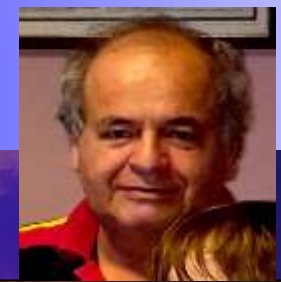


3

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE



Objetivo

● Utilizar los diferentes modos de propagación de ondas de radio en el diseño de sistemas de comunicación por radio y describir el proceso asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión y recepción.



Manual de clases

Última modificación:
21 de julio de 2021

Tema 3 de:
COMUNICACIÓN POR RADIO
Edison Coimbra G.

1.- MODOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

El modo de propagación depende de la frecuencia de la onda

- **Las propiedades de la Tierra** y las distintas capas de la atmósfera afectan el modo de propagación de las ondas de radio, según su **frecuencia**.
- **Las fórmulas para medir** los efectos son complejas por naturaleza; por lo que algunas reglas básicas resultan útiles para entender y planear la propagación de ondas de radio:
 - ▶ **A frecuencias más bajas**, el alcance es mayor, la onda es más penetrante y rodea más obstáculos.
 - ▶ **A frecuencias más altas**, se transmite una mayor cantidad de datos.
- **Según el orden de frecuencia**, de baja a alta, las ondas de radio pueden tomar 3 trayectorias básicas de propagación a través del espacio libre.
- **Las ondas** que estén más cerca de la superficie de la Tierra se verán más afectadas por las propiedades de la Tierra.

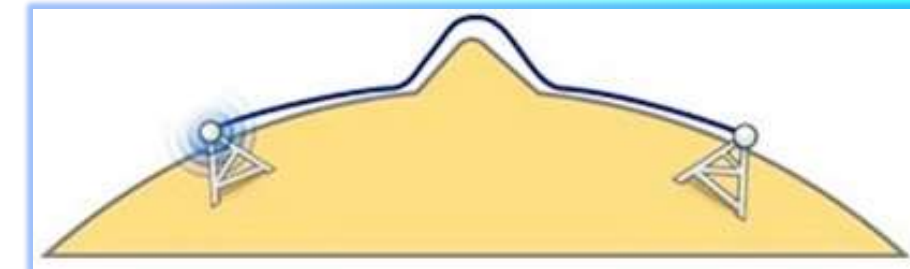
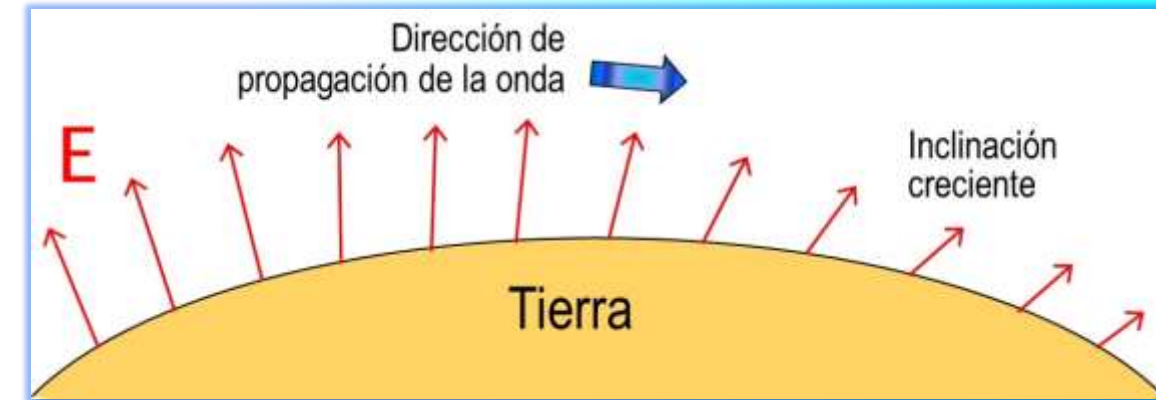
Modos de propagación de ondas		
Hasta 2 MHz	300 kHz a 30 MHz	30 MHz a 30 GHz
Por onda de superficie o terrestre. La onda sigue a la superficie de la Tierra.	Por onda ionosférica. La onda se refracta en las capas ionizadas de la atmósfera.	Por onda espacial o línea de vista. La onda se propaga en línea recta, directa, del transmisor al receptor.

Modos de propagación de ondas

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Propagación por onda de superficie (Blake, 2004)

- **Ondas de frecuencias de hasta 2 MHz.**
- **Descripción**
 - Es una **onda polarizada** de manera vertical (**campo E** vertical) que sigue a la superficie de la Tierra y, por tanto, sigue su curvatura para propagarse más allá del horizonte.
- **Aplicación**
 - **Da buenos resultados** en comunicaciones de larga distancia, tiene gran estabilidad, aunque le afecte mucho el tipo de terreno.
 - **Se utiliza** en la banda de **radiodifusión AM** estándar (530 a 1.700 kHz).
 - **Las ondas de superficie** requieren potencias altas y grandes antenas (por su λ) para lograr buena eficiencia.



