

Lección 9: Análisis de Enlaces de Comunicación. Parte I

Gianluca Cornetta, Ph.D.

Dep. de Ingeniería de Sistemas de Información y Telecomunicación

Universidad San Pablo-CEU



Contenido

- ❑ Análisis de Enlace
- ❑ El Canal
- ❑ Potencia de Ruido y de Señal Recibida
- ❑ Análisis del Presupuesto de Enlace



Análisis de Enlace

- ❑ Un enlace comprende el camino completo de los datos a través de un sistema de comunicación. Se trata pues del conjunto formado por:
 - ❑ Fuente de información
 - ❑ Sub-sistema de transmisión (codificador, modulador, etc.)
 - ❑ Canal
 - ❑ Sub-sistema de recepción
- ❑ El resultado del análisis de enlace es un presupuesto de enlace (*link budget*) que consiste en calcular la potencia de la señal útil y del ruido que llegan al receptor
 - ❑ El presupuesto de enlace es el balance de pérdidas y ganancias del sistema y describe la distribución detallada de los recursos de transmisión y recepción que permite cerrar el enlace de comunicación
- ❑ Algunos de los parámetros de enlace son estadísticos por lo que el presupuesto de enlace proporciona una estimación de la tolerancia a errores de un sistema de telecomunicación
- ❑ El presupuesto de enlace es una herramienta para:
 - ❑ Estudiar las interdependencias entre los distintos componentes de un sistema complejo
 - ❑ Analizar las prestaciones de distintas alternativas de diseño
 - ❑ Buscar soluciones de compromiso entre los distintos parámetros y figuras de mérito del sistema



El Canal

- ❑ El canal es el medio de propagación que conecta transmisor y receptor
 - ❑ Medios guiados: cables, cables coaxiales, fibra óptica, guías de onda (para enlaces RF)
 - ❑ Medios no guiados: atmósfera, espacio
- ❑ El objetivo es estudiar un enlace satelital por lo que los medios de propagación considerados son la atmósfera terrestre y el espacio
- ❑ Se hará la asunción de espacio libre (canal ideal):
 - ❑ El canal es libre de todo tipo de limitación que afectan a la propagación de ondas RF: absorción, reflexión, refracción o difracción
 - ❑ Si el canal contiene atmósfera, ella es uniforme y cumple con todas las condiciones anteriores
 - ❑ La tierra es infinitamente distante y su coeficiente de reflexión es despreciable
 - ❑ La energía RF que llega al receptor es función únicamente de la distancia del transmisor



El Canal

- ❑ Existen dos causas principales de degradación de la señal:
 - ❑ Perdidas por degradación de la relación señal-ruido S/N
 - ❑ Perdidas por interferencia intersímbolo (ISI)
- ❑ Un presupuesto de enlace sirve principalmente para analizar el efecto de pérdidas y ganancia sobre señal y ruido
 - ❑ El efecto del ISI no se suele tener en cuenta ya que aumentar la potencia de señal no siempre contribuye a mitigar la degradación debida a interferencia intersímbolo
- ❑ En el caso de comunicaciones digitales la tolerancia al error depende del E_b/N_0 de la señal recibida:

$$\boxed{\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R} \right)}$$

- ❑ Se trata de una forma normalizada de la relación señal ruido S/N (o SNR)
- ❑ Con el SNR se denota (a menos que se indique lo contrario) la relación entre *potencia media* de señal y *potencia media* de ruido

