

CAPÍTULO 5º

RADIOENLACES DIGITALES



RADIOENLACES DIGITALES DE SERVICIO FIJO

- Frecuencia: 2 - 40 GHz. Recientemente equipos comerciales hasta 85 GHz.
- Propagación con visibilidad directa (LOS).
- Distancias máximas de vano: 5-80 km.
- Configuración punto a punto o punto a multipunto.
- Monocanal o multicanal.
- Vano único o multivano.



Evolución histórica:

- Radioenlaces analógicos FM-FDM y FM-TV. Origen: 1947.
- Primeros radioenlaces digitales: FSK y QPSK. Origen: 1968.
- Digitalización de las redes de telefonía (Evolución a RDSI).
- Digitalización de redes de TV.
- Sistemas de alta eficiencia espectral (Ej. QAM).



Situación actual. Diferentes factores:

- Alta capacidad (Hasta 310 Mbit/s o incluso 1 Gbit/s):
 - Reserva (no red principal).
 - Métodos eficientes de modulación (QAM y TCM)
 - Sistemas PDH y SDH. Aparición de nuevos usos (1 Gbit Ethernet, para vanos cortos).
 - Capacidades de 1 ó 2 tramas STM-1 por radiocanal.
- Baja y media capacidad (hasta 34 Mbps):
 - Gran demanda en nuevas aplicaciones (datos, móviles, acceso, etc...). Necesidad creciente de capacidad.
 - Contexto de liberalización.
 - Radioenlaces urbanos de corta distancia (en muchos casos)
 - Aplicación de frecuencias elevadas (milimétricas).

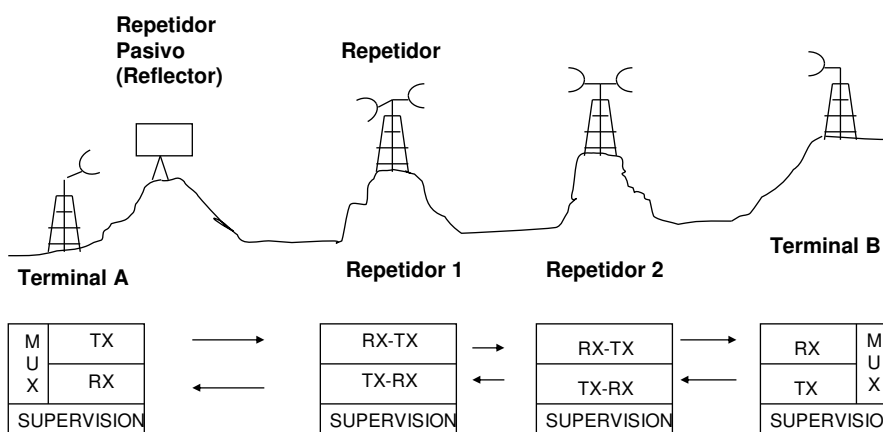


- Ventajas de los radioenlaces frente a sistemas por línea.
 - Inversión inicial reducida. Instalación rápida.
 - Capacidad de recuperación rápida en caso de desastres.
 - Conservación más económica. Facilidad de reparación.
 - Superación de obstáculos naturales.
 - Medio de transmisión homogéneo (excepto en desvanecimientos).

- Inconvenientes
 - Necesidad de visibilidad directa. Emplazamientos elevados.
 - Segregación de canales poco flexible.
 - Consumo de espectro radioeléctrico.
 - Presencia de desvanecimientos.
 - Parámetros de calidad difícilmente comparables a los de fibra óptica.



RADIOENLACE MULTIVANO



NECESIDAD DE REDUNDANCIA DE EQUIPOS Y SUPERVISIÓN

- Para asegurar la continuidad del servicio son precisos equipos de reserva. Estos se activan en caso de fallos o desvanecimientos.
- Configuraciones M + N (Ej. 2 + 1, 3 + 1, ...).
- Los repetidores suelen estar desatendidos. Se requieren medidas de su funcionamiento y la transmisión de los datos a un punto central. También se precisa capacidad de telemando.
- Las necesidades de supervisión dependen de la aplicación, en particular de los objetivos de calidad e indisponibilidad.
- Canales de servicio, de telecontrol, telealarma y telemando.

SSR

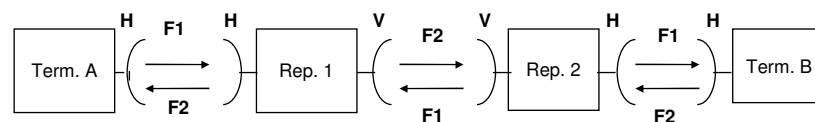


6



PLANES DE FRECUENCIAS

- Necesidad de reutilización adecuada de frecuencias (mínimo consumo de espectro). Planes a 2 frecuencias.



Ejemplo de Plan a 2 Frecuencias

SSR



7



PLANES DE FRECUENCIA Y DISPOSICIÓN DE RADIOCANALES

- Normalización para facilidad de fabricantes, operadores y gestión del espectro.
- Contenido de un Plan:
 - Frecuencia de referencia (designa el plan).
 - Anchura de banda.
 - Separación dúplex.
 - Paso de canalización.



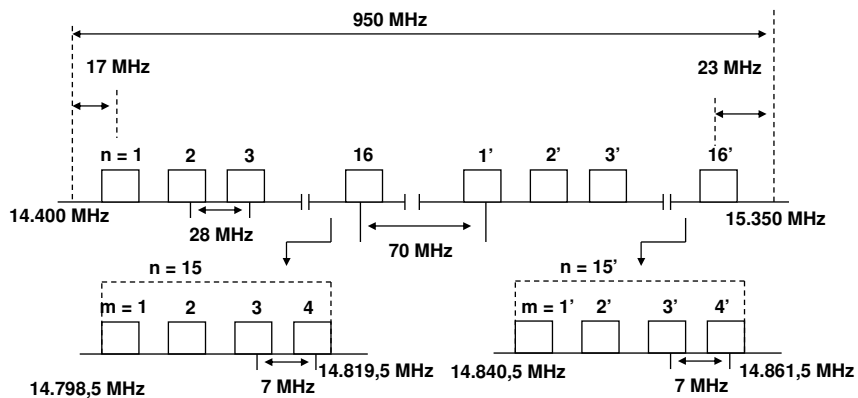
- Número de radiocanales.
- Bandas de guarda.
- Polarización.
- Cálculo de frecuencias.

En Europa: Canales de anchura múltiplo de 3,5 MHz.

Típicamente: 3,5 MHz; 7 MHz; 14 MHz; 28 MHz; 56 MHz



EJEMPLO DE PLAN DE RADIOCANALES



SSR

10



ANCHURA DE BANDA DE TRANSMISIÓN

$$B \text{ (MHz)} = F \cdot V_b \cdot K$$

$$F = 1 + \alpha$$

α : Parámetro de caída progresiva (roll-off).

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

Típicamente 0,25 ó 0,30.