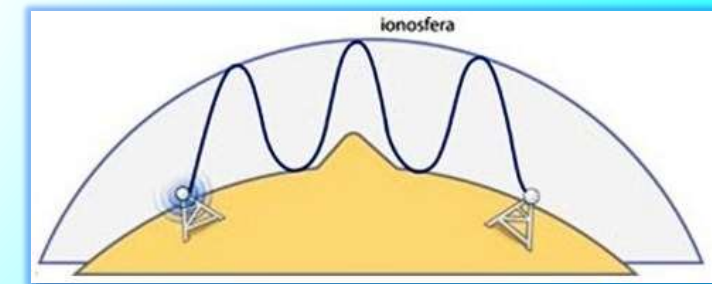
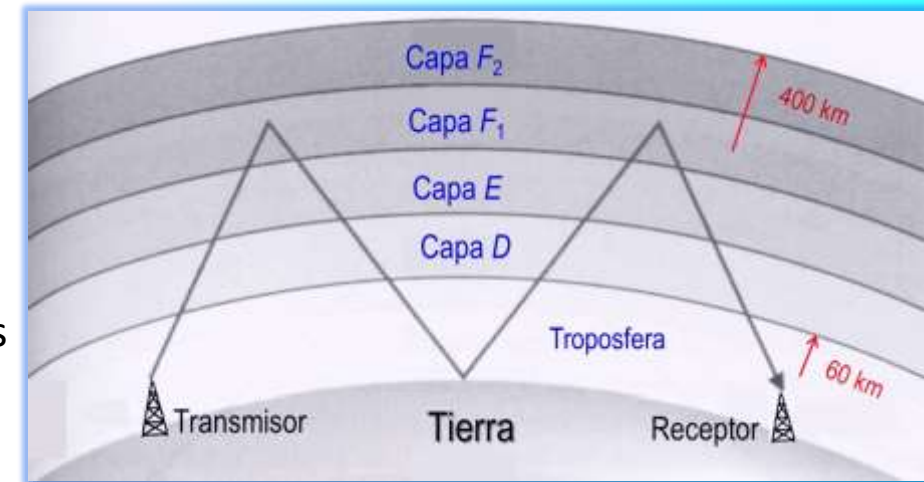
Modos de propagación de ondas

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Propagación por onda ionosférica

(Blake, 2004)

- **Ondas de frecuencias de entre 300 kHz y 30 MHz.**
- **Descripción**
 - **La onda se refracta** en las **capas ionizadas** de la atmosfera; allí las moléculas de aire se ionizan por la radiación solar. Estas capas están entre 60 y 400 km de altura.
 - **La propagación en el día** (mayor ionización) es posible para las frecuencias entre **10 MHz y 30 MHz**. Son refractadas a Tierra por las capas F_1 y F_2 .
 - **La propagación en la noche** (menor ionización) es posible para las frecuencias **menores que 10 MHz**. Son refractadas a Tierra por las capas F_1 y F_2 .
- **Aplicación**
 - **Se utiliza** en comunicaciones de barcos y aviones y radioaficionados; además de la radiodifusión de onda corta.
 - **Tiene gran alcance** pero con poca estabilidad. La onda puede reflejarse desde el suelo y realizar saltos. Es posible hasta **20 saltos**. La máxima distancia de un salto es 3.200 Km. Es posible rodear la Tierra..
 - **Las ondas ionosféricas** requieren niveles de potencia razonables.



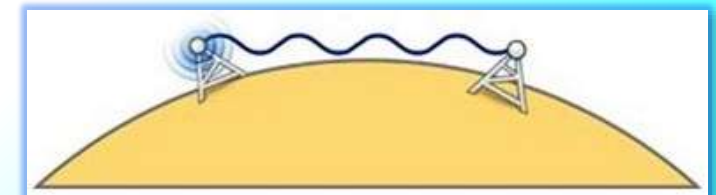
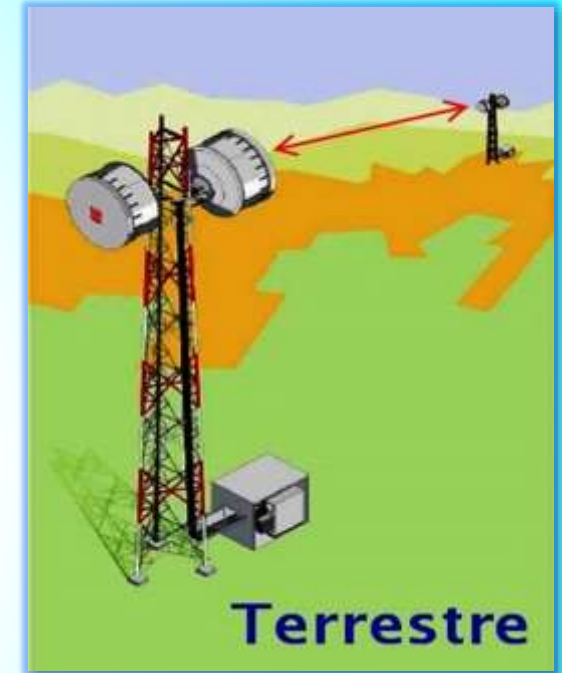
Modos de propagación de ondas

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Propagación por onda espacial terrestre

(Forouzan, 2007)

- Ondas de frecuencias de entre 30 MHz y 30 GHz.
- ► **Descripción**
 - **Utiliza radiación directa** entre dos antenas a través de la tropósfera. Se la conoce también como propagación por **línea de vista** y **troposférica**.
 - **Pueden haber reflexiones** desde la superficie de la Tierra, pero es más probable que cause problemas a que incremente la intensidad de la señal.
- ► **Aplicación**
 - **Se utiliza** Se utiliza en radioenlaces por microondas terrestre, telefonía móvil, difusión de televisión terrestre.
 - **Los radioenlaces** por microondas terrestre se explotan entre 2 a 80 GHz. Se llaman así porque ambos terminales, transmisor y receptor, están en Tierra.
 - **La onda espacial** terrestre requiere antenas instaladas a la mayor altura posible.



Modos de propagación de ondas

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Propagación por onda espacial satelital

(Forouzan, 2007)

