## Tema 1 - Definición y fundamentos

## Definiciones

- Radiación: emisión de ondas electromagnéticas al espacio libre
- Propagación: transporte de ondas electromagnéticas por el espacio libre desde un punto de transmisión (Tx) al punto o los puntos de recepción (Rx).
- Alcance: Máxima distancia que una señal es capaz de recorrer antes de atenuarse y no distinguirse del ruido.
- Relación frecuencia tamaño de la antena: de manera general, se puede afirmar que el tamaño de una antena es directamente proporcional a la longitud de onda en la que trabaja. Así, para trabajar a frecuencias muy bajas, las antenas tendrán que ser grandes y viceversa.
- Microondas: Ondas electromagnéticas de entre 300MHz y 300GHz de frecuencia, con, por lo tanto, longitudes de onda de entre 1mm y 1m
- Colimar: Obtener o concentrar un haz de rayos paralelos a partir de un foco luminoso

Medio físico: puede ser:

- Medios guiados, es decir, cables. En ellos se miden tensiones y corrientes.
- Espacio libre. En ellos se miden campos electromagnéticos.

El medio físico está caracterizado por:

- Permitividad eléctrica  $\varepsilon$  ( $C^2/Nm^2 \circ F/m$ )
- Permeabilidad magnética  $\mu (Ns^2/C^2 \circ N/A^2)$
- <sub>o</sub> Relacionando ambos parámetros tenemos la impedancia intrínseca:  $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{c}}$  (Ω)

Estos parámetros definen de qué manera el medio permite a los campos electromagnéticos propagarse en su interior. Antena: dispositivo diseñado para emitir o recibir ondas electromagnéticas.

El vacío es el medio ideal, sus características son:

Impedancia intrínseca (o de onda del medio)

Velocidad de la luz

Permitividad relativa, relación de la permitividad eléctrica del medio real con la del vacío

- Antena emisora: transforma voltajes y corrientes presentes en el medio físico (en este caso un cable) en ondas electromagnéticas que se emiten al espacio libre.
- Antena receptora: realiza la función inversa a la antena emisora. Transforma ondas electromagnéticas presentes en el espacio libre a voltajes y corrientes que vuelca en el medio físico.

## Parámetros importantes de campos electromagnéticos

Conductividad de un material  $\sigma$  (S/m)

Frecuencia f (Hz) Longitud de onda  $\lambda = \frac{c}{f}$  (m) Número de onda  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  (m<sup>-1</sup>)

Los campos eléctrico  $(\overrightarrow{E})$  y magnético  $(\overrightarrow{H})$  son siempre perpendiculares entre sí.

## **Campo lejano**

Regiones del espacio según cercanía a la antena transmisora:

- Entorno cercano a la antena transmisora. Aquí los campos siguen una geometría compleja y es difícil calcular su valor. Aquí el campo electromagnético no es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Se desglosa en dos regiones:
  - Región del campo próximo reactivo: región próxima a la antena donde predomina el campo reactivo causado por los términos  $1/r^2$  y  $1/r^3$
  - Región del campo próximo radiante o zona de Fresnel: región intermedia entra la de campo reactivo y la de campo lejano.
- Entorno lejano a la antena transmisora, región de campo lejano o zona de Fraunhofer: se caracteriza porque la distribución angular (diagrama de radiación) del campo radiado es independiente de la distancia a la antena (r). Aquí los campos varían como 1/r.



En la región de campo lejano se hace la simplificación de considerar las ondas planas lo cual implica que los campos eléctrico y magnético están en fase y son perpendiculares además de entre sí (como siempre), a la dirección de propagación de la onda.



Condición de campo lejano o distancia de Fraunhofer:

$$d \ge \frac{2D^2}{\lambda}$$
 (m)

Siendo D es la dimensión máxima de la antena

Además, en campo lejano, la dependencia del campo electromagnético con la distancia es la de una onda esférica, con expresión general:

$$\vec{E} = \frac{E_0}{r} e^{-jk_0 r} \hat{u}_E(N/C \circ V/m)$$

Donde  $\hat{u}_E$  indica la dirección del vector campo eléctrico y r (también llamado a veces z) es la única variable y representa la dirección de propagación de la onda, por lo que es perpendicular a  $\hat{u}_E$ .

Que un vector sea perpendicular a una dirección implica que no contiene componente en dicha dirección. Por ejemplo:

- En cartesianas, si la dirección de propagación de la onda plana es z, E y H pueden contener componentes en x o y pero no en z.
- $\circ$  En esféricas, la dirección de propagación es r (a veces la llaman z) por lo que E y H pueden tener componentes en  $\phi \circ \theta$ .

## Poynting

El teorema de Poynting expresa la ley de conservación de la energía:

$$p_{entregada \ a \ la \ antena} = p_{disipada \ por \ efecto \ Joule} + p_{radiada \ por \ la \ antena} (W)$$

El vector de Poynting representa la densidad de potencia radiada (también llamada intensidad de radiación):

$$\langle \vec{s} \rangle = \frac{1}{2} Re \left\{ \vec{E} \ x \vec{H} \right\} \quad (W/m^2)$$

El módulo del vector de Poynting tiene la expresión:

$$\left|\langle \vec{s} \rangle\right| = \frac{\left|\vec{E}\right| \left|\vec{H}\right|}{2} = \frac{\left|\vec{E}\right|^2}{2\eta_0} \quad (W/m^2)$$
$$\left|\langle \vec{S} \rangle\right| = 10\log\left(\left|\langle \vec{s} \rangle\right|\right) \quad (dBW/m^2)$$

*Nota:* Para calcular  $\left| \vec{E} \right|^2$ , primero se hace el módulo del vector de campo, que es complejo y luego se eleva al cuadrado

Se puede calcular también el mismo módulo, pero independientemente de la distancia:

$$\left|\langle \vec{s} \rangle\right| = \frac{p_{entregada \ a \ la \ antena} \cdot g}{4\pi} \quad (W/Estereoradian)$$

Nota: El módulo de este vector se suele calcular en la dirección del máximo, que es cuando el ancho de haz es -3dB, esto será para  $\theta = X^{\circ}$ . Análogamente, cuando me lo piden en la mitad del ancho de haz,  $\theta = X/2^{\circ}$ , el módulo del vector será la mitad también.

Este vector decrece siempre como  $1/r^2$  y su dirección es radial.

La potencia total radiada por una antena se puede expresar como:

$$p_{radiada \ por \ la \ antena} = Superficie \ encerrada \ por \ la \ antena \cdot |\langle S \rangle$$

Las extrapolaciones en cuanto al campo eléctrico y al módulo del vector de Poynting se hacen sabiendo como decrecen, es indirectamente proporcional, por ejemplo:

• Sabiendo que el campo a 300m es de 5V/m, ¿cuánto es a 100m? A esto se llega mediante la regla de tres siguiente:



ya que decrece como 1/r, siendo esta la ecuación aplicada en la columna derecha de la regla de tres, por lo que el resultado será 15(V/m).

## Tema 2 – Parámetros básicos de radiación

Banda de frecuencias		Nombre	Servicios
Mín.	Máx.		
3Hz	300Hz	(ELF) Extremely low frequency	Comunicaciones de submarinos
3kHz	30kHz	(VLF) Very low frequency	Navegación, sónar
30kHz	300kHz	(LF) Low frequency	Navegación, sónar
300kHz	3000kHz	(MF) Medium frequency "onda media"	Retransmisiones AM, radio marítima, comunicaciones de la guardia costera
3MHz	30MHz	(HF) High frequency	Teléfono, telégrafo, radio amateur, comunicaciones mar a tierra y mar a aire
30MHz	300MHz	(VHF) Very high frequency	Televisión, retransmisiones FM, control del tráfico aéreo, policía, servicios de taxi
300MHz	3000MHz	(UHF) Ultrahigh frequency	Televisión, comunicación satélite, radiosondas, radas de vigilancia
3000MHz	30GHz	(SHF) Superhigh frequency	Radar, comunicaciones móviles, comunicación satélite
30GHz	300GHz	(EHF) Extremely high frequency	Radar, usos experimentales

## Espectro radioeléctrico – Aplicaciones según frecuencia

Sombreadas en azul las frecuencias del rango de las microondas

Frequency band	Frequency range (GHz)
L band	1-2
S band	2-4
C band	4-8
X band	8-12
Ku band	12-18
K band	18-27
Ka band	27-40
V band	40-75
W band	75-110

## Impedancia de una antena

Se define la impedancia de entrada (resistencia, reactancia) de una antena como el cociente V/I:



Antenaresonante  $\leftrightarrow$  Sepierde la mínima potencia posible

Impedancia =  $f(Dimensionantena) \leftrightarrow SiL \cong \lambda/2 \ la antena \ serar resonante$ 

Las antenas se diseñan para ser resonantes a la frecuencia central de la banda de utilización. Esto facilita la adaptación de impedancias, que es cuando la impedancia a la entrada de la antena es igual que a la salida (antena adaptada). A veces no es posible lograr resonancia, sobre todo a frecuencias bajas pues habría que hacer antenas excesivamente grandes, pero siempre se trata de minimizar la reactancia al máximo.

La resistencia de entrada, parte real de impedancia, es la suma de la resistencia de radiación y de la resistencia de pérdidas. Estas dos últimas no existen físicamente, sino que se definen para poder expresar la potencia radiada y la potencia disipada.

$$R_{i} = R_{p\acute{e}rdidas} + R_{radiación} \quad (\Omega)$$

$$p_{radiada \, por \, la \, antena} = \frac{1}{2}I^{2}R_{radiación} \quad (W)$$

$$p_{disipada} = \frac{1}{2}I^{2}R_{p\acute{e}rdidas} \quad (W)$$

## Diagrama de radiación de una antena

Las antenas, según su capacidad de radiación se clasifican en:

- Isótropas: si son ideales, radian por igual en todas las direcciones
- Omnidireccional: si son isótropas en una dirección

El diagrama de radiación de una antena es una representación de las propiedades direccionales de radiación de la antena en el espacio tomando condiciones de campo lejano.



En estos diagramas lo más común es presentar en dB magnitudes relativas a la antena isótropa. El valor máximo del diagrama representa el punto o la dirección en la cual la energía es la misma que radiaría una antena isótropa. Es por esto que si dan como dato una antena isótropa, su directividad siempre será 1 o 0dB.

El ancho del haz principal a -3dB se refiere al punto de potencia mitad respecto al máximo y su relación con el ancho de haz entre nulos es:

## $BW_{nulos} = 2'25BW_{-3dB}$

Nota: En vez de dar la gráfica del diagrama de radiación, pueden darlo en modo de ecuación, si esta ecuación tiene simetría par, el diagrama de radiación tiene simetría de revolución y el ancho a -3dB es equivalente para el plano E y para el plano H

Nota: El ancho de haz lo pueden llamar también "HP"

## Principio de reciprocidad

### Características antenas en recepción $\equiv$ Características antena en transmisión

Este principio también nos asegura que los diagramas de radiación de una antena son idénticos en transmisión y en recepción.

