

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE
TELECOMUNICACIÓN



Trabajo Fin de Grado

Diseño de arrays de micrófonos para aplicaciones de vigilancia

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Sergio García Sanz

Tutor/es: Manuel Rosa Zurera

2016

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

Trabajo Fin de Grado

Diseño de arrays de micrófonos para aplicaciones de vigilancia

Autor: Sergio García Sanz

Tutor/es: Manuel Rosa Zurera

TRIBUNAL:

Presidente: Roberto Gil Pita

Vocal 1º: Jesús Sánchez Golmayo

Vocal 2º: Manuel Rosa Zurera

FECHA:

Agradecimientos:

En primer lugar, a mi abuelo Zoilo y a tío Mariano que tristemente no pudieron verme terminar esta etapa de mi vida, también a todas esas personas que han estado ahí desde el principio, mis padres, familiares y amigos casi hermanos, a esos buenos amigos que hice Universidad, y en especial a una persona que apareció para darme el empujón que me faltaba para terminar esta bonita etapa, a ti Yaneth.

Resumen

En el proyecto se estudian las técnicas de procesado en array de señales sonoras. Se realiza un estudio de los distintos tipos de array en función de su estructura y geometría, y se describen algunas técnicas para la mejora de la captación de señales, principalmente el método de Beamforming para filtrado espacial, o las técnicas para la determinación de la dirección de llegada (DOA), que se exponen de manera más detallada a lo largo del documento. El bloque de desarrollo termina con un apartado en el que se relacionan los conceptos del procesado en array y las tareas de vigilancia.

El principal objetivo es realizar una aplicación para vigilancia, generando un código en MATLAB implementando estas técnicas, para la detección de señales sonoras y su correspondiente ubicación espacial. La aplicación permite escoger el array deseado y analizarlo en función de su Factor de Array.

Finalmente, se puede encontrar un apartado con simulaciones en el que se detalla la influencia del tipo de array seleccionado y la del número de micrófonos y la distancia entre ellos en el Factor de Array.

Palabras clave

Array, Micrófono, Beamforming, Filtrado Adaptativo

Abstract

The array processing techniques of sound signals are studied in this Project. A study of different kinds of arrays, depending of the structure and geometry is included, and also some techniques to improve signal acquisition, mainly the Beamforming techniques for spatial filtering or techniques for direction of arrival estimation (DOA), are exposed with more detail along the document. The block dealing with development finishes with a section in which the main concepts of array processing in surveillance applications are related.

The main objective is to develop an application for surveillance, generating a code in MATLAB which implements these techniques, for detecting sound signals and the corresponding spatial location. The application allows to choose the desired array and analyse it as a function of the Array Factor.

Finally, a section with simulations can be found, detailing the influence of the selected array class, the number of microphones, and the distance between them in the Array Factor.

Keywords

Array, Microphone, Beamforming, Adaptive Filtering

Resumen extendido

El proyecto se divide en tres partes, la primera de ella es una introducción para aclarar el contexto en el que nos encontramos a la hora de la realización del mismo y para dejar claro algunos aspectos que serán necesarios para el desarrollo de la teoría expuesta más adelante.

En el segundo punto se expone en primer lugar el concepto de array, se comenta su estructura y los tipos de arrays que podemos implementar, más adelante entramos en materia para desarrollar la técnica de Beamforming, imprescindible en el procesado en array para la mejora de la detección de las señales emitidas por fuentes interferentes en los sistemas. En este apartado se incluye también un apéndice acerca de los algoritmos de estimación de la dirección de llegada (DOA), puesto que son de gran ayuda en la estimación de la posición de dichas fuentes interferentes. Para finalizar con la exposición teórica se explica el funcionamiento de un algoritmo de filtrado adaptativo, el algoritmo LMS, y en el último de los apartados del segundo bloque del proyecto se realiza una comparación de todo lo aprendido en estos apéndices con la temática elegida para el desarrollo del proyecto, la vigilancia.

En el tercer apartado se pueden ver multitud de simulaciones, a través de las cuales se explican los conceptos de array y beamforming, los tipos que podemos implementar y los efectos positivos o negativos que causan la variación de algunos parámetros básicos como el número de micrófonos o la distancia entre ellos en el Factor de Array. Estas simulaciones han sido generadas a partir de una GUI diseñada en MATLAB con el objetivo de que cualquier usuario que la empleé pueda realizar un diseño del array que más le convenga en función de las especificaciones de las que disponga. Todos los conceptos asimilados y reafirmados con la realización de esta GUI se explican en el apartado de conclusiones.

Glosario de Acrónimos

GUI – Graphical Usuary Interface

ASA – Auditory Scene Analysis

GSS – Geometric Source Separation

BSS – Blind Source Separation

HRTFs – Head Related Transfer Functions

SONAR – Sound Navigation And Ranging

SNR – Signal to Noise Ratio

FIR – Finite Impulse Response

ULA – Uniform Linear Arra

DOA – Direction Of Arrival

SINR – Signal to Interference plus Noise Ratio

SSR - Signal Strength

TOA - Time Of Arrival

TDOA – Time Difference Of Arrival

RSSI – Received Signal Strength Indication

MV – Minimum Variance

MUSIC – Muliple Signal Classification

ESPRIT – Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques

AV – Auxiliar Vector

CG – Conjugate Gradient

COP – Citerion Of Performance

SOE – Signal Operationg Environment

LPC – Linear Predictive Coding

ANC – Active Noise Control

LMS – Least Mean Square

MSE – Mean Square Error

LSB – Least Significant Bit

DFT – Discrete Fourier Transform

DCT – Discrete Cosine Transform

FFT – Fast Fourier Transform

ISI – Inter-Symbol Interference

RLS – Recursive Least Square

MVDR – Minimum Variance Distortionless Response

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de procesado de señal en array. [16-FIGURA]	10
Figura 2. Array lineal equiespaciado. [20-FIGURA]	12
Figura 3. Margen visible de un array lineal equiespaciado con amplitud uniforme y fase progresiva. [20-FIGURA2]	13
Figura 4. Sistema para la definición de un array de micrófonos.	14
Figura 5. Array de micrófonos captando M fuentes.	18
Tabla 1. Analogía entre Filtrado Espacial (beamforming) y Procesamiento Tiempo-Frecuencia. [23]	20
Figura 6. Beamformer simple. [25-FIGURA]	21
Figura 7. Beamformer Delay&Sum [27]	22
Figura 8. Esquema de un filtro adaptativo. [35-FIGURA].....	25
Figura 9. Identificación de sistemas. [35-FIGURA2]	26
Figura 10. Inversión de sistemas. [35-FIGURA3].....	26
Figura 11. Predicción de señales. [35-FIGURA4].....	27
Figura 12. Cancelación de interferencia multisensor. [35-FIGURA5].....	28
Figura 13. Elementos básicos de filtro adaptativo supervisado. [36-FIGURA].....	28
Figura 14. Implementación de un filtro FIR adaptativo empleando el algoritmo LMS. [37-FIGURA]	30
Figura 15. Estructura del dominio transformado del filtro adaptativo LMS. [39-FIGURA]	32
Figura 16. Estructura de filtrado adaptativo de bloqueo. [39-FIGURA2].....	33
Figura 17. Modelo de transmisión de datos de un sistema full-duplex que emplea canceladores de eco en los módems. [40-FIGURA]	34
Figura 18. Diagrama de bloques para investigación del rendimiento del cancelador de eco adaptativo. [40-FIGURA2].....	34
Figura 19. Diagrama de bloques para investigación de un ecualizador adaptativo. [40-FIGURA3].....	35
Figura 20. Pantalla inicial.	39
Figura 21: Tipo de array.	40
Figura 22. Array Plano.....	40

Figura 23. Array Lineal.....	41
Figura 24. Array Lineal Equiespaciado(izquierda) y Array Lineal ULA(derecha) .	41
Figura 25. Diferencias de Pesos en los arrays equiespaciado y ULA.	42
Figura 26. Representación de arrays en el eje de coordenadas ‘X , Y , Z’.....	42
Figura 27. Factor de Array, “Array Lineal ULA”.	43
Figura 28. Interfaz de selección de tipo de array para “Array Lineal Equiespaciado”.	44
Figura 29. Selección del tipo de “Array Lineal Equiespaciado” deseado.	44
Figura 30. Selección de array plano.....	45
Figura 31. Factor de Array del Array Plano.	46
Figura 32. Selección de Array Lineal.	46
Figura 33. Array Lineal ULA en el eje de coordenadas	47
Figura 34. Factor de Array del Array Lineal ULA.	47
Figura 35. Array Lineal Equiespaciado en el eje de coordenadas.....	48
Figura 36. Factor de Array del Array Lineal Equiespaciado.....	48
Figura 37. Factor de Array para un Phased Array con Alfa distinto de 0.	49
Figura 38. Factor de Array para un Array Endfire con Theta_max 60°.	50
Figura 39. Array Plano para 6 micrófonos.	52
Figura 40. Factor de Array del Array Plano para 6 micrófonos.	52
Figura 41. Array Lineal ULA para 6 micrófonos.	53
Figura 42. Factor de Array del Array Lineal ULA para 6 micrófonos.....	53
Figura 43. Array Lineal Equiespaciado para 6 micrófonos.....	54
Figura 44. Factor de array del Array Lineal Equiespaciado para 6 micrófonos.....	54
Figura 45. Array Plano para una distancia de 2 lambda.	56
Figura 46. Factor de Array del Array Plano para una distancia de 2 lambda.....	56
Figura 47. Array Lineal ULA para una distancia entre micrófonos de 2 lambda	57
Figura 48. Factor de Array de Array Lineal ULA para una distancia de 2 lambda.	57
Figura 49. Array Lineal Equiespaciado para una distancia de 2 lambda.....	58
Figura 50. Factor de array del Array Lineal Equiespaciado para una distancia de 2 lambda.....	58
Figura 51. Valores iniciales.	67
Figura 52. Tipo de Array Lineal.	68
Figura 53. Tipo de Array Plano.	68

Figura 54. Tipo de Array Lineal Equiespaciado.....	69
Figura 55. Valores de Array Lineal Equiespaciado.....	69
Figura 56. Matriz generada de Array Lineal Equiespaciado.	70
Figura 57. Gráfica del eje de coordenadas de Array Lineal Equiespaciado.....	70
Figura 58. Tipo de Array Lineal a implementar.	71
Figura 59. Gráficas Factor de Array para Phased Array.	72
Figura 60. Valores de Array Lineal ULA.	72
Figura 61. Matriz y gráfica del eje de coordenadas de Array Lineal ULA.	73
Figura 62. Gráficas Factor de Array para Array Lineal ULA.	73
Figura 63. Pantalla de Array Plano.....	74
Figura 64. Valores y gráfica del eje de coordenadas de Array Plano.....	74
Figura 65. Gráficas Factor de Array para Array Plano.....	75

Índice General

Agradecimientos.....	I
Resumen.....	II
Palabras clave.....	II
Abstract.....	III
Keywords	III
Resumen extendido.....	IV
Glosario de acrónimos.....	V
Índice de Figuras.....	VII
1.-Introducción	3
1.1.-Objetivos y motivación	3
1.2.-Planteamiento.....	7
1.3.-Definiciones básicas.....	7
2.-Desarrollo.....	9
2.1.-Arrays.....	9
2.1.1.-Arrays lineales	11
2.1.2.-Arrays planos	13
2.1.3.-Respuesta de un array de micrófonos ante una o varias fuentes sonoras.....	14
2.2.-Beamforming	19
2.2.1.-Beamformer Delay&Sum (Retardo&Suma).....	22
2.2.2.-Estimación de la dirección de llegada.....	22
2.3.-Filtrado adaptativo	24
2.3.1.-LMS	29
2.4.-Aplicación al procesado de sonido.	35
3.-Simulaciones	39
3.1.-Presentación de la aplicación.	39
3.2.-Comparación de arrays	45

3.3.-Efecto del incremento del número de micrófonos	51
3.3.-Efecto del incremento de la distancia entre micrófonos	55
4.-Conclusiones	60
5.-Pliego de condiciones	61
5.1.- Objetivos y campo de aplicación	61
5.2.- Descripción del trabajo	61
5.3.- Metodología y plan de trabajo	61
5.4.- Medios.....	62
6.-Presupuesto	63
6.1.- Introducción	63
6.2.- Coste de ejecución material	63
6.2.1.- Coste de la mano de obra.....	63
6.2.1.1.- Relación de salarios	64
6.2.1.2.- Cargas por obligaciones sociales	64
6.2.1.3.- Salarios efectivos	65
6.2.1.4.- Coste final de la mano de obra.....	65
6.2.2.- Costes de la amortización del material empleado.....	65
6.2.3.- Coste total de ejecución material	65
6.3.- Honorarios del ingeniero.....	65
6.4.- Coste total del proyecto	66
7.-Manual de usuario.....	67

1.-Introducción

1.1.-Objetivos y motivación

El objetivo fundamental de este TFG es revisar los conocimientos sobre arrays de micrófonos y los algoritmos sobre conformación del haz, para estudiar y proponer posibles aplicaciones relacionadas con la vigilancia. En este sentido, deberán estudiarse las características propias de los arrays de micrófonos, los límites de sensibilidad en función de la frecuencia y las técnicas y algoritmos que podrían utilizarse para mejorar la sensibilidad.

Las aplicaciones que se abordarán en este Trabajo Fin de Grado, se pueden encuadrar en el problema común de “Análisis de Escenas Auditivas” (ASA - Auditory Scene Analysis). El procesado digital de señales encuentra en el Análisis de Escenas Auditivas una manera de emular el comportamiento cerebral respecto a su capacidad para reconocer sonidos a partir de descripciones mentales separadas efectuadas sobre diferentes eventos en un entorno determinado [1]. Entre las aplicaciones de las técnicas ASA, podemos encontrar:

- Emulación de la audición en prototipos robotizados:
 - En [2] se propone un sistema que proporciona a un robot móvil la capacidad de separar fuentes de sonido simultáneas, se emplea un array de micrófonos a lo largo de una implementación en tiempo real dedicada a Separación Geométrica de fuentes, GSS (Geometric Source Separation), y un filtro posterior que proporciona reducción en la interferencia de otras fuentes. La principal ventaja de esta aplicación para robots móviles es que tanto el algoritmo GSS en el dominio frecuencial como el filtro posterior son capaces de adaptarse rápidamente a nuevas fuentes y a la no estacionariedad.
 - En [3] se propone el diseño a partir de beamforming, el algoritmo se basa en un proceso previo de beamforming y un algoritmo de Separación de Fuente Ciega, BSS (Blind Source Separation), empleando un criterio de separación por dispersión. Antes de la realización de BSS, se filtran las salidas de los sensores con los filtros de beamforming para reducir la reverberación y el ruido ambiental. Ya que es difícil el modelado del array, se utilizan funciones de transferencia ya medidas, HRTFs (Head Related Transfer Functions), para estimar los filtros de beamforming.

- Localización de fuentes sonoras en sistemas de seguridad:
 - En [4] se describe el diseño, la implementación y la evaluación de una red acústica basada en sensores para un sistema de vigilancia o supervisión del estacionamiento. El sistema emplea sensores equipados con micrófonos de bajo coste para localizar eventos acústicos como una el sonido de una alarma de un coche o el de un choque entre vehículos. Una vez que el evento está localizado, se ajustan las cámaras para estimar la localización para supervisar y registrar la situación ocurrida.
 - En [5] se describe un sistema de vigilancia basado en la localización de fuentes por arrays de micrófonos. Los sistemas de vigilancia de audio y video están yendo hacia diseños de detección autónoma. El diseño de arrays de micrófonos es una cuestión importante en la precisión de localización de fuentes, para aplicaciones de vigilancia se implementan algoritmos de beamforming para incrementar el rendimiento del seguimiento y la detección.
- Equipos SONAR para sistemas de navegación: [6]

La actual generación de sistemas SONAR (SOund Navigation And Ranging) emplean una alta resolución tanto temporal como espacial para alcanzar un rendimiento operacional aceptable. Esto, junto con los mecanismos físicos de propagación acústica en el océano, generan una serie de limitaciones para implementar sistemas de beamforming para SONAR:

1. Las bajas frecuencias de operación SONAR y el uso de gran ancho de banda de procesamiento, requieren la implementación de técnicas de beamforming que empleen retardos temporales verdaderos en lugar de retardos de fase.
2. Se requieren grandes arrays de sensores para una alta resolución espacial y para que el sistema de beamforming sea capaz de formar y procesar el gran número de haces dirigidos de manera independiente, y en paralelo para lograr una buena resolución angular.

3. Los arrays de sensores a menudo están ubicados en plataformas móviles (barcos de superficie) y los efectos del movimiento de la plataforma en el array de datos se deben considerar si se desea mantener la resolución.
 4. Las geometrías de los arrays empleados están, a veces, limitadas por los requerimientos de la plataforma, en lugar de por los del SONAR, lo que provoca que los sistemas de beamforming para SONAR deben ser capaces de procesar datos de diversas geometrías de array.
- Localización de hablantes en entornos de videoconferencia:
 - En [7] se describe el algoritmo de localización de fuentes de voz empleado en el sistema de apuntamiento automático de cámara, PictureTel. El sistema emplea un array de 46cm de ancho y 30cm de largo, que contiene cuatro micrófonos y se sitúa en la parte superior del monitor. Las tres posiciones espaciales de una fuente de sonido se calculan a partir de los retardos temporales de los cuatro pares de micrófonos. En la estimación del retardo temporal el promedio del inicio de señal de cada banda de frecuencia se combina con la correlación de fase para reducir la influencia del ruido y la reverberación, con este análisis es posible proporcionar una buena localización de fuentes en tres dimensiones con un pequeño array de micrófonos. También se introduce un procesado a posteriori basado en conocimientos a priori para eliminar la influencia de las reflexiones por el mobiliario.
 - En [8] se describe la aplicación específica de algoritmos de localización de fuentes para la estimación de la posición de fuentes (considerándolas como los hablantes) en un entorno real con recursos computacionales limitados a partir de los arrays de micrófonos orientables electrónicamente. Estos arrays tienen una gran variedad de usos en sistemas de adquisición de datos de voz, como la teleconferencia, el reconocimiento del lenguaje y del hablante, la captura de sonidos en entornos adversos y los dispositivos biomédicos para discapacitados auditivos. Un array de micrófonos puede ser electrónicamente programado para proporcionar una señal de alta calidad desde una fuente de sonido deseada, mientras, de manera simultánea, se atenúan las interferencias de los hablantes y del ruido ambiente, sin ser necesario el movimiento físico para alterar la dirección de recepción.

Además, el array cuenta con las capacidades de detección automática, localización y seguimiento de hablantes activos en su área de recepción.

La efectividad de estas técnicas dependerá en gran medida de las condiciones de propagación del sonido en el medio, de la cantidad de señales (fuentes sonoras) involucradas, de los dispositivos destinados a realizar los algoritmos de procesado ideados y de las características del sensor elegido para la captación del sonido. Desde este punto de vista, el diseño de agrupaciones de micrófonos (arrays), que permitan implementar sensores directivos, será el objetivo fundamental de este trabajo.

Las consideraciones geométricas para la distribución de los micrófonos se han estudiado ligadas al entorno de aplicación, por ejemplo, en [9,10]. En el primero de los casos, se realiza un estudio general en aplicaciones de vigilancia, con el análisis de los principales algoritmos que se suelen utilizar. En el segundo de los casos, se estudia el diseño y desarrollo de dos arrays de micrófonos direccionales para realizar test aeronáuticos.

En este Trabajo, a partir del estudio de las técnicas de procesado en array y del diseño de arrays de micrófonos, abordamos el siguiente problema: ¿Cómo realizar una implementación en tiempo real para efectuar localización pasiva y posterior seguimiento de una fuente acústica, utilizando un array simple de micrófonos como dispositivo de captación de señales?

La elección de los algoritmos y la geometría del array de micrófonos a emplear dependen, en gran medida, de la viabilidad de la implementación práctica con el hardware disponible y de los resultados obtenidos en las condiciones acústicas del medio en el que se aplicará el array de micrófonos.

Todos estos aspectos serán estudiados en los siguientes capítulos de este trabajo fin de grado:

En primer lugar, se presenta este apartado de introducción en el que se trata de exponer en que consiste el TFG y los objetivos a conseguir con la realización del mismo. También en la introducción se incluye un apartado de definiciones básicas, que son necesarias para comprender algunos conceptos que se van introduciendo a lo largo del documento.

En la segunda parte entramos ya en materia, consiste en un desarrollo puramente teórico sobre arrays y sobre las técnicas usadas para mejorar su rendimiento, como el beamforming

y los algoritmos adaptativos. El último punto de este apartado trata sobre la aplicación de dichas técnicas en el campo del sonido que es el de nuestro interés.

En la tercera parte se presenta la relación de la teoría expuesta en la segunda parte con las simulaciones obtenidas del programa que se ha generado, no se analizará en detalle el código puesto que para ello se añade el octavo apartado, Manual de usuario, en el que se podrá encontrar una guía con los pasos a seguir para manejar la GUI realizada.

En la cuarta parte se encuentran las conclusiones obtenidas sobre la teoría de arrays y la posible aplicación al campo de la vigilancia, todo ello a partir de los datos experimentales que se obtienen con la generación del código.

Respecto a la memoria en sí misma ya tendríamos todos los apartados expuestos, pero además se añaden varios apartados que completan el contenido de la misma, como son el quinto apartado que contiene el Pliego de condiciones, el sexto que contiene el Presupuesto y el séptimo que como ya se ha comentado corresponde al Manual de usuario.

1.2.-Planteamiento

Con el Trabajo de Fin de Grado que se propone, se pretende realizar un estudio de la posible aplicación de las técnicas de procesado en array de micrófonos, a tareas de vigilancia. Entre las aplicaciones consideradas está la detección de sonidos impulsivos que constituyan alarmas en entornos de vigilancia, como pueden ser la rotura de cristales, disparos, gritos, etc. Mediante la aplicación de técnicas de conformación de haz (beamforming) se podrá realzar la señal mediante filtrado espacial.

1.3.-Definiciones básicas

- Array: Se define como un conjunto ordenado de elementos (micrófonos en nuestro caso) dispuestos con una determinada geometría cuyo objetivo es sintetizar un diagrama de radiación, para mejorar la comunicación es imprescindible la propiedad de directividad.

Se define un array como una agrupación de antenas (micrófonos en nuestro caso), todas ellas alimentadas de manera común, que radian y reciben por tanto de modo conjunto. La alimentación se realiza de forma adecuada para obtener el diagrama de radiación deseado. Con ellos se consigue simular distribuciones continuas de corriente, normalmente en fase,

discretizándolas espacialmente y asignando los valores obtenidos de amplitud y fase a cada elemento del array. [11]

- Directividad: Se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia, y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia una antena isótropa, a igualdad de potencia total radiada.

Ésta magnitud representa la capacidad que tiene una antena (array de micrófonos en este caso) de concentrar la intensidad de radiación en una determinada dirección del espacio, considerando el resto de direcciones como interferencias, para establecer la dirección de apuntamiento del array en la del máximo recibido.

Su valor es mayor cuanto más estrecho sea su haz principal y por su propia definición debe ser siempre mayor que uno o igual cuando nos encontramos en el caso ideal de antena isótropa. [12]

- Beamforming: Es una técnica de conformación de haz que consiste en sintetizar un diagrama de radiación de un array de antenas, para seleccionar la dirección de máximo apuntamiento gracias a la directividad. El beamforming es una técnica de procesado de señal en la que se produce una mejora de la señal principal mediante combinaciones lineales de las diferentes salidas de cada uno de los micrófonos del array, de tal manera que las perturbaciones indeseadas se atenúan por la directividad.

Mediante el beamforming un receptor puede discriminar entre diferentes señales incidentes, dependiendo de cuál sea la localización espacial de las mismas. Si apuntamos el eje de máxima captación de un array hacia la fuente deseada se estará atenuando la señal procedente de otras fuentes no situadas en dicho eje, y que se consideran como fuentes de ruido.

- Factor de array: Es el diagrama de radiación de una agrupación de elementos isotrópicos. [13]

El factor de array depende del número de elementos, del espaciado entre ellos y de la amplitud y la fase aplicada a cada uno de los elementos. El número de elementos y el espaciado entre ellos determinan el área de superficie radiante, lo que se conoce como *apertura*. Con aperturas grandes se consiguen ganancias grandes. [14]

2.-Desarrollo

El TFG se desarrollará a partir de la teoría de arrays, de los algoritmos de beamforming y del filtrado espacial, en este apartado del proyecto se van a describir con detalle estos conceptos y a relacionarlos las fuentes de sonido.

2.1.-Arrays

El primer enfoque para llevar a cabo el procesamiento espacio-temporal de datos muestreados para un array de sensores fue el filtrado espacial o beamforming. El Beamforming convencional (Barlett) data de la Segunda Guerra Mundial y es una mera aplicación de análisis espectral basada en Fourier. Más adelante se aplicaron beamformers adaptativos y técnicas clásicas de estimación de retardo temporal para mejorar la capacidad de resolver las fuentes de señal muy próximas entre sí. El filtrado espacial sufre algunas limitaciones, en particular, su dependencia directa con el tamaño físico del array, es decir, con la apertura, independientemente de la información temporal disponible y de la relación señal a ruido SNR (Signal to Noise Ratio). Desde un punto de vista estadístico, las técnicas clásicas se pueden ver como una extensión espacial del filtrado espacial de Wiener. El objetivo por excelencia del procesamiento de señal para arrays de sensores es la estimación de parámetros fusionando información temporal y espacial, capturados a través del frente de onda de muestreo con un conjunto de sensores minuciosamente colocados. Se asume que el frente de onda es generado por un número finito de emisores y contiene información sobre los parámetros de caracterización de la señal de estos emisores. [15]

Un array de micrófonos consiste en un conjunto de micrófonos situados de forma que se capte correctamente la información espacial. La diversidad espacial es representada por la respuesta al impulso acústica de una fuente radiante hacia los sensores. Los canales acústicos se modelan como filtros de respuesta al impulso finita FIR (Finite Impulse Response), y normalmente no son idénticos por lo que surge un problema que es cuando los filtros FIR poseen ceros comunes. La información disponible gracias a la diversidad necesita de un procesamiento, por lo que el principal objetivo del procesamiento de señal en array de micrófonos es la estimación de determinados parámetros o la extracción de algunas señales de interés usando la información espacio-temporal disponible a la salida del array de micrófonos. Dependiendo de las aplicaciones la geometría del array puede suponer un papel importante en la formulación de los algoritmos de procesamiento, por ejemplo, para localización de fuentes, la geometría del array debe ser conocida para poder localizar correctamente una fuente, a veces una geometría regular puede simplificar el problema, cuando se usan arrays uniformes,

ya sean lineales o circulares. Gracias al empleo de arrays de micrófonos se pueden solventar muchos problemas como por ejemplo la reducción de ruido, eco o reverberación, la estimación del número de fuentes o la localización de una o múltiples fuentes y la separación entre ellas. [16]

En la siguiente imagen, Figura 1, se pueden apreciar estos problemas que solucionan los arrays de micrófonos, se observa como cada micrófono recibe respectivamente una señal $y_i(k)$, que es la adición de la señal deseada $s(k)$ y el conjunto de señales interferentes que se generan en el entorno, como el eco, la reverberación, la interferencia de otro hablante y el ruido. En el array se reciben en total $y_k(k)$ señales, tantas como micrófonos tenga el array, que se procesan para obtener la señal $z(k)$ que es la señal de salida generada, que es el resultado de discriminar el conjunto de interferencias y atender a la señal deseada $s(k)$.

