



Guglielmo Marconi
(1874-1937)

Antenas y Propagación

Tema 3

Propagación de ondas electromagnéticas en medio natural



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Índice:

1. Introducción. Ecuación de transmisión de Friis y ecuación del radar. Influencia del medio en la propagación de OEM
2. Efecto de la tierra sobre la propagación de OEM
 - a) Reflexión en tierra plana
 - b) Difracción
 - c) Ondas de superficie
3. Efecto de la troposfera sobre la propagación de OEM
 - a) Atenuación
 - b) Refracción
 - c) Difusión troposférica
4. Efecto de la ionosfera sobre la propagación de OEM
 - a) Propagación en un medio ionizado
 - b) Influencia del campo magnético terrestre
 - c) Comunicaciones ionosféricas
5. Modelización de la propagación en entornos complejos. Modelos empíricos para el valor medio de las pérdidas de propagación. El modelo Okumura-Hata



Edward Victor Appleton
(1892-1965)



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

1.- Introducción. Ecuación de transmisión de Friis y ecuación del radar. Influencia del medio en la propagación de ondas electromagnéticas.

En la actualidad son muchos los sistemas de radiocomunicaciones que usan ondas electromagnéticas radiadas como soporte de la transmisión de información entre dos antenas: emisora y receptora. Estos sistemas de radiocomunicación pueden ser radiodifusión, radio localización (radar), teledetección, radio ayuda a la navegación, etc. Para el correcto diseño y planificación de un sistema de comunicaciones mediante propagación de ondas electromagnéticas es necesario conocer todos los factores que puedan alterar la propagación, su magnitud y su influencia en las distintas bandas de frecuencias así como las características de transmisión y recepción de las antenas que componen el radioenlace y la relación señal-ruido en la antena receptora.

Respecto a este último factor si se quiere obtener una alta relación señal-ruido es necesario poner en juego una cierta cantidad de energía en la antena transmisora y por tanto, necesario establecer un balance de potencias entre el transmisor y el receptor que permita alcanzar un nivel mínimo en el receptor que esté por encima del ruido. Definimos potencia recibida en un enlace de radiocomunicación como la potencia disponible en bornes de la antena receptora.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Por una parte, esta potencia máxima entregada por la antenna al receptor viene dada por

$$P_{rec}|_{m\acute{a}x} = \frac{V_{CA}^2}{4R_a}$$

y por otra, supuesto la antenna con un rendimiento e_f

$$P_{rec}|_{\max} = P_{\max} e_f = \mathcal{P}_{inc} A_{ef_{\max}} e_f = \left(\frac{|E_{inc}|^2}{120\pi} \right) \left(D \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) e_f = \frac{D \lambda^2 |E_{inc}|^2 e_f}{480\pi^2}$$

De donde se deduce que la tensión inducida en bornes de la antenna en abierto puede expresarse como

$$V_{CA} = \frac{|E_{inc}| \lambda}{\pi} \sqrt{\frac{D \cdot R_{rad} e_f}{120}}$$

Denominamos ecuación de transmisión de Friis como la relación entre la potencia entregada por una antenna a su receptor y la potencia entregada por un transmisor a su antenna. Esta ecuación representa las pérdidas que existen en un canal de comunicación (radio enlace) establecido entre dos equipos. Supongamos una situación ideal, esto es, una comunicación entre dos antenas isótropas (iguales), una funcionando



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

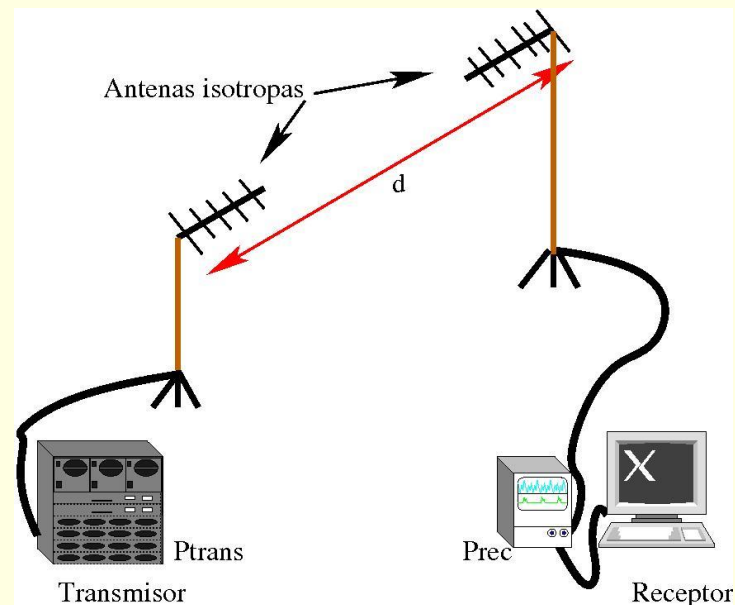
como antena transmisora y la otra como antena receptora, ambas separadas una distancia d . Las dos antenas están perfectamente adaptadas a sus circuitos y ambas están inmersas en un medio ideal (vacío) sin obstáculos. La pérdida por propagación, que se define como el cociente entre la potencia captada por la antena receptora y la potencia radiada por la transmisora viene dada por

$$l_o = \frac{P_{cap}}{P_{rad}} = \frac{\oint A_{ef}}{\oint 4\pi d^2} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

o bien $L_0 = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) [dB]$

Como puede verse, esta pérdida es independiente de las antenas y son debidas al decaimiento que se producen en la amplitud de los campos en su propagación (ley de la inversa del cuadrado con la distancia).

Supongamos ahora que se disponen de dos antenas no isótropas separadas una distancia d y cada una conectada a sus equipos de transmisión y recepción tal y como





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

se indica en la figura. Si la antena está desadaptada tanto con el transmisor como con el receptor, la potencia recibida por la antena desde el transmisor viene dada por

$$P_{AT} = P_{trans} (1 - |\Gamma_T|^2)$$

por lo que la potencia radiada por la antena (supuesta ésta no isotrópica) es

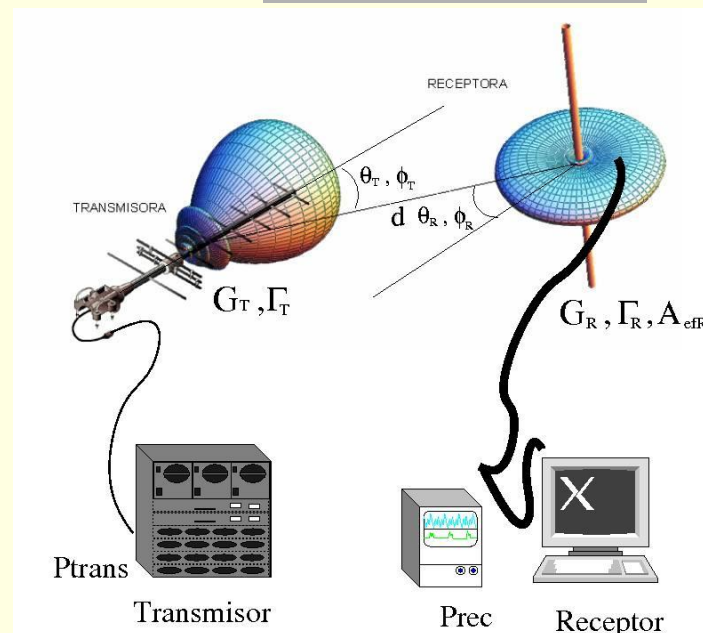
$$P_{rad} = P_{AT} G_T = P_{trans} (1 - |\Gamma_T|^2) G_T$$

y la densidad de potencia radiada por la antena transmisora será

$$\mathcal{P}_{rad} = \frac{P_{rad}}{4\pi d^2} = \frac{P_{trans} (1 - |\Gamma_T|^2) G_T}{4\pi d^2}$$

De toda esta potencia, sólo una parte de ella es captada por la antena receptora en función del área efectiva, esto es,

$$P = \mathcal{P}_{rad} A_{ef} = \frac{P_{trans} (1 - |\Gamma_T|^2) G_T}{4\pi d^2} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) G_R = P_{trans} (1 - |\Gamma_T|^2) G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

La potencia recibida por el receptor será la recibida por la antena por el coeficiente de desadaptación con el receptor.

$$P_{rec} = P(1 - |\Gamma_R|^2) = P_{trans} (1 - |\Gamma_T|^2)(1 - |\Gamma_R|^2) G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

En la práctica, ambas antenas no tienen por qué tener la misma polarización, lo que conlleva a una pérdida por despolarización

$$fpp = |\hat{e}_T \cdot \hat{e}_R|^2$$

por lo que la ecuación de transmisión de Friis queda

$$l_B = \frac{P_{rec}}{P_{trans}} = (1 - |\Gamma_T|^2)(1 - |\Gamma_R|^2) G_T G_R |\hat{e}_T \cdot \hat{e}_R|^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

O bien, términos de unidades logarítmicas

$$\begin{aligned} L_B &= 10 \log \left(\frac{P_{rec}}{P_{trans}} \right) = \\ &= L_0 + 10 \log (1 - |\Gamma_T|^2) + 10 \log (1 - |\Gamma_R|^2) + 10 \log G_T + 10 \log G_R + 20 \log |\hat{e}_T \cdot \hat{e}_R| [dB] \end{aligned}$$



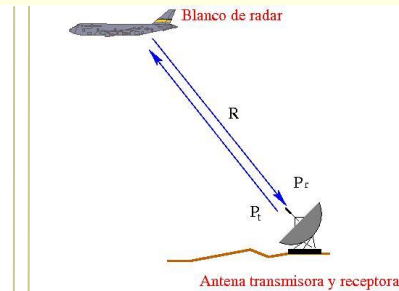
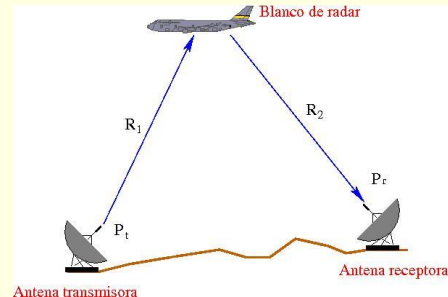
Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Un caso particular de la ecuación de transmisión de Friis es la ecuación del radar. Se denomina blanco radar a un objeto conductor capaz de rerradiar parte de la energía electromagnética que le llega. Denominamos sección recta radar (RCS) al

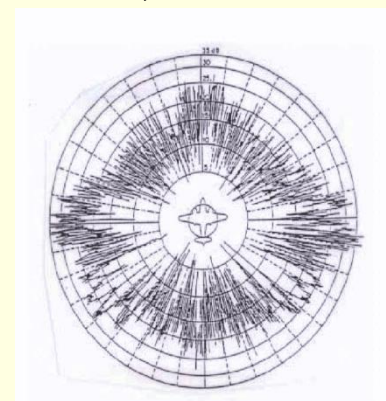
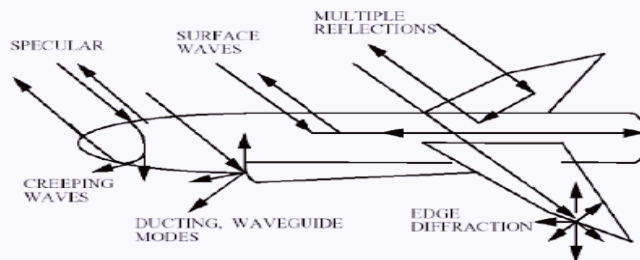
área que intercepta una cantidad de potencia tal que al radiarse de forma isótropa genera en el receptor una densidad media de potencia igual a la producida por el blanco.

$$\sigma = A_{\text{blanco}} D_{\text{blanco}}$$

La sección recta radar es una característica propia del blanco radar y depende de la frecuencia, ángulo y polarización de la onda, forma geométrica del blanco, material con el que está construido, etc.



Mecanismos de dispersión





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

En la siguiente tabla se dan valores medios típicos de la sección recta radar.

Mediante la actuación sobre la geometría y tipo materia con el que se construye los blancos, estos pueden hacerse invisibles al radar

Blanco	$\sigma \text{ (m}^2\text{)}$	Blanco	$\sigma \text{ (m}^2\text{)}$
Insecto	10^{-5}	Avioneta	2
Pájaro	0.01	Bombardero	10
Misil	0.1	Transporte	40
Hombre	1	Coche	100

F117 NightHawk

$$\sigma = 0.003 \text{m}^2$$



B2 Spirit

$$\sigma = 0.0015 \text{m}^2$$



Boeing «Bird of Prey»

$$\sigma = 0.0000001 \text{m}^2$$





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Como ya se ha visto, la densidad media de potencia radiada es $\wp_{rad} = (P_{rad} G_T) / (4\pi R_1^2)$ y de la definición de la RCS, se tiene, $P_{blanco} = \wp_{rad} \sigma$. Teniendo en cuenta la superficie efectiva de la antena receptora, es posible conocer la potencia detectada por la antena debida a la presencia del blanco radar.

$$P = \wp_{blanco} A_{ef} = P_{rad} G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi R_1 R_2} \right)^2 \frac{\sigma}{4\pi}$$

Teniendo en cuenta los factores de desadaptación, la ecuación del radar queda.

$$\frac{P_{rec}}{P_{trans}} = (1 - |\Gamma_T|^2) (1 - |\Gamma_R|^2) G_T G_R |\hat{e}_T \cdot \hat{e}_R|^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi R_1 R_2} \right)^2 \frac{\sigma}{4\pi}$$

Para el caso de un radar monoestático (misma antena emisora y receptora) y adaptación perfecta, la ecuación de radar queda

$$\frac{P_{rec}}{P_{trans}} = \frac{G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

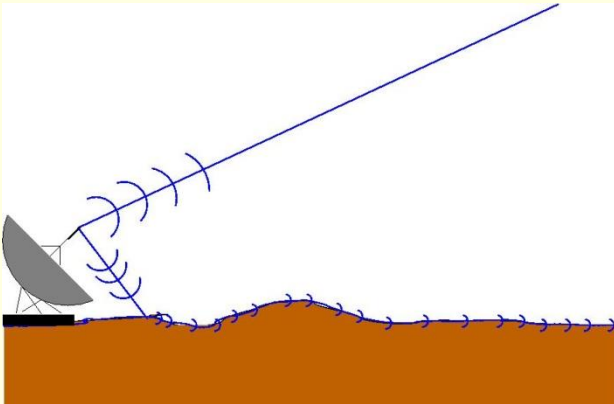
Según hemos visto en las transparencias anteriores, en la fórmula de Friis solo se ha tenido en cuenta las pérdidas por propagación, las diferentes pérdidas que se producen en las antenas transmisoras y receptoras y la potencia puesta en juego por el transmisor pero no hemos tenido en cuenta el efecto del propio medio, el conjunto de tierra y mar, troposfera e ionosfera así como los diferentes obstáculos que la onda puede encontrarse por su camino (montañas, edificios, agua, nieve, etc.). Todos estos efectos hacen que la fórmula de Friis no sea correcta en la mayoría de los casos reales. Dado que cada uno de estos efectos se potencian en bandas de frecuencia, serán estas las que van a definir los mecanismos de la propagación de ondas necesario para el análisis de un canal de comunicación (radioenlace). En particular se tiene que en la banda de:

➤ VLF (3kHz - 30kHz) tanto el suelo como la ionosfera se comportan como buenos conductores y dado que la distancia entre ambas es de aproximadamente unos 80 km (suele tener variaciones) comparable a la longitud de onda de la señal, la propagación de ondas se suele modelar mediante análisis de guías de ondas esféricas con pérdidas. Las aplicaciones más importantes están en el ámbito marino los cuales necesitan tener cobertura global.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

➤ LF (30kHz – 300kHz) y MF (300kHz – 3 MHz) se produce la propagación por onda de superficie sobre la interface formada por tierra/mar y el aire. Como se estudió en la asignatura de “Campos Electromagnéticos”, en la interface entre un dieléctrico y un conductor (aire-tierra) sólo se propaga la polarización vertical ya que la horizontal que atenuada rápidamente en el interior del conductor. Las aplicaciones más importantes de este tipo de propagación son las comunicaciones navales y los sistemas de radiodifusión.



