

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE INTERFEROMETRÍA CORRELATIVA
APLICANDO EL ALGORITMO MUSIC**

LUIS CARLOS CASTRO AVENDAÑO

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA SAN MARTÍN
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2010 I**

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE INTERFEROMETRÍA CORRELATIVA
APLICANDO EL ALGORITMO MUSIC**

**LUIS CARLOS CASTRO AVENDAÑO
042008
LUICASTRO85@HOTMAIL.COM**

MONOGRAFÍA

**ASESOR TÉCNICO
JORGE ALBERTO ARÉVALO ALDANA**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA SAN MARTÍN
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2010 I**

Nota de aceptación

Jorge Alberto Arévalo Aldana
Asesor

Hans Igor López Chávez
Jurado 1

Jesús Rodolfo Rojas Osorio
Jurado 2

Bogotá (08, 06, 2010)

Dedicado a mi madre, quien hizo posible que estudiara una carrera profesional, a mi hermano Santiago, cuya sonrisa siempre me motivó a seguir adelante y a mi novia Adriana que siempre estuvo conmigo de manera incondicional brindándome su ayuda, su apoyo y porque ni un solo momento dejo de creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por su esfuerzo y a todas aquellas personas que colaboraron en la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PROBLEMA	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. OBJETIVOS	19
3.1 OBJETIVO GENERAL	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4. MARCO REFERENCIAL	20
4.1 ANTECEDENTES	20
4.1.1 Orígenes de la Radiogoniometría	20
4.1.2 Radiogoniómetro de Bellini y Tossi	21
4.1.3 Radiogoniómetro automático de aviación (ADF)	21
4.1.4 Radiogoniómetro de exploración azimutal (<i>All Azimut</i>)	21
4.1.5 Radiogoniómetro de Watson - Watt	21
4.1.6 Radiogoniómetro Doppler	22
4.2 MARCO CONCEPTUAL	22
4.2.1 Radiogoniometría	22
4.2.2 Radiogoniómetro	22
4.2.3 Antena	22

4.2.4	Antena espiral	22
4.2.5	Antena de lazo	23
4.2.6	Antena de Apertura	23
4.2.7	Antena reflectora giratoria	24
4.2.8	Arreglos de antenas	24
4.2.9	Espectroscopio	25
4.2.10	Algoritmo	25
4.3	MARCO TEÓRICO	27
4.3.1	Principio básico de la radiogoniometría	27
4.3.2	Métodos de Radiogoniometría	29
4.3.3	Efecto Doppler	30
4.3.4	Diferencia de tiempo de llegada	32
4.3.5	Interferometría correlativa	33
4.3.6	Aplicaciones	35
4.3.7	Conceptos sobre vectores	39
4.3.8	Covarianza	40
4.3.9	Interferómetro, técnicas para Direction Finder	40
4.3.10	Matemáticas de interferometría	41
4.3.11	Conceptos para la estimación del DOA (Direction of arrival)	51
4.3.12	Estimación del DOA (Direction of Arrival)	55

4.3.13	Algoritmo Music Espectral (Covarrubias, 2009).	56
4.3.14	Funcionamiento algoritmo Music	57
4.3.15	Características algoritmos interferometría correlativa	61
4.4	ESTADO DEL ARTE	62
4.5	LIMITACIONES Y ALCANCES	63
5.	DISEÑO METODOLÓGICO	64
6.	DESARROLLO	65
6.1.1	Algoritmo Music en Matlab.	65
6.1.2	Interfaz Gráfica de Usuario (GUI).	68
7.	PRUEBAS Y RESULTADOS	72
7.1	AMBIENTE DE PRUEBAS	72
7.2	PROCESO DEL ALGORITMO	72
7.2.1	Parámetros iniciales.	72
7.2.2	Graficar arreglo de antenas, fuente de origen y realizar muestreo.	72
7.2.3	Matriz de Covarianza, Vectores propios y Valores Propios	73
7.2.4	Guardar resultados y graficarlos.	75
7.2.5	Grafica del error de estimación y tiempo de procesamiento.	75
7.3	DESEMPEÑO DEL ALGORITMO	76
7.3.1	Prueba con una fuente, bajo SNR y 2 antenas en el arreglo.	76
7.3.2	Prueba con una fuente, nivel medio de SNR y 2 antenas en el arreglo.	77

7.3.3	Prueba con una fuente, nivel alto de SNR y 2 antenas en el arreglo.	78
7.3.4	Prueba con una fuente, alto SNR y 3 antenas en el arreglo.	79
7.3.5	Prueba con una fuente, alto SNR y 4 antenas en el arreglo.	80
8.	CONCLUSIONES	83
9.	RECOMENDACIONES	84
	GLOSARIO	85
	BIBLIOGRAFÍA	87

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Evolución dipolos conectados a la antena en espiral.	23
Figura 2. Antena de lazo con protección.	23
Figura 3. Tipos de antenas rectangulares de apertura.	24
Figura 4. Forma reflector para estrecho azimut y alta elevación.	24
Figura 5. Patrón de ganancia del arreglo de antenas Watson-Watt	26
Figura 6. Ejemplo del método Doppler de cambio de frecuencia.	26
Figura 7. Diagrama bloques Direction Finder de vector correlativo.	27
Figura 8. Medición de la dirección del transmisor.	28
Figura 9. Medición de la dirección por triangulación.	29
Figura 10. Triangulación mediante 3 estaciones de radiogoniometría.	29
Figura 11. Efecto Doppler para sistema de recepción de ondas de radio	30
Figura 12. Desviación Doppler de frecuencia con giro de antena receptora.	32
Figura 13. Principio de localización hiperbólica mediante TDOA	33
Figura 14. Principio de localización hiperbólica mediante TDOA	34
Figura 15. Ángulo determinado por goniometría.	37
Figura 16. Marcaciones indicador radio magnético.	37
Figura 17. Sistema NDF/ADF	38
Figura 18. Una línea de base de referencia del interferómetro.	42
Figura 19. Ambigüedad del interferómetro.	46
Figura 20. Resolución ambigüedad en interferómetro de múltiples referencias	47
Figura 21. Interferómetro de referencia dual.	48
Figura 22. Relaciones del cuadrante para la referencia dual del interferómetro	50
Figura 23. Problema estimación DOA.	52
Figura 24. Arreglo de antenas frente a una onda plana.	52
Figura 25. Diagrama técnicas de estimación espectral.	55
Figura 26. Diagrama de bloques general para estimación del DOA	55
Figura 27. Ejemplo matriz de datos.	58
Figura 28. Matriz de datos y matriz de correlación.	59

Figura 29. Matriz de correlación y matriz de información espacial.	60
Figura 30. Subespacio de señal y subespacio de ruido.	60
Figura 31. Equipo DDF255 para Direction Finder.	62
Figura 32. Diagrama de Bloques solución en Matlab.	65
Figura 33. Diagrama de Bloques Muestreo ULA.	66
Figura 34. Diagrama de Bloques Matriz covarianza	67
Figura 35. Diagrama de Bloques Gráfica de resultados.	68
Figura 36. Diagrama de Bloques Descomposición en sub-espacios.	69
Figura 37. Diseño interfaz gráfica de usuario para el algoritmo Music.	69
Figura 38. Barra de Opciones interfaz gráfica.	70
Figura 39. Diseño interfaz gráfica de usuario para el algoritmo Music.	70
Figura 40. Variables iniciales.	73
Figura 41. Variables iniciales.	74
Figura 42. Matriz de covarianza y Autovectores.	75
Figura 43. Estimación del DoA en forma Polar.	76
Figura 44. Estimación del DoA en forma Polar	77
Figura 45. Estimación del DoA en forma Polar	78
Figura 46. Estimación del DoA en forma Polar	79
Figura 47. Estimación del DoA en forma Polar	80
Figura 48. Estimación del DoA en forma Polar	81
Figura 49. Estimación del DoA en forma Polar	81

LISTA DE FÓRMULAS

	pág.
Ecuación 1 Desviación de frecuencia Doppler	31
Ecuación 2 Frecuencia de rotación Doppler	31
Ecuación 3. Voltaje recibido forma exponencial	42
Ecuación 4. Voltaje recibido en forma exponencial para la antena 1	43
Ecuación 5. Voltaje v_1	43
Ecuación 6. Voltaje v_2	43
Ecuación 7. Voltaje producido antenas	43
Ecuación 8. Voltaje producido antenas	43
Ecuación 9. Diferencia parte real	43
Ecuación 10. Frecuencia producida	44
Ecuación 11. Frecuencia producida en grados	44
Ecuación 12. En grados	44
Ecuación 13. Caso general	45
Ecuación 14. Reordenando términos ecuación 10	45
Ecuación 15. Sustituyendo f	45
Ecuación 16. Referencia interferómetro antena 1	47
Ecuación 17. Referencia interferómetro antena 2	47
Ecuación 18. Medida ángulo retraso	49
Ecuación 19. Resolviendo ecuación 27	49
Ecuación 20. Ángulos de desfase	49
Ecuación 21. Angulo de llegada 1	50
Ecuación 22. Angulo de llegada 2	50
Ecuación 23. Salida agrupación antenas.	53
Ecuación 24. Vector entrada agrupación antenas.	53
Ecuación 25. Ubicación agrupación antenas.	54
Ecuación 26. Muestras agrupación antenas.	54
Ecuación 27. Señales emitida k -ésima fuente.	54
Ecuación 28. Modelo de entrada	57

Ecuación 29. Modelo de entrada forma matricial.	57
Ecuación 30. Matriz de correlación.	59
Ecuación 31. Espectro espacial Music	60
Ecuación 32. Espectro espacial Music	61

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 Códigos de programación	90

RESUMEN

En este trabajo se propone un sistema de localización basado en interferometría correlativa a través de un algoritmo denominado algoritmo Music.

Dado un conjunto de muestras obtenidas de un arreglo de antenas, este algoritmo emplea la descomposición en sub espacios (de señal o de ruido) para deducir los máximos picos y determinar un DoA (direction of arrival) para alguna fuente deseada.

El sistema ha sido implementado mediante el uso de una computadora personal y el entorno MATLAB, donde se implementó el algoritmo de estimación con el fin de observar el comportamiento del sistema de localización en condiciones ideales ó controlables.

INTRODUCCIÓN

La guerra es la industria que ha sido el motor de los mayores avances tecnológicos de la humanidad a lo largo de la historia, y lo sigue siendo en la época actual, dada la inversión que los gobiernos brindan a este sector para su protección y la de su gente, además los adelantos en investigación académica pueden ser directamente usados en este campo. La radiogoniometría ha sido herramienta fundamental de las batallas desde justo antes de la segunda guerra mundial, y ha venido representando un arma de lucha que permite saber con exactitud en qué lugar se encuentran las naves enemigas.

En sus inicios, los radiogoniómetros marcaban la diferencia entre la supervivencia o la destrucción de una nave de guerra, pero hoy en día su gama de aplicaciones se ha ido ampliando para ofrecer múltiples ventajas en monitoreo de comunicaciones, sin abandonar el principio básico de localización geográfica de estaciones transmisoras. Es así como día a día, radioaficionados, estaciones de comunicaciones y de monitoreo, fuerzas militares y de gobierno utilizan módulos Direction Finder para el desempeño de sus labores.

Aunque en el mundo actual, los radiogoniómetros son ampliamente conocidos por ser herramientas costosas de ingeniería, en las cuales su valiosa aplicación sustenta el precio pagado, existen diferentes métodos con los cuales se puede producir un resultado fiable. El método que últimamente ha desplegado la mayor confiabilidad frente a sencillez de implementación ha sido el método de interferometría correlativa, dada la exactitud que se puede lograr en la medida del azimut de la estación transmisora analizada.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo de grado se orienta al estudio del sistema de interferometría correlativa, aplicando además el algoritmo Music, con el cual se puede simular el funcionamiento del sistema.

1. PROBLEMA

La interferometría correlativa consiste en una técnica mediante la cual se busca determinar la procedencia de cualquier señal de radio. Esta técnica vio sus orígenes durante la segunda guerra mundial y se utilizó para fines militares; Posteriormente, se utilizaba en la navegación marítima, donde por medio de un radiogoniómetro se establecía una conexión con diversas emisoras que le permitían crear una línea imaginaria entre la estación y la nave y haciendo esto mismo con más emisoras se podía triangular la posición del barco para que pudiera corregir su trayectoria y llegar a su destino satisfactoriamente.

Desde entonces, la interferometría correlativa ha tenido un fuerte progreso a lo largo de los años y se ha convertido en una herramienta útil en múltiples aplicaciones, incluso en el territorio colombiano, donde se ha utilizado por organismos gubernamentales debido al conflicto interno actual; Sin embargo, debido a la complejidad de estos sistemas, se necesita una gran capacidad intelectual y una gran cantidad de recursos necesarios para su implementación, y esto ha hecho que la accesibilidad sea bastante limitada y que se restrinja a un pequeño número de personas, tales como entidades estatales.

De seguir así, con estas limitaciones, será cada vez más exclusivo el acceso a la información, lo que impedirá en gran medida a las personas interesadas, enriquecer su conocimiento y aspirar a un gran número de oportunidades futuras.

2. JUSTIFICACIÓN

A lo largo de la carrera en la Universidad San Martín, se han visto asignaturas de todos los campos de aplicación en la ingeniería electrónica, y se ha venido enfatizando en el campo de las telecomunicaciones. Este proyecto está directamente enfocado a las telecomunicaciones que tiene componentes de análisis y procesamiento de señales y de herramientas computacionales completas para la simulación. Es así como se considera el estudio de un sistema de interferometría correlativa aplicando el algoritmo Music como un conjunto de elementos que se interrelacionan con los componentes ya mencionados.

El estudio inicial de este proyecto tiene como fin sembrar una semilla para la generación de un sistema completo de radiogoniometría que no involucre grandes sumas de dinero para su implementación y que les sirva a aquellos interesados en temas tan complejos como este, para que puedan enriquecer su conocimiento y fortalecer sus habilidades como ingenieros, permitiéndoles la realización de proyectos más avanzados y estar mejor preparados, lo cual les representará oportunidades futuras.

Teniendo en cuenta que los radiogoniómetros son herramientas costosas que sobrepasan los 25000 dólares, es un gran aporte la realización de este proyecto con un costo menor, para poder llegar a desarrollar en el futuro un sistema completo de esta clase al servicio de la Universidad y de su academia, utilizando un método de última generación.

Se busca que puedan obtener un acceso más fácil a la información, al mismo tiempo que se disminuyen en gran medida los costos puesto que los interesados podrán estudiar a fondo el tema, comprender sus bases teóricas y matemáticas, realizar pruebas mediante las simulaciones, lo cual representa una gran disminución de costos ya que puede probar su funcionamiento sin tener que implementarlo físicamente.

Con todo esto, el usuario podrá fortalecer el conocimiento previo, así como enriquecerlo en gran medida y esto le representara mayor habilidad, competencia, y experiencia.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar y simular el algoritmo Music mediante un programa de software asistido por computador para la implementación de un sistema de interferometría correlativa.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los algoritmos existentes sobre interferometría correlativa.
- Determinar los parámetros de funcionamiento del algoritmo Music.
- Implementar el algoritmo “Music” bajo los parámetros de funcionamiento previamente establecidos.
- Determinar las condiciones necesarias de simulación para probar el funcionamiento.
- Realizar la simulación para probar el funcionamiento del algoritmo Music.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES

La estimación exacta de la dirección de llegada (DoA) de una señal ha recibido considerable atención en comunicaciones y sistemas de radares comerciales y aplicaciones militares; Radares, sonares, y comunicaciones móviles son algunos ejemplos de las múltiples aplicaciones.

Por ejemplo, en defensa una aplicación importante es identificar la dirección de una posible amenaza. Un ejemplo de aplicación comercial es identificar la dirección de un teléfono celular de llamadas de emergencia de tal manera que el equipo de rescate pueda ser enviado a la ubicación correcta.

A lo largo de los años se han implementado sistemas y refinado algoritmos para este propósito, desde sistemas que aplicaban el principio matemático de la triangulación y que podían determinar la posición de un barco o un avión sin necesidad de conocer la distancia que los separaba de otros puntos de referencia. Hasta sistemas modernos que hacen uso de algoritmos de súper resolución, como el algoritmo tratado en este proyecto (Music).

Durante la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron el radiogoniómetro, el radiofaro direccional, y las radiobalizas, todos ellos basados en la transmisión o recepción de ondas de radio. El radiogoniómetro fue el primero que se utilizó de forma generalizada como ayuda a la navegación (Gassin, 2009).

4.1.1 Orígenes de la Radiogoniometría

En 1876 nació Ettore Bellini, quien en colaboración con Alessandro Tosi, inventó el radiogoniómetro, el cual consta de dos antenas de planos ortogonales cruzados con el fin de localizar la dirección de cualquier transmisor de radio.

La manera de hacerlo era con el radiogoniómetro conectado a dos antenas que estaban ortogonales entre si y un receptor. Una vez que la onda llega al par de antenas ortogonales se crean oscilaciones eléctricas sobre cada una de ellas y cuya intensidad es proporcional a la onda y al plano del circuito de la antena.

Estas dos oscilaciones eléctricas producen campos magnéticos sobre las bobinas internas. Luego, estos campos se combinan entre sí produciendo a su vez un campo magnético, y su intensidad y dirección depende de la intensidad y la fase que haya en las fluctuaciones de las dos oscilaciones eléctricas y la antena.

Hay una tercera bobina, que se puede ajustar por medio de una perilla exterior, se encuentra sumergida sobre el campo magnético girando en las consiguientes exploraciones y sus medidas. Cuando la señal eléctrica que sale de la bobina y que es recibida por el receptor que está conectado al receptor alcanza su máxima intensidad se indica la dirección de la estación de radio del transmisor (Gassin, 2009).

4.1.2 Radiogoniómetro de Bellini y Tossi

Este tipo de radiogoniómetro evita la dificultad de tener que girar la antena. Esto se logra utilizando dos cuadros verticales dispuestos perpendicularmente, conectados a bobinas, también perpendiculares. Dentro de ellas existe una tercera bobina que se puede girar mediante un mecanismo mecánico. Su giro equivale al giro de la antena (Gassin, 2009).

4.1.3 Radiogoniómetro automático de aviación (ADF)

Este radiogoniómetro mueve la bobina de prototipo de Bellini y Tossi con un servomotor. Luego, combina la señal de esta bobina con el dipolo para obtener el diagrama en cardioide giratorio. Un detector controla el servomotor de modo que busca el mínimo de señal de forma automática (Gassin, 2009).

4.1.4 Radiogoniómetro de exploración azimutal (*All Azimut*)

La bobina central del radiogoniómetro de Bellini y Tossi gira con velocidad constante. Esto modula en doble banda lateral la señal incidente, estando su dirección de incidencia codificada en la fase. Un comparador de fase entre la señal DBL detectada y la frecuencia de giro de la antena produce la indicación de dirección (Gassin, 2009).

4.1.5 Radiogoniómetro de Watson - Watt

Este radiogoniómetro dispone de tres canales idénticos: uno para el dipolo y los otros dos para cuadros perpendiculares. Los canales producen una señal detectada que se aplica a un tubo de rayos catódicos, de la siguiente forma: los canales de las bobinas se conectan a las placas de deflexión, una bobina a las horizontales y la otra a las verticales. Esto produce, ante una señal incidente, una traza en la pantalla del TRC orientada en la dirección de incidencia de la señal. El canal del dipolo se conecta al eje Z, de modo que borra media traza, dejando solamente la parte que apunta al emisor de la señal (Gassin, 2009).

4.1.6 Radiogoniómetro Doppler

Se basa en una antena omnidireccional (como por ejemplo un dipolo) que gira sobre una circunferencia horizontal. La señal incidente aparece modulada en frecuencia por el efecto Doppler. Como en el Radiogoniómetro de Watson - Watt, la dirección de incidencia aparece codificada en la fase de la señal modulada (Gassin, 2009).

4.2 MARCO CONCEPTUAL

Para poder entender un poco mejor cómo funciona la interferometría correlativa es necesario comentar las partes y componentes que se manejan en esta técnica.

4.2.1 Radiogoniometría

La radiogoniometría es una técnica que se utiliza para determinar la ubicación de una estación emisora mediante un dispositivo llamado radiogoniómetro (Arganeo, 2009).

4.2.2 Radiogoniómetro

El radiogoniómetro es un receptor de radio con una antena direccional que se utiliza para determinar la ubicación de una estación emisora (Arganeo, 2009).

