

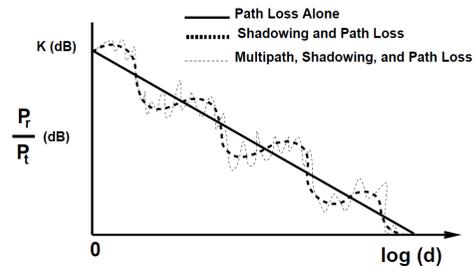
TE903 – Comunicação Digital

Revisão sobre Propagação em Larga e Pequena Escala

Evelio M. G. Fernández

17 de setembro de 2019

Qualidade do Canal Sem Fio



- **Desvanecimento em larga escala**, devido às perdas de propagação em função da distância e do sombreamento provocado por grandes objetos. É avaliado em termos de uma grande distância entre o transmissor e o receptor.
- **Desvanecimento em pequena escala**, devido à interferência construtiva e destrutiva provocada pelos multipercursos entre transmissor e receptor. Acontece numa escala espacial da ordem do comprimento da onda portadora e é dependente da frequência.

Notes

Notes

Modelagem Física de Canais Sem Fio

- Resolvendo as equações do campo eletromagnético → tarefa muito complexa de ser resolvida, particularmente 'em tempo real' por usuários móveis;
- Utilizando técnicas de traçado de raios → *Ray Tracing*;
- Desenvolvendo modelos analíticos baseados em medições empíricas;
- Construindo modelos estocásticos do canal → assumindo que diferentes comportamentos do canal acontecem com probabilidades diferentes e variam com o tempo;
- Construindo modelos assistidos por computador para caracterizar a propagação de rádio dentro de prédios.

Modelos de Propagação em Larga Escala

- Descrevem a potência média recebida (ou SNR média);
- São funções da topologia (distância, altura, etc), da frequência da onda portadora, do tipo de ambiente (urbano, rural, etc), etc.;
- Podem ser considerados modelos exatos ou empíricos.

Notes

Notes

Perda de Propagação no Espaço Livre

É o modelo utilizado para predição da potência do sinal recebido quando não existem obstáculos entre a antena transmissora e receptora (LOS, *Line-of-Sight*) e não são consideradas reflexões.

Exemplos:

- Sistemas de comunicação via satélite;
- Enlaces de microondas.

Equação do espaço livre de Friis:

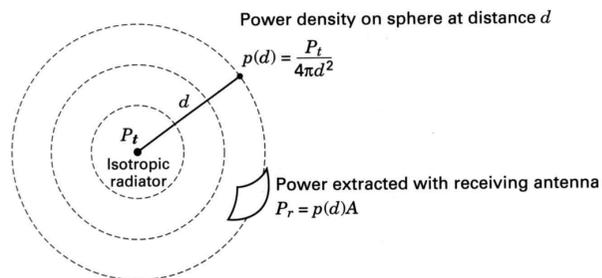
$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r,$$

$$P_{r(\text{dBm})} = P_{t(\text{dBm})} + 10 \log_{10}(G_t G_r) + 20 \log_{10}(\lambda) - 20 \log_{10}(4\pi) - 20 \log_{10}(d),$$

$$P_{L(\text{dB})} = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = -10 \log_{10} \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}.$$

Notes

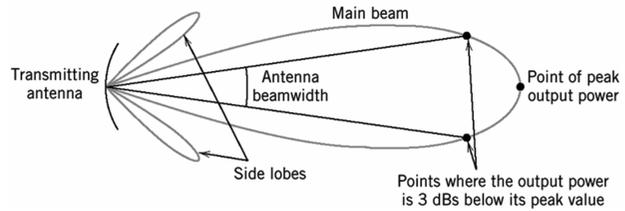
Irradiador Isotrópico



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

Notes

Diretividade da Antena ou Ganho Diretivo



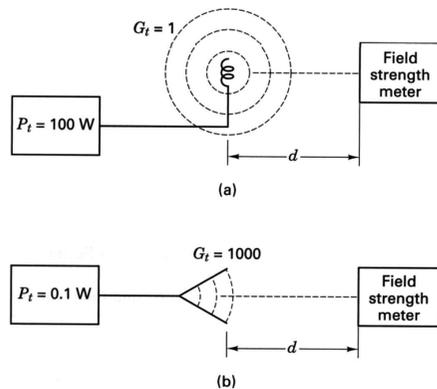
Potência irradiada isotrópica efetiva [*Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)*]:

$$EIRP = P_t G_t, \quad G = \frac{4\pi A}{\lambda^2},$$

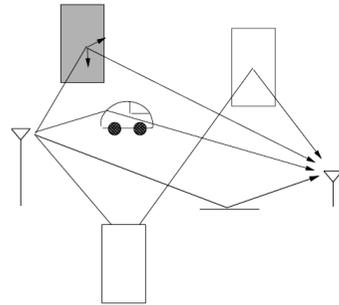
$$\Rightarrow P_r = \frac{P_t A_r}{4\pi d^2} = \frac{EIRP \cdot A_r}{4\pi d^2} = \frac{P_t G_t A_r}{4\pi d^2} = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2.$$

Notes

Mesma EIRP produzida de duas formas diferentes



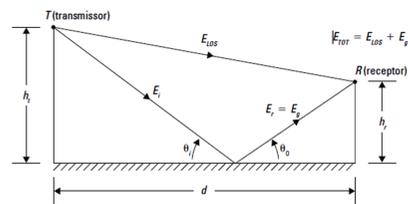
Notes



- Levam em conta os três mecanismos básicos da propagação: reflexão, difração e dispersão;
- Aproximam a propagação das ondas eletromagnéticas representando as frentes de onda como partículas,
- Modelos baseados na ótica geométrica.

Notes

• Modelo de dois raios



$$P_r = P_t \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2 G_t G_r.$$

- Considera o caminho direto e um caminho de propagação refletido no solo entre transmissor e receptor;
 - É independente da frequência quando a distância é grande o suficiente;
 - Mostra a dependência com a altura das antenas;
 - Boa aproximação para propagação ao longo de rodovias, estradas rurais e na superfície da água.
- **Modelo de dez raios** → para microcélulas urbanas;
 - **Modelos de difração de gume de faca (knife-edge)**;

Notes

Modelos de Perdas de Propagação Empíricos

- Modelos anteriores são baseados em fenômenos físicos, exatos para os cenários em questão;
- Porém, os cenários podem não valer na prática;
- Modelo completo é muito difícil de ser criado e analisado;
- Na prática é comum utilizar modelos empíricos.

Alguns Modelos Empíricos – Okumura-Hata Urbano

- **Modelo de Okumura** → grandes macrocélulas urbanas na faixa de 150–1500 MHz;
- **Modelo de Hata** → formulação empírica dos dados de perda no caminho fornecidos por Okumura;

$$P_{L,urban}(d)_{(dB)} = 69,55 + 26,16 \log_{10} f_c - 13,82 \log_{10} h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_t) \log_{10} d,$$

onde,

$$a(h_r) = 3,2(\log_{10}(11,75h_r))^2 - 4,97.$$

Para outros cenários (rural, suburbano, etc) existem fatores de correção.

Notes

Notes

- **Modelo COST 231** → versão estendida do modelo de Hata até a frequência de 2 GHz:

$$P_{L,urban}(d)_{(dB)} = 46,3 + 33,9 \log_{10} f_c - 13,82 \log_{10} h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_t) \log_{10} d + C_M,$$

onde,

$C_M = 0$ dB para cidades de tamanho médio e regiões suburbanas e $C_M = 3$ dB para regiões metropolitanas

Restrições: $1,5 \text{ GHz} < f_c < 2 \text{ GHz}$, $30 \text{ m} < h_t < 200 \text{ m}$, $1 \text{ m} < h_r < 10 \text{ m}$, $1 \text{ km} < d < 20 \text{ km}$.

- **Modelo de Longley-Rice** → aplica-se a sistemas de comunicação ponto a ponto na faixa de frequências de 40 MHz a 100 GHz.

Modelo de Perdas Simplificado – Log-Distância

$$P_r = P_t P_L(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^n,$$

$$P_L(d)_{(dB)} = P_L(d_0)_{(dB)} + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right).$$

- Modelo válido para $d > d_0$, onde $1 \leq d_0 \leq 10$ m em ambientes internos e $10 \leq d_0 \leq 100$ em ambientes externos;
- A perda de percurso $P_L(d_0)$ na distância de referência d_0 pode ser obtida por medição, espaço-livre, etc;
- O expoente n é aquele que melhor aproxima as medidas reais.