V_b : velocidad de bits (Mbit/s).

$$K = 1/\log_2 M.$$

M: número de estados de modulación

SSR

11



EJEMPLO

- $V_b = 2 \times 8 \text{ Mbit/s}$.
- QPSK, $M = 4$.
- $\alpha = 0,3$

$$B = 1,3 \cdot 16 \cdot (1/2) = 10,4 \text{ MHz}$$

SSR

12



DIAGRAMA DE BLOQUES DE EQUIPOS

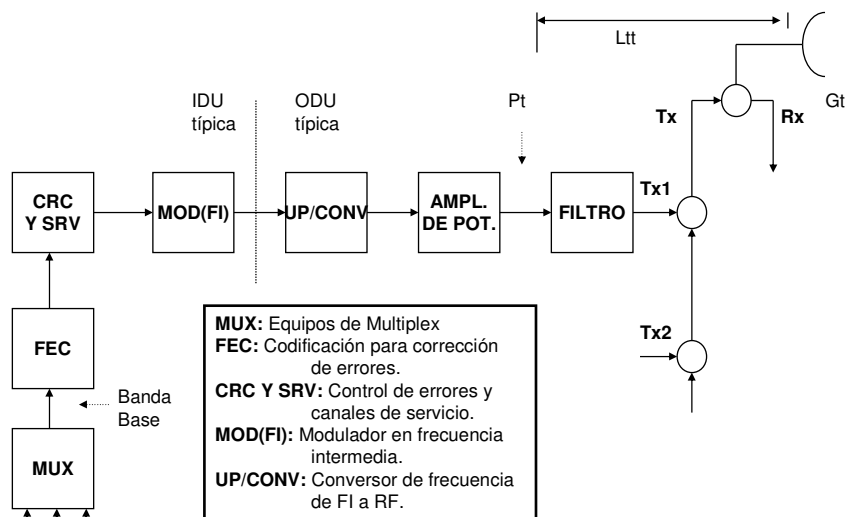
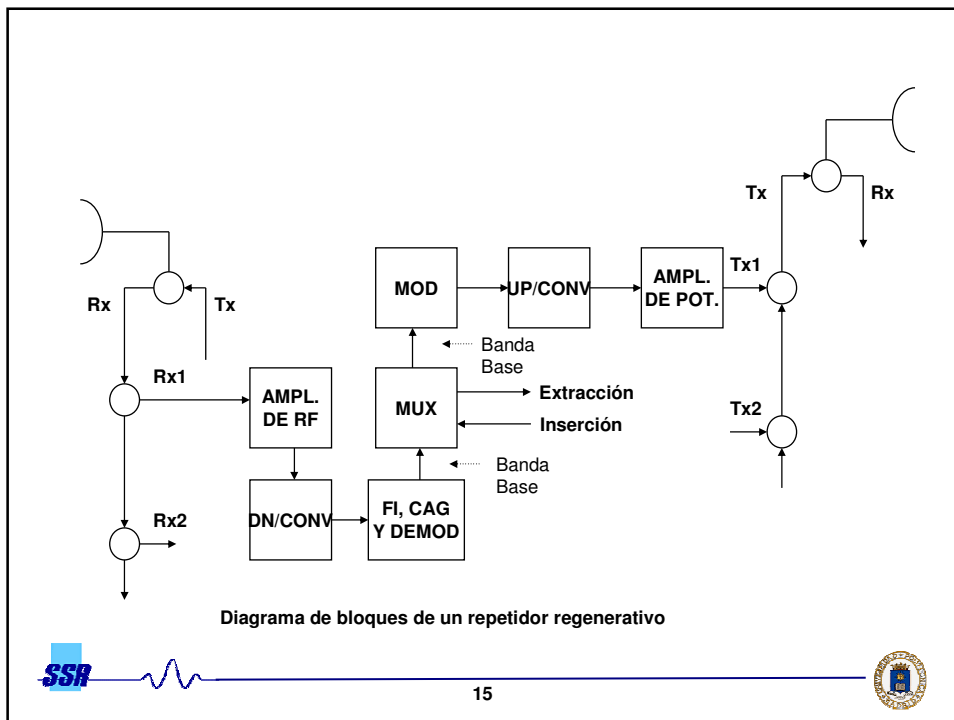
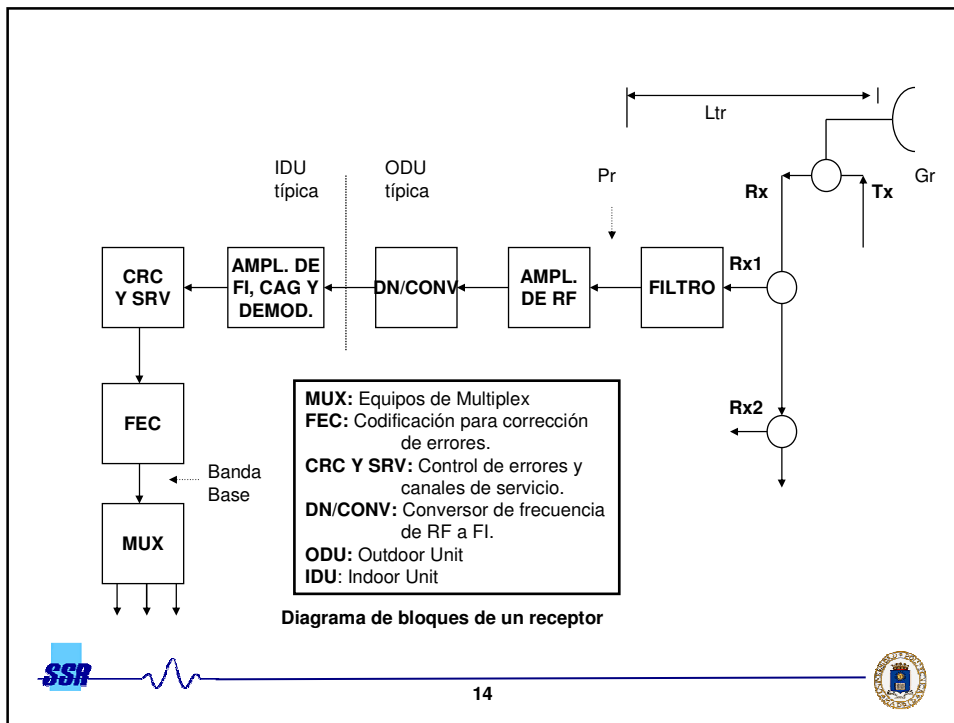


