

Capítulo-6: Antenas

Las antenas son dispositivos diferentes a los vistos hasta ahora ya que la corriente que circula por ellas debe radiar energía e interactuar con otras antenas. La fuente de esas antenas son usualmente líneas de transmisión, por lo que una antena puede ser vista como una carga excitada mediante corrientes que circulan a través de los conductores de la antena y que vuelven a la tierra. Normalmente una antena está pegada a otro objeto conductor como una carcasa metálica que contendrá el transmisor o receptor, o muchas antenas están situadas cerca de la superficie de la tierra, la cual tiene una conductividad significativa. Los conductores pegados a las antenas, si bien conectados o no a ellas, se comportarán como planos de tierra, y su influencia en las prestaciones de la antena será nuestro objetivo en este capítulo.

1 Conceptos Fundamentales

Una antena es una estructura diseñada para radiar energía electromagnética eficientemente. En otras palabras, es un objeto conductor en el que los electrones son acelerados para que puedan transferir energía en forma de ondas electromagnéticas al espacio libre con las menores pérdidas posibles. Como parte de un sistema de microondas, una antena será la interfaz entre las ondas guiadas en una línea de transmisión y las ondas planas del espacio libre. En la siguiente figura podemos observar un ejemplo de antena, el dipolo:

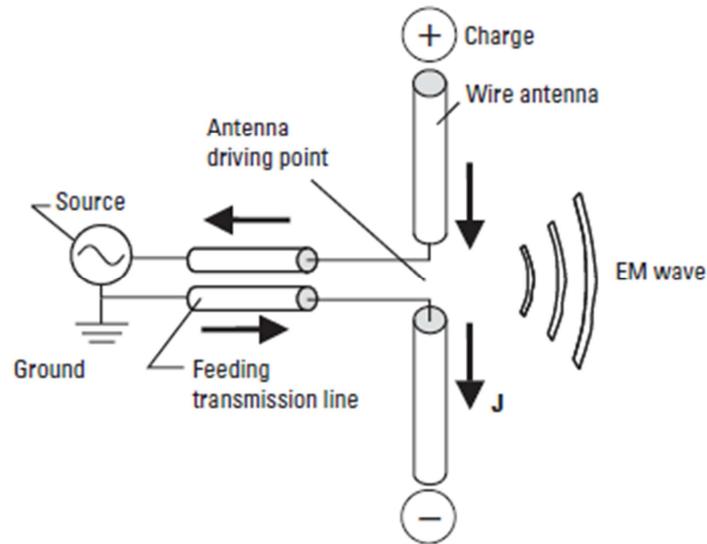


Ilustración 1: Antena Dipolo

Cargas de polaridad opuesta se acumulan en los extremos del dipolo. La interfaz entre la fuente y la antena es la línea de transmisión, que podría ser una línea coaxial o una línea microstrip. Podemos ver la antena como una impedancia de carga que termina la línea de transmisión. La parte real de la impedancia de antena es la resistencia de radiación, y determina el nivel de potencia radiada en el campo lejano. La parte imaginaria de la impedancia de antena es la responsable del almacenamiento de energía en el campo cercano. Idealmente, queremos diseñar antenas para obtener una máxima eficiencia de radiación, que se da cuando la parte imaginaria de la impedancia de antena se hace cero (resonancia), y la parte real está adaptada a la impedancia de la línea.

La tierra en una antena se puede definir como una referencia de potencial, fuente o sumidero de las corrientes. Sin embargo, la interacción de la antena con otras estructuras complica la situación. Por ejemplo, para el dipolo podemos definir la tierra como cualquiera de los dos brazos. Arbitrariamente se escoge el brazo inferior, que se conectará a la tierra de la fuente. La tierra de la fuente y la tierra del dipolo no están generalmente al mismo potencial. Ahora, si colocamos una lámina de metal bajo la antena, la antena interactuará con la lámina, induciendo cierta corriente en ella. Aunque esta corriente no circulará hacia la fuente de la antena, la presencia de cargas

cambiará el patrón de radiación y la impedancia de antena, incluyendo el potencial de la tierra de la antena.

En efecto, la lámina metálica será parte de la antena, y podríamos llamarla tierra si la conectamos a la fuente o la tierra de la antena. En comparación con los circuitos no radiantes, el comportamiento de la antena es particularmente sensible a las estructuras metálicas en su vecindad. Por ello, es importante que la corriente que vuelve a la fuente de los terminales de la antena siga un camino bajo en pérdidas y no radiante. Alguna impedancia en este camino, se añadirá a la impedancia de antena modificando la adaptación de la antena a la línea, y la eficiencia de la radiación.

Hay dos antenas básicas: antenas de “cables”, como el dipolo del ejemplo, y las antenas de apertura, como la antena de bocina. La distribución de corrientes en el primer tipo es relativamente fácil de encontrar, y de ella sacaremos la impedancia de antena y su patrón de radiación. En comparación, la distribución de corrientes en una antena de apertura es muy compleja de encontrar. Por ello, los campos se tendrán que aproximar en este tipo de antenas, calculando de esta manera la impedancia de antena y el patrón de radiación. El primer tipo de antenas, es más bien conocido como antenas de fuentes reales, y el segundo tipo, antenas de fuentes equivalentes.

En general, las antenas tienen dos planos principales: el plano de la antena paralelo al campo eléctrico es el plano E, y el plano paralelo al campo magnético, es el plano H. El ancho de banda de potencia mitad es el ángulo entre dos puntos en cualquier cara del lóbulo más ancho, de tal manera que la directividad ha caído a la mitad. La directividad máxima de la antena vendrá dada por la siguiente aproximación:

$$D_{max} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

Donde A_e es el área efectiva de la antena.