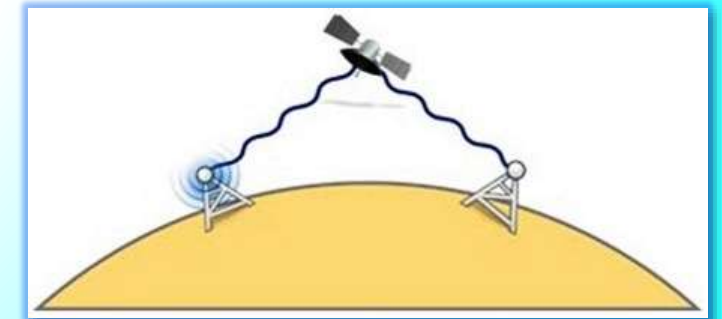
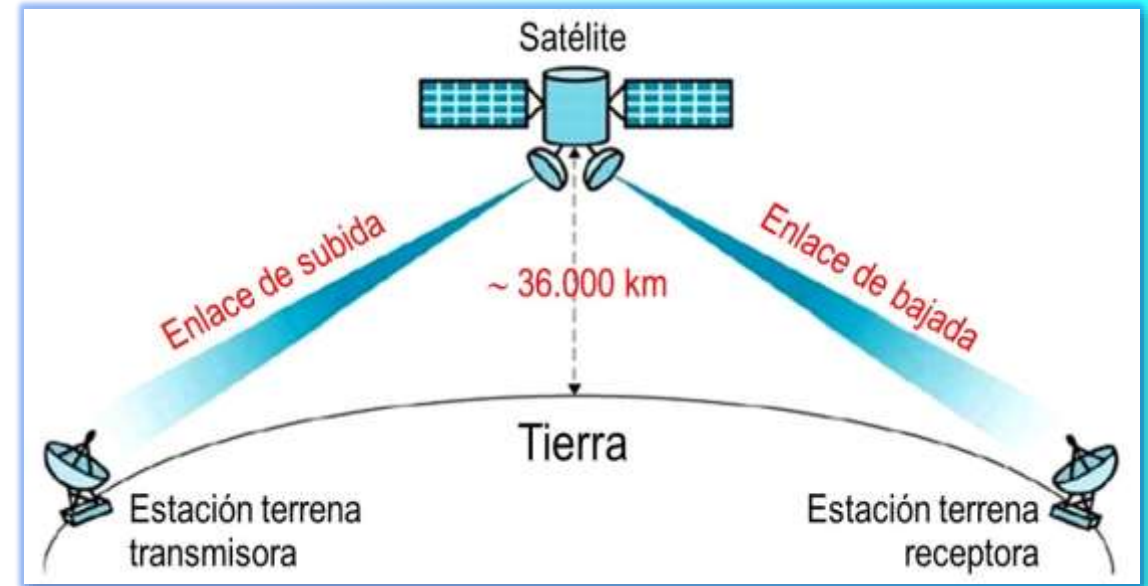
- Ondas de frecuencias de entre 30 MHz y 30 GHz.

► Descripción

- **Utiliza** radiación directa (línea de vista) entre la antena de la estación terrena y la del satélite. El satélite es un **repetidor** emplazado en el espacio.

► Aplicación

- **Se utiliza en radioenlaces** por microondas satelital, telefonía móvil satelital, difusión de televisión satelital.
- **Los radioenlaces** por microondas satelitales se explotan entre 2 a 50 GHz. Se llaman así porque uno de los terminales está en un satélite.
- **La mayoría de los satélites** de comunicaciones son geoestacionarios.



2.- LINEA DE VISTA DE LA ONDA ESPACIAL

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Alcance de la trayectoria

(Stallings, 2007)

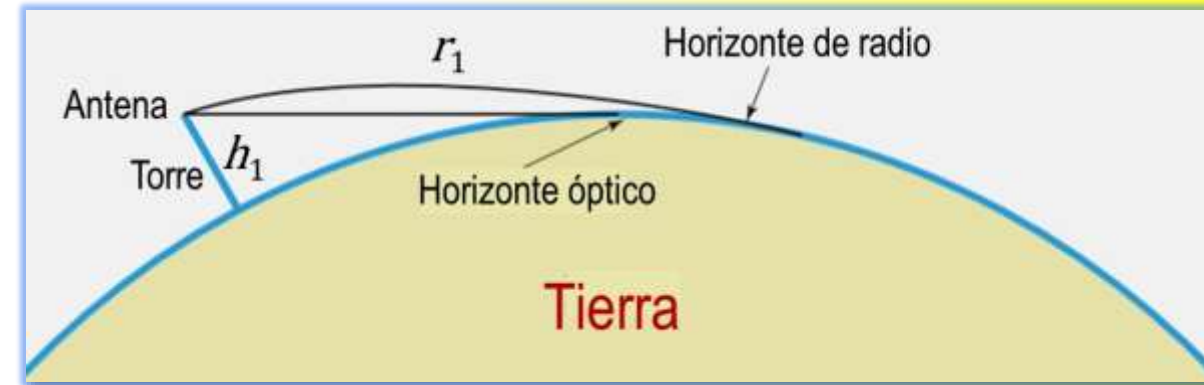
- **¿Cómo se calcula?**
- **La onda espacial** utiliza radiación directa entre dos antenas a través de la tropósfera. Debe disponer de la potencia necesaria para cruzar una distancia dada y tener condiciones de **visibilidad directa**.
- **La distancia de comunicación** está limitada por la **curvatura de la Tierra**. Se calcula con base a la geometría de la Tierra y la altura en que está la antena transmisora: el **horizonte óptico**.

$$r_1(\text{km}) = \sqrt{12,74 h_1(\text{m})}$$

- **En la práctica**, la distancia va más allá del horizonte óptico debido a que la refracción en la atmósfera, originada por diferencias de densidades, tiende a curvar la onda hacia Tierra. Este efecto posibilita que llegue una distancia 1/3 veces mayor, al **horizonte de radio**.

$$r_1(\text{km}) = \sqrt{12,74 K h_1(\text{m})} = \sqrt{17 h_1(\text{m})}$$

- **Estas ecuaciones** son válidas para un terreno razonablemente plano.



r_1 = distancia del transmisor al horizonte. En **km**.
 h_1 = altura en que está la antena transmisora. En **m**.
 $K \approx 4/3$, factor de corrección.

Línea de vista de la onda espacial

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Alcance de la trayectoria (cont.)

