

Análise do Enlace de Comunicação

Edmar José do Nascimento
(Tópicos Avançados em Engenharia Elétrica I)
<http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento>

Universidade Federal do Vale do São Francisco
Colegiado de Engenharia Elétrica

Roteiro

- 1 Potência do Sinal e do Ruído
- 2 Análise do Orçamento do Enlace

Introdução

- Um enlace de comunicação abrange todo o caminho desde a fonte, passando pelos moduladores, codificadores e canal, juntamente com o receptor e todo o processamento envolvido terminando no ponto de destino da informação
- A análise do enlace resulta no orçamento do enlace (*link budget*) em que consta a soma da potência útil e da interferência ao longo do enlace
- Com o orçamento do enlace, pode-se identificar o ponto de operação real do sistema (valor de E_b/N_0 disponível na saída e a sua probabilidade de erro associada)
- Com o orçamento do enlace, pode-se verificar também se o sistema pode atingir os requisitos de projeto

Canal de Comunicação

- O canal de comunicação é o meio pelo qual as ondas eletromagnéticas se propagam do transmissor ao receptor
- No enlaces de satélite, o canal de comunicação é formado pela atmosfera (em torno de 20 km) e pelo espaço livre
- O conceito de espaço livre admite um canal livre de todos obstáculos à propagação de RF, tais como absorção, reflexão, refração ou difração
- No espaço livre, a energia que chega ao receptor é função apenas da distância
- Na atmosfera, entretanto, os efeitos de absorção, reflexão, difração e espalhamento estão presentes

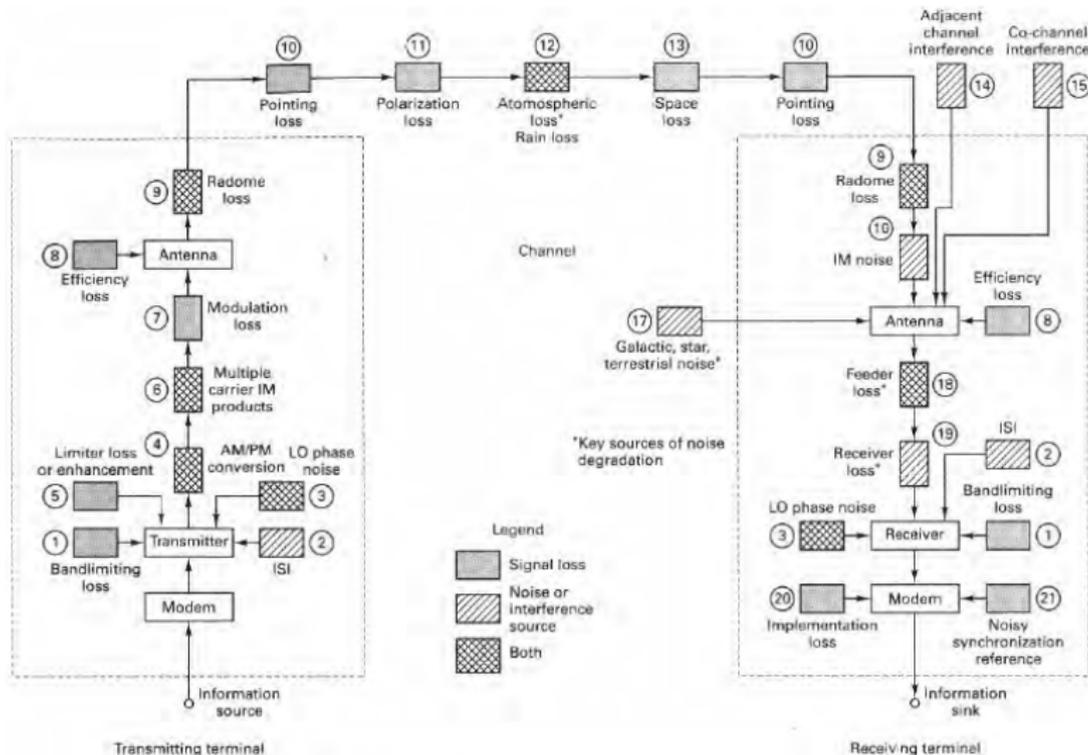
Canal de Comunicação

- Vimos que a relação E_b/N_0 é um tipo de SNR normalizada

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

- A SNR representa a potência média do sinal dividida pela potência média do ruído
- Uma degradação na SNR pode ser ocasionada pela diminuição na potência do sinal ou pelo aumento na potência do ruído (interferência)
- Uma diminuição na potência do sinal é chamada de *perda* (*loss*)