La respuesta de una antena receptora a una señal incidente se mide como la cantidad de potencia que circula entre sus terminales. Una antena con un bajo pico de directividad, como el dipolo, tenderá a responder de forma similar a señales

procedentes de muchas direcciones. Mientras que una antena con gran directividad, como un reflector, responderá fuertemente a una señal cercana a su pico de su lóbulo principal, pero débilmente a las señales procedentes de otro lugar.

2 Interacción Entre Planos de Tierras y Fuentes Radiantes

Las antenas se suelen diseñar para operar en condiciones de espacio libre, incluso sabiendo que casi siempre van a radiar en presencia de otras estructuras conductoras, como planos de tierra. Por ello, la radiación de la antena y la impedancia característica dependerán de su localización y distancia al plano de tierra. Parece claro que raramente las antenas existirán en un total aislamiento.

Hay dos situaciones posibles entre las antenas y los planos de tierra: aquellas para las que el plano de tierra es parte integral de la antena, y aquellas para las que el plano de tierra no está físicamente conectada a la antena. Todas las antenas, como parte del sistema, tienen al menos una línea de transmisión conectada entre sus terminales. Junto a proporcionar el camino para la corriente que circula entre la antena y el resto del sistema, la estructura de la línea puede perturbar las características de radiación de la antena. En esta sección discutiremos en términos generales los efectos del plano de tierra en las fuentes radiantes, incluyendo la reflexión y la difracción.

2.1 Conductor Perfecto. Planos de Tierras Infinitos

Un plano de tierra de conductor perfecto ($\sigma = \infty$) reflejará una onda electromagnética incidente, de acuerdo con la ley de Snell, con un ángulo sobre la normal del plano igual al ángulo de la onda incidente. Por ello, si situamos una antena sobre un plano de tierra, el rayo de la antena en dirección al plano se reflejará otra vez hacia al espacio al alcanzar a éste.

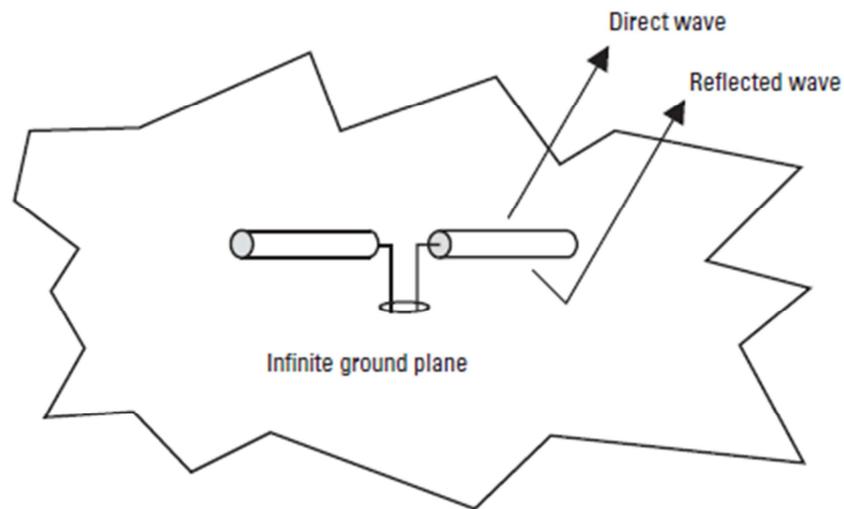


Ilustración 2: Plano de Tierra Infinito

La onda reflejada interferirá de forma constructiva o destructiva con el rayo directo, dependiendo de la distancia a la que esté la antena del plano de tierra. El método de las imágenes es una técnica simple pero efectiva que podemos usar para obtener el patrón de radiación de antenas sobre un plano de tierra infinito. Del capítulo dos sabemos que la componente tangencial del campo eléctrico en un conductor perfecto debe ser cero, y que las líneas de la densidad de flujo eléctrico deben ser normales a la superficie del conductor. A continuación detallaremos gráficamente los diferentes casos que se nos pueden dar para la aplicación del método de las imágenes:

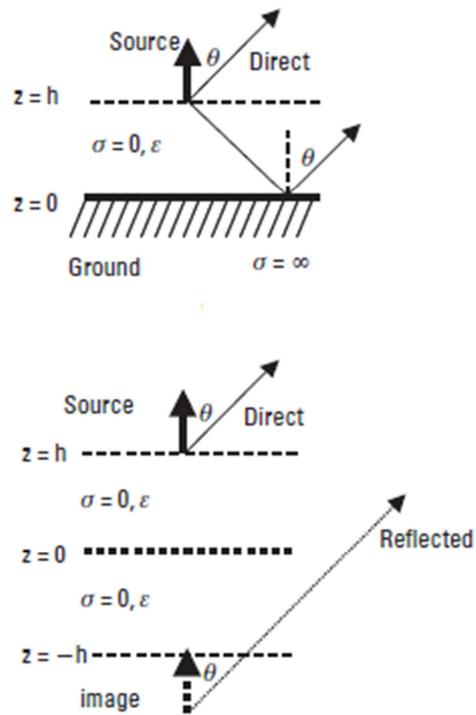


Ilustración 3: Método Imágenes para Fuente de Campo Vertical

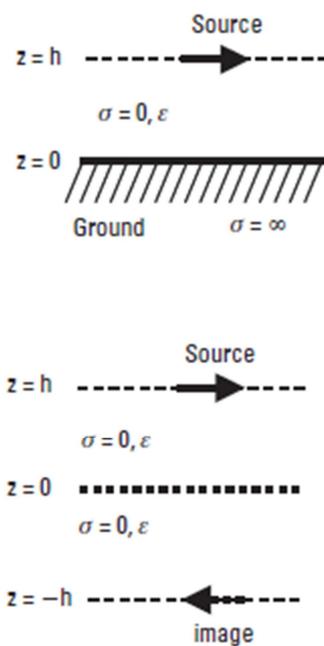


Ilustración 4: Método de las Imágenes para Fuente de Campo Horizontal

Podemos escribir una ecuación para el campo lejano radiado por cada par de fuentes verticales, teniendo en cuenta las contribuciones de la fuente y de su imagen. Solo existirá componente *theta* del campo, ya que la componente *phi* es ortogonal a la

fuelle:

$$E_{\theta V} = s_{\theta}(r, \theta, \varphi)(e^{jk h \cos \theta} + e^{-jk h \cos \theta}) = 2s_{\theta}(r, \theta, \varphi) \cos(kh \cos \theta)$$

Donde $k = 2\pi/\lambda$; $s_{\theta}(r, \theta, \varphi)$ es la componente *theta* del campo el6ctrico, y el t6rmino del par6ntesis se denomina factor array de la antena.

