

Tema 1

Introducción a los sistemas de radiocomunicaciones

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Conceptos básicos

- Definiciones UIT
 - Telecomunicación es toda emisión, transmisión y recepción de signos, señales, escritos e imágenes, sonidos e informaciones de cualquier naturaleza por hilo, radioelectricidad, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos.
 - Radiocomunicación: telecomunicación por medio de ondas radioeléctricas
 - Ondas radioeléctricas: ondas EM, sin guía artificial, $f < 3000$ GHz

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Historia de la Radiocomunicación (I)

- 1819 – Oersted demuestra que la electricidad produce magnetismo. Ampère amplía sus observaciones
- 1831 – Faraday demuestra el efecto inverso: un campo magnético variable induce corriente en un conductor
- 1873 – Maxwell publica su “Tratado de Electricidad y Magnetismo”
 - Ecuaciones que relacionan campo eléctrico y magnético
- 1887 – Hertz demuestra experimentalmente la propagación de ondas electromagnéticas

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Historia de la Radiocomunicación (II)

- 1899 – Marconi enlaza Dover (UK) y Wimereux (FR), separados por el canal de la Mancha, en una comunicación sin hilos
- 1901 – 1ª comunicación transatlántica sin hilos entre Polhu (UK) y Newfoundland (CAN)
- 1922 – Nace la BBC
- 1945 – Arthur C. Clarke propone las comunicaciones con satélites artificiales como repetidores
- 1957 – lanzamiento del Sputnik
- 1962 – TELSTAR I, establece un canal de TV entre EEUU y Europa
- 1993 – 1995 : puesta en marcha sistema geolocalización por GPS

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Historia de la Radiocomunicación (III)

- 1946 a 1985 – System Service de Bell Labs, telefonía móvil: caro y aparatoso
- 1984 – Motorola DynaTAC 8000X, primer teléfono móvil realmente portátil
- Años 90 a actualidad: TACS, GSM, GPRS, EDGE, UMTS...

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



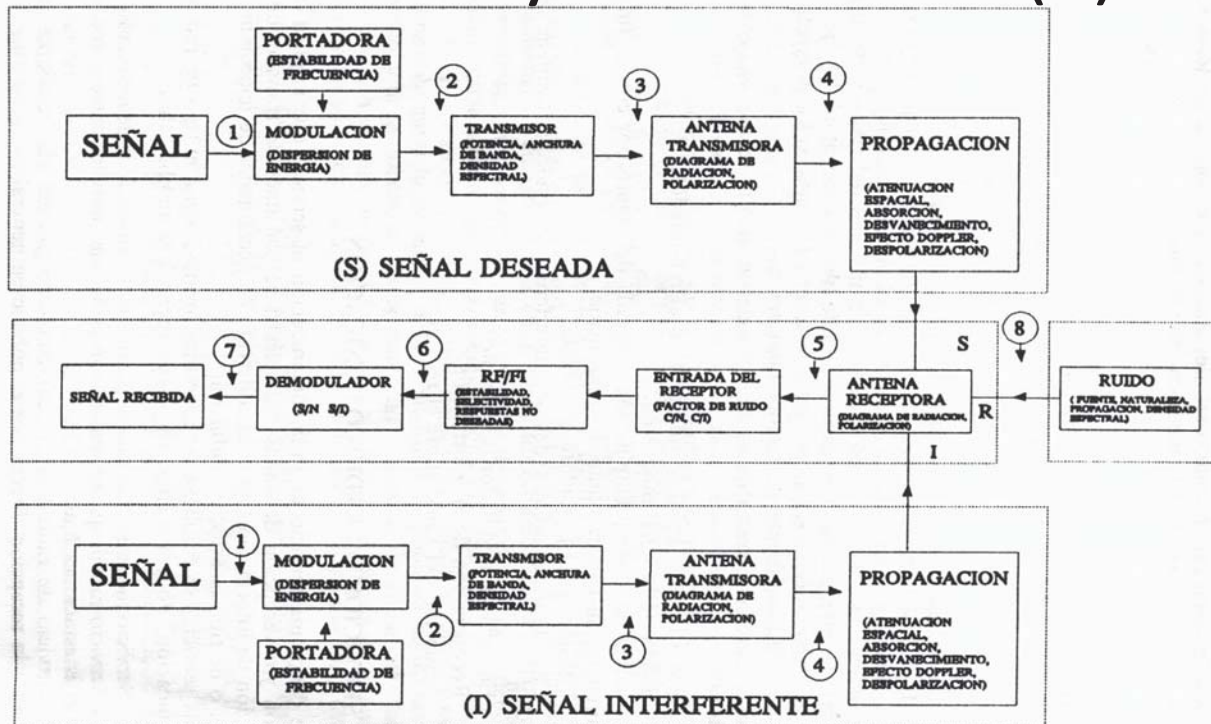
Elementos y definiciones (I)

- Estación transmisora o transmisor: osciladores + moduladores + filtros + amplificadores + antenas
- Radiación: flujo saliente de energía EM desde cualquier fuente
 - Emisión: radiación por una estación transmisora
 - Radiaciones parásitas: ondas EM no deseadas
- Estación receptora: antena + amplificadores + demoduladores + filtros
- Señal interferente o no deseada: ruido (natural o artificial) + Interferencia
- Distorsión por propagación
- Cobertura limitada por ruido (umbral de potencia de señal para una calidad de recepción deseada)
- Cobertura limitada por interferencia (relación de protección para una calidad de recepción deseada)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Elementos y definiciones (II)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Servicios de radiocomunicación

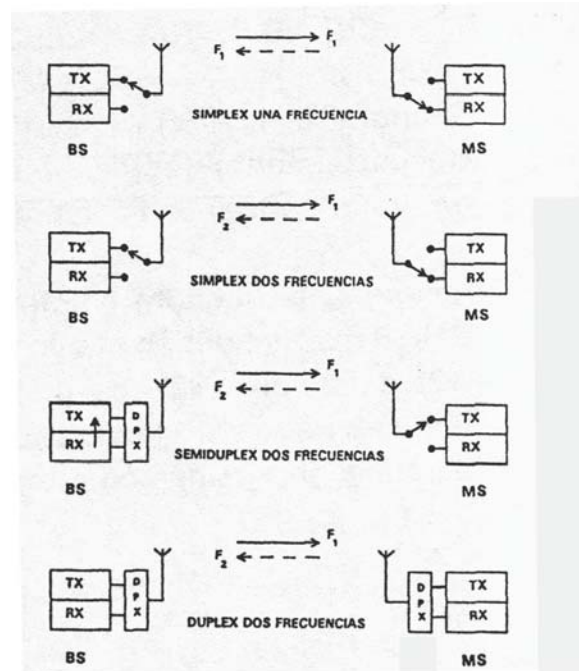
- Servicio de radiocomunicación: aquel que implica emisión/recepción de ondas EM con el fin de transmitir/recibir información para cobertura de necesidades de telecomunicación, así como de tipo científico o industrial
- Tipos:
 - Servicio fijo
 - Servicio móvil (terrestre, marítimo, aeronáutico)
 - Servicio de radiodifusión
 - Otros: radiodeterminación, radioastronomía, aficionados, frecuencias patrón, señales horarias ...
- Explotación de los servicios:
 - Terrenal
 - Por satélite

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modos de explotación

- Símplex
 - transmisión alternativa en uno u otro sentido del canal de comunicación
- Dúplex
 - Transmisión simultánea en los dos sentidos del canal de comunicación
- Semidúplex
 - Símplex en un extremo del canal y dúplex en otro u otros



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Gestión de las frecuencias radioeléctricas (I)

- El reglamento de radiocomunicaciones de la UIT establece los mecanismos de coordinación internacional para la utilización óptima del espectro
 - Atribución: la UIT atribuye las bandas de frecuencias a los diferentes servicios
 - Adjudicación: la UIT adjudica frecuencias a los países para su utilización por los servicios de radiocomunicación propios
 - Asignación: las administraciones de los países asignan el canal radioeléctrico (frecuencia y ancho de banda) a las estaciones autorizadas para emitir

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Gestión de las frecuencias radioeléctricas (II)

- Banda asignada: (anchura necesaria) + (2 × tolerancia de frecuencia) + (2 × desplazamiento Doppler en satélites)
- Frecuencia asignada: valor central de la banda asignada
- Nomenclatura de frecuencias. Unidades empleadas:
 - KHz de 3 a 3000 KHz
 - MHz de 3 a 3000 MHz
 - GHz de 3 a 3000 GHz
 - THz frecuencias superiores

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Gestión de las frecuencias radioeléctricas (III)

- Se definen 9 bandas, $N = 4 \rightarrow 12$
- Cada banda abarca: 0.3×10^N a 3×10^N Hz.
- También se designan por sus abreviaturas en inglés o por su designación métrica

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Gestión de las frecuencias radioeléctricas (IV)

Número de la banda (N)	Símbolos (en inglés)	Gamas de frecuencias (excluido el límite inferior pero incluido el superior)	Designación métrica correspondiente	Abreviaturas métricas para las bandas
4	VLF	3 a 30 KHz	Ondas miriamétricas	B. Mam
5	LF	30 a 300 KHz	Ondas kilométricas	B. km
6	MF	300 a 3.000 KHz	Ondas hectométricas	B. hm
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas	B. dam
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas	B. m
9	UHF	300 a 3.000 MHz	Ondas decimétricas	B. dm
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas	B. cm
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas	B. mm
12		300 a 3.000 GHz	Ondas decimilimétricas	

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Gestión de las frecuencias radioeléctricas (V)

- Existe otra designación en bandas I-VI para radiodifusión y TV.

Banda I	41 - 68 MHz
Banda II	87,5 - 108 MHz
Banda III	162 - 230 MHz
Banda IV	470 - 582 MHz
Banda V	582 - 960 MHz
Banda VI	12 GHz (radiodifusión por satélite).

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Gestión de las frecuencias radioeléctricas (VI)

- En microondas se emplea la denominación propia de radar

<i>Banda</i>	<i>Frecuencia (GHz)</i>
L	1 - 2
S	2 - 4
C	4 - 8
X	8 - 12
Ku	12 - 18
K	18 - 27
Ks	27 - 40
mm	40 - 300

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Gestión de las frecuencias radioeléctricas (VII)

- Cuadro de atribución de frecuencias. El mundo aparece dividido en tres regiones. Los servicios se distinguen en primarios, permitidos y secundarios, con diferentes prioridades y derechos
 - Secundarios: no pueden interferir a primarios y permitidos, ni reclamar protección frente a interferencias de éstos
 - Primarios y permitidos: mismos derechos, pero el primario tiene prioridad frente al permitido a la hora de adjudicar frecuencias
- La administración española ha adoptado el cuadro de la UIT añadiendo notas específicas para España. El resultado es el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Gestión de las frecuencias radioeléctricas (VIII)

MHz 420 — 470			MHz 420-470		
Atribución a los Servicios			ATRIBUCIÓN NACIONAL	OBSERVACIONES	USOS
Región 1	Región 2	Región 3			
420 — 430	FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización 651 652 653		420-430 FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico Radiolocalización	UN-31 UN-73 UN-74	M M
430 — 440	AFICIONADOS RADIOLOCALIZACIÓN 653 654 655 656 657 658 659 661 662 663 664 665	430 — 440 RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 653 658 659 660 663 664	430-440 AFICIONADOS RADIOLOCALIZACIÓN	661 RR UN-30 UN-32 * USOS: E y C (según nota UN)	* M
440 — 450	FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización 651 652 653 666 667 668		440-450 FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico Radiolocalización	668 RR UN-31 UN-73	M M M
450 — 460	FIJO MÓVIL 653 668 669 670		450-460 FIJO MÓVIL	668, 669 RR UN-33 TELEFONÍA MÓVIL AUTOMÁTICA UN-31 UN-73 UN-78 UN-84 * USOS: M y C (según notas UN)	* *
460 — 470	FIJO MÓVIL Meteorología por satélite (espacio-Tierra) 669 670 671 672		460-470 FIJO MÓVIL Meteorología por satélite (espacio-Tierra)	669, 671 RR UN-31 UN-33 TELEFONÍA MÓVIL AUTOMÁTICA UN-34 RADIOBUSQUEDA UN-73 UN-75	M M Rx

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Frecuencias radioeléctricas: usos militares (I)

ATRIBUCIÓN A LOS SERVICIOS según el RR de la UIT		
2700 - 4800 MHz		
Región 1	Región 2	Región 3
2700 - 2900	RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA 5.337 Radiolocalización 5.423 5.424	
2900 - 3100	RADIOLOCALIZACIÓN 5.424A RADIONAVEGACIÓN 5.426 5.425 5.427	
3100 - 3300	RADIOLOCALIZACIÓN Exploración de la Tierra por satélite (activo) Investigación espacial (activo) 5.149 5.428	
3300 - 3400 RADIOLOCALIZACIÓN 5.149 5.429 5.430	3300 - 3400 RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados Fijo Móvil 5.149	3300 - 3400 RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.149 5.429

ATRIBUCIÓN NACIONAL	USOS	OBSERVACIONES
2700 - 4800 MHz		
2700 - 2900 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA Radiolocalización	R R	5.337 5.423 UN-53, UN-154
2900 - 3100 RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN	R R	5.424A 5.425 5.426 5.427
3100 - 3300 RADIOLOCALIZACIÓN Exploración de la Tierra por satélite (activo) Investigación espacial (activo)	R R R	5.149 UN-53, UN-154
3300 - 3400 RADIOLOCALIZACIÓN	R	5.149 UN-53, UN-154

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Frecuencias radioeléctricas: usos militares (II)

UN - 53 Radares entre 1 y 5 GHz

Las bandas de frecuencias 1215-1350 MHz, 3,1-3,4 GHz y 5,255-5,350 GHz se destinan preferentemente a usos del Estado para sistemas del Ministerio de Defensa en el servicio de radiolocalización con carácter primario.

Deberá tenerse en cuenta el uso de la banda 1215-1350 MHz por el sistema de navegación por satélite GALILEO a partir de la entrada en servicio del mismo. Ver la nota UN-122.

La banda de frecuencias 2,7-2,9 GHz se destina preferentemente a usos del Estado para sistemas del Ministerio de Defensa en el servicio de radiolocalización con carácter secundario.

Referente al servicio de radiolocalización en la banda de frecuencias 3,4-3,6 GHz véase la nota UN-107.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Emisión: parámetros y características (I)

- Parámetros de emisión:
 - Clase de emisión: tipo de modulación, naturaleza de la moduladora, tipo de información
 - Anchuras de banda necesaria y ocupada
 - Tolerancia de frecuencia
 - Emisiones no deseadas (no esenciales o fuera de banda)
 - Potencia de cresta de la envolvente
 - Potencia media de la onda modulada
 - Potencia de la portadora
 - Polarización (lineal, circular)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Emisión: parámetros y características (II)

- Denominación de las emisiones: clase de emisión (5 caracteres)
 - Modulación: ninguna (N), Amplitud (A), BLU con portadora completa (H), BLR (C), frecuencia (F)
 - Naturaleza de la moduladora: ninguna (0), 1 canal digital (1), 1 canal analógico (3), 2 canales múltiplex (8)
 - Tipo de información: ninguna (N), datos (D), fonía (E), video (F)
 - Detalles moduladora: sonido calidad comercial (J), sonido calidad radiodifusión monoaural (G), sonido calidad radiodifusión estéreo (H), video color (N)
 - Características múltiplex: ninguno (N), frecuencia (F), tiempo (T)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Emisión: parámetros y características (III)

- Denominación de las emisiones: frecuencia (4 caracteres)
 - Frecuencia con 3 dígitos y una letra: H, K, M, G
- Ejemplos:
 - 6K00 A3EJN
 - 3K00 H3EJN
 - 16K0 F3EJN
 - 256K F8EHF
 - 6M25 C3FNN
 - 750K F3EGN

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Propagación: parámetros y características (I)

- Características de propagación: modos de propagación
 - Onda de superficie (OS)
 - Onda ionosférica (OI)
 - Onda espacial (OE)
 - Directa (OD)
 - Reflejada (OR)
 - Multitrayecto (ORM)
 - Onda de dispersión troposférica

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Propagación: parámetros y características (II)

- Fenómenos físicos que condicionan la propagación
 - Reflexión
 - Refracción
 - Difracción
 - Dispersión
 - Absorción

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Recepción: parámetros y características

- Parámetros de recepción
 - Intensidad de campo mínima utilizable o campo a proteger
 - Valor mínimo del campo para una determinada calidad de recepción.
 - Intensidad de campo utilizable
 - Además del campo a proteger, tiene en cuenta el efecto de las interferencias
 - Condiciones de recepción: instalación de recepción, tipo de transmisión, banda de frecuencias, condiciones de explotación (zona, hora, época del año)
 - Interferencias: efecto de energías no deseadas debidas a emisiones, radiaciones o inducciones que se manifiesta como degradación de calidad, falseamiento o pérdida de información
 - Relación de protección en RF: relación señal deseada/interferencia en condiciones concretas para cierta calidad de recepción en un % del tiempo determinado

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Explotación: parámetros y características

- Parámetros de explotación
 - Zona de cobertura de un transmisor: es la zona en la cual el campo está por encima de un umbral para un % del tiempo. Puntual, sectorial o circular. Puede variar con las condiciones de recepción
 - Zona de servicio: concepto administrativo, se garantiza una protección del servicio contra interferencias

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



**CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR**



**CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR**



Tema 2

Modulaciones

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Introducción (I)

- Objetivo de un sistema de comunicación: transmitir información a través de un canal de comunicación que separa transmisión de recepción
- Banda base: banda de frecuencias de la señal original que lleva la información
- Utilización eficiente del canal de comunicación: desplazamiento de las frecuencias 'banda base' a otro rango de frecuencias más adecuado para la transmisión ⇒ MODULACIÓN

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Introducción (II)

- Modulación: modificación de alguna de las características de una portadora en función de una señal de información
 - Señal banda base de información: señal moduladora
 - Señal de radiofrecuencia cuyas características se van a variar: señal portadora (típicamente sinusoidal)
 - Señal resultante del proceso de modulación: señal modulada
- En recepción, proceso inverso para recuperar la señal de información original \Rightarrow DEMODULACIÓN

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Introducción (III)

- Dependiendo de la naturaleza de la señal moduladora:
 - Modulaciones analógicas
 - AM, FM, PM
 - Modulaciones digitales
 - ASK, PSK, FSK, QAM, OFDM....

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulaciones analógicas

- Dependiendo de la característica modificada en la portadora:
 - Modulación de amplitud (AM): amplitud de la portadora varía en función de la moduladora
 - AM convencional
 - DBL
 - BLU
 - BLR
 - Modulación angular: ángulo de la portadora varía en función de la moduladora
 - Modulación de fase (PM): varía la fase
 - Modulación de frecuencia (FM): varía la frecuencia

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación AM

- La señal moduladora $m(t)$ con ancho de banda W
- La señal portadora $c(t)$:
 - $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$
 - A_c : amplitud de la portadora
 - f_c : frecuencia de la portadora ($f_c > W$)
 - ϕ_c fase de la portadora (por simplificación se considera cero)
- $c(t)$ y $m(t)$ independientes

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



AM convencional (I)

- La señal modulada $s(t)$:

$$s(t) = A_c[1 + am(t)]\cos(2\pi f_c t)$$

a : índice de modulación

- Para poder recuperar $m(t)$ con un detector de envolvente:

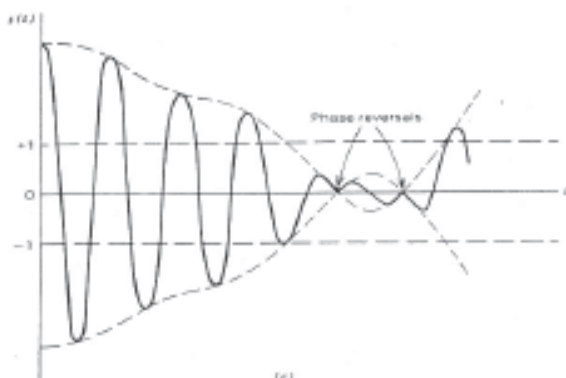
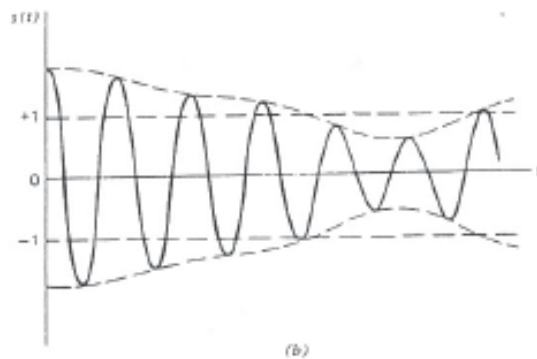
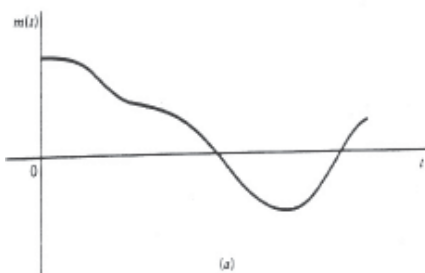
$$|am(t)| \leq 1 \forall t \Rightarrow 1 + am(t) \geq 0 \Rightarrow \text{envolvente de } s(t): A_c[1 + am(t)]$$

- Si no se cumple, habrá inversión de fase cada vez que $(1 + am(t))$ cambie de signo: distorsión de envolvente \Rightarrow sobremodulación. No se usa detector de envolvente, hace falta un detector coherente

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



AM convencional (II)



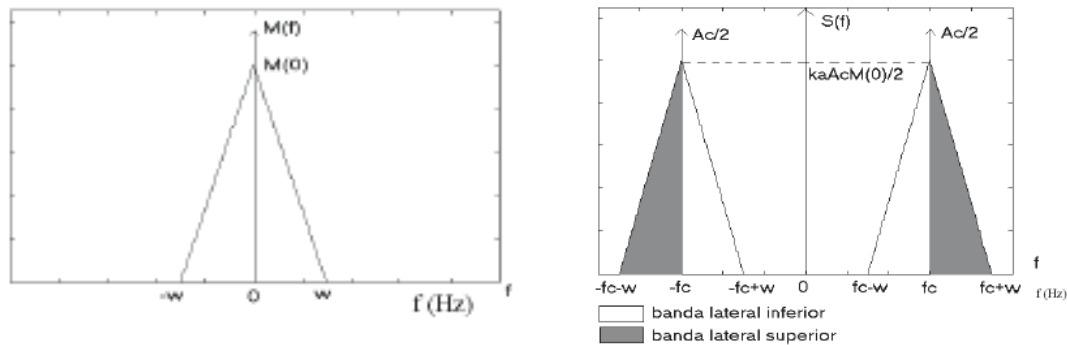
- (a): señal banda base $m(t)$
(b): señal AM sin sobremodulación
(c): señal AM con sobremodulación

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



AM convencional (III)

- Representación en frecuencia:



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



AM convencional (IV)

- Tres componentes:
 - Portadora ($\pm f_c$)
 - Banda lateral superior ($f_c \rightarrow f_c + W$, $-f_c \rightarrow -f_c - W$)
 - Banda lateral inferior ($f_c - W \rightarrow f_c$, $-f_c + W \rightarrow -f_c$)
- Ancho de banda de la señal modulada: $B_T = 2W$
- La potencia de la señal se distribuye entre la portadora y las bandas laterales:

$$P_T = P_c + P_{BL} = \frac{A_c^2}{2} + \frac{A_c^2}{2} a^2 P_m$$

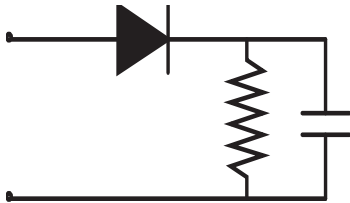
$$\nu = \frac{P_{BL}}{P_T} = \frac{a^2 P_m}{1 + a^2 P_m} \text{ eficiencia de la modulación}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



AM convencional (V)

- Demodulación:
 - detector de envolvente (sencillo y barato)

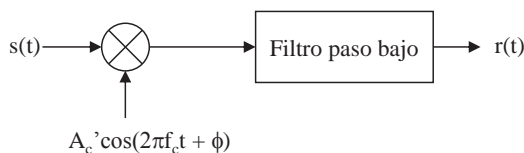


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



AM convencional (VI)

- detección coherente



$$y(t) = A_c [1 + am(t)] \cos(2\pi f_c t) A_c' \cos(2\pi f_c t + \phi) = \frac{A_c A_c'}{2} [1 + am(t)] \cos(\phi) +$$

$$\frac{A_c A_c'}{2} [1 + am(t)] \cos(4\pi f_c t + \phi)$$

$$r(t) = \frac{A_c A_c'}{2} [1 + am(t)] \cos(\phi)$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



AM convencional (VII)

- Problema: conocer la fase del oscilador de transmisión en recepción:
 - Si $\phi = 0$, la señal recuperada tendrá máxima amplitud
 - Si $\phi = \pi/2$, no recuperamos nada
 - Problema añadido si ϕ no es constante
- Solución: utilización de PLLs \Rightarrow diseñados para engancharse en fase a la portadora, son esquemas de recepción más complejos y costosos
- Bucle de Costas

