

# Propagación de las ondas electromagnéticas

## INTRODUCCIÓN

En el capítulo 8 se describieron las ondas electromagnéticas transversales (TEM, por *transverse electromagnetic*) y también se describió cómo los conductores metálicos se pueden usar como medio de transmisión para transferir las ondas TEM de uno a otro punto. Sin embargo, en los sistemas electrónicos de comunicaciones con frecuencia es impráctico o imposible interconectar dos equipos con una instalación física, como un hilo o cable metálico. Esto es válido en especial cuando los equipos están separados por grandes trechos de agua, escarpadas montañas o inhóspitos desiertos, o al comunicarse con transpondedores satelitales, en órbita a 22,000 millas sobre la Tierra. También, cuando los transmisores o receptores son móviles, como por ejemplo, en las radiocomunicaciones en dos sentidos y en los teléfonos móviles, es imposible tener conexiones con instalaciones metálicas. En consecuencia, se suele usar el espacio libre o la atmósfera terrestre como medio de transmisión.

La propagación de las ondas electromagnéticas por el *espacio libre* se suele llamar *propagación de radiofrecuencia* (RF), o simplemente *radio propagación*. Aunque el espacio libre implica al vacío, con frecuencia la propagación por la atmósfera terrestre se llama propagación por el espacio libre, y se puede considerar casi siempre así. La diferencia principal es que la atmósfera de la Tierra introduce pérdidas de la señal que no se encuentran en el vacío. Las TEM se propagan a través de cualquier material dieléctrico, incluyendo el aire. Sin embargo, no se propagan bien a través de conductores con pérdidas, como por ejemplo agua de mar, porque los campos eléctricos hacen que fluyan corrientes en el material, que disipan con rapidez la energía de las ondas.

Las ondas de radio son ondas electromagnéticas y, como la luz, se propagan a través del espacio libre en línea recta y con velocidad de 300,000,000 metros por segundo. Otras formas de ondas electromagnéticas son los rayos infrarrojos, los ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Para propagar las ondas de radio por la atmósfera terrestre se necesita que la energía se irradie de la fuente. A continuación, la energía se debe capturar en el lado de recepción. La irradiación y la captura de energía son funciones de las antenas, y se explicarán en el capítulo 10; las propiedades de las ondas electromagnéticas se explicaron en el capítulo 8. El objetivo de este capítulo es describir la naturaleza, comportamiento y propiedades ópticas de las ondas de radio que se propagan a través de la atmósfera terrestre.

## POLARIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Como se explicó en el capítulo 8, una onda electromagnética contiene un campo eléctrico y uno magnético, que forman  $90^\circ$  entre sí. La *polarización* de una onda electromagnética plana no es más que la orientación del vector de campo eléctrico con respecto a la superficie de la Tierra, es decir, respecto al horizonte. Si la polarización permanece constante se llama *polarización lineal*. La *polarización horizontal* y la *polarización vertical* son dos formas de polarización lineal. Si el campo eléctrico se propaga en dirección paralela a la superficie terrestre, se dice que la onda está polarizada horizontalmente. Si el campo eléctrico se propaga en dirección perpendicular a la superficie terrestre, se dice que la onda está polarizada verticalmente. Si el vector de polarización gira  $360^\circ$  a medida que la onda recorre una longitud de onda por el espacio, y la intensidad de campo es igual en todos los ángulos de polarización, se dice que la onda tiene *polarización circular*. Cuando la intensidad de campo varía con cambios en la polarización, se dice que es una *polarización elíptica*. Una onda rotatoria puede girar en cualquier dirección. Si el vector gira en dirección de las manecillas del reloj ( $\hookrightarrow$ ), es derecho, y si gira en dirección contraria ( $\curvearrowright$ ), se considera izquierdo.

## RAYOS Y FRENTE DE ONDA

Las ondas electromagnéticas son invisibles y, en consecuencia, se deben analizar con métodos indirectos, mediante esquemas. Los conceptos de *rayos* y de *frentes de onda* son auxiliares para ilustrar los efectos de la propagación de ondas electromagnéticas a través del espacio vacío. Un rayo es una línea trazada a lo largo de la dirección de propagación de una onda electromagnética. Los rayos se usan para mostrar la dirección relativa de la propagación de la onda electromagnética; sin embargo, no necesariamente representan la propagación de una sola onda electromagnética. En la fig. 9-1 se muestran varios rayos ( $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$ , etc.). Un frente de onda representa una superficie de ondas electromagnéticas de fase constante. Se forma un frente de onda cuando se unen puntos de igual fase en rayos que se propagan desde la misma fuente. La fig. 9-1 muestra un frente de onda con una superficie que es perpendicular a la dirección de propagación: el rectángulo  $ABCD$ . Cuando una superficie es plana, su frente de onda es perpendicular a la dirección de propagación. Cuanto más cerca está de su fuente, el frente de onda se vuelve más complicado.

La mayoría de los frentes de onda son más complicados que los de una simple onda plana. La fig. 9-2 muestra una fuente puntual, varios rayos que se propagan desde ella, y el frente de onda correspondiente. Una *fente puntual* es un solo lugar desde el cual se propagan rayos por igual en todas direcciones: es una *fente isotrópica*. El frente de onda generado por una fuente puntual sólo es una esfera con radio  $R$ , y su centro está en el punto de origen de las ondas. En el espacio libre, y a una distancia suficiente de la fuente, los rayos dentro de una superficie pequeña de un frente de onda esférico son casi paralelos. Por consiguiente, a mayor distancia de la fuente, la propagación de la onda se parece más a la de un frente de onda plano.

## RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

### Densidad de potencia e intensidad de campo

Las ondas electromagnéticas representan el flujo de energía en la dirección de propagación. La rapidez con que la energía pasa a través de una superficie dada en el espacio libre se llama *den-*

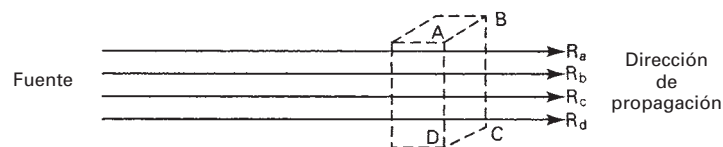


FIGURA 9-1 Onda plana

*sidad de potencia*. Por consiguiente, la densidad de potencia es la energía por unidad de tiempo y por unidad de área, y se suele expresar en watts por metro cuadrado. La *intensidad de campo* es la intensidad de los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética que se propaga por el espacio libre. La intensidad del campo eléctrico se suele expresar en volts por metro, y la del campo magnético en amperes por metro (A/m). La densidad de potencia es:

$$\mathcal{P} = \mathcal{E}\mathcal{H} \quad \text{W/m}^2 \quad (9-1)$$

siendo  $\mathcal{P}$  = densidad de potencia (watts por metro cuadrado)

$\mathcal{E}$  = intensidad rms del campo eléctrico (volts por metro)

$\mathcal{H}$  = intensidad rms del campo magnético (amperes por metro)

### Impedancia característica del espacio libre

Las intensidades del campo eléctrico y magnético de una onda electromagnética en el espacio libre se relacionan a través de la impedancia característica (resistencia) del espacio vacío. La impedancia característica de un medio de transmisión sin pérdidas es igual a la raíz cuadrada de la relación de su permeabilidad magnética entre su permitividad eléctrica. La ecuación de la impedancia característica del espacio libre,  $Z_s$ , es

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (9-2)$$

en la que  $Z_s$  = impedancia característica del espacio libre (ohms)

$\mu_0$  = permeabilidad magnética del espacio libre,  $1.26 \times 10^{-6}$  H/m

$\epsilon_0$  = permitividad eléctrica del espacio libre,  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m

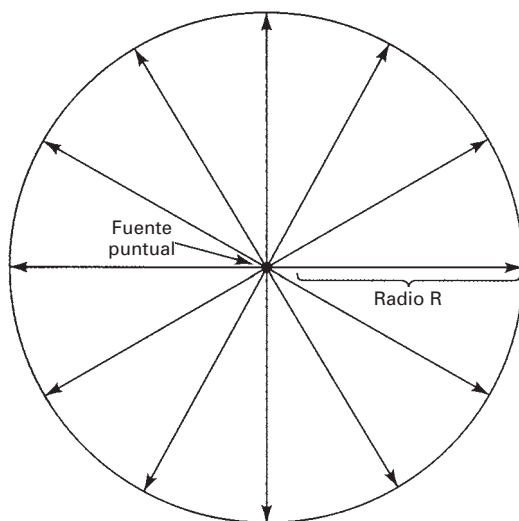
Al sustituir valores en la ecuación 9-2, se obtiene

$$Z_s = \sqrt{\frac{1.26 \times 10^{-6}}{8.85 \times 10^{-12}}} = 377 \, \Omega$$

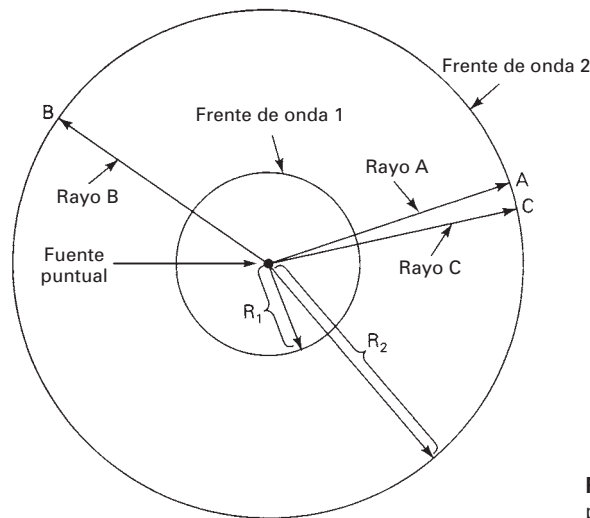
Por consiguiente, al aplicar la ley de Ohm se obtienen

$$\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}^2}{377} = 377\mathcal{H}^2 \quad \text{W/m}^2 \quad (9-3)$$

$$\mathcal{H} = \frac{\mathcal{E}}{377} \quad \text{A/m} \quad (9-4)$$



**FIGURA 9-2** Frente de onda producido por una fuente puntual



**FIGURA 9-3** Frente de onda esférico producido por una fuente isotrópica

## FRENTE DE ONDA ESFÉRICO Y LA LEY DEL CUADRADO INVERSO

### Frente de onda esférico

La fig. 9-3 muestra una fuente puntual que irradia potencia a una tasa constante y uniformemente en todas direcciones. Esa fuente se llama *radiador isotrópico*. No existe un radiador realmente isotrópico; sin embargo, se puede aproximar a una *antena omnidireccional*. Un radiador isotrópico produce un frente de onda esférico cuyo radio es  $R$ . Todos los puntos que están a la distancia  $R$  de la fuente están en la superficie de una esfera, y tienen igual densidad de potencia. Por ejemplo, en la fig. 9-3, los puntos  $A$  y  $B$  están a igual distancia de la fuente. En consecuencia, las densidades de potencia en ellos son iguales. En cualquier momento, la potencia irradiada,  $P_r$  watts, está uniformemente distribuida sobre la superficie total de la esfera (se supone que el medio de transmisión no tiene pérdidas). Así, la densidad de potencia en cualquier punto de la esfera es la potencia total irradiada dividida entre el área total de la esfera. La ecuación que expresa la densidad de potencia en cualquier punto de la superficie de un frente de onda esférico es

$$\mathcal{P} = \frac{P_{rad}}{4\pi R^2} \quad (9-5)$$

en donde  $P_{rad}$  = potencia total irradiada (watts)

