarrollo del problema

Se considera un sistema de recepción multicanal con un número L de canales; en cada canal, una entrada de multiplexación temporal de una frecuencia de calibración y otra señal de datos procedentes de la antena son procesadas acorde con la Figura 4-2, mientras que se aplica una frecuencia externa de

referencia GPS a cada canal por medio de un divisor, de forma que cuando cada canal tome datos de cada antenna estos se obtengan al mismo tiempo.

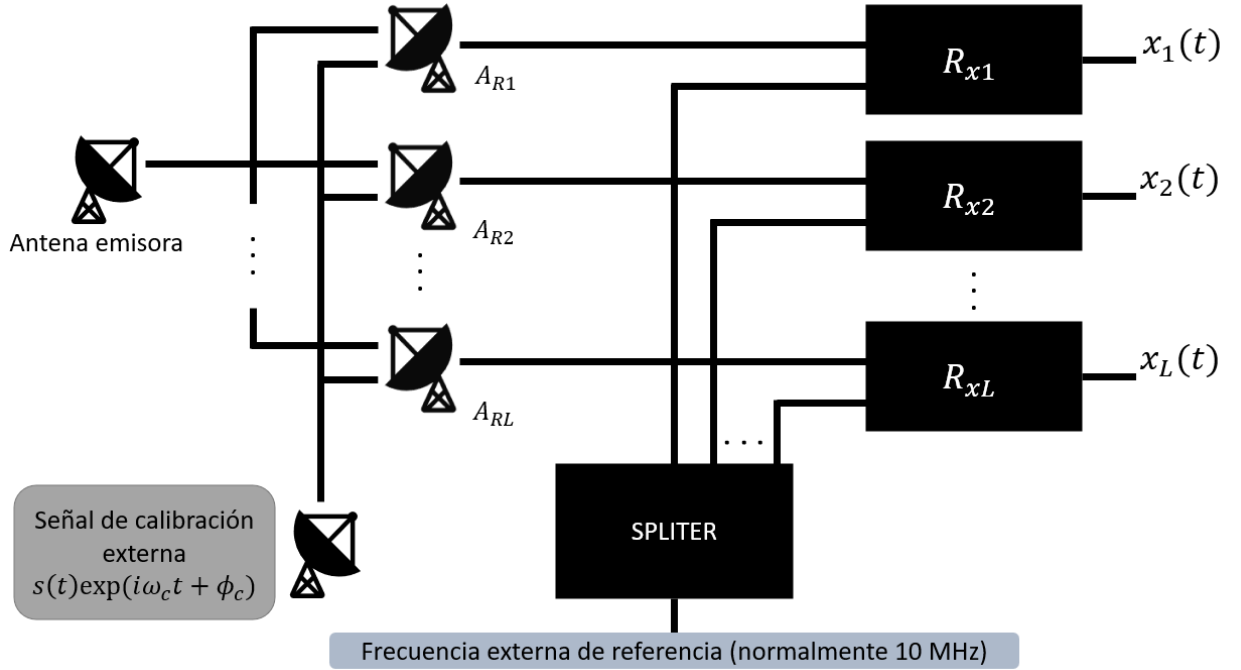


Figura 4-2: Esquema de calibración de un receptor multicanal

Para ello, los cables que van del divisor a los canales también están calibrados y los osciladores internos de los canales de recepción se afianzan a estas señales de referencia usando sus lógicas de procesamiento de fase o PPL's, aunque estas presentan compensaciones relativas en fase y frecuencia en sus salidas. Recalcar que las señales tanto de la emisora como la de calibración o referencia son recibidas por la receptora de forma inalámbrica, a través del aire.

Cabe destacar que los programas de procesamiento empleados en los arrays requieren frecuencias exactas, así como sincronización en tiempo entre los distintos canales. Suponiendo que este último requisito se cumple, la compensación en fase se da al principio del intervalo de medidas, y la correspondiente en frecuencia es constante durante dicho intervalo.

En el sistema bajo estudio en este proyecto la baliza transmite una señal tipo coseno que se mezcla/integra con la señal TDT. De esta manera, la señal coseno y la señal procedente de la antena emisora de TDT llegan a los canales continuamente al mismo tiempo.

En los canales de recepción, una vez que la señal IQ se transforma a banda base se lleva a cabo una conversión AD (Analogic to Digital) sincronizada de las señales I y Q. Sin embargo, en cada uno de los canales de recepción aparecen descompensaciones tanto en frecuencia como en fase debido a que los osciladores locales podrían no estar ajustados correctamente.

En base a todo lo anterior, se puede expresar de forma matricial un modelo matemático de banda base, referente a la señal recibida por un sistema de recepción multicanal de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_L(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_1} e^{j\omega_1 n} \\ e^{j\varphi_2} e^{j\omega_2 n} \\ \vdots \\ e^{j\varphi_L} e^{j\omega_L n} \end{bmatrix} s(n) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\Delta\varphi_2} e^{j\Delta\omega_2 n} \\ \vdots \\ e^{j\Delta\varphi_L} e^{j\Delta\omega_L n} \end{bmatrix} e^{j\varphi_1} e^{j\omega_1 n} s(n) \quad (4-5)$$

Aquí:

- $x_i(n) \in \mathbb{C}^{L \times 1}$, $n = 1, \dots, N$ es el vector de las señales de banda base referente a las salidas IQ de los canales de recepción; N es el número de señales que hay en el intervalo de observación T_C .
- $a(n) \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ es el vector columna cuyos elementos presentan una forma genérica: $e^{j\Delta\varphi_i} e^{j\Delta\omega_i}$, $i = 1, \dots, L$.
- $s(n)$ es la envolvente compleja de la señal de calibración.
- Se desprecia el vector referente al ruido.

Los parámetros desconocidos de la ecuación (4-5) serían:

- La fase inicial y el cambio de frecuencia $\{\varphi_1, \omega_1\}$ pertenecientes al primer canal (canal de referencia).
- Las compensaciones relativas en fase y frecuencia $\{\Delta\varphi_i, \Delta\omega_i\}$, $i = 1, \dots, L$ que tienen que ser estimadas.

Dichas compensaciones se aproximan a $\Delta\omega_i = \frac{2\pi\Delta f_i}{f_s}$ en donde Δf_i es la relativo en frecuencia y f_s la frecuencia de muestreo [42].

Como consecuencia, lo que se busca es reducir el problema de estimación de las compensaciones relativas de un sistema receptor multicanal, hasta obtener una correcta estimación entre el canal de referencia y el resto de canales receptores. Si se considera que el primer canal es el de referencia, y cualquier otro es escogido como segundo canal, entonces se puede obtener un modelo matemático para un sistema de dos canales receptores:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\Delta\varphi} e^{j\Delta\omega n} \end{bmatrix} e^{j\varphi_1} e^{j\omega_1 n} s(n) \quad (4-6)$$

En este proyecto, el desfase entre los elementos del array se estima a partir de las diferencias de fase obtenidas a partir de la ecuación 4-4. Respecto al desfase relativo en frecuencia, como se verá en el siguiente apartado, todos los elementos del array son recibidos con un único receptor de 4 entradas por lo que se utilizará un único oscilador local que, por consiguiente, no introduce desfase entre antenas.

4.3 Materiales y metodología a emplear

4.3.1 Materiales

La correcta calibración del array es el objetivo a perseguir en este proyecto. Para ello, se hará uso de una serie de elementos que permitan cumplir con dicha finalidad:

- Array de antenas: está conformado por 4 antenas pasivas Televés UHF DiNova Boss de hasta 34 dB de ganancia. Lleva en la estructura incorporada la antena Televés que capta la señal de referencia de la emisora de Poio (ver Figura 4-3).
- Dispositivo Keysight: se conecta individualmente a un elemento del array para analizar las diferentes señales recibidas (ver Figura 4-6). Se centra entre 490 - 690 MHz puesto que es la zona de trabajo; rango de frecuencias donde emite la antena transmisora situada en Poio y en donde se emitirá la señal empleada para calibrar.
- Antena emisora TDT en Poio (ver Figura 4-4).
- Antena emisora (baliza) emitiendo señal coseno. Se hace uso de dos modelos, la Antena TV Ikusi Flashd Nano 5G 12 dB de ganancia (antena verde, ver Figura 4-8), y la Antena Dalltek de base magnética 5 dB de ganancia (antena pequeña negra, ver Figura 4-7).
- Ordenador con Matlab y GNU Radio (SDR).

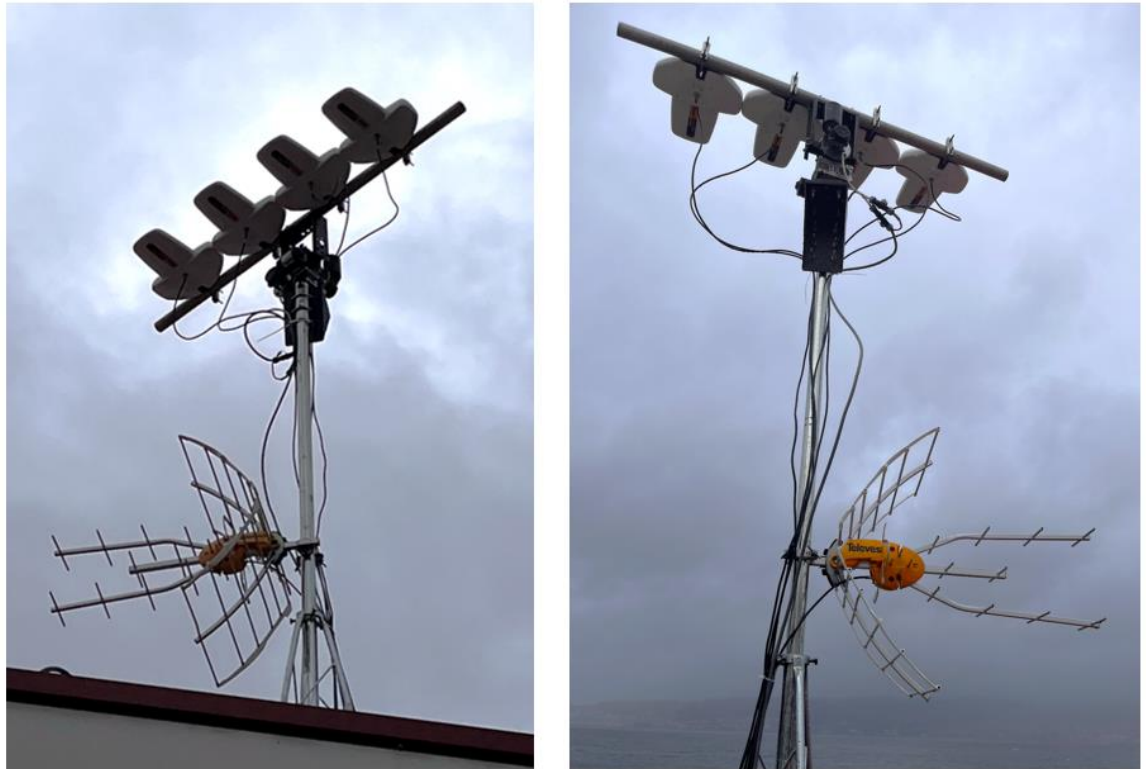


Figura 4-3: Array pasivo de 4 antenas sobre la azotea del edificio de investigación con antena Televés.



Figura 4-4: Antena emisora (IO) en Poio

4.3.2 Procedimiento – fase inicial

El sistema montado se trata de un radar pasivo biestático, en el que el IO (antena transmisora de TDT) se encuentra en la localidad de Poio, y el array se encuentra montado en la azotea del edificio de investigación, localizado en la Escuela Naval Militar.