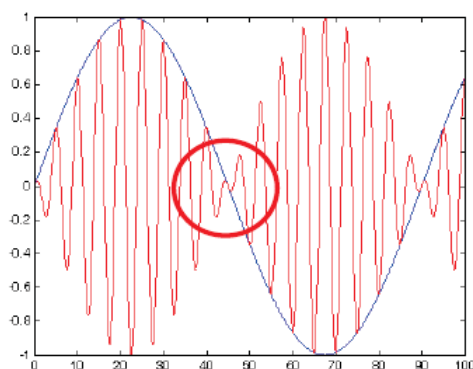
CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



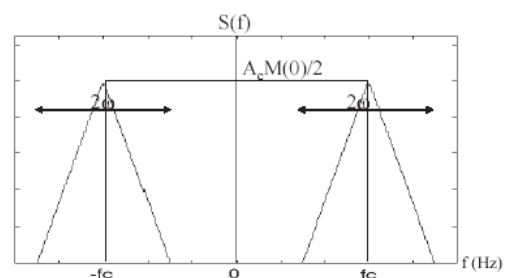
Doble banda lateral (I)

- Con AM convencional se desperdicia potencia \Rightarrow sólo una parte de la potencia transmitida lleva información
- Solución: suprimir la componente de portadora
- La señal modulada $s(t)$:

$$s(t) = m(t)c(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t)$$



- Representación en frecuencia:

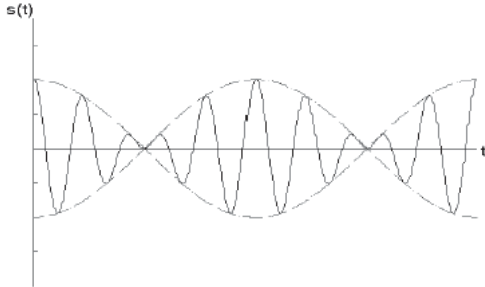


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Doble banda lateral (II)

- $s(t)$ cambia de fase cada vez que $m(t)$ cruza por 0 \Rightarrow la envolvente ya no sigue a la señal moduladora



$$B_T = 2W$$

$$P_T = P_{BL} = \frac{A_c^2}{2} P_m$$

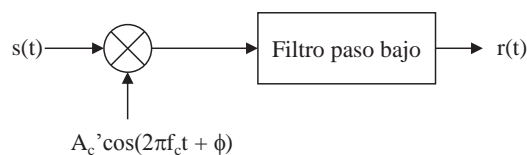
$$\nu = \frac{P_{BL}}{P_T} = 1$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Doble banda lateral (III)

- Demodulación:
 - Detector coherente



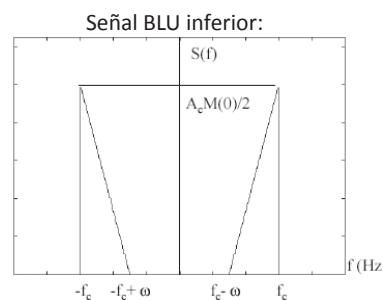
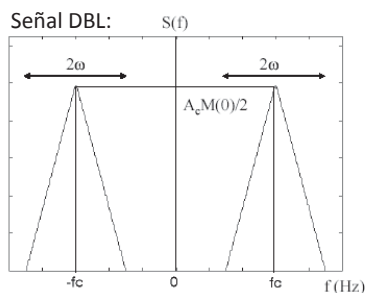
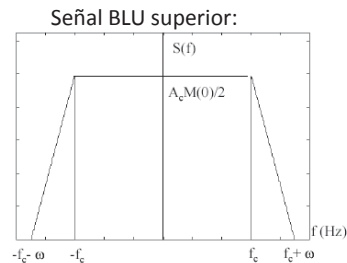
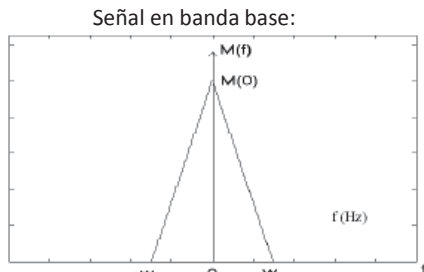
$$r(t) = \frac{A_c A_c'}{2} m(t) \cos(\phi)$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Banda lateral única (I)

- En lugar de transmitir las dos bandas laterales, sólo se transmite una de ellas (superior o inferior)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Banda lateral única (II)

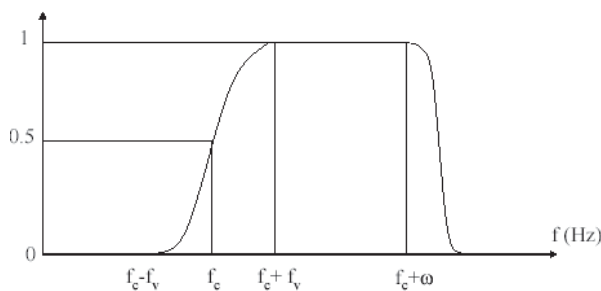
- Ventajas:
 - $B_T = W$
 - $v = 1$
- Desventajas:
 - Mayor coste y complejidad
 - La señal moduladora debe ser nula en torno al origen (sin componente de continua) \Rightarrow no vale para señal de televisión
- Demodulación: detección coherente
- Esta modulación es altamente sensible a los errores de fase (diferencia de fase entre el oscilador de transmisión y el de recepción): errores de fase producen distorsión de fase.
 - En la señal de voz no es demasiado importante
 - En música o vídeo es inaceptable
- Se suele transmitir una portadora piloto junto con la señal para que el esquema de demodulación se enganche en fase

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Banda lateral residual

- Se transmite completamente una banda lateral y una pequeña parte de la otra banda
- De esta forma, no se anulan las componentes de baja frecuencia de la señal moduladora (frecuencias en torno a f_c en la señal modulada)
- Ejemplo de filtro:



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulaciones angulares (I)

- El ángulo de la señal portadora se modifica en función de la variación de la señal moduladora
- Las modulaciones angulares permiten discriminar más fácilmente el ruido y las interferencias que las de amplitud
- Penalización: ancho de banda \Rightarrow negociación ancho de banda – prestaciones frente a ruido
- Dos tipos, relacionados:
 - Modulación de frecuencia (FM)
 - Modulación en fase (PM)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulaciones angulares (II)

- La señal portadora $c(t)$:

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

- La señal modulada $s(t)$:

$$s(t) = A_c \cos(\theta_i(t)) = A_c \cos(2\pi f_c t + \phi(t))$$

$\theta_i(t)$ fase instantánea

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} = f_c + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \text{ frecuencia instantánea}$$

- $\theta_i(t)$ variará en función de la señal moduladora $m(t)$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulaciones angulares (III)

- PM: la fase de la señal modulada varía de forma lineal con la señal $m(t)$

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t)$$

k_p : sensibilidad en fase

- La señal modulada:

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)]$$

- La moduladora aparece en el ángulo de la señal modulada \Rightarrow no hay relación lineal entre ambas

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulaciones angulares (IV)

- FM: la frecuencia instantánea de la señal modulada varía de forma lineal con $m(t)$

$$f_i(t) = f_c + k_f m(t) \Rightarrow \theta_i(t) = 2\pi \int f_i(t) dt = 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int m(t) dt$$

k_f : sensibilidad en frecuencia

- La señal modulada:

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int m(t) dt]$$

- No hay relación lineal entre la señal modulada y la moduladora

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



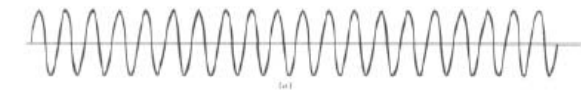
Modulaciones angulares (V)

- Diferencias de estas modulaciones con las modulaciones en amplitud:
 - No hay regularidad en los cruces por cero de la señal modulada
 - La envolvente es constante e igual a la amplitud de la portadora
 - Las señales PM y FM sólo se pueden distinguir cuando se conoce $m(t)$

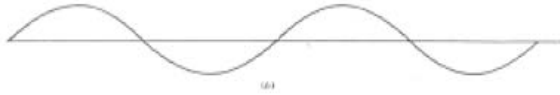
CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



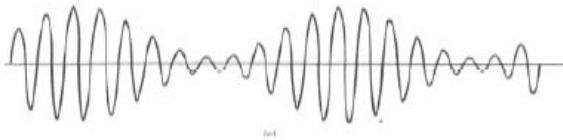
Modulaciones angulares (VI)



Portadora



Moduladora sinusoidal



Señal modulada en amplitud



Señal modulada en fase



Señal modulada en frecuencia

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ancho de banda en FM (I)

- Modulación en frecuencia: proceso no lineal ($s(t)$ función no lineal de $m(t)$) \Rightarrow los espectros de $s(t)$ y $m(t)$ no están relacionados de forma sencilla, como en modulación en amplitud
- Para calcular el ancho de banda de una señal FM:
 - $\Delta f = k_f A_m$, con A_m amplitud máxima de la señal moduladora
 - Representa la máxima desviación de frecuencia respecto a la frecuencia de la portadora
 - No depende de la frecuencia de la portadora, sino de la amplitud de la moduladora
 - Relación de desviación: $D = \frac{\Delta f}{W}$
 - W : ancho de banda de la señal moduladora

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ancho de banda en FM (II)

- Teóricamente, FM tiene un número infinito de bandas laterales \Rightarrow ancho de banda absoluto infinito
- En la práctica: ancho de banda finito compatible con un determinado nivel de distorsión \Rightarrow ancho de banda efectivo de transmisión B_T

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



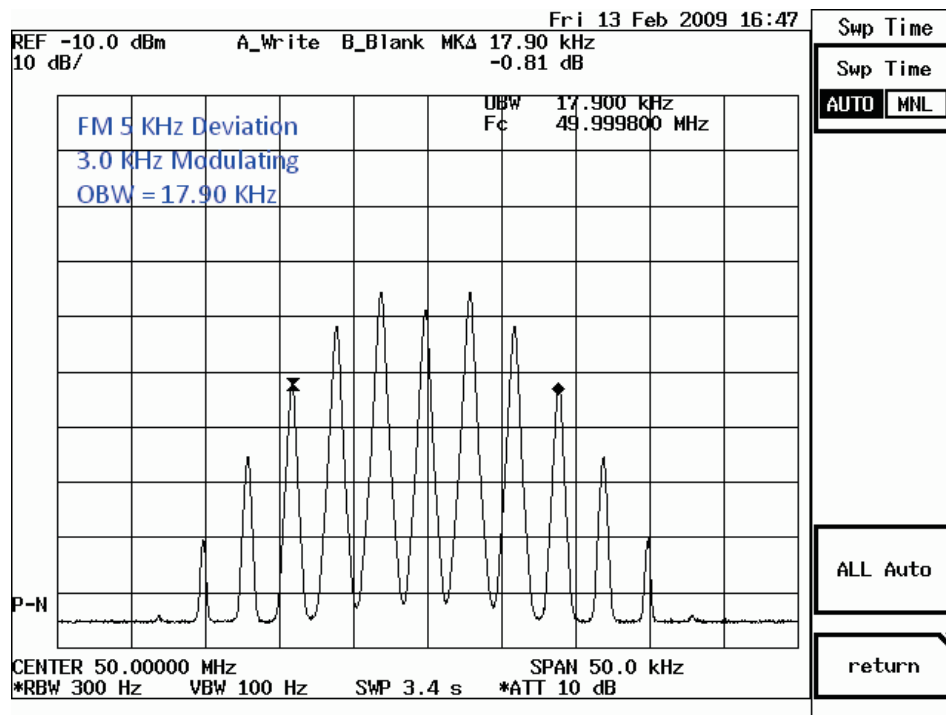
Ancho de banda en FM (III)

- Regla de Carson:
$$B_T = 2(\Delta f + W) = 2\Delta f \left(1 + \frac{1}{D}\right) = 2W(1 + D)$$
 - Ancho de banda estimado por debajo del real
- Criterio del 1%:
 - B_T ha de contener todas las bandas laterales que tengan amplitud mayor al 1% de la amplitud de la portadora sin modular
 - Ancho de banda estimado por encima del real
- En la práctica, se usa la media de los obtenidos por los dos criterios

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ancho de banda en FM (IV)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Comparación AM - FM

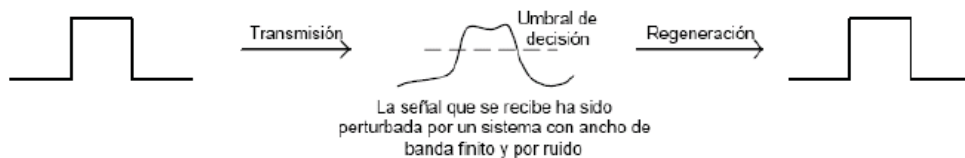
- Ventajas FM:
 - FM permite uso de amplificadores de potencia altamente no lineales para aprovechar la máxima potencia \Rightarrow uso en enlaces de microondas
 - El efecto del paso de una señal FM por un sistema no lineal, si se filtra de modo adecuado, es simplemente una modificación de amplitud
 - La señal FM no se ve afectada por la distorsión debida a no linealidades de la amplitud del canal, a diferencia de la señal AM
 - FM más robusta frente al ruido que AM
- Desventajas FM:
 - FM es muy sensible a no linealidades de fase
 - Ocupa mayor ancho de banda
 - Los esquemas de transmisores y receptores son más complejos

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Conversión A/D (I)

- La gran mayoría de las señales son analógicas en origen
- Ventajas sistemas digitales:
 - Mayor calidad: regeneración de la señal



– Factores tecnológicos:

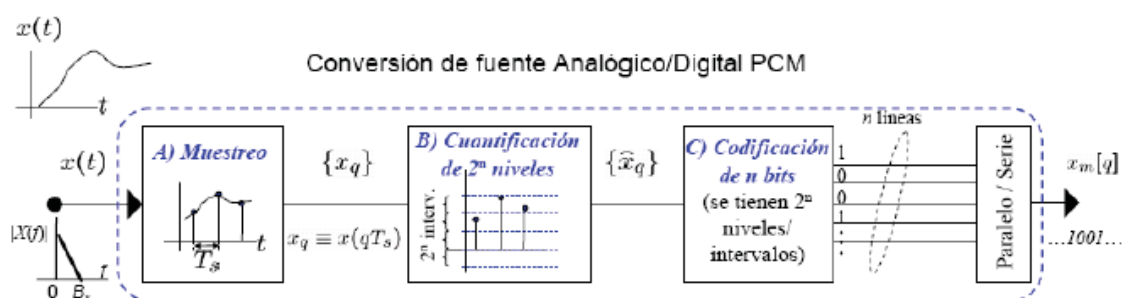
- Sencillo
- Integrable
- independiente del origen de información: con el mismo formato, se manejan distintos tipos de información → sistemas de funcionalidad múltiple

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Conversión A/D (II)

- 3 pasos:
 - Muestreo de la señal analógica
 - Cuantificación de los valores muestreados
 - Codificación de los valores cuantificados

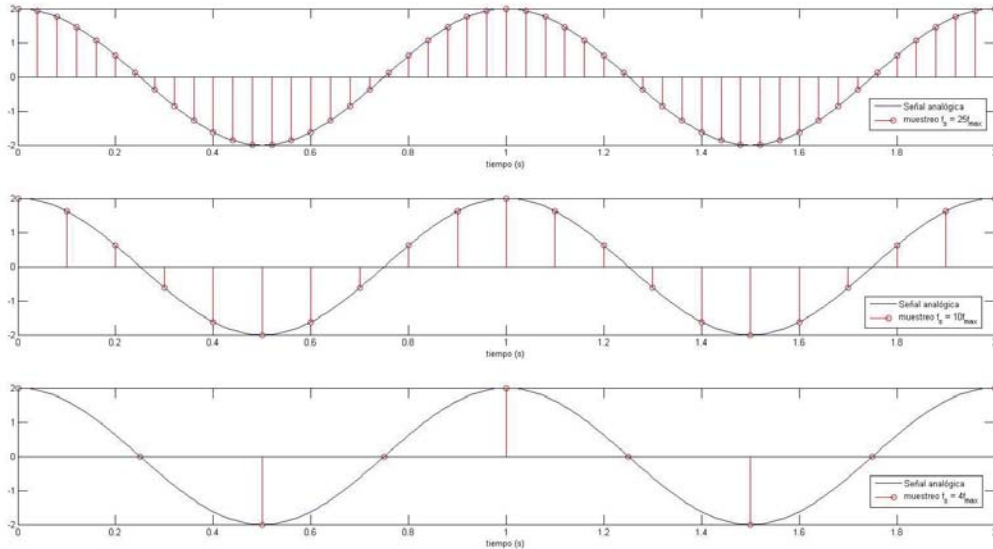


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Muestreo (I)

- Se toman valores de la señal analógica $x(t)$ a intervalos T_s



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Muestreo (II)

- Criterio de Nyquist:
 - Una señal $x(t)$ limitada en banda se puede recuperar sin pérdidas a partir de sus muestras siempre que se cumpla:

$$f_s = \frac{1}{T_s} \geq 2f_{\max}$$

- Siendo f_{\max} la máxima frecuencia del espectro de la señal $x(t)$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR

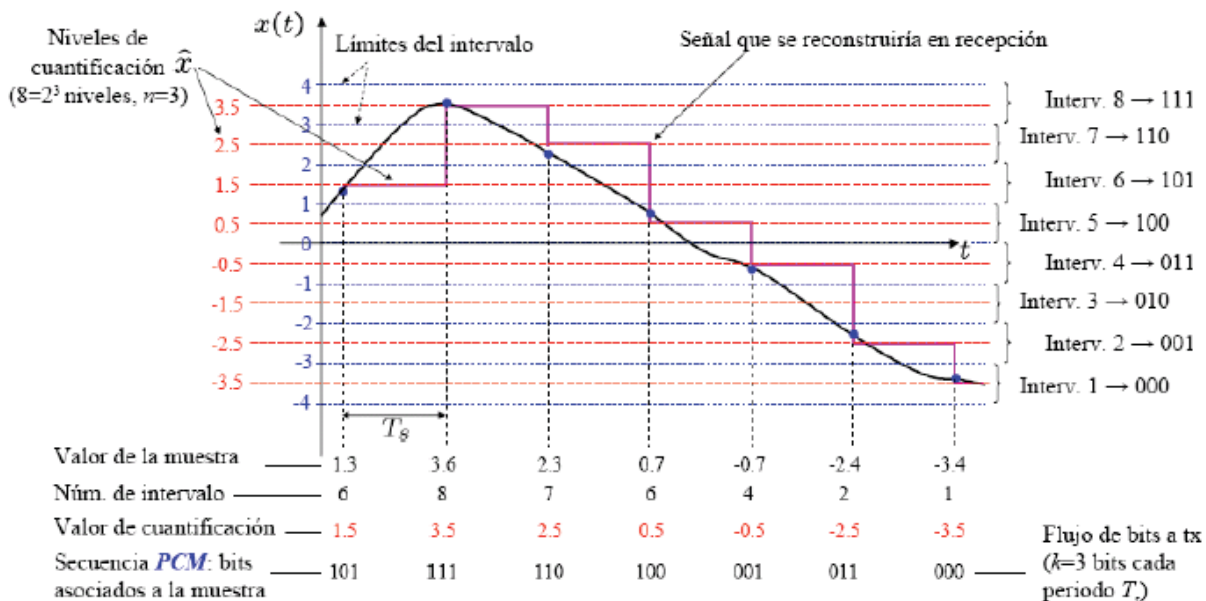


Cuantificación y codificación(I)

- Una señal analógica:
 - Es continua en tiempo
 - Es continua en amplitud
- Una vez muestreada la señal $x(t)$, a cada una de las muestras x_q hay que asignarle un valor dentro de un conjunto finito \rightarrow cuantificación \hat{x}_q
 - Habrá una diferencia entre el valor real de la muestra y su valor cuantificado: error de cuantificación
 - La señal original ya no podrá ser recuperada: $\hat{x}_q \neq x_q$



Cuantificación y codificación (II)



Modulaciones digitales (I)

- Objetivo: convertir los bits en señales adecuadas para su transmisión
 - El flujo de bits se agrupa en grupos de k bits, llamados símbolos
 - Para cada símbolo, se elige una señal $s_m(t)$ diferente, de duración T_s (periodo de símbolo)
 - 1 símbolo = k bits $\rightarrow M = 2^k$ símbolos distintos
 - Correspondencia biunívoca entre un símbolo y la señal correspondiente

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulaciones digitales (II)

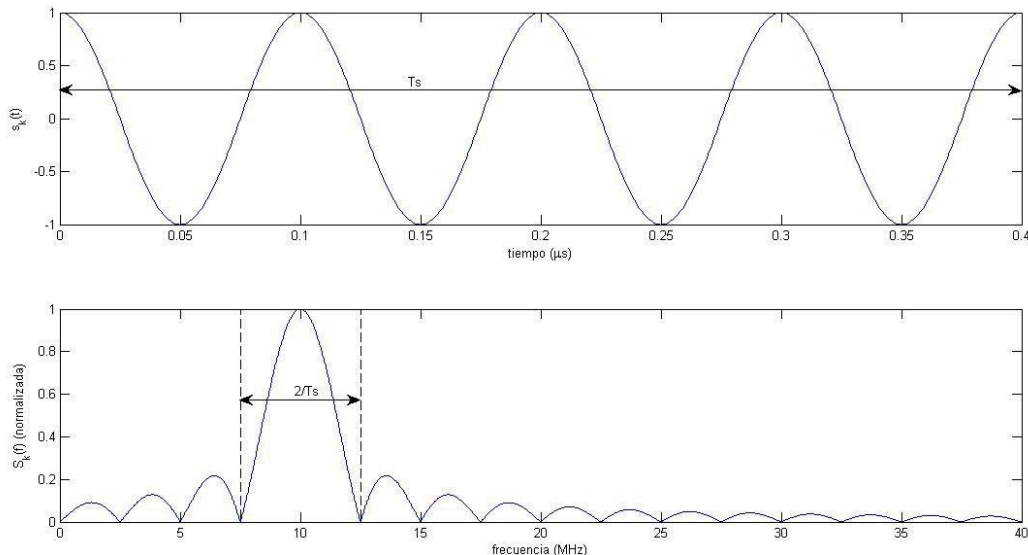
- Parámetros de interés:
 - Régimen binario o tasa de bits por segundo:
 - $R_b = k/T_s$
 - Ancho de banda
 - Probabilidad de error y tasa de error de bit (BER)
 - Relacionado con la energía de la señal portadora del símbolo y el ruido presente en el canal
 - Las interferencias también influyen
 - Interferencia entre símbolos
 - Debida al multitrayecto

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulaciones digitales (III)

- A mayor régimen binario, mayor ancho de banda



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación ASK (I)

- ASK (Amplitude Shift Keying) o modulación por desplazamiento en amplitud:

$$s_m(t) = A_m \cos(2\pi f_c t) \quad m = 0, 1, \dots, M - 1$$

- Ejemplo: 4 – ASK

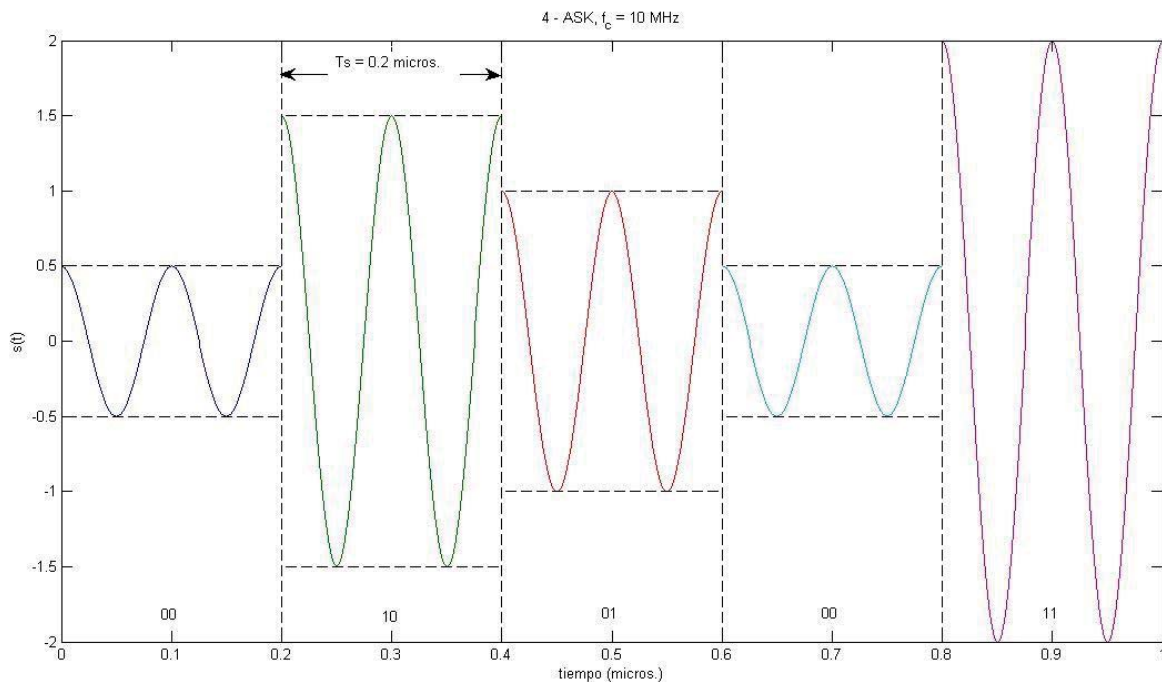
– $M = 4 \rightarrow k = 2$

Bits	00	01	10	11
A_m	$A_0 = 0.5$	$A_1 = 1$	$A_2 = 1.5$	$A_3 = 2$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación ASK (II)



