

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones

TRABAJO DE DIPLOMA

"Diseño de un Sistema de Antenas para el barrido de un haz con aplicación en radiolocalización."

Autor: Yunior Hereira Dominguez

Tutor: Ing. Roberto Hiribarne Guedes

Santa Clara

2008

"Año 50 de la Revolución"

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

"Diseño de un Sistema de Antenas para el barrido

de un haz con aplicación en radiolocalización."

Autor: Yunior Hereira Dominguez

E-mail: hereira@uclv.edu.cu

Tutor: Ing. Roberto Hiribarne Guedes

Facultad de Ing. Eléctrica. UCLV.

E-mail: hiribarne@uclv.edu.cu

Santa Clara

2008

"Año 50 de la Revolución""



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de

Información Científico-Técnica

El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad.

Victor Hugo

"Dedico este trabajo de diploma a mis padres y a mi hermanita que supieron sostenerme cuando me faltaron las fuerzas".

AGRADECIMIENTOS

De Yunior:

Deseo agradecerles en especial a mi madre y mi padre por su preocupación en la superación de mis estudios; además a mis abuelos que siempre me brindaron su apoyo en todo momento así como a mis tíos los cuales se mantuvieron al tanto de mí en todo momento.

A mis compañeros de aula y profesores que tan importante papel desempeñaron en mi vida de estudiante y en especial a Lanyer que siempre me tendió la mano en los momentos difíciles.

- A mi tutor por su colaboración incondicional.
- A Darío, Norberto y a Yuliet los cuales me brindaron su apoyo en diferentes momentos de mi carrera.
- Desde mi corazón, a todas aquellas personas que de una forma u otra ayudaron en la construcción de mi futuro.

TAREA TÉCNICA

- 1. Búsqueda bibliográfica y estudio de trabajos relacionados con el tema.
- 2. Obtener las características del sistema de antenas utilizado actualmente.
- Buscar información sobre arreglos de antenas y su aplicación en radares de localización.
- Cálculo de las fases de alimentación de los elementos para lograr mover el patrón en el sector deseado.
- 5. Validación de los resultados utilizando Matlab
- 6. Redacción de un informe final.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En el presente trabajo de diploma se da una panorámica general de los radares de localización, su clasificación, tipo, así como ejemplos utilizados en la actualidad. Se brindan los principales parámetros y características de los arreglos de antenas controlados por la fase de alimentación. Se analizan los principales métodos de diseño de arreglos de antenas así como las expresiones más importantes para el diseño de arreglos planos rectangulares. Se realizan los cálculos de las fases progresivas entre los elementos con los cuales se moverá el máximo del patrón de radiación con el tiempo en un sector del espacio deseado. Por último se validan los resultados obtenidos utilizando Matlab donde se muestran diferentes posiciones del haz del patrón así como el barrido en el sector completo. Además se comentan los programas utilizados para la simulación en Matlab.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN1
CAPÍTULO 1. Estado del arte en Sistemas de Arreglos de antenas con
aplicaciones en radares de SAF4
1.1 Teoría de radares4
1.1.1 Concepto de radar4
1.1.2 Operación del radar4
1.1.3 Partes del radar5
1.1.4 Clasificación de los radares9
1.2 Arreglos de antenas11
1.2.1 Clasificación de los arreglos de antenas13
1.2.2 Principio de Funcionamiento de arreglos de antenas14
1.2.3 Tipos de arreglos planos15
1.3 Radares con arreglos de antenas más usados en la radiolocalización17
1.4 Conclusiones del capítulo19
CAPÍTULO 2. Metodología de diseño para la conformación del patrón en radares
de SAF
2.1 Métodos de síntesis del patrón para arreglos lineales y planos20
2.1.1 Síntesis de Dolph - Chevyshev20
2.1.2 Forma de Schelkunov

2.1.3 Síntesis de Woodward						
2.1.4 Método de Transformada de Fourier						
2.1.5 Síntesis de Taylor de la Fuente de Línea21						
2.2 Arreglo plano rectangular						
2.3 Ecuaciones de diseño para el arreglo plano						
2.3.1 Factor de arreglo:						
2.4 Directividad						
2.5 Cálculo de las fases progresivas para la conformación del patrón27						
2.6 Conclusiones del capítulo						
CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados del diseño29						
3.1 Análisis de los resultados del diseño de un arreglo plano de 10 x 10						
elementos						
3.1.1 Gráfica para φο =155°29						
3.1.2 Análisis de la gráfica para φο=165°30						
3.1.3 Análisis de la gráfica para φo=175°31						
3.1.4 Barrido para φo desde 155° hasta 175°32						
3.2 Análisis de los resultados para el diseño del arreglo plano de 112 x 112						
elementos						
3.2.2 Gráfica para la mitad del desplazamiento						
3.2.3 Posición del haz al final del sector35						
3.2.4 Barrido del haz para los 20 valores de φo						
3.3 Programa en Matlab para obtener los patrones para cada ángulo φo						
individual						
3.4 Programa en Matlab para la obtención del barrido en el sector de los 20						
valores de ϕ a la vez						

3.5 Conclusiones del capítulo.	
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
Anexo I. Cálculo de las fases progresivas para el sector de movimien	to del patrón.

1

INTRODUCCIÓN

Una antena simple produce un patrón con propiedades de radiación limitadas, sin embargo, utilizando un conjunto de antenas simples excitadas apropiadamente, es decir, un arreglo, es posible, en muchos casos, obtener características de radiación según requerimientos dados. En general, las características de radiación del arreglo son manejadas a través de la selección adecuada del elemento (dipolo, corneta, parche, etc.), la ubicación de cada uno de éstos, y de la distribución de amplitud y fase de excitación de los mismos.

Para la radiolocalización son utilizados radares que pueden estar formados por una o por varias antenas. Los radares formados por arreglos de antenas, específicamente los planares que son los más utilizados en estos casos, tienen muchas ventajas en cuanto a versatilidad pues poseen mayor número de parámetros de control, permitiendo la obtención de patrones más simétricos con lóbulos laterales más pequeños y facilitando el desplazamiento del haz principal hacia cualquier punto del espacio. En la actualidad la mayoría de los arreglos empleados en estos radares son faseados o sea el movimiento del patrón se realiza variando la fase de alimentación de los elementos radiantes.

Este trabajo tiene una aplicación específica y de gran importancia pues el arreglo con los requerimientos de radiación deseados será utilizado para la conformación de un radar el cual se empleará para la localización de aeronaves lo mismo en tiempo de paz como en situaciones excepcionales.

Objetivo:

Diseño de un Sistema de Arreglos de Antenas para el barrido de un haz con aplicación en radares de súper alta frecuencia

Objetivos específicos:

- Lograr mover el diagrama direccional total del conjunto de antenas.
- Lograr que el movimiento se haga variando la fase de alimentación de los elementos del arreglo.
- Lograr que esto se realice atendiendo al sector que ha de barrerse, a la velocidad de dicho barrido y a la dirección de izquierda a derecha.

Para la realización de esta tarea técnica es necesario conocer las principales características del arreglo de antenas al cual se le moverá el patrón:

• El conjunto de antenas fue diseñada para la banda de super alta frecuencia (SAF), 5.76 cm < λ < 7.68 cm en el siguiente rango aproximado de frecuencias 3.9 Ghz < f < 5.2 Ghz.

• Fue diseñado para recibir la energía de un magnetrón, con régimen de irradiación impulsiva, con período de repetición de los impulsos de hasta 1840Hz y potencia de hasta 1000Kw.

• Para la banda de trabajo la ganancia se mantiene en 35dB< G < 40 dB.