Para las fuentes horizontales, tendremos componentes *theta* y *phi* del campo el6ctrico lejano, dadas por las siguientes expresiones:

$$E_{\theta H} = s_{\theta}(r, \theta, \varphi)(e^{jk h \cos \theta} - e^{-jk h \cos \theta}) = j2s_{\theta}(r, \theta, \varphi) \sin(kh \cos \theta)$$

$$E_{\phi H} = s_{\phi}(r, \theta, \varphi)(e^{jk h \cos \theta} - e^{-jk h \cos \theta}) = j2s_{\phi}(r, \theta, \varphi) \sin(kh \cos \theta)$$

En este caso, las contribuciones de la fuente y la imagen se restan, por lo que conforme h se vaya aproximando a cero, el campo de la fuente y de la imagen se cancelar6 en la superficie del plano de tierra. A continuaci6n vemos una serie de im6genes de las componentes para el campo lejano para fuentes verticales y horizontales de antenas isotr6picas a diferentes distancias sobre el plano de tierra.

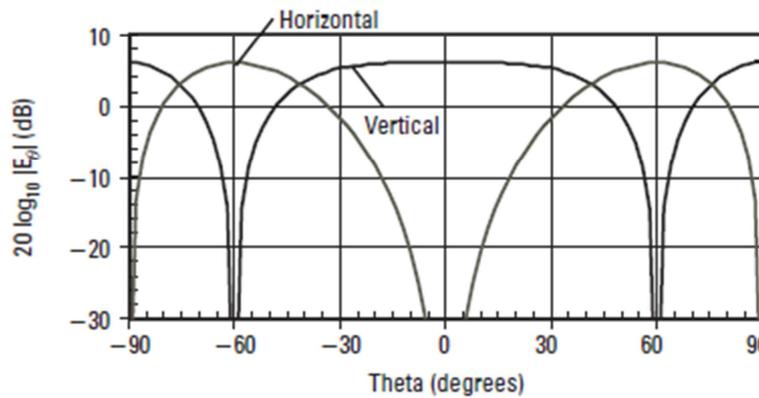
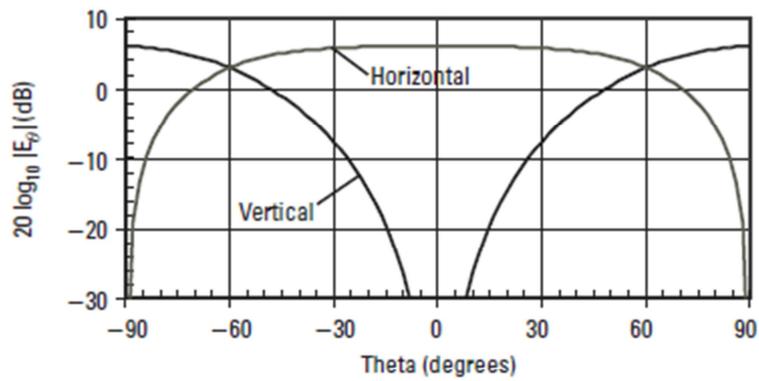
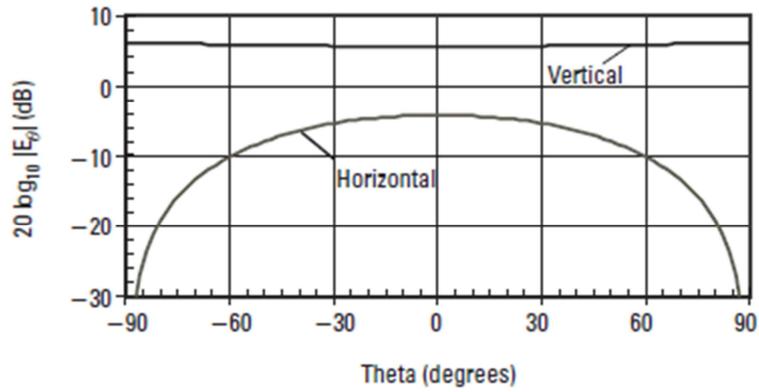


Ilustración 5: Afección del Plano de Tierra en el Diagrama de Radiación

Dado que un radiador isotrópico tiene un patrón no directivo, queda claro de las imágenes que el plano de tierra cambia el patrón de radiación significativamente. Podemos hacer ahora uso de la discusión mantenida hasta ahora para explicar la interferencia multitrayecto, fenómeno que ocurre en comunicaciones de microondas y sistemas de radar que confían en la propagación paralela y cercana a la superficie de una tierra imperfecta (la Tierra).