## Parámetros de antenas

• Coeficiente de reflexión:

$$\Gamma = \frac{Z_{antena} - Z_{LDT}}{Z_{antena} + Z_{LDT}} \quad (A \, dim \, . \,)$$

 $\Gamma = 0 \leftrightarrow Z_{antena} = Z_{LDT} \leftrightarrow Antena resonante adaptada$ 

(Máxima transferencia de potencia)

• Relación de onda estacionaria (ROE o VSWR):

$$ROE = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (A \, dim.)$$

 $ROE = 1 \leftrightarrow Máximatransferencia de potencia$ 

• Pérdidas de retorno (siempre negativas)

$$P.R = 10\log \frac{p_{reflejada}}{p_{incidente}} = 20\log |\Gamma| \quad (dB)$$

 Rendimiento de reflexión: Indica la cantidad de potencia que se entrega a la antena de toda la potencia que sale del generador (todas estas fórmulas son agnósticas de lo que pueda pasar con la potencia radiada, es decir, del hipotético receptor)

$$\eta_{reflexión} = 1 - \left| \Gamma \right|^2$$

 $p_{entregada \ a \ la \ antena} = p_{generador} \cdot \eta_{reflexión}$ 

 $p_{radiada \ por \ la \ antena} = p_{entregada \ a \ la \ antena} \cdot \eta_{radiación} = p_{generador} \cdot \eta_{reflexión} \cdot \eta_{radiación}$ 

 $P_{radiada \, por \, la \, antena} = P_{entregada \, a \, la \, antena} - L_{transmisor/ \, cadena \, alimentación}$ 

Nota: a la potencia del generador también se le puede llamar potencia disponible en el transmisor

• Pérdidas por desadaptación de impedancias

$$L_{desadaptación \ de \ impedancias} = 10 \log \left( 1 - \left| \Gamma \right|^2 \right) \quad (dB)$$

 Ganancia directiva: relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección en particular con la densidad de potencia radiada al mismo punto por la antena isótropa de referencia. La máxima ganancia directiva de una antena es la directividad, o lo que es lo mismo, la directividad es la ganancia directiva en la dirección de máxima radiación.

$$d_{0} = 4\pi r^{2} \frac{\left|\langle \vec{s} \rangle\right|}{P_{radiada \ por \ la \ antena}} \approx \frac{4\pi}{BWE_{-3dB(rad)}BWH_{-3dB(rad)}} \approx \frac{41253}{BWE_{-3dB(deg)}BWH_{-3dB(deg)}} \quad (A \ dim \ .)$$
$$D_{0} = 10 \log d_{0} \quad (dBi)$$

$$d_0 SIEMPRE \ge 0 dBi$$

Siendo BWE y BWH equivalentes a  $2\theta_E$  y  $2\theta_H$  respectivamente. Estos anchos de haz, también llamados "ángulo total", se suelen obtener a partir del diagrama de radiación de la siguiente manera:

 Con el corte a -3dB se ve el ancho de banda de 2° entre ambas líneas negras, a menos que digan lo contrario, este será el valor tanto de BWE como de BWH.



• Ganancia (de potencia) o máxima intensidad de radiación: es la amplificación que aplica la antena a la señal del circuito para poder radiarla.

$$g = 4\pi r^2 \frac{\left|\langle \vec{S} \rangle\right|}{P_{entregada \ a \ la \ antena}} \quad (A \ dim \ .)$$
$$G = 10 \log g \ (dBi)$$

Nota: por ejemplo, que la ganancia de una antena sea 30dBi significa que la intensidad de radiación en la dirección de máxima radiación es 30dB mayor que la de una antena isótropa con la misma potencia de entrada

• Rendimiento de radiación

$$\eta_{radiación} = \frac{P_{radiada \, por \, la \, antena}}{P_{entregada \, a \, la \, antena}} = \frac{g}{d_0} \quad (A \, dim \, .)$$
$$\eta_{radiación} = \frac{1}{l_{cadena \, alimentación}} \quad (A \, dim)$$

Si no dan datos acerca del rendimiento de radiación y lo necesito para los cálculos, se supone 1.

• PIRE: Potencia isotrópica radiada equivalente. Es una forma de medir la potencia real final emitida por una antena en una dirección.

 $pire = g \cdot P_{entregada \ a \ la \ antena} = d_0 \cdot P_{radiada \ por \ la \ antena} \quad (W)$ 

$$pire = 4\pi d^{2} \left| \langle \vec{S} \rangle \right| \quad (W)$$

$$PIRE = P_{TX} + G_{TX} \quad (dBW)$$

$$PIRE_{minima} = PIRE - 3dB$$

$$\left| \langle \vec{s} \rangle \right| \left( dBW/m^{2} \circ dBm/m^{2} \right) = pire \left( dBW \circ dBm \right) - 10 \log \left( 4\pi d^{2} \right) (dB)$$

 $^{\circ}$   $\,$  Ancho de banda: Rango de frecuencias en las que puede trabajar la antena

$$BW = f_{máx} - f_{mín} \quad (Hz)$$

 Polarización: Es la figura que, en función del tiempo, traza el extremo del vector de campo radiado y su sentido de giro, visto por un observador situado en la antena. Una antena en recepción sólo puede captar potencia contenida en un campo con la misma polarización que la suya.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E_0}e^{-jk_0\hat{z}} \rightarrow \vec{E_0} = \vec{E_{or}} + \vec{E_{oi}}$$

La polarización puede ser:

 Lineal si el campo sólo tiene una componente o dos componentes que están en fase (su producto vectorial es cero)

$$\vec{E_{or}} = 0$$
 **ó**  $\vec{E_{oi}} = 0$  **ó**  $\vec{E_{or}} \mid \vec{E_{oi}} \mid \vec{E_{oi}} \mid \vec{PV} = 0$ 

Circular si las componentes no están en fase, pero su módulo coincide (su producto escalar es cero)

$$\left| \vec{E_{or}} \right| = \left| \vec{E_{oi}} \right|$$
 y  $\vec{E_{or}}$  perpendicular a  $\vec{E_{oi}}$  (PE = 0)

Elíptica si las componentes no están en fase, y su módulo no coincide. Si no es lineal ni circular, es elíptica.



Por lo general, la polarización está relacionada con la forma geométrica que tiene la antena, es decir, si una antena tiene una forma lineal trabajará con polarización lineal y análogamente para antenas de polarización circular o elíptica.

Sentido de polarización: Dado el vector de campo eléctrico y los módulos de sus componentes

$$\left(\vec{E_{oi}} \times \vec{E_{or}}\right) \hat{n} \begin{cases} > 0 \iff \text{Sentido de giro positivo o a derechas (RHC)} \\ < 0 \iff \text{Sentido de giro negativo o a izquierdas (LHC)} \\ = 0 \iff \text{No gira (Polarización lineal)} \end{cases}$$

 En la realidad las polarizaciones que se consiguen nunca son perfectamente circulares o lineales, sino que siempre son elípticas. Por lo tanto, se distinguen las siguientes componentes:

- Componente copolar: polarización del campo deseada.
- Componente contrapolar: polarización ortogonal a la copolar.

Por ejemplo, en polarización circular, las componentes RHC y LHC son ortogonales entre sí.

Si piden la polarización de la antena receptora cuando la antena transmisora es de polarización elíptica, hay que ver si la polarización de la onda transmitida se acerca más a polarización circular o a polarización lineal:

- Si la polarización elíptica se acerca más a lineal, la antena receptora deberá ser de polarización lineal alineada con el eje mayor de la elipse
- Si la polarización elíptica se acerca más a circular, la antena receptora deberá ser de polarización circular con el mismo sentido de giro que la antena transmisora

Relación de polarización circular

$$\rho = \frac{\left| E_{RHC} \right|}{\left| E_{LHC} \right|} \quad (A \, dim \, .)$$

- Será 1 si la polarización es lineal
- Será 0 si la polarización es circular a izquierdas
- Será ∞ si la polarización es circular a derechas

Relación axial

$$ar = \frac{m \acute{a} x(\left| \vec{E_{or}} \right|, \left| \vec{E_{oi}} \right|)}{m \acute{n} (\left| \vec{E_{or}} \right|, \left| \vec{E_{oi}} \right|)} \quad (A \, dim \, .)$$

$$AR = 20\log(ar)$$
 (dB)

Nota: aunque la relación axial en unidades lineales sea adimensional, como se halla con unidades de voltaje, al pasarlo a logarítmico se multiplica por 20, no por 10

- Será ∞ si la polarización es lineal
- Será 1 si la polarización es circular
- Será la relación entre el eje mayor y el menor si la polarización es elíptica

Nivel de radiación contrapolar

$$nrc = \frac{LHC}{RHC} \quad (Adim.)$$
$$NRC = 20\log \frac{LHC}{RHC}$$

Fracción de potencia entregada por la antena al receptor por el efecto de la radiación contrapolar respecto del caso en que el acoplo de polarización fuese perfecto

$$FPER = \frac{RHC^2}{LHC^2 + RHC^2} \quad (A \, dim \, .)$$

Si lo pidiesen en porcentaje, sólo habría que multiplicar por 100.

## Antena en recepción

Los parámetros que caracterizan a la antena en recepción son los siguientes:

• Área efectiva o equivalente

$$A_{equivalente} = \frac{g\lambda^2}{4\pi} = \eta_{radiación} \cdot \varepsilon_{apertura} \cdot A_{apertura} \quad (m^2)$$

Donde el producto  $\eta_{radiación} \cdot \epsilon_{apertura}$  es considerado la eficiencia total de la antena.

- Temperatura de ruido: Una antena en recepción capta toda la radiación que hay a su alrededor, incluido el ruido que le llega. Este ruido puede ser acústico o térmico, ya que todos los cuerpos con una temperatura superior a 0K desprenden radiación. Para hallar la temperatura de ruido del sistema hay que tener en cuenta:
  - La temperatura de ruido captada por la antena  $(T_{antena})$
  - Las pérdidas de la antena como atenuador ( $L = L_{salida} = 1/\eta_{radiación}$ )
  - La temperatura física de la antena  $(T_{fisica})$ , también la suelen llamar "temperatura ambiente"
  - La temperatura de ruido del circuito receptor al que está conectada la antena  $(T_{RX})$

Siendo por tanto la temperatura de ruido total de la antena:

$$T_A = \frac{T_{antena}}{l} + \frac{T_{fisica}(l-1)}{l} \quad (K)$$

Y, por tanto, la temperatura de ruido del sistema completo es:

$$T_{total} = T_{antena} + T_{RX} \quad (K)$$

Una antena se considera de mejor calidad cuanto menor es su temperatura de ruido.