Fontes de Perdas e Ruído



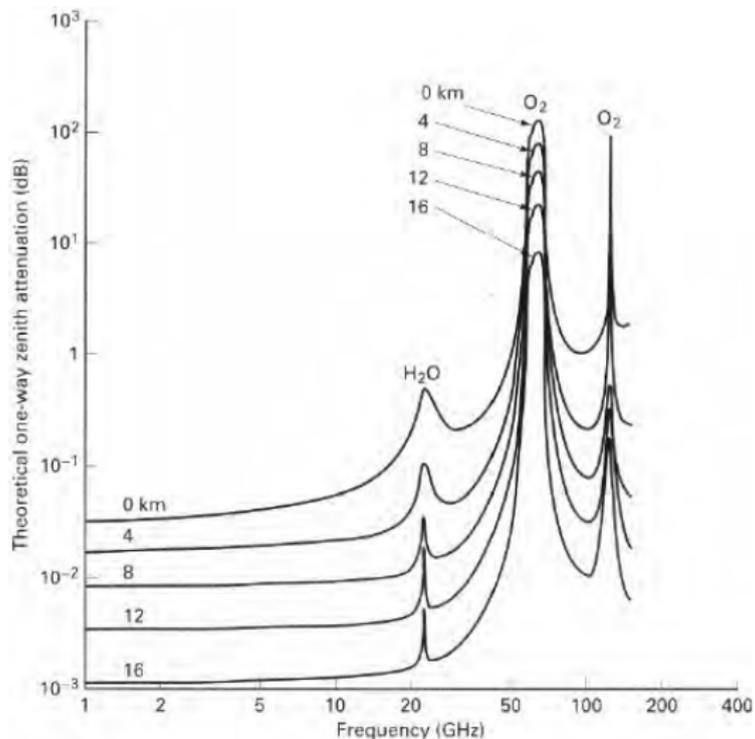
Fontes de Perdas e Ruído

- Perdas pela limitação de banda (*Bandlimiting loss*) - Necessárias para evitar interferência com canais vizinhos
- Interferência Intersimbólica (ISI)
- Ruído de fase do oscilador local - Flutuações na fase do oscilador local adicionam ruído ao sinal
- Conversão AM/PM - Fenômeno de ruído que ocorre em dispositivos não lineares como os TWT (traveling-wave tubes) usados para amplificação de potência em RF
- Produtos de Intermodulação - Quando várias portadoras estão presentes em um TWT, surgem novos sinais cujas frequências são dadas pelas somas e pelas diferenças entre as frequências presentes

Fontes de Perdas e Ruído

- Perda de modulação - Muitas vezes, no processo de modulação, somente uma parcela da energia representa a informação
- Perda de radome e ruído - O radome é uma capa protetora que protege a antena dos efeitos do tempo. Essa capa tanto absorve quanto emite energia (ruído)
- Perda de apontamento - Relacionada ao desalinhamento entre as antenas transmissoras e receptoras
- Perdas atmosféricas e ruído - As moléculas da atmosfera absorvem a energia do sinal e também irradiam, gerando ruído

Fontes de Perdas e Ruído



Equação de Alcance

- A equação de alcance relaciona a potência recebida com a distância entre o transmissor e o receptor
- Um radiador isotrópico é uma fonte de RF omnidirecional que transmite um sinal uniformemente ao longo de 4π esterradianos
- A densidade de potência $p(d)$ a uma distância d da fonte para uma potência transmitida P_t é dada por