• Para la banda de trabajo el coeficiente de onda estacionaria (ROE es menor o igual que 1.5).

• El diagrama direccional con forma de abanico, tiene un ancho, en el plano de desplazamiento, igual a 1º y en el plano perpendicular al desplazamiento igual a 7º.

Para dar solución a esta tarea también es necesario tener en cuenta que el diagrama debe desplazarse (barrer) cíclicamente, comenzando un barrido directo desde el extremo izquierdo hacia el otro, en un sector del espacio de 20°, con una frecuencia de 15 Hz. El retorno del haz desde el extremo derecho hacia el extremo izquierdo, forma el barrido inverso. El desplazamiento del haz de la antena tiene

que garantizar un tiempo de paso directo del barrido igual a 53±2 mls y un tiempo de paso inverso de 13±2 ms.

El movimiento del haz (barrido) debe realizarse electrónicamente y ello se logra cambiando la fase de alimentación de los elementos de antenas, el calculo de estas fases progresivas se realizará variando el ángulo φ o (define el ancho del patrón) en un sector de 20° manteniendo la elevación constante (θ o).

Este radar diseñado con estas características tendrá innumerables ventajas con respecto a otros existentes en la actualidad, los cuales utilizan otros tipos de antenas como las de caracol, que son inmensamente grandes, pesadas y desenmascarantes expuestas a esquirlas u otro cualquier objeto y para su manipulación eran necesarias gran cantidad de personas. En cambio este nuevo sistema será mucho mas pequeño, manipulable, podrá ser fijado encima de camiones u otro medio de transporte y desde allí ponerse en funcionamiento.

Organización del trabajo:

El trabajo consta de tres capítulos. El primero se denomina" Estado del arte en Sistema de Arreglos de Antenas con aplicación en radares de súper alta frecuencia" y se dedica a explicar los conceptos básicos sobre radares y arreglos de antenas exponiendo las características fundamentales así como sus principales ventajas. Además se muestran algunos ejemplos de radares utilizados en la radiolocalización en la actualidad. El segundo capítulo se titula "Metodología de diseño para la conformación del patrón en radares de SAF" y en él se selecciona el tipo de arreglo más adecuado para la aplicación que es el plano rectangular y de él se hizo un análisis de las expresiones más importantes, además el diseño para la conformación del patrón se realizó a partir del cálculo de las fases progresivas βx y βy . En el tercer capítulo titulado "Análisis de los resultados del diseño" se hizo un análisis de los principales resultados alcanzados. Aquí se muestran las gráficas del patrón para los diferentes valores ϕ o así como los programas en Matlap utilizados para la obtención de las mismas.

3

CAPÍTULO 1. Estado del arte en Sistemas de Arreglos de antenas con aplicaciones en radares de SAF.

1.1 Teoría de radares

En este capítulo se pretenden explicar los conceptos básicos sobre los radares y los arreglos de antenas, exponiendo las características fundamentales así como sus principales ventajas. Además se muestran algunos ejemplos de radares utilizados en la radiolocalización en la actualidad.

1.1.1 Concepto de radar

El radar es un dispositivo electrónico que se utiliza para la detección y localización de objetos. Radar es un acrónimo que significa por sus siglas en inglés "*Radio Detection and Range*" (Levanon, 1988). Un radar opera radiando energía electromagnética en una dirección y con base en la información que proporciona el eco producido por la reflexión de la energía, se puede calcular a la distancia a la que se encuentra. El sistema de un radar funciona transmitiendo un tipo particular de forma de onda, comúnmente, una onda senoidal modulada por pulso.

1.1.2 Operación del radar

Un sistema de radar emite potentes ondas de radio y "escucha" cualquier eco producido por las mismas. Analizando las señales electromagnéticas (EM) reflejadas, el objeto puede ser localizado e identificado. Las señales EM se reflejan en una variedad de formas dependiendo de la frecuencia de la señal y la

forma del blanco. Si la longitud de onda es mucho más pequeña que el tamaño del objeto, la onda se reflejara de una forma parecida a un haz de luz reflejado en un espejo.

La forma más fácil para medir la distancia de un objeto es enviar un pulso pequeño de una señal EM y después evaluar el tiempo que toma en regresar el eco. En la Fig. 1.1 se transmiten señales EM y se recibe un eco cuando la señal rebota sobre un objeto. La distancia es la mitad del producto del tiempo de ida y vuelta.





Otra forma de medir la distancia es usando modulación por frecuencia. Al comparar frecuencias de dos señales distintas se puede tener una medición más precisa. La rapidez es el cambio en la distancia de un objeto respecto del tiempo. Al combinar el sistema original con una memoria de la posición de un objeto se puede calcular fácilmente la velocidad a la cual un blanco se mueve. Esta es una forma fácil de calcular la velocidad de un blanco.

1.1.3 Partes del radar

Los elementos básicos de un radar se ilustran en el diagrama en bloques de la figura 2. (Soriano, 2006).



Fig. 1.2 Diagrama en bloques de un radar.

El transmisor es representado en la Fig. 1.2 como un amplificador de potencia. El transmisor puede ser de diferentes tipos entre ellos un Klystron, un magnetrón, un tubo de ondas progresivas ("traveling wave tube", TWT) o un amplificador de campo cruzado ("crossed field-amplifier", CFA). (Nathanson, 1963). Estos dispositivos sirven para generar señales de radio de alta potencia. Un Klystron es un tubo de electrones usado como amplificador de microondas o como oscilador. Es un tubo de microondas de haz lineal en el que la velocidad de modulación es aplicada a un haz de electrones para así producir amplificación. El magnetrón es el más utilizado a pesar de que se trata de una tecnología algo antigua. Son pequeños y ligeros, pueden funcionar a frecuencias de entre 30 MHz y 100 GHz y proporcionan buena potencia de salida. El Tubo de ondas progresivas, para radares de 30 MHz a 15 GHz, tiene buena potencia de salida. Un CFA es un tubo especial de vacío. Tiene menor ganancia y ancho de banda que otros amplificadores de microondas pero es más eficiente y es capas de entregar una señal de salida mucho más fuerte. El transmisor de una estación de vigilancia aérea puede tener una potencia promedio del orden de Kilowatts. Los radares de corto alcance pueden tener potencias del orden de milliwatts. Los radares para la

detección de objetos espaciales y los radares que "ven" más allá del horizonte pueden tener potencias de Megawatts.

La aplicación de los radares define la potencia del amplificador que se utilizará. Esto se hace para no cometer el error de invertir en transmisores más costosos. Los transmisores no solo deben ser capaces de generar potencias altas con formas de ondas estables, si no también deben operar en un ancho de banda extenso y con alta eficiencia.

> Duplexor

El duplexor actúa como un interruptor muy rápido para proteger el receptor de daños cuando la transmisión en alta potencia esta ocurriendo. En la recepción, con el transmisor apagado, el duplexor dirige la señal de baja potencia al receptor en vez de al transmisor. Los duplexores generalmente son alguna forma de dispositivo de descarga en gas, también se utilizan aisladores de estado sólido. (Barton, 1991).

> Antena

La señal EM del transmisor es radiada al espacio por una antena de alta directividad que concentra la energía en un haz muy angosto. Los sistemas de radar pueden utilizar antenas parabólicas reflectoras dirigidas mecánicamente y arreglos de cornetas. El haz angosto que es característico de los radares no solo concentra la energía en un objeto sino que también permite la medición de la dirección del objeto. El ancho de haz de una antena típica para seguimiento aéreo puede ser de 1 o 2 grados. Un radar de seguimiento dedicado puede tener un patrón de radiación en forma de lápiz.