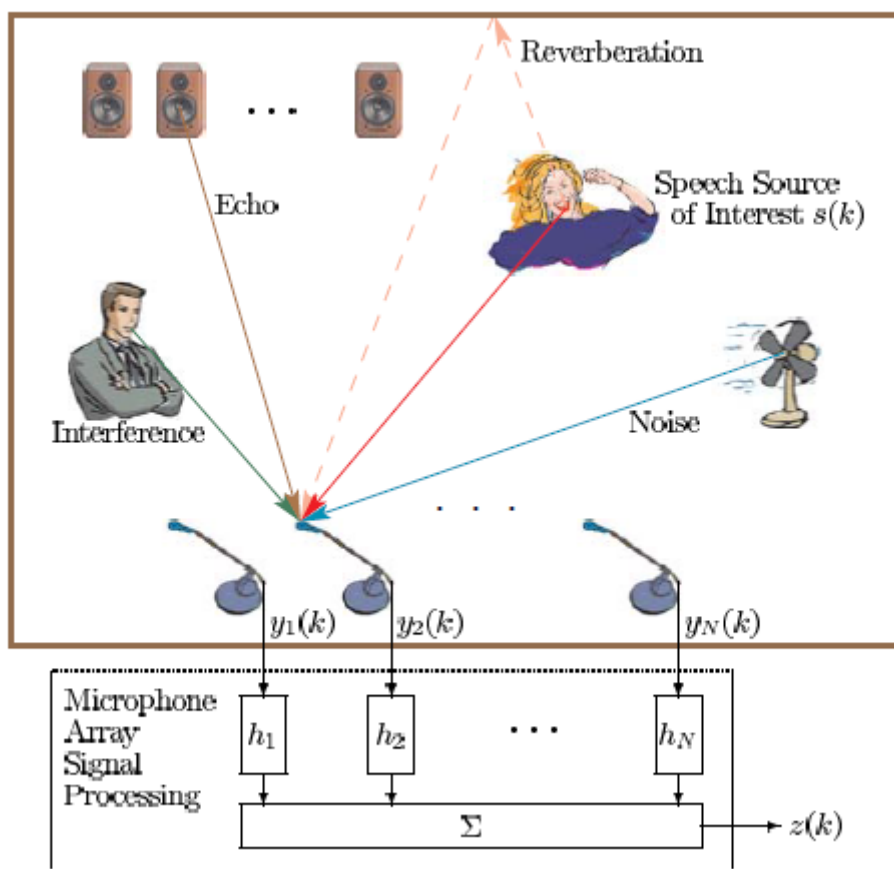


Figura 1. Esquema de procesado de señal en array. [16-FIGURA]

El array proporciona diversidad espacial, lo que es útil en presencia de desvanecimientos multitrayecto, aunque su característica principal es la capacidad para cancelar interferencias, el objetivo del uso de arrays es configurar un diagrama de radiación combinando las señales de las diferentes antenas que emiten (señal deseada e interferencias) mediante unos pesos adecuados. [17]

El problema fundamental en el procesado de señal en array es determinar la localización relativa de una fuente de energía emisora con respecto al array. Es interesante la estimación de la dirección de llegada de una señal en presencia de ruido y señales interferentes, los arrays de antenas abordan este problema explotando la separación espacial en las posiciones donde se originan la señal deseada y las interferentes. Éstas señales interferentes no son otras que las emitidas por fuentes que no se consideran para el diseño, es decir, existe una fuente que es la que genera el máximo de radiación en el diagrama de radiación del array, debido a la directividad, y las demás fuentes de las que se recibe señal se consideran fuentes interferentes. [18]

Existen muchas clasificaciones para los arrays, la más sencilla es atendiendo a su geometría, así, podemos encontrar tres grupos:

- Arrays lineales: Los elementos se sitúan en una recta, pudiendo estar equiespaciados o no.
- Arrays planos: Los elementos se sitúan sobre un plano, los más utilizados son los circulares y reticulares.
- Arrays tridimensionales: Los elementos se sitúan sobre un volumen, los casos más importantes son los semiesféricos. [19]

En los apartados siguientes se va a exponer un análisis más detallado de los arrays lineales y de los arrays planos circulares. El caso más sencillo de analizar es cuando los micrófonos del array están equiespaciados y alimentados uniformemente en amplitud y fase, pero también se describirán casos en los que se cumpla esta uniformidad.

2.1.1.-Arrays lineales

Se define un array lineal como la agrupación de antenas dispuestas en una línea recta a lo largo de un eje, que suele ser el eje z . Si las antenas se sitúan a una misma distancia se catalogan como arrays lineales equiespaciados y si las antenas están alimentadas con la misma amplitud y fase se exponen como arrays lineales uniformes, conocidos como ULA (Uniform Linear Array). [20]

En la Figura 2 se observa la disposición de un Array lineal equiespaciado, con una separación d constante entre los elementos, donde N es el número total de elementos dispuestos a lo largo del eje z .

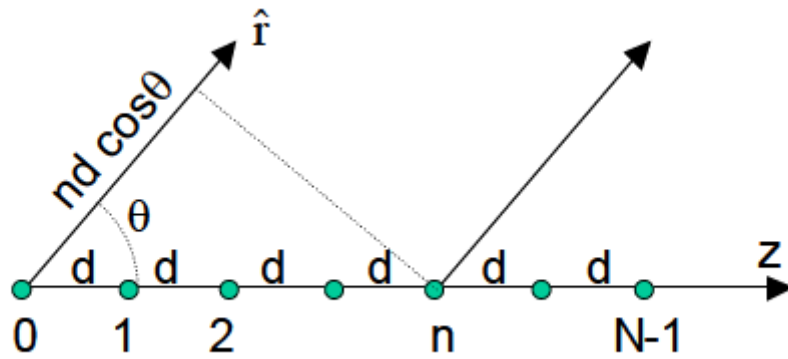


Figura 2. Array lineal equiespaciado. [20-FIGURA]

Si tratamos el caso de arrays lineales equiespaciados, los diagramas de radiación de cada elemento del array serán iguales y los elementos estarán orientados en la misma dirección del espacio por lo que el diagrama de radiación de la agrupación se puede obtener como el producto del factor de array por el diagrama de radiación del elemento.

Respecto a la amplitud y a la fase se tienen dos tipos, el primero de ellos es el array uniforme en amplitud y fase (ULA), mediante el cual se obtiene una expresión cerrada para el factor de array, de tipo sinc periódico, ya que todas las corrientes son de idéntica alimentación para todos los elementos. En esta expresión de tipo sinc periódico se tiene que la anchura del lóbulo principal en el espacio real es inversamente proporcional a la longitud total del array que es $N*d$, donde N es el número total de elementos del array y d es la distancia entre cada uno de ellos. Con este argumento se establece que los diagramas obtenidos dependerán principalmente de la longitud del array, en lugar de depender exclusivamente del número de elementos empleado.

El segundo tipo es el array con amplitud uniforme y fase progresiva, es decir, se tienen estos arrays cuando la alimentación en fase no es uniforme, sino que tiene presente saltos de fase constante entre cada dos elementos consecutivos, por lo que se tiene una variable más que proporciona la capacidad de ajustar la dirección de apuntamiento del lóbulo principal del array. Aparece un nuevo concepto, el de Margen visible, que es el factor de array que pertenece al diagrama de radiación en el espacio real.

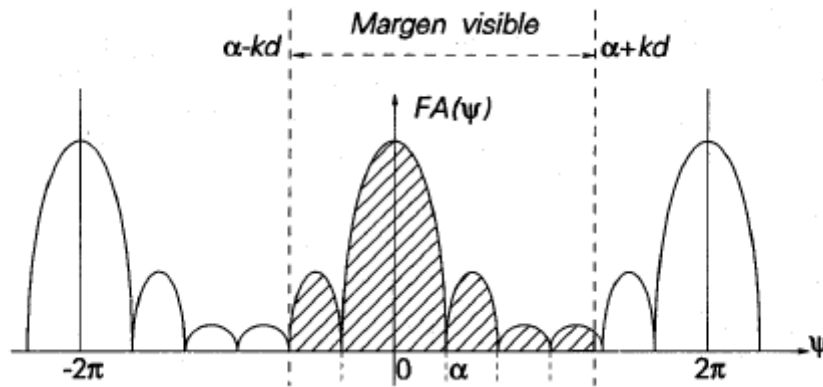


Figura 3. Margen visible de un array lineal equiespaciado con amplitud uniforme y fase progresiva. [20-FIGURA2]

En la figura 3 se puede observar el margen visible en un array de fase progresiva, que está comprendido entre los valores " $\alpha \pm kd$ ".

Los arrays de fase progresiva a su vez se pueden dividir según la dirección de apuntamiento en tres tipos:

- Array broadside: Tiene el máximo de radiación en el plano perpendicular al array.
- Array de exploración: Apunta a una dirección variable fijada por el salto de fase.
- Array endfire: Tiene el máximo de radiación en el eje del array. En este caso el diagrama de radiación es de tipo pincel.

Es posible que aparezcan lóbulos emergentes cuando la separación y/o el salto de fase superan determinados valores, se les denomina *grating lobes*, lo que es importante debido a que su aparición puede provocar desajustes en la determinación de la longitud del array, por lo que es necesario reducir el margen habitual de separaciones entre elementos para arrays broadside ($0.6-0.8\lambda$) y para arrays endfire ($0.4-0.45\lambda$).

2.1.2.-Arrays planos

Se define un array plano como la agrupación de antenas dispuestas en un plano, el tipo de array plano que se va a describir es el array circular, en el que los elementos se disponen alrededor de una circunferencia. Proporcionan una gran ventaja respecto a los arrays lineales y es su versatilidad, ya que con arrays planos se pueden obtener diagramas de radiación que apunten en cualquier dirección del espacio.

2.1.3.-Respuesta de un array de micrófonos ante una o varias fuentes sonoras

En primer lugar, se va a realizar un análisis de la respuesta de un array ante una única fuente, basándolo en la Figura 4. [21, 22]

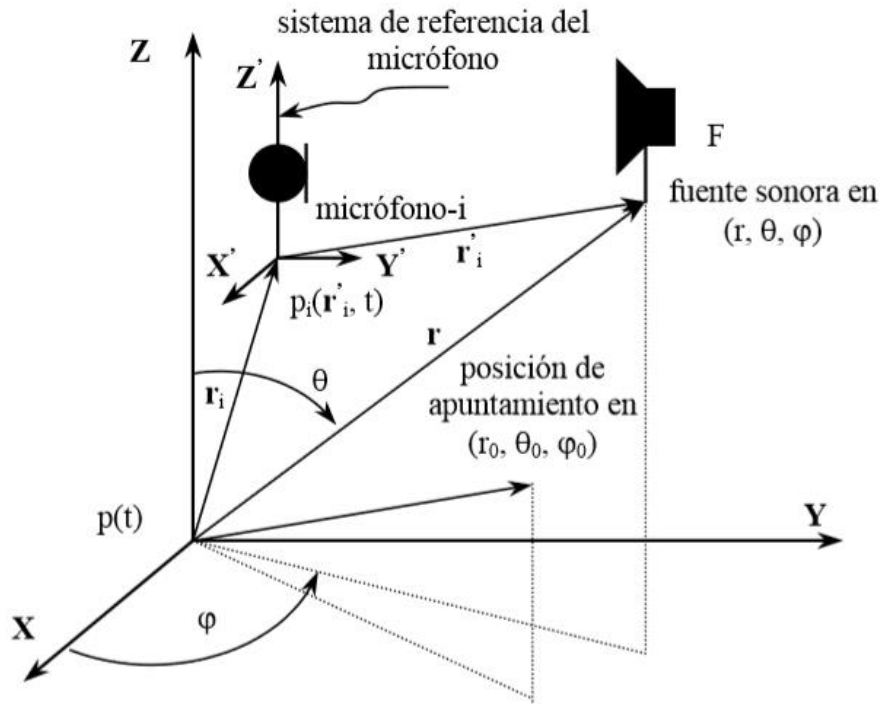


Figura 4. Sistema para la definición de un array de micrófonos.

En el modelo de la Figura 4, se observa solamente una fuente emisora y un solo receptor con sus respectivos puntos característicos. El vector de posición del micrófono i es r_i , el vector de posición del emisor es r'_i relativo al micrófono y, por último, el vector r es el vector de posición de la fuente, cumpliéndose la ecuación $r'_i = r - r_i$. El sistema de referencia del micrófono es necesario para poder definir la posición de la fuente y lo forman las coordenadas $(X' Y' Z')$, que corresponde al sistema de referencia principal $(X Y Z)$ desplazado en el vector de posición del micrófono, r_i . La fuente sonora omnidireccional F , situada en el punto de coordenadas esféricas (r, θ, φ) , está siendo captada por uno de los micrófonos que componen el array, diseñado para apuntar a la posición $(r_0, \theta_0, \varphi_0)$ y se considera dentro del eje de máxima captación del array. La posición de apuntamiento del array se conoce como DOA (Direction Of Arrival). Las principales técnicas DOA para la estimación del ángulo de llegada se estudiarán en el siguiente apartado. La fuente genera una onda senoidal de presión acústica $p(t)$ en el centro de coordenadas, la señal se considera libre de perturbaciones acústicas y se define mediante la siguiente ecuación:

$$p(t) = p_0 e^{j(\omega t + \phi)} \quad (1)$$

En esta ecuación p_0 es el valor eficaz de la presión acústica, ω la pulsación de la vibración acústica producida por la fuente y ϕ la fase inicial de la fuente. Sólo se va a analizar el camino director de transmisión, es decir, el camino desde la fuente hacia el micrófono. La fuente desde ese punto crea una perturbación esférica en el micrófono i (ya que se ha definido como omnidireccional) que estará relacionada con la presión en el centro de coordenadas por la ecuación:

$$p_i(r'_i, t) = p(t) \frac{r}{r'_i} e^{-jk(r'_i - r)} \quad (2)$$

Donde k es el número de onda de la transmisión acústica en el aire y se define como: $k = \omega/c$, siendo c la velocidad del sonido.

El siguiente punto de análisis es cuando la onda llega al micrófono i y se genera una señal de salida $x_i(t)$ mediante la siguiente ley:

$$x_i(t) = S_i D_i(\theta'_i, \varphi'_i) p_i(r'_i, t) = S_i D_i(\theta'_i, \varphi'_i) p(t) \frac{r}{r'_i} e^{-jk(r'_i - r)} \quad (3)$$

Donde S_i [V/Pa] es la sensibilidad del micrófono i a la pulsación ω , $D_i(\theta'_i, \varphi'_i)$ es la directividad del micrófono i , con θ'_i, φ'_i los ángulos en coordenadas esféricas de elevación y azimut que determinan la posición de la fuente con respecto al micrófono i .

Se denomina eje del micrófono a su dirección de máxima captación, normalmente será cuando $\theta'_i = 0, \varphi'_i = 0$. En éste eje, la característica de directividad del micrófono $D(\theta, \varphi)$ expresa la variación de la respuesta eléctrica en función de la posición de la fuente (r, θ, φ) , respecto a la respuesta que tendría si la fuente se situase en la posición de apuntamiento $(r_0, \theta_0, \varphi_0)$, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{x(r, \theta, \varphi)}{x(r_0, \theta_0, \varphi_0)} \quad (4)$$

Con $x(r, \theta, \varphi)$ la respuesta del micrófono a una fuente situada en (r, θ, φ) y con $x(r_0, \theta_0, \varphi_0)$ la respuesta a una fuente situada en la posición de apuntamiento, como se había representado en la Figura 4. En la Ecuación 4 no se muestra la relación de la directividad D

con la distancia r debido a que en la práctica esta dependencia sólo existe cuando la distancia es comparable al tamaño del receptor.

Se va a considerar un micrófono como referencia, situado en el eje coordenado y sus índices son 0, así las coordenadas de la fuente F cumple que $(r, \theta, \varphi) = (r'_0, \theta'_0, \varphi'_0)$. En la posición $(r'_0, \theta'_0, \varphi'_0)$ el subíndice 0 corresponde al índice del micrófono de referencia, como se comentó anteriormente, y no a la posición de apuntamiento $(r_0, \theta_0, \varphi_0)$. El micrófono considerado como referencia puede no ser un micrófono de los que conforman el array, ya que se utiliza como herramienta para establecer las definiciones. A este micrófono se le supone una sensibilidad S_0 y es omnidireccional, por lo que $D_0(\theta, \varphi) = 1$. Se va a analizar el efecto que tendría que éste micrófono de referencia recibiese la onda de presión $p(t)$ descrita anteriormente en este análisis mediante la Ecuación (1) y su respuesta eléctrica $x_0(t)$ en las Ecuaciones (5) y (6):

$$x_0(t) = S_0 p(t) \quad (5)$$

Despejando la Ecuación 5, queda relacionada la presión acústica en el centro de coordenadas con la tensión de salida del micrófono de referencia en la Ecuación 6:

$$p(t) = \frac{x_0(t)}{S_0} \quad (6)$$

Y ahora se puede expresar la señal de salida del micrófono i (Ecuación (3)) en función del micrófono de referencia:

$$x_i(t) = \frac{S_i}{S_0} D_i(\theta'_i, \varphi'_i) \frac{r}{r'_i} e^{-jk(r'_i - r)} x_0(t) \quad (7)$$

Se define un elemento más que ayuda a simplificar las ecuaciones, es el factor a_i que representa la respuesta particular del micrófono i ante una excitación de presión procedente de la posición r , y relativa a la respuesta del micrófono de referencia. Contiene información tanto del fenómeno de transducción electroacústica producido por el micrófono, a través de su sensibilidad y de su directividad, como del camino de transmisión acústica entre la fuente y el micrófono (considerando la respuesta relativa al centro del array). Así, la Ecuación (7) se puede resumir en la Ecuación (8).

$$x_i(t) = a_i(r'_i, \theta'_i, \varphi'_i) x_0(t) \quad (8.a)$$

$$a_i(r'_i, \theta'_i, \varphi'_i) = \frac{S_i}{S_0} D_i(\theta'_i, \varphi'_i) \frac{r}{r'_i} e^{-jk(r'_i - r)} \quad (8.b)$$

La Ecuación (8.a) representa la señal de salida del micrófono i con respecto al micrófono de referencia en función del factor a_i , mientras que la Ecuación (8.b) representa la respuesta particular del micrófono i ante una excitación relativa a la puesta del micrófono de referencia.

En la formulación de factor a_i se evita expresar la dependencia con la frecuencia para destacar que depende en gran medida de la posición y la orientación relativa entre el micrófono y la fuente, con las coordenadas $(r'_i, \theta'_i, \varphi'_i)$.

Ahora vamos considerar que existen I micrófonos, cada uno situado en una posición r_i , con sus correspondientes características de sensibilidad S_i y directividad $D_i(\theta'_i, \varphi'_i)$. La Ecuación (8.b) puede extenderse ahora a todos los elementos del array de micrófonos generando así el llamado vector de apuntamiento, o “steering” vector:

$$\mathbf{a}(r, \theta, \varphi) = [a_1(r'_1, \theta'_1, \varphi'_1), a_2(r'_2, \theta'_2, \varphi'_2), \dots, a_I(r'_I, \theta'_I, \varphi'_I)]^T \quad (9)$$

En este vector de apuntamiento se ve claramente la dependencia de la respuesta del array con la posición de la fuente (r, θ, φ) referida al sistema de coordenadas $(X Y Z)$. De la misma manera que se ha obtenido el vector de apuntamiento, se puede obtener la salida eléctrica de cada micrófono en forma de vector de señales temporales:

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_I(t)]^T \quad (10.a)$$

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(r, \theta, \varphi) \mathbf{x}_0(t) \quad (10.b)$$

En la Ecuación (10.a) se presenta el vector de señales temporales de salida eléctrica de cada micrófono, mientras que en (8.b) se presenta la Ecuación de respuesta del array.

Como se ve en la Ecuación (10), seguimos cumpliendo la simplificación de la Ecuación (8.a), y tenemos la ecuación de respuesta del array. Esta ecuación obtiene la salida eléctrica de cada micrófono a partir de la salida eléctrica del micrófono de referencia $x_0(t)$, y de la respuesta electroacústica del array, representada por el vector de apuntamiento $\mathbf{a}(r, \theta, \varphi)$, que incluye la respuesta de los micrófonos por medio de sus sensibilidades y, además, el efecto del camino acústico entre fuente y array, que se traduce en atenuación y retardo (cambio de fase) para cada uno de los micrófonos integrantes de dicho array.

En segundo lugar, se va a realizar un análisis de la respuesta de un array ante varias fuentes simultáneas, basándolo en la Figura 5.

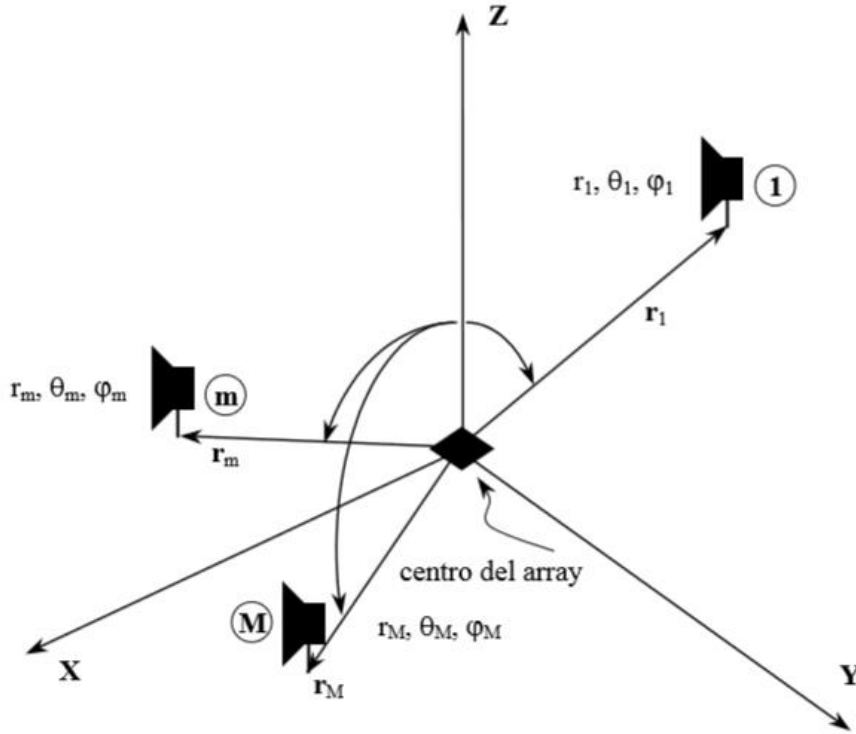


Figura 5. Array de micrófonos captando M fuentes.

Se supone la existencia de M fuentes emisoras diferentes, caracterizadas por la presión temporal que cada una proporciona al array de micrófonos, que vienen dadas por la presión temporal de cada fuente en el centro de coordenadas, de la forma:

$$p_m(t) = p_{0m} e^{j(\omega t + \phi_m)} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

siendo ϕ_m la fase relativa a la fuente m. Ahora, el índice m se refiere a cada una de las fuentes y no a los micrófonos, como sucedía en el primer caso, ya que en este caso el array está caracterizado por su posición con respecto a las fuentes y su posición de apuntamiento y no por sus elementos. Se pueden definir las respuestas de referencia debidas a cada una de las M fuentes:

$$x_{0m}(t) = \mathbf{S}_0 p_m(t) \quad (12)$$

La respuesta conjunta del array sometido a las M fuentes será la suma del efecto de cada una de las fuentes:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{m=1}^M \mathbf{a}_m(r_m, \theta_m, \varphi_m) x_{0m}(t) \quad (13)$$

En la Ecuación (13), el vector de apuntamiento \mathbf{a}_m está asociado a la posición $(r_m, \theta_m, \varphi_m)$ de cada una de las fuentes. Se definen el vector respuesta de referencia del array y la matriz de apuntamiento como:

$$\mathbf{x}_0(t) = [x_{01}(t), \dots, x_{0m}(t), \dots, x_{0M}(t)]^T \quad (14.a)$$

$$\mathbf{a}_m(r, \theta, \varphi) = [\mathbf{a}_1(r_1, \theta_1, \varphi_1), \dots, \mathbf{a}_m(r_m, \theta_m, \varphi_m), \dots, \mathbf{a}_M(r_M, \theta_M, \varphi_M)]^T \quad (14.b)$$

En esta matriz, cada columna representa la respuesta del array a una determinada posición espacial $(r_m, \theta_m, \varphi_m)$. Como aclaración, el elemento a_{ij} de esta matriz representa la respuesta del micrófono situado en la fila i y en la columna j . Por lo tanto, la Ecuación (13) que representa la respuesta del array para M fuentes, se puede escribir de forma matricial como el producto de la matriz de apuntamiento por el vector respuesta de referencia del array:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}_m(r, \theta, \varphi) \mathbf{x}_0(t) \quad (15)$$

2.2.-Beamforming

El término beamforming deriva de la forma en pincel del haz de los primeros filtrados espaciales que se empleaban para recibir una señal radiando desde una localización específica y atenuar las señales de las otras direcciones. Los sistemas diseñados para recibir señales propagándose espacialmente normalmente se encuentran con la presencia de señales interferentes, si la señal deseada y las interferentes ocupan la misma banda temporal de frecuencia, el filtrado temporal no es útil para separar la señal deseada de las interferentes. No obstante, la señal deseada y las interferentes normalmente se originan desde diferentes posiciones del espacio, hecho que puede ser explotado para separar la señal de las interferencias usando un filtro espacial en el receptor.

De forma análoga con el filtrado temporal, en el que se requiere una apertura temporal para procesar los datos recogidos en ella, en el filtrado espacial también existe una apertura espacial de la que se recogen los datos para el procesado. Cuando el muestreo espacial se

realiza de forma discreta, el procesador que realiza el filtrado espacial se denomina beamformer.

Metas del Filtrado Espacial	Metas del Procesado Tiempo-Frecuencia
Incrementar la SNR para señales de frente de onda plano en ambientes con ruido oceánico	Incrementar la SNR para señales de banda estrecha en presencia de ruido de banda ancha
Resolver o distinguir entre las diferentes posiciones de las que llegan señales de frente de onda plano	Resolver señales de banda estrecha para diferentes frecuencias
Medir la dirección desde la que llegan señales de frente de onda plano	Medir la frecuencia de señales de banda estrecha

Tabla 1. Analogía entre Filtrado Espacial (beamforming) y Procesamiento Tiempo-Frecuencia. [23]

La capacidad de discriminación espacial depende del tamaño de la apertura espacial, a medida que la apertura se incrementa, mejora la discriminación. No es tan importante el tamaño absoluto de la apertura como lo es su tamaño eléctrico en longitudes de onda, que es un parámetro crítico para cualquier diseño. Una sola antena física (apertura espacial continua) capaz de proporcionar el requisito de discriminación, es práctica para señales de alta frecuencia ya que la longitud de onda será pequeña, sin embargo, con señales de baja frecuencia un array de sensores puede sintetizar una apertura espacial mucho mayor que la obtenida con una sola antena física, ya que la longitud de onda será grande. [24]

El beamforming tiene una serie de requerimientos:

- Directividad: Como se comentó en el apartado de definiciones, esta propiedad es imprescindible puesto que proporciona la capacidad de apuntar el array hacia la dirección deseada e ignorar las señales incidentes desde otras direcciones. Dado que el beamformer es un filtro espacial puede emplearse para incrementar la SNR, de forma que se bloquea la mayor parte del ruido ajeno a la dirección de interés, gracias a esta propiedad.

- Control de los lóbulos laterales: Debemos tener en cuenta que ningún filtro es ideal, por lo que aparecen lóbulos laterales que hay que controlar, debe existir un balance entre la directividad del lóbulo principal y los lóbulos laterales.

- Orientación del haz (Beam Steering): El beamformer puede ser orientado electrónicamente, aunque se produzca algo de degradación en el diseño.

- La función del patrón del beamformer es dependiente de la frecuencia:

* El lóbulo principal se estrecha con el incremento de frecuencia.

* Puede aparecer el fenómeno de "*spatial aliasing*", provocado por los *grating lobes* que se comentaron anteriormente, cuando la separación es de una longitud de onda o mayor, lo que significa que existe un muestreo insuficiente de los datos a lo largo del análisis. [25]

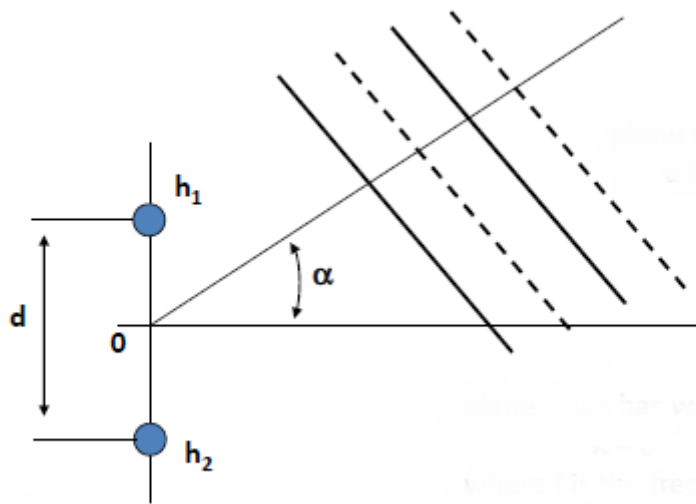


Figura 6. Beamformer simple. [25-FIGURA]

En la Figura 6 podemos ver un beamformer simple formado por 2 micrófonos, h_1 y h_2 , separados una distancia d , y equidistantes respecto al origen. El frente de onda es un frente plano, con ondas planas, con una longitud de onda λ , que es función, de la frecuencia, f , dividida por la velocidad del sonido en el vacío, c .

2.2.1.-Beamformer Delay&Sum (Retardo&Suma)

La idea básica es asumir que la fuente de sonido se encuentra lejos del array, por lo que se puede aproximar que la onda será plana. Para emplear este beamformer basta con retardar las señales recibidas en cada micrófono y posteriormente sumarlas. El efecto que se produce es el incremento de la relación señal a ruido SNR y de la relación señal a interferencia SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio), si la interferencia es una señal que proviene de un ángulo diferente al de la fuente con respecto al array.

Para estimar el retardo de la señal entre micrófonos se mide la correlación cruzada entre micrófonos sucesivos. La medida se toma en el dominio de la frecuencia, lo que requiere observar la información de fase, el retardo será menor de una muestra. Para estimar el retardo será necesario realizar la Transformada discreta de Fourier, encontrar la correlación cruzada y estimar la pendiente (que es la información necesaria del retardo temporal), con ello es de esperar que el ruido y la reverberación no afecten de forma significativa a la estimación. [26]

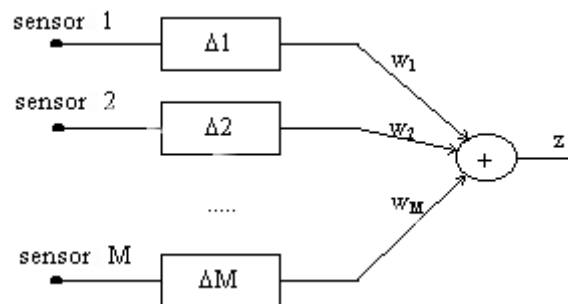


Figura 7. Beamformer Delay&Sum [27]

En la Figura 7 se puede apreciar el diagrama de bloques del Beamformer Delay&Sum, los M sensores reciben desde una fuente en campo lejano, se retardan mediante los pesos w_i y se suman para finalmente conseguir la señal z que es la deseada.