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

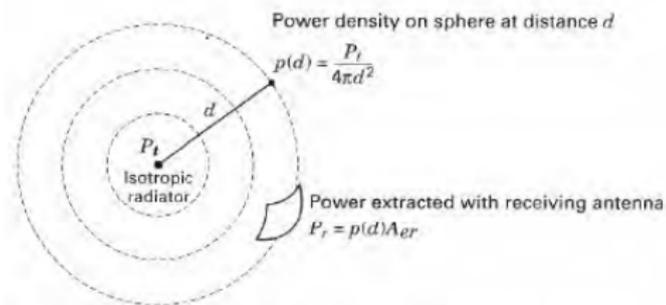
- A potência extraída pela antena receptora é dada por

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

Equação de Alcance

- O parâmetro A_{er} é chamado de área efetiva da antena receptora e é definido como

$$A_{er} = \frac{\text{Potência total extraída}}{\text{Densidade do fluxo de potência incidente}}$$



Equação de Alcance

- A área física de uma antena A_p está relacionada com a sua área efetiva A_e pelo parâmetro de eficiência η

$$A_e = \eta A_p$$

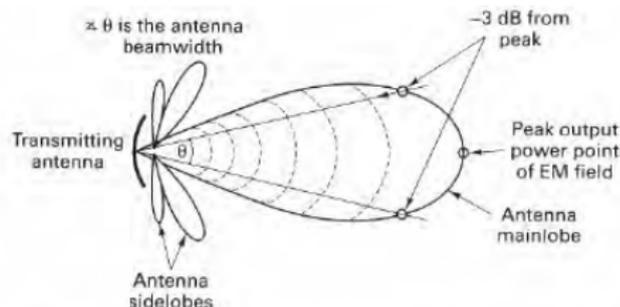
- Os valores nominais de η dependem do formato da antena ($\eta = 0,55$ para uma antena parabólica)
- Ao contrário dos radiadores isotrópicos, uma antena concentra o fluxo em determinadas direções
- O *ganho diretivo* G é um parâmetro que relaciona a potência de saída ou entrada com a de um radiador isotrópico

$$G = \frac{\text{Intensidade de potência máxima}}{\text{Intensidade de potência média sobre } 4\pi \text{ esterradianos}}$$

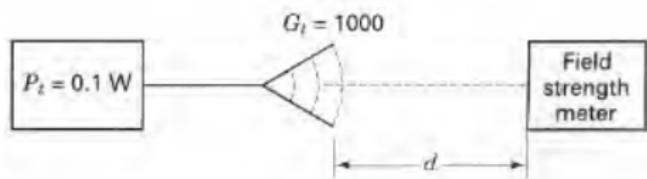
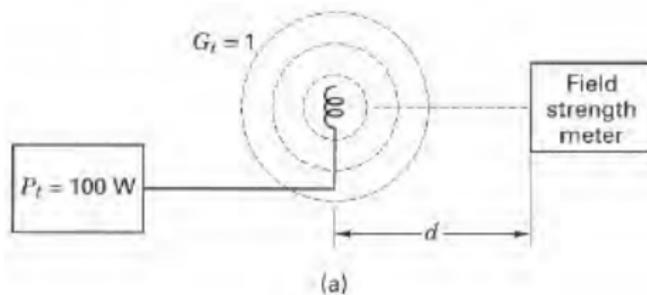
Equação de Alcance

- Na ausência de perdas dissipativas ou devidas a erros no casamento de impedância, o ganho de uma antena é simplesmente o ganho diretivo
- A potência irradiada efetiva com respeito ao radiador isotrópico (EIRP) é definida como

$$EIRP = P_t G_t$$



Mesma EIRP para Valores de P_t Diferentes



Equação de Alcance

- No caso mais geral, a equação de alcance pode ser reescrita como

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

- A relação entre o ganho da antena G e a área efetiva A_e é dada por

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

- Esse resultado se aplica tanto para antenas transmissoras quanto receptoras
- Aumentar o ganho de uma antena é equivalente a concentrar a densidade de fluxo em um ângulo menor (largura de feixe mais estreita)

