



Escuela  
Politécnica  
Superior

# Diseño y Análisis de un Array de Antenas tipo Parche en Tecnología Microstrip



Grado en Ingeniería en Sonido e  
Imagen en Telecomunicación

## Trabajo Fin de Grado

Autor:

Javier Martínez Manzano

Tutor/es:

Stephan Marini

Miguel Ángel Sanchez Soriano

Diciembre 2019



# Diseño y Análisis de un Array de Antenas tipo Parche en Tecnología Microstrip

---

## Autor

Javier Martínez Manzano

## Tutor/es

Stephan Marini

*Dpto. de Física, Ing. Sistemas y Teoría de la Señal*

Miguel Ángel Sanchez Soriano

*Dpto. de Física, Ing. Sistemas y Teoría de la Señal*



Grado en Ingeniería en Sonido e Imagen en Telecomunicación



Escuela  
Politécnica  
Superior



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

ALICANTE, Diciembre 2019



# Agradecimientos

Este trabajo de final de grado pone punto y seguido a mis cuatro años como estudiante de telecomunicaciones, y es aquí donde me es imposible no mirar atrás y observar con vértigo hasta donde he podido llegar. Pero todo este camino ha tenido muchos nombres y apellidos a los que me gustaría agradecer su apoyo y confianza:

A mis padres, Javier Martínez y Rosa Manzano, mi hermano, Alejandro y toda mi familia, cuyo cariño, apoyo y confianza desde 1996 han hecho que pueda llegar hasta donde hoy me encuentro.

A todos aquellos docentes que, desde infantil hasta la universidad, me han servido como referentes, aportándome nuevas formas de ver el mundo y haciéndome ver cual es mi camino en la vida: La tecnología y las telecomunicaciones.

A Stephan Marini y Miguel Angel Sanchez Soriano, mis dos tutores, por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto sobre la materia que más me apasiona: Las antenas, y haberme ofrecido en todo momento su ayuda y conocimientos.

A mis compañeros de clase por haber hecho que estos cuatro años de clase hayan sido un poco más fáciles. En especial a Quique, cuyo apoyo y compañía durante estos cuatro años llevaré para el resto de mi vida, y a Plens, porque su dedicación y sus ganas de ayudar a los demás han marcado la forma de ser de una generación entera de telecos, y gracias a ello este TFG va a quedar precioso.

A Pablo Mateos por todos su ayuda para este TFG. Quién diría de cuatro años después de que la selectividad nos separara fuires a elegir el mismo camino que yo.

Y a Anaida, por literalmente: TODO.



*Wio, alguien en una terraza ha gritado, "Te amo"  
Una suave interferencia, culpa al viento solar  
Un poema embotellado que en estéreo ha aterrizado en mi inconsciente,*

"Wio, Antenas y Pijamas" - Love Of Lesbian



# Índice general

<b>1</b>	<b>Arrays de Antenas</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción . . . . .	1
1.2	Arrays lineales . . . . .	2
1.3	Factor de array . . . . .	4
1.4	Influencia de los parámetros de diseño . . . . .	6
1.4.1	Número de elementos . . . . .	6
1.4.2	Espaciado de elementos . . . . .	6
1.4.3	Desfase progresivo . . . . .	6
1.5	Tipos de agrupaciones . . . . .	10
1.5.1	Polinomio de agrupación . . . . .	10
1.5.2	Agrupaciones unidimensionales . . . . .	10
1.5.2.1	Distribución uniforme . . . . .	10
1.5.2.2	Distribución triangular . . . . .	11
1.5.2.3	Distribución binómica . . . . .	12
1.5.3	Agrupación lineal uniforme . . . . .	13
1.5.3.1	Agrupaciones transversales . . . . .	13
1.5.3.2	Agrupaciones longitudinales . . . . .	14
1.5.4	Agrupaciones bidimensionales . . . . .	15
1.5.4.1	Agrupación bidimensional uniforme . . . . .	15
<b>Bibliografía</b>		<b>17</b>
<b>Lista de Acrónimos y Abreviaturas</b>		<b>19</b>



# Índice de figuras

1.1	Agrupación lineal de antenas sobre el eje Z . . . . .	2
1.2	Margen visible. [1] . . . . .	5
1.3	Ceros en el plano Z y en el módulo del FA para el caso de un array de 8 elementos y distribución uniforme. [1] . . . . .	11
1.4	Ceros en el plano Z y en el módulo del FA para el caso de un array de 7 elementos y distribución triangular. [1] . . . . .	12
1.5	Ceros en el plano Z y en el módulo del FA para el caso de un array de 8 elementos y distribución binómica. [1] . . . . .	13
1.6	Comparación de radiación <i>broadside</i> y <i>endfire</i> . . . . .	14



# **Índice de tablas**

1.1	Efecto de adición de elementos sobre array lineal . . . . .	7
1.2	Efecto de la separación de elementos sobre array lineal . . . . .	8
1.3	Efecto del desfase de alimentación de los elementos sobre array lineal . . . . .	9



# **Índice de Códigos**



# 1 Arrays de Antenas

## 1.1 Introducción

Un array o vector de antenas se basa en la agrupación de un cierto número de elementos individuales de antenas para conseguir que trabajen como una sola, mejorando así las prestaciones globales de esta e incluso llegar a obtener parámetros característicos que serían imposibles de conseguir con el trabajo de una sola antena.

En cierto tipo de aplicaciones, necesitamos patrones de radiación o ganancias que antenas de un único elemento no nos pueden ofrecer, ya que los patrones de directividad de estos suelen ser anchos y muy poco directivos. Cuando se necesitan antenas con ganancias más elevadas o patrones de directividad estrechos y concentrados para, por ejemplo, radio enlaces, o patrones estrechos en un plano, pero muy extendidos en su perpendicular, como se hace necesario en aplicaciones de telefonía móvil donde se intenta concentrar el haz hacia las calles y las casas y evitar propagar la señal al cielo, se hace indispensable el uso de agrupaciones de antenas para modelar la radiación de la señal según nuestras especificaciones.

Normalmente un array de antenas está formado por la agrupación del mismo tipo y modelo de antenas dispuestas en una geometría específica. Aunque esto no es estricto, y diferentes tipos de antenas pueden actuar como array para conseguir configuraciones más específicas o cuando otro tipo de limitaciones, como factores de diseño o económicos, no nos permiten usar el mismo tipo de antenas.

Cuando se dispone de un array de antenas, lo común es que este se diseñe para que el campo electromagnético radiado total sea la suma de los campos individuales trabajando en forma de interferencia constructiva para el lóbulo principal, y en forma de interferencia destructiva para el resto del espacio, de forma que la máxima transferencia de potencia se centre en el lóbulo principal. Para conseguir un correcto funcionamiento de un array de antenas según las especificaciones marcadas para nuestra aplicación se deberán tener en cuenta una serie de factores clave en el diseño [2]:

- **La configuración geométrica:** Se deberá conocer de antemano qué tipo de configuración geométrica se aplicará a la hora de distribuir los elementos individuales: Lineal, circular, rectangular, etc. Esta distribución es clave para la correcta aproximación a los parámetros finales deseados.
- **Distancia entre elementos:** La distancia entre elementos afectará a como los campos electromagnéticos interfieren entre si y estos son sumados en el campo lejano.
- **La amplitud de excitación:** Una incorrecta intensidad de excitación a uno o varios

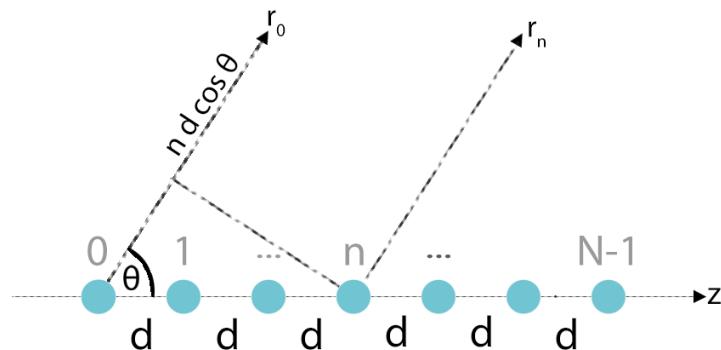
de los elementos que conformen el array puede llevar a superposiciones indeseadas que deformen por completo el patrón de radiación de nuestra antena global.

