

Capítulo 1

Propagación de Ondas Electromagnéticas

1.1.- Propagación de Ondas.

La propagación de ondas se refiere a la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio libre. Aunque el espacio libre realmente implica en el vacío, con frecuencia la propagación por la atmósfera terrestre se llama propagación por el espacio libre y se puede considerar siempre así. La principal diferencia es que la atmósfera de la Tierra introduce pérdidas de la señal que no se encuentran en el vacío.

Las ondas electromagnéticas se propagan a través de cualquier material dieléctrico incluyendo el aire pero no se propagan bien a través de conductores con pérdidas como el agua de mar ya que los campos eléctricos hacen que fluyan corrientes en el material disipando con rapidez la energía de las ondas.[1]

Las ondas de radio se consideran ondas electromagnéticas como la luz y al igual que ésta, viajan a través del espacio libre en línea recta con una 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. [1]

Las ondas de radio se propagan por la atmósfera terrestre con energía transmitida por la fuente, posteriormente la energía se recibe del lado de la antena receptora. La radiación y la captura de esta energía son funciones de las antenas y de la distancia entre ellas.

1.1.1.- Frentes de Onda.

Las ondas electromagnéticas no son visibles al ojo humano y se debe de analizar con métodos indirectos mediante esquemas. Los conceptos de rayos y frentes de onda son auxiliares para ilustrar los efectos de propagación de las ondas electromagnéticas a través del espacio libre. Un rayo se considera como una línea trazada a lo largo de la dirección de propagación de una onda electromagnética. Estos rayos son utilizados para mostrar la dirección relativa de la propagación de la onda electromagnética pero esto no indica que se refiere a la propagación de una sola onda electromagnética. [1]

Un frente de onda representa una superficie de ondas electromagnéticas de fase constante. El frente de onda es formado cuando se unen los puntos de igual fase en rayos que se propagan desde la misma fuente. [1]

1.1.1.1.- Frente de onda plana.

Un frente de onda plana representa un frente de onda con una superficie que es perpendicular a la dirección de propagación, cuando una superficie es plana, su frente de onda es perpendicular a la dirección de propagación como se muestra en la figura 1.1. En cuanto mas cerca está el frente de la fuente, el frente de onda se vuelve mas complicado. [1]

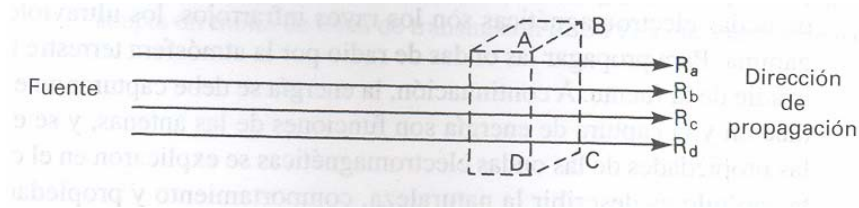


Figura 5.1 Frente de Onda Plana.

1.1.1.2.- Frente de onda producido por una fuente puntual.

Gran parte de los frentes de onda son por lo general más complicados que los frentes de onda plana, en una fuente puntual, varios rayos son propagados desde ella en todas direcciones. Esta fuente se considera una fuente isotrópica y el frente de onda generado por la fuente puntual se considera una esfera con su respectivo radio y en la cual su centro está en el punto donde se originan las ondas. [1]

En el espacio libre, y a una distancia de la superficie de la fuente, los rayos dentro de una superficie pequeña del frente de onda esférico son casi paralelos a la dirección de propagación mostrados en la figura 1.2, por lo tanto, a mayor distancia de la fuente la propagación, el frente de onda se parece mas a un frente de onda plano por lo que en la mayoría de los casos los frentes de onda esféricos se pueden simplificar como frentes de onda planos. [1]