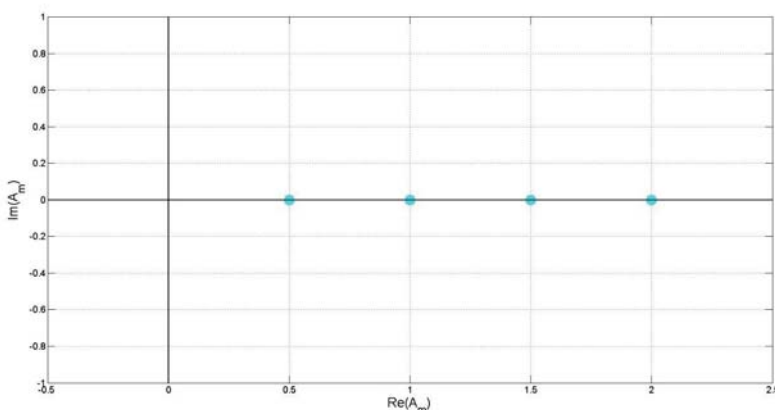
CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación ASK (III)

- Constelación: representación en diagrama polar del fasor de cada uno de los posibles símbolos

$$s(t) = \text{Re}\{\mathbf{S}_m e^{j2\pi f_c t}\}, \mathbf{S}_m = A_m$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación PSK (I)

- PSK (Phase Shift Keying) o modulación por desplazamiento en fase:

$$s_m(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \phi_m) \quad m = 0, 1, \dots, M - 1$$

- Ejemplo: QPSK (4 – PSK)

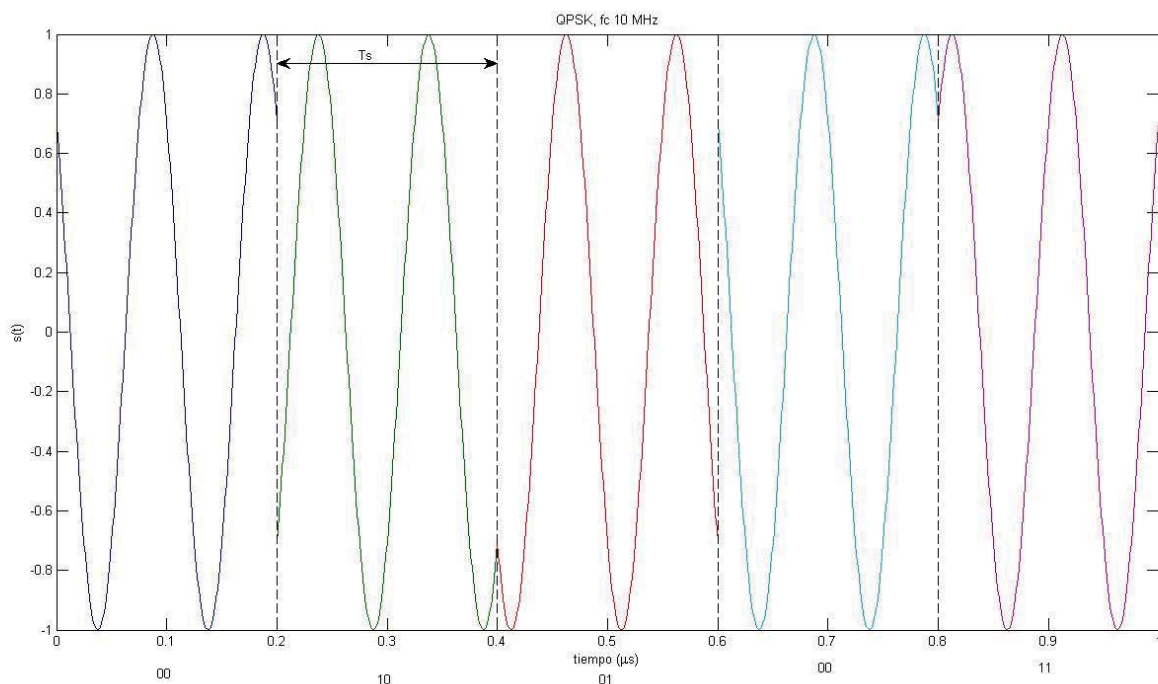
– $M = 4 \rightarrow k = 2$

Bits	00	01	10	11
ϕ_m	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación PSK (II)



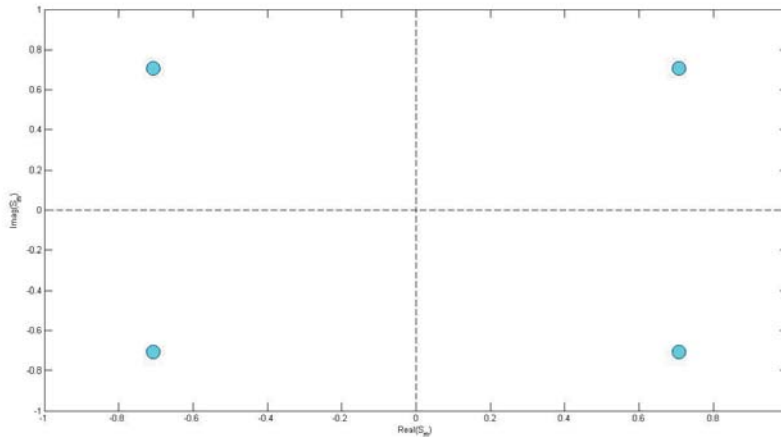
CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación PSK (III)

- Constelación PSK:

$$s_m(t) = \text{Re}\{\mathbf{S}_m e^{j2\pi f_c t}\}, \mathbf{S}_m = A_c e^{j\phi_m}$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación FSK(I)

- FSK: Frequency Shift Keying o modulación por desplazamiento de frecuencia:

$$s_m(t) = A \cos(2\pi f_m t)$$

$$f_m = f_c + \frac{(2m - (M - 1))}{2} \Delta f,$$

$$m = 0, 1, \dots, M - 1$$

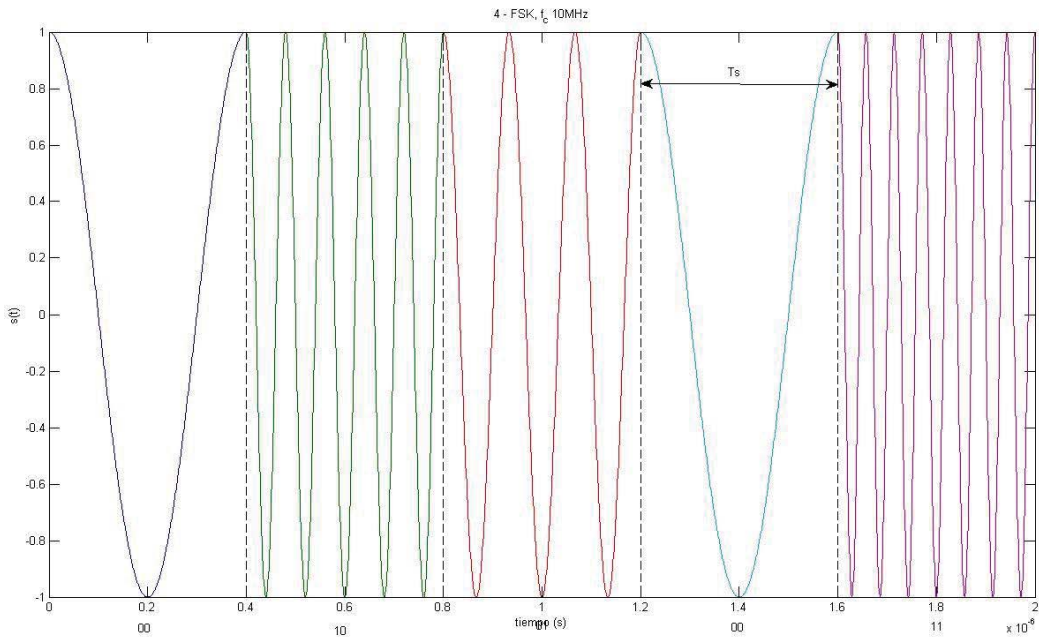
- Ejemplo: 4 – FSK, $\Delta f = f_c/100$
– $M = 4 \rightarrow K = 2$

Bits	00	01	10	11
f_m	$f_c - \frac{3}{2}\Delta f$	$f_c - \frac{1}{2}\Delta f$	$f_c + \frac{1}{2}\Delta f$	$f_c + \frac{3}{2}\Delta f$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación FSK (II)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación QAM (I)

- QAM (Quadrature Amplitude Modulation) o modulación de amplitud en cuadratura

$$s_m(t) = A_{Ik} \cos(2\pi f_c t) - A_{Ck} \sin(2\pi f_c t)$$

$$m = 0, 1, \dots, M - 1, \quad k = 0, 1, \dots, K - 1$$

- Ejemplo: 16 QAM

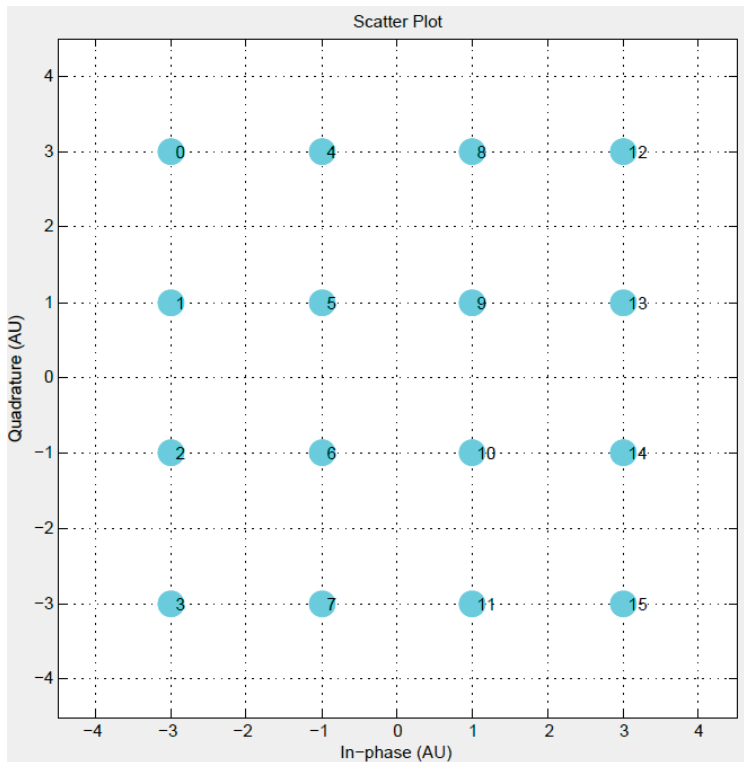
– $M = 16 \rightarrow K = 4$

A_{Ck}, A_{Ik}	- 3	-1	1	3
3	0000	0100	1000	1100
1	0001	0101	1001	1101
-1	0010	0110	1010	1110
-3	0011	0111	1011	1111

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación QAM(II)



$$s_m(t) = \text{Re}(\mathbf{S}_m e^{j2\pi f_c t})$$

$$\mathbf{S}_m = A_{Ik} + jA_{Ck}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



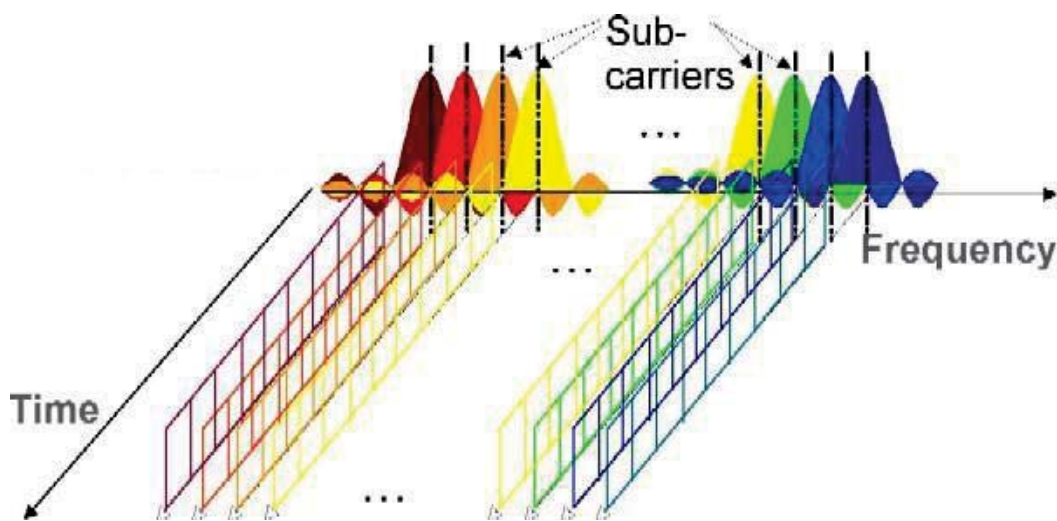
Modulación OFDM (I)

- Utiliza múltiples portadoras, cada una de ellas modulada con una de las modulaciones anteriores
- Se emiten todas a la vez
- Se recupera la información a partir del espectro de frecuencia

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación OFDM (II)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación OFDM (III)

- Se alcanzan regímenes binarios altos con periodos de símbolo altos
- Funciona muy bien ante el fenómeno del multitrayecto
 - T_s alto
 - Inserción de periodos de guarda
- Permite trabajar con canales selectivos en frecuencia

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Modulación OFDM(IV)

- Sistemas que utilizan OFDM
 - La televisión digital terrestre DVB-T, también conocida como TDT
 - La radio digital DAB
 - La radio digital de baja frecuencia DRM
 - El protocolo de enlace ADSL
 - El protocolo de red de área local IEEE 802.11a/g, también conocido como Wireless LAN
 - El sistema de transmisión inalámbrica de datos WiMAX

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Técnicas de acceso múltiple

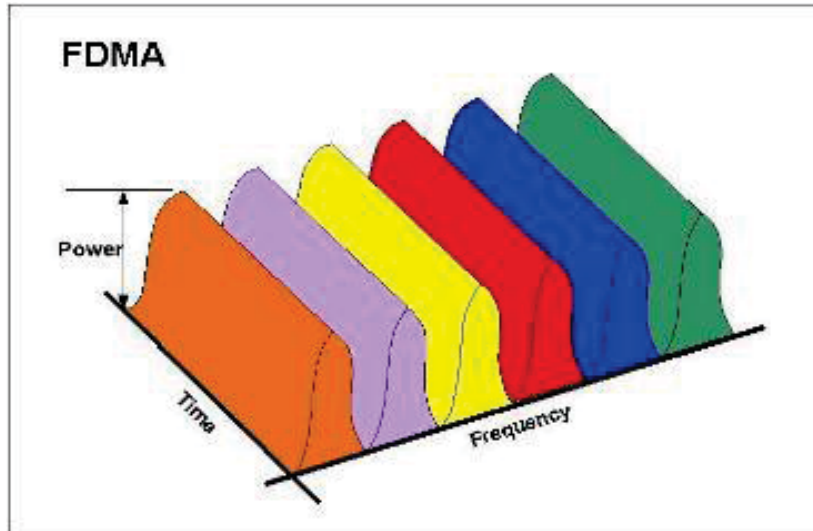
- Permiten múltiples emisiones compartiendo el mismo canal
- Tipos:
 - Multiplexado en frecuencia (FDMA)
 - Multiplexado en tiempo (TDMA)
 - Multiplexado en código (CDMA)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Multiplexado en frecuencia

- Todas las emisiones al mismo tiempo, separadas en frecuencia

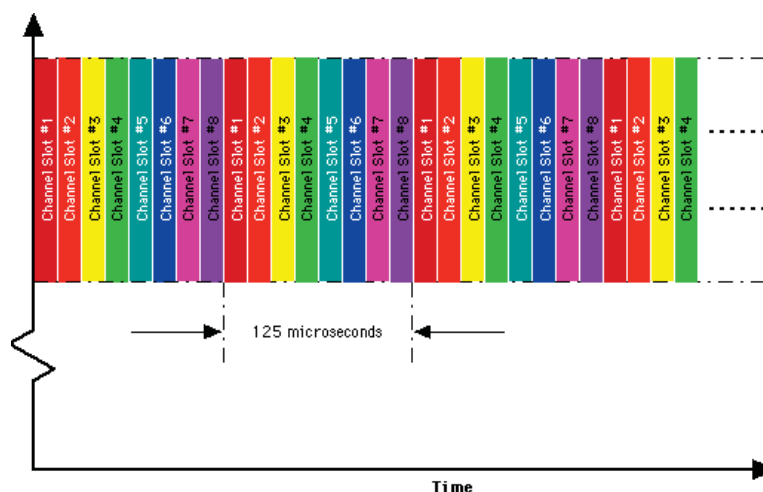


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Multiplexado en tiempo

- Distintas emisiones en la misma frecuencia, en instantes de tiempo (slots) distintos

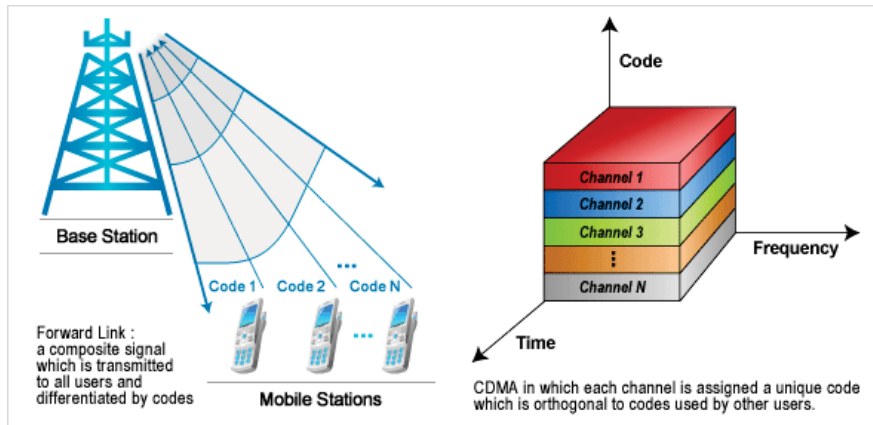


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Multiplexado en código

- Todas las emisiones al mismo tiempo y compartiendo frecuencia, códigos distintos para poder discriminar



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



**CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR**



**CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR**



Tema 3

Radiación y ondas guiadas

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Introducción

- Trabajar con las expresiones de los campos es muy complejo → caracterización de la antena de forma más sencilla.
- Antena: caja negra, caracterizada por una serie de parámetros, que sirven para calcular los balances de enlace en los sistemas radio
- Parámetros más importantes:
 - Impedancia de entrada
 - Diagrama de radiación
 - Ganancias
 - Polarización

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



El elemento radiante

- Caracterización circuital del elemento radiante:
 - Impedancia de entrada de la antena:

$$Z_a = R_a + jX_a \quad \text{Si la antena está sintonizada en frecuencia: } X_a = 0$$

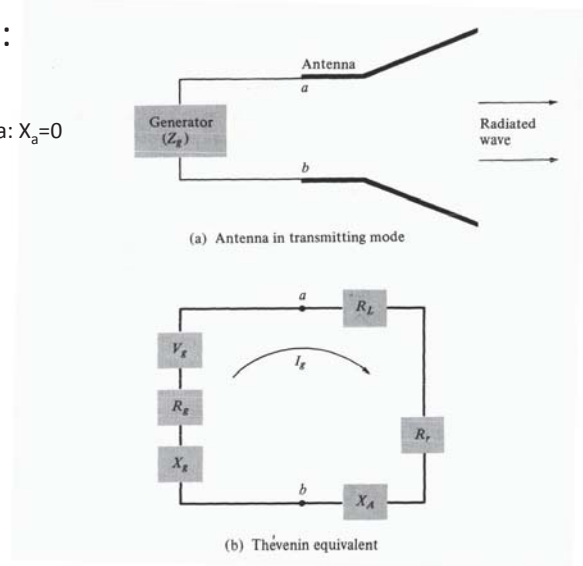
$$R_a = R_p + R_r$$

$$R_p \equiv \text{pérdidas}; R_r \equiv \text{radiación}$$

$$p_r = R_r \cdot i^2$$

- Rendimiento:

$$\eta_r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{p_r}{p_r + p_p} = \frac{R_r}{R_r + R_p}$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Radiación electromagnética

- Propiedades de los campos EM en el espacio libre
 - Campo eléctrico y magnético ortogonales
 - Onda localmente plana:

$$\vec{E}(r,t) = \text{Re}\{\vec{E}_0 \cdot e^{j(\omega t - k_0 r)}\} = \text{Re}\{|\vec{E}_0| \hat{e} \cdot e^{j(\omega t - k_0 r)}\}$$

- Impedancia característica:

$$\eta = \frac{|E_0|}{|H_0|} = 120\pi \Omega$$

- Constante de fase:

$$\beta = k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

- Velocidad de fase:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Características de radiación de una antena

- Valor eficaz de campo

$$e(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{2}} |\bar{E}_0(\theta, \varphi)|$$

- Densidad de flujo de potencia:

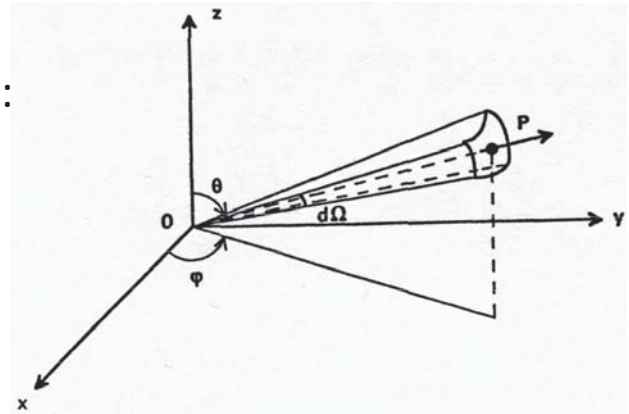
$$\phi(\theta, \varphi) = \frac{e^2(\theta, \varphi)}{\eta} \text{ (W / m}^2\text{)}$$

- Intensidad de radiación:

$$u(\theta, \varphi) = r^2 \phi(\theta, \varphi) \text{ (W / strad)}$$

- Antena isotrópica:

$$\phi = \frac{P_t}{4\pi r^2} \Rightarrow u(\theta, \varphi) = \frac{P_t}{4\pi}$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ganancias de una antena

- Ganancia directiva o Directividad (siendo p_t la potencia radiada)

$$g^d(\theta, \varphi) = \frac{u(\theta, \varphi)}{u_{iso}} = 4\pi \frac{u(\theta, \varphi)}{P_t} \Rightarrow u(\theta, \varphi) = \frac{P_t}{4\pi} g^d(\theta, \varphi)$$

$$\phi(\theta, \varphi) = \frac{P_t}{4\pi r^2} g^d(\theta, \varphi) \quad e(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{\eta}{4\pi}} \frac{\sqrt{P_t g^d(\theta, \varphi)}}{r}$$

- Ganancia de potencia (siendo p'_t la potencia entregada a la antena)

$$u(\theta, \varphi) = \frac{P_t \eta}{4\pi} g^d(\theta, \varphi) \Rightarrow g(\theta, \varphi) = \eta g^d(\theta, \varphi)$$

$$g^d = \left. \frac{P_{rl}}{P_{tA}} \right|_{e_A=e_l} = \left. \left(\frac{e_A}{e_l} \right)^2 \right|_{P_{lA}=P_{rl}} \quad g = \left. \frac{P_{rl}}{P_{tA}} \right|_{e_A=e_l} = \left. \left(\frac{e_A}{e_l} \right)^2 \right|_{P_{lA}=P_{rl}}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Diagramas de radiación (I)

