

Comunicaciones Espaciales

Enlace Radioeléctrico

Fernando D. Quesada Pereira¹

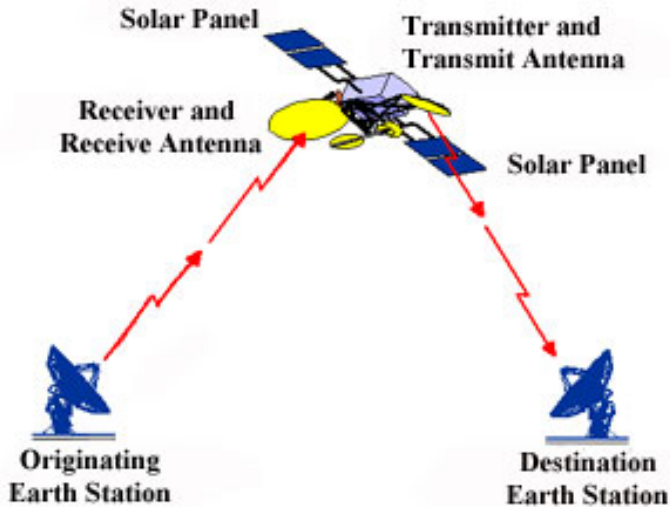
¹Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cartagena

15 de octubre de 2010

Índice de Contenidos

- 1 Conceptos básicos de enlaces radioeléctricos en satélites
- 2 Teoría básica de propagación
- 3 Temperatura y Potencia de ruido de un sistema radioeléctrico
- 4 Enlace descendente
- 5 Enlace ascendente
- 6 Estimación de la C/N global de un sistema
- 7 Procedimiento general de diseño de un enlace de comunicación por satélite

Enlaces en satélites



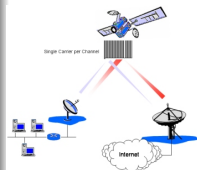
Esquema básico de un enlace de comunicaciones por satélite

Enlaces en satélites

Conceptos básicos

Características de los enlaces

- Existen dos enlaces, uno ascendente o **uplink** y otro descendente o **downlink**. La mayoría de las comunicaciones se establecen en las **bandas** 6/4 GHz, 14/11 GHz y 30/20 GHz (primero el enlace ascendente).
- El efecto de las **pérdidas** por atenuación por **lluvia aumenta con la frecuencia**. Las **pérdidas por propagación** son menores en LEO y MEO que en GEO, aunque las antenas pueden ser más directivas en el último caso.
- Los enlaces deben de satisfacer una tasa de error (**BER**) o una relación de señal a ruido mínima (**S/N**), dependiendo respectivamente si el enlace es digital o analógico. Ambos parámetros están relacionados con la **C/N**.
- Existen diversos **esquemas de modulación** FM, QPSK, etc. . . . Cada modulación requiere una **C/N** para detectar correctamente la señal.
- A la hora de diseñar los enlaces se deben **evitar interferencias** con otros.



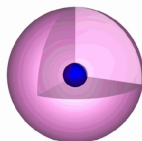
Enlace de
satélite

Teoría básica de propagación

Transmisión

La densidad de potencia F producida por una fuente isotrópica que emite P_t (W) a una distancia R es:

$$F = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad \text{W/m}^2$$



Las **fuentes isotrópicas no existen**, mientras que las antenas reales radian en una dirección más que en otras con un determinado **diagrama de ganancia** $G(\theta, \phi)$, definido como la potencia por unidad de ángulo sólido radiada en una dirección (θ, ϕ) normalizada por la potencia media radiada por unidad de ángulo sólido:

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_0/(4\pi)}$$

Normalmente se establece como **referencia** de ángulo (θ, ϕ) aquella para la que existe un **máximo de potencia radiada**. Para ese ángulo un transmisor que radie una potencia P_t y presenta una ganancia G_t , por lo que la **densidad superficial de potencia** a una distancia R es:

$$F = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad \text{W/m}^2$$

Donde $P_t G_t$ es la potencia isotrópica radiada efectiva o **PIRE**.

Teoría básica de propagación

Recepción

Apertura de antena

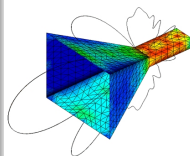
Una antena receptora ideal con un área de apertura A (m^2), captura una potencia P_r igual a:

$$P_r = F A \quad W$$

Generalmente la antena receptora no es ideal, y se debe definir una apertura efectiva de la antena A_e :

$$A_e = \eta_A A_r \quad m^2$$

donde A_r es la área física de la apertura y η_A es la eficiencia, la cual depende del tipo de antena.