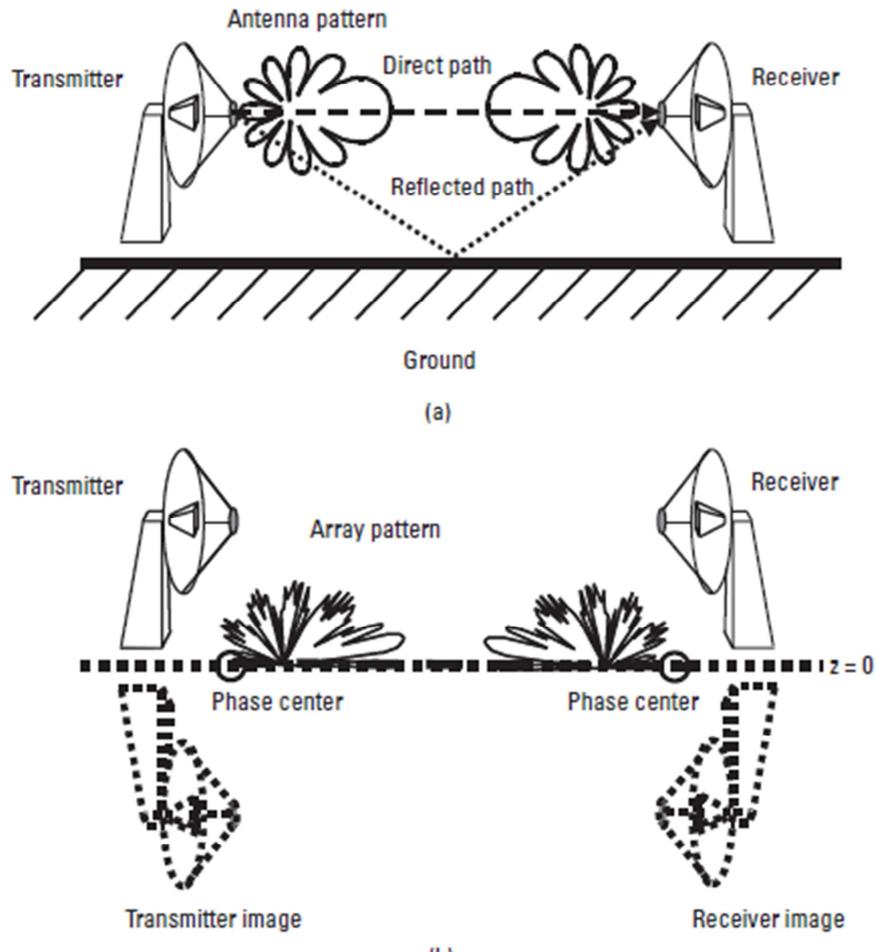


Ilustración 6: Interferencia Multitrayecto

En el ejemplo anterior aproximaremos la superficie de la tierra como un conductor perfecto para simplificar el análisis. El primero de los rayos viaja recto de una antena a otra. Sin embargo, la antena transmisora transmite en todas direcciones, y una señal secundaria incidirá en la tierra a mitad de camino entre ambas antenas, con un ángulo que dependerá de la altura de la antena transmisora sobre la tierra. Este rayo secundario se reflejará hacia delante en dirección de la antena receptora. Ya que la onda reflejada viaja una mayor distancia que el rayo directo, las dos ondas se recibirán en instantes distintos de tiempo, y generalmente con diferentes fases. A una frecuencia particular, la onda reflejada estará desfasada 180 grados del rayo directo, por lo que ambas ondas interferirán de forma destructiva. El resultado puede ser el corte del canal de comunicación.

Obviamente, el correcto emplazamiento de la antena sobre el plano de tierra es

esencial para alcanzar el comportamiento óptimo del enlace: no queremos un nulo del patrón de radiación en la dirección de la antena receptora y viceversa. Una forma de resolver el problema mutitrayecto es usar un array de antenas para la transmisión y recepción. La localización de cada elemento del array es diferente, y de ahí su respuesta multicamino.

2.2 Planos de Tierras Imperfectos

Las antenas se colocan normalmente sobre planos de tierra imperfectos, que quiere decir que tienen conductividad finita. Aunque usaremos de nuevo el método de las imágenes para conocer el campo lejano, no podemos simplemente sumar o restar los términos de la fuente y de su imagen para ello. A diferencia de los conductores perfectos, que reflejan toda la onda incidente, un plano de tierra imperfecto, absorberá parte de la energía electromagnética incidente sobre él. Este comportamiento causará que la radiación de la imagen se atenúe en amplitud y se desplace en fase respecto al caso de plano de tierra de conductor perfecto. En la siguiente figura vemos un esquema de lo explicado:

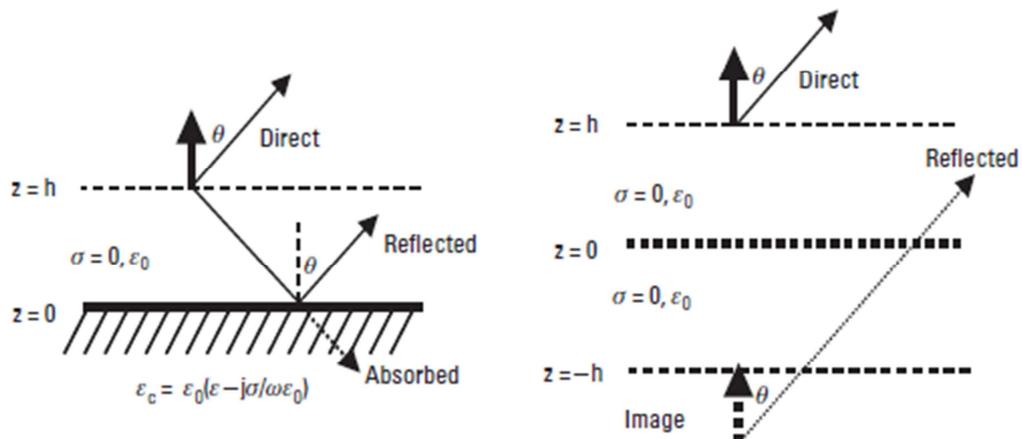


Ilustración 7: Rayo de Una Fuente de Campo Vertical

El coeficiente de reflexión para el rayo reflejado viene dado por:

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Donde $\epsilon_c = \epsilon_0(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0})$, y hemos asumido que $\mu = \mu_0$. Podemos escribir el campo radiado para la fuente vertical sobre un plano imperfecto de la siguiente manera:

$$E_{\theta V} = s_{\theta}(r, \theta, \varphi)(e^{jkh\cos\theta} + \Gamma_V e^{-jkh\cos\theta})$$