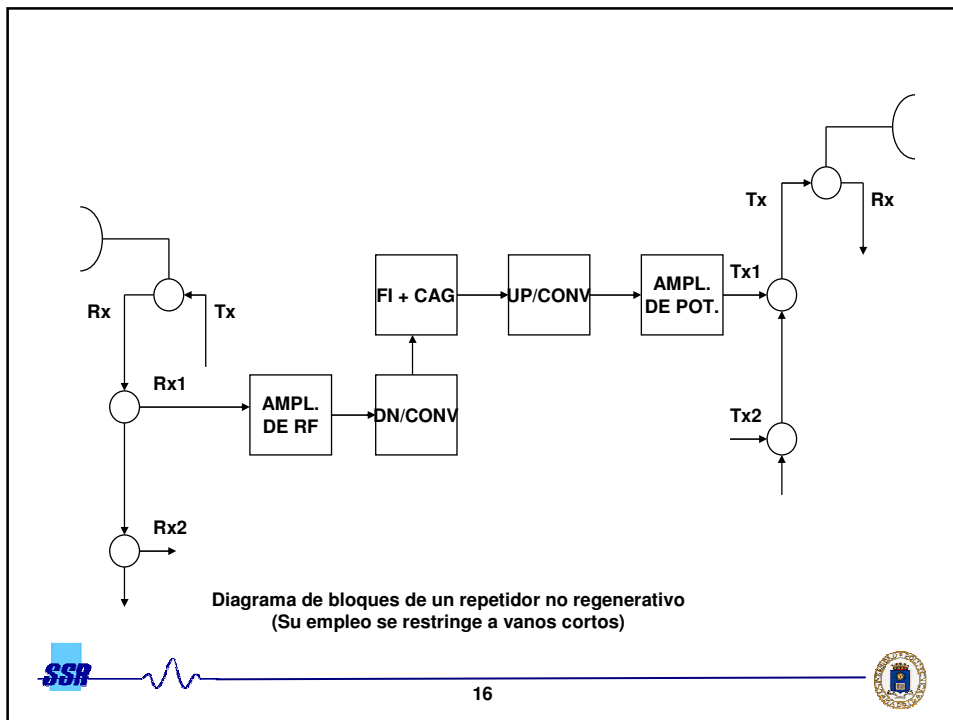
Diagrama de bloques de un transmisor

SSR

13







DISPOSITIVOS PASIVOS

- Circuitos de acoplamiento (Circuladores, filtros, etc...)
- Líneas: Coaxiales ($f < 3$ GHz) y guías de onda ($f \geq 3$ GHz)
- Antenas parabólicas, con alimentador central o descentrado (offset).

Ganancia de antena
$$g = k \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

k: eficiencia de la antena (50 a 60 %)

D: diámetro (m)

$$G \text{ (dB)} = 20,4 + 10 \cdot \log k + 20 \cdot \log D(\text{m}) + 20 \cdot \log f(\text{GHz})$$

Ancho de haz
$$BW(^{\circ}) = \frac{21}{f(\text{GHz})D(\text{m})}$$

EJEMPLO

- Antena de diámetro 30 cm y eficiencia 53 % a 23 GHz.

$$D = 0,3 ; k = 0,53 ; f = 23 \text{ GHz}$$

$$G = 20,4 + 10 \cdot \log 0,53 + 20 \cdot \log 0,3 + 20 \cdot \log 23$$

$$G = 34,4 \text{ dB}$$

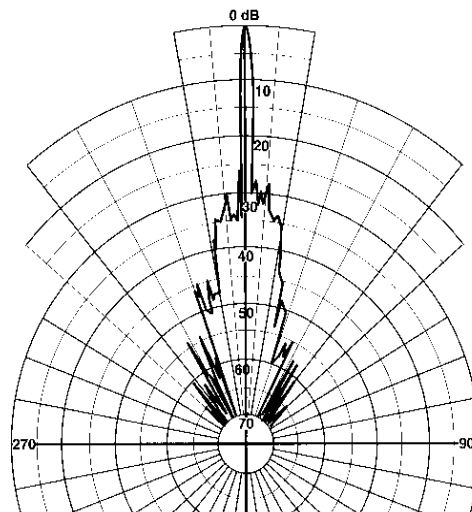
$$BW^\circ = \frac{21}{23 \cdot 0,3} = 3^\circ \quad (0,0524 \text{ rad})$$

Puntería a 10 km.

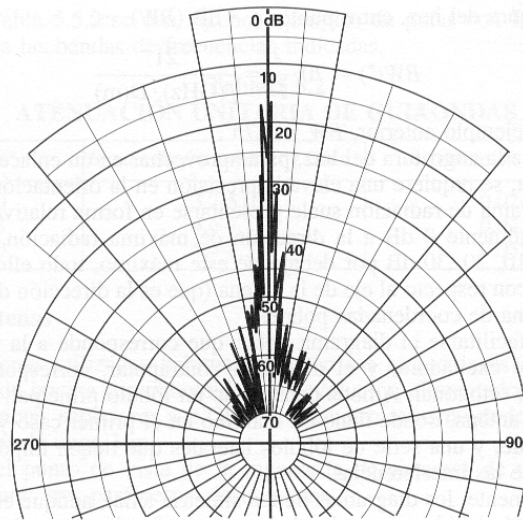
$$y = 10^4 \cdot 5,24 \cdot 10^{-2} = 524 \text{ m.}$$



EJEMPLO DE DIAGRAMA DE RADIACIÓN COPOLAR



EJEMPLO DE DIAGRAMA DE RADIACIÓN CONTRAPOLAR



SSR



20



DIAGRAMAS DE LÓBULOS LATERALES

- Envoltentes de referencia para cálculos de interferencias y coordinación.

- Ganancia relativa.

$$G \text{ (dB)} = 52 - 10 \cdot \log(D/\lambda) - 25 \cdot \log \varphi ; 100 \left(\frac{\lambda}{D} \right)^0 \leq \varphi \leq 48^\circ$$

$$G \text{ (dB)} = 10 - 10 \cdot \log(D/\lambda) ; 48^\circ < \varphi \leq 180^\circ$$

D: diámetro de la antena (m)

λ : longitud de la onda (m)

SSR



21



EJEMPLO

$D = 30 \text{ cm}$; $f = 23 \text{ GHz}$

$\lambda/D = (0,3/23)/0,3 = 1/23$; $100 (\lambda/D) = 4,3^\circ$

1) $\varphi = 30^\circ$; $G = 52 - 10 \cdot \log(23) - 25 \cdot \log 30 = 1,5 \text{ dB}$

2) $\varphi = 60^\circ$; $G = 10 - 10 \cdot \log(23) = -3,6 \text{ dB}$

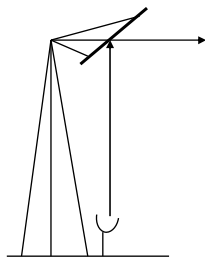
SSR



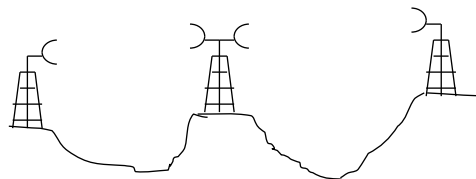
22



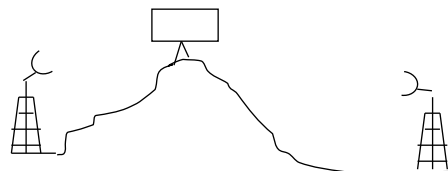
REPETIDORES PASIVOS



Reflector especular en torre o estructura elevada



Conexión pasiva de dos antenas por medio de una guía de onda



Reflector especular para salvar un obstáculo

SSR



23



PARÁMETROS DE UN RADIOENLACE

P_t (dBm): Potencia de transmisión.

L_{tt} L_{tr} (dB): Pérdidas en los acopladores (transmisor y receptor).

G_t G_r (dB): Ganancias de las antenas.

L_b (dB): Pérdida básica de propagación.

P_r (dBm): Potencia recibida en la entrada del receptor.

Balance del enlace:

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) - L_{tt}(\text{dB}) + G_t(\text{dB}) - L_b(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) - L_{tr}(\text{dB})$$

Si varía L_b también varía la potencia recibida (desvanecimientos).

Uso del control automático de ganancia.



F_r (dB): Factor de ruido del receptor.

n_0 (W/Hz): Densidad espectral de ruido.