$R$  = radio de la esfera, que es igual a la distancia de cualquier punto de la superficie de la esfera a la fuente

$4\pi R^2$  = área de la esfera

y para una distancia  $R_a$  metros de la fuente, la densidad de potencia es

$$\mathcal{P}_a = \frac{P_{rad}}{4\pi R_a^2}$$

Se igualan las ecuaciones 9-3 y 9-5 para obtener

$$\frac{P_{rad}}{4\pi R^2} = \frac{\mathcal{E}^2}{377}$$

Por consiguiente,  $\mathcal{E}^2 = \frac{377P_{rad}}{4\pi R^2}$  y  $\mathcal{E} = \frac{\sqrt{30P_{rad}}}{R} \quad (9-6)$

### Ley del cuadrado inverso

Se ve, en la ecuación 9-5, que cuanto más lejos va el frente de onda respecto a la fuente, la densidad de potencia es más pequeña:  $R_a$  y  $R_c$  se alejan entre sí. La potencia total distribuida en la

superficie de la esfera queda igual. Sin embargo, como el área de la esfera aumenta en proporción directa a la distancia a la fuente elevada al cuadrado, es decir, al radio de la esfera al cuadrado, la densidad de potencia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente. A esta relación se le llama *ley del cuadrado inverso*. Entonces, la densidad de potencia en cualquier punto de la superficie de la esfera exterior es

$$\mathcal{P}_2 = \frac{P_{rad}}{4\pi R_2^2}$$

y la densidad de potencia en cualquier punto de la esfera interior es

$$\mathcal{P}_1 = \frac{P_{rad}}{4\pi R_1^2}$$

Por consiguiente,

$$\frac{\mathcal{P}_2}{\mathcal{P}_1} = \frac{P_{rad}/4\pi R_2^2}{P_{rad}/4\pi R_1^2} = \frac{R_1^2}{R_2^2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \quad (9-7)$$

Según esta ecuación, a medida que se duplica la distancia a la fuente, la densidad de potencia decrece en un factor de  $2^2$ , o 4. Cuando se dedujo la ley del cuadrado inverso de la radiación, ecuación 9-7, se supuso que la fuente irradia isotrópicamente, aunque eso no es necesario; sin embargo, sí es necesario que la velocidad de propagación en todas direcciones sea uniforme. A un medio de propagación con estas propiedades se le llama *medio isotrópico*.

### Ejemplo 9-1

Determinar, para una antena isotrópica que irradia 100 W de potencia:

- (a) Densidad de potencia a 1000 m de la fuente.
- (b) Densidad de potencia a 2000 m de la fuente.

**Solución** (a) Se sustituye en la ecuación 9-5, para obtener

$$\mathcal{P}_1 = \frac{100}{4\pi 1000^2} = 7.96 \mu\text{W}/\text{m}^2$$

(b) De nuevo se sustituyen valores en la ecuación 9-5

$$\mathcal{P}_2 = \frac{100}{4\pi 2000^2} = 1.99 \mu\text{W}/\text{m}^2$$

o bien, si se sustituyen en la ecuación 9-7, se obtendrá

$$\frac{\mathcal{P}_2}{\mathcal{P}_1} = \frac{1000^2}{2000^2} = 0.25$$

o sea que

$$\mathcal{P}_2 = 7.96 \mu\text{W}/\text{m}^2 (0.25) = 1.99 \mu\text{W}/\text{m}^2$$

## ATENUACIÓN Y ABSORCIÓN DE ONDAS

El espacio libre es el vacío, por lo que no hay pérdida de energía al propagarse una onda por él. Sin embargo, cuando las ondas se propagan por el espacio vacío, se dispersan y resulta una reducción de la densidad de potencia. A esto se le llama *atenuación*, y se presenta tanto en el espacio libre como en la atmósfera terrestre. Ya que la atmósfera terrestre no es un vacío, contiene partículas que pueden absorber energía electromagnética. A este tipo de reducción de potencia se le llama *pérdida por absorción*, y no se presenta en ondas que viajan fuera de nuestra atmósfera.

### Atenuación

La ley del cuadrado inverso de la radiación describe en forma matemática la reducción de densidad de potencia con la distancia a la fuente. A medida que se aleja un frente de onda de la fuente, el campo electromagnético continuo que irradia la fuente se dispersa. Esto es, las ondas se alejan cada vez más entre sí y, en consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor. No se pierde o disipa nada de la potencia irradiada, porque el frente de onda se aleja de la fuente; la on-

da sólo se extiende, o se dispersa, sobre un área mayor y disminuye la densidad de potencia. La reducción de densidad de potencia con la distancia equivale a una pérdida de potencia, y se suele llamar *atenuación de la onda*. Como la atenuación se debe a la dispersión esférica de la onda, a veces se le llama *atenuación espacial* de la onda. La atenuación de la onda se expresa en general en función del logaritmo común de la relación de densidades de potencia (pérdida en dB). La definición matemática de  $\gamma_a$  es

$$\gamma_a = 10 \log \frac{\mathcal{P}_1}{\mathcal{P}_2} \quad (9-8)$$

La relación de densidad de potencia debida a la ley del cuadrado inverso supone que la propagación es en el espacio libre: en el vacío o casi en el vacío, y se llama atenuación de onda. La reducción de la densidad de potencia debida a propagación en espacio no libre se llama *absorción*.

### Absorción

La atmósfera terrestre no es un vacío. Más bien está formada por átomos y moléculas de diversas sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Algunos de esos materiales pueden absorber las ondas electromagnéticas. Cuando una onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricos. La absorción de onda por la atmósfera es análoga a una pérdida de potencia  $I^2R$ . Una vez absorbida, la energía se pierde para siempre, y causa una atenuación en las intensidades de voltaje y campo magnético, y una reducción correspondiente de densidad de potencia.

La absorción de las radiofrecuencias en una atmósfera normal depende de su frecuencia, y es relativamente insignificante a menos de unos 10 GHz. La fig. 9-4 muestra la absorción atmosférica, en decibels por kilómetro, debida al oxígeno y al vapor de agua, para radiofrecuencias mayores de 10 GHz. Se aprecia que ciertas frecuencias se afectan más o menos por la absorción, y se producen picos y valles en las curvas. La atenuación de ondas debida a la absorción no depende de la distancia a la fuente de radiación, sino más bien a la distancia total que la onda se propaga a través de la atmósfera. En otras palabras, para un *medio homogéneo*, cuyas propiedades son uniformes en todo él, la absorción sufrida durante el primer kilómetro de propagación es igual que la del último kilómetro. También, las condiciones atmosféricas anormales, como por ejemplo lluvias intensas o neblina densa, absorben más energía que una atmósfera normal. La absorción atmosférica se representa por  $\eta$  y, para una onda que se propaga de  $R_1$  a  $R_2$ , es  $\gamma(R_2 - R_1)$ , siendo  $\gamma$  el coeficiente de absorción. Así, la atenuación de onda depende de la relación  $R_2/R_1$ , y la absorción de onda depende de la distancia entre  $R_1$  y  $R_2$ . En el

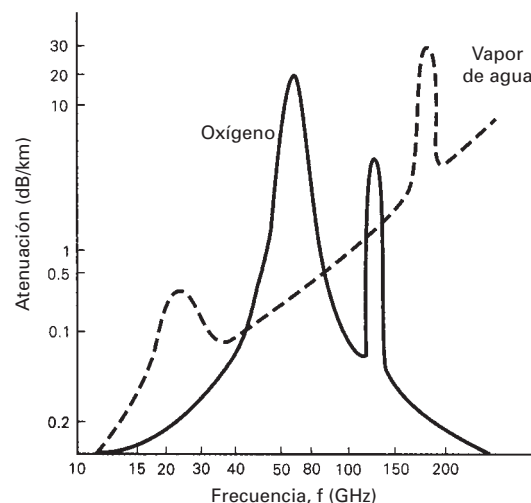


FIGURA 9-4 Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas

caso más real, es decir, en un *medio no homogéneo*, el coeficiente de absorción varía mucho de acuerdo con el lugar y por lo mismo origina difíciles problemas para los ingenieros de sistemas de radio.

## PROPIEDADES ÓPTICAS DE LAS ONDAS DE RADIO

En la atmósfera terrestre, la propagación de frentes de ondas y rayos puede diferir del comportamiento en el espacio libre, debido a efectos *ópticos*, como *refracción*, *reflexión*, *difracción* e *interferencia*. En una terminología muy coloquial, se puede imaginar la refracción como la *flexión*, la reflexión como *rebote*, la difracción como *dispersión* y la interferencia como *choques*. Se dice que la refracción, la reflexión, la difracción y la interferencia son propiedades ópticas porque se observaron primero en la ciencia de la óptica, que estudia el comportamiento de las ondas luminosas. Como las ondas luminosas son ondas electromagnéticas de alta frecuencia, parece razonable que las propiedades ópticas también se apliquen a la propagación de las ondas de radio. Aunque se pueden analizar por completo los principios ópticos aplicando las ecuaciones de Maxwell, lo cual es complicado por necesidad. Para la mayoría de las aplicaciones, se pueden sustituir las ecuaciones de Maxwell por el *trazo geométrico de rayos*.