Notes

Notes

Exemplos de expoentes de perda de percurso

Ambiente	<i>n</i>
Espaço Livre	2
Rural Plano	3
Rural Acidentado	3,5
Urbano	4
Urbano Denso	4,5
Prédio comercial (mesmo andar)	1,6–3,5
Prédio comercial (múltiplos andares)	2–6
Residência	3

Perda de Percurso + Sombreamento – Modelo Log-Normal

$$P_L(d)_{(dB)} = P_L(d_0)_{(dB)} + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \psi,$$

onde ψ é uma variável aleatória Gaussiana (em dB), de média zero e variância ψ^2 , que modela o sombreamento (shadowing).

Notes

Notes

Link Budget (ou Cálculo do Enlace)

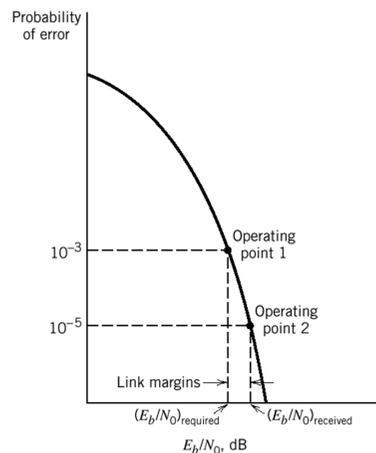
Cálculo e tabulação das potências de sinal e de ruído no receptor. É um balanço de ganhos e perdas no sistema tendo em conta potência de sinal, ruído, atenuação, processamento, etc, que deve revelar:

- Link margins → confortável, no limite, subdimensionado, sobredimensionado;
- Restrições de hardware;
- Compromissos de sistema → mudanças de configurações;
- A documentação pode revelar se a análise foi trivial ou profunda;
- Pode-se usar para prever tamanho dos equipamentos, peso, custos, etc.

Notes

Planejamento de Link

É comum projetar o sistema tal que uma E_b/N_0 mínima, que garanta uma BER alvo, seja atingida no receptor.



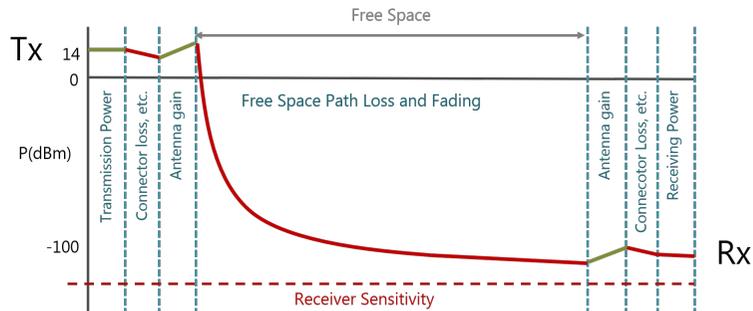
Potência a ser transmitida?

- Determinar $\frac{E_b}{N_0}$ projetado para a BER desejada;
- Converter E_b/N_0 para SNR no receptor;
- Somar atenuação e margem de operação, M :

$$M_{(dB)} = \frac{E_b}{N_0} \text{ projetado}_{(dB)} - \frac{E_b}{N_0} \text{ mínimo}_{(dB)}$$

Notes

Exemplo: Link Budget – LoRaWAN



► LoRaWAN world record

Exercício

Um sistema de comunicação sem fio está sujeito a um *path loss* do tipo:

$$P_L[\text{dB}] = -50 + 10 \log_{10} f_c + 30 \log_{10} d,$$

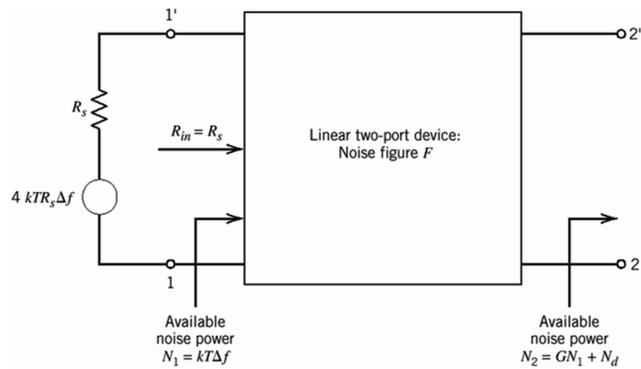
com $f_c = 1$ GHz. Ademais, $N_0 = -174$ dBm/Hz, largura de banda $B = 1$ MHz e o valor de SNR requerido é de $E_s/N_0 = 10$ dB. Determine:

- a) A mínima potência recebida requerida;
- b) Assumindo que a potência de transmissão é $P_T = 1$ W, qual é o alcance (d) do sistema?;
- c) Qual o valor de P_T que seria necessário se o alcance desejado fosse $d = 2$ km?;
- d) Para um dado valor de P_T , de quanto o alcance aumentaria se a taxa de símbolos é reduzida para $R_s = 100$ k símbolos/s?;
- e) Considere $P_T = 30$ dBm e o valor de d calculado no item (b). Considere também que o efeito do sombreamento está presente no canal sendo neste caso as perdas de propagação representadas por uma variável aleatória Gaussiana cuja média é dada pelo equacionamento de *path loss* acima e cujo desvio padrão é 4 dB. Determine a probabilidade de o valor de SNR recebido ser menor que o limiar desejado que é de $E_s/N_0 = 10$ dB;
- f) O que deve ser feito para garantir uma probabilidade de outage (probabilidade de a SNR recebida estar abaixo de um limiar desejado) menor que 10^{-3} ?

Notes

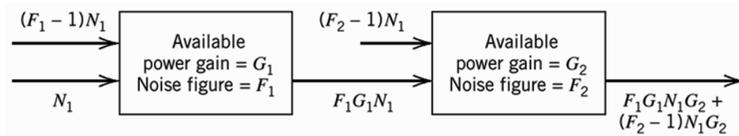
Notes

Dispositivo Linear de Duas Portas



Notes

Conexão em Cascata de Redes de Duas Portas



Notes

Figura de ruído global do sistema:

$$F = \frac{F_1G_1N_1G_2 + (F_2 - 1)N_1G_2}{N_1G_1G_2} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}$$

Em geral:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1G_2G_3} + \dots$$

$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1G_2} + \frac{T_4}{G_1G_2G_3} + \dots$$

Considere uma rede sem fio com as seguintes especificações:
 $f_c = 5$ GHz, $B = 20$ MHz, $G_T = 2$ dB, $G_R = 2$ dB, margem de operação $M = 16$ dB, *path loss* $P_L = 90$ dB, $P_T = 20$ dBm e uma SNR alvo $\frac{P_r}{N} = 10$ dB. Qual é a máxima figura de ruído aceitável para o receptor?

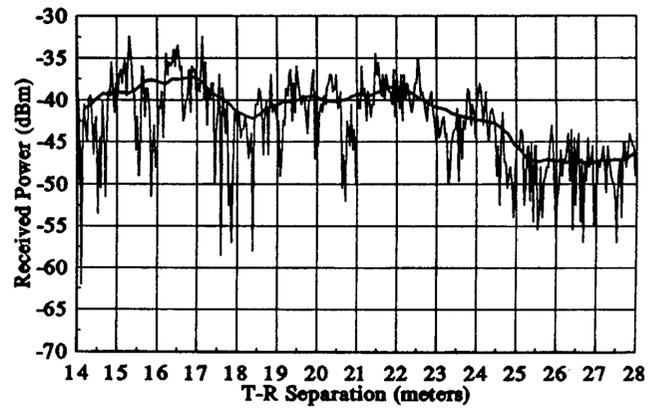
Notes

Propagação de Caminhos Múltiplos em Pequena Escala

- Os três efeitos mais importantes que descrevem o comportamento da potência instantânea recebida são:
 - Mudanças rápidas na intensidade do sinal em uma pequena distância ou intervalo de tempo;
 - Modulação de frequência aleatória por causa de mudanças Doppler variáveis em diferentes sinais de caminho múltiplo;
 - Dispersão de tempo (ecos) causada por atrasos de propagação de caminho múltiplo.
- Fatores influenciando a atenuação em pequena escala
 - **Propagação de caminho múltiplo:** presença de objetos refletindo e dispersores no canal;
 - **Velocidade da estação móvel:** deslocamento Doppler;
 - **Velocidades dos objetos ao redor:** o *tempo de coerência* define a 'estaticidade' do canal e sofre impacto direto do deslocamento Doppler;
 - **Largura de banda de transmissão do sinal:**
 - O sinal recebido será distorcido se a largura de banda do sinal de rádio transmitido for maior que a 'largura' de banda do canal de caminho múltiplo;
 - *Largura de banda de coerência:* largura de banda do canal de caminho múltiplo.