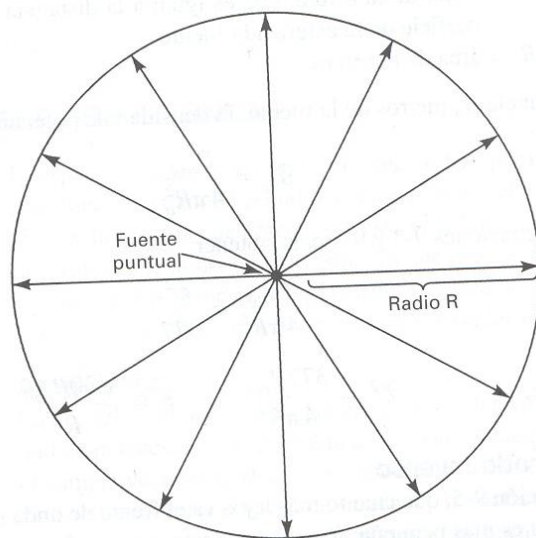


Figura 5.2 Frente de onda producido por una fuente puntual.

1.1.1.3.- Frente de onda esférico.

Para generar un frente de onda esférico, se necesita un radiador isotrópico que irradie en todas direcciones, en la realidad no existen radiadores isotrópicos pero se puede aproximar al radiador de una antena omnidireccional, el cual es capaz de producir un frente de onda esférico con radio R . Todos los puntos que se encuentran a una distancia R , se encuentran en la superficie de la esfera y cuentan con la misma densidad de potencia. En cualquier otro momento, la potencia irradiada, se encuentra uniformemente distribuida sobre la superficie total de la esfera, donde se considera que el medio de transmisión no tiene pérdidas. [1]

La potencia irradiada por la fuente puntual se encuentra distribuida en la superficie total de la esfera donde la potencia total irradiada es. [1]

$$P = \frac{Pr_{ad}}{4\pi R^2}$$

Ecuación 1.1

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

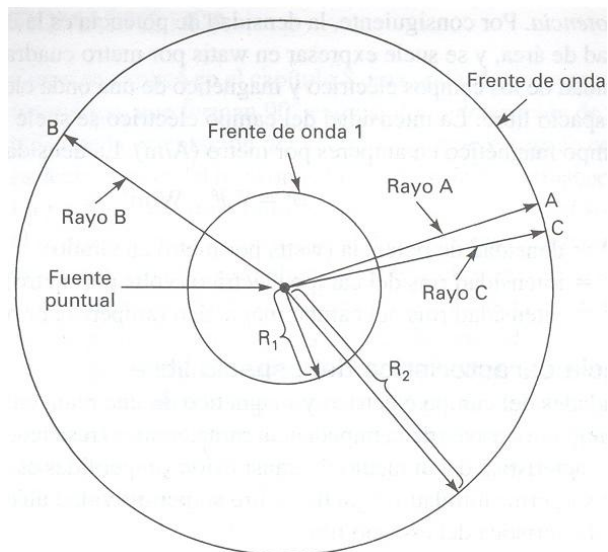


Figura 5.3 Frente de onda producido por una fuente puntual.

1.1.1.3.1.-Ley del cuadrado inverso.

La ley del cuadrado inverso nos dice que entre más lejano va el frente de onda de la antena transmisora, la densidad de potencia es más pequeña. En estos casos la potencia total distribuida sobre la esfera queda de la misma cantidad. Por otro lado el área de la esfera aumenta en proporción directa a la distancia a la que se encuentra de la fuente elevada al cuadrado, es decir, el radio de la esfera elevado al cuadrado y esto nos causa una menor densidad de potencia ya que ésta disminuye inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente. [2]

1.1.2.- Pérdidas de la señal en el espacio libre

El espacio libre puede ser considerado como vacío y no se consideran pérdidas. Cuando las ondas electromagnéticas se encuentran en el vacío, se llegan a dispersar y se reduce la densidad de potencia a lo que es llamado atenuación. La atenuación se presenta tanto en el espacio libre como en la atmósfera terrestre. La atmósfera terrestre no se le considera vacío debido a que contiene partículas que pueden absorber la energía electromagnética y a este tipo de reducción de potencia se le llama pérdidas por absorción la cual no se presenta cuando las ondas viajan afuera de la atmósfera terrestre. [1]

1.1.2.1.- Atenuación.