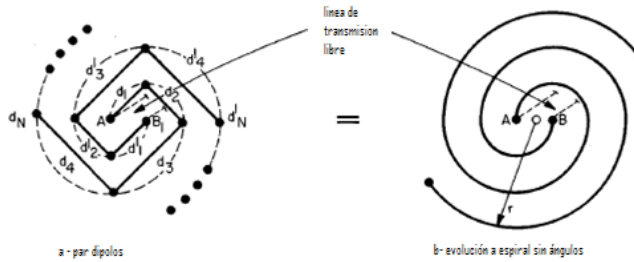
4.2.3 Antena

Una antena es un dispositivo diseñado para irradiar o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre. Es decir que una antena es un elemento que sirve de mediador entre el aire libre y un medio guiado. Existen muchos tipos de antenas, cada una se utiliza para un uso diferente (Lipsky, 2004).

4.2.4 Antena espiral

Existe gran diversidad de antenas, cada una de ellas depende del uso que se requiera. La primera que se puede encontrar en la literatura es la antena espiral (que se puede observar en la figura 1), una de las más útiles y populares antenas para técnicas de radiogoniometría. La antena espiral tiene una amplia cobertura de frecuencias siguiendo los principios de estructuras de tipo periódicas (Lipsky, 2004).

Figura 1. Evolución dipolos conectados a la antena en espiral.

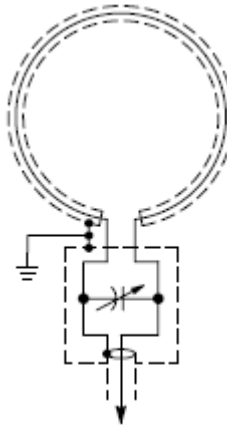


(Lipsky, 2004).

4.2.5 Antena de lazo

Son muy comunes, se pueden encontrar en casi cualquier parte, aunque son comúnmente de forma circular por su facilidad de construcción, también pueden tomar la forma de un rectángulo, cuadrado, elipse, etc (Straw 2000). La figura 2 muestra una antena de lazo con protección.

Figura 2. Antena de lazo con protección.

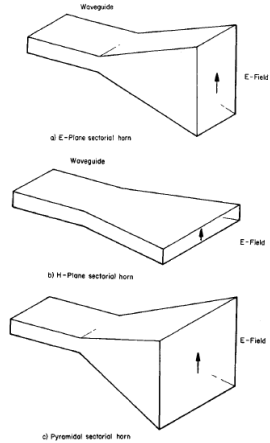


(Lipsky, 2004)

4.2.6 Antena de Apertura

Este tipo de antenas es bastante útil debido a la alta recepción que tienen en frecuencias altas. Son muy utilizadas en técnicas de radiogoniometría debido a los patrones de directividad que estas ofrecen. El caso más simple es la guía de onda rectangular, que se observa en la figura 3. Esta antena permite propagar en modo fundamental y que se deja en circuito abierto. También están las de tipo bocina, que permiten aumentar la directividad en las aperturas de la antena rectangular. Este tipo de antenas se utilizaron de una manera amplia a partir de la segunda guerra mundial, con el desarrollo de sistemas de radar (Straw, 2000).

Figura 3. Tipos de antenas rectangulares de apertura.

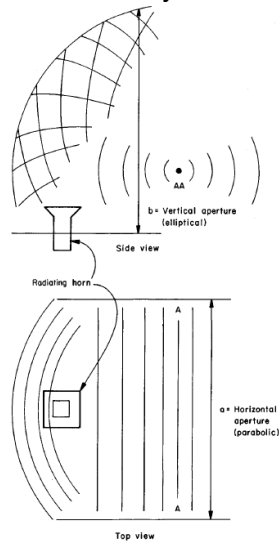


(Lipsky, 2004)

4.2.7 Antena reflectora giratoria

Este es otro tipo de antena que se suele utilizar en técnicas de radiogoniometría debido a su simplicidad y ganancia. La eficiencia de esta antena depende de la forma del cono del rayo de iluminación de la antena y la reflectividad, que se puede apreciar en la figura 4 (Straw, 2000).

Figura 4. Forma reflector para estrecho azimut y alta elevación.



(Straw, 2000)

4.2.8 Arreglos de antenas

Las aplicaciones de radiogoniometría requieren de ciertas características de radiación que no se pueden lograr con una sola antena, es por eso que se utilizan

arreglos de antenas, es decir, varias antenas posicionadas geométricamente para agregar mayor radiación y obtener características deseadas. (Straw, 2000)

4.2.9 Espectroscopio

El espectroscopio es un instrumento adecuado para descomponer la luz en su espectro, por medio de un retículo de difracción o de un prisma. La dispersión se puede realizar por refracción (espectroscopio de prisma) o por difracción (espectroscopio de red). (Astro, 2010)

4.2.10 Algoritmo

Se entiende por algoritmo un conjunto de instrucciones a seguir, que es aplicado a un número finito de datos y que después de un número finito de iteraciones entrega un resultado (Enci, 2009).

4.2.10.1 Algoritmos usados en radiogoniometría

Un sistema de Radiogoniometría usa un arreglo de antenas acoplados con uno o más receptores para determinar la dirección de llegada de un emisor objetivo usando características de la señal recibida por parte de cada una de las antenas en el arreglo.

Los sistemas de radiogoniometría se pueden clasificar según el número de receptores empleados y de las características de la señal recibida usada para obtener la dirección de llegada estimada, por ejemplo la amplitud de la señal, la fase o el tiempo de llegada (Harter, 2007).

4.2.10.2 Algoritmo Wattson-Watt

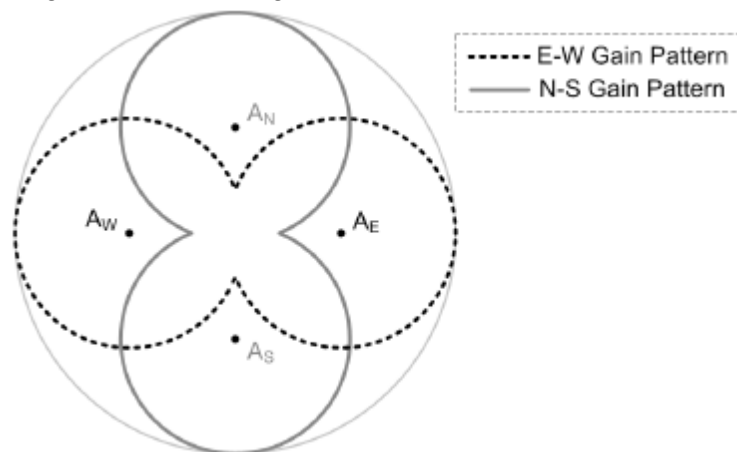
El algoritmo de Watson-Watt es uno de los primeros algoritmos usados para radiogoniometría. Está basado en la amplitud, y utiliza dos antenas ortogonales de lazo orientado o también un par de antenas Adcock, tal como se muestra en la figura 5.

En un par de antenas Adcock, la diferencia entre el vector de salida de voltaje de las dos antenas se toma para obtener una única salida de aquellos pares. Esta diferencia en el funcionamiento efectivamente combina los patrones de ganancia circular de las dos antenas discretas con un patrón de ganancia máxima a lo largo de la línea de la base del par y nulo a lo largo de la perpendicular al punto medio (Harter, 2007).

4.2.10.3 Métodos de Doppler y Pseudo-Doppler

Los algoritmos de Doppler y sus derivados Pseudo-Doppler, son algoritmos de un único canal para obtener la estimación de la dirección de llegada basándose en la fase de la señal recibida. Originalmente, el método de Doppler usa sólo una antena (figura 6) que se mueve sobre la circunferencia de un círculo a una velocidad angular fija.

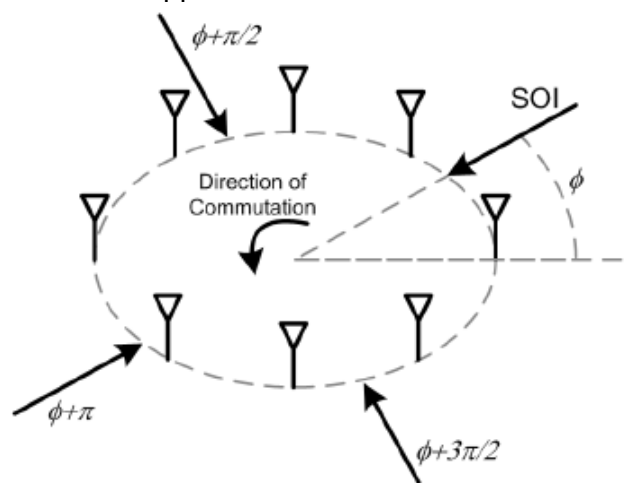
Figura 5. Patrón de ganancia del arreglo de antenas Watson-Watt



(Harter, 2007)

El método de Pseudo-Doppler fue desarrollado usando múltiples arreglos circulares con un interruptor que selecciona las antenas sucesivas alrededor del círculo aproximándose al movimiento circular de la antena doppler (Harter, 2007).

Figura 6. Ejemplo del método Doppler de cambio de frecuencia.



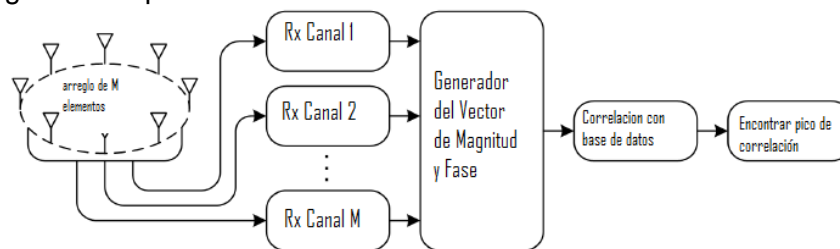
(Harter, 2007)

4.2.10.4 Vector correlativo Direction Finder

El vector correlativo de Direction Finder es uno de los métodos de radiogoniometría usados con mayor frecuencia debido a su relativa simplicidad. Se diferencia de los otros dos algoritmos en que es un algoritmo de n canales y usa tanto la fase como la amplitud de la señal recibida. Con este enfoque, una base de datos de múltiples vectores es generado por un conjunto de números o direcciones de llegada y puntos de frecuencia conocidos, y la distribución de ellos depende de cómo fluya la respuesta entre los puntos.

Una de las principales fortalezas de este algoritmo es que se puede adaptar a cualquier imperfección en la construcción del arreglo o instalación siempre que ellos sean reflejados en la base de datos tal y como se muestra en la figura 7 (Harter 2007).

Figura 7. Diagrama bloques Direction Finder de vector correlativo.



(Harter 2007)

4.3 MARCO TEÓRICO

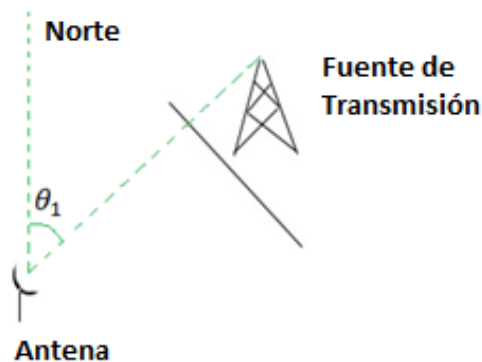
4.3.1 Principio básico de la radiogoniometría

El objetivo de la radiogoniometría es medir la dirección de una fuente transmisora hacia un punto de referencia, que para estaciones móviles, es el eje proa – popa de la nave y para estaciones fijas es el norte magnético, llamándose entonces al ángulo formado, azimut o demora. La Figura 8 muestra un esquema básico de medición de la dirección mediante una estación de radiogoniometría.

El parámetro indispensable que se debe conocer de la señal a la cual se le realiza el proceso de radiogoniometría es la frecuencia de la portadora. Este valor lo debe colocar el operario del instrumento. Para realizar el proceso de radiogoniometría mediante el análisis del desfase de la portadora en un sistema de sensores, no se tienen en cuenta características de la señal como potencia de transmisión, tipo de modulación o duración de la transmisión ya que se constituyen en parámetros adicionales que no determinan la dirección a la cual se encuentra el transmisor frente a la referencia. Un pequeño ejemplo se ve en la figura 8.

La radiogoniometría tiene un gran espectro de aplicaciones con fines de localización de estaciones transmisoras, móviles y fijas, comenzando con actividades de comunicaciones aficionadas y finalizando con complejos sistemas de inteligencia utilizados por el gobierno y las fuerzas militares, en donde los equipos utilizados deben ser de última tecnología para que garanticen una gran confiabilidad y precisión de los resultados. Cada una de las aplicaciones define la calidad del equipo utilizado, y por lo tanto su costo y precisión.

Figura 8. Medición de la dirección del transmisor.



(Casado, 1951)

Para lograr encontrar la posición aproximada del transmisor, es necesario implementar un sistema con dos o más equipos de radiogoniometría en lugares previamente conocidos para realizar procesos de triangulación, cuyo principio básico se detalla en la figura 9.

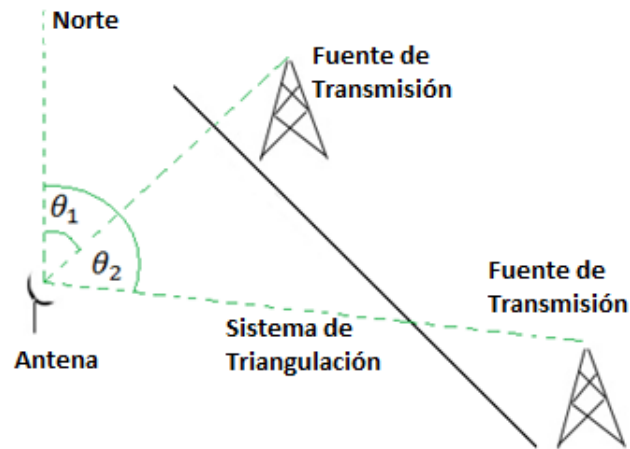
La utilización de dos equipos de radiogoniometría genera dos líneas de dirección hacia el transmisor, con el cruce entre éstas y la posición de cada estación receptora, se conoce la información necesaria para que con herramientas de geometría sea posible la ubicación aproximada del lugar de generación de la transmisión.

Comúnmente para estos sistemas de triangulación se utiliza una estación de radiogoniometría adicional, para apoyar la información obtenida y así obtener mayor precisión en la ubicación. La inclusión de la estación adicional soluciona un problema común para este tipo de procedimientos que se presenta cuando el azimut obtenido por una de las estaciones está desfasado exactamente 180° del obtenido en la otra estación, situación en la que no se podría conocer la ubicación de la estación transmisora, dado que los puntos de cruce de las dos líneas de dirección resultantes son infinitos. Una tercera línea de dirección es generada para la ubicación final del transmisor; la localización mediante tres estaciones se puede ver en la figura 10 (Casado, 1951).

4.3.2 Métodos de Radiogoniometría

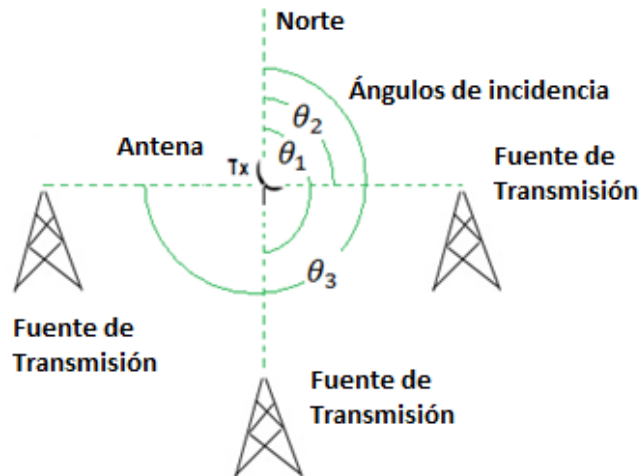
Existen diversos métodos de radiogoniometría, los cuales muestran diversas ventajas según la aplicación que se desee trabajar; Sin embargo, los métodos más difundidos que aplican la radiogoniometría son:

Figura 9. Medición de la dirección por triangulación.



(Casado, 1951)

Figura 10. Triangulación mediante 3 estaciones de radiogoniometría.



(Casado, 1951)

- Efecto Doppler
- Diferencia en tiempos de llegada TDOA (Time Difference of Arrival)
- Interferometría correlativa

Cuando pasa por el punto D, la desviación de frecuencia Doppler como función de la rotación de la antena se describe mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1 Desviación de frecuencia Doppler

$$dF = \frac{(\omega r f_c)}{c}$$

(Electronics, 1999)

Donde:

dF : Pico de cambio en frecuencia: Desviación Doppler (Hz)

ω : Velocidad angular de rotación: $2 \times \pi \times \text{frecuencia de rotación} \left(\text{rad}/\text{seg} \right)$

f_c : Frecuencia de la señal transmitida (Hz)

c : Velocidad de la luz (m/s)

La frecuencia de rotación de la antena para determinada desviación Doppler se determina mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 2 Frecuencia de rotación Doppler

$$f_r = dF \times \frac{1879.8}{R} \times f_c$$

(Electronics 1999)

Donde:

f_r : Frecuencia de la señal recibida (MHz)

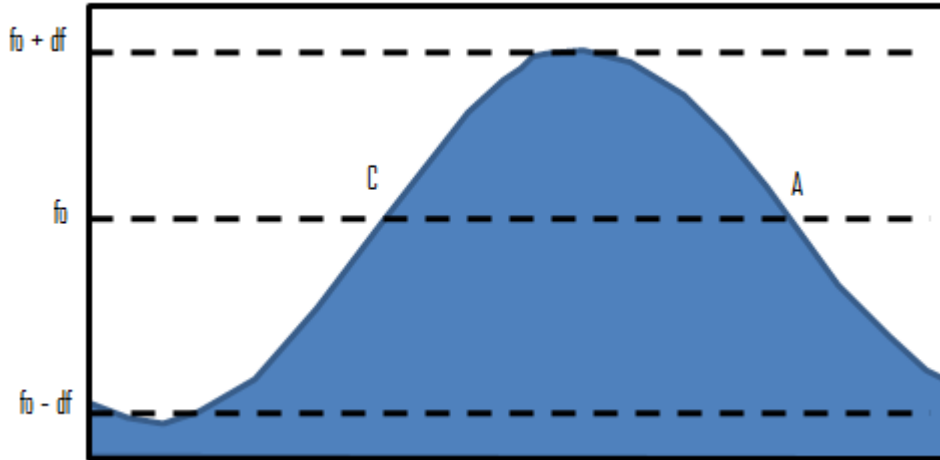
dF : Desviación Doppler (Hz)

R : Radio de la rotación de la antena (Pulgadas)

f_c : Frecuencia de la portadora de la señal recibida (MHz)

El fenómeno de cambio de frecuencia con el movimiento de la antena en una trayectoria circular se puede apreciar en la figura 12.

Figura 12. Desviación Doppler de frecuencia con giro de antena receptora.



(Electronics, 1999)

Los cruces por cero de la señal de desviación Doppler en el sistema corresponden a la posición de la antena localizada directamente al transmisor (posición A) o directamente opuesta (Posición C). Es decir, que al implementar un detector de cruces por cero de la desviación de la frecuencia recibida frente a la frecuencia de transmisión, se puede reconocer la dirección a la cual se encuentra la estación buscada.

Se puede considerar entonces, un sistema que mediante elementos como relojes, filtros, receptores y demás elementos de procesamiento y visualización, utilice el efecto Doppler para radiogoniometría; claro está, se tienen que considerar requerimientos de velocidad de operación y sincronización (Electronics 1999).

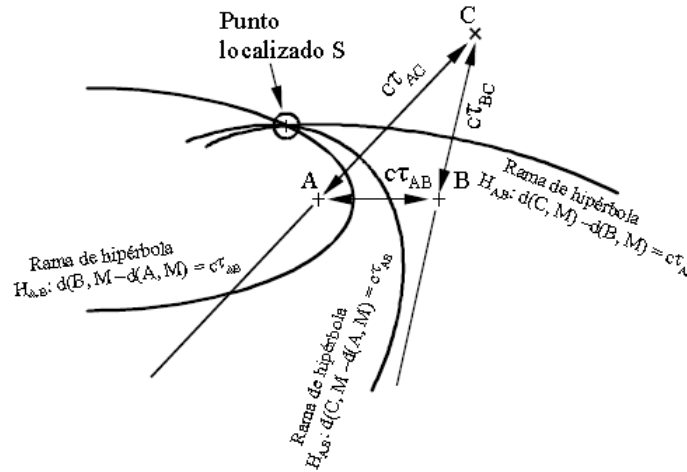
4.3.4 Diferencia de tiempo de llegada

4.3.4.1 Principio de funcionamiento

El TDOA (Time Difference of Arrival) Consiste en una técnica hiperbólica de determinación de la posición; donde la diferencia del tiempo de llegada de la señal de un usuario a dos estaciones base, se modela mediante una hipérbola que contiene la posición del móvil.