En la entrada del receptor la densidad espectral de ruido equivalente es: $n_0 = k \cdot T_0 \cdot f_r$, siendo:

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ W/(Hz K) Constante de Boltzmann

$T_0 = 290$ K Temperatura de referencia

En unidades logarítmicas $kT_0 = -174$ dBm/Hz.



p_{eb} : Probabilidad de error en un bit. Normalmente se obtiene en función de E_b/N_0 o bien de C/N.

e_b : Energía recibida por bit. Producto de la potencia recibida por el periodo de bit; $e_b = p_r \cdot T_b$

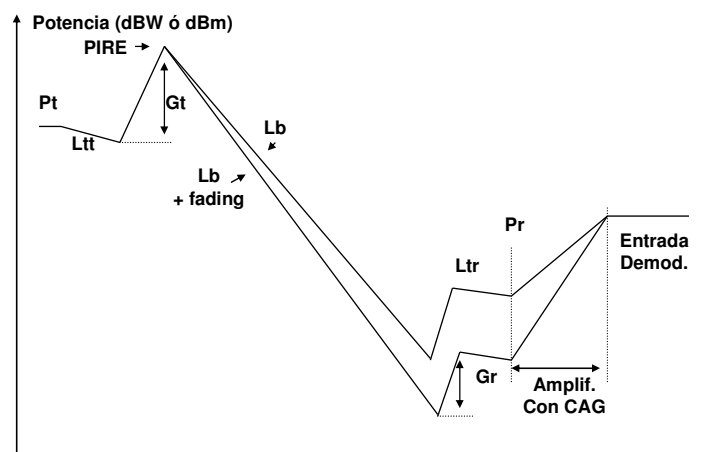
c: Potencia de señal. Equivale a p_r si el punto de medida es el mismo.

n: Potencia total de ruido. Se obtiene como $n_0 \cdot B_T$

B_T : Ancho de banda de transmisión.



HIPSOGRAMA DE UN VANO



MODULACIÓN

- La mayor parte de los radioenlaces digitales actuales utilizan modulación QAM o alguna derivada de la misma.

- Cada símbolo puede expresarse como:

$$v(t) = a_k \cos(\omega_p \cdot t) - b_k \sen(\omega_p \cdot t) = \text{Re}[z_k \cdot e^{j\omega_p t}]$$

- Donde $z_k = a_k + jb_k$. Esta expresión es válida para $(k-1)T < t < kT$, y no considera el filtrado, sino transiciones bruscas entre un símbolo y el siguiente. En la práctica se limita el ancho de banda con filtros en coseno alzado.



- La modulación M-QAM tiene M símbolos diferentes, es decir, M posibles valores de z_k . Por tanto permite codificar $\log_2 M$ bits en cada símbolo.
- Los sistemas 4-QAM son equivalentes a QPSK (con alguna diferencia práctica). Se utilizan mucho 16-QAM y 64-QAM. Para alta capacidad se usa 256-QAM y 512-QAM, éste último con TCM.



PÉRDIDA BÁSICA

L_b : Pérdida básica de propagación. En radioenlaces con visibilidad se calcula como:

$$L_b = L_{bf} + L_{di} + L_d + L_a + L_p + L_g \text{ (dB)}$$

L_{bf} : Pérdida básica en espacio libre.

L_{di} : Pérdida por difracción.

L_d : Pérdida por desvanecimiento multirrayecto.

L_a : Pérdida por desapuntamiento.

L_p : Atenuación debida a las precipitaciones.

L_g : Atenuación debida a los gases atmosféricos.

La Recomendación 530 del UIT-R es la referencia fundamental.



PÉRDIDA POR DIFRACCIÓN

- Se recomienda (Rec. P.530) que la altura de las antenas permita:
 - Despejamiento igual a R_1 en condiciones usuales (valor mediano de k).
 - Despejamiento igual a 0 (rayo rasante) con obstáculo aislado o a $0,3 R_1$ con obstáculo redondeado, en clima continental y para el valor de k rebasado el 99,9% del peor mes.
- Siempre una altura mínima para salvar edificaciones, etc...
- Un despejamiento excesivo no siempre es favorable. La presencia de obstáculos puede evitar reflexiones en el suelo.



DESVANECIMIENTOS

- Variaciones de nivel en la señal recibida. Tres tipos:
 - Variaciones “usuales”. De carácter aleatorio y distribución gaussiana (en dB). Debidas a turbulencias atmosféricas, etc...

En ocasiones la desviación típica aumenta considerablemente, manteniendo el valor medio (centelleo).

Dado el gran margen con que trabajan los radioenlaces, no suelen plantear problemas (sí puede haberlos en comunicaciones por satélite). En general no se consideran. Si fuera necesario la Rec. P.530 del UIT-R incluye un método para hacerlo, así como para calcular el refuerzo de señal.



- Desvanecimientos lentos por efecto de la difracción. Debido a variaciones del factor k (radio ficticio de la tierra) se produce un incremento de la difracción.

Se trata de desvanecimientos poco profundos (algunos dB), que no deben cortar el enlace. Su duración puede ser considerable.

Puesto que su origen es la curvatura del rayo, su efecto es prácticamente independiente de la frecuencia (dentro de la banda). Es por tanto desvanecimiento plano.

Es suficiente con cumplir las reglas de la Rec. P.530 ya mencionadas.



- Desvanecimientos lentos por efecto de la lluvia. A causa de las precipitaciones el nivel recibido puede caer significativamente.

Estos desvanecimientos son poco profundos hasta unos 12 GHz, pero pueden cortar el enlace en frecuencias más elevadas.

Dado que su profundidad depende de la distancia y de la frecuencia, pueden ser la causa de la limitación de alcance en frecuencias altas.

En general son lentos (tiempos del orden de minutos). Afectan a la disponibilidad del enlace.



- Desvanecimiento multitrayecto. La combinación de rayos en el receptor, procedentes de trayectos distintos, puede causar desvanecimientos profundos .

Para ello deben combinarse dos señales (dos rayos) de amplitud similar y fase contraria: Fenómeno poco probable pero muy destructivo.

Por la misma razón, son desvanecimientos breves (tiempos del orden de segundos para los más profundos). Afectan a la calidad del enlace.

Si existen reflectores en el terreno (suelo, agua, monte, etc...) el desvanecimiento no es profundo todo el tiempo (la fase varía aleatoriamente), pero la probabilidad de que lo sea aumenta mucho.

Se compensan con dispositivos anti-reflexión.



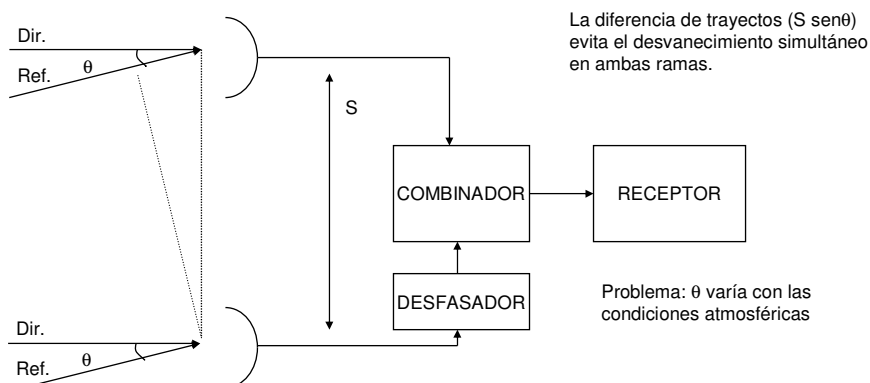
EFFECTOS DE LOS DESVANECIMIENTOS

- Desvanecimiento plano:
 - Aumento del ruido: Incremento de la probabilidad de error.
 - Corte del enlace: Tasas de error por debajo del umbral.
- Desvanecimiento selectivo:
 - Interferencia entre símbolos.
 - Efectos sobre la recuperación de la portadora.
 - Efectos sobre la recuperación del reloj de datos.
 - Aumento tasa de error y corte (outage)
- Protecciones:
 - Sistemas anti-reflectantes.
 - Diversidad.



