

Lección 5: Antenas de ondas electromagnéticas

Resumen

Una antena sirve para transmitir o recibir ondas electromagnéticas. Como antena emisora, ésta convierte las ondas electromagnéticas de los cables de corriente alterna en ondas del espacio libre o, a la inversa, como antena receptora, convierte las ondas electromagnéticas que llegan como ondas del espacio libre de nuevo en ondas electromagnéticas en corriente alterna. Para ello es muy importante la transformación o adaptación de la impedancia característica del cable a través de la configuración de la antena a la impedancia característica del vacío.

Tabla de contenidos

- Folio 2: Particularidades de ondas electromagnéticas
- Folio 3-5: Corriente en el dipolo y potencia radiada (1-3)
- Folio 6-8: Antenas especiales (1-3)
- Folio 9-11: Campo de radiación de antenas (1-3)
- Folio 12: Características del campo cercano y del campo lejano

Particularidades de ondas electromagnéticas

Existe una relación entre la intensidad del campo eléctrico y magnético de un campo electromagnético que es similar a la ley de Ohm, $U/I = R = \text{const.}$ Para las cantidades del campo eléctrico y campo magnético, se aplica lo siguiente a la impedancia, es decir, la resistencia de corriente alterna denominada impedancia característica del vacío Z_0 :

$$Z_0 = \frac{E}{\frac{1}{\mu_0} \cdot B} = \mu_0 \cdot c = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c}$$

La impedancia se calcula en el espacio vacío a través de la relación entre la constante de permeabilidad μ_0 y la constante dieléctrica ϵ_0 .

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}}{\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \frac{As}{Vm}}} = 120\pi \cdot \Omega \approx 377 \Omega$$

De este modo, las magnitudes de los campos E y B pueden convertirse en el espacio libre.

Corriente en el dipolo y potencia radiada (1)

Una característica importante para el diseño de antenas es la resistencia de la antena. La resistencia de radiación se calcula a partir de la potencia de radiación de un dipolo y sus dimensiones y la potencia eléctrica mediante la ley de Ohm.

$$p = q \cdot d$$

p : momento dipolar

q : carga

d : extensión del dipolo, longitud de la antena

$$\dot{p} = I \cdot d$$

I : corriente eléctrica

$$I = I_0 \cdot \cos \omega t$$

$$\ddot{p} = \dot{I} \cdot d = -I_0 \cdot d \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

$$\ddot{p}^2 = I_0^2 \cdot d^2 \cdot \omega^2 \cdot \sin^2 \omega t \quad ; \quad \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} \quad ; \quad \text{promedio temporal}$$

$$\ddot{p}^2 = \frac{1}{2} \cdot I_0^2 \cdot d^2 \cdot \omega^2$$

$$I_{\text{efectiva}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_0$$

$$\ddot{p}^2 = I_{ef}^2 \cdot d^2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot \nu^2$$

Corriente en el dipolo y potencia radiada (2)

Sustitución de la aceleración del dipolo (en la antena) por la potencia de radiación del dipolo.

Nota: A partir de aquí, la potencia radiante que es la intensidad de la radiación dipolar I se denotará por P para mantener la corriente eléctrica con I .

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{\ddot{p}^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot c^3} = \frac{2}{3} \cdot \frac{I_{ef}^2 \cdot d^2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot \nu^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot c^3}$$

Potencia total radiada por el dipolo excitado (= antena) expresado en términos de longitud de onda:

$$P = \frac{2\pi}{3\epsilon_0 c} \cdot \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 \cdot I^2$$

La potencia eléctrica P calculada mediante la ley de Ohm.

$$P = R \cdot I^2$$

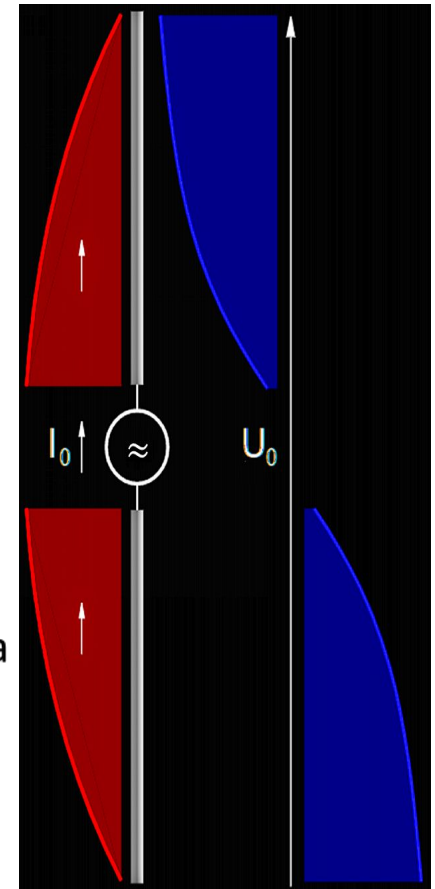
Corriente en el dipolo y potencia radiada (3)

La resistencia R a la radiación de la antena se deduce de la comparación de los coeficientes.

$$R = \frac{2\pi}{3 \cdot \epsilon_0 \cdot c} \cdot \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2$$

$$R \approx 790 \, \Omega \cdot \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2$$

Una construcción sencilla es una antena dipolo. Su longitud es la mitad de la longitud de onda λ . Está separada en la mitad y alimentada simétricamente; allí se encuentran un máximo de corriente y un mínimo de voltaje. Si la impedancia se adapta exactamente al espacio exterior, lo ideal sería que la energía suministrada se irradia por completo. Este caso ideal no se cumple. Según el diseño, las eficiencias se encuentran entre unos pocos % hasta cerca del 80 %.