(Stallings, 2007)

- **¿Cómo se calcula la distancia máxima?**
- **En el cálculo** de la distancia máxima se incluye la altura en que está la antena receptora, por lo que se consideran las distancias al horizonte de radio de cada antena.

$$r_1(\text{km}) = \sqrt{17h_1(\text{m})}$$

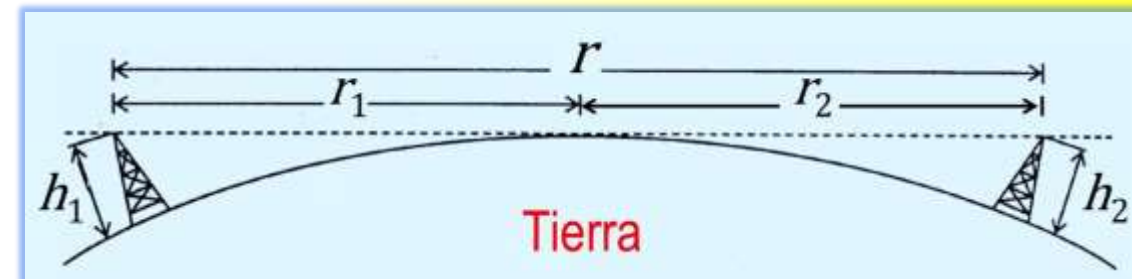
$$r_2(\text{km}) = \sqrt{17h_2(\text{m})}$$

- **Entonces**, se obtiene un valor aproximado para la **distancia máxima** entre antena transmisora y receptora, sobre un terreno razonablemente plano.

$$r(\text{km}) = \sqrt{17h_1(\text{m})} + \sqrt{17h_2(\text{m})}$$

r = distancia máxima entre antenas. En **km**.
 h_1 = altura en que está la antena transmisora. En **m**.
 h_2 = altura en que está la antena receptora. En **m**.

- **A veces** la distancia se amplía por difracción, si hay obstáculos afilados en el trayecto.



Línea de vista de la onda espacial

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Ejemplos de alcance de la trayectorias

(Blake, 2004) (Stallings, 2007)

- **Ejemplo 1. Alcance de trayectoria.** Una compañía de taxis, ha instalado, en su oficina central, una antena en la parte superior de una torre de 15 m de altura. Las antenas de los taxis están sobre sus techos, más o menos a 1,5 m del suelo. Calcule la distancia de comunicación máxima:

- a) Entre la central y un taxi.
- b) Entre dos taxis.

$$r(\text{km}) = \sqrt{17h_1(\text{m})} + \sqrt{17h_2(\text{m})}$$

- a) $r = 21 \text{ km}$
- b) $r = 10 \text{ km}$

- **Ejemplo 2. Estación de radio FM.** Una estación de radiodifusión FM tiene una antena transmisora puesta a 50 m sobre el nivel del terreno. Calcule qué tan lejos se puede recibir la señal:

- a) Por una radio de automóvil con una antena a 1,5 m del suelo.
- b) Por una antena de techo puesta a 12 m sobre el nivel del suelo.

- a) $r = 34,2 \text{ km}$
- b) $r = 43,4 \text{ km}$

- **Ejemplo 3. Estación de TV.** Calcule la altura a la cual debe estar la antena de una estación de TV terrestre para que su cobertura sea de 50 Km a la redonda.

$h_1 = 118,9 \text{ m}$. (las antenas de televisores están a 1,5 m del suelo).

- **Ejemplo 4. Enlace de microondas.** Un enlace de microondas tiene la antena transmisora a 100 m de altura y la receptora al nivel del suelo, es decir a 0 m. Calcule la altura a la que se puede bajar la antena transmisora si la receptora se eleva a 10 m sobre el nivel del suelo, para alcanzar la misma distancia.

$$h_1 = 47 \text{ m}$$

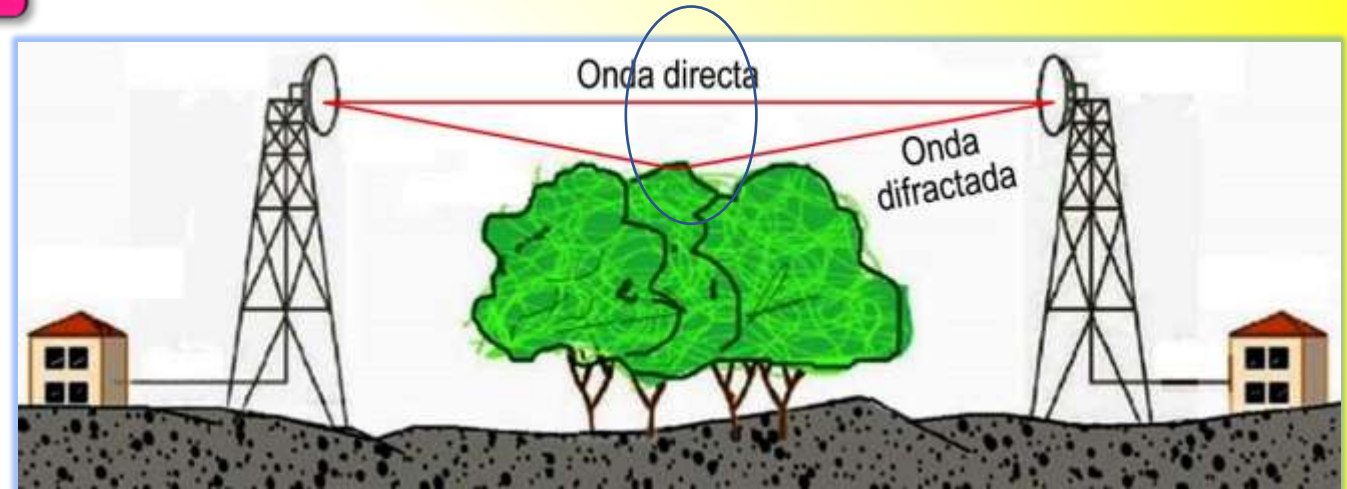
Línea de vista de la onda espacial

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Obstrucción parcial de la línea de vista

(APC, 2007)

- **¿Por qué no es suficiente tener una línea de vista?**
- **La antena es el foco** primario de un frente de onda que se expande.
- **Si el frente de onda** en expansión incide en una montaña, un árbol o un edificio, ocurre la **difracción**. Según Huygens, el punto incidente actúa como una segunda fuente de esa onda, generando una onda difractada.
- **Las ondas** directa y difractada se suman en el receptor, pero debido a la diferencia en la longitud de trayectoria de ambas, la interferencia puede ser:
 - **▶ Constructiva**, si ambas ondas están en fase.
 - **▶ Destructiva**, si están fuera de fase, es decir podrían cancelarse parcialmente entre sí, produciendo el desvanecimiento de la onda.
- **Para que la potencia** de la onda difractada disminuya y la interferencia sea menos pronunciada, se debe incrementar el espacio entre la trayectoria directa y el objeto que difracta la onda.
- **Un radioenlace** necesita, por tanto, una línea de vista y un “poco de espacio alrededor” ¿Cuánto?