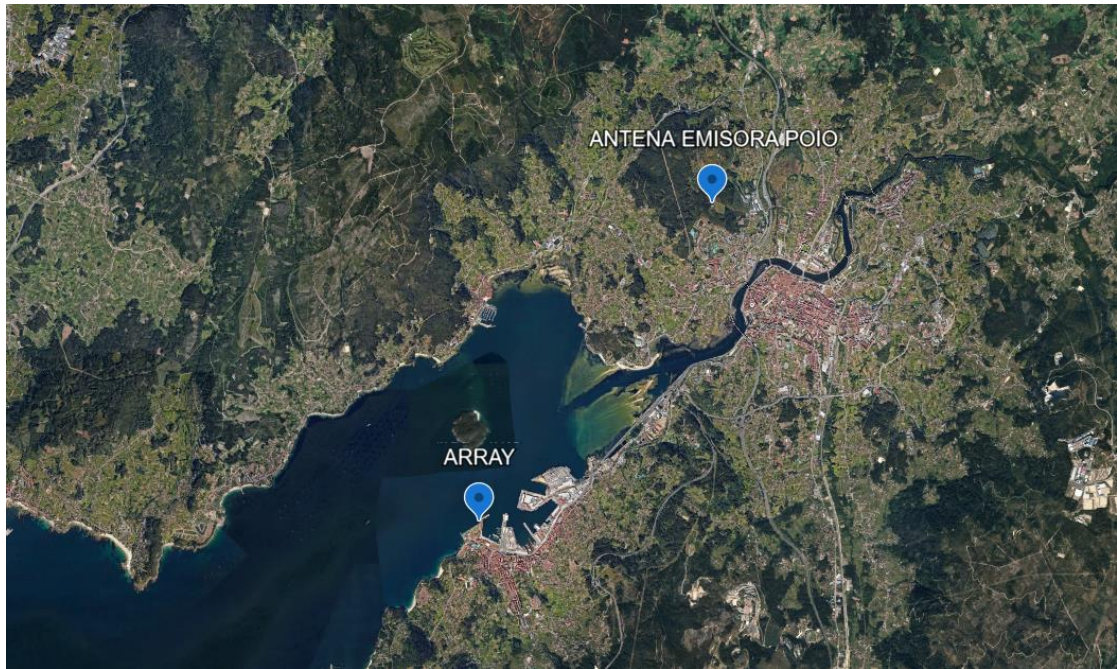


Figura 4-5: Localización GPS del IO y el array pasivo.

El primer paso a realizar será comprobar el rango de frecuencias entre las que se encuentra emitiendo la señal de TDT, mediante una antena auxiliar y un dispositivo de análisis frecuencial, el Keysight. Para ello, se colocó la antena en el exterior conectada al dispositivo, y se observaron las siguientes frecuencias con sus respectivos anchos de banda, correspondientes a los diferentes canales.

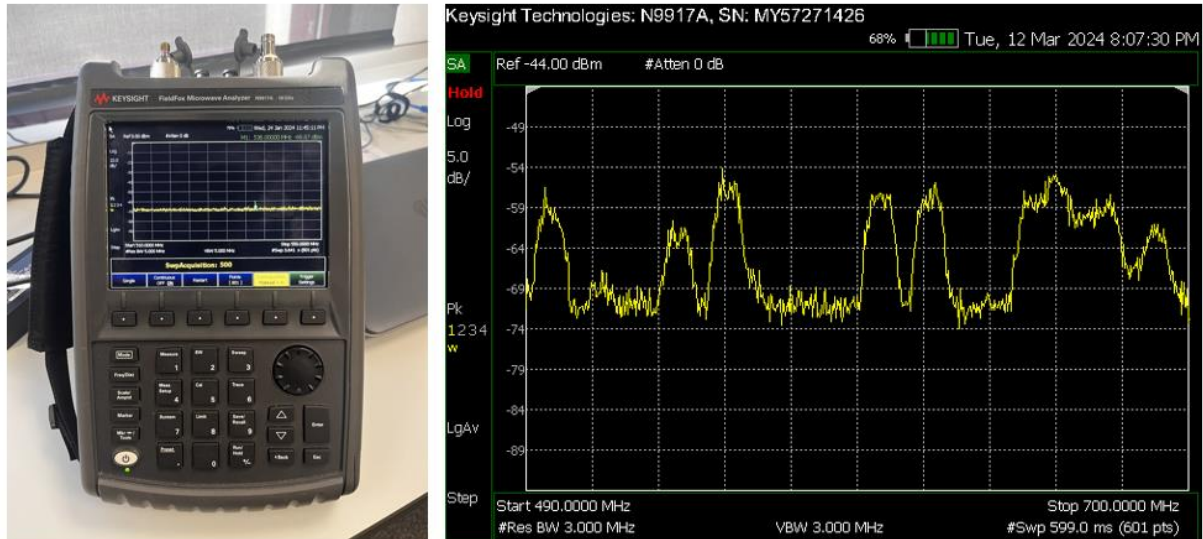


Figura 4-6: Dispositivo Keysight (izquierda) y espectro de canales TDT transmitido por la emisora de Poio (derecha).

Del espectro obtenido, se escogía la frecuencia a la que se iba a emitir la señal señuelo para llevar a cabo la calibración; se decidió que esta iba a emitir en la frecuencia de 535,8 MHz. Empleando una pequeña antena emisora (baliza) y colocándola cerca de la antena auxiliar (también baliza, pero usada en este caso como receptora), se podía apreciar como el espectro electromagnético cambiaba, y aparecía una nueva señal.



Figura 4-7: Baliza emisora de la señal coseno

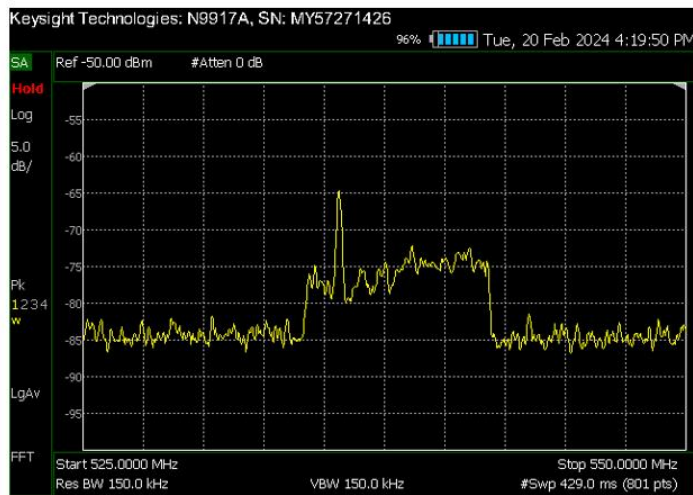


Figura 4-8: Señal recibida por antena auxiliar.

Una vez comprobados que los elementos a emplear funcionan, se procederá a explicar el funcionamiento tanto de la baliza como del sistema de recepción de las señales.

4.4 Funcionamiento baliza de tipo coseno

La baliza a emplear emite una señal coseno pura a una frecuencia concreta de forma que se pueda detectar de forma inequívoca por el array. Para ello, se emplea la transformada de Fourier, que permite computar el muestreo de la señal y detectar finalmente la señal de la baliza, así como detectar la fase con la que llega (ver fundamento teórico en apartado 4.1).

4.4.1 Señal emitida por la baliza

Lo que se está emitiendo es un pico de señal, la señal coseno emitida por la baliza empleada para llevar a cabo la posterior calibración. Para ello, se emplea el siguiente diagrama definido para la emisión de la señal.

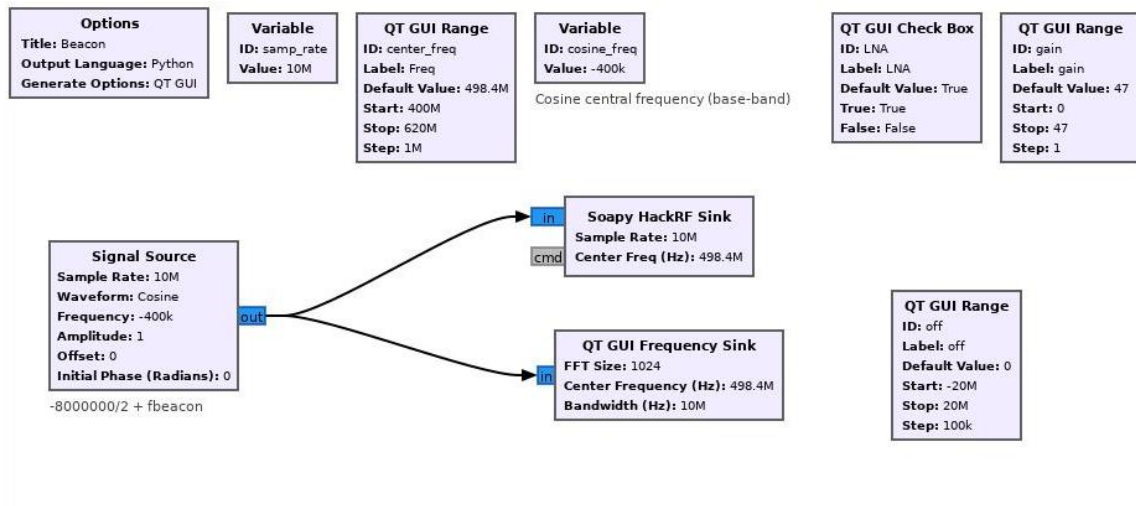


Figura 4-9: Diagrama SDR de emisión de la señal coseno.

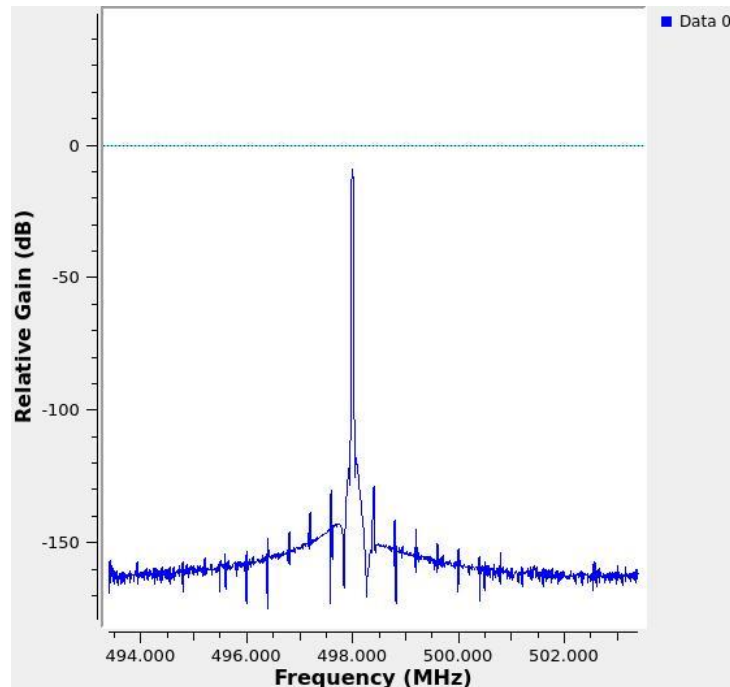


Figura 4-10: Señal coseno emitida por la baliza. Controlada mediante el SDR.

En este caso la baliza está emitiendo a una frecuencia de 498 MHz, aunque dicho valor cambiará en función de los requerimientos.

4.4.2 Sistema de correlación de datos recibidos

Los datos obtenidos en un sistema de recepción proceden de antenas y dispositivos individuales, por lo que requieren que, previo a su análisis, se lleve a cabo una correlación coherente en tiempo de los mismos. Para ello, es necesario un sistema encargado de llevar a cabo dicha tarea.