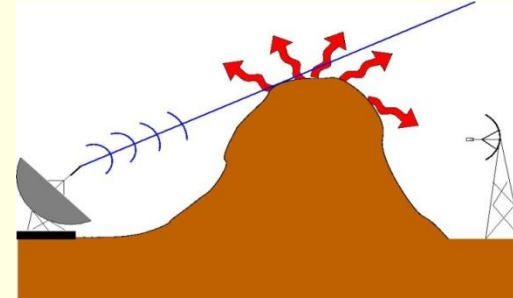
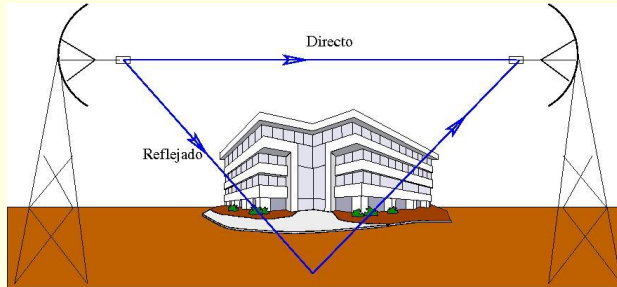
➤ MF (300kHz – 3 MHz) y HF (3 MHz – 30 MHz) la ionosfera sigue comportándose como un buen conductor por lo que seguirá reflejando las ondas electromagnéticas y haciéndolas volver a la tierra mediante la llamada reflexión ionosférica (en realidad es

una refracción en vez de reflexión). Las aplicaciones más importantes en esta banda son los radioaficionados, comunicaciones navales y telefonía (antes de existir los satélites)

➤ VHF (30 MHz -300 MHz) y superiores la ionosfera se hace transparente y por tanto los únicos medios de propagación son los de onda de espacio (con reflexiones y/o difracciones) y las atenuaciones, refracciones y dispersiones que produce la troposfera



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural



Las aplicaciones más importantes en esta banda de frecuencias están las comunicaciones vía satélite, radiodifusión (FM y TV), telefonía móvil, radioenlaces fijos, radar, etc

2.- Efecto de la tierra sobre la propagación de ondas electromagnéticas

Como hemos comentado anteriormente la tierra perturba la propagación de ondas electromagnéticas de tal forma que al establecer un sistema de radiocomunicación en el entorno terrestre aparecerán una serie de fenómenos que modificarán las condiciones ideales de propagación en el vacío. Como ya sabemos estos fenómenos son básicamente tres: las ondas de espacio (reflexión), la difracción y las ondas superficiales.

La importancia de cada uno de ellos dependerá de la banda de frecuencia usadas, del tipo de terreno y de la ubicación de las antenas.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

✓ Reflexión en tierra plana

Si consideramos la tierra como un objeto cuya superficie es plana y lisa, la incidencia de una onda electromagnética sobre el puede ser considerado como un problema de reflexión especular. La tierra es un medio dieléctrico con pérdidas y cuyas constantes dieléctricas varían en función del tipo de suelo, humedad y la frecuencia. Valores típicos de permitividades relativas y conductividades de diferentes tipos de tierras pueden verse en la tabla adjunta.

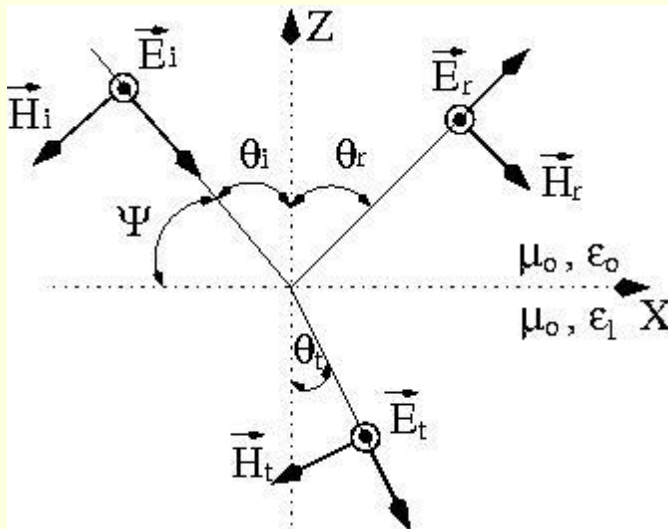
Tipo de terreno	1 MHz			1 GHz		
	ϵ'	$\sigma(\text{S/m})$	ϵ''	ϵ'	$\sigma(\text{S/m})$	ϵ''
Agua salada, 20° C	70	5	$90 \cdot 10^3$	70	5	90
Suelo húmedo	30	0.01	180	30	0.05	0.9
Agua dulce, 20° C	80	0.002	36	80	0.05	0.9
Suelo moderadamente seco	15	0.001	18	15	0.03	0.5
Suelo muy seco	3	0.0001	1.8	3	0.00005	0.0009
Agua pura, 20° C	80	<0.00001	<0.2	80	0.1	3.6
Hielo, -1° C	3	0.00003	0.5	3	0.0007	0.013



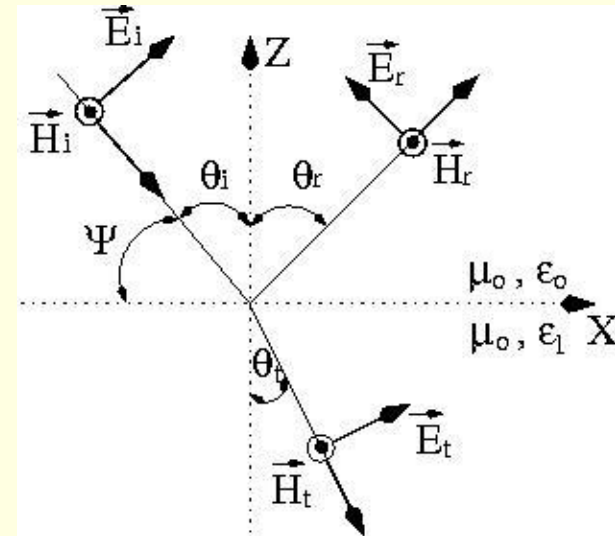
Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Al incidir una onda plana sobre un dieléctrico se genera una onda reflejada y una onda transmitida. Como sabemos podemos distinguir dos situaciones en función de la polarización de la onda incidente: polarización perpendicular y polarización paralela (véase figura). En esta situación se cumple la ley de Snell para la reflexión y refracción

$$\theta_i = \theta_r \quad \text{y} \quad n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$



Polarización perpendicular, horizontal o E



Polarización paralela, vertical o H



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Y los coeficientes de reflexión y de transmisión para cada polarización.

$$\Gamma_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_t - n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_t + n_1 \cos \theta_i}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{2n_2 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_t + n_1 \cos \theta_i}$$

Estas expresiones se suelen escribir en función del ángulo de elevación Ψ (véase figura anterior) y considerando que el índice de refracción del primer medio es 1 (espacio libre).

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\sin \Psi - \sqrt{n_2^2 - \cos^2 \Psi}}{\sin \Psi + \sqrt{n_2^2 - \cos^2 \Psi}}$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{n_2^2 \sin \Psi - \sqrt{n_2^2 - \cos^2 \Psi}}{n_2^2 \sin \Psi + \sqrt{n_2^2 - \cos^2 \Psi}}$$

donde n es el índice de refracción del terreno, es decir,

$$n_2 = \sqrt{\epsilon' - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}}$$

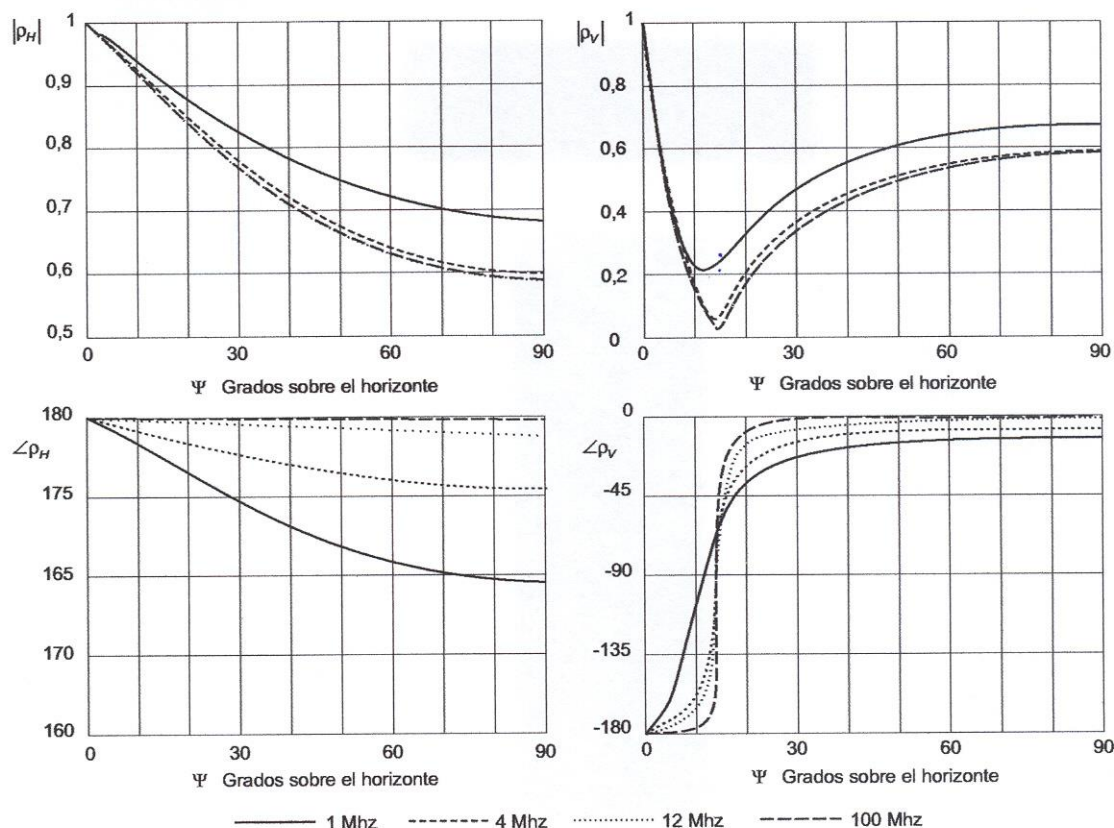


Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Como puede verse el coeficiente de reflexión son función del tipo de terreno, la polarización, de la frecuencia y del ángulo de incidencia. En la figura se representa el modulo y la fase del coeficiente de reflexión para un suelo moderadamente seco para distintas frecuencias

$$\varepsilon' = 15$$

$$\sigma = 10^{-3} \text{ S/m}$$

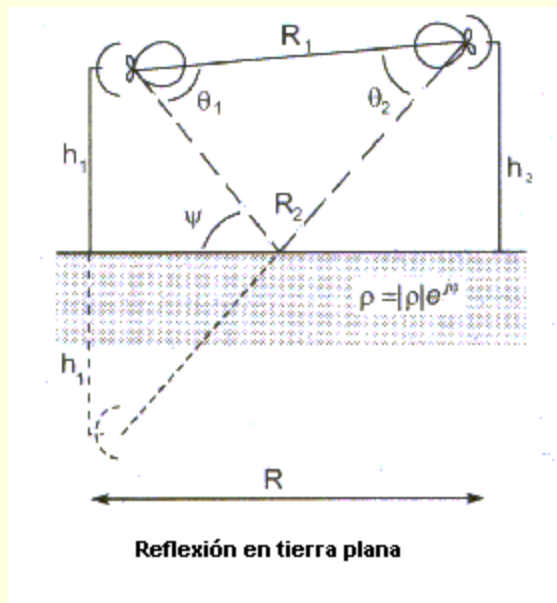




Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Como puede verse de las gráficas anteriores, un mismo terreno puede comportarse, eléctricamente diferente para diferentes frecuencias. En el terreno mostrado en las gráficas se considera conductor a frecuencias por debajo de 1 MHz

Una situación de reflexión en tierra plana es la presentada en la figura, esto es, un



sistema de dos antenas con directividades que se suponen orientadas en la dirección de máxima radiación y separadas una distancia R y a alturas h_1 y h_2 sobre el suelo el cual posee un coeficiente de reflexión

$$\Gamma = |\Gamma|e^{j\phi}$$

R_1 y R_2 son las distancias recorridas por la onda directa y la reflejada.

La superposición entre la onda directa y la onda reflejada

da lugar a la onda de espacio. Definimos la tensión en circuito abierto como la tensión inducida en una antena por una onda incidente

$$V_{ca} = -\frac{1}{I(0)_{antena}} \int I \vec{E} \cdot d\vec{l}$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

La tensión en circuito abierto inducida por la onda de espacio en la antena receptora puede obtenerse como superposición de la onda directa y la reflejada. La tensión en abierto producida por la onda directa es proporcional a

$$V_{ca}^d \propto \sqrt{D_1(0)D_2(0)} \frac{e^{-jkR_1}}{R_1}$$

mientras que la producida por la onda reflejada es

$$V_{ca}^r \propto \sqrt{D_1(\theta_1)D_2(\theta_2)} |\Gamma| e^{j\phi} \frac{e^{-jkR_2}}{R_2}$$

y la tensión inducida por la onda de espacio será

$$V_{ca} \propto \sqrt{D_1(0)D_2(0)} \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \left[1 + \sqrt{\frac{D_1(\theta_1)D_2(\theta_2)}{D_1(0)D_2(0)}} |\Gamma| e^{j\phi} e^{-jk(R_2-R_1)} \right]$$

En general la distancia R es mucho mayor que la altura de las dos antenas y esto implica que, excepto para antenas de una directividad muy elevada, los ángulos

$D_1(\theta_1)$ y $D_2(\theta_2)$ puedan aproximarse por $D_1(0)$ y $D_2(0)$ respectivamente.