La figura 13 muestra la localización de un punto S mediante tres ramas de hipérbola generadas estratégicamente por la posición de los receptores, que han sido previamente dispuestos estratégicamente por la posición de los receptores, que han sido previamente dispuestos en determinada ubicación espacial con una geometría apreciada. Este método es sugerido en la recomendación SM1598 de la unión internacional de las telecomunicaciones.

Figura 13. Principio de localización hiperbólica mediante TDOA



(UIT-R, 2002)

El principio de esta técnica es el siguiente: Teniendo en cuenta una geometría bidimensional para un transmisor, si se considera un par de antenas síncronas denotadas en la figura 13 como A y B ubicadas estratégicamente, se puede hallar una diferencia de tiempo de llegada τ_{AB} mediante la intercorrelación de las señales que llegan a las antenas, la localización del transmisor estará dada entonces por una rama H_{AB} de hipérbola definida por la posición de las antenas y la diferencia de tiempo τ_{AB} . Si se considera otro par de antenas distantes (A, C) y el mismo procedimiento anterior, se genera otra rama de hipérbola (H_{AC}) con la posición de éstas antenas y τ_{AC} . Por consiguiente, la posición del transmisor vendrá determinada por la intersección de las ramas H_{AB} y H_{AC} de las hipérbolas.

La utilización de antenas directivas en este método proporciona ventajas en precisión y en recursos, ya que se limita el campo angular explotado y además, se puede limitar el número de mediciones síncronas a dos antenas. Esas características se pueden detallar en la figura 14.

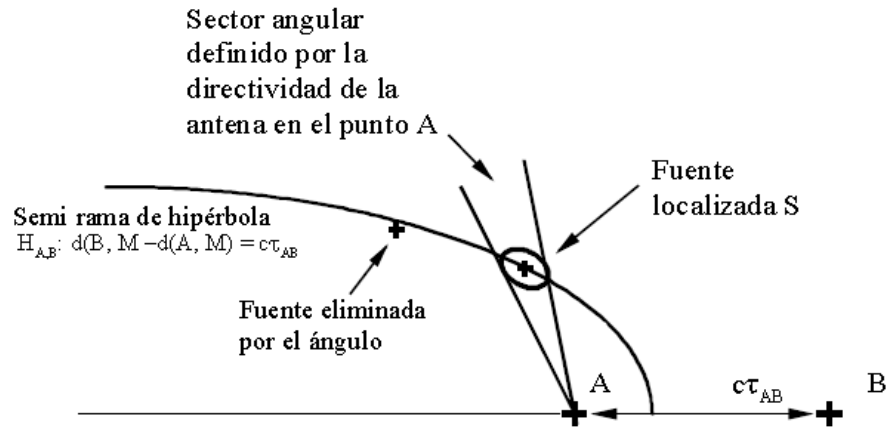
4.3.5 Interferometría correlativa

La interferometría es una técnica de medición basada en el fenómeno de la interferencia; ésta se produce cuando dos ondas electromagnéticas de exactamente la misma frecuencia se superponen. La interferencia en ondas radioeléctricas se produce generalmente por rebote en edificios y otros obstáculos que también producen distorsión de la señal.

Además de tener la misma frecuencia, estas ondas deben ser sincrónicas, es decir que sus diferencias de fase, y por lo tanto las distancias entre las crestas de ambas ondas, deben permanecer constantes con el tiempo; eso es prácticamente

posible sólo si las ondas que se interfieren provienen de la misma fuente de radiación. Los haces generados entonces son desviados por medio de dos técnicas: división de amplitud y división de frente de onda.

Figura 14. Principio de localización hiperbólica mediante TDOA



(UIT-R, 2002)

Cuando las ondas interfieren entre sí, la amplitud de la onda resultante depende de las frecuencias, fases relativas y amplitudes de las ondas iniciales, produciendo efectos destructivos o constructivos entre las señales.

La interferometría es una herramienta indispensable en muchas actividades en las que es necesario realizar mediciones. Hoy en día, por medio de técnicas interferométricas se pueden realizar una gran variedad de medidas sumamente precisas; por medio de la relación entre los factores de los que depende el patrón de interferencia se pueden establecer diferentes técnicas de medición de ciertos parámetros, como se describe a continuación:

- Una posibilidad es dar el valor de la longitud de onda incidente así como de las características geométricas del arreglo físico de generación y medición de la interferencia; entonces es posible predecir el patrón de interferencia que se formará.
- Otra posibilidad es dar las características geométricas del arreglo, además del patrón de interferencia que se forma; con estos valores se puede inferir el valor de la longitud de onda incidente. Usado de esta manera, este arreglo se llama espectroscopio de interferencia; este aparato sirve para encontrar los valores de las de las longitudes de onda de haces luminosos.

- Finalmente, si se da el patrón de interferencia que se forma, así como la longitud de onda de la señal incidente, se pueden inferir las características geométricas del arreglo.

Cuando se conoce la longitud de onda de la fuente empleada, pueden medirse distancias pequeñas en la trayectoria óptica analizando las interferencias producidas. Esta técnica se emplea para realizar mediciones de varios tipos como por ejemplo:

- El contorno de la superficie de los espejos de los telescopios.
- Los índices de refracción de una sustancia, se calculan a partir del desplazamiento en las franjas de interferencia causado por el retraso del haz.
- El diámetro de estrellas grandes relativamente cercanas, como por ejemplo Betelgeuse; para obtener imágenes de variaciones del brillo en la superficie de dichas estrellas.
- Medición de ángulos extremadamente pequeños.

La interferometría correlativa también llamada interferometría tradicional, puede ser secuencial o en paralelo con canales múltiples. El principio de la interferometría correlativa es el cálculo del retardo de fase entre las señales obtenidas en varios sensores, mediante la herramienta matemática de la correlación y ciertos algoritmos de procesamiento para hallar el máximo de la señal; posteriormente se realiza una comparación entre el resultados obtenido y un cuadro de calibrado almacenado mediante una tabla de datos y generado a partir de la teoría de propagación y de antenas, a fin de obtener la dirección de la fuente.

Este método permite acoplarse a una sincronización de señal mediante la detección de energía; esto produce la gran ventaja de que el equipo se active solamente con la duración efectiva de la transmisión.

4.3.6 Aplicaciones

Dentro del campo de localización de estaciones transmisoras se encuentran múltiples aplicaciones, dentro de las cuales se destacan:

4.3.6.1 Radiogoniometría Deportiva

También llamada “Fox Hunter” (Cazador de zorros). Algunos radioaficionados utilizan equipos de radiogoniometría para realizar concursos en diferentes países cuyo objetivo es la búsqueda de transmisores escondidos. Una estación “fantasma” transmite de forma alternada desde un punto fijo, estando dentro de cierto radio de cobertura, los participantes (radioaficionados) deben interactuar tomando medidas para poder llegar a la estación transmisora (Solana, 2008).

4.3.6.2 Elementos de navegación

En aeronaves y embarcaciones actuales se utilizan métodos de localización avanzados, no obstante la radiogoniometría es una herramienta de apoyo para este servicio, es considerado un elemento auxiliar de los sistemas de radar.

La radiogoniometría es una de las técnicas clásicas para la búsqueda de fuentes de transmisión, también llamado, radio localización.

Para que esta técnica funcione son necesarias dos condiciones, un transmisor y un receptor y este último debe estar equipado con una serie de antenas capaces de captar de una manera precisa el sentido de procedencia de la energía que se está emitiendo por parte del transmisor.

Los sistemas de radiogoniometría se empezaron a implementar como una ayuda para la navegación aérea y al transmisor que utiliza se le denominaba NDB (Non Directional Beacon) y al receptor se le denomina ADF (Automatic Directional Finder).

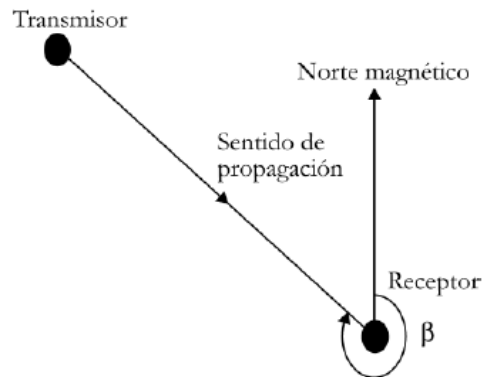
También puede ser empleado por ATC (Automatic Traffic Control) en la localización de aeronaves perdidas.

Para hacerse con una idea del funcionamiento de este sistema utilizado tanto en navegación marítima como aérea se puede observar la figura 15 donde se muestra el sentido de propagación de una fuente que incide sobre una antena receptora y como se forma un ángulo respecto al norte magnético de la antena receptora.

La figura 16 muestra el indicador radio magnético y la figura 17, indica de forma gráfica la situación de una aeronave con respecto a un NDB y la indicación obtenida del indicador radio magnético.

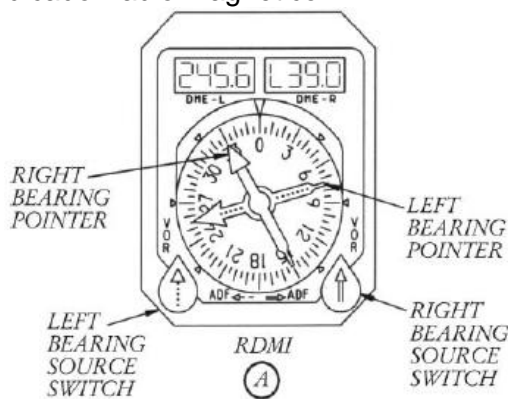
El receptor toma la señal transmitida de la estación NDB seleccionada por dos puntos distintos, uno por la antena de cuadro bidireccional y otro por la antena direccional. La señal de radio de la estación transmisora NDB es interceptada por las bobinas laterales y longitudinales de la antena de cuadro e induce voltajes de cada una de ellas, estos voltajes son proporcionales en amplitud, al ángulo de arribo de la onda de radio, con respecto a la posición del avión (Gassin, 2009).

Figura 15. Ángulo determinado por goniometría.



(Casado, 1951)

Figura 16. Marcaciones indicador radio magnético.



(Gassin, 2009)

4.3.6.3 Detección de transmisiones de radio ilegales

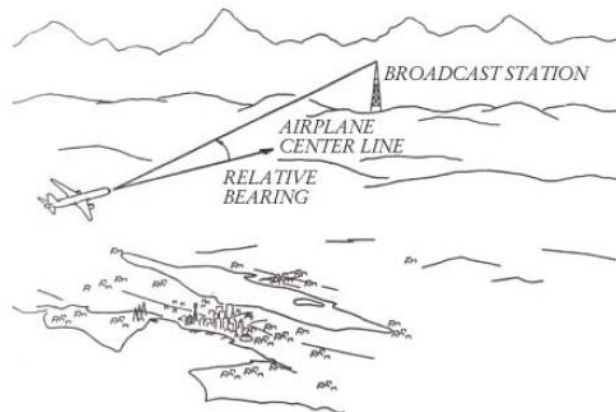
Puesto que no es necesario conocer las características de la señal, es suficiente con realizar un barrido de frecuencias en cierto punto para determinar si existen transmisiones ilegales dentro del rango geográfico en el cual opera el sistema de radiogoniometría. Y por supuesto se puede ubicar la dirección de la fuente ilegal (Casado, 1951).

Existen otro tipo de aplicaciones en las cuales no se necesita conocer el lugar donde se origina la transmisión, basta con encontrar la dirección de donde proviene la señal. Las aplicaciones más comunes se describen a continuación:

4.3.6.4 Estudios de interferencia

Debido al gran aumento de los servicios de comunicaciones que utilizan el espectro radioeléctrico para transmitir y recibir información, la radiogoniometría puede proporcionar herramientas de análisis en el campo de la interferencia, ya que es posible establecer la dirección de las fuentes cuyas ondas radioeléctricas inciden sobre cierto punto geográfico. El objetivo es detectar posibles transmisores interferentes que podrían perjudicar el funcionamiento de una estación en operación o de una estación nueva (Casado, 1951).

Figura 17. Sistema NDF/ADF



(Gassin, 2009)

4.3.6.5 Monitoreo y gestión del espectro

Para los organismos de regulación y control del espectro radioeléctrico en todos los países, constituye una herramienta de análisis y evaluación de los planes de frecuencia y la operación de éstos en determinada zona (Casado, 1951).

4.3.6.6 Transmisiones breves con mensajes cifrados

Los mensajes cifrados generalmente son de corta duración, por tal motivo los equipos de radiogoniometría necesarios para detectar este tipo de transmisiones tienen que ser de respuesta rápida; es decir, la velocidad de procesamiento debe estar dentro de un rango determinado de tiempos para poder detectar emisiones de decenas de milisegundos. Esta aplicación es útil para análisis de inteligencia para las fuerzas militares del país (Casado, 1951).

4.3.7 Conceptos sobre vectores

- Vector hermitian transpuesto: el transpuesto hermitian es la transpuesta conjugada de un vector denotado por el operador H. por lo tanto la transpuesta hermitian de \bar{a} se puede demostrar como

$$\bar{a}^H = [a_1^* \ a_2^* \ \dots \ a_M^*]$$

$$b^H = \begin{bmatrix} b_1^* \\ b_2^* \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_N^* \end{bmatrix}$$

- Vector de producto punto (producto interno): el producto punto de un vector fila con sí mismo es tradicionalmente dado por:

$$\begin{aligned} b \cdot b^T &= [[b_1 \ b_2 \ \dots \ b_N]] \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_N \end{bmatrix} \\ &= [b_1^2 \ b_2^2 \ \dots \ b_N^2] \end{aligned}$$

- Vector Vandermonde: un vector vandermonde es un vector de M-elementos tal que:

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} x^0 \\ x^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x^{(M-1)} \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, el arreglo del vector dirección dado por la ecuación es un vector Vandermonde (Gross, 2005).

4.3.8 Covarianza

La covarianza entre dos variables es una medida de la asociación lineal existente entre ellas. Será positiva si la relación entre ambas es directa (si crece una crece la otra) y negativa si es inversa (si crece una decrece la otra); además, será tanto mayor en valor absoluto cuanto más fuerte sea la relación lineal existente.

Si dos variables aleatorias tienen covarianza cero o equivalentemente, si $R_{XY} = EX \cdot EY$, se dice que no están correlacionadas. Si dos variables aleatorias independientes son siempre no correlacionadas, en cuyo caso: $Cov[X, Y] = 0$

Si dos variables aleatorias son tales que $R_{XY} = 0$, se dice que son ortogonales.

4.3.9 Interferómetro, técnicas para Direction Finder

Los interferómetros pueden considerarse un caso específico de arreglos de antenas. El arreglo lineal en el cual todas las antenas se encuentran en el centro de una línea recta espaciadas equitativamente de un haz producido por el cambio de redes de fase por ejemplo.

En un interferómetro, los elementos que también pueden formar una línea recta, pero que usualmente están inequitativamente distanciados para obtener las relaciones del tiempo de llegada que pueden ser transpuestos en las diferencias de fase para determinar el ángulo de llegada de la información.

El concepto también se extiende a arreglos circulares, donde las técnicas de interferometría pueden ser aplicadas a una cobertura de 360° de azimut de una antena montada en un punto.

El sistema de Direction Finder es una técnica de medida basada en la diferencia del tiempo de llegada de una señal detectada por dos antenas idénticas colocadas en un espacio separado por una finita línea de base.

La salida de las antenas difiere en la fase de cada otra en proporción al tiempo extra que le tomó a la señal de onda plana viajar una mayor distancia a la antena siguiente. Dado que una señal podría ser detectada al mismo tiempo si se desplazara al mismo tiempo a ambas antenas, la diferencia de fase podría ser cero, creando una diferencia de fase nula a lo largo de la dirección en que se está apuntando la antena por esta condición. La medida de diferencia de fase o tiempo siempre que sea mayor o menor que cero, por lo tanto, puede dar el ángulo entrante con respecto a la dirección en que está apuntando la antena.

En un sistema de Direction Finder de dos monopolos que está en el espacio a 180 grados es ambiguo, desde el punto de vista en el que no es claro de cual mitad del hemisferio se está originando la señal. Una solución práctica para este problema en los sistemas de Direction Finder es usar otro sistema tal como un Direction Finder de mono pulso de amplitud para seleccionar la dirección correcta o usar un cuadrante arreglo de antenas protegidas entre sí, o un arreglo circular de mono polos para que sin ambigüedades cubra los 360° del campo de vista.

En la primera técnica, la ambigüedad de resolución es obtenida por el blindaje, que se logra mediante la utilización de un terreno plano artificial, como el lado de un buque o avión para absorber o reflejar la onda trasera.

El último método resuelve la ambigüedad gracias a la medición de las diferencias relativas en las fases entre todos los elementos radiantes alrededor de un círculo, esencialmente resolviendo respuestas ambiguas.

La amplia cobertura en frecuencias es deseada generalmente en los sistemas de interferómetros para la detección pasiva, lo que exige más de un conjunto de antenas y más de una línea de referencia entre las antenas usadas, puesto que la solución de las ecuaciones del ángulo de llegada para un sistema de una a sola línea de base no es un único valor.

Los interferómetros de este tipo son llamados interferómetros de línea de base múltiple y generalmente consisten de una antena de referencia en el centro de dos o más espaciadas en línea y con distancias diferentes de ella. Es posible utilizar muchas referencias y antenas para obtener una amplia cobertura de frecuencias. Al relacionar las referencias de una manera conocida o usando una radio frecuencia conocida en el procesamiento, todas las ambigüedades de direcciones encontradas pueden ser resueltas.

En otra técnica el espacio de fase puede ser hecho proporcional a la frecuencia con dos antenas cónicas posicionadas la una frente a la otra. En este caso la ambigüedad de fase nula es resuelta desde el espacio optimizado para cada frecuencia. El ancho de banda de las espirales cónicas hace de esta una técnica útil (Lipsky, 2004).

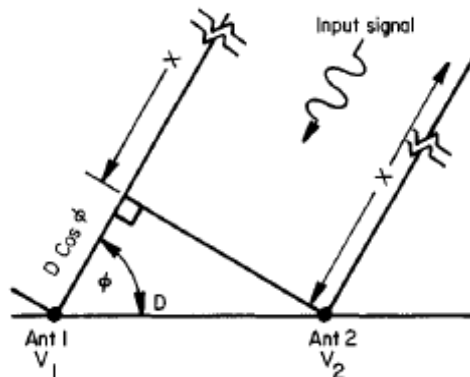
4.3.10 Matemáticas de interferometría

En primer lugar, es importante entender que la antena parte del sistema del interferómetro es casi siempre una configuración de mono pulso de fase, permitiendo técnicas de procesamiento.

El problema de la medida de fase, sin embargo, a menudo requiere que se utilicen sistemas de fase y amplitud combinados. Un ejemplo de esto es la ambigüedad de resolución previamente mencionada.

Detectando la amplitud de la antena, así como las respuestas de fase y comparando sectores en un sistema mono pulso de amplitud es posible eliminar múltiples ambigüedades nulas de dirección de la fase del interferómetro que ocurre cuando las frecuencias tienen longitudes de onda menores que la mínima ambigüedad espacial $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ de un par de antena presente.

Figura 18. Una línea de base de referencia del interferómetro.