PROTECCIÓN FRENTE A REFLEXIONES EN SUELO

Técnicas de apantallamiento o de inclinación de antenas.
Sistemas antirreflectantes:

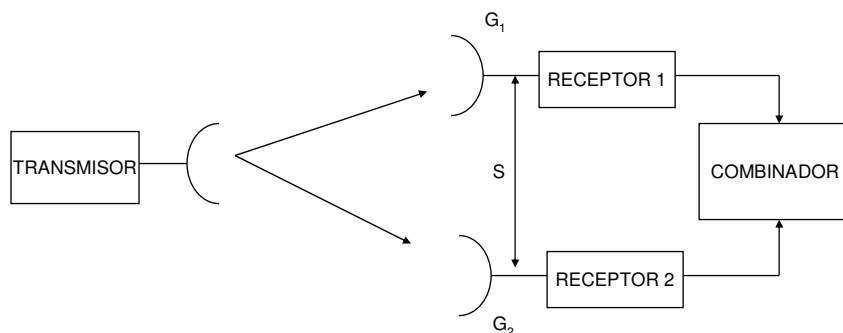


DIVERSIDAD

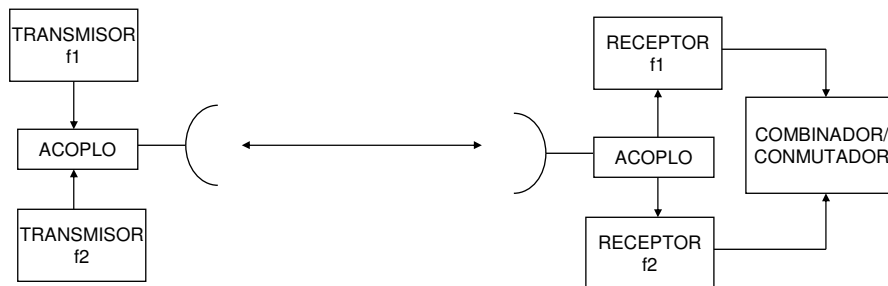
- Uso general para reducir la probabilidad de desvanecimientos.
 - Diversidad de espacio.
 - Diversidad de frecuencia.
 - Diversidad de ángulo.
 - Diversidad de polarización.
 - Diversidad de ruta.
- El último es especialmente oneroso, pero es el único válido frente al efecto de las precipitaciones.
- Los más utilizados son los dos primeros. La diversidad de ángulo suele combinarse con diversidad de espacio, pues necesita también dos antenas. La diversidad de polarización no aporta ventajas en enlaces con visibilidad directa.



DIVERSIDAD DE ESPACIO



DIVERSIDAD DE FRECUENCIA



PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN

- Selección por conmutación.
 - Se elige la mejor de las señales disponibles.
- Selección por combinación
 - Combinación lineal: Se suman las señales alineadas en fase.
 - Combinación de relación máxima: Se suman las señales alineadas con factores de peso.
- En todos los casos, se descarta una de las señales si está muy degradada respecto a la otra.

CÁLCULOS DE CALIDAD Y DISPONIBILIDAD

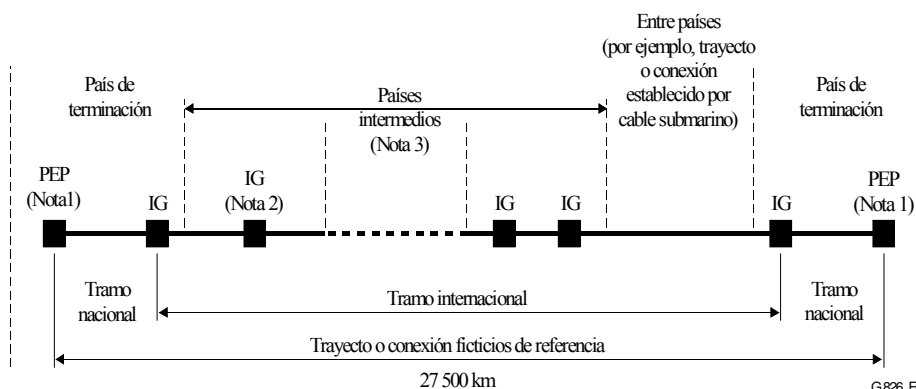


TRAYECTOS Y CONEXIONES DIGITALES FICTICIAS DE REFERENCIA

- Para la asignación de objetivos de DISPONIBILIDAD y de CALIDAD, la Rec. UIT-T G.801 "Redes digitales" define modelos de trayectos y conexiones digitales, con una longitud y estructura determinados.
- Una conexión digital ficticia de referencia (HRX), es un modelo de enlace con velocidad $N \times 64$ bit/s ($1 \leq N \leq 31$) de 27.500 km.



- Un trayecto digital ficticio de referencia (HRP) es un conjunto de medios de transmisión de una señal digital con una velocidad determinada, también de 27.500 km de longitud.
- Para la distribución de los objetivos de indisponibilidad y calidad de errores (error performance), el HRP o la HRX se dividen en un tramo internacional y tramos nacionales, separados por pasarelas internacionales, IG (International Gateways).



G.826_F03

NOTA 1 – Si se considera que un trayecto termina en la pasarela internacional (IG, *international gateway*), sólo se aplica la asignación del tramo internacional.

NOTA 2 – Se pueden definir una sola o dos IG (de entrada o salida) por país intermedio.

NOTA 3 – Se suponen cuatro países intermedios.



PARÁMETROS DE DISPONIBILIDAD Y CALIDAD

- La Rec. UIT-T G.826 ha establecido objetivos de calidad de errores EPO (Error Performance Objectives), para:
 - A. Trayectos digitales internacionales de jerarquía plesiócroma.
 - B. Conexiones digitales internacionales a $N \times 64$ kbit/s ($1 \leq N \leq 31$).
- Los objetivos se aplican en un sentido del trayecto o conexión.



- En el caso A se usa el concepto de medición por bloques empleando códigos de detección de errores. Un bloque, es un conjunto de bits sucesivos asociados al trayecto.
- En el caso B se realizan mediciones de errores de bit, con señales de prueba, para obtener la tasa de errores de bit, BER (Bit Error Ratio).
- La formulación de objetivos se hace por fases:
 1. Definición de eventos de errores.
 2. Parametrización de los eventos
 3. Objetivos = Valores particulares de los parámetros.