2.2.2.-Estimación de la dirección de llegada

La estimación de la dirección de llegada es necesaria para poder estimar dónde se sitúa la fuente que está transmitiendo señales que son detectadas por el array, el problema de esta estimación de la localización se puede resumir en el cálculo de distancias y los ángulos de llegada. En primer lugar, se va a hacer hincapié en la medida de distancias y posteriormente en la medida del ángulo de llegada.

- Medida de distancias: Para estimar la distancia entre dos puntos podemos emplear dos métodos, uno que se basa en la atenuación de la señal por el efecto de la distancia (SSR, Signal Strength) y otro que se basa en el retardo de propagación de una señal viajando a una velocidad conocida (TOA, método basado en la medida del tiempo de llegada, Time Of Arrival).

* Método TOA: Medida del retardo de propagación que provoca el canal, se considera que emisor y receptor están sincronizados. Existe un método que deriva de éste que es el TDOA (Time Difference Of Arrival) que consiste en la estimación de la diferencia de tiempos de llegada de la señal emitida por la fuente para varios receptores, en éste segundo caso no se requiere sincronización con el transmisor, sólo con el receptor. Éstos métodos basados en estimaciones a partir de muestras temporales generan un incremento de la SNR o del ancho de banda de la señal. [28]

* Método SSR: Atenuación de una señal por efecto de la distancia, es decir, *path loss* (pérdidas por camino). La atenuación es medida por una señal que indica la intensidad de señal recibida, la RSSI (Received Signal Strength Indication). La precisión de las medidas mediante esta técnica depende del canal de propagación y de la distancia entre el array y las fuentes.

- Medida del ángulo de llegada: A diferencia de las medidas temporales, no se requiere sincronización precisa, pero sí es necesario disponer de diversidad espacial, que como se comenta anteriormente, es una propiedad que aporta el uso de arrays en recepción. En general, la estimación se realiza empleando la densidad espectral de potencia. Una fuente situada en la dirección perpendicular al array provoca que la señal llegue en el mismo instante a todos los sensores, por lo que, para una fuente situada en éste ángulo, la amplitud será la misma en todos los sensores, y la señal será considerada como una constante o como una señal de muy baja frecuencia espacial. [29, 30]

A parte del Beamforming, otro uso importante de las técnicas de procesado en array es la estimación DOA, que consiste en que dada una señal propagada espacialmente se determine su ángulo de llegada al array. Los algoritmos de estimación DOA convencionales consisten en dirigir el haz en todas las posibles direcciones y buscar picos en la potencia de salida. La implementación es razonablemente simple, pero siempre se requiere un gran número de elementos en el array para alcanzar una gran resolución. El método Capon es uno de los algoritmos convencionales, que consiste en minimizar la potencia de salida de las

interferencias indeseadas mientras mantiene una ganancia constante a lo largo de la dirección deseada de acuerdo con el criterio de mínima varianza (MV, Minimum Variance) sujeta a restricciones en la respuesta del array. Cuando se ejecuta y pinta el espectro Capon sobre las posibles direcciones, las direcciones de llegada se pueden estimar encontrando los picos. La precisión de éste método depende del número de muestras y del tamaño del array. [31]

Los algoritmos de estimación DOA basados en subespacios, logran una mejor resolución explotando el subespacio de señal de la entrada de la matriz de covarianza, algunos de estos métodos son:

- MUSIC: Clasificación múltiple de señales.
- ESPRIT: Estimación de parámetros de señal mediante la técnica de invariancia rotacional.
- AV: Vector auxiliar.
- CG: Gradiente conjugado.

Los dos primeros son métodos de la década de los 80 y consisten en analizar la estructura de la matriz de covarianza de entrada para descomponerla en un subespacio de señal y un correspondiente subespacio de ruido ortogonal, el primero de ellos, MUSIC, escanea las posibles direcciones de los ángulos, dibuja el espectro de potencia (haciendo uso de la ortogonalidad) y localiza los picos que corresponden a los ángulos de las fuentes. El segundo de ellos, ESPRIT, reduce la carga computacional y logra una mejor resolución ya que no busca en todas las posibles direcciones, exige que el array tenga una estructura para poder descomponerse en dos subconjuntos (subarrays) idénticos con ambos separados una distancia fija. [32,33]

Respecto a los dos últimos algoritmos, cabe comentar que son propuestos más actualmente, de hecho, GC se considera una versión extendida del algoritmo AV que está desarrollado en base a la ortogonalidad de un subespacio de señal. [34]

2.3.-Filtrado adaptativo

Un filtro adaptativo debe tener las siguientes características: [35]

- Estructura de filtrado: Éste módulo conforma la salida del filtro usando medidas de la señal o señales de entrada. La estructura del filtro es lineal si la salida se obtiene como una combinación lineal de las medidas de entrada, de lo contrario se define como no lineal. La

estructura es fijada por el diseñador y sus parámetros son ajustados por el algoritmo adaptativo.

- Criterio de rendimiento (COP, Criterion Of Performance): La salida del filtro adaptativo y la respuesta deseada se procesan mediante el módulo COP para evaluar su calidad con respecto a los requerimientos de la aplicación particular.
- Algoritmo adaptativo: Emplea el valor de COP, o alguna función de él, y las medidas de la entrada y de la respuesta deseada para decidir cómo modificar los parámetros del filtro para mejorar el rendimiento.

Todas las aplicaciones de filtrado adaptativo envuelven una o más señales de entrada y una señal de respuesta deseada que puede ser o no accesible por el filtro adaptativo. Se nombran a estas señales relevantes como entorno operativo de señal (SOE, Signal Operating Environment) del filtro adaptativo. Antes de que se realice el diseño de cualquier filtro adaptativo se requiere disponer de una gran cantidad de información sobre el SOE y un amplio conocimiento de la aplicación en particular. Dicha información es necesaria para que el diseñador pueda elegir de manera correcta las características definidas anteriormente. En la Figura 8 se pueden observar los elementos básicos de un filtro adaptativo general.

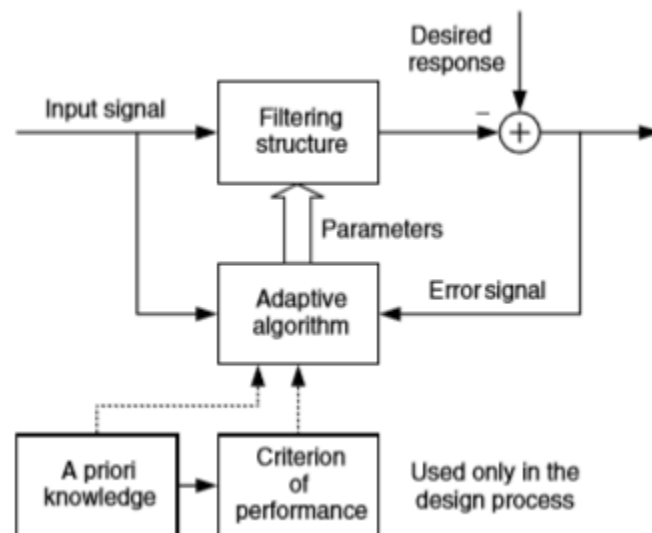


Figura 8. Esquema de un filtro adaptativo. [35-FIGURA]

La mejor manera para introducir concepto de filtrado adaptativo es describiendo los problemas de algunas aplicaciones que pueden solucionarse de manera efectiva empleando este tipo de filtrado. Éstas aplicaciones se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: [35]

1.- Identificación de sistemas: Esta clase también se conoce como modelado de sistemas, el sistema a modelar puede ser real o puede ser una hipotética ruta de transmisión de señal. La característica distintiva de esta aplicación es que la entrada del filtro adaptativo está libre de ruido y la respuesta deseada se corrompe por ruido aditivo incorrelado con la señal de entrada. Las aplicaciones de esta clase incluyen la cancelación de eco, modelado de canal e identificación de sistemas para aplicaciones de control, en éste último caso el filtrado se utiliza para estimar los parámetros o el estado del sistema y posteriormente para usar esta información para diseñar un controlador. En aplicaciones de procesamiento de señal, la meta a alcanzar es la correcta estimación de la respuesta deseada de acuerdo con el criterio establecido en el diseño. En la Figura 9 se puede ver el diagrama de bloques de este tipo de aplicaciones.

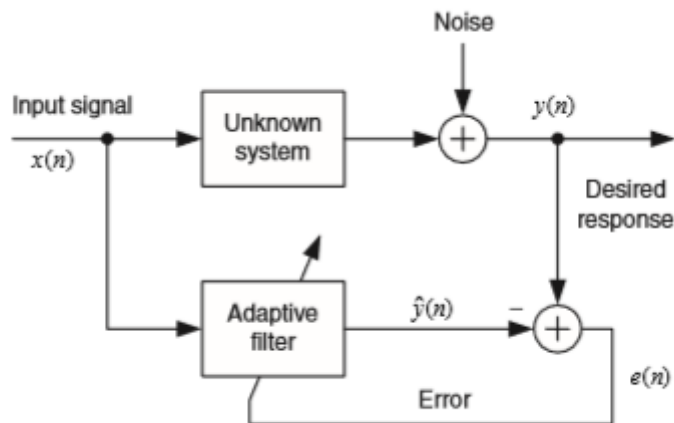


Figura 9. Identificación de sistemas. [35-FIGURA2]

2.- Inversión de sistemas: Esta clase también se conoce como modelado de inversión de sistemas. La meta a alcanzar del filtrado adaptativo es estimar y aplicar la inversa del sistema. En función de la aplicación, la entrada del filtro puede verse afectada por ruido adaptativo lo que provoca la posible desaparición de la respuesta deseada. En la Figura 10 se puede ver el diagrama de bloques de este tipo de aplicaciones.

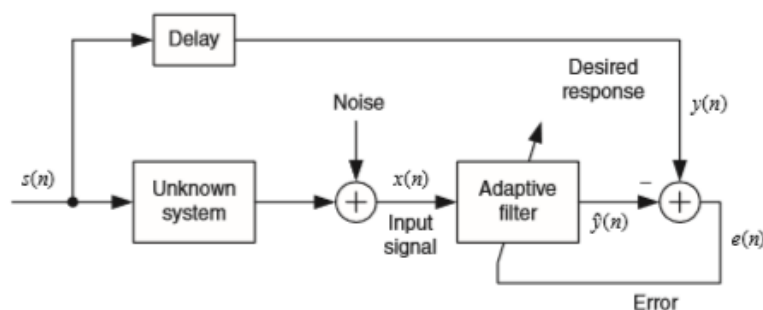


Figura 10. Inversión de sistemas. [35-FIGURA3]

3.- Predicción de señales: La meta en este caso es la estimación de un valor $x(n_0)$ de una señal aleatoria usando un conjunto de señales consecutivas $\{x(n), n_1 \leq n \leq n_2\}$, existen tres casos de interés:

- Predicción *forward* (hacia delante): Cuando $n_0 > n_2$.
- Predicción *backward* (hacia atrás): Cuando $n_0 < n_1$.
- Interpolación: Cuando $n_1 < n_0 < n_2$. El valor $n = n_0$, no se usa en la estimación.

El tipo más ampliamente utilizado es la predicción *forward* o más conocida como predicción lineal, donde la estimación se realiza empleando una combinación lineal de muestras pasadas. Se emplean códigos LPC (Linear Predictive Coding) en este tipo de predicciones para minimizar el número de bits necesarios para la representación de la señal manteniendo la calidad a un nivel aceptable según los criterios de rendimiento. En la Figura 11 se puede ver el diagrama de bloques de este tipo de aplicaciones.

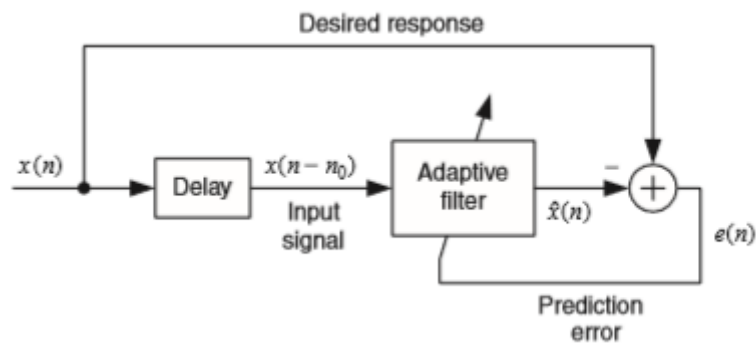


Figura 11. Predicción de señales. [35-FIGURA4]

4.- Cancelación de interferencia multisensor: La característica clave en este tipo de aplicaciones es el uso de múltiples sensores para eliminar la interferencia y el ruido indeseados. Normalmente, una señal contiene una parte con la propia señal de interés y otra con ruido, se las denomina señales primarias. Las señales capaces de cancelar las interferencias indeseadas se conocen como señales de referencia, que se recogen utilizando otros sensores en los que la señal de interés no se considera. La cantidad de correlación entre las señales primarias y las de referencia se mide y se utiliza para estimar la interferencia en la señal primaria para su posterior eliminación, por otra parte, la señal de interés no está presente en las señales de referencia para que al realizarse la comparación por la cantidad de correlación no sea eliminada como sucede con las interferencias. Las aplicaciones típicas en las que se emplea este método son el procesado en array para radar y comunicaciones,

sistemas de teledetección biomédicos y control activo del ruido (ANC, Active Noise Control). En la Figura 12 se puede ver el diagrama de bloques de este tipo de aplicaciones.

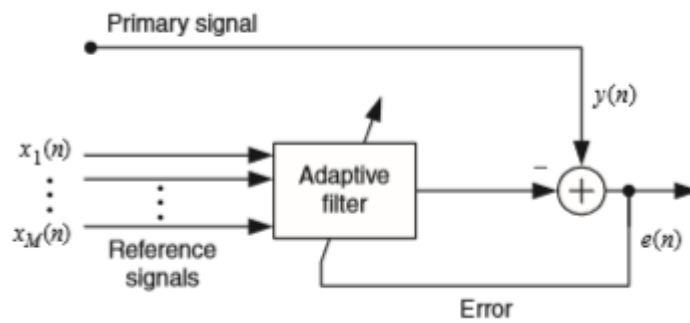


Figura 12. Cancelación de interferencia multisensor. [35-FIGURA5]

Un factor muy importante en el diseño de algoritmos adaptativos es la disponibilidad de la señal de respuesta deseada, que como se ha comentado anteriormente, puede o no estar disponible para el uso del filtrado adaptativo. La adaptación debe realizarse de una de las siguientes maneras: [36]

- Adaptación supervisada: En cada instante de tiempo, el filtro adaptativo conoce de antemano la respuesta deseada, calcula el error, evalúa el COP y lo usa para ajustar sus coeficientes. El diagrama de bloques de esta adaptación puede observarse en la Figura 13.

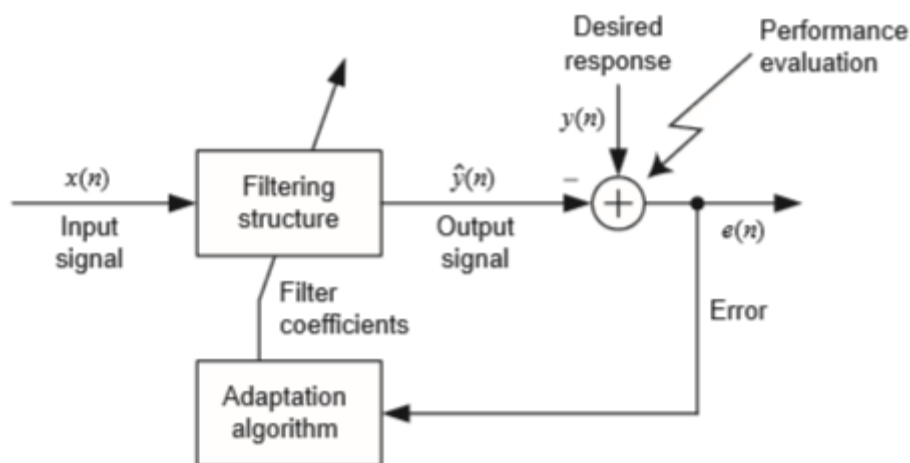


Figura 13. Elementos básicos de filtro adaptativo supervisado. [36-FIGURA]

- Adaptación no supervisada: Cuando la respuesta deseada no está disponible, el filtro adaptativo no puede generar y usar el error para mejorar el comportamiento. En algunas aplicaciones (por ejemplo, envolvente constante), la señal de entrada tiene algunas

propiedades medibles que se pierden cuando la señal alcanza el filtro, por ello lo que sucede es que el filtro ajusta sus parámetros para poder recuperar dichas propiedades perdidas de la señal de entrada. En otras aplicaciones (por ejemplo, comunicaciones digitales), el objetivo del filtro adaptativo es clasificar cada pulso recibido como uno de un conjunto finito de símbolos.

2.3.1.-LMS

El algoritmo adaptativo LMS (Least Mean Square), se basa en los mínimos cuadrados, se emplea en la práctica gracias a su simplicidad, eficiencia computacional y un buen rendimiento bajo una gran variedad de condiciones de funcionamiento. Se puede resumir en las siguientes ecuaciones: [37]

$\hat{y}_{(n)} = e^H_{(n-1)}x_{(n)}$	Filtrado.
$e_{(n)} = y_{(n)} - \hat{y}_{(n)}$	Generación del error.
$c_{(n)} = c_{(n-1)} + 2\mu x_{(n)}e^*_{(n)}$	Actualización de coeficientes.

(1) Listado de ecuaciones LMS.

Donde:

- μ es el valor del paso de adaptación.
- $c_{(n)}$ es el vector de coeficientes del filtro en el instante n.
- $e_{(n)}$ es el error en el instante n.
- $y_{(n)}$ es la respuesta deseada en el instante n.
- $x_{(n)}$ es el vector de datos de entrada en el instante n.

El algoritmo requiere el uso de $2M+1$ multiplicaciones complejas y de $2M$ sumas complejas, siendo M el número de coeficientes. La Figura 14 muestra una implementación de un filtro FIR adaptativo usando éste algoritmo.

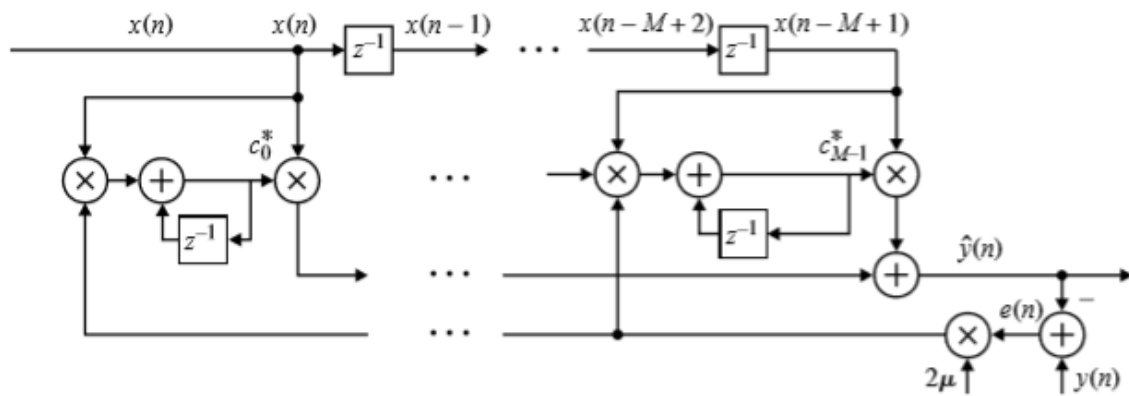


Figura 14. Implementación de un filtro FIR adaptativo empleando el algoritmo LMS.

[37-FIGURA]

Las directrices principales para generar el algoritmo son: [38]

- Estabilidad: Propiedad que asegura que, por norma, el filtro adaptativo LMS converge hacia el filtro óptimo.
- Tasa de convergencia: El error cuadrático medio, MSE (Mean Square Error), va desapareciendo progresivamente de forma exponencial sin mostrar ninguna oscilación. Como se espera de manera intuitiva, cuanto menor sea el valor del paso de adaptación y más lejos se encuentren los coeficientes iniciales de los valores óptimos, más iteraciones se deben realizar en el algoritmo LMS para que pueda converger en un filtro óptimo.
- Exceso de estado estacionario de MSE: Para pequeños valores del paso de adaptación, el exceso de MSE es mucho más pequeño que para el MSE óptimo.
- Velocidad con respecto a la calidad de adaptación: Existe una compensación entre la tasa de convergencia (velocidad de adaptación) y el exceso de estado estacionario de MSE (calidad de adaptación, o precisión del filtro adaptativo). El primer requerimiento para un filtro adaptativo es la estabilidad, que se asegura eligiendo μ de forma correcta, haciéndolo más pequeño para disminuir el número de desajustes del filtro óptimo, si se hace mayor, se aumenta la velocidad de convergencia, pero genera un aumento de los desajustes. El equilibrio entre la velocidad de convergencia y los desajustes es uno de los principales compromisos del algoritmo LMS.

El algoritmo LMS es el algoritmo adaptativo más ampliamente conocido y empleado debido a su simplicidad y robustez ante las perturbaciones y los errores de modelado. A continuación, se exponen algunas de las propiedades más interesantes del algoritmo: [39]

- Robustez: Esta propiedad indica que el filtro adaptativo debe ser insensible a las condiciones iniciales $c(-1)$ y el error residual óptimo $e_0(n)$, que actúa como medida de ruido. Estas entradas suelen llamarse disturbios. En la práctica el error óptimo no solo actúa como medida de ruido, sino que también sirve para errores de cuantificación, errores del modelo y otras imperfecciones.

- Efectos de precisión finita: Cuando se diseña el filtro adaptativo LMS se elige un valor de μ que proporcione el balance deseado entre la velocidad de convergencia y los desajustes como vimos anteriormente. Si la velocidad de convergencia no es lo más interesante del diseño en cuestión, puede reducirse el valor de μ tanto como sea necesario para obtener unos desajustes insignificantes. En aplicaciones digitales, la adaptación del algoritmo LMS se para cuando el término de corrección se hace más pequeño en magnitud que la mitad del último bit significativo (LSB, Least Significant Bit). El hecho de hacer decrecer el parámetro μ puede provocar una degradación del rendimiento a no ser que se incremente el número de bits de los coeficientes del filtro. En la práctica, el parámetro μ no puede decrecer por debajo de un nivel donde los efectos de degradación de cuantificación y la aritmética de precisión finita se hagan insignificantes. Los efectos de precisión finita se acentúan más a medida que aumentan las malas condiciones a la entrada.

- Dominio transformado y algoritmos LMS de bloqueo: El algoritmo LMS consigue su mejor tasa de convergencia cuando la matriz de correlación de entrada es diagonal y con autovalores iguales. En caso de filtros FIR, esto implica que la señal de entrada es ruido blanco. Cuando los componentes del vector de datos de entrada están correlados, se puede mejorar la convergencia usando una transformación de decorrelación, que se puede obtener usando bien la descomposición triangular o la ortogonal de la matriz de correlación de entrada. El diagrama de bloques que conforma la estructura de ésta transformación se observa en la Figura 15.

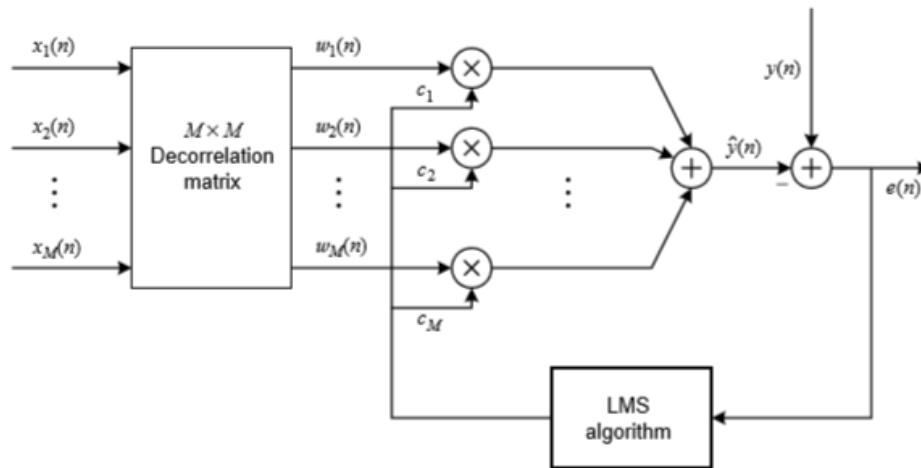


Figura 15. Estructura del dominio transformado del filtro adaptativo LMS. [39-FIGURA]

En la práctica, cuando la matriz de correlación de entrada es desconocida y es probable que sea variante en el tiempo, sólo pueden emplearse transformaciones que se denominan sub-óptimas, como son la Transformada de Fourier discreta, DFT (Discrete Fourier Transform), la Transformada del coseno discreta, DCT (Discrete Cosine Transform) y otras transformaciones ortogonales. El rendimiento del filtro adaptativo obtenido depende de las propiedades de decorrelación en la transformación que, a su vez, dependen de las propiedades de la matriz de correlación de entrada.

En aplicaciones que requieren filtros adaptativos con un número muy grande de coeficientes se utiliza bastante la implementación en tiempo real del algoritmo LMS, como por ejemplo en canceladores de eco acústico. La complejidad de estas aplicaciones puede verse reducida usando filtros adaptativos de bloqueo, que procesan un bloqueo de datos a cada instante, ya sea en el dominio temporal o frecuencial. Los coeficientes del filtro adaptativo se actualizan una vez en cada bloque y se mantienen fijos dentro de él, algunos filtros tienen buena exactitud numérica por lo que puede reducirse su complejidad calculando las convoluciones y correlaciones involucradas usando algoritmos de Transformada rápida de Fourier, FFT (Fast Fourier Transform). En algunas aplicaciones, como la cancelación de eco expuesta anteriormente, el retardo introducido por la duración del bloque puede generar problemas. El diagrama de bloques que conforma esta solución a la complejidad del algoritmo puede apreciarse en la Figura 16. [39]

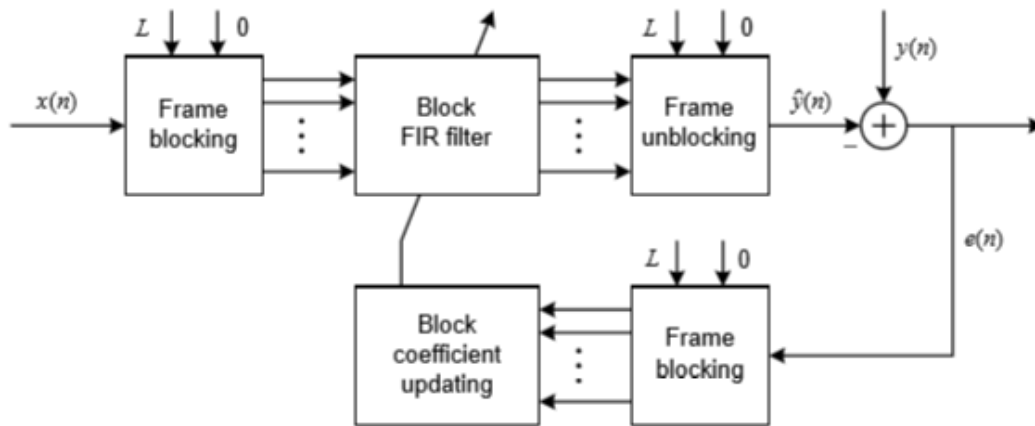


Figura 16. Estructura de filtrado adaptativo de bloqueo. [39-FIGURA2]

Se exponen tres aplicaciones prácticas en las cuales la influencia del algoritmo LMS ha sido muy importante: [40]

-Predicción lineal: Se realiza una adquisición de coeficientes predictores usando el algoritmo LMS y se estudian los efectos de los autovalores de propagación de la matriz de correlación de entrada en la convergencia del algoritmo adaptativo LMS cuando se emplea para cargar los coeficientes.

- Cancelación de eco en transmisiones de datos full-duplex: En primer lugar, una transmisión full-duplex es aquella que logra la transmisión de datos simultánea en ambas direcciones, en la Figura 17 se muestra el modelo de una transmisión full-duplex sobre circuitos de dos hilos empleando las interfaces de cable de dos a cuatro hilos (lo que se conoce como acopladores híbridos), que existen en cualquier sistema de telefonía. Los acopladores híbridos están diseñados para proporcionar aislamiento perfecto entre el transmisor y el receptor, pero es una característica que no se puede mantener totalmente en la práctica, por lo que se producen dos efectos, en primer lugar, una parte de la señal transmitida se fuga a través del extremo cercano al híbrido hacia el propio receptor y, en segundo lugar, otra parte de la señal transmitida se refleja en el extremo lejano al híbrido y termina en el propio receptor. La combinación de las señales de eco incrementa el número de errores (puede ser hasta 30dB mayor que la señal deseada recibida desde el otro extremo).