Equação de Alcance

- Considerando uma antena receptora, então

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

- A potência recebida pode ser expressada como

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

- Em que L_s é um parâmetro chamado de *perda de caminho* (*path loss*) dado por

$$L_s = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Equação de Alcance

- A equação de alcance pode ser expressada de diversas maneiras

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

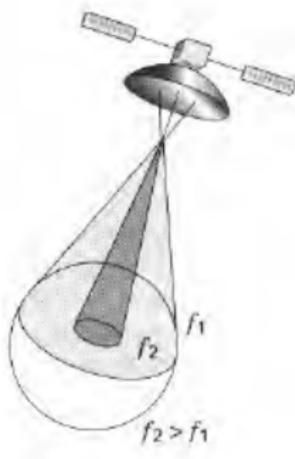
$$P_r = \frac{P_t G_t A_{er}}{4\pi d^2}$$

$$P_r = \frac{P_t A_{et} A_{er}}{\lambda^2 d^2}$$

$$P_r = \frac{P_t A_{et} G_r}{4\pi d^2}$$

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

Diminuição da Cobertura com o Aumento da Freqüência

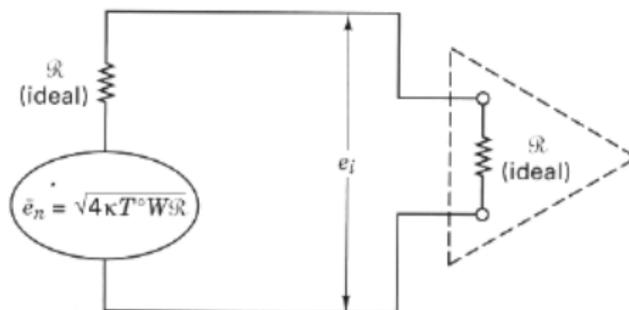


Potência do Ruído Térmico

- O ruído térmico ou ruído de Johnson é modelado por um gerador de ruído com uma tensão média quadrática em aberto de $4\kappa T^{\circ}WR$, sendo
 - κ = constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}(\text{J/K})$ ou $(\text{W/K} - \text{Hz})$
 - T° = temperatura em Kelvin
 - W = largura de banda
- A potência máxima do ruído que pode ser acoplada ao gerador de ruído vale $N = \kappa T^{\circ}W$ watts e a DEP de um lado vale

$$N_0 = \frac{N}{W} = \kappa T^{\circ} \text{ watts/hertz}$$

Potência do Ruído Térmico



Análise do Orçamento do Enlace

- Na análise do orçamento do enlace se utiliza um tipo de SNR conhecida como *carrier-to-noise ratio* (C/N)
- C representa a potência da portadora totalmente modulada e N a potência do ruído na saída da antena receptora
- Se P_r representa a potência do sinal recebido, então tem-se que

$$\frac{P_r}{N} \equiv \frac{S}{N} \equiv \frac{C}{N} \equiv \frac{C}{\kappa T^0 W}$$

- Substituindo-se P_r pela expressão obtida anteriormente, tem-se:

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

Análise do Orçamento do Enlace

- Nos sistemas digitais, substitui-se na expressão anterior a potência do ruído N pela sua DEP de um lado N_0 , dessa forma, a expressão anterior passa a ser

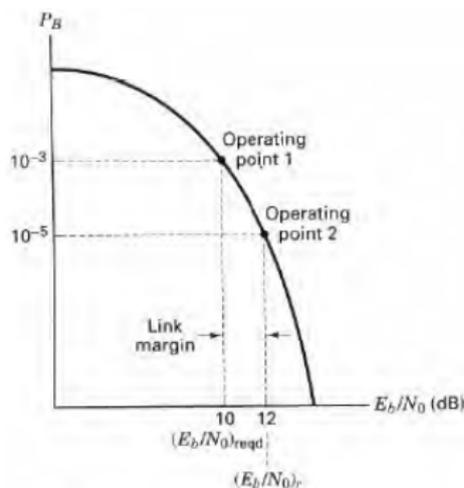
$$\frac{P_r}{N_0} = \frac{EIRP G_r / T^\circ}{\kappa L_S L_o}$$