• Factor o figura de ruido

$$T = (f - 1)T_0 \quad (K)$$

Siendo  $T_0 = 290K$  la temperatura de referencia.

Este factor se puede sacar del sistema (tal y como está la fórmula) o de la antena, el receptor, etc.

¡OJO! La f de la fórmula **no** es la frecuencia, es el factor o figura de ruido, de unidades adimensionales. En escala logarítmica, por tanto, se expresa como:

$$F = 10\log f (dB)$$

• Potencia de ruido térmico

$$n = KTB$$
 (W)

$$N = 10\log K + 10\log T + 10\log B = 10\log(KTB) \quad (dBW)$$

Siendo K la constante de Boltzmann, y T y B la temperatura de ruido de la parte del sistema en cuestión y el ancho de banda que la antena es capaz de captar, respectivamente.

Nota: a veces para referirse al ancho de banda dicen que la antena transmisora emite por canales de cierta frecuencia, esa frecuencia será B

• Parámetro G/T: Es una medida de calidad global del sistema receptor

$$\frac{g_{RX}}{T_{Total}} (1/K) \quad \leftrightarrow \quad G_{RX} - 10 \log(T_{Total}) \, dB(1/K)$$

 Relación señal a ruido: Mide la calidad de la señal recibida relacionando la potencia de la señal y la potencia de ruido que llegan al receptor.

$$snr = \frac{p_{RX}}{n} = \frac{\left|\langle \vec{S} \rangle\right|}{KB} \frac{\lambda^2}{4\pi} \left(\frac{G}{T}\right) \quad (A \, dim.)$$
$$SNR = P_{RX} - N \quad (dB)$$

## $Cuandos nresmínima \leftrightarrow f_{ruido} es máximo$

Nota: N suele quedar negativo, por lo tanto, al hacer la resta se suma. Tanto la potencia recibida como la potencia de ruido son dBWs o dBms, pero el resultado queda en dB.

## Ecuación de Friis

Se usa para calcular el balance de potencias en un radioenlace formado por un transmisor y un receptor. Los resultados se utilizan para comprobar si, con la potencia y la ganancia de la antena transmisora y la ganancia de la antena receptora es posible que la señal recorra la distancia que separa a ambas antenas y llegue a la antena receptora con un valor de potencia superior a la sensibilidad del receptor. Es decir, que llegue un valor de señal suficiente para que la antena receptora no la confunda con ruido.

$$P_{RX}(dBm) = P_{TX}(dBm) + G_{TX}(dB) + G_{RX}(dB) - L_{el}(dB) - L_{pol.}(dB) - L_{desapuntamiento}(dB) - L_{cable RX}(dB) - L_{cable TX}(dB) - L_{fen. atmosféricos}(dB) - L_{desadaptación de impedancias}(dB)$$

Nota: a la potencia recibida en el receptor también se la llama potencia disponible en el receptor o sensibilidad del receptor. A la potencia transmitida también se le llama potencia radiada (que será igual que la potencia entregada a la antena si las pérdidas en el circuito de la antena transmisora son nulas)

#### Donde:

- OJO con el signo de las pérdidas, pues aisladamente se pueden dar las pérdidas en valor absoluto, pero siempre son negativas. Como es evidente, en la ecuación de Friis, las pérdidas restarán haciendo que la potencia en el receptor sea menor.
- Las pérdidas se pasan de escala logarítmica a escala lineal y viceversa con la siguiente ecuación:

$$L = 10\log(l) \quad (dB)$$

- Pérdidas por desadaptación de impedancias: Suelen producirse en el receptor y para calcularla se suele partir del dato de las pérdidas de retorno en el receptor.
- Pérdidas en el espacio libre, que siempre están presentes:

$$L_{el} = 20\log f(Hz) + 20\log d(m) - 147'56$$
 (*dB*)

Nota: OJO en situaciones de rayo directo y rayo reflejado, pues la **d** no será la distancia entre antenas, sino la longitud del rayo directo

• Pérdidas por desajuste (o desacoplo) de polarización o de despolarización, que aparecen si la antena receptora está desorientada un ángulo  $\alpha$  según la polarización del campo transmitido por la antena emisora.

$$L_{pol.} = FPP = -20\log(\cos\alpha)) = -20log \left| \hat{e}_T \hat{e}_R \right| = -10\log FPER \quad (dB)$$

 Cuando una de las antenas es de polarización lineal y la otra es de polarización circular, estas pérdidas son de 3dB.

- Cuando las antenas tienen polarizaciones ortogonales, estas pérdidas son infinitas pues no hay acoplo posible
- Las interferencias producidas por estás pérdidas se hallan cambiando en la fórmula el coseno por un seno:

$$I_{pol.} = -20\log(\text{sen}\alpha)) \quad (dB)$$

Quedando la relación señal a interferencia como este resultado cambiado de signo.

Orientar dipolo para minimizar estas pérdidas

- Si la onda recibida es lineal o elíptica pero cuasilineal, en su misma dirección, esto es, si es una componente  $(E_{oi} \circ E_{or})$ , igual que ella y si son dos hallo el ángulo que forman (entre  $E_{oi} y E_{or})$
- Si la onda recibida es circular o elíptica, pero cuasicircular, en la dirección del eje mayor si esta es una componente (E<sub>oi</sub> ó E<sub>or</sub>) y si son dos hallo el ángulo entre ellas (entre E<sub>oi</sub> y E<sub>or</sub>)
- Pérdidas por desapuntamiento: Se obtienen con los datos del problema y el diagrama de radiación haciendo el siguiente razonamiento:



- En el punto B no habrá pérdidas por desapuntamiento, pues el satélite está situado justamente encima (el máximo del diagrama de radiación del satélite apunta a B)
- Obtengo el ángulo de desapuntamiento con el cuál el satélite ve al punto A con trigonometría básica:

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{d1}{d2}\right)$$

- Para el ángulo α obtenido, me fijo en el eje X del diagrama de radiación y veo que valor del eje Y corresponde: ese valor será, en dBs, las pérdidas por desapuntamiento.
- Si las antenas se ven en las direcciones de máxima ganancia, estas pérdidas son cero
- Otra forma de obtenerlas es mediante el diagrama de radiación:

 $L_{desapuntamiento} = -20\log(\text{function del diagrama de radiación}(\theta)))$ 

## Tema 3 – Propagación de ondas en medio natural

La influencia del suelo, la atmósfera, los obstáculos, etcétera, hacen que el modelo ideal de propagación en espacio libre descrito en la ecuación de Friis no sea válido en la mayoría de los casos.

Por ello, la ecuación de Friis debe corregirse introduciendo factores de corrección correspondientes a cada uno de los fenómenos que afectan a la propagación. Esto no es fácil pues en la mayoría de las ocasiones, el entorno es parcialmente desconocido y los factores varían con el tiempo, el espacio o la frecuencia. Es por este motivo que se suelen usar valores estadísticos.

## La influencia de la frecuencia en la propagación

En el espectro radioeléctrico conviven simultáneamente numerosas señales de distintas fuentes que no se interfieren unas u otras ya que está estipulado en qué banda debe transmitirse cada una.

Esto también determina su capacidad de propagación, ya que cada una de las distintas frecuencias tiene una capacidad de propagación particular (alcance, factores de atenuación por los que se ve afectada, etcétera).

De manera general, cuando una onda se transmite por el aire, el alcance de la señal disminuye cuando aumenta la frecuencia (excepto en propagación ionosférica, donde no es así porque se trata de una reflexión en la atmósfera).

## Mecanismos de propagación

## Onda de superficie

El suelo tiene ciertas propiedades de conductividad y permitividad que varían con el tipo de terreno y la frecuencia de la portadora. Así, la profundidad de penetración se define como:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (m)$$
$$\uparrow f \to \int \delta$$

Cuando la frecuencia aumenta por encima de 30MHz (frontera entre HF y VHF),  $\delta$  disminuye tanto que el suelo ya no es capaz de transmitir.

Es por esto que el rango de frecuencias entre las que este mecanismo de propagación es verdaderamente útil es de VLF a MF (3kHz a 3000kHz) puesto que el suelo se comporta como un plano conductor.

Existe un tipo de antena llamada dipolo o dipolo elemental que consiste en dos elementos conductores alimentados en su punto intermedio. Por el método de las imágenes podemos sustituir uno de estos conductores por el suelo mientras se mantenga el potencial generado por la antena. Así, el dipolo de longitud L se puede reemplazar por un monopolo o mástil de longitud L/2 que transmite pegado al suelo. Esto es muy beneficioso en este mecanismo de propagación ya que, al transmitir a frecuencias bajas, las dimensiones de las antenas son grandes (es decir, si tuviese que usar dipolos para esto, las longitudes tan grandes que se requerirían harían el sistema inviable).



Este mecanismo de propagación sólo propaga en polarización vertical, ya que la polarización horizontal se atenúa muy rápidamente a estas frecuencias por efecto de la conductividad del suelo.

El alcance que se obtiene varía con la frecuencia, la potencia transmitida y el tipo de suelo. Con respecto al tipo de suelo:

$$\begin{array}{c}
\uparrow Frecuencia \leftrightarrow \quad \downarrow Alcance\\
\uparrow Humedadsuelo \leftrightarrow \quad \uparrow Conductividadsuelo \leftrightarrow \quad \downarrow Atenuación \leftrightarrow \quad \uparrow Alcance\\
\end{array}$$

Y con respecto a la frecuencia:

- En LF (30kHz a 300kHz) se consiguen alcances de hasta 2000km
- En MF (300kHz a 3000kHz) se consiguen alcances de hasta 300km

Tamaño objetos que se pueden salvar  $< \lambda$ 

Como aquí la longitud de onda es grande, se pueden salvar grandes obstáculos y el alcance es mayor que la visión directa.



Los dipolos son resonantes cuando  $L = \lambda/2$  por lo que los monopolos lo son cuando  $L = \lambda/4$ 

La directividad de las antenas tipo monopolo es la siguiente:

- Monopolo corto o eléctricamente corto ( $L \ll \lambda$ ):  $d_0 = 3 \leftrightarrow D_0 = 4'77 dBi$
- Monopolo resonante ( $L = \lambda/4$ ):  $d_0 = 3'28 \iff D_0 = 5'16 dBi$

Para estudiar el mecanismo de propagación por onda de superficie se utilizan dos modelos:

• Modelo de Tierra plana: Se utiliza para distancias menores de

$$d_{máx} = \frac{100}{\sqrt[3]{f(MHz)}} \quad (Km)$$

dónde se introduce únicamente un factor de atenuación respecto al caso ideal de espacio libre  $F_e$ , que se calcula en función de una variable p llamada distancia numérica:

$$p \approx \frac{\pi d}{60\sigma\lambda^2}$$
$$F_e = \frac{2 + 0'3p}{2 + p + 0'6p^2}$$

Este factor representa la potencia absorbida por el suelo.