### Refracción

La *refracción* electromagnética es el cambio de dirección de un rayo al pasar en dirección oblicua de un medio a otro con distinta velocidad de propagación. La velocidad a la que se propaga una onda electromagnética es inversamente proporcional a la densidad del medio en el que lo hace. Por consiguiente, hay refracción siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro de distinta densidad. La fig. 9-5 muestra la refracción de un frente de onda en una frontera *plana* entre dos medios con distintas densidades. Para este ejemplo, el medio 1 es menos denso que el medio 2, por lo que  $v_1 > v_2$ . Se puede ver que el rayo A entra al medio más denso antes que el rayo B. Así, el rayo B se propaga con más rapidez que el rayo A, y viaja la distancia B-B' durante el mismo tiempo que el rayo A recorre la distancia A-A'. Por consiguiente, el frente de onda A'B' se *inclina* o se dobla hacia abajo. Como un rayo se define como perpendicular al frente de onda en todos los puntos de éste, los rayos de la fig. 9-5 cambiaron de dirección en la interfase entre los dos medios. Siempre que un rayo pasa de un medio menos denso a uno más denso, se dobla hacia la *normal*. La normal no es más que una línea imaginaria, trazada perpendicular a la interfase en el punto de incidencia. Al revés, siempre que un rayo pasa de un medio más

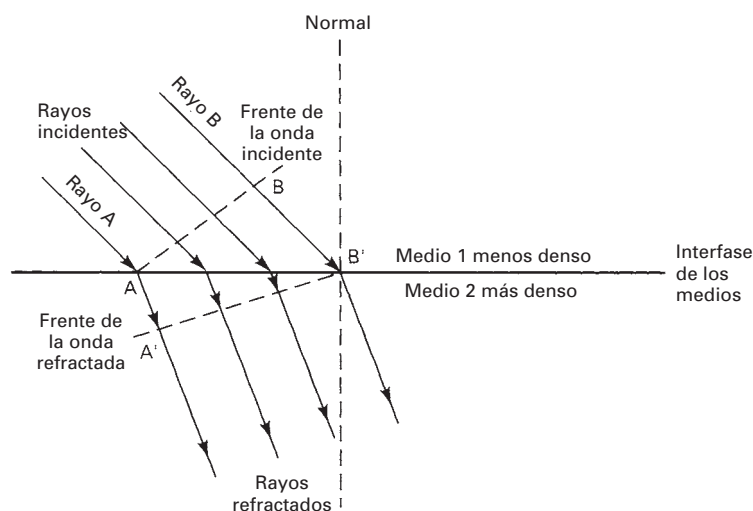


FIGURA 9-5 Refracción en una frontera plana entre dos medios

denso a uno menos denso se dobla alejándose de la normal. El *ángulo de incidencia* es el que forman la onda incidente y la normal, y el *ángulo de refracción* es el que forman la onda refractada y la normal.

El grado de flexión o refracción que hay en la interfase entre dos materiales de distintas densidades es bastante predecible, y depende del *índice de refracción* de cada material. El índice de refracción no es más que la relación de la velocidad de propagación de la luz en el espacio vacío entre la velocidad de propagación de la luz en determinado material, es decir,

$$n = \frac{c}{v} \quad (9-9)$$

en la que  $n$  = índice de refracción (adimensional)

$c$  = velocidad de la luz en el espacio libre ( $3 \times 10^8$  m/s)

$v$  = velocidad de la luz en determinado material (metros por segundo)

El índice de refracción también es una función de la frecuencia. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones la variación es insignificante y, en consecuencia, se omitirá de esta descripción. La forma en que reacciona una onda electromagnética cuando llega a la interfase entre dos materiales transmisores que tienen distintos índices de refracción se describe con la *ley de Snell*. La ley de Snell establece que

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad (9-10)$$

$$\text{y} \quad \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

en donde  $n_1$  = índice de refracción del material 1

$n_2$  = índice de refracción del material 2

$\theta_1$  = ángulo de incidencia (grados)

$\theta_2$  = ángulo de refracción (grados)

y como el índice de refracción de un material es igual a la raíz cuadrada de su constante dieléctrica,

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}} \quad (9-11)$$

donde  $\epsilon_{r1}$  = constante dieléctrica del medio 1

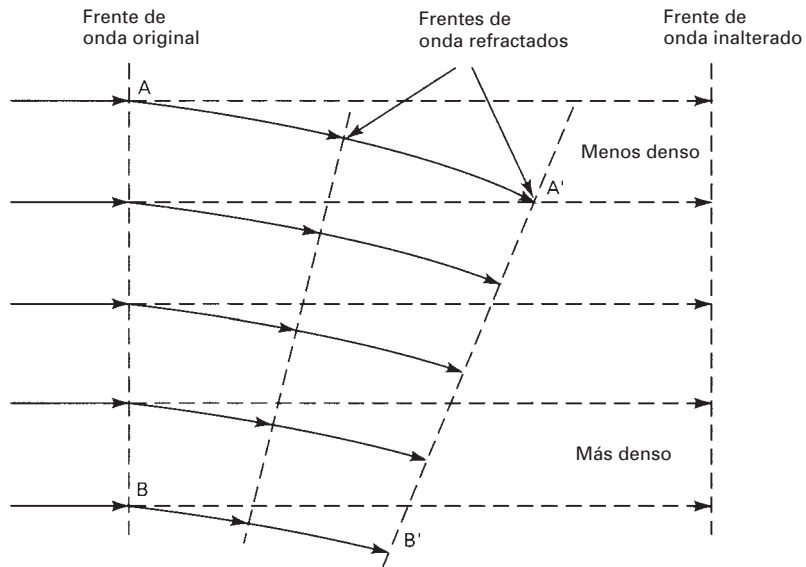
$\epsilon_{r2}$  = constante dieléctrica del medio 2

También se presenta la refracción cuando un frente de onda se propaga en un medio que tiene un *gradiente de densidad*, perpendicular a la dirección de propagación, es decir, paralelo al frente de onda. La fig. 9-6 representa la refracción de un frente de onda en un medio de transmisión que tiene una variación gradual en su índice de refracción. El medio es más denso en la parte inferior, y menos denso en la parte superior. Entonces, los rayos que viajan cerca de la parte superior lo hacen con mayor rapidez que los que están cerca de la parte inferior y, en consecuencia, el frente de onda se inclina hacia abajo. La desviación se hace en forma gradual a medida que avanza el frente de onda, como se ve en la figura.

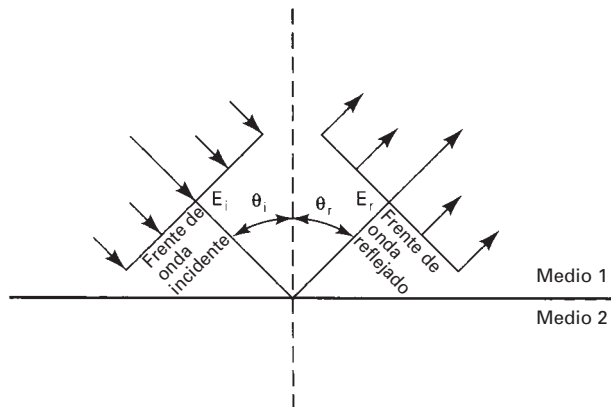
## Reflexión

*Reflejar* quiere decir regresar, y la *reflexión* es el acto de reflejar. La reflexión electromagnética se presenta cuando una onda incidente choca con una frontera entre dos medios, y algo o toda la potencia incidente no entra al segundo material. Las ondas que no penetran al segundo medio se reflejan. La fig. 9-7 muestra la reflexión de una onda electromagnética en un plano límite entre dos medios. Como todas las ondas reflejadas permanecen en el medio 1, las velocidades de las ondas incidente y reflejada son iguales. En consecuencia, el *ángulo de reflexión* es igual al *ángulo de incidencia*,  $\theta_i = \theta_r$ . Sin embargo, la intensidad del campo del voltaje reflejado es





**FIGURA 9-6** Refracción de un frente de onda en un medio con gradiente



**FIGURA 9-7** Reflexión electromagnética en una frontera plana entre dos medios

menor que la del voltaje incidente. La relación de las intensidades de voltaje reflejado a incidente se llama *coeficiente de reflexión*,  $\Gamma$ . Para un conductor perfecto,  $\Gamma = 1$ . Se usa  $\Gamma$  para indicar tanto la amplitud relativa de los campos incidente y reflejado, como el desplazamiento de fase que hay en el punto de reflexión. La ecuación de este coeficiente es

$$\Gamma = \frac{E_r e^{j\theta_r}}{E_i e^{j\theta_i}} = \frac{E_r}{E_i} = e^{j(\theta_r - \theta_i)} \quad (9-12)$$

en la que  $\Gamma$  = coeficiente de reflexión (adimensional)  
 $E_i$  = intensidad de voltaje incidente (volts)  
 $E_r$  = intensidad de voltaje reflejado (volts)  
 $\theta_i$  = fase incidente (grados)  
 $\theta_r$  = fase reflejada (grados)

La relación de las densidades de potencia reflejada a incidente es  $\Gamma$ . La parte de la potencia incidente total que no es reflejada se llama *coeficiente de transmisión de potencia*,  $T$ , o simplemente el *coeficiente de transmisión*. Para un conductor perfecto,  $T = 0$ . La *ley de la conservación de la energía* establece que, para una superficie reflectora perfecta, la potencia total reflejada debe ser igual a la potencia total incidente y, en consecuencia,

$$T + |\Gamma|^2 = 1 \quad (9-13)$$

Para los conductores imperfectos, tanto  $|\Gamma|^2$  como  $T$  son funciones del ángulo de incidencia, la polarización del campo eléctrico y las constantes dieléctricas de los dos materiales. Si el medio 2 no es conductor perfecto, algunas de las ondas incidentes penetran en él y se absorben. Las ondas absorbidas establecen corrientes a través de la resistencia del material, y la energía se convierte en calor. La fracción de la potencia que penetra al medio 2 se llama *coeficiente de absorción*.

Cuando la superficie reflectora no es plana, sino curva, la curvatura de la onda reflejada es distinta de la de la onda incidente. Cuando el frente de la onda incidente es curvo, y la superficie reflectora es plana, la curvatura del frente de la onda reflejada es igual a la del frente de la onda incidente.

