

Lección 10: Análisis de Enlaces de Comunicación. Parte II

Gianluca Cornetta, Ph.D.

Dep. de Ingeniería de Sistemas de Información y Telecomunicación

Universidad San Pablo-CEU

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Contenido

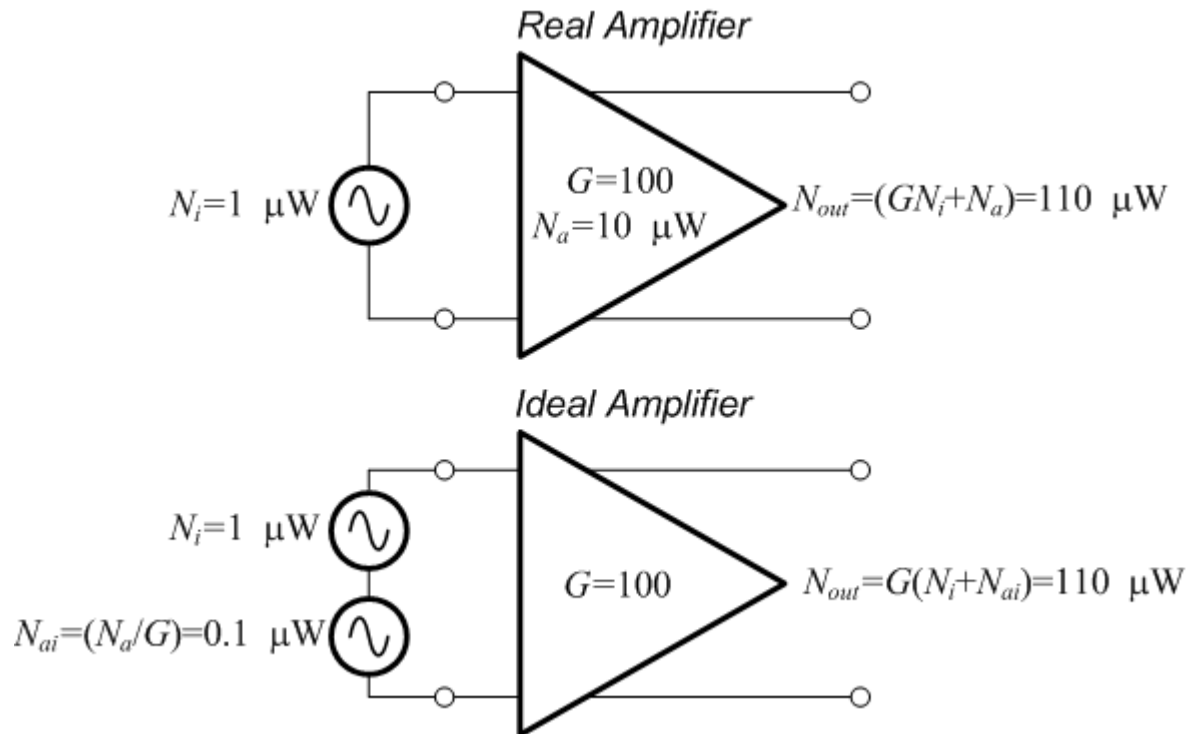
- Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema
- Ejemplo de Análisis de Enlace
- Repetidores Satelitales

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema



- Si se refiere todo el ruido a la entrada del amplificador, la ecuación de la figura de ruido se vuelve:

$$F = \frac{N_i + N_{ai}}{N_i} = 1 + \frac{N_{ai}}{N_i}$$

- La figura de ruido de ruido en entrada

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema

- ❑ Para expresar de forma objetiva la figura de ruido hay que escoger un N_i de referencia
- ❑ Friis propuso utilizar como referencia el ruido de una fuente a la temperatura $T_0=290^\circ\text{K}$
- ❑ La elección $T_0=290^\circ\text{K}$ fue debida al hecho de que se trata de una aproximación razonable de la temperatura de las fuentes de ruido de la mayor parte de los enlaces
- ❑ Asimismo, con la elección $T_0=290^\circ\text{K}$, la densidad espectral de la potencia de ruido se transforma en un número muy sencillo:

$$N_0 = \kappa T_0 = 1.38 \times 10^{-23} \times 290 = 4.0 \times 10^{-21} \text{ W/Hz} = -204 \text{ dBW/Hz}$$

- ❑ En los casos en los que N_i se encuentra a temperaturas distintas de 290°K hay que utilizar la figura de ruido operativa F_{op}

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema

- ❑ A partir de la expresión de la figura de ruido se obtiene:

$$N_{ai} = (F - 1)N_i \Rightarrow \kappa T_R W = (F - 1)\kappa T_0 W \Rightarrow T_R = (F - 1)T_0$$

- ❑ T_R es la temperatura efectiva de ruido. Se trata de una caracterización equivalente a la figura de ruido
 - ❑ La única diferencia es que no tiene la restricción de ser referida a alguna magnitud de referencia
- ❑ El ruido interno de un amplificador puede expresarse como una fuente externa de ruido a la temperatura efectiva T_R
- ❑ Para terminaciones resistivas T_R nunca es inferior a la temperatura ambiente a menos que el sistema esté refrigerado
- ❑ Para terminaciones reactivas T_R puede ser inferior a 290°K incluso si la temperatura ambiente es superior
- ❑ El ruido en la salida del amplificador resulta ser:

$$N_{out} = GN_i + GN_{ai} = G\kappa T_g W + G\kappa T_R W = G\kappa(T_g + T_R)W = G\kappa T_g W + (F - 1)G\kappa T_0 W$$