- En forma logarítmica

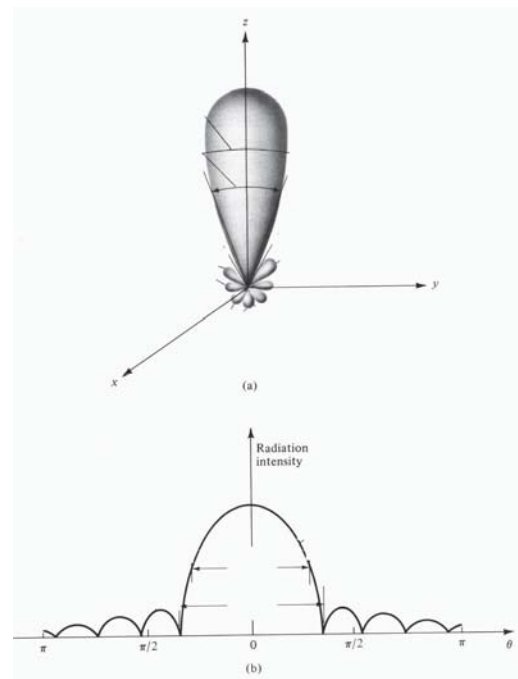
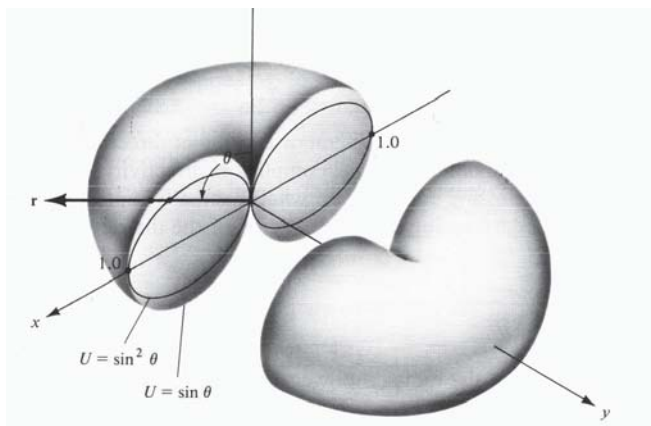
$$10\log\frac{g^d(\theta,\varphi)}{g_{\max}^d} = 20\log\frac{e(\theta,\varphi)}{e_{\max}}$$

- Tipos:
 - Isotrópicos
 - Omnidireccionales
 - Pincel
- Representación:
 - Cortes $\varphi=\text{cte}$ y $\theta=\text{cte}$
 - Diagramas tridimensionales
 - Curvas de nivel

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Diagramas de radiación (II)

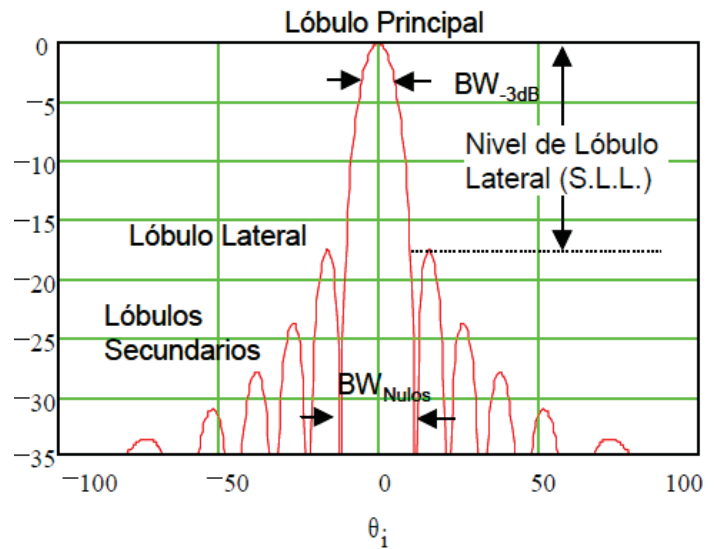


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Diagramas de radiación (III)

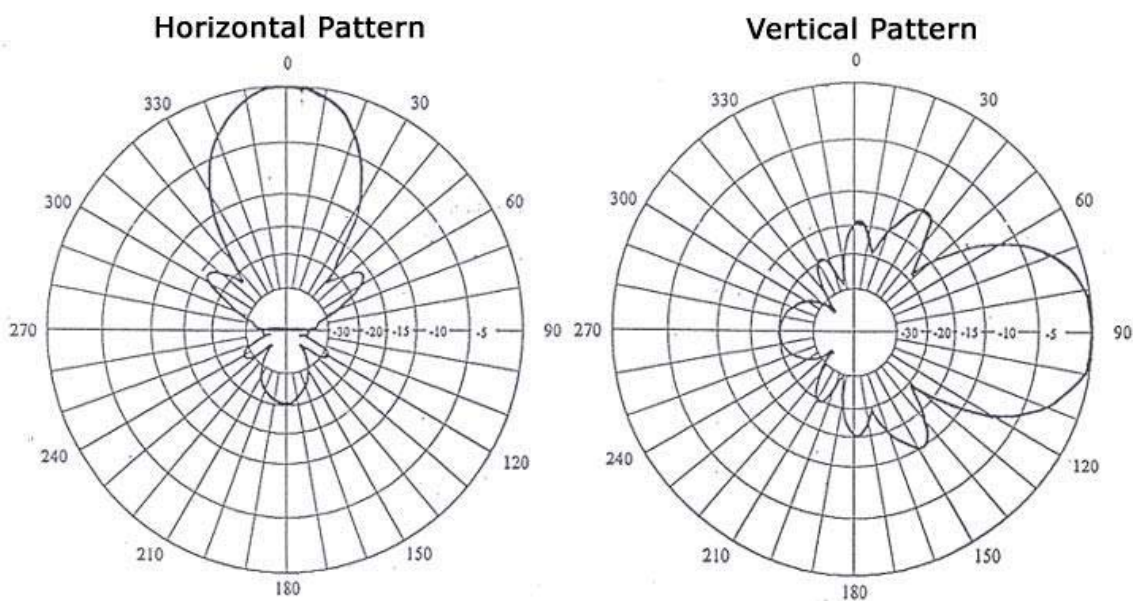
- **Lóbulo:** porción del diagrama delimitado por zonas de radiación más débil
 - Principal: el que contiene la dirección de máxima radiación
 - Secundario: el resto
 - Laterales: los secundarios adyacentes al principal
 - Posterior: el que ocupa la dirección opuesta al principal
- Nivel de lóbulos secundarios SLL (entre el lóbulo principal y el mayor de los secundarios)
- Ancho de haz a -3 dB (entre puntos de potencia mitad)
- Ancho de haz entre nulos
- Relación delante – detrás FBR (entre el lóbulo principal y el posterior)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Diagramas de radiación (IV)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ancho de banda

- Margen de frecuencias dentro del cual los parámetros característicos de la antena cumplen unas especificaciones prefijadas
 - Antenas de banda estrecha (antenas resonantes): % de la frecuencia de resonancia
 - Antenas de banda ancha: relación entre la frecuencia superior y la inferior de la banda, p. ej. 2:1 (una octava), 10:1 (una década)..
- Las que superan una relación 2:1 en alguno de sus parámetros: antenas independientes de la frecuencia
 - Se diseñan en función de las direcciones de radiación
 - Las antenas de apertura son de este tipo

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Campo en condiciones de espacio libre

- Antena isotrópica: concepto de *pire*
 - Potencia isotrópica radiada equivalente

$$e = \sqrt{\frac{\eta}{4\pi}} \frac{\sqrt{p_i g^d}}{r} = \sqrt{\frac{\eta}{4\pi}} \frac{\sqrt{p_i g}}{r} = \sqrt{\frac{\eta}{4\pi}} \frac{\sqrt{pire}}{r}$$

$$e(mV/m) = 173,2 \frac{\sqrt{pire(KW)}}{r(Km)}$$

$$E(dBu) = 104.8 + PIRE(dBKW) - 20 \log r(Km)$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



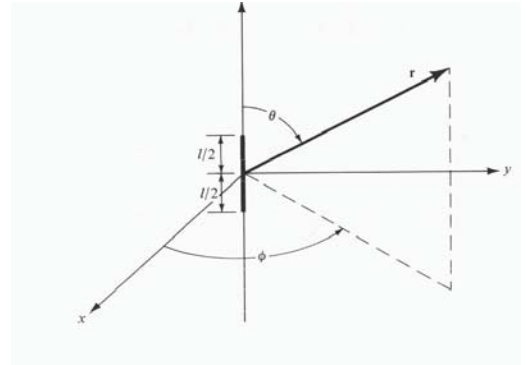
Antenas lineales (I)

- Dipolo elemental

$$\bar{E} = j \frac{\eta}{2\lambda} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} i l \sin \theta \hat{\theta}; \quad i: \text{corriente eficaz}$$

$$p_t = R_t i^2; \quad g^d(\theta) = \frac{3}{2} \sin^2 \theta; \quad R_t = \frac{2\pi}{3} \eta \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2$$

$$pire = \frac{3}{2} p_t (\text{máx}) \Rightarrow G^d = 1,76 \text{dB}$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



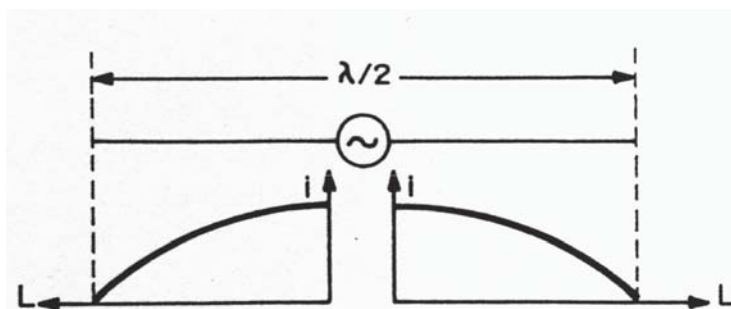
Antenas lineales (II)

- Dipolo en $\lambda/2$

$$\bar{E} = j \frac{\eta}{2\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} i \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \hat{\theta}; \quad i: \text{corriente eficaz}$$

$$p_t = R_t i^2; \quad g^d(\theta) = 1,64 \frac{\cos^2(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin^2 \theta}; \quad R_t = 73\Omega$$

$$pire = 1,64 p_t (\text{máx}) \Rightarrow G^d = 2,15 \text{dB}$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Antenas lineales (III)

- Concepto de pra
 - Potencia radiada aparente

$$g_{\lambda/2}^d = \frac{u}{u_{\text{dipolo } \lambda/2}} = \frac{g^d}{1,64} \Rightarrow G_{\lambda/2}^d = G^d - 2,15 \text{ dB}$$

$$pra = p_r g_{\lambda/2}^d \Rightarrow e(mV / m) = 222 \frac{\sqrt{pra(KW)}}{r(Km)}$$

$$E(dBu) = 106,9 + PRA(dB / KW) - 20 \log r(Km)$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



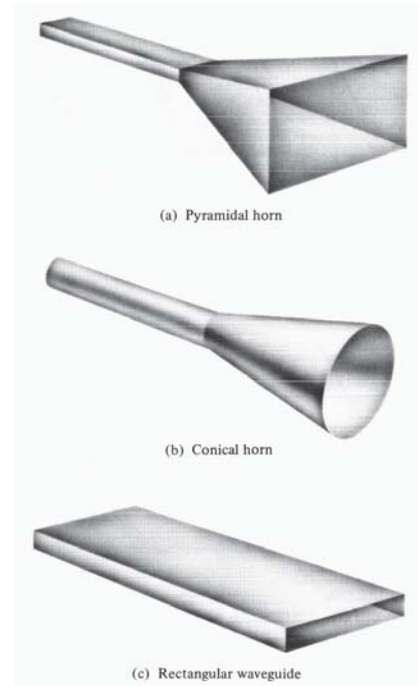
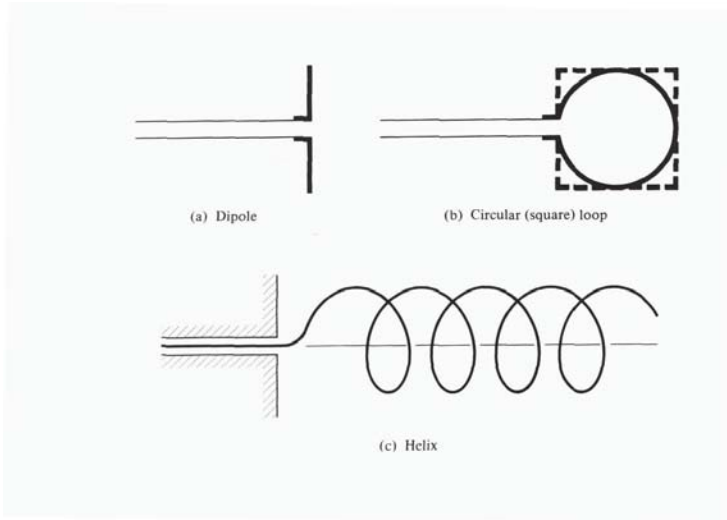
Otras antenas (I)

- Lineales:
 - longitudes resonantes Dipolos doblados. Antenas de cuadro. Antenas de onda progresiva. Logarítmico-periódicas. Antenas de hélice. Espirales
- Apertura:
 - Bocinas. Reflectores. Lentes. Ranuras
- Tecnología impresa

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



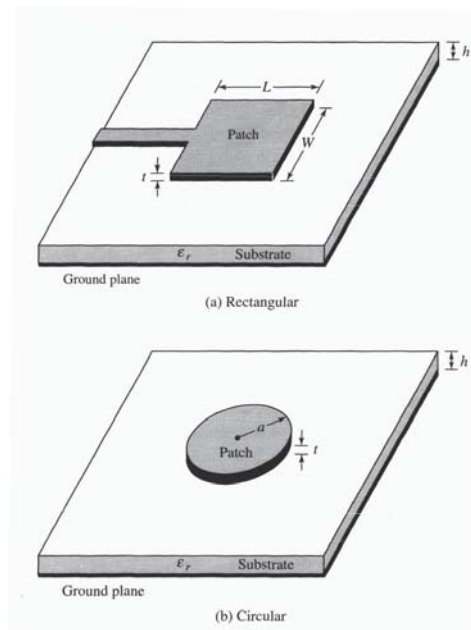
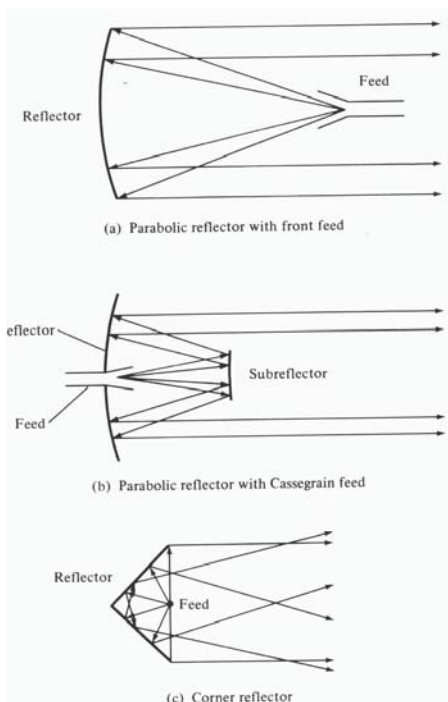
Otras antenas (II)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Otras antenas (III)

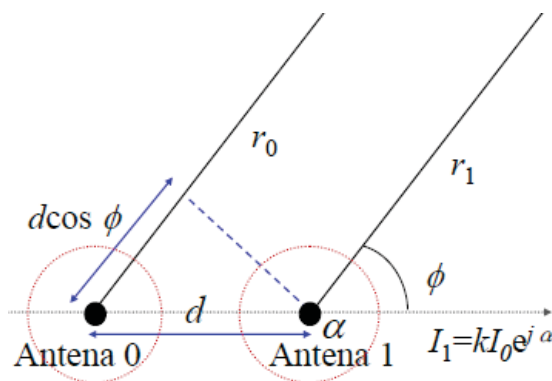


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Agrupamientos de antenas (I)

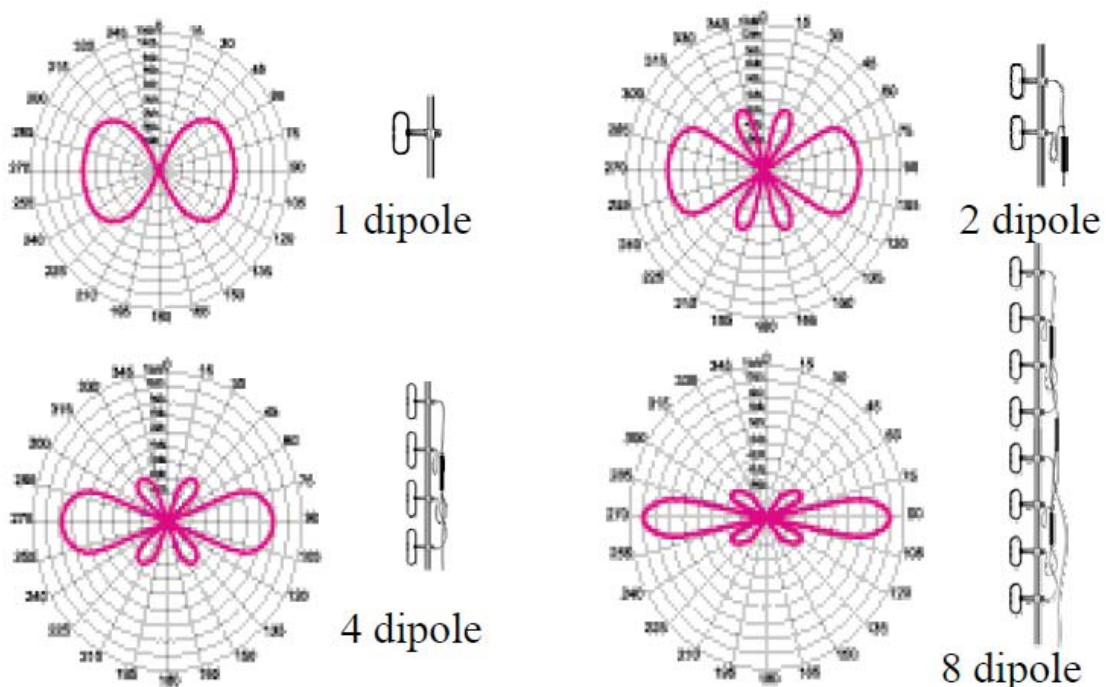
- Array: conjunto de antenas
 - La antena ahora se denomina sistema radiante
 - La posición espacial y la alimentación de cada una de ellas determina el diagrama de radiación final
 - Con un diseño cuidadoso, se puede obtener el diagrama de radiación deseado



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



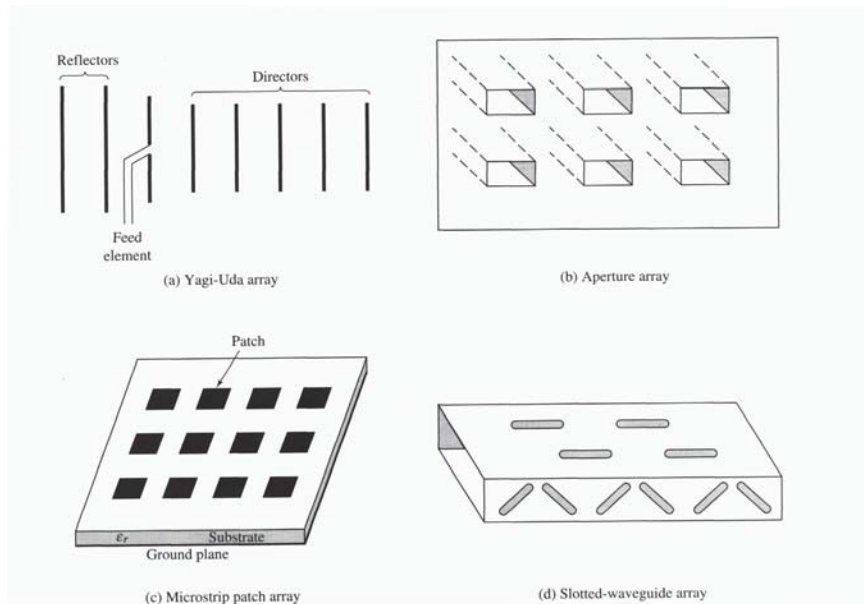
Agrupamientos de antenas (II)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Agrupamientos de antenas (III)

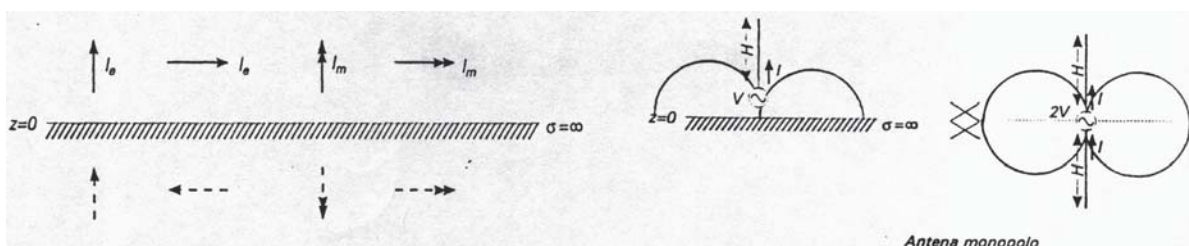


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Antenas próximas al suelo (I)

- Teoría de imágenes. Las componentes verticales de las corrientes se duplican, las horizontales se anulan. La polarización vertical se refuerza, la horizontal se debilita
- Antena isótropa frente a tierra: $g = 2$
- Antenas verticales de altura h : directividad doble de las del dipolo de longitud $2h$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Antenas próximas al suelo (II)

- Antena vertical corta

$$\bar{E} = j \frac{\eta}{2\lambda} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} i l_e \sin \theta \hat{\theta}; \quad l_e = 2h_e \approx 2h \quad i: \text{intensidad eficaz}$$

$$g^d(\theta) = 3 \sin^2 \theta \quad (\theta \leq \frac{\pi}{2})$$

$$p_t = R_t i^2 \quad R_t = \frac{\pi}{3} \eta \left(\frac{l_e}{\lambda} \right)^2$$

$$p_{ire} = 3p_t$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Antenas próximas al suelo (III)

- pr_{avc}

$$g_{avc} = \frac{u}{u_{avc}}; \quad pr_{avc} = p_t g_{avc}$$

$$e(mV/m) = 300 \frac{\sqrt{pr_{avc}(KW)}}{r(Km)}$$

$$E(dBu) = 109,5 + PRAVC(dBKW) - 20 \log r(Km)$$

- Fuerza cimomotriz

$$fcm(V) = e(mV/m) \cdot r(Km) = 300 \sqrt{pr_{avc}(KW)}$$

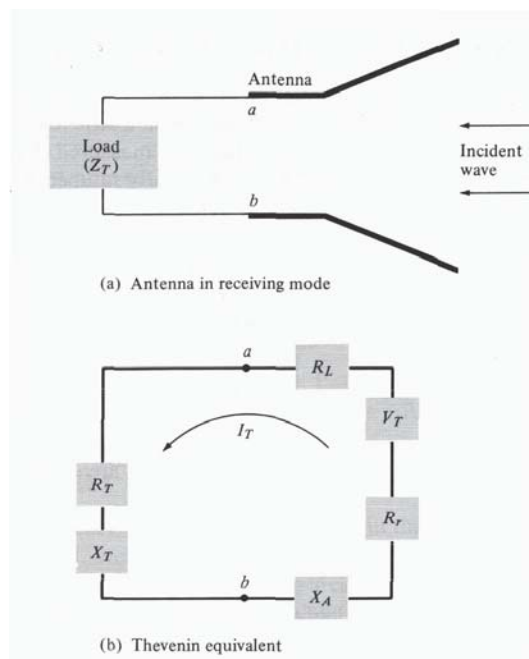
CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Antena en recepción (I)

- Caracterización circuital
 - Equivale a un generador con una impedancia interna igual a la de la antena
 - En condiciones de adaptación: la potencia suministrada por el generador ideal se divide en potencia rerradiada + potencia disipada + potencia entregada:

$$\frac{v^2}{2(R_r + R_p)} = \frac{v^2 R_r}{4(R_r + R_p)^2} + \frac{v^2 R_p}{4(R_r + R_p)^2} + \frac{v^2}{4(R_r + R_p)}$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Antena en recepción (II)

- Área de absorción o superficie equivalente
 - Relaciona la potencia disponible en bornes de la antena receptora con la densidad de flujo incidente:

$$p_r = \phi_{inc} \cdot A_e$$

- Relación entre ganancia y área equivalente de absorción

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} g^d \text{ (espacio libre)} \quad A_e = \frac{\lambda^2}{16\pi} g^d \text{ (con plano conductor)}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Antena en recepción (III)

- Longitud efectiva

- En antenas lineales, se suele definir una longitud efectiva que relaciona el campo incidente con la tensión inducida en bornes de la antena en circuito abierto:

$$v = (\mathbf{e}_{inc} \hat{\mathbf{u}}_{inc}) \cdot (l_e \hat{\mathbf{u}})$$

- Relación entre longitud efectiva y área equivalente de absorción:

$$p_r = A_e \cdot \phi_{inc} = \frac{v^2}{4R_r}; \quad \phi_{inc} = \frac{e_{inc}^2}{\eta} \Rightarrow A_e = \frac{\eta l_e^2}{4R_r}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Antena en recepción (IV)

- Potencia recibida

- Es la potencia disponible en bornes de la antena real (con pérdidas) \Rightarrow potencia que entrega al receptor si está adaptado

$$p_r = \phi_{inc} \cdot A_e = \frac{e_{inc}^2}{\eta} \frac{\lambda^2}{4\pi} g \quad (\text{espacio libre})$$

$$p_r = \phi_{inc} \cdot A_e = \frac{e_{inc}^2}{\eta} \frac{\lambda^2}{16\pi} g \quad (\text{sobre plano de tierra})$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Medios guiados

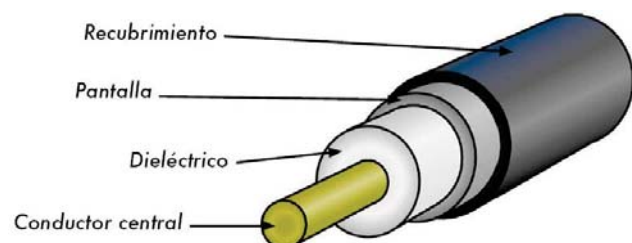
- Medios de transmisión en línea o guiados: aquellos de los que se vale la tecnología de las telecomunicaciones para guiar las señales portadoras de información, usando medios materiales y finitos
- En esta asignatura, interesan los que permiten guiar señales de frecuencias altas (radiofrecuencia) hacia/desde las antenas

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Cable coaxial

- Formados por dos conductores concéntricos de cobre
- Materiales aislantes intermedios para garantizar concentricidad
- Poseen buen apantallamiento electromagnético y gran ancho de banda
- No permiten trabajar con frecuencias elevadas (demasiada atenuación)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Guía de onda (I)

- Conducto metálico, confina la onda en su interior
- Rígidas
- No necesitan dieléctrico en su interior
- Pueden trabajar con potencias elevadas (radar)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Guía de onda (II)

- Campos electromagnéticos dentro de la guía: solución de las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de contorno (geometría de la guía)
- Modos: cada una de las soluciones anteriores
 - TE: el campo eléctrico es nulo en la dirección del eje de la guía
 - TM: el campo magnético es nulo en la dirección del eje de la guía
- Para cada uno de los modos, existe una frecuencia de corte a partir de la cual se propagan
 - Modo fundamental: modo con la frecuencia de corte más baja
- Cada modo tiene una velocidad de propagación diferente: interesa que toda la energía de la señal se propague en un único modo para evitar dispersión

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Guía de onda (III)

- Rectangulares:

$$- f_{cmn} = \frac{c \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}{2}$$

- c : velocidad de la luz en el dieléctrico que rellena la guía ($c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ con c_0 velocidad de la luz en el vacío)
- a, b dimensiones de la guía ($a > b$)
- n, m no pueden ser 0 en modos TM
- Modo fundamental : TE_{10}

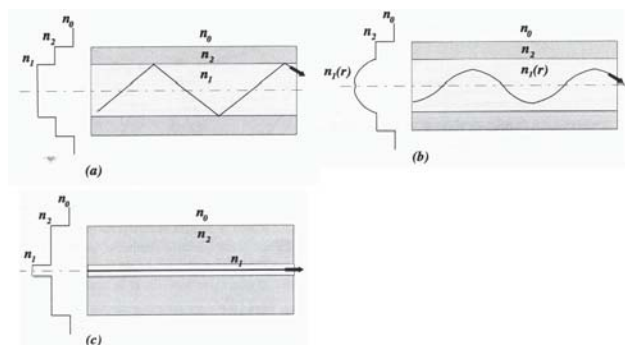
- Circulares:

- Frecuencia de corte dependiente del radio de la guía y de los ceros de las funciones de Bessel....