 Modelo de Tierra esférica o curva: Para distancias mayores es necesario contar con los fenómenos de difracción producidos por la curvatura de la Tierra. Se usan las gráficas de la UIT que indican el valor del campo en función de la distancia, el tipo de terreno y la frecuencia:



Intensidad de la onda de superficie sobre mar (UIT-R) Pt=1 kw

En las gráficas se puede apreciar:

• En las regiones próximas a la antena el campo decrece linealmente como 1/d. Esto es el comportamiento para el espacio libre ideal.

• En las regiones intermedias y alejadas, el campo decrece parabólicamente como  $1/d^2$ . Esto es porque la atenuación de la onda en el suelo disminuye mucho cuando aumenta la distancia, alejándose del modelo ideal.

Las aplicaciones más importantes de la onda de superficie son los sistemas de comunicaciones navales, los sistemas de radiodifusión AM y las bandas dedicadas a radioaficionados.

## Propagación por onda ionosférica

La atmósfera se divide en capas según su concentración de gases e ionización. La ionización es la presencia de electrones libres debido a las radiaciones solares.

La ionosfera tiene la característica de que en ella la concentración de gases es prácticamente nula y la ionización empieza a ser importante.

Las capas de la atmósfera tienen distinto índice de refracción, que en general va disminuyendo con la altura. Cuando incide en ellas una onda, el rayo normalmente es refractado al siguiente medio, pero pasa con un ángulo mayor con respecto a la normal (más tumbado). Esto produce una curvatura en la trayectoria de los rayos hasta que inciden en una de las capas con un ángulo superior al crítico y se reflejan, volviendo al suelo.

$$\uparrow$$
 Altura  $\rightarrow \downarrow$  Indice de refracción

También hay que tener en cuenta el efecto de los electrones presentes en las capas, pues atenúan las ondas incidentes. Esto hace que la propagación de la señal varíe enormemente entre el día y la noche.



## Capas de la ionosfera

La ionosfera, a su vez, se divide en capas dependiendo de su concentración de electrones, ya que ésta varía con la distancia al suelo:

- Capa C: Es una capa muy delgada que apenas afecta al mecanismo de propagación por onda ionosférica.
- Capa D: Entre 60 y 90km del suelo. Su efecto más importante es la atenuación de la banda MF (300kHz a 3000kHz).



• Capa E: Entre 90 y 130km del suelo. Aparece fundamentalmente de día y muy tenuemente por la noche. Refleja las frecuencias MF (300kHz a 3000kHz).

Capa F: Entre 150 y 400km del suelo, aunque por el día se desdobla en F1 y F2. Refleja las frecuencias HF (3MHz a 30MHz).

La bajada en la ionización de las capas que sucede por la noche da lugar a interferencias nocturnas, puesto que las ondas rebotan más alto por la ausencia de atenuación provocada por los electrones, incrementando así su alcance; este efecto se conoce como "fading".

## Frecuencia y ángulo críticos

En cuanto al ángulo de incidencia de la señal en la ionosfera, éste está relacionado con la frecuencia de la siguiente manera:

 $\uparrow$  Frecuencia  $\rightarrow \downarrow$  Ángulo de incidencia



Si la frecuencia de la señal es muy alta, ésta se refractará por las distintas capas de la atmósfera sin reflejarse de vuelta y se perderá en el espacio. A la frecuencia a partir de la cual se produce este efecto se la llama frecuencia crítica o de corte y se puede hallar en función de la densidad de electrones N de cada capa:

$$f_{crítica\ 90^\circ\ suelo} = \sqrt{80'8N}$$
 (Hz)

Estando la densidad de electrones por capa condicionada de la siguiente manera:

$$\uparrow Radiación \, solar \rightarrow \uparrow N \rightarrow N_{dia} > N_{noche}$$
$$\uparrow Capas de mayor altura \rightarrow \uparrow Radiación \, solar \rightarrow \uparrow N \rightarrow \uparrow f_c$$

En términos generales, el mecanismo de propagación por onda ionosférica se puede usar con señales de hasta 30MHz por este mismo motivo.

## Alcance de la señal

Para calcular el alcance lo primero es rectificar la fórmula de la frecuencia crítica para ajustarla al ángulo de incidencia con el que se apunta al cielo  $\phi_0$ :

$$f_{crítica \phi suelo} = f_{crítica 90^{\circ} suelo} \cdot \sec \phi_0 \quad (Hz)$$

Y con el siguiente modelo geométrico y suponiendo que la Tierra es plana:



Se pueden sacar las relaciones entre la frecuencia de la señal y el alcance siguientes:

$$f = f_{crítica \phi suelo} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h_v}\right)^2} \quad (Hz)$$

$$\uparrow f \to \uparrow d$$

En términos generales, con el mecanismo de propagación por onda ionosférica se pueden conseguir los siguientes alcances:

- En MF (300kHz a 3000kHz) se consiguen alcances de hasta 2000km durante la noche
- En HF (3MHz a 30MHz) se consiguen alcances de hasta 4000km tanto de día como de noche

## Zona de sombra

Es una zona cercana a la antena donde este mecanismo de propagación no es válido puesto que para conseguir un alcance tan pequeño el ángulo de incidencia también debería ser muy pequeño, pero para dicho ángulo la señal se refracta al espacio en lugar de reflejarse.



## Rotación de Faraday

La rotación de Faraday es una rotación en la polarización producida por los electrones presentes en la atmósfera, es decir, el campo magnético de la Tierra, que afecta a cualquier señal que penetre en la atmósfera, independientemente de su polarización o frecuencia.

- ° Si la polarización es lineal, las pérdidas por rotación de Faraday son notorias
- Si la polarización es circular o elíptica, el efecto no es de importancia pues es simplemente es una rotación adicional

## Dispersión

La ionosfera se comporta como un medio dispersivo ya que:

$$v_{fase}, v_{grupo} = f(indice \, de \, refracción) = f(h, f) \rightarrow v_{fase}, v_{grupo} \, no \, son \, constantes$$



Esto afecta a las señales de la siguiente manera:

- En señales de banda ancha, como su mínimo y su máximo de frecuencia están muy separados y se propagan a velocidades muy distintas, le afecta mucho pues las componentes de frecuencia llegarán al destino desordenadas y esto se traducirá en una señal distorsionada en recepción
- En señales de banda estrecha, como el mínimo y el máximo están muy cerca y se propagan a velocidades muy similares, este efecto apenas afectará

Es por todo esto que se limitará el mecanismo de propagación ionosférica al uso de señales de banda estrecha.

## Aplicaciones de propagación ionosférica

Las aplicaciones más habituales son las comunicaciones navales y las bandas para radioaficionados y antes de existir las comunicaciones satélite, era el medio más utilizado para comunicaciones de voz punto a punto a largas distancias.

## Onda de espacio o propagación troposférica

Es el mecanismo de propagación más común y se utiliza de VHF en adelante. El alcance es muy variable:

- En VHF (30MHz a 300MHz) y UHF (300MHz a 3000MHz) se consiguen alcances que van algo más allá del horizonte visible
- De SHF en adelante (>3GHz) se consiguen alcances de decenas de kilómetros
- En comunicaciones vía satélite se consiguen alcances de hasta 36000km con los satélites geoestacionarios
- En observaciones del espacio profundo se consiguen alcances de millones de kilómetros

La onda de espacio se utiliza en la mayoría de los sistemas de comunicaciones: radiodifusión TV y radio FM, telefonía móvil, radioenlaces fijos, sistemas de radar, etc.

Se utilizan antenas elevadas varias longitudes de onda y directivas como yagis, bocinas, arrays o reflectores.

Existen varios tipos de propagación por onda de espacio:

- Radioenlace terrenal o troposférico: también llamados estaciones terrenas o modelo de propagación de dos rayos, en estos enlaces hay que tener en cuenta la reflexión y la difracción del suelo y la atenuación y refracción de la troposfera. Son enlaces que cubren distancias similares a la visión directa. Una característica especial que tienen es que, debido a la variación del índice de refracción en la troposfera según las condiciones atmosféricas de presión, humedad y temperatura, los rayos se curvan ligeramente. Además, al juntarse la onda directa y la reflejada, pueden darse casos que no encajan con las reglas del campo lejano, por ejemplo, que la intensidad de la onda varíe como 1/d<sup>4</sup>, situación producida por la interferencia de la onda reflejada al llegar a la antena receptora.
- Enlaces vía satélite: en estos enlaces el nivel de señal recibido es muy bajo por lo que los receptores han de tener una sensibilidad muy fina. Es importante escoger frecuencias suficientemente altas para que la ionosfera sea transparente a la transmisión.
  - Satélite geoestacionario: tipo de satélite artificial que tiene las siguientes características:
    - Se encuentra en órbita sobre un punto del ecuador terrestre
    - Tiene la misma velocidad angular que la Tierra

Es decir, permanece inmóvil sobre un determinado punto del globo terráqueo. Suele estar situado en torno a 36000km de altura.

- Estación terrena: estación situada en la Tierra capaza de comunicarse con
- Dispersión troposférica: Se aprovecha la dispersión que se produce en la troposfera para lograr alcances algo mayores que la visión directa.

Nota: la troposfera es la capa de la atmósfera más pegada al suelo, mientras que la ionosfera está muchísimo más arriba.

## Rotación de Faraday

La rotación de Faraday es muy acusada en comunicaciones satélite ya que la señal debe atravesar toda la ionosfera (y toda la atmósfera). Es por ello que se usan siempre polarizaciones circulares para las trasmisiones Tierra - satélite.

## Repetidores utilizados en propagación troposférica

En muchas ocasiones, en los enlaces punto a punto, los dos puntos están más alejados de la visión directa. Por ello, es necesario hacer la comunicación por pasos, poniendo en el camino antenas que reciban la señal y la transmitan hacia la siguiente antena hasta que se alcance el receptor final.



21

Este tipo de antenas se llaman repetidores y están formadas por una antena de recepción orientada hacia un extremo y una de transmisión para retransmitir la señal hacia el otro extremo. Se suelen colocar en lugar elevados para que tengan visibilidad sobre el terreno cercano.