Además podemos aproximar



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

$$R_1 \approx R + \frac{1}{2} \frac{(h_2 - h_1)^2}{R} \quad \text{y} \quad R_2 \approx R + \frac{1}{2} \frac{(h_2 + h_1)^2}{R}$$

En este caso el ángulo de elevación, Ψ , es aproximadamente cero, por lo que el coeficiente de reflexión es aproximadamente -1 para las dos polarizaciones. Con estas hipótesis simplificadoras podemos escribir

$$\left| \frac{V_{ca}}{V_{ca}^d} \right| = \left| 1 - e^{-jk \frac{2h_1 h_2}{R}} \right| \approx \text{sen} \frac{2kh_1 h_2}{R}$$

Para el caso que $kh_1 h_2 / R$ sea inferior a $\lambda/16$, es decir, si el desfase entre la onda directa y la reflejada sea pequeño, puede hacerse la siguiente aproximación

$$\left| \frac{V_{ca}}{V_{ca}^d} \right| \approx \frac{2kh_1 h_2}{R}$$

y dado que la potencia recibida es proporcional al cuadrado de la tensión en abierto podemos escribir la relación entre la potencia recibida por onda de espacio y la potencia por propagación en el espacio libre

$$\frac{P_R}{P_R^d} = \left(\frac{2kh_1 h_2}{R} \right)^2$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

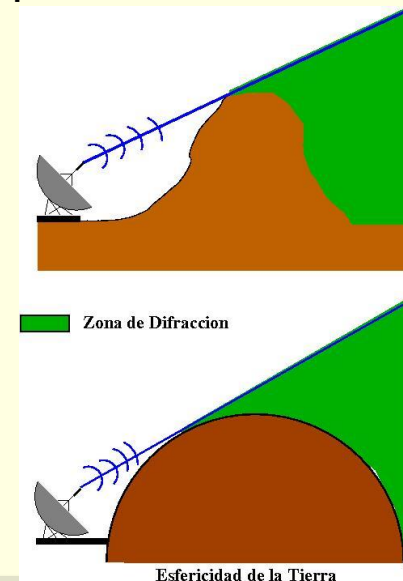
o lo que es lo mismo, la relación entre la potencia transmitida y la recibida, para reflexión en tierra plana con ángulo de incidencia rasante

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{1}{4\pi R^2} D_T A_{efR} \left(\frac{2kh_1h_2}{R} \right)^2 \propto \frac{1}{R^4}$$

y como puede verse la potencia recibida es inversamente proporcional a la distancia a la cuarta en vez de al cuadrado como ocurre en propagación en el espacio libre.

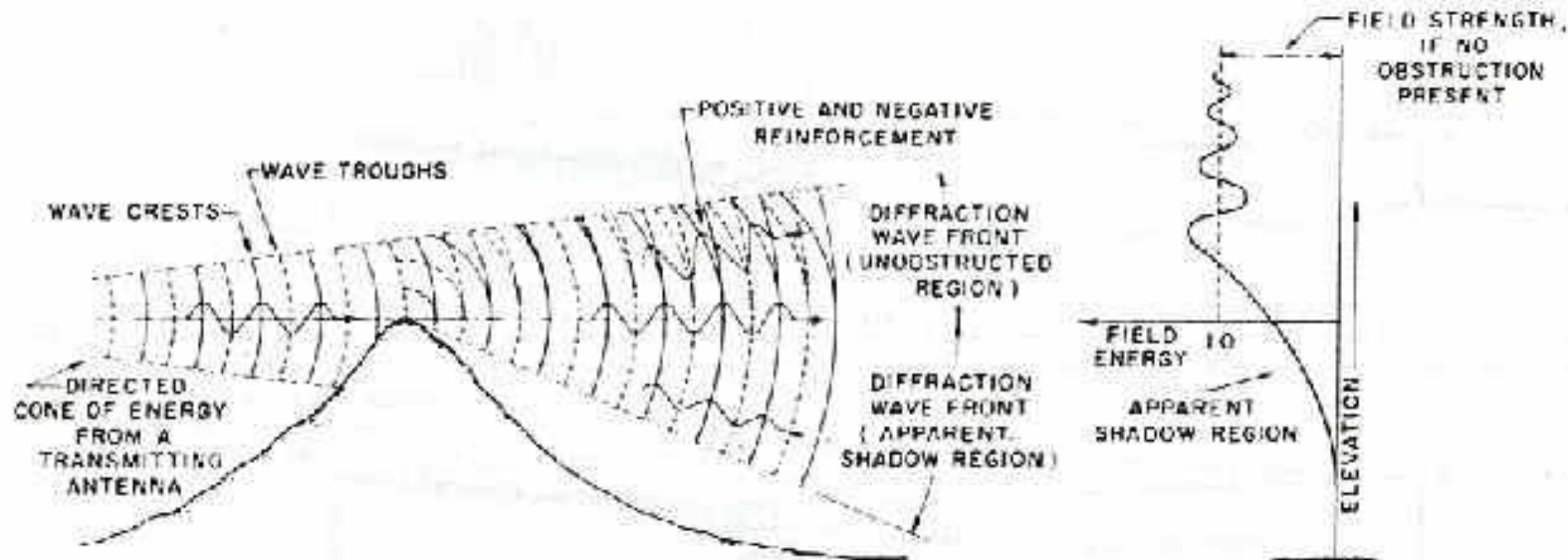
✓ Difracción

La difracción es el fenómeno que ocurre cuando una onda electromagnética incide sobre un obstáculo. La tierra y sus irregularidades puede impedir la visibilidad entre la antena transmisora y la antena receptora. La zona oculta a la antena transmisora se denomina zona de difracción. En esta zona los campos eléctricos no son nulos debido principalmente a la difracción y por consiguiente es posible establecer una comunicación entre antenas, si bien, esta con atenuaciones superiores al espacio libre.





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural



Definimos visibilidad entre antenas, es decir, cuando debe considerarse que un obstáculo interrumpe el camino directo entre la antena transmisora y receptora y por tanto la difracción es un fenómeno relevante en la propagación.

Consideremos la situación mostrada en la figura en la que dos antenas isotropas están separadas una distancia R . A una distancia d_1 de la antena transmisora, donde se halla



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

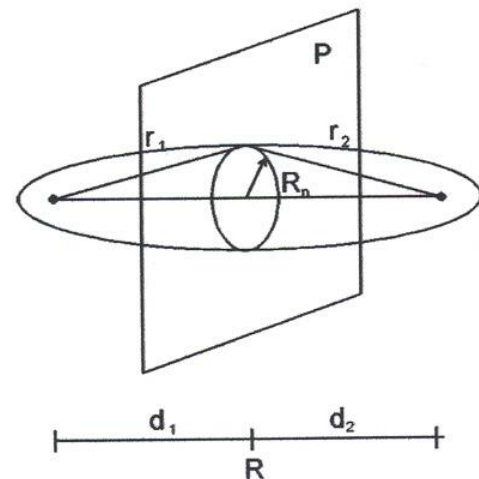
el obstáculo, se define un plano P infinito, perpendicular a la línea que une a la antena transmisora con la receptora. Se definen las zonas de Fresnel como aquellos puntos del espacio que cumplen

$$(r_1 + r_2) - R = n \frac{\lambda}{2}$$

con $n=1,2,\dots$

Las zonas de Fresnel son elipsoides de revolución cuyo eje mayor tiene una longitud de $R + n(\lambda/2)$. La intersección de las zonas de Fresnel con el plano P son circunferencias cuyo radio puede calcularse para el caso que sea mucho menor que d_1 y d_2 como

$$R_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

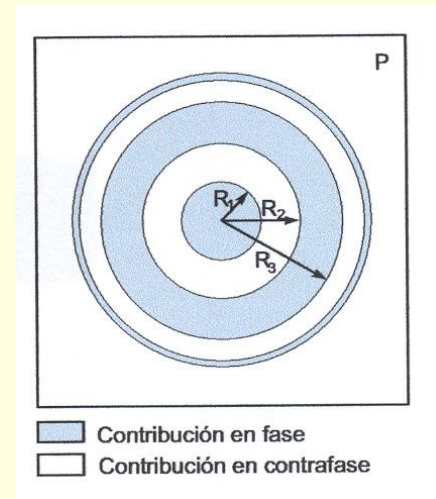


Aplicando el principio de Huygens, el campo sobre la antena receptora puede formarse como la superposición de fuentes elementales de ondas esféricas situadas en el plano P, radiando cada una de esta fuentes con un desfase función de la distancia r_1 . A estas fuentes equivalentes se les denomina fuentes secundarias.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

A partir de la definición de las zonas de Fresnel, los campos producidos por las fuentes equivalentes de Huygens situadas en la zona 1 de la figura, se sumarán en la antena receptora con una fase inferior a 180° , es decir, constructivamente. Las contribuciones de las fuentes situadas en las zonas 2 y 3 tienden a cancelarse mutuamente, lo mismo que las de las zonas 4 y 5, 6 y 7, y así sucesivamente. Por tanto, si en la situación del plano P se sitúa un plano conductor con un orificio de radio R_1 , esto es, dejando solamente las fuentes secundarias comprendidas dentro de la primera zona de Fresnel y anulando el resto, la potencia recibida por el receptor no disminuirá de forma apreciable. Por tanto el radio de la primera zona de Fresnel permite definir la condición de visibilidad entre antenas, de forma que mientras que no exista un obstáculo dentro de la primera zona de Fresnel se considera que la trayectoria no ha sido obstruida. Por el contrario cuando el obstáculo se encuentra dentro de la primera zona de Fresnel existirá una disminución apreciable en la potencia recibida, por lo que se considera que la trayectoria ha sido obstruida y deberá considerarse el efecto de la difracción.

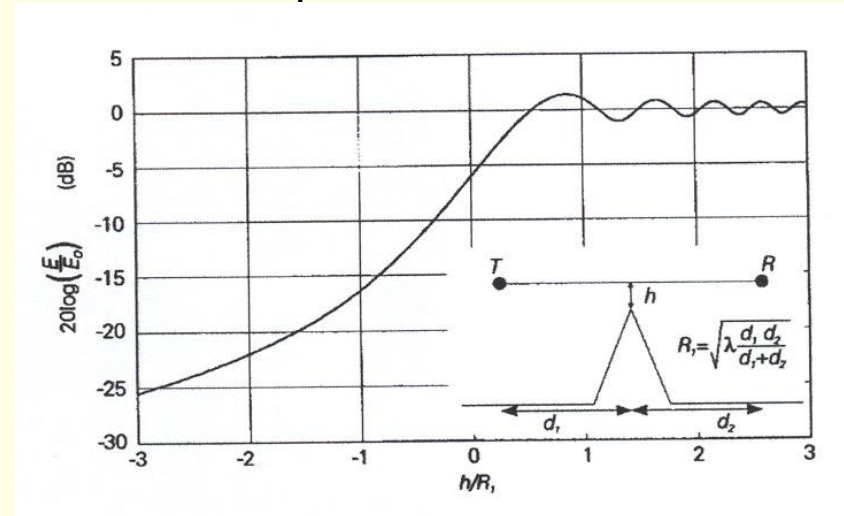




Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

La difracción por objetos arbitrarios es un problema electromagnético que admite en pocos casos soluciones analíticas cerradas. Sin embargo es posible hallar expresiones para objetos canónicos que modelan, aunque de forma aproximada, obstáculos reales. Una esfera conductora lisa y una arista o filo de navaja se emplean para caracterizar los efectos de la difracción de la tierra y las colinas o edificios respectivamente.

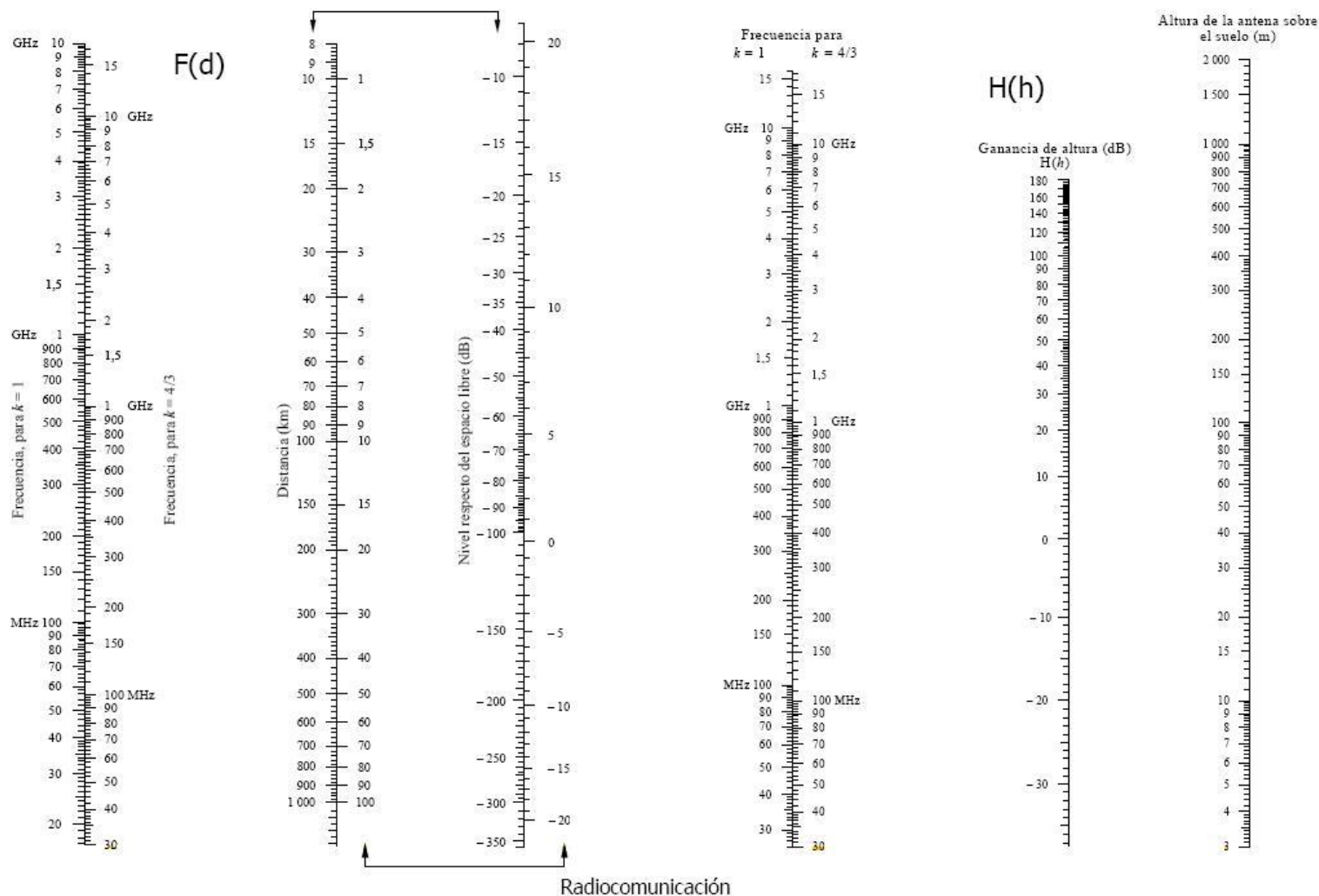
En la figura se representa la pérdida adicional respecto al espacio libre, en función de la distancia entre la trayectoria y el obstáculo normalizadas al radio de la primera zona de Fresnel, para un obstáculo del tipo filo de navaja. Nótese que hasta que el obstáculo no penetra un 60% en la primera zona de Fresnel, los efectos sobre la potencia recibida son pequeños. Con respecto a las pérdidas por



difracción debida a la tierra esférica se suelen dar en los nomogramas siguientes. Esta pérdida es función de la distancia entre antenas d , y la altura de las mismas sobre la tierra



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural





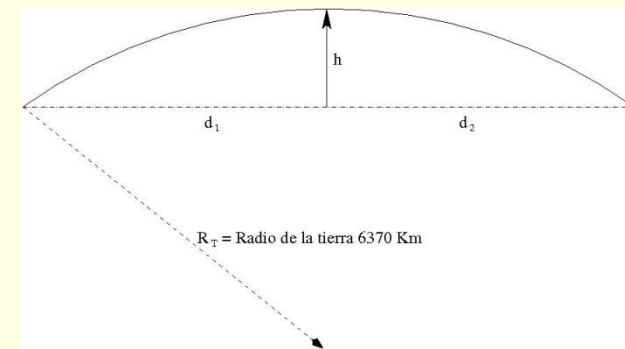
Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Los nomogramas dependen de la polarización de la señal y del tipo de terreno. Están dados por valores de $k=1$ para no tener en cuenta el efecto de la refracción atmosférica o el de $k=4/3$ para tener en cuenta dicho factor. Para otros valores de k (factor de curvatura del radio terrestre) se suele emplear la escala de $k=1$, pero sustituyendo la frecuencia de trabajo por un nuevo valor igual a f/k^2 para el cálculo de la pérdida por distancia y el valor de f/\sqrt{k} para el cálculo de la ganancia de altura.