También se produce reflexión cuando la superficie reflectora es *irregular* o *áspera*; sin embargo, esa superficie puede destruir la forma del frente de onda. Cuando un frente de onda incidente choca con una superficie irregular, se dispersa al azar en muchas direcciones. A esa condición se le llama *reflexión difusa*, mientras que a la reflexión de una superficie perfectamente lisa se llama *reflexión especular* (como de espejo). Las superficies que caen entre lisas e irregulares se llaman *superficies semiásperas*. Esas superficies causan una mezcla de reflexión difusa y especular. Una superficie semiáspera no destruye en su totalidad la forma del frente de onda reflejado. Sin embargo, hay una reducción de la potencia total. El *criterio de Rayleigh* establece que una superficie semiáspera refleja como si fuera una superficie lisa siempre que el coseno del ángulo de incidencia sea mayor que  $\lambda/8d$ , donde  $d$  es la profundidad de la irregularidad de la superficie, y  $\lambda$  es la longitud de la onda incidente. La reflexión en una superficie semiáspera se ilustra en la fig. 9-8. La ecuación del criterio de Rayleigh es

$$\cos \theta_i > \frac{\lambda}{8d} \quad (9-14)$$

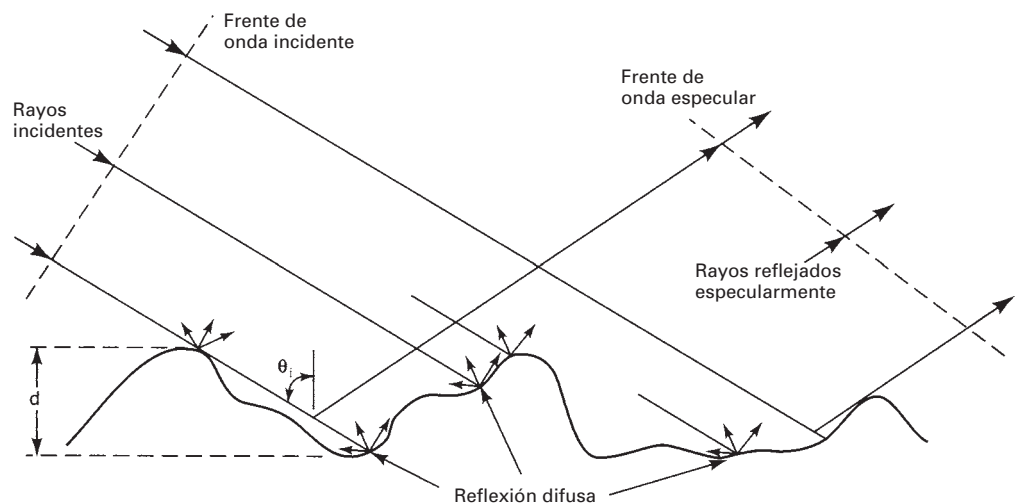


FIGURA 9-8 Reflexión en una superficie semiáspera

## Difracción

Se define a la *difracción* como la modulación o redistribución de la energía dentro de un frente de onda, al pasar cerca de la orilla de un objeto *opaco*. La difracción es el fenómeno que permite que las ondas luminosas o de radio se propaguen en torno a esquinas. En la descripción anterior de la refracción y la reflexión se supuso que las dimensiones de las superficies refractora y reflectora eran grandes con respecto a una longitud de onda de la señal. Sin embargo, cuando un frente de onda pasa cerca de un obstáculo o discontinuidad cuyas dimensiones sean de tamaño comparable a una longitud de onda, no se puede usar el análisis geométrico simple para explicar los resultados, y es necesario recurrir al *principio de Huygens*, que se puede deducir de las ecuaciones de Maxwell.

El principio de Huygens establece que todo punto sobre determinado frente de onda esférico se puede considerar como una fuente puntual secundaria de ondas electromagnéticas, desde la cual se irradian y se alejan otras ondas secundarias. El principio de Huygens se ilustra en la fig. 9-9. En la figura 9-9a se muestra la propagación normal de ondas considerando un plano infinito. Cada fuente puntual secundaria ( $p_1$ ,  $p_2$ , etc.) irradia energía hacia afuera, en todas direcciones. Sin embargo, el frente de onda sigue en su dirección original, y no se reparte, porque la anulación de ondas secundarias se hace en todas direcciones, excepto en la de avance. Por lo anterior, el frente de onda permanece plano.

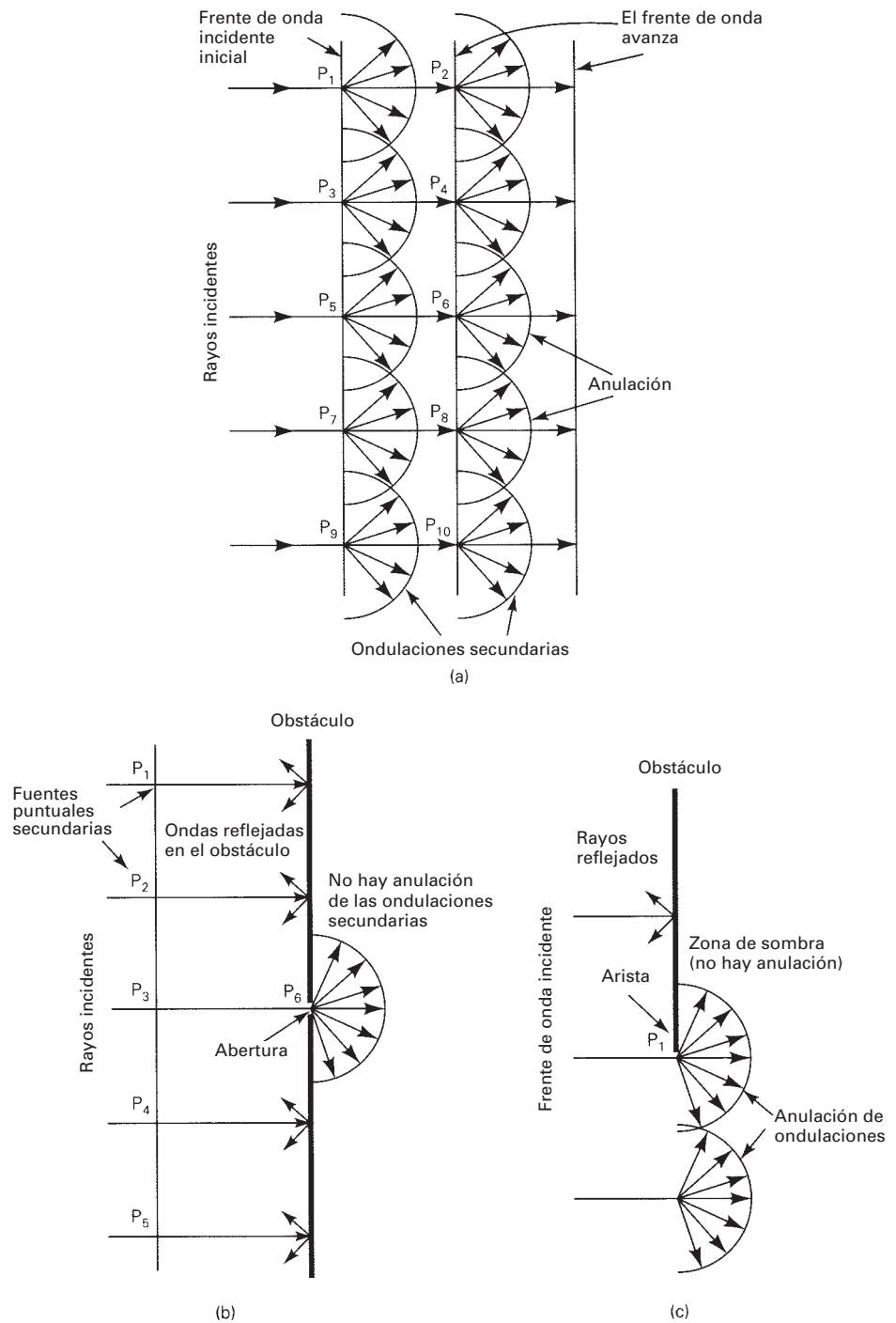
Cuando se considera un frente de onda plano y finito, como en la fig. 9-9b, es incompleta la anulación en direcciones aleatorias. En consecuencia, el frente de onda se reparte hacia afuera, o se *dispersa*. A este efecto de dispersión se le llama *difracción*. La fig. 9-9c muestra la difracción en torno a la orilla de un obstáculo. Se ve que la anulación de ondulaciones sólo es parcial. Se lleva a cabo en torno a la orilla del obstáculo, lo que permite que las ondas secundarias se “escurran” en torno a las aristas de un obstáculo, hacia lo que se llama la *zona de sombra*. Este fenómeno se puede observar cuando se abre la puerta de un cuarto oscuro. Los rayos de luz se difractan en torno a la orilla de la puerta, e iluminan lo que hay detrás de ella.

## Interferencia

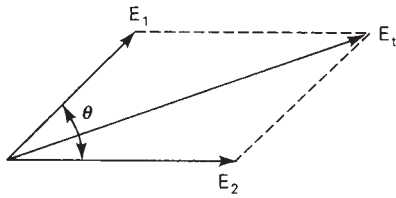
*Interferir* quiere decir estar en oposición, y la *interferencia* es el acto de interferir. La interferencia de ondas de radio se produce siempre que se combinan dos o más ondas electromagnéticas de tal manera que se degrada el funcionamiento del sistema. La refracción, la reflexión y la difracción pertenecen a la óptica geométrica, y eso quiere decir que su comportamiento se analiza principalmente en función de rayos y de frentes de onda. Por otro lado, la interferencia está sujeta al principio de la *superposición lineal* de las ondas electromagnéticas, y se presenta siempre que dos o más ondas ocupan el mismo punto del espacio en forma simultánea. El principio de la superposición lineal establece que la intensidad total de voltaje en un punto dado en el espacio es la suma de los vectores de onda individuales. Ciertos tipos de medios de propagación tienen propiedades no lineales; sin embargo, en un medio ordinario, como la atmósfera terrestre, es válida la superposición lineal.

La fig. 9-10 muestra la suma lineal de dos vectores de voltaje instantáneo, cuyos ángulos de fase difieren en el ángulo  $\theta$ . Se aprecia que el voltaje total no es tan sólo la suma de las dos magnitudes vectoriales, sino más bien la suma fasorial. En la propagación por el espacio libre, puede existir una diferencia de fases sólo porque difieran las *polarizaciones electromagnéticas* de las dos ondas. Según los ángulos de fase de los dos vectores, puede suceder una suma o una resta. Esto implica simplemente que el resultado puede ser mayor o menor que cualquiera de los vectores, porque las dos ondas electromagnéticas se pueden reforzar o se pueden anular.

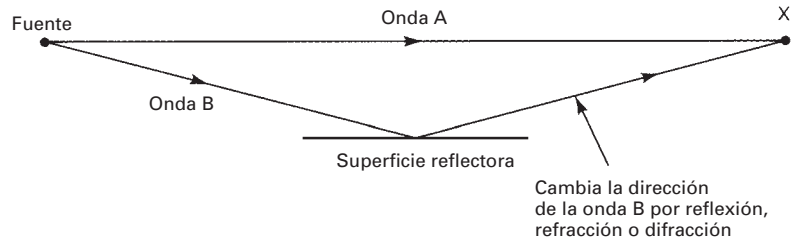
La fig. 9-11 muestra la interferencia entre dos ondas electromagnéticas en el espacio libre. En el punto  $X$  las dos ondas ocupan el mismo lugar en el espacio. Sin embargo, la onda  $B$  ha recorrido una trayectoria diferente a la de la onda  $A$  y, en consecuencia, sus ángulos de fase relativos pueden ser distintos. Si la diferencia de distancias recorridas es un múltiplo entero impar de la mitad de la longitud de onda, se presenta la anulación total. Si la diferencia es un múltiplo entero y par de la mitad de la longitud de onda, tiene lugar un reforzamiento. Lo más probable es que la diferencia de distancias sea intermedia entre las dos, y se produce una anulación o reforzamiento parcial. Para frecuencias menores que VHF, las longitudes de onda relativamente grandes evitan que la interferencia sea un problema apreciable. Sin embargo, con UHF o más, la interferencia ondulatoria puede ser grave.