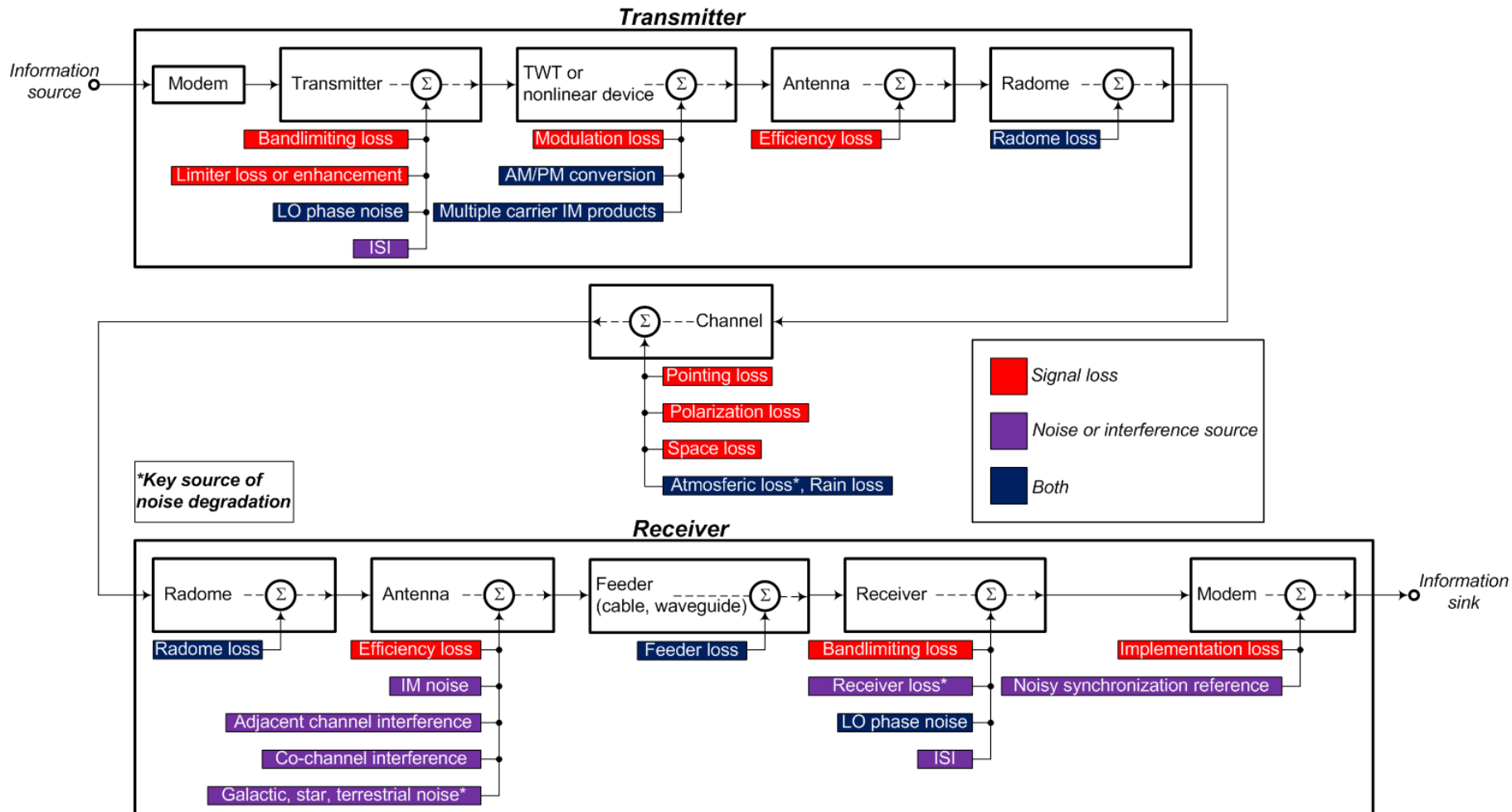


El Canal

- ❑ Dos son las fuentes principales de degradación del degradación del SNR :
 - ❑ Disminución de la potencia de la señal deseada (pérdidas de trayecto)
 - ❑ Aumento de la potencia de ruido (pérdidas por ruido) o de la potencia de los interferentes (pérdidas por interferencia)
- ❑ Las pérdidas ocurren cuando una porción de la señal es absorbida, reflejada o difusa durante su trayecto hacia el receptor
 - ❑ Una parte de la energía transmitida no llega pues al receptor
- ❑ Las fuentes más comunes de pérdidas por ruido o por interferencia son:
 - ❑ Ruido térmico, ruido galáctico, ruido atmosférico, ruido de intermodulación, etc.

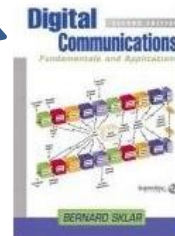


El Canal



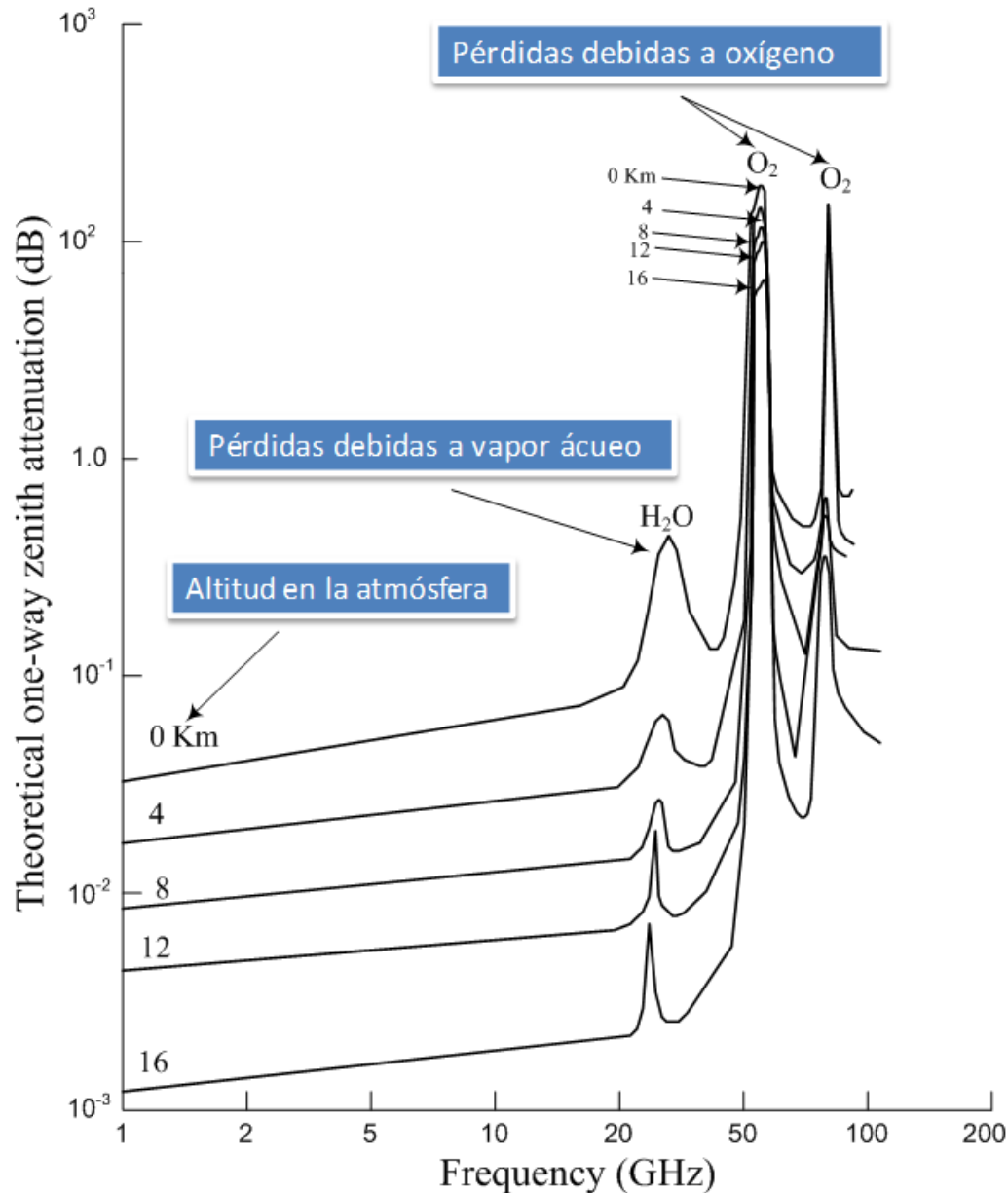
El Canal

- ❑ Las fuentes de interferencia afectan a transmisor receptor y canal, y pueden clasificarse en tres grupos:
 - ❑ Pérdidas de señal: limitación en banda por filtrado imperfecto, pérdidas o ganancias debidas a limitadores (*hard limiting* o *clipping*), pérdidas de modulación (energía gastada para la portadora), pérdidas de eficiencia, por desapuntamiento o de polarización de la antena, pérdidas debidas a la distancia de transmisión, pérdidas por sincronización y limitaciones de la implementación
 - ❑ Fuentes de ruido e interferencia: ISI, interferencia de señales en bandas adyacentes o en la misma banda de la señal útil (interferencia co-canal), ruido de intermodulación generado por dispositivos no lineales, ruido térmico en el receptor, ruido galáctico y terrestre
 - ❑ Fuentes de pérdidas y de ruido: ruido de fase del oscilador, distorsión AM/PM y productos de intermodulación inyectados por dispositivos no lineales (por ejemplo TWT –*Travelling Wave Tube*), pérdidas de radomo, pérdidas por cableado, pérdidas por atenuación atmosférica