Se tendrá en cuenta el efecto de la esfericidad de la Tierra siempre y cuando se cumpla que

$$h = \frac{d_1 d_2}{2kR_t} > 5$$

Para antenas muy próximas al suelo, la ganancia en altura es aproximadamente constante. Por este motivo, si la recta que une frecuencia y altura corta la línea AB del último nomograma, debe de reemplazarse la altura de la antenna por un valor mayor hasta que la recta que une la frecuencia y la altura quede rasante a la recta AB por el punto A





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Ejemplo: Calcular las pérdidas respecto a las de propagación en el espacio libre de un radioenlace compuesto por dos antenas situadas a 40 Km. y elevadas sobre el nivel de tierra 8 m. y 4 m. respectivamente. La frecuencia de trabajo es de 4 GHz

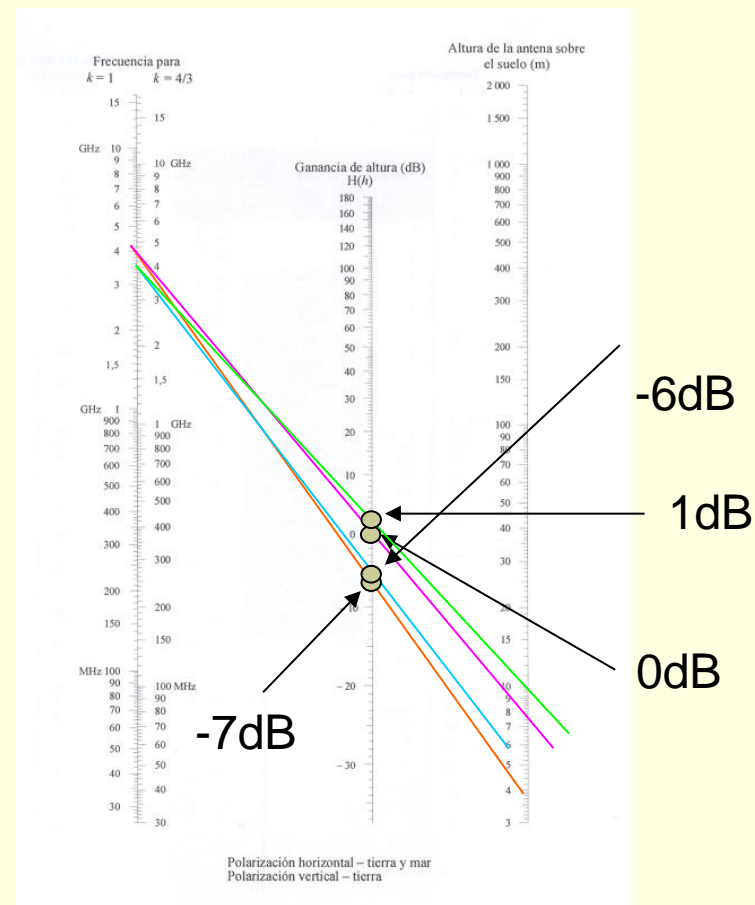
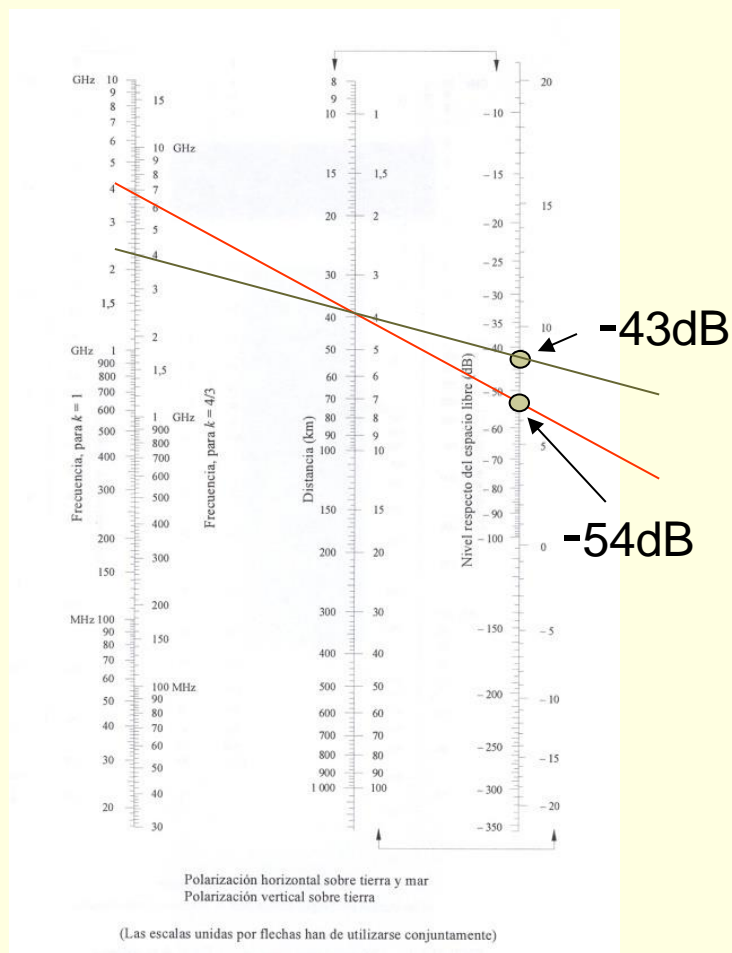
Las pérdidas asociadas a la difracción por tierra esférica pueden ser calculadas mediante la expresión

$$20\log\left(\frac{E}{E_0}\right) = F(d) + H(h_1) + H(h_2)$$

donde F y H son unas funciones que tienen en cuenta la distancia entre antenas y de las altura de las mismas. El valor de dichas funciones se obtienen de los respectivos nomogramas.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Dado que no nos dicen nada sobre las condiciones atmosféricas, las calcularemos para refracción atmosférica ($k=4/3$) y sin tener en cuenta dicha refracción ($k=1$)

Veamos el valor de $F(d)$. Tomando el nomograma de polarización horizontal sobre tierra y mar y uniendo mediante una línea recta el valor de la frecuencia para $k=1$ (4GHz) y el de $k=4/3$. Por lo tanto la atenuación por tierra esférica para este sistema de radio enlaces es

	$F(d)(dB)$	$H(h1)(dB)$	$H(h2)(dB)$	$20\log(E/E_0) (dB)$
Con refracción atmosférica $K=4/3$	-43	1	-6	-48
Sin refracción atmosférica $K=1$	-54	0	-7	-61



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

✓ Ondas de superficie

A diferencia de las ondas de espacio, cuando las alturas sobre el suelo de las antenas transmisoras y receptoras son pequeñas en términos de λ (o lo que es lo mismo si trabajamos en las bandas LF y MF, esto es en la banda de los 30 KHz. a 3 MHz.), la onda de espacio tiende a cancelarse y en este caso tiene mayor relevancia como mecanismo de propagación la onda de superficie. (sin considerar efectos ionosféricos).

La radiación de OEM's sobre una superficie esférica lisa posee solución analítica y el campo radiado puede ser expresado como suma de términos cuyas amplitudes son función de la frecuencia, tipo de terreno, altura de las antenas, la polarización de las misma y la distancia.

De la solución analítica se observa que, si las antenas se aproximan al suelo (antenas eléctricamente cortas como el caso de las dipolos de Hertz), la potencia recibida en ambas polarizaciones decrece hasta una cierta altura en la que la potencia en polarización paralela permanece constante, mientras que la polarización perpendicular continúa decreciendo. Cuando la altura de las antenas es una fracción de longitud de onda, la potencia recibida en polarización perpendicular es despreciable frente a la



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

potencia recibida por la polarización paralela. Este fenómeno es especialmente importante a frecuencias bajas ($\lambda > 100$ m.) en las que las antenas están necesariamente próximas a la superficie de la tierra.

En otras palabras, dado que la onda de espacio posee dos componentes, una que se propaga directamente y otra que se refleja en la tierra y supuesto que la distancia es grande, el ángulo de incidencia del rayo reflejado tiende a cero y por tanto el coeficiente de reflexión tiende hacia 1 y el desfase tiende a ± 180 por lo que la superposición de ambas ondas se cancelan entre sí. Como consecuencia de esto el campo recibido en estas circunstancias se debe solo a la onda de superficie y que corresponde a la ondas que salieron de la antena transmisora con ángulos de incidencia prácticamente rasantes.

Por consiguiente las ondas de superficie tan sólo son relevantes en polarización paralela; la amplitud de los campos es independiente de la altura de las antenas y presentan una variación en función de la distancia proporcional a $1/R^2$ más un término de decaimiento exponencial que es apreciable a distancias superiores a los 100km. La atenuación de la onda de superficie es función de la frecuencia y del tipo de terreno.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Podemos resumir las características de la propagación por onda de superficie a los siguientes puntos.

- ✓ Este es el modo de propagación dominante para frecuencias menores de 30 MHz.
- ✓ Las antenas no están eléctricamente elevadas.
- ✓ La tierra equivale a un plano conductor que modifica las características de radiación.
- ✓ Se emplean antenas monopolo (antena lineal sobre plano de tierra) para la transmisión.
- ✓ La propagación se realiza a ras de Tierra.
- ✓ Las ondas transmitidas son de largo alcance

Dado que la evaluación de estos campos es compleja se suelen usar curvas normalizadas por la UIT-R (Unión Internacional de Telecomunicación) y denominadas cartas de propagación por onda de superficie.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

En estas cartas se muestra las intensidades de los campos correspondiente a la onda de superficie sobre el mar y sobre tierra seca y válidas en el margen de los 10 kHz. a los 30 MHz. y expresan la intensidad de campo correspondiente a la componente vertical medida sobre la superficie de la tierra, en función de la distancia, cuando la potencia transmitida de 1 KW. y la antena es un monopolo corto. De la gráfica podemos ver tres regiones interesantes, la línea discontinua indica un decaimiento $1/R$ correspondiente a la propagación en el espacio libre, un decaimiento proporcional a $1/R^2$ y por último un decaimiento exponencial.

Dado que en la parte de la banda de frecuencias considerada, a partir de 2 ó 3 MHz., la propagación ionosférica adquiere importancia, se utilizarán estas cartas cuando la amplitud de las reflexiones ionosféricas se considere despreciables.

Las curvas no se utilizarán cuando la antena receptora se encuentre a una altura por encima de la superficie de la tierra mayor que la dada por la expresión

$$h \leq 12\sigma^{\frac{1}{2}}\lambda^{\frac{3}{2}} \text{ (m)}$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Lo que equivale a establecer una permitividad relativa para el suelo que cumpla la relación

$$\varepsilon_r \ll 60\lambda\sigma$$

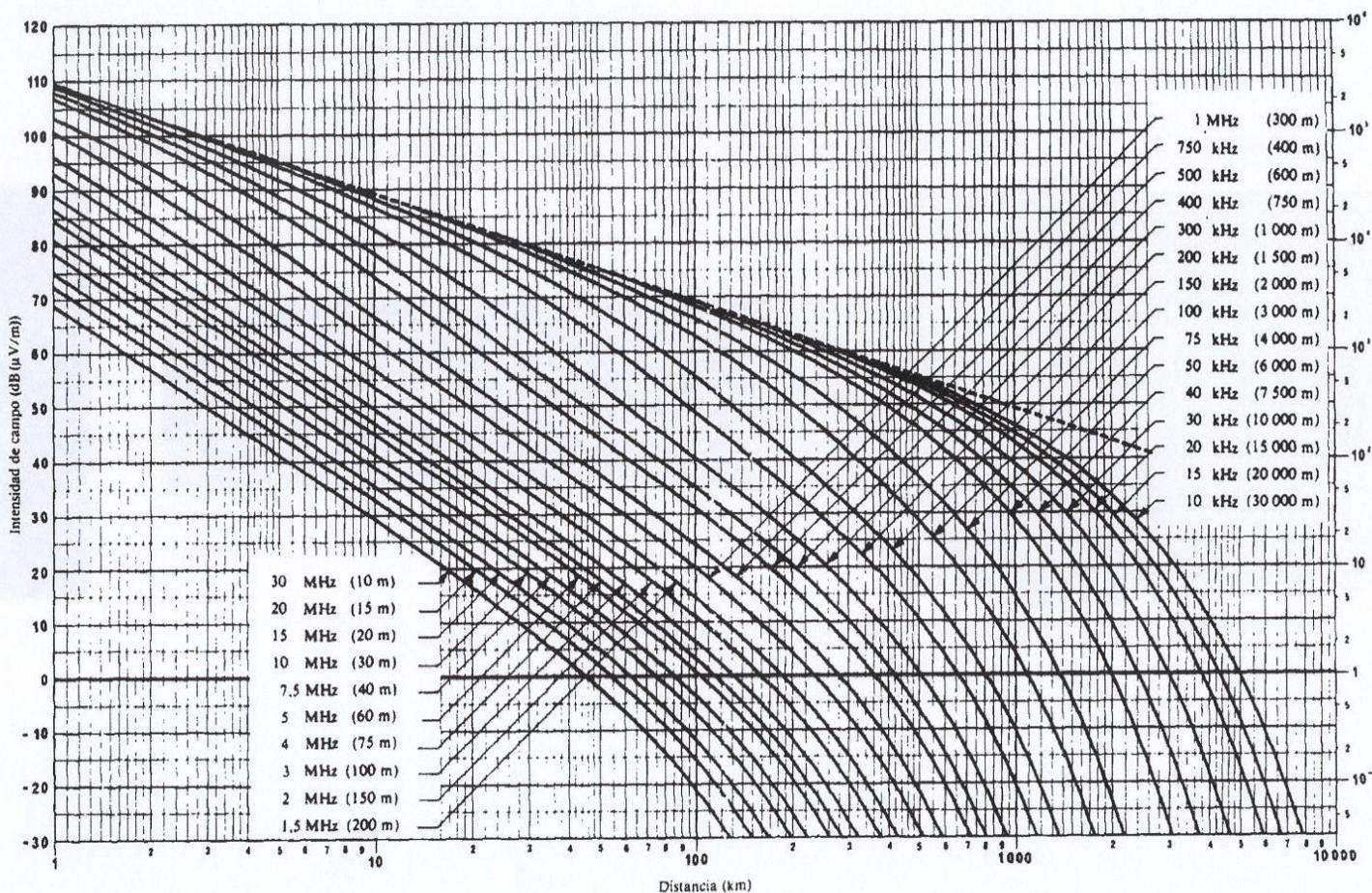
con λ la longitud de la onda y σ la conductividad del suelo.