(Lipsky, 2004)

En la figura 18, la única línea de base de un interferómetro de dos antenas ha sido adecuada para mostrar la operación en el primer cuadrante. El voltaje recibido por la segunda antena puede ser expresado en forma exponencial así:

Ecuación 3. Voltaje recibido forma exponencial

$$V_2 = V \exp(j\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} X)$$

(Lipsky, 2004)

Donde:

V = la amplitud inicial de la señal transmitida

X = la distancia recorrida

$\frac{2\pi}{\lambda}$ = constante de propagación en el espacio libre

Y de modo similar sucede con la antena 1:

Ecuación 4. Voltaje recibido en forma exponencial para la antena 1

$$V_1 = V \exp \left(j\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} X + D \cos \phi \right)$$

(Lipsky, 2004)

Donde el término $D \cos \phi$ representa la longitud adicional hacia la antena 1 en referencia a la antena 2. Se está interesado en diferencias relativas de fase entre 2 voltajes recibidos, V_1 y V_2 entonces se puede asumir $\frac{2\pi}{\lambda}$ para ser la referencia cero de la antena 2, entonces:

Ecuación 5. Voltaje v1

$$V_2 = e^{j\omega t}$$

(Lipsky, 2004)

Y

Ecuación 6. Voltaje v2

$$V_1 = \exp \left(j\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} D \cos \phi \right)$$

(Lipsky, 2004)

Tomando el logaritmo natural (ln) en ambos lados de la ecuación y sustrayendo para obtener la diferencia de voltajes producidos.

Ecuación 7. Voltaje producido antenas

$$\ln V_2 - \ln V_1 = \ln \frac{V_2}{V_1} = j\omega t - j\omega t + jD \cos \phi$$

(Lipsky, 2004)

Ecuación 8. Voltaje producido antenas

$$= j \frac{2\pi}{\lambda} D \cos \phi$$

(Lipsky, 2004)

Y entonces ψ queda definido como la diferencia en la parte real de la ecuación 5; entonces:

Ecuación 9. Diferencia parte real

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} D \cos \phi$$

(Lipsky, 2004)

Tomando en cuenta la diferencia de los logaritmos de los dos voltajes efectivamente forman el radio $ln \frac{V_2}{V_1}$, que hace de este un sistema de interferómetro de mono pulso de fase; el término $\Delta\psi$ ha sido normalizado respecto a la variación de la señal de entrada y es el radio del mono pulso.

Sustituyendo

$$\Delta\psi = \frac{c}{f} \text{ Donde } c = 3 \times 10^{10} \frac{cm}{seg}$$

Y resolviendo la ecuación 7 para $\cos\phi$ en términos de frecuencia producida

Ecuación 10. Frecuencia producida

$$\cos\phi = \frac{30\Delta\psi}{2\pi Df}$$

(Lipsky, 2004)

Donde

$\Delta\psi$ = La diferencia de fase en radianes (2π radianes = 360 grados)

f = la frecuencia de la intercepción expresada en gigahertz por segundo

D = el espacio medido en centímetros

ϕ = el ángulo de llegada

Ó

Ecuación 11. Frecuencia producida en grados

$$\cos\phi = \frac{\Delta\psi}{12Df}$$

(Lipsky, 2004)

Ya que $\Delta\psi$ se repite cada 360° para todas las frecuencias altas donde la longitud de onda que llega es menor a D , para el $\cos\phi$ en la figura 12 siendo inequívocos, el cambio relativo de fase $\Delta\psi$ debe ser

Ecuación 12. En grados

$$0 < \Delta\psi < 360 \text{ grados}$$

(Lipsky, 2004)

Y para el caso general

Ecuación 13. Caso general

$$\cos \phi = \frac{\Delta\psi + 360K}{12Df}$$

(Lipsky, 2004)

Donde K es cualquier entero positivo que es el número solución correspondiente a altas frecuencias. Dado que el coseno es siempre menor que 1, K está limitada a solo aquellos valores tales que $\cos \phi \leq 1$ en la ecuación 23.

Esto se puede mostrar reordenando los términos de la ecuación 23:

Ecuación 14. Reordenando términos ecuación 10

$$\cos \phi = \frac{\Delta\psi + 2\pi K}{12Df}$$

(Lipsky, 2004)

Sustituyendo $f = \frac{B}{\lambda}$. donde B contiene todas las constantes, y dividiendo por 2 da:

Ecuación 15. Sustituyendo f

$$B \frac{D}{\lambda} = \cos \phi = \frac{\Delta\psi}{2\pi} + K$$

(Lipsky, 2004)

La figura 20 es un gráfico de ϕ , contra el ángulo de llegada (como medida del horizonte 0 – 90 grados en el primer cuadrante) como una función de $(\frac{\Delta\psi}{2\pi} + K)$.

En la gráfica se puede ver que no habrá ambigüedades para $\frac{D}{\lambda} = 4$, por ejemplo para un cambio de 10 a 80 grados, habrá un cambio en $(\frac{\Delta\psi}{2\pi} + K)$ de 3.6 a 0.5 o 3.1 grados de rotación, creando 3 ambigüedades. El sistema de una sola línea de base podría, además, no tener solo un valor durante este lapso.

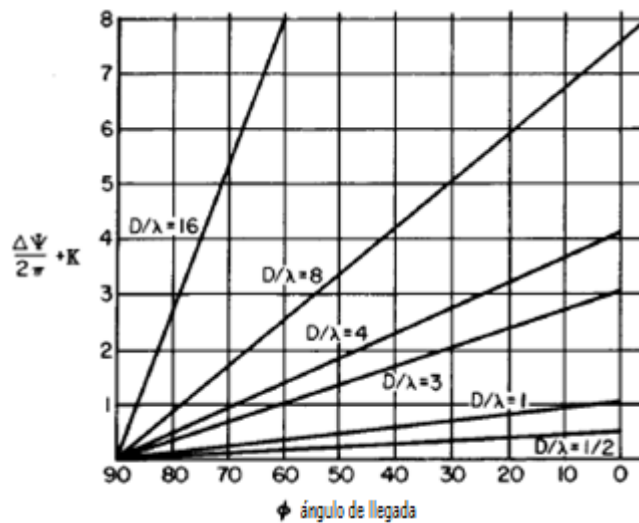
Considerando, sin embargo, la articulación, que por un interferómetro puede ser definida como una tasa de cambio del ángulo de fase para el ángulo de llegada. Si se define la pendiente $m_{0.5}$ ser igual que $\frac{D}{\lambda} = \frac{1}{2}$, entonces:

$$\frac{0.5}{90 \text{ grados}} \times \frac{180 \text{ grados}}{\pi(\text{radianes})} = 0.32 \frac{\text{grados}}{\text{grados}}$$

Para $\frac{D}{\lambda} = 4$, la pendiente m_4 para este caso es

$$\frac{4}{90 \text{ grados}} \times \frac{180}{\pi} = 2.55 \frac{\text{grados}}{\text{grados}}$$

Figura 19. Ambigüedad del interferómetro.



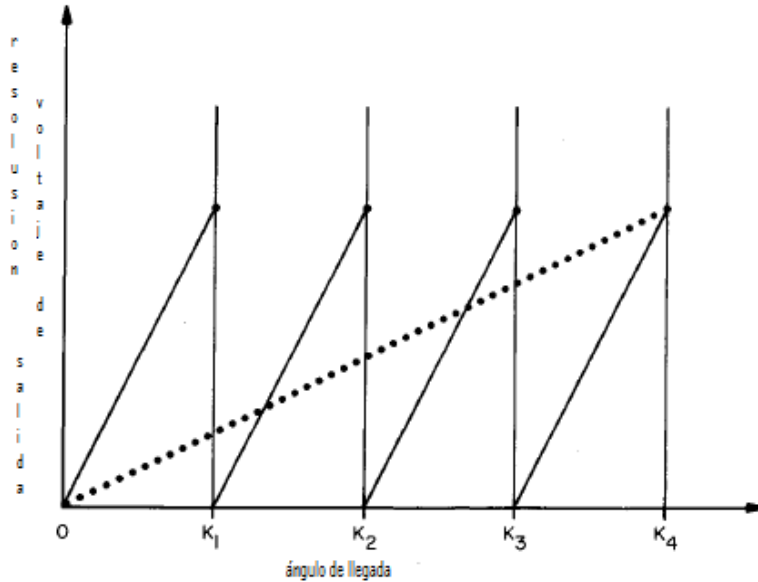
(Lipsky, 2004)

Lo cual es ocho veces mejor que $D = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{0.5} \right)$ como se esperaba, además, es posible concluir que la técnica de interferómetro Direction Finder puede conseguir una muy alta resolución de una amplia elección de $\frac{D}{\lambda}$ radios a expensas de solucionar el problema de la ambigüedad que tendrá como resultado. Esta es la base para el uso de esta técnica de un sistema de alta resolución Direction Finder.

Un método para resolver las ambigüedades en un limitado rango de frecuencias es limitando el campo de visión de la antena, aunque también se puede lograr utilizando múltiples referencias como se puede observar en la figura 20.

Un ambiguo par de referencias da lugar a las ambigüedades K_1, K_2, K_3 , y K_4 (línea sólida), las cuales pueden ser resueltas por otro par de referencia (línea punteada) sin ambigüedades, el segundo par son más cercanos. La fina medición angular se mide mejor por el amplio par espacial ya que posee una mayor articulación (cambio de fase por grado); sin embargo, el número más significativo para la medida, la primera no ambigüedad, hecha por el canal con la menor articulación, requiriendo una mejor relación de señal – ruido en el canal para ofrecer precisión.

Figura 20. Resolución ambigüedad en interferómetro de múltiples referencias



(Lipsky, 2004)

Un sistema de medición de amplitud es usado aquí además para ofrecer esta resolución si la ventaja de relación señal – ruido existe.

La figura 21 muestra un sistema de referencia dual donde la antena 1 está espaciada a una distancia D_1 de la antena 2 formando una corta referencia para el interferómetro, mientras la antena 3 esta espaciada una distancia D_2 de la antena 1 formando una larga referencia para el interferómetro.

En el primer cuadrante, V_3 retrasa V_2 , quien retrasa a V_1 . Reescribiendo la ecuación 23 en este caso queda así:

Ecuación 16. Referencia interferómetro antena 1

$$\cos\phi_1 = \frac{\Delta\psi_1 + 360K_1}{12fD_1}$$

(Lipsky, 2004)

Ecuación 17. Referencia interferómetro antena 2

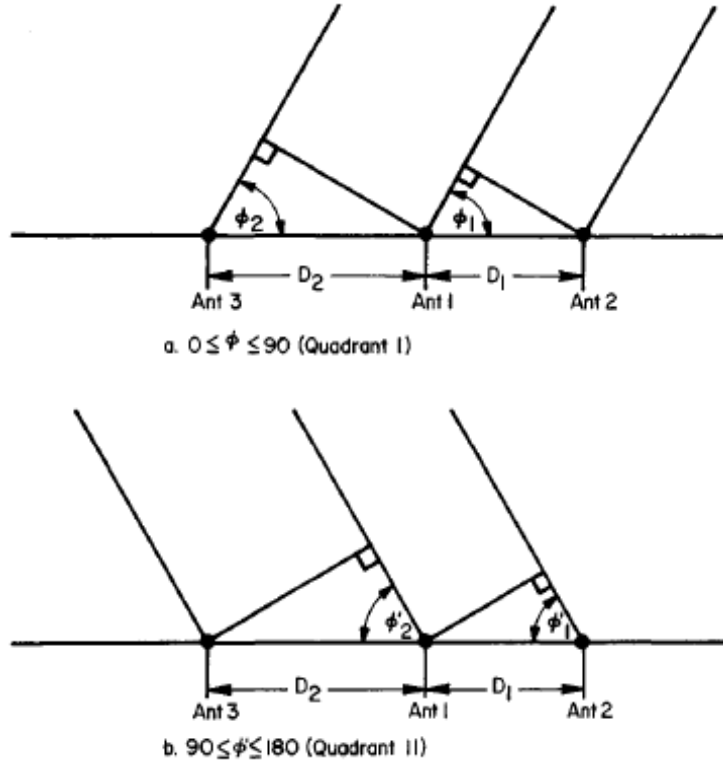
$$\cos\phi_2 = \frac{\Delta\psi_2 + 360K_2}{12fD_2}$$

(Lipsky, 2004)

Donde

$$D_1 \neq D_2$$

Figura 21. Interferómetro de referencia dual.



(Lipsky 2004)

Para un determinado rango de frecuencias, los valores de K_1 y K_2 pueden ser calculados estableciendo $\cos \phi_1$ y $\cos \phi_2$ iguales a la unidad y solucionando para K .

Por ejemplo utilizando la ecuación 26

$$\cos \phi = \frac{\Delta\psi_1 + 360K_1}{12fD_1} \leq 1$$

Entonces

$$\Delta\psi + 360K_1 \leq 12fD_1$$

Pero

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= 0 \\ 360K_1 &= 12fD_1 \\ K_1 &= \frac{fD_1}{30} \end{aligned}$$

K_1 Puede tener múltiples valores para altas frecuencias. El número de ambigüedades será un número entero que va desde cero, el caso ideal, cualquier número entero menor que la solución. En el cuadrante dos el ángulo de llegada se convierte en un ángulo principal, es decir, V_3 lleva V_1 , quien lleva V_2 . Como se muestra en la figura 22 en la parte (b).

A los 90° de orientación no hay diferencia de ángulo y el ángulo de llegada de retraso de desfase a adelanto. Dado que la mayoría del tiempo real se hace una medida del ángulo de retraso, es necesario un ajuste en las ecuaciones. Definiendo los valores del cuadrante 2 como principales, y midiéndolos, como se muestra, la ecuación 9 se convierte en

Ecuación 18. Medida ángulo retraso

$$\cos\phi^1 = -\frac{\Delta\phi'}{12Df}$$

(Lipsky, 2004)

$\Delta\psi'$ es un ángulo principal y ahora es negativo con respecto al sistema de medición. La figura 22 muestra las relaciones de los cuadrantes. La señal proveniente de ϕ^1 en el cuadrante 2 tiene el mismo valor que $\cos(\pi - \phi)$ para un equivalente en el cuadrante 1, donde:

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{2} < \phi^1 \leq \pi \\ \cos\phi^1 &= \cos(\pi - \phi) \\ &= \cos\pi\cos\phi + \operatorname{sen}\pi\operatorname{sen}\phi \\ &= -\cos\phi \end{aligned}$$

Ecuación 19. Resolviendo ecuación 27

$$\cos\phi = \frac{\Delta\psi}{12fD}$$

(Lipsky, 2004)

Dado que sólo se miden los ángulos de desfase ψ^1 , podría avanzar 360° como sigue:

Ecuación 20. Ángulos de desfase

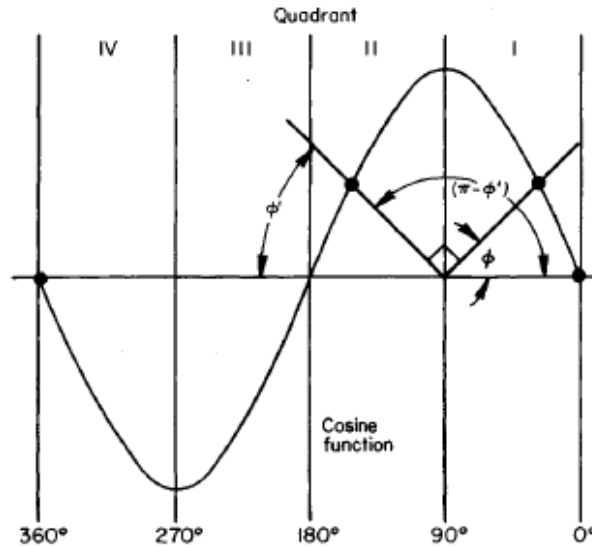
$$\Delta\psi^1 = 360 + \Delta\psi$$

(Lipsky, 2004)

Luego, sustituyendo la ecuación 30 en 29 y luego solucionando la ecuación para $\Delta\psi$ da

$$\cos\phi = \frac{(\Delta\psi^1 - 360)}{12fD}$$

Figura 22. Relaciones del cuadrante para la referencia dual del interferómetro



(Lipsky, 2004)

Dado que sólo los ángulos de 0 a 360° pueden ser medidos para K soluciones,

$$\cos\phi = \frac{(\Delta\psi^1 - 360K) - 360}{12fD}$$

Los ángulos de llegada ϕ_1 y ϕ_2 para el cuadrante 2 pueden además ser escritos así:

Ecuación 21. Angulo de llegada 1

$$\cos\phi_1 = \frac{\psi_1 - 360(K_1 + 1)}{12fD_1}$$

(Lipsky, 2004)

Ecuación 22. Angulo de llegada 2

$$\cos\phi_1 = \frac{\psi_1 - 360(K_2 + 1)}{12fD_2}$$

(Lipsky, 2004)

Donde $\Delta\psi_1 = \psi_1$ y $\Delta\psi_2 = \psi_2$ por definición, la verdadera medida del ángulo de fase diferencia las antenas (Lipsky, 2004).

4.3.11 Conceptos para la estimación del DOA (Direction of arrival)

Un problema clásico en el procesamiento de señales es la estimación de direcciones de llegada de una serie de ondas planas que inciden en un conjunto de antenas. En la literatura pueden encontrarse técnicas avanzadas para estimar estos parámetros como por ejemplo el método de estimación de máxima verosimilitud o por otra parte, el algoritmo Music (Multiple Signal Classification) entre otros.

A pesar del buen funcionamiento de estos métodos de estimación, su aplicación a situaciones reales es bastante difícil por el hecho de que usualmente existe un número desconocido de señales incidentes simultáneamente sobre el arreglo de antenas, cada una de ellas con direcciones y amplitudes desconocidas, además las señales recibidas siempre están corrompidas por ruido.

El problema clásico en el procesado de señal de un arreglo es determinar la localización de una fuente radiante relativa a la localización del arreglo, es decir, el objetivo es estimar la dirección de arribo (DoA: direction of arrival) de una señal en la presencia de ruido y señales interferentes. El proceso general se describe en a figura 23.

La agrupación o arreglo de antenas resuelve este problema explotando la separación espacial en la localización donde se originan las señales deseadas e interferentes. Filtra los datos colectados considerando una apertura espacial de la misma manera en que un filtro FIR procesa temporalmente los datos muestreados.

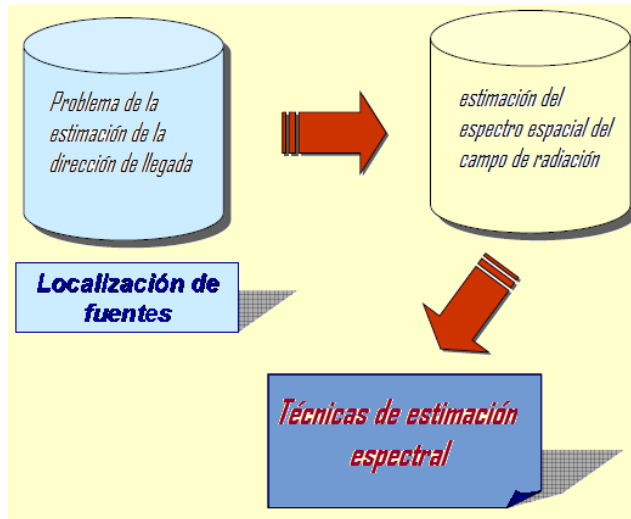
Un aspecto de fundamental importancia dentro de cualquier sistema de antenas inteligentes lo constituye la estimación de la dirección de arribo (DoA), ya que a partir del conocimiento de este parámetro es posible determinar la posición angular de los usuarios activos con respecto a la estación base.

El problema de la estimación del DOA, ha sido investigado ampliamente en sistemas de radar y sonar. Sin embargo, dentro del contexto de los sistemas de comunicaciones inalámbricas, la estimación de la dirección de arribo representa un problema de mayor complejidad, dado que las fuentes pueden parecer espacialmente distribuidas debido a los dispersores cercanos al usuario.

Además, dichas fuentes pueden estar dotadas de movilidad por lo que es necesario realizar un rastreo en cada tiempo de muestreo. Un factor de sustancial importancia en la determinación de la dirección de arribo de las señales deseadas lo constituye el arreglo de antenas, ya que es a través de éste que se capta la

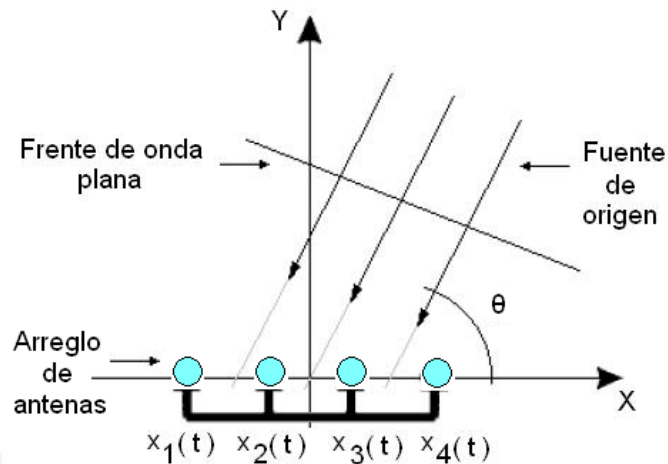
información compleja del entorno espacial. A partir de la cual, es posible determinar la posición angular de las fuentes de interés.