- Un evento es una degradación que influye en la calidad de funcionamiento. Los eventos pueden ser:
 - Anomalías
 - Errores en la señal de alineación de trama.
 - Bloques erróneos.
 - Defectos
 - Pérdidas de señal (LOS).
 - Indicación de alarma (AIS).
 - Pérdida alineación de trama (LOF).



EVENTOS PARA DETERMINAR CARACTERÍSTICAS DE ERRORES

- a. Para trayectos:
 1. Bloque con uno o mas errores, EB (Errored Block).
 2. Segundo con errores, ES (Errored Second).
Periodo de un segundo con uno o mas errores EB
 3. Segundo con muchos errores, SES (Severely Errored Second).
Periodo de un segundo que contiene el 30 % o mas de EB.
 4. Error de bloque de fondo, BBE (Background Block Error)
Bloque con errores que no forma parte del SES.



EJEMPLO

Transmisión de 1.000 bloques/segundo y tiempo de observación de 10 segundos.

	Segundo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bloques con errores	0	50	100	200	320	400	180	150	0	0

Eventos:

ES = 7 ; SES = 2 ; BBE = 680



b. Para conexiones:

1. Segundo con errores, ES.
 - Uno o muchos errores.
2. Segundo con muchos errores, SES.
 - Segundo con $BER > 10^{-3}$ ó pérdida de señal.



PARÁMETROS DE CARACTERÍSTICAS DE ERROR PARA TRAYECTOS Y CONEXIONES

- Tasa de segundos de errores, ESR (Errored Second Ratio).

$$ESR = \frac{ES}{\text{Total de segundos}}$$

- Tasa de segundos con muchos errores; SESR (Severely Errored Second Ratio).

$$SESR = \frac{SES}{\text{Total de segundos}}$$



- Tasa de bloques con errores de fondo, BBER (Background Block Error Ratio)

$$BBER = \frac{BBE}{\text{Total de bloques}}$$

El total de bloques excluye los bloques SES.

Todas las tasas se refieren a un periodo de medición fijo.



CRITERIOS Y OBJETIVOS DE DISPONIBILIDAD

- Se definen en la Rec. UIT-T G.826.
- En un sentido de transmisión:
 - Un periodo de indisponibilidad comienza con el primero de 10 eventos SES consecutivos. Estos 10 segundos son parte del periodo.
 - Un periodo de disponibilidad comienza con el primero de 10 eventos no SES consecutivos. Estos 10 segundos son parte del periodo.
- Un trayecto o conexión está indisponible si uno de sus dos sentidos lo está.

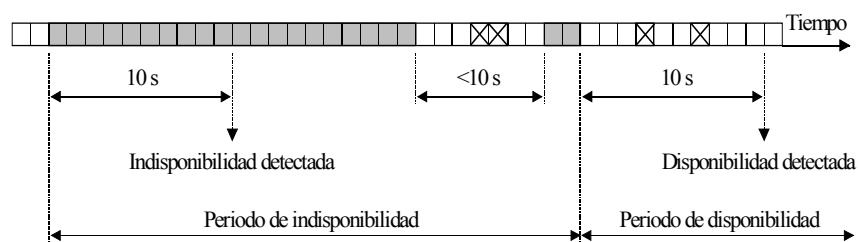


54



EJEMPLO

- Indisponibilidad de un sentido.



- Segundo con muchos errores
- ⊗ Segundo con errores (no SES)
- Segundo sin errores

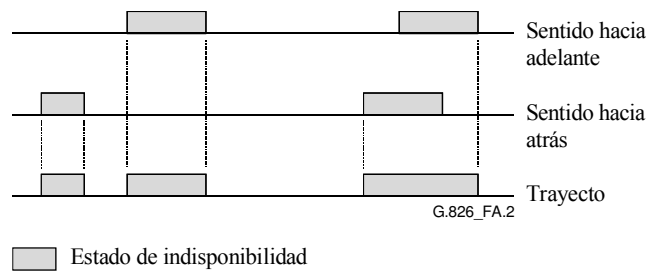
G.826_FA.1



55



- Indisponibilidad de un trayecto/conexión bidireccional



PARÁMETROS PARA LOS OBJETIVOS DE INDISPONIBILIDAD

- Relación de disponibilidad, AR (Availability Ratio).

$$AR = \frac{\text{Tiempo estado disponible}}{\text{Tiempo de observación}}$$

- Relación de indisponibilidad, UR (Unavailability Ratio).

$$UR = 1 - AR$$

- Tiempo medio entre interrupciones, M_o .
Duración media de los intervalos de disponibilidad dentro del periodo de medición.
- El periodo de observación o medición suele ser 1 año.
- Intensidad de interrupción, OI (Outage Intensity).
Número de interrupciones en el periodo de medición.
- $OI = 1/M_o$



EJEMPLO

- Para cierto trayecto: $AR = 0,9995$ y $M_o = 0,01$
Se tendrá:
 - $UR = 1 - 0,9995 = 0,0005$ (año)
 $0,0005 \times (525.600 \text{ min/año}) = 263 \text{ min/año}$
 - $M_o = 0,01 \times 525.600 = 5.256 \text{ min}$
 - $OI = 1/0,01 = 100$ interrupciones /año



OBJETIVOS DE INDISPONIBILIDAD

- Se establecen en la Rec. UIT-R F.1703 para los diferentes tramos y secciones de los trayectos y conexiones digitales ficticias de referencia.
- Para los tramos de acceso y de corto alcance son independientes de la longitud.

Parámetros	Objetivos	
	Acceso	Corto Alcance
UR	0,05 %	0,04 %
OI	100	120

- Si el enlace tiene varios vanos, la suma de los UR de cada vano no debe rebasar el objetivo.



CALIDAD DE FIDELIDAD DE UN RADIOENLACE

Calidad de fidelidad:

- Para un radioenlace en condiciones de disponibilidad, es la degradación admisible de la información, junto con el tiempo máximo en que no se puede rebasar esa degradación.
- Las degradaciones se miden por los ES y los SES dentro del tiempo de disponibilidad.
- Los objetivos se establecen en términos de las relaciones ESR, SESR y BBER.



- La Rec. UIT-R F.1668 establece los objetivos de calidad de fidelidad para HRP y HRC, considerando los tramos internacional y nacionales y la división nacional en porciones de acceso, de corto alcance y de largo alcance.
- Para el tramo internacional y la porción de largo alcance del tramo nacional, los objetivos constan de una parte fija y otra que depende de la distancia.
- Para las porciones de acceso y de corto alcance, los objetivos son fijos.