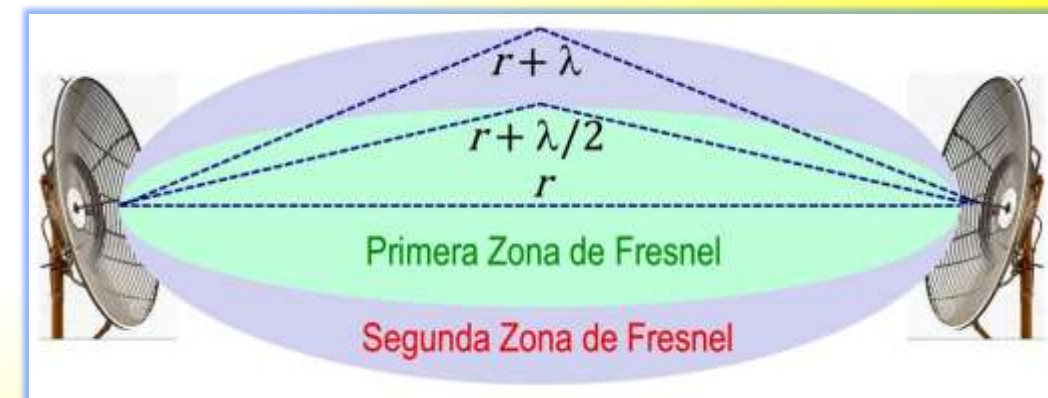
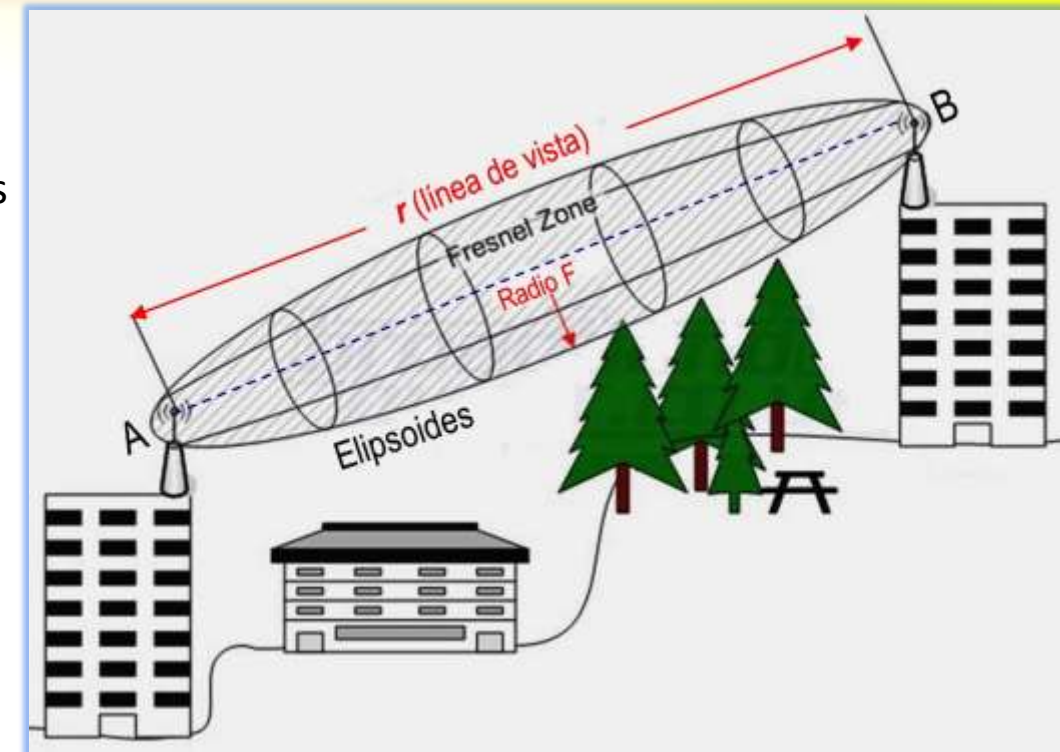
Línea de vista de la onda espacial

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

¿Qué son las Zonas de Fresnel?

(APC, 2007)

- **Las zonas de Fresnel** se pueden imaginar como una familia de elipsoides en 3D con focos en las antenas. Todas tienen la misma distancia r entre antenas, pero cada una dispone de un **radio F** al centro (a la línea de vista) cada vez mayor.
- **La idea**, que fue bautizada en honor a Fresnel, consiste en determinar qué zona del espacio entre emisor y receptor debe estar libre para evitar en la medida de lo posible la interferencia destructiva de la onda difractada.
- **Una onda** que se refleja en la superficie de un elipsoide, recorre una distancia mayor en **múltiplos de $\lambda/2$** y se desfasa en **múltiplos de 180°** . El valor del múltiplo determina la primera, segunda, etc., zona de Fresnel.
- **Existen** muchas zonas de Fresnel, pero la que interesa es la **primera**, porque contiene el 50% de la potencia de la onda.
- **Si la primera zona de Fresnel** se encuentra libre de obstáculos, el nivel de recepción será equivalente al obtenido en el espacio libre.
- **Por tanto**, un radioenlace necesita una línea de vista y un “poco de espacio alrededor”, definido por la primera zona de Fresnel. ¿Cómo se calcula el radio F1?