De estas gráficas se observa que la intensidad de campo disminuye con la frecuencia, de forma que la propagación por onda de superficie deja de ser un mecanismo relevante de propagación a grandes distancias en la banda de HF.

El mecanismo de onda de superficie es uno de los utilizados en la propagación de las ondas de radio en las bandas LF, MF y HF (30kHz – 30 MHz), si bien en esta última banda las antenas se consideran como dipolos normales y no como dipolos eléctricamente cortos, que radian en unas direcciones tales que la posibilidad de reflexión en el terreno disminuye, por lo que la onda espacial no se anula, sino que interviene en la propagación reforzando la intensidad del campo recibido a grandes distancias



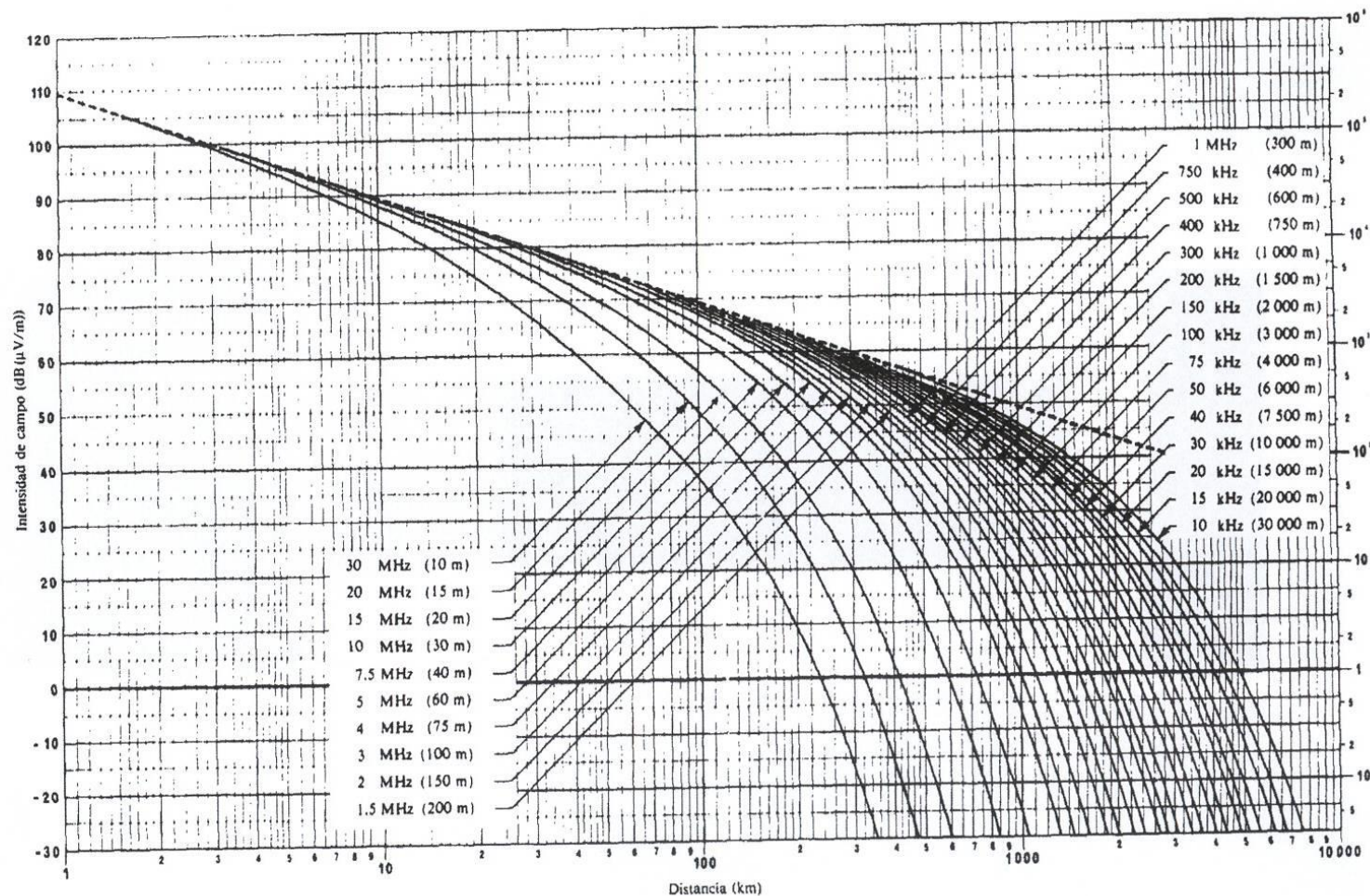
Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural



Intensidad de la onda de superficie sobre tierra seca



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural



Intensidad de la onda de superficie sobre el mar



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

3.- Efecto de la troposfera sobre la propagación de OEM's

La troposfera es la capa atmosférica más próxima a la Tierra. Tiene una altura media de entre 12 y 15 km. (9 en los polos y aproximadamente 17 en el ecuador). Es en esta zona donde se desarrollan los fenómenos meteorológicos aéreos y acuados, disminuyendo su temperatura a medida que nos elevamos. Su comportamiento tiene gran importancia en las comunicaciones terrestres, las cuales la emplean como medio de propagación.

Hasta ahora se ha supuesto la troposfera como un medio isótropo definido por una permitividad y una permeabilidad correspondiente al vacío. Sin embargo, esta suposición no es cierta ya que las características de la troposfera varían con la climatología, la época del año y la altura con respecto a la superficie de la Tierra.

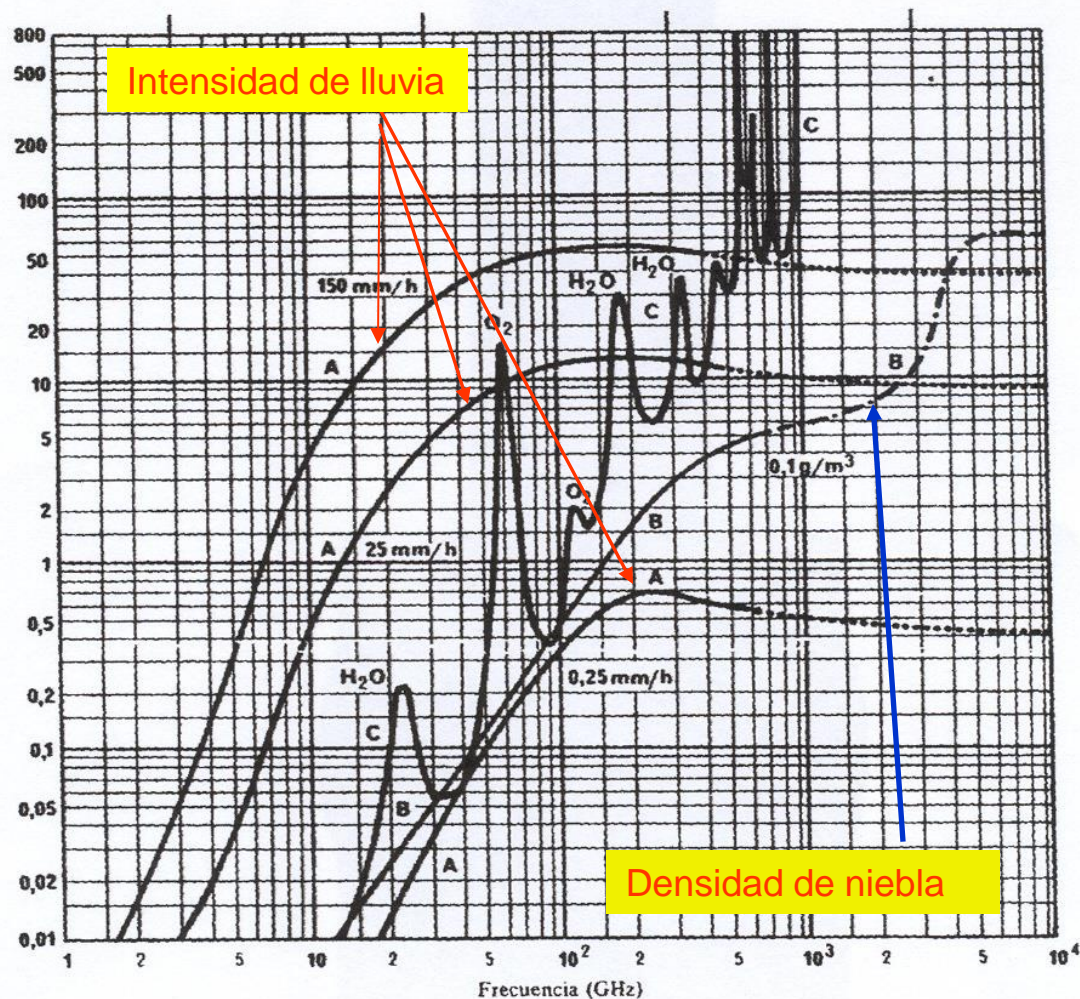
✓ Atenuación

La absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por los hidrometeoros son las principales causas de la atenuación atmosférica. En la figura siguiente se presenta la atenuación específica (dB/Km.) en función de la frecuencia para un trayecto próximo a la superficie de la Tierra.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

La atenuación por absorción molecular se debe principalmente a las moléculas de oxígeno y de vapor de agua. Para frecuencias inferiores a los 10GHz. es prácticamente despreciable, mientras que a frecuencias superiores presenta un comportamiento creciente con la frecuencia y la aparición de rayas de atenuación asociadas a las frecuencias de resonancia de las moléculas (22.3 GHz para el vapor de agua y 60 GHz. para el O₂).



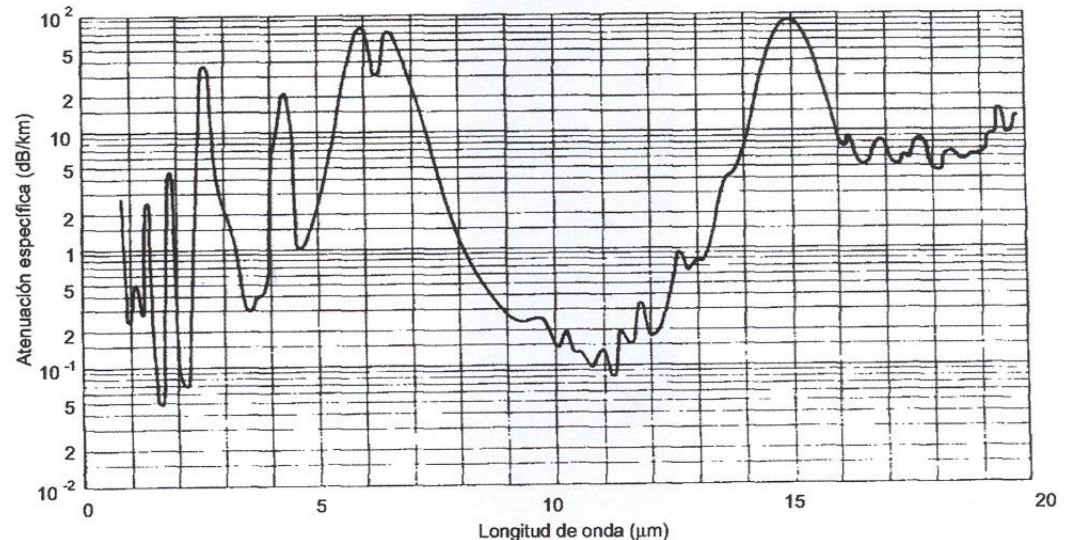
A- Lluvia B- Niebla C.- Componentes gaseosos



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

En la figura siguiente se muestra la atenuación específica por absorción molecular en la banda de los infrarrojos.

Con respecto a la atenuación por hidrometeoros, es especialmente importante la lluvia, ya que la niebla, la nieve y el granizo producen atenuaciones mucho menores en la banda de SHF (3-30GHz) e inferiores. La atenuación por lluvia depende de la intensidad y de factores como el



tamaño de la gota y la velocidad de la misma. En la grafica anterior se puede ver claramente un atenuación importante a partir de la frecuencia de 1Ghz.

La atenuación total por lluvia se obtiene de forma estadística teniendo en cuenta la probabilidad de que una cierta intensidad de lluvia ocurra. Esto se efectúa sobredimensionando el sistema de forma que la atenuación asociada a la intensidad de lluvia no afecte al propio sistema.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

En la práctica la atenuación específica de la lluvia puede calcularse como:

$$\gamma_R = KR^\alpha \text{ [dB/km]}$$

donde R es la intensidad de lluvia en mm/h, y las constantes K y α son función de la frecuencia y difieren para polarización vertical y horizontal debido principalmente a que las gotas de lluvia no son esféricas sino esferoides con el eje vertical menor que el eje horizontal (efecto del rozamiento con el aire) por lo que provoca una menor atenuación para la polarización vertical que para la horizontal. Los valores de K y α se dan en la siguiente tabla en función de la frecuencia y para cada polarización

Frecuencia (GHz)	K_H	K_V	α_H	α_V
1	0.0000259	0.0000308	0.9691	0.8592
10	0.01217	0.01129	1.2571	1.2156
20	0.09164	0.09611	1.0568	0.9847
30	0.2403	0.2291	0.9485	0.9129
40	0.4431	0.8673	0.4274	0.8421



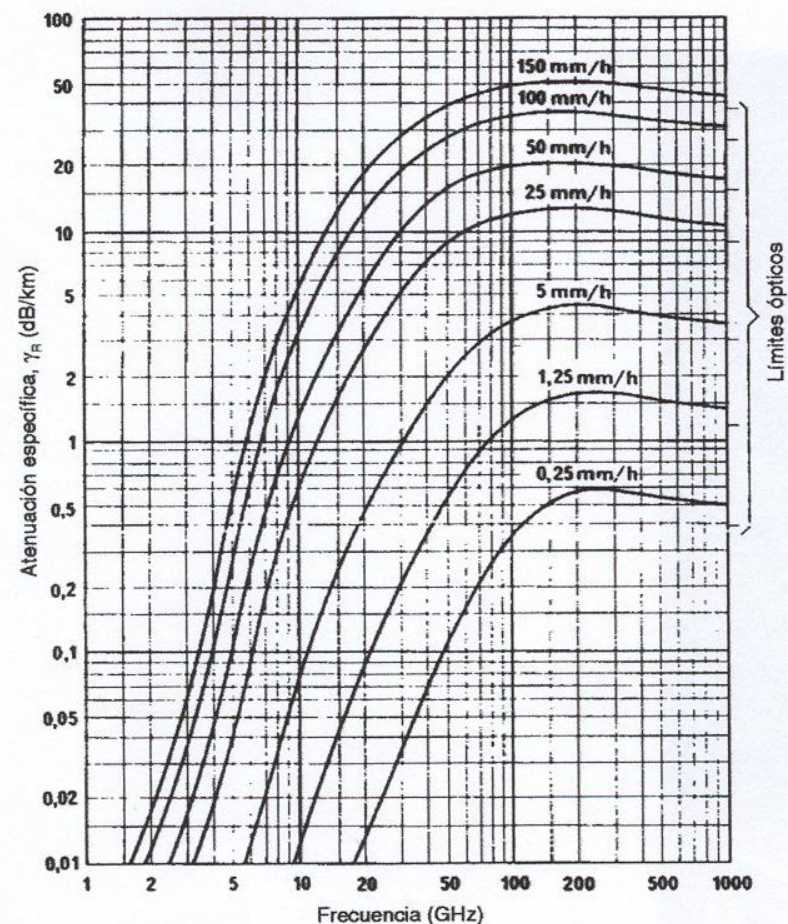
Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

En la gráfica se representa la ecuación anterior, supuesto las gotas de agua esféricas

En la gráfica puede verse que a frecuencias inferiores a 100 GHz. la atenuación aumenta al aumentar la frecuencia hasta alcanzar un valor máximo a partir de la cual empieza a disminuir hasta un valor constante a frecuencia ópticas.