Figura 23. Problema estimación DOA.



(Covarrubias, 2009)

Figura 24. Arreglo de antenas frente a una onda plana.



(Covarrubias, 2009)

Es posible ubicar a varias fuentes a la misma frecuencia y al mismo tiempo, todo el tiempo, mediante la Diversidad Espacial, la cual se refiere a la ubicación distinta de cada fuente de transmisión dentro del alcance de las antenas. Para ello es necesario el uso de arreglo de antenas, el procesamiento de los datos capturados por sus elementos y una técnica de ubicación de fuentes.

Considerando una agrupación de r sensores con características de localización y direccionalidad arbitrarias, los cuales reciben señales generadas por q fuentes de

banda estrecha, con conocida frecuencia central ω y localizaciones espaciales $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$. La salida de la agrupación puede expresarse en representación compleja como:

Ecuación 23. Salida agrupación antenas.

$$x(t) = \sum_{k=1}^q a(\theta_k) s_k(t) + n(t)$$

(Covarrubias, 2009)

Donde:

$X(t) = [x_1(t), \dots, x_r(t)]^t$ es el vector de las señales recibidas por los sensores del arreglo.

$s_k(t)$ es la señal emitida por la k -ésima fuente recibida como referencia en el sensor 1 del arreglo

$a(\theta_k) = [1, e^{-j\omega\tau_2(\theta_k)}, \dots, e^{-j\omega\tau_r(\theta_k)}]^T$ es el vector dirección del agrupamiento dirigido hacia θ_k . $\tau_i(\theta_k)$ es el retardo de propagación entre el primer y el i -ésimo sensor de la forma de onda que proviene de la dirección θ_k

$n(t) = [n_1(t), \dots, n_r(t)]^T$ es el vector de ruido.

La ecuación anterior también se puede representar en forma matricial como:

Ecuación 24. Vector entrada agrupación antenas.

$$X(T) = A(\theta)S(t) + n(t)$$

(Covarrubias, 2009)

Donde:

$A(\theta)$ es la matriz $r \times q$ del vector dirección arreglo: $A(\theta) = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_q)]$

Y $s(t)$ es el vector $q \times 1$ de las señales: $s(t) = [s_1(t), \dots, s_q(t)]^T$

Considerando que se han tomado N muestras en instantes t_1, t_2, \dots, t_M , los datos pueden expresarse como: $X = A(\theta)S + N$

Donde X y N son las matrices $r \times M$

Ecuación 25. Ubicación agrupación antenas.

$$X = [x(t_1), \dots, x(t_M)]$$

(Covarrubias, 2009)

Ecuación 26. Muestras agrupación antenas.

$$N = [n(t_1), \dots, n(t_M)]$$

(Covarrubias, 2009)

Y S es la matriz $q \times M$

Ecuación 27. Señales emitida k-ésima fuente.

$$s = [s(t_1), \dots, s(t_M)]$$

(Covarrubias, 2009)

El objetivo será la estimación de los DoA's de las fuentes $\theta_1, \theta_2, \theta_q$ de las M muestras $x(t_1), \dots, x(t_M)$ del arreglo.

El objetivo de la estimación del DoA queda pues fijado en, dada una colección de snapshots (muestras) con su correspondiente matriz de covarianza estimada, encontrar los vectores de enfoque de las fuentes presentes en el escenario. Por el momento, se asumirá que el número de snapshots N disponibles es mayor que el número de elementos de la apertura Q , asumiendo de este modo que la matriz de covarianza estimada está bien condicionada. De manera práctica, N ha de ser mayor que $2Q$ y los resultados entre el uso de la matriz exacta y estimada, en los correspondientes estimadores comienza a ser pequeño cuando N es mayor que $10Q$.

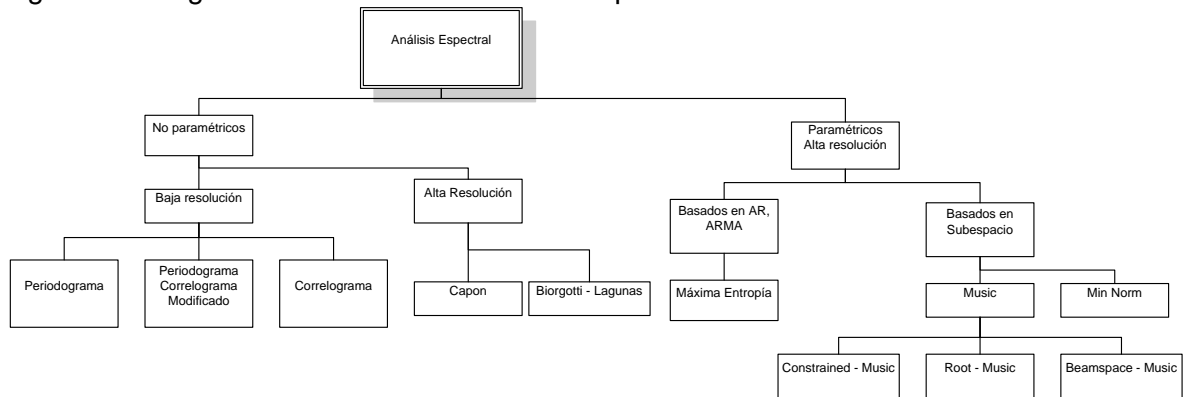
Hacia dicho objetivo se hacen las siguientes consideraciones:

1. El número de señales es conocido y menor al número de sensores $q < r$
2. El conjunto de cualquier q vectores dirección es linealmente independiente.
3. Las muestras de ruido $n_i(t_j)$: $i=1, \dots, r$; $j=1, \dots, M$ provienen de una distribución compleja isótropa estable.
4. Las muestras de ruido $n_i(t_j)$ son estadísticamente independientes de una a otra a través de la agrupación de sensores.

4.3.12 Estimación del DOA (Direction of Arrival)

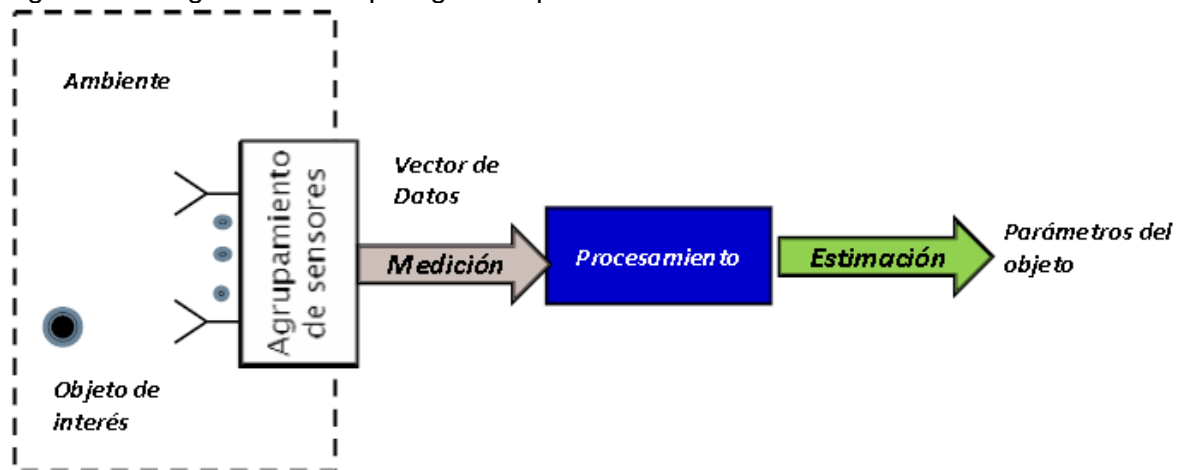
El problema de estimación del DoA (Direction of Arrival) trata de determinar aquellas cantidades físicas que no pueden ser medidas, puede ser de una señal o de un parámetro.

Figura 25. Diagrama técnicas de estimación espectral.



(Covarrubias, 2009)

Figura 26. Diagrama de bloques general para estimación del DOA



(Covarrubias, 2009)

La forma más empleada para estimar el DOA se realiza mediante técnicas del análisis espacio vectorial (eigenestructuras) de los datos obtenidos de las muestras de cada elemento/sensor del arreglo de antenas. Dos de estas técnicas son los algoritmos:

- MUSIC (Multiple Signal Classification)

- ESPRIT (Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques).

El algoritmo Music determina la dirección de arribo de las señales mediante la generación de un espectro espacial, en el cual los máximos o picos corresponden a las posibles fuentes en el entorno. Existen varias versiones del algoritmo Music, las cuales pueden ser conceptualizadas de forma muy general en 3 vertientes:

- MUSIC Espectral
- Root MUSIC.
- MUSIC con restricción

4.3.13 Algoritmo Music Espectral (Covarrubias, 2009).

Music es un algoritmo de alta resolución que permite detectar fuentes con una separación mínima hasta de 5 grados, está basado en el modelo de señal incidente y tiene la ventaja de poder aplicarse independientemente de la geometría del arreglo y para SNRs relativamente bajas (mayores a 5 dB). El algoritmo Music espectral es un método sub óptimo que descompone la matriz de correlación de la señal formando dos subespacios ortogonales, uno asociado a la señal y el otro al ruido, sobre los que se proyectan los potenciales vectores de dirección, tal que los máximos principales del espectro formado representen las direcciones verdaderas.

El procesamiento de este algoritmo es considerado uno de los más ligeros, computacionalmente hablando, por lo que es la técnica de DoA más utilizada, en la que, a partir de un modelo de datos de entrada se llega a representar un espectro espacial, ubicando en dirección de sus máximos a los móviles activos. A partir del muestreo espacio-temporal realizado por la agrupación de antenas, el algoritmo Music forma la matriz de datos.

Además este algoritmo requiere de arreglos de antenas con el fin de crear una matriz de correlación empleando las señales recibidas por el arreglo, lo cual implica el conocimiento del vector de dirección.

Es un método de estimación de la dirección de arribo basado en estructuras de valor propio, las cuales determinan la posición angular de las fuentes activas dentro del entorno celular mediante la generación de un espectro espacial, en el cual los máximos o picos corresponden a las posibles fuentes.

Como ya se mencionó, el algoritmo Music requiere del empleo de un arreglo de antenas para formar una matriz de correlación a partir de los datos muestreados por cada uno de los elementos que conforman el arreglo. Este algoritmo no restringe la geometría del arreglo, pero si requiere del conocimiento previo de su estructura geométrica y en particular del vector de dirección.

El principio de operación del algoritmo Music se basa en la estructura ortogonal del espacio muestreado, y señala que éste puede descomponerse en dos subespacios complementarios y mutuamente ortogonales, denominados subespacio de señal y subespacio de ruido.

De esta forma, en vez de realizar una búsqueda exhaustiva en todo el espacio muestreado, se puede confinar dicha búsqueda al subespacio de señal, el cual usualmente es de menor dimensión. El algoritmo Music en su forma estándar también es conocido como Music espectral.

La hipótesis principal de Music establece que en el mejor de los casos las señales de los usuarios de interés sean totalmente no correlacionadas (incoherentes u ortogonales), con un coeficiente de correlación cero; o a lo más, parcialmente correlacionadas, con un coeficiente cercano a ± 1 . Se supone también que el ruido presente es independiente en cada rama e independiente de cada señal y del tipo AWGN (ruido blanco aditivo Gaussiano), de media cero y varianza σ_n^2

4.3.14 Funcionamiento algoritmo Music

Al ser muestreadas las señales que arriban a la agrupación de antenas, se evalúa junto con ellas, un parámetro de ruido, por lo que el modelo de datos de entrada al sistema puede expresarse como:

Ecuación 28. Modelo de entrada

$$x(t) = A(\theta)s(t) + n(t)$$

(Covarrubias, 2009)

Ecuación 29. Modelo de entrada forma matricial.

$$x(t) = \begin{bmatrix} a_{11}(\theta_1)e^{-j\omega_0\tau_1(\theta_1)} & \dots & a_{1d}(\theta_d)e^{-j\omega_0\tau_1(\theta_d)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1}(\theta_1)e^{-j\omega_0\tau_m(\theta_1)} & \dots & a_{md}(\theta_d)e^{-j\omega_0\tau_m(\theta_d)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \vdots \\ s_d(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ \vdots \\ n_m(t) \end{bmatrix}$$

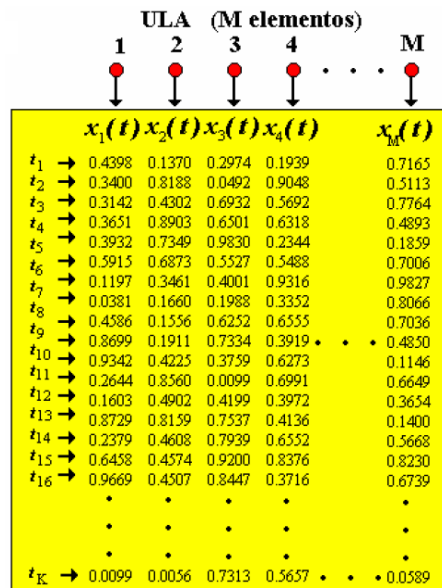
(Covarrubias, 2009)

El algoritmo Music primero forma la matriz de datos, a partir del muestreo temporal de la superposición de señales, que arriben a cada sensor o elemento del arreglo

de antenas. La matriz de datos de K muestreos para una ALU (Arreglo lineal uniforme) de M sensores es de dimensión $K \times M$.

Las columnas de la matriz de datos corresponden a la información espacial proporcionada por cada uno de los elementos del arreglo, mientras que las filas representan el muestreo temporal. Por lo tanto, la matriz de datos representa el punto de partida para determinar la dirección de arribo de las señales transmitidas por fuentes radiantes

Figura 27. Ejemplo matriz de datos.



Matriz de Datos

(Covarrubias, 2009)

En cada muestreo en el dominio del tiempo, se obtiene un total de M resultados correspondientes a la salida de señal compleja, de cada uno de los sensores que conforman el arreglo de antenas.

Cada uno de estos resultados representa una perspectiva diferente del entorno espacial a un determinado tiempo t . Esto quiere decir que, entre más muestras se tengan, mayor será la caracterización del entorno reunida en el conjunto de datos. A partir de este muestreo espacio-temporal se obtiene la matriz de datos.

A partir de la matriz de datos X se deduce la matriz de correlación R_{xx} . La matriz de correlación se puede expresar como:

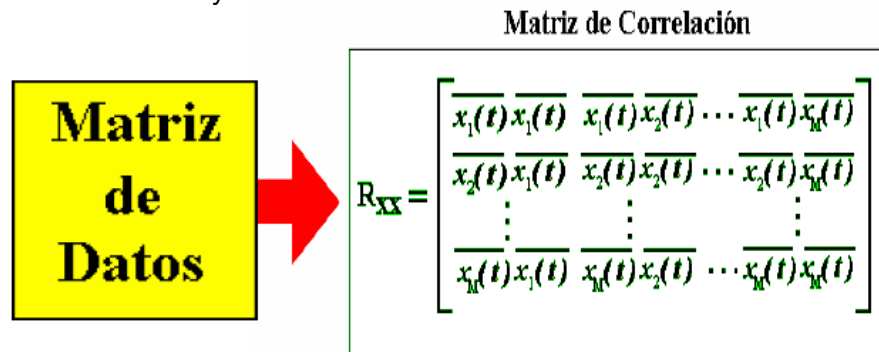
En la matriz de correlación R_{xx} el elemento ij equivale a la media del producto de los vectores columna x_i y x_j de la matriz de datos. Por lo que R_{xx} es una matriz de $M \times M$.

Ecuación 30. Matriz de correlación.

$$R_{xx} = E[\bar{x}(l)\bar{x}(l)^H] = \begin{bmatrix} \bar{x}_1(l)\bar{x}_1(l)^H & \bar{x}_1(l)\bar{x}_2(l)^H & \dots & \bar{x}_1(l)\bar{x}_M(l)^H \\ \bar{x}_2(l)\bar{x}_1(l)^H & \bar{x}_2(l)\bar{x}_2(l)^H & \dots & \bar{x}_2(l)\bar{x}_M(l)^H \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_M(l)\bar{x}_1(l)^H & \bar{x}_M(l)\bar{x}_2(l)^H & \dots & \bar{x}_M(l)\bar{x}_M(l)^H \end{bmatrix}$$

(Covarrubias, 2009)

Figura 28. Matriz de datos y matriz de correlación.



(Covarrubias, 2009)

La matriz de correlación proporciona un resumen útil de la relación que existe entre los datos obtenidos a partir del muestreo del arreglo de antenas. Un nivel alto de correlación indica una cantidad sustancial de redundancia, mientras que un nivel bajo indica que cada vector $x_i(t)$ proporciona información adicional no encontrada por otro elemento.

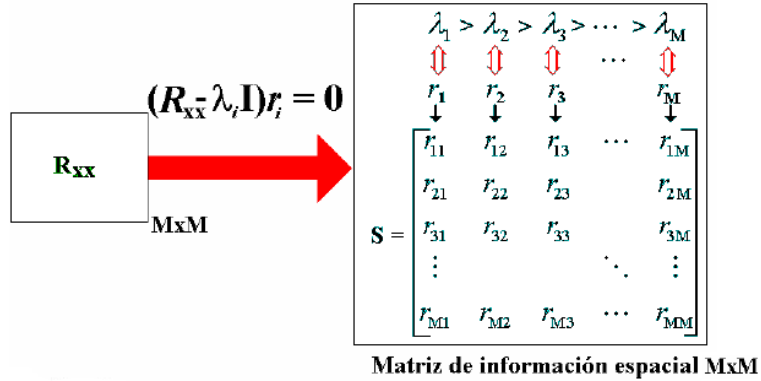
La matriz de correlación R_{xx} debe descomponerse de acuerdo a sus valores propios (eigenvalues) y vectores propios (eigenvectors) para formar la matriz de información espacial.

De la matriz de información espacial pueden separarse el subespacio de señal y el subespacio de ruido, al considerar dos subconjuntos de los vectores propios (respectivamente). La separación de estos subespacios se basa en el número de usuarios activos (fuentes), N

De la matriz de correlación se aprovechan las siguientes propiedades:

1. El espacio abarcado por sus eigen-vectores puede ser particionado en dos subespacios, llamados el subespacio de señal y el subespacio de ruido.

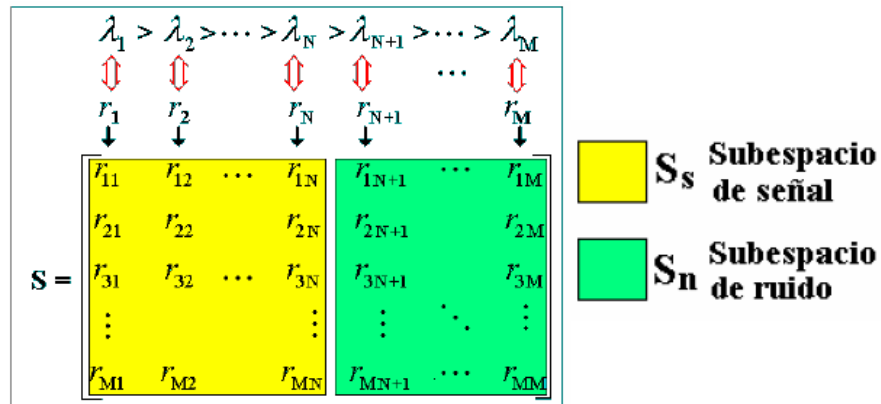
Figura 29. Matriz de correlación y matriz de información espacial.



(Covarrubias, 2009)

2. Los vectores de dirección correspondientes a las fuentes direccionales son ortogonales al subespacio de ruido.

Figura 30. Subespacio de señal y subespacio de ruido.



(Covarrubias, 2009)

Es de resaltar que: el subespacio de ruido está formado por los eigen-vectores asociados con los menores eigen-valores de la matriz de correlación, y el subespacio de la señal está formado por los eigen-vectores asociados con los mayores eigen-valores.