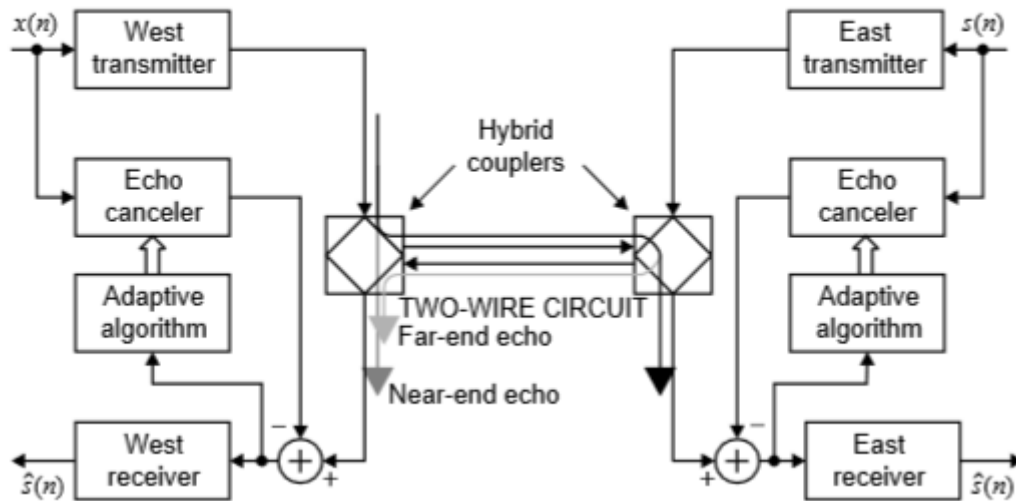


Figura 17. Modelo de transmisión de datos de un sistema full-duplex que emplea canceladores de eco en los módems. [40-FIGURA]

La mejor manera de solucionar éste problema es generar una réplica del eco y posteriormente restarlo a la señal de entrada. Se pueden modelar los ecos como el resultado de un “camino de eco” (echo path) entre el transmisor y el receptor, por lo que se puede obtener la réplica mediante un filtro FIR LMS adaptativo, es decir, un cancelador de eco. El hecho de incluir el transmisor en la ruta del eco simplifica la implementación de la aplicación y mejora la velocidad de adaptación porque la entrada es una secuencia de datos binaria IID de valores equiprobables +1 y -1.

En la Figura 18 se muestra el diagrama de bloques de un sistema para investigar el funcionamiento del cancelador de eco, en el que podemos ver el uso del filtro FIR correspondiente a la creación del “camino de eco” y el cancelador de eco adaptativo.

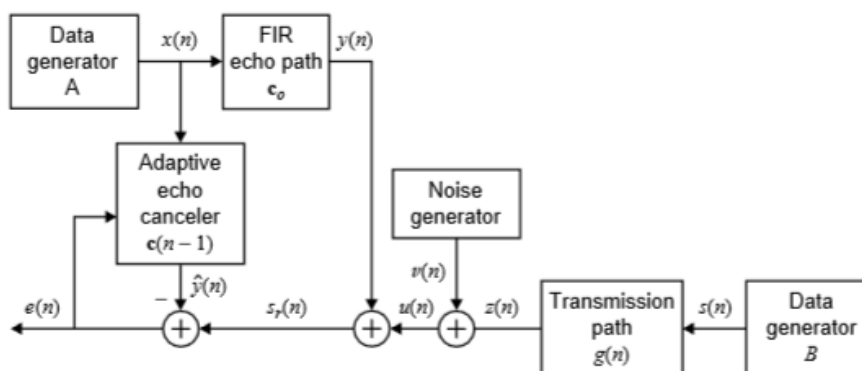


Figura 18. Diagrama de bloques para investigación del rendimiento del cancelador de eco adaptativo. [40-FIGURA2]

- Ecuación adaptativa: Cuando los datos se transmiten con una tasa por debajo de los 2.4Mbps, la interferencia entre símbolos, ISI (Inter-Symbol Interference) es relativamente pequeña y no supone problemas en las operaciones del modem. Sin embargo, para comunicaciones de alta velocidad por encima de los 2.4Mbps, se necesita un ecualizador en el modem para compensar la distorsión del canal. Debido a que las características del canal suelen ser desconocidas y variables en el tiempo, se requiere un filtro adaptativo. En la Figura 19 se expone el diagrama de bloques de un ecualizador adaptativo. Inicialmente, se ajustan los coeficientes del ecualizador, por medio del algoritmo LMS, transmitiendo una secuencia de prueba conocida de corta duración, tras este corto período de prueba, la secuencia de datos actual se transmite. Se realiza un seguimiento continuo de la lenta variación de las características del canal ajustando los coeficientes del ecualizador, usando las decisiones en lugar de la secuencia de prueba conocida.

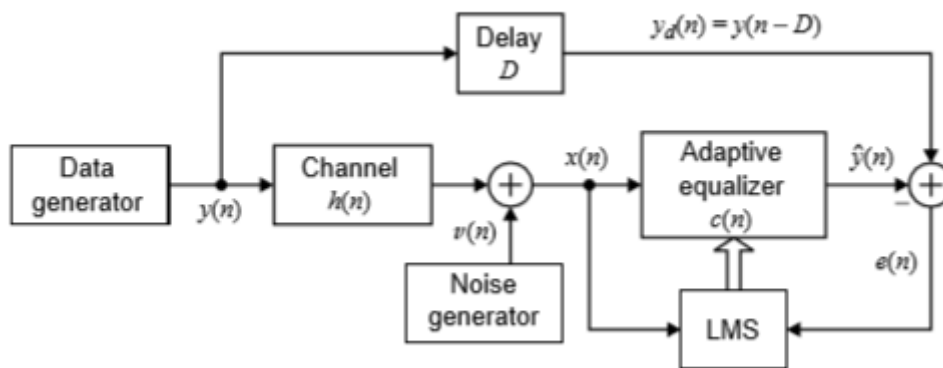


Figura 19. Diagrama de bloques para investigación de un ecualizador adaptativo. [40-
FIGURA3]

2.4.-Aplicación al procesamiento de sonido.

El procesamiento de señales acústicas empleando arrays de micrófonos ha generado una gran atención, no tanto en el campo submarino debido al uso de SONAR en operaciones navales, pero si en general. Se ha propuesto el uso de arrays de micrófonos para aplicaciones militares, como la localización o identificación de vehículos o helicópteros, pero el desarrollo más amplio ha sido en el entorno comercial. En particular, las aplicaciones relacionadas con la mejora o recuperación del mensaje transmitido por la fuente. [41]

Las capacidades de un array de micrófonos para localizar una fuente acústica (como un hablante), extraer una señal acústica en un entorno de ruido y reverberación y sintetizar

campos sonoros, han llevado a desarrollar su uso en sistemas avanzados de videoconferencia, sistemas de comunicación de manos libres, vigilancia y simulación acústica de salas de conciertos.

De manera similar a la acústica submarina, el procesado de señal con arrays de micrófonos se basa en modelos de datos de banda ancha, donde el tiempo de propagación a través del array es generalmente mucho mayor a la inversa del ancho de banda, por ejemplo, en una apertura típica de un array se tarda aproximadamente 6ms para que el sonido viaje medio metro, mientras que la inversa del ancho de banda de una señal de voz es en torno a 0.2-0.5ms.

Dado que la velocidad del sonido en el aire es más de cuatro veces más lenta que en el agua, y dado que las frecuencias de interés para la acústica del aire son generalmente más altas que en SONAR, los arrays de micrófonos pueden hacerse mucho más compactos, por ejemplo, a 1kHz la longitud de onda del sonido es aproximadamente 30cm, por lo que lo más común es que los arrays tengan unas aperturas de pocos metros. Por lo tanto, se asumen típicamente modelos de propagación de onda plana, al menos localmente en las proximidades del array.

La propagación en exteriores es más complicada debido al viento y los gradientes de temperatura que hacen difícil la precisión en la localización para ratios grandes. Incluso en situaciones donde se supone propagación rectilínea, las fluctuaciones aleatorias en el aire y la temperatura causarán en la señal acústica transmitida una pérdida de coherencia temporal si la señal viaja a lo largo de una gran distancia. En la propagación en interiores, los principales obstáculos a superar son la reverberación debido a las reflexiones del sonido en los materiales, tales como las plantas o las paredes y techos de los edificios o el mobiliario.

En resumen, el enfoque mayoritario en las aplicaciones de arrays de micrófonos en exteriores es la localización de la fuente, mientras que interiores el problema más común es la reconstrucción de la fuente sonora deseada en presencia de ruido y multitrayecto (debido a los materiales). Se van a comentar aspectos de estos dos problemas a continuación.

-Localización de fuentes sonoras en el aire: El término “cámara acústica” se emplea normalmente para referirse a arrays de micrófonos que se emplean para caracterizar campos sonoros y localizar fuentes con energía acústica. Dado que las señales sonoras transmitidas

por el aire empleadas en localización son normalmente de banda ancha se emplean modelos en el dominio frecuencial para solventar los problemas que aparecen.

Un enfoque general y muy conveniente es contar con una situación en la que se tienen arrays de arrays, donde varios arrays de micrófonos (que se denotan como K) estrechamente espaciados con propagación localmente coherente se distribuyen a lo largo de un área grande y separados por distancias tales que no se puede asumir la propagación coherente.

- Beamforming de ancho de banda adaptativo: En muchas aplicaciones de arrays de micrófonos la localización de una fuente sonora es menos importante de lo que es la extracción de su forma de onda en un entorno de ruido y reverberación.

En la configuración de entornos de interior en áreas relativamente pequeñas donde los factores de la propagación sonora (como temperatura, presión y humedad) son uniformes, se puede ignorar tanto el efecto de la dispersión como el efecto Doppler, y para una buena muy buena aproximación, el array simplemente recibirá versiones escaladas y retardadas de la fuente a través de un número de caminos afectados por reverberación. En particular, para el micrófono m , la señal sonora recibida se representa en la siguiente ecuación:

$$y_m(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_{i,m} s(t - \tau_{i,m}) + n_m(t) \quad (1)$$

Donde $s(t)$ es la fuente deseada, N representa el número de ecos por multicamino desde la fuente al micrófono, $\{\alpha_{i,m}, \tau_{i,m}\}$, son las amplitudes y los retardos correspondientes al camino i y el micrófono m , finalmente la señal $n_m(t)$ es debida al resto de interferencias que puedan existir.

El enfoque más común para extraer $s(t)$ desde la salida del array de micrófonos de M elementos es por medio de un beamformer de banda ancha, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\hat{s}(t - t_0) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=0}^L w_{ml} y_m(t - lT_s) \quad (2)$$

Donde T_s es el periodo de muestreo del array, w_{ml} es el peso del beamformer para el micrófono m en la muestra l , y t_0 es un retardo arbitrario. En esencia, lo que se está representando es un ecualizador espacio-tiempo similar al que podría ser empleado en un canal de radiofrecuencia, RF (Radio Frequency), inalámbrico selectivo en frecuencia.

La diferencia en la aplicación del array de micrófonos es que normalmente no se dispondrá de capacidad para manejar los chequeos periódicos de datos desde la fuente para facilitar la carga de los pesos del beamformer, ya sea en el tiempo mediante los algoritmos LMS o RLS (Recursive Least Square), o bien empleando un enfoque adaptativo como el beamforming MVDR (Minimum Variance Distortionless Response), por lo que se deben explotar otros factores para adaptar los pesos. Por ejemplo, se puede estimar la ubicación aproximada de la fuente (DOA), como en sistemas de videoconferencia donde los hablantes están confinados a ciertas posiciones. Asimismo, el conocimiento de fuertes fuentes de interferencia (por ejemplo, televisores, aires acondicionados o ventanas) puede producir una ventaja para ayudar al filtro a concentrarse en la fuente de interés. La cancelación de eco adaptativa es posible si se dispone de formas de onda de referencia para las interferencias, que se puede obtener, por ejemplo, situando un micrófono próximo a la fuente interferente. También se pueden explotar situaciones donde la fuente o la interferencia son conocidas por tener componentes notorias en determinadas frecuencias, lo que es ventajoso para implementar el filtro en el dominio frecuencial, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\hat{S}(\omega_k) = \sum_{m=1}^M W_m(\omega_k) Y_m(\omega_k) \quad (3)$$

Los factores a considerar cuando se implementa un beamformer de banda ancha en una aplicación de arrays de micrófonos son el periodo de muestreo T_s y la longitud L del ecualizador, que en muchas ocasiones puede ser demasiado grande para el valor de T_s requerido.

Un ejemplo, para reconstruir una señal de voz con un ancho de banda de 3kHz en una sala donde las longitudes de los caminos de los ecos pueden variar en torno a 5m, requiere una longitud L de unas 300-400 muestras.

3.-Simulaciones

3.1.-Presentación de la aplicación.

En este apartado se va a exponer el trabajo realizado a partir de la GUI generada, mostrando simulaciones y comentando en relación a lo expuesto en apartados anteriores. La aplicación generada consiste en la realización de un array y la representación del factor de array (en grados y en polares) obtenido a partir de los parámetros que se van pidiendo a medida que avanza la simulación. En primer lugar, lo que se va a realizar es una demostración de las pantallas que aparecen en el programa (en blanco) para ponernos en situación y posteriormente se van a seleccionar unos parámetros de entrada para probar todos los arrays con ellos.

Cuando se inicia la aplicación encontramos la siguiente pantalla:



Figura 20. Pantalla inicial.

A partir de ella se selecciona el número de micrófonos y la frecuencia de muestreo (éste valor no se emplea en el diseño, se ha generado para trabajos futuros), cuando se han seleccionado ambos valores se pide el tipo de array que se quiere implementar, y se puede ver la siguiente pantalla:

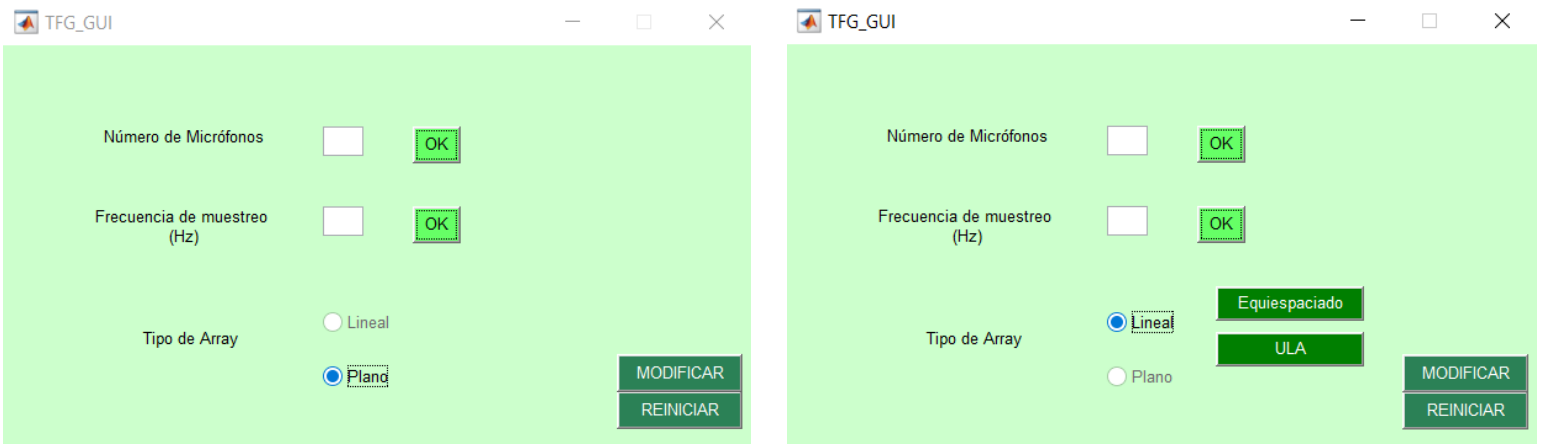


Figura 21: Tipo de array.

En función del tipo de array que se haya seleccionado se presenta una situación u otra, si seleccionamos “Array Plano”, aparecerá una nueva interfaz en la que se deberán introducir los valores para el diseño, como se ve en la Figura 22, primero nos piden la posición inicial del primer micrófono (en metros) mediante las coordenadas ‘ X , ‘ Y , ‘ Z ’, posteriormente la distancia entre ellos (medida en lambdas λ , que es la distancia eléctrica del array) y por último, nos piden las esquinas de la sala en la que está contenida el array, como bien se indica, primero se guardarán las posiciones ‘ X , ‘ Y , ‘ Z ’ de la esquina izquierda y después las de la esquina derecha. Cuando hemos introducido todos estos valores aparecerá un botón para generar el array y se podrá visualizar en la gráfica adjunta como se verá más adelante.

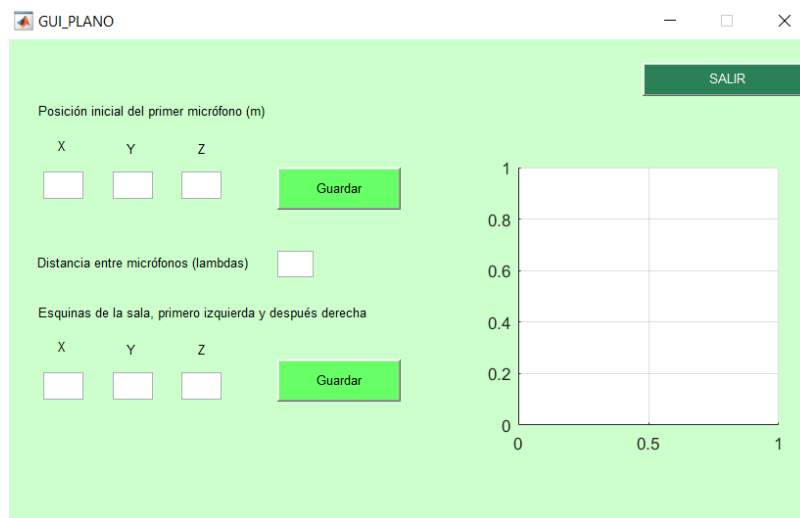


Figura 22. Array Plano.

Si en lugar de haber seleccionado el “Array Plano”, hubiésemos seleccionado “Array Lineal” el programa nos da a elegir entre “Equiespaciado” y “ULA”, como se ve en la Figura 23:

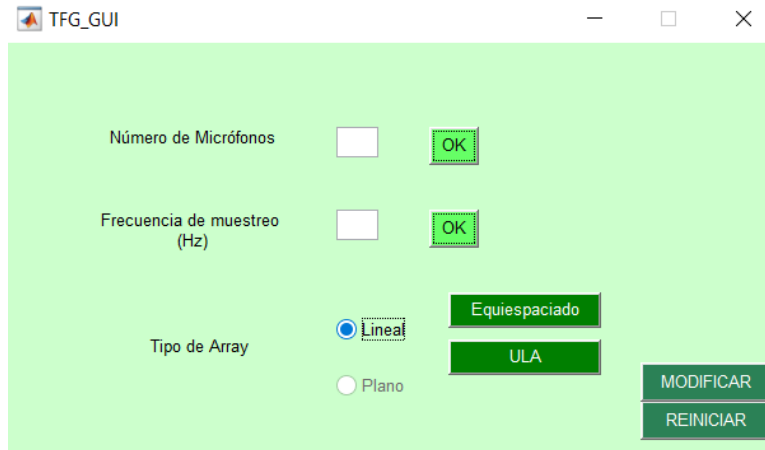


Figura 23. Array Lineal.

Se va a analizar de manera paralela el “Array Lineal Equiespaciado” y el “Array Lineal ULA” como se observa en la Figura 24, nos piden que seleccionemos el eje sobre el que se sitúa el array, la distancia (en lambdas λ) entre los micrófonos y la posición inicial del array.

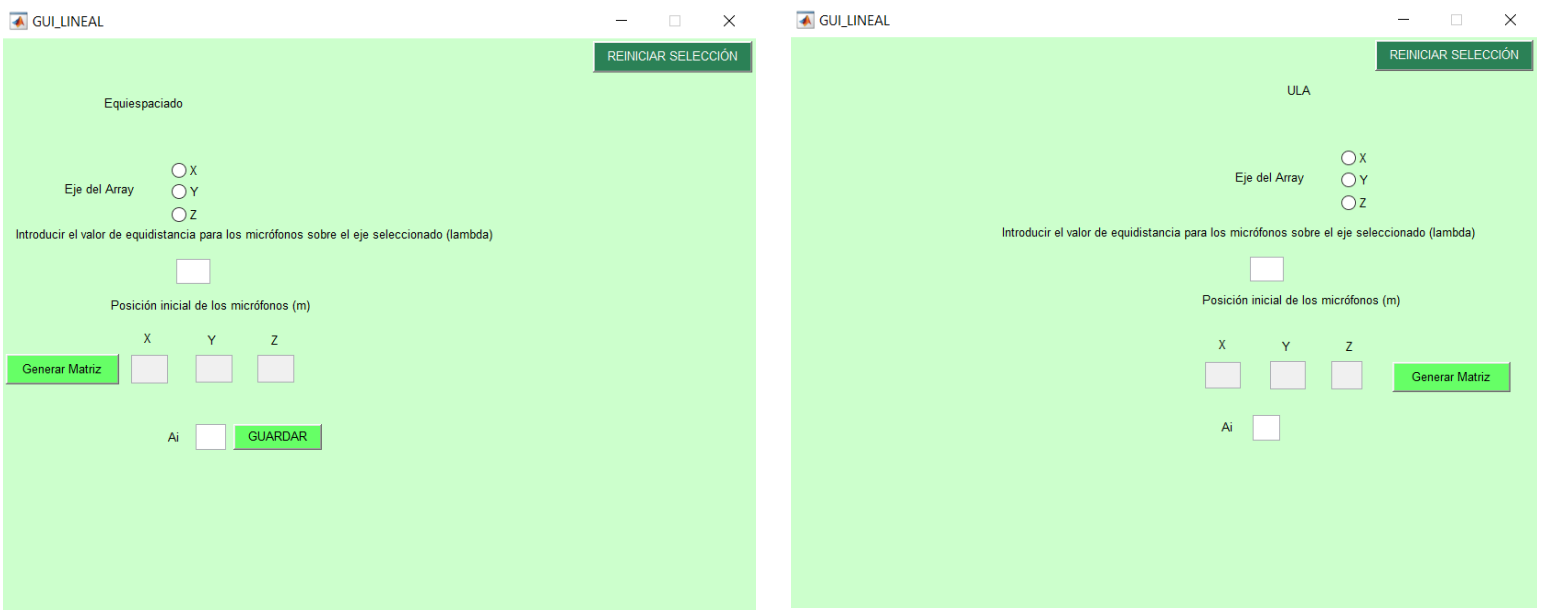


Figura 24. Array Lineal Equiespaciado(izquierda) y Array Lineal ULA(derecha)

La diferencia que se ha establecido entre array equiespaciado y array ULA es debida a que en el array equiespaciado podemos tener unos pesos que sean diferentes de ‘1’, no así en el ULA que se establecen iguales a ‘1’ como se ve en la Figura 25. Esta condición será útil más adelante, puesto que a partir del array equiespaciado podremos generar un array de tipo endfire o un array de tipo phased array. También se observa en la Figura 25, como el programa nos da la matriz generada (en este caso NaN siempre porque no hemos introducido

valores) y nos avisa de lo comentado acerca de los pesos, en el equiespaciado nos pide un valor por cada micrófono y en el ULA nos fija el valor a '1' para todos los micrófonos.

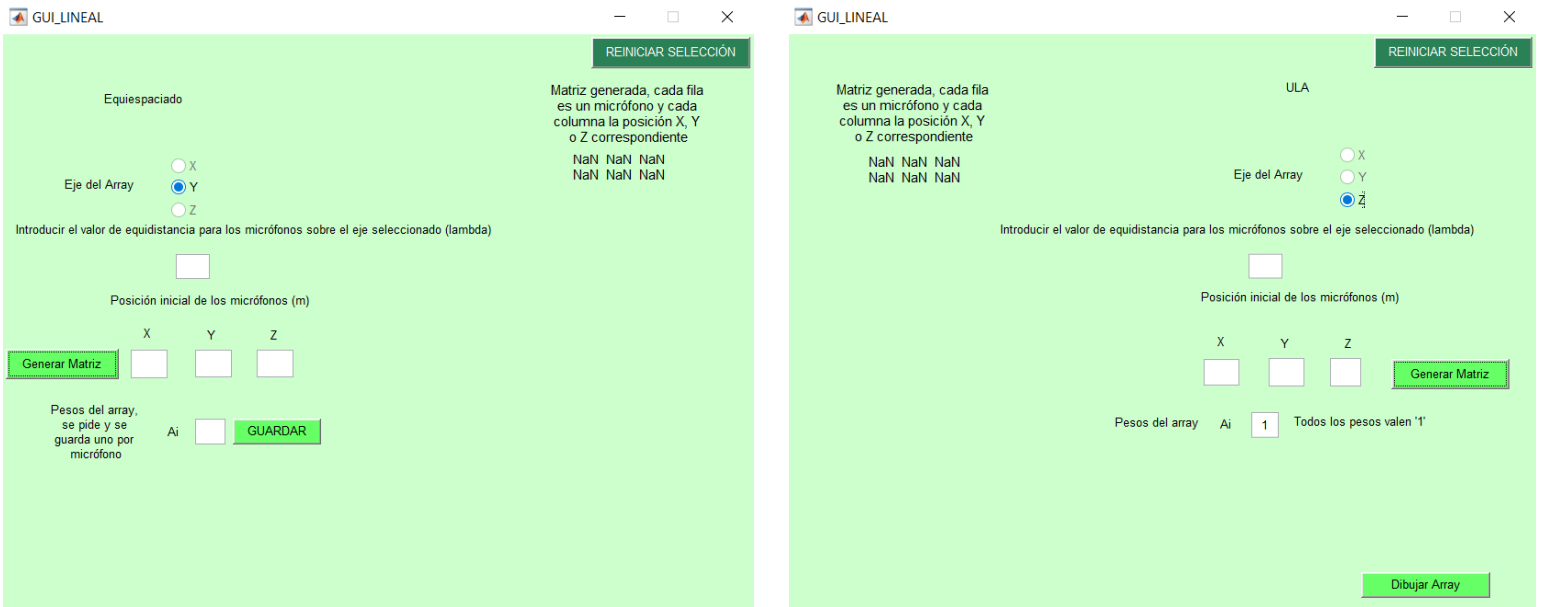


Figura 25. Diferencias de Pesos en los arrays equiespaciado y ULA.

Cuando se han guardado todos estos valores sólo queda representar, primero se dibujan los puntos del array en el eje de coordenadas para hacernos una idea visual de cómo se distribuyen los micrófonos y posteriormente con el botón “DIAGRAMA” accederemos a una nueva interfaz que se explicará a continuación. En la Figura 26 se puede apreciar cómo se genera la gráfica de los ejes de coordenadas 'X, Y, Z' para ambos arrays

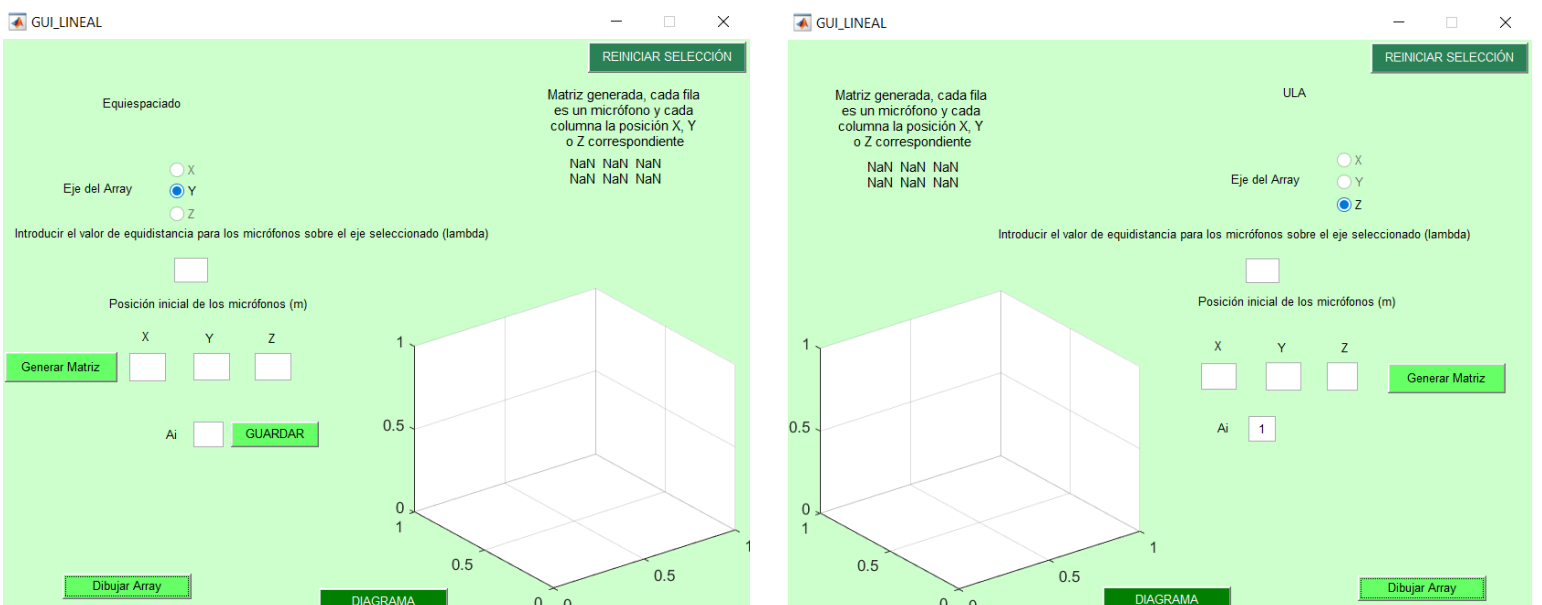


Figura 26. Representación de arrays en el eje de coordenadas 'X, Y, Z'

En este punto hay que hacer una nueva división para poder explicar la interfaz de manera que sea más comprensible. Vamos a comenzar por el “Array Lineal ULA”, puesto que la interfaz que va a aparecer al pulsar el botón “DIAGRAMA” es más simple que para el “Array Lineal Equiespaciado”. En la Figura 27 se observa que en dicha interfaz se representa el Factor de Array en grados, y que aparece una ventana emergente con la llamada “Figure1” que representa dicho Factor en polares.