El tamaño de la antena depende:

- 1- La frecuencia de operación
- 2- Posición del radar en tierra o en vehículos en movimiento
- 3- Tipo de ambiente en el que se utiliza.

En la banda ultra alta de frecuencias (UAF) una antena "grande" puede tener dimensiones de hasta 30 metros. A frecuencias más altas como las microondas

una antena "grande" puede ser de 3 a 5 metros. Es muy raro encontrar antenas que tengan un haz con menos de 0.2 grados de estrecho.

La mayoría de las veces, la antena es movida mecánicamente por motores para barrer el área donde existe algún objeto que se desea detectar. Este barrido puede ser también de forma electrónica cuando la aplicación requiere un barrido que no puede ser alcanzado por elementos mecánicos.

Para la exploración electrónica se requiere de antenas de arreglos en fase que son un grupo de antenas que, cuando se conectan, funcionan como una sola antena cuyo ancho de haz y dirección (o sea, patrón de radiación) puede cambiarse electrónicamente sin tener que mover físicamente ninguna de las antenas individuales. La ventaja principal de las antenas de arreglo de fase es que eliminan la necesidad de girar en forma mecánica los elementos de la antena. En esencia, un arreglo de fase es una antena cuyo patrón de radiación puede ajustarse o cambiarse electrónicamente. La aplicación principal de arreglo de fase es es en radares, donde los patrones de radiación deben ser capaces de cambiar rápidamente para seguir un objeto en movimiento.

Receptor

La señal recolectada por la antena es enviada al receptor que es del tipo superheterodino. El receptor sirve para:

1-Separar la señal que se desea del ruido presente en otras señales que puedan interferir

2-Amplificar la señal lo suficiente para que pueda percibirse en el display.

El mezclador de receptor superheterodino traduce la señal de RF recibida a una frecuencia intermedia. La ganancia del amplificador de frecuencia intermedia (IF) resulta a un aumento del nivel de la señal recibida. El amplificador IF también tiene una etapa de acoplamiento del filtro que maximiza la razón señal a ruido de la salida. Esto sirve para maximizar la detectabilidad de la señal.

El segundo detector es un detector de envolvente que elimina la portadora de IF y pasa la envolvente de la modulación. En algunos radares como el CW (onda

continua) el detector de envolvente es reemplazado por un detector de fase que extrae la frecuencia del duppler comparándola con una señal de referencia transmitida.

El amplificador de video aumenta la potencia de la señal a un nivel donde es conveniente desplegar la información que contiene. Se establece un límite en la salida del amplificador de video para permitir la decisión de detección. Esta decisión puede hacerla un operador o puede ser automática. (Pozar ,1992).

Display

El display de un radar es un tubo de rayos catódicos con un Indicador de Plano de Posición (PPI, *Position Plane Indicator*). Un PPI es un mapa modulado por intensidad que provee la localización de un objeto en coordenadas polares. En algunos casos la intensidad producida por el eco de objetos no deseados se suprime del display y se elimina pera detectar solamente objetos en movimientos u objetos de diferentes características al entorno usual.

Modulador de impulsos

Todo equipo de radar normal posee otro componente importante: el modulador de impulsos. Este dispositivo se encarga de extraer continuamente corriente de una fuente de energía, como un generador, para alimentar el magnetrón del transmisor con impulsos del voltaje, potencia, duración e intervalo precisos. El impulso debe comenzar y finalizar de manera abrupta, pero la potencia y el voltaje no deben variar de forma apreciable durante el impulso. (Toomay, 1982).

Sub Modulador

Es el encargado de generar los pulsos de sincronismo para arrancar el modulador.

1.1.4 Clasificación de los radares

Se puede hacer una clasificación general de los radares en función de una serie de aspectos básicos:

Según el número de antenas

- Monoestático: una sola antena transmite y recibe.
- Biestático: una antena transmite y otra recibe, en unos mismos o diferentes emplazamientos.
- Multiestático: combina la información recibida por varias antenas.

Según el blanco

- Radar primario: funciona con independencia del blanco, dependiendo solamente de la RCS del mismo.
- Radar secundario. el radar interroga al blanco, que responde, normalmente con una serie de datos (altura del avión, etc). En el caso de vehículos militares, se incluye el identificador amigo-enemigo.

Según la forma de onda

- Radar de onda continua (CW): transmite ininterrumpidamente. El radar de la policía suele ser de onda continua y detecta velocidades gracias al efecto Doppler.
- Radar de onda continúa con modulación (CW-FM, CW-PM): se le añade a la señal modulación de fase o frecuencia con objeto de determinar cuando se transmitió la señal correspondiente a un eco (permite estimar distancias).
- Radar de onda pulsada: es el funcionamiento habitual. Se transmite periódicamente un pulso, que puede estar modulado o no. Si aparecen ecos de pulsos anteriores al último transmitido, se interpretarán como pertenecientes a este último, de modo que aparecerán trazas de blancos inexistentes.

Según su finalidad

 Radar de seguimiento: es capaz de seguir el movimiento de un blanco. Por ejemplo el radar de guía de misiles. Radar de búsqueda: explora todo el espacio, o un sector de él, mostrando todos los blancos que aparecen. Existen radares con capacidad de funcionar en ambos modos. (Skolnik, 1980).

1.2 Arreglos de antenas

Para mover el diagrama direccional en un radar electrónicamente se emplean los múltiples arreglos de antenas. En la actualidad se utiliza con mucha frecuencia los arreglos de antenas en equipos con aplicaciones militares entre los que se encuentran los de la defensa antiaérea, cuyas misiones consisten en localizar los aviones enemigos (blancos) con sus radares y destruirlos con el fuego de los medios de defensa (cañones, cohetes, etc.).

En el mundo hay disímiles medios que emplean antenas para cumplir las misiones antes comentadas, en estos se pueden emplear diferentes tipos de antenas, en los cuales se emplean las antenas más actuales y especificando concretamente los arreglos de antenas.

Estos radares disponen de antena de aperturas (Stutzman, Thiele 1998) con cientos o incluso miles de diferentes elementos de antena en lugar de una única antena reflectora con sólo un alimentador o de una antena de ranura con guía ondas de fase fija. Cada uno de los elementos de antena puede influir por separado en la magnitud y en la fase de su potencia de alimentación, de forma que la antena en su conjunto es capaz de generar, después, frentes de onda de prácticamente cualquier configuración. La potencia de emisión se genera en lugar central y una red de distribución se encarga de la alimentación, la cual aplica señales de cierta amplitud y fase a cada elemento. La amplitud deseada se obtiene con el uso de amplificadores o atenuadores y la fase requerida por medio de circuitos cambiadores de fase (Pozar, 1992).



Fig. 1.3. Esquema de una red alimentadora para un arreglo lineal.

El barrido del sector de exploración se realiza variando la fase de todos los elementos del arreglo. A partir de un control de las distribuciones de amplitud y fase en cada elemento de la antena es posible lograr un cambio en la dirección del lóbulo principal, consiguiendo con esto evitar el movimiento mecánico y realizar el barrido electrónico por medio de los *phased array* (Milligan, 1985).

Un arreglo de fase consiste en una matriz (*array*) de elementos radiantes. La fase de la señal que alimenta cada uno de estos está controlada de tal manera que la radiación del conjunto sea muy directiva. Es decir, se juega con las fases de las señales para que se cancelen en las direcciones no deseadas y se interfieran constructivamente en las direcciones de interés.