- Nessa expressão, o parâmetro G_r / T° é chamado de *figura de mérito do receptor*, T° representa a temperatura do sistema e L_o representa outras perdas que não foram contabilizadas
- A relação da expressão anterior com E_b/N_0 é dada por

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

Margem do Enlace

- Em geral se opera com uma margem de segurança em relação ao valor de E_b/N_0 requerido
- A margem de segurança permite que efeitos não previstos atuem sobre o sistema sem que haja uma grande degradação de desempenho



Margem do Enlace

- Denotando-se por M a margem de segurança do enlace, então

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

- Em decibéis, a margem do enlace é dada por

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

- Combinando a equação da margem com a expressão para P_r/N_0 , tem-se a *equação da margem do enlace* dada por

$$M = \frac{EIRP G_r / T^0}{(E_b/N_0)_{reqd} R \kappa L_s L_o}$$

Margem do Enlace

- A equação da margem do enlace é tipicamente calculada em decibéis

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

- Os valores numéricos dessa equação constituem o orçamento do enlace
- A partir dela, pode-se ter uma idéia de como se pode reduzir ou aumentar a margem com base nos parâmetros de projeto do sistema
- Em geral, quando os parâmetros de projeto são bem conhecidos, a margem é bem pequena

Margem do Enlace

TABLE 5.1 Proposed Direct Broadcast Satellite (DBS) from Satellite Television Corp.

Uplink		
Earth station EIRP	86.6 dBW	
Free-space loss (17.6 GHz, 48° elevation)	208.9 dB	
Assumed rain attenuation	12.0 dB	
Satellite G/T°	7.7 dB/K	
Uplink $C/\kappa T^\circ$	102.0 dB-Hz	
	Atmospheric Condition	
Downlink	Clear	5-dB Rain Attenuation
Satellite EIRP	57.0 dBW	57.0 dBW
Free-space loss (12.5 GHz, 30° elevation)	206.1 dB	206.1 dB
Atmospheric attenuation	0.14 dB	5.0 dB
Home receiver G/T° (0.75 m dish)	9.4 dB/K	8.1 dB/K
Receiver pointing loss (0.5° error)	0.6 dB	0.6 dB
Polarization mismatch loss (average)	0.04 dB	0.04 dB
Downlink $C/\kappa T^\circ$	88.1 dB-Hz	82.0 dB-Hz
Overall $C/\kappa T^\circ$	87.9 dB-Hz	82.0 dB-Hz
Overall C/N (in 16 MHz)	15.9 dB	10.0 dB
Reference threshold C/N	10.0 dB	10.0 dB
Margin over threshold	5.9 dB	0.0 dB

Margem do Enlace

- No cálculo das perdas no orçamento do enlace são utilizados com frequência as seguintes definições:
 - Figura de ruído
 - Temperatura de ruído
 - Temperatura do sistema
- A figura de ruído F relaciona a SNR na entrada e na saída de uma rede
- Esse parâmetro mede a degradação da SNR causada por uma rede

$$F = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} = \frac{S_i/N_i}{GS_i/G(N_i + N_{ai})}$$

- Sendo G o ganho do amplificador e N_{ai} o ruído do amplificador

Figura de Ruído

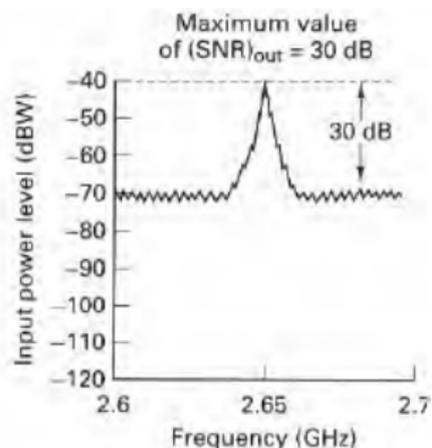
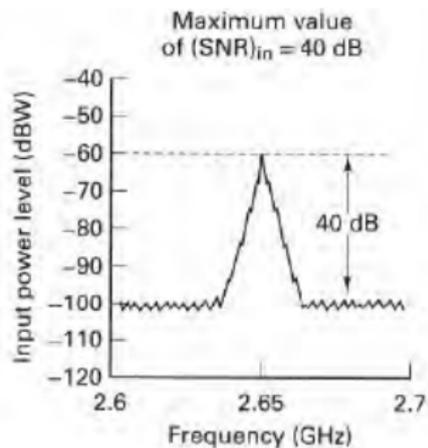