Efectos del suelo en la propagación troposférica

En los radioenlaces troposféricos, la señal recibida proviene de varias contribuciones:

- El rayo de visión directa, que se ha propagado por el espacio libre desde la antena emisora hasta la transmisora.
- El rayo reflejado en la superficie terrestre
- El rayo difractado por las irregularidades del terreno o por la curvatura de la Tierra



## Reflexión en el suelo

Para calcular la contribución entre rayo directo y rayo reflejado se usa el modelo de tierra plana que desprecia la contribución del rayo difractado al total de señal recibida.

Para calcular el rayo reflejado hay que conocer el coeficiente de reflexión  $\rho$  del suelo. Este coeficiente depende del tipo de suelo, de la polarización de la onda y del ángulo de incidencia con el que la onda llega al suelo (y por lo tanto de las alturas efectivas de las antenas y la distancia entre ellas).



 $h_T, h_R \ll d \rightarrow \psi \cong 0 \rightarrow \rho \cong -1$  (Incidencia rasante)

Suelo muy reflectante  $\rightarrow \rho \cong -1 \rightarrow Es$  seguro que el rayo reflejado llegará a la antena receptora El rayo directo y el reflejado tienen las siguientes características:

- Su módulo es igual pues la atenuación que sufren muy similar
- Sus fases no guardan ninguna relación, pudiendo ser:

Interferencia constructiva: Si su desfase está entre 0° y 180°. En el mejor de los casos, que es cuando están en fase (0°), se conseguirá el doble de la señal transmitida, lo que equivale a 6dB de ganancia con respecto a únicamente el rayo directo. Esto implica que puede recibirse más potencia si hay reflexión en el suelo y la fase es la adecuada que transmitiendo por el espacio libre.

Nota: estos 6dB son sin tener en cuenta las ganancias de las antenas

 Interferencia destructiva: Si su desfase está entre 180° y 360°. En el peor de los casos, que es cuando están en oposición de fase (180°), las señales se anularán completamente al llegar al receptor.

La señal en el receptor, suponiendo la suma entre el rayo directo y el reflejado es:

$$E_{rx} = E_{directo} + E_{reflejado} = E_{directo} \left(1 + \rho e^{-j\Delta\phi}\right) = E_{directo} \left(1 + \rho e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R}\right) (V/m)$$

Donde:

- C La expresión  $\left(1 + \rho e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R}\right)$  es el factor de potencia por reflexión en Tierra plana. Este factor es máximo (2) cuando se duplica la señal en el receptor y mínimo (0) cuando las señales se anulan.
- Las pérdidas por reflexión, son, por tanto:

$$L_{reflexion} = -20log \left| 1 + \rho e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R} \right|$$
 (dB)

 $\circ$   $\Delta R$  se refiere a la diferencia de caminos recorridos:

$$\begin{split} \Delta R &= \sqrt{d^2 + (h_R + h_T)^2} - \sqrt{d^2 + (h_R - h_T)^2} \ (m) \\ h_T, h_R \ll d \ \rightarrow \ \Delta R \ \cong \frac{2h_T h_R}{d} \ (m) \end{split}$$

Según esta expresión, el campo recibido es mayor cuanto mayor sean las alturas de las antenas, es por esto que interesa elevar las antenas lo más posible porque además de aumentar la visibilidad, reduce pérdidas de propagación.

Además, si  $\rho = -1$ :

$$\left| \mathbf{E}_{\mathrm{rx}} \right| = 2 \left| \mathbf{E}_{\mathrm{directo}} \right| \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta \mathbf{R}}{\lambda}\right) = 2 \left| \mathbf{E}_{\mathrm{directo}} \right| \sin\left(\frac{2\pi \mathbf{h}_{\mathrm{T}} \mathbf{h}_{\mathrm{R}}}{\lambda \mathrm{d}}\right) \quad (\mathrm{V/m})$$

Entonces si  $\left( \begin{array}{c} 1 \\ d \end{array} \right) \rightarrow \sin \left( \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d} \right) \cong \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}$  lo que implica que:

• El campo recibido en este mecanismo de propagación varía como  $\frac{1}{r^2}$  en lugar de como  $\frac{1}{r}$  que es el caso del espacio libre.

• La potencia a su vez varia como  $\frac{1}{r^4}$  en lugar de como  $\frac{1}{r^2}$  que es el caso del espacio libre.

Para calcular la potencia disponible en el receptor en este modelo de propagación se hace lo siguiente:

- Se calcula la potencia disponible en el receptor  $(P_{RX})$  mediante la fórmula de Friis. Esto es, en condiciones de espacio libre y sin tener en cuenta el suelo
- Se halla el módulo al cuadrado del factor de potencia, esto es:

$$\operatorname{Fe}^{2} = 10\log\left(\left|1 + \rho e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R}\right|^{2}\right) \quad (dB)$$

Esta expresión representa la diferencia en dB entre el campo recibido en condiciones de espacio libre y el recibido con reflexión en el suelo

• Y por fin se halla la potencia disponible en el receptor tras la reflexión en el suelo:

$$P_{RX \text{ con suelo}} = P_{RX \text{ espacio libre}} + F_{\text{potencia}} \quad (dBW)$$

### Difracción en obstáculos

La difracción es un efecto que se produce cuando una onda electromagnética atraviesa una rendija o se choca contra un obstáculo. En ese momento, el obstáculo o las rendijas actúan como nueva fuente emisora de ondas. Es por esto, que no siempre hace falta visión directa entre el transmisor y el receptor (principio de Huygens).



La difracción explica el hecho de que las ondas sean capaces de salvar obstáculos, pues estos se convierten en el nuevo origen de ondas. La desventaja de la difracción es que atenúa mucho con lo cual la potencia que llega al receptor es mucho menor que en el caso del espacio libre.

Tamaño obstáculos que se pueden salvar  $\leq \lambda$ 

## Zonas de Fresnel

Las zonas de Fresnel se definen como el volumen de espacio entre el emisor y el receptor en el cual el desfase de las ondas que rebotan en dicho volumen no supere los 180° para que no se destruyan entre sí. Estos 180° equivalen a  $\lambda/2$  ya que la longitud de onda se define como la distancia que hay entre dos puntos de igual fase.



Haciendo cortes en las zonas de Fresnel se obtienen los elipsoides de Fresnel que son zonas bidimensionales por ser superficies. Ésta es la manera de definir las zonas de Fresnel, mediante sus elipsoides correspondientes, que son en dos dimensiones. Estas pueden ser:

- El primer elipsoide de Fresnel (n = 1) abarca señales que no difieran más de 180° ( $\lambda/2$ ) con respecto a la señal de visión directa
- El segundo elipsoide de Fresnel (n = 2) abarca señales que difieran entre 180° ( $\lambda/2$ ) y 360° ( $\lambda$ ) con respecto a la señal de visión directa. Es por esto que es destructiva con respecto a la señal de visión directa

Y así sucesivamente. Siempre se cumple que las zonas impares son constructivas y las pares destructivas. La zona más importante es la primera porque la segunda se anula con la tercera, la cuarta con la quinta, etc.



La aplicación de la primera zona de Fresnel es que si la dejamos libre al 100% (aunque a efectos prácticos con dejar el 80% también sería válido), sobre cada obstáculo que haya entre las dos antenas, la difracción se hace despreciable.





## Atenuación por niebla

La atenuación por niebla se hace importante a partir de 10GHz y se suele medir en función de la intensidad de la misma expresada en  $g/m^3$ .

## Atenuación por gases atmosféricos

La atenuación de los gases moleculares (oxígeno y vapor de agua) se debe a la existencia de frecuencias de resonancia en la estructura electrónica de las diversas moléculas que componen la atmósfera. En estas frecuencias el gas absorbe energía, provocando una fuerte atenuación en las ondas.

Para cuantificar la atenuación por gases se consideran dos efectos:

- Una pequeña contribución por el aire "seco" de la atmósfera  $(O_2)$
- Una contribución mayor por la parte "húmeda" de la atmósfera  $(H_2O)$

$$\gamma_{gases} = \gamma_{O_2} + \gamma_{H_2O}$$

La atmósfera es selectiva, produciendo unas máximos y unos mínimos de atenuación por gases atmosféricos. Es por esto que para los radioenlaces se usan las ventanas de atenuación mínima que están en torno a 35GHz y 94GHz.

#### Atenuación por lluvia

La atenuación por lluvia se produce por la disipación que trae consigo el efecto Joule. Esta disipación de calor depende del tamaño de las gotas y de su deformación al caer, pero sobretodo depende de la cantidad global de agua en el aire. Este último factor es la intensidad de la lluvia en mm/h o l/h (l/m² /h).

La atenuación de la lluvia comienza a ser importante a 3GHz y varía con la frecuencia hasta los 100GHz. A partir de 100GHz se estabiliza su valor o satura y se queda en un valor constante, mayor cuanto mayor sea la intensidad de la lluvia.



Otras pérdidas que genera la lluvia son las producidas por la despolarización en la polarización horizontal, ya que las gotas giran ligeramente la señal. Estas pérdidas también afectan al resto de polarizaciones, aunque en mucha menor medida.

A la hora de diseñar un radioenlace se tienen en cuenta las estadísticas de lluvia en cada zona y se asegura un servicio fiable en un porcentaje del tiempo dado.

## Tema 4 – Antenas

## **Antenas lineales**

Las antenas lineales son las que cumplen:

Radio conductores «longitud

```
Radio conductores \ll \lambda
```

Su principal inconveniente es que para conseguir alta directividad hay que subir la frecuencia y esto hace que comiencen a surgir diagramas de radiación multilobulados que no suelen ser deseados.

## **Dipolos**

Es la antena lineal más utilizada y sencilla. Está formado por dos hilos conductores de L/2 de longitud que están alineados y se alimentan conjuntamente por una corriente simétrica que penetra por la zona que está entre ambos.

 $Z_{IN \ dipolo \ resonante \ con \ radio \ 
ightarrow 0} = 73 + j42'5 \quad (\Omega)$ 

Los dipolos tienen polarización lineal según heta

Los dipolos pueden ser:

- Dipolos cortos si  $L \ll \lambda$
- Dipolos resonantes si  $L \in [0'46\lambda, 0'48\lambda]$

El campo generado por un dipolo en coordenadas esféricas no depende del ángulo  $\varphi$  lo que quiere decir que los dipolos radian con simetría de revolución con respecto a ese ángulo. Esto junto con la longitud del dipolo definen el diagrama de radiación:



**DIPOLO CORTO** 



Se cumple que:

 $\int L \operatorname{con} \operatorname{respecto} a \lambda \begin{cases} \operatorname{Diagrama} \operatorname{de} \operatorname{radiación} \operatorname{más} \operatorname{directivo} \equiv L \operatorname{\acute{o}bulos} \operatorname{más} \operatorname{estrechos} \\ \operatorname{Mayor} \operatorname{número} \operatorname{de} \operatorname{l\acute{o}bulos} \end{cases}$ 

Lo más importante de los diagramas de radiación del dipolo es que en el cénit, es decir, justo encima de donde está situado el dipolo, hay un mínimo en el diagrama de radiación.