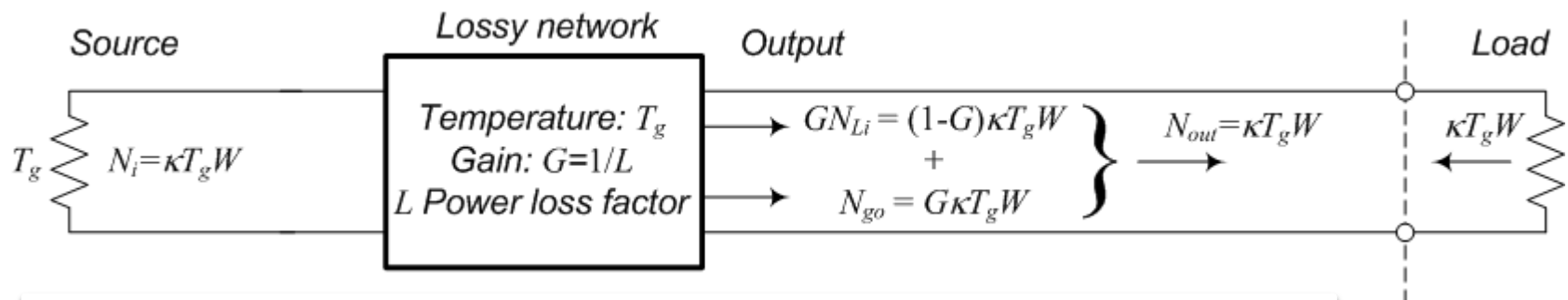
- ❑ Donde T_g es la temperatura de la fuente

Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema

- ❑ En el caso de líneas con pérdidas, la degradación del SNR se debe a la atenuación de la señal ya que la potencia de ruido se mantiene constante (en el caso en que la temperatura de la línea es inferior o igual a la temperatura ambiente)
- ❑ Sin embargo, a pesar de que la causa de degradación es distinta del caso de un circuito activo, la degradación seguirá midiéndose en términos de figura de ruido o temperatura efectiva de ruido
- ❑ Las pérdidas de potencia L se definen como:

$$L = \frac{\text{input power}}{\text{output power}}$$

- ❑ La ganancia de la línea será $G = 1/L$ (inferior a la unidad para líneas con pérdidas)



Línea con pérdidas adaptada en impedancia y temperatura en ambos puertos



Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema

- ❑ La potencia de ruido total que fluye de la red a la carga es igual a la fuente de ruido:

$$N_{out} = kT_g W$$

- ❑ La carga es adaptada y de tipo resistivo con temperatura de ruido T_g
- ❑ Para garantizar el equilibrio térmico, la potencia que desde la carga fluye atrás hacia la red debe ser igual a N_{out}
 - ❑ De hecho, la potencia disponible de ruido depende de la temperatura, del ancho de banda y de la adaptación de impedancia y no del valor de la resistencia
- ❑ La potencia N_{out} puede considerarse como la suma de dos contribuciones:

$$N_{out} = N_{go} + GN_{Li} = GkT_g W + GN_{Li}$$

- ❑ Donde:
 - ❑ $N_{go} = GkT_g W$ es la componente del ruido de salida debida a la fuente
 - ❑ GN_{Li} es la componente del ruido de salida debida al ruido de la red referido a la entrada N_{Li}



Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema

- N_{Li} resulta ser:

$$N_{Li} = \frac{1-G}{G} \kappa T_g W = \kappa T_L W$$

- T_L es la temperatura efectiva de la línea, es decir:

$$T_L = \frac{1-G}{G} T_g = (L-1) T_g$$

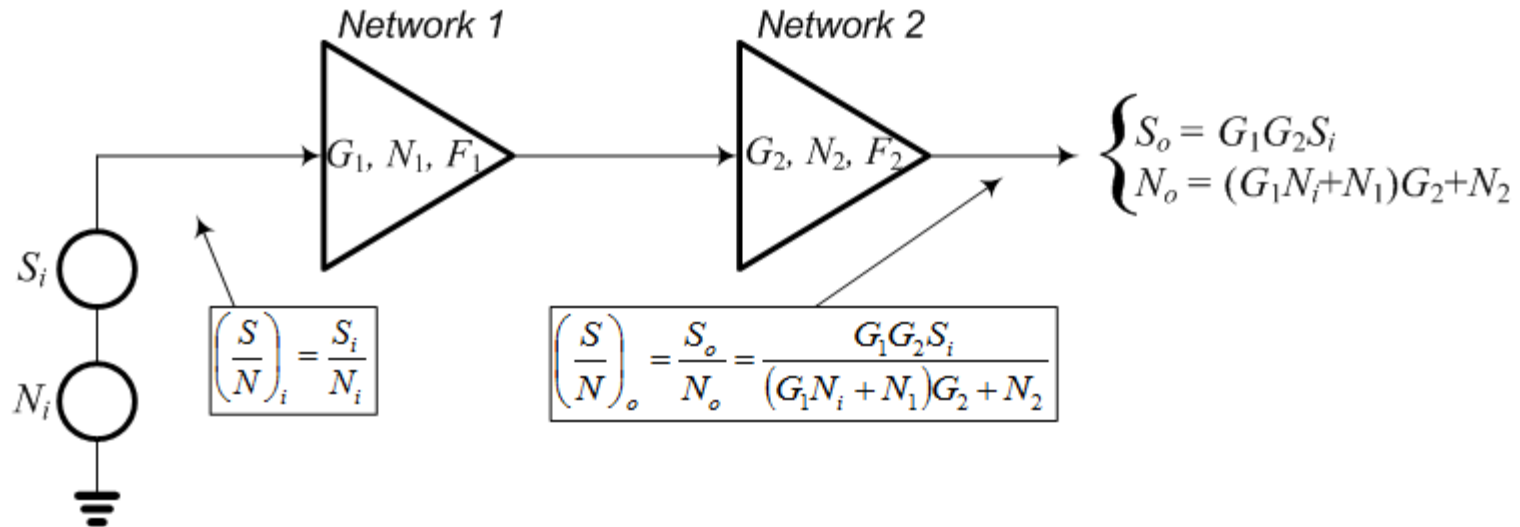
- Si $T_g = T_0 = 290^\circ\text{K}$, T_L resulta:

$$T_L = (L-1) T_0 = (F-1) T_0 \Rightarrow F = \frac{T_L}{T_0} + 1 = L$$

- Donde $F=L$ es la figura de ruido y $G=1/L$ es la ganancia de la línea con pérdidas. Consecuentemente N_{out} se vuelve:

$$N_{out} = \frac{\kappa T_g W}{L} + \left(1 - \frac{1}{L}\right) \kappa T_0 W$$

Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema



$$F_{comp} = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} = \frac{S_i/N_i}{G_1 G_2 S_i / ((G_1 N_i + N_1) G_2 + N_2)} = \frac{G_1 N_i + N_1}{G_1 N_i} + \frac{N_2}{G_1 G_2 N_i} = \underbrace{\left(1 + \frac{N_1/G_1}{N_i}\right)}_{F_1} + \frac{1}{G_1} \underbrace{\left(\frac{N_2/G_2}{N_i}\right)}_{F_2 - 1} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}$$

- ❑ Cuando n etapas están conectadas en cascada se obtiene:

$$F_{comp} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

- ❑ Para minimizar la figura de ruido compuesta es deseable tener una primera etapa con elevada ganancia y baja figura de ruido
- ❑ Una ganancia elevada y una baja figura de ruido son requerimientos mutuamente exclusivos por lo que hay que encontrar una solución de compromiso

Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema

- La expresión de F_{comp} para el caso genérico de n etapas (conocida también como *ecuación de Friis*) puede modificarse para expresar los efectos compuestos de la temperatura de ruido T_{comp} :

$$\begin{aligned} F_{comp} - 1 &= F_1 - 1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \\ \Rightarrow \frac{T_{comp}}{T_0} &= \frac{1}{T_0} \left(T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_n}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \right) \\ \Rightarrow T_{comp} &= T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_n}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \end{aligned}$$

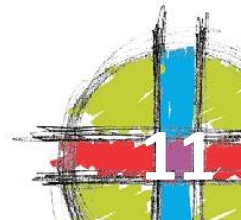
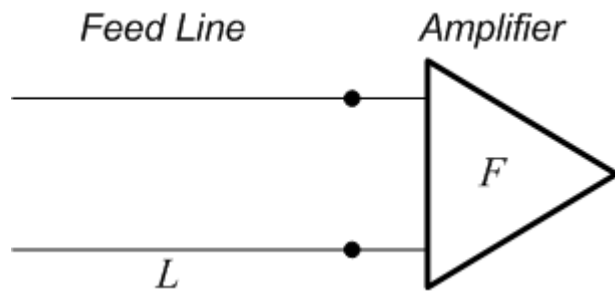


Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema



- ❑ Una posible conexión en cascada está formada por una línea con pérdidas conectada a un amplificador
 - ❑ Es esto el caso que modela la conexión de un sistema a la antena receptora
- ❑ Utilizando la ecuación de Friis para el caso de dos etapas se obtiene:

$$F_{comp} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} \Rightarrow F_{comp} = L + \frac{F - 1}{1/L} = L + (F - 1)L = LF$$

- ❑ La temperatura compuesta T_{comp} del sistema resulta pues:

$$F_{comp} - 1 = LF - 1 \Rightarrow \frac{T_{comp}}{T_0} = (LF - 1) \Rightarrow T_{comp} = (LF - 1)T_0$$