De manera similar se haría para una fuente horizontal. Ahora el coeficiente de reflexión vendrá dado por:

$$\Gamma_H = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_c - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_c - \sin^2\theta}}$$

Y el campo radiado vendrá dado por:

$$E_{\theta H} = s_{\theta}(r, \theta, \varphi)(e^{jkh\cos\theta} + \Gamma_H e^{-jkh\cos\theta})$$

$$E_{\phi H} = s_{\phi}(r, \theta, \varphi)(e^{jkh\cos\theta} + \Gamma_H e^{-jkh\cos\theta})$$

Observando las anteriores expresiones en comparación con las dadas para un plano conductor perfecto, observamos que debido a los coeficientes de reflexión, no es posible la existencia de un nulo, ya que los campos nunca se llegarán a cancelar, y que por la misma causa, el campo recibido máximo no será ahora el doble, sino menos del doble. Además, como los coeficientes de reflexión para las fuentes verticalmente y horizontalmente polarizadas son diferentes para un mismo ángulo θ , un plano conductor imperfecto puede despolarizar la onda, y combinar ambas polarizaciones dando lugar a polarizaciones circulares de la onda incidente.

2.3 Planos de Tierra Finitos

Un plano de tierra infinito es una idealización, dado que todos los planos son finitos en extensión. Sin embargo, si el plano de tierra se extiende suficientemente más allá de la fuente, al menos varias veces la longitud de la fuente, y si la fuente no está muy lejos sobre el plano, la aproximación de plano infinito es razonablemente buena.

Ya sea finito o infinito, todos los planos de tierra reflejan las ondas electromagnéticas,

pero los bordes de un plano finito también difractarán las ondas incidentes, como podemos ver en la siguiente figura:

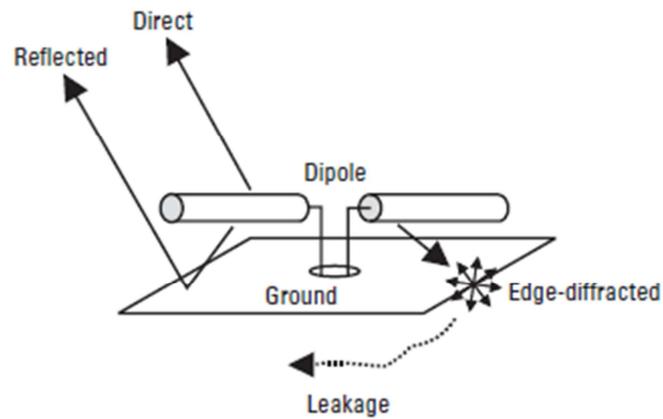


Ilustración 8: Plano de Tierra Finito

La difracción es un fenómeno que permite a las ondas electromagnéticas seguir un camino alrededor de un obstáculo. Las corrientes que circulan por los bordes de un plano finito radiarán hacia muchas direcciones afectando de esta manera el comportamiento de la antena. Sin embargo, el tema de la difracción no está dentro de los objetivos de nuestro escrito.

3 Antenas Basadas en Cables Sobre Planos de Tierra

En este apartado estudiaremos el comportamiento de las antenas monopolo y dipolo sobre planos de tierra.

3.1 Fundamentos

Estas antenas tienden a tener lóbulos anchos, y baja directividad. Dada estas características, esperamos que el patrón de un dipolo orientado paralelamente al plano de tierra sea mayormente modificado que otro orientado perpendicular al plano.

Un dipolo radia de manera eficiente cuando mide aproximadamente la mitad de la longitud de onda en espacio libre. Un dipolo de longitud $\lambda/2$ tiene una directividad de 1.64 (2.15 dBi), y una resistencia de radiación de aproximadamente 73Ω .

Una antena monopolo es la mitad de un dipolo. Los monopolos se montan casi siempre sobre planos de tierra. El patrón de radiación de un monopolo de un cuarto de onda, sobre un plano infinito de tierra es idéntico al de un dipolo en el espacio libre.

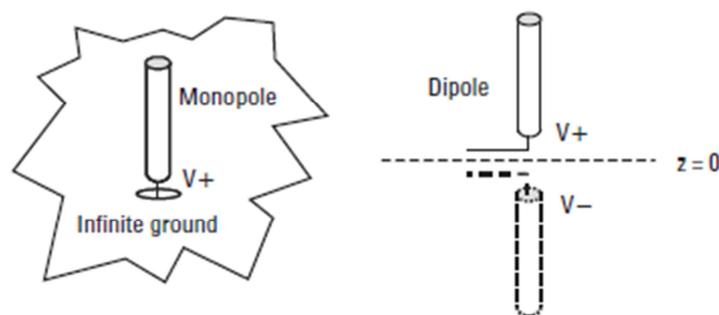


Ilustración 9: Antena Monopolo

Ya que el plano de tierra previene cualquier radiación por debajo de $z = 0$, la directividad será el doble que la del dipolo en el espacio libre.