Tanto del subespacio de ruido como del subespacio de señal pueden estimarse las direcciones de los N móviles dentro del entorno espacial, esto se logra hallando los máximos (picos) del espectro espacial dado por:

Ecuación 31. Espectro espacial Music

$$P_{música} = \frac{1}{|\bar{v}^H S_n|^2} \equiv P_{música} = |S_s \bar{v}^H|^2$$

(Covarrubias, 2009)

Donde \bar{v} es el vector de dirección de la ALU (Arreglo Lineal Uniforme) y H representa la transpuesta del complejo conjugado.

Conforme el número de muestras tienda a infinito, los vectores propios del subespacio de ruido tenderán cada vez más a ser ortogonales al vector de dirección \bar{v} en dirección de θ_i , lo cual puede aprovecharse para estimar las direcciones de las N fuentes dentro del entorno espacial, de acuerdo a la siguiente expresión:

Ecuación 32. Espectro espacial Music

$$P_{música}(\theta) = \frac{1}{|\bar{v}^H s_n|^2}$$

(Covarrubias, 2009)

4.3.15 Características algoritmos interferometría correlativa

4.3.15.1 Algoritmo Music

- Algoritmo de alta resolución.
- Sus salidas las proporciona en espectros de potencia.
- Consumo de tiempo considerable.

4.3.15.2 Algoritmo Root-Music

- Basado en la solución de raíces polinomiales.
- Se aplica solamente en arrays lineales uniformes (ALU).

4.3.15.3 Algoritmo Esprit

- Reduce el tiempo computacional con respecto a MUSIC.
- Basado en la división del array de sensores en sub-arrays.

4.3.15.4 Algoritmo Mle

- Empleo de tiempo computacional muy elevado.

- Preferentemente utiliza supercomputadoras.
- Precisión elevada en la estimación

4.4 ESTADO DEL ARTE

Aunque el algoritmo Music logra su objetivo de encontrar la dirección de dónde viene una señal verificando varios ángulos de llegada continuamente al analizar todas las posibles direcciones para determinar finalmente el correcto DoA. Este procedimiento, conocido también como scanning hace que la detección del DoA sea menos eficiente.

Para solucionar este problema se creó el método ESPRIT, que por sus siglas en inglés significa estimación de los parámetros de señal vía técnicas de invariancia rotacional (estimation of signal parameters via rotational invariance techniques).

Este método convierte el problema del scanning en una determinación directa de los retardos que logran dirigir el lóbulo principal hacia la posición de las fuentes vía sus ángulos directores. En otras palabras se puede decir que el algoritmo ESPRIT enfoca el lóbulo principal hacia la mejor dirección de una sola vez, sin necesidad de verificar si otros lóbulos brindan una mejor recepción.

Uno de estos modernos equipos se puede apreciar en la figura 31.

Figura 31. Equipo DDF255 para Direction Finder.



(Rhode, 2010)

Una desventaja que tiene este método es que se ve afectado por el ruido no blanco, es decir, el ruido que varía su magnitud conforme varía su frecuencia. Además, para su funcionamiento se requiere de una carga computacional tan

grande que hace inconveniente el uso de este algoritmo para procesamiento de señales en tiempo real para señales que varían constantemente en el tiempo.

También la empresa Rhode and Schwarz desarrolla en la actualidad modernos equipos para la determinación del DoA haciendo uso de algoritmos de interferometría correlativa. Uno de los equipos más recientes es el DDF255 Direction Finder, que puede hacer un escaneo de frecuencias hasta los 6GHz, es decir, trabaja en el rango de VHF/UHF/SHF con una altísima precisión.

4.5 LIMITACIONES Y ALCANCES

Una de las grandes limitantes está dada por el hecho que es un software y aunque Matlab es una herramienta poderosa se hace necesario comprobar la eficiencia del algoritmo Music en un ambiente real.

La simulación del algoritmo ha sido desarrollada en el entorno MATLAB, bajo condiciones ideales o controlables para simplificar un poco la implementación del mismo.

El muestreo que se hace en MATLAB no es propiamente un muestreo en tiempo real, lo que se hace es generar un vector de muestras de un modelo de datos que sirve como parámetro de entrada para el desarrollo del algoritmo.

También se ha asumido que los niveles de potencia de las fuentes de origen son los mismos para todos los casos, esto con el fin de simplificar complejidad.

El algoritmo solo tiene un cubrimiento de 180° debido a que se trabajó con un solo arreglo de antenas.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Para alcanzar los objetivos propuestos a lo largo del proyecto, es necesario seguir una secuencia de pasos determinados y organizados de manera tal que el desarrollo del proyecto se efectúe de la mejor manera.

Como primera medida, se hace necesario buscar información acerca de lo que es la interferometría correlativa, cual es el concepto, cómo funciona, y qué tipos de algoritmos existen para su implementación. Todo esto bajo una serie de pasos que se necesitan para la realización.

En primer lugar hay que realizar el documento del anteproyecto para tener una planeación que permita evaluar los progresos que se vayan obteniendo a lo largo del desarrollo del proyecto y que efectivamente se está cumpliendo con lo planeado.

A medida que se va realizando el documento del anteproyecto, es necesario investigar sobre interferometría correlativa para poder entender el concepto básico y que es lo que se quiere lograr.

Como segunda medida, es necesario identificar los algoritmos existentes que se utilizan en la interferometría correlativa y conocer las bases teóricas y el fundamento matemático tras el algoritmo Music.

También se hace indispensable investigar a fondo los parámetros utilizados en el algoritmo Music para poder saber cuál es la mejor manera de implementarlo en el sistema de interferometría correlativa.

Una vez se conocen todas las bases teóricas y matemáticas se puede entonces comprender las diferentes técnicas existentes para hacer interferometría correlativa y como implementar el algoritmo deseado.

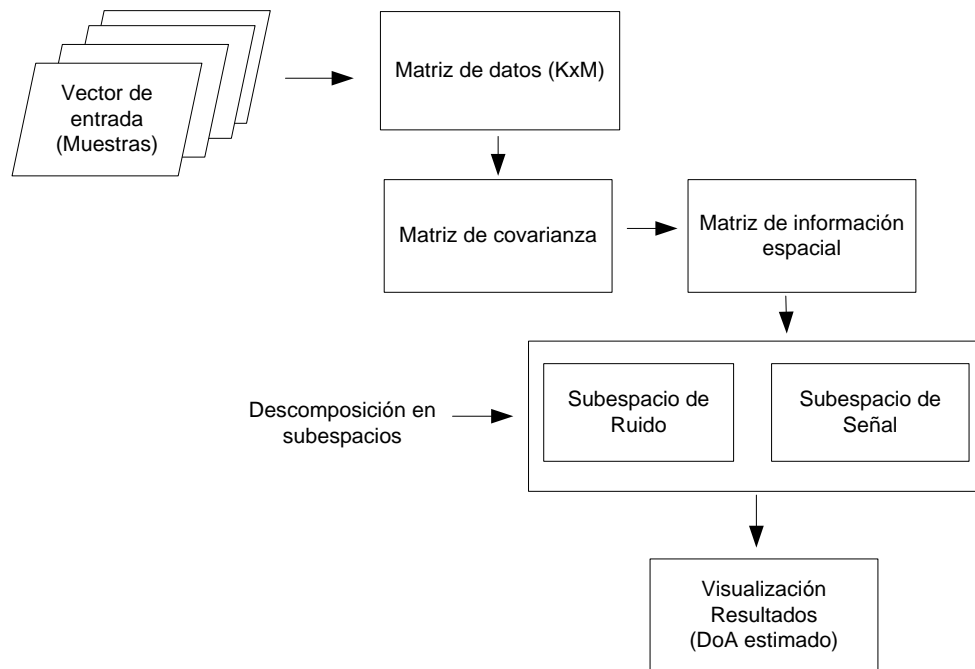
Después de estos pasos, se continúa con una investigación sobre las interfaces graficas en Matlab, para poder hacer un ambiente adecuado para la simulación del sistema completo. También se puede diseñar en esta parte, qué guías va a tener el usuario final, para que de una manera casi que intuitiva pueda utilizar el programa.

6. DESARROLLO

6.1.1 Algoritmo Music en Matlab.

El algoritmo Music anteriormente explicado, se implementó sobre la herramienta de simulación Matlab. En la figura 32 se puede observar un diagrama de bloques del procedimiento que se siguió, con el fin de realizar la estimación del DoA.

Figura 32. Diagrama de Bloques solución en Matlab.

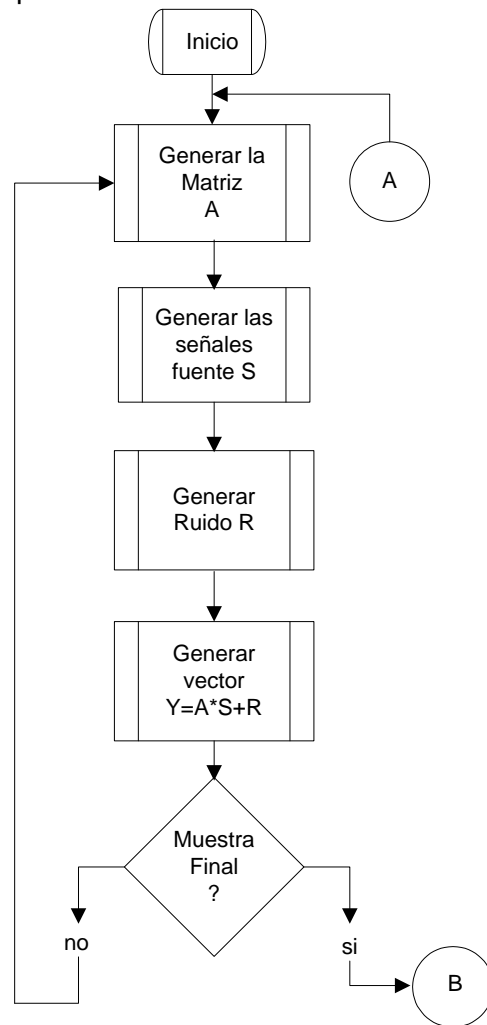


El primer paso en la implementación del algoritmo bajo el entorno Matlab es realizar el muestreo para formar una matriz de datos de $K \times M$, siendo K el número de muestras a tomar y M el número de elementos presentes en el arreglo de antenas. Ya que no se trabaja con datos reales tomados de antenas físicas, lo que se hace es generar un vector de muestras basado al modelo de datos de un ULA (Uniform Lineal Array). El diagrama de bloques de la figura 34 ilustra cómo se llevó a cabo este primer paso en el entorno de Matlab, teniendo en cuenta que también se debe adicionar ruido a las muestras, para hacer el problema un poco más cercano a como ocurre en un ambiente real.

Una vez que se ha realizado la simulación del muestreo de las señales presentes en el escenario controlable, el siguiente paso es formar la matriz de covarianza y descomponerla, esto se puede observar en la figura 35.

Hay que proseguir inmediatamente con la conformación de los sub espacios a partir de la descomposición de la matriz de covarianza, no es indispensable formar los dos sub espacios, generalmente se prefiere el sub espacio de señal porque éste presenta picos más definidos, lo que ayuda a identificar con mayor facilidad el ángulo estimado por el algoritmo Music.

Figura 33. Diagrama de Bloques Muestreo ULA.

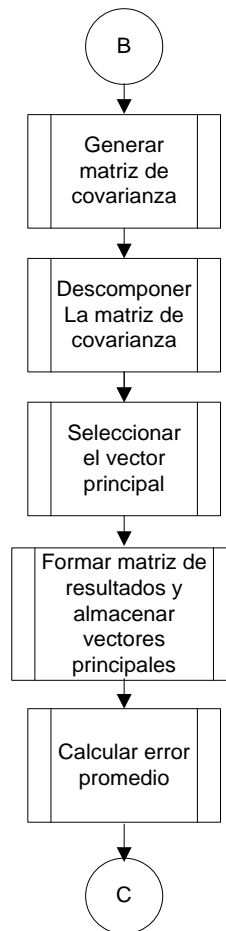


Cuando se empieza a descomponer la matriz de covarianza se forman dos matrices como se observa en la figura 36, la primera (La matriz D) es una matriz diagonal que contiene valores propios y la segunda (La matriz V) contiene en sus columnas los vectores propios asociados.

En este punto se deben remover los componentes imaginarios, solo interesa la parte real.

Se termina este proceso de descomposición, ordenando los vectores propios y los valores propios de manera ascendente.

Figura 34. Diagrama de Bloques Matriz covarianza

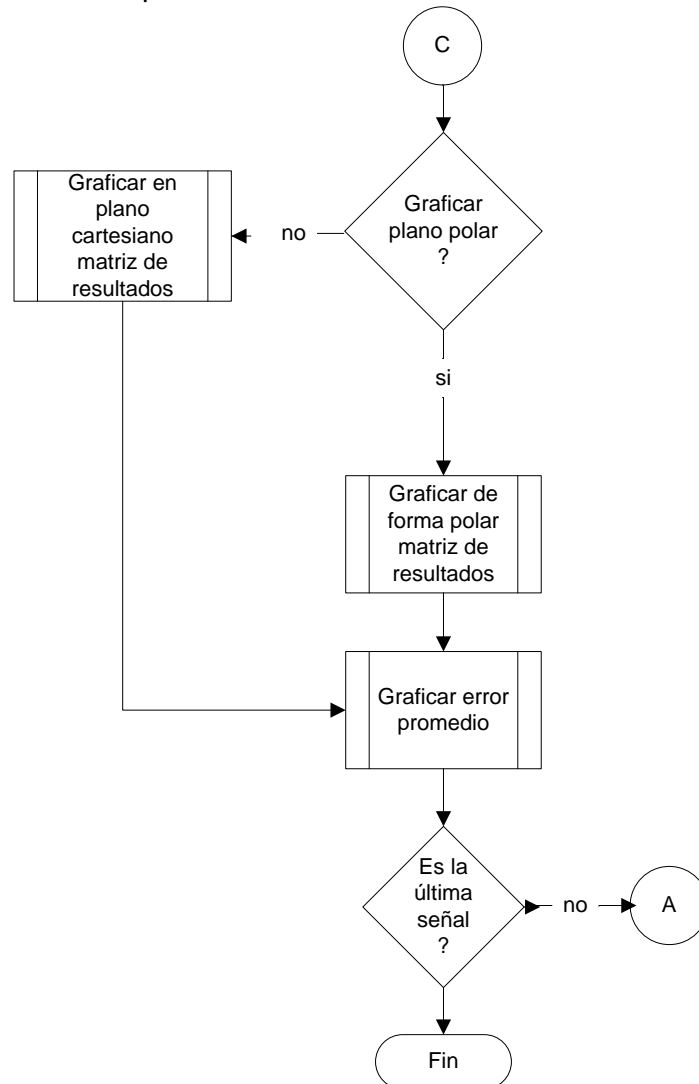


Se forma una matriz de resultados en la cual está almacenada la información de los vectores principales, aquellos que contienen el posible ángulo de llegada de la fuente de interés.

Como se observa en la figura 37 dependiendo del tipo de gráfica que se desee, se puede graficar los resultados en el plano cartesiano o en el plano polar, siendo el plano polar el que mayor facilidad de entendimiento ofrece.

También se puede graficar el error promedio y verificar si es la última señal presente, de no ser así entonces se vuelve al punto A para iniciar el proceso nuevamente y realizar todas las estimaciones de ángulos según la cantidad de fuentes.

Figura 35. Diagrama de Bloques Gráfica de resultados.



6.1.2 Interfaz Gráfica de Usuario (GUI).

Con el fin de visualizar los resultados obtenidos mediante el algoritmo Music de una manera más agradable y fácil de entender se ha diseñado la interfaz mostrada en la figura 36.

Figura 36. Diagrama de Bloques Descomposición en sub-espacios.

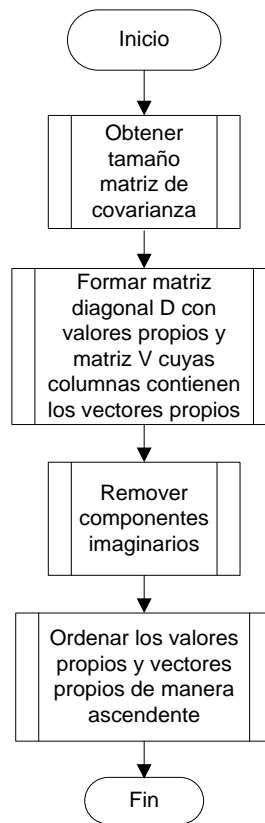


Figura 37. Diseño interfaz gráfica de usuario para el algoritmo Music.

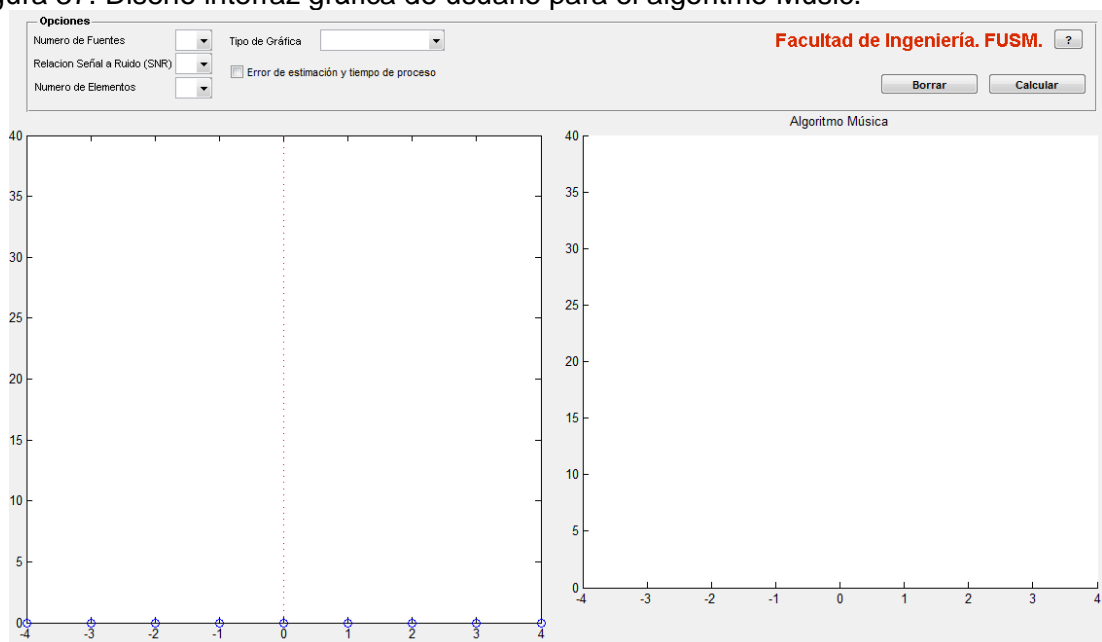


Imagen capturada de Matlab.

Los elementos que presenta la interfaz se pueden observar en la figura 39:

Figura 38. Barra de Opciones interfaz gráfica.

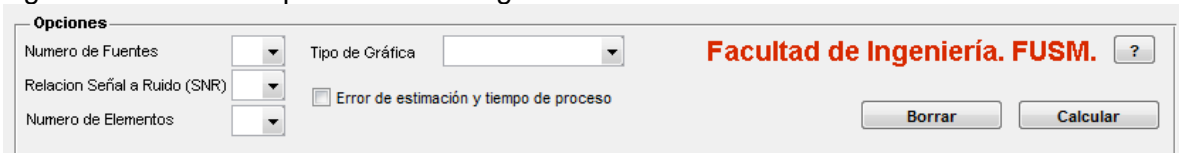


Imagen capturada de Matlab.

- **Número de fuentes:** Hace referencia al número de fuentes de origen al cual el algoritmo Music va a determinar su dirección de arribo (DoA).
- **Relación señal a ruido (SNR):** Es una medida usada para cuantificar que tanto una señal ha sido corrompida por ruido. Si hay una mayor relación señal a ruido, los picos del algoritmo Music serán más definidos.
- **Número de Elementos:** Indica el número de sensores presente en el arreglo de antenas. Como condición para el correcto funcionamiento del algoritmo Music, el número de antenas debe ser mayor al número de señales a analizar.

Figura 39. Diseño interfaz gráfica de usuario para el algoritmo Music.