Línea de vista de la onda espacial

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

(Blake, 2004)

Cálculo del radio de la primera zona de Fresnel

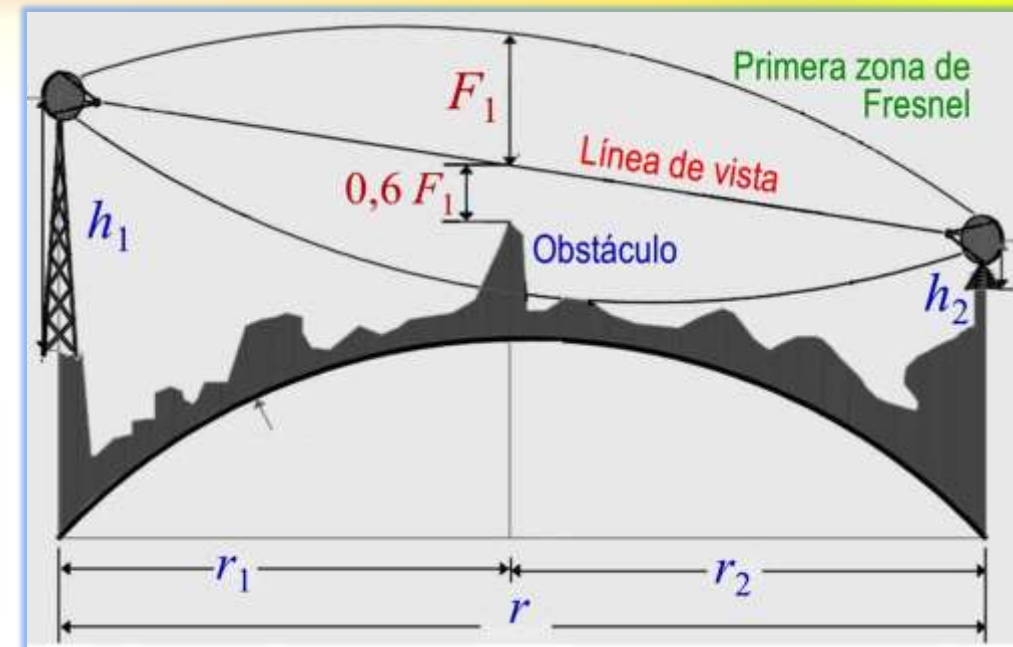
- El radio F_1 en cualquier punto del elipsoide de la primera zona de Fresnel se calcula en función de la ubicación del obstáculo y la frecuencia de operación.

$$F_1(\text{m}) = 17,32 \sqrt{\frac{r_1(\text{km})r_2(\text{km})}{r(\text{km})f(\text{GHz})}}$$

F_1 = radio de la primera zona de Fresnel. En m.
 r_1, r_2 = distancia de la antena al obstáculo. En km.
 r = distancia entre antenas. En km.
 f = frecuencia de operación del sistema. En GHz.

- En la práctica, para que el nivel de recepción sea equivalente al obtenido en el espacio libre, es suficiente tener libre al menos el 60% de la primera zona de Fresnel a lo largo de todo el trayecto.
- La teoría de Fresnel examina a la línea de vista punta a punta.
- Ejemplo 5. Interferencia por difracción.** Un radioenlace por línea de vista que opera a una frecuencia de 6 GHz tiene una separación de 40 km entre antenas. Un obstáculo en la trayectoria se sitúa a 10 km de la antena transmisora. Calcule el claro que debe existir entre la trayectoria directa y el obstáculo.

$$0.6F_1 = 11,62 \text{ m.}$$



Zonas de Fresnel



Línea de vista de la onda espacial

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Ejemplos con la primera zona de Fresnel

(Twibrights Labs)

$$F_1(\text{m}) = 17,32 \sqrt{\frac{r_1(\text{km})r_2(\text{km})}{r(\text{km})f(\text{GHz})}}$$

- **Ejemplo 6. Obstrucción por un camión.** Caso de enlace WLAN de 2,4 GHz. Calcule la altura máxima que puede tener el camión para que no afecte al enlace. El camión se encuentra a la mitad de la trayectoria.

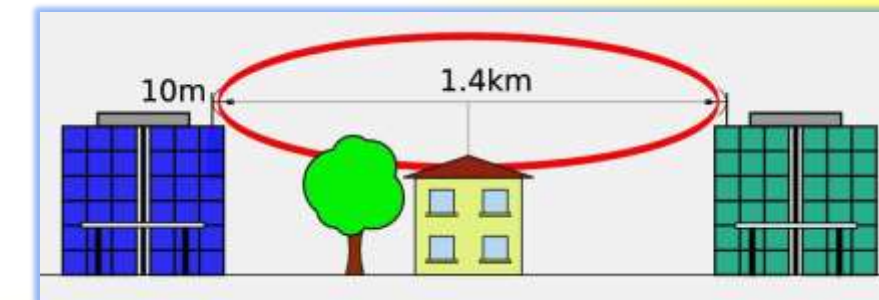
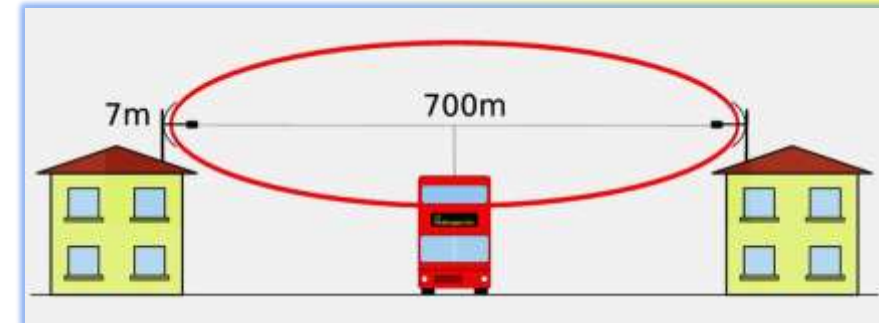
$$h = 4,2 \text{ m.}$$

- **Ejemplo 7. Obstrucción por el suelo.** Caso de enlace WLAN de 2,4 GHz. Determine si el funcionamiento del enlace es el adecuado.

No, porque las antenas deben estar a 5.8 m.