Nota: el dipolo de Hertz es un ente teórico caracterizado por ser un pequeño trozo de conductor donde la corriente es constante en toda su longitud

## Dipolo paralelo a un plano conductor



Donde:

- $z_{11}$  es la impedancia del dipolo aislado, impedancia de entrada del dipolo en espacio libre ó autoimpedancia. La ganancia del dipolo aislado se mueve en el rango de  $[2'15dBi (L = \lambda/2), 3'82dB (L = \lambda)]$
- $z_{12}$  es la impedancia mutua con el dipolo imagen

Para calcular estas impedancias se necesitan conocer la longitud del dipolo L y la distancia con el plano conductor h

Nota: a veces a la distancia entre el dipolo y su imagen, es decir, 2h, se le llama y, sobre todo en problemas en los que se usan gráficas

## Balunes

Los balunes o estructuras simetrizadoras convierten la corriente asimétrica que proviene de la línea de transmisión en corriente simétrica o no balanceada.

Nota: Los términos corriente no balanceada, asimétrica o no equilibrada son equivalentes. Análogamente, corriente balanceada, simétrica o equilibrada también lo son.

En el caso de la corriente asimétrica, como por ejemplo en un cable coaxial, el diagrama siempre estará formado por tres corrientes:



Lo cual hace que la alimentación en brazos del dipolo que se conecte a este cable coaxial no sea la misma. Como éste es un efecto indeseado, se usan los balunes para anular la corriente  $I_3$  y así conseguir que  $I_1 = I_2$ .

Los balunes pueden ser de dos tipos:

• Balun Bazooka o Sleeve: Se trata de una línea coaxial que se une de manera concéntrica al exterior del cable coaxial de partida. Para que anule la corriente, su longitud ha de ser  $\lambda/4$  y debe estar cortocircuitada al coaxial de partida por el extremo inferior para así crear un circuito abierto en el extremo superior evitando que fluya la corriente  $I_3$ 



• Balun partido: Se trata también de un coaxial de longitud  $\lambda/4$  pero esta vez se sitúa paralelo al mismo. También debe estar cortocircuitado con el coaxial de partida en la parte inferior del mismo.



## Monopolo sobre plano conductor

Este tipo de antenas se apoyan en los siguientes postulados:

- Teorema de unicidad del potencial: Dada una distribución de cargas, ésta es equivalente a otra distribución siempre y cuando generen el mismo potencial.
- Método de las imágenes: Se trata de sustituir una distribución de cargas por otra más sencilla siempre y cuando generen el mismo potencial.

Es por esto que se puede sustituir un dipolo de longitud *L* por un monopolo de longitud *L*/2 con el suelo actuando como segundo conductor. Para dipolos resonantes de longitud  $\lambda/2$ , el monopolo equivalente de longitud  $\lambda/4$  también será resonante.

## $Z_{IN\,monopolo\,resonante} = 37$ ( $\Omega$ )

Para mejorar la conductividad del suelo y minimizar pérdidas, en ocasiones se apoya el monopolo en una red radial de varillas.



Otro ejemplo de este tipo de antenas son las de tipo látigo:

$$Grosorlátigo \rightarrow \uparrow Ancho banda funcionamiento$$
$$D_{0 monopolo} = 2D_{0 dipolo}$$
$$R_{rad monopolo} = \frac{1}{2}R_{rad dipolo}$$

$$Z_{in\,monopolo} = \frac{1}{2} Z_{in\,dipolo}$$

## Caso de uso de antenas tipo látigo: comunicaciones NVIS

En comunicaciones NVIS (Near vertical incidentskywave) hay que utilizar frecuencias de transmisión inferiores a la frecuencia crítica de la capa F2 para que la energía retorne a la Tierra.

Para este tipo de comunicaciones son más apropiadas antenas en cuyo diagrama de radiación hay máximos cercanos al cénit, que es hacia donde queremos que se propague la onda. Es por esto que las antenas látigo deben curvarse a una posición aproximadamente horizontal para conseguir una radiación similar a la del dipolo paralelo a Tierra.



Figure M-1. Near-vertical incidence sky-wave propagation concept.



## Agrupaciones de dipolos

El mayor inconveniente de los dipolos es que su diagrama de radiación es poco directivo. Esto es interesante en aplicaciones como radiodifusión, pero no es lo habitual.

Para lograr mayor directividad, se agrupan los dipolos como en las antenas Yagi.



$$\begin{split} L_{reflector} &> L_{elemento\ activo} \\ L_{directores} &< L_{elemento\ activo} \\ f_{reflector} &< f_{activo} &< f_{director} \\ E_{total\ radiado} &= \sum_{i=0}^{i} E_{radiado\ por\ elemento\ i}\ i = 0,\ 1,2... \end{split}$$

Estas antenas son muy utilizadas ya que con una sencilla forma de excitación consiguen buenas prestaciones de ganancia. Se utilizan mucho para la recepción de señales de televisión en las bandas UHF y VHF.

Es fácil conseguir ganancias de entre 15 y 18dBi con estructuras muy largas ya que:

 $\uparrow$  Longitud,  $\uparrow$  Número de elementos  $\rightarrow \uparrow$  Ganancia

Ganancia
(dBi)
9.4
10.7
11
11.9
12.7

## Antenas de cuadro

Son hilos conductores que crean una forma cerrada, circular o cuadrada. Se utilizan en recepción y casi nunca en transmisión. Tienen un diagrama de radiación multilobulado. Hay dos tipos:

• Espiras eléctricamente pequeñas ( $L \ll \lambda$ ): Su diagrama de radiación será de la misma forma que el de dipolo corto.



• Espiras eléctricamente grandes ( $L = \lambda/2$ ): De rendimiento alto



## Hélices

Para mejorar las prestaciones de los hilos conductores se pueden crear formas cerradas enrollándolos en torno a un cilindro imaginario. A este tipo de antena se la conoce como hélice y es muy fácil de excitar. Tiene polarización circular en el mismo sentido que el arrollamiento.





Dependiendo de la longitud del conductor se tendrán distintos modos de radiación:

- Modo normal  $(L \ll \lambda)$ : El máximo de radiación se da en la dirección perpendicular al eje de la hélice. Se usan mayoritariamente en recepción porque su resistencia de radiación es limitada.
- Modo axial  $(3\lambda/4 < C < 4\lambda/3)$  o dicho de otro modo, el perímetro es del orden de la longitud de onda: El máximo de radiación está en la dirección del eje de la hélice. Sus ganancias suelen estar entre 10 y 17dBi. Se utilizan para aplicaciones de banda ancha en UHF.



La principal ventaja de las hélices es su diseño simple lo que abarata enormemente los costes de fabricación.

## **Antenas no lineales**

## Arrays

Un array es una agrupación de antenas que radian o reciben en modo conjunto. Los elementos que componen un array pueden ser cualquier tipo de antena, pero lo más habitual es que sean dipolos, reflectores, parches o ranuras. Se utilizan mucho en comunicaciones móviles.

La polarización de los arrays es la misma que la del elemento radiante.

 $Elemento de un array \equiv Antena elemental \equiv Elemento radiante \equiv Elemento de referencia$ 

- Su principal ventaja es que el diagrama de radiación se puede ajustar dinámicamente. Esto se consigue alimentando los elementos con corrientes de amplitudes y fases adecuadas.
- Su mayor desventaja es su diseño complejo y los altos costes de fabricación que ello implica.

Los arrays de antenas se clasifican en tres tipos

- Lineales: Los elementos están dispuestos en una línea
- Planos: Los elementos están dispuestos sobre un plano
- Tridimensionales: Los elementos se sitúan sobre un volumen



Como un array de antenas cumple que todos los elementos son iguales y están igualmente orientados:

Linealidad Ecs. Maxwell  $\leftrightarrow$  Principio de superposición  $\rightarrow$ 

$$\rightarrow \vec{E}_{total} = \sum_{n} \vec{E}_{elemento\,n} \, con \, \vec{E}_{elemento\,n} = \vec{E}_{ref}(r,\theta,\varphi) \sum_{n} A_{n} e^{jk_{0}r_{n}\vec{r}}$$

Siendo el factor de array:

$$FA = F_A(\theta, \varphi) = \sum_n A_n e^{jk_0 r_n \vec{r}} \quad (A \, dim.)$$

Que implica:

- $A_n$  indica de qué manera está alimentado cada elemento del array.  $A_n = I_n/I_0$  donde  $I_n$  se refiere a la corriente que alimenta al elemento n e  $I_0$  a la corriente que alimenta al primer elemento, que se toma como referencia
- o  $e^{jk_0r_n\vec{r}}$  está relacionado con las posiciones de los elementos del array
- Como FA surge de una exponencial compleja, es una función periódica de periodo  $2\pi$
- Como los diagramas de radiación son iguales para cada elemento, si se orientan todos en la misma dirección se cumple el principio de multiplicación de diagramas:

 $Diagrama de radiación conjunto = FA \cdot Diagrama de radiación elemento n$ 

• En arrays grandes, como FA varía mucho más rápido que el diagrama del elemento:

 $Diagrama de radiación conjunto \cong FA$ 

## Arrays lineales equiespaciados

En estos arrays los elementos se colocan en una recta, separados entre sí una distancia fija d. Se llaman lineales porque los elementos están en una línea, pero dichos elementos pueden ser lineales (dipolos), plano (reflectores), etc.