Consulte el **párrafo 5.2.3** del libro de texto para información más detallada

El Canal



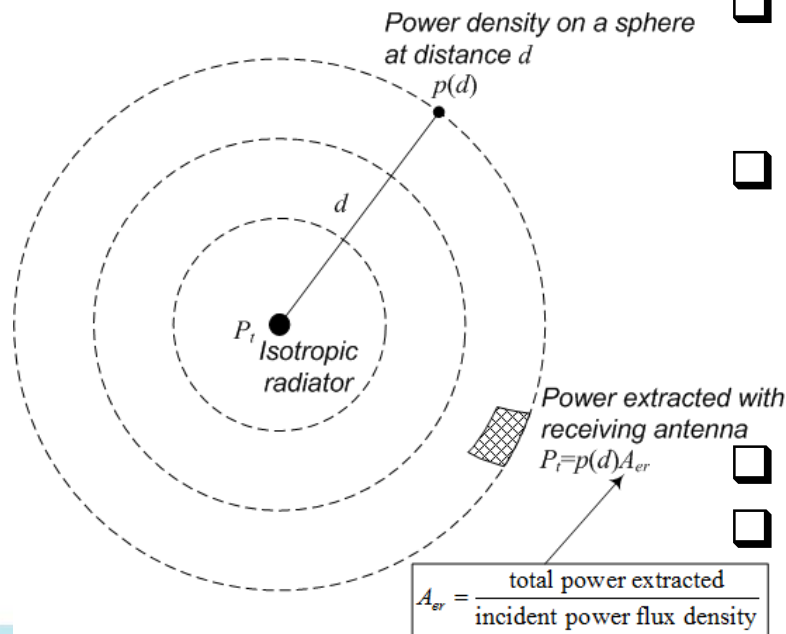
La atmósfera es una de las principales responsables de atenuación y de ruido y de ruido en un sistema de telecomunicación ya que las moléculas de vapor ácuo y de oxígeno absorben pero también radian energía en el espectro RF. La lluvia es también otra de las principales causas de absorción de energía de la señal RF.

Potencia de Ruido y de Señal Recibida

- ❑ El objetivo de un presupuesto de enlace es el de verificar que un sistema de telecomunicación se comporta según lo establecido en el plan de despliegue analizando pérdidas y ganancias de la señal desde su transmisión hasta la recepción
- ❑ El resultado del análisis es el de determinar cuánto E_b/N_0 es recibido y cuál es el margen de seguridad por encima de este límite
- ❑ En un sistema de comunicación la señal:
 - ❑ *Parte de una fuente*, es decir la antena transmisora (un transductor que transforma una señal eléctrica en un campo electromagnético)
 - ❑ *Atraviesa el canal de transmisión* (que atenúa la señal en función de la distancia entre transmisor y recepción)
 - ❑ *Llega al receptor*, es decir la antena receptora (un transductor que realiza la operación inversa de la antena transmisora)



Potencia de Ruido y de Señal Recibida



- ❑ Se asume un radiador isótropo, es decir una fuente RF omnidireccional que transmite uniformemente sobre 4π estereorradianes
- ❑ La densidad de potencia $p(d)$ sobre una superficie esférica a una distancia d de la fuente que transmite con una potencia P_t es:

$$p(d) = \frac{P_t}{4\pi d^2} \text{ vatios/m}^2$$

- ❑ Donde $4\pi d^2$ es el área de una esfera
- ❑ Para campo lejano (es decir $d \gg \lambda$), la potencia extraída por la antena receptora es:

$$P_r = p(d)A_{er} = \frac{P_t A_{er}}{4\pi d^2}$$

- ❑ Donde A_{er} es la sección eficaz de absorción (*absorption cross section*) o área efectiva de la antena receptora



Potencia de Ruido y de Señal Recibida

- El área efectiva A_e de un antena (tanto en transmisión A_{et} , como en recepción A_{er}) puede relacionarse con el área física A_p y un coeficiente de eficiencia η que tiene en cuenta del hecho que parte de la potencia incidente se pierde a través de distintos mecanismos :

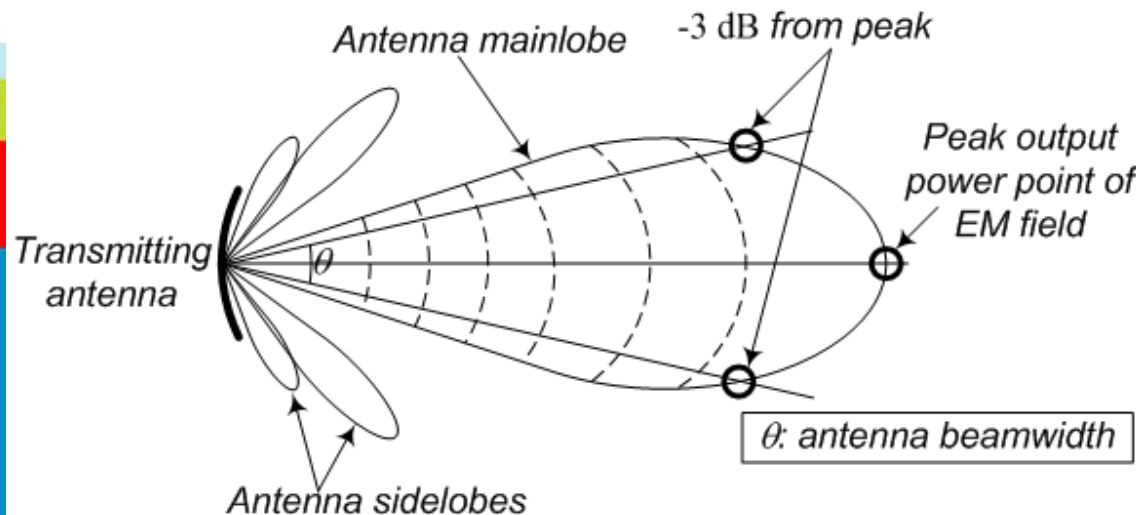
$$A_e = \eta A_p$$

- Valores típicos de η son 0.55 para antenas parabólicas y 0.75 para antenas de bocina
- La direccionalidad de antena o ganancia direccional (*directive gain*) G relaciona la potencia entrante o saliente de una antena con la de un radiador isótropo:

$$G = \frac{\text{maximum power intensity}}{\text{average power intensity over } 4\pi \text{ steradians}}$$

- En ausencia de pérdidas disipativas o de desadaptación de impedancia G representa la ganancia de pico de la antena (en la dirección de máxima intensidad). En el caso de pérdidas es multiplicada por un coeficiente de pérdidas
- La potencia efectiva radiada respecto a un radiador isótropo (EIRP) es:

$$EIRP = P_t G_t$$



El campo de antena es una medida del ángulo sólido en el que está concentrada la mayor parte de la potencia radiada y es inversamente proporcional a la ganancia de antena G . En la práctica se utiliza el ángulo plano θ (*anchura del haz*) medido en radianes o grados.