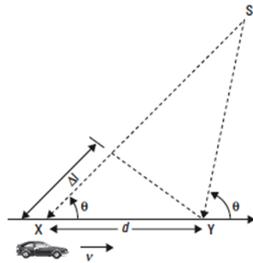
Notes

Fading de Larga Escala vs Fading de Pequena Escala



Notes

Efeito Doppler



$$\Delta l = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta,$$

⇒ mudança de fase no sinal recebido, devido à diferença nas extensões do caminho,

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v \Delta t}{\lambda} \cos \theta,$$

⇒ mudança aparente na frequência, ou deslocamento Doppler:

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta.$$

Notes

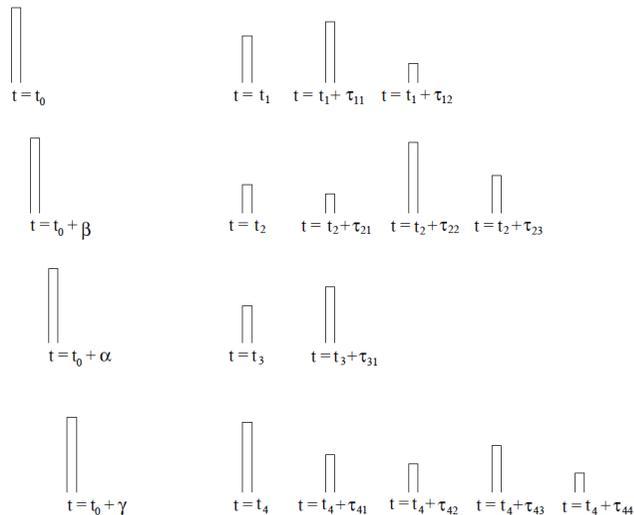
Exemplo

Considere um transmissor que irradia uma frequência portadora $f_c = 1.850$ MHz. Para um veículo movendo-se a 100 km/h, calcule a frequência de portadora recebida se a estação móvel estiver se movendo,

- a) Diretamente em direção ao transmissor;
- b) Diretamente para longe do transmissor;
- c) Em uma direção perpendicular à direção de chegada do sinal transmitido.

Notes

Canal Multicaminhos Variante no Tempo



Notes

Resposta Impulsiva do Canal Multicaminhos Variante no Tempo

Sinal transmitido:

$$x(t) = \Re\{\tilde{x}(t)e^{j2\pi f_c t}\},$$

Sinal recebido:

$$y(t) = \sum_n \alpha_n(t)x[t - \tau_n(t)],$$

$$\Rightarrow y(t) = \Re\left\{\sum_n \alpha_n(t)e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)}\tilde{x}[t - \tau_n(t)]e^{j2\pi f_c t}\right\},$$

Equivalente em banda base do sinal recebido:

$$\tilde{y}(t) = \sum_n \alpha_n(t)e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)}\tilde{x}[t - \tau_n(t)] = \tilde{x}(t) * \tilde{h}(\tau, t),$$

\Rightarrow Resposta impulsiva do canal equivalente em banda base:

$$\tilde{h}(\tau, t) = \sum_n \alpha_n(t)e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)}\delta[t - \tau_n(t)].$$

Evelio M. G. Fernández

TE903 – Propagação em Larga e Pequena Escala

Notes

Parâmetros de Canais Móveis com Multipercurso

Derivados do perfil de atraso de potência (potência recebida como uma função do atraso em excesso com relação a uma referência de atraso de tempo fixo).

Parâmetros de dispersão temporal \rightarrow descrevem o comportamento do *fading* na frequência:

- Média do atraso em excesso:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k \alpha_k^2 \tau_k}{\sum_k \alpha_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)},$$

- Espalhamento do atraso rms (RMS delay spread):

$$\sigma_\tau = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad \text{onde} \quad \tau^2 = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)},$$

valores típicos da ordem de μs em ambientes exteriores, e da ordem de ns em ambientes interiores;

- Máximo atraso em excesso (X dB):

$$\text{atraso em excesso} = \tau_X - \tau_0,$$

τ_0 : atraso do primeiro sinal que chega;

τ_X : atraso máximo em que um componente de multipercurso está até X dB do sinal de multipercurso mais forte que chega.