Antenas especiales (1)

Las frecuencias superiores a los 30 MHz irradian al espacio libre y las ondas resultantes están lo suficientemente lejos del terreno para separarse de él en forma de radiación. Las frecuencias inferiores de 30 MHz producen ondas esféricas de gran longitud de onda, lo que obliga a construir antenas inmensas. Las pérdidas a través de la superficie terrestre aumentan a frecuencias más bajas, y la eficacia de las antenas disminuye más.

En el espacio libre, la comunicación por radio con una longitud de onda adecuada no es ningún problema. Si, por el contrario, se quiere llegar a los submarinos, las ondas de radio tienen que penetrar el agua eléctricamente conductora.

Los submarinos están protegidos de las frecuencias de radiocomunicación ordinarias por la conducción del agua del mar, pero las ondas de radio en la banda de muy baja frecuencia (VLF) debajo de 30 kHz pueden penetrar hasta profundidades de unos 15 metros, lo que permite a los submarinos recibir mensajes sin salir a la superficie y ser vulnerables a la detección. Sin embargo, aquí hay un problema porque la radiación dipolar es proporcional

$$P \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Antenas especiales (2)

Además, una antena efectiva de longitud $\lambda/2$ tendría que tener una longitud de 5 km a esta baja frecuencia. Se puede realizar una longitud de antena de aproximadamente 1 km , lo que corresponde a $\lambda/10$. Tanto la radiación de la antena como su resistencia a la radiación se reducen para muchos órdenes de magnitud.

$$\begin{aligned} \nu &= 30 \text{ MHz} \rightarrow \lambda = 10 \text{ m} \\ \nu &= 30 \text{ kHz} \rightarrow \lambda = 10^4 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\frac{P_{30 \text{ kHz}}}{P_{30 \text{ MHz}}} = \left(\frac{10 \text{ m}}{10^4 \text{ m}} \right)^4 = 10^{-12}$$

$$\frac{R_{30 \text{ kHz}}}{R_{30 \text{ MHz}}} = \frac{\left(1 \text{ km} / 10 \text{ km} \right)^2}{\left(5 \text{ m} / 10 \text{ m} \right)^2} = 0.04$$

Antenas especiales (3)

La consecuencia es que la comunicación desde tierra hacia los submarinos sumergidos es solo unidireccional debido a los tremendos requisitos de energía eléctrica para operar una antena a bajas frecuencias. Además del tamaño de la antena, la potencia necesaria es de 1 MW o más.

Un ejemplo de este tipo de instalaciones se encuentra en Australia, unos más en otros países. Esta instalación de la costa oeste en Australia consta de 13 torres con una longitud total de 4400 m , que operan a una frecuencia cerca de 20 kHz . Las torres forman la antena propiamente dicha, el soporte horizontal de alambre actúa como una carga capacitiva para amplificar la corriente en las torres con el fin de mejorar la potencia radiada y la eficiencia. La recepción en los submarinos se realiza con los correspondientes circuitos oscilantes, que tienen grandes dimensiones de la inductancia (= bobina) por la baja frecuencia.