Fibra óptica (I)

- Dos dieléctricos cilíndricos y concéntricos de distinto índice de refracción: núcleo (n_1) y revestimiento (n_2)
 - n_2 ligeramente inferior a n_1
- El núcleo constituye el soporte físico de la radiación óptica
- El revestimiento ayuda al confinamiento de la radiación
- Los distintos modos de propagación se modelan como trayectorias de rayos en la fibra
- Perfil de índice: variación del índice de refracción en la fibra
 - Fibras de salto de índice
 - Fibras de índice gradual



- (a) Fibra multimodo de salto de índice
- (b) Fibra multimodo de índice gradual
- (c) Fibra monomodo de salto de índice



Fibra óptica (II)

- Cada posible ángulo de incidencia que cumpla reflexión total \Rightarrow forma de propagación de la luz dentro de la guía
- Sólo ciertos ángulos serán posibles (cada modo de propagación se representa aproximadamente por un modelo de rayos de cierta inclinación)
- Cada modo (trayectoria de rayos) se propaga con una velocidad (las distancias recorridas son distintas)
- Fibra de índice gradual: trata de igualar las velocidades de propagación de los distintos modos: menor índice de refracción para trayectorias con camino mayor
- Fibra monomodo: sólo propaga un modo, no hay dispersión de velocidades

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Tema 4

Radiopropagación

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Propagación de ondas

- La propagación depende de la frecuencia:
 - Efecto guía onda Tierra - atmósfera
 - Onda de superficie: se propagan siguiendo la superficie terrestre hasta varios miles de kilómetros en frecuencias muy bajas
 - A través de la atmósfera: ionosfera (MF, HF) y troposfera.
 - Ondas directas en línea recta entre distancias cortas (\geq VHF)
 - Ondas curvadas por la troposfera entre distancias largas.
 - Reflexiones sobre medios naturales o artificiales

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Efecto guía onda (I)

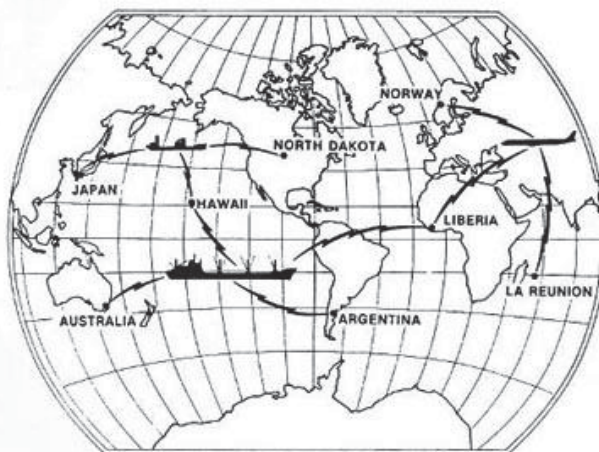
- Se da a muy bajas frecuencias (ELF, ULF y valores inferiores de VLF)
- La tierra y la ionosfera se comportan como buenos conductores → las ondas se propagan como si estuviesen en una guía de onda
- La propagación es bastante estable
- Grandes alcances
- Se utiliza en servicios de radionavegación y móvil marinos
 - Sistema Omega : entre 10 y 13 KHz

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Efecto guía onda (II)

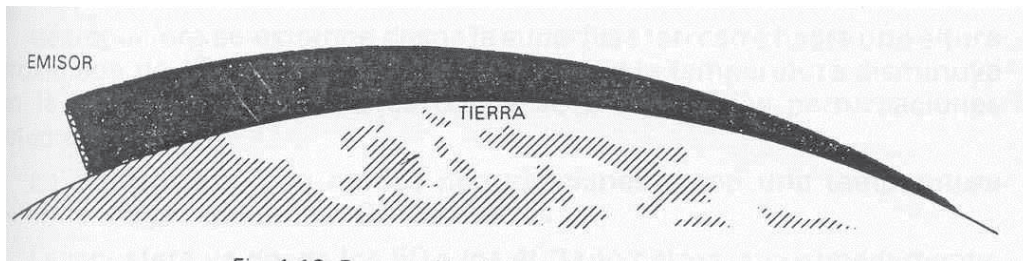
OMEGA NAVIGATION SYSTEM USER'S GUIDE



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ondas de superficie (I)



Su alcance depende de:

- Naturaleza del suelo
- Frecuencia de transmisión
- Potencia transmitida

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ondas de superficie (II)

- Una parte de la energía es absorbida por el suelo, induciendo corrientes. La absorción es tanto mayor cuanto mayor sea la frecuencia.
- La absorción es mucho mayor en la polarización horizontal por lo que se emite con polarización vertical.
- La conductividad del suelo influye en el alcance:

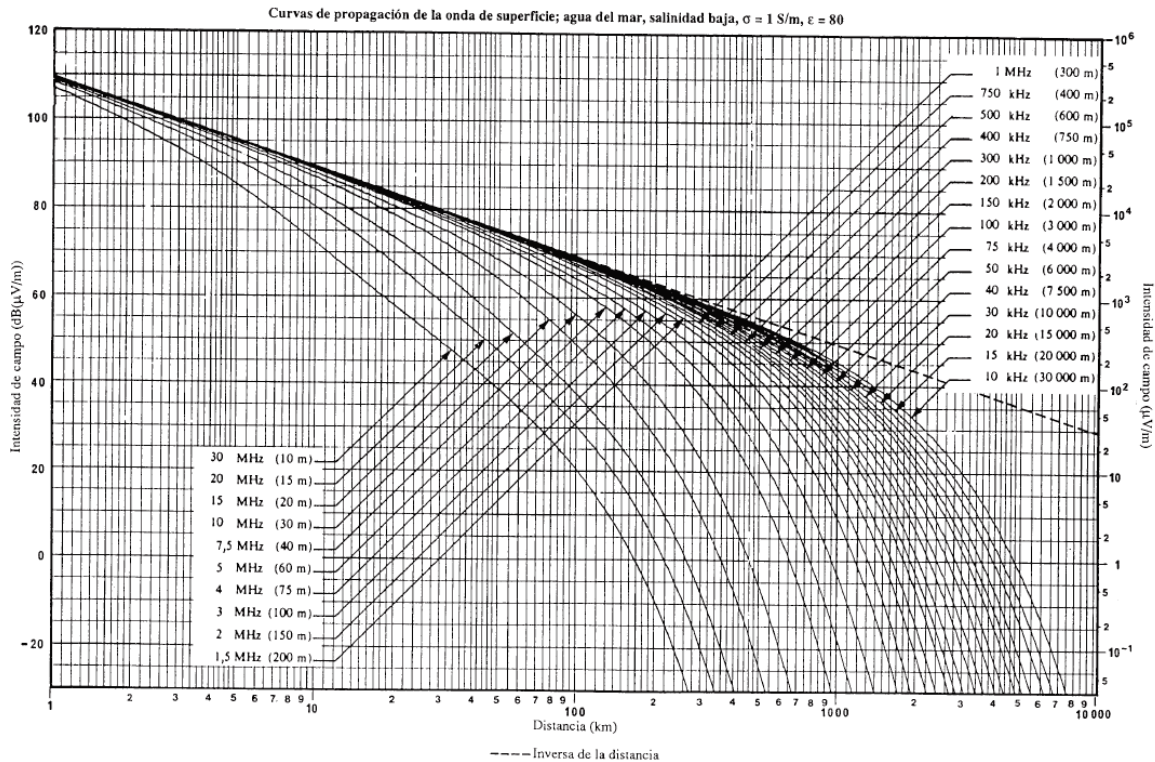
Tipo de suelo	S/m
Agua salada	5
Terrenos boscosos	$8 \cdot 10^{-3}$
Terrenos aridos	$2 \cdot 10^{-3}$
Suelo urbano	$1 \cdot 10^{-3}$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ondas de superficie (III)

FIGURA 1



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ondas de superficie (IV)

La atenuación aumenta con la frecuencia:

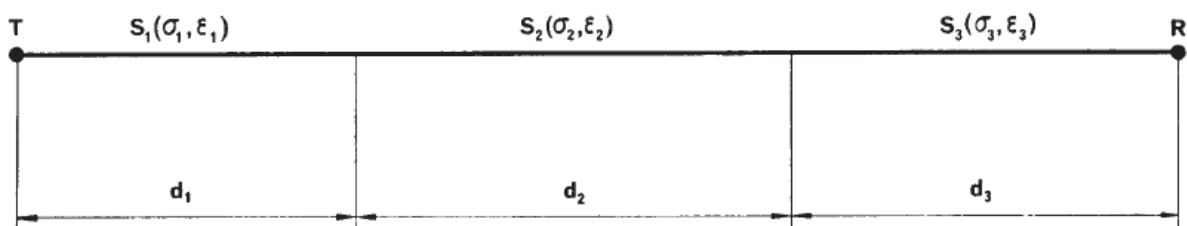
- Para la banda VLF se tienen alcances de varios miles de kilómetros.
- Para la banda MF se tienen alcances de cientos de kilómetros.
- Para la banda HF decenas de kilómetros

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ondas de superficie (V)

- Si la onda ha de atravesar distintos tipos de terreno: método de Millington (Rec. UIT- R P.368)



$$E_R = E_1(d_1) - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2) - E_3(d_1 + d_2) + E_3(d_1 + d_2 + d_3)$$

$$E_T = E_3(d_3) - E_2(d_3) + E_2(d_3 + d_2) - E_1(d_3 + d_2) + E_1(d_3 + d_2 + d_1)$$

$$E(d) = (E_T + E_R)/2$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (I)

La atmósfera se subdivide en tres capas:

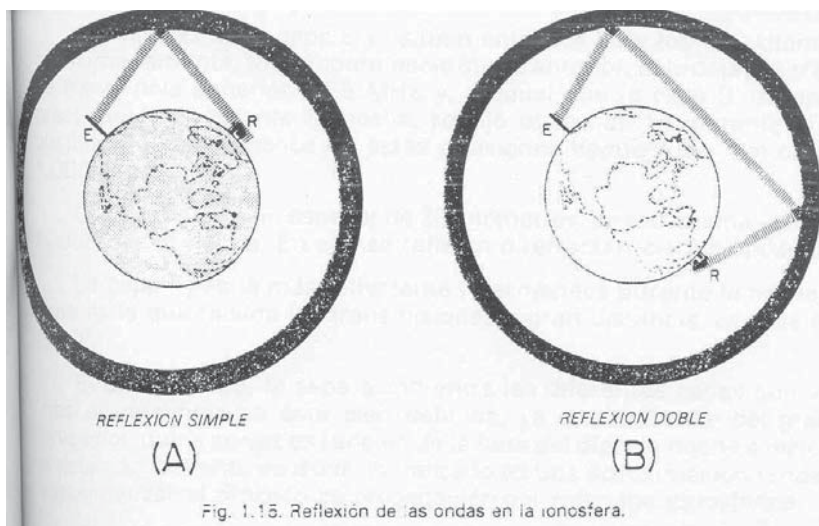
- La troposfera (< 10 Km): la temperatura disminuye con la altura.
- La estratosfera (< 50 Km). Pocas perturbaciones atmosféricas y temperatura uniforme.
- La ionosfera (< 400 Km): en donde se produce la disociación de iones en las moléculas del aire a partir de la energía solar. La ionización es mucho más importante durante el día que durante la noche.
 - Sirve de espejo reflector para frecuencias hasta HF

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (II)

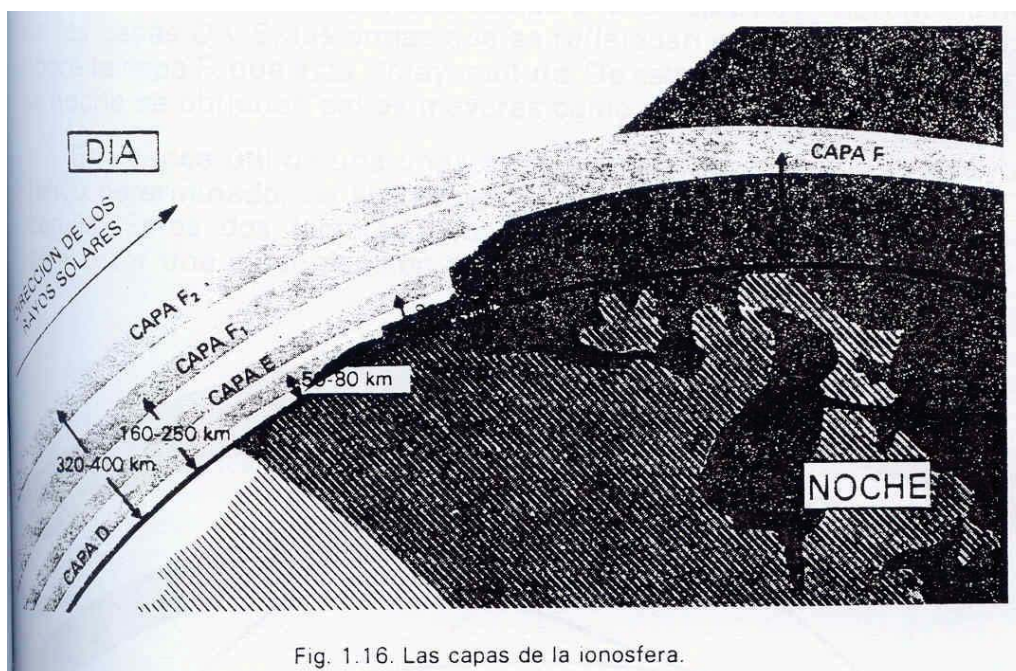
Las ondas van propagándose a índices de refracción menores



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (IV)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (V)

- Capas de la ionosfera:
 - Capa D:
 - Se localiza de forma aproximada entre 60 y 90 Km de altura. Su grado de ionización depende de la actividad solar, y, por lo tanto, es inexistente por la noche.
 - Refleja ciertas bandas de VLF y LF.
 - Absorbe parcialmente las MF y las HF.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (VI)

- Capa E:
 - Se sitúa entre los 90 y 130 Km. de altura.
 - Sólo deja pasar ondas de $f > 25$ MHz.
 - Desaparece por la noche.
 - Refleja ondas HF durante el día permitiendo alcances de hasta 1600 Km.
- Capa F_1 :
 - Se sitúa entre 150 y 250 Km. de altura.
 - Se recombina con la F_2 por la noche.
 - Se reflejan ciertas bandas de HF.
- Capa F_2 :
 - Se sitúa entre 300 y 450 Km. de altura.
 - Es la más reflectante permaneciendo todo el día.
 - Permite alcances de varios miles de Km en HF.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



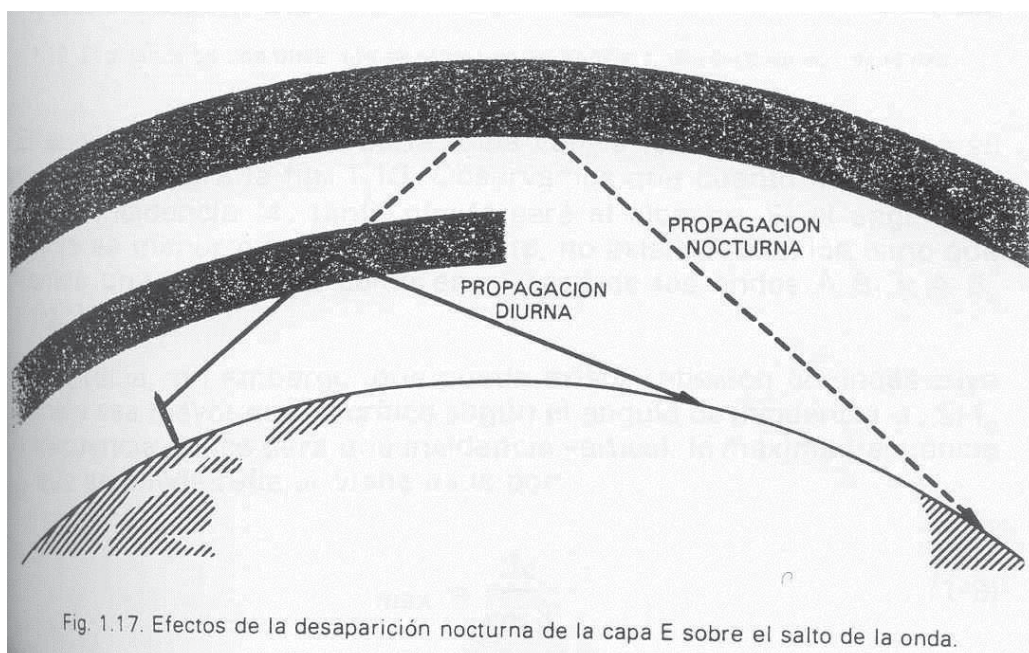
Onda ionosférica (VII)

- La composición depende de la hora del día y de la época del año.
- Las ondas que se reflejan en las capas D y E durante el día, pasan a reflejarse en la capa F durante la noche por lo que el alcance será mayor por la noche que durante el día.
- El alcance útil de la onda de radio para una situación ionosférica determinada, depende de:
 - Frecuencia de la onda.
 - Ángulo de incidencia.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (VIII)

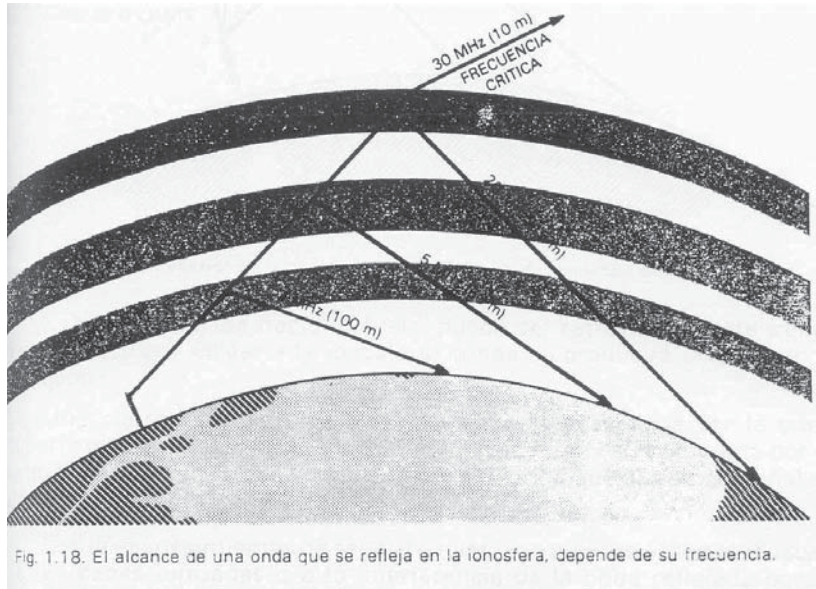


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (IX)

- El alcance aumenta con la frecuencia



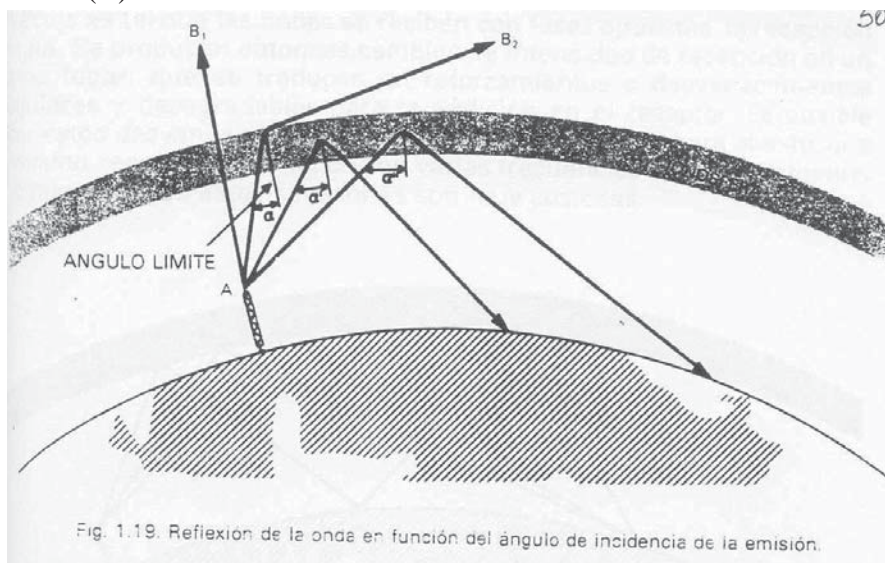
CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (X)

$$f_{\max} = \frac{f_c}{\cos(\alpha)}$$

Siendo f_c la frecuencia límite para incidencia vertical

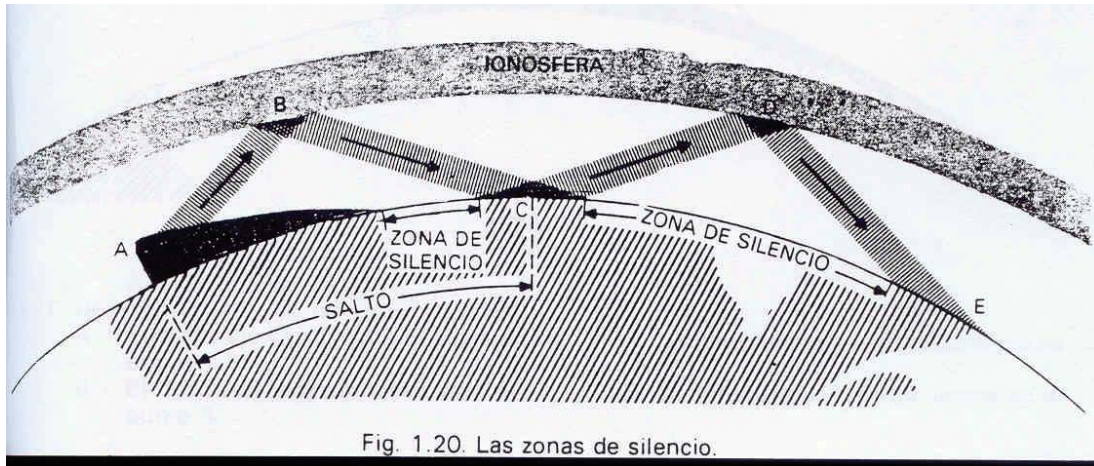


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (XI)

- Las regiones de silencio están entre las zonas de cobertura de la onda de superficie y la zona de cobertura debida a la propagación ionosférica.