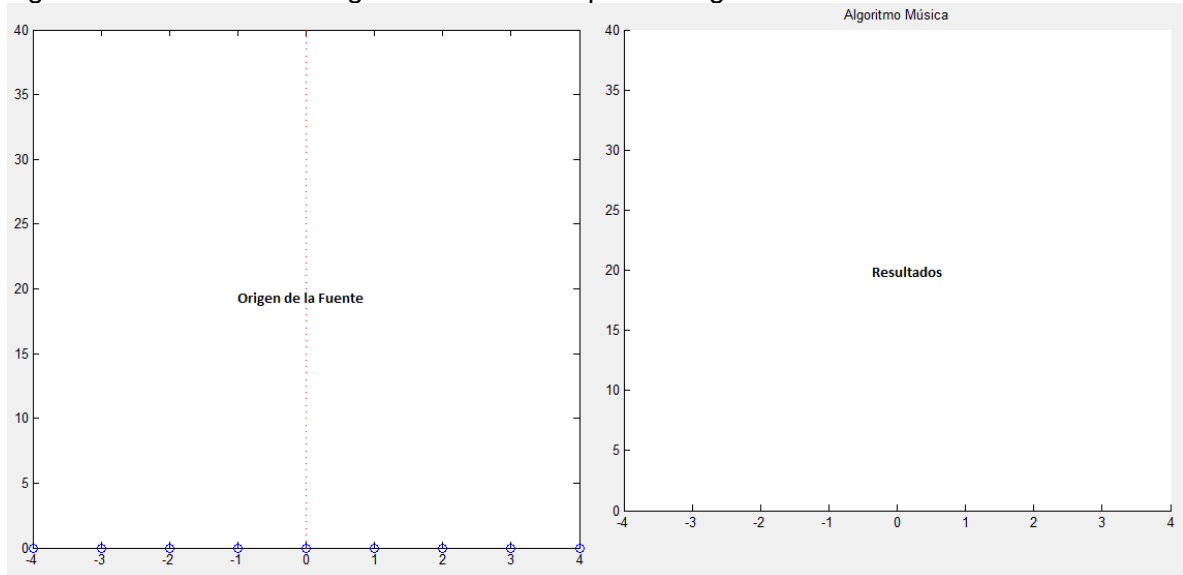


Imagen capturada de Matlab.

- **Tipo de Gráfica:** El resultado del algoritmo Música se puede visualizar de dos maneras (Sub espacio de Ruido, Polar) siendo la gráfica polar la más clara.

- Error de estimación y tiempo de proceso: Hace referencia al error presentado por el algoritmo Music al determinar la dirección de arribo de alguna señal y a cuánto tiempo se demora determinando esta dirección.
- Origen de la fuente: En esta ventana, se posiciona en cualquier lugar de ella una fuente de origen a la cual se le va a determinar su DoA.
- Resultados: En esta ventana se visualizan los resultados del algoritmo Music, cuyo valor debe ser muy parecido al lugar original donde se posiciona la fuente de origen, para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo.

7. PRUEBAS Y RESULTADOS

7.1 AMBIENTE DE PRUEBAS

Se ha diseñado un ambiente de pruebas bajo unas condiciones previamente establecidas, con el fin de obtener un escenario controlable para probar el correcto funcionamiento del algoritmo Music.

Se ha establecido que los niveles de potencia de las fuentes de origen van a ser los mismos para todos los casos, que el tipo de antenas son omnidireccionales, y que se está trabajando en campo lejano, esto con el fin de simplificar un poco la complejidad del problema a resolver.

7.2 PROCESO DEL ALGORITMO

7.2.1 Parámetros iniciales.

- **Objetivo:** Establecer parámetros iniciales que sirven como paso inicial para el proceso del algoritmo.
- **Recursos:** Computador, Matlab versión 2009b.
- **Procedimiento:** En un M-File de Matlab se establecen las variables iniciales con las que se debe cargar el programa cada vez que se utilice para poder determinar el DoA de alguna señal deseada. Tales variables son la frecuencia de muestreo, frecuencia de la señal de origen, número de elementos en el arreglo de antenas, distancia entre los elementos del arreglo, número de muestras, número de veces que se realizará el experimento.
- **Resultados esperados:** Obtener variables cargadas con los parámetros iniciales establecidos.
- **Resultados obtenidos:** Se obtuvieron las variables iniciales necesarias que sirven como primer parámetro del algoritmo, así como también la variable que contiene el muestreo realizado. Se pueden observar en la figura 40.

7.2.2 Graficar arreglo de antenas, fuente de origen y realizar muestreo.

- **Objetivo:** Graficar en la ventana de fuente de origen, el arreglo de antenas, graficar la fuente de origen para la cual se va a establecer su DoA, inicializar variable encargada de medir el tiempo de proceso del algoritmo y realizar el

muestreo de la señal presentada en la ecuación 40 que sirve como modelo de entrada del arreglo de antenas.

Figura 40. Variables iniciales.

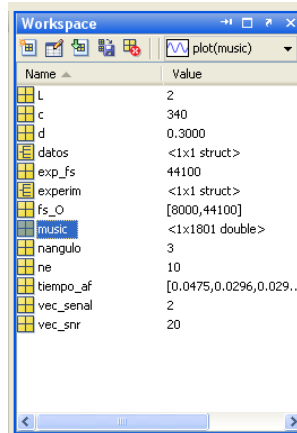


Imagen capturada de Matlab.

- Recursos: Computador, Matlab versión 2009b.
- Procedimiento: Una vez que se han cargado las variables iniciales, el siguiente paso es graficar el arreglo de antenas en la grafica de origen de fuente, después, ubicar en cualquier lugar de esta ventana, la fuente de origen a la cual se le va a determinar su DoA.
- Resultados esperados: Obtener en la ventana de fuente de origen, la gráfica del arreglo de antenas, la fuente de origen, así como una variable que contenga el muestreo que es con el cual se va a trabajar para determinar el DoA.
- Resultados obtenidos: Se obtuvo la grafica del arreglo de antenas (figura 41), así como la ubicación de la fuente de interés en un lugar aleatorio de la ventana de fuente de origen y la variable que contiene el muestreo para dicha fuente.

7.2.3 Matriz de Covarianza, Vectores propios y Valores Propios

- Objetivo: Generación de la matriz de covarianza y descomposición en vectores propios (eigenvectors) y valores propios (eigenvalues).
- Recursos: Computador, Matlab versión 2009b.

- Procedimiento: Cuando ya se ha formado la matriz que contiene el muestreo, de esta se extrae la matriz de covarianza y de esta nueva matriz se descomponen sus vectores propios, que se pueden proyectar al subespacio de ruido.
- Resultados esperados: Cuando ya se ha obtenido la matriz que contiene el muestreo, el siguiente paso es generar a partir de esta matriz, la denominada matriz de covarianza y descomponer esta a su vez, en valores propios y vectores propios.

Figura 41. Variables iniciales.

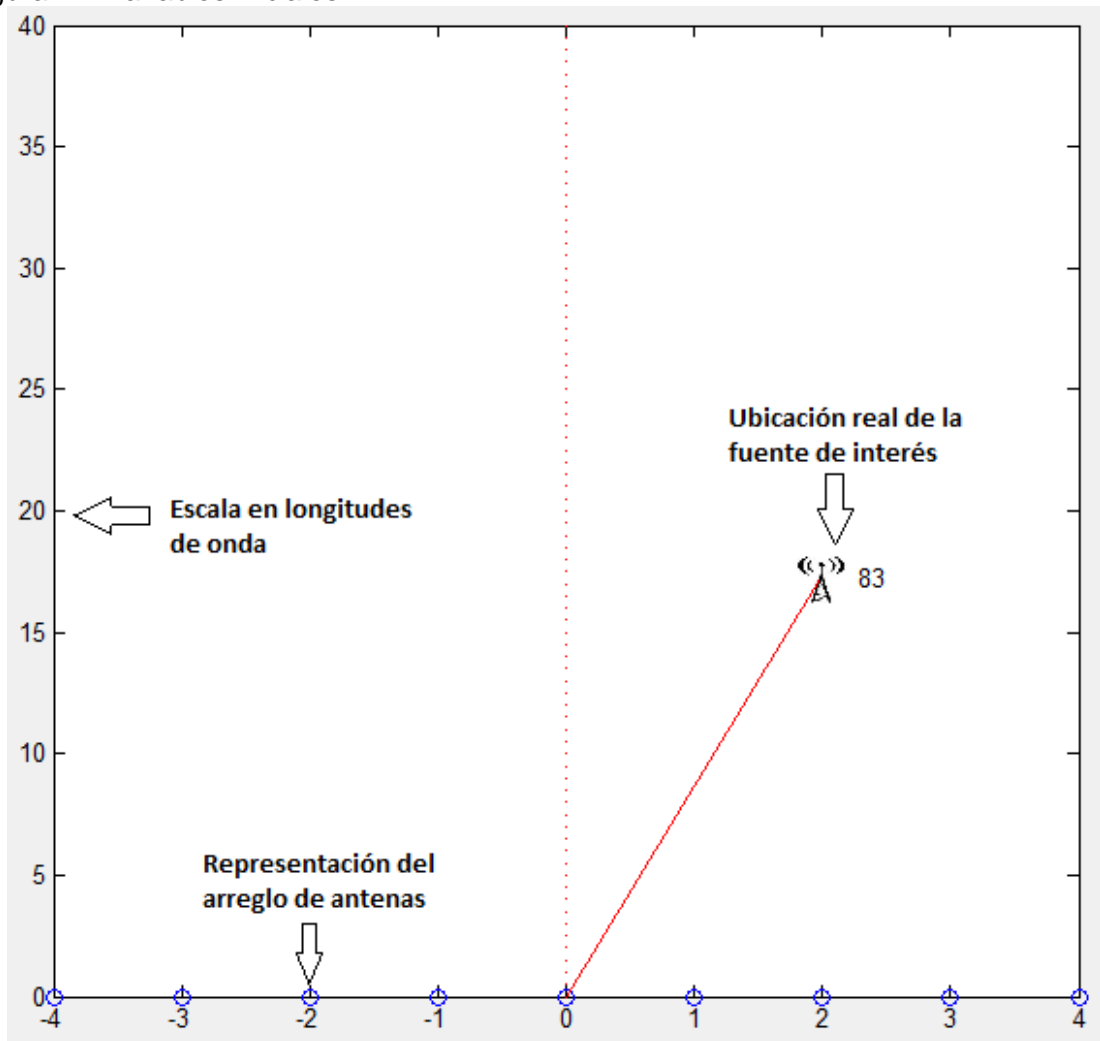


Imagen capturada de Matlab.

- Resultados obtenidos: Matriz de covarianza y Autovectores proyectados al subespacio de ruido, se pueden observar en la figura 42.

7.2.4 Guardar resultados y graficarlos.

- Objetivo: Guardar temporalmente los resultados de los valores de el subespacio de ruido y graficarlos en la ventana de Resultados.
- Recursos: Computador, Matlab versión 2009b.
- Procedimiento: Con los autovectores proyectados al subespacio de ruido, el último paso es graficar esto valores, en donde se obtiene la estimación del DoA de la fuente de interés.
- Resultados esperados: Grafica Polar de la estimación del DoA de la fuente de interés.

Figura 42. Matriz de covarianza y Autovectores.

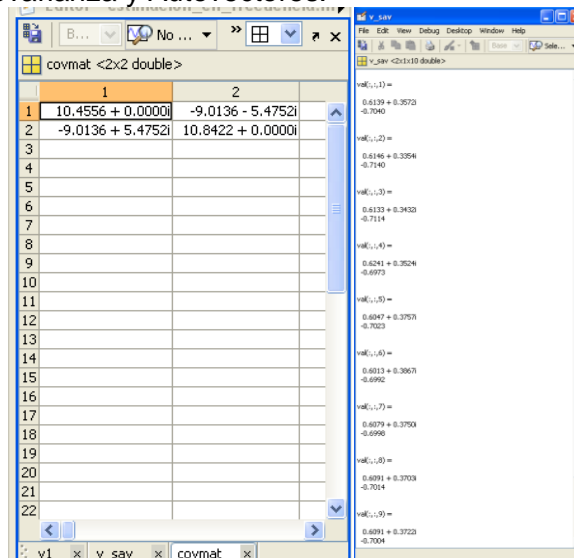


Imagen capturada de Matlab.

- Resultados obtenidos: Gráfica de la estimación del DoA de la fuente de interés en la ventana de Resultados. Se observa en la figura 43.

7.2.5 Grafica del error de estimación y tiempo de procesamiento.

- Objetivo: Obtener una gráfica que represente el tiempo que algoritmo dura procesando una señal para determinar su DoA, así como el error de estimación.

- Recursos: Computador, Matlab versión 2009b.

Figura 43. Estimación del DoA en forma Polar.

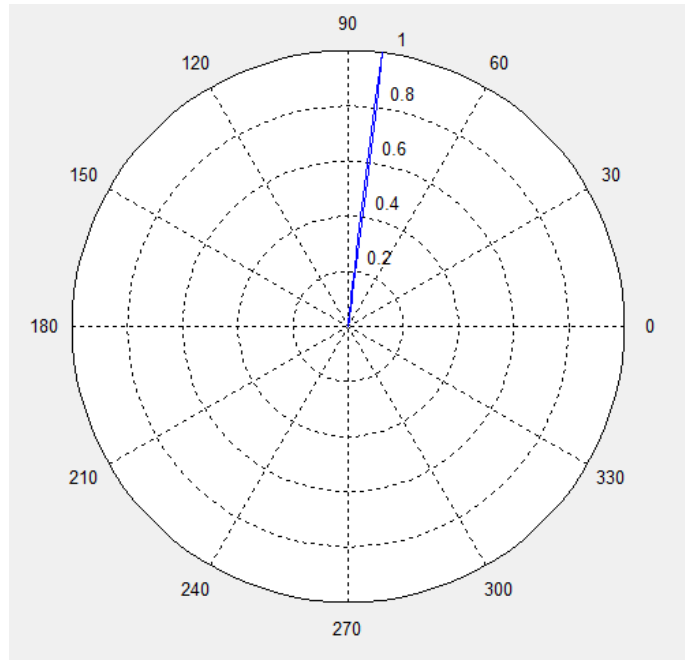


Imagen capturada de Matlab.

- Procedimiento: Se detiene la variable que lleva el conteo del tiempo de procesamiento y se procede a graficarla junto con la variable que guarda el error de estimación del algoritmo.
- Resultados esperados: Gráfica de Tiempo de procesamiento y error de estimación.
- Resultados obtenidos: Gráfica del tiempo de procesamiento del algoritmo y el error de estimación. Se observa en la figura 44.

7.3 DESEMPEÑO DEL ALGORITMO

7.3.1 Prueba con una fuente, bajo SNR y 2 antenas en el arreglo.

- Objetivo: Obtener una gráfica que represente el desempeño del algoritmo bajo determinadas condiciones.
- Recursos: Computador, Matlab versión 2009b.

Figura 44. Estimación del DoA en forma Polar

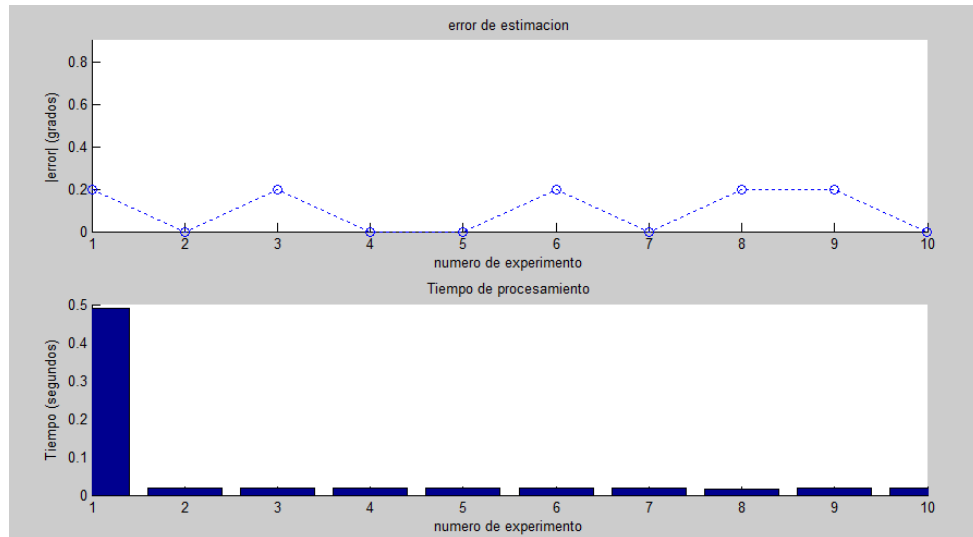


Imagen capturada de Matlab.

- Procedimiento: Se selecciona en la interfaz gráfica 1 fuente de interés, una relación señal a ruido de 1 decibel y 2 antenas en el arreglo, luego se presiona el botón calcular.
- Resultados esperados: Grafica de estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones.
- Resultados obtenidos: Gráfica de la estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones. Se puede observar en la figura 45.
- Conclusiones: Con pocas antenas presentes en el arreglo y una relación señal a ruido baja, la precisión del algoritmo se ve afectada, como se observa en la gráfica 45.

7.3.2 Prueba con una fuente, nivel medio de SNR y 2 antenas en el arreglo.

- Objetivo: Obtener una gráfica que represente el desempeño del algoritmo bajo determinadas condiciones.
- Recursos: Computador, Matlab versión 2009b.
- Procedimiento: Se selecciona en la interfaz gráfica 1 fuente de interés, una relación señal a ruido de 20 decibeles y 2 antenas en el arreglo, luego se presiona el botón calcular.

- Resultados esperados: Gráfica de estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones.
- Resultados obtenidos: Gráfica de la estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones. El resultado se puede apreciar en la figura 46.
- Conclusiones: El aumentar la relación señal a ruido mejora el lóbulo de radiación presentado en la gráfica 46, sin embargo aun no es tan preciso.

Figura 45. Estimación del DoA en forma Polar

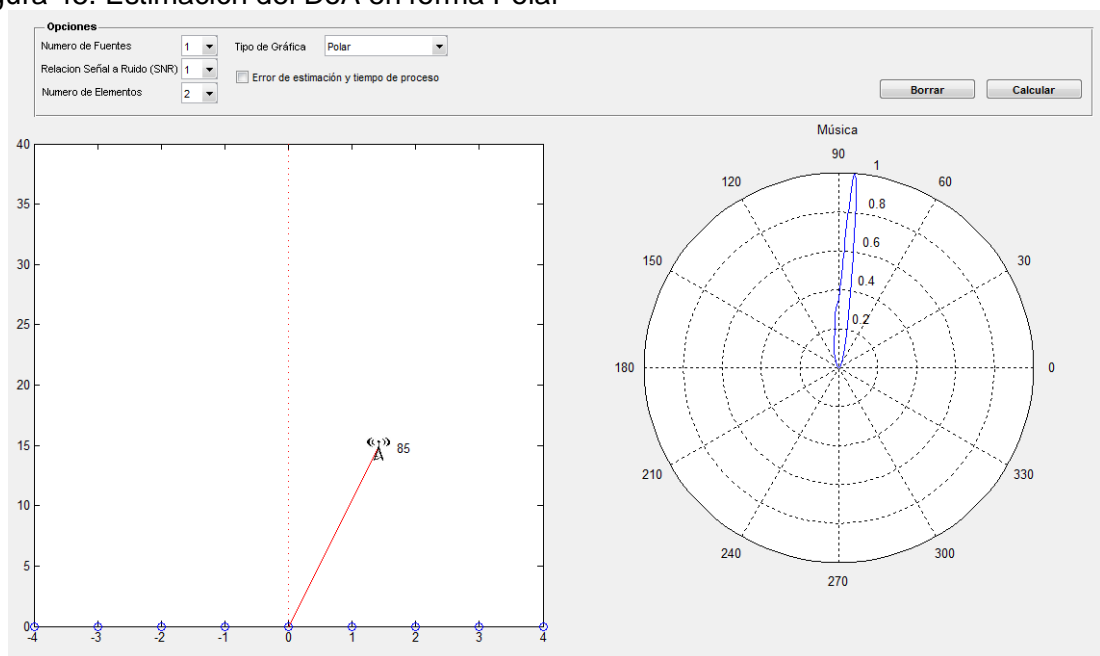


Imagen capturada de Matlab.

7.3.3 Prueba con una fuente, nivel alto de SNR y 2 antenas en el arreglo.

- Objetivo: Obtener una gráfica que represente el desempeño del algoritmo bajo determinadas condiciones.
- Recursos: Computador, Matlab versión 2009b.
- Procedimiento: Se selecciona en la interfaz gráfica 1 fuente de interés, una relación señal a ruido de 50 decibeles y 2 antenas en el arreglo, luego se presiona el botón calcular.