✓ Refracción

Las ondas de radio que se propagan en la troposfera sufren refracción y dispersión debido a las variaciones del índice de refracción que a su vez obedecen a variaciones tanto espaciales como temporales de la temperatura, presión y contenido en vapor de agua. El índice de refracción es una magnitud cuyo valor es próximo a 1, por lo que se hace necesario definir un nuevo parámetro que permita comparar el índice de refracción troposférico





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

con el del vacío. Se define el coíndice de refracción o refractividad N como:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6$$

de forma que la refractividad tiene en la superficie de la Tierra valores de centenas de unidades. Supuesto la atmósfera como un gas ideal con una cierta concentración de vapor de agua, la refractividad puede obtenerse como

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2}$$

donde:

P : presión atmosférica en mbar

T : temperatura absoluta en K

e : presión parcial del vapor de agua en mbar

De esta expresión podemos ver que el primer sumando depende de las condiciones en seco (N_{seco}), mientras que el segundo sumando depende de las condiciones del vapor de agua en la atmósfera (N_{vapor})



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Esta expresión, como puede verse en la gráfica anterior, puede usarse a frecuencias inferiores a 100GHz. Todos estos parámetros depende de la altura por lo que para un perfil atmosférico medio la refractividad varía exponencialmente en función de la altura.

A partir de la conjunción de las variaciones con la altura de la presión atmosférica como de la presión relativa del vapor de agua y de la temperatura absoluta, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) establece la llamada atmósfera de referencia o atmósfera estándar a aquella en la que la refractividad varía como:

$$N(h) = 315e^{-0.136h}$$

con h la distancia en Km. y 315 la refractividad en la superficie de la Tierra.

Dentro de los uno a dos kilómetros de altura es posible linealizar el comportamiento tanto de la temperatura, como el de la presión atmosférica y la presión del vapor de agua con la altura de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$T(h) = 290 - 6.5h$$

$$P(h) = 950 - 117h$$

$$e(h) = 8 - 3h$$

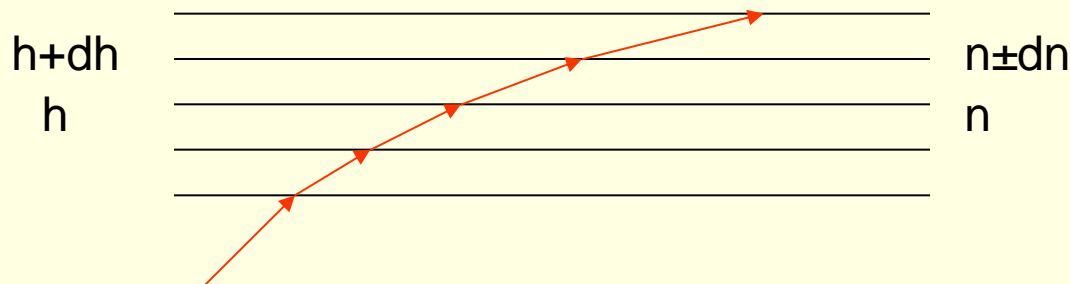
Lo que hace posible establecer una variación lineal para el co-índice de refracción como

$$N(h) = 315 (1 - 0.136h)$$



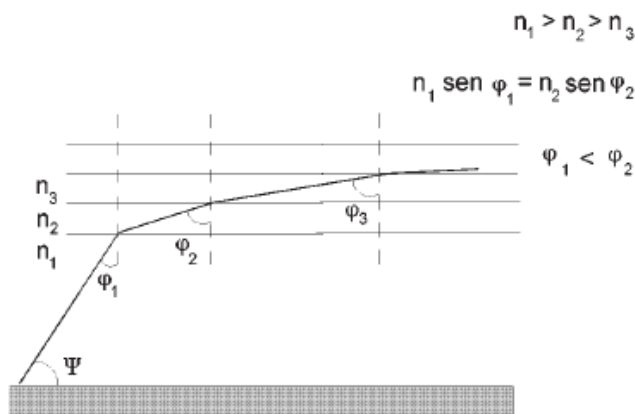
Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

En esta expresión se supone que la atmósfera puede ser modelizada como un medio estratificado en sentido horizontal, en el que en una fina capa de espesor dh se produce una variación diferencial del índice de refracción, dn , tal y como se muestra en la figura.



La principal consecuencia de la variación del índice de refracción es la refracción de las ondas, es decir, las ondas no se propagan en línea recta. Para un medio estratificado

como el de la figura en la que el índice decrece con la altura, la trayectoria de la onda se curva hacia la región de mayor índice de refracción. Aplicando la ley de Snell para la refracción sobre la interfaz dieléctrica se tiene

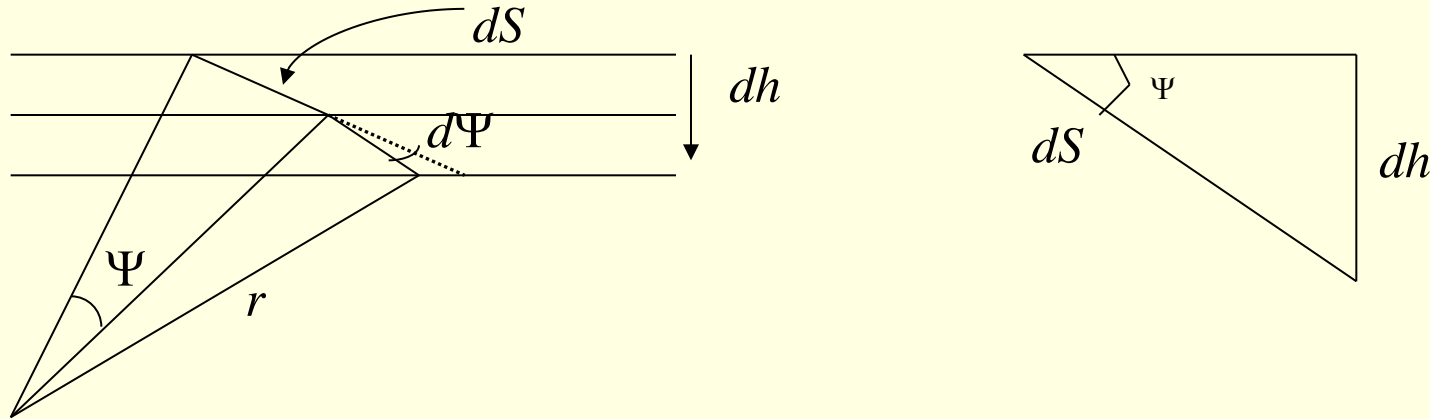


$$n \sin \phi = n \cos \Psi = cte$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Teniendo en cuenta que en una capa de altura dh se considera que el rayo recorre una trayectoria dS curva, de radio r que se puede considerar recta



Derivando la expresión anterior respecto a la distancia, se tiene

$$\frac{dn}{dS} \cos \Psi - n \sin \Psi \frac{d\Psi}{dS} = 0 \Rightarrow \frac{d\Psi}{dS} \sin \Psi = \frac{dn}{dS} \frac{\cos \Psi}{n}$$

De la gráfica anterior se puede ver que $dS = \frac{dh}{\sin \Psi}$ por lo que operando se tiene

$$\frac{d\Psi}{dS} = \frac{\cos \Psi}{n} \frac{dn}{dh} \quad \text{se define el radio de curvatura como } r = \frac{dS}{d\Psi} \quad \text{por lo que}$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{n(h)} \cos \Psi \frac{dn}{dh}$$

Dado que, en general las antenas están a la misma altura (radioenlaces horizontales) y el índice de refracción es próximo a 1 (no hay dependencia con h), el ángulo Ψ de elevación se aproxima a cero y la expresión anterior puede aproximarse por

$$\frac{1}{r} = \frac{dn}{dh} = 10^{-6} \frac{dN}{dh}$$

En condiciones de atmósfera estándar, la variación del coíndice con la altura es aproximadamente de -40 Km^{-1} por lo que le corresponde un radio de curvatura de 25641 Km.

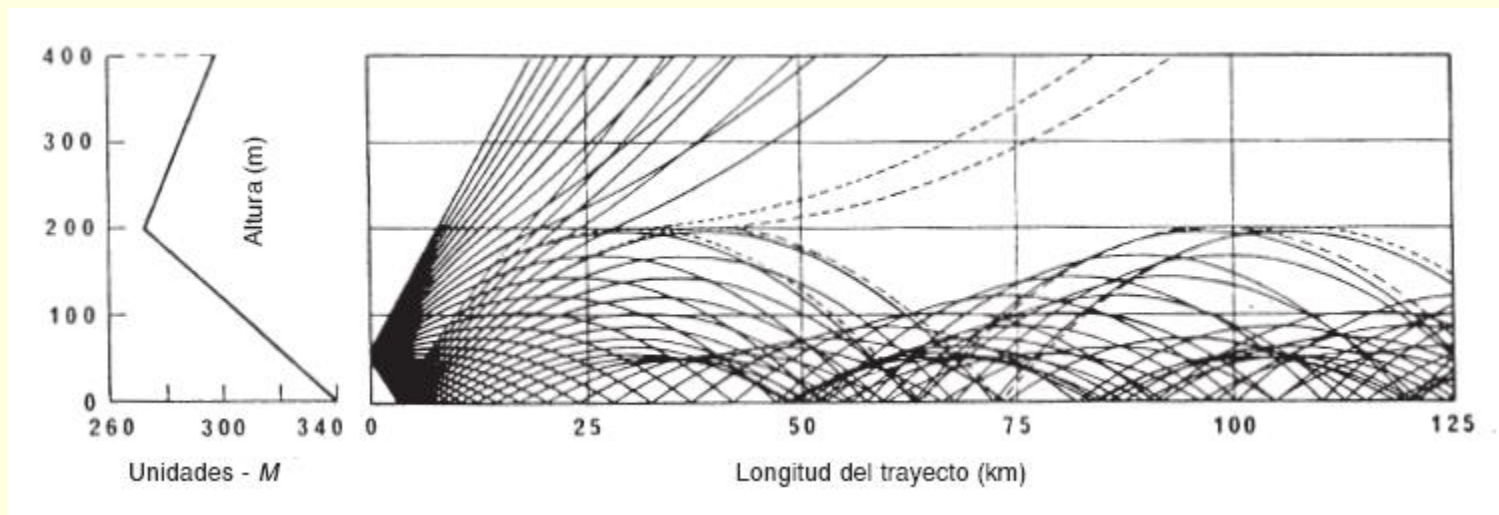
Para una atmósfera homogénea, la variación de índice (o del coíndice) con la altura es nula por lo que el radio de curvatura es infinito, esto es podemos aproximar la trayectoria del rayo como rectas. Si deseamos que el radio de curvatura coincida con el radio terrestre (6370 Km.), la variación del coíndice de refracción con la altura posee un valor crítico igual a -157 Km^{-1}



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

En otras palabras, cuando la variación del índice de refracción con la altura es significativo, el radio de curvatura no es muy grande y como consecuencia la trayectoria no es recta sino que se curva debido a la refracción. Este efecto ha de tenerse en cuenta a la hora de considerar la visibilidad entre antenas.

Si el gradiente de la refractividad es inferior a un valor crítico de -157 Km^{-1} la trayectoria de la onda se curva de tal manera que incide sobre la superficie de la Tierra. En esta situación puede producirse un guiado de la onda entre la superficie de la Tierra y una capa atmosférica próxima.





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Este fenómeno se denomina propagación por conductos y permite la propagación de ondas electromagnéticas con atenuaciones muy inferiores a los correspondientes al espacio libre. El análisis de la propagación por conductos puede hacerse a partir de los modos de propagación dentro de una guía de ondas.

La formación y dimensiones del conducto sólo puede describirse de forma estadística, si bien las alturas habituales son de algunos metros y en condiciones extraordinarias puede alcanzar varios centenares de metros. La propagación por conductos afecta principalmente a las bandas VHF, UHF y SHF.

La formación de conductos está asociada a grandes variaciones de gradiente del índice de refracción debido a su vez a variaciones elevadas de la concentración de vapor de agua en las capas altas de la atmósfera. Es por esto por lo que existe mayor probabilidad de encontrar conductos en los mares cálidos que en la tierra.

Así en los meses de verano es habitual la formación de conductos sobre el mar Mediterráneo que permite el alcance a grandes distancias en las bandas de VHF y UHF, fenómenos que afectan especialmente a los servicios de radiodifusión (FM) y a los de televisión.



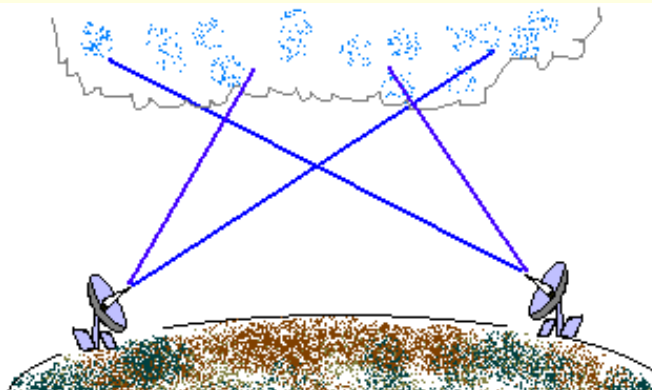
Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

✓ Difusión troposférica

La propagación por dispersión troposférica constituye una modalidad de transmisión en frecuencias superiores a unos 100 MHz. y se producen como consecuencia de efectos dispersivos ocasionados por irregularidades troposféricas las cuales provocan una vuelta a la Tierra de la energía radioeléctrica lanzada a la troposfera.