3.2 Monopolos y Dipolos Sobre la Tierra

El monopolo sobre un plano de tierra es un ejemplo de una antena en la que el plano de tierra pertenece a su estructura. Vamos a ver el caso ya estudiado por Wiener de un monopolo sobre un plano de tierra circular, como podemos ver en la figura:

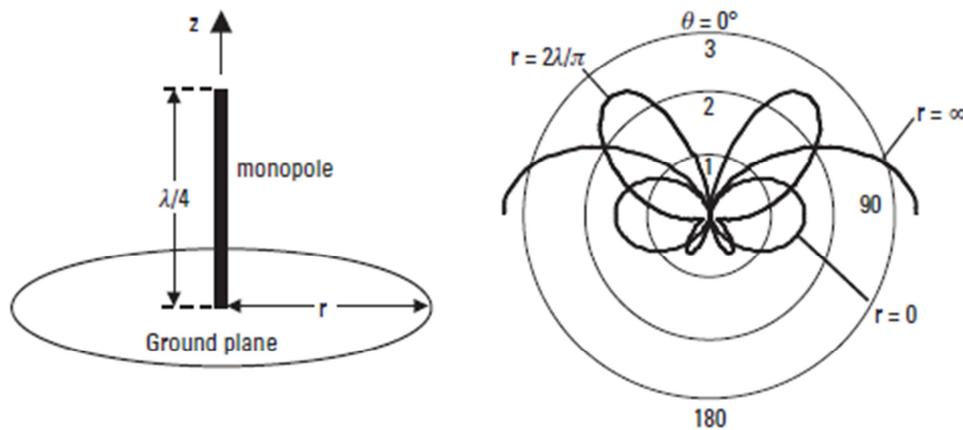


Ilustración 10: Monopolo Estudio de Wiener

Vamos a enfocar el estudio en el cálculo del patrón de radiación y de la impedancia de entrada como función del radio del plano de tierra. La figura de la derecha representa el patrón de radiación del dipolo para tres valores diferentes del radio del plano. Cuando el radio es finito, la difracción en los ejes interactuará con el campo principal causando que el pico de directividad se desplace hacia 0 grados, cuando en condiciones normales estaría ajustado a 90 grados.

Otro ejemplo de antena con plano de tierra como parte de la estructura es el monopolo sobre un plano de tierra cónico, como podemos ver en la figura:

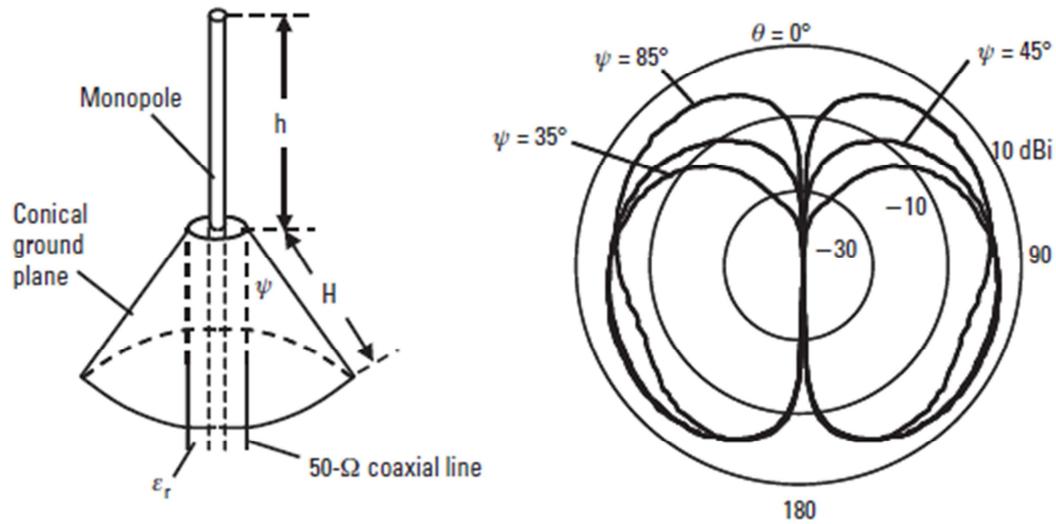


Ilustración 11: Monopolo sobre Plano de Tierra Finito Cónico

Conforme el ángulo del cono se incrementa, el ángulo en el cual el pico de respuesta se da se va aproximando a 0 grados.

Una de las razones por la que las antenas monopolo se usan en equipamientos de comunicaciones para la banda de microondas, es porque se pueden meter en carcasas electrónicas y extenderse lo que se haga necesario, como podemos ver en la figura:

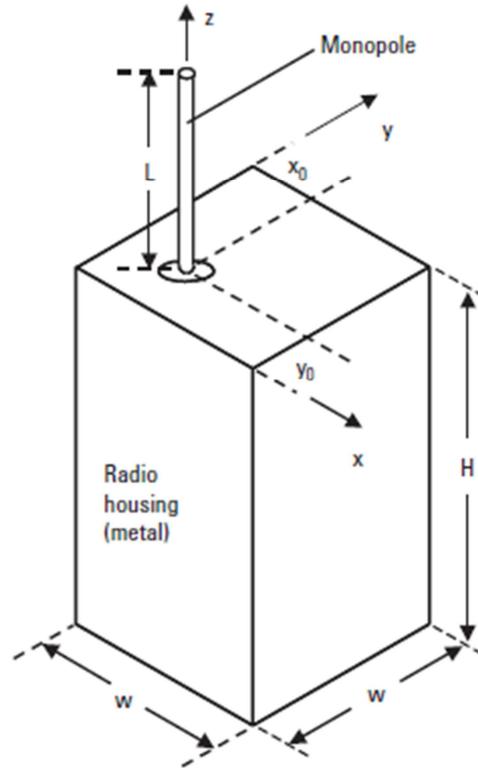


Ilustración 12: Carcasa en Función de Tierra (Antena Monopolo)

Una línea de transmisión de 50 Ω alimenta la antena. El conductor externo de la línea se pega a la carcasa, y el conductor central forma la antena monopolo. La parte superior de la carcasa hace de plano para el monopolo. Sin embargo, la difracción a lo largo del borde superior de la carcasa perturbará el patrón de radiación (dependiendo de la localización de la antena).

4 Antenas de Apertura Sobre Planos de Tierra

4.1 Fundamentos

En general, la formación de una apertura en una estructura metálica como una guía de ondas, construyen una antena de apertura. La apertura radiante más simple es un hueco en el plano de tierra. La interrupción de la circulación de la corriente es el mecanismo básico para que una apertura radie. Cuando un hueco interrumpe la circulación de corriente en el plano de tierra, las cargas acumuladas en sus bordes forman un campo eléctrico radiado a través de la apertura. Si el hueco mide la mitad de la longitud de onda, el patrón de radiación toma forma del patrón de un dipolo de media onda.