 $I_0$  es la corriente de referencia que alimenta al primer elemento e  $I_n$  la que alimenta a un elemento cualquiera. Cada fasor de corriente tiene diferente módulo respecto al anterior y además puede existir un desfasaje progresivo que se representa con  $\alpha$ :

$$I_{0} = |I_{0}|e^{j0} = |I_{0}|$$
$$I_{1} = |I_{1}|e^{j\alpha}$$
$$I_{2} = |I_{2}|e^{j2\alpha}$$
$$\vdots$$
$$I_{n} = |I_{n}|e^{jn\alpha} \quad (A)$$

Entonces el FA quedaría:

$$F_A(\theta,\varphi) = \frac{1}{I_0} \Big( I_0 + I_1 e^{jk_0 d\cos\theta} + I_2 e^{jk_0 2d\cos\theta} + \dots + I_n e^{jk_0 nd\cos\theta} \Big) = \sum_n A_n e^{jn\alpha} e^{jnk_0 d\cos\theta} = \sum_n A_n e^{jn\psi} \quad (A \dim D) = \sum_n A_n e^{jn\alpha} e^{j\alpha} e^{j$$

Siendo:

•  $\psi$  el ángulo eléctrico, que representa la diferencia de fase entre las ondas producidas por los elementos debida a la diferencia de caminos y a la diferencia de fase de la alimentación.

$$\psi = k_0 d\cos\theta + \alpha$$

Gráficamente el ángulo eléctrico representa el ángulo existente entre una determinada dirección y la dirección de máxima radiación. Sólo una parte de los valores que puede tomar este ángulo se corresponden con el espacio real tridimensional, a este rango se le llama margen visible:

$$\psi \epsilon \left[ \alpha - k_0 d, \, \alpha + k_0 d \right]$$

Este margen se corresponde con los valores posibles de la variable  $\theta$ , variando  $\cos\theta$  entre -1 y 1. En el punto de máxima radiación,  $\psi = 0$ 

- $\circ$   $\alpha$  el desfasaje progresivo en la alimentación de los elementos del array (rad)
- d distancia entre los elementos (m)
- $\circ$   $\theta$  dirección de apuntamiento del diagrama de radiación global respecto al eje del array (rad)



Tipos de arrays según la dirección de máxima radiación

- Array endfire: El máximo de radiación coincide con el eje del array ( $\theta = 0^{\circ}$ ). En este tipo de arrays, si se aumenta la separación entre elementos por encima de 0'45 $\lambda$ , aparecen lóbulos de difracción dando lugar a más de un máximo de radiación por lo que el margen habitual de separación entre elementos es  $[0'4\lambda, 0'45\lambda]$ .
- Array broadside: También llamado array de diagrama perpendicular o array de radiación transversal. El máximo de radiación es perpendicular al eje del array ( $\theta = 90^{\circ}$ ). En este tipo de arrays no aparecen lóbulos de difracción hasta separaciones mayores de 0'85 $\lambda$  por lo que el margen habitual de separación entre elementos es de  $[0'6\lambda, 0'8\lambda]$ . Se consiguen así menor acoplo entre las antenas y que con un número reducido de elementos se consiga alta directividad.
- Array de exploración: El máximo de radiación no tiene un valor fijo, sino que varía según cambia la corriente de alimentación.



 $_{i}OJO! A \theta$  le llaman "haz"

Nota: el horizonte está a 90°, cualquier elemento por encima del horizonte estará a  $90^{\circ}$  – grados, y cualquier elemento por debajo estará a  $90^{\circ}$  + grados

## Tipos de arrays según la ley de excitación utilizada

Las leyes de excitación o de alimentación se refieren a de qué manera se inyecta corriente en los elementos del array, o lo que es lo mismo, como varía el módulo y la fase de la corriente de un elemento al siguiente.

• Alimentación uniforme en amplitud y fase: Es la excitación que da la máxima directividad.

$$I_0 = I_n \rightarrow A_n = 1$$
$$\alpha = 0$$

Su FA si se sitúa el primer elemento en el origen de coordenadas es:

$$F_{A}(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn\psi} = \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} = e^{j\frac{N-1}{2}\psi} \frac{\sin\frac{N\psi}{2}}{\sin\frac{\psi}{2}} \quad (A \, dim \, .)$$

N.T.

Y su módulo normalizado al máximo:

$$\left|F_{AN}(\psi)\right| = \frac{1}{N} \left|\frac{\sin\frac{N\psi}{2}}{\sin\frac{\psi}{2}}\right| \quad (A \, dim \, .)$$

Que de forma gráfica será:



Además, como no existe desfasaje en la alimentación, se cumple que:

$$\psi = k_0 d\cos\theta$$

Por tanto, la dirección de máxima radiación se produce cuando el coseno es 0, es decir, en  $\theta = 90^{\circ}$ . Por ello este tipo de arrays son siempre broadside.

Su nivel del lóbulo principal con respecto al secundario es:

$$NLPS = \frac{N}{\frac{1}{\sin\left(\frac{3\pi}{2N}\right)}} \quad (A\,d\,i\,m)$$

Por último, la anchura del haz a -3dB se puede aproximar en arrays grandes por:

$$\Delta \theta_{-3dB} = 0'886 \frac{\lambda}{Nd} \quad (rad)$$

Nota: Con este tipo de gráfica suelen pedir a -3dB de factor de array ( $20\log(|F_{AN}(\psi)|)$ ), para N, los dos valores de ángulo eléctrico, que a su vez, darán lugar a  $\theta_{max}$  y  $\theta_{min}$  con las que se podrá calcular el ancho de haz

- Arrays lineales con amplitud uniforme y fase progresiva: La alimentación presenta un salto de fase constante α entre elementos consecutivos. Con este cambio de fase su puede controlar la dirección de apuntamiento del diagrama de radiación y así lograr desde arrays broadside a endfire
- Arrays lineales con amplitud simétrica y decreciente del centro hacia el borde: Variando la amplitud de la corriente de alimentación se controla el nivel de los lóbulos secundarios. Con excitaciones de amplitudes simétricas y decrecientes del centro al borde se consigue reducir el nivel de los lóbulos secundarios ensanchando el principal, reduciendo así la directividad del array.

Si el array es omnidireccional (anchos de haz iguales para ambos planos), su directividad se puede calcular con la siguiente expresión:

$$d_0 = \frac{4\pi}{2\pi B W_{-3dB}} \quad (A \, dim)$$

## Arrays reticulares

Son arrays formados por una rejilla de elementos equidistantes.

$$A_{apertura} = d_x d_y M N$$

Donde M y N son el ancho y el alto en número de elementos del array respectivamente y  $d_x$  y  $d_y$  las distancias entre los elementos en x e y.

Además, el ángulo eléctrico sigue la expresión habitual en el eje x pero en el eje y es:

$$\psi = k_0 d\sin\theta + \alpha$$

La eficiencia de apertura de los arrays reticulares se puede suponer 1.

## Aperturas

Para frecuencias iguales o mayores que GHz, en vez de utilizar un cable para transportar la corriente desde y hasta la antena se utiliza una guía de ondas, que es tubería metálica de sección circular o rectangular que transporta los campos electromagnéticos en su interior.

Antena de apertura es la manera genérica de denominar los dispositivos que consiguen radiar al espacio los campos electromagnéticos que están hacinados en una guía de ondas.

 $Geometría guía ondas \equiv Geometría polarización onda hacinada \equiv Geometría de la polarización onda radiada$ 

La eficiencia de iluminación o de apertura  $\varepsilon_a$ , se relaciona con el modo en el que está fabricada la apertura. Sus valores típicos están entre 0'5 y 0'8 y siempre es menor que 1.

$$d_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{aper} \varepsilon_a \quad (A \, dim \, . \,)$$

$$\uparrow$$
 Tamaño apertura  $\rightarrow \uparrow$  Estrecho haz de radiación  $\rightarrow \uparrow$  Directividad

## Bocinas

Las bocinas son un ensanchamiento de la propia guía de onda para direccionar los campos.

Sus principales aplicaciones son:

- Alimentadores de antenas tipo reflector
- o Antenas individuales para establecer radioenlaces en bandas milimétricas

• Antenas de satélite para conseguir una cobertura global de la Tierra

Son muy utilizadas en las bandas de frecuencia de las microondas pues proporcionan alta ganancia (8dB - 30dB), ancho de banda relativamente grande y son fáciles de diseñar y construir.

Los tipos de bocina más utilizados son:

- Bocinas rectangulares: generadas a partir de una guía onda rectangular
- Bocinas cónicas: generadas a partir de una guía onda circular

## Bocinas rectangulares

Las bocinas rectangulares ensanchan uno los dos lados de la guía rectangular.



Bocina rectangular  $\equiv$  Modotransversal eléctrico (TE10)  $\rightarrow \vec{E}$  dirección vertical,  $\vec{H}$  dirección horizontal



En cuanto a la directividad de estos tipos de bocinas:

La sectorial de plano H tiene un haz muy estrecho en la dirección horizontal

- La sectorial de plano E tiene un haz muy amplio en la dirección horizontal
- La bocina piramidal es la más usada pues permite controlar la anchura del haz en ambos planos por separado Altura lóbulos secundarios plano E > Altura lóbulos secundarios plano H

Ancho de haz plano E < Ancho de han plano H

El eje Y de las gráficas es:

$$E(dB) = 20\log(Intensidad de campo relativa)$$

Si dadas las gráficas, piden una bocina con el lóbulo principal lo más simétrico posible, se igualaría  $\theta$  de ambas gráficas a E = -3dB (0'7 en escala lineal).

Errores de fase

Las bocinas, al aumentar las dimensiones de la guía de onda para aumentar la directividad, hacen que aparezcan errores de fase s y t para los planos E y H respectivamente. Esto se debe a que dentro de la bocina, el frente de ondas es esférico.

 $\int Longitudbocina \leftrightarrow \int Errores defase$ 



Los errores de fase ensanchan el haz, aumentan los lóbulos secundarios y rellenan los nulos del diagrama de radiación. Se miden en vueltas, es decir, múltiplos de  $2\pi$  radianes y es esta unidad en la que están en las gráficas, aunque también lo podrían dar en grados y habría que pasarlo primeramente a vueltas.



 $Bocina piramidal \leftrightarrow Condición de realizabilidad R_1 = R_2$ 

Nota: Las longitudes R<sub>i</sub> son del centro de fase de la bocina hasta el extremo

Cuando se quiere alta eficiencia hay que tener errores de fase pequeños (s,t < 0'15,  $\varepsilon_a = 0'8$  y  $\eta_{rad} = 1$ ) y por lo tanto las bocinas serán muy largas.

Si se quieren bocinas lo más cortas posibles, se realizan diseños óptimos con s=1/4 y t=3/8, siendo  $\varepsilon_a = 0'5$ . Una bocina óptima es la más corta posible para una determinada ganancia, no es la más directiva, ni la de menos lóbulos laterales.

## $\varepsilon_a$ es inversamente proporcional al error de fase

#### Bocinas cónicas

Las bocinas cónicas son un ensanchamiento de la guía de onda cilíndrica.



En estas bocinas, el error de fase s, será el mismo en los planos E y H. Sin embargo, sus diagramas no son iguales porque la ley de iluminación es diferente sobre los ejes x e y.



#### Bocinas cónicas corrugadas

Para conseguir que los planos E y H sean iguales, se realizan una serie de incisiones en el interior de la bocina que se llaman corrugaciones. Estas corrugaciones presentan una alta impedancia para las corrientes longitudinales, forzando a que el campo se anule en toda la periferia de la bocina. Una buena aproximación de su eficiencia de apertura es 0'6.