Si todos los elementos del array están contenidos en el mismo plano y la señal con que se alimentan es de la misma fase, entonces se estará reforzando la dirección perpendicular a ese plano. Si se altera la fase relativa de las señales se podrá "mover" el haz (en realidad lo que se está haciendo es cambiar la dirección en la cual las interferencias son constructivas). Se consigue de este modo hacer barridos sin necesidad de movimiento físico, con la ventaja añadida de que se pueden escanear ángulos del orden de miles de grados por segundo. Esto permite utilizar la antena para compaginar simultáneamente funciones de detección y de seguimiento muchos blancos individuales. Apagando y encendiendo algunos de los elementos radiantes se puede variar el haz de radiación, ensanchándolo para mejorar las funciones de búsqueda o estrechándolo para hacer un seguimiento preciso de un objetivo. El punto débil de los phased arrays es la imposibilidad de dirigirlo correctamente en ángulos cercanos al plano en el que están los elementos radiantes. (Tang, Burns 1984).

1.2.1 Clasificación de los arreglos de antenas

Los arreglos de antenas se clasifican de dos formas fundamentales (Albornoz, 2002):

Por su geometría

- Lineales
- Planares
- Volumétricos

Por su excitación

- Uniformes
- Binomiales
- Tchevichev
- Schelkunoff (ceros)
- Fourier
- Coseno pedestal
- etc.

1.2.2 Principio de Funcionamiento de arreglos de antenas

Se describe a continuación las características principales de dos tipos de los arreglos, lineales y planares.

> Arreglos de fase lineales

Las antenas de arreglos de fase introducen un cambio de fase lineal a lo largo del arreglo para poder recibir o transmitir una onda en determinada dirección. Los arreglos pasivos y activos funcionan de esta manera, tal como se muestra en la figura 1.



Fig. 1.4 Arreglos de fase (a) pasivos y (b) activos.

Es posible escanear la onda en una dirección determinada, asumiendo que la corriente en los elementos es constante de igual amplitud con cambio de fase uniforme (α)

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} dsen\theta \tag{1.1}$$

Por ejemplo,

para direccionar la onda un ángulo de 30° considerando d/ λ = 0.5, el cambio progresivo y uniforme en fase será α = 90°.

> Arreglos planos.

Los arreglos planos son aquellos en que los elementos del arreglo se encuentran ubicados sobre un plano, existen varias configuraciones que pueden ser obtenidas; por ejemplo, arreglos rectangulares, circulares, o en cruz. Los arreglos planos son mucho más versátiles que los arreglos lineales (Hansen, 1983), ya que poseen mayor número de parámetros de control, permitiendo la obtención de patrones más simétricos con lóbulos laterales más pequeños y facilitando el desplazamiento del haz principal hacia cualquier punto del espacio. Estas características convierten a los arreglos planos en antenas ideales para aplicaciones tales como radar, antenas inteligentes aplicadas a sistemas modernos de comunicaciones, radioastronomía, telemetría, etc. (Ramos, Martinez, Ruiz, 2002).

1.2.3 Tipos de arreglos planos

✓ Arreglos planos rectangulares.

Un arreglo plano puede estructurarse considerando un arreglo lineal de M elementos colocados, por ejemplo, a lo largo del eje x, y posteriormente repetir N de tales arreglos a lo largo de la dirección y como se muestra en la figura 1.5. Así cada elemento en el arreglo en la dirección x su espaciamiento será d_x y su fase progresiva β_x mientras que en la dirección y cada arreglo o elemento tendrá una separación d_y y una fase progresiva β_y . En esta forma quedaría un arreglo de tipo rectangular (Mailloux, 2005).



Fig. 1.5. Disposición geométrica de un arreglo plano rectangular de antenas.

✓ Arreglo plano circular.

Un arreglo circular consiste de N elementos isotópicos idénticos igualmente espaciados en un círculo de radio **a** como se muestra en la figura 1.6. Cada elemento es pesado con un peso complejo V_n para n = 0, 1,..., N-1. Desde que los N elementos son espaciados igualmente alrededor del círculo de radio **a**, el ángulo del azimut del elemento nth es dado como $\Phi_k = 2k\Pi/N$. La fase relativa en el elemento n con respecto al centro del arreglo está dado por (1.2).



Fig. 1.6. Arreglo circular con N elementos espaciados igualmente.

$$\beta_n = -ka\cos \oint -\phi_n \, \overline{sen\theta} \tag{1.2}$$

Si se sabe que el factor del arreglo para un arreglo circular con N elementos espaciados igualmente esta dado como:

$$F \mathbf{\Phi}, \theta = \sum_{n=0}^{N-1} V_n e^{j \mathbf{E}_n ka \cos \mathbf{\Phi} - \varphi k \operatorname{Re} \theta}$$
(1.3)

donde V_ne^{jan} denota los pesos complejos del elemento n. Debido a que tiene el rayo principal orientado en el ángulo (Φ_0 , θ_0) en el espacio, la fase del peso para el elemento n se puede elegir para ser:

$$\alpha_n = ka\cos(\mathbf{\Phi} - \varphi_0) \sin(\mathbf{\Phi})$$
(2.4)

En varias aplicaciones, tales como antenas de estaciones de base, el patrón en el plano $\theta = \Pi/2$ es de interés. En este caso, el factor de arreglo se da como:

$$F \, \mathbf{\Phi}, \theta = \sum_{n=0}^{N-1} V_n e^{j \mathbf{E}_n - ka \cos \mathbf{\Phi} - \varphi k \, \mathbf{j}} \tag{1.5}$$

Una de las características inherente de un arreglo circular es la presencia de niveles de lóbulos laterales grandes en su patrón del rayo. Para un arreglo circular con elementos espaciados igualmente y coeficientes de peso uniforme, el menor nivel de lóbulo lateral pico que alcanza está sobre los 8 dB con respecto al lóbulo principal. El nivel de lóbulo lateral es una función de θ_0 y Φ_0 en adición a los parámetros físicos del arreglo (Pozar, 1992).

1.3 Radares con arreglos de antenas más usados en la radiolocalización

Ejemplos de radares que se usan en la actualidad los cuales están formados por arreglos de antenas.

En la Fig. 1.7 se muestra un arreglo de antenas. Este es el sistema de misiles antiaéreos denominado S300 de origen ruso y denominado por la OTAN con el nombre de SA-10. De este sistema se conoce que trabaja en la Banda de 2 a 4

GHz y realiza la exploración electrónica con el empleo de un arreglo de fase plano, con radiadores a guías de ondas ranuradas. Además, este CCAA tiene un radar para el fuego, en la Banda de 8 a 12 Ghz, para el seguimiento del blanco y para el guiado de los cohetes, que emplea 10000 elementos defasadores distribuidos en forma de matriz (100x100), en una lente espacial. El cambio de la dirección del haz se realiza controlando la fase de los defasadores que componen la matriz.



Fig. 1.7. Sistema de misiles antiaéreos S300

Por último, en la Fig. 1.8 se muestra otro arreglo de antenas. Este es el moderno sistema de artillería antiaérea denominado Zoopark-1, de origen ruso.



Fig. 1.8. Sistema de artillería antiaérea Zoopark-1

1.4 Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se realizó un estudio de los sistemas de radares así como de los arreglos de antenas analizando las principales características y aplicaciones para ambos casos. Se hizo un análisis de los principales tipos de arreglos de antenas así como de sus ecuaciones de diseño. Además se hizo referencia a los sistemas de radares más utilizados en la actualidad en el mundo.

CAPÍTULO 2. Metodología de diseño para la conformación del patrón en radares de SAF.

En este capítulo se selecciona el tipo de arreglo más adecuado para la aplicación que es el plano rectangular y de el se hace un análisis de las expresiones más importantes, además el diseño para la conformación del patrón se realizará a partir del cálculo de las fases progresivas $\beta x y \beta y$.