La atenuación es descrita matemáticamente por la ley del cuadrado inverso que describe como es que se reduce la densidad de potencia con la distancia a la fuente. El campo electromagnético continuo se dispersa a medida que el frente de onda se aleja de la fuente, lo que hace que las ondas electromagnéticas se alejen cada vez más entre si. En consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor. [1]

Cabe destacar que no se pierde ni se disipa nada de la potencia irradiada por la fuente a medida que el frente de onda se aleja, sino que el frente se extiende cada vez mas sobre un área mayor lo que hace una perdida de potencia que se suele llamar atenuación de la onda. La atenuación de la onda se debe a la dispersión esférica de la onda, a veces se le llama atenuación espacial de la onda.

1.1.2.1.1.- Modelo de propagación en el espacio libre.

El modelo de propagación en el espacio libre es usado para predecir la señal recibida directa cuando el transmisor y el receptor tienen línea de vista entre ellos. Los sistemas de comunicación vía satélite y los enlaces microondas con línea de vista típicamente son en el espacio libre.

Como la mayoría de los modelos de propagación en el espacio libre, el modelo predice que la potencia recibida decrece a medida que la separación entre las antenas receptora y transmisora aumenta. La energía recibida en el espacio libre es función de la distancia y esta dada por. [1]

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde

P_t es la potencia transmitida,

$P_r(d)$ es la potencia recibida que es función de la distancia entre el transmisor y el receptor.

G_t es la ganancia de la antena transmisora.

G_r es la ganancia de la antena receptora, d es la distancia de separación entre el transmisor y el receptor en metros.

L es el factor de pérdida del sistema no relacionado con la propagación ($L \geq 1$).

λ es la longitud de onda en metros.

La ganancia de cualquier antena está relacionada con su apertura efectiva, A_e y esta dada por. [1]

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde

A_e esta relacionada con la medida física de la antena.

λ = longitud de onda.

y esta dada por

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde

f = frecuencia de la portadora en Hertz.

ω_c = frecuencia de la portadora en radianes por segundo.

c = velocidad de la luz en metros/s.

Los valores para P_t y P_r deben de estar expresados en las mismas unidades.

La ecuación del espacio libre muestra que la potencia recibida decae al cuadrado de la distancia de separación entre las antenas. Esto implica que la potencia recibida decae con la distancia a medida de 20 dB / década.

Un radiador isotrópico es una antena ideal que radia potencia con una ganancia uniforme en todas direcciones, y es comúnmente usada para referenciar la ganancia de una antena en un sistema inalámbrico. La potencia efectiva radiada isotrópicamente esta definida por $EIRP = P_t G_t$ y representa el máximo de la potencia radiada disponible desde el transmisor en dirección de la máxima ganancia de la antena.

En la práctica, la potencia radiada efectiva (ERP) es usada en lugar de EIRP para denotar el máximo de la potencia radiada como comparada con una antena bipolar de media onda. Como la antena bipolar tiene una ganancia de 1.64 (2.15 dB arriba de la antena isotrópica), el ERP será 2.15 dB más chico que el EIRP para el mismo sistema de transmisión. En la práctica, la ganancia de las antenas están dadas en unidades de dBi (ganancia en dB con respecto a una antena isotrópico o dBd (ganancia en dB con respecto a una antena bipolar de media onda). [1]

Las pérdidas por trayectoria que representa la atenuación de la señal como una cantidad positiva medida en dB, son definidas como la diferencia en dB entre la potencia transmitida efectiva y la potencia recibida. Las pérdidas por trayectoria para el modelo en el espacio libre están dadas por. [1]

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Donde

$PL(dB)$ = Pérdidas por trayectoria.

P_t = Potencia de transmisión.

P_r = Potencia de recepción.

λ = longitud de onda

1.1.2.1.1.1. Región de Fraunhofer.

La región de Fraunhofer de una antena transmisora es definida como la región más allá de la distancia de Fraunhofer df que está relacionada con la dimensión lineal más larga

de la apertura de la antena transmisora y la longitud de onda de la portadora. La distancia de Fraunhofer está dada por. [2]

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Donde

d_f = distancia de Fraunhofer.