Notes

Largura de Banda de Coerência, B_c

- Medida estatística da faixa de frequências sobre as quais o canal pode ser considerado plano (*flat*);
- Nessa faixa de frequências duas componentes de frequência têm um forte potencial para correlação de amplitude;
- Duas senóides com separação de frequência maior que B_c são afetadas de forma muito diferentes pelo canal;
- Em geral, $B_c \propto 1/\sigma_\tau$. Se B_c for definida como a largura de banda sobre a qual a função de correlação de frequência é acima de 0,9, então

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau};$$

- Se a definição for relaxada, de modo que a função de correlação de frequência seja acima de 0,5, então

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau}.$$

Espalhamento Doppler, B_D

- Espalhamento Doppler e tempo de coerência são parâmetros que descrevem a natureza variável no tempo do canal em uma região em pequena escala;
- Quando um tom senoidal de frequência f_c é transmitido, o espectro do sinal recebido, chamado espectro Doppler, terá componentes na faixa de $f_c - f_d$ até $f_c + f_d$, onde f_d é o deslocamento Doppler;
- Se a largura de banda do sinal de banda base for muito maior que B_D , os efeitos do espalhamento Doppler são desprezíveis no receptor. Esse é um canal de atenuação lenta.

Notes

Notes

Tempo de Coerência, T_C

- É o domínio de tempo dual do espalhamento Doppler;
- Usado para caracterizar a natureza variante com o tempo da dispersividade de frequência do canal no domínio do tempo

$$T_C \approx \frac{1}{f_m}$$

f_m : espalhamento Doppler máximo dado por $f_m = v/\lambda$;

- Medida estatística da duração de tempo sobre a qual a resposta impulsiva do canal é basicamente invariável: → é a duração de tempo máxima a partir da qual duas realizações do canal são descorrelacionadas;
- Se o inverso da largura de banda do sinal de banda base for maior que o tempo de coerência do canal, então o canal mudará durante a transmissão de um símbolo, causando distorção no sinal recebido;
- Regra prática

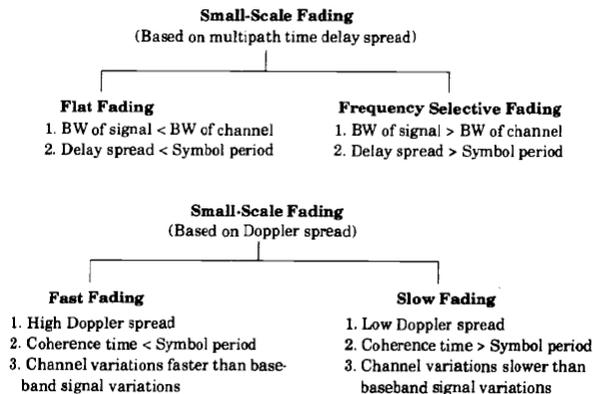
$$T_C = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_m^2}} = \frac{0,423}{f_m};$$

- Dois sinais chegando com uma separação de tempo maior que T_C são afetados diferentemente pelo canal.

Notes

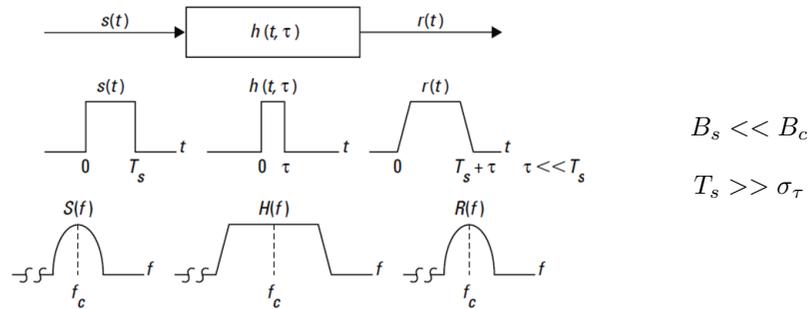
Tipos de Atenuação em Pequena Escala

- Espalhamento de atraso em caminho múltiplo leva à *dispersão de tempo* e à *atenuação seletiva de frequência*;
- Espalhamento Doppler leva à *dispersão de frequência* e à *atenuação seletiva do tempo*



Notes

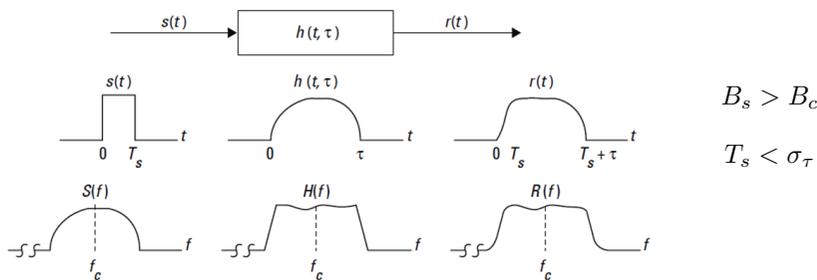
Atenuação Uniforme (*Flat Fading*)