2.1 Métodos de síntesis del patrón para arreglos lineales y planos.

2.1.1 Síntesis de Dolph - Chevyshev.

La amplitud del rayo es bastante estrecha en correspondencia a un nivel dado del lóbulo lateral que debe ser constante. Para arreglos pequeños, la directividad aumenta linealmente respecto a la longitud del arreglo hasta que llega el momento en que se alcanza la directividad máxima, el incremento de esta se detiene, al ser los lóbulos laterales constantes y necesitar tomar una parte grande de la energía del lóbulo principal para mantener igual el nivel de los mismos (Stegen, 1960).

2.1.2 Forma de Schelkunov.

Con este se reajusta el patrón de los ceros del polinomio del arreglo. El polinomio es una suma. El rango del índice de la suma se va a cambiar en dependencia de la simplificación que se le desee hacer a la forma polinómica. La magnitud de los ceros del polinomio va a ser de uno. El factor del arreglo en un punto dado va a ser el producto de las longitudes de los segmentos que unen los ceros con el punto antes mencionado. En este método si los ceros son posicionados más cercanos unos con respecto a los otros se puede obtener lóbulos laterales reducidos a expensas de un rayo principal más amplio. Se usa en arreglos de una sola dimensión. (Schellkunoff, Friis, 1952).

2.1.3 Síntesis de Woodward.

Se usa en la síntesis de patrones uniformes. Produce un mayor nivel de ondulaciones y grandes lóbulos laterales en relación con el método de Fourier. No controla el nivel de los lóbulos laterales en la región desformada del patrón. Esta técnica puede implementarse usando redes de rayo ortogonal de pérdidas (Elliott, 1981).

2.1.4 Método de Transformada de Fourier.

Aquí la función del patrón es una serie de Fourier finita y periódica. Este método proporciona la mínima aproximación ajustada del error medio del patrón deseado para un $d_x \ge 0.5$. Para un espaciamiento de $\lambda/2$ a medida que los arreglos tienen mayor número de elementos proporciona una aproximación más exacta del patrón deseado reproduciendo pendientes más abruptas para emparejar el patrón ideal.

2.1.5 Síntesis de Taylor de la Fuente de Línea.

Brinda gran eficiencia para arreglos grandes. EL parámetro \overline{n} se encarga del control del nivel de los lóbulos laterales. Con el incremento de \overline{n} ; se logra lóbulos laterales bastante semejantes a los lóbulos laterales que se desean diseñar; acercar el patrón de Taylor al de Chevyshev; que el patrón del rayo principal sea más estrecho y que la eficiencia de apertura aumente (Taylor, 1955).

2.2 Arreglo plano rectangular

La utilización de arreglos de antenas permite sustituir este sistema de barrido evitando el movimiento físico y proporcionando ventajas en cuanto a fiabilidad, retardos, manuabilidad, peso y tamaño, lo que permite su fácil enmascaramiento.

Ello se puede lograr variando la fase de alimentación de los elementos pues así se puede mover el patrón de radiación en un sector determinado sin necesidad de utilizar movimiento físico

Como el Sistema de Antenas es para un radar de radiolocalización el tipo de configuración de arreglo que se usará es planar rectangular, más específica cuadrada para hacer el diseño más sencillo y flexible; los arreglos planos son mucho más versátiles que los arreglos lineales, ya que poseen mayor número de parámetros de control, permitiendo la obtención de patrones más simétricos con lóbulos laterales más pequeños y facilitando el desplazamiento del haz principal hacia cualquier punto del espacio. El arreglo plano que se desea construir va a estar formado por N arreglos lineales a lo largo de la dirección *y*, donde cada arreglo lineal va a estar formado por M elementos a lo largo del eje **x**.

2.3 Ecuaciones de diseño para el arreglo plano rectangular

2.3.1 Factor de arreglo:

El factor de arreglo puede ser escrito por la siguiente ecuación:

$$AF = \sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j \left(m - 1 \right) \left(k dx sen \, \theta \cos \phi + \beta y \right)^{-2}}$$
(2.1)

Donde Im1 es el coeficiente de excitación de cada elemento. El espaciamiento y la fase progresiva cambian entre los elementos a lo largo del eje \mathbf{x} y son representados respectivamente por dx y βx . En ciertos arreglos N es igual de un

elemento a otro en la dirección **y**, a distancia dy aparte y con fase progresiva β y lo que da lugar al arreglo plano rectangular. (Balanis 1996).

El factor de arreglo para el arreglo planar completo puede ser escrito como se muestra a continuación:

$$AF = \sum_{n=1}^{N} I_{1n} \left[\sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j \left(q_{n-1} \right) \left(k dx sen \, \theta \cos \varphi + \beta x \right)} \right] e^{j \left(q_{n-1} \right) \left(k dy sen \, \theta sen \, \varphi + \beta y \right)}$$
(2.2)

De donde se puede llegar a que:

$$AF = S_{xm}S_{yn} \tag{2.3}$$

Donde:

$$S_{xm} = \sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j \left(q_{n-1} \right) \left(k dx sen \, \theta \cos \varphi + \beta x \right)}$$
(2.3a)

$$S_{yn} = \sum_{n=1}^{N} I_{1n} e^{j \left(-1 \right) \left(k dysen \, \theta sen \, \varphi + \beta y \right)}$$
(2.3b)

La ecuación 2.3 indica que el diseño de un arreglo rectangular es el producto del factor de arreglo en las direcciones \mathbf{x} y \mathbf{y} del arreglo (Booker, 1991).Si la amplitud de los coeficientes de excitación de los elementos de los arreglos en la dirección \mathbf{y} son proporcionales a los de la dirección \mathbf{x} , la amplitud del (m, n) esimo elemento puede ser escrito como:

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1N}$$
(2.4)

Si además la amplitud de excitación de todo el arreglo es uniforme ($Imn=I_0$) queda como:

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^{M} e^{j \left(q - 1 \right) \left(k dx sen \, \theta \cos \phi + \beta x \right)} \sum_{n=1}^{N} e^{j \left(q - 1 \right) \left(k dx sen \, \theta sen \, \phi + \beta y \right)}$$
(2.5)

La formula del factor de arreglo normalizado puede ser escrita por la siguiente expresión:

$$AF_{n} \mathbf{\Phi}, \boldsymbol{\varphi} = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{M}{2}\psi_{x}\right)}{\operatorname{sen}\left(\frac{\psi_{x}}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{N}{2}\psi_{y}\right)}{\operatorname{sen}\left(\frac{\psi_{y}}{2}\right)} \right\}$$
(2.6)

Donde:

$$\psi_x = kdxsen\theta\cos\varphi + \beta_x \tag{2.7a}$$

$$\psi_{y} = k dy sen \theta sen \varphi + \beta_{y}$$
(2.7b)

Cuando el espaciamiento es igual o mayor que $\lambda/2$, es el máximo múltiplo para magnitudes iguales que puede formarse. El máximo principal es referido al lóbulo principal y los restantes como lóbulos secundarios. Un lóbulo secundario es definido como un lóbulo aparte del lóbulo principal producido por un arreglo de antenas cuando el espaciamiento entre los elementos es suficientemente grande para permitir una adición en fase de los elementos radiantes en más de una dirección. La forma de evitar lóbulos secundarios en el arreglo rectangular es el mismo principio que debe ser satisfecho para arreglos lineales. Para evitar lóbulos secundarios en el plano xz y yz el espaciamiento entre elementos en la dirección x e y respectivamente tienen que ser menor que $\lambda/2$ (dx < $\lambda/2$ y dy < $\lambda/2$). (Balanis, 1996).