- **La fase de excitación:** La fase con la que se alimenta cada elemento individual es un factor clave para modelar el comportamiento global de la antena. Si se alimenta cada elemento siempre con la misma fase se obtendrá un patrón de radiación concreto y estático mientras que el hecho de variar la fase a cada elemento de forma individual hará que el patrón de radiación varíe según las necesidades. Esta variación de fase es normalmente llevada a cabo por ordenador y son también conocidos como *Phased arrays*
- **El patrón de radiación de cada elemento:** Para que un elemento llegue a interferir constructiva o destructivamente sobre la radiación de otro, es necesario que sus patrones lleguen a mezclarse físicamente, para ello, el patrón de radiación de cada elemento individual debe estar controlado para así poder predecir cual será el resultado de la antena global.

## 1.2 Arrays lineales

Para entender el funcionamiento analítico de las agrupaciones de antenas, se pondrá como ejemplo un array lineal de estas. Un array lineal consiste en un conjunto de antenas agrupadas a lo largo de una recta y conectadas en serie. El diagrama de radiación del array de antenas es el producto final de las interferencias constructivas y destructivas causadas por las radiaciones de los elementos individuales. Comenzaremos considerando una sola antena alimentada mediante una corriente  $I_n$ , donde  $n$  identifica el número de la antena que compone el array, siendo 0 la primera antena y N-1 la última. Por lo tanto, la primera antena será alimentada por una corriente  $I_0$  [1].

Esta antena poseerá una distribución de corrientes  $J_0(\vec{r})$ . Por lo tanto, si agrupamos un conjunto de  $n$  antenas equiespaciadas una distancia  $d$  a lo largo del eje  $z$  (fig. 1.1), cada una excitada con su fasor de corriente,  $I_n$ , la distribución de corrientes del conjunto de antenas quedará como [1]:



**Figura 1.1:** Agrupación lineal de antenas sobre el eje Z

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n \vec{J}_0(r - nd\hat{z}) \quad (1.1)$$

Se puede expresar el sumatorio anterior como la convolución entre la corriente que alimenta un elemento básico del array, es decir, una antena simple, y un tren de deltas ponderadas con sus respectivos pesos  $I_n$  [1].

$$\vec{J}(\vec{r}) = \vec{J}_0(\vec{r}) * \sum_{n=0}^{N-1} I_n \delta(r - nd\hat{z}) = \vec{J}_0(\vec{r}) * I(n) \quad (1.2)$$

Sabiendo que el vector de radiación  $\vec{N}(\vec{r})$ , es la transformada de Fourier tridimensional de la distribución de corrientes  $\vec{J}(\vec{r})$ , se aplicará el teorema de convolución para calcularlo [1].

$$\vec{N}(\vec{r}) = TF_{3D} \left[ \vec{J}(\vec{r}) \right] = \vec{N}_0(\vec{r}) \cdot TF_{3D}[I(n)] \quad (1.3)$$

Donde  $\vec{N}_0(\vec{r})$  es el vector de radiación del elemento simple situado en el origen, cuando el fasor de alimentación toma el valor unidad. Dado que el fasor de corriente  $I_n$  es separable, su  $TF_{3D}$  consistirá en el producto de las transformadas en cada dirección [1].

$$TF_{3D}[I(n)] = TF_x[I(n)] \cdot TF_y[I(n)] \cdot TF_z[I(n)] = TF_z[I(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{j\omega_z n} \quad (1.4)$$

Donde  $\omega_z$  es la frecuencia digital en la dirección del eje  $z$ , que puede ser obtenida mediante el producto de la frecuencia espacial analógica  $k_z$  por el periodo de muestreo en la dirección  $z$ , que equivale a la distancia de espaciación entre las antenas que componen el array,  $d$  [1].

$$\omega_z = k_z \cdot d = kd \cos \theta \quad (1.5)$$

Donde  $\theta$  representa el ángulo cualquiera con respecto a la agrupación de antenas. Teniendo en cuenta que los fasores de alimentación  $I_n$ , presentan una fase progresiva entre cada par de antenas consecutivas que puede expresarse mediante [1]:

$$I_n = a_n e^{jn\alpha} \quad (1.6)$$

Donde  $a_n$  son coeficientes, generalmente complejos, y que pueden tomar valores reales cuando la fase de alimentación sea progresiva, se podrá entonces obtener el vector de radiación del conjunto de antenas [1]:

$$\vec{N}(\vec{r}) = \vec{N}_0(\vec{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn(kd \cos \theta + \alpha)} \quad (1.7)$$

Para simplificar los cálculos, agruparemos el término  $kd \cos \theta + \alpha$  en una sola variable, la cual representará la diferencia de fase entre las contribuciones en el campo lejano de dos

antenas consecutivas [1].

$$\Psi = kd \cos \theta + \alpha \quad (1.8)$$

Esta diferencia de fase es igual a la suma del desfase por diferencia de caminos  $kd \cos \theta$ , más la diferencia de fase que progresivamente ha ido alimentando cada antena  $\alpha$ . Quedando entonces el vector de radiación como [1]:

$$\vec{N}(\vec{r}) = \vec{N}_0(\vec{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\Psi} \quad (1.9)$$

Se puede observar cómo el vector de radiación consiste en el producto entre el vector de radiación de la primera antena básica  $\vec{N}_0(\vec{r})$  y un factor que tiene en cuenta la interferencia de las  $N$  ondas generadas por cada antena. Este factor depende únicamente de la separación entre elementos, su alimentación y la frecuencia de trabajo, y se le denomina *factor de agrupación* o *factor de array (FA)* [1].

$$FA(\Psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\Psi} \quad (1.10)$$

### 1.3 Factor de array

Mediante el factor de array se puede obtener el patrón de radiación producido por cualquier array de antenas isotrópicas. Si las antenas que conforman el array no fuesen isotrópicos, se podrá obtener el campo radiado total multiplicando el factor de array por el campo radiado de un elemento único. Cada array tiene su propio factor de array. El factor de array, por lo general, queda en función del número de elementos, su disposición geométrica, sus magnitudes relativas, sus fases relativas, y la distancia entre los elementos [3].