λ = longitud de onda

D = mayor dimensión lineal física de la antena. Adicionalmente, para estar en la región de Fraunhofer, d_f debe de ser

$$d_f \gg D$$

y

$$d_f \gg \lambda$$

La ecuación que define la potencia recibida en la antena receptora no concierne para $d = 0$. Por esta razón, los modelos de propagación usan una distancia cercana d_0 conocida como punto de referencia de la potencia recibida. La potencia recibida, $Pr(d)$ a cualquier distancia $d > d_0$ puede ser relacionada con la Pr en d_0 . El valor $Pr(d_0)$ puede ser predecido por los modelos de propagación. La distancia de referencia debe de ser escogida tal que ésta caiga en la región de Fraunhofer, esto es $d_0 \geq d_f$ y d_0 es escogida para ser más pequeña que cualquier distancia práctica usada en cualquier sistema de comunicaciones. Por esto la potencia recibida está dada por. [1]

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Donde

$Pr(d)$ = Potencia recibida

$Pr(do)$ = Potencia recibida a do

d = distancia entre las antenas

1.1.2.2.- Absorción.

La causa de la absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire es que el aire no es un vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Estos materiales pueden absorber a las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricos. [1]

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, lo que provoca una atenuación de las intensidades de voltaje y campo magnético al igual que una reducción correspondiente en la densidad de potencia. [1]

La medida en que una onda es absorbida en la atmósfera por sus distintas partículas depende de su frecuencia, y es relativamente insignificante a menos de unos 10 GHz. Así también la absorción de una onda depende del medio en el que se propague. Las pérdidas por absorción no dependen 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, es decir, cuando la onda se propaga a través de un medio homogéneo y cuyas propiedades son uniformes, las pérdidas

por absorción en el primer kilómetro de propagación son las mismas que en el último kilómetro. [1]

En caso de contar con lluvias intensas y neblina densa, las ondas electromagnéticas tienden a ser absorbidas en mayor proporción que cuando se encuentran en una atmósfera normal. En la figura 1.4 se tiene la absorción en decibeles por kilómetro de una onda electromagnética en frecuencias de los 10 a 200 GHz cuando se propaga en oxígeno y vapor de agua. [1]

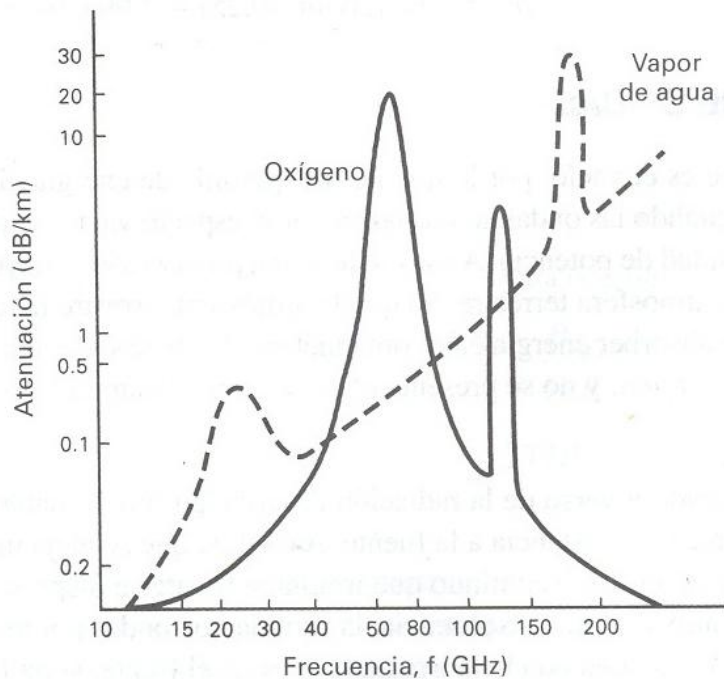


Figura 5.4 Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas.

1.1.3.- Propagación terrestre de las ondas electromagnéticas.

Las ondas terrestres son todas las ondas electromagnéticas que viajan dentro de la atmósfera terrestre, así también, las comunicaciones entre dos o más puntos de la Tierra son

llamadas radiocomunicaciones. Las ondas terrestres se ven influidas por la atmósfera y por la Tierra misma.

Las radiocomunicaciones terrestres se pueden propagar de distintas formas y éstas formas dependen de la clase de sistema y del ambiente, las ondas terrestres tienden a viajar en línea recta, pero tanto la Tierra como la atmósfera pueden alterar su trayectoria.