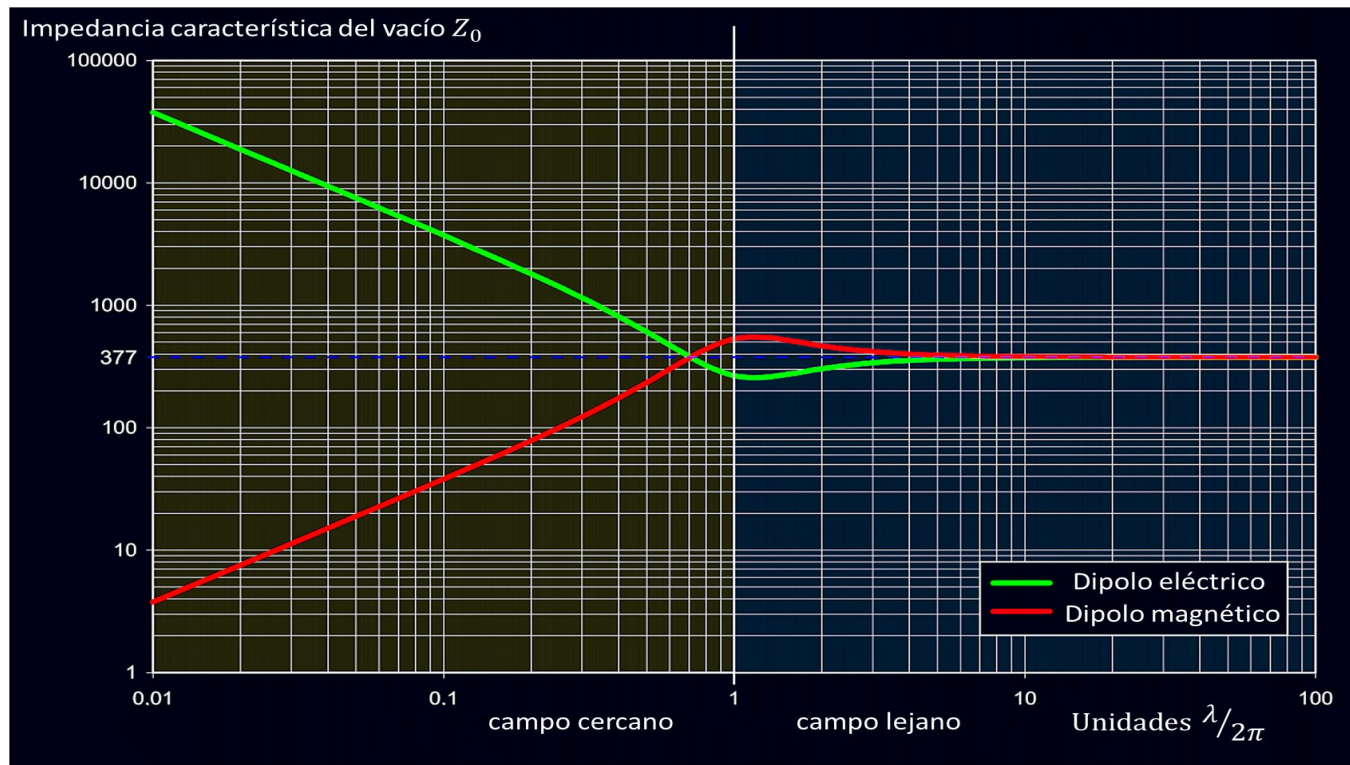


Campo de radiación de antenas (1)

Las ondas electromagnéticas (ondas de radio) son generadas por una fuente de campo eléctrico o magnético excitada por un voltaje alterno o una corriente alterna. Por lo tanto, el único elemento básico elemental para la generación de campos es el dipolo eléctrico (una barra) y el dipolo magnético (una bobina). Un dipolo eléctrico como antena genera una gran intensidad de campo eléctrico en el campo cercano que disminuye a la tercera potencia con la distancia. La intensidad de campo magnético más reducida disminuye cuadráticamente con la distancia en el campo cercano. Un dipolo magnético como antena genera una intensidad de campo magnético elevada en el campo cercano que disminuye a la tercera potencia con la distancia. La intensidad del campo eléctrico más pequeño disminuye cuadráticamente con la distancia. Estas diferencias se expresan en una impedancia característica de campo (en el vacío o en un medio), que cambia en el campo cercano como función de la distancia a la antena. Las antenas eléctricas con un campo eléctrico dominante tienen una impedancia de campo decreciente como función de la distancia, mientras que las antenas magnéticas tienen una impedancia de campo baja cuyo valor aumenta con la distancia.

Campo de radiación de antenas (2)

Al aumentar la distancia de la antena, la impedancia se estabiliza al valor constante de la impedancia característica de campo del espacio vacío de 377Ω .



Campo de radiación de antenas (3)

En el campo lejano de una antena, la potencia radiada disminuye con el cuadrado de la distancia (ley de radiación óptica), sin ningún efecto de retroalimentación sobre el emisor. En el campo cercano, existe una amortiguación de la radiación, es decir, se genera una absorción. Esto es semejante a la inducción magnética en un transformador.

En la región del campo lejano, cada parte del campo electromagnético induce un cambio en la otra parte, y la relación entre las intensidades del campo eléctrico y magnético es sólo la impedancia de onda en el medio. Sin embargo, en la región de campo cercano, los campos eléctrico y magnético pueden existir independientemente el uno del otro, y un tipo de campo puede dominar al otro en diferentes subsectores.

El límite entre campo cercano y campo lejano depende del tipo de antena. En general, el comienzo del campo lejano se indica con la relación

$$r = 2 \cdot \frac{D^2}{\lambda}$$

r : distancia de la antena

D : Longitud o diámetro de la antena

Características del campo cercano y del campo lejano

En la tabla se muestran las diferencias características entre las antenas del campo cercano y las del campo lejano.

	Campo cercano	Campo lejano
Transmisión de energía	Transmisión de energía con acoplamiento inductivo o capacitivo	La energía se propaga como campo de radiación en el espacio
Existencia	Desaparece al apagar la fuente	El campo de radiación se propaga hasta el infinito si no ha sido absorbido antes
Registro de valores medidos	Una medición provoca cambios de potencia en voltaje y corriente	Una medición absorbe parte del campo de radiación sin retroalimentación a la fuente
Forma del campo	Determinado por la fuente y su forma geométrica	Ondas esféricas que toman una forma más plana a grandes distancias
Impedancia	Depende de la fuente y el medio	
Transmisión de energía	Campo predominante eléctrico o predominante magnético	Ondas - fotones