El factor de array presenta las siguientes propiedades [1]:

- **Periodicidad:** Se trata de una función periódica del ángulo  $\Psi$  con periodo  $2\pi$ , tal que los coeficientes de su serie de Fourier son los coeficientes de la alimentación  $a_n$ . Gracias a esta propiedad se podrá realizar una sintetización de un patrón de radiación mediante el ajuste de los coeficientes de Fourier del factor de array de la agrupación concreta.
- **Relación con la TF:** El factor de array puede ser definido ahora como la transformada de Fourier de la secuencia discreta de los coeficientes de la alimentación,  $a_n$ .
- **Máximo del factor de array:** Si los coeficientes de la alimentación  $a_n$  son reales y positivos, el máximo del factor de la agrupación se encuentra en el origen  $\Psi = 0$ . Sabiendo que el máximo del diagrama de radiación se encuentra en la dirección en la que los máximos de cada antena se interieren positivamente en el espacio, es decir, en fase, la cual corresponde a un desfase nulo ( $\Psi = 0$ ) en la interferencia cuando los coeficientes son reales y positivos.

- **Margen visible:** Dado que el ángulo  $\theta$  solo tomará valores reales entre 0 y  $\pi$ , se puede deducir el rango de valores de  $\Psi$  para los que este fenómeno toma lugar:

$$\Psi \in [-kd + \alpha, kd + \alpha] \quad (1.11)$$

Solamente el intervalo comprendido en (1.11) pertenece al diagrama de radiación, lo que se conoce como *margen visible* (fig. ??). La longitud del margen visible es de  $2kd$  y está centrado en  $\Psi = \alpha$ , de forma que su tamaño es proporcional al espaciado de la agrupación, normalizado respecto a la longitud de onda y su posición en el eje  $\Psi$  varía con la fase progresiva.

- **Máximo del diagrama de radiación:** Cuando los coeficientes de la alimentación son reales y positivos y si el margen visible incluye el origen  $\Psi = 0$ , el máximo del diagrama de radiación se encuentra en  $\theta_{max}$ .

$$\theta_{max} = \arccos\left(-\frac{\alpha}{kd}\right), \quad |\alpha| \leq kd \quad (1.12)$$

Si se varía la fase de alimentación progresiva  $\alpha$ , sería posible controlar la dirección del máximo de radiación. Este es el principio de funcionamiento de los *Phased arrays*, en las que la dirección del máximo se varía de forma electrónica mediante un control de la fase relativa progresiva de alimentación de los elementos individuales del array.

**Periodicidad de los máximos:** Si el máximo de radiación se encuentra en  $\Psi_{max}$  existirán máximos periódicos en los múltiplos enteros de  $2\pi$ . Cuando estos máximos se encuentran dentro del margen visible:

$$kd + \alpha \geq 2\pi, \quad -kd + \alpha \leq 2\pi \quad (1.13)$$

Aparecerán múltiples máximos de radiación en el espacio real, denominados *lóbulos de difracción* o *grating lobes*. Este fenómeno suele darse cuando el espaciado es de una o más longitudes de onda.

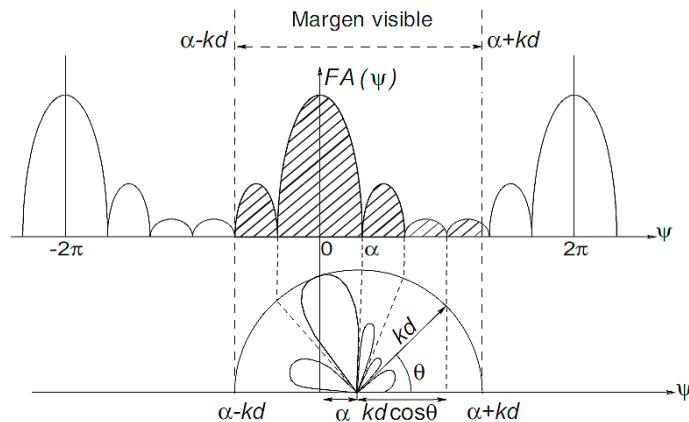


Figura 1.2: Margen visible. [1]

## 1.4 Influencia de los parámetros de diseño

A continuación, se van a realizar un breve resumen sobre los principales efectos que producen sobre el patrón de radiación la modificación de los parámetros de diseño del array, tales como el número de elementos que lo componen, la distancia entre ellos, o el efecto que produciría un desfase relativo en su alimentación. Para la simulación de los efectos deseados se usará el Applet diseñado por Amanogawa para la simulación de arrays uniformes [4].

### 1.4.1 Número de elementos

En primer lugar se comenzará variando el número de elementos que componen el array de dipolos uniformes. La configuración del array se basará en la adición de dipolos de longitud  $\lambda/2$ , alimentados con la misma fase relativa y separados a una distancia entre  $\lambda/4$  y  $\lambda$  para poder ver cómo la separación entre elementos también afecta a la forma inicial del patrón de radiación.

En la tabla 1.1 se puede observar cómo, dado un espacio constante y un aumento del número de elementos del array, la directividad del patrón de radiación va aumentando, y con ello, el número de lóbulos laterales. Se ha de llegar a un compromiso entre la directividad que se desea conseguir en el patrón de directividad final frente al número de lóbulos laterales y la intensidad de estos, a la hora de diseñar un array lineal.

### 1.4.2 Espaciado de elementos

En este caso se modificará la separación entre antenas fijando el número de elementos que componen el array a 4 dipolos  $\lambda/2$ . La principal variación que se observa cuando se aumenta la distancia entre elementos es la aparición de nuevos máximos.