 $Bocinacónicacorrugada \equiv Modohíbrido equilibrado (HE11)$ 

Las ventajas de una bocina cónica corrugada frente a una sin corrugaciones:

- Las líneas de campo son prácticamente paralelas
- Diagrama de radiación con simetría axial, o, en otras palabras, diagramas de plano E y plano H iguales
- Bajos lóbulos secundarios
- Baja polarización cruzada

Estas bocinas se usan mucho como alimentadores de reflectores por las siguientes razones:

$$\circ \qquad Planos E y Higuales \leftrightarrow \uparrow \varepsilon_{total} reflector$$

$$\circ \qquad \downarrow Nivel l \acute{o} bulos secundarios \leftrightarrow \downarrow P\acute{e} rdidas por spillover$$

$$\circ \qquad L \acute{i} neas de campo paralelas \leftrightarrow \uparrow Pureza de polarización$$

## Reflectores

Se basan en un alimentador y un reflector en el cual se refleja la radiación poco directiva del alimentador generando un haz de alta directividad.

Se les llama coloquialmente antenas parabólicas porque el reflector sigue la geometría de una parábola, situándose el alimentador en el foco de la parábola.



$$g = \frac{4\pi A_{aper} \varepsilon_{total}}{\lambda^2} \quad (Adim.)$$

A falta de datos, la eficiencia total típica de un reflector es de entre 0'7 y 0'75.

Notas:

- La eficiencia total será igual a la eficiencia de apertura si no dan datos acerca del bloqueo o el spillover.
- Esta fórmula es totalmente equivalente a la de la directividad de una apertura cualquiera

Siendo la eficiencia total el producto de varias eficiencias parciales:

• Eficiencia de iluminación o de apertura ( $\varepsilon_a$ ): Tendrá un valor alto cuando el reflector se ilumine uniformemente, es decir, cando el alimentador tenga un haz ancho que ilumine tanto el centro del reflector como los bordes del mismo.

$$C (Tapering \circ iluminación en el borde) = \frac{Iluminación borde reflector}{Iluminación centro reflector} (Adim.)$$

Ilum. borde < Ilum. centro  $\rightarrow C \leq 1$ 

$$\begin{array}{l}
\uparrow C \rightarrow & \uparrow \varepsilon_{a} \\
C = & 10 \text{logc} (\text{dB})
\end{array}$$

Si no dan la  $\varepsilon_a$  del reflector como dato, se supone 0'6 y la eficiencia del sistema como 1.

Si me piden la máxima ganancia del reflector, se supone C  $\simeq -10$ dB = 0'1 pues así se alimenta 10 veces más el centro de la antena que sus bordes. El valor óptimo de C está entre -10dB y -12dB.

Además, el tapering, debido a la diferencia de caminos, tiene la expresión adicional:

$$C = 10\log(f(\theta)) + 20\log(\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)) \quad (dB)$$

Donde  $f(\theta)$  es la función del diagrama de radiación. Cuando el diagrama de radiación no tiene simetría de revolución habrá dos valores de C independientes (de los que normalmente se hace la media). Es por esto que este sumando es equivalente a 20logicr y a  $10\log\left(\frac{G_{\theta e}}{G_{max}}\right)$  usando la expresión que más convenga según los

datos.

## Nota: Esta fórmula es válida también para el paraboloide equivalente

- Eficiencia de bloqueo ( $\varepsilon_b$ ): Representa las ondas emitidas o recibidas por el reflector que tropiezan en el alimentador, no llegando así a su destino.
- Eficiencia de spillover o de desbordamiento ( $\varepsilon_{so}$ ): Las ondas radiadas por el alimentador a veces salen fuera del reflector si el haz del alimentador es muy ancho o si el alimentador está lejos del reflector. Entonces:

$$\varepsilon_{so} = \frac{P_{reflejada por el reflector}}{P_{radiada por el alimentador}} \quad (Adim.)$$

$$\left| \frac{F}{D} \leftrightarrow \right| Uniformidad iluminación reflector \leftrightarrow \left| \varepsilon_{a} \leftrightarrow \right| \varepsilon_{so}$$

$$Iothermitian (Adim.)$$

$$Iothermitian (Adim.$$

Nota: si preguntan cuándo se pude aumentar la ganancia en dos situaciones distintas:

$$\Delta G = 10 \log \left( \frac{\epsilon_{g \text{ máx situación nueva}}}{\epsilon_{g \text{ máx situación anterior}}} \right) \quad (dB)$$

Anchura de haz a -3dB

d

$$\Delta \theta_{-3dB} \cong \frac{70\lambda}{D}$$
 (rad)

Nota: La D se refiere al diámetro del reflector, no a la directividad que en cualquier caso lleva subíndice 0.

## Geometría del reflector

- $\circ$   $\theta_0 \circ \theta$ , se define como el ángulo con el que el alimentador ve el borde del reflector o como la mitad de la anchura del haz del alimentador.
- F se define como la distancia focal de la parábola matriz
- D se define como el diámetro del paraboloide principal.

La relación F/D define a la antena y se usa para conocer de qué manera ilumina el alimentador a la superficie del reflector:

De las ecs. de la parábola: 
$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{D}{4F} \leftrightarrow \frac{F}{D} = \frac{1}{4\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$
 (Adim.)  
$$\left|\frac{F}{D} \leftrightarrow \right|^{2}$$
Curvatura del reflector

Nota: las fórmulas de la parábola valen para el paraboloide principal y para el equivalente

Si hay que suponer el parámetro F/D de un reflector, se escoge el valor 0'4 pues es el de una antena compacta con un alimentador apropiado.



Una F/D de entre 0'3 y 0'4 es ideal pues la antena es compacta y el alimentador apropiado.

## Tipos de reflectores

Reflector parabólico centrado



Consiste en un paraboloide que transforma un frente de ondas esférico, radiado desde su foco, en un frente de ondas plano.

Los caminos recorridos por las ondas están en fase en la apertura equivalente del reflector lo que da lugar a un haz colimado de alta ganancia en la dirección del eje de revolución.

## Sistema Cassegrain centrado

En este reflector, los rayos que salen del alimentador se reflejan primero en un subreflector que está en el foco de la parábola para después reflejarse nuevamente en el reflector principal. Se producen, por tanto, dos reflexiones. El subreflector tiene la forma de un casquete de hiperboloide de revolución y comparte el foco con el reflector parabólico principal.



Las ventajas de los sistemas Cassegrain son las siguientes:

- Alta ganancia. Normalmente estos sistemas se utilizan cuando las ganancias deseadas son altas (>45dBi)
- La ubicación del alimentador es próxima al vértice del reflector. Posibilitando la utilización de líneas de transmisión cortas y de bajas pérdidas
- En recepción captan menos ruido del espacio circundante que en los reflectores simples.

Por otro lado, sus inconvenientes son:

 El subreflector produce un bloqueo ya que parte de los rayos que llegan en dirección al reflector principal encuentran como obstáculo el subreflector y chocan con él. Este bloqueo es mayor que en los reflectores simples.

 $\Big| \begin{array}{c} Bloqueo \ \rightarrow \ \ \\ \\ \varepsilon_{bloqueo} \ \rightarrow \ \ \\ Incremento \ lóbulos \ secundarios \end{array}$ 

(sobre todo el adyacente al principal)

• Los sistemas Cassegrain son menos compactos y, por lo tanto, no son aptos para cualquier lugar

## Reflector parabólico descentrado

En ellos, el alimentador se descentraliza del foco de la parábola para evitar el bloqueo. Esto supone mayor eficiencia global y menos nivel de lóbulos secundarios que en un sistema centrado.

Superficie parabólica



# Logaritmos

Las magnitudes se pueden presentar de manera absoluta o de manera relativa al caso ideal (antena isótropa). Para magnitudes relativas se tiene:

- Se utilizan decibelios (dB) o sus variantes como unidad
- El valor máximo posible representa el punto o la dirección en el que la energía es la misma que radiaría la antena isótropa, ese valor es 1 (0dB)
- Se utiliza mayúscula para unidades expresadas en unidades relativas. Para magnitudes absolutas/lineales se utiliza minúscula.
- Los dB sólo se suman o restan. Para hacer cocientes o productos hay que pasar a lineal

Para pasar magnitudes absolutas a relativas:

• Si la magnitud tiene que ver con voltajes:

$$V = 20\log(v)$$

• Si la magnitud tiene que ver con potencias:

$$P = 10\log(p)$$

• Si la magnitud es adimensional tenemos que ver que unidades se anularon, por ejemplo:

 $G = 10\log(g) \leftrightarrow$  Ya que las unidades que se anularon eran potencias

 $AD = 20\log(ad) \leftrightarrow$  Ya que las unidades que se anularon eran voltajes

Se pueden también pasar ecuaciones enteras de escala lineal a escala logarítmica de la siguiente manera:

- Las divisiones pasan a ser restas
- Las multiplicaciones pasan a ser sumas

Por ejemplo, la ecuación en escala lineal siguiente:

$$pire = g \cdot p_{entregada \ a \ la \ anten a}$$

En escala logarítmica sería:

$$PIRE = G(dBi) + P_{entregada \ a \ la \ antena}(dBW)$$

Además, los logaritmos tienen las propiedades siguientes:

$$\log(ab) = \log a + \log b$$
$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b$$

Las variantes de los decibelios más utilizadas son:

- dB para magnitudes adimensionales
- dBW para potencias en W
- dBm para potencias en mW (¡¡OJOOOO!!)
- dBV para voltajes en V
- dBi para decibelios de potencia radiada isotrópicamente (a efectos de unidades son dBs estándar)
- etc

En las ecuaciones se pueden mezclar dBms con dBs o dBWs con dBs pero nunca dBms con dBWs

Truco para convertir rápido entre magnitudes de la escala logarítmica:

 dBW + 30dB = dBm => Si hay que hacer conversiones de logarítmico a lineal complejas, es mejor tener las unidades logarítmicas en dBW antes de empezar.

# Equivalencia entre unidades y trucos

- W = VA
- V = ΩA
- J = Ws
- Para convertir X radianes a grados se multiplica  $X \frac{180}{\pi}$

Para convertir Y grados a radianes se multiplica 
$$Y \frac{\pi}{180}$$

- "Azimut" es equivalente a  $\varphi$  de coordenadas esféricas
- "Ángulo de elevación" ó "tangente en caída" son equivalentes a  $\theta$  de coordenadas esféricas

## Cuidado con la calculadora

Hay que poner todas las cantidades en cada ecuación en unidades del sistema internacional, por ejemplo, radianes y metros, nunca se debe mezclar por ejemplo metros y radianes.

# Aproximaciones en el examen

Elegir el número de decimales a utilizar y mantenerlo durante todo el problema. Las soluciones oficiales suelen usar un decimal o como mucho dos.