Potencia de Ruido y de Señal Recibida

- ❑ En el caso en que la antena de transmisión tiene cierta ganancia respecto a una antena isótropa la potencia de transmisión P_t se sustituye con $EIRP$:

$$P_r = EIRP \frac{A_{er}}{4\pi d^2}$$

- ❑ La relación entre ganancia de antena G y área efectiva A_e es:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (\text{for } A_e \gg \lambda^2)$$

- ❑ Por el teorema de reciprocidad esta relación es válida tanto para antenas transmisoras como receptoras: para una antena y una longitud de onda de portadora dadas, antenas transmisoras y receptora son idénticas
- ❑ La ganancia de antena aumenta con la frecuencia y con la apertura efectiva de antena
- ❑ El haz de la antena disminuye con la frecuencia y con la apertura efectiva de antena



Potencia de Ruido y de Señal Recibida

- ❑ El área efectiva de una antena isótropa se puede calcular imponiendo $G=1$:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

- ❑ Para una antena isotrópa $A_e=A_{er}=A_{et}$, por tanto la potencia recibida por una antena isotrópa es:

$$P_r = EIRP \frac{A_{er}}{4\pi d^2} = \frac{EIRP}{(4\pi d/\lambda)^2} = \frac{EIRP}{L_s}$$

- ❑ $L_s=(4\pi d/\lambda)^2$ representa las pérdidas de trayecto (*path loss*) o pérdidas en el espacio libre (*free-space loss*) en el caso de antena receptora isótropa ($G_r=1$) y *es una magnitud que depende de la frecuencia*
- ❑ La potencia recibida por una antena es igual a la potencia isotrópa efectiva radiada (EIRP) reducida sólo por las pérdidas de trayecto
- ❑ Si la antena no es isótropa:

$$A_{er} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \Rightarrow P_r = EIRP \frac{A_{er}}{4\pi d^2} = EIRP \frac{G_r \lambda^2 / 4\pi}{4\pi d^2} = EIRP \frac{G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} = \frac{EIRP G_r}{L_s}$$

Potencia de Ruido y de Señal Recibida

- ❑ La potencia recibida P_r puede expresarse de cuatro formas distintas:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_{er}}{4\pi d^2} = \frac{P_t A_{et} A_{er}}{\lambda^2 d^2} = \frac{P_t A_{et} G_r}{4\pi d^2} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

- ❑ Analizando estas ecuaciones se podría extrapolar información equivocada ya que en algunas parece que P_r es independiente de la frecuencia mientras que en otras resulta directamente o inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia a través de λ
- ❑ Naturalmente son se trata de ninguna paradoja ya que la ganancia de antena y su apertura efectiva están relacionadas con el cuadrado de la longitud de onda λ
- ❑ Las distintas expresiones de se utilizan en escenario distintos:
 - ❑ Primera ecuación: G_t y A_{er} se mantienen fijos al variar de la longitud de onda λ (esto significa que A_{et} debe variar para que G_t se mantenga constante con λ)
 - ❑ Segunda ecuación: se utiliza para estimar las prestaciones de sistemas ya contruidos (A_{et} y A_{er} fijos). Esta ecuación nos dice que la potencia recibida aumenta al aumentar de la frecuencia
 - ❑ Tercera ecuación: se utiliza cuando G_r y A_{et} se mantienen fijos al variar de la longitud de onda λ
 - ❑ Cuarta ecuación: se utiliza cuando las ganancias de antena en transmisión y recepción son fijas

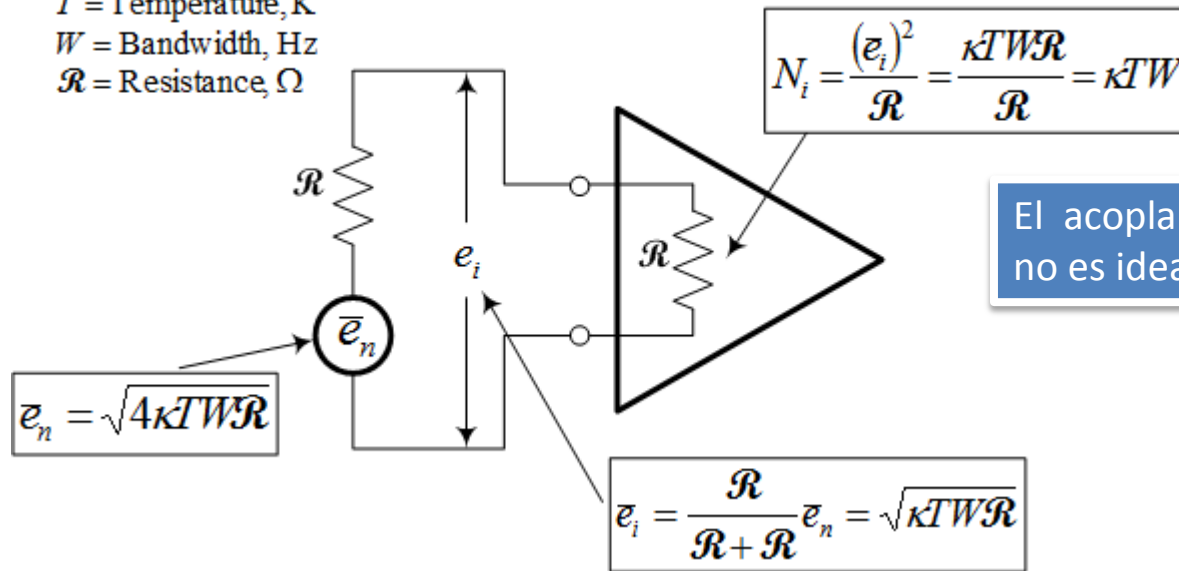
Potencia de Ruido y de Señal Recibida

κ = Boltzmann's constant = 1.38×10^{-23} J/K or W/K - Hz = -228.6 dBW/K - Hz

T = Temperature, K

W = Bandwidth, Hz

$\mathcal{R}$ = Resistance, Ω



El acoplamiento entre antena y receptor no es ideal genera ruido térmico.

- ❑ La máxima densidad espectral de potencia unilateral N_0 (potencia de ruido en una banda de 1 Hz) es:

$$N_0 = \frac{N_i}{W} = \kappa T \quad \text{W/Hz}$$

- ❑ La potencia de ruido disponible de una fuente de ruido térmico depende de la temperatura de la fuente (temperatura de ruido –*noise temperature*)
- ❑ Es posible introducir el concepto de temperatura efectiva de ruido (*effective noise temperature*) para modelar el comportamiento de fuentes de ruido no estrictamente de natura térmica (ruido galáctico, atmosférico, etc.)