Figura de Ruído

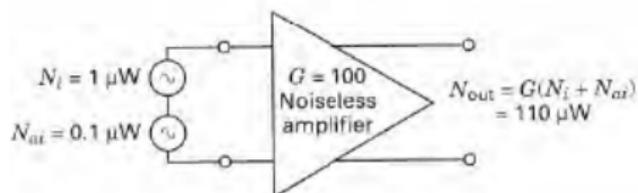
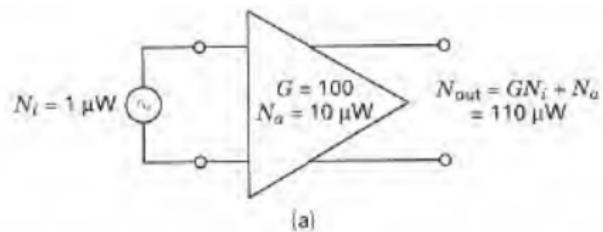


Figura de Ruído

- A equação da figura de ruído pode ser reduzida para

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

- Em uma rede ideal, $F = 1$ ($N_{ai} = 0$), ou seja, a rede não contribui com ruído
- A figura de ruído é tomada em relação à N_i
- Padroniza-se então que a fonte de ruído que origina N_i está em uma temperatura de referência igual a $T_0^{\circ} = 290K$ ($N_0 = \kappa T_0^{\circ} = 4 \times 10^{-21} W/Hz$)
- Esse valor é padronizado pelo IEEE e corresponde à temperatura da fonte em muitos enlaces
- Quando a temperatura é diferente, F é substituída pela figura de ruído operacional F_{op}

Temperatura de Ruído

- Tem-se que $N_{ai} = (F - 1)N_i$
- Fazendo-se $N_i = \kappa T_0^\circ W$ e $N_{ai} = \kappa T_R^\circ W$, sendo T_R° a temperatura de ruído efetiva do receptor, tem-se

$$\begin{aligned}\kappa T_R^\circ W &= (F - 1)\kappa T_0^\circ W \implies T_R^\circ = (F - 1)T_0^\circ \\ T_R^\circ &= (F - 1)290K\end{aligned}$$

- Essa equação é conhecida como *temperatura efetiva de ruído*
- O ruído de saída pode ser expressado em função da temperatura efetiva de ruído

$$N_{out} = G\kappa(T_g^\circ + T_R^\circ)W = G\kappa T_g^\circ W + (F - 1)G\kappa T_0^\circ W$$

Perdas na Linha

- Quando a rede ocasiona perdas no lugar de ganho, a deterioração da SNR se dá pela atenuação do sinal
- Definindo-se a perda de potência por

$$L = \frac{\text{Potência de Entrada}}{\text{Potência de Saída}}$$

- Então com cálculos similares, pode-se obter a figura de ruído para uma linha com perdas dada por