- **Ejemplo 8. Obstrucción por un árbol.** Caso de enlace WLAN de 2,4 GHz. Calcule la altura máxima que puede tener el árbol para que no afecte al enlace. El árbol se encuentran a 400 m de la antena más cercana.

$$h = 6,41 \text{ m.}$$



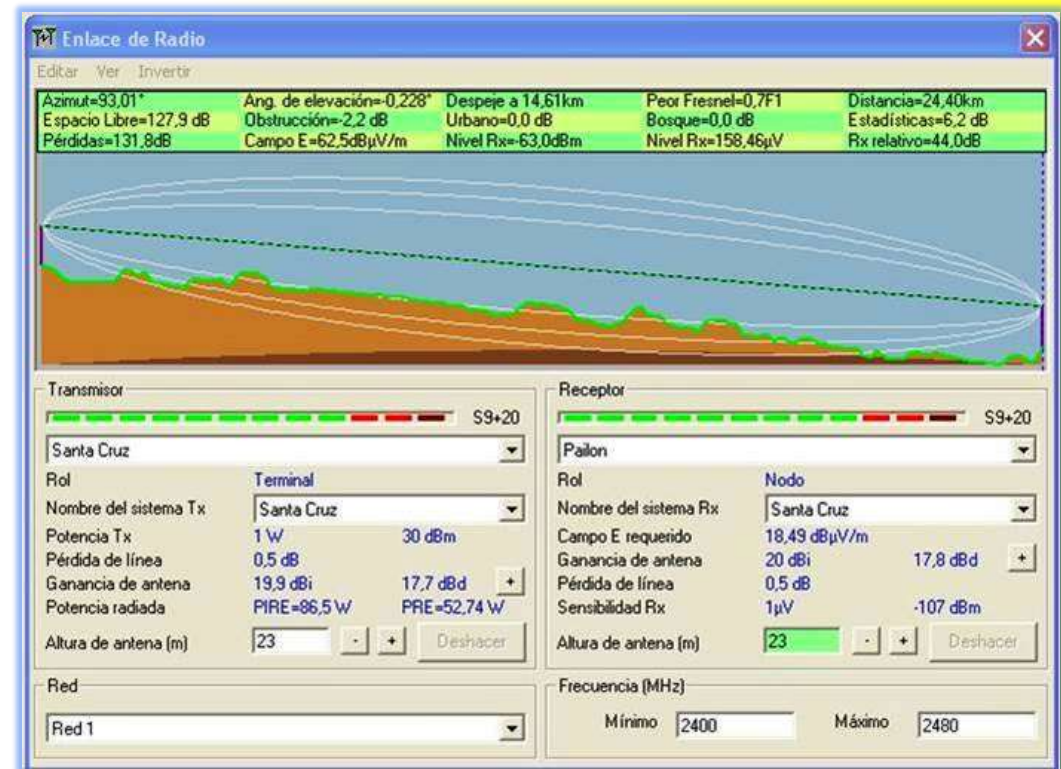
Línea de vista de la onda espacial

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Simulación con software RadioMobile

- La **trayectoria del enlace** se puede simular con el software **RadioMobile** que usa mapas digitales con la elevación del terreno proporcionados por la NASA.
- RadioMobile** construye automáticamente un perfil entre ambas antenas, mostrando el área de cobertura y la primera zona de Fresnel, la cual debe tener un claro de, al menos, **$0.6F_1$** entre la línea de vista y el obstáculo, a lo largo de todo el trayecto, para que el nivel de recepción sea equivalente al obtenido en el espacio libre.
- Ejemplo 9. El peor Fresnel.** Realice la simulación de un enlace WLAN de 2,4 GHz entre las ciudades de Santa Cruz y Pailón, y determine el “**Peor Fresnel**” en caso que las antenas estén puestas en torres de 23 m de altura.

$0.7F_1$. Ver figura



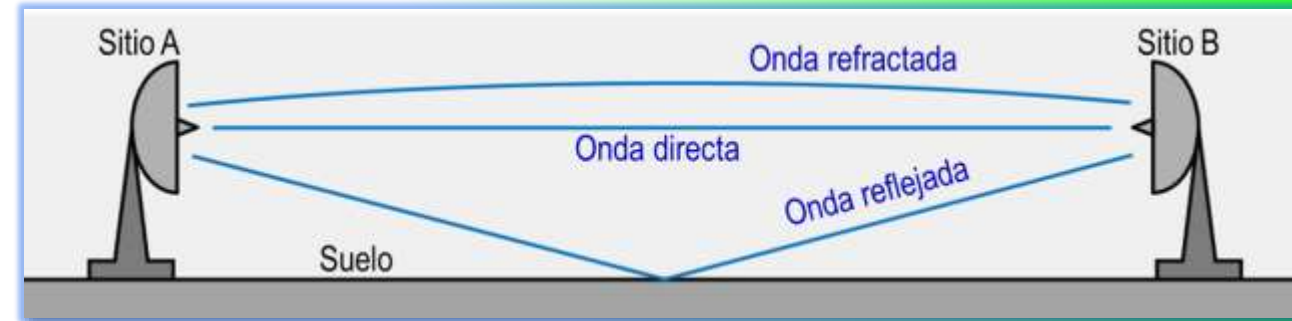
3. MULTITRAYECTORIA

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

¿Por qué se produce la multitrayectoria?

- **Un radioenlace** se planifica con una línea de vista libre de obstáculos; sin embargo, debido a la refracción y a la reflexión, se reciben también múltiples copias de la onda con diferentes retardos.
- **La refracción**, causada por la atmosfera, “dobla” a Tierra la trayectoria de la onda que se expande. Produce la **onda refractada**.
- **La reflexión** es causada por la superficie del suelo o el agua. Produce la **onda reflejada**.
- **La onda resultante** será mayor o menor que la directa, dependiendo de la diferencia en la longitud de los trayectos de la onda directa y de las refractadas y reflejadas, es decir habrá una amplificación o anulación parcial (**desvanecimiento**) de la onda.
- **Ejemplo 10. Distorsión por multitrayectoria.** Una onda de telefonía móvil a 1.9 GHz llega a una antena vía dos trayectorias que difieren en longitud por 19 m. Calcule:
 - a) La diferencia en el tiempo de llegada para las dos trayectorias.
 - b) La diferencia de fase entre las dos ondas. (Sugerencia: 360° es lo mismo que 0° con respecto a la fase, así que se pueden ignorar los múltiplos de 360°)

(Blake, 2004) (Stallings, 2007)



$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\begin{aligned} \text{a) } \Delta t &= 63,3 \text{ ns} \\ \text{b) } \Delta \theta &= 120^\circ \end{aligned}$$

¿Cómo se puede controlar el desvanecimiento de la onda?