Análisis del Presupuesto de Enlace

- ❑ En un presupuesto de enlace la magnitud de interés es el SNR en recepción (es decir, la salida de la antena de recepción)
- ❑ Este SNR se suele indicar con CNR (*carrier-to-noise ratio*)
 - ❑ La potencia de ruido es $N = \kappa T_s W$
 - ❑ T_s es la temperatura de sistema
 - ❑ W es el ancho de banda
- ❑ A partir del SNR (también indicado con P_r/N o S/N) hay que determinar E_b/N_0
- ❑ Para señales con supresión de portadora (como las señales transmitidas por satélites, es decir modulaciones PSK o FSK) SNR y CNR tienen el mismo valor y se utilizan de forma intercambiable:

$$\boxed{\frac{P_r}{N} = \frac{S}{N} = \frac{C}{N} = \frac{C}{\kappa T W}}$$

- ❑ En general SNR y CNR son diferentes y sólo coinciden cuando la portadora es completamente modulada



Análisis del Presupuesto de Enlace

- ❑ Considere el caso de una señal FM:

$$s(t) = A \cos\left(\omega_0 t + K \int m(t) dt\right)$$

- ❑ Donde $m(t)$ es la moduladora y K una constante
- ❑ La potencia media de $m(t)$ es $\overline{m^2(t)}$, por tanto aumentar la potencia de la moduladora sólo aumenta la desviación de frecuencia respecto a la frecuencia de portadora ω_0
- ❑ La potencia de portadora es difusa sobre un espectro más ancho pero la potencia media de señal $s^2(t)$ resta igual a $A^2/2$ independiente mente de $\overline{m^2(t)}$
- ❑ Para modulaciones lineales como AM:

$$s(t) = [1 + m(t)]A \cos \omega_0 t \Rightarrow \overline{s^2(t)} = [1 + m(t)]^2 \frac{A^2}{2} = \frac{A^2}{2} [1 + \overline{m^2(t)} + 2\overline{m(t)}]$$

- ❑ Si $m(t)$ tiene media nula:

$$\overline{s^2(t)} = \frac{A^2}{2} [1 + \overline{m^2(t)}]$$

- ❑ En esta expresión aparece una componente de portadora no modulada, por tanto la potencia de portadora no es la misma de la potencia de señal

Análisis del Presupuesto de Enlace

- ❑ La potencia a la salida de la antena es:

$$P_r = EIRP \frac{G_r}{L_s} \Rightarrow \frac{P_r}{N} = EIRP \frac{G_r/N}{L_s}$$

- ❑ En receptores analógicos la banda equivalente de ruido vista por el demodulador suele ser mayor de la banda de señal, por tanto P_r/N es la figura de mérito más adecuada
- ❑ En receptores digitales banda de ruido y de señal son idénticas, por tanto es preferible sustituir la potencia de ruido con la densidad espectral de potencia de ruido:
- ❑ Para modulaciones lineales como AM:

The diagram shows the equation $\frac{P_r}{N_0} = EIRP \frac{G_r}{L_s} \frac{1}{\kappa T L_o}$ with several annotations in blue boxes:

- Figura de mérito del receptor**: Points to the $\frac{P_r}{N_0}$ term.
- Otras pérdidas**: Points to the $\frac{1}{\kappa T L_o}$ term.
- Densidad espectral de potencia de la relación potencia recibida-ruido de la señal recibida**: Points to the $\frac{P_r}{N_0}$ term.
- Pérdidas de trayecto**: Points to the L_s term.

The G_r term is enclosed in a red dashed box.

Análisis del Presupuesto de Enlace

- ❑ T es la temperatura efectiva del sistema y es función del ruido radiado hasta la antena receptora y del ruido térmico generado por el receptor
- ❑ G_r/T se conoce como figura de mérito del receptor
- ❑ Asumiendo que toda la potencia recibida P_r está en la moduladora, se obtiene:

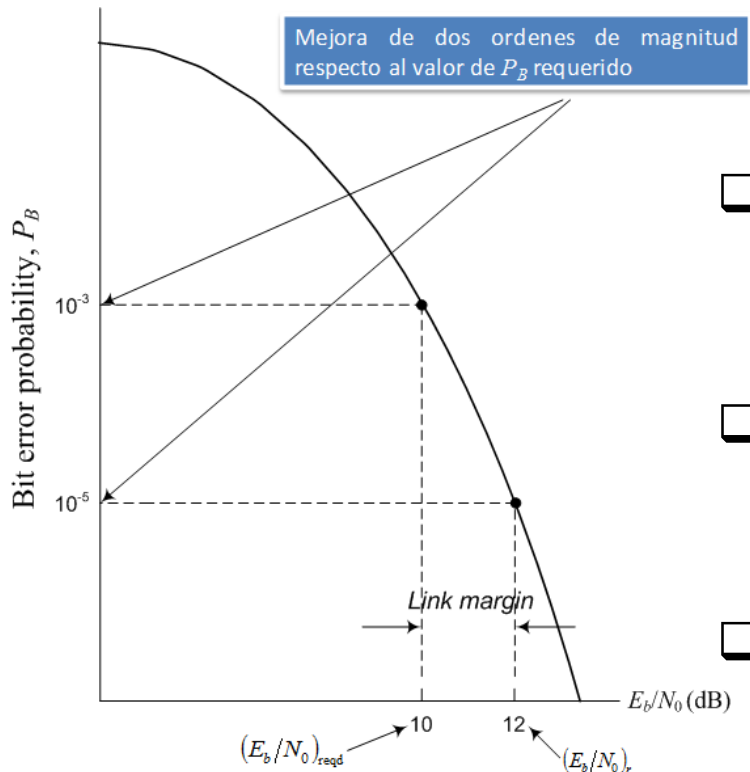
$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_r}{N} \left(\frac{W}{R} \right) = \frac{P_r}{N/W} \left(\frac{1}{R} \right) = \frac{P_r}{N_0} \left(\frac{1}{R} \right)$$

- ❑ Por tanto resulta que:

$$\frac{P_r}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} R$$

- ❑ Donde R es el *bitrate*
- ❑ Esta ecuación se puede extender también al caso en que parte de la potencia recibida P_r es de portadora
 - ❑ En este caso la potencia de portadora contribuye al factor de pérdidas L_o

Análisis del Presupuesto de Enlace



- ❑ E_b/N_0 es definido como el valor de energía por bit referido a la densidad espectral de potencia de ruido necesario para alcanzar una probabilidad de error dada
- ❑ Para calcular el margen de seguridad M hay que distinguir entre:
 - ❑ El E_b/N_0 requerido por el estándar: $(E_b/N_0)_{\text{reqd}}$
 - ❑ El E_b/N_0 actual o recibido: $(E_b/N_0)_r$
- ❑ No se diseña utilizando $(E_b/N_0)_{\text{reqd}}$ sino $(E_b/N_0)_r$ que fija el margen de error o margen de enlace (*link margin*) tolerado por el sistema
- ❑ La relación señal-ruido puede reescribirse teniendo en cuenta el margen de enlace M :

$$\frac{P_r}{N_0} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_r R = M \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{reqd}} R$$

- ❑ Por tanto M resulta:

$$M(\text{dB}) = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_r (\text{dB}) - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{reqd}} (\text{dB})$$



Análisis del Presupuesto de Enlace

- ❑ Es posible expresar el margen de enlace M en función de todos los principales parámetros de enlace obteniendo la *ecuación del margen de enlace*:

$$\frac{P_r}{N_0} = EIRP \frac{G_r/T}{\kappa L_S L_O} \Rightarrow M \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{reqd}} \quad R = EIRP \frac{G_r/T}{\kappa L_S L_O} \Rightarrow M = EIRP \frac{G_r/T}{\left(E_b/N_0 \right)_{\text{reqd}} R \kappa L_S L_O}$$