En este proyecto, dicho sistema presenta la siguiente estructura:

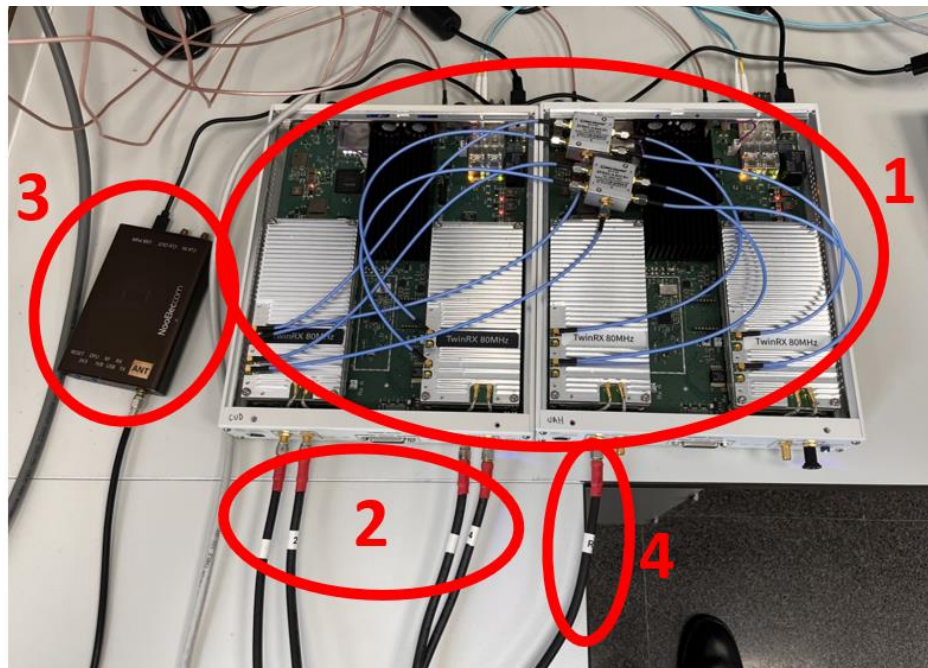


Figura 4-11: Sistema de correlación de datos

Donde:

1. Dispositivo de recepción de datos (USRP X310 Digitalizador de señal).
2. Cables de recepción de señales de las antenas del array.
3. Transmisor de la señal tipo coseno de la baliza (señal de calibración).
4. Cable correspondiente a la señal de referencia.

El funcionamiento es bastante sencillo de entender; las señales recibidas por cada una de las antenas del array llegan al dispositivo de recepción de datos (1) a través de los cables (2) conectados a cada una de ellas. A su vez, la señal generada por el transmisor (3) es enviada a la baliza para que sea emitida. Mientras todo esto se produce, al dispositivo le está entrando constantemente la señal de referencia de la antena que apunta a la emisora (IO en Poio) mediante otro cable (4). Lo primordial de este sistema resulta en que todas las señales, una vez lleguen al dispositivo, estén correladas en tiempo lo más preciso posible.

Este último factor es determinante a la hora de analizar la información, puesto que gran parte de la coherencia de la misma reside en que los datos extraídos de cada una de las señales sean tomados en el mismo instante temporal. Esto se consigue gracias a que el dispositivo está conectado, a su vez, a una señal GPS que le permite obtener esa precisión temporal.

Como paso previo al análisis y representación de gráficas, se hace uso de un programa SDR para almacenar dichos datos:

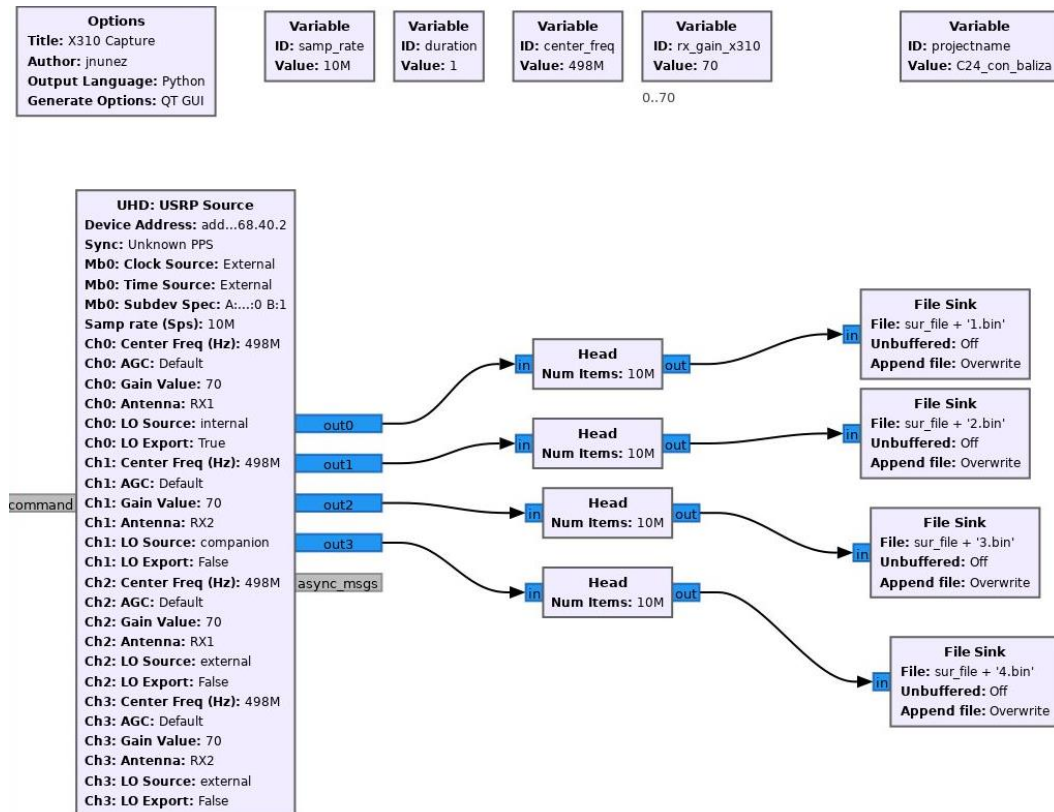


Figura 4-12: Programa de recolección de datos del array.

La Figura 4-12 representa el programa SDR empleado para recolectar los datos de las antenas del array, empleados posteriormente para su representación y procesado, como se verá en los siguientes apartados.

4.5 Detección y representación gráfica de las señales

La señal recibida por la baliza coseno es captada por cada una de las antenas del array, a la vez que los diferentes canales de la señal TDT aparecen en el espectro frecuencial. Aquí se mostrará una representación de cómo es posible visualizar la señal emitida por la baliza.

Primero, se mostrará lo que recibe una de las antenas a través del dispositivo Keysight:



Figura 4-13: Espectro recibido por una de las antenas en tiempo real.

Se observa como respecto a la Figura 4-6, la frecuencia correspondiente a la señal coseno aparece fuera del espectro de canales TDT, concretamente entre dos canales. Se trata de un caso ideal en el que se puede claramente localizar cual es la señal de referencia.

Se propone entonces otro caso en el que la baliza está transmitiendo dentro del ancho de banda reservado a un canal, ya que en la realidad no tendría por qué existir un rango de frecuencias libres entre dos canales:

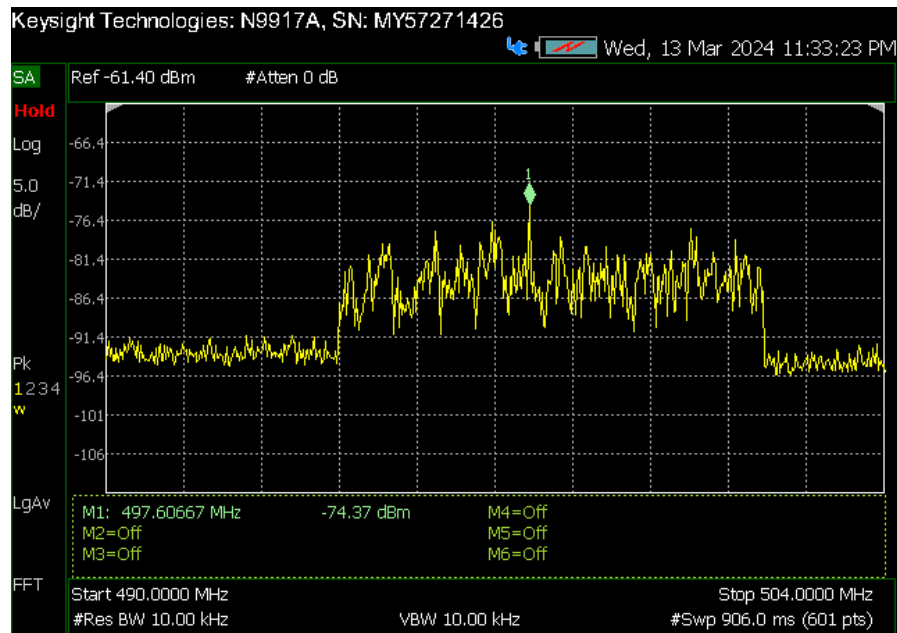


Figura 4-14: Señal coseno dentro del ancho de banda de un canal TDT.

Cabe resaltar que esto son imágenes obtenidas en tiempo real, en donde una de las antenas se conecta directamente al dispositivo Keysight. No obstante, para poder ver lo que reciben las cuatro antenas al mismo tiempo, se debe de almacenar dicha información y luego representarla a través de MATLAB (ver en apartado 5.1.2.1).

4.6 Corrección/calibración del array

Para llevar a cabo la calibración del array se hará uso de lo mencionado anteriormente, tanto de materiales como de procedimientos teóricos. Se empezará por la colocación y comprobación de los elementos a emplear, destacando como parte más importante y epicentro de este trabajo el empleo del algoritmo de calibración desarrollado.



Figura 4-15: Colocación de la baliza respecto del array

La baliza se ha colocado físicamente a -85° respecto de la normal al array, un ángulo conocido para poder ejecutar el algoritmo. Más adelante, se hicieron comprobaciones también a 0° .

4.6.1 Obtención del ángulo y los desfases

En este apartado se explica cómo se consigue a obtener la dirección (DOA) de la baliza de forma experimental, sabiendo que esta se encuentra a un ángulo conocido respecto del array lineal. Consiste en emplear diferentes funciones presentes en *test_calibration_3_antena.m* para:

- Obtener coeficientes de calibración
- Extraer la amplitud y el ángulo de fase, así como la frecuencia más alta (baliza).
- Aplicar las correcciones en las fases.

Se introducen los datos teóricos de ángulo y frecuencia de la baliza para tener una referencia de lo que se debe obtener. Después, se emplea un fichero antenna denominado “*Antenas.mat*” que recoge las 50000 muestras de cada una de las cuatro antenas para analizar y computar los datos obtenidos durante la exploración.

Para trabajar con ellos, se hace uso de la transformada de Fourier (transformada rápida de Fourier) aplicada a los datos obtenidos por cada antenna para obtener su representación en el dominio de la frecuencia. Una vez realizado, se aplica una señal senoidal para poder determinar el ángulo de llegada (DOA) para cada antenna, haciendo uso de la expresión (4-1), en donde dicho ángulo se obtiene de $\angle H(f_0)$ y por ende, los diferentes desplazamientos en fase de cada una de las antenas. Cabe resaltar que cada valor obtenido no hace referencia a los ángulos de llegada, sino a los desfases de llegada; el DOA se identifica con θ en la ecuación (3-1), mientras que los desplazamientos en fase con el ángulo α . Si el sistema estuviese bien calibrado, el ángulo θ sería el mismo para cada antenna.

5 RESULTADOS

5.1 Análisis de resultados

En este apartado se recogerán todos los datos obtenidos de las diferentes pruebas y se realizarán comparativas entre un array sin calibrar y otro calibrado, al que se le ha aplicado el algoritmo y se han corregido los desajustes que presentaban cada una de las antenas mediante sus respectivos coeficientes. Cabe mencionar que debido a las condiciones meteorológicas de la zona el array tuvo que ser montado de nuevo, lo que implicó tomar de nuevo medidas para poder justificar correctamente el proyecto; se presentarán situaciones y ejemplos antes y después del nuevo montaje. Incluso, la posición y la orientación no coinciden exactamente de un caso a otro.

5.1.1 Primera campaña de muestreo

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos en el primer muestreo, en el que solo se emplearon tres antenas del array, en vez de las cuatro, debido a que en un principio no se disponían de los 8 puertos del digitalizador de señal USRP X310, solo de 4 y estando uno de ellos destinado al cable de la señal de referencia (recibida por antena Televés). La baliza se colocó en una posición a -85° del array, como se muestra en la Figura 4-15.