Objetivos de calidad de error para la porción de corto alcance

Parámetros	Valores objetivo		
	$R < VP$	$1,5 \leq R \leq 5$	$5 < R \leq 15$
ESR	$0,04 \cdot B$	$0,04 \cdot B$	$0,05 \cdot B$
SESR	$0,002 \cdot B$	$0,002 \cdot B$	$0,002 \cdot B$
BBER	-	$2 B \cdot 10^{-4}$	$2 B \cdot 10^{-4}$

R: Velocidad de bits (Mbit/s) ; VP: Velocidad Primaria.
 $0,075 \leq B \leq 0,085$



Objetivos de calidad de error para la porción de acceso

Parámetros	Valores objetivo		
	$R < VP$	$1,5 \leq R \leq 5$	$5 < R \leq 15$
ESR	$0,04 \cdot C$	$0,04 \cdot C$	$0,05 \cdot C$
SESR	$0,002 \cdot C$	$0,002 \cdot C$	$0,002 \cdot C$
BBER	-	$2 C \cdot 10^{-4}$	$2 C \cdot 10^{-4}$

R: Velocidad de bits (Mbit/s) ; VP: Velocidad Primaria.
 $0,075 \leq C \leq 0,085$



- Los objetivos son valores a largo plazo para el tiempo de evaluación de un mes.
- Segundos/mes = Valor objetivo x 2.592.000
- Para el BBER, Bloques erróneos, EB
$$EB = 2,592 \cdot 10^6 \times R \times BBER/N$$

N: Número de bits/bloque



EJEMPLO

- Radioenlace L = 20 km ; porción de acceso R = 2 Mbit/s
N = 1.000 bits/bloque ; C = 0,075 (caso peor).

$$ESR = 0,04 \times 0,075 = 3 \times 10^{-3} \text{ (7.775 segundos/mes).}$$

$$SESR = 0,002 \times 0,075 = 1,5 \times 10^{-4} \text{ (389 segundos/mes).}$$

$$BBER = 2 \times 0,075 \times 10^{-4} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ (77.760 EB/mes).}$$

CAUSAS DE INDISPONIBILIDAD

- La indisponibilidad se debe a averías de los equipos o a propagación.
- Los segundos con muchos errores (SES) pueden producirse por desvanecimientos profundos debidos a la lluvia o al multitrayecto:
 - Los debidos a la lluvia, duran más de 10 segundos y, por tanto, inciden en la indisponibilidad.
 - Los debidos al multitrayecto, duran menos de 10 segundos y se consideran en el cumplimiento de objetivos de calidad.
- Por tanto la indisponibilidad es causada por lluvia (especialmente por encima de 10 GHz) o por los equipos. El reparto de objetivos entre estos dos factores depende de la banda. Por debajo de 10 GHz casi todo se debe a equipos. En frecuencias más altas domina el efecto de la lluvia.

INCIDENCIA EN LA CALIDAD

- La calidad resulta afectada por el desvanecimiento multitrayecto que puede ser profundo, pero de corta duración.
- El desvanecimiento puede ser plano o selectivo para un radioenlace según la anchura de banda de transmisión o la capacidad en Mbit/s.
- Para la verificación de los objetivos hay que utilizar un modelo que proporcione la probabilidad de una determinada profundidad de desvanecimiento.



COMPROBACIÓN DE OBJETIVOS

MARGEN BRUTO DEL ENLACE

- Diferencia (en dB) entre el nivel medio de señal en ausencia de desvanecimientos (P_r) y el umbral del receptor.

Umbral: Nivel de potencia para el que se producen SES (T_h)

Umbral teórico:

$$T_h \text{ (dBm)} = W \text{ (dB)} + F_r \text{ (dB)} + 10 \cdot \log(V_b) - 174$$

Donde W es la relación E_b/N_0 para SES.

- El umbral práctico lo da el fabricante o puede estimarse sumando 5 - 8 dB al umbral teórico.
- El margen es:

$$M(\text{dB}) = P_r(\text{dBm}) - T_h(\text{dBm})$$



INFLUENCIA DE LA LLUVIA: INDISPONIBILIDAD

- Se debe calcular el porcentaje de tiempo p en que se supera el Margen del enlace.
- Se parte de $A_{0,01}$ (atenuación superada el 0,01% del tiempo) que se calcula a partir de los datos de intensidad de lluvia. Se obtiene p resolviendo la ecuación:

$$M = 0,12 \cdot A_{0,01} \cdot p^{-(0,546+0,043 \cdot \log(p))}$$

- Esta ecuación es válida para p comprendida entre el 0,001% y el 1%.

Haciendo $y = \log(p)$ y tomando logaritmos esta ecuación se transforma en una de segundo grado.

De las dos soluciones solo una está en el rango indicado.

SSR



INDISPONIBILIDAD DEBIDA A LOS EQUIPOS

$$U = \frac{\sum T_{\text{ind}}}{T} \cdot 100 (\%)$$

T_{ind} : Tiempo de equipo indisponible

T : Tiempo total de observación

- En un enlace de N vanos, T_{ind} es, a su vez, la suma de los intervalos de tiempo en que uno de los vanos está indisponible.
- Se considera que el vano está indisponible cuando al menos uno de los sentidos está interrumpido:

$$T_{\text{ind}} = T_1 + T_2 - T_{12}$$

T_1, T_2 : Tiempo de indisponibilidad en cada sentido.

T_{12} : Tiempo en que los dos sentidos están interrumpidos.

SSR



- La indisponibilidad de equipos U (%), es:

$$U(\%) = 100 \cdot \frac{MTTR}{MTTR + MTBF} \cong 100 \cdot \frac{MTTR}{MTBF}$$

MTBF: Mean Time Between Failures (horas)

MTTR: Mean Time To Repair (horas)

- Mejora de indisponibilidad:
 - Incremento de MTBF (Fabricantes).
 - Disminuir MTTR (Mantenimiento).
 - Equipos de reserva (N+P).



El Tiempo entre fallos es una variable aleatoria, con distribución exponencial de valor medio $\tau = \text{MTBF}$.

$$p(t) = \frac{1}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

La probabilidad de que el fallo se produzca pasado un tiempo t_0 , es:

$$p(t > t_0) = \int_{t_0}^{\infty} p(t) dt = \exp\left(-\frac{t_0}{\tau}\right)$$



La indisponibilidad y MTBF de un conjunto de dos equipos se calcula como:

$$U_T = U_1 + U_2 \quad (\text{MTBF})_T^{-1} = (\text{MTBF})_1^{-1} + (\text{MTBF})_2^{-1}$$



INFLUENCIA DE MULTITRAYECTO: CALIDAD

- La probabilidad de que el desvanecimiento sea mayor que el margen, para desvanecimiento plano, es:

$$P_{TP}(\%) = P_0 \cdot 10^{-M/10} \cdot 100$$

- Para baja capacidad (banda estrecha) no hay que calcular el efecto de desvanecimientos selectivos. En banda ancha intervienen las dos probabilidades que se combinan así:

$$P_{TT} = (P_{TP}^{\alpha/2} + P_{TS}^{\alpha/2})^{2/\alpha}$$

$$\alpha = 1,5 \text{ a } 2$$



INFLUENCIA DE DESVANECIMIENTO SELECTIVO

- Método de la constante de la signatura K

$$K = (T_s^2 \cdot W \cdot \lambda_a) / \tau_r$$

T_s : Periodo de símbolo.

W : Ancho de la curva de signatura (firma).

λ_a : Nivel medio de la curva. En ocasiones se da la profundidad media, o de corte B, en dB. Se tiene:

$$\lambda_a = 10^{-B/20}$$

τ_r : Retardo de referencia de la curva.

η, τ_m : Parámetros de propagación.

- Para utilizar unidades coherentes, puede darse W en Hz y T_s y τ_r en segundos, o bien W en GHz y T_s y τ_r en ms.