- ❑ O, de forma alternativa:

$$T_{comp} = (LF - 1 + L - L)T_0 = [(L - 1) + L(F - 1)]T_0 = T_L + LT_R$$

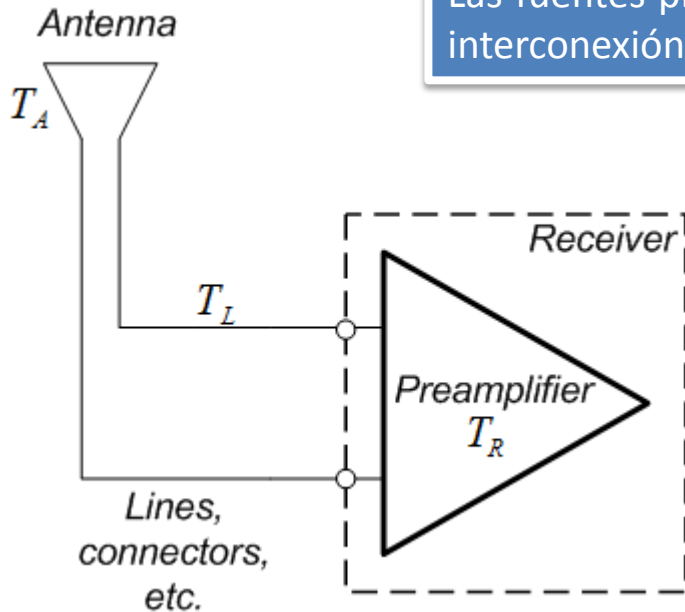
Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema

- ❑ Para las comunicaciones terrestres, F es la figura de mérito más adecuada porque las fuentes de ruido terrestres tienen temperaturas próximas a 290°K
 - ❑ Valores convenientes de F se encuentran en el rango entre 1 dB y 10 dB
- ❑ Para comunicaciones espaciales T es la figura de mérito más idónea
 - ❑ Valores típicos de T se encuentran entre 30°K y 150°K
 - ❑ La figura de ruido no es una métrica adecuada ya que los dispositivos para comunicaciones espaciales tienen todos F muy próxima a la unidad (de 0.5 a 1.5 dB) lo que complica muchísimo las comparaciones
 - ❑ No es necesario expresar la temperatura efectiva respecto a una temperatura de referencia para evaluar la degradación de la señal



Potencia de Ruido y de Señal Recibida

Las fuentes principales de ruido en un receptor son la antena, las líneas de interconexión (pérdidas por atenuación) y el preamplificador.



- ❑ El ruido total generado por fuentes externas (ruido galáctico, ruido generado por el hombre, etc.) inyectado por la antena es $\kappa T_A W$, mientras que el ruido generado internamente por el front-end de recepción es $\kappa T_{comp} W$
- ❑ Asumiendo que la antena no tiene partes disipativas, La temperatura de sistema T_S es:
$$T_S = T_A + T_{comp}$$
- ❑ Donde T_{comp} es la temperatura compuesta y representa la degradación generada internamente por el ruido térmico de la línea y del amplificador

- ❑ Resulta que:

$$T_S = T_A + T_L + LT_R = T_A + (L-1)T_0 + L(F-1)T_0 = T_A + (LF-1)T_0$$

- ❑ Si LF está expresado en dB entonces:

$$T_S = T_A + (10^{LF/10} - 1)T_0$$

Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema

- ❑ Normalmente la potencia recibida P_r y la temperatura de sistema T_s , están referidas a la salida de la antena receptora
 - ❑ Este convenio suele ser utilizado por los diseñadores de antenas y subsistemas de transmisión
- ❑ También es posible referir la potencia recibida y la temperatura de sistema a la entrada del receptor (conectado a la antena mediante una línea con pérdidas L)
 - ❑ La potencia recibida P'_r en la entrada del receptor es: $P'_r = LP_r$
 - ❑ La temperatura de sistema T'_s en la entrada del receptor es:
 $T'_s = LT_s$
 - ❑ Este convenio suele ser utilizado por los diseñadores de subsistemas de recepción