4.2 Antenas de Bocina Sobre la Tierra

Si colocamos un plano infinito de tierra bajo y paralelo a una bocina, el campo de la bocina y de su imagen son normales al plano de tierra, y de esta manera se sumarán como dos fuentes polarizadas verticalmente. El plano de tierra estrecha el ancho del lóbulo significativamente, e incrementa el pico de ganancia en un factor cuatro.

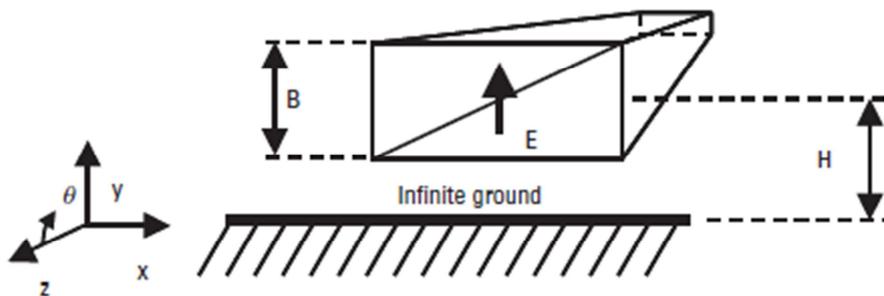


Ilustración 13: Antena de Bocina sobre Plano de Tierra

Una antena de bocina puede ser colocada también perpendicularmente al plano de tierra. Ya que la bocina radia mucha menos energía por su parte trasera, la interacción del plano de tierra es mucho menos severa que en el caso paralelo. Aún así, para antenas de ancho lóbulo, el plano de tierra puede causar un significativo rizado en su

patrón de radiación como se ve en la siguiente figura:

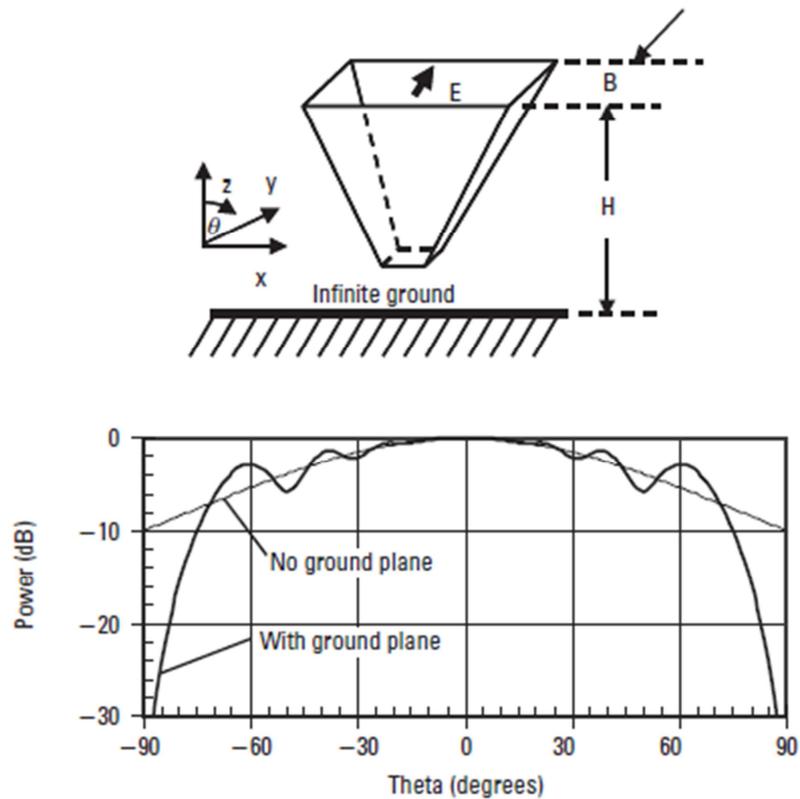


Ilustración 14: Antena Bocina Perpendicular al Plano de Tierra

4.3 Antenas de Bocina y Difracción Sobre el Borde

La corriente que circula sobre la superficie interna de una bocina excita el campo principal de la abertura. El campo radiado por la parte trasera de la bocina procede de la difracción del campo principal excitada por la corriente que circula de la boca de la abertura al borde exterior de la pared.

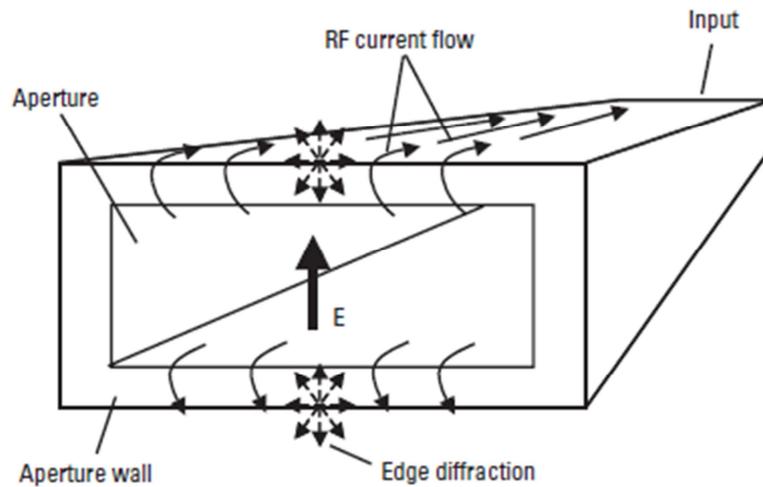


Ilustración 15: Difracción Antena de Bocina

Por consecuencia, el grueso de la pared de la apertura, e incluso los ángulos de intersección de las superficies metálicas determinan cómo el campo difractado se añadirá al campo principal. El efecto de la difracción en el patrón de radiación de una bocina es más pronunciado cuando las amplitudes del campo principal y el difractado no difieren mucho, como es el caso de las antenas de ancho lóbulo.