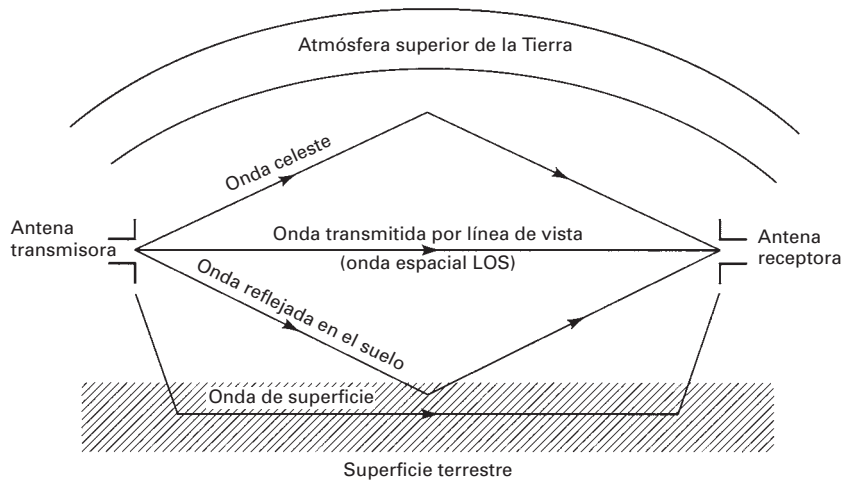
**FIGURA 9-9** Difracción de las ondas electromagnéticas: (a) principio de Huygens para un frente de onda plano; (b) frente de una onda finita a través de una abertura; (c) frente de onda rodeando una arista



**FIGURA 9-10** Suma lineal de dos vectores con distintos ángulos de fase



**FIGURA 9-11** Interferencia de las ondas electromagnéticas



**FIGURA 9-12** Modos normales de propagación de ondas

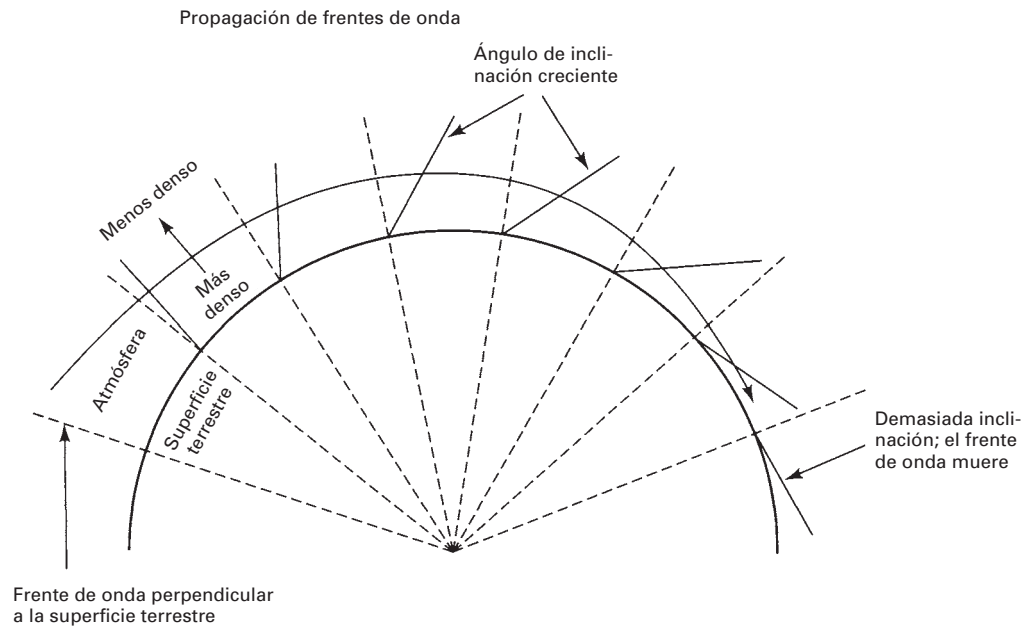
## PROPAGACIÓN TERRESTRE DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las ondas electromagnéticas de radio que viajan dentro de la atmósfera terrestre se llaman *ondas terrestres*, y las comunicaciones entre dos o más puntos de la Tierra se llaman *radiocomunicaciones terrestres*. Las ondas terrestres se ven influidas por la atmósfera y por la Tierra misma. En las radiocomunicaciones terrestres, las ondas se pueden propagar de varias formas, que dependen de la clase del sistema y del ambiente. Como se dijo antes, las ondas electromagnéticas también viajan en línea recta, excepto cuando la Tierra y su atmósfera alteran sus trayectorias. En esencia, hay tres formas de propagación de ondas electromagnéticas dentro de la atmósfera terrestre: onda terrestre, onda espacial (que comprende ondas directas y reflejadas en el suelo) y ondas celestes o ionosféricas.

La fig. 9-12 ilustra los modos normales de propagación entre dos antenas de radio. En todo sistema de radio existen los tres modos, sin embargo, algunos son despreciables en ciertos intervalos de frecuencia, o sobre determinada clase de terreno. A frecuencias menores que 1.5 MHz, las ondas terrestres tienen la mejor difusión, porque las pérdidas en el suelo aumentan con rapidez al aumentar la frecuencia. Las ondas celestes se usan para aplicaciones de alta frecuencia, y las ondas espaciales se usan para frecuencias muy elevadas.

### Propagación de ondas terrestres

Una *onda terrestre* es una onda electromagnética que viaja por la superficie de la Tierra. Por eso a las ondas terrestres también se les llama *ondas superficiales*. Las ondas terrestres deben estar polarizadas verticalmente. Esto se debe a que el campo eléctrico, en una onda polarizada horizontalmente, sería paralelo a la superficie de la tierra, y esas ondas se pondrían en corto por la conductividad del suelo. Con las ondas terrestres, el campo eléctrico variable induce voltajes en



**FIGURA 9-13** Propagación de ondas terrestres

la superficie terrestre, que hacen circular corrientes muy parecidas a las de una línea de transmisión. La superficie terrestre también tiene pérdidas por resistencia y por dieléctrico. Por consiguiente, las ondas terrestres se atenúan a medida que se propagan. Se propagan mejor sobre una superficie buena conductora, como por ejemplo, agua salada, y se propagan mal sobre superficies desérticas. Las pérdidas en las ondas terrestres aumentan rápidamente al aumentar la frecuencia. Por consiguiente, su propagación se limita en general a frecuencias menores que 2 MHz.

La fig. 9-13 representa la propagación de las ondas terrestres. La atmósfera terrestre tiene un *gradiente de densidad*, es decir, la densidad disminuye en forma gradual conforme aumenta la distancia a la superficie de la Tierra; esto hace que el frente de onda se incline en forma progresiva hacia adelante. Así, la onda terrestre se propaga en torno a la Tierra y queda cerca de su superficie; si se transmite la potencia suficiente, el frente de onda se podría propagar más allá del horizonte, o hasta por toda la circunferencia de la Tierra. Sin embargo, se debe tener cuidado al seleccionar la frecuencia y el terreno sobre el que se va a propagar la onda terrestre, para asegurarse de que no se incline demasiado y se “caiga”, de plano sobre el suelo, cesando de propagarse.

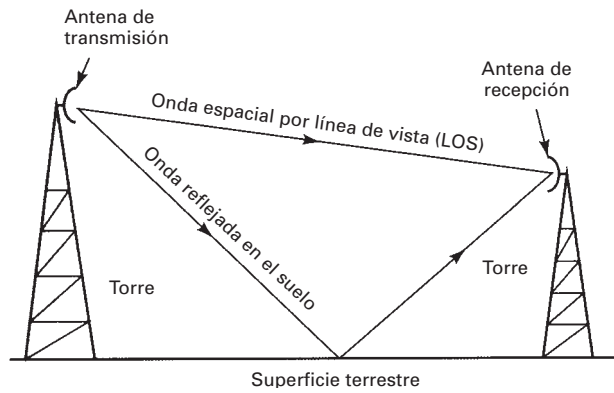
La propagación por ondas terrestres se usa normalmente en comunicaciones entre barcos y de barco a tierra, para la radionavegación y para comunicaciones marítimas móviles. Las ondas terrestres tienen frecuencias tan bajas como 15 kHz.

Las desventajas de la propagación de ondas terrestres son las siguientes:

1. Requieren una potencia de transmisión relativamente alta.
2. Se limitan a frecuencias muy bajas, bajas e intermedias (VLF, LF y MF) y requieren grandes antenas. La razón de esto se explica en el capítulo 11.
3. Las pérdidas en el terreno varían mucho de acuerdo con el material superficial y su composición.

Las ventajas de la propagación de ondas terrestres son las siguientes:

1. Con la potencia suficiente de transmisión, se pueden usar las ondas terrestres para comunicarse entre dos lugares cualesquiera en el mundo.
2. Las ondas terrestres se afectan poco por las condiciones variables de la atmósfera.



**FIGURA 9-14** Propagación de ondas espaciales

### Propagación de las ondas espaciales

La propagación de la energía electromagnética en forma de ondas espaciales incluye la energía irradiada que viaja en los kilómetros inferiores de la atmósfera terrestre. Las ondas espaciales incluyen ondas directas y las reflejadas en el suelo (véase la fig. 9-14). Las *ondas directas* viajan esencialmente en línea recta entre las antenas de transmisión y recepción. La propagación de ondas espaciales directas se llama *transmisión por línea de vista* (LOS, por *line-of-sight*). Por consiguiente, la propagación directa de ondas espaciales está limitada por la curvatura de la Tierra. Las ondas reflejadas en el suelo son las que refleja la superficie terrestre cuando se propagan entre las antenas emisora y receptora.

En la fig. 9-14 se ve la propagación de una onda espacial entre dos antenas. Se aprecia que la intensidad de campo en la antena receptora depende de la distancia entre las dos antenas (atenuación y absorción) y de si las ondas directas y las reflejadas en el suelo están en fase (interferencia).

La curvatura de la Tierra presenta un horizonte en la propagación de las ondas espaciales, que se suele llamar el *horizonte de radio*. A causa de la refracción atmosférica, el horizonte de radio está más allá del *horizonte óptico* para la *atmósfera estándar* común. El horizonte de radio está, más o menos, a cuatro tercios del horizonte óptico. La refracción se debe a la troposfera, a cambios en su densidad, temperatura, contenido de vapor de agua y conductividad relativa. El horizonte de radio se puede alargar sólo con elevar las antenas de transmisión o recepción, o ambas, respecto a la superficie terrestre, con torres, o colocándolas sobre montañas o edificios altos.