La potencia recibida es:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_e}{4\pi R^2} \quad W$$

Relación entre ganancia y área de la antena es:

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

La **ecuación del enlace** queda como:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi R/\lambda)^2} \quad W$$

Teoría básica de propagación

Ecuación del enlace

Al término $(4\pi R)/\lambda^2$ se le denomina pérdida del camino o **path loss**.

Ecuaciones en decibelios

A veces es conveniente trabajar en decibelios $10\log_{10}(x)$, por lo que la ecuación del enlace se escribe como:

$$P_r = PIRE + G_r - L_p \quad \text{dBW}$$

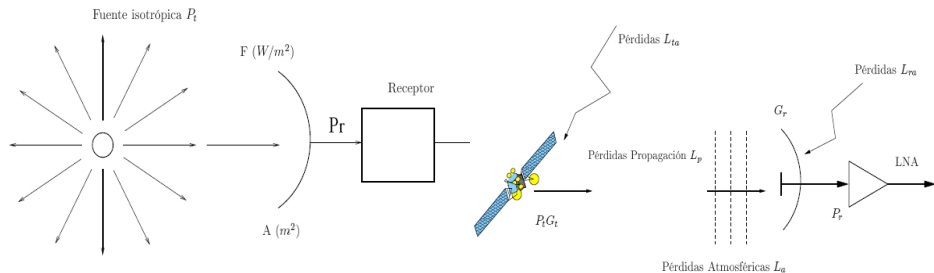
Pérdidas

Esta ecuación es el caso ideal, generalmente hay que incluir pérdidas asociadas a otros efectos como la atenuación en la atmósfera L_a , producidas por la antena transmisora L_{ta} y la receptora L_{ra} .

$$P_r = PIRE + G_r - L_a - L_{ta} - L_{ra} - L_p \quad \text{dBW}$$

Además de la potencia recibida para dimensionar el enlace hay que tener en cuenta la **potencia de ruido** N .

Fuente Isotrópica y pérdidas en el enlace



Densidad de potencia producida por una fuente isotrópica

Pérdidas introducidas en el enlace

Temperatura de ruido

- Proporciona una forma de determinar el **ruido térmico** generado por dispositivos pasivos o activos en un sistema receptor.
- A frecuencias de microondas, un cuerpo oscuro a una temperatura física de T_p grados Kelvins, genera un ruido eléctrico de banda ancha de la forma:

$$P_n = kT_p B_n \quad (\text{Wattios})$$

donde, $k = 1,39 \cdot 10^{-23}$ (J/K) es la constante de Boltzmann, T_p la temperatura física de la fuente y B_n (Hz) el ancho de banda de ruido.

- Al producto kT_p se le denomina **densidad espectral de potencia de ruido** (W/Hz).
- Un dispositivo con una temperatura de ruido T_n K, produce a su salida el mismo ruido que un **cuerpo negro** a una temperatura física de T_n grados Kelvin seguido de un amplificador no ruidoso de la misma ganancia que el dispositivo real.

Temperatura de ruido de un sistema

Definición

Concepto

La **temperatura de ruido de un sistema** T_s es la correspondiente a una fuente ruidosa, situada a la entrada de un receptor ideal, que proporciona la misma potencia de ruido que el receptor real medida a su salida (generalmente se incluye el **ruido de la antena**).

Potencia a la salida

Si se tiene que la ganancia total del receptor es G_{rx} y su ancho de banda P_{no} . La potencia a la salida es:

$$P_{no} = kT_s B_n G_{rx} \quad (\text{Wattios})$$

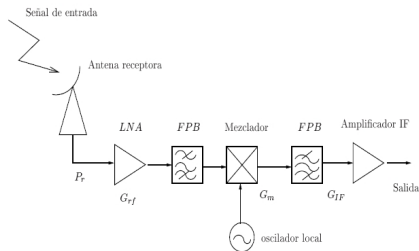
Relación portadora a ruido

Si la potencia entregada por la antena receptora es P_r , la relación de portadora a ruido (C/N) se puede escribir como:

$$\frac{C}{N} = \frac{P_r G_{rx}}{kT_s B_n G_{rx}} = \frac{P_r}{kT_s B_n}$$

Cálculo de la temperatura de ruido de un sistema

Receptor superheterodino



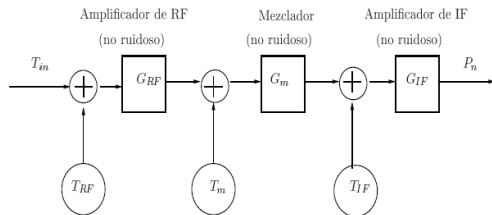
Esquema de un **receptor simplificado** con una única conversión de frecuencia de una estación terrestre.