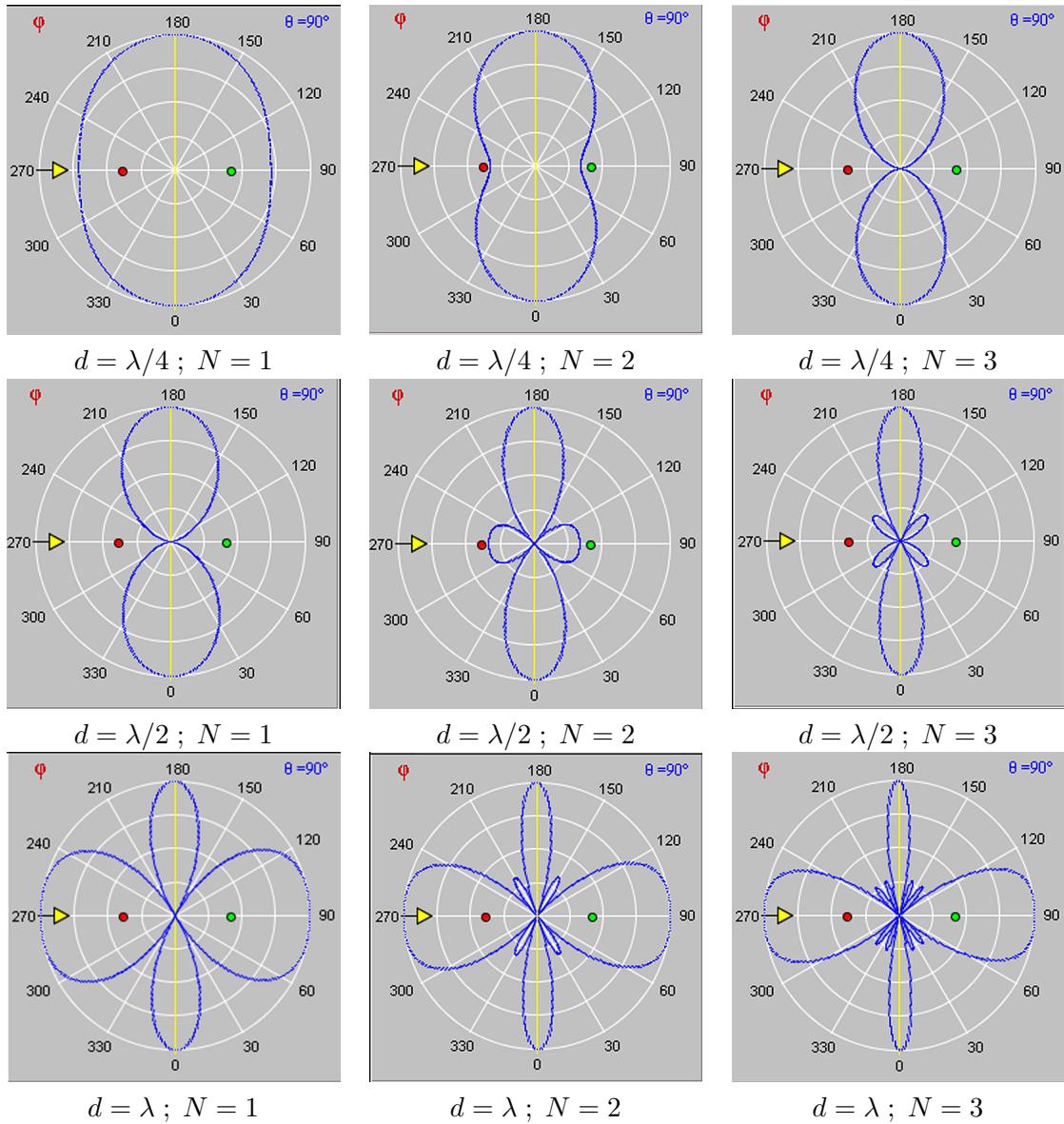
Cuando la distancia de separación es menor a  $\lambda/2$  tan solo aparece un máximo principal. Conforme la separación aumenta de  $\lambda$  encontraremos la aparición de nuevos máximos principales, como ocurre en la tabla 1.2 cuando  $d = \lambda$ . Entre  $\lambda/4$  y  $\lambda$  encontramos aparición de lóbulos laterales. [2]

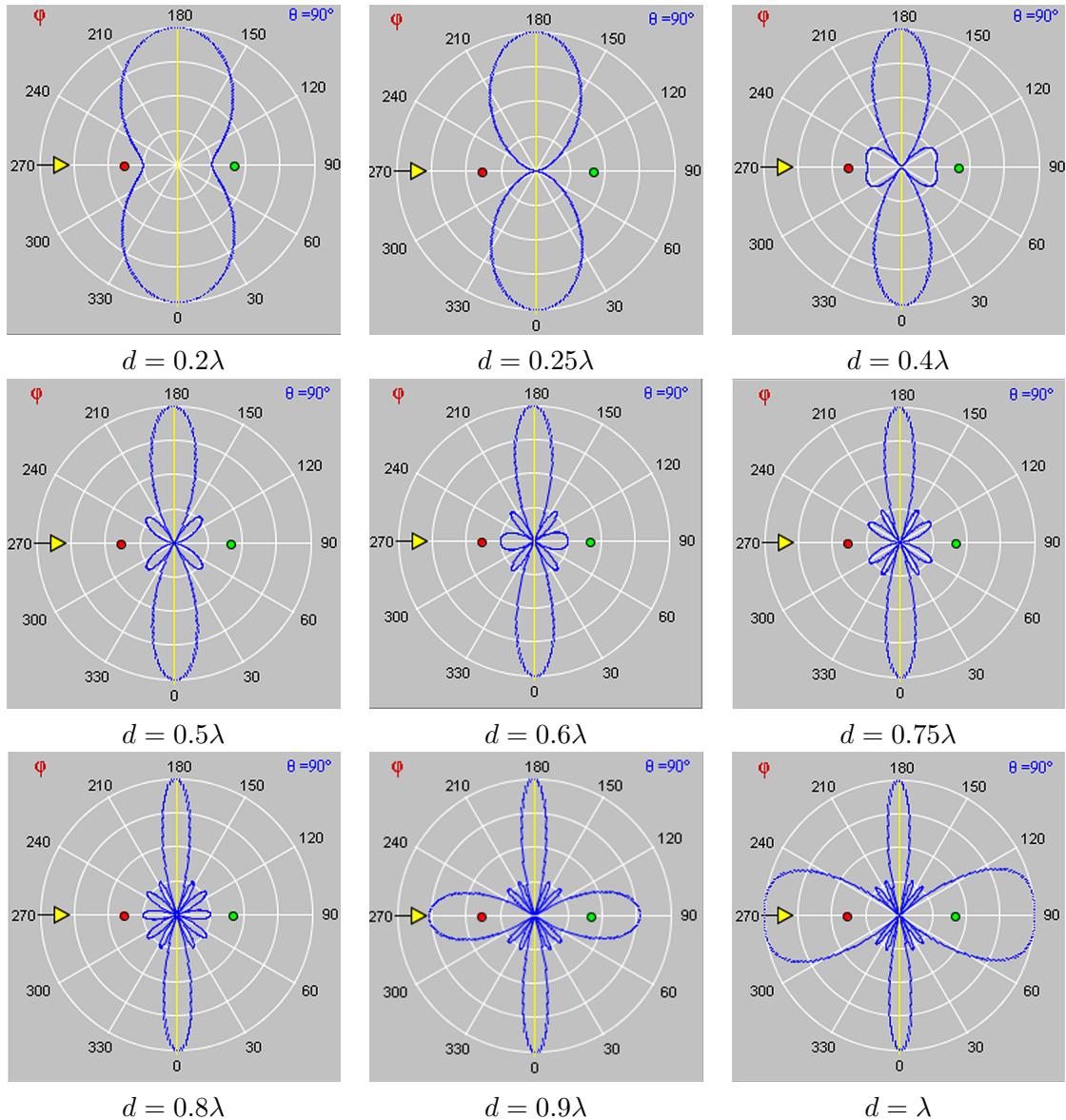
### 1.4.3 Desfase progresivo

En este último caso, se modificará el desfase progresivo entre las antenas de  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ , manteniendo, como en las configuraciones anteriores, un array de 4 dipolos  $\lambda/2$  separados a una distancia de  $\lambda/4$ . [2]