Existen tres formas de propagación de ondas electromagnéticas dentro de la atmósfera que corresponden a las ondas terrestres, ondas espaciales y ondas celestes o ionosféricas. Mostradas en la figura 1.5. Cuando las ondas viajan directamente del transmisor al receptor se le llama transmisión de línea de vista (*LOS-Line of Sight*). [1]

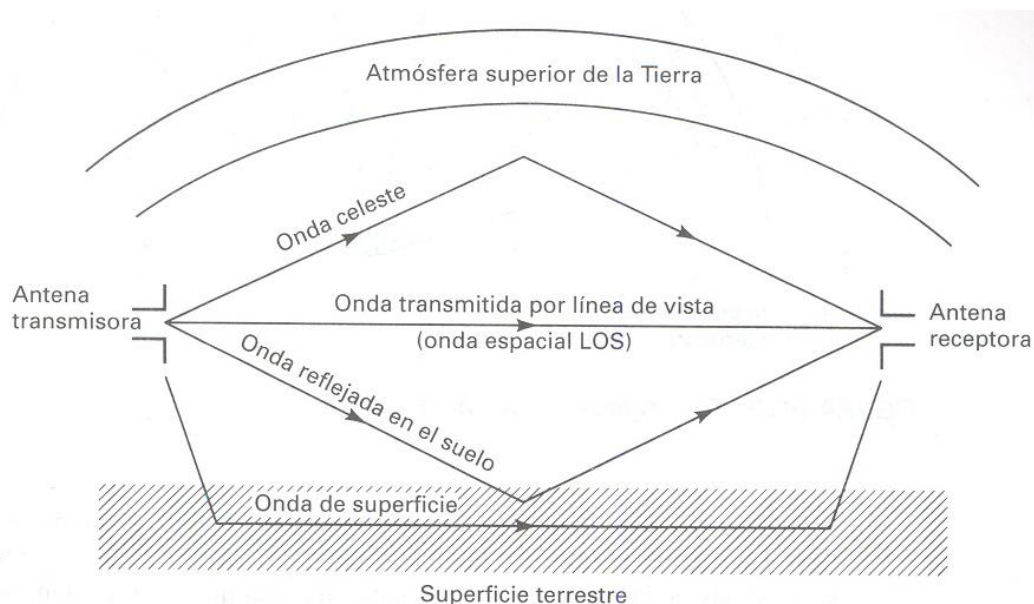


Figura 5.5 Modos normales de propagación de ondas.

1.1.3.1.- Propagación de ondas terrestres.

Las ondas terrestres son las ondas que viajan por la superficie de la tierra, éstas deben de estar polarizadas verticalmente debido a que el campo eléctrico en una onda

polarizada horizontalmente sería paralelo a la superficie de la tierra y se pondría en corto por la conductividad del suelo. [1]

En las ondas terrestres el campo eléctrico variable induce voltajes en 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 haciéndolo mejor sobre una superficie buena conductora como el agua salada y son mal propagadas en superficies como desiertos. La atmósfera terrestre tiene un gradiente de densidad, es decir, la densidad disminuye en forma gradual conforme aumenta la distancia a la superficie terrestre, 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 pudiéndose propagar más allá del horizonte o incluso por toda la circunferencia de la Tierra como se muestra en la figura 1.6. [1]

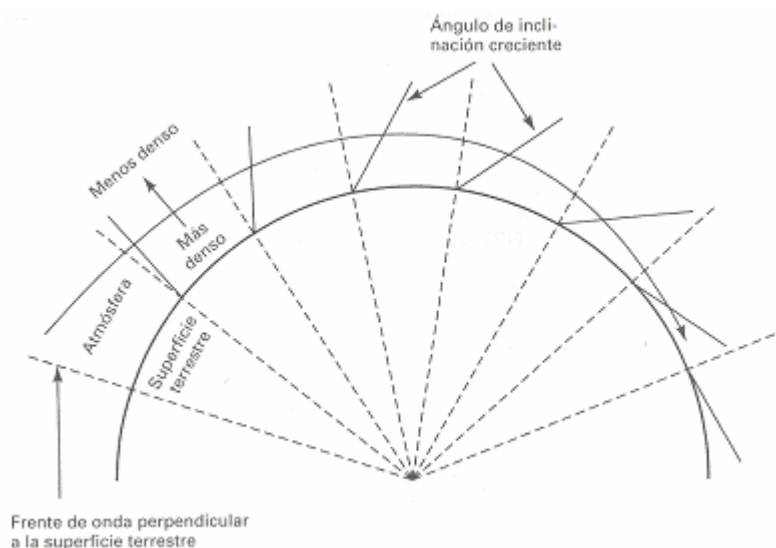


Figura 5.6 Propagación de ondas terrestres.