Receptores

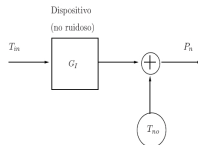
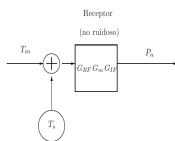
- Se suelen emplear receptores **superheterodinos** compuestos de tres partes: *front end* (Amplificador de RF, mezclador, oscilador local), amplificador de FI con filtros y demodulador en banda base.
- El amplificador de RF se denomina **LNA** (Low Noise Amplifier). Interesa que su temperatura de ruido sea baja y su ganancia alta.
- Algunas estaciones terrestres utilizan una configuración doblemente heterodina con dos conversiones de frecuencia con un **LNB** (Low Noise Block Converter), típico en sistemas de televisión en banda Ku.

Cálculo de la temperatura de ruido de un sistema

Modelos equivalentes



Modelo equivalente de fuentes de ruido para el receptor superheterodino



Modelo equivalente del receptor.

Modelo equivalente dispositivo ruidoso.

Cálculo de la temperatura de ruido de un sistema

Temperatura equivalente

Procedimiento

- Para el modelo equivalente del receptor superheterodino la temperatura de ruido a la salida es:

$$P_n = G_{IF} k T_{IF} B_n + G_{IF} G_m k T_m B_n + G_{IF} G_m G_{RF} k B_n (T_{RF} + T_{in})$$

- Reescribiendo la anterior expresión:

$$P_n = G_{IF} G_m G_{RF} k B_n (T_{RF} + T_{in} + T_m/G_{RF} + T_{IF}/(G_{RF} G_m))$$

- Por otra parte, el modelo de una única fuente de ruido con temperatura equivalente T_s debe generar la misma potencia de ruido:

$$P_n = G_{IF} G_m G_{RF} k T_s B_n$$

- Igualando ambas expresiones se obtiene como **temperatura equivalente de ruido del sistema T_s** :

$$T_s = (T_{in} + T_{RF} + T_m/G_{RF} + T_{IF}/(G_m G_{RF}))$$

Factor de ruido y temperatura de ruido

Relación G/T para estaciones terrestres

Definición

- El **factor de ruido** se usa habitualmente para especificar el ruido generado por un dispositivo y se define como:

$$NF = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}}$$

- A veces conviene expresar el **factor de ruido como temperatura de ruido T_d** , por lo que se usa la relación:

$$T_d = T_0(NF - 1)$$

Donde el factor ruido debe estar en lineal y no en decibelios, mientras que T_0 es la temperatura de referencia, generalmente igual a 290 K. NF generalmente se da en decibelios.

- La relación C/N se escribe como:

$$\frac{C}{N} = \left[\frac{P_t G_t G_r}{k T_s B_n} \right] \left[\frac{\lambda}{4\pi R} \right]^2 = \left[\frac{P_t G_t}{k B_n} \right] \left[\frac{\lambda}{4\pi R} \right]^2 \left[\frac{G_r}{T_s} \right]$$

- La relación G/T_s (dB/K) marca la **calidad del receptor** en la estación terrestre.

Diseño de un enlace descendente

Objetivos

- Cumplir con una determinada relación C/N .
- Mantener un coste mínimo.

Fiabilidad del enlace

Los enlaces se diseñan con un determinado **porcentaje de fiabilidad** que se ha de cumplir a lo largo de todo el año. Es decir que la C/N no baje de un mínimo no más que un cierto porcentaje de tiempo (se ha de tener en cuenta el **efecto de la lluvia**). La fiabilidad depende también de la señal que se transmita.

Link Budget

Para calcular la C/N se ha de estudiar las potencias de señal y ruido del enlace radioeléctrico o **link budget**:

- Se suele hacer en dBs para cada transpondedor.
- La C/N es la global del enlace debiéndose **tener en cuenta todos los saltos** (ascendente y descendente)
- Se suelen evaluar para el **caso peor**.

Cálculo de la C/N

Operaciones

El cálculo de la relación portadora a ruido se basa en dos ecuaciones:

1

$$P_r = PIRE + G_r - L_p - L_a - L_r - L_t \quad \text{dBW} \quad \text{Potencia recibida}$$

2

$$P_n = kT_s B_n \quad \text{Wattios} \quad \text{Potencia de ruido}$$

$$N = k + T_s + B_n \quad \text{dBW} \quad \text{Potencia de ruido en dBs}$$

Efecto lluvia

La **lluvia**, además de aumentar la atenuación del enlace, hace que **crezca el ruido**, aumentando la T_{sky} . Por ejemplo, una atenuación de 1 dB por lluvia produce una T_{sky} :

$$T_{sky} = 273(1 - 1/1,32) = 66 \text{ K}$$

En **sistemas de televisión DBS** se utilizan satélites con antenas regionales (muy directivas) y que emiten mucha potencia (elevada PIRE) para así disponer de estaciones terrestres con antenas pequeñas.