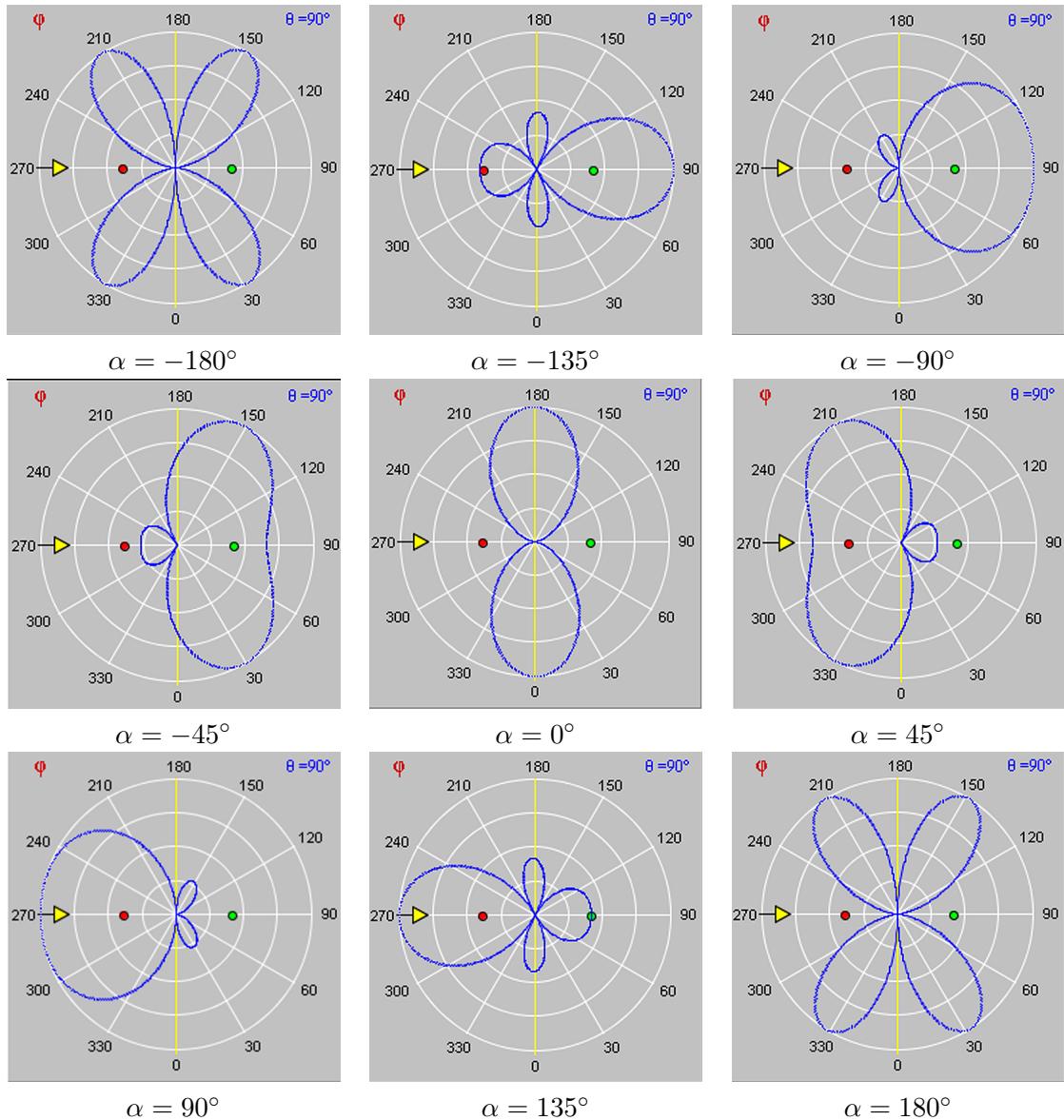
Como se puede comprobar en la tabla 1.3, gracias al efecto producido por el desfase en los dipolos se pueden llegar a conseguir patrones de radiación desde *broadside* hasta *end-fire*. Este es el principio de funcionamiento de los *phased arrays*. Esta capacidad de reconfigurabilidad de las antenas es especialmente útil en antenas donde el sujeto no está fijo y se necesita una gran directividad para desperdiciar la mínima energía posible en la radiación.

---

**Tabla 1.1:** Efecto de adición de elementos sobre array lineal



**Tabla 1.2:** Efecto de la separación de elementos sobre array lineal



**Tabla 1.3:** Efecto del desfase de alimentación de los elementos sobre array lineal

## 1.5 Tipos de agrupaciones

A lo largo de esta sección se realizará un repaso a los principales tipos de agrupaciones usadas para el diseño de arrays de antenas y se hará mención a las características que definen las agrupaciones así como las principales ventajas y aplicaciones de cada una. Definiremos dos tipos principales de agrupaciones según su tipo de distribución en el espacio: unidimensionales, todos los elementos se sitúan a lo largo de un eje común, y bidimensionales, los elementos se sitúan a lo largo de un plano común.

### 1.5.1 Polinomio de agrupación

En la sección 1.3 se ha definido y resumido las principales características del factor de array, siendo interpretado como la transformada de Fourier de la secuencia de alimentaciones  $a_n$ . De la misma manera, se puede definir el *polinomio de agrupación* como la transformada Z de la misma secuencia. [1]

$$P(z) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n z^n = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_{N-1} z^{N-1} \quad (1.14)$$

El polinomio de agrupación se relaciona con el factor de agrupación mediante:

$$FA(\Psi) = P(z)|_{z=e^{j\Psi}} \quad (1.15)$$

Con esto se deduce que el factor de agrupación corresponde al polinomio de agrupación de un array concreto pero muestreado sobre la circunferencia unidad. Cada periodo de  $2\pi$  en  $\Psi$  del factor de agrupación corresponde a una vuelta sobre el círculo unidad en el plazo Z. El diagrama de radiación del array está asociado al intervalo del círculo unidad definido por el margen visible. Como los ceros del polinomio que están situados sobre el círculo unidad y dentro del margen visible corresponden a nulos del diagrama de radiación, se puede aproximar la forma del diagrama de radiación a partir de la posición de los ceros en el plano Z. [1]

### 1.5.2 Agrupaciones unidimensionales

En primer lugar se hará un resumen de las principales agrupaciones unidimensionales y sus características. Como se ha mencionado, las agrupaciones unidimensionales son aquellas en las cuales los elementos que componen la agrupación se sitúan a lo largo de un mismo eje. Dentro de las configuraciones unidimensionales, podemos clasificar tres tipos principales de distribución de corrientes: uniformes, triangulares y binómicas. [1]

El nombre que reciben este tipo de configuraciones viene dado, no por la distribución de las antenas en el espacio, sino por la distribución de los ceros en el polinomio de agrupación en el círculo unidad.

#### 1.5.2.1 Distribución uniforme

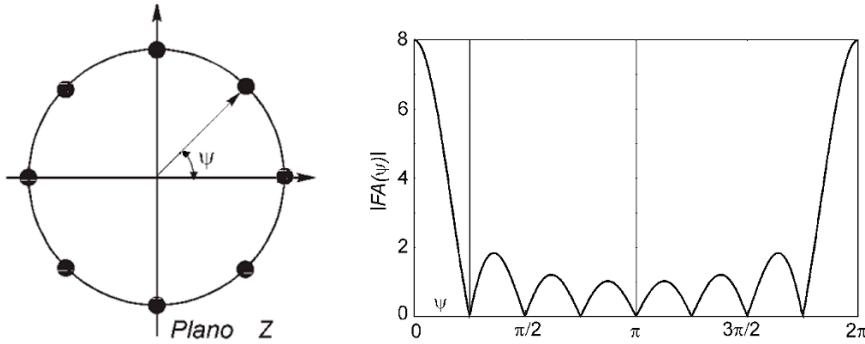
La distribución de corrientes uniforme es aquella en la que se alimentan todos los antenas que componen el array con la misma amplitud de excitación  $a_n = 1$ . Su polinomio de

---

agrupación es: [1]

$$P(z) = 1 + z + z^2 + \dots + z^{N-1} = \frac{z^N - 1}{z - 1} \quad (1.16)$$

De esta expresión se puede deducir que los ceros del polinomio de agrupación en el plano  $Z$  son las raíces  $N$ -ésimas de la unidad salvo  $z = 1$ , y por ello, estos ceros se encuentran equiespaciados sobre el círculo unidad. [1]