- O canal tem ganho constante e resposta de fase linear em uma largura de banda maior que a largura de banda do sinal \Rightarrow as características espectrais do sinal transmitido são preservadas no receptor;
- A intensidade do sinal recebido muda com o tempo, devido a flutuações no ganho do canal causadas pelo caminho múltiplo;
- Com o tempo, o sinal recebido $r(t)$ varia em ganho, mas o espectro da transmissão é preservado.

Notes

Atenuação Seletiva de Frequência



- O canal possui uma resposta de fase de ganho constante e linear em uma largura de banda menor que a largura de banda do sinal transmitido;
- Deve-se à dispersão de tempo dos símbolos transmitidos dentro do canal \Rightarrow o canal induz interferência intersimbólica (ISI);
- A atenuação seletiva de frequência é causada por atrasos de caminho múltiplo que se aproximam ou excedem o período de símbolo do símbolo transmitido.

Notes

Efeitos da Atenuação Devidos ao Espalhamento Doppler

- **Atenuação rápida:** A resposta ao impulso do canal muda rapidamente dentro da duração do símbolo. Ou seja, o tempo de coerência do canal é menor que o período de símbolo do sinal transmitido,

$$T_s > T_c \text{ e } B_s < B_D$$

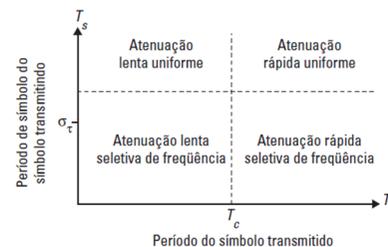
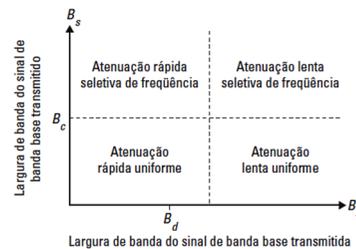
- **Atenuação lenta:** A resposta ao impulso do canal muda muito mais lentamente que o sinal de banda base transmitido. Nesse caso, o canal pode ser considerado estático por um ou vários períodos de símbolo,

$$T_s \ll T_c \text{ e } B_s \gg B_D$$

Notes

Atenuações Rápida e Lenta

Deve-se enfatizar que a atenuação rápida e lenta trata do relacionamento entre a taxa de mudança no canal e o sinal transmitido, e não dos modelos de perda do caminho de propagação.



Notes

Considere a média espacial local de um perfil de atraso de potência medido a 900 MHz, mostrado na figura.

- a) Determine o espalhamento de atraso rms e a média do atraso em excesso para o canal;
- b) Determine o atraso em excesso máximo (20 dB);
- c) Se o canal tiver que ser usado com uma modulação que exija um equalizador sempre que a duração do símbolo T_s for menor que $10\sigma_\tau$, determine a taxa de símbolos de RF máxima que pode ser admitida sem exigir um equalizador;
- d) Se uma estação móvel trafegando a 30 km/h recebe um sinal pelo canal, determine o tempo pelo qual o canal parece estar estacionário (ou, pelo menos, altamente correlacionado).

Notes

Canal com Desvanecimento Rayleigh

Ambientes com predomínio de multipercursos $\rightarrow \tilde{h}(\tau, t)$ modelada por um processo Gaussiano complexo de média nula e variância σ^2

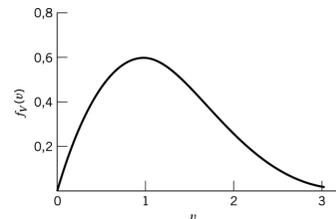
\Rightarrow a envoltória $|\tilde{h}(\tau, t)|$ desse processo segue a distribuição de Rayleigh:

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), & r \geq 0, \\ 0, & \text{fora.} \end{cases}$$

Sejam

$$v = \frac{r}{\sigma}, \quad f_V(v) = \sigma f_R(r)$$

$$\Rightarrow f_V(v) = \begin{cases} v \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right), & v \geq 0, \\ 0, & \text{fora.} \end{cases}$$



Distribuição de Rayleigh normalizada

Notes