Variación de la C/N con la lluvia

- La atenuación producida en el camino de propagación A se debe a la absorción gaseosa A_{ca} y a la lluvia A_{rain} .
- Como consecuencia la temperatura del cielo T_{sky} es:

$$T_{sky} = 270(1 - 10^{-A/10}) \quad K$$

- La temperatura de la antena T_A es la del cielo T_{sky} multiplicada por un coeficiente de acoplo η_c :

$$T_A = \eta_c T_{sky} \quad K$$

- La temperatura de ruido del sistema receptor se puede tomar como:

$$T_{s\ rain} = T_{LNA} + T_A \quad K$$

- Por lo que el incremento de ruido producido por la lluvia es:

$$\Delta N_{rain} = 10 \log_{10} \left(\frac{kT_{s\ rain} B_n}{kT_{sca} B_n} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{T_{s\ rain}}{T_{sca}} \right) \quad dB$$

- Como consecuencia de la atenuación por lluvia, se tiene:

$$C_{rain} = C_{ca} - A_{rain} \quad dB$$

- Por lo que, finalmente:

$$(C/N)_{dn\ rain} = (C/N)_{dn\ ca} - A_{rain} - \Delta N_{rain} \quad dB$$

Diseño del enlace ascendente

Es **más sencillo** que el descendente, ya que se pueden emplear estaciones terrestres con tamaño de antena mayor y con más potencia que los satélites. Aunque en el caso de los sistemas VSAT y de telefonía móvil este no es el caso.

Los transpondedores son casi lineales, determinando la potencia de salida la que se tiene a la entrada. En los amplificadores de alta potencia se deja un **backoff** para evitar productos de **intermodulación**.

Se debe estimar la $(C/N)_{up}$ con las relaciones:

$$N_{xp} = k + T_{xp} + B_n \quad dBW$$

y

$$P_{rxp} = P_t + G_t + G_r - L_p - L_{up} \quad dB$$

Con lo que,

$$C/N = P_{rxp} - N_{xp} \quad dB$$

Por otra parte, se tiene

$$P_{rxp} = P_{sat} - BO_0 - G_{xp} \quad dBW$$

Donde P_{sat} es la potencia de salida de saturación, BO_0 es el margen de *backoff* y G_{xp} la ganancia del transpondedor.

Estimación de la $(C/N)_0$ global de un sistema

Para la estimación de la $(C/N)_0$ global de un sistema hay que **tener en cuenta todas las contribuciones**:

$$(C/N)_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{(C/N)_1} + \frac{1}{(C/N)_2} + \frac{1}{(C/N)_3} + \dots\right)}$$

Como la potencia de la portadora C se refiere a un mismo punto, tiene el mismo valor, por lo que la anterior expresión se puede escribir como:

$$(C/N)_0 = \frac{1}{\left(\frac{N_1}{C} + \frac{N_2}{C} + \frac{N_3}{C} + \dots\right)} = \frac{C}{(N_1 + N_2 + N_3 + \dots)}$$

Que en decibelios se puede poner como:

$$(C/N)_0 = C - 10\log_{10}(N_1 + N_2 + N_3 + \dots) \quad dB$$

Efecto interferencias o intermodulación

Se debe añadir un término C/I .

$$(C/N)_0 = C - 10\log_{10}(N_1 + N_2 + N_3 + I + \dots) \quad dB$$

Diseño de un enlace de comunicación por satélite

- 1 Determinar la banda de frecuencia en que va a operar el sistema.
- 2 Determinar los parámetros de comunicación del satélite. Estimar los valores que no sean conocidos.
- 3 Determinar los parámetros de transmisión y recepción de las estaciones terrestres.
- 4 Comenzar con la estación transmisora terrestre. Estimar el enlace ascendente y la potencia de ruido del transpondedor para calcular $(C/N)_{up}$.
- 5 Calcular la potencia de salida del transpondedor según ganancia y backoff.
- 6 Establecer la potencia del enlace descendente y el ruido en la estación terrestre receptora. Calcular $(C/N)_{dn}$ y el $(C/N)_0$ global en el borde de la zona de cobertura (caso peor).
- 7 Calcular la S/N o el BER en banda base. Encontrar los márgenes del enlace.
- 8 Evaluar los resultados y comparar con las especificaciones requeridas. Cambiar los parámetros del sistema para cumplir con la $(C/N)_0$, la S/N o el BER.
- 9 Determinar las condiciones de propagación bajo las que debe operar el enlace y su porcentaje de fiabilidad.
- 10 **Rediseñar los parámetros** del sistema si los márgenes del enlace son inadecuados. Comprobar que los parámetros sean razonables y que se está dentro del **presupuesto requerido**.