**Figura 1.3:** Ceros en el plano  $Z$  y en el módulo del  $FA$  para el caso de un array de 8 elementos y distribución uniforme. [1]

Teniendo en cuenta las ecuaciones 1.15 y 1.16 se puede deducir el factor de agrupación, obteniéndose: [1]

$$|FA(\Psi)| = \frac{|e^{jN\Psi} - 1|}{|e^{j\Psi} - 1|} \quad (1.17)$$

Se puede observar que el factor de agrupación obtenido es una función *sinc* periódica, igual a la TF de un pulso muestrado. [1]

### 1.5.2.2 Distribución triangular

La distribución de corrientes triangular se define para un array con un número de elementos impar. La alimentación de estas viene dada por: [1]

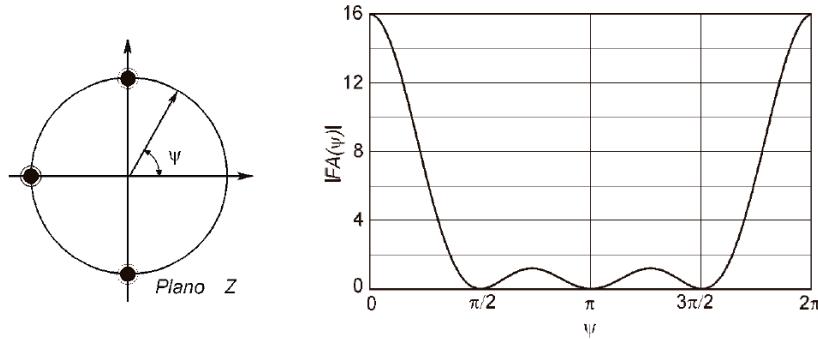
$$a_n = \begin{cases} n+1, & n < \frac{N}{2} \\ N-n, & n > \frac{N}{2} \end{cases} \quad (1.18)$$

Si desarrollamos el polinomio  $Z$  (eq. 1.14 y 1.15), y tenemos en cuenta que la función triangular puede descomponerse en la convolución de dos pulsos iguales cuya longitud es la mitad que la del triángulo, lo que se traduce en un producto de transformadas en el dominio  $Z$ , el polinomio de la distribución de corrientes triangular puede expresarse como: [1]

$$P(z) = 1 + 2z + 3z^2 + \dots + 3z^{N-3} + 2z^{N-2} + z^{N-1} = \left[ \frac{z^{\frac{N+1}{2}} - 1}{z - 1} \right]^2 \quad (1.19)$$

Los ceros de la distribución triangular son los mismos que se obtendrían para el caso de la distribución de corrientes uniformes con  $(N + 1)/2$  antena, pero dobles. El factor de agrupación es también el obtenido para una distribución uniforme de longitud  $[(N + 1)/2]^2$ : [1]

$$|FA(\Psi)| = \frac{|\sin\left(\frac{N+1}{4}\Psi\right)|^2}{|\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)|^2} \quad (1.20)$$



**Figura 1.4:** Ceros en el plano Z y en el módulo del FA para el caso de un array de 7 elementos y distribución triangular. [1]

### 1.5.2.3 Distribución binómica

La distribución de corrientes binómica define el polinomio como un binomio elevado a una potencia y desarrollado según la fórmula de Newton: [1]

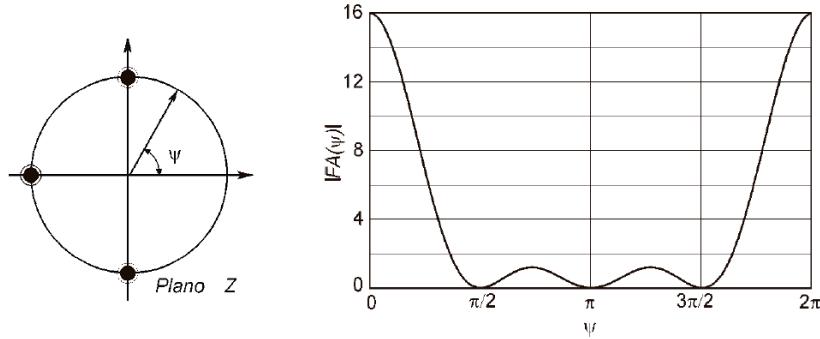
$$P(z) = (z + 1)^{N-1} = \binom{N-1}{0} + \binom{N-1}{1}z + \binom{N-1}{2}z^2 + \dots + \binom{N-1}{N-1}z^{N-1} \quad (1.21)$$

Los coeficientes de excitación del polinomio de agrupación se pueden obtener a través de la expresión de números combinatorios. [1]

$$a_n = \binom{N-1}{n} = \frac{(N-1)!}{n!(N-1-n)!} \quad (1.22)$$

El polinomio de la distribución de corrientes binómica presenta un solo cero, situado en  $\Psi = \Pi$  y con multiplicidad  $N - 1$ . Es por ello que el ancho de haz entre ceros de  $\Psi$  es de  $2\pi$  y no existen lóbulos secundarios en el módulo del factor de agrupación. Sin embargo, en el patrón de radiación si pueden aparecer lóbulos secundarios debido a los lóbulos de difracción, que entra en el margen visible. El factor de agrupación obtenido para esta distribución es: [1]

$$|FA(\Psi)| = \left| 2 \cos \frac{\Psi}{2} \right|^{N-1} \quad (1.23)$$



**Figura 1.5:** Ceros en el plano Z y en el módulo del FA para el caso de un array de 8 elementos y distribución binómica. [1]

### 1.5.3 Agrupación lineal uniforme

La agrupación lineal uniforme es aquella en la que los elementos que componen el array están equiespaciados y excitados con la misma amplitud. Se trata de una configuración muy usada y estudiada. Este tipo de agrupaciones también tiene utilidad en aplicaciones de acústica, donde las antenas serían sustituidas por micrófonos o altavoces para lograr mayores ganancias. En el caso de las antenas, las características de la agrupación lineal uniforme son básicas para el diseño de aplicaciones RADAR.

Se va a mencionar dos tipos de configuraciones lineales uniformes según el tipo de patrón de radiación que se desea obtener en el diseño final. En la sección 1.4.3 se hizo mención a los conceptos *broadsire* y *endfire*. Estos conceptos definen los casos en los que el máximo de radiación sea transversal (*broadsire*) o longitudinal (*endfire*) con respecto al eje de la agrupación. [1]

#### 1.5.3.1 Agrupaciones transversales

Las configuración transversal o *broadsire* es muy usada en aplicaciones que requiere un máximo de radiación en el eje normal al array ( $\theta_0 = 90^\circ$ ). Para conseguir este resultado se debe diseñar el array tal que el máximo de radiación de un solo elemento así como el máximo de radiación del factor de array deben dirigirse a  $\theta_0 = 90^\circ$ . [3]

Para conseguir que el máximo de radiación de un solo elemento radie en esta dirección basta con saber elegir qué elemento radiante es el mejor para nuestro sistema. Por otro lado, para conseguir que el factor de array tenga un máximo en  $\theta_0 = 90^\circ$ , se deberá ajustar correctamente la separación y la fase de excitación de los elementos del array. Se tomará como punto de partida la ecuación 1.8, en la que buscaremos un nulo (máximo de radiación). [3]

$$\Psi = kd \cos \theta + \alpha = 0 \quad (1.24)$$

De donde obtenemos  $\alpha$  como:

$$\Psi = kd \cos \theta|_{\theta=90^\circ} + \alpha \rightarrow \alpha = 0 \quad (1.25)$$