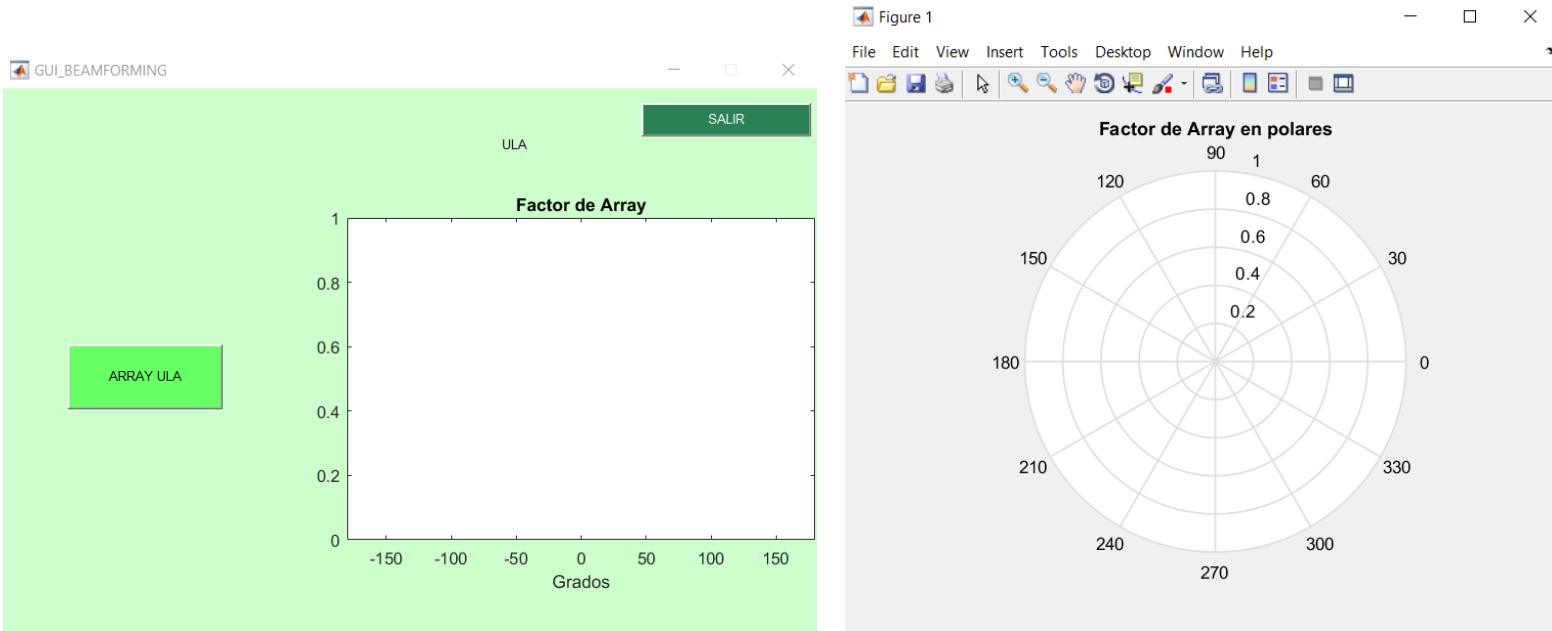


Figura 27. Factor de Array, “Array Lineal ULA”.

Para el caso de “Array Lineal Equiespaciado” aparecen 3 opciones a seleccionar, como se observa en la Figura 28, en función de la elegida se pedirán unos determinados valores, para el caso de “ARRAY EQUIESPACIADO” no se pide nada puesto que ya conocemos el valor de los pesos y no es necesario introducir desfase, para el caso de “PHASED ARRAY” se pide un valor de alfa en radianes que representa el desfase y, por último, para el caso de “ARRAY ENDFIRE” se pide un valor de Theta_max que representa la dirección de apuntamiento deseada de este array.

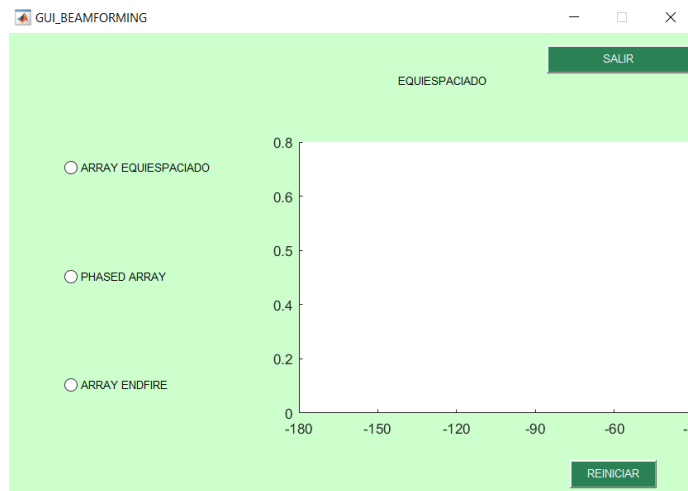


Figura 28. Interfaz de selección de tipo de array para “Array Lineal Equiespaciado”.

Para no ser redundante puesto que no se van a tener valores en las gráficas ya que estamos analizando el diseño con los campos en blanco, en la Figura 29 sólo se va a representar la interfaz que se observa al pulsar cada uno de los botones, puesto que las gráficas obtenidas van a seguir el patrón que se seguía con el “Array Lineal ULA”.

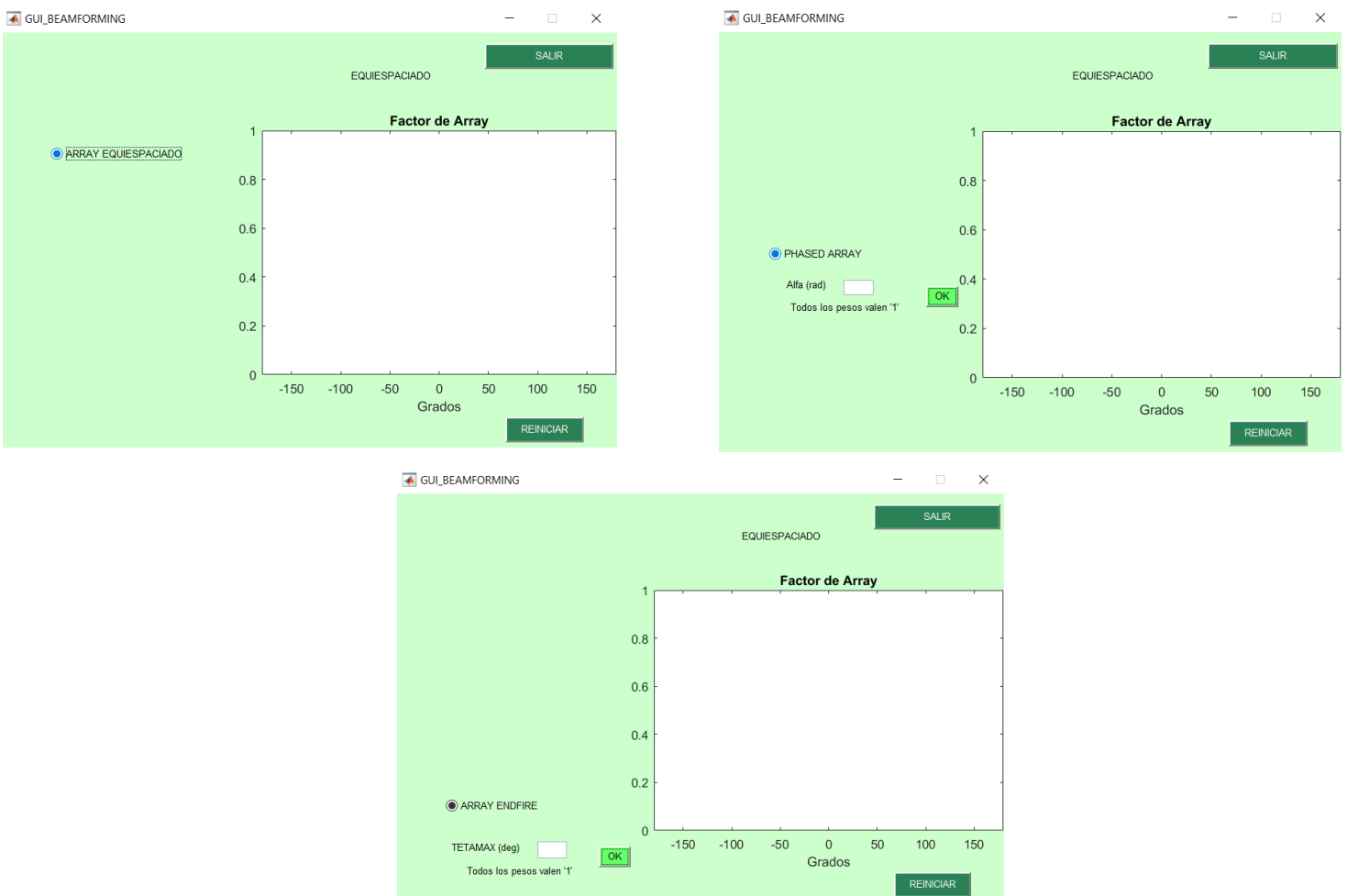


Figura 29. Selección del tipo de “Array Lineal Equiespaciado” deseado.

3.2.-Comparación de arrays

Una vez llegados a este punto en el que ya se ha presentado el funcionamiento de la aplicación generada se va a pasar a implementar una simulación con un ejemplo para todos los tipos de arrays de los que se disponen, para ello se va a elegir un número de micrófonos de '3' y una distancia entre micrófonos de '0.5'(lambda), posteriormente se realizará otro análisis con un número de micrófonos mayor y con una distancia entre ellos igual a la inicial, y por último, se realizará un análisis con el mismo número de micrófonos que existían al inicio y con una distancia entre ellos mayor que la establecida inicialmente, para apreciar de manera visual el efecto que se produce con estos cambios y compararlo con los aspectos teóricos que se comentaron en los apartados anteriores.

En primer lugar, se selecciona el número de micrófonos y el array a emplear, primero se va a probar con un array plano, para este caso nos piden la posición inicial del primer micrófono que la establecemos en el punto (0,0,0) y la posición de las esquinas de sala, la izquierda la estableceremos en el punto (-3,-3,-3) y la derecha en el punto (2,2,2).



Figura 30. Selección de array plano.

En la Figura 30 se observa el diseño de este tipo de array con las coordenadas comentadas anteriormente, en la Figura 31 se pueden apreciar los resultados para el Factor de Array obtenidos con esta combinación de valores, en la figura de la izquierda se ve el valor en grados y en la de la derecha el valor en coordenadas polares.

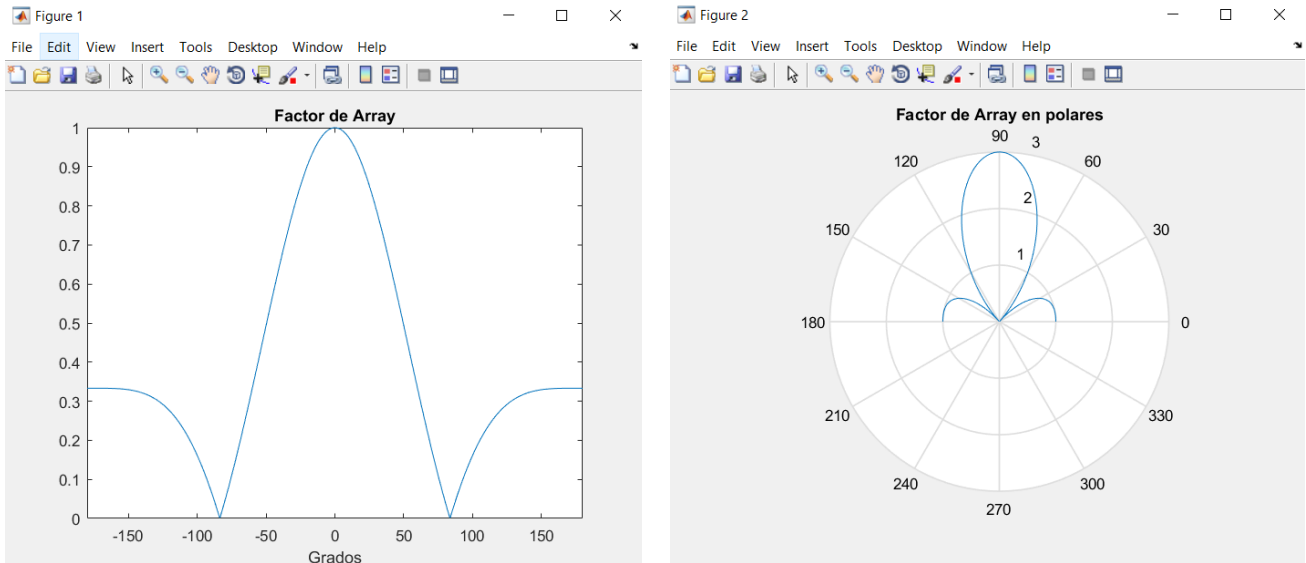


Figura 31. Factor de Array del Array Plano.

A partir de aquí todos los arrays que se van a representar son de tipo lineal, por lo que, la configuración que se debe establecer para todos ellos es la mostrada en la Figura 32:

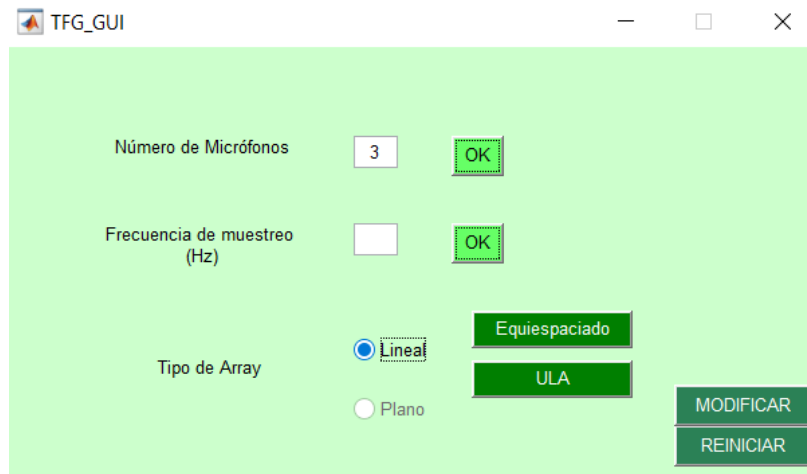


Figura 32. Selección de Array Lineal.

Vamos a comenzar analizando el Array Lineal ULA, como se observa en la Figura 33, tras rellenar los campos pedidos, se dibuja el array en el eje de coordenadas X, Y, Z , y se representa la matriz correspondiente a las posiciones de los micrófonos, donde cada fila es un micrófono representado por las coordenadas X, Y, Z referidas cada una de ellas a una de las columnas respectivamente.

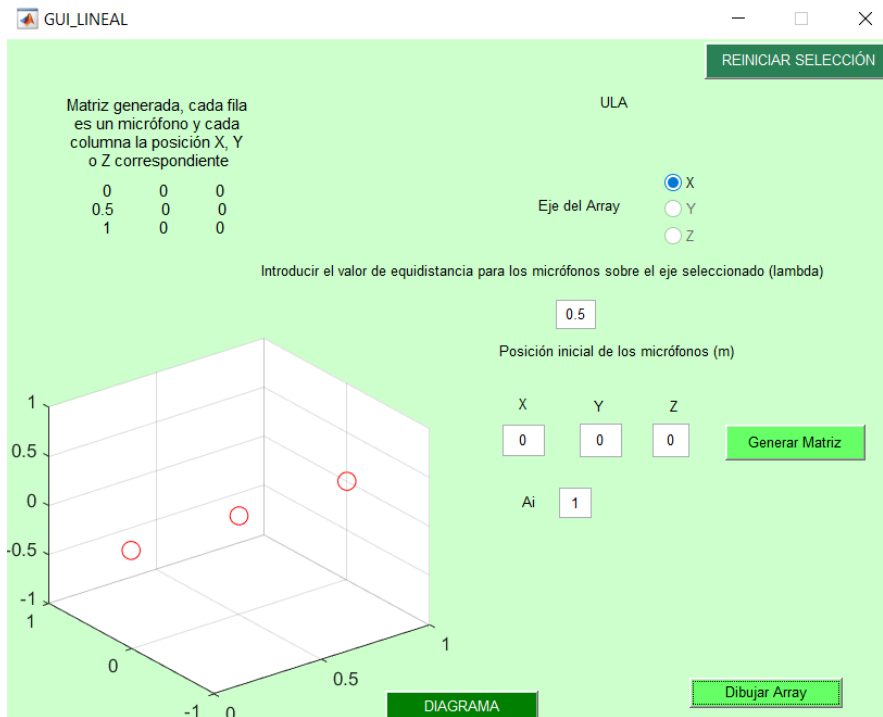


Figura 33. Array Lineal ULA en el eje de coordenadas

Para terminar con este Array Lineal ULA sólo nos queda representar el diagrama de radiación, como se observa en la Figura 34:

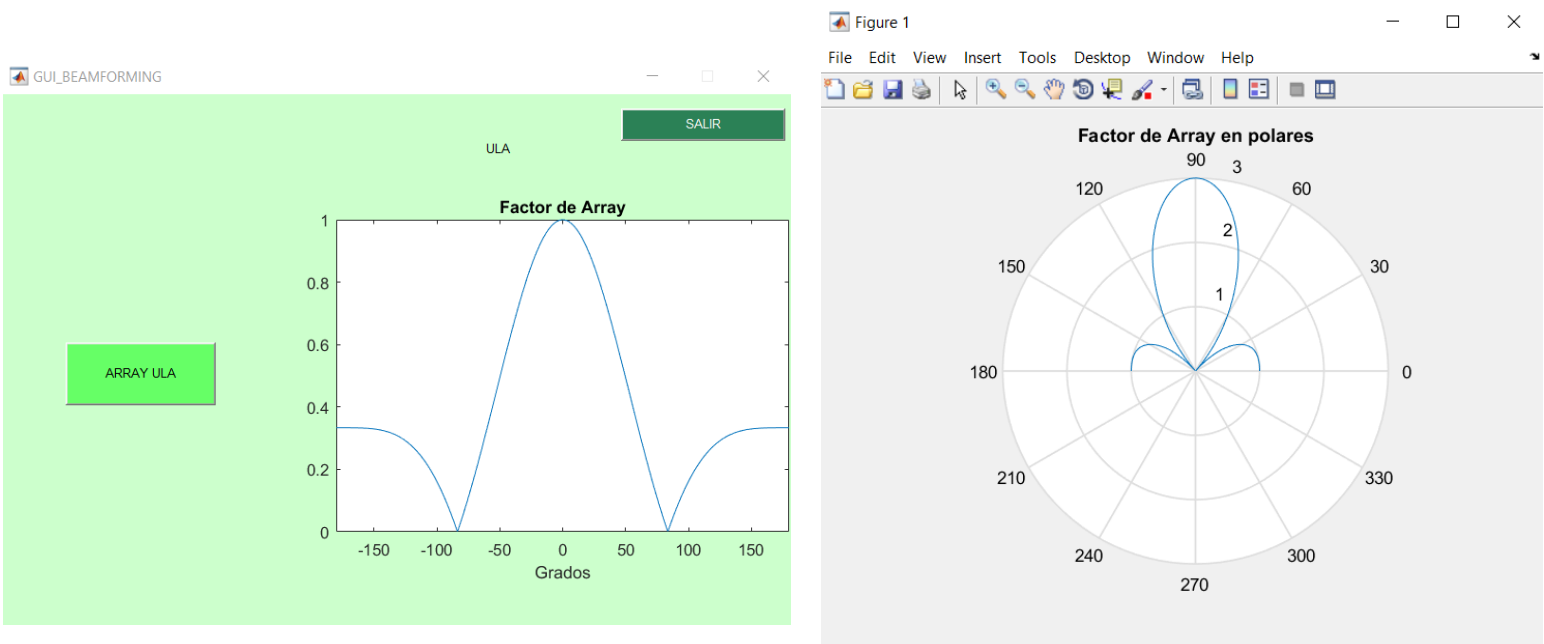


Figura 34. Factor de Array del Array Lineal ULA.

Se prosigue con el análisis con el Array Lineal Equiespaciado, primero hay que establecer los parámetros principales, entre los que destaca el valor de los pesos del array, puesto que ahora ya no se va a fijar como un valor de '1', y es el único diferente con el análisis anterior.

Tenemos que fijar tres valores que van a ser $(1, -1, -j)$ que se emplearán más adelante y que por el modo en el que está diseñada la aplicación no van a ser visibles una vez guardados, a partir de ahí dibujamos las posiciones del array en el eje de coordenadas, como se observa en la Figura 35:

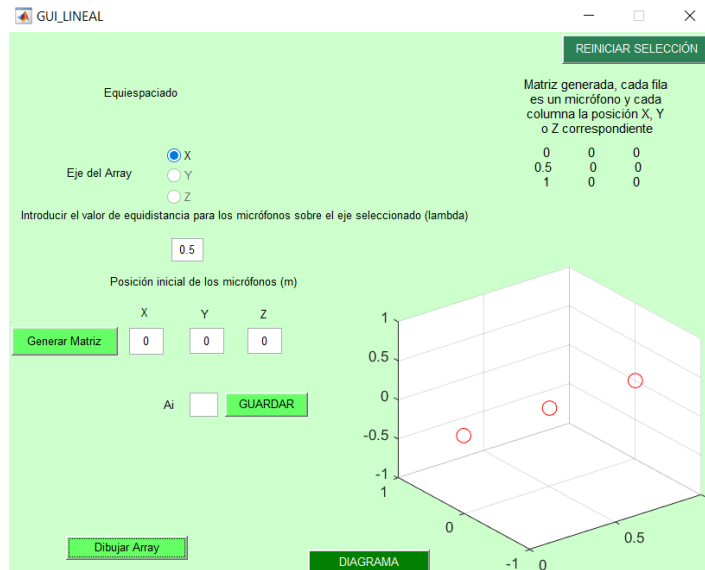


Figura 35. Array Lineal Equiespaciado en el eje de coordenadas

En este caso, como se vio en el ejemplo inicial, al pulsar “DIAGRAMA” tenemos tres posibles configuraciones, vamos a comenzar por la primera de ellas, es decir, el array equiespaciado, la representación de su factor de array se muestra en la Figura 36:

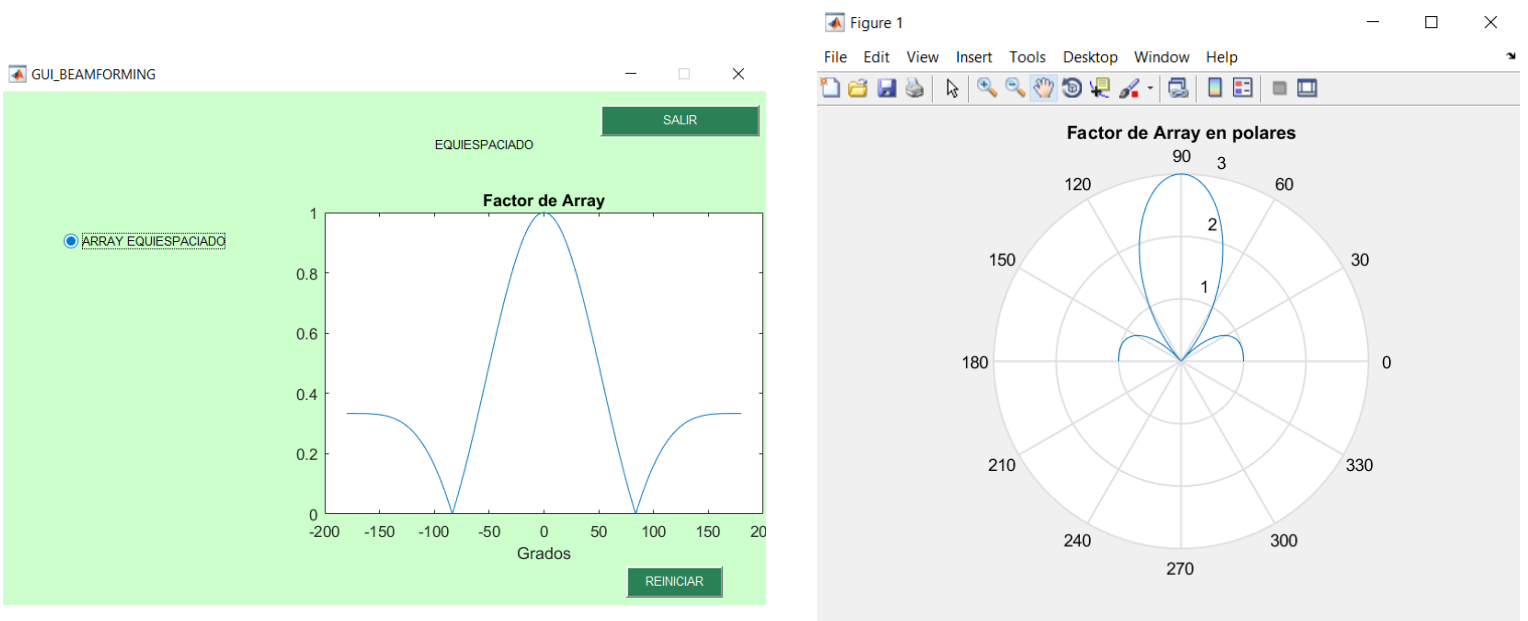


Figura 36. Factor de Array del Array Lineal Equiespaciado.

En segundo lugar, se procede a analizar el factor de array generado para un array de tipo Phased Array, antes de simular su diseño se pide un valor Alfa(deg) por pantalla que debemos introducir para establecer el desfase que se quiere conseguir, si ponemos 0 grados lo que se va a generar es un array ULA, puesto que para el Phased Array los pesos también se configuran a '1', si ponemos un valor negativo se ve como el array se desplazará (en polares, puesto que si miramos la gráfica de grados el efecto es inverso) hacia la izquierda y si establecemos uno positivo se moverá hacia la derecha. Estos valores de Alfa se piden en grados, pero internamente se transforman a radianes para operar en éstas unidades.

La representación de este factor se observa en la Figura 37 en la que se incluye también el efecto de establecer valores positivos o negativos para Alfa, en las dos primeras gráficas se tiene un valor de Alfa = -30 y en las dos segundas un valor de Alfa = 30.

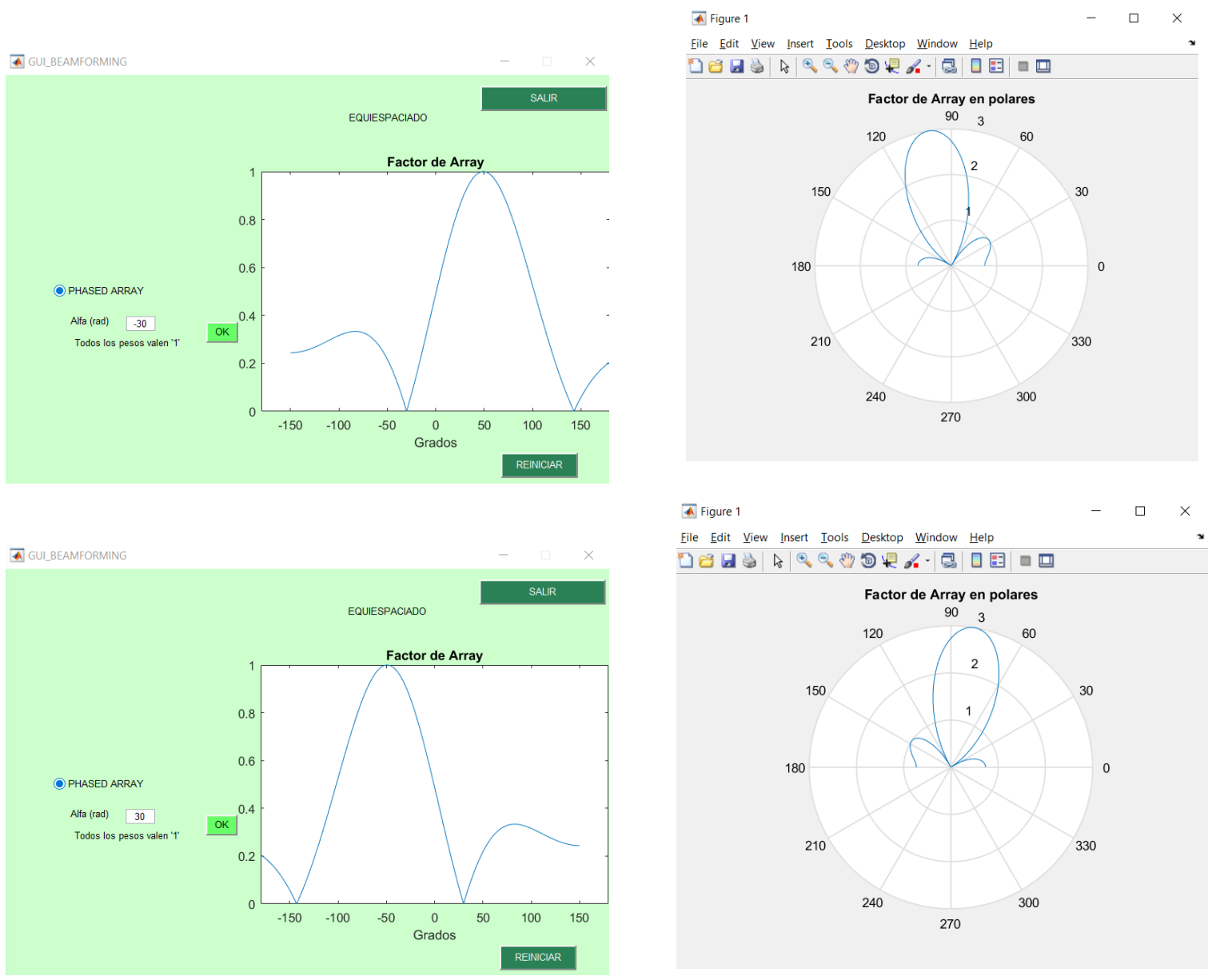


Figura 37. Factor de Array para un Phased Array con Alfa distinto de 0.