DISEÑO DE ENLACE PASO A PASO

1. Cálculo de la potencia recibida en ausencia de desvanecimientos:

$$L_b = L_{bf} + L_{di} + L_g + L_a$$

$$P_r = P_t - L_{tt} + G_t - L_b + G_r - L_{tr}$$

2. Cálculo del margen del enlace

$$M = P_r - T_h$$

3. Cálculo de los parámetros básicos de los desvanecimientos:

$A_{0,01}$ Desvanecimientos por lluvia

P_0, η, τ_m Desvanecimientos multitrayecto



4. Cálculo de la probabilidad de superar el umbral por lluvia.

$$M = 0,12 \cdot A_{0,01} \cdot p^{-(0,546+0,043 \cdot \log(p))}$$

5. Cálculo de la probabilidad de superarlo por desvanecimiento plano.

$$P_{TP}(\%) = P_0(\%) \cdot 10^{-M/10}$$

6. Cálculo de la probabilidad de superarlo por desvanecimiento selectivo.

$$P_{TS}(\%) = 100 \cdot \eta \cdot 4,32 \cdot K \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_s} \right)^2$$



7. Combinación de desvanecimiento plano y selectivo.

$$P_{TT} = (P_{TPi}^{\alpha/2} + P_{TSi}^{\alpha/2})^{2/\alpha} ; \quad \alpha = 1,5 \text{ a } 2$$

8. Cálculo de indisponibilidad debida a equipos.

$$U(\%) = 100 \cdot \frac{MTTR}{MTTR + MTBF} \cong 100 \cdot \frac{MTTR}{MTBF}$$

9. Combinación y comparación con los límites del UIT-R

- Indisponibilidad: p (Lluvia) + U (equipos)
- Calidad SES: P_{TT} (Multitrayecto)

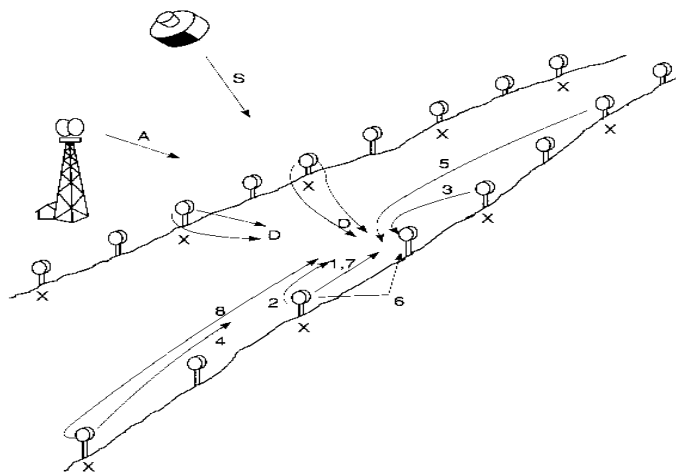


INTERFERENCIAS DE RF EN RADIOENLACES

- Las interferencias RF introducen en un receptor señales no deseadas, lo cual puede afectar a la calidad de funcionamiento.
- Puede clasificarse:
 - Según su génesis
 - Intrasistema
 - Intersistema
 - Según la situación en el espectro
 - Cocanal
 - Canales adyacentes
 - Según los trayectos de propagación



FUENTES DE INTERFERENCIA



TIPOS DE INTERFERENCIA

- Tipo A
Interferencia que comparte todo o parte del trayecto de propagación con la señal deseada. Se desvanece a la vez que ella.
- Tipo B
Interferencia que no tiene trayecto común con la señal deseada. Se desvanece de forma independiente.



TABLA DE INTERFERENCIAS

Referencia	Grupo A	Referencia	Grupo B
1	Cocanal, canales de polarización cruzada	3	Recepción delante/detrás
2	Radiación hacia atrás	5	Rebasamiento opuesto (3 tramos)
4	Rebasamiento (3 tramos)	6	Reflexiones no deseadas
7	Canal adyacente polarizado	D	Otros sistemas digitales
8	Radiación hacia atrás y rebasamiento	A	Otros sistemas analógicos
		S	Sistemas por satélite



- Para el análisis de la incidencia de la interferencia hay que calcular la relación:

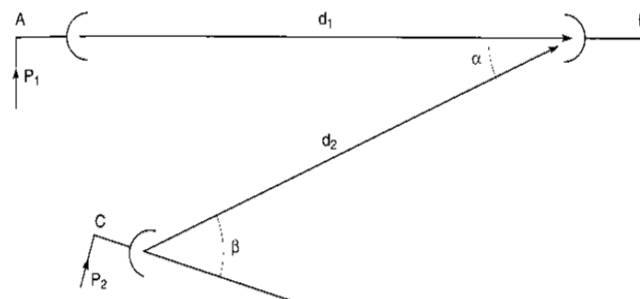
$$\frac{c}{i} = \frac{\text{potencia señal deseada}}{\text{potencia total de interferencia}}$$

- Para ello se utiliza los balances de enlace.
- Las señales interferentes se suman en potencia (mW), NO EN dBm.



EJEMPLO DE CÁLCULO PARA UNA FUENTE INTERFERENTE

- Trayecto deseado A → B
- Trayecto interferente C → B



- Balances de enlaces

- Señal deseada

$$P_{DB} = P_{TA} - L_{TTA} + G_{TA} - L_b(d1) + G_{RB} - L_{TRB}$$

- Señal interferente

$$P_{IB} = P_{TC} - L_{TTC} - L_{FC} + G_{TC} - A_C(\beta) - L_b + G_{RB} - A_B(\alpha) - L_{TRB} - L_{FB}$$



- Cálculo atenuación señal interferente.

- Pesimista espacio libre.

Puede eliminar enlaces que serían viables.

- Realista: Recomendación UIT-R P.452.

Método muy completo pero complejo de aplicar manualmente.



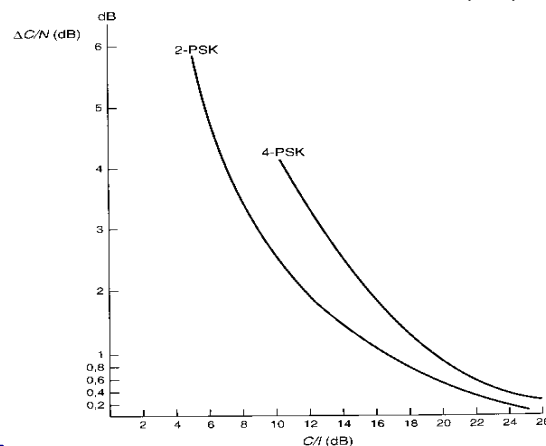
INTERFERENCIAS EN RADIOENLACES DIGITALES

- En general la interferencia por si misma no suele producir errores pero aumenta la probabilidad de que el ruido térmico los genere.
- Para mantener la tasa de errores (BER), objetivo cuando hay interferencia, hay que aumentar la relación E_b/N_o , es decir la potencia de señal recibida (mayor potencia de transmisión).
- El incremento depende de la relación C/I (dB) y del sistema de modulación.



EJEMPLO

- En la figura se representa el incremento de la relación portadora/ruido ($\Delta C/N$), necesario para mantener una $BER = 10^{-6}$ es función de la relación C/I (dB).



- No siempre es posible o conveniente amentar el c/n de recepción por lo que se suele establecer umbral de viabilidad de interferencia.

- Si para un enlace interferido

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{\text{real, dB}} < \left(\frac{C}{I}\right)_{\text{umbral, dB}}$$

se considera que éste es inviable y habrá que buscar una nueva frecuencia para él.