Para un arreglo rectangular, el lóbulo principal y secundarios son de Sxm y Syn en 2.3a y 2.3b son situados en:

$$Kdxsen\theta\cos\varphi + \beta x = 2m\pi \qquad m = 0,1,2,3 \tag{2.8a}$$

$$Kdysen\theta sen\varphi + \beta y = 2m\pi \qquad n = 0,1,2,3 \tag{2.8b}$$

Las fases βx y βy son independientes una de la otra y ambas pueden ser ajustadas de modo que el haz principal de Sxm no es el mismo que Syn. De

cualquier modo en la aplicación más práctica se requiere que el cono del rayo principal de Sxm y Syn se intercepten y su máximo valor este dirigido hacia la misma dirección (Balanis, 1996). Si se desea tener un solo haz principal dirigido a

lo largo de $\Theta = \theta_0$ y $\phi = \phi_0$, la fase progresiva cambia entre los elementos con el tiempo en la dirección (**x** y **y**) y tiene que ser igual a:

$$\beta x = -kdxsen\theta_0 \cos\varphi_0 \tag{2.9a}$$

$$\beta y = -kdysen\theta_0sen\phi_0 \tag{2.9b}$$

Si resolvemos simultáneamente las expresiones 2.9a y 2.9b puede expresarse también como:

$$\tan \varphi_0 = \frac{\beta y dx}{\beta x dy} \tag{2.10a}$$

$$\tan \theta_0 = \left(\frac{\beta_x}{kdx}\right)^2 + \left(\frac{\beta y}{kdy}\right)^2$$
(2.10b)

El máximo principal (m=n=0) y los lóbulos secundarios pueden ser localizado por:

$$Kdx \left\{ en\theta \cos\varphi - sen\theta_0 \cos\varphi_0 \right\} \pm 2m\pi \qquad m = 0,1,2,3$$
(2.11a)

$$Kdy \left(en\theta \, sen\phi - sen\theta_0 sen\phi_0 \right) = \pm 2n\pi \qquad n = 0,1,2,3 \qquad (2.11b)$$

O también pueden ser escritas como:

$$sen\theta\cos\varphi - sen\theta_0\cos\varphi_0 = \pm \frac{m\lambda}{dx}$$
 $m = 0,1,2,3$ (2.12 a)

$$sen\theta sen\varphi - sen\theta_0 sen\varphi_0 = \pm \frac{n\lambda}{dy}$$
 $n = 0,1,2,3$ (2.12b)

Si resolvemos simultáneamente estas dos ecuaciones las expresiones se reducen a las siguientes:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{sen\theta_0 sen\varphi_0 \pm \frac{n\lambda}{dy}}{sen\theta_0 \cos\varphi_0 \pm \frac{m\lambda}{dx}} \right]$$
(2.13)

$$\theta = sen^{-1} \left[\frac{sen\theta_0 \cos\varphi_0 \pm \frac{m\lambda}{dx}}{\cos\varphi} \right] = sen^{-1} \left[\frac{sen\theta_0 sen\varphi_0 \pm \frac{n\lambda}{dy}}{sen\varphi} \right]$$
(2.14)

2.4 Directividad

La directividad (Balanis, 1996) en el factor de arreglo $AF \mathbf{\Phi}, \phi$ cuyo haz mayor es indicado en la dirección $\theta = \theta \sigma$ y en la $\Phi = \Phi \sigma$ puede ser obtenida empleando la expresión:

$$D_{0} = \frac{4\pi \left[F \, \boldsymbol{\theta}_{0}, \boldsymbol{\varphi}_{0} \right] \left[F \, \boldsymbol{\theta}_{0}, \boldsymbol{\varphi}_{0} \right]}{\int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} \left[F \, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi} \right] \left[F \, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi} \right] \left[sen\theta \, d\theta \, d\varphi}$$
(2.15)

En arreglos planos grandes como son aproximadamente los broadside la directividad se reduce a

$$D_0 = \pi \cos \theta_0 D x D y \tag{2.16}$$

Donde Dx y Dy son las directividades de los elementos del arreglo lineal broadside. El factor cosθo contribuye para que decrezca la directividad porque decrece el área proyectada del arreglo.

Para la mayoría de las distribuciones prácticas la directividad expresada en 2.16 es expresada en función del ángulo sólido

$$D_0 = \frac{\pi^2}{\Omega_A (ad^2)} = \frac{32400}{\Omega_A (agrees^2)}$$
(2.17)

Donde Ω_A es expresado en rad ² y grados ²

Aquí se relaciona la directividad con el ángulo sólido Ω_A (Balanis, 1996) que debe poseer el patrón de radiación, el cual va a estar dado por:

$$\Omega_A = \Theta_h \psi_h \tag{2.18}$$

donde Θ_h es la amplitud del rayo a mitad de potencia en el plano y – z, y Ψ_h es la amplitud del rayo a mitad de potencia en el plano x – y.

2.5 Cálculo de las fases progresivas para la conformación del patrón

Como el arreglo plano que se debe diseñar debe tener un patrón de radiación de 1° por 7° cuando se le hace un corte transversal al diagrama direccional, $\psi_h = 1^o$ y $\Theta_h = 7^o$ entonces el ángulo sólido según (2.18) que se obtiene va a ser:

$$\Omega_A = 7^o(1^o) = 7(grados)^2$$

y la directividad que se alcanza usando (2.17) con este ángulo sólido será

$$D_0 \approx \frac{32400}{7} = 4628.6 = 36.65 dB$$

Aquí se comprueba que usando este ángulo sólido se logra que la directividad se encuentre en el rango de ganancia directiva deseado para el conjunto de antenas. Para un arreglo plano cuadrado se sabe que:

$$\psi_h = \Theta_{xo} = \Theta_{yo} \tag{2.19}$$

Además

$$\Theta_h = \Theta_{xo} \sec\theta_0 \tag{2.20}$$

entonces se llega a que

$$\Theta_h = \Psi_h \sec\theta_0 \tag{2.21}$$

despejando en la expresión 2.21 y teniendo en cuenta que se $\mathcal{O}_0 = \frac{1}{c \circ \mathcal{O}_0}$ se obtendrá el valor de θ_0

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{1^o}{7^o} = \cos^{-1} \mathbf{0}.149 = 81.79 \approx 82^o$$

El cálculo de las fases progresivas se realiza a partir de las expresiones 2.9 a) y 2.9 b). Para ello se parte del valor de θ o calculado anteriormente (82°), ese valor se deja fijo y el ángulo φ o se varia 20° en un sector del espacio determinado, con ello se obtienen las fases progresivas (ver anexo 1) de todos los elementos para cada ángulo φ o. El espaciamiento entre elementos es $dx = dy = \frac{\lambda}{2}$ para los ejes **x** e **y** respectivamente. El factor k viene dado por la expresión $k = \frac{2\pi}{2}$

2.6 Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se realizó una breve explicación de los métodos de diseño para la conformación del patrón en radares de SAF. Se escogieron los arreglos planos rectangulares específicamente los cuadrados, para la realización del diseño porque son los más utilizados en radiolocalización, de los cuales se hizo un análisis de las expresiones más importantes, Además se realizó el cálculo de las fases progresivas βx y βy para el sector de desplazamiento.

CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados del diseño.

3.1 Análisis de los resultados del diseño de un arreglo plano de 10 x 10 elementos.

Para comprobar el funcionamiento del diseño o sea que el haz se mueve en el sector deseado se hará una prueba con un arreglo de 100 elementos 10 por el eje **x** (M=10) y 10 por el eje **y** (N=10). Este diseño con pocos elementos facilitará las simulaciones y tendrá como característica fundamental la poca presencia de lóbulos laterales que es lo deseado. Se escogió el sector desde $\varphi o = 155^{\circ}$ hasta $\varphi o = 175^{\circ}$.