1.1.3.2.- Propagación de ondas espaciales.

Esta clase de propagación corresponde a la energía irradiada que viaja en los kilómetros inferiores de la atmósfera terrestre. Las ondas espaciales son todas las ondas directas y reflejadas en el suelo como se muestra en la figura 1.7. [1]

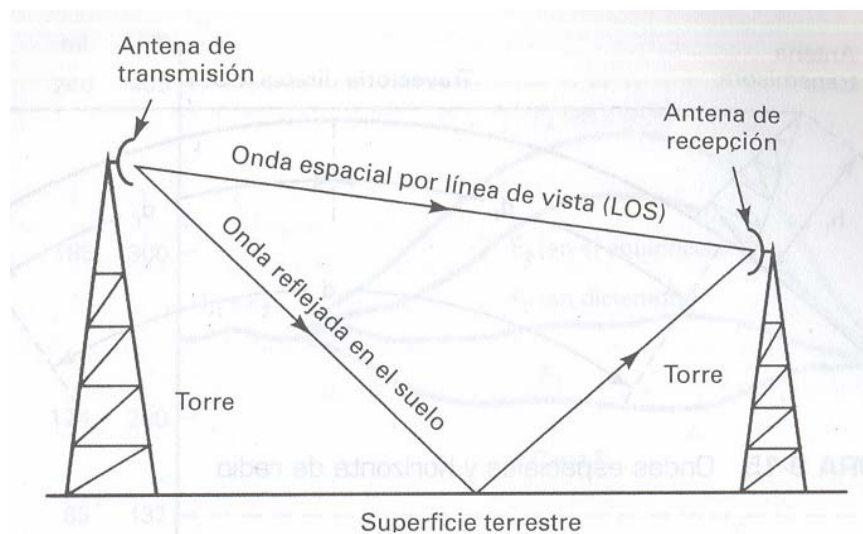


Figura 5.7 Propagación de ondas espaciales.

Las ondas directas viajan esencialmente en línea recta de la antena transmisora a la receptora. Esta transmisión se le llama transmisión de línea de vista. Esta transmisión se encuentra limitada principalmente por la curvatura de la tierra. La curvatura de la Tierra presenta un horizonte en la propagación de las ondas espaciales, que se suele llamar el horizonte de radio. Éste horizonte se encuentra más lejano que el horizonte óptico para la atmósfera estándar común.

Aproximadamente, el horizonte de radio se encuentra a cuatro tercios del horizonte óptico mostrado en la figura 1.8. [1]

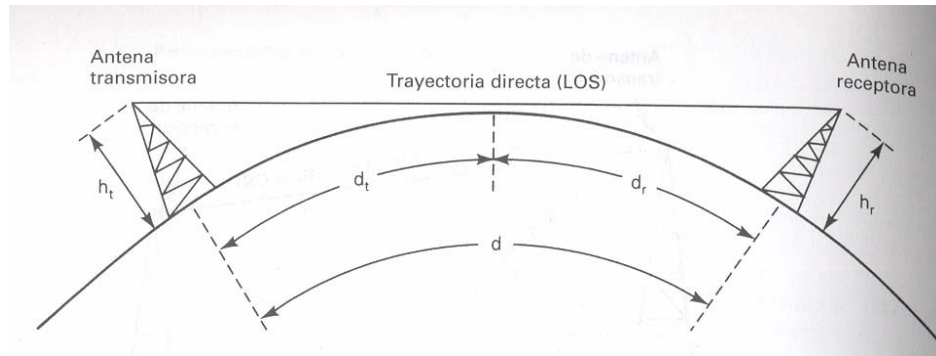


Figura 5.8 Ondas espaciales y horizonte de radio.

1.1.4.- Propiedades de las ondas de radio.