(Blake, 2004)

- **Existen** dos métodos básicos para tratar con el desvanecimiento por multitrayectoria.
- **▶1.Sobre construir el sistema.** Se incrementa la potencia del transmisor, la ganancia de las antenas o la sensibilidad del receptor, para obtener un **margen de desvanecimiento** de, por lo menos, **20 dB**.
- **▶1.Técnicas de diversidad.**
 - **Diversidad de frecuencia.** Utiliza 2 frecuencias. La diferencia, en λ 's, entre las longitudes de las trayectorias es diferente para cada frecuencia. Requiere 2 transmisores y 2 receptores separados en frecuencia, por lo menos en un **5%**.
 - **Diversidad de espacio.** Utiliza 2 antenas montadas una sobre otra en la misma torre. La diferencia entre las longitudes de las trayectorias es diferente para cada antena. Requiere que las antenas estén separadas **200 λ** o más.
 - **No se pueden** aplicar estas técnicas cuando la superficie reflectora es el **agua**, debido a que el viento la mantiene en movimiento.



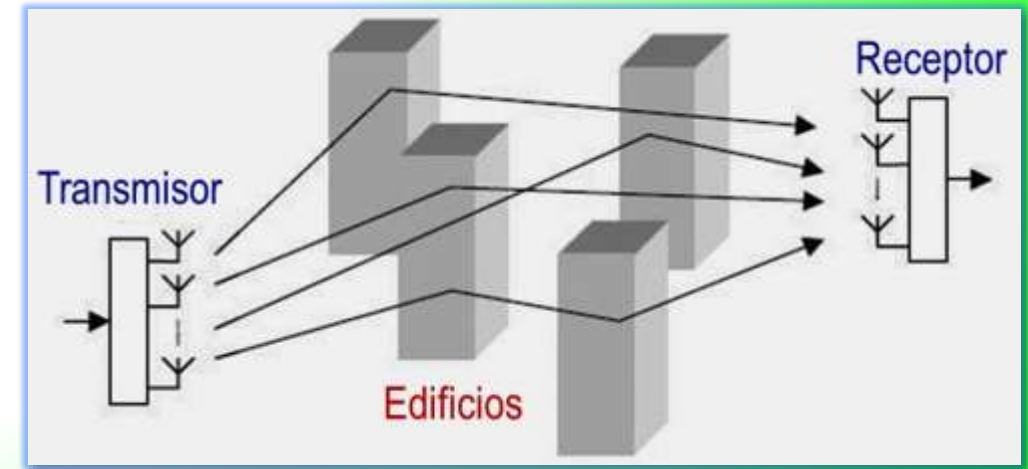
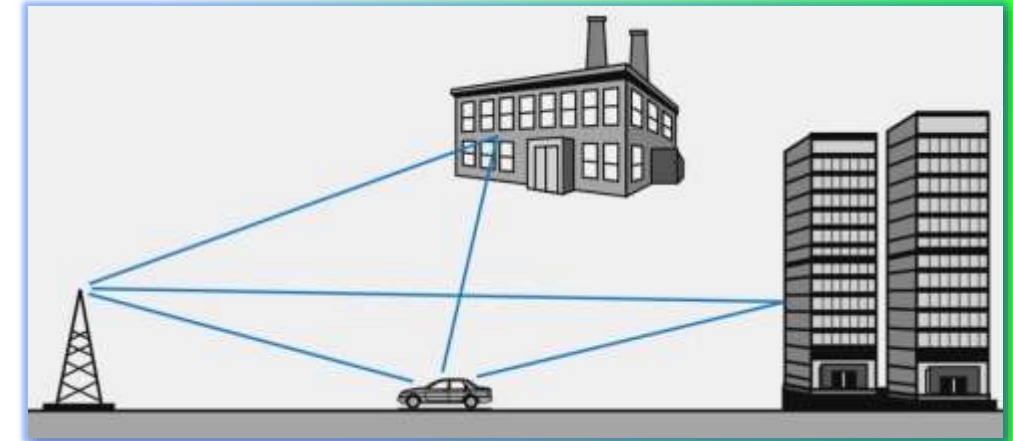
Multitrayectoria

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Multitrayectoria en comunicaciones móviles

- **En comunicaciones móviles**, la multitrayectoria es primordial. Las superficies reflectoras las proporcionan los rasgos estructurales y topográficos del ambiente. Los efectos se controlan con sistemas de antenas inteligentes.
- **▶ Antenas inteligentes.** Controlan la amplitud y fase de las ondas recibidas, hasta obtener una óptima recepción y superar, inclusive, los límites de la línea de vista cuando se dispone de suficiente potencia.
- **▶ MIMO. Múltiple Input Múltiple Output** es una tecnología de antenas inteligentes que utiliza varias antenas en el transmisor y en el receptor. Capitaliza los beneficios de la multitrayectoria y de la diversidad de espacio para conseguir un mayor alcance del que se consigue con sistemas tradicionales.
 - **MIMO** se utiliza hoy en redes WiFi (4, 5 y 6) y en tecnologías 4G y 5G: WiMAX Advanced y LTE Advanced. Un enlace sin línea de vista es posible.

(Blake, 2004) (Stallings, 2007)



Referencias bibliográficas

PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE

Referencias bibliográficas

- APC, Asociación para el progreso de las comunicaciones (2007). *Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo*. Mountain View, CA. USA: Limehouse Book Sprint Team.
- Blake, Roy (2004). *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. México: Thomson.
- Frenzel (2003). *Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*. Madrid: Alfaomega.
- Forouzan, B. A. (2007). *Transmisión de datos y redes de comunicaciones*. Madrid: McGraw-Hill.
- Kraus, J., & Fleisch, D. (2000). *Electromagnetismo con Aplicaciones*. México: McGraw-Hill.
- RadioMobile. *RadioMobile*. Recuperado el 16 de marzo de 2015, de <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>.
- Stallings, William (2007). *Data and Computer Communication*. New Jersey: Pearson.

FIN

Tema 3 de:
COMUNICACIÓN POR RADIO
Edison Coimbra G.