La fig. 9-15 muestra el efecto de la altura de la antena sobre el horizonte de radio. El horizonte visual de radio para una sola antena es

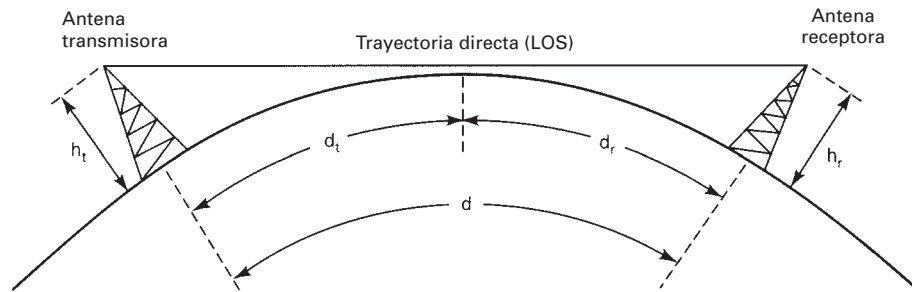
$$d = \sqrt{2} h \quad (9-15)$$

siendo  $d$  = distancia al horizonte de radio (millas)  
 $h$  = altura de la antena sobre el nivel del mar (millas)

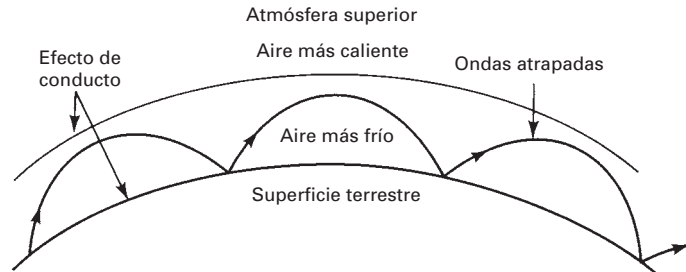
Por consiguiente, para una antena de transmisión y una de recepción, la distancia máxima entre ellas es

$$\begin{aligned} d &= d_t + d_r \\ d &= \sqrt{2} h_t + \sqrt{2} h_r \end{aligned} \quad (9-16)$$

donde  $d$  = distancia total (millas)  
 $d_t$  = horizonte de radio de la antena transmisora (millas)  
 $d_r$  = horizonte de radio de la antena receptora (millas)  
 $h_t$  = altura de la antena transmisora (pies)  
 $h_r$  = altura de la antena receptora (pies)



**FIGURA 9-15** Ondas espaciales y horizonte de radio



**FIGURA 9-16** Propagación por conductos atmosféricos

La distancia máxima entre un transmisor y un receptor sobre terreno promedio se puede aproximar en unidades métricas como sigue

$$d(\text{máx}) = 17h_t + 17h_r \quad (9-17)$$

siendo  $d(\text{máx})$  = distancia máxima entre el transmisor y el receptor (kilómetros)

$h_t$  = altura de la antena transmisora (metros)

$h_r$  = altura de la antena receptoras (metros)

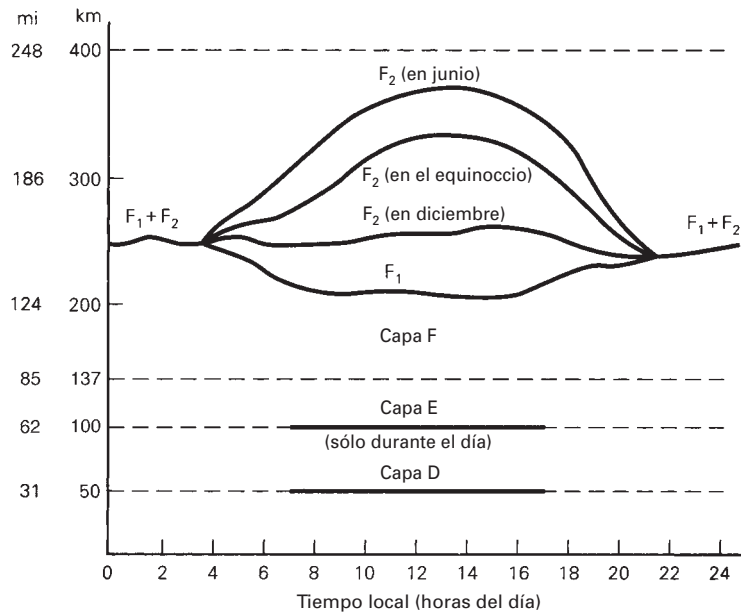
De acuerdo con las ecuaciones 9-16 y 9-17, la distancia de propagación de las ondas espaciales se puede incrementar aumentando la altura de la antena transmisora o de la antena receptora, o de ambas.

Como las condiciones de la atmósfera terrestre inferior cambian, el grado de refracción puede variar a través del tiempo. Se tiene una condición especial, llamada *propagación por conductos* cuando la densidad de la atmósfera inferior es tal que las ondas electromagnéticas quedan atrapadas entre ella y la superficie terrestre. Las capas atmosféricas funcionan como un conducto, y una onda electromagnética se puede propagar grandes distancias siguiendo la curvatura de la Tierra dentro de este conducto. En la fig. 9-16 se representa la propagación por conducto.

### Propagación por ondas celestes

Las ondas electromagnéticas que se dirigen sobre el nivel del horizonte se llaman *ondas celestes*. En el caso normal, las ondas celestes se irradian en una dirección que forma un ángulo relativamente grande con la Tierra. Se irradian hacia el cielo, donde son reflejadas o refractadas hacia la superficie terrestre por la ionosfera. Debido a lo anterior, a la propagación de las ondas celestes se le llama a veces propagación ionosférica. La ionosfera es la región del espacio que está entre 50 y 400 km (30 a 250 mi) sobre la superficie terrestre. Es la parte superior de la atmósfera terrestre. Por su situación, absorbe grandes cantidades de la energía solar radiante, que ioniza las moléculas de aire y forma electrones libres. Cuando una onda de radio atraviesa la





**FIGURA 9-17** Capas ionosféricas

ionosfera, el campo eléctrico de la onda ejerce una fuerza sobre los electrones libres y los pone a vibrar. Los electrones en vibración disminuyen la corriente, lo que equivale a reducir la constante dieléctrica. Al reducir la constante dieléctrica aumenta la velocidad de propagación y las ondas electromagnéticas se desvían y se alejan de las regiones de alta densidad de electrones hacia regiones de baja densidad de electrones; es decir, aumenta la refracción. Al alejarse la onda de la Tierra aumenta la ionización; sin embargo, hay menos moléculas de aire que se ionizan. Por consiguiente, la atmósfera superior tiene mayor porcentaje de moléculas ionizadas que la atmósfera inferior. Mientras mayor sea la densidad de iones, la refracción es mayor. También, debido a la composición no uniforme de la ionosfera y a sus variaciones de temperatura y de densidad, está *estratificada*. En esencia son tres las capas que forman la ionosfera: las capas D, E y F, que se ven en la fig. 9-17. Las tres capas de ionosfera varían en localización y en *densidad de ionización* según la hora del día. También fluctúan en una forma cíclica durante el año, y también siguiendo el *ciclo de manchas solares* de 11 años. La ionosfera es más densa durante las horas de más luz solar: durante las horas del día y en el verano.

**Capa D.** La *capa D* es la más inferior de la ionosfera, entre 30 y 60 mi (50 a 100 km) sobre la superficie de la Tierra. Como es la capa más alejada del Sol, tiene poca ionización. En consecuencia, la capa D tiene muy poco efecto sobre la dirección de propagación de las ondas de radio. Sin embargo, los iones de la capa D pueden absorber cantidades apreciables de energía electromagnética. La cantidad de ionización en la capa D depende de la altura del Sol sobre el horizonte. En consecuencia, desaparece durante la noche. La capa D refleja las ondas de VLF y LF, y absorbe las ondas MF y HF (véase la tabla 1-1, con las regiones de frecuencias VLF, LF, MF y HF).

**Capa E.** La *capa E* se ubica entre las 60 y las 85 millas (100 a 140 km) sobre la superficie terrestre. A veces se le llama *capa Kennelly-Heaviside* en honor de los dos científicos que la descubrieron. Tiene su densidad máxima a unas 70 millas a mediodía, cuando el Sol está en su altura máxima. Como en la capa D, la capa E desaparece casi totalmente por la noche. La capa E favorece la propagación de ondas superficiales de MF y refleja algo las ondas HF durante el día. La parte superior de la capa E se considera a veces por separado, y se llama capa E esporádica, porque parece llegar e irse en forma impredecible. La capa E esporádica se produce

durante los *destellos solares* y durante la *actividad de manchas solares*. Es una capa delgada con una densidad de ionización muy alta. Cuando aparece, produce una mejoría inesperada en la radiotransmisión a grandes distancias.

**Capa F.** La *capa F* está formada en realidad por dos capas: la  $F_1$  y la  $F_2$ . Durante el día, la capa  $F_1$  está entre 85 y 155 mi (140 a 250 km) sobre la superficie terrestre. La capa  $F_2$  está de 85 a 185 mi (140 a 300 km) sobre la superficie terrestre durante el invierno, y de 155 a 220 mi (250 a 350 km) en el verano. Durante la noche, las capas  $F_1$  y  $F_2$  se combinan y forman una sola capa. La capa  $F_1$  absorbe y atenúa algunas ondas de HF, aunque la mayoría de las ondas atraviesan hasta la capa  $F_2$ , donde son reflejadas hacia la Tierra.

## TÉRMINOS Y DEFINICIONES DE PROPAGACIÓN

### Frecuencia crítica y ángulo crítico

Virtualmente, la ionosfera no afecta a las frecuencias mayores que las UHF, porque las ondas son extremadamente cortas. Las distancias entre iones son bastante mayores que las longitudes de onda de estas frecuencias, y en consecuencia, las ondas electromagnéticas pasan a través de ellos con pocos efectos notables. Por consiguiente es razonable que haya un límite superior de frecuencias que se propaguen como ondas celestes. La *frecuencia crítica* ( $f_c$ ) se define como la máxima frecuencia que se puede propagar directo hacia arriba y es reflejada por la ionosfera hacia la Tierra. La frecuencia crítica depende de la densidad de ionización y, en consecuencia, varía con la hora del día y con la estación. Si disminuye el ángulo vertical de irradiación, las frecuencias iguales o mayores que la crítica se pueden reflejar hacia la superficie terrestre, porque recorren una distancia mayor en la ionosfera y por consiguiente tienen mayor tiempo de refractarse. Así, la frecuencia crítica sólo se usa como punto de referencia para fines de comparación. Sin embargo, cada frecuencia tiene un ángulo vertical máximo al cual se puede propagar y seguir reflejándose por la ionosfera. Ese ángulo se llama *ángulo crítico*. El ángulo crítico,  $\theta_c$ , se ilustra en la fig. 9-18.