En el apartado anterior hemos supuesto que la atmósfera es un medio estratificado en el que el índice de refracción varía solamente con la altura. En realidad existe en la atmósfera homogeneidades que producen fluctuaciones locales del índice de refracción

Si mediante la antena transmisora se radia suficiente energía hacia una de estas heterogeneidades, la energía interceptada y rerradiada hacia la antena receptora bastará para realizar una comunicación transhorizonte con niveles de señales superiores a los que se conseguirían por difracción sobre tierra esférica.



Difusión troposférica



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

4.- Efecto de la ionosfera sobre la propagación de OEM's

En el año 1902, Kennelly y Heaviside, de forma independiente, postularon la existencia de una capa ionizada en la parte alta de la atmósfera como la responsable de la reflexión de las ondas electromagnéticas, explicando de esta forma el mecanismo de propagación a grandes distancias. El primer experimento para realizar mediciones directas de la ionosfera lo llevaron a cabo Appleton y Barnett en Londres, en 1925. Consistía en emitir una señal de onda continua de fase variable con el tiempo. En un receptor próximo se recibía la interferencia entre la onda directa y la reflejada. A partir de la formación de interferencias constructivas y destructivas les fue posible determinar la altura de la capa ionizada. A esta capa la llamaron capa eléctrica, o abreviadamente capa E. Estudios posteriores revelaron la existencia de capas inferiores y superiores a la capa E, a las que manteniendo el orden alfabético se las denominó D y F respectivamente. Investigaciones más profundas demostraron que la ionosfera no es un medio estratificado, sino que presenta variaciones continuas de la densidad de ionización en función de la altura. Por razones históricas se mantiene la nomenclatura de capas D, E y F para designar cada una de las regiones de la ionosfera de altitud creciente. Bajo ciertas condiciones la capa F se desdobra en dos, las capas F_1 y F_2 .

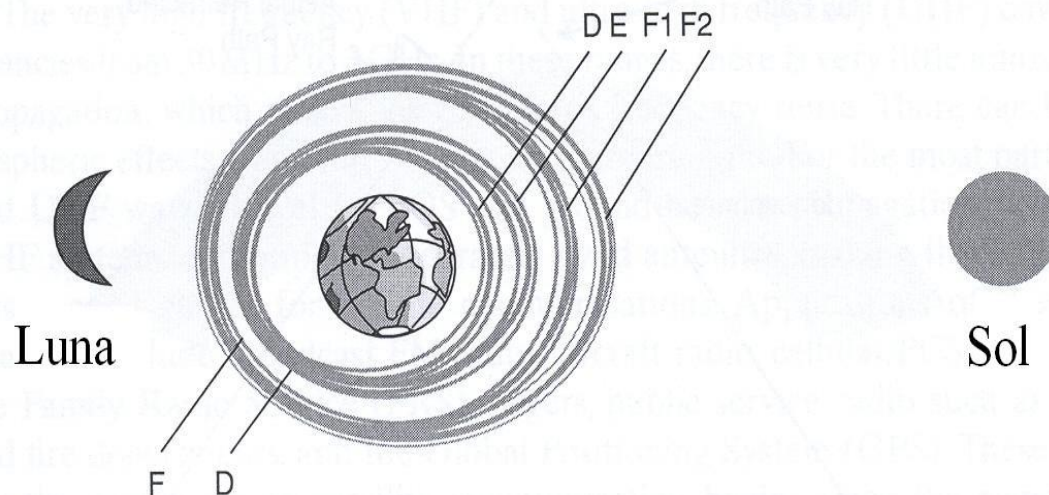
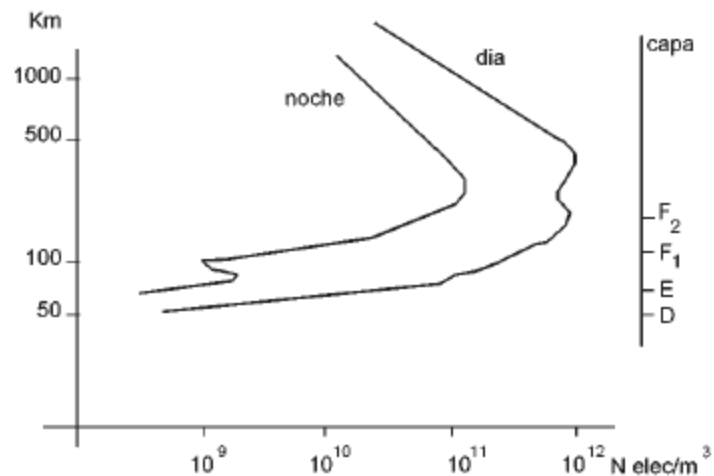


Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

La causa primordial de ionización de la ionosfera es la radiación solar en la región del espectro de los rayos X y ultravioletas. También contribuyen a la ionización la incidencia de partículas cargadas (protones y electrones) de origen solar y los rayos cósmicos galácticos. La creación de iones depende de la energía de las radiaciones y de la densidad de moléculas. Para alturas elevadas la energía de la radiación incidente es elevada pero la densidad de moléculas es baja, mientras que a alturas más bajas la densidad de moléculas es alta pero la energía de las radiaciones ha sido absorbida en gran parte, de modo que la densidad de ionización máxima se produce en un punto intermedio. La densidad de ionización existente es el resultado de un equilibrio dinámico entre la ionización y la recombinación producida principalmente por la colisión entre iones. Dado que la causa principal de ionización es la actividad solar, el comportamiento de la ionosfera está muy influenciado por los ciclos solares observados desde la tierra. Los periodos de estos ciclos son: diurno, anual y de once años. Este último está asociado a los periodos de aparición de las manchas solares. En la figura siguiente se muestra la densidad de ionización típica de la ionosfera en función de la altura para el día y la noche. La capa inferior D se extiende entre los 50 y 90 km. de altura. Su densidad de ionización aumenta rápidamente con la altura y presenta grandes variaciones entre el día y la noche. De hecho, por la noche prácticamente



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural



desaparece, por lo que habitualmente se considera que la capa D es una capa diurna. La capa E es la zona intermedia comprendida entre los 90 y 130 km. de altura. Su comportamiento está muy ligado a los ciclos solares. A pesar de presentar grandes variaciones de ionización conserva un nivel apreciable durante la noche. Alcanza el máximo de ionización durante el mediodía en los meses de verano. En ciertas ocasiones aparece una ionización anómala en la capa E que se denomina capa E esporádica (E_s). En zonas templadas la capa E_s es bastante frecuente en verano, y alcanza densidades iónicas varias veces superior a la capa E circundante. La capa F se extiende hacia arriba a partir de los 130 km. de altitud.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Debido al distinto comportamiento de la parte inferior y superior de la capa, ésta se subdivide en capa F₁ entre los 130 y 210 km. y F₂ a partir de los 210 km. La capa F₁ desaparece durante la noche mientras que la capa F₂ mantiene niveles de ionización relativamente constantes entre el día y la noche. Este comportamiento se explica por la poca densidad de moléculas en las capas altas de la atmósfera, lo que dificulta la recombinación por colisiones y por fenómenos dinámicos de difusión de iones desde capas inferiores.

✓ Propagación en un medio ionizado

La propagación de ondas electromagnéticas en la ionosfera se puede modelar a partir de la propagación en plasmas. Un plasma es una región de espacio, con la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética del vacío, que contiene electrones libres.

Considérense en primer lugar las fuerzas a las que se encuentra sometido un electrón inmerso en el campo electromagnético de una onda plana. Éste experimentará una fuerza debida al campo eléctrico y otra al campo magnético dadas por

$$|\vec{F}_e| = e|\vec{E}| = eE \text{ y por otra parte } |\vec{F}_m| = e|\vec{v} \times \vec{B}| = e \cdot v \cdot B \cdot \sin\theta = e \cdot v \left(\frac{\mu}{\eta} \right) E \sin\theta = \left(\frac{v}{c} \right) |\vec{F}_e| \sin\theta$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

donde e es la carga del electrón, v su velocidad y c la velocidad de la luz. Nótese que la fuerza experimentada por el electrón debida al campo magnético de la onda plana es despreciable frente a la fuerza producida por el campo eléctrico, cuando la velocidad del electrón es mucho menor que la de la luz.

La ecuación del movimiento de un electrón en un plasma frío, en el que se propaga una onda plana y existe un campo magnético estático \vec{H}_0 está dada por

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - \xi m\vec{v} - e\mu_0 \vec{v} \times \vec{H}_0$$

donde se ha considerado también un término de pérdidas por colisión entre electrones y donde ξ es la frecuencia de colisiones. La presencia del campo magnético estático dificulta el análisis, por lo que en los desarrollos que siguen se va a omitir, si bien esto no significa que el efecto del campo magnético terrestre sobre la propagación ionosférica sea despreciable. Suponiendo variaciones armónicas de la forma $e^{j\omega t}$, de la expresión anterior se deduce que

$$\vec{v} = \frac{-e\vec{E}}{m(\xi + j\omega)}$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Si existe una densidad de N electrones/m³ se creará una densidad de corriente asociada al movimiento de los electrones, y a partir de las ecuaciones de Maxwell

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon_0\vec{E} = j\omega\epsilon_0 \left[1 + \frac{Ne^2}{j\omega\epsilon_0 m(j\omega + \xi)} \right] \vec{E} = j\omega\epsilon_0 \epsilon^* \vec{E}$$

es posible definir la permitividad eléctrica relativa y la conductividad del plasma

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' - j\frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} \quad \text{con} \quad \epsilon' = 1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0(\xi^2 + \omega^2)} \quad \text{y} \quad \sigma = \frac{Ne^2\xi}{m(\xi^2 + \omega^2)}$$

En ausencia de colisiones entre iones ($\xi = 0$) las expresiones anteriores pueden escribirse como

$$\epsilon' = 1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0\omega^2} = 1 - \frac{f_p^2}{f^2} \quad \text{y} \quad \sigma = 0$$

donde se ha introducido la frecuencia de resonancia del plasma f_p , también llamada frecuencia crítica



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

$$f_p^2 = \left(\frac{\omega_p}{2\pi} \right)^2 = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0 (2\pi)^2}$$

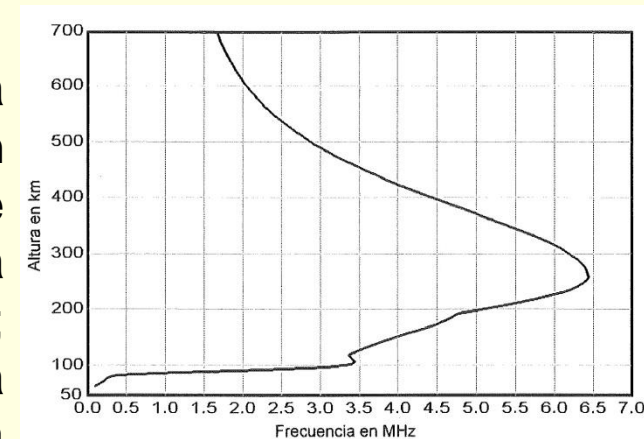
Al sustituir las constantes por su valor se obtiene que $f_p = 9\sqrt{N}$ [Hz] con la densidad de ionización en electrones por m³.

Una onda plana propagándose en este supuesto por la ionosfera tiene una constante de fase $\beta = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon'}$. En el caso que la frecuencia sea inferior a la frecuencia de resonancia, la constante de fase será imaginaria y la onda se atenuará de forma exponencial con la distancia; por el contrario, si la frecuencia es superior a f_p , la constante de fase es real y por tanto no habrá atenuación. En este último caso la permitividad relativa es inferior a la unidad y por tanto la velocidad de fase es superior a la de la luz

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}$$

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{v_p}{1 - \frac{\omega}{v_p} \frac{dv_p}{d\omega}} = \frac{c^2}{v_p} = c\sqrt{\epsilon'}$$

La velocidad de grupo es





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Nótese que en este caso la velocidad de propagación es función de la frecuencia y, por tanto, la ionosfera constituye un medio dispersivo.

Si se considera la existencia de colisiones en la ionosfera, la constante dieléctrica ϵ^* tiene una parte imaginaria no nula, por lo que el medio presentará atenuación. En este caso la constante de propagación compleja puede escribirse como

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon_0\left[\epsilon' - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right]}$$

Bajo la hipótesis de buen dieléctrico $\frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} \ll \epsilon'$

se obtiene que $\alpha = 60\pi \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon'}}$

Suponiendo que el índice de refracción es próximo a la unidad y que la frecuencia de la onda es mucho mayor que la frecuencia de las colisiones ($\omega \gg \xi$) la atenuación puede escribirse como

$$\alpha = 1.16 \cdot 10^{-3} \frac{N\xi}{f^2} \quad [\text{dB/Km}]$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

✓ Influencia del campo magnético terrestre

En el análisis anterior no se ha considerado el efecto del campo magnético terrestre. Un plasma sometido a un campo magnético constante posee características anisótropas, de forma que la constante dieléctrica no es un escalar sino un tensor.

El efecto más notable es que la constante de propagación es función de la polarización de la onda. En concreto la constante de propagación es distinta para una onda polarizada circularmente a derechas o a izquierdas. Esto produce una rotación en el plano de polarización de una onda linealmente polarizada. Considérese la siguiente onda linealmente polarizada según el eje x , que se propaga en la dirección del eje z , y que se descompone como la suma de dos ondas polarizadas circularmente

$$\vec{E}_i = 2E_0 e^{-jk_0 z} \hat{i} = E_0 (\hat{i} + j\hat{j}) e^{-jk_0 z} + E_0 (\hat{i} - j\hat{j}) e^{-jk_0 z}$$

Tras propagarse por un medio anisótropo de espesor l con constantes de propagación k_1 y k_2 para cada una de las polarizaciones circulares se obtiene (despreciando las reflexiones en las superficies de separación entre medios)



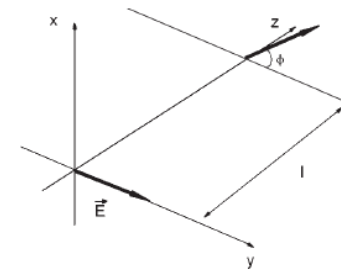
Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

$$\vec{E} = 2E_0 e^{-j(k_1+k_2)\frac{l}{2}} \left[\hat{i} \cos(k_2 - k_1) \frac{l}{2} + j \text{sen}(k_2 - k_1) \frac{l}{2} \right]$$

que es la expresión de una onda polarizada linealmente con una dirección rotada respecto al eje x un ángulo Φ dado por

$$\text{tg} \Phi = \text{tg} \left[(k_2 - k_1) \frac{l}{2} \right]$$

A este efecto se le denomina rotación de Faraday. El ángulo de rotación de la polarización depende de la diferencia entre las dos constantes de propagación. Esta diferencia es función de la dirección de propagación de la onda respecto al campo magnético terrestre, de la intensidad del campo magnético y de la frecuencia de resonancia de la ionosfera, e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Para frecuencias superiores a 10 GHz la rotación de Faraday es totalmente despreciable (inferior a 1°); sin embargo, en las bandas de VHF y UHF puede tener valores considerables que son impredecibles. Es por este motivo que en estas bandas es necesario el empleo de polarización circular en las comunicaciones tierra - satélite, ya que el empleo de polarización lineal tendría asociadas pérdidas por desacoplo





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

fluctuantes, impredecibles y con valores potencialmente elevados.