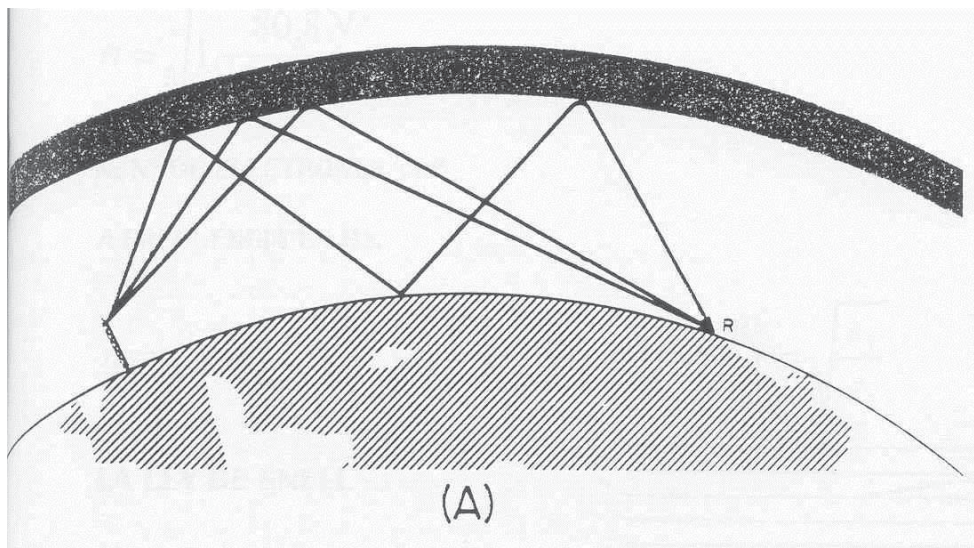


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (XII)

- El desfase entre ondas que siguen distintos trayectos producen desvanecimientos en el punto R.

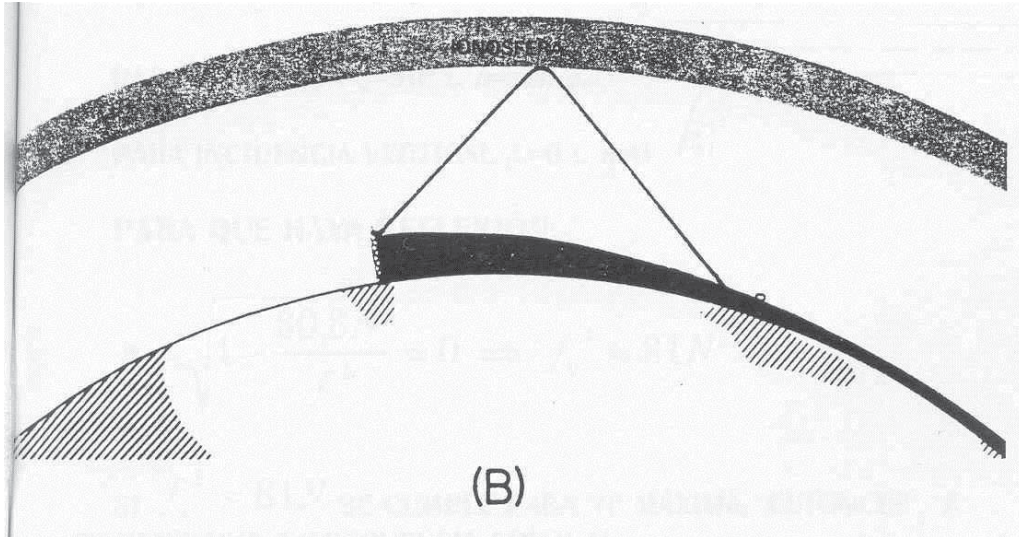


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (XIV)

- El desfase entre la onda de tierra y la reflejada produce desvanecimientos en el punto R.



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (XV)

- Refracción y reflexión en la ionosfera:
 - El índice de refracción de la ionosfera es

$$n = \sqrt{1 - \frac{80,8N}{f^2}}$$

- N: concentración de electrones. Aumenta con la altura
- f: frecuencia de la onda.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (XVI)

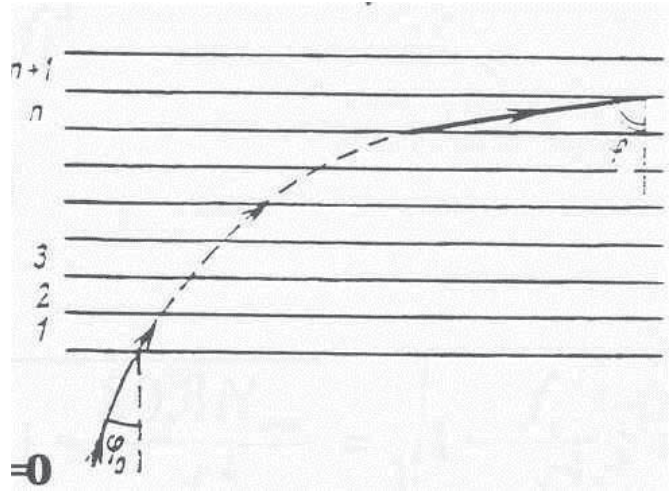
- La ley de Snell:

$$n_0 \operatorname{sen} \phi_0 = n \operatorname{sen} \phi$$

- Para reflexión 90° $n = \operatorname{sen}(\phi_0)$
- Para incidencia vertical
 - $\phi_0 = 0 \rightarrow n = 0$
- Para que haya reflexión:

$$n = \sqrt{1 - \frac{80,8N}{f^2}} = 0 \rightarrow f_v^2 \approx 81N$$

- Si $f_v \approx 9\sqrt{N}$ se cumple para N máxima en una capa, entonces f_v se denomina frecuencia crítica de dicha capa y se denota f_c



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (XVII)

- Frecuencia crítica: para una capa, es aquella frecuencia de onda que en condiciones de incidencia vertical se refleja en la parte más ionizada de dicha capa.
- Cualquier frecuencia menor con incidencia vertical va a encontrar un N_i tal que se cumpla:

$$\sqrt{1 - \frac{80,8N_i}{f_i^2}} = 0 \text{ (reflexion) con } N_i < N_{mx}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (XVIII)

- Incidencia oblicua: $\phi_0 \neq 0^\circ$
 - La onda de frecuencia f_{obl} se reflejará a una altura h tal que:

$$\text{sen}(\phi_0) = \sqrt{1 - \frac{80.8N(h)}{f_{obl}^2}} = \sqrt{1 - \frac{f_v^2(h)}{f_{obl}^2}}$$

$$\text{sen}^2(\phi_0) = 1 - \frac{f_v^2(h)}{f_{obl}^2} \rightarrow f_{obl} = f_v(h)\text{sec}(\phi_0)$$

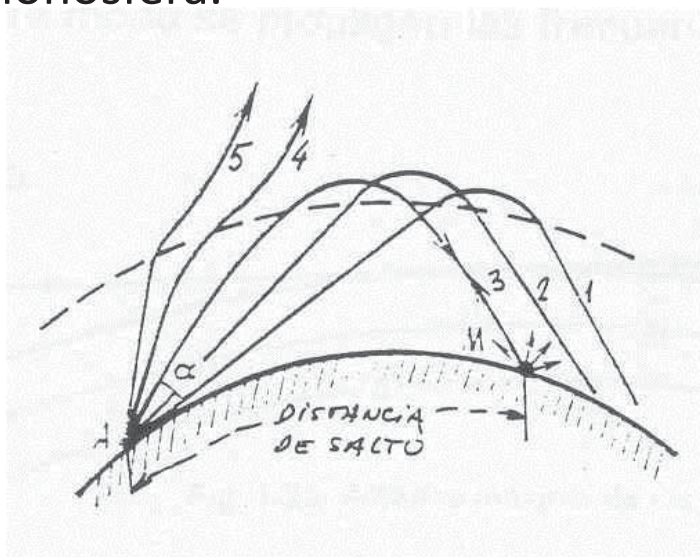
- Para reflexión a una altura h , $f_{obl} > f_v$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (XIX)

- **Distancia de salto:** para una determinada frecuencia, representa la mínima distancia contada a partir del transmisor para que la onda retorne por efecto de la ionosfera.



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda ionosférica (XX)

- **MUF:** Para una determinada distancia, se denomina MUF a aquella frecuencia para la que la distancia es la del salto.

$$n = \sin(\phi_0) \text{ condicion de retorno}$$

$$n = \sqrt{1 - \frac{80,8N}{f^2}} = \sin(\phi_0)$$

- **FOT (frecuencia óptima de trabajo):** se la define un 15 % por debajo de la MUF y se utiliza para evitar problemas de desvanecimientos por oscilaciones en la ionosfera.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio (I)

- Se propagan en línea recta (una vez corregido el efecto de la refracción troposférica) y necesitan visión directa entre Tx y Rx.
- Al no ser plana la superficie de la tierra tienen alcance limitado.
- Para bandas VHF y superiores
- El alcance máximo de una antena o distancia al horizonte es: $d_{hor} \approx \sqrt{2h_{ant}R_T}$
 - Ejemplo: siendo $R_T = 6400$ Km y si la antena estuviese situada a $h_{ant} = 100$ m, $d_{hor} = 36$ Km

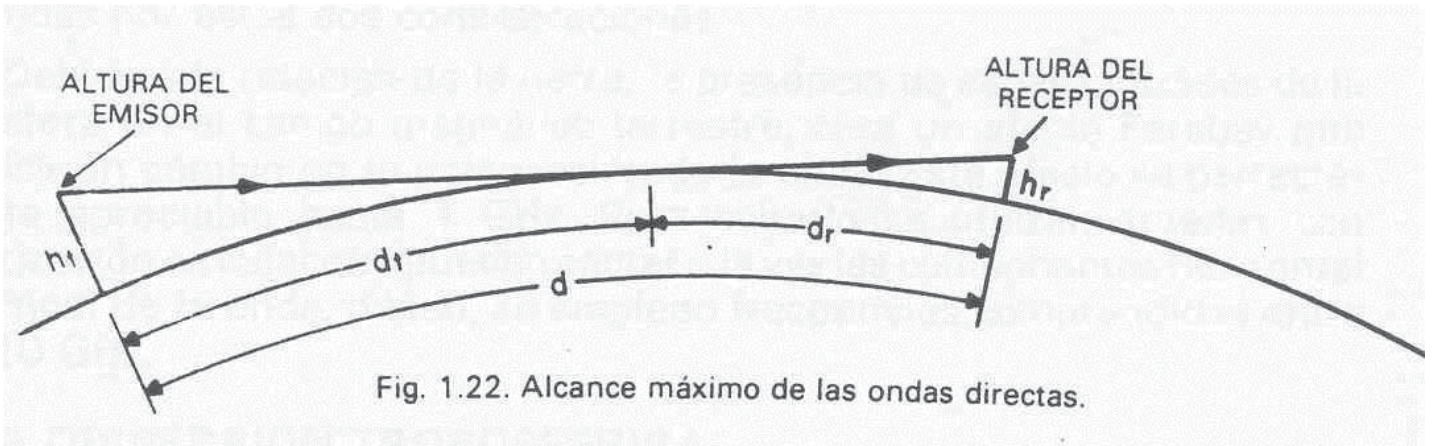
CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio (II)

- Distancia de visibilidad entre dos antenas:

$$d_{vis} = d_{hor,t} + d_{hor,r} \approx \sqrt{2h_t R_T} + \sqrt{2h_r R_T}$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio (III)

- Esta modalidad de propagación es la que utilizan los radioenlaces en visibilidad o fijos, también denominados LOS (Line Of Sight).
- La onda se propaga en la troposfera, medio que presenta una altura en torno a 10 km por encima de la superficie terrestre.
- La energía asociada a la onda se transmite entre la antena transmisora y la receptora en línea recta (una vez corregida la refracción atmosférica) y en forma de onda reflejada por la superficie terrestre o por la troposfera.
- La onda espacial es la única que interesa en UHF, VHF y SHF.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio (IV)

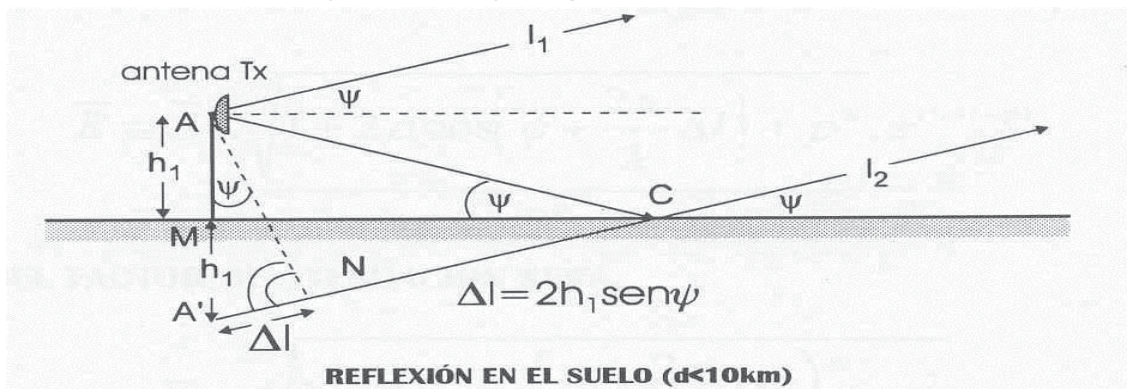
- Mecanismos que intervienen en la propagación de la onda de espacio:
 - Reflexión
 - Refracción
 - Absorción
 - Difracción

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: reflexión (I)

- Efectos de la reflexión en el modelo de tierra plana
 - Para distancias $D < 10$ Km se puede ignorar la curvatura de la tierra y se puede aplicar el modelo de tierra plana.
 - El rayo reflejado se combina con el rayo directo provocando interferencias positivas y negativas



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



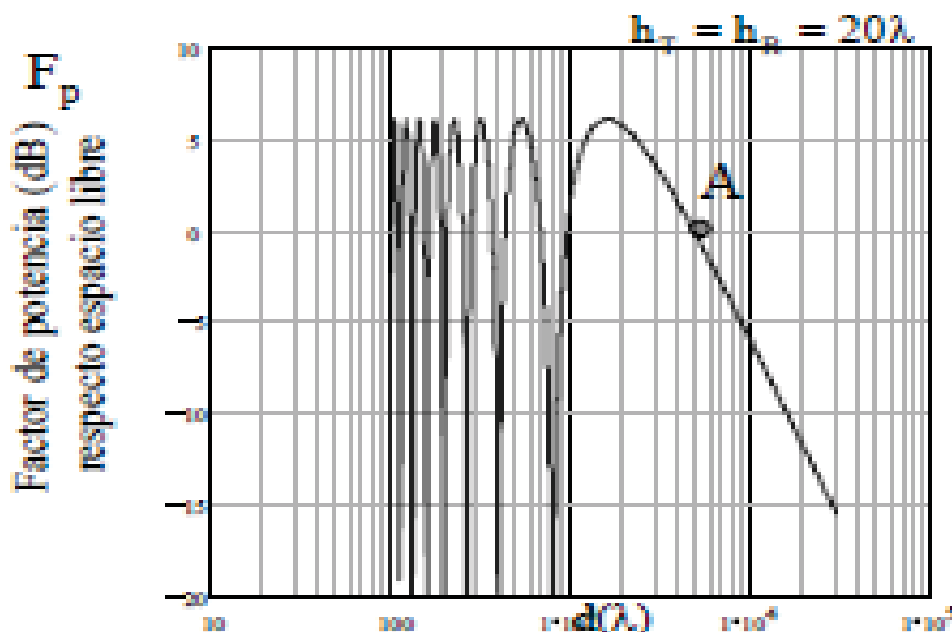
Onda de espacio: reflexión (II)

- Habrá un máximo en las direcciones en las cuales el campo directo y el reflejado se encuentren en fase.
- En las direcciones en las cuales el campo directo y el reflejado se encuentren en oposición de fase habrá un nulo.
- En consecuencia, el diagrama de radiación de una antena isotrópica se modifica incluyendo $2h/\lambda$ nulos.
- Esta multiplicidad de lóbulos en el plano vertical tiene importancia práctica en las comunicaciones y en radar de elevada altitud donde es fundamental mantener los mínimos fuera de la dirección de radiación.
- Con antenas direccionales (no isotrópicas) las que de por sí presentan lobulaciones en el plano vertical, el efecto de la interferencia introduce nuevas lobulaciones dentro de las lobulaciones ya presentes.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: reflexión (III)

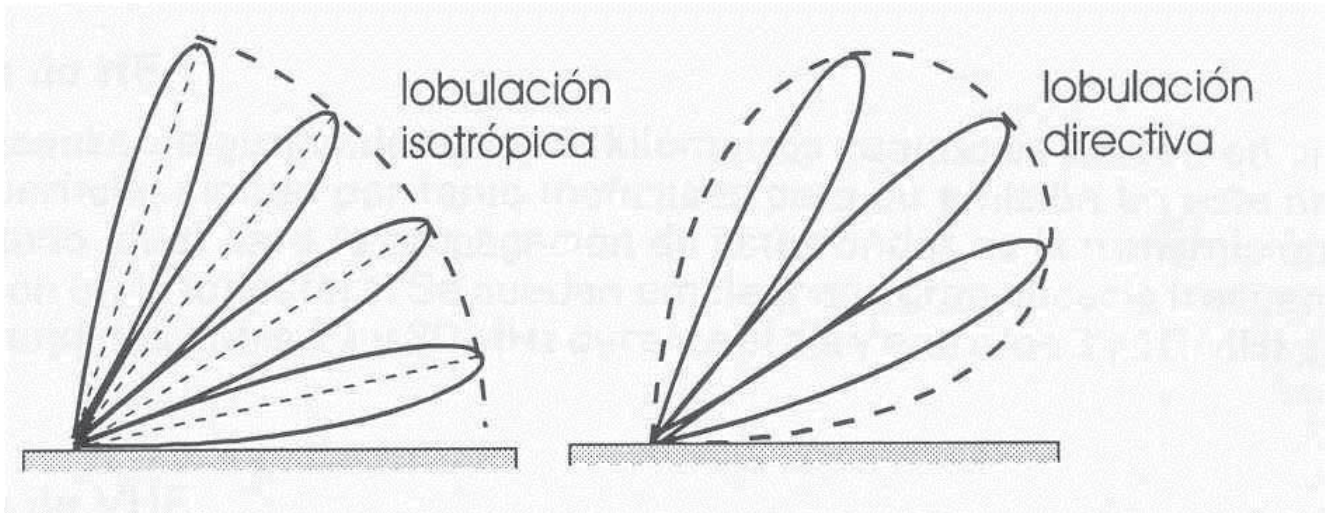


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: reflexión (IV)

- Efectos de la reflexión en el suelo en la modificación del diagrama de radiación de una antena.



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (I)

- Refracción
 - Las ondas electromagnéticas son refractadas cuando pasan de un medio con un dado índice de refracción a otro diferente. En la atmósfera los cambios de índice son, en general, graduales puesto que la densidad del aire decrece con la altura. Por encima de los 30 MHz el contenido de agua en el aire juega un papel predominante en los cambios refractivos.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (II)

- Índice de refracción:

$$n = n_0 + \frac{\partial n}{\partial h} h = n_0 + gh$$

- El valor de g queda definido mediante la fórmula de Booker

$$g = \frac{\partial n}{\partial h} = \frac{1}{R_0} \left(-0.2 + 30 \frac{\partial P}{\partial h} - 6 \frac{\partial T}{\partial h} \right)$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (III)

- Características para atmósfera estándar :

Parámetro	Símbolo	Valor
Radio ecuatorial terrestre	R_0, a	6378 km.
Variación de la presión del vapor de agua con la altura	$\partial P / \partial h$	-0.0033 mbar/m
Variación de la temperatura con "h"	$\partial T / \partial h$	-0.009 °C/m

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (IV)

$$g = -\frac{0.245}{R_0} \cong -\frac{1}{4R_0}$$

$$n = n_0 - \frac{h}{4R_0}$$

Valor típico $n_0=1.000325$

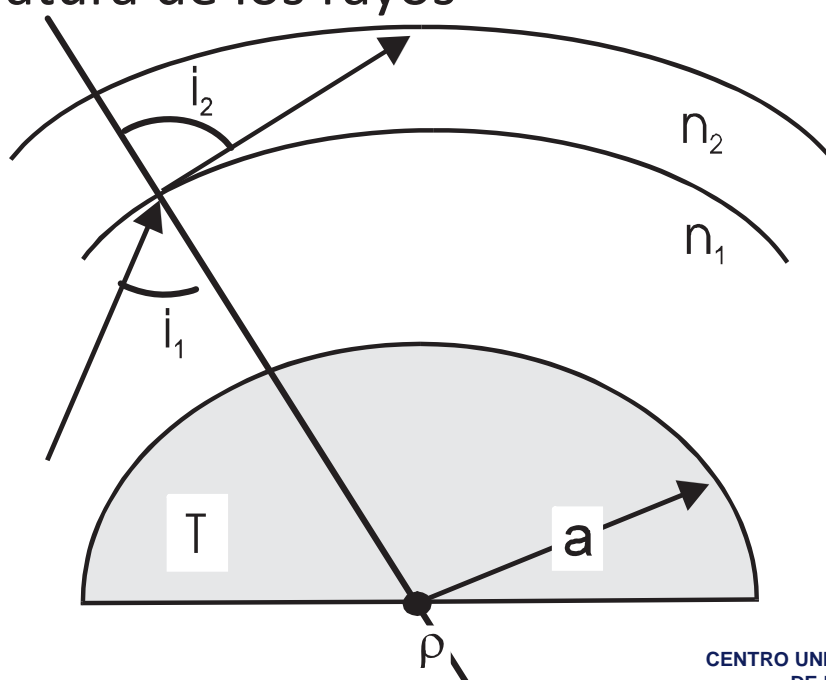
Coíndice N $N = (n - 1)10^6$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (V)

- Curvatura de los rayos



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (VI)

- Curvatura del rayo

- $n_1 \text{sen}(\Phi_1) = n_2 \text{sen}(\Phi_2) = n_3 \text{sen}(\Phi_3) = \dots = \text{cte}$

- El radio de curvatura se obtiene diferenciando respecto a h:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial h} \text{sen}(\phi) + n \cos(\phi) \partial \phi &= 0 \\ \cos(\phi) &= \frac{\partial h}{\partial l} \\ \rho &= \frac{\partial l}{\partial \phi} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{1}{\rho} = -\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial h} \text{sen}(\phi)$$

- Para antenas de alturas semejantes:

$$\frac{1}{\rho} \Big|_{\substack{\phi \approx 90^\circ \\ n(h) \approx 1}} \approx -\frac{\partial n}{\partial h}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (VII)

- Signos de curvatura:



Convención para la curvatura

- para la Tierra la curvatura será:

$$\sigma_T = -1/a$$

- y para el rayo la curvatura será:

$$\sigma_R = -\frac{1}{\rho} = \frac{dn}{dh}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (VIII)

- Modelo de tierra ficticia (rayo rectilíneo)
 - Para efectuar modelos simplificados se suele modificar la curvatura del rayo para considerarlo rectilíneo, en tal caso interesa la curvatura relativa:

$$\sigma_{RT} = \sigma_R - \sigma_T$$

$$\sigma_{RT} = -\frac{1}{\rho} - \left(-\frac{1}{a}\right) = -\frac{1}{\infty} - \left(-\frac{1}{ka}\right)$$

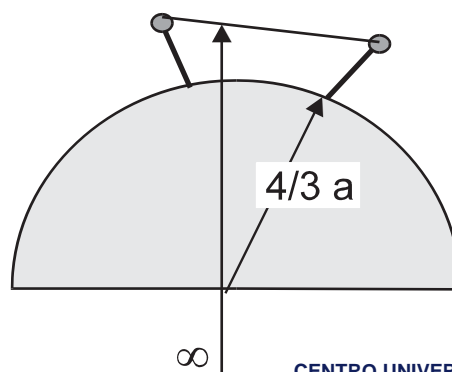
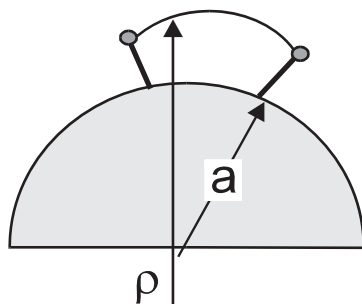
$$k = \frac{1}{1 - a/\rho}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (IX)

$$\rho = -\frac{1}{\frac{\partial n}{\partial h}} \Rightarrow \text{atmósfera estándar: } \left\{ \begin{array}{l} \rho = -\frac{1}{-\frac{1}{4a}} = 4a \\ k = \frac{1}{1 - \frac{a}{4a}} = \frac{4}{3} \end{array} \right.$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (X)