5.1.1.1 Espectros de tres antenas

Se obtuvieron únicamente tres gráficas a la hora de analizar el espectro de frecuencia:

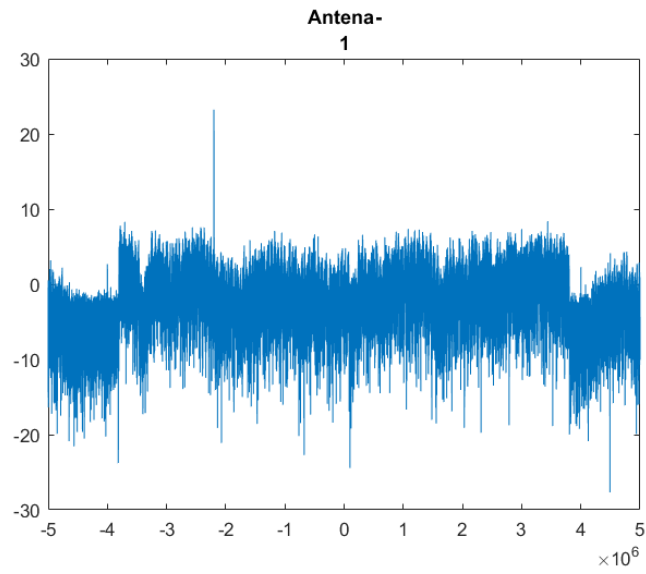


Figura 5-1: Espectro captado por la antena 1

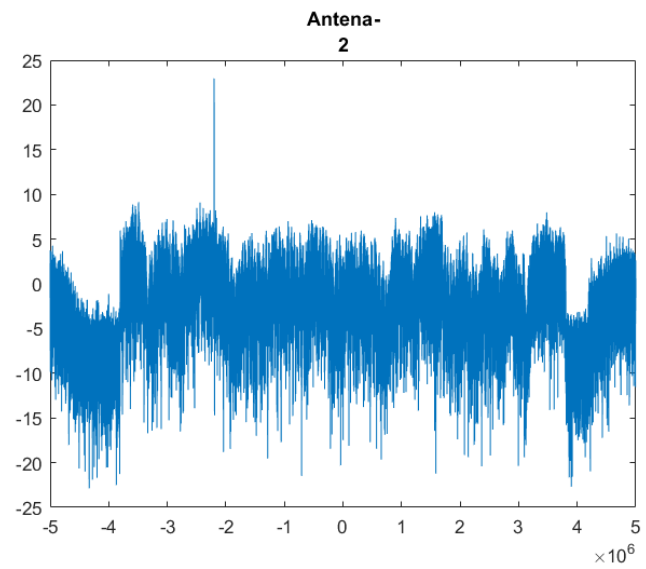


Figura 5-2: Espectro captado por la antena 2

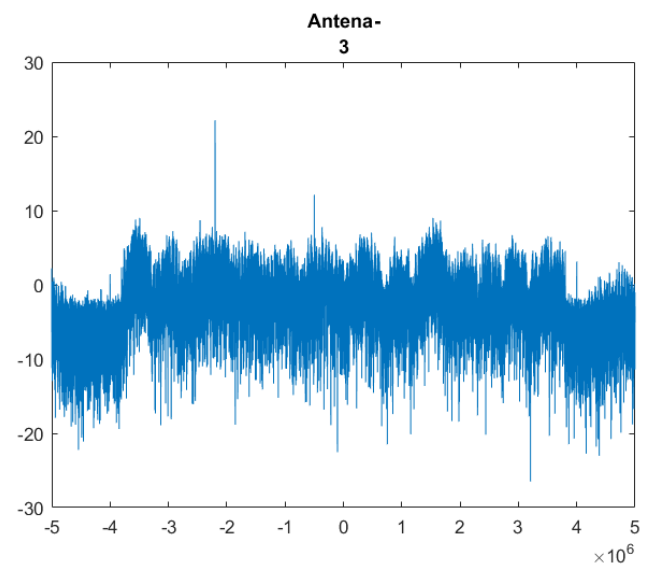


Figura 5-3: Espectro captado por la antena 3

En todos los espectros se observa como el pico de frecuencia corresponde con la señal emitida por la baliza, centrada en torno a los 535,8 MHz, y se encuentra dentro del ancho de banda reservado a uno de los canales. Si se comparan las gráficas se aprecian diferencias entre ellas debido a que no se trata exactamente de la misma antena quien recibe la señal; teóricamente tendría que ser así, aunque la realidad es distinta. Las tres antenas están mostrando la misma zona del espectro frecuencial, donde se observa el mismo canal y la misma señal de la baliza.

Para obtener esas gráficas se emplea el código o algoritmo presente en el archivo *test_calibration_3_antena.m* de MATLAB. En estas se observa:

- El eje de abscisas: se corresponde con el ancho frecuencial analizado (10 MHz) y centrado en 538 MHz.
- El eje de ordenadas: refleja el espectro de señal captado por la antena. Para poder representar los datos, se emplea la transformada de Fourier (visto en el apartado 4.2) que simplifica los cálculos, aunque esto se resume en emplear la función “fft” o transformada rápida de Fourier en MATLAB.

Cabe resaltar que los datos no se trabajan a tiempo real, sino que se almacenan en un vector (en este caso con una longitud de 50000 muestras por antena).

A continuación, se dará paso a los resultados del proceso de calibración.

5.1.1.2 Calibración de tres antenas

Los datos obtenidos de las tres antenas se agrupan con el programa de SDR para obtener el fichero *Antenas.mat*, el cual será procesado mediante el algoritmo para obtener los coeficientes de calibración. La tabla que se muestra a continuación muestra las fases que se esperan con la baliza a -85° , las que realmente se obtuvieron y los coeficientes de calibración calculados:

Apuntamiento = -85°			
Fases esperadas	-166,2799	0	166,2799
Fases reales de llegada	-142,8792	-80,5945	-129,9779
Coeficientes de calibración	-23,4007	80,5945	63,7422

Tabla 4: Resultados de 3 antenas en la primera campaña

En esta situación, el array se encuentra en su primer emplazamiento y los coeficientes corrigen las antenas en esa posición y situación determinadas por independiente. Si se cambiasen los cables, su posición, etc. las fases de llegada y por ende, los coeficientes, modificarían su valor. En cambio, si lo que cambia es la dirección de apuntamiento, lo único que cambiaría serían las fases esperadas y las reales, pero el coeficiente resultante de cada antena no sufriría apenas una variación.

Una vez corregido, se puede detectar de forma inequívoca el DOA de la baliza recibiendo un pico en dicha dirección o apuntamiento.

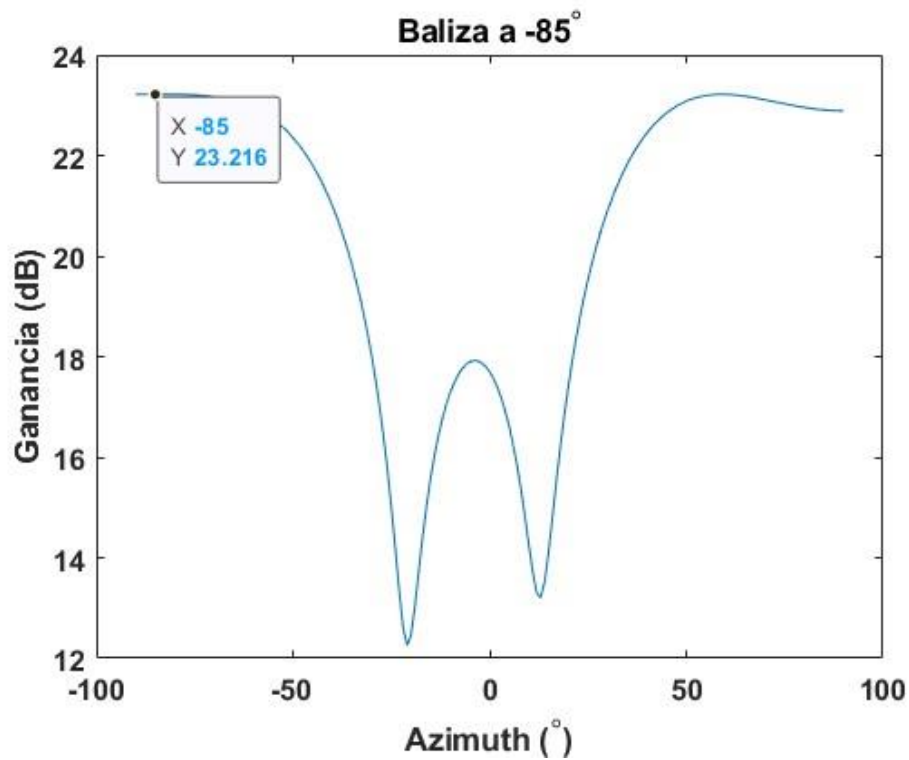


Figura 5-4: DOA de la baliza con array calibrado

5.1.1.3 Gráficas obtenidas en un escenario real

Una vez observada la efectividad del algoritmo con la baliza se procederá a su aplicación en un caso real, en el que hay dos barcos navegando en la ría de Pontevedra.

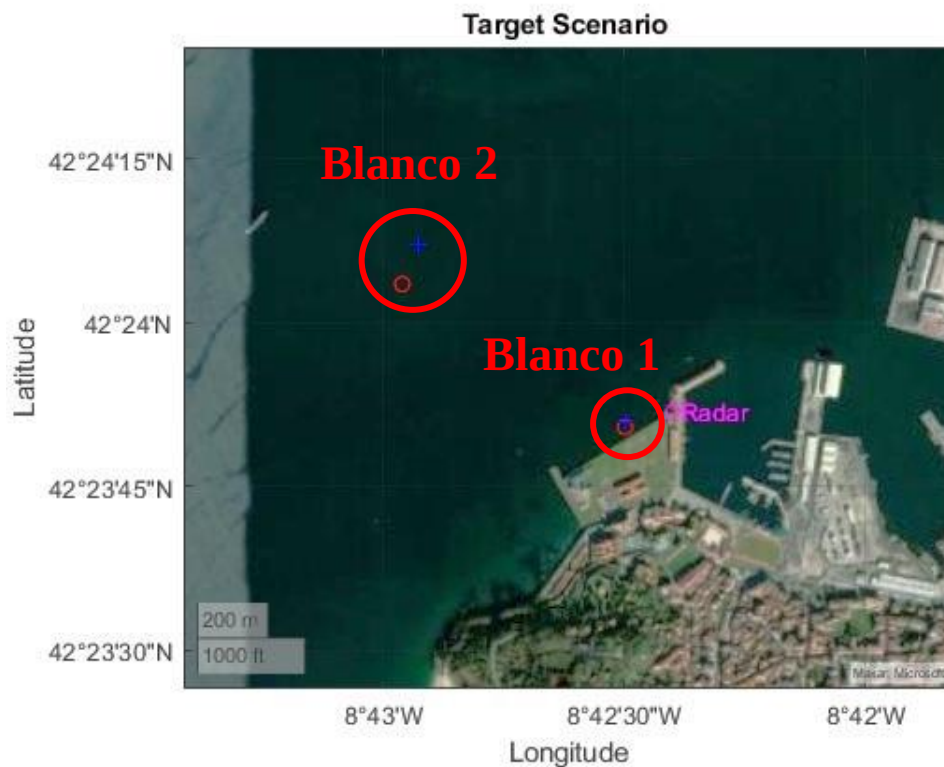


Figura 5-5: Escenario real. Dos contactos navegando por la ría de Pontevedra.