En la atmósfera terrestre, la propagación de frentes de onda y rayos puede diferir del comportamiento en el espacio libre debido a efectos ópticos. Estos efectos ópticos son principalmente clasificados en refracción, reflexión, difracción e interferencia llamándose ópticos debido a que fueron primeramente observados en la ciencia óptica que se encarga de estudiar a las ondas luminosas. [1]

Debido a que las ondas luminosas son ondas electromagnéticas de alta frecuencia también se pueden aplicar los mismos conceptos a las ondas de radio. Por esto se pueden sustituir las ecuaciones de Maxwell por el trazo geométrico de rayos haciendo los cálculos mucho más sencillos. [1]

1.1.4.1.- Refracción.

La refracción se refiere al 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 lo tanto, hay refracción siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro con distinta densidad como se muestra en la figura 1.9. [1]

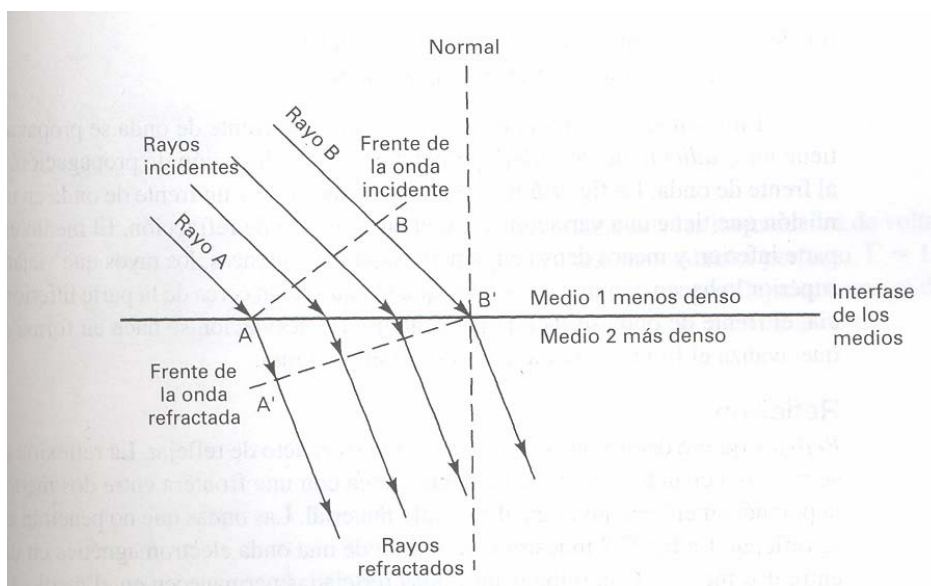


Figura 5.9 Refracción en una frontera plana entre dos medios.

En la figura 1.9 se muestra cómo el rayo A se propaga del medio 1 al medio 2 siendo el medio 1 menos denso que el 2. El rayo A proveniente del medio 1 con menos densidad experimenta un cambio de dirección al propagarse dentro del medio 2.

El ángulo de incidencia es llamado al ángulo que forma la onda incidente y la normal y el ángulo de refracción es el formado por la onda propagada en el medio y la normal, así, el índice de refracción no es mas que la relación entre la velocidad de propagación de la luz en el espacio vacío y la velocidad de propagación de la luz en determinado material.

1.1.4.2.- Reflexión.

La reflexión refiere al choque de la onda electromagnética con la frontera entre dos medios y parte o toda la potencia de la onda no se propaga en el medio si no que es reflejada en dirección opuesta al segundo medio como se muestra en la figura 1.10 en donde el frente de onda incidente choca con el medio 2 con un ángulo de incidencia θ_i . Este frente de onda es reflejado en su totalidad con un cambio de dirección llamado θ_r . [1]