- ❑ E_b/N_0 es definido a la entrada del receptor (*predetection point*)
 - ❑ En general, cada parámetro que se refiere a energía o potencia recibida es definido a la entrada del receptor (*predetection point*)
- ❑ G_r/T es definida a la entrada de la antena receptora
- ❑ $EIRP$ es la potencia de la onda electromagnética a la salida de la antena transmisora



Análisis del Presupuesto de Enlace

- ❑ El análisis de enlace se suele realizar en dB, por tanto hay que expresar en dB la ecuación del margen de enlace:

$$M(\text{dB}) = EIRP(\text{dBW}) + G_r(\text{dBi}) - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{reqd}} (\text{dB}) - R(\text{dB-bit/s}) - \kappa T(\text{dBW/Hz}) - L_s(\text{dB}) - L_o(\text{dB})$$

- ❑ Un dBW expresa la potencia de una señal en dB en relación a 1 W
- ❑ Un dBi (decibelio isótropo) mide la ganancia de una antena en referencia a una antena isótropa teórica
- ❑ La tasa de transmisión R se expresa en dB referidos a una velocidad de referencia de 1 bit/s
- ❑ ¿Cuál es el margen de enlace mínimo necesario?
- ❑ El valor de M depende del escenario de diseño y del grado de confianza del diseñador en los parámetros de enlace. M puede ser mínimo cuando:
 - ❑ Todas las fuentes de pérdidas y ganancia han sido cuidadosamente analizadas considerando el caso peor
 - ❑ Todos los parámetros de enlace con elevada varianza (por ej. atenuación atmosférica) se adhieren a las restricciones estadísticas para la disponibilidad de enlace

Análisis del Presupuesto de Enlace

☐ Por ejemplo:

- ☐ Comunicación vía satélite en banda C (enlace ascendiente –*Uplink* 6 GHz, enlace descendiente –*Downlink* 4 GHz)

- ☐ Los parámetros de enlace suelen ser bien conocidos por lo que un margen de enlace $M=1$ dB es suficiente

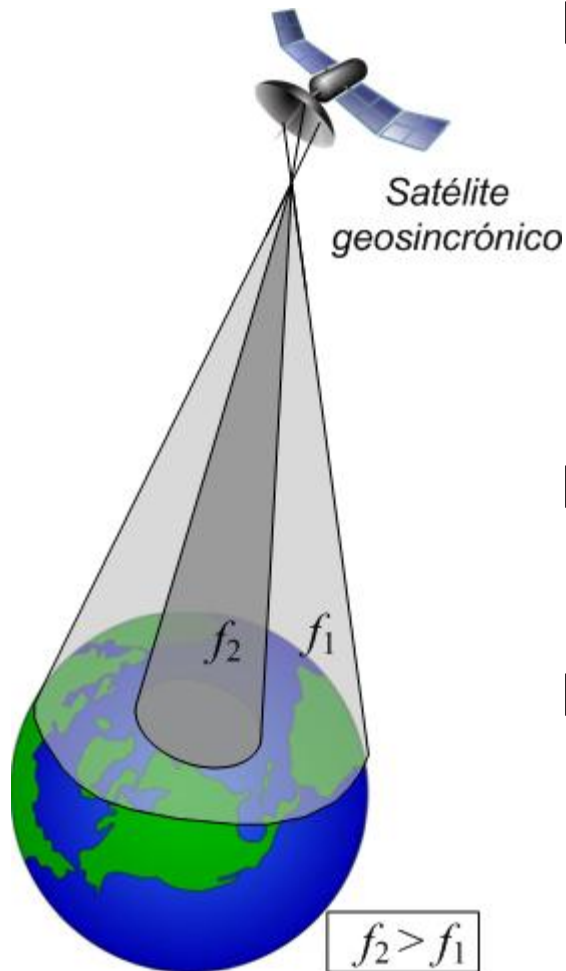
- ☐ Enlace telefónico satelital con disponibilidad del servicio del 99.9% (por ejemplo INTELSAT)

- ☐ Requiere un margen de enlace M de entre 4 y 5 dB

- ☐ En general, sistemas que operan a frecuencias elevadas (del orden de decenas de GHz) precisan márgenes de enlace más elevados debido a su baja tolerancia a las variaciones atmosféricas