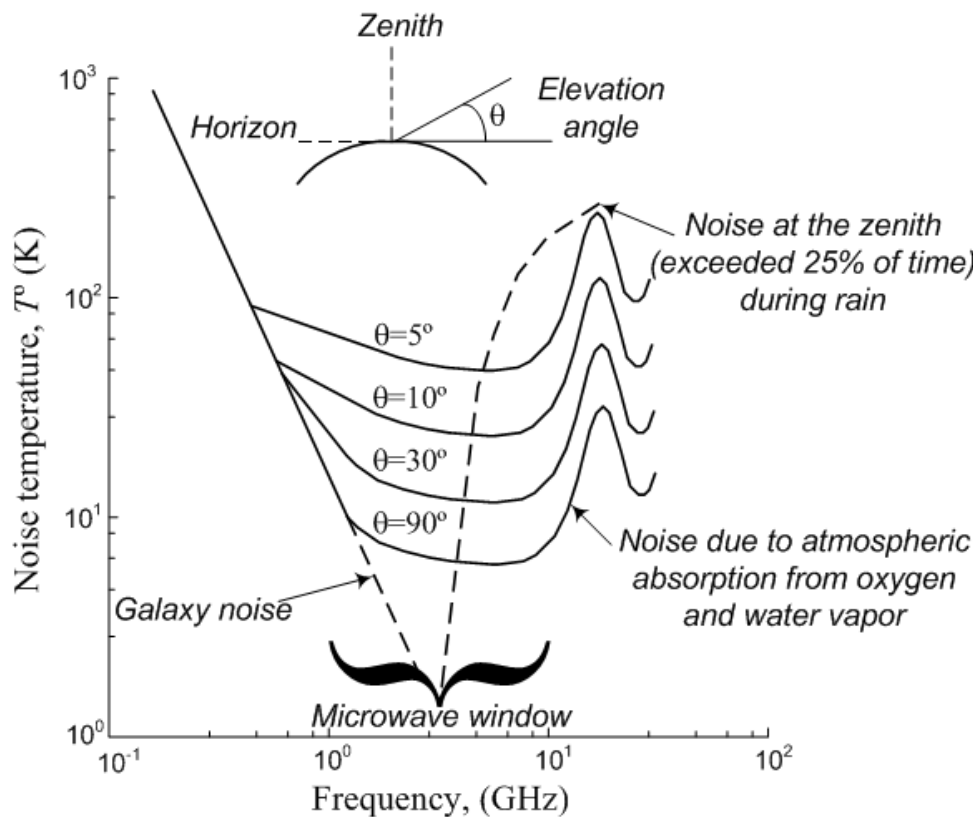


Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema

- ❑ La figura de ruido es definida respecto a una temperatura de referencia $T_0 = 290^\circ\text{K}$
- ❑ Cuando la temperatura de la fuente de ruido es diferente de T_0 , es necesario definir una *figura de ruido efectiva o operativa*:

$$F_{op} = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} = \frac{S_i / \kappa T_A W}{G S_i / G(\kappa T_A W + N_{ai})} = \frac{\kappa T_A W + N_{ai}}{\kappa T_A W} = 1 + \frac{(F-1)N_i}{\kappa T_A W} = 1 + \frac{(F-1)\kappa T_0 W}{\kappa T_A W} = 1 + \frac{T_0}{T_A} (F-1)$$

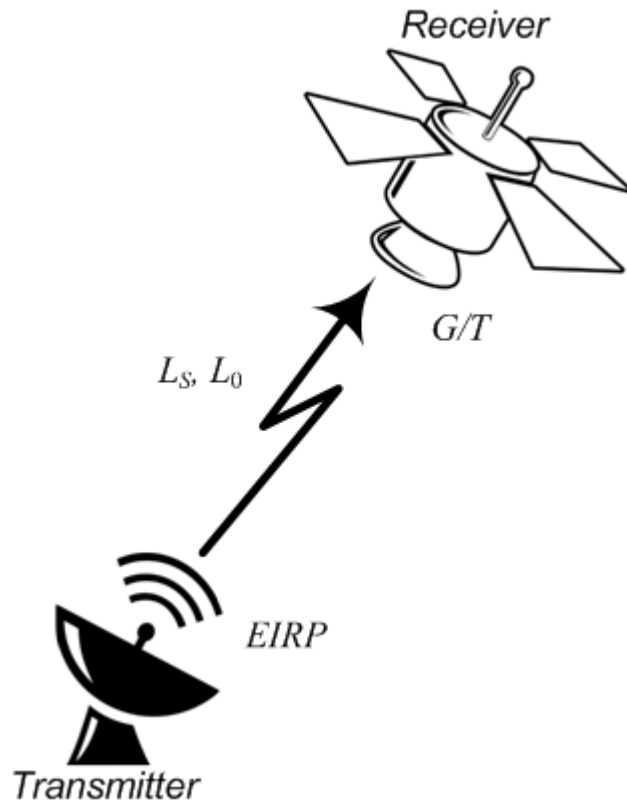
Figura de Ruido, Temperatura de Ruido y Temperatura de Sistema



- ❑ La antena receptora colecciona ruido aleatorio que proviene de fuentes terrestres y galácticas que constituyen el ruido de fondo de origen celeste (*sky background noise*)
- ❑ El ruido de fondo de origen celeste depende de la frecuencia y del ángulo de elevación de la antena sobre el horizonte
 - ❑ Existe una ventana de frecuencias (*microwave window* o *space window*) en la que el ruido de fondo es poco significativo (por ello esta ventana se aprovecha para comunicaciones vía satélite o con el espacio profundo)
 - ❑ El ruido de fondo vuelve a ser apreciable a frecuencias superiores a los 10 GHz
 - ❑ Existen mapas del ruido galáctico de fondo en función de la posición (expresado como ascensión recta –*right ascension* y declinación –*declination*) de las fuentes de ruido galáctico (sol, luna, planetas, etc.) y de la frecuencia



Ejemplo de Análisis de Enlace



- ❑ El objetivo del análisis de enlace es el de determinar si el sistema cumple con el máximo P_B permitido
 - ❑ Esto se verifica comparando el E_b/N_0 de la señal recibida con el E_b/N_0 requerido
- ❑ Para realizar esta comprobación sólo hacen falta unos pocos parámetros:
 - ❑ EIRP (cuál es la potencia efectiva transmitida)
 - ❑ La figura de mérito G/T (cuál es la capacidad del receptor de recolectar la potencia en entrada)
 - ❑ Las pérdidas de trayecto (*space loss*) L_S
 - ❑ Las otras pérdidas y degradaciones L_0