Para aperturas muy estrechas (menos de 0.7 veces la longitud de onda), la difracción causará una significativa reflexión de la corriente. Para aperturas anchas, la difracción en el borde externo es más interesante, dado a que su interacción con el campo de la apertura distorsionará el patrón de radiación principal. Además, es el borde externo la fuente de campo radiado en la parte trasera de la bocina.

Podríamos aprovechar la difracción que se produce en los bordes para dar forma al ancho del lóbulo de la antena de apertura. Sin embargo, a veces el ancho de la pared se escoge por requerimientos mecánicos, por lo que no es posible esta optimización. Cuando el grueso de la pared excede el ancho de lóbulo deseado, podemos usar un hueco como el de la figura:

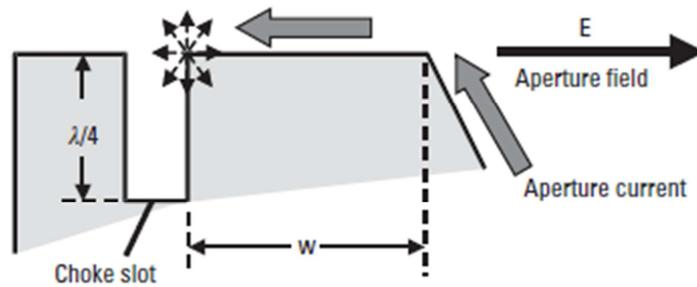


Ilustración 16: Detalle del Hueco

El hueco es un línea de transmisión de placas paralelas de longitud un cuarto la longitud de onda. En el plano de la apertura se transforma en un circuito abierto, parando el flujo de corriente en el borde cercano a la apertura de bocina. De esta manera, el hueco aislará la apertura de otras estructuras externas. Ya que el hueco proporciona un mecanismo de control del flujo de corriente en el plano de tierra, podría ser colocado a lo largo de los bordes de un plano de tierra eléctricamente pequeño para reducir la amplitud de los campos difractados detrás del plano de tierra. El hueco será un circuito abierto solo a una frecuencia. A otras frecuencias, alguna corriente podría fluir a través de éste. Para alcanzar el máximo ancho de banda, podríamos usar dos o más huecos de diferentes dimensiones, como vemos en la siguiente figura:

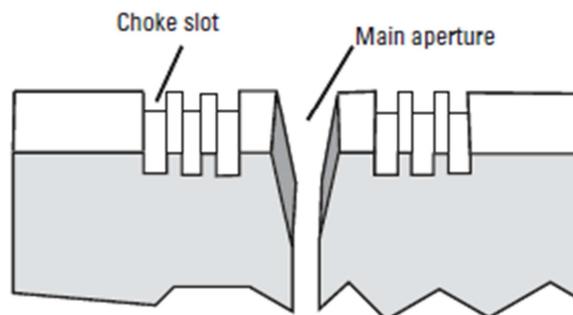


Ilustración 17: Uso de Más de Un Hueco (Banda Ancha)

4.4 Antenas de Parche

La antena de parche microstrip es popular dado su bajo perfil, peso ligero, y fabricación en circuito impreso. La antena de parche es una antena de apertura en la que se radia

desde sus extremos como una cavidad agujereada. Como una cavidad, la antena de parche posee un ancho de banda estrecho. La actuación del plano de tierra es fundamental en la operación del parche. La distancia entre el plano de tierra y el parche provocará la altura de la cavidad y determinará la eficiencia de radiación del parche. El ancho de banda de la antena de parche aumenta conforme aumenta el grueso del sustrato.

Para resolver la incompatibilidad entre el parche y los requerimientos de alimentación, Pozar propuso la antena de apertura acoplada que podemos ver en la siguiente figura:

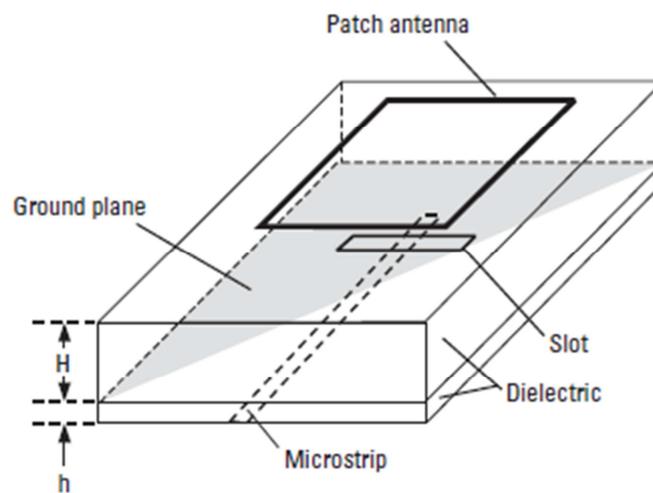


Ilustración 18: Antena de Parche Microstrip

Dos capas dieléctricas separadas por un plano de tierra común forman la estructura, por lo que podemos colocar el parche y la alimentación microstrip en lados opuestos del plano de tierra. El plano de tierra tiene un hueco, que acopla la alimentación con el parche. El hueco en el plano de tierra interrumpe la corriente de tierra de la línea microstrip, radiando y con ello excitando al parche.

Las antenas de parche se colocan casi siempre en plano de tierras finitos. Por ello, el patrón de radiación de la antena es distorsionado por la difracción en los bordes y por el plano finito. El patrón tendrá un rizado significativo para un plano de tierra finito. Para eliminar estos rizados, Namiki modificó la difracción en los bordes del plano de tierra abriendo secciones rectangulares de metal, que provocaban la cancelación de los

campos difractados.