Por el contrario, a frecuencias superiores a 10 GHz, puede emplearse polarización lineal sin que exista una rotación apreciable en la polarización, y de hecho es habitual en las comunicaciones espaciales en estas bandas la reutilización de frecuencias mediante el empleo de polarizaciones lineales ortogonales.

✓ Comunicaciones ionosféricas

La existencia de la ionosfera permite, tal como comprobó Marconi, las comunicaciones a grandes distancias. El efecto de la ionosfera es distinto para las diferentes bandas de frecuencias. A frecuencias bajas y muy bajas (bandas de LF y VLF) la ionosfera supone un cambio brusco, en términos de λ , del índice de refracción atmosférico. Esta variación abrupta produce una reflexión de la onda incidente en la parte baja de la ionosfera.

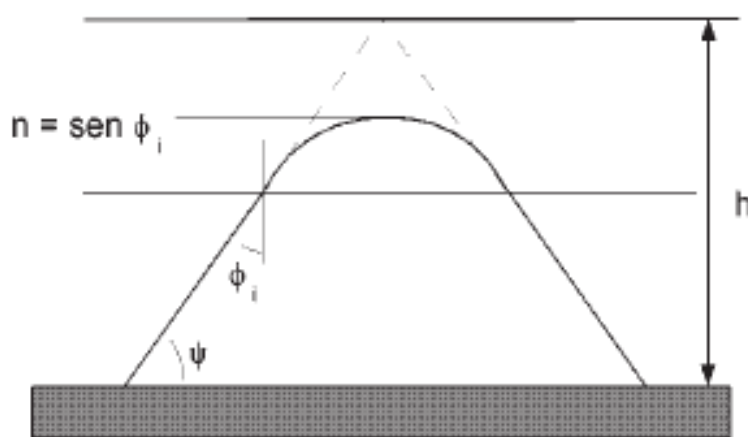
Se puede considerar que la superficie de la tierra y la parte baja de la ionosfera forman una guía de ondas que favorece la propagación a grandes distancias en estas bandas de frecuencias (típicamente entre los 5.000 y 20.000 Km.). Dado que la onda no llega a penetrar en la ionosfera, este modo de propagación es relativamente insensible a las



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

variaciones de la ionosfera.

A frecuencias más elevadas (MF y superiores) la onda penetra en la ionosfera. La ionosfera es un medio cuyo índice de refracción varía con la altura. La densidad de ionización aumenta con la altura hasta alcanzar el máximo entre los 300 y 500 km. A medida que la densidad de ionización aumenta, el índice de refracción disminuye, produciéndose la refracción de la onda, o curvatura de la trayectoria, de forma análoga a la refracción atmosférica. Bajo ciertas condiciones la curvatura es tal que la onda regresa a la tierra.



La condición para que la onda regrese a la tierra es que para cierta altura se cumpla, según la ley de Snell,

$$\text{sen} \phi_i = n \cdot \text{sen}(90^\circ) = n = \sqrt{\epsilon'} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}$$

que mediante una sencilla manipulación se convierte en

$$\cos \phi_i = \frac{f_p}{f}$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Nótese que, aunque el proceso físico involucrado en este modo de propagación es una refracción, es habitual referirse a él como reflexión ionosférica, considerando que se produce una reflexión a una altura virtual h .

Se define la frecuencia máxima utilizable básica (MUF básica) como

$$MUF = \frac{f_p}{\cos \phi_i} = \frac{f_p}{\sin \Psi}$$

El significado de la MUF es el siguiente: para unas condiciones ionosféricas dadas (f_p) y ángulo de elevación respecto al horizonte (Ψ), la MUF es la máxima frecuencia utilizable para que la onda regrese a la tierra. Si se emplea una frecuencia mayor la curvatura de la trayectoria no es suficiente. Nótese que la frecuencia de resonancia es la frecuencia a la que se produce reflexión cuando se incide normalmente a la ionosfera.

La distancia cubierta en un enlace ionosférico depende del ángulo de incidencia y de la altura virtual a la que se produce la reflexión. La altura virtual es de unos 100 Km. para la capa E, entre 200 y 250 Km. para la capa F_1 y entre los 250 y 400 Km. para la capa F_2 .



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

El valor del ángulo de elevación máximo está limitado, para una frecuencia dada, por

$$\text{sen}\Psi_{\text{máx}} = \frac{f_p}{f}$$

de forma que si se supera este ángulo la onda no regresa a la tierra. Este ángulo fija la distancia mínima que puede cubrirse con una reflexión ionosférica. Esta distancia mínima está dada por

$$d_{\text{mín}} = 2h \sqrt{\left(\frac{f}{f_p}\right)^2 - 1}$$

donde h es la altura a la que se produce la reflexión virtual. Esta expresión supone un modelo de tierra plana y no es válida cuando el ángulo de incidencia en la ionosfera es grande, ya que en este caso debe considerarse el efecto de la curvatura de la tierra.

La distancia máxima alcanzable está limitada por la potencia del transmisor, la sensibilidad del receptor, la altura virtual de reflexión y la curvatura terrestre.

Considerando el efecto de refracción de la atmósfera terrestre esta distancia está limitada en torno a los 4.000 km. Sin embargo, es posible alcanzar distancias mayores



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

mediante reflexiones múltiples. Estas reflexiones múltiples se producen entre la ionosfera y la superficie de la tierra, o bien entre capas ionosféricas distintas. En estos casos la longitud de los enlaces puede ser superior a los 10.000 km.

La propagación por reflexión ionosférica es importante en las bandas de MF y HF. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en la banda de MF, y especialmente a frecuencias inferiores a 1 MHz, la capa D presenta una atenuación elevada, proporcional a la densidad de ionización, que imposibilita la refracción ionosférica en esta banda durante el día. Es por este motivo que la propagación ionosférica la banda de MF presenta un comportamiento totalmente distinto durante el día y la noche. Durante día queda totalmente absorbida por la capa D, mientras que por la noche, cuando la capa D desaparece, es posible la refracción en las capas superiores y establecer enlaces ionosféricos. Los enlaces en HF no sufren estos problemas ya que la atenuación en la capa D es proporcional $1/f^2$, y por tanto despreciable en esta banda.

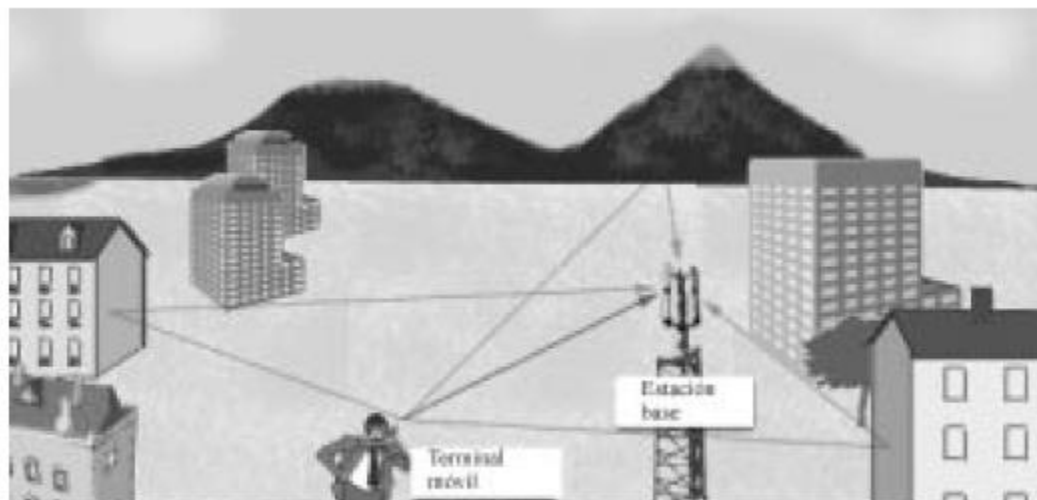
5.- Modelización de la propagación en entornos complejos

Los modelos de propagación de las secciones anteriores son útiles para evaluar las pérdidas de propagación asociadas a los distintos efectos que se han descrito: reflexión



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

en tierra, difracción por obstáculos, etc. Cuando el efecto dominante en las pérdidas de propagación es únicamente uno de ellos las permiten estimar adecuadamente. En entornos de propagación complejos en los que existe una superposición de varios efectos, el cálculo de las pérdidas de propagación debe abordarse de forma diferente. Considérese la situación de la figura en la que se representa un escenario habitual en los servicios de comunicaciones móviles en entornos urbanos. En la mayoría de las ocasiones no existe visibilidad directa entre los dos extremos del enlace: la estación base y el terminal móvil. La intensidad de campo eléctrico y por tanto la densidad de potencia incidente en la antena receptora es el resultado de la contribución de ondas reflejadas y difractadas en los edificios y obstáculos del entorno. En función de la fase de cada una de las contribuciones la suma de todas ellas puede ser constructiva o destructiva. En el caso de ser destructiva se producirá un fuerte desvanecimiento en la señal recibida. Sin embargo, con sólo desplazar el móvil una





Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

distancia del orden de media longitud de onda (17 cm. a 900 MHz), la contribución puede ser constructiva, y por tanto se pueden observar fuertes variaciones en la potencia de señal recibida. Estas variaciones pueden ser del orden de 30 a 40 dB con pequeños desplazamientos.

En este contexto, la modelización de la propagación debe abordarse a partir de modelos empíricos que permiten determinar el valor medio o esperado de las pérdidas de propagación. Sobre este valor medio se superpone una variable aleatoria que modela las fluctuaciones en la atenuación. El resultado es la caracterización estocástica de las pérdidas de propagación, cuyo objetivo no es predecir el valor exacto de las pérdidas, sino asociar a una atenuación una probabilidad de ocurrir. De forma que desde el punto de vista de la planificación de un servicio, el objetivo es garantizar que una cierta pérdida de propagación no se supere el 90, el 95 o el 99 % del tiempo en función de la fiabilidad que se le quiera conferir al servicio.

✓ Modelos empíricos para el valor medio de las pérdidas de propagación. El modelo Okumura-Hata



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Los modelos empíricos se basan en el ajuste de leyes de decaimiento de la potencia recibida en función de la distancia, altura de antenas, frecuencia y tipología del entorno a datos medidos. Evidentemente, mientras que ciertos parámetros como la frecuencia o la altura de las antenas son conocidos de forma unívoca otros, como la tipología del entorno son más difíciles de objetivar. Generalmente los modelos empíricos distinguen entre zonas urbanas muy densas, zonas urbanas de baja densidad y zonas rurales. A lo largo del tiempo se han desarrollado distintos modelos empíricos. Uno de los más empleados es el denominado Okumura-Hata, que se desarrolló a partir de medidas realizadas en Tokio. De acuerdo con este modelo las pérdidas de propagación L definidas como

$$\frac{P_L}{P_T} = -L + G_r + G_T \text{ [dB]}$$

se pueden calcular para distancias $R > 1\text{km}$ como

Zona urbana densa	$L = A + B \log R - E \text{ (dB)}$
Zona urbana de baja densidad	$L = A + B \log R - C \text{ (dB)}$
Zona rural	$L = A + B \log R - D \text{ (dB)}$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

donde R es la distancia en Km. y los parámetros A , B , C , D y E dependen de la altura de la antena de la estación base (h_b), la altura de la antena del terminal (h_m) ambas expresadas en metros, y la frecuencia (f) expresada en MHz y según el modelo pueden calcularse como:

$$A = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_b$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log h_b$$

$$C = 2(\log(f/28))^2 + 5,4$$

$$D = 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f + 40,94$$

$$E = 3,2(\log(11,75h_m))^2 - 4,97 \quad \text{para ciudades grandes } f \geq 300 \text{ MHz}$$

$$E = 8,29(\log(1,54h_m))^2 - 1,1 \quad \text{para ciudades grandes } f < 300 \text{ MHz}$$

$$E = (1,11 \log f - 0,7)h_m - (1,56 \log f - 0,8) \quad \text{para ciudades medias y pequeñas}$$

El modelo es válido con las siguientes restricciones:

$150 \text{ MHz} \leq f \leq 1500 \text{ MHz}$ El modelo Okumura-Hata predice una disminución del valor medio de la potencia recibida en función de la distancia de la forma

$$30 \text{ m} \leq h_b \leq 200 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} \leq h_m \leq 10 \text{ m}$$

$$L \propto \frac{1}{R^{4.5-0.66 \log h_b}}$$



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

que para una altura de antena de la estación base de 200 m implica una variación de la forma $1/R^{2.98}$ y para una altura de 30 m la variación en función de la distancia es de la forma $1/R^{3.52}$. Por tanto, el valor que se obtiene es intermedio entre la variación del tipo $1/R^2$ correspondiente a la propagación en espacio libre y el caso de reflexión en tierra plana lisa con incidencia rasante proporcional a $1/R^4$. Cuanto más alta se encuentra la antena de la estación base menor es el exponente que afecta a la distancia.

Los modelos empíricos sólo proporcionan el valor medio o esperado de las pérdidas de propagación para un entorno genérico en función de la distancia entre la estación base y el terminal. Sin embargo, es evidente que aún manteniendo la distancia a la estación base constante se observarán fluctuaciones en los niveles de señal en distintas ubicaciones del terminal móvil. Éstas se deben a las diferentes alturas de los edificios, orientación y características de las calles, etc. Por tanto, al describir una circunferencia en torno a una estación base se medirán variaciones en las pérdidas de propagación. Variaciones relativamente lentas en función de la distancia recorrida y que físicamente cabe asociarlas a la variación en el entorno. Dado que estas variaciones dependen de múltiples factores independientes, la resultante es una variación aleatoria de distribución gaussiana.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

De forma que las pérdidas de propagación se caracterizan como:

$$L = L_{50} + L_s$$

donde L_{50} es la atenuación mediana no excedida el 50 % del tiempo obtenida mediante un modelo empírico.

Nótese que para una variable aleatoria gaussiana el valor medio o esperado y la mediana coinciden. En cuanto a L_s es una variable aleatoria gaussiana de media cero y caracterizada por su desviación estándar σ . Una vez más el valor de σ depende de la frecuencia y de la tipología del entorno y se determina mediante leyes derivadas de datos empíricos. Un modelo empírico es:

$$\sigma = 0.65(\log f)^2 - 1.3\log f + A$$

con $A = 5,2$ en entornos urbanos y $6,6$ en los suburbanos.

De esta forma es posible asociar una probabilidad a una atenuación para unas características dadas del enlace.



Tema 3.- Propagación de ondas en medio natural

Los apuntes de este tema han sido extraídos de la siguiente bibliografía:

- Ángel Cardama et al, *Antenas*, 2^o Ed. Ediciones UPC, 2002
- Curt A. Levis, Joel T. Johnson and Fernando L. Teixeira. *Radiowave Propagation: Physics and Applications*, Wiley, 2010.
- José María Hernando Rábanos, *Transmisión por Radio*, Ed. Centro de Estudios Ramón Areces, 1998
- Robert E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*, McGraw-Hill, 1985
- Recomendaciones de la UIT-R