De la ecuación 1.25 se deduce que, para que el factor de array tenga un máximo en  $\theta_0 = 90^\circ$ , no debe existir ningún desfase a la hora de excitar los elementos del array, así como ninguna diferencia de amplitud en la excitación. Aunque la separación de los elementos puede tomar cualquier valor, para asegurarnos que no existan lóbulos de difracción, esta separación no debe tomar valores múltiplos enteros de la longitud de onda. [3]

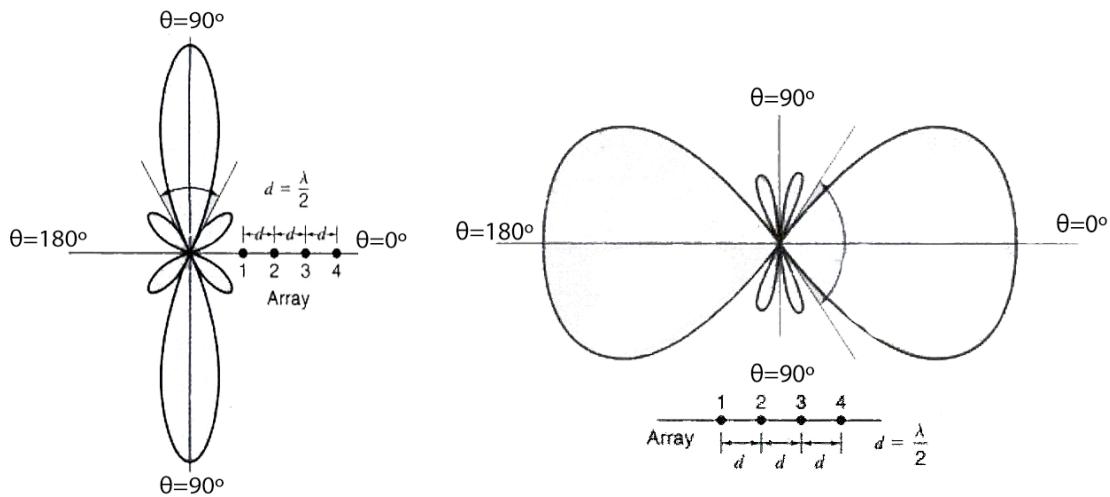
### 1.5.3.2 Agrupaciones longitudinales

Por otro lado tenemos la configuración denominada longitudinal o *end-fire*. En este caso el máximo de radiación se encontrará a lo largo de la dirección del array, y no en la normal de esta, como en el caso *broadside*. Con este tipo de configuraciones es, además, posible conseguir que solo exista el máximo en una dirección, ya sea a  $\theta_0 = 0^\circ$  ó  $\theta_0 = 180^\circ$ . Partiendo de la ecuación 1.8 buscaremos los máximos  $\Psi = 0$  para los ángulos de  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . [3]

$$\Psi = kd \cos \theta + \alpha|_{\theta=0^\circ} \rightarrow kd + \alpha = 0 \rightarrow \alpha = -kd \quad (1.26)$$

$$\Psi = kd \cos \theta + \alpha|_{\theta=180^\circ} \rightarrow kd + \alpha = 0 \rightarrow \alpha = kd \quad (1.27)$$

Se puede comprobar como para conseguir máximos de radiación en la dirección de  $0^\circ$  se debe alimentar el array con una fase progresiva de  $\alpha = -kd$ , y  $\alpha = kd$  en el caso de la dirección de  $180^\circ$ . Si la separación de los elementos es de  $d = \lambda/2$ , se obtendrán máximos de radiación en ambas direcciones. Además, esta separación es múltiplo entero de  $\lambda$ , se obtendrán máximos tanto en las direcciones de  $0^\circ$  y  $180^\circ$  características de la configuración *end-fire* como en las direcciones de  $90^\circ$ , es decir, de la configuración *broadside*. [3]



**Figura 1.6:** Comparación de radiación *broadside* y *endfire*

### 1.5.4 Agrupaciones bidimensionales

Las agrupaciones bidimensionales son aquellas en las que los elementos que conforman el array se sitúan sobre un plano común. En las agrupaciones unidimensionales, el diagrama de radiación producido se caracterizaba por tener una simetría de revolución respecto al eje de la agrupación. Las agrupaciones bidimensionales permiten obtener diagramas de radiación más complejos, y brindan la capacidad de dirigir el haz de propagación en las dos coordenadas esféricas del espacio ( $\theta, \phi$ ), sin las restricciones impuestas por la simetría de revolución. [1]

#### 1.5.4.1 Agrupación bidimensional uniforme

La agrupación bidimensional más sencilla es la agrupación bidimensional uniforme. Esta configuración se caracteriza por tener una distribución de antenas rectangular a lo largo de un mismo plano, conformada por  $M \times N$  antenas idénticas, equiespaciadas con separación  $d_x$  a lo largo del eje  $x$  y  $d_y$  a lo largo del eje  $y$ , y alimentadas con una corriente  $I_{mn}$ , es decir, con la capacidad de alimentación individual. [1]

El factor de agrupación será el resultado de la interferencia en el campo lejano de la radiación de todas las antenas. Por analogía a la ecuación 1.7, el factor de agrupación para una agrupación bidimensional uniforme es: [1]

$$FA(k_x, k_y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{mn} e^{jm k_x d_x} e^{jn k_y d_y} \quad (1.28)$$

Para una excitación con fase progresiva  $\alpha_x$  en la dirección  $x$  y  $\alpha_y$  en la dirección  $y$ . [1]

$$FA(k_x, k_y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{mn} e^{jm k_x d_x} e^{jn k_y d_y} e^{jm \Psi_x} e^{jn \Psi_y} \quad (1.29)$$

Definiendo los ángulos  $\Psi_x$  y  $\Psi_y$  como el desfase eléctrico entre las contribuciones en campo lejano de dos elementos consecutivos en los planos  $(x, z)$  y  $(y, z)$ : [1]

$$\begin{aligned} \Psi_x &= kd_x \sin \theta \cos \phi + \alpha_x \\ \Psi_y &= kd_y \sin \theta \sin \phi + \alpha_y \end{aligned} \quad (1.30)$$

Resultando el factor de agrupación: [1]

$$FA(\Psi_x, \Psi_y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{mn} e^{jm \Psi_x} e^{jn \Psi_y} \quad (1.31)$$

Mediante la variación de la longitud de onda  $\lambda$ , los espaciados eléctricos  $d_x/\lambda$  y  $d_y/\lambda$ , o las fases progresivas  $\alpha_x$  y  $\alpha_y$ , se pueden controlar los ángulos  $\theta_{max}$  y  $\phi_{max}$  para dirigir el haz de máxima radiación en la dirección deseada. También, si se aumenta la distancia de separación hasta superar  $\lambda$  se podrán obtener lóbulos de difracción, o *gratin lobes* que podrán actuar como segundos haces en caso de que fuera necesario para la aplicación.

En este proyecto, las agrupaciones diseñadas se basan en agrupaciones bidimensionales uniformes, lo que significa que los arrays a diseñar, dispondrán de antenas dispuestas a lo largo de un mismo plano común, y las antenas estarán siempre equiespaciadas con sus antenas colindantes laterales, superiores e inferiores, pero no con las diagonales.