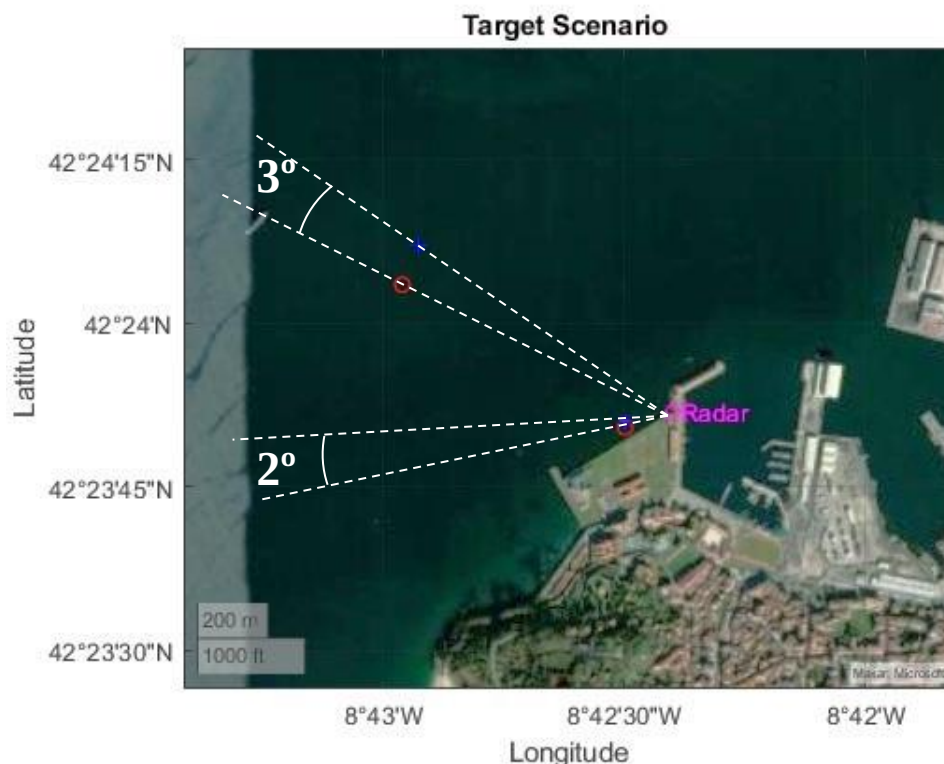


Figura 5-6: Diferencia de azimut

La Figura 5-5 refleja la situación de dos contactos (blanco 1 y blanco 2) en las proximidades de la Escuela Naval Militar, además de la localización del array. Los símbolos rojo y azul hacen referencia a dos situaciones distintas, una captada por la antena sin calibrar (azul) y la otra corregida (rojo). Estos blancos son detectados mediante Doppler.

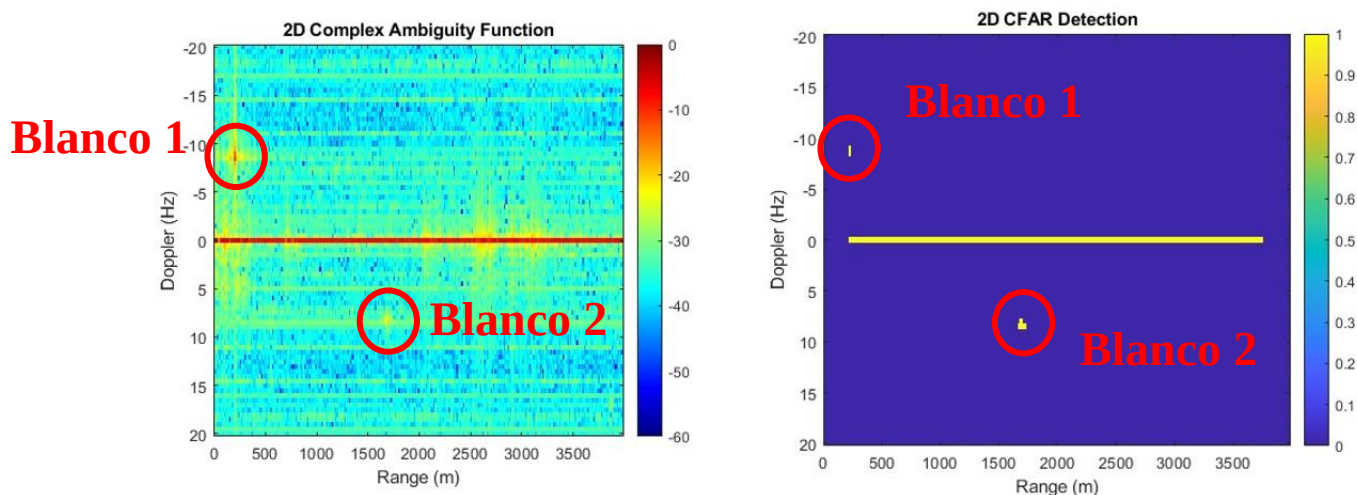


Figura 5-7: Captación de los blancos mediante Doppler

En la Figura 5-7 se observa como ambos blancos son captados gracias a que se encuentran en movimiento, por lo que todo aquello que se encuentre inmóvil o con una velocidad inapreciable no será detectado y se considerará como ruido (montaña, costa, barcos fondeados o sin arrancada, etc.). El sistema ha sido capaz de detectar dos barcos, uno situado a una distancia biestática de 200 m aproximadamente (blanco 1) y otro más alejado, con una distancia biestática de 1700 m (blanco 2). Se debe recordar que estas distancias no son respecto del array, sino que son las distancias biestáticas que indican que los blancos se encuentran en algún lugar de la elipse formada por transmisor-blanco-receptor

(ver explicación apartado 2.5.1) de manera que hace falta determinar el ángulo DOA para poder determinar su posición mediante la intersección de este y la elipse.

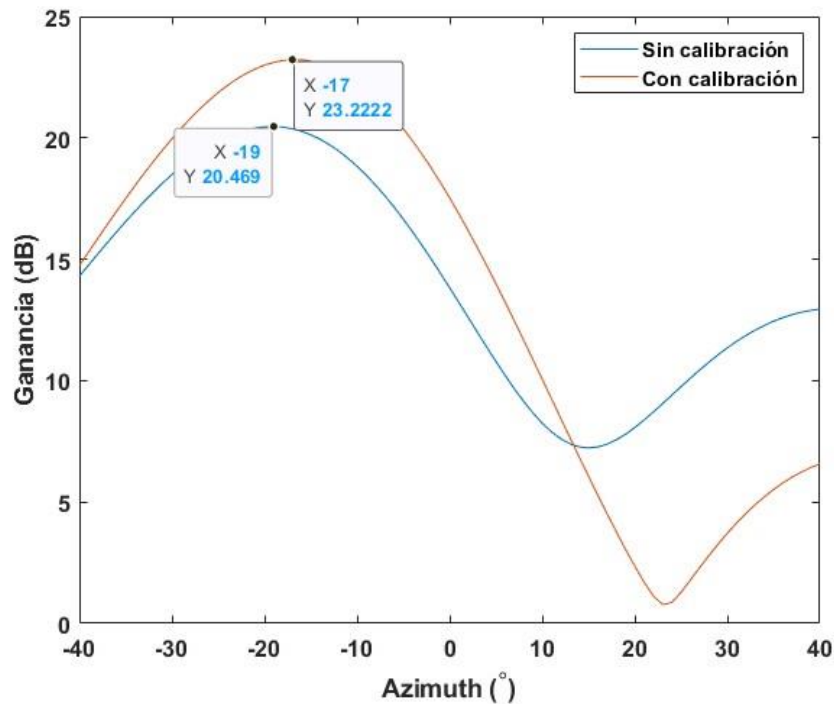


Figura 5-8: Comparativa DOA del blanco 1

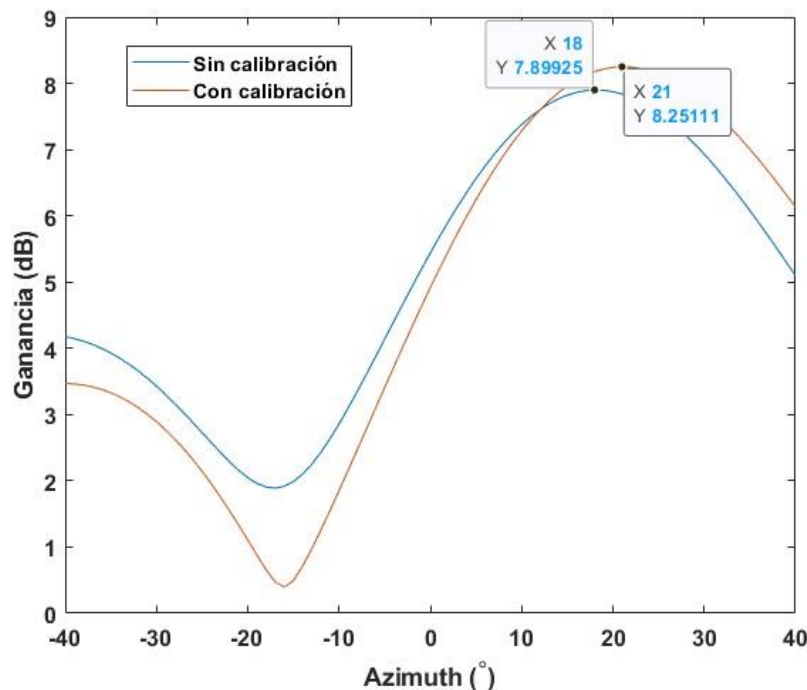


Figura 5-9: Comparativa DOA blanco 2

En las figuras Figura 5-8 y Figura 5-9 se puede ver claramente como existe una diferencia en los DOA corregidos y sin corregir de ambos blancos. Correlacionando estas gráficas con la Figura 5-6 se determina que, para el caso planteado, el error de posicionamiento en el blanco 1 es muy pequeño, incluso tolerable, situación opuesta al del blanco 2 donde se observa que cuanto más lejos se encuentre el blanco la diferencia entre posicionamientos empieza a aumentar. En estas gráficas se observa un ancho

de 80° (de -40° a 40°) en donde los diagramas de radiación presentan picos referentes a la detección de los blancos (el apuntamiento del array se hace electrónicamente). Si se quisiera calcular la distancia que hay desde el array hasta el blanco, bastaría con hacer uso de la ecuación (2-6).

5.1.2 Segunda campaña de muestreo

Debido a la necesidad de volver a montar el array, se tuvo que repetir nuevamente el proceso dado que los datos obtenidos en la primera campaña no son válidos para el nuevo emplazamiento. Además, en esta participan las 4 antenas, ya que fue posible emplear todos los puertos del digitalizador de señal.