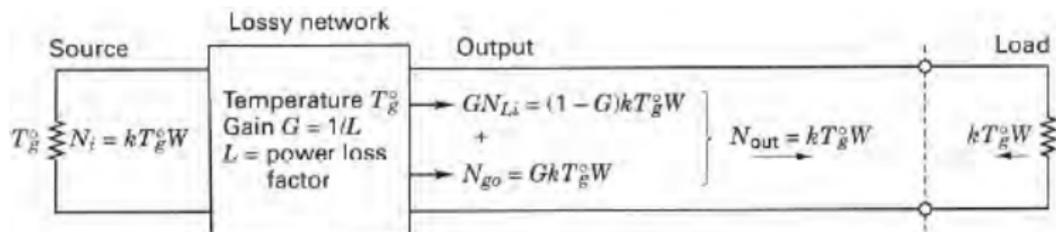
$$F = 1 + \frac{T_L^\circ}{290} = L$$

- Sendo T_L° a temperatura efetiva da linha

Perdas na Linha

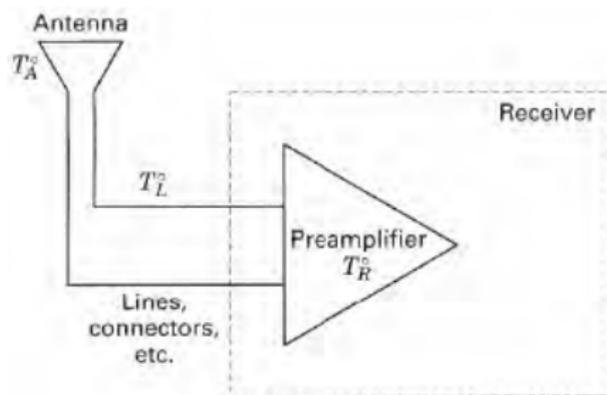
- O ruído de saída pode ser então expressado como

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



Temperatura Efetiva do Sistema

- Em um sistema receptor, os elementos principais responsáveis pela degradação da SNR são a antena, a linha e o pré-amplificador



Temperatura Efetiva do Sistema

- A antena captura diversas fontes de ruído naturais ou ocasionados pelo homem
- O ruído capturado pela antena pode ser expressado por $\kappa T_{ant} W$, sendo T_{ant} a temperatura da antena
- Pode-se definir a *temperatura do sistema* T_S° como

$$T_S^\circ = T_A^\circ + T_{comp}^\circ$$

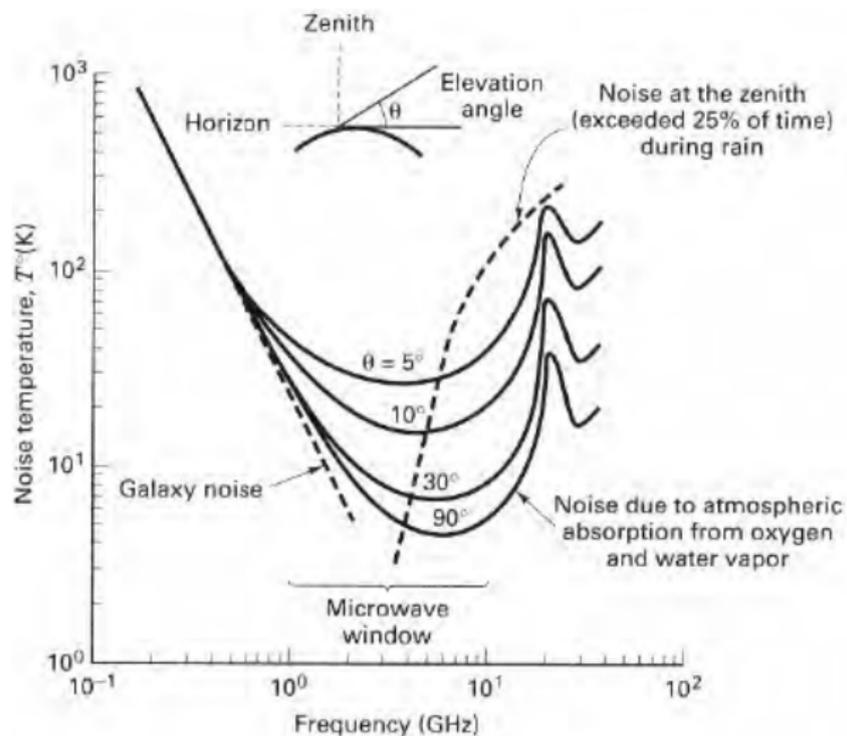
- Sendo T_A° a temperatura da antena e T_{comp}° a temperatura composta da linha e do pré-amplificador
- Pode-se mostrar que