# Bibliografía

- [1] CARDAMA, A.N., JOFRE, R.L., RIUS, C.J.M., ROMEU, R.J., BLANCH, B.S., and FERNANDO, B.M. *Antenas*. Edicions UPC, 2002. ISBN 9788489636323. URL <https://www.worldcat.org/title/antenas-ejercicios-y-problemas/oclc/626483782>.
- [2] VALERO, A., ESTEBAN, H., and FERNANDO, B.M. *Agrupación de antenas*, 2008. URL [http://www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Agrupaciones.pdf](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Agrupaciones.pdf).
- [3] BALANIS, C.A. *Antenna Theory*. John Wiley & Sons, 2015. URL [https://www.ebook.de/de/product/25674970/constantine\\_a\\_balanis\\_antenna\\_theory.html](https://www.ebook.de/de/product/25674970/constantine_a_balanis_antenna_theory.html).
- [4] AMANO GAWA. *Uniform dipole array*, 2019. URL <http://www.amanogawa.com/archive/AntennaArray/AntennaArray.html>.
- [5] STODART, G.J. *Engraving of james clerk maxwell*, Circa. 1890. URL [https://es.wikipedia.org/wiki/James\\_Clerk\\_Maxwell#/media/Archivo:James\\_Clerk\\_Maxwell.png](https://es.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell#/media/Archivo:James_Clerk_Maxwell.png).
- [6] 3GPP. *Release 15*, 2019. URL <https://www.3gpp.org/release-15>.
- [7] HUFFAKER, S. *Martin cooper*, 2009. URL <https://www.britannica.com/biography/Martin-Cooper>.
- [8] MUESA, K., SELONEN, P., and SARIOLA, A. *Stadika 5g*, 2019. URL <https://kerrokantasi.hel.fi/5g/X0Tms8W3uL5ZVQ6QzRheZR10qr72QyQm?headless=false&lang=sv>.
- [9] *Wd140-n dipole*, 2012. URL [https://www.sirio.store/pdf/wd\\_140\\_155\\_n.pdf](https://www.sirio.store/pdf/wd_140_155_n.pdf).
- [10] YAVUZ, M.E. *Dipole radiation pattern [fdtd simulation]*. URL <https://www.youtube.com/watch?v=Fp26Bjm99VI&feature=share>.
- [11] *Dipolo de fm com refletor*, 2008. URL [https://idealantenas.com.br/Espanhol/espa%C3%B3ol/produtosport/fm/pdfdipolo1\\_2%20ondacomrefletor.pdf](https://idealantenas.com.br/Espanhol/espa%C3%B3ol/produtosport/fm/pdfdipolo1_2%20ondacomrefletor.pdf).
- [12] PEARCE, R. *Yagi antenna array*, 2010. URL <https://www.flickr.com/photos/22760956@N08/4732854900/>.
- [13] FRENZEL, L. *What's the difference between a dipole and a ground plane antenna?*, 2013. URL <https://www.electronicdesign.com/wireless/what-s-difference-between-dipole-and-ground-plane-antenna>.
- [14] SAGDEJEV, I. *Mast radiator*, 2008. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Mast\\_radiator#/media/File:2008-07-28\\_Mast\\_radiator.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Mast_radiator#/media/File:2008-07-28_Mast_radiator.jpg).

- [15] NASA. *Holmdel horn antenna*, 1962. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Holmdel\\_Horn\\_Antenna#/media/File:Horn\\_Antenna-in\\_Holmdel,\\_New\\_Jersey.jpeg](https://en.wikipedia.org/wiki/Holmdel_Horn_Antenna#/media/File:Horn_Antenna-in_Holmdel,_New_Jersey.jpeg).
- [16] MICIU. *Radiotelescopio de 30m del iram (pico veleta, granada)*, 2019. URL <http://www.ciencia.gob.es/portal/site/MICINN/menuitem.edc7f2029a2be27d7010721001432ea0/?vgnextoid=d29a02133a578610VgnVCM1000001d04140aRCRD&vgnextchannel=97b2b572c7ea2510VgnVCM1000002006140aRCRD>.
- [17] PIPES, R. *Galileo in-orbit validation satellite*, 2011. URL [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2011/10/Galileo\\_In-Orbit\\_Validation\\_satellite](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2011/10/Galileo_In-Orbit_Validation_satellite).
- [18] ENDUROSAT. *X-band 4 element patch antenna array*, 2018. URL <https://www.endurosat.com/cubesat-store/all-cubesat-modules/x-band-2x2-patch-array/>.
- [19] 5GAMERICAS. *5g spectrum vision*, 2019. URL [https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/5G\\_Americas\\_5G\\_Spectrum\\_Vision\\_Whitepaper-1.pdf](https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/5G_Americas_5G_Spectrum_Vision_Whitepaper-1.pdf).
- [20] TOPPR. *Propagation of electromagnetic waves*, 2017. URL <https://www.toppr.com/guides/physics/communication-systems/propagation-of-electromagnetic-waves/>.
- [21] AMITEC. *Microstrip patch antenna array 22*, 2018. URL <https://amitec.co/microstrip-patch-antenna-array-22/>.
- [22] URJC. *Agrupaciones de antenas (arrays)*, 2014. URL <http://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Tema%206%20Arrays.pdf>.

# **Lista de Acrónimos y Abreviaturas**

<b>1G</b>	1 <sup>a</sup> Generación.
<b>2G</b>	2 <sup>a</sup> Generación.
<b>3G</b>	3 <sup>a</sup> Generación.
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project.
<b>4G</b>	4 <sup>a</sup> Generación.
<b>4G LTE</b>	4 <sup>a</sup> Generación (Long Term Evolution).
<b>5G</b>	5 <sup>a</sup> Generación.
<b>AM</b>	Amplitud Modulada.
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System.
<b>ATT</b>	American Telephone and Telegraph.
<b>CTNE</b>	Compañía Telefónica Nacional de España.
<b>FEM</b>	Finite Element Method.
<b>FM</b>	Frecuencia Modulada.
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service.
<b>GPS</b>	Global Positioning System.
<b>GSM</b>	Global System for Mobile communications.
<b>GTD</b>	Geometric Theory of Diffraction.
<b>HSPA</b>	High Speed Packet Access.
<b>IoT</b>	Internet Of Things.
<b>IRAM</b>	Instituto Radio Astronómico Milimétrico.
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union.
<b>LTE</b>	Long Term Evolution.
<b>M2M</b>	Machine To Machine.
<b>MIMO</b>	Multiple Imput Multiple Output.
<b>MINETUR</b>	Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.
<b>mMIMO</b>	Massive MIMO.
<b>mmWave</b>	Milimeter Wave.
<b>NMT</b>	Nordic Mobile Telephone.
<b>NTT</b>	Nippon Telegraph and Telephone.
<b>O.E.M</b>	Ondas Electromagnéticas.
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board.
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation.
<b>RAN</b>	Radio Access Network.

<b>TACS</b>	Total Access Communications System.
<b>TDT</b>	Televisión Digital Terrestre.
<b>TE</b>	Transversal Eléctrico.
<b>TIC</b>	Tecnologías de la Información y la Comunicación.
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System.
<b>VoIP</b>	Voice over IP.
<b>W-CDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access.
<b>Wi-Fi</b>	.