Por último, se va a analizar el factor de array generado para un array de tipo Endfire, antes de pasar al dibujo del Factor de Array se nos pide un valor denominado como “THETAMAX” que es la dirección de apuntamiento (en grados) que deseamos para el array, como se observa en la Figura 38, cuando utilizamos un valor de 60° el haz principal corrige su trayectoria y aparece apuntando a este valor que hemos establecido.

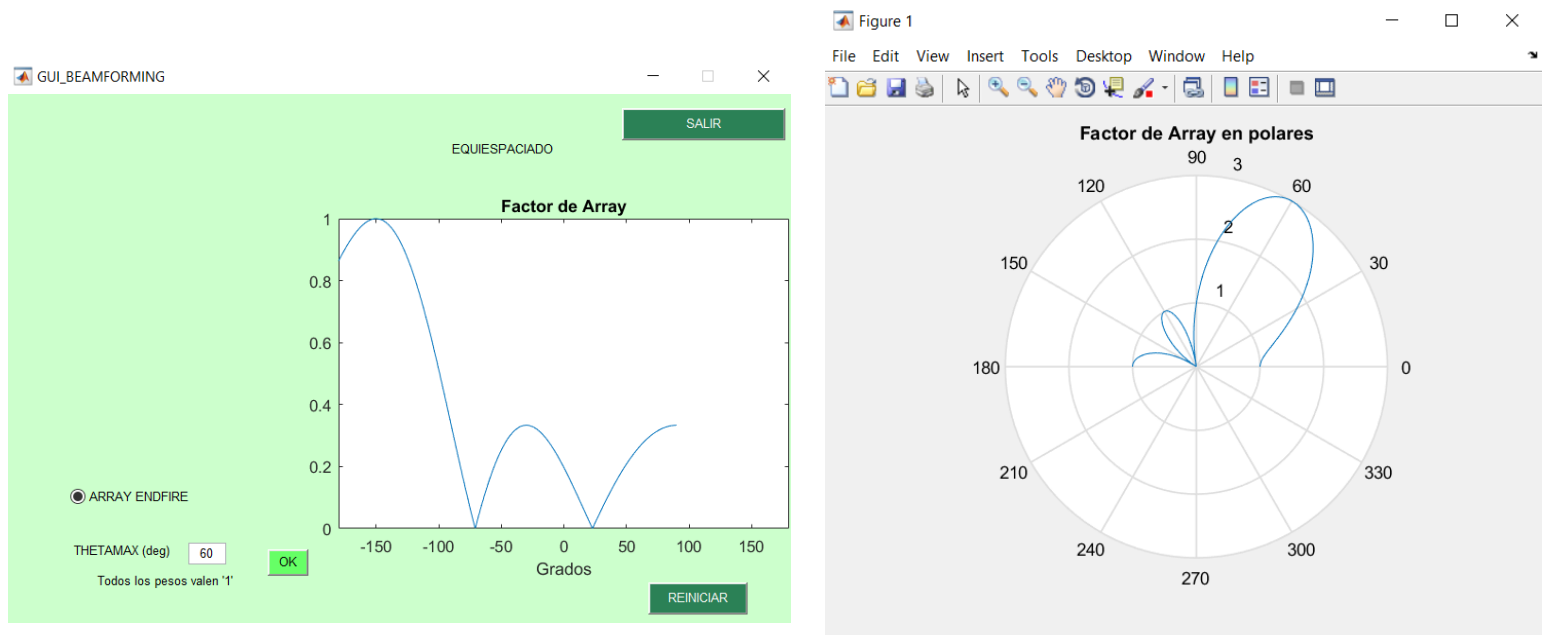


Figura 38. Factor de Array para un Array Endfire con Θ_{max} 60° .

Con esta primera parte de simulaciones se puede concluir que el funcionamiento de los arrays es el esperado según la teoría, verdaderamente, sólo podemos extraer información relevante de los análisis del Phased Array y del Array Endfire, puesto que para los demás arrays no tenemos ningún tipo de variación visual que nos indique que se ha modificado el haz del diagrama de radiación.

Para el Phased Array se ha visto cómo el valor Alfa de desfase introducido provoca que el array se desvíe de su trayectoria, a derecha o izquierda (en el diagrama del Factor de Array en grados) en función del valor negativo o positivo que introduzcamos al parámetro. Este efecto no se aprecia en el Array Lineal ULA ni en el Array Lineal Equiespaciado debido a que suponemos un desfase de 0 grados.

Para el Array Endfire se ha visto cómo se modifica la dirección de apuntamiento del array en función del valor introducido en Θ_{max} , con este tipo de array podemos establecer la dirección de apuntamiento que queremos y tendremos el array fijado en esa posición deseada. Este efecto no se aprecia en el Array Lineal ULA ni en el Array Lineal

Equiespaciado puesto que la dirección de apuntamiento no se modifica y se establece en función del número de micrófonos y de la distancia entre ellos.

La aplicación que se ha desarrollado está orientada a la vigilancia, podemos darle dos enfoques para elegir un array u otro para el diseño físico que podríamos implementar, en primer lugar emplear un Phased Array sería útil por su capacidad de realizar barridos en frecuencia y poder así detectar señales interferentes que aparezcan en el lóbulo principal en función del ángulo al que se apunte en el momento en que se produce una detección, y en segundo lugar, también sería útil el empleo de Arrays Endfire debido a su capacidad de apuntar a la dirección deseada, sabiendo la posición a la que apuntar, habiendo detectado alguna anomalía en esa dirección podemos apuntar el Array Endfire a la misma y poder captarla con mayor nitidez para poder dilucidar si realmente es algo anómalo o se trata de una falsa alarma.

3.3.-Efecto del incremento del número de micrófonos

En este apartado se va a realizar el mismo análisis que en el apartado anterior, salvo que ahora vamos a emplear 6 micrófonos en lugar de los 3 utilizados en el apartado anterior para comprobar el efecto que produce este incremento sobre los factores de array de los distintos tipos de array ya comentados, la distancia entre ellos se mantiene con valor de '0.5'(λ). Por no ser repetitivos y centrarnos exclusivamente en el análisis de esta propiedad, se va a pasar directamente a comentar las gráficas que generan los arrays, tanto en el eje de coordenadas como las que generan los factores de array, sin mostrar de nuevo todo el proceso que sigue la aplicación hasta llegar a la representación final.

En primer lugar, se procede al análisis del Array Plano, se mantiene el valor de posición inicial del primer micrófono en el punto (0,0,0) y se establece la posición en la que situamos las esquinas de la sala, la esquina izquierda en el punto (-3,-3,-3) y la esquina derecha en el punto (3,3,3), ha sido necesario aumentar la capacidad de la sala puesto que con el aumento de micrófonos en el sistema no cabían todos en la representación en el eje de coordenadas, como se observa en la Figura 39:

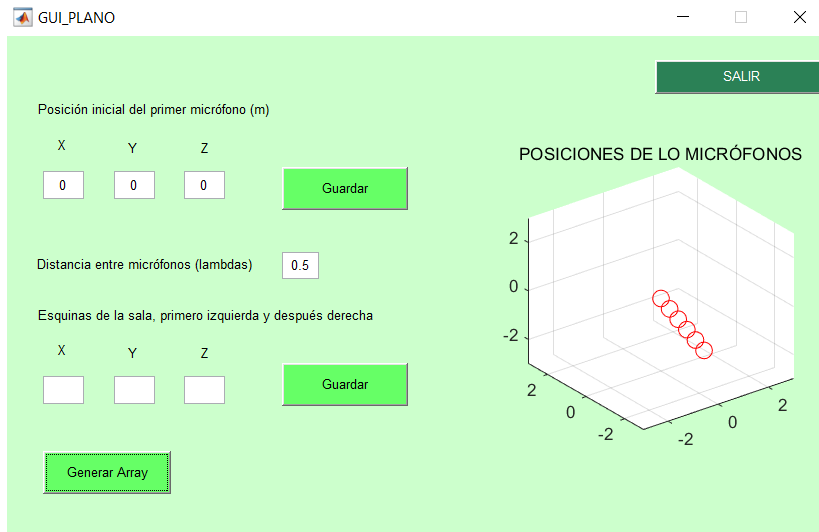


Figura 39. Array Plano para 6 micrófonos.

En la Figura 40 se puede apreciar la variación que ha producido en el array el aumento en el número de micrófonos en el sistema y que será comentada a modo de conclusión al finalizar este apartado, cabe destacar el aumento en los lóbulos laterales y la estrechez del lóbulo principal:

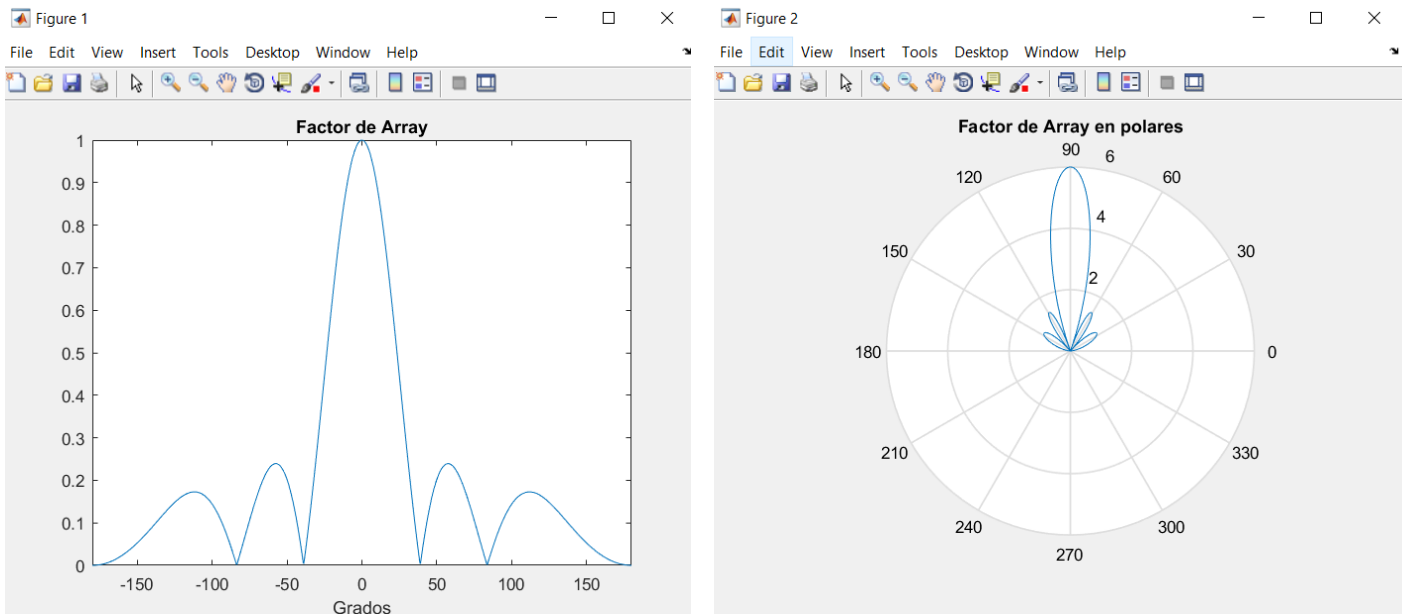


Figura 40. Factor de Array del Array Plano para 6 micrófonos.

En segundo lugar, se procede al análisis de los Arrays Lineales para todos ellos establecemos de nuevo la posición inicial en (0,0,0), comenzaremos con el Array Lineal ULA, vemos en la Figura 41 la representación en el eje de coordenadas, y en la Figura 42 el Factor de Array con la variación sufrida por el aumento del número de micrófonos:

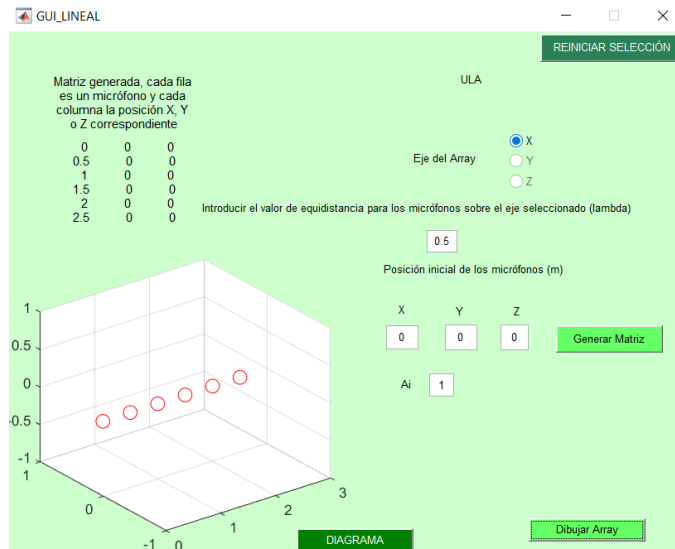


Figura 41. Array Lineal ULA para 6 micrófonos.

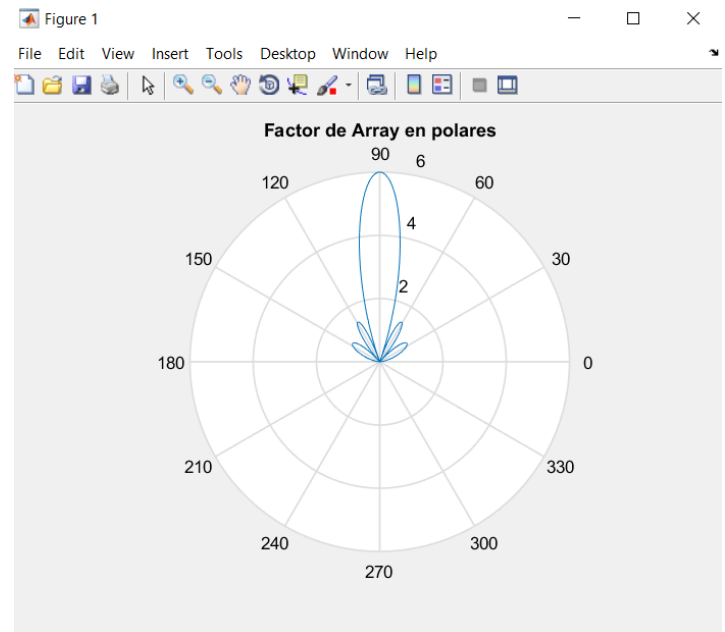
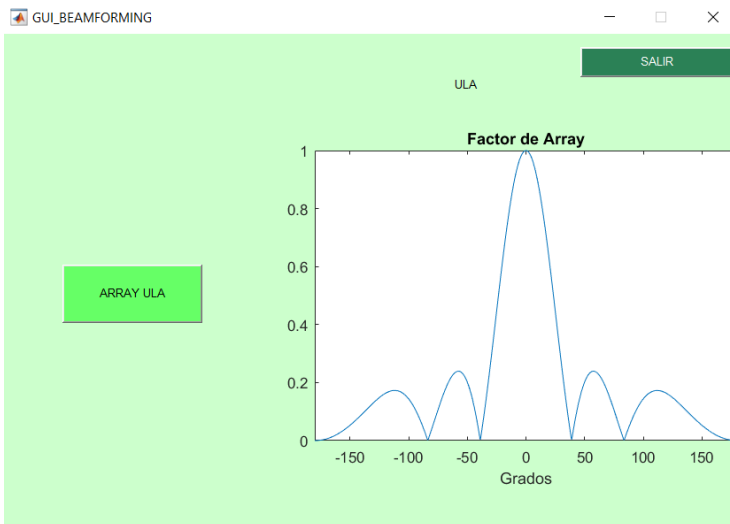


Figura 42. Factor de Array del Array Lineal ULA para 6 micrófonos.

Por último, se van a analizar los distintos tipos de Array Lineal Equiespaciado que se han definido en el apartado anterior, el primero de ellos el Array Lineal Equiespaciado para el que estableceremos los valores de los pesos en $(1, -1, -j, -1, 1, j)$, en la Figura 43 se puede observar el array en el eje de coordenadas y en la Figura 44 el Factor de Array en polares y en grados afectado por el incremento en el número de micrófonos.

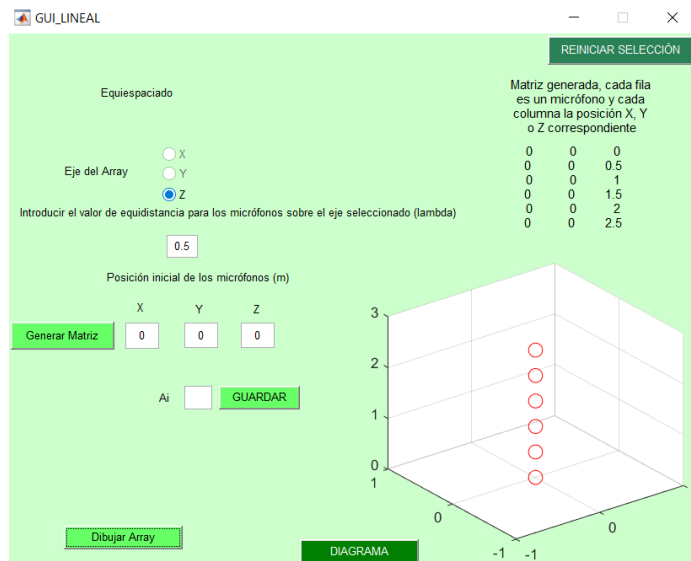


Figura 43. Array Lineal Equiespaciado para 6 micrófonos.

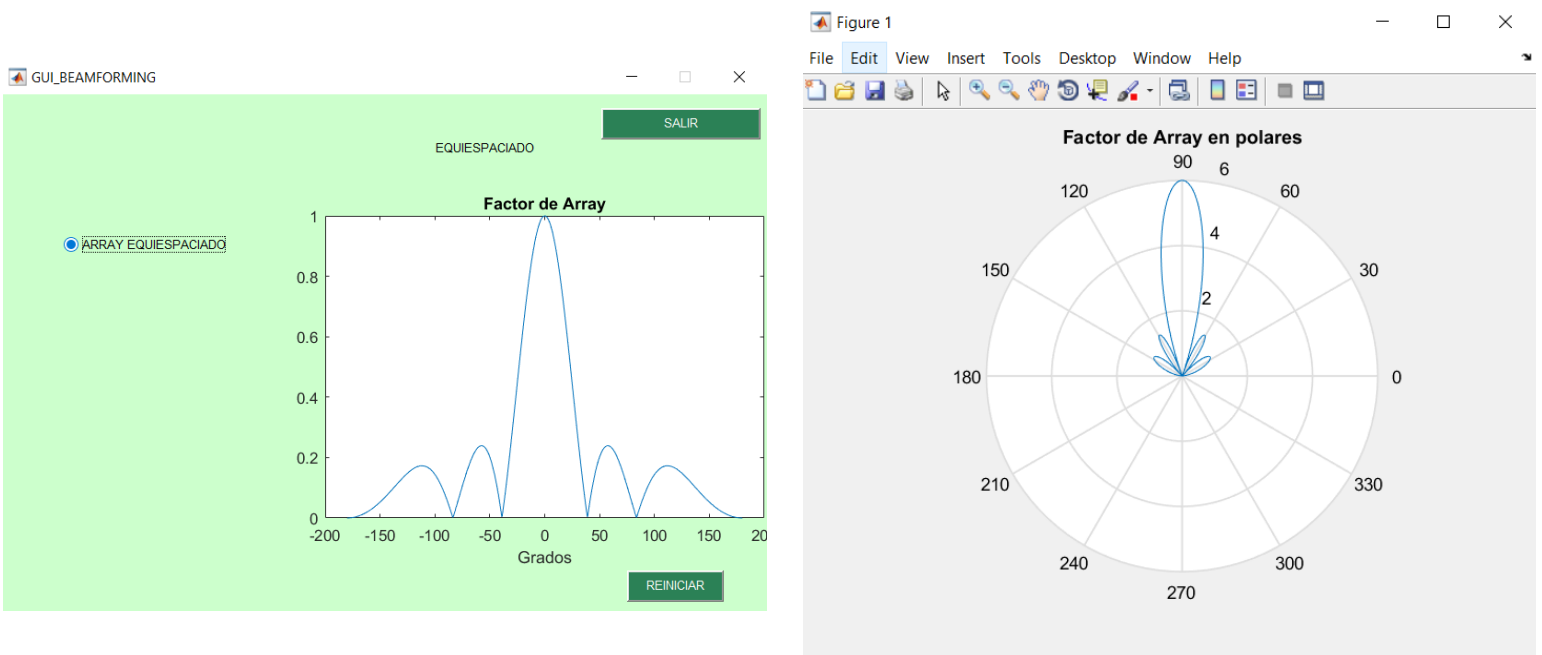


Figura 44. Factor de array del Array Lineal Equiespaciado para 6 micrófonos.

El efecto importante que provocan los arrays de tipo Phased Array y Array Endfire lo apreciamos en el apartado anterior por lo que se ha decidido no añadirlos en este bloque, la simulación que veríamos sería la misma del bloque anterior, pero añadiéndole además el efecto que apreciamos en todas las simulaciones de este apartado, el aumento de los lóbulos secundarios y reducción del haz principal.

A modo de conclusión para explicar lo sucedido al aumentar el número de micrófonos del array cabe comentar dos efectos que se han producido, el primero de ellos es que aumenta el número de lóbulos laterales, que es siempre $N-2$ siendo N el número de micrófonos del

array, para el apartado anterior se ve en las gráficas un único lóbulo secundario ($3-2 = 1$ lóbulo) que aparece dividido en dos por el ancho de la ventana pero solamente se tiene uno, en este caso, vemos como se tienen 4 lóbulos secundarios ($6-2 = 4$ lóbulos), lo que puede suceder si el número de micrófonos aumenta en exceso es que la mayoría de la potencia radiada se disperse en estos lóbulos laterales y se pierda la referencia del lóbulo principal y por tanto las señales que podría captar, mientras esto no ocurra el aumento del número de micrófonos es beneficioso para una de las propiedades principales de los arrays, es decir, para la directividad, lo que nos lleva al segundo efecto y es que se reduce el ancho del lóbulo principal al aumentar la presencia de estos lóbulos laterales que se han comentado y que ocupan espacio y dispersan potencia, la reducción del haz principal genera un aumento en la ganancia directiva, por lo que se puede afirmar que la directividad mejora y que si el aumento en el número de micrófonos no es desproporcionado nuestro array será más directivo.

3.3.-Efecto del incremento de la distancia entre micrófonos

En este apartado se va a realizar el mismo análisis que en el apartado 3.2, salvo que ahora vamos a emplear una distancia entre micrófonos de '2' (λ) para comprobar el efecto que produce este incremento sobre los factores de array de los distintos tipos de array ya comentados, el número de micrófonos empleados será de 3. Al igual que se hizo en el apartado anterior nos vamos a centrar en comentar las gráficas que generan los arrays, tanto en el eje de coordenadas como las que generan los factores de array, sin mostrar de nuevo todo el proceso que sigue la aplicación hasta llegar a la representación final, sin hacer referencia a como se llega a este punto, puesto que ya se ha descrito el proceso al comienzo de este bloque.

En primer lugar, se procede al análisis del Array Plano, se mantiene el valor de posición inicial del primer micrófono en el punto (0,0,0) y se establece la posición en la que situamos las esquinas de la sala, la esquina izquierda en el punto (-3,-3,-3) y la esquina derecha en el punto (7,7,7), ha sido necesario aumentar la capacidad de la sala puesto que con el aumento de la distancia entre micrófonos en el sistema no cabían todos en la representación en el eje de coordenadas, como se observa en la Figura 45:

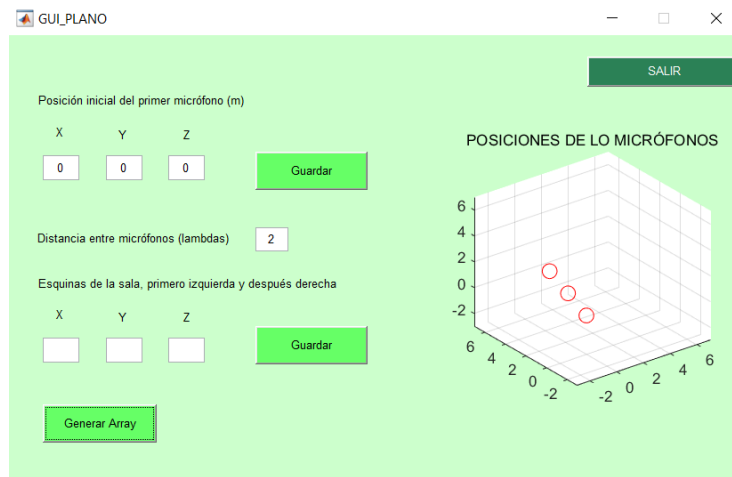


Figura 45. Array Plano para una distancia de 2 lambda.

En la Figura 46 se puede apreciar la variación que ha producido en el array el aumento de la distancia entre micrófonos en el sistema y que será comentada a modo de conclusión al finalizar este apartado, cabe destacar el aumento de potencia en los lóbulos laterales y la consecuente disminución de ella en el lóbulo principal:

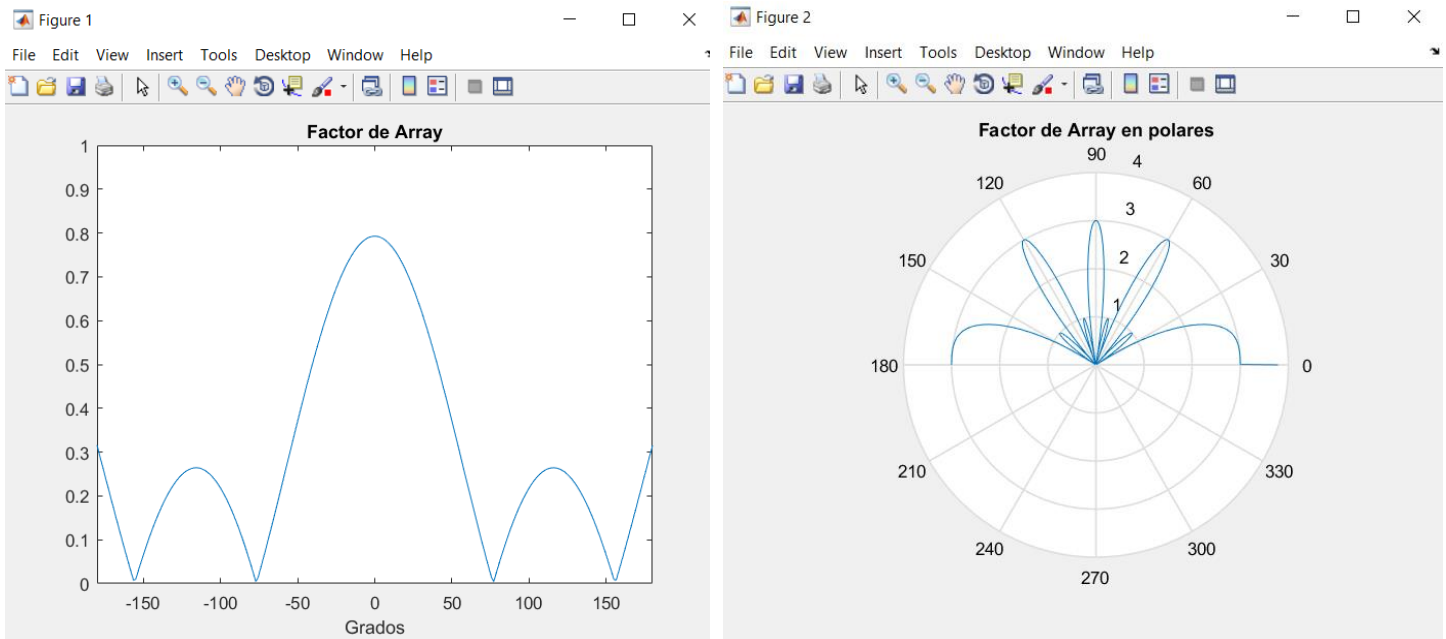


Figura 46. Factor de Array del Array Plano para una distancia de 2 lambda.