3.1.1 Gráfica para φο =155°.

La Fig. 3.1 muestra la posición que tiene el haz cuando $\varphi = 155^{\circ}$ que es el primer valor en el sector deseado, el ángulo θ o mantendrá su valor constante para cada ángulo φ o pues la elevación del patrón no debe variar, con estas especificaciones los valores de fases progresivas entre los elementos serán $\beta x=161.5^{\circ}$ y $\beta y=-75.3^{\circ}$ respectivamente. Es necesario aclarar que el ancho del haz varía inversamente proporcional con el número de elementos, a medida que el arreglo tenga menos elementos el patrón será más ancho algo que en esta aplicación no es deseado.



Fig. 3.1. Posición del haz para φο =155°.

3.1.2 Análisis de la gráfica para φo=165°.

Cuando el ángulo φ o comienza a aumentar varía la fase progresiva entre los elementos con el tiempo y es apreciable la deflexión del haz, con este valor de φ o los valores de las fases progresivas entre los elementos serán βx = 172.1° y β y= - 46.1° respectivamente. En la Fig. 3.2 se escogió un valor de φ o en el centro del sector o sea 165° y se puede ver perfectamente el desplazamiento.



Fig. 3.2. Posición del haz para φo=165°

3.1.3 Análisis de la gráfica para φo=175°.

Al seguir aumentando φ o hasta el valor de 175° las fases progresivas entre los elementos alcanzan los valores de β x=177.5° y β y= -15.5° respectivamente con el tiempo de manera que el haz alcanzará el valor final del sector deseado. En la Fig. 3.3 se puede apreciar que la deflexión del haz alcanza los 20° aproximadamente y aquí concluye el barrido directo con duración de 53 ms luego comenzará el inverso en sentido contrario y con duración de 13 ms.



Fig. 3.3. Posición del haz para φo=175°

3.1.4 Barrido para φo desde 155° hasta 175°.

La Fig. 3.4 muestra el barrido del patrón en el sector completo o sea para los 20 valores de φ o para los cuales hay 20 valores diferentes de β x y de β y respectivamente (ver anexo I), es necesario aclarar que este barrido es solo en el sentido directo y lo hace en aproximadamente 53 ms.



Fig. 3.4. Barrido del haz en el sector de 20°

3.2 Análisis de los resultados para el diseño del arreglo plano de 112 x 112 elementos.

En este epígrafe se aborda el diseño utilizando Matlab, para las características del arreglo que será empleado en la aplicación el cual tiene 112 elementos por cada eje lo que es lo mismo que M=112 y N=112 y el espaciamiento se mantendrá en λ 2. Con el aumento del número de elementos se hará apreciable la disminución del ancho del haz el cual quedará en aproximadamente un grado que es lo deseado. Aquí es necesario aclarar que con el aumento de qo cuando la cantidad de elementos es grande trae como consecuencia la aparición de gran cantidad de lóbulos laterales.

3.2.1 Análisis de la gráfica para φo=155° en el diseño 112x112 elementos.

La Fig. 3.5 muestra la posición del haz cuando $\varphi o = 155^{\circ} o$ sea el primer valor en el sector del espacio que se desea cubrir como ya se había analizado en el diseño

anterior los valores de fase progresiva serán $\beta x=161.5^{\circ}$ y $\beta y=-75.3^{\circ}$ respectivamente. Es apreciable la disminución del grueso del patrón con respecto al caso del arreglo de 10 X 10 elementos, lo que hace los radares con arreglos de antenas grandes, equipos de mucha precisión.



Fig. 3.5. Posición del haz para φo=155°

3.2.2 Gráfica para la mitad del desplazamiento.

En la Fig. 3.6 se aprecia el desplazamiento del haz a medida que varía la fase progresiva con el tiempo entre los elementos. Para este caso $\varphi o = 165^{\circ} y$ aproximadamente el patrón está en la mitad del sector que se desea cubrir.



Fig. 3.6. Posición del haz para la mitad del desplazamiento

3.2.3 Posición del haz al final del sector.

La Fig. 3.7 es cuando φ o toma el valor de 175 ° para el cual β x=177.5° y β y= - 15.5° respectivamente. Aquí se aprecia que el haz ha recorrido el sector del espacio deseado al variar la fase progresiva con el tiempo. Cuando φ o a aumentado 20° termina el barrido directo que demora 53ms y comenzará el inverso con duración de 13ms.



Fig. 3.7. Posición del haz para φo=175°

3.2.4 Barrido del haz para los 20 valores de ϕ o.

La Fig. 3.8 muestra el patrón para el sector completo o sea abarca todos los valores de ϕ o deseados, obteniéndose 20 valores distintos de β x y β y respectivamente (ver anexo I). En ella se aprecia el movimiento del haz en el sentido directo.



Fig. 3.8. Barrido en el sector de 20°

3.3 Programa en Matlab para obtener los patrones para cada ángulo φo individual.

%% Arreglos Rectangulares %%

clear

% Número de elementos

M = 10;

N = 10;

%M y N son la cantidad de elementos por el eje "x" y "y" respectivamente

% Separación entre elementos en lambda

dx = 1/2;

dy = 1/2; k = 2*pi;

% Estas son las expresiones de Theta0 y Phi0, en la primera se mantiene fijo el valor de 82° y en la segunda se varía φ o desde 1° hasta 20° que es el sector deseado en intervalos de 1° .

Theta0 = deg2rad (82);

Phi0 = deg2rad(1);

% Fase progresiva entre elementos,

Betax = -k*dx*sin (Theta0)*cos (Phi0);

Betay = -k*dy*sin (Theta0)*sin (Phi0);

Con estas dos expresiones se calculan las fases progresivas tanto por el eje x como por el y.

% Ángulos de elevación del Patrón de Radiación.

Theta = 0:.01/2: pi;

% Ángulos de azimut del Patrón de Radiación.

Phi = 0:.01:2*pi;

% Factor de Arreglo

Chix = (k*dx*sin (Theta).*cos (Phi))+Betax;

Chiy = (k*dy*sin (Theta).*sin (Phi))+Betay;

%AF = ((1/M) * sin((M/2) * Chix) ./ sin(Chix/2)) .* ((1/N) * sin((N/2) * Chiy) ./ sin(Chiy/2));

% Factor de Arreglo.

AFx = 0;

for m = 1:M

 $AFx = AFx + exp (j^{*}(m-1)^{*}Chix);$

End

%Este bloque lo que hace es evaluar la expresión del factor de arreglo en x para los M elementos de ese eje.

AFy = 0;

for n = 1: N

```
AFy = AFy + exp (j^{*}(n-1)^{*}Chiy);
```

end

%Este otro bloque evalúa la expresión del factor de arreglo en el eje y para los N valores o cantidad de elementos de ese eje.

AF = AFx .* AFy; Esta expresión multiplica los factores de arreglo tanto en x como en y para obtener el factor de arreglo total.

% Magnitud (Modulo) del Factor de Arreglo normalizado.

AF = (1/N) * (1/M) * abs (AF);

[x,y,z] = sph2cart (Theta, Phi, AF);

```
polar (Theta,AF)
```

hold on

end

3.4 Programa en Matlab para la obtención del barrido en el sector de los 20 valores de φ a la vez.

%% Arreglos Rectangulares %%

clear

% Númeo de elementos.