- Tipos de refracción en función de G:

$$G = \frac{\partial N}{\partial h} = \frac{\partial n}{\partial h} \times 10^6 \quad \text{Gradiente de refractividad}$$

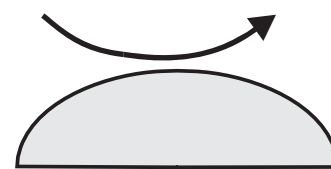
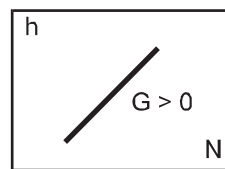
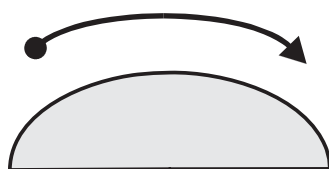
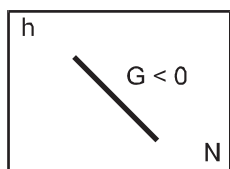
$$a = 6370 \text{ Km}$$

$$G = \frac{\partial N}{\partial h(\text{Km})}$$

$$k = \frac{1}{1 - a/\rho} = \frac{1}{1 + a \frac{\partial n}{\partial h}} = \frac{1}{1 + a \frac{\partial N}{\partial h} \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{10^6 + aG} = \frac{157}{157 + G}$$

$$a' = ka$$

Refracción normal e inversa



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (XI)

- Tipos de troposfera según el factor k:

– Super – refractiva, $k > 4/3$

– Normal, $1 \leq k \leq 4/3$

– Sub – refractiva, $0 \leq k < 1$

– Conductiva, $k < 0$

- Modelo de tierra plana

- Índice de refracción modificado (m) y módulo de refracción (M)

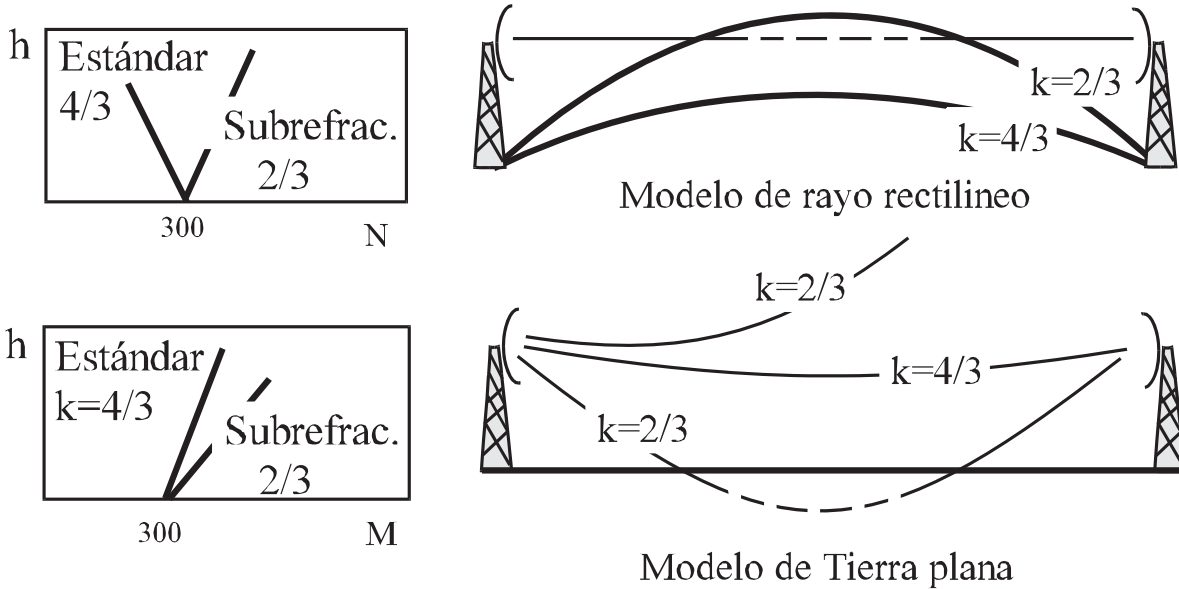
$$m = n + \frac{h}{a}, M = (m - 1) \cdot 10^6 \rightarrow \Delta M = \frac{\partial M}{\partial h} = \frac{10^6}{ka} = G + 157$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (XII)

- Propagación en atmósfera subrefractiva:

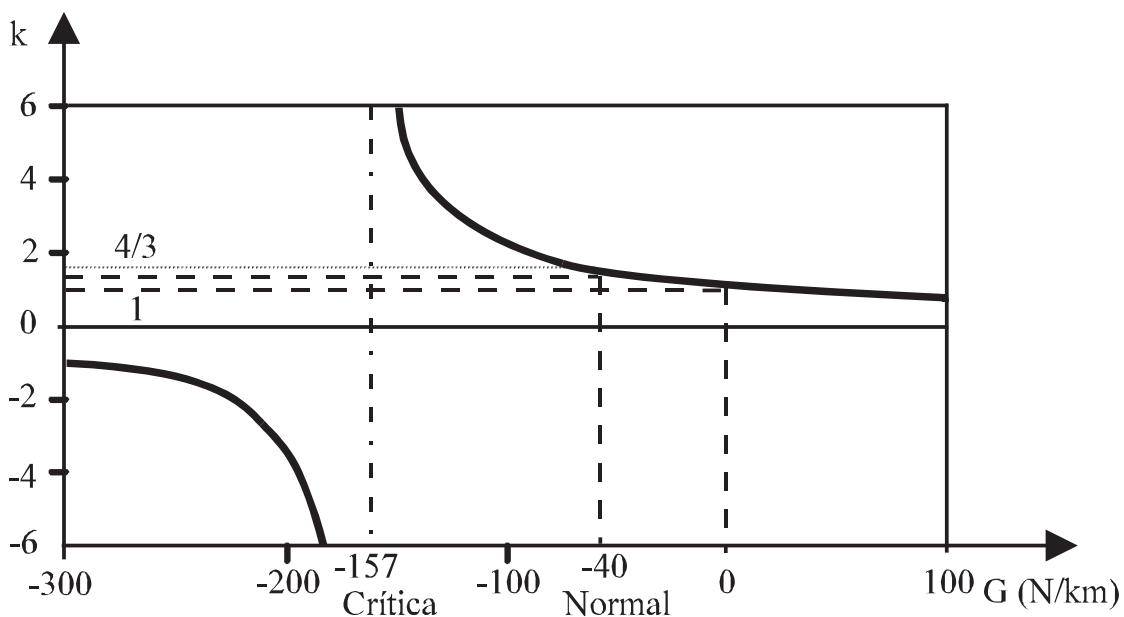


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (XIII)

- Factor k en función del gradiente de refractividad G

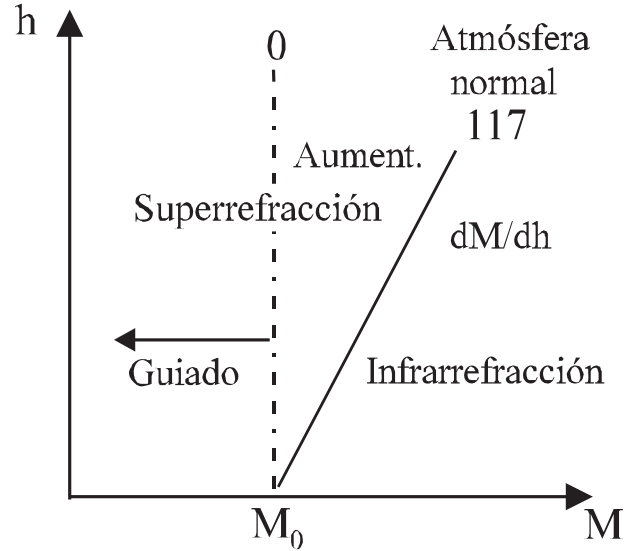
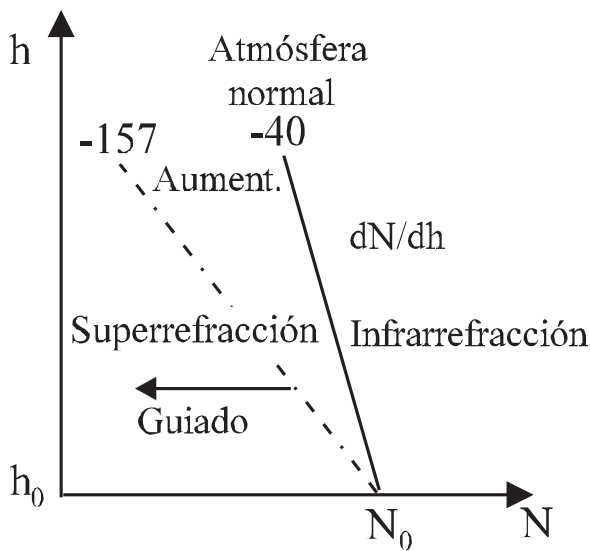


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (XIV)

- Condiciones límites

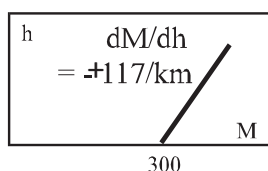
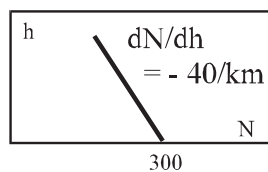
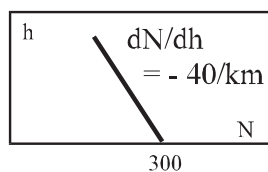


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (XV)

- Modelos de refracción



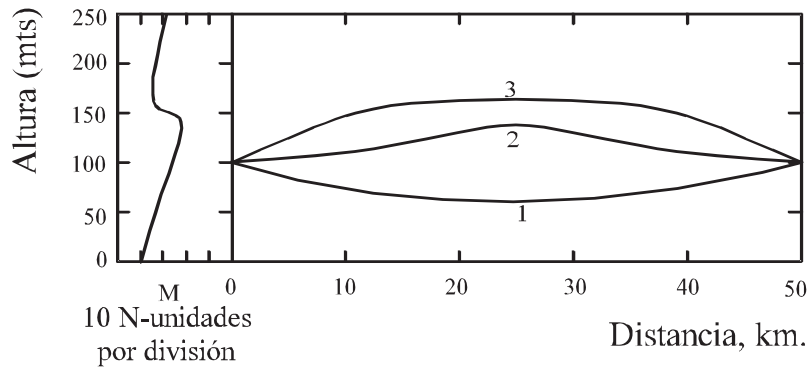
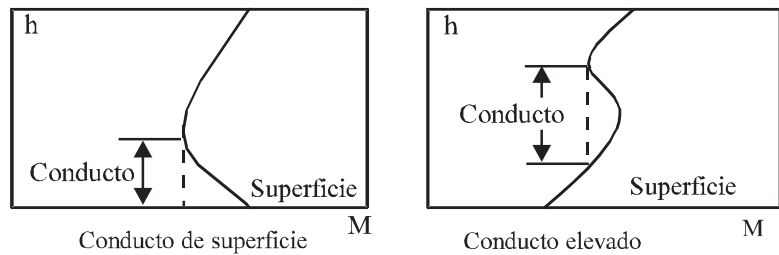
Modelo de Tierra plana

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: refracción (XVI)

- Conductos



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: absorción (I)

- Absorción y difusión

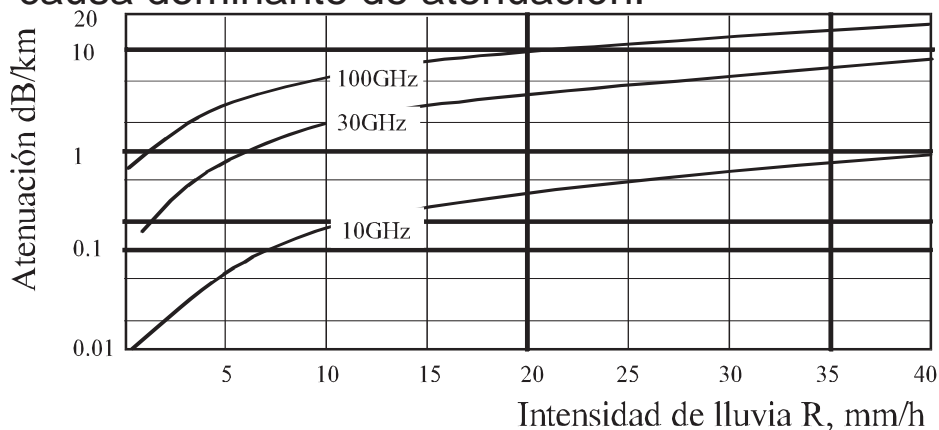
- Se ha comprobado que las ondas cuya longitud es mayor de 10 cm. (3 GHz) no sufren prácticamente atenuación por absorción. En frecuencias mayores la atenuación puede ser tal que el enlace podría interrumpirse totalmente en condiciones adversas. La travesía de zonas de lluvia, nubes o niebla produce absorción de las ondas más cortas (centimétricas y milimétricas). Las nubes y nieblas que contienen gotas muy pequeñas, comparadas con la longitud de onda, no producen fenómenos de difusión importantes. El gas contenido en la atmósfera, en ciertas frecuencias que provocan variaciones de energía (bandas de resonancia), puede producir absorción importante.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: absorción (II)

- Atenuación por lluvia
 - En las bandas centimétricas y milimétricas la atenuación es consecuencia de la absorción y dispersión de energía. En frecuencias por encima de los 10 GHz, la lluvia es la causa dominante de atenuación.



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



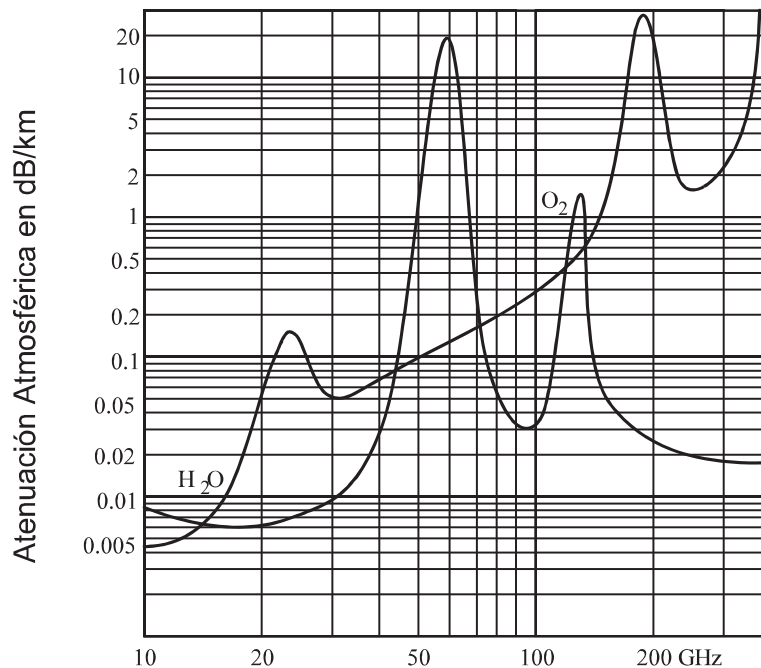
Onda de espacio: absorción (III)

- Absorción molecular
 - La atenuación que se produce en ondas cuya longitud es menor que 1.5 cm. ($f > 20$ GHz) puede deberse también a la interacción del campo de la onda y las moléculas de gas atmosférico. En ausencia de lluvia es debido a la energía gastada por la onda para calentar los gases, ionizarlos o excitar los átomos y moléculas (absorción resonante). Los principales gases a considerar son el oxígeno y el vapor de agua.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: absorción (IV)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



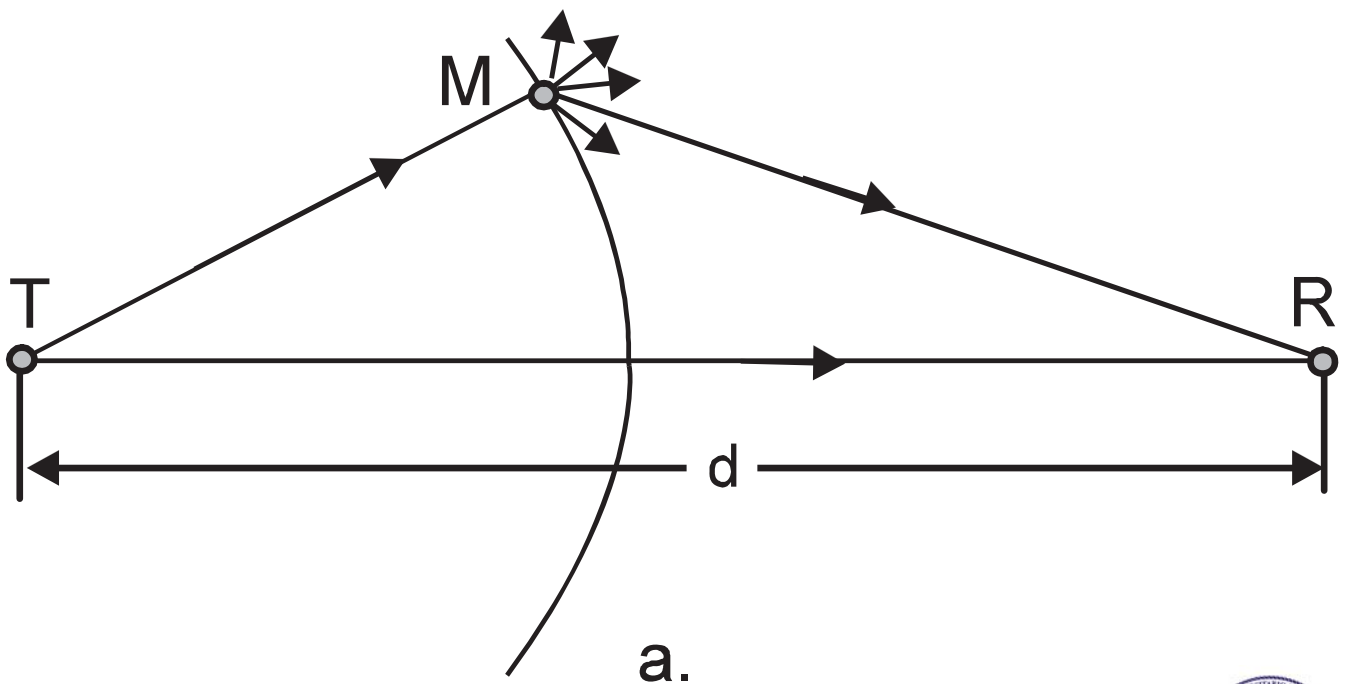
Onda de espacio: difracción (I)

- Cuando una onda electromagnética incide sobre un obstáculo se difracta
 - Hay que tener en cuenta el volumen que ocupa la onda
 - Se definen los elipsoides de Fresnel:
 - Focos situados en el transmisor (T) y el receptor (R)
 - Para el elipsoide de orden n , siendo P un punto cualquiera de su superficie, se cumple que la distancia del trayecto TPR es igual a la distancia $TR + n\lambda/2$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



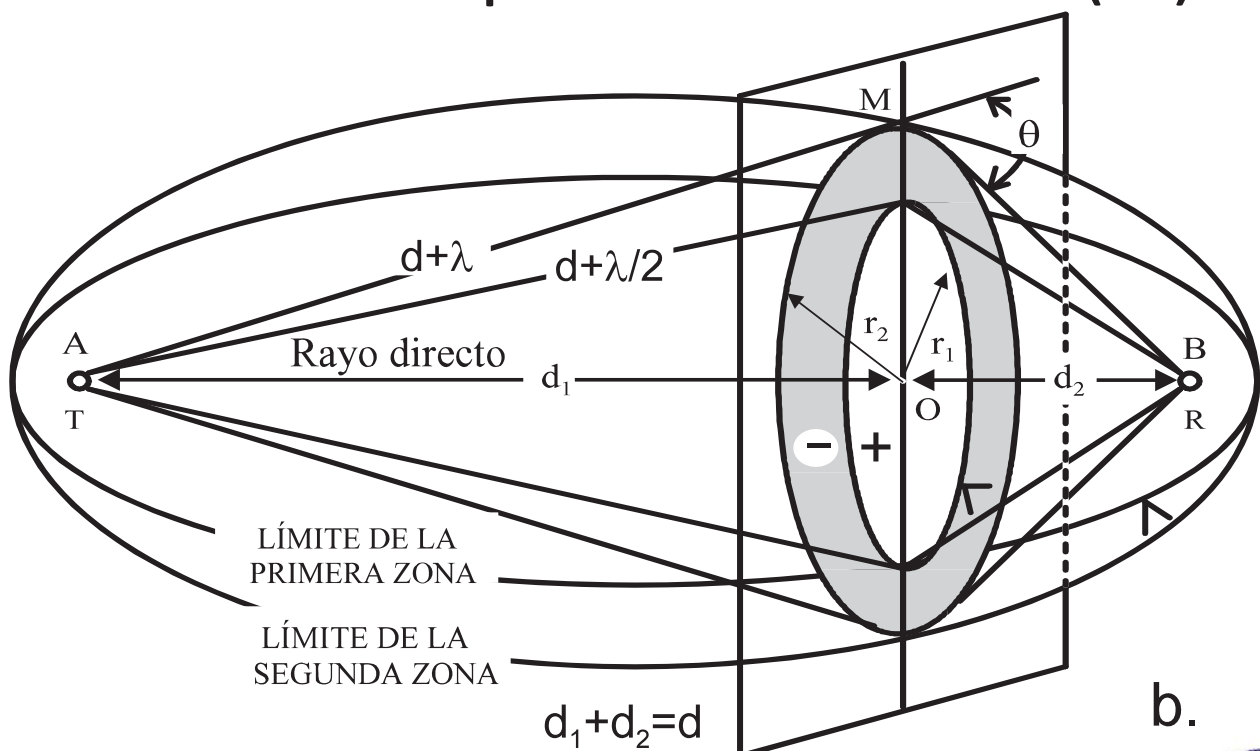
Onda de espacio: difracción (II)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: difracción (III)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



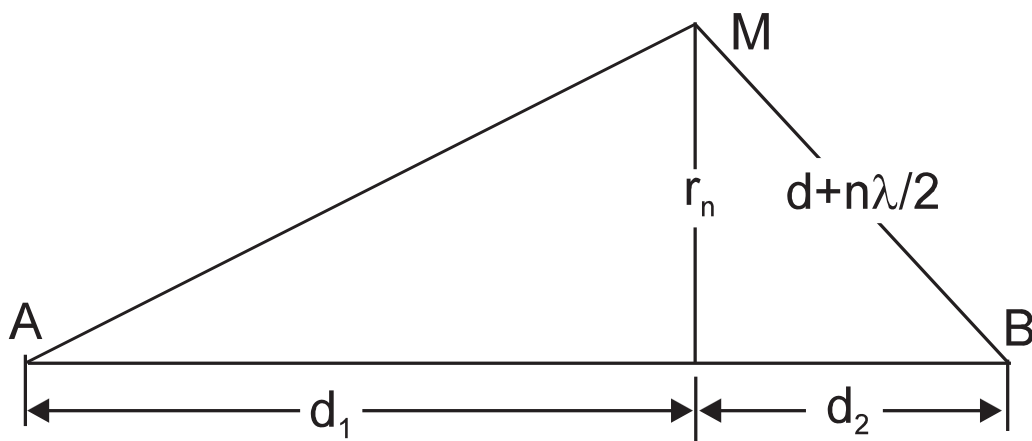
Onda de espacio: difracción (IV)

- Alrededor del punto O, punto de intersección de la recta AB con el frente de onda, se trazarán una serie de circunferencias cuyos radios sean sucesivamente r_1, r_2, \dots, r_n , tales que los trayectos entre A y B que contengan un punto de la circunferencia de radio r_n superen en $n\lambda/2$ a la distancia d (entre ambos terminales).
- Esto equivale a considerar zonas cuyas contribuciones en el punto de recepción se producen con desfases pequeños respecto de la onda directa, indicadas como positivas (+) ($n\lambda/2$ con n impar) y zonas cuya contribución se produce con desfases grandes, cercanos a 180° ($n\lambda/2$ con n par), zonas estas últimas que han sido marcadas con signo negativo (-).