Ejemplo de Análisis de Enlace

Parameter	Link Budget		
Transmitter power (dBW)	100	20.00	P_t
Transmitter circuit loss		2.00	L_o
Transmitter antenna gain (peak dBi)		51.57	G_t
Dish diameter (ft)	20		
Half-power beamwidth (degrees)	0.45		
Terminal EIRP (dBW)		69.57	EIRP
Path Loss (dB)	(10 elev.)	202.67	L_s
Fade allowance (dB)		4.00	L_o
Other losses		6.00	L_o
Received isotropic power (dBW)		-143.10	
Receiver antenna gain (peak dBi)		35.09	G_r
Dish diameter (ft)	3		
Half-power beamwidth (degrees)	2.99		
Edge-of-coverage loss (dB)		2.00	L_o
Received signal power (dBW)		-110.02	P_r
Receiver noise figure at antenna port (dB)		11.5	
Receiver temperature (K)		3806.36	
Receiver temperature (dB-K)		35.81	
Receiver antenna temperature (K)		300.00	
Receiver antenna temperature (dB-K)		24.77	
System temperature (K)		4106.36	
System temperature (dB-K)		36.13	
System G/T (dB/K)		-1.05	
Boltzmann's constant (dBW/K-Hz)		-228.60	
Noise spectral density (dBW/Hz)		-192.47	$N_0 = kT$
Received P_r/N_0		82.45	$(P_r/N_0)_r$
Data rate (dB-bit/s)	2 Mbit/s	63.01	R
Received E_b/N_0		19.44	$(E_b/N_0)_r$
Implementation loss		1.50	L_o
Required E_b/N_0		10.00	$(E_b/N_0)_{reqd}$
Margin (dB)		7.94	M

$$G_t = 10 \log_{10} \frac{4\pi A_{et}}{\lambda^2}$$

$$EIRP = P_t(\text{dB}) + G_t(\text{dB}) - L_o(\text{dB})$$

$$L_s = 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d}$$

$$G_r = 10 \log_{10} \frac{4\pi A_{er}}{\lambda^2}$$

$$\left(10^{\frac{F(\text{dB})+L(\text{dB})}{10}} - 1 \right) T_0$$

$$T_s = T_A + (L-1)T_0 + L(F-1)T_0 = T_A + (F-1)T_0 = T_A + T_R$$

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

Frequency (GHz)	8
Wavelength (m)	0.04
Efficiency (dish antenna)	0.55
Physical Area (A_{pt}) m ²	29.19
Effective Area (A_{et}) m ²	16.05
Physical Area (A_{pr}) m ²	0.66
Effective Area (A_{er}) m ²	0.36

Distance (nautical miles)	21915
Reference temperature T_0 (K)	290
Receiver Line losses (dB)	0
Boltzmann's constant (J/K)	1.38E-23
Data rate (Mbit/s)	2



Ejemplo de Análisis de Enlace

- ❑ Especificar por separado los requerimientos en términos de P_r/N_0 (o E_b/N_0) y de G/T puede llevar a sistemas sobredimensionados y aumentar los costes de producción
- ❑ Conviene expresar estos términos como un único parámetro denominado potencia isotrópica recibida (*received isotropic power* –RIP):

$$RIP(\text{dBW}) = \frac{P_r}{N_0} (\text{dB} - \text{Hz}) - \frac{G}{T} (\text{dB/K}) + \kappa (\text{dB/K} - \text{Hz})$$

- ❑ O, de forma equivalente:

$$RIP = \frac{(P_r/N_0)\kappa}{(G_r/T)} = \frac{P_r \kappa T}{N_0 G_r} = \frac{P_r \kappa T}{\kappa T G_r} = \frac{P_r}{G_r}$$

- ❑ P_r/N_0 representa la densidad espectral de la relación señal ruido requerida para obtener el P_B deseado con un esquema de modulación dado
- ❑ Si con $(P_r/N_0)_{\text{th-rq}}$ se denomina la relación señal ruido teórica que se precisa para obtener un P_B dado y con L'_O las pérdidas de la implementación, se obtiene:

$$\frac{P_r}{N_0} = L'_O \left(\frac{P_r}{N_0} \right)_{\text{th-rq}}$$

- ❑ Por tanto:

$$RIP = \frac{P_r}{G_r} = \frac{P_r}{N_0} \frac{N_0}{G_r} = L'_O \left(\frac{P_r}{N_0} \right)_{\text{th-rq}} \frac{N_0}{G_r} = L'_O \left(\frac{P_r}{\kappa T} \right)_{\text{th-rq}} \frac{\kappa T}{G_r}$$



Repetidores Satelitales

- ❑ Los repetidores satelitales retransmiten la información que reciben trasladándola en frecuencia
- ❑ Existen dos tipos de repetidores:
 - ❑ Regenerativos: demodulan y reconstruyen la información antes de retransmitirla. Soportan sólo una o pocas modulaciones
 - ❑ No regenerativos: sólo amplifica y retransmite la información recibida, por tanto soporta diferentes tipos de modulaciones
- ❑ Para calcular la probabilidad de error de un repetidor regenerativo es necesario tratar por separado el enlace ascendiente (*uplink*) y el descendiente (*downlink*)
- ❑ Si P_u es la probabilidad de error de bit en el enlace ascendiente y P_d la probabilidad de error de bit en el enlace descendiente, la probabilidad de recepción correcta P_c es:

$$P_c = (1 - P_u)(1 - P_d) + P_u P_d$$

- ❑ La probabilidad de error de bit P_B es:

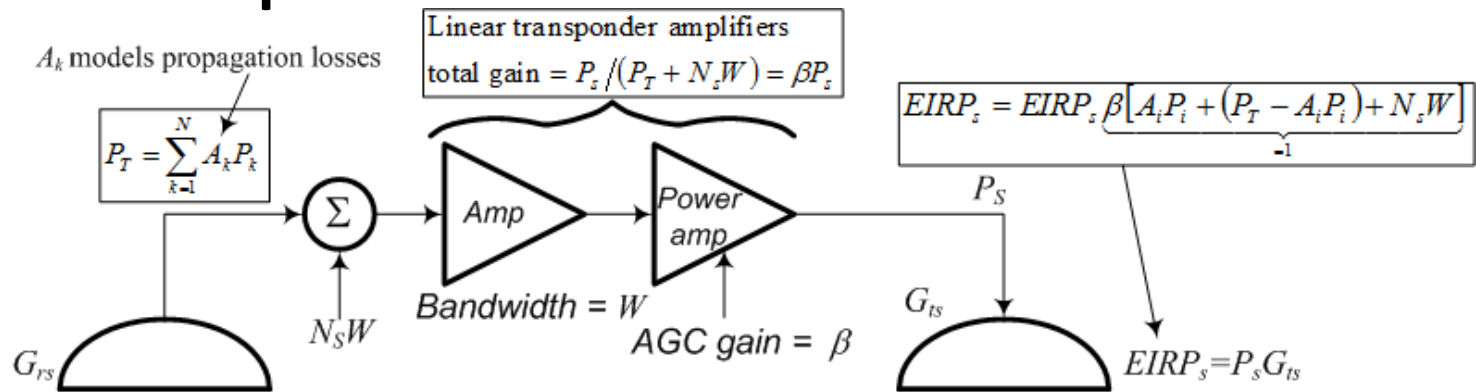
$$P_B = 1 - P_c = P_u + P_d - 2P_u P_d$$

- ❑ Si P_u y P_d son pequeñas se obtiene:

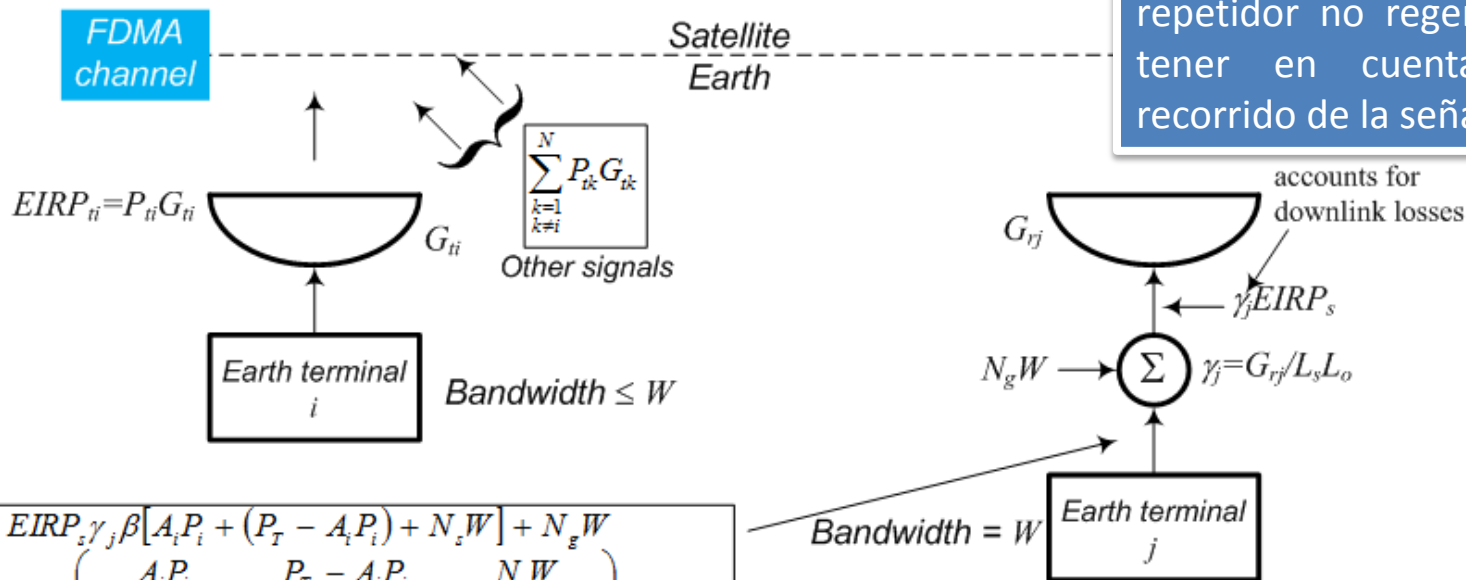
$$P_B \approx P_u + P_d$$



Repetidores Satelitales



El análisis de enlace de un repetidor no regenerativo debe tener en cuenta el entero recorrido de la señal



$$P_{rj} = EIRP_s \gamma_j \beta [A_i P_i + (P_T - A_i P_i) + N_s W] + N_g W$$

$$= EIRP_s \gamma_j \left(\frac{A_i P_i}{P_T + N_s W} + \frac{P_T - A_i P_i}{P_T + N_s W} + \frac{N_s W}{P_T + N_s W} \right) + N_g W$$