$$T_S^\circ = T_A^\circ + T_L^\circ + LT_R^\circ = T_A^\circ + (LF - 1)290K$$

Temperatura do Ruído Celestial

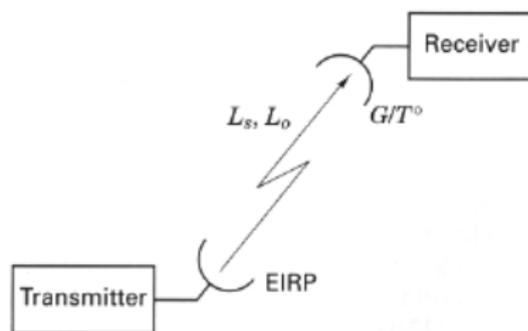
- A temperatura da antena pode ser influenciada por diversas fontes
- Os efeitos galáticos decrescem com o aumento da frequência enquanto os efeitos atmosféricos se tornam bem significativos acima de 10 GHz
- Entre 1 e 10 GHz se situa uma banda que é muito utilizada em comunicações via satélite e espaciais
- Entre 1,8 e 2,4 GHz há uma região em que as contribuições de ruído são fracas apesar da ocorrência de chuvas intensas (usado para aplicações militares, telemetria e rastreamento)

Temperatura do Ruído Celestial



Orçamento de um Enlace

- Considera-se o sistema mostrado abaixo
- O orçamento do enlace é composto de três colunas de valores, sendo a do meio contendo os ganhos e perdas e as demais com valores auxiliares necessários aos cálculos
- As perdas são indicadas por parênteses e os subtotais estão circulados



Orçamento de um Enlace

TABLE 5.2 Earth Terminal to Satellite Link Budget Example: Frequency = 8 GHz, Range = 21,915 Nautical Miles.

1. Transmitter power (dBW)	(100.00W)	20.0	P_t
2. Transmitter circuit loss (dB)		(2.0)	L_o
3. Transmitter antenna gain (peak dBi)		51.6	G_t
Dish diameter (ft)	20.00		
Half-power beamwidth (degrees)	0.45		
4. Terminal EIRP (dBW)		69.6	EIRP
5. Path loss (dB)	(10° elev.)	(202.7)	L_p
6. Fade allowance (dB)		(4.0)	L_o
7. Other losses (dB)		(6.0)	L_o
8. Received isotropic power (dBW)		-143.1	
9. Receiver antenna gain (peak dBi)		35.1	G_r
Dish diameter (ft)	3.00		
Half-power beamwidth (degrees)	2.99		
10. Edge-of-coverage loss (dB)		(2.0)	L_o
11. Received signal power (dBW)		-110.0	P_r
Receiver noise figure at antenna port (dB)		11.5	
Receiver temperature (dB-K)		35.8 (3806 K)	
Receiver antenna temperature (dB-K)		24.8 (300 K)	
12. System temperature (dB-K)		36.1 (4106 K)	
13. System G/T° (dB/K)	-1.0		G/T°
14. Boltzmann's constant (dBW/K-Hz)		-228.60	
15. Noise spectral density (dBW/Hz)		(-192.5)	$N_0 = kT^\circ$
16. Received P_r/N_0 (dB-Hz)		82.5	$(P_r/N_0)_r$
17. Data rate (dB-bit/s)	(2 Mbits/s)	(63.0)	R
18. Received E_b/N_0 (dB)		19.5	$(E_b/N_0)_r$
19. Implementation loss (dB)		(1.5)	L_o
20. Required E_b/N_0 (dB)		(10.0)	$(E_b/N_0)_{\text{reqd}}$
21. Margin (dB)		8.0	M

Orçamento de um Enlace

- A margem do enlace de 8 dBs é resultante do cálculo da expressão apresentada

$$\begin{aligned} M(\text{dB}) &= EIRP(\text{dBW}) + G_r(\text{dBi}) - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{reqd}(\text{dB}) \\ &\quad - R(\text{dB} - \text{bit/s}) - \kappa T^0(\text{dBW/Hz}) - L_s(\text{dB}) - L_o(\text{dB}) \end{aligned}$$