M = 10;

N = 10;

% Separación entre elementos en lambda.

dx = 1/2;

dy = 1/2;

k = 2*pi;

for Phi0_deg = 1:1:20,

Theta0 = deg2rad (82);

Phi0 = deg2rad (Phi0_deg);

%Este bloque lo que hace es evaluar la expresión de Theta0 para 82° y mediante un ciclo for darle valores a Phi0 desde 1° hasta 20° que es el sector del espacio deseado, con ello se obtiene el patrón resultante de todos los valores Phi0 en ese sector.

% Fase progresiva entre elementos.

Betax = -k*dx*sin (Theta0)*cos (Phi0);

Betay = -k*dy*sin (Theta0)*sin (Phi0);

Con estas dos expresiones se calculan las fases progresivas tanto por el eje x como por el y

% Angulos de elevación del Patrón de Radiación.

Theta = 0:.01/2: pi;

% Angulos de azimut del Patrón de Radiación.

Phi = 0:.01:2*pi;

% Factor de Arreglo

Chix = (k*dx*sin (Theta).*cos (Phi))+Betax;

Chiy = (k*dy*sin (Theta).*sin (Phi))+Betay;

%% Factor de Arreglo.

AFx = 0;

for m = 1: M

 $AFx = AFx + exp (j^{*}(m-1)^{*}Chix);$

End

%Este bloque lo que hace es evaluar la expresión del factor de arreglo en x para los M elementos de ese eje.

$$AFy = 0;$$

for n = 1: N

 $AFy = AFy + exp (j^{*}(n-1)^{*}Chiy);$

End

%Este bloque lo que hace es evaluar la expresión del factor de arreglo en y para los N elementos de ese eje.

AF = AFx * AFy;

% Magnitud (Modulo) del Factor de Arreglo normalizado.

AF = (1/N) * (1/M) * abs (AF);

[x,y,z] = sph2cart (Theta, Phi, AF);

polar (Theta,AF)

hold on

end

3.5 Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se obtuvieron las gráficas de la posición del máximo del patrón de radiación para cada uno de los valores de φo. Para demostrar el funcionamiento del diseño se comprobó el movimiento del haz con un arreglo de 10 X 10 elementos y luego para el arreglo 112 X112 que es el de la aplicación de interés. Además en este capítulo se comentaron los programas en Matlab para la obtención de las gráficas.

CONCLUSIONES

Con la realización del presente trabajo se arribaron a las siguientes conclusiones:

- La utilización de radares con arreglos de antenas faseados es lo más utilizado en el mundo para la radiolocalización de aeronaves principalmente por sus características de directividad.
- El movimiento del patrón de radiación de forma electrónica hace los sistemas de radares mucho más manipulables y flexibles.
- Variando la fase progresiva con el tiempo entre los elementos es posible mover el máximo del patrón en sectores del espacio determinado pero para valores de φo grandes la presencia de lóbulos laterales se hace apreciable.
- A medida que aumenta el número de elementos del arreglo aumenta la presencia de lóbulos laterales y disminuye el ancho del haz.
- Se obtuvo un diseño para el barrido del haz de un arreglo de fase, cumpliendo con los requisitos iniciales del trabajo.
- Se desarrollaron los métodos necesarios para el diseño del barrido del haz auxiliándose de Matlab como herramienta computacional.

RECOMENDACIONES

Se recomienda de manera general:

- Proponer otras variantes de diseño con otros tipos de arreglos de antenas como son los circulares y realizar comparaciones con el arreglo plano rectangular.
- La realización de estudios más profundos y otros análisis comparativos, que en función de la disponibilidad de los recursos, logren ajustar el diseño para su mejor utilización.
- El presente trabajo sirva como fuente de estudio e información para profesores, estudiantes, y profesionales en general, debido a que presenta información reciente sobre la teoría y el diseño de radares con arreglos de antenas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albornoz R, (2004). Antenas Inteligentes: V Encuentro Nacional de Ramas IEEE 2004. Disponible en <u>http://Lant.ing.uc.edu.ve</u>. Accedido 15 de abril del 2008.

Balanis, C. A. (1997). Antennas Theory, Analysis and Design. New York. Wiley.

Barton E. K. E. Cook y H. Paul (1991)."*Radar Evaluation HandBook*".Artech House.

Booker, E., y col (1991). *Practical Phased Array Antenna Systems*. Artech House, Boston.

Elliott, R. S. (1981). *Antenna Theory and Design*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New York.

Hansen, R. C. (1983). *Linear Array*. Capítulo 9 en The Handbook of Antenna Design, Rudge, A. W., y col, London, England: Peter Peregrinus.pp.22, 309.

Levanon M. I. (1988)." Radar Principles". John Wiley y Sons. New York.

Mailloux, R. J. (2005). *Phased Array Antenna Handbook*. Segunda Edición. Artech House. Boston London. (MMM, 2005).

Milligan, T. A. (1985)." Modern Antenna Design". McGraw–Hill. p.p. 48-65 y 297-319. Nathanson E. F. (1963)." Radar Design Principles" .McGraw-Hill.

Pozar M. D. (1992). "*Microwave Engineering*", Addison-Wesley Publishing Company, Capítulos 3, 12.

Ramos, J. L., M. J. Martínez, y col (2002). Arreglos planos: La Cruz de Mills. Disponible en: <u>http: //exa.unne.edu.ar/ depar/ areas/ informatica/ Sistemas</u> <u>Operativos/ cie200286.pdf.</u> Accedido: 18 de febrero del 2008.

Schelkunoff, S. A. y H. T. Friis (1952). *Antenna, Theory and Practice*. New York. Wiley.

Skolnik, M. I. (1980). Introduction to Radar Principle. McGraw-Hill. New York.

Soriano, J. C. (2006)."*Modelo Experimental de Propagación de RF en Espacio Libre y Vegetación a 9.1 GHz*". Disponible en: <u>http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/soriano_m_jc/apendiceJ.pdf</u> Accedido: 10 de marzo del 2008.

Stegen, R. J. (1960). *Gain of Tschebyscheff Arrays*. IEEE Trans. en Antennas and Propagation, Vol. AP-81.pp.629-631.

Stutzman, W. L. y G. A. Thiele (1998). *Antenna Theory and Design*. Segunda edición, Wiley, New York.

Tang, R, y R, W. Burns (1984). Phased Array. Capítulo 20 en Antenna Engeneering Handbook, Johnson, R. C., H. Jasik, y col, New York: McGraw-Hill.

Taylor, T. T. (1955). Design of Line Source Antennas for Narrow Beamwidth and Low Sidelobes. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. Vol. AP-3. pp.16 – 28.

Toomay, J. C. (1982). Radar Principles. Lifetime LearningPublications. Belmot.CA.

Anexo I. Cálculo de las fases progresivas para el sector de movimiento del patrón.

	Bx	Ву		Bx	Ву
φο=155°	161.5°	-75.3°	φο=166°	172.9°	-43.1°
φο=156°	162.8°	-72.48°	φο=167°	173.6°	-40°
φο=157°	164°	-69.6°	φο=168°	174.3°	-37°
φο=158°	165.2°	-66.8°	φο=169°	174.9°	-34°
φο=159°	166.4°	-63.9°	φο=170°	175.49°	-30.9°
φο=160°	167.5°	-60.9°	φο=171°	176°	-27.9°
φο=161°	168.49°	-58°	φο=172°	176.46°	-24.8°
φο=162°	169.47°	-55°	φο=173°	176.87°	-21.7°
φο=163°	170.4°	-52.1°	φο=174°	177.2°	-18.6°
φo=164°	171.3°	-49.1°	φο=175°	177.5°	-15.5°
φο=165°	172.1°	-46.1°			

Tabla I.1. Valores de las fases progresivas para cada ángulo φο