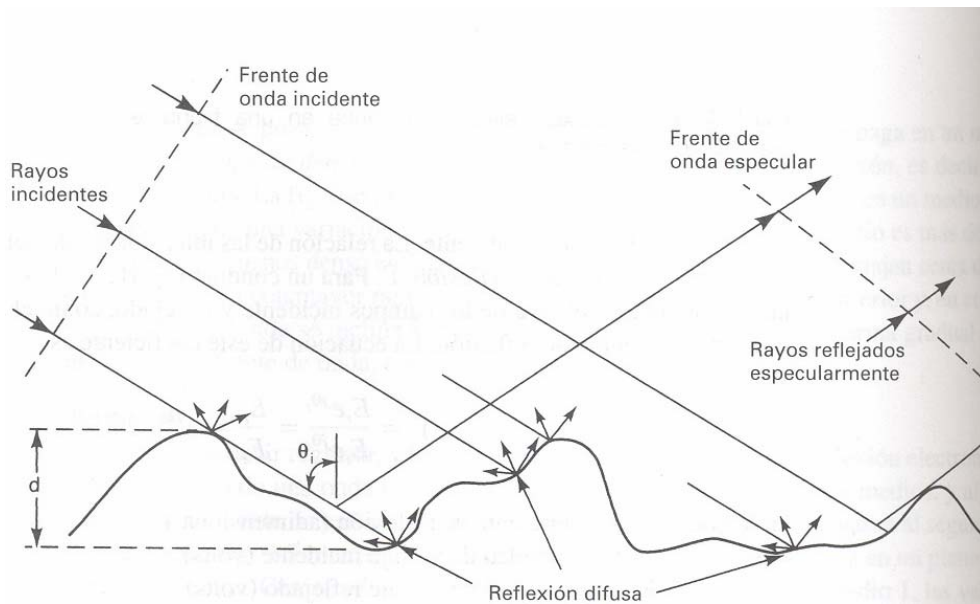


Figura 5.10 Reflexión.

1.1.4.3.- Difracción.

La difracción refiere a 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 las esquinas. Cuando un frente de onda pasa cerca de un obstáculo o discontinuidad cuyas dimensiones sean del tamaño comparable a una longitud de onda, no se puede usar el análisis geométrico como en los casos anteriores. En estos casos se debe de usar el principio de Huygens.

En los casos en el que el frente de onda es considerado plano y finito, es incompleta la anulación en direcciones aleatorias. En consecuencia, el frente de onda se reparte hacia fuera, o se dispersa a lo que en este caso se le llama difracción. Este fenómeno es comúnmente observado 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.[4]

1.1.4.4.- Interferencia.

La interferencia es producida siempre que se combinan dos o más ondas electromagnéticas de tal manera que se degrada el funcionamiento del sistema. La interferencia está sujeta al principio de 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.

En la figura 1.11 se muestra la suma lineal de dos vectores de voltaje instantáneo, cuyos ángulos de fase difieren en el ángulo θ . Se aprecia que el voltaje total no es tan solo la suma de las dos magnitudes vectoriales, sino mas bien la suma fasorial. En la propagación por el espacio libre, puede existir una diferencia de fases solo porque difieran las polarizaciones electromagnéticas de las dos ondas. Según los ángulos de fase de los dos vectores, puede suceder una suma o resta. Esto implica simplemente que el resultado puede ser mayor o menor que cualquiera de los dos vectores, así que las ondas electromagnéticas pueden ser anuladas o reforzadas. [1]

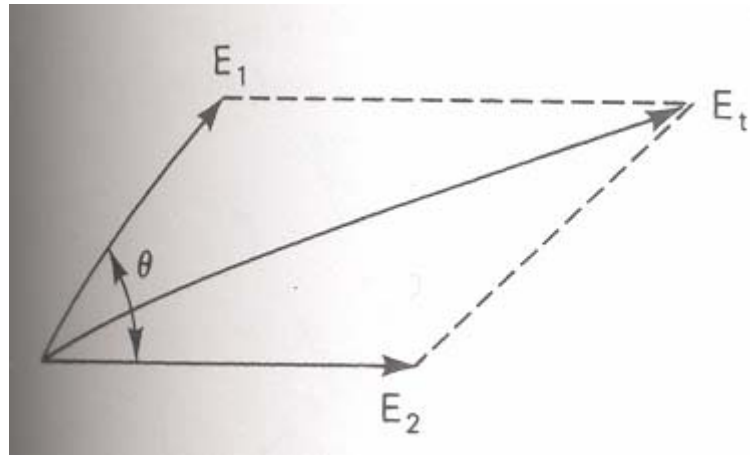


Figura 5.11 Suma lineal de dos vectores con distintos ángulos de fase.