A veces se usa una técnica de medición llamada *sondeo ionosférico* para determinar la frecuencia crítica. Una señal se propaga directo hacia arriba, desde la superficie de la Tierra, y su frecuencia se aumenta en forma gradual. A las frecuencias inferiores, la señal se absorberá por completo en la atmósfera. Sin embargo, a medida que se aumenta la frecuencia, la señal, o una

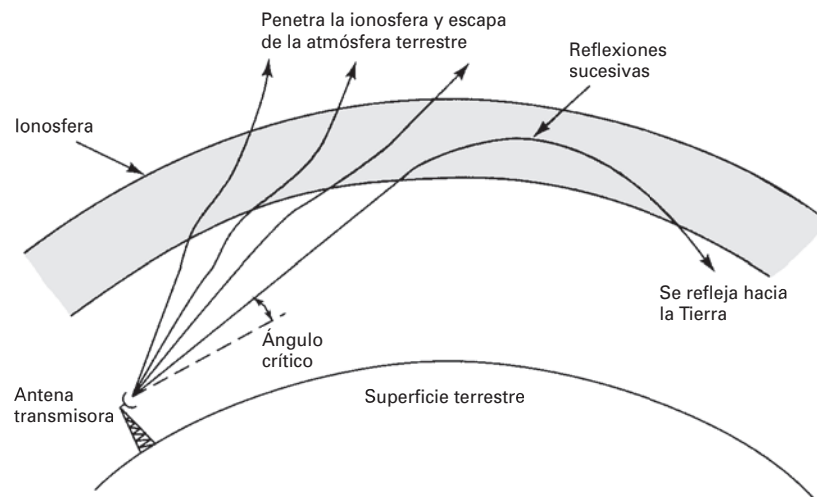


FIGURA 9-18 Ángulo crítico

parte de ella, regresará a la Tierra. Pero en determinada frecuencia la señal pasará por la atmósfera terrestre, hacia el espacio exterior, y no regresará hacia la Tierra. La máxima frecuencia que regresa a la Tierra en dirección vertical es la frecuencia crítica.

### Altura virtual

La *altura virtual* es la altura, sobre la superficie terrestre, desde la que parece reflejarse una onda refractada. La fig. 9-19 muestra una onda que se ha irradiado desde la superficie terrestre hacia la ionosfera. La onda irradiada se refracta y regresa a la tierra, describiendo la trayectoria B. La altura máxima real que alcanzó la onda es  $h_a$ . Sin embargo, la trayectoria A muestra la trayectoria proyectada que podría haber tomado la onda reflejada y ser regresada a la Tierra hacia el mismo lugar. La altura máxima que habría alcanzado esta onda reflejada hipotética es la altura virtual ( $h_v$ ).

### Máxima frecuencia útil

La *máxima frecuencia útil* (MUF, de *maximum usable frequency*) es la mayor frecuencia que se puede usar en propagación de ondas celestes entre dos puntos específicos de la superficie terrestre. Es razonable, entonces, que haya tantos valores posibles de MUF como puntos y frecuencias hay en la Tierra: una cantidad infinita. La MUF, como la frecuencia crítica, es una frecuencia límite para la propagación de las ondas celestes. Sin embargo, la MUF es para determinado ángulo de incidencia: el ángulo que forma la onda incidente con la normal. La ecuación correspondiente es

$$\text{MUF} = \frac{\text{frecuencia crítica}}{\cos \theta} \quad (9-18a)$$

$$= \text{frecuencia crítica} \times \sec \theta \quad (9-18b)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia.

La ecuación 9-18a se llama *ley de la secante*. Supone que la Tierra es plana y que la capa reflectora es plana, lo cual, naturalmente, no puede ser. Por esta razón la MUF sólo se usa para hacer cálculos preliminares.

Debido a la inestabilidad general de la ionosfera, la máxima frecuencia que se usa entre dos puntos se suele seleccionar menor que la MUF. Se ha demostrado que si se trabaja con una frecuencia igual al 85% de la MUF se obtienen comunicaciones más confiables. A veces, a esta frecuencia se le llama *frecuencia óptima de trabajo* (OWF, de *optimum working frequency*).

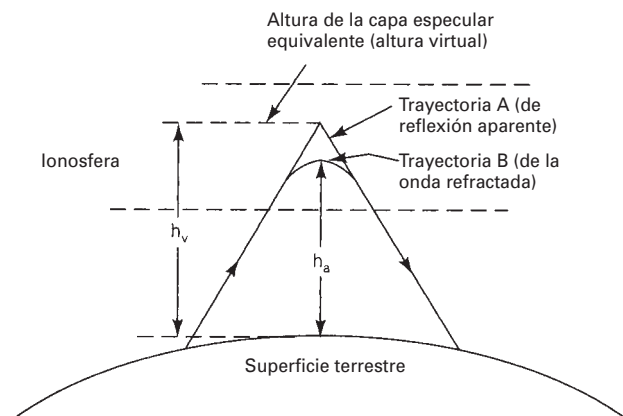
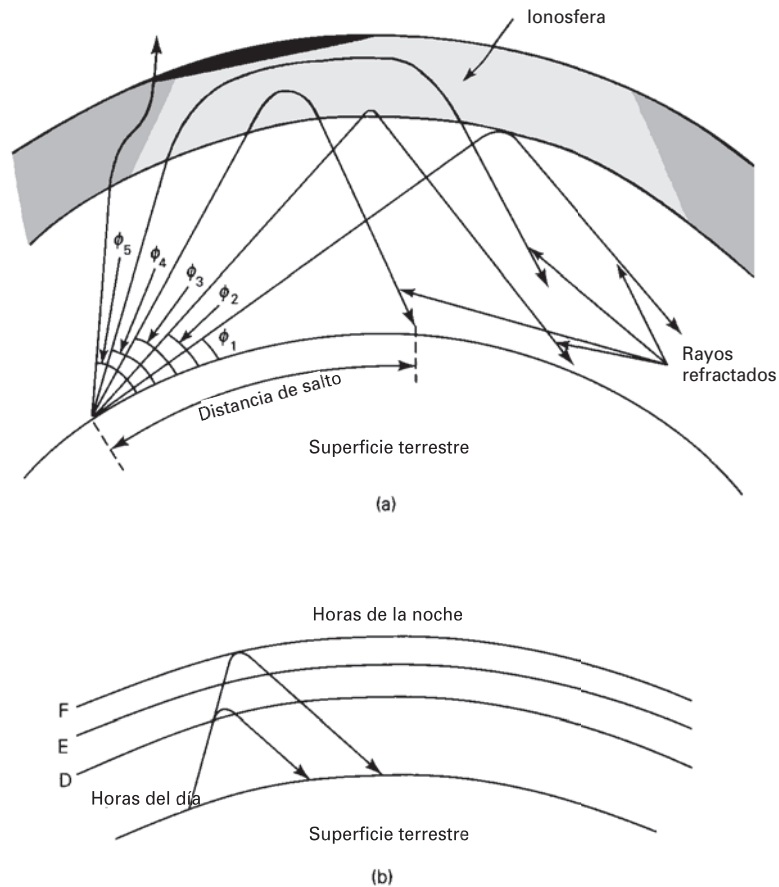


FIGURA 9-19 Altura virtual y altura real



**FIGURA 9-20** (a) Distancia de salto; (b) propagación durante el día y durante la noche

### Distancia de salto

La *distancia de salto*,  $d_s$ , es la distancia mínima desde una antena de transmisión a la que regresará a la Tierra una onda celeste de determinada frecuencia (que debe ser menor que la MUF). La fig. 9-20a muestra varios rayos con distintos ángulos de elevación, irradiados desde el mismo punto sobre la Tierra. Se aprecia que el punto en el que regresa la onda a la Tierra se acerca al transmisor a medida que aumenta  $\phi$ , el ángulo de elevación. Sin embargo, al final el ángulo de elevación es tan alto que la onda penetra y atraviesa la ionosfera, y escapa de la atmósfera terrestre en forma total.

La fig. 20-9b muestra el efecto de la desaparición de las capas D y E durante la noche, sobre la distancia de salto. En forma efectiva, el *cielo* que forma la ionosfera se eleva y permite a las ondas celestes viajar más arriba antes de ser refractadas hacia la Tierra. Este efecto explica por qué a veces las estaciones lejanas de radio se oyen durante la noche, pero no durante las horas del día.

## PÉRDIDAS EN TRAYECTORIA POR EL ESPACIO LIBRE

La *pérdida en trayectoria por el espacio libre* se suele definir como la pérdida sufrida por una onda electromagnética al propagarse en línea recta por un vacío, sin absorción ni reflexión de energía en objetos cercanos. Es una definición mala y con frecuencia engañosa. La pérdida en trayectoria por el espacio libre es una cantidad técnica artificial que se originó debido a la manipulación de las ecuaciones de presupuesto de un enlace de comunicaciones, que deben tener

determinado formato en el que se incluye la ganancia de la antena transmisora, la pérdida en trayectoria por el espacio libre y el área efectiva de la antena receptora. En realidad no se pierde energía alguna; tan sólo se reparte al propagarse alejándose de la fuente, y se produce una menor densidad de potencia en determinado punto a determinada distancia de la fuente. En consecuencia, un término más adecuado para definir el fenómeno es *pérdida por dispersión*. La pérdida por dispersión se debe simplemente a la ley del cuadrado inverso. La ecuación que define a la pérdida en trayectoria por el espacio libre es

$$L_p = \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi Df}{c} \right)^2 \quad (9-19)$$

siendo  $L_p$  = pérdida en trayectoria por el espacio libre (adimensional)  
 $D$  = distancia (kilómetros)  
 $f$  = frecuencia (hertz)  
 $\lambda$  = longitud de onda (metros)  
 $c$  = velocidad de la luz en el espacio libre ( $3 \times 10^8$  metros por segundo)

Expresada en decibeles, esta ecuación es

$$L_{p(\text{dB})} = 20 \log \frac{4\pi f D}{c} = 20 \log \frac{4\pi}{c} + 20 \log f + 20 \log D$$

Cuando la frecuencia se expresa en MHz y la distancia en km

$$\begin{aligned} L_{p(\text{dB})} &= 20 \log \frac{4\pi(10)^6(10)^3}{3 \times 10^8} + 20 \log f_{(\text{MHz})} + 20 \log D_{(\text{km})} \\ &= 32.4 + 20 \log f_{(\text{MHz})} + 20 \log D_{(\text{km})} \end{aligned} \quad (9-20a)$$

Cuando la frecuencia se expresa en GHz y la distancia en km

$$L_{p(\text{dB})} = 92.4 + 20 \log f_{(\text{GHz})} + 20 \log D_{(\text{km})} \quad (9-20b)$$

Se pueden hacer conversiones parecidas cuando la distancia está en millas, la frecuencia en kHz, etc.