5.1.2.1 Espectros de cuatro antenas

Se aplica de nuevo el programa diseñado de SDR para la obtención de un nuevo fichero de datos. Como en el caso anterior, se computa y se analiza mediante MATLAB obteniendo estas gráficas:

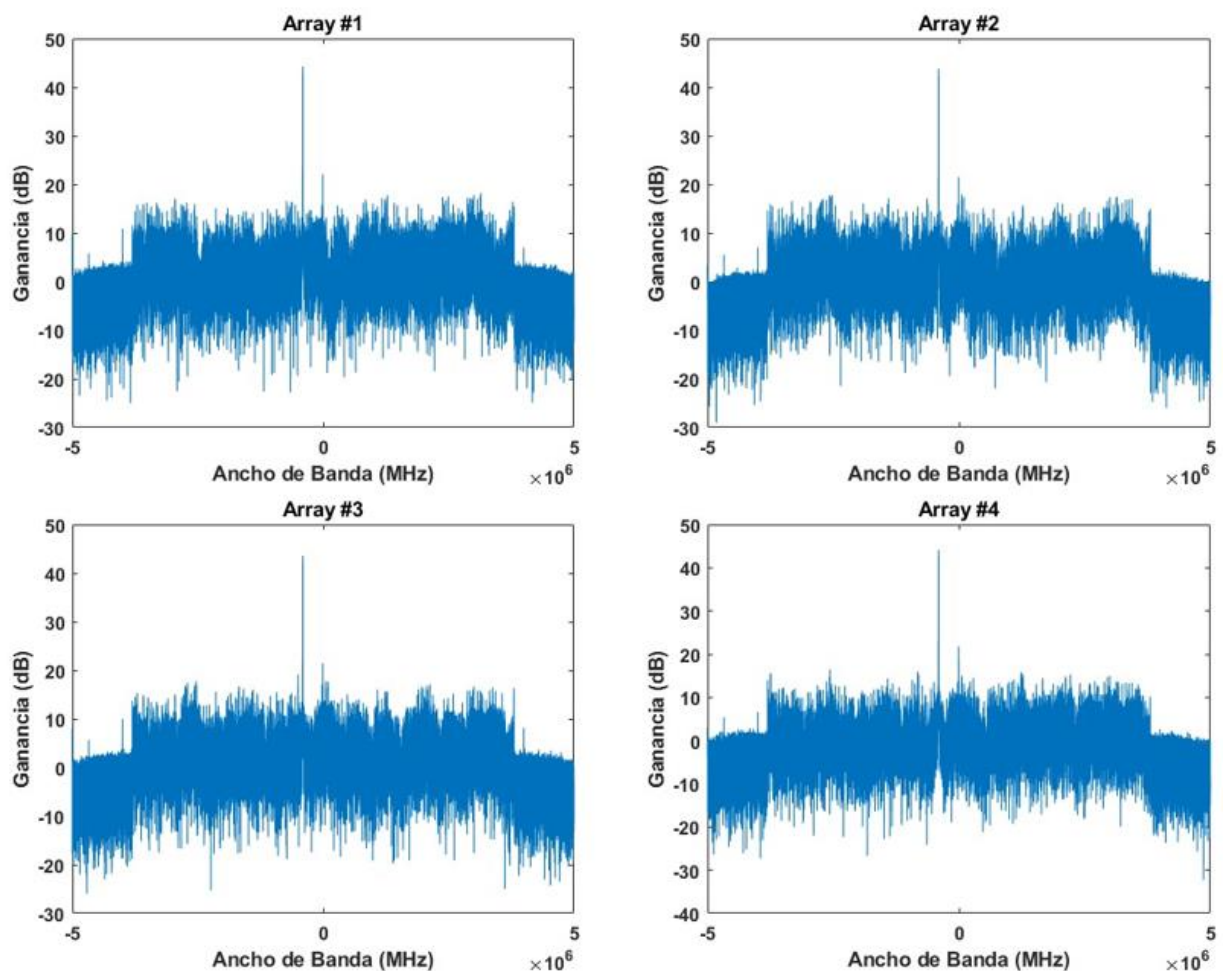


Figura 5-10: Espectros de frecuencia simultáneos de cuatro antenas

En la Figura 5-10 se observa la señal de la baliza a una frecuencia de unos 497,6 MHz dentro del ancho de banda de un canal; mismo procedimiento que en el caso anterior salvo por un cambio en la frecuencia.

5.1.2.2 Calibración de cuatro antenas

El procedimiento es exactamente igual al del apartado 5.1.1.2, con la diferencia de que en la baliza se colocó a 0° para obtener otros resultados igualmente válidos, pero más visuales.



Figura 5-11: Colocación baliza frente al array (0°)

A continuación, se presentan las fases esperadas, las obtenidas realmente y sus correcciones.

Apuntamiento = 0°				
Fases esperadas	0	0	0	0
Fases reales de llegada	-155,3796	-114,2285	107,4614	113,9552
Coefficientes de calibración	155,3796	114,2285	-107,4614	-113,9552

Tabla 5: Resultados de 4 antenas en la segunda campaña

Cuando la baliza se encuentra justo en frente del array (apuntamiento 0°) las fases de llegada no deberían de variar de unas antenas a otras, puesto que la señal llega de forma simultánea a cada una de ellas. Además, en este caso concreto la fase de llegada es igual a la fase propia de la onda; si la onda se emitiese con un ángulo distinto de 0, ese sería el ángulo o fase recibida.

Con la nueva calibración del array, se observa que la baliza es detectada a 0° (donde se ha colocado), por lo que al igual que en el caso anterior, este ha sido corregido correctamente.

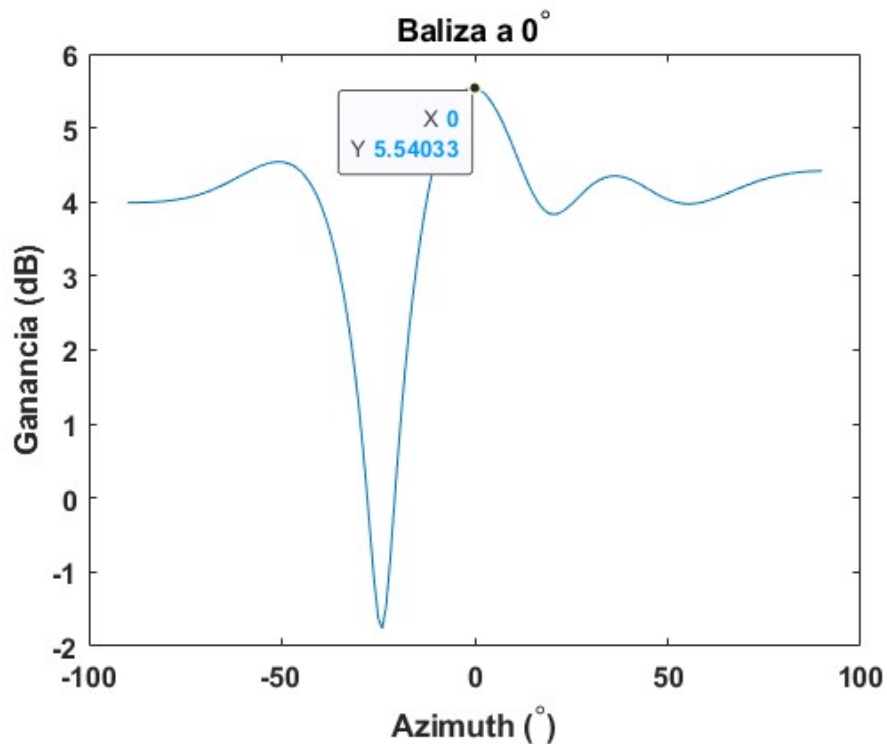


Figura 5-12: DOA de la baliza con array calibrado

5.1.2.3 Gráficas obtenidas en un escenario real

En este nuevo escenario aparece un único blanco navegando en las proximidades de la ENM.



Figura 5-13: Blanco 3 en las proximidades de la ENM



Figura 5-14: Diferencia en azimut

La representación continúa siendo la misma, donde los símbolos azul y rojo son situaciones captadas por el array sin calibrar y calibrado, respectivamente, habiendo una diferencia en azimut de 16° . También fue detectado mediante Doppler.

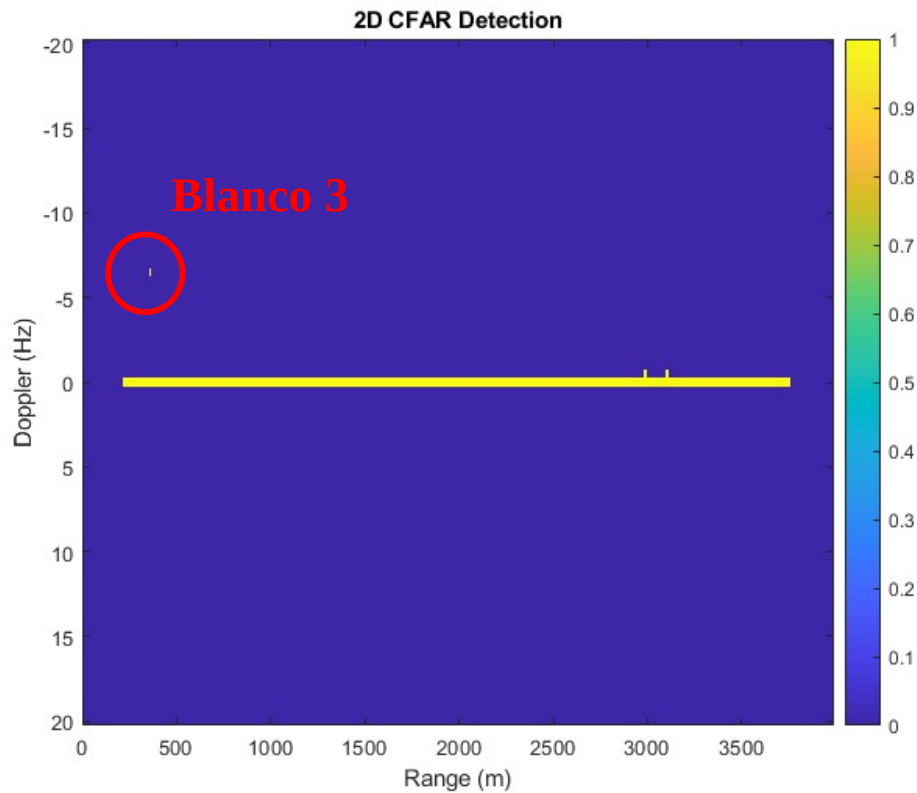


Figura 5-15: Distancia biestática del blanco 3

En la Figura 5-15 se observa como el sistema ha detectado un barco a una distancia biestática de casi 500 m, situado en algún lugar de la nueva elipse formada por transmisor-blanco-receptor; para poder determinar su posición solo queda obtener el ángulo DOA.

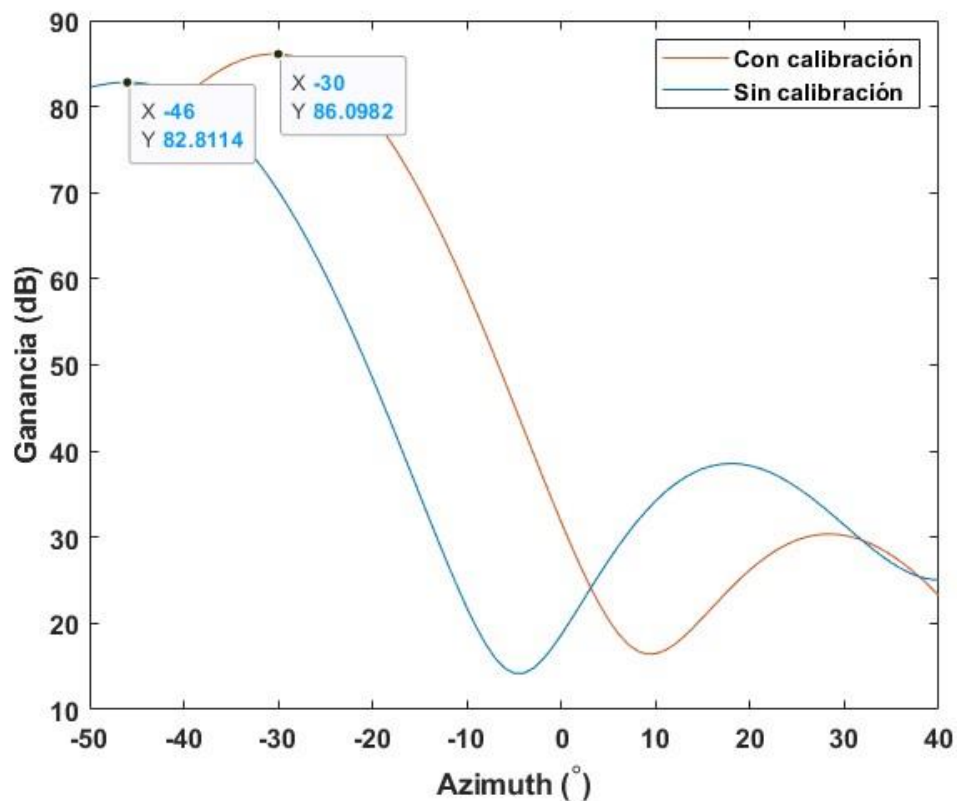


Figura 5-16: Ángulo DOA del blanco 3 (con y sin calibración)

Se obtiene nuevamente una comparativa entre el pico de señal obtenido antes y después de aplicar el algoritmo, con la diferencia en azimut 16° previamente mencionada. Aunque en zonas próximas al radar se puede considerar despreciable, se debe tener en cuenta que el error aumentara de manera proporcional a la distancia.