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: difracción (V)



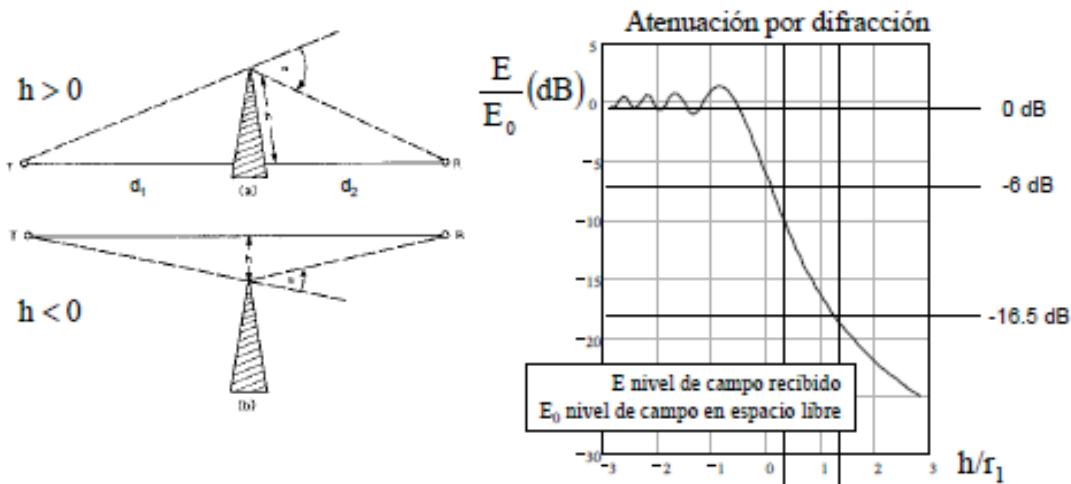
$$r_n = \sqrt{n\lambda d_1 d_2 / d}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: difracción (VI)

- Si el obstáculo no penetra dentro de la primera zona de Fresnel el efecto de la difracción es despreciable



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: difracción (VII)

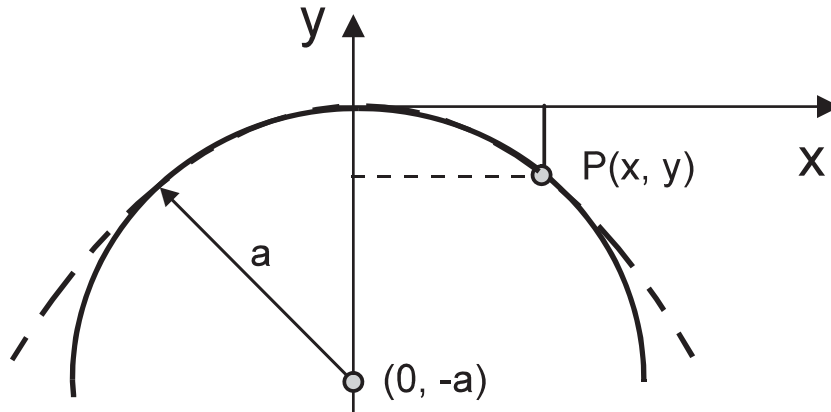
- Representación de perfiles
 - La representación de perfiles se realiza trasladando las alturas obtenidas a partir de las curvas de nivel sobre el terreno sobre un arco de circunferencia cuyo radio representa a escala el radio terrestre verdadero o el ficticio según el valor de k . En la práctica y teniendo en cuenta que la longitud de los vanos es muy inferior al radio terrestre, se puede aproximar dicho arco mediante una parábola, cosa que simplifica mucho el tratamiento matemático del problema.

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: difracción (VIII)

- Ecuación aproximada de la curvatura terrestre

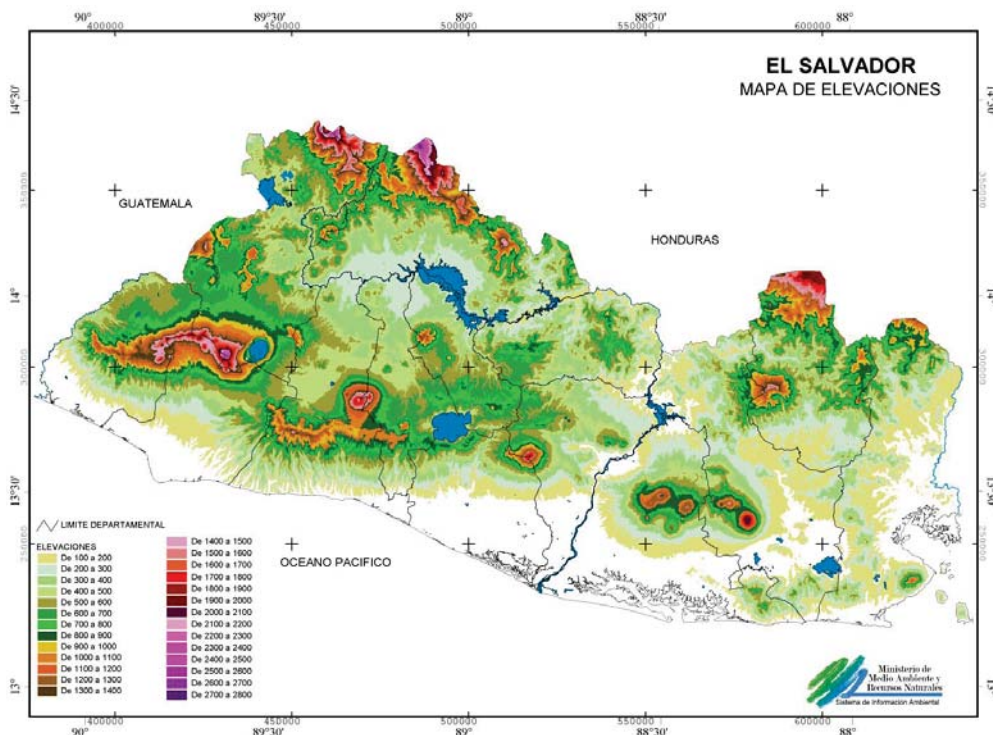


$$y = -x^2/2a$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: difracción (IX)

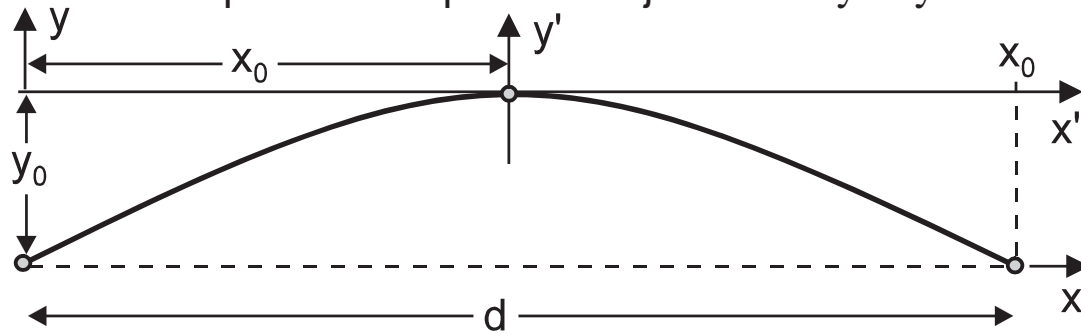


CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: difracción (X)

- Es posible efectuar un cambio del origen de coordenadas y considerar también el radio ficticio de la tierra. Por comodidad los ejes anteriores los denominaremos x' , y' . En las condiciones de la figura, para un radio terrestre efectivo ka , entonces es posible desplazar el eje x' a x e y' a y

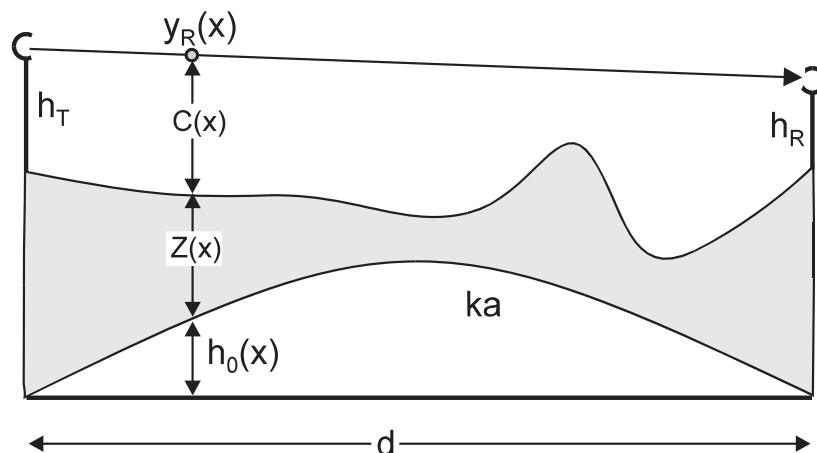


$$y = \frac{x(d - x)}{2ka}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: difracción (XI)



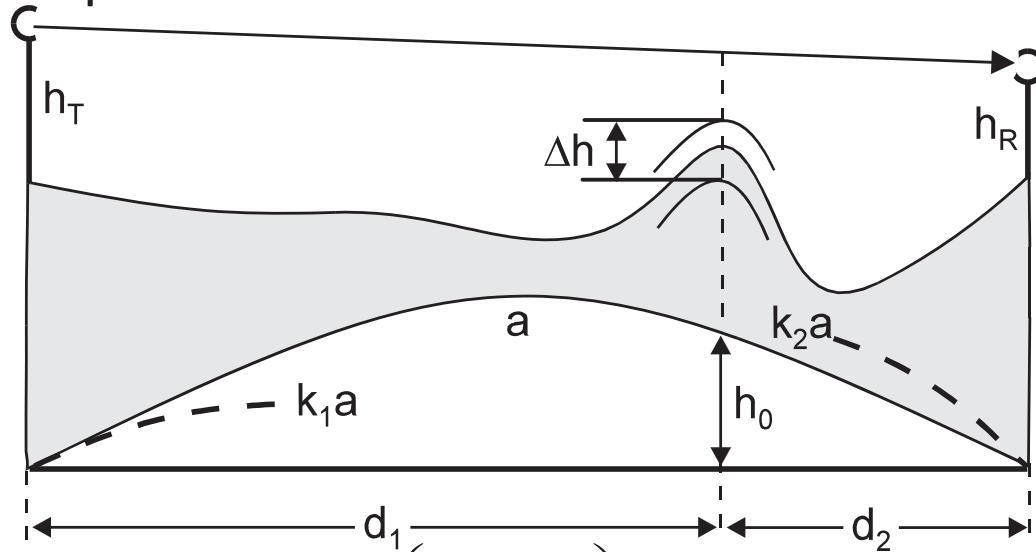
- $h_0(x)$: un punto sobre la parábola base para un radio ficticio ka
- d : es la longitud del vano
- $Z(x)$: la cota del terreno
- $y_R(x)$ la ordenada del trayecto

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de espacio: difracción (XII)

- Desplazamiento ficticio de un obstáculo



$$\Delta h_{mts} = \frac{d_{1Km} d_{2Km}}{2a_{Km}} \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1} \right) \times 10^3$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



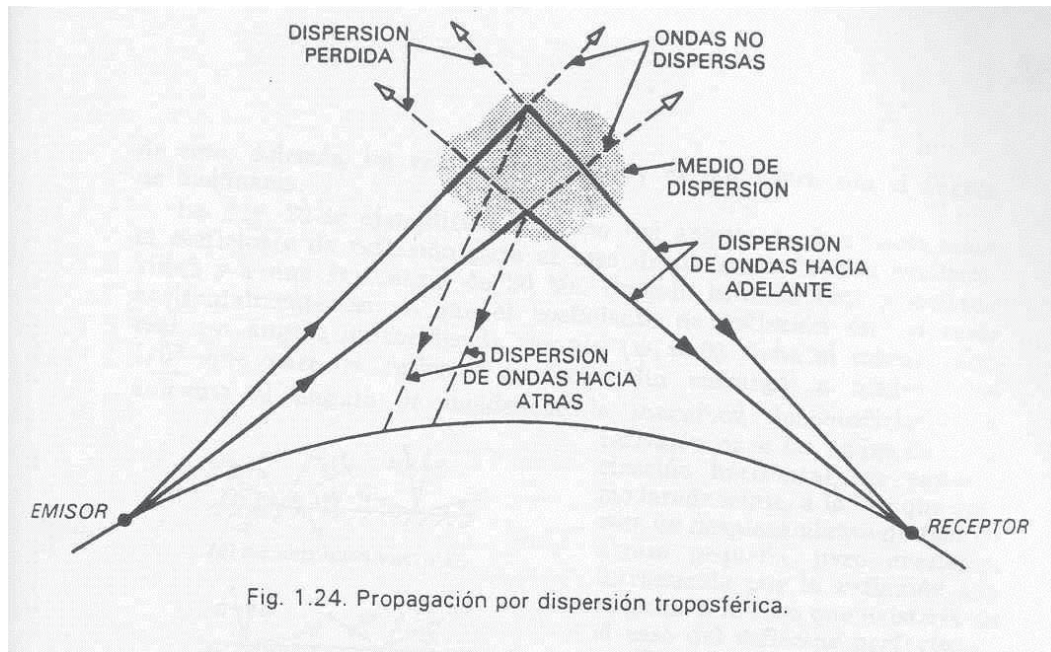
Onda de dispersión troposférica (I)

- Importante en bandas UHF.
- Fenómenos de multitrayecto debido a fenómenos diversos en la troposfera: cambios abruptos en el índice de refracción, masas de aire, grado de humedad, ...
- Llegan al receptor réplicas de la señal emitida, atenuadas y retardadas y provocan los fenómenos de desvanecimiento,

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Onda de dispersión troposférica (II)



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



**CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR**



**CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR**



Tema 5

Balance de un enlace radioeléctrico

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Introducción

- Balance de enlace: relación entre la potencia entregada al receptor en función de la potencia disponible en transmisión y las pérdidas y ganancias que aparecen en el trayecto entre transmisión y recepción.
- Objetivo del balance de enlace: análisis energético del enlace radioeléctrico para estudiar si se dan las condiciones mínimas necesarias para una buena recepción:
 - margen de potencia suficiente sobre el ruido presente (sistemas limitados en potencia)
 - margen de potencia suficiente sobre las interferencias presentes (sistemas limitados en interferencias)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Recordando lo visto en el tema 3...

- Potencia recibida en espacio libre:

$$p_r' = \phi_{inc} \cdot A_e = \frac{e_{inc}^2}{\eta} \frac{\lambda^2}{4\pi} g_r \quad (\text{espacio libre})$$

$$e_{inc} = \sqrt{\frac{\eta}{4\pi}} \frac{\sqrt{p_t' g_t}}{r} \Rightarrow p_r' = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 p_t' g_t g_r$$

- p_t' : potencia a la entrada de la antena transmisora real (con pérdidas). Coincide con la disponible a la salida del transmisor (p_{dt}) si hay adaptación de impedancias entre ellos
- p_r' : potencia a la salida de la antena receptora real (con pérdidas). Coincide con la entregada al receptor (p_{er}) si hay adaptación de impedancias entre ellos
- g_t (g_r): ganancia en potencia de la antena transmisora (receptora) en la dirección de la antena receptora (transmisora)
- r : distancia entre la antena transmisora y la receptora
- λ : longitud de onda de la emisión

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Balance del enlace radioeléctrico (I)

- Pérdida básica de propagación en espacio libre (entre antenas isotrópicas adaptadas y acopladas en polarización):

$$l_{bf} = \frac{p_t'}{p_r'} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 \quad (g_t, g_r = 1)$$

- Pérdida de transmisión en espacio libre (entre antenas cualesquiera adaptadas y acopladas en polarización):

$$l_{tf} = \frac{p_t'}{p_r'} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{g_t g_r}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Balance del enlace radioeléctrico (II)

- Pérdida básica de propagación (entre antenas isotrópicas adaptadas y acopladas en polarización):

$$l_b = \frac{p_t'}{p_r} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 a_e \quad (g_t, g_r = 1)$$

$$a_e = \left(\frac{e_0}{e} \right)^2 \quad \text{atenuación del campo (pérdidas en exceso) debido a no propagación en espacio libre}$$

- Pérdida de transmisión (entre antenas cualesquiera adaptadas y acopladas en polarización):

$$l_t = \frac{p_t'}{p_r} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{a_e}{g_t g_r}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Balance del enlace radioeléctrico (III)

- Pérdida del sistema (entre antenas cualesquiera acopladas en polarización):

$p_t' = p_{dt}(1 - |\Gamma_t|^2)$, Γ_t : coeficiente de reflexión entre el transmisor y la antena transmisora

$p_{er} = p_r'(1 - |\Gamma_r|^2)$, Γ_r : coeficiente de reflexión entre la antena receptora y el receptor

$$l_s = \frac{p_{dt}}{p_{er}} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{a_e}{g_t g_r} \frac{1}{(1 - |\Gamma_t|^2)} \frac{1}{(1 - |\Gamma_r|^2)}$$

- Pérdida del sistema (entre antenas cualesquiera):

$$l_s = \frac{p_{dt}}{p_{er}} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{a_e}{g_t g_r} \frac{1}{(1 - |\Gamma_t|^2)} \frac{1}{(1 - |\Gamma_r|^2)} \frac{1}{|\hat{e}_{inc} \cdot \hat{e}_r|^2}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Balance del enlace radioeléctrico (IV)

- Expresado en decibelios:

$$L_s(dB) = 32,45 + 20\log f(MHz) + 20\log r(Km) + L_{pol} + A_e - G_t - G_r + L_{at} + L_{ar}$$

$$-L_{pol}(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{1}{|\hat{e}_{inc} \cdot \hat{e}_r|^2}\right) \text{ pérdidas por desacoplo de polarización}$$

$$-L_{at}(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{1}{1 - |\Gamma_t|^2}\right) \text{ pérdidas por desadaptación de impedancias en transmisión}$$

$$-L_{ar}(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{1}{1 - |\Gamma_r|^2}\right) \text{ pérdidas por desadaptación de impedancias en recepción}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Polarización

- Desacoplo de polarización: entre dos antenas cualesquiera existe un desacoplo de polarización dado por el producto de sus vectores característicos:
 - Lineal con lineal: $I_{pol} = 1/\cos^2\alpha$
 - Lineal con circular: $I_{pol} = 2$ ($L_{pol} = 3dB$)
 - Circular con circular de igual sentido: $I_{pol} = 1$
 - Circular con circular de sentido contrario: $I_{pol} = \infty$
- El medio de transmisión provoca variaciones en el plano de polarización del campo

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Fórmula de Friis para el enlace

- En unidades naturales:

$$p_{er}(W, KW, mW \dots) = \frac{p_{dt}(W, KW, mW \dots)}{l_s}$$

- En unidades logarítmicas:

$$P_{er}(dBW, dBKW, dBm \dots) = P_{dt}(dBW, dBKW, dBm \dots) - L_s(dB)$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ruido

- Fuentes de ruido
 - Ruido externo natural: descargas de rayos, radiación de fuentes radioeléctricas celestes... Presente a todas las frecuencias
 - Ruido externo artificial: radiación procedente de maquinaria eléctrica, equipos eléctricos y electrónicos, líneas eléctricas... Disminuye al aumentar la frecuencia
 - Ruido interno: generado por el receptor y los circuitos pasivos de conexión antena - receptor

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ruido térmico (I)

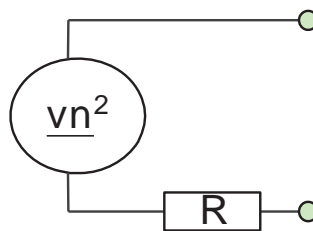
- En un material conductor, los electrones libres se mueven de forma aleatoria.
- Este movimiento aleatorio genera corrientes aleatorias con valor medio cero, pero no así su valor cuadrático medio

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ruido térmico (II)

$$\overline{v_n^2} = 4kbtR$$



- k constante de Boltzmann, $k=1,381 \cdot 10^{-23}$ jul/k
- t temperatura absoluta en Kelvin
- b anchura de banda en Hz.
- R Resistencia del conductor en Ω .

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ruido térmico (III)

- Potencia de ruido

$$n = \frac{\overline{v_n^2}}{4R} = ktb \text{ (W)}$$

- Ejemplo: potencia de ruido disponible para un ancho de banda de 4 KHz a temperatura ambiente (290 K):

$$N = 10 \log_{10}(1.381 \times 10^{-23} \times 290 \times 4000) = -138 \text{ dBm}$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Ruido en recepción

- La antena capta a través de su diagrama de radiación no sólo la señal en recepción, sino también el ruido externo, tanto natural como artificial
- Además, al estar fabricada de un material conductor, también generará ruido térmico
- Los elementos que conforman el receptor generarán más ruido térmico, que se irá sumando a la señal a medida que esta va pasando por cada uno de ellos

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Sistemas limitados en potencia (I)

- Son aquellos en los que la perturbación dominante es el ruido
- Viables si la relación señal a ruido en recepción supera un determinado valor umbral
- Ni las potencias recibidas de señal, ni las potencias de ruido son variables deterministas por lo que habrá que caracterizar la aleatoriedad o añadir un margen a los cálculos realizados suponiendo la señal determinista

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Sistemas limitados en potencia (II)

- Las pérdidas que produce el medio de propagación constituyen una variable aleatoria, cuyas variaciones se producen:
 - Para un mismo instante de tiempo, en distintas ubicaciones
 - Para una misma ubicación, en distintos instantes de tiempo
- La fórmula de Friis tendrá en cuenta alguno de los estadísticos de la variable aleatoria (valor mediano, valor medio...)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Sistemas limitados en potencia (III)

- **Disponibilidad:** porcentaje de tiempo en que un enlace supera los requisitos de calidad necesarios (relación señal/ruido, portadora/interferente, probabilidad de error...)
- En los sistemas limitados en potencia, interesa la relación señal/ruido:

$$\frac{S}{N} (dB) = S(dBxx) - N(dBxx) \quad xx: \mu W, mW \dots$$

- S: potencia de señal recibida, N: ruido en recepción (medidos en el mismo punto)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Sistemas limitados en potencia (IV)

- A partir de la relación señal/ruido requerida para cumplir los requisitos de calidad necesarios y la potencia de ruido a la entrada del sistema receptor, se calcula la **potencia umbral**:

$$P_{ru}(dBxx) = N(dBxx) + \frac{S}{N} (dB) \quad xx: \mu W, mW \dots$$

- Es la mínima potencia recibida necesaria para cumplir los requisitos de calidad. También se conoce como **sensibilidad**
- Para garantizar una disponibilidad alta, se deja un margen que compense las variaciones estadísticas de la señal recibida, y se define la **potencia nominal** como aquella potencia recibida que tiene en cuenta dicho margen:

$$P_{rn}(dBxx) = P_{ru}(dBxx) + M(dB) \quad xx: \mu W, mW \dots$$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Interferencia (I)

- **Interferencia:**

- Suma de una energía no deseada sobre la señal recibida en un sistema de radiocomunicación
- Dicha energía procede de una o varias emisiones no deseadas
- El resultado es la degradación de la calidad, falseamiento o pérdida de información de la señal deseada

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Interferencia (II)

- **Tipos de interferencia:**

- Según el número de fuentes: simple (una única fuente) y múltiple (varias fuentes)
- Según la frecuencia: cocal (a la misma frecuencia portadora del enlace deseado) y de canales adyacentes (la frecuencia de la señal interferente corresponde a canales contiguos al del enlace deseado)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Sistemas limitados en interferencia (I)

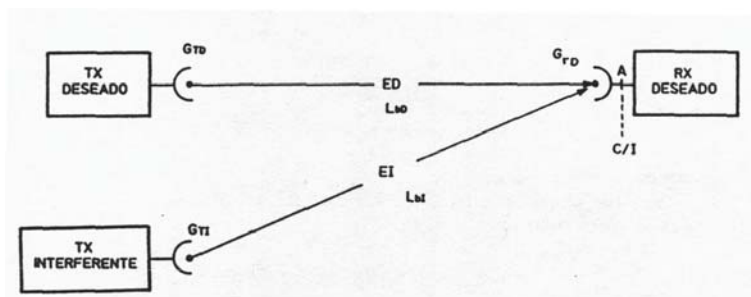
- En los enlaces punto a punto, interesa la **relación portadora/interferente**:

$$\frac{C}{I} (dB) = P_{rD}(dBxx) - P_{rI}(dBxx) \quad xx: \mu W, mW \dots$$

- Potencias de señal deseada e interferente:

$$P_{rD}(dBxx) = P_{tD}(dBxx) + G_{tD} - L_D + G_{rD}$$

$$P_{rI}(dBxx) = P_{tI}(dBxx) + G_{tI} - L_I + G_{rI}$$



CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Sistemas limitados en interferencia (II)

- En enlaces zonales, en los que no se puede prever el valor de ganancia de la antena receptora, se trabaja con los campos de señal deseada e interferente en la zona de recepción: **relación de protección**

$$R_p (dB) = E_D (dBu) - E_I (dBu) = P_{tD} - P_{tI} + G_{tD} - G_{tI} + L_I - L_D$$

- A partir de este valor se obtiene la distancia de cobertura del transmisor
- También habrá que tener en cuenta la variabilidad de las señales recibidas, tanto la deseada como la interferente: añadir margen para disponibilidad alta (tanto en enlaces punto a punto como en enlaces zonales)

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR



Sistemas limitados en interferencia (III)

- Para calcular la relación C/I con interferencia múltiple en enlaces punto a punto:

$$\frac{C}{I} (dB) = P_{rd}(dBxx) - 10 \log_{10} \left(\sum_i P_{ri}(xx) \right) \quad xx: \mu W, mW \dots$$

- Interferencia múltiple en enlaces zonales:

Campo mínimo utilizable $E_u = f(E_{p1}, E_{p2} \dots E_{pn})$

Campos perturbadores $E_{pi}(t\%) = E_{ii}(100 - t\%) + R_{pi} + D_{ri}$

CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA DEFENSA
ESCUELA NAVAL MILITAR