En segundo lugar, se procede al análisis de los Arrays Lineales para todos ellos establecemos de nuevo la posición inicial en (0,0,0), comenzaremos con el Array Lineal ULA, vemos en la Figura 47 la representación en el eje de coordenadas, y en la Figura 48 el Factor de Array con la variación sufrida por el aumento de la distancia entre micrófonos:

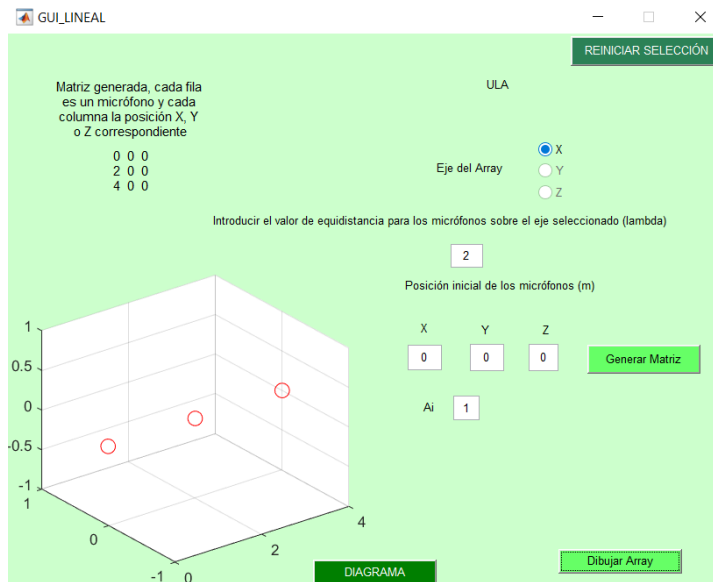


Figura 47. Array Lineal ULA para una distancia entre micrófonos de 2 lambda

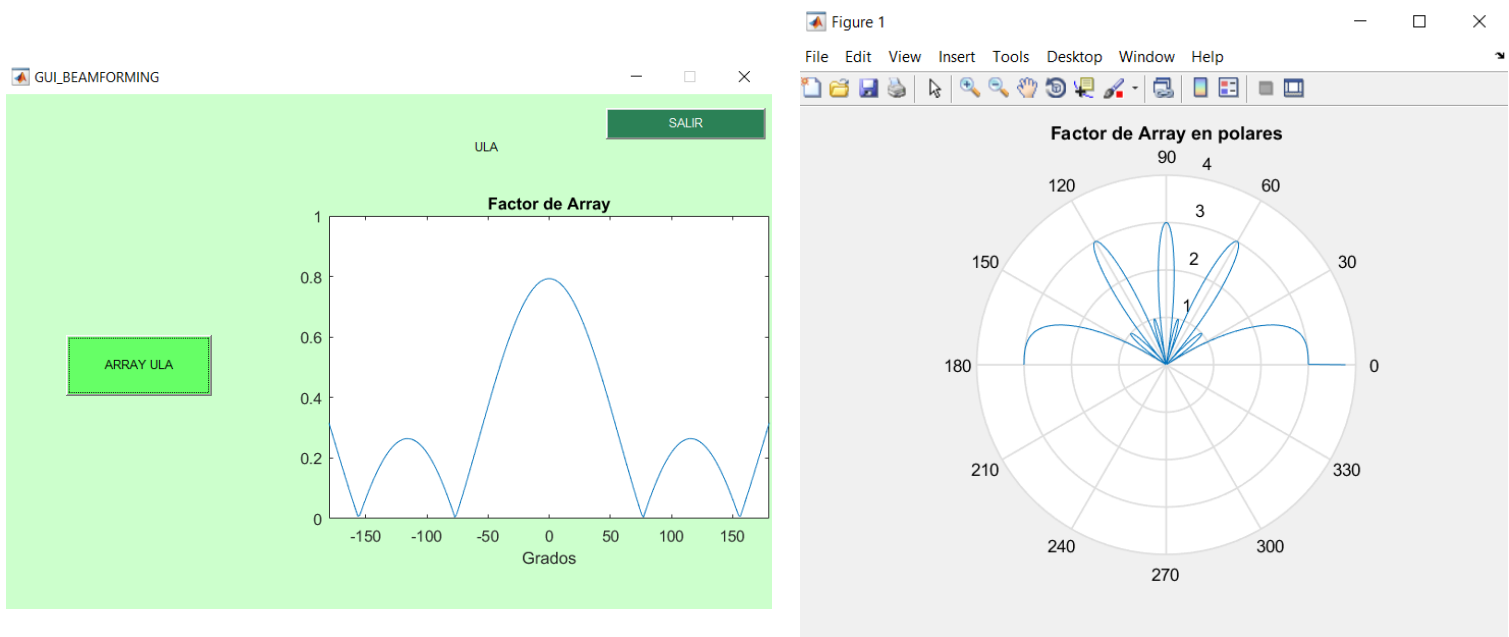


Figura 48. Factor de Array de Array Lineal ULA para una distancia de 2 lambda.

Por último, se van a analizar los distintos tipos de Array Lineal Equiespaciado que se han definido en el apartado anterior, el primero de ellos el Array Lineal Equiespaciado para el que estableceremos los valores de los pesos en $(1, -1, -j)$, en la Figura 49 se puede observar el array en el eje de coordenadas y en la Figura 50 el Factor de Array en polares y en grados afectado por el incremento de la distancia entre micrófonos.

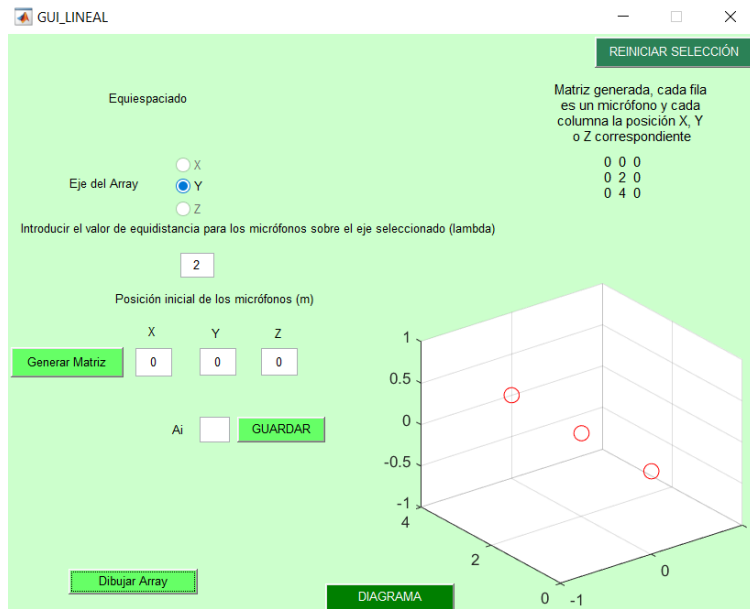


Figura 49. Array Lineal Equiespaciado para una distancia de 2 lambda.

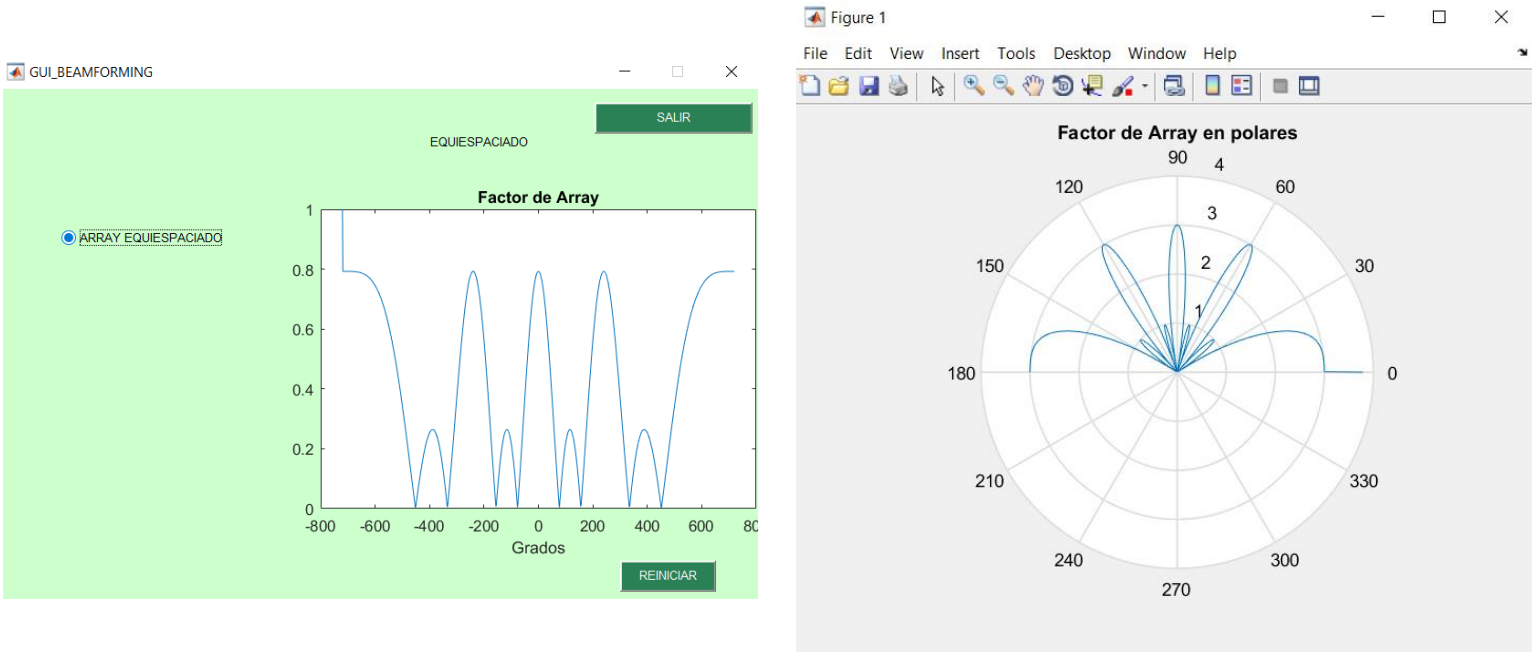


Figura 50. Factor de array del Array Lineal Equiespaciado para una distancia de 2 lambda.

Al igual que se concluía en el apartado anterior, no se va a analizar el efecto producido en los arrays de tipo Phased Array y Array Endfire, puesto que sería repetitivo con lo que hemos visto en estas gráficas, para el Phased Array veríamos el efecto que se ve en el Array Lineal ULA más el efecto de la fase Alfa y para el Array Endfire veríamos ese efecto del aumento de la distancia entre micrófonos pero con la salvedad de la selección de la posición de apuntamiento a través del parámetro Theta_max.

Se concluye este apartado con los efectos que provoca en el Factor de Array el aumento de la distancia entre micrófonos, en las gráficas se puede apreciar como la potencia del haz principal se ha reducido respecto al primer análisis que realizamos, esto es porque los lóbulos laterales han disipado parte de la potencia, lo que deja ver que es un efecto negativo puesto que perdemos la referencia del array y la capacidad de detección. Se ve claramente que ésta disipación de potencia viene precedida del aumento de lóbulos laterales en el sistema, hay más lóbulos de los que había al comienzo y además disipan más potencia de la que disipaban al inicio, por lo tanto, el lóbulo principal pierde potencia, lo que es perjudicial para nuestro sistema. En el apartado anterior se comentó que se produce un aumento de la directividad al disponer de más micrófonos en el sistema y esto era bueno porque centramos más la dirección de apuntamiento, pero en este caso no se puede considerar algo positivo puesto que el lóbulo principal ha perdido potencia.

4.-Conclusiones

Tras la realización de este proyecto se puede concluir que para mejorar los resultados obtenidos a partir del procesado en array es necesario el empleo de ciertas técnicas ya descritas en el documento que favorecen la correcta recepción de las señales y la localización de las fuentes que emiten ciertas señales. Otra de las conclusiones que he sacado, a partir de los resultados experimentales obtenidos mediante las simulaciones, es que a la hora de diseñar un array influye de manera notable la geometría escogida para el diseño, una vez escogida la geometría correcta de cara a obtener los resultados deseados es importante tener en cuenta dos factores, el primero de ellos es el número de micrófonos que van a formar parte del sistema y el otro es la distancia entre los propios micrófonos.

El primero de los factores deja ver que si la distancia entre micrófonos es de un valor bajo, el número de micrófonos no afecta de manera negativa en el diseño, al contrario, afecta casi de manera positiva puesto que, como vimos en las gráficas, el haz principal se vuelve más estrecho, por lo tanto la ganancia directiva del array aumenta.

Sin embargo, el segundo de los factores si que presenta una conclusión negativa, y es que al incrementar la distancia entre micrófonos el sistema se distorsiona demasiado respecto a los casos más ideales, esto es debido a que aumenta la presencia de lóbulos laterales y también la potencia que disipa cada uno de ellos, reduciendo la potencia del haz principal, lo que provoca que la dirección de apuntamiento cambie y el array no esté correctamente diseñado.

Respecto a la temática de la vigilancia, el desarrollo del procesado en array tiene múltiples ventajas, por ejemplo, se pueden diseñar sistemas que detecten exactamente la posición de la fuente que emite un sonido interferente a partir de tener nuestro sistema esperando señales en todas las posiciones del espacio, podría hacerse con un Phased Array barriendo el espectro de frecuencia a lo largo del tiempo. A partir de este sistema, sabiendo dónde se sitúa la fuente interferente podríamos diseñar un Array Endfire apuntando a esa dirección ya conocida para focalizar la atención sobre dicho punto y a partir de ahí detectar la señal con mayor calidad y dilucidar qué tipo de señal es la emitida por esa fuente detectada.

De cara a un proyecto futuro se puede partir de la base generada en este proyecto para realizar un diseño similar al ejemplo expuesto en el párrafo anterior, otro ejemplo que podría implementarse es el estudio del efecto de la directividad y de los pesos en los diferentes tipos de arrays.

5.-Pliego de condiciones

5.1.- Objetivos y campo de aplicación

El objetivo de este TFG es aunar los conocimientos sobre arrays y los algoritmos brevemente comentados en la introducción para desarrollar aplicaciones relacionadas con la vigilancia. Se podrán implementar algoritmos para determinar la dirección de llegada de fuentes sonoras, y para detectar sonidos impulsivos. El estudio conllevará el diseño del array en cuanto a número de sensores, y distancias entre ellos para sintetizar el haz deseado.

5.2.- Descripción del trabajo

A grandes rasgos lo que se va a realizar es lo siguiente:

- Primero se seleccionarán los componentes que creamos más adecuados para el diseño de las aplicaciones.
- Posteriormente se desarrollarán los programas necesarios para realizar simulaciones sobre las posibles orientaciones y distancias de los micrófonos en el array y poder así determinar el diseño más correcto para la aplicación deseada.
- Por último, se integrará todo el diseño para realizar el proyecto al completo.

Lo que me lleva a realizar el TFG sobre este tema de procesado de voz es que es un campo que no hemos tratado mucho durante el grado y que me llamó mucho la atención a partir de la asignatura "Procesado de Voz y Audio" que imparte el tutor del proyecto.

5.3.- Metodología y plan de trabajo

En primer lugar, debemos escoger los micrófonos adecuados para las posibles aplicaciones a realizar, teniendo en cuenta aspectos como tamaño, sensibilidad, respuesta en frecuencia.

A grandes rasgos lo que se va a realizar es lo siguiente, primero se seleccionarán los componentes que creamos más adecuados para el diseño de las aplicaciones, posteriormente se desarrollarán los programas convenientes para realizar simulaciones sobre las posibles orientaciones y distancias de los micrófonos en el array y poder así determinar el diseño más

correcto para la aplicación deseada. Por último, se integrará todo el diseño para realizar el proyecto al completo.

5.4.- Medios

Para la realización del TFG serán necesarios micrófonos, un ordenador para la implementación de los algoritmos necesarios y dispositivos electrónicos para volcar los programas realizados y desarrollar el correcto funcionamiento de la aplicación. Todo el material necesario será financiado por el Grupo de Investigación en Procesado de Señales Sonoras, al que pertenece el tutor del proyecto, que ha mostrado interés por el resultado del mismo.

Como se comentar en el apartado 4, los micrófonos serán escogidos atendiendo a ciertos requisitos de diseño y acordes a la aplicación final que se va a desarrollar para poder así implementarla con mayor éxito.

Respecto a los ordenadores y a los dispositivos electrónicos, no se requiere ningún material adicional al dispuesto por el departamento.

6.-Presupuesto

6.1.- Introducción

Para la realización del proyecto se han atendido los siguientes conceptos:

- Coste de la mano de obra.
- Coste de los materiales empleados.
- Honorarios del ingeniero.

El desarrollo del proyecto ha sido llevado a cabo por un estudiante de Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación.

Las fases seguidas en la realización del proyecto han sido las siguientes, no presentadas en orden cronológico.

1. Revisión bibliográfica previa sobre el procesado de voz en array.
2. Análisis de la información obtenida.
3. Diseño del programa de simulación y análisis de arrays de micrófonos.
4. Realización software.
5. Pruebas del sistema.
6. Redacción y transcripción de la memoria del proyecto.

6.2.- Coste de ejecución material

Este apartado engloba todos los costes asociados a la ejecución del proyecto, incluyendo los costes de personal (mano de obra) y la amortización de los equipos empleados.

6.2.1.- Coste de la mano de obra

Los costes de mano de obra deben achacarse a la persona que desarrolle cada parte del proyecto. En ese sentido el estudiante de Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación ha realizado las siguientes tareas:

- Tareas de diseño de los sistemas y desarrollo software.
- Tareas de prueba de los sistemas.
- Tarea de transcripción de los resultados a la memoria.

En el coste del desarrollo software y la labor de prueba, habrá que añadir los gastos originados por la amortización de los equipos empleados en dicha tarea.

Para poder calcular el gasto total de personal, hemos de calcular el tiempo necesario para poder desarrollar cada tarea, obteniéndose el gasto total multiplicando el gasto diario por el número de días empleados en el desarrollo del proyecto. En ese sentido se tiene el siguiente cuadro donde se muestra el tiempo dedicado a cada actividad.

CONCEPTO	INGENIERO
Estudio teórico	100
Software implementado	
Diseño	30
Desarrollo	100
Pruebas	40
Análisis de resultados	40
Redacción de la memoria, documentación	40
TOTAL	350

Tabla 2.- Tiempos empleados en las distintas tareas del proyecto.

6.2.1.1.- Relación de salarios

En la siguiente tabla se detallan los salarios base mensual y diario, así como las primas y sueldo total diario del personal implicado en la realización del proyecto. El salario diario se obtiene a partir del mensual de la siguiente forma: se multiplica el salario mensual por el número de meses que tiene el año (12) y el resultado se divide por el número de días del año.

PERSONAL	SALARIO BASE MENSUAL	SALARIO BASE DIARIO	PRIMAS	TOTAL SALARIO DIARIO
INGENIERO	2000 €	65.75 €	0 €	65.75 €

Tabla 3.- Salarios del personal que participa en el proyecto.

6.2.1.2.- Cargas por obligaciones sociales

Las cargas por obligaciones sociales se dan como porcentajes que se gravan sobre el sueldo antes calculado. Se consideran las siguientes:

CONCEPTO	PORCENTAJE (%)
Vacaciones anuales retribuidas	8,2%
Indemnización por despido	1,4%
Abono de días festivos	16,4%
Días de enfermedad	3,8%
Paro tecnológico	8,2%
Ausencia justificada	1,8%
Cuota Seguridad Social	28,5%
Cuota Accidentes de Trabajo	6,12%
Cuota Fondo Garantía Salarial	0,4%
Cuota Formación Profesional	0,7%
Cuota Desempleo	7,55%
TOTAL	83,07%

Tabla 4.- Cargas por obligaciones sociales.

6.2.1.3.- Salarios efectivos

Los salarios efectivos, tras aplicar las distintas cargas sociales, son los siguientes:

PERSONAL	SALARIO DIARIO	CARGAS SOCIALES	SALARIO TOTAL DIARIO
INGENIERO	65.75 €	54.62 €	119.95 €

Tabla 5.- Salarios totales tras aplicar cargas sociales.

6.2.1.4.- Coste final de la mano de obra

El cálculo del coste final de la mano de obra se realiza multiplicando el número de días de duración del proyecto por el salario total diario. Puede verse reflejado en la siguiente tabla:

PERSONAL	SUELDO TOTAL DIARIO	NÚMERO DE DÍAS	IMPORTE TOTAL
INGENIERO	119.95 €	44	5277.8 €
IMPORTE TOTAL DE LA MANO DE OBRA			5277.8 €

Tabla 6.- Coste total de la mano de obra.

6.2.2.- Costes de la amortización del material empleado

Para la realización del proyecto se han empleado una serie de equipos y utilidades software. Es necesario calcular los costes de amortización de todo este material, para lo que se parte del precio inicial y del tiempo estimado de utilización en años (5 para los materiales informáticos), de donde se calcula la constante de amortización anual.

EQUIPO	P.V.P.	AÑOS DE VIDA	AMORT.(%)	MESES DE USO	COSTE AMORTIZ.
Impresora	300 €	5	20	3	15
PC	3000 €	5	20	3	150 €
COSTE TOTAL DE AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS					165 €

Tabla 7.- Costes de la amortización de equipos utilizados.

6.2.3.- Coste total de ejecución material

Es la suma de los costes anteriormente calculados. En nuestro caso, se obtiene: **5442.8 €**

6.3.- Honorarios del ingeniero

Se calculan como un porcentaje sobre los costes de ejecución material del proyecto que ya se han calculado en el apartado anterior.

El porcentaje a aplicar está regulado por los Colegios Oficiales, estando establecido en estos momentos en un 7%.

COEFICIENTE	CANTIDAD AFECTADA	RESULTANTE
1	5442.8 €	5442.8 €
		TOTAL
		5442.8 €
Honorarios del Ingeniero, calculados como un 7% del total		381 €

Tabla 8.- Honorarios del Ingeniero.

6.4.- Coste total del proyecto

El coste total del proyecto se obtiene como la suma de los Costes de Ejecución Material y los Honorarios del Ingeniero. Además, deben aplicarse a cada cantidad los impuestos pertinentes:

CONCEPTO	IMPORTE
COSTE DE EJECUCIÓN MATERIAL	5442.8 €
HONORARIOS	381 €
TOTAL (sin impuestos)	5823.8€
I.V.A. (21%)	1223 €
TOTAL	7046.80 €

El coste total del proyecto asciende a la cantidad: **7046.80 €**

Madrid, a 12 de Diciembre de 2016.

7.-Manual de usuario

Al desarrollar la memoria se hizo una presentación de la aplicación que se ha utilizado para generar las gráficas de los arrays, tanto de su posicionamiento sobre el eje de coordenadas como del Factor de Array, bien, pues en este apartado se expone cómo un usuario debe emplear la aplicación para obtener los resultados deseados.

En primer lugar, al ejecutar la GUI con el comando “TFG_GUI” se obtiene una pantalla, en la que se selecciona paso a paso el número de micrófonos y la frecuencia de muestreo, pulsando OK cuando ya se haya escrito el valor en el cuadro correspondiente. Cuando ya se ha pulsado el botón OK para fijar la frecuencia de muestreo se activan las dos opciones que se ven más abajo para “Tipo de Array”, en esta opción se seleccionará entre arrays planos y arrays lineales:

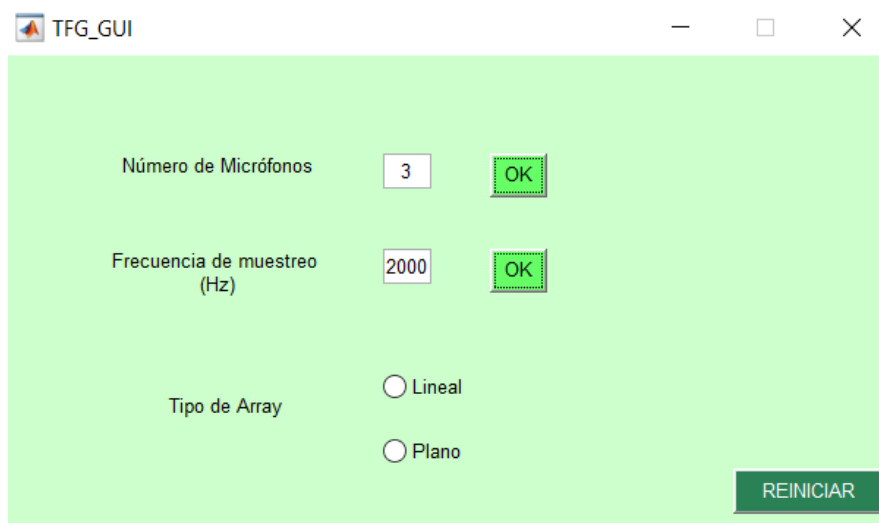


Figura 51. Valores iniciales.

A partir de aquí, se tienen dos opciones, primero se explica la selección del array de tipo lineal. Al seleccionar esta opción se tendrá que elegir posteriormente entre array Equiespaciado o array ULA:



Figura 52. Tipo de Array Lineal.

Y la segunda opción que se tiene es elegir el tipo de array plano, con lo que se entrará directamente a otra pantalla que se explicará más adelante:



Figura 53. Tipo de Array Plano.

Ahora volvemos al primer caso, vamos a ver lo que sucede cuando se elige un array de tipo lineal equiespaciado, aparece una nueva ventana en la que se piden ciertos valores que se explican a continuación:

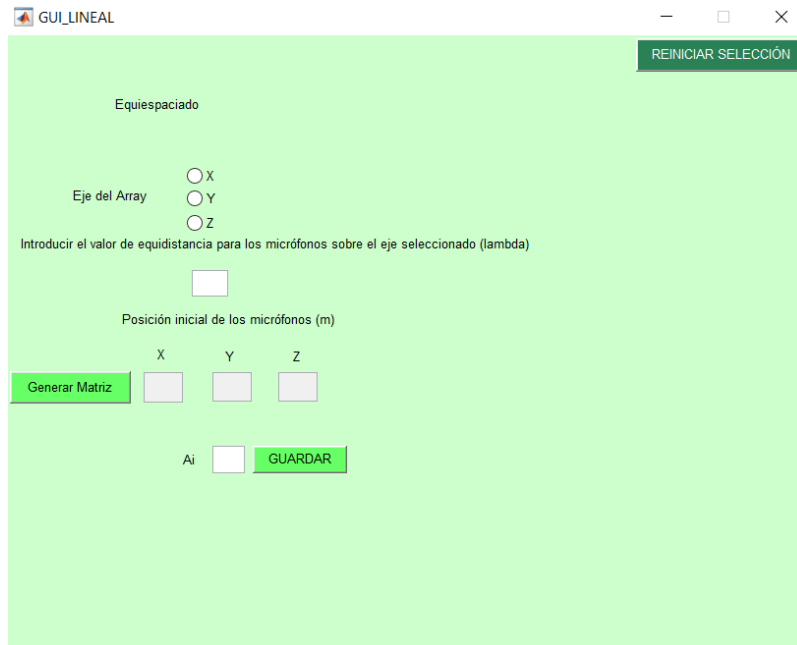


Figura 54. Tipo de Array Lineal Equispaciado.

En esta pantalla se debe seleccionar en primer lugar el eje sobre el que se situará el array, para el ejemplo vamos a elegir el eje X, y posteriormente se puede introducir en el cuadro correspondiente la equidistancia existente entre los micrófonos (en lambda):

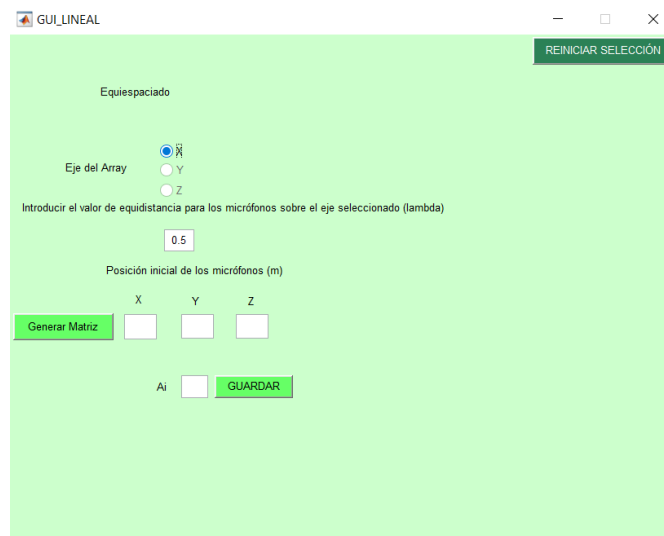


Figura 55. Valores de Array Lineal Equispaciado.

Lo siguiente que haremos será introducir los puntos en coordenadas cartesianas (valor en metros) de comienzo del array y posteriormente se pulsará el botón “Generar Matriz” y se mostrará la matriz generada a partir del eje, la equidistancia y los puntos seleccionados:

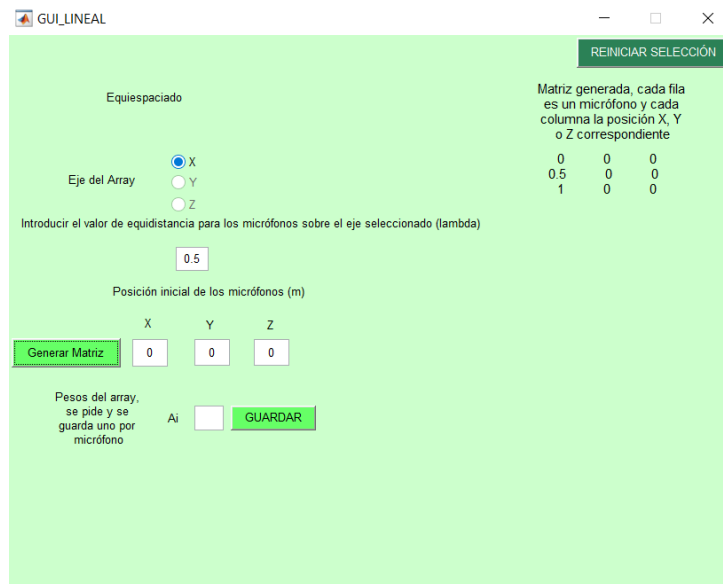


Figura 56. Matriz generada de Array Lineal Equiespaciado.