Los coeficientes de calibración no solo permiten corregir el DOA, sino incrementar la ganancia del lóbulo principal mejorando las propiedades del array.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Comparación de resultados y conclusiones

Este último apartado del Trabajo Fin de Grado pone cierre al proceso de investigación referente a la calibración de un radar pasivo mediante técnicas beamforming. Se expondrán los objetivos establecidos al inicio, así como su satisfactoria realización mediante el estudio y las pruebas de ensayo/error que han ido sucediendo. A su vez, también se expondrán los diferentes impedimentos encontrados a lo largo de su desarrollo, y su resolución mediante alternativas o suposiciones no determinantes a la hora de conseguir los resultados esperados.

6.1.1 Efectividad del algoritmo de calibración

Como epicentro de este trabajo, el algoritmo de calibración empleado para corregir los desajustes del array y obtener gráficas con resultados coherentes, cumple su función de forma satisfactoria.

Los resultados obtenidos antes y después de su aplicación confirman no solo el funcionamiento del mismo, sino su precisión a la hora de detectar contactos de la ría, proporcionando fiabilidad y corrigiendo aquellas desviaciones o errores inherentes en el sistema. Al implementarlo se logra mejorar la uniformidad en la respuesta del array maximizando así la ganancia y directividad del sistema, traducido en una mejor capacidad de detección y seguimiento.

Puesto que el sistema no se mueve físicamente, un diagrama de radiación bien definido permite abarcar un rango bastante amplio (80°) sin que el lóbulo principal se vea afectado por solapamiento, permitiendo así explotar las capacidades del radar al máximo y evitar errores en las mediciones.

Cabe destacar que el algoritmo define unos coeficientes de calibración para un sistema concreto, definido por el emplazamiento, el número y tipo de antenas, longitud de los cables, calidad de los materiales, etc. Esto quiere decir que, si se hiciesen cambios en el sistema, como nuevos cables o actualización de dispositivos, el array requeriría de una nueva calibración, aunque a simple vista pareciera que se tratase del mismo.

Es importante matizar que, si bien este trabajo se centró en la calibración de un array de antenas para radar pasivo, la tarea de calibración es independiente de la frecuencia utilizada, es decir, es independiente del servicio de radiocomunicación al que esté dedicado. Simplemente, la distancia de separación de los diferentes elementos del array debe satisfacer las condiciones de separación típicas de $\lambda/2$ o inferiores para evitar la aparición de los lóbulos posteriores indeseados.

6.1.2 Utilidad de la Transformada de Fourier

El array solo es capaz de detectar cuando las emisiones de la antena emisora TDT rebotan en blancos existentes en la ría y estos rebotes son captados por el array. Esto quiere decir que el rango de frecuencias

en donde trabaja incluye aquel reservado para la emisión de dichos canales y dando a entender que, si se quiere desarrollar un método de calibración con una señal de referencia, esta se debe de encontrar dentro de dicho rango.

En esta parte es donde entra la utilidad de la transformada de Fourier, aunque en verdad se emplee la transformada rápida de Fourier (aproximación válida) que no solo permite identificar la fase de llegada de la señal, sino también discernirla entre el “ruido” generado por los canales; su funcionamiento se centra en procesar la señal dividida entre un número finito de elementos, de forma que a mayor sea dicho número, mayor va a ser su aproximación a su valor intermedio. En otras palabras, un canal de televisión comprende un ancho de banda determinado, en el que los valores de frecuencia oscilan notablemente interpretándose como un valor no constante y por lo tanto, ruido. Cuando se aplica Fourier a un espectro como tal, la tendencia será a que los valores presentes tiendan a aproximarse a un valor intermedio entre sus máximos y sus mínimos. Por el contrario, la señal coseno se trata de una señal pura, con un único valor de frecuencia, lo que significa que su transformada apenas modificará su amplitud dado que no es un valor que oscile.

En conclusión, si se quiere mantener cierto grado de discreción, la señal de referencia puede ir camuflada dentro de un canal, de forma que no sería apreciable dentro del espectro normal. Una vez el rango de muestreo es captado y analizado, se puede hacer uso de Fourier para discernir la señal deseada entre todo el ruido y poder hacer uso de esta sin ningún tipo de problema.

6.2 Líneas futuras

Este trabajo se puede ver como una implementación al radar pasivo desarrollado en la Escuela Naval Militar para la localización de blancos en la ría de Pontevedra, dado que no cumpliría su función de no ser por un algoritmo que le dé la precisión necesaria. A partir de este, se podría desarrollar otros trabajos relacionados en cómo implementar radares pasivos biestáticos en buques de la Armada y, en caso de que este algoritmo no fuera válido, desarrollar otros que sirvan en dichas circunstancias.

Por lo pronto, este no presenta en sí mejoras más allá de su aplicación en radares a tiempo real, dado que el sistema empleado no contaba con la suficiente potencia como para llevar a cabo ese tipo de detección y no se pudo probar en ese escenario. Cabe mencionar que, dado que las frecuencias empleadas para la calibración se encuentran dentro de rangos reservados para canales de radiodifusión DVB-T o TDT, en el caso en que la señal emitida fuera demasiado potente, aparecería en el espectro reservado.

6.2.1 Calibración en amplitud y frecuencia de un array de antenas

En este trabajo fin de grado, se realizó una calibración en fase de un array de antenas que permita corregir los errores de apuntamiento cuando se realizan técnicas de beamforming. Para ello se estima la fase teórica con la que deberían llegar las señales en función del ángulo de llegada, se calculan las fases con las que llega la señal a cada uno de los elementos del array utilizando una señal de ayuda procedente de una baliza y finalmente se corrigen esos desfases.

Una mejora en la calibración de un array de antenas vendría dada por la corrección de las amplitudes de cada elemento del array. Según la ecuación 4-1, que repetimos a continuación:

$$y(t) = |H(f_0)| \cos(2\pi f_0 t + \angle H(f_0)) \quad (6-1)$$

La amplitud $|H(f_0)|$ de la señal recibida en cada uno de los elementos del array debería de ser igual. En caso contrario, se podría realizar una corrección similar a la de fase que permita identificar con mayor precisión blancos que se encuentren al límite en un determinado rango de distancias.

En este Trabajo Fin de Grado, se utilizó el capturador y digitalizador de señal USRP X310 que dispone de hasta 4 canales de entrada (es decir, dispone de capacidad de capturar la señal de un array de 4 elementos). Sin embargo, si se quisiese aumentar la capacidad del dispositivo y no se dispusiese de él, se haría necesario combinar diferentes digitalizadores cuyos osciladores locales siempre tendrán una

cierta deriva sobre su valor teórico. En tal caso, los diferentes términos ω_i de la ecuación 4-5 serían diferentes

$$\begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_L(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_1} e^{j\omega_1 n} \\ e^{j\varphi_2} e^{j\omega_2 n} \\ \vdots \\ e^{j\varphi_L} e^{j\omega_L n} \end{bmatrix} s(n) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\Delta\varphi_2} e^{j\Delta\omega_2 n} \\ \vdots \\ e^{j\Delta\varphi_L} e^{j\Delta\omega_L n} \end{bmatrix} e^{j\varphi_1} e^{j\omega_1 n} s(n) \quad (6-2)$$

y sería necesario su estimación y corrección para una adecuada calibración del array.

6.2.2 Ocultación de la señal mediante correlación

El funcionamiento de la señal GPS se basa en emplear correlaciones a partir de pseudocódigos que permiten detectar la señal transmitida por los satélites a pesar de tener relaciones SNR negativas. Una línea de futuro para el calibrado de un array de antenas podría pasar por la utilización de pseudocódigos para evitar que la potencia de la señal de la baliza tuviese que ser superior en la entrada del array a la señal del sistema a calibrar.

6.2.3 Aplicación en tiempo real y automatización del algoritmo

Desde un punto de vista operativo, puede resultar interesante que el sistema de calibración pueda ser aplicado en tiempo real a partir de una automatización del algoritmo, aunque este tipo de tareas siempre dependerá de la disponibilidad de un Hardware adecuado.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Electromagnetic Radiation», Chemistry LibreTexts. Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation)
- [2] «Instituto de Magnetismo Aplicado (IMA)». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ucm.es/ima/campos-electromagneticos-y-efectos-biologicos>
- [3] «Radiación electromagnética: información básica | Radiansa». Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.radiansa.com/es/radiacion-antenas-alta-frecuencia/radiacion-alta-frecuencia.htm>
- [4] «El Espectro Electromagnético | Decodifica Imágenes enviadas desde la ISS». Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://esero.es/practic-as-en-abierto/decodifica-imagenes-iss/el_espectro_electromagnético.html
- [5] «Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones».
- [6] «ONDAS_EM_CONCEPTOS_BASICOS.pdf». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.uco.es/organiza/departamentos/ing-electrica/documentos/ONDAS_EM_CONCEPTOS_BASICOS.pdf
- [7] P. Turmero, «Principios de las antenas», Monografias.com. Accedido: 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos105/principios-antenas/principios-antenas>
- [8] Dic 15 y 2017 | 2, « Antenas FPV 5.8GHz para Drones de Carreras», MiDrondCarreras. Accedido: 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.midronedecarreras.com/tutoriales/tipos-de-polarizacion-en-antenas-fpv-circular-o-lineal/>
- [9] «Aprendiendo Telecomunicaciones - Facebook». Accedido: 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.facebook.com/AprendiendoTelecom/photos/a.103498621546086/270625848166695/>

- [10] «10.8: Patrón de radiación», LibreTexts Español. Accedido: 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Libro%3A_Electromagnetica_II_\(Ellingson\)/10%3A_Antenas/10.08%3A_Patr%C3%B3n_de_radiaci%C3%B3n](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Libro%3A_Electromagnetica_II_(Ellingson)/10%3A_Antenas/10.08%3A_Patr%C3%B3n_de_radiaci%C3%B3n)
- [11] «¿Cómo funciona una antena?», Electricity - Magnetism. Accedido: 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.electricity-magnetism.org/es/como-funciona-una-antena/>
- [12] «Antena dipolo horizontal y en V invertida», CB27.com. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cb27.com/tecnica/antena-v-invertida>
- [13] antena2013, «Trabajo de antena (yagi)», antena2013. Accedido: 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://antena2013.wordpress.com/2013/11/19/trabajo-de-antena-yagi/>
- [14] «Antena monopolo», hmn.wiki. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://hmn.wiki/es/Monopole_antenna
- [15] «Calidad de recepción de la antena [cerrado] - Electronica». Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://electronica.guru/questions/102898/calidad-de-recepcion-de-la-antena-cerrado>
- [16] «Antena Yagi», Antenas. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://todoantenas.weebly.com/antena-yagi.html>
- [17] «Antenas». Accedido: 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.enacom.gob.ar/antenas_p120
- [18] «Arrays de Antenas», Maam891's Blog. Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://maam891.wordpress.com/2011/05/03/arrays-de-antenas/>
- [19] «FULLTEXT02.pdf». Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1681540/FULLTEXT02.pdf>
- [20] J. A. R. Cruz y J. L. M. Campos, «Antenas y Circuitos de Alta Frecuencia Segunda parte, Tema V», 2007.
- [21] «AGRUPACIONES DE ANTENAS. (ARRAYS)».
- [22] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Formación digital de haces». Accedido: 16 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an33.es.html>
- [23] «Radar biestático», hmn.wiki. Accedido: 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://hmn.wiki/es/Monostatic_radar
- [24] «Radar secundario biestático.pdf». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106103/Radar%20secundario%20biest%C3%A1tico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [25] «Elipsoide para Niños». Accedido: 10 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ninos.kiddle.co/Elipsoide>
- [26] M. Á. P. García, «EL RADAR PASIVO, LA CAPACIDAD DE DETECTAR SIN DEJAR RASTRO».
- [27] leandro68, «RADIO FM», EL CAJÓN DEL ELECTRÓNICO. Accedido: 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://elcajondelectronico.com/radio-fm/>
- [28] «Modulación FM», ingeniatic. Accedido: 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/525-modulación-fm>
- [29] M. Á. P. García, «EL RADAR PASIVO, LA CAPACIDAD DE DETECTAR SIN DEJAR RASTRO».