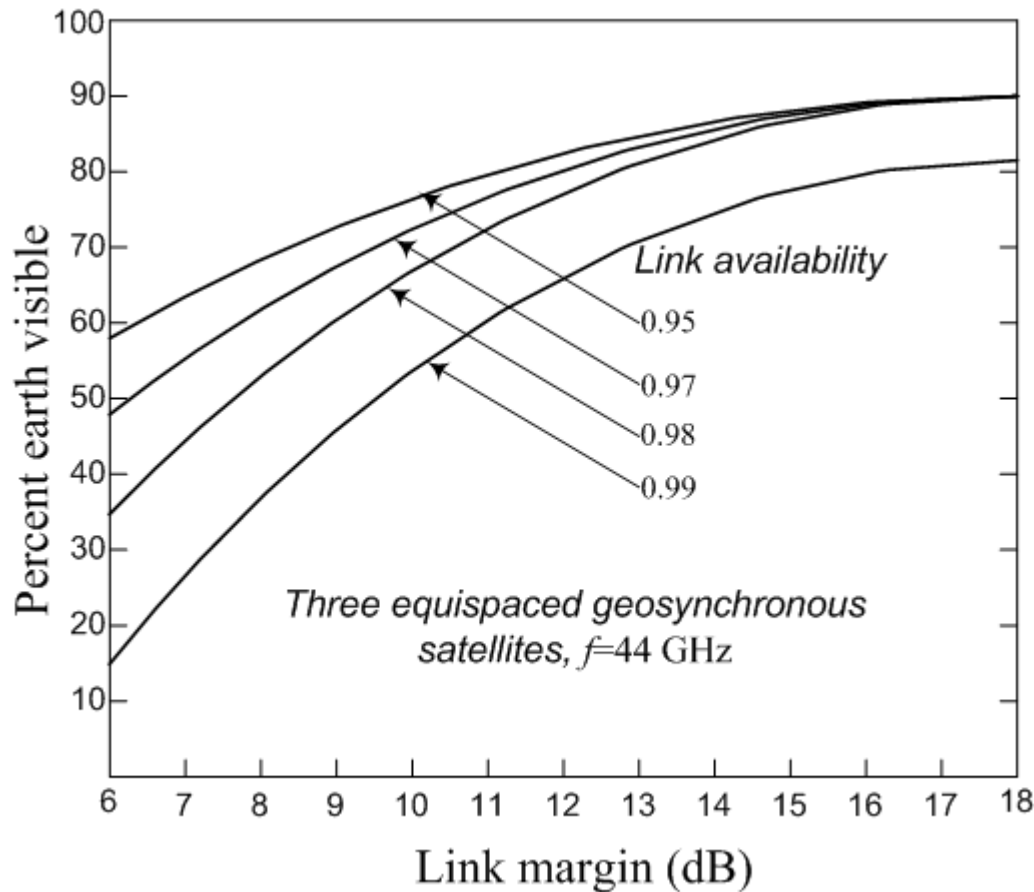


Análisis del Presupuesto de Enlace



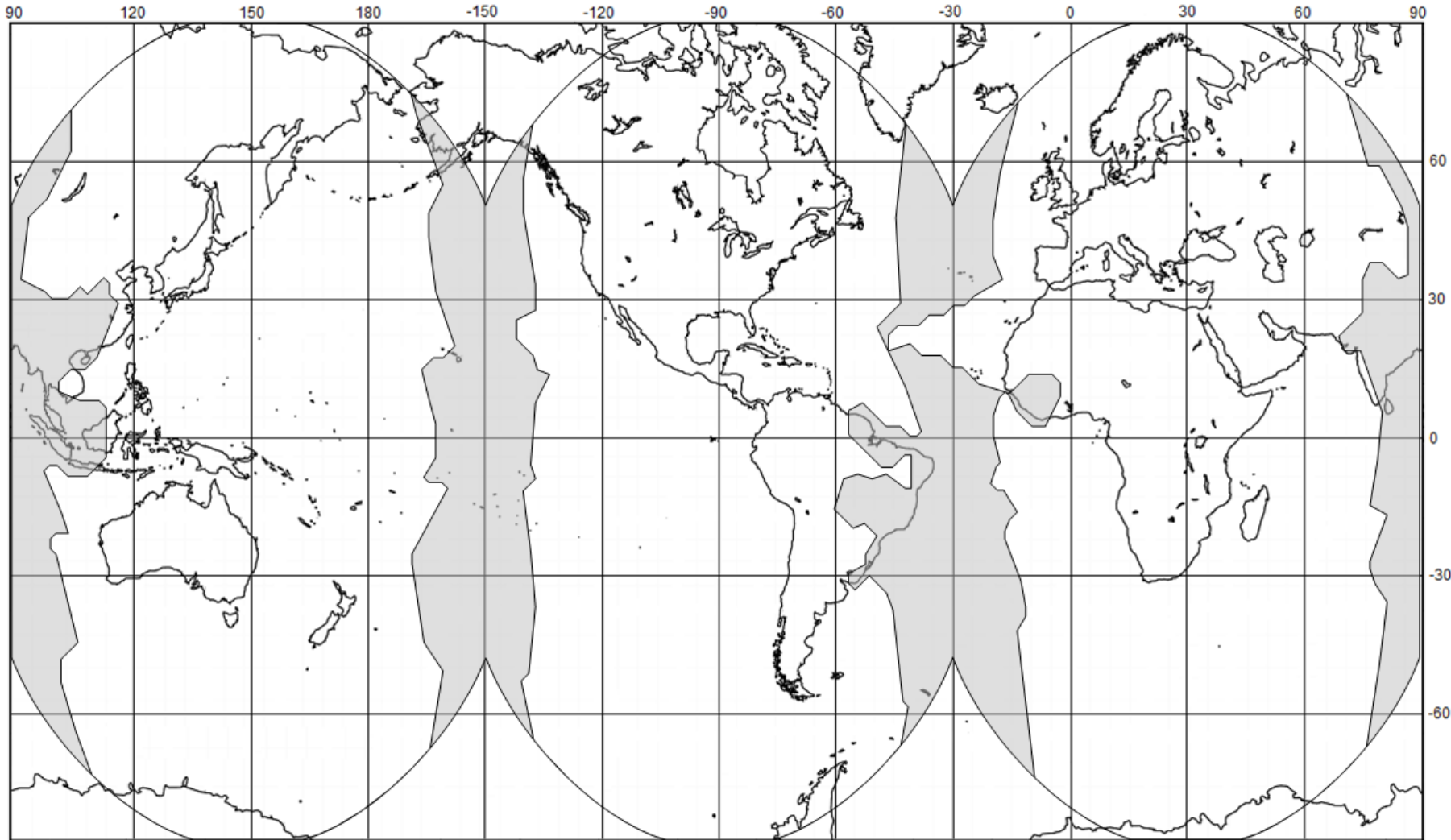
- ☐ El efecto de la atenuación atmosférica sobre la degradación del SNR es una función de la frecuencia, por tanto la disponibilidad de enlace y el margen de enlace necesario deben ser examinados en el contexto de una particular frecuencia de transmisión
- ☐ La ganancia de antena G_t del satélite es fija por lo que la P_r resultante es independiente de la longitud de onda
- ☐ Si el satélite consigue cubrir la superficie terrestre transmitiendo a la frecuencia f_1 , un cambio a la frecuencia $f_2 > f_1$ reducirá el nivel de cobertura (ya que G_t aumentará)