### Ejemplo 9-2

Calcular la pérdida en trayectoria por el espacio libre para una frecuencia de portadora de 6 GHz y una distancia de 50 km.

#### Solución

$$\begin{aligned} L_p &= 32.4 + 20 \log 6000 + 20 \log 50 \\ &= 32.4 + 75.6 + 34 = 142 \text{ dB} \\ L_p &= 92.4 + 20 \log 6 + 20 \log 50 \\ &= 92.4 + 15.6 + 34 = 142 \text{ dB} \end{aligned}$$

## MARGEN DE DESVANECIMIENTO

Las radiocomunicaciones entre lugares remotos, sean de tierra a tierra o de tierra a satélite, requieren la propagación de señales electromagnéticas por el espacio libre. Al propagarse una onda electromagnética por la atmósfera terrestre, la señal puede tener pérdidas intermitentes de intensidad, además de la pérdida normal en la trayectoria. Esas pérdidas de pueden atribuir a diversos fenómenos, que incluyen efectos de corto y de largo plazo. Esta variación en la pérdida de la señal se llama *desvanecimiento* y se puede atribuir a perturbaciones meteorológicas como lluvia, nieve, granizo, etc.; a trayectorias múltiples de transmisión y a una superficie terrestre irregular. Para tener en cuenta el desvanecimiento temporal, se agrega una pérdida adicional de transmisión a la pérdida en trayectoria normal. A esta pérdida se le llama *margen de desvanecimiento*.

En esencia, el margen de desvanecimiento es un “factor espurio” que se incluye en la ecuación de ganancia del sistema para considerar las características no ideales y menos predecibles de la propagación de las ondas de radio, como por ejemplo la *propagación por trayectorias*

múltiples (pérdida por trayectorias múltiples) y la sensibilidad del terreno. Estas características causan condiciones atmosféricas temporales y anormales que alteran la pérdida por trayectoria en el espacio libre, y suelen ser perjudiciales para la eficiencia general del sistema. El margen de desvanecimiento también tiene en cuenta los objetivos de confiabilidad del sistema. Así, el margen de desvanecimiento se incluye en la ecuación de ganancia de un sistema como una pérdida.

Al resolver las ecuaciones de confiabilidad de Barnett-Vignant para una disponibilidad anual especificada en un sistema no protegido sin diversidad se obtiene la siguiente ecuación

$$F_m = \underbrace{30 \log D}_{\text{Efecto de trayectoria múltiple}} + \underbrace{10 \log (6ABf)}_{\text{Sensibilidad del terreno}} - \underbrace{10 \log (1 - R)}_{\text{Objetivos de confiabilidad}} - \underbrace{70}_{\text{constante}} \quad (9-21)$$

siendo  $F_m$  = margen de desvanecimiento (decibeles)

$D$  = distancia (kilómetros)

$f$  = frecuencia (gigahertz)

$R$  = confiabilidad en tanto por uno (es decir, 99.99% = 0.9999 de confiabilidad)

$1 - R$  = objetivo de confiabilidad para una ruta de 400 km en un sentido

$A$  = factor de rugosidad

= 4 sobre agua o sobre un terreno muy liso

= 1 sobre un terreno promedio

= 0.25 sobre un terreno muy áspero y montañoso

$B$  = factor para convertir la peor probabilidad mensual en una probabilidad anual

= 1 para pasar una disponibilidad anual a la peor base mensual

= 0.5 para áreas calientes y húmedas

= 0.25 para áreas continentales promedio

= 0.125 para áreas muy secas o montañosas

### Ejemplo 9-3

Calcular el margen de desvanecimiento para las siguientes condiciones: distancia entre sitios  $D = 40$  km; frecuencia  $f = 1.8$  GHz; terreno liso; clima húmedo y objetivo de confiabilidad 99.99%.

**Solución** Se sustituyen valores en la ecuación 9-21, para obtener

$$\begin{aligned} F_m &= 30 \log 40 + 10 \log[(6)(4)(0.5)(1.8)] - 10 \log(1 - 0.9999) - 70 \\ &= 48.06 + 13.34 - (-40) - 70 = 31.4 \text{ dB} \end{aligned}$$

## PREGUNTAS

- 9-1. Describa un rayo electromagnético y un frente de onda.
- 9-2. Describa lo que es densidad de potencia e intensidad de voltaje.
- 9-3. Describa un frente de onda esférico.
- 9-4. Explique la ley del cuadrado inverso.
- 9-5. Describa la atenuación de ondas.
- 9-6. Describa la absorción de ondas.
- 9-7. Describa la refracción; explique la ley de Snell de la refracción.
- 9-8. Describa la reflexión.
- 9-9. Describa la difracción. Explique el principio de Huygens.
- 9-10. Describa la composición de un buen reflector.
- 9-11. Describa las condiciones atmosféricas que causan la refracción electromagnética.
- 9-12. Defina la *interferencia de ondas electromagnéticas*.
- 9-13. Describa la propagación de ondas terrestres. Haga una lista de sus ventajas y sus desventajas.

- 9-14. Describa la propagación de las ondas espaciales.
- 9-15. Explique por qué el horizonte de radio está a mayor distancia que el horizonte óptico.
- 9-16. Describa las diversas capas de la ionosfera.
- 9-17. Describa la propagación de ondas celestes.
- 9-18. Explique por qué las condiciones ionosféricas varían con la hora del día, el mes, etc.
- 9-19. Defina la *frecuencia crítica* y el *ángulo crítico*.
- 9-20. Describa lo que es altura virtual.
- 9-21. Defina lo que es *máxima frecuencia útil*.
- 9-22. Defina la *distancia de salto* y describa las razones por las que varía.
- 9-23. Describa lo que es pérdida en trayectoria.
- 9-24. Describa qué es margen de desvanecimiento.
- 9-25. Describa el desvanecimiento.

## PROBLEMAS

- 9-1. Calcule la densidad de potencia cuando la potencia irradiada es 1000 W y la distancia a la antena isotrópica es 20 km.
- 9-2. Calcule la densidad de potencia para el problema 9-1, para un punto a 30 km de la antena.
- 9-3. Describa los efectos sobre la densidad de potencia, si se eleva al triple la distancia a la antena de transmisión.
- 9-4. Calcule el horizonte de radio para una antena de transmisión de 100 pies de alto, y una antena de recepción de 50 pies de alto, y para antenas respectivas de 100 m y de 50 m.
- 9-5. Calcule la máxima frecuencia útil para una frecuencia crítica de 10 MHz y un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ .
- 9-6. Calcule la intensidad de campo eléctrico para el mismo punto en el problema 9-1.
- 9-7. Calcule la intensidad de campo eléctrico para el mismo punto en el problema 9-2.
- 9-8. Para una potencia irradiada  $P_{rad} = 10$  kW, calcule la intensidad de voltaje a 20 km de la fuente.
- 9-9. Calcule el cambio de densidad de potencia cuando la distancia a la fuente aumenta en un factor de 4.
- 9-10. Si la distancia a la fuente se reduce a la mitad, ¿qué efecto tiene sobre la densidad de potencia?
- 9-11. La densidad de potencia en un punto es  $0.001 \mu\text{W}$ , y en otro punto es  $0.00001 \mu\text{W}$  para la misma señal. Calcule la atenuación en decibels.
- 9-12. Para una relación dieléctrica  $\sqrt{\epsilon_{r2} / \epsilon_{r1}} = 0.8$  y un ángulo de incidencia  $\theta_i = 26^\circ$ , calcule el ángulo de refracción  $\theta_r$ .
- 9-13. Calcule la distancia al horizonte de radio para una antena a 40 pies sobre el nivel del mar.
- 9-14. Calcule la distancia al horizonte de radio para una antena que está a 40 pies sobre la cumbre de una montaña de 4000 pies de altura.
- 9-15. Calcule la distancia máxima entre antenas idénticas equidistantes sobre el nivel del mar para el problema 9-13.
- 9-16. Calcule la densidad de potencia cuando la potencia irradiada es 1200 W, a 50 km de una antena isotrópica.
- 9-17. Calcule la densidad de potencia para el problema 9-16 y un punto a 100 km de la misma antena.
- 9-18. Describa los efectos sobre la densidad de potencia si la distancia a una antena de transmisión se reduce en un factor de 3.
- 9-19. Calcule el horizonte de radio para una antena de transmisión de 200 pies de alto, y una de recepción de 100 pies de alto. También para antenas de 200 m y de 100 m.
- 9-20. Calcule la máxima frecuencia útil cuando la frecuencia crítica es de 20 MHz y el ángulo de incidencia es  $35^\circ$ .
- 9-21. Calcule la intensidad de voltaje para el mismo punto en el problema 9-16.
- 9-22. Calcule la intensidad de voltaje para el mismo punto en el problema 9-17.

- 9-23.** Calcule el cambio de densidad de potencia cuando la distancia a la fuente disminuye en un factor de 8.
- 9-24.** Calcule el cambio de densidad de potencia cuando la distancia a la fuente aumenta en un factor de 8.
- 9-25.** Si la distancia a la fuente se reduce a una cuarta parte, ¿qué efecto tiene sobre la densidad de potencia?
- 9-26.** La densidad de potencia en un punto es  $0.002 \mu\text{W}$ , y en otro punto, para la misma señal, es  $0.00002 \mu\text{W}$ . Calcule la atenuación en dB.
- 9-27.** Calcule el ángulo de refracción para una relación de dieléctrico de 0.4, y un ángulo de incidencia  $\theta_i = 18^\circ$ .
- 9-28.** Determine la distancia al horizonte de radio de una antena de 80 pies sobre el nivel del mar.
- 9-29.** Determine la distancia al horizonte de radio de una antena de 80 pies sobre la cumbre de una montaña de 5000 pies.
- 9-30.** Calcule la distancia máxima entre antenas idénticas, a la misma altura sobre el nivel del mar, que la del problema 9-29.
- 9-31.** Calcule la pérdida en trayectoria para las siguientes frecuencias y distancias:

$f$ (MHz)	$D$ (km)
400	0.5
800	0.6
3000	10
5000	5
8000	20
18,000	15

- 9-32.** Calcule el margen de desvanecimiento para una transmisión de microondas a 30 km. La RF es 10 GHz, el terreno es agua y el objetivo de confiabilidad es 99.995%.