- Resultados esperados: Grafica de estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones.

Figura 46. Estimación del DoA en forma Polar

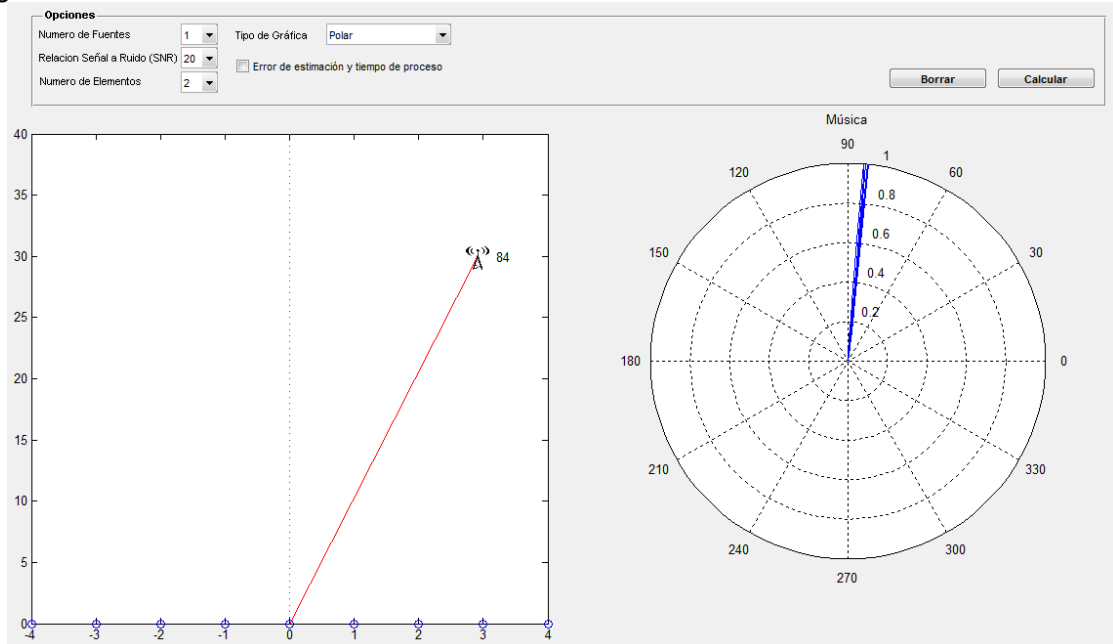


Imagen capturada de Matlab.

- Resultados obtenidos: Gráfica de la estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones. El resultado se puede apreciar en la figura 47.
- Conclusiones: Aumentando el nivel de relación señal a ruido, el ancho del lóbulo es más definido, aunque aún hay presencia de ruido.

7.3.4 Prueba con una fuente, alto SNR y 3 antenas en el arreglo.

- Objetivo: Obtener una gráfica que represente el desempeño del algoritmo bajo determinadas condiciones.
- Recursos: Computador, Matlab versión 2009b.
- Procedimiento: Se selecciona en la interfaz gráfica 1 fuente de interés, una relación señal a ruido de 50 decibeles y 3 antenas en el arreglo, luego se presiona el botón calcular.

- Resultados esperados: Grafica de estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones.

Figura 47. Estimación del DoA en forma Polar

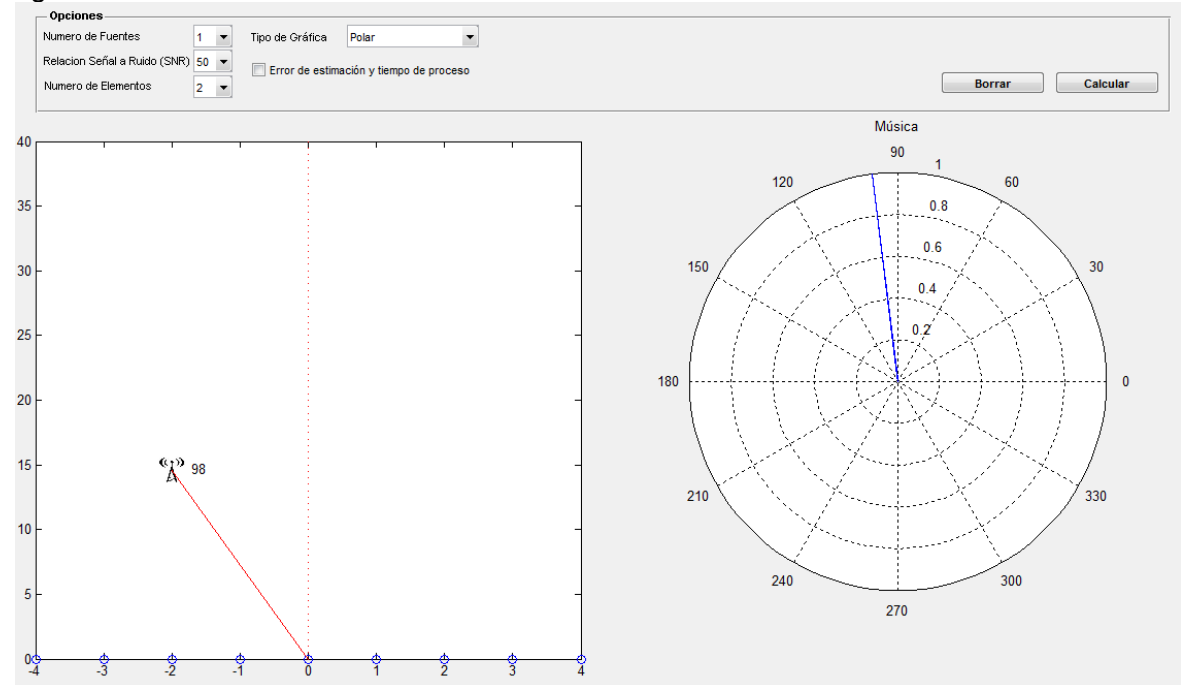


Imagen capturada de Matlab.

- Resultados obtenidos: Gráfica de la estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones. Se puede observar en la figura 48.
- Conclusiones: con una alta relación señal a ruido, y aumentar a 3 el número de antenas presentes en el arreglo, el lóbulo de radiación visto en la figura 48 es muy definido, dando una respuesta casi que idéntica a la original.

7.3.5 Prueba con una fuente, alto SNR y 4 antenas en el arreglo.

- Objetivo: Obtener una gráfica que represente el desempeño del algoritmo bajo determinadas condiciones.
- Recursos: Computador, Matlab versión 2009b.
- Procedimiento: Se selecciona en la interfaz gráfica 1 fuente de interés, una relación señal a ruido de 50 decibeles y 4 antenas en el arreglo, luego se presiona el botón calcular.

- Resultados esperados: Grafica de estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones.

Figura 48. Estimación del DoA en forma Polar

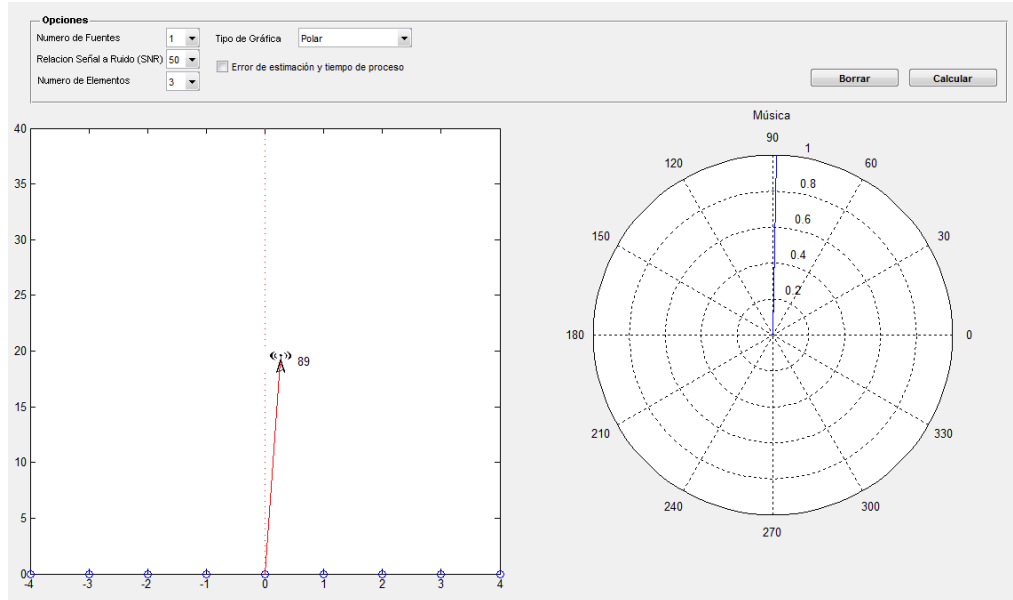


Imagen capturada de Matlab.

Figura 49. Estimación del DoA en forma Polar

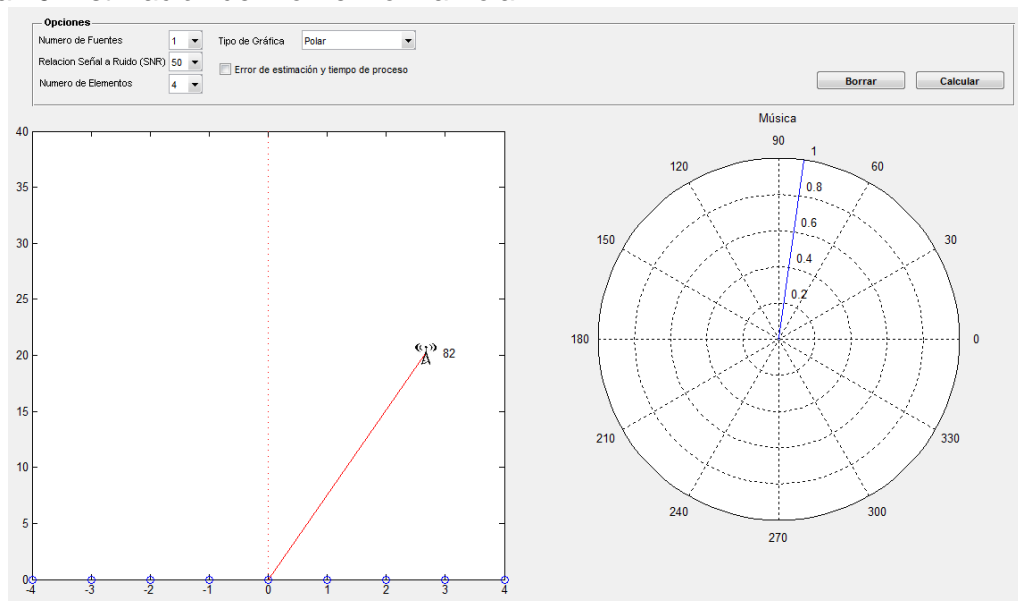


Imagen capturada de Matlab.

- Resultados obtenidos: Gráfica de la estimación del DoA de una fuente de interés bajo determinadas condiciones. Se puede observar en la figura 49.

- Conclusiones: Al mantener una alta relación señal a ruido y aumentar el número de antenas al máximo se tiene mayor información en el número de muestras y esto hace que la precisión del algoritmo sea la más alta como se ve en la figura 49.

8. CONCLUSIONES

- Cuando dos usuarios no cumplen con una separación mínima (de al menos 5 grados) la precisión del algoritmo Music se ve considerablemente afectada debido a que la hipótesis principal del algoritmo Music establece que en el mejor de los casos las señales de los usuarios de interés deben ser totalmente ortogonales, con coeficiente de correlación cero; o a lo más parcialmente correlacionadas, con coeficiente cercano a ± 1 . Por eso, los métodos que implican análisis propios (eigenanalysis) tal como el algoritmo Music, dejan de ser útiles cuando dos o más señales que inciden sobre el arreglo de antenas están altamente correlacionadas entre sí.
- Los resultados obtenidos son adecuados debido a que el error es mínimo (aproximadamente 2 grados), siendo el punto de origen y la estimación dada por el algoritmo casi igual, tal como se pudo apreciar en la prueba de estimación de error y tiempo de procesamiento.
- El tiempo de procesamiento empleado por el algoritmo es de aproximadamente 300 milisegundos, lo cual es algo destacable en el algoritmo Music ya que tiene pocos requerimientos en hardware, un nivel computacional medio y entrega resultados bastante precisos. Aunque existen en la actualidad algoritmos con mayor resolución, el nivel computacional requerido es muy elevado.
- Es necesario que la fuente de origen se encuentre en el campo lejano para que las ondas recibidas por el arreglo se puedan caracterizar como frentes de onda planos y poder así determinar la dirección de arribo.
- Con pocas antenas presentes en el arreglo y baja relación señal a ruido (SNR) el rendimiento del algoritmo no fue totalmente convincente, tal como se pudo observar en la prueba de una fuente, baja relación señal a ruido y 2 antenas.

9. RECOMENDACIONES

Es necesario que el número de antenas presentes en el arreglo siempre sea mayor al número de señales incidentes sobre éste, esto es debido a que entre mayor sea el número de antenas presente en el arreglo, se va a tener mayor información para procesar y el lóbulo de radiación visualizado en la gráfica será más definido.

Los resultados obtenidos favorecen la viabilidad para desarrollar trabajos más complejos en el futuro, por ejemplo llevar el trabajo simulado aquí descrito a un entorno real, ó utilizar varios arreglos para obtener una localización de 360°, por nombrar algunas opciones.

Una ventaja del algoritmo Music es que funciona independientemente de cuál sea la geometría del arreglo. Se escogió un arreglo lineal porque es el más fácil, pero existe la posibilidad de la ubicación tridimensional al usar un arreglo no lineal, esto implica una variación en la caracterización del modelo de datos de entrada dependiendo del tipo de arreglo que se utilice.

Para utilizar la interfaz desarrollada en Matlab no es estrictamente necesario tener instalado Matlab en el PC, pero si es necesario tener instalado el compilador que se adjunta en el CD de esta monografía.

GLOSARIO

ALGORITMO: Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema. (Word, 2009)

ANTENA: Dispositivo de formas muy diversas que, en los emisores y receptores de ondas electromagnéticas, sirve para emitir las o recibirlas. (Balan, 1996)

AZIMUT: Angulo comprendido entre el norte verdadero y la vertical de un astro o punto notable. (Arganeo, 2009)

COMPILAR: Recolectar y editar de un conjunto de información. (Merriam, 2009)

DIRECTION FINDER: Un dispositivo usado para buscar la localización de una estación de transmisión inalámbrica. (Merriam, 2009)

RADIOFARO: Estación radial que emite señales distintivas, por medio de las cuales los barcos pueden determinar su posición. (Arganeo, 2009)

RADIOGONIOMETRÍA: Técnica que permite determinar la ubicación de una estación emisora mediante un radiogoniómetro. (Arganeo, 2009)

RADIOGONIÓMETRO: Receptor de radio con antena direccional. (Arganeo, 2009)

RECEPTOR: Aparato que recibe señales electromagnéticas. (Word, 2009)

SEÑAL: Una cantidad física detectable o impulso (como una tensión, corriente, o del campo magnético), por la que los mensajes o información puede ser transmitida. (Merriam, 2009)

SIMULACIÓN: técnica para representar algo real mediante un programa de computadora. (Merriam, 2009)

SIMULADOR: un dispositivo que le permite al operador reproducir o representar bajo condiciones de prueba fenómenos que puedan ocurrir en la ejecución efectiva. (Merriam, 2009)

TRANSMISOR: Aparato que transforma una onda acústica en onda eléctrica, o produce señales para ser transmitidas por cable, mediante onda electromagnética. (Word, 2009)

TRC: Tubo de rayos catódicos. (Word, 2009)

BIBLIOGRAFÍA

- Arganeo (2009). "Diccionario Náutico." 2009, from http://www.arganeo.com.es/index.php/diccionario?KT_az=R.
- ARRL. (2000). *The ARRL Antenna Book* (19 ed.).
- Balanis, C. A. (1996). *Antenna Theory: Analysis and Design* (3 ed.): Wiley-Interscience.
- Barreda, D. G. G. d. (2004). Sistemas Circulares de Radionavegación. *Universidad de Cadíz*, 180.
- Cárdenas, D. d. L., Caballero, J. E., & Cruz, J. L. V. (2002). *Interfaces Gráficas en Matlab*.
- Casado, E. F. (1951). Radiogoniometría. España, Labor S.A.: 492.
- Center, U. A. I. (1999). Introduction to Radio Direction Finding. 1, 53.
- Chandran, S. (2006). Advances in Direction of Arrival Estimation (Vol. 1).
- Cordovés, J. S. (2007). Radiogoniometría. 2009, from <http://www.xtec.cat/~cgarci38/ceta/historia1/radiogono.htm>
- Covarrubias, D. (2009). Dirección de Llegada (DOA). *Pontificia Universidad Católica del Perú*, 1, 68.
- Electronics, R. (1999). *Doppler Direction Finder* (Vol. 1). New York.
- Exordio. (2002). Radiogoniómetro. Retrieved 2009, from <http://www.exordio.com/1939-1945/civilis/telecom/hf-df.html>
- Ferrando, M., & Valero, A. (2007). Antenas de Apertura. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1, 26.
- Foutz, J., Spanias, A., & Banavar, M. (2008). Narrowband Direction of Arrival Estimation for Antenna Arrays. Arizona.

- Gassin, B. (2009). "Ettore Bellini y Alessandro Tosi." 2009, from <http://escibalofilms.blogspot.com/2009/01/ettore-bellini-y-alessandro-tosi.html>.
- Guerrero, D. O. B. (2008). Manual de Interfaz Gráfica de Usuario en Matlab. In U. d. Cadiz (Eds.)
- Godara, C. L. (2004). *Smart Antennas* (Vol. 1). Washington, D.C.: CRC Press LLC.
- Gross, F. (2005). *Smart Antennas for Wireless Communications* (Vol. 1). Virginia: McGraw-Hill.
- Harter, N. M. (2007). *Development of a Single-Channel Direction Finding Algorithm* (Vol. 1). Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute.
- He, J. (2010). MATLAB Toolbox quick Reference (Vol. 1, Available from www.cheat-sheets.org/saved-copy/matlab_toolbox_quickref.pdf
- Jhonson, O. (2004). Information Theory and The Central Limit Theorem. Inglaterra, Imperial College Press.
- Lagunas, M. A. (2007). *Beamforming y Estimacion de Direccion de Llegada* (Vol. 32): IEEE Trans. ASSP.
- Lagunas, M. A. (2007). Estimación de Angulo de Llegada (Vol. 10): IEEE Trans. ASSP.
- Leon, F. G. (2007). *Radiogoniometría*. Mexico: Instituto Politécnico Nacional.
- Lipsky, S. E. (2004). *Microwave Passive Direction Finding* (Vol. 1). New York: Schitech.
- Marshall, G., & Anatoly, Y. (2008). Direction of Arrival Estimation using a Root-MUSIC Algorithm. 4
- Merriam (2009). "Merriam Webster Diccionario." Retrieved 2009, from <http://www.merriam-webster.com/dictionary/signal>.
- Moldes, J. (2000). Radiogoniometría y radiolocalización. from <http://www.qsl.net/eb1hbk/taller/radiogonio.html>

- Muñoz, M. V. (2007). Una historia de las telecomunicaciones navales. 2, 9. Retrieved from www.revistamarina.cl/revistas/2003/4/vasquez.pdf
- Pardo, R. M. (2008). Desarrollo de Algoritmos para la Extracción de Parámetros del Canal MIMO y Aplicación con Medidas.
- Pérez, D. G. (2008). Manejo Básico de imágenes con Matlab
- Solana, J. (2008). Amateur Radio Direction Finding. 1, 6. Retrieved from www.xe1rcs.org.mx/dxxe/ardf%20por%20xe1yjs.pdf
- Trees, H. L. V. (2002). *Optimum Array Processing* (Vol. 1). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Tuncer, E. (2009). *Classical and Modern Direction of Arrival Estimation* (Vol. 26). New York: Microwave and Optical Technology Letters.
- UIT-R. (2002). Recomendación UIT-R SM.1598. 8.
- Word (2009). "Word Reference."

ANEXOS

Anexo 1. Códigos de Programación (ver contenido en el CD).