Análisis del Presupuesto de Enlace



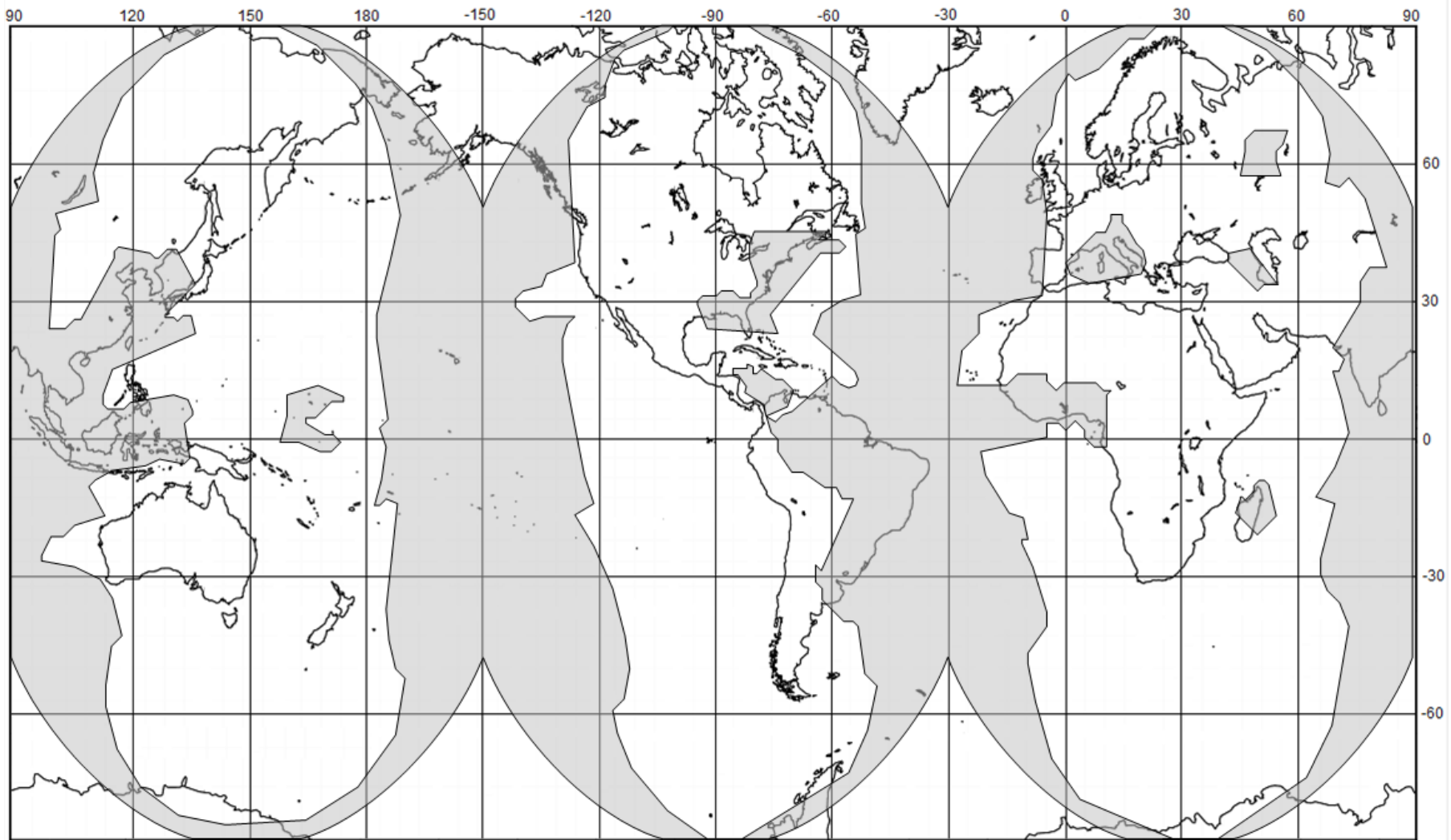
- ☐ La disponibilidad de enlace es una medida (sobre base anual) de la fracción de tiempo por la que un enlace está disponible
- ☐ En general, para un un satélite geoestacionario:
 - ☐ Fijado el margen de enlace, la visibilidad es inversamente proporcional a la disponibilidad requerida
 - ☐ Fijada la disponibilidad, la visibilidad aumenta monotonicamente al aumentar del margen de enlace

Análisis del Presupuesto de Enlace



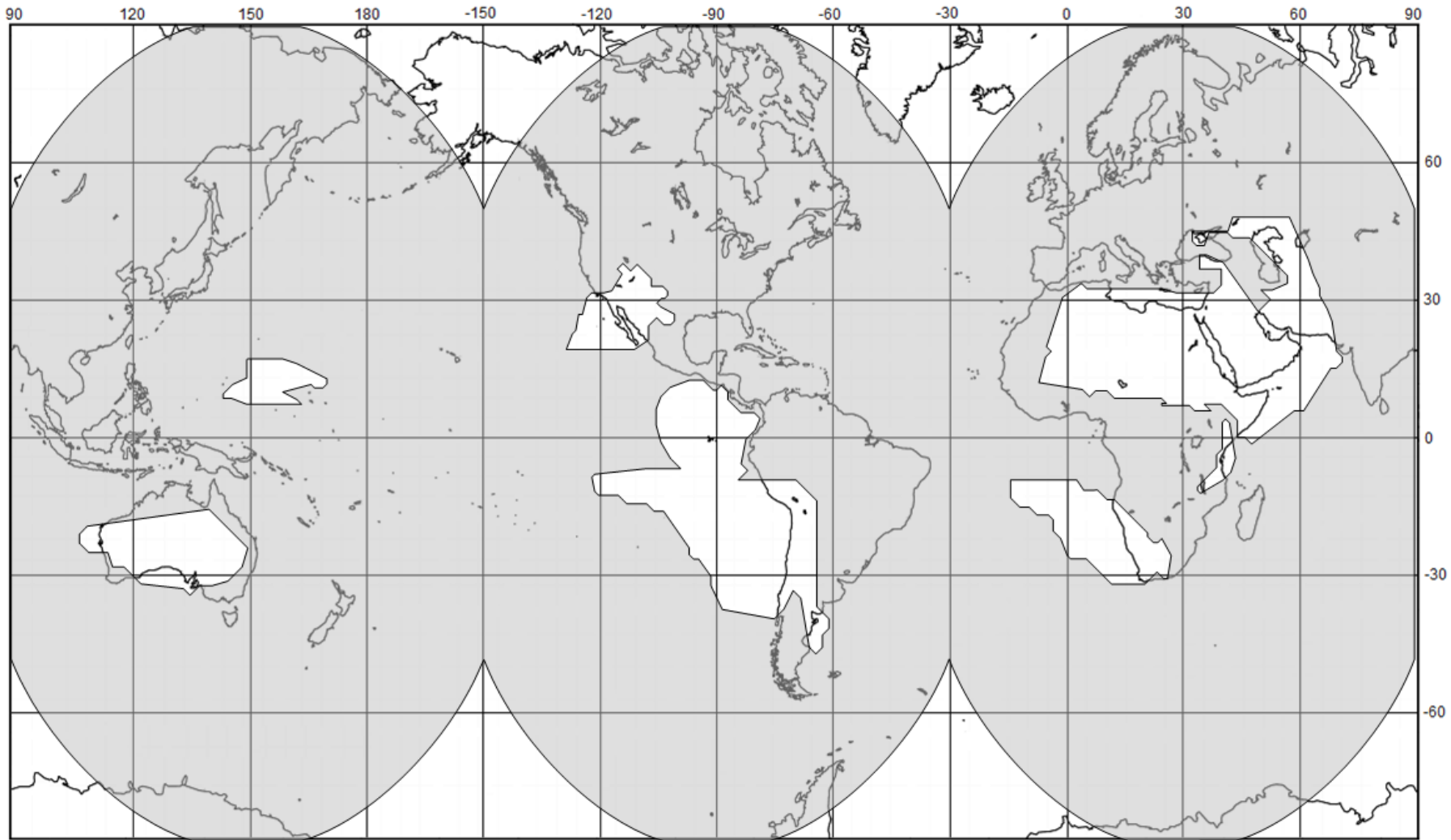
Cobertura terrestre de 3 satélites geoestacionarios equidistantes con disponibilidad de enlace de 0.99, $f = 44$ GHz, margen de enlace 14 dB

Análisis del Presupuesto de Enlace



Cobertura terrestre de 3 satélites geoestacionarios equidistantes con disponibilidad de enlace de 0.99, $f = 44$ GHz, margen de enlace 10 dB

Análisis del Presupuesto de Enlace



Cobertura terrestre de 3 satélites geoestacionarios equidistantes con disponibilidad de enlace de 0.99, $f = 44$ GHz, margen de enlace 6 dB