Repetidores Satelitales

- ❑ La potencia P_{rj} recibida por la estación j puede expresarse como:

$$P_{rj} = EIRP_s \gamma_j \left(\frac{S_i \text{ U/L power}}{\text{total}(S + N) \text{ U/L power}} + \frac{\text{balance } S \text{ U/L power}}{\text{total}(S + N) \text{ U/L power}} + \frac{\text{U/L noise power}}{\text{total}(S + N) \text{ U/L power}} \right) + N_g W$$

- ❑ Donde S es la potencia de señal, N la potencia de ruido y U/L denota el enlace ascendiente (*uplink*)
- ❑ De esta ecuación se deduce que la porción del EIRP en el enlace descendiente dedicada a cada usuario (o a ruido en el enlace ascendiente) es determinada por la relación entre la potencia de transmisión de un usuario dado y la potencia total de señal y ruido en el enlace ascendiente
 - ❑ Los usuarios deben cooperar y no exceder una potencia de transmisión ascendiente preestablecida
 - ❑ En el caso en que un usuario exceda la potencia de transmisión, la potencia de señal en el enlace descendiente reservado a aquel usuario se vería mejorada en detrimento de los otros usuarios

Repetidores Satelitales

- ❑ La relación P_r/N para la señal i recibida por la estación j puede expresarse como:

$$\left(\frac{P_r}{N}\right)_{ij} \approx \frac{EIRP_s \gamma_j [A_i P_i / (P_T + N_s W)]}{EIRP_s \gamma_j [N_s W / (P_T + N_s W)] + N_g W}$$

- ❑ La relación P_r/N_0 global para la señal i recibida por la estación j puede expresarse como:

$$\left(\frac{P_r}{N_0}\right)_{ij} = \frac{EIRP_s \gamma_j \beta A_i P_i}{EIRP_s \gamma_j \beta N_s + N_g}$$

- ❑ El ruido en el enlace ascendente degrada el SNR total reduciendo el EIRP en el enlace descendente y contribuyendo al ruido total de sistema
- ❑ Cuando $P_T \ll N_s W$ se dice que el enlace es limitado en el tramo ascendente (*uplink limited*) y la mayoría del $EIRP_s$ del tramo descendente es gastada para transmitir el ruido del enlace ascendente. En este caso $EIRP_s \gamma_j \ll N_g W$ por lo que:

$$\left(\frac{P_r}{N_0}\right)_{ij} \approx \frac{EIRP_s \gamma_j A_i P_i / N_s W}{(EIRP_s \gamma_j / W) + N_g} \approx \frac{A_i P_i}{N_s}$$

Repetidores Satelitales

- ❑ En el caso de un enlace limitado en el tramo ascendente, la relación P_r/N_0 global sigue el SNR del enlace ascendente
- ❑ La situación más común es la de un enlace limitado en el tramo descendente (*downlink limited*). En este caso $P_T \gg N_s W$ y el EIRP del satélite es limitado, por lo que:

$$\left(\frac{P_r}{N_0} \right)_{ij} \approx \frac{EIRP_s \gamma_j A_i P_i / P_T}{N_g}$$

- ❑ La potencia del transpondedor es dividida principalmente entre las señales transmitidas en el enlace ascendente y muy poco ruido es transmitido en el enlace descendente. En este caso las prestaciones dependen sólo de los parámetros del enlace descendente
- ❑ En ausencia de ruido de intermodulación, las prestaciones del enlace en términos de E_b/N_0 (o P_r/N_0) pueden estimarse de la siguiente manera:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{ov}^{-1} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_u^{-1} + \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_d^{-1}$$

Repetidores Satelitales

- ❑ La mayor parte de los transpondedores satelitales son de tipo no regenerativo
- ❑ Los transpondedores regenerativos son más sofisticados pero tienen importantes ventajas respecto a los de tipo no regenerativo:
 - ❑ El enlace ascendente es desacoplado del enlace descendente, por tanto el ruido del tramo ascendente no es retransmitido en el tramo descendente
 - ❑ La relación señal ruido en ambos tramos mejora de manera significativa

Repetidores Satelitales

- ❑ Los sistemas de comunicación satelitales tienen importantes restricciones de potencia...
- ❑ ...por ello suelen utilizar amplificadores no lineales pero energéticamente más eficientes respecto a amplificadores lineales
- ❑ Desafortunadamente los amplificadores no lineales tienen una serie de inconvenientes:
 - ❑ Introducen ruido de intermodulación
 - ❑ Introducen conversión AM-AM que produce una distorsión de amplitud de la señal
 - ❑ Introducen una conversión AM-PM que provocan fluctuaciones de la envolvente de la señal
 - ❑ Pueden cancelar las señales más débiles
- ❑ Para limitar el efecto de las no linealidades, es posible hacer operar el amplificador cerca de la región de funcionamiento lineal
 - ❑ Se reduce el efecto del ruido de intermodulación en detrimento de la eficiencia energética