- [30] «Televisión de R - Wiki de BandaAncha.eu». Accedido: 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://wiki.bandaancha.st/Televisi%C3%B3n_de_R
- [31] «Televisión digital - Dividendo Digital». Accedido: 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://televisiondigital.mineco.gob.es/DIVIDENDODIGITAL/Paginas/dividendo-digital.aspx>
- [32] «Frecuencias y bandas 2G, 3G, 4G y 5G en España - operadores móviles», ADSLZone. Accedido: 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.adslzone.net/operadores/en-detalle/frecuencias-moviles-espana/>
- [33] «Historia sobre LINE ARRAY», Audio Profesional. Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://topaudioprofesional.blogspot.com/2012/11/historia-sobre-line-array.html>
- [34] F. Ibañez Urzaiz, «Contribución a la integración de cabezales de radiofrecuencia y estructuras radiantes para sistemas radar de exploración superficial con configuración de array digital», PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2020. doi: 10.20868/UPM.thesis.66467.
- [35] M. Á. Lagunas y A. I. Pérez-Neira, «ARRAY PROCESSING I: BEAMFORMING Y ESTIMACION DE DIRECCION DE LLEGADA».
- [36] «3.pdf». Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cttc.cat/wp-content/uploads/2022/03/3.pdf>
- [37] «MACHÍN - Beamforming, localización de fuentes sonoras mediante arrays de micrófonos..pdf». Accedido: 29 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/74764/MACH%C3%8DN%20-%20Beamforming%2C%20localizaci%C3%B3n%20de%20fuentes%20sonoras%20mediante%20arrays%20de%20micr%C3%B3fonos..pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [38] «MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico». Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- [39] «EMISORAS DE RADIO DEFINIDAS POR SOFTWARE-SDR-Software defined radio». Accedido: 3 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ea1uro.com/sdr.html>
- [40] M. Malanowski, *Signal processing for passive bistatic radar*. en Artech House radar library. Norwood, MA: Artech House, 2019.
- [41] A. Bonafonte, «Transformada de Fourier».
- [42] M. M. Erić, N. J. Vukmirović, y M. T. Janjić, «Calibration of Local Oscillators Mismatch in a Multi-channel Receiving System».

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

Todo proyecto a realizar implica tener en cuenta una serie de aspectos sociales, económicos y ambientales de forma que no se lleve a cabo sin ningún tipo de control. Se realiza de esta manera para evitar o reducir lo máximo posible los impactos negativos que pueda tener en alguno de los aspectos previamente mencionados, y fomentar aquellas metodologías que aseguran un desarrollo favorable y no dañino. En pleno S. XXI se hace mucho hincapié en el ámbito medioambiental, tanto que se acabó creando el concepto de Desarrollo Sostenible, empleado como herramienta reguladora en la creación y desarrollo de los proyectos de actualidad.

A pesar de tener una connotación principalmente medioambiental, sus efectos se expanden a la sociedad y la economía de un país; con la aprobación de la Agenda 2030 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (AG-ONU) durante la Cumbre de Desarrollo Sostenible celebrada en Nueva York, se establecen una serie de metas comunes para proteger el planeta y garantizar el bienestar de todas las personas. El empleo y desarrollo de la tecnología de los radares, así como otras, se encuentra actualmente ajustada a ciertos parámetros de manera que se pueda mantener un desarrollo sostenible, puesto que trata de una tecnología con cierto impacto en los diferentes ámbitos mencionados al inicio:

- **Implicaciones sociales:** el empleo de radares puede llegar a afectar al funcionamiento de diversos dispositivos electrónicos, especialmente cuando son notablemente potentes, por lo que deberán de presentar una política de emisión dependiendo de la zona donde operen. Cabe destacar la repartición del espectro frecuencial, como es el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) que reserva cada una de las bandas de frecuencia en las que se divide el espectro radioeléctrico designado para las telecomunicaciones en España, y en el que los radares, dependiendo en la frecuencia en la que operen, podrían interferir.
- **Implicaciones económicas:** muchos de los sistemas biestáticos emplean las emisiones de antenas ya existentes, de manera que se reducen los costos de emplazamiento, fabricación y diseño, así como de energía. A su vez, las empresas líderes en tecnología radar, como Indra, favorecen la economía nacional mediante contratos y colaboraciones con otros países, ofertas de empleo, etc.
- **Implicaciones ambientales:** los radares llegan a presentar impacto tanto a nivel atmosférico como visual; la tecnología radar acarrea una huella de carbono (toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera) la cual es reducida lo máximo posible mediante nuevos diseños (ecodiseños), traducido también en una mayor eficiencia energética. Cabe mencionar que el empleo de sistemas biestáticos reduce la cantidad de radiación emitida al medioambiente, debido a que aprovecha la existente. No obstante, el impacto visual que producen los emplazamientos de antenas emisoras/receptoras es algo a considerar.

El avance en la tecnología es lo que permite obtener una mayor eficiencia en el desarrollo de estos sistemas, ajustándose a una serie de medidas acordes con un desarrollo sostenible. Esto se traduce en el empleo de materiales más eficientes y menos contaminantes, diseños más discretos y efectivos, ahorro de energía, etc.

Se debe tener en cuenta que en el desempleo de este campo toman parte numerosos factores que también producen un impacto, como es el transporte, la producción de material, generación de empleo... entre otros. Al final lo que se observa es una especie de círculo de coordinación, en el que todos los factores implicados se encuentran regulados y controlados de manera independiente consiguiendo una sostenibilidad social, ambiental y económica en su conjunto.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La calibración de radares pasivos acarrea consigo una serie de factores éticos y sociales que, aunque no se muestren intrínsecos o de relevancia en un principio, se deben de tener en cuenta debido al ámbito en el que se encuentra integrado. La detección pasiva o biestática implica conocer la posición de blancos o captar emisiones de forma que se aprovecha o se emplea un emisor que no tiene por qué formar parte del sistema (puede ser ajeno) mientras que el receptor cumple su objetivo con una gran ventaja respecto de otros radares, que es la discreción. Puesto que el método de calibración planteado y desarrollado es válido para cualquier tipo de radar pasivo, puede ser aplicado independientemente del objetivo para el que esté diseñado.

Por una parte, el principio fundamental de los radares biestáticos es el de emplearse como método de detección de blancos, principalmente aéreos y marítimos, para controlar el tráfico en una determinada zona. Esto permite llevar a cabo una labor de vigilancia que vele por la seguridad de aquellos que se encuentren transitando, así como el de elaborar registros históricos que permitan ver la evolución del tráfico a lo largo de los años. Además, si las empresas se esfuerzan por mejorar sus radares mediante técnicas de calibración, se entiende como mejoras destinadas a la seguridad y correcta gestión del espacio ocupado. Para entenderlo mejor, se menciona algunos de los ejemplos que tienen lugar en la vida real, como es el control del tráfico aéreo en un aeropuerto para evitar accidentes, o la gestión del tráfico marítimo en las entradas a los puertos o en los Dispositivos de Separación de Tráfico (DST).

Por otro lado, dada la discreción de los sistemas biestáticos, no se descarta su incorporación en el ámbito militar donde dicha ventaja puede ser aprovechada para detectar emisiones o blancos de interés sin que la parte opuesta sea consciente. La discreción es un elemento primordial en la estrategia, por lo que su uso podría estar justificado dado que la defensa de un país empieza por la protección de sus ciudadanos e intereses. No obstante, se debe tener en cuenta que dicho uso también puede adoptar un carácter ofensivo como se puede observar en la tecnología armamentística, concretamente en los misiles.

Muchos de los misiles desarrollados y empleados en la actualidad usan la tecnología pasiva para dirigirse hacia su blanco de manera que este no sea capaz de detectarlo sin que sea demasiado tarde, y cuanto mejor sea su capacidad de discernir, mayor es su efectividad. Esto supone una brecha en la seguridad de las personas dado que las probabilidades de infligir un daño considerable aumentan, agravando la situación si su empleo presenta una connotación más bélica que estratégica.

En resumen, la mejora de los sistemas de radar pasivo mediante técnicas de calibración supone una mayor efectividad en su desempleo. No obstante, la ética se ve comprometida dependiendo del uso que se le dé; el control del tráfico y la seguridad son los dos cometidos más expandidos que envuelven al desarrollo de esta tecnología, dado su uso más frecuente en zonas de alta densidad de tráfico. Por el contrario, se debe tener en cuenta que, aunque en menor medida, se puede volver ofensivo y es ahí cuando la ética debe actuar y controlar dónde y cómo se aplica esta tecnología, dado que no es igual de grave conocer la posición o movimientos que realizan fuerzas opuestas, que causar daño en poblaciones civiles, como está ocurriendo en las guerras que acontecen en el S. XXI.

ANEXO III: ALGORITMO DE CALIBRACIÓN

En este anexo se incluye el algoritmo desarrollado en el entorno MATLAB, el cual ha sido usado para obtener los coeficientes de calibración vistos en los apartados 5.1.1.2 y 5.1.2.2. Además, se explicará en qué consiste cada una de sus partes para una mejor comprensión.

```
load Antenas.mat

%% FILE MANAGING

N = 3 % number of array elements
d = 0.301 % array elements separation
fbeacon = 535800000 %beacon frequency;
angleBeacon = 85*pi/180 %beacon angle (radians);
fc = 538000000; % Channel frequency
fs = 100000000; % Sample frequency
lambda = physconst('LightSpeed')/fc;

numSamples = 50000; % number of samples to process

freq = (-fs/2):(fs/numSamples):(fs/2)-(fs/numSamples); % Frequency axis

% Get and plot signals from data files
for narray=1:N

    % Plot signal spectrum for the elements
    figure,
    signal_spectrum(:,narray) = fftshift(fft(signals(:,narray))); % Compute FFT and
shift the zero frequency to the center
    plot(freq, 10*log10(abs(signal_spectrum(:,narray))))
    antennaId = ["Antena-", num2str(narray)];
    title(antennaId)
end
```

En esta parte se carga el fichero *Antenas.mat* que contiene la información recogida por las antenas, siguiéndole las diferentes variables necesarias para el funcionamiento. En este caso se establece la calibración para tres antenas y la baliza situada a 85° respecto del array. Como se expone en el apartado 4.6.1, el número de elementos a procesar es de 50000 obtenidos del fichero; una vez procesados, cada uno de los espectros recogidos por las antenas se representan mediante la función *plot*.

```
%% CALIBRATION

expected_phases = angle(exp(-j*2*pi*d/lambda*sin(angleBeacon)*[-(N-1)/2:(N-1)/2]))
expected_phases2=(2*pi*d/lambda*sin(angleBeacon).*[-(N-1)/2:(N-1)/2])

% Obtain calibration coefficients
df = fs/numSamples; % frequency resolution

index_freq=round((fbeacon-fc)/df)+numSamples/2+1;

% Extract amplitude and phase

cosine_phases = angle(signal_spectrum(index_freq,:)); % Extract phase angle
cosine_amplitude=abs(signal_spectrum(index_freq,:))
cosine_freq = freq(index_freq) + fc; % Extract the frequency corresponding to the
peak
```

```
coefficients_cal = (exp(1i*(-expected_phases-cosine_phases*fc/fbeacon))).';  
  
expected_phases*180.0/pi  
angle(coefficients_cal).*180.0/pi;  
  
% apply phase corrections  
signals_cal=signals.*coefficients_cal.';
```

Esto último es la parte más relevante del código, pues es la que calcula los coeficientes de calibración y los aplica, obteniendo así la señal corregida que luego será usada para mostrar correctamente los diferentes ecos captados por el array.