En este caso debemos introducir el valor de los pesos A_i para cada micrófono, por lo que se irá pidiendo tantas veces como micrófonos hayamos escogido el valor correspondiente para cada uno de ellos, cuando ya se han guardado los respectivos valores podemos dibujar en el eje de coordenadas el array de micrófonos:

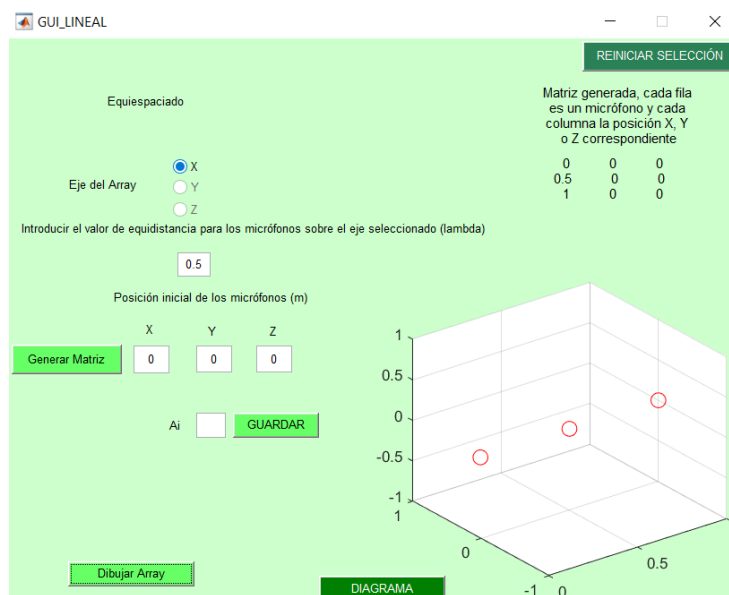


Figura 57. Gráfica del eje de coordenadas de Array Lineal Equiespaciado.

En este punto ya estamos listos para pasar a la representación del Factor de Array, esto se consigue en una nueva ventana a la que llega tras pulsar el botón “DIAGRAMA”, en dicha ventana podremos seleccionar entre los posibles tipos de array equiespaciado que se han programado. Si en cualquier momento se quisiera cambiar el tipo de array sería necesario

pulsar el botón “REINICIAR SELECCIÓN”, se volvería a la pantalla inicial y en ella se pulsa el botón “MODIFICAR” si sólo queremos cambiar el tipo de array o el botón “REINICIAR” si se quiere comenzar el diseño desde 0.

En la siguiente imagen se observa la GUI que ve el usuario tras pulsar el botón “DIAGRAMA” de la imagen anterior:

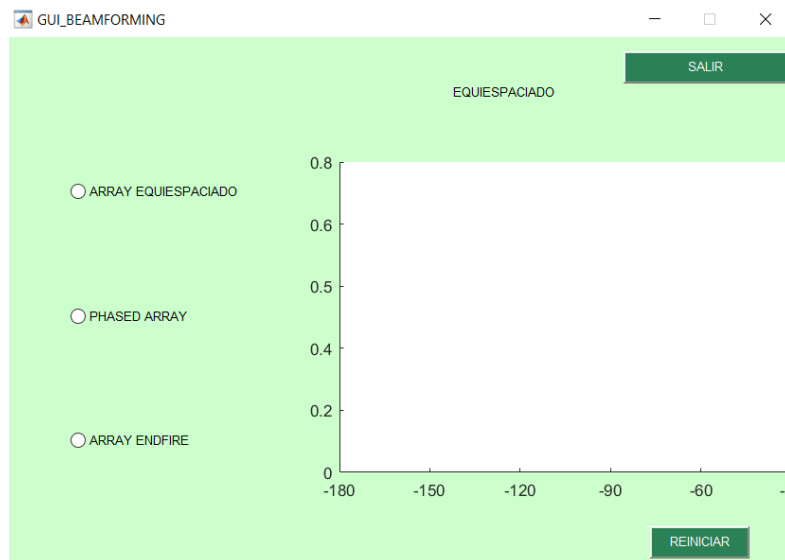


Figura 58. Tipo de Array Lineal a implementar.

El usuario puede seleccionar cualquiera de las tres opciones en función el tipo de array que desee implementar, es más, con el botón “REINICIAR” podría probar varios tipos las veces que considere oportuno. Si se pulsa el botón “SALIR” el programa se cerrará por completo. Para este ejemplo vamos a seleccionar “Phased Array”, primero es necesario introducir el valor que nos piden, y al pulsar OK, se van a pintar las gráficas que queremos como resultado del diseño:

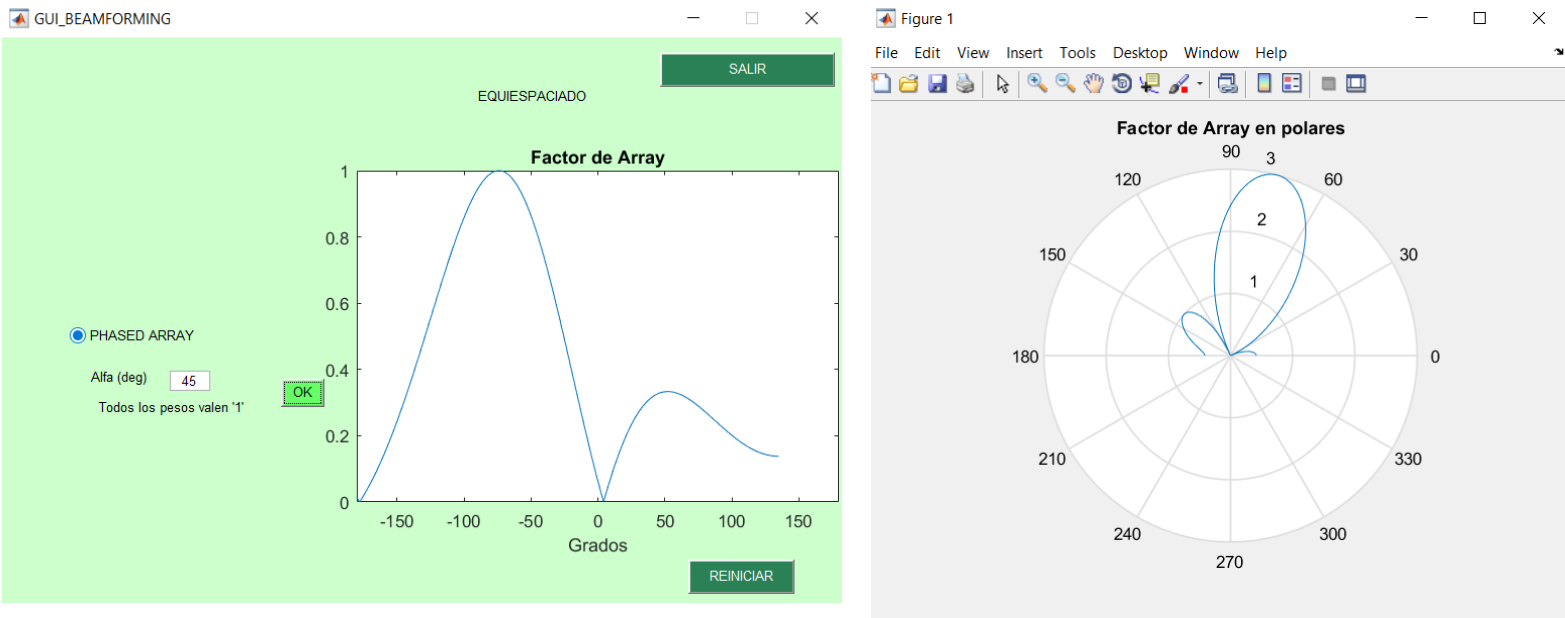


Figura 59. Gráficas Factor de Array para Phased Array.

Volviendo a retomar la ventana inicial, si se selecciona el tipo de array lineal ULA, aparece una ventana muy similar a la del array lineal equiespaciado y se cumple de la misma manera, ahora vamos a probar a establecer el eje en Z y a establecer otros valores de las posiciones para hacer visible que pueden modificarse los valores según el deseo del usuario:

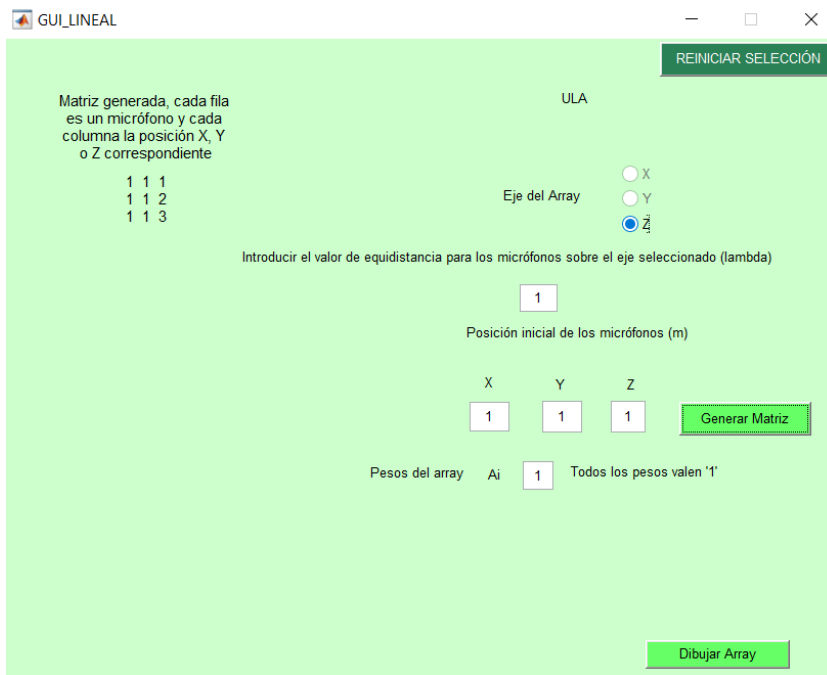


Figura 60. Valores de Array Lineal ULA.

Y al pulsar el botón “Dibujar Array” se pinta en el eje de coordenadas el array generado:

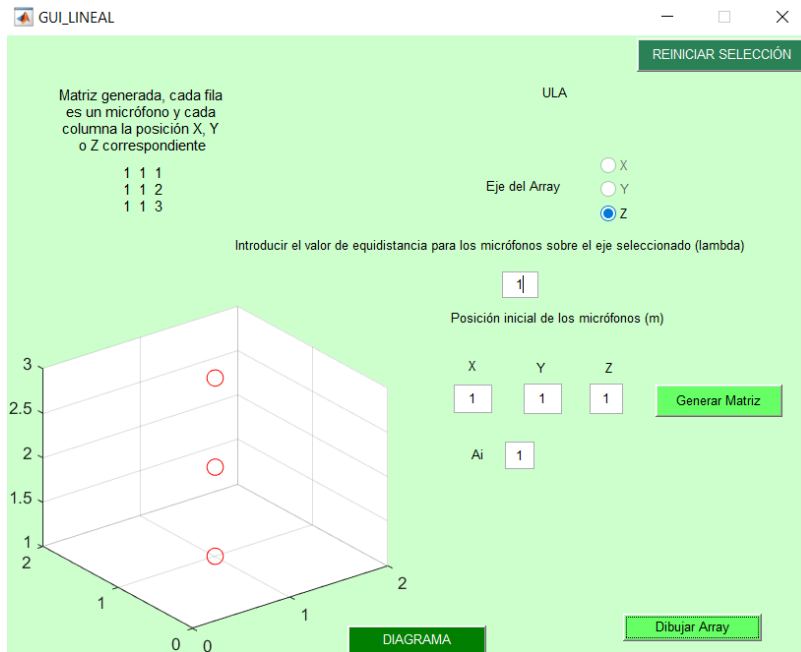


Figura 61. Matriz y gráfica del eje de coordenadas de Array Lineal ULA.

Tal y como ocurría para el array lineal equiespaciado, al presionar el botón “DIAGRAMA” se abre una nueva ventana para proceder a la representación del factor de array correspondiente, cuando se pulsa el botón “ARRAY ULA” se generan las gráficas esperadas:

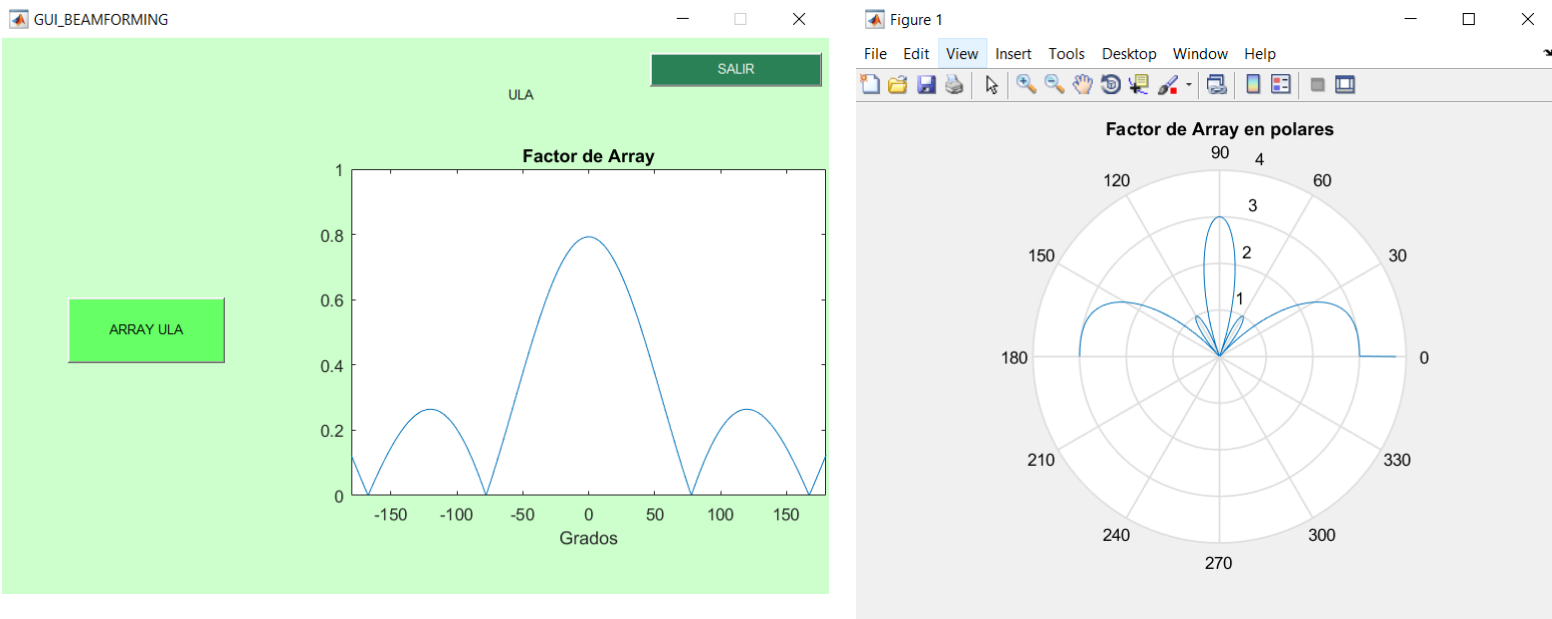


Figura 62. Gráficas Factor de Array para Array Lineal ULA.

Con esta imagen termina la explicación de los arrays de tipo lineal, vamos ahora con el array plano. Si desde la ventana inicial seleccionamos este tipo de array se abre la siguiente ventana:

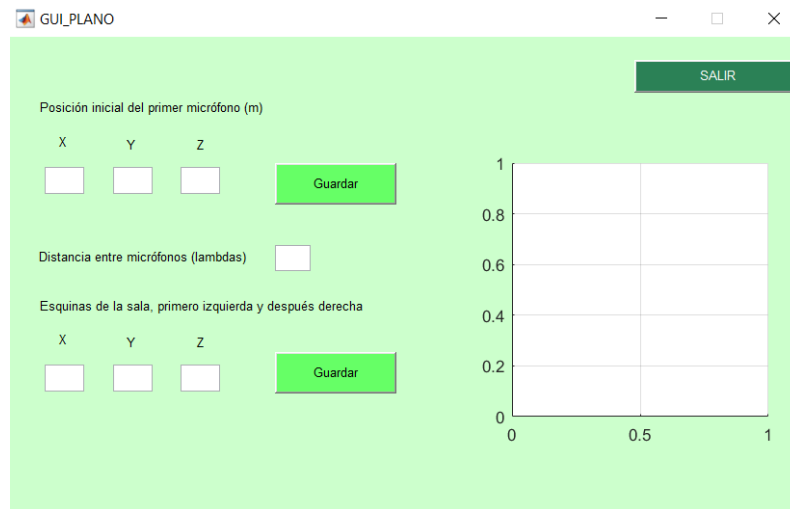


Figura 63. Pantalla de Array Plano.

Lo primero es completar los cuadros que aparecen en blanco y que nos piden la posición inicial del primer micrófono, la distancia entre ellos (lambda) y las esquinas de la sala, una vez fijados estos valores pulsando sobre los botones “GUARDAR” que aparecen, nos encontramos con la siguiente ventana:

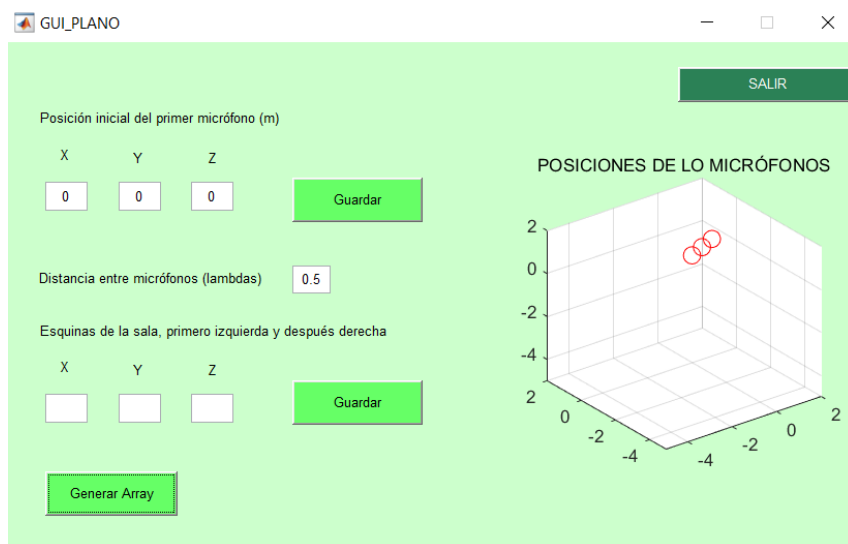


Figura 64. Valores y gráfica del eje de coordenadas de Array Plano.

Tras pulsar el botón “GENERAR ARRAY” se pinta la gráfica en el eje de coordenadas para hacernos una idea de la posición espacial de los micrófonos. Siempre cabe la opción de

pulsar el botón “SALIR” para finalizar con el diseño. En el caso que nos ocupa, al pulsar el botón “GENERAR ARRAY” también aparecen dos gráficas que representan el factor de array generado, que se observan en las siguientes imágenes:

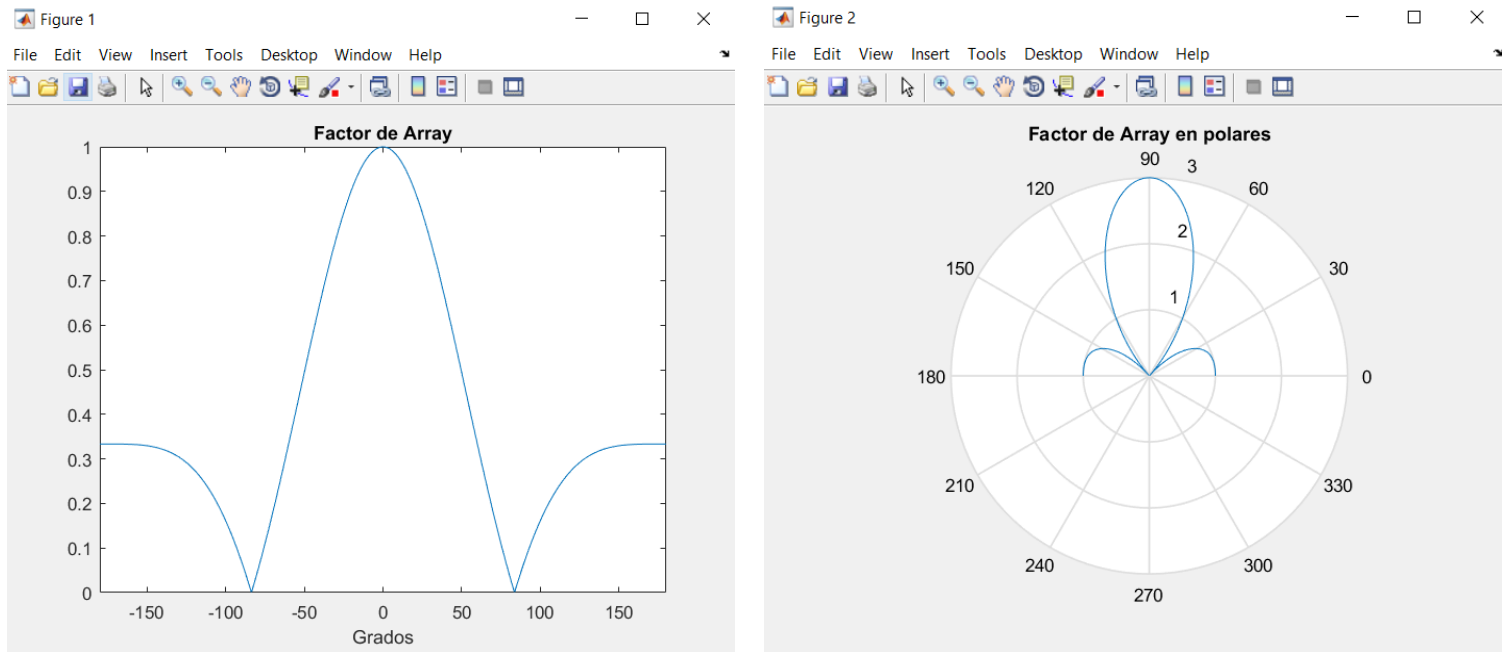


Figura 65. Gráficas Factor de Array para Array Plano.

Con esta imagen finaliza la explicación de cómo un usuario puede emplear la aplicación para realizar el array que le sea necesario.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] A. S. Bregman, “Auditory Scene Analysis: The perceptive organization of sound”, MIT Press. USA (1994).
- [2] Valin, J. M., Rouat, J., & Michaud, F. (2004, September). Enhanced robot audition based on microphone array source separation with post-filter. In Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on (Vol. 3, pp. 2123-2128). IEEE.
- [3] MAAZAOUI, Mounira; ABED-MERAIM, Karim; GRENIER, Yves. Blind source separation for robot audition using fixed HRTF beamforming. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012, vol. 2012, no 1, p. 1-18.
- [4] NA, Keewook; KIM, Yungeun; CHA, Hojung. Acoustic sensor network-based parking lot surveillance system. En European Conference on Wireless Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 247-262.
- [5] Papez, M., & Vlcek, K. (2016). Model of Surveillance System Based on Sound Tracking. In Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems (pp. 267-278). Springer International Publishing.
- [6] CURTIS, T. E.; WARD, R. J. Digital beam forming for sonar systems. Communications, Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F, 1980, vol. 127, no 4, p. 257-265.
- [7] WANG, Hong; CHU, Peter. Voice source localization for automatic camera pointing system in videoconferencing. En Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1997. ICASSP-97., 1997 IEEE International Conference on. IEEE, 1997. p. 187-190.
- [8] BRANDSTEIN, Michael S.; SILVERMAN, Harvey F. A practical methodology for speech source localization with microphone arrays. Computer Speech & Language, 1997, vol. 11, no 2, p. 91-126.

[9] Rui, Y., & Florencio, D. (2003, July). New direct approaches to robust sound source localization. In Multimedia and Expo, 2003. ICME'03. Proceedings. 2003 International Conference on (Vol. 1, pp. I-737). IEEE.

[10] HUMPHREYS JR, William M., et al. DESIGN AND USE OF MICROPHONE DIRECTIONAL ARRAYS. 36st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Enero 12-15, 1988.

[11] M. SIERRA, J.L. BESADA y L. DE HARO ARIET. Radiación y Propagación. 124-126. Julio 2004.

[12] M. SIERRA, J.L. BESADA y L. DE HARO ARIET. Radiación y Propagación. 25-40. Julio 2004.

[13] M. SIERRA, J.L. BESADA y L. DE HARO ARIET. Radiación y Propagación. 127. Julio 2004.

[14] I.V. MININ and O.V. MININ. Basics Principles of Fresnel Antenna Arrays. 5. 2008.

[15] H. KRIM and M. VIBERG, Two Decades of Array Signal Processing Research, The Parametric Approach, IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE, 1996.

[16] J. BENESTY, J. CHEN and Y. HUANG. Microphone Array Signal Processing, 1. 1-5.

[16-FIGURA] J. BENESTY, J. CHEN and Y. HUANG. Microphone Array Signal Processing, 1. 3.

[17]<http://www2.elo.utfsm.cl/~ipd465/Papers%20y%20apuntes%20de%20referencia/Procesado%20de%20Se%F1al%20en%20Array.pdf>, 1-2.

- [18] <http://users.ics.forth.gr/~tsakalid/THESIS/chapter2.pdf>, 1.
- [19] M. SIERRA, J.L. BESADA y L. DE HARO ARIET. Radiación y Propagación. Julio 2004, 127.
- [20] M. SIERRA, J.L. BESADA y L. DE HARO ARIET. Radiación y Propagación. Julio 2004, 127-134.
- [20-FIGURA] M. SIERRA, J.L. BESADA y L. DE HARO ARIET. Radiación y Propagación. Julio 2004, 128.
- [20-FIGURA2] M. SIERRA, J.L. BESADA y L. DE HARO ARIET. Radiación y Propagación. Julio 2004, 133.
- [21] S. HAYKIN, Array signal processing, Englewood Cliffs-Prentice-Hall, New Jersey, 1985.
- [22] P.S. NAIDU, Sensor array signal processing, Boca Raton, CRC Press, 2001.
- [23] <http://www.personal.psu.edu/faculty/m/x/mxm14/sonar/beamforming.pdf>, 10.
- [24] B.D. VAN VEEN and K.M. BUCKLEY. Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering. IEEE ASSP MAGAZINE. 4-6. APRIL 1988.
- [25] <http://www.personal.psu.edu/faculty/m/x/mxm14/sonar/beamforming.pdf>, 1-8.
- [25-FIGURA]
<http://www.personal.psu.edu/faculty/m/x/mxm14/sonar/beamforming.pdf>, 4.
- [26] <http://www.signalsguru.net/projects/thesis/research/node9.html>
- [27] http://digilander.libero.it/simodg/delay_and_sum_beamforming.htm

- [28] A.A.D'Amico, U.Mengail and L.Taponocco. Energy-Based TOA Estimation. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol 7, 3. Marzo 2008.
- [29] A. Pourmohammad and S. M. Ahadi. N-dimensional N-microphone sound source localization. EURASIP Journal on Audio, Speech and Music Processing, 2013.
- [30] R.Kumaresan and D.W.Tufts. Estimating the angles of arrival of multiple plane waves. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 134-139. Enero 1983.
- [31] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 445-477.
- [32] R.O.Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation. IEEE, Antennas and Propagation. vol 34, 276-280. Agosto 1986.
- [33] R.Roy and T.Kailath. ESPRIT estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. Optial Engineering. vol 29, 296-313. Abril 1990.
- [34] R.Grover, D.A.Pados and M.J.Medley. Subspace direction finding with an auxiliary-vector analysis. IEEE Signal Processing. vol 55, 758-763. Febrero 2007.
- [35] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 11-26.
- [35-FIGURA] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 24.
- [35-FIGURA2] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 18.

[35-FIGURA3] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 18.

[35-FIGURA4] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 18.

[35-FIGURA5] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 18.

[36] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 506-508.

[36-FIGURA] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 508.

[37] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 526.

[37-FIGURA] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 526.

[38] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 533-535.

[39] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 543-548.

[39-FIGURA] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 547.

[39-FIGURA2] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 547.

[40] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 536-543.

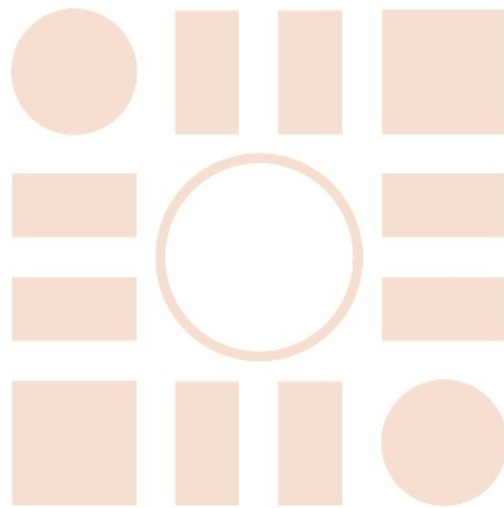
[40-FIGURA] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 539.

[40-FIGURA2] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 539.

[40-FIGURA3] D.G.Manolakis, V.K.Ingle and S.M.Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. 543.

[41] R.Chellappa and S.Theodoridis. Academic Press Library in Signal Processing, Vol 3, Array and Statistical Signal Processing. 938-942

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá