

# Curso: Engenharia de Computação

**Sistemas de Comunicações Móveis**

Prof. Clayton J A Silva, MSc  
clayton.silva@professores.ibmec.edu.br



# Canal de Comunicações **Móveis**

---

# Visão geral

- A propagação por rádio em ambientes de comunicações móveis **externos (*outdoor*)** ou **internos (*indoor*)** é um fenômeno complexo
- O desempenho de sistemas de comunicações móveis é afetado por **efeito de multipercurso de curta duração** e por perdas de **larga duração**
- Esses efeitos tendem a produzir vários tipos de problemas às comunicações móveis.

# Visão geral

- Caracterização do canal de comunicações
  1. Modelagem da atenuação em função da frequência usada, distância entre transmissor e receptor e localização espacial
  2. Medição da variação de fase e amplitude em função do tempo
  3. Análise do comportamento probabilístico do canal

# Efeitos do canal sobre o sinal transmitido

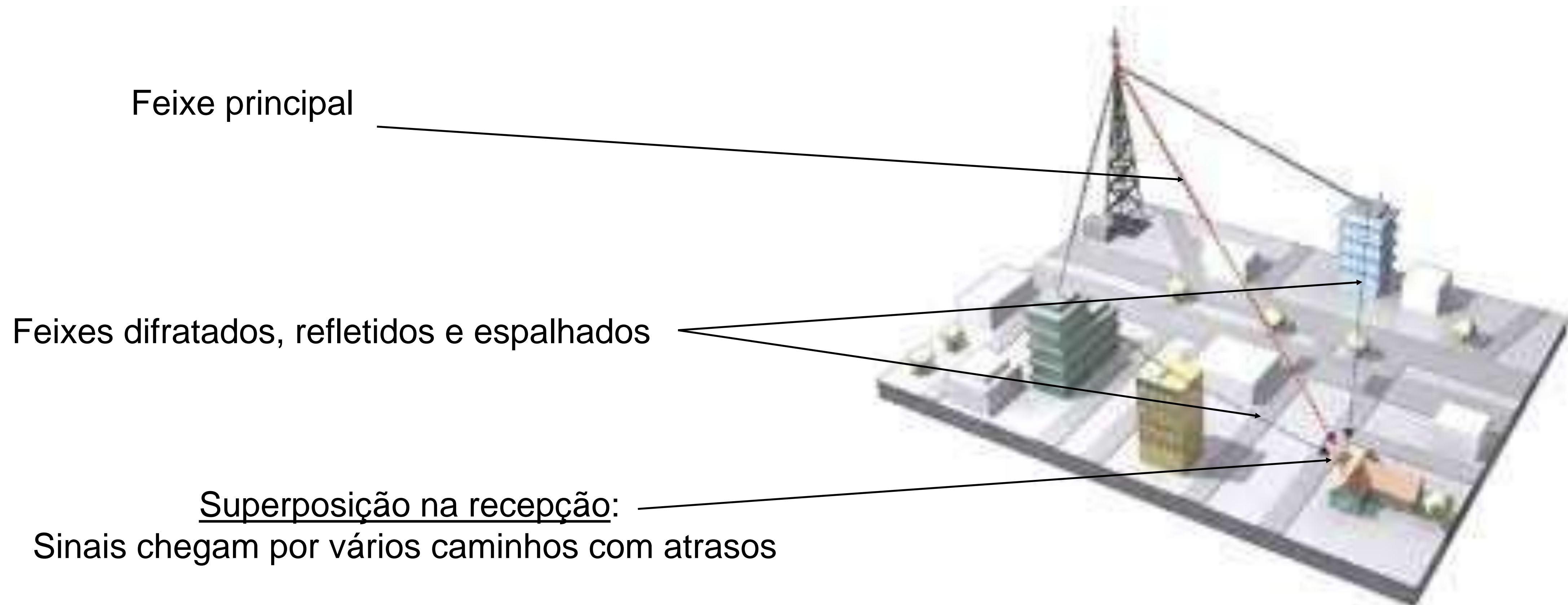
- 1. Filtragem** – tende a reduzir a banda disponível da portadora modulada, visto que surte efeito na sua forma de onda, ocasionando também uma distorção de fase.
- 2. Doppler** – faz com que a frequência da portadora não seja idêntica na recepção, em virtude do desvio provocado pelo movimento relativo entre o transmissor e o receptor. Afeta a recepção do sinal de sincronização.

# Efeitos do canal sobre o sinal transmitido

- 3. Desvanecimento – variações aleatórias ao longo do tempo da intensidade do sinal recebido causadas pelo meio de propagação.**
- 4. Percursos múltiplos – o feixe principal do sinal resultante recebido, que é a soma de um raio direto entre as antenas e outros raios que seguem trajetos distintos do raio direto, sofre uma atenuação considerável. Os trajetos distintos, designados como percursos múltiplos, são originados das refrações e reflexões.**

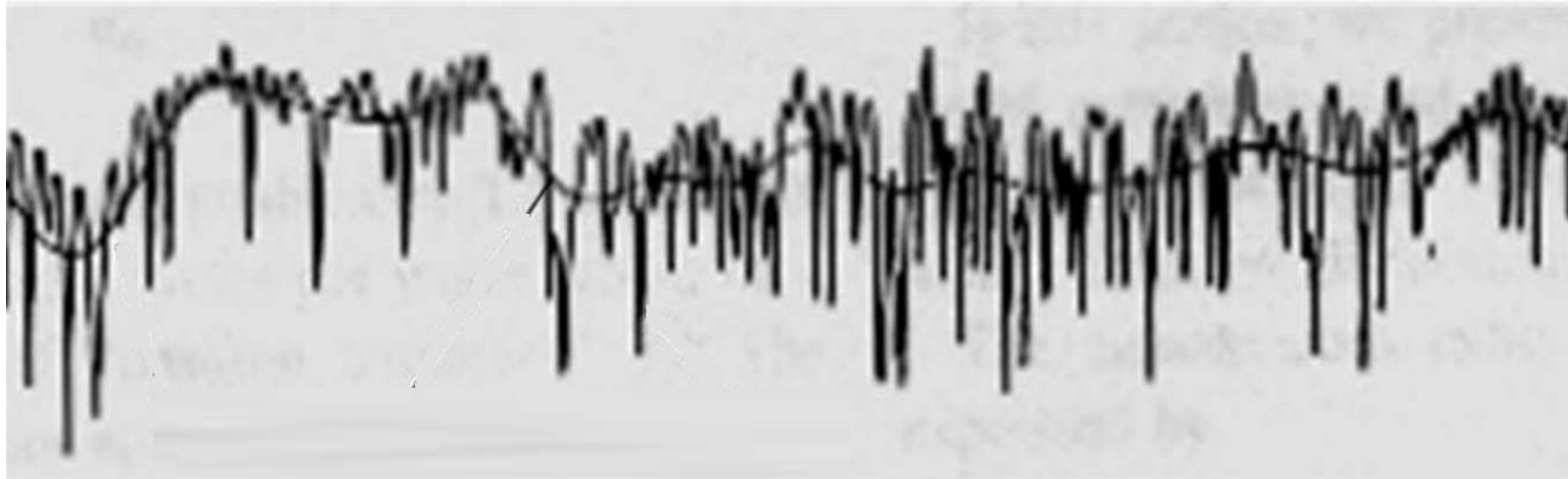


# Efeitos de percursos múltiplos



# Efeitos de percursos múltiplos

- O **desvanecimento de multipercurso**, devido às reflexões nos edifícios e obstáculos naturais, para comunicações móveis, ou nas paredes, teto e piso, para o caso de comunicações móveis prediais, provoca uma série de **atenuações no espectro do sinal recebido**.
- **Desvanecimento seletivo**.

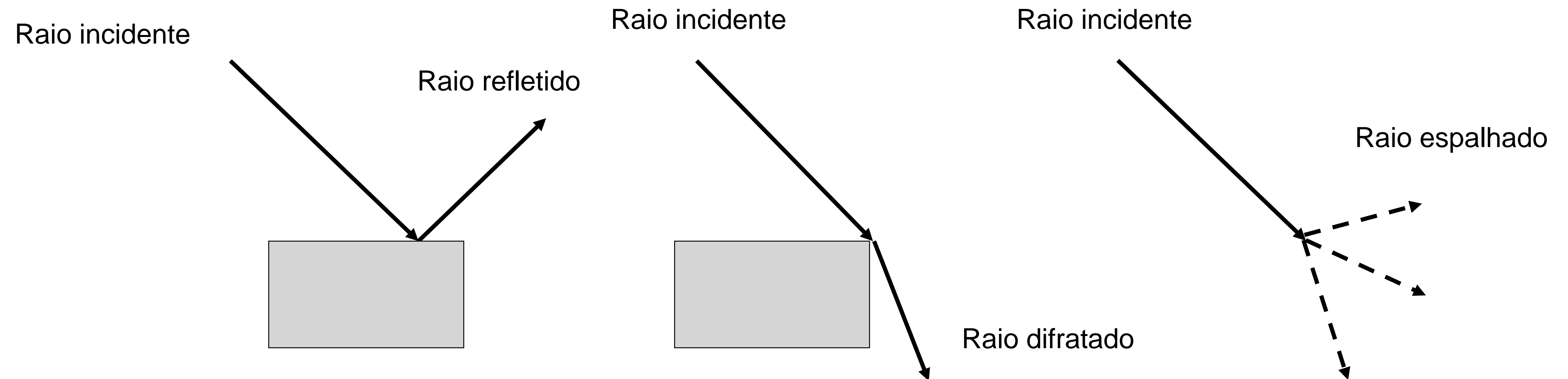




# Efeitos de percursos múltiplos

- Os sinais de multipercurso se **recombinam no receptor**, de forma que o **sinal recebido é uma versão distorcida do que foi transmitido**.
- Existem três diferentes mecanismos de propagação: **reflexão, difração e espalhamento**.
  - **Difração** ocorre quando os raios se curvam ao redor de obstáculos;
  - **Reflexão** quando os raios colidem com superfícies duras e lisas;
  - **Espalhamento** ocorre quando um raio se divide em vários, após o impacto com uma superfície dura e áspera.

# Efeitos de percursos múltiplos

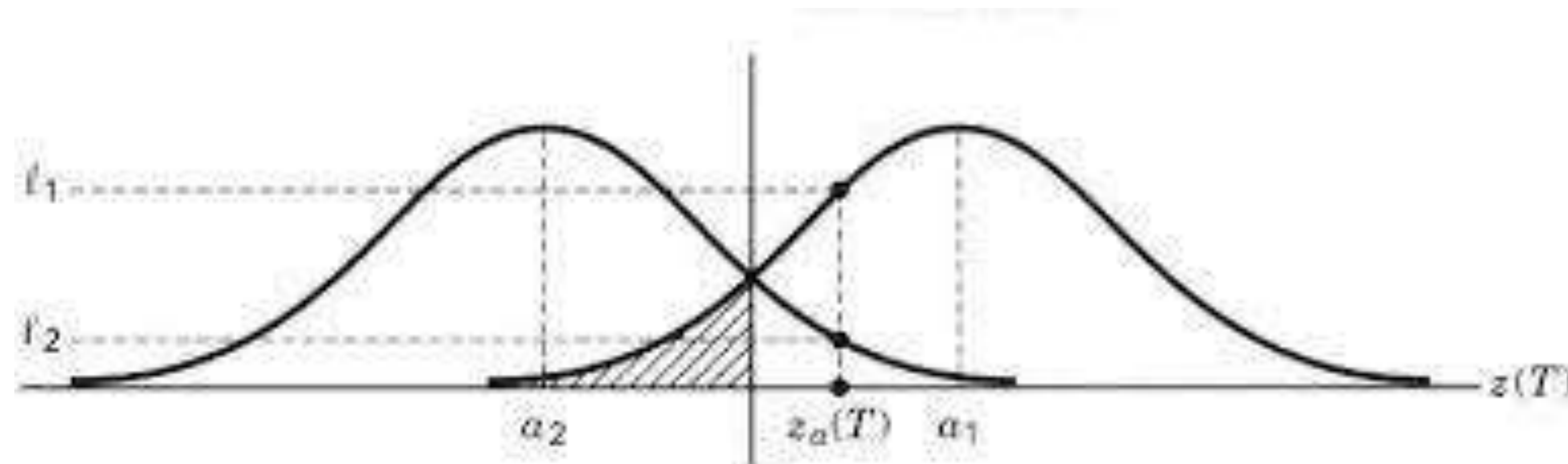


# Efeitos de percursos múltiplos

- Os sinais que percorrem caminhos que têm **atrasos idênticos** são subtraídos ou adicionados na recombinação, dependendo se as **fases dos sinais estão alinhadas ou não**.
- Esse tipo de distorção é conhecido como **desvanecimento de faixa estreita**.
- **Consequência: formação de erros em rajadas.**

# Efeitos de percursos múltiplos

- Sinais que percorrem caminhos que têm diferentes atrasos também são recombinaados.
- Esse tipo de distorção é chamado de **desvanecimento de faixa larga**.
- **Consequência:** produzem o espalhamento do pulso, podendo produzir interferência intersimbólica.



# Desvanecimento

Os tipos de desvanecimento (*fading*) observados em um canal móvel sobre o sinal podem ser agrupados em três categorias principais:

- desvanecimento espacial,
- desvanecimento temporal e
- desvanecimento seletivo em frequência.



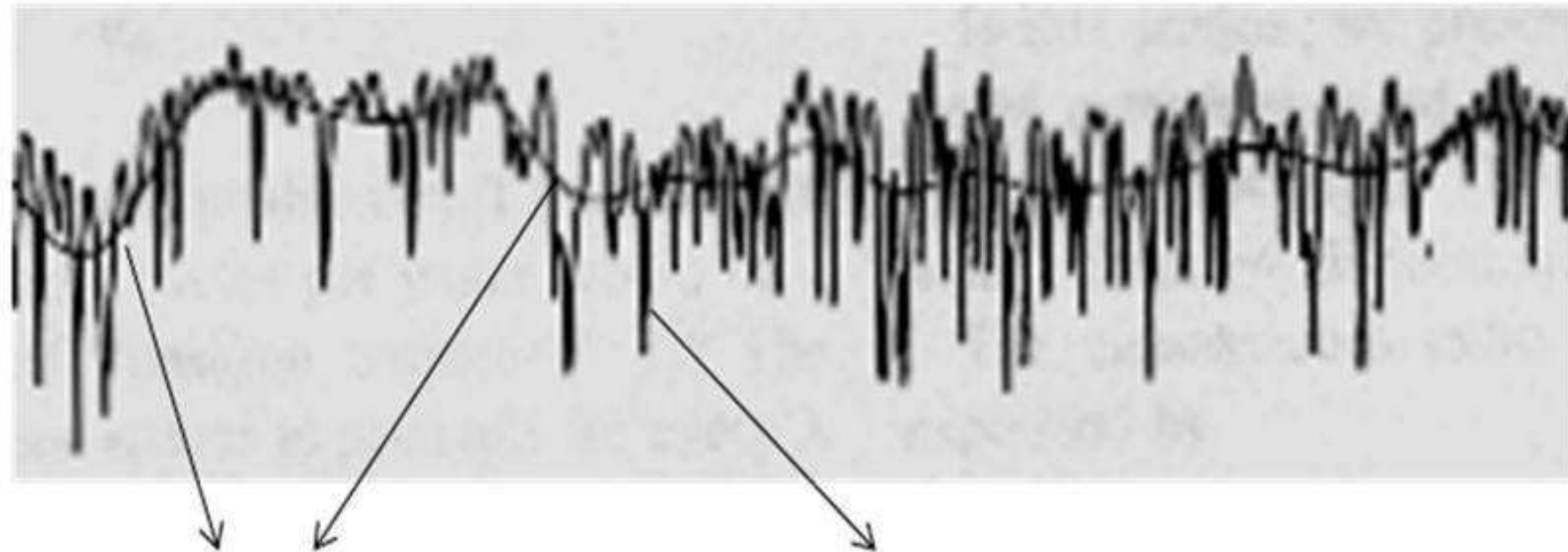
# Desvanecimento espacial

Caracterizado por uma **variação da intensidade do sinal em função da distância** e apresenta **duas versões**: desvanecimento de grande escala e de pequena escala.

**Desvanecimento de grande escala** é a **média do conjunto das flutuações do sinal**, enquanto

**desvanecimento de pequena escala** é a **variação do sinal em torno do valor médio**.

# Desvanecimento espacial



Variação de Grande  
Escala

Variação de Pequena  
Escala

# Desvanecimento espacial

A equação seguinte descreve, de forma simples, o desvanecimento de grande escala como uma **função da distância**

$$P = A \cdot d^{-n}$$

em que  $P$  é a potência do sinal recebido,  $A$  é uma constante,  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor e  $n$  é o fator de atenuação.

- $n=2$ , em espaço livre (*outdoor*)
- $n<2$ , em espaços com corredores (*indoor*)
- $n>2$ , dentro de salas e escritórios (*indoor*)

# Desvanecimento espacial

- O desvanecimento espacial depende fortemente da topografia,
- Normalmente leva a uma variação lenta da resposta do canal, seja na amplitude, fase ou atraso, por esse motivo chamado de **desvanecimento lento**.

# Desvanecimento temporal

- Caracteriza-se por apresentar uma **variação da intensidade do sinal**, medida em uma frequência particular fixa, como função do **tempo**, também chamado de **desvanecimento de faixa estreita**
- Uma das causas do desvanecimento temporal é o **movimento físico dentro do canal**, isto é, **entidades móveis podem bloquear percursos do sinal e absorver parte da energia do sinal temporariamente**, de forma a criar **desvanecimentos momentâneos**.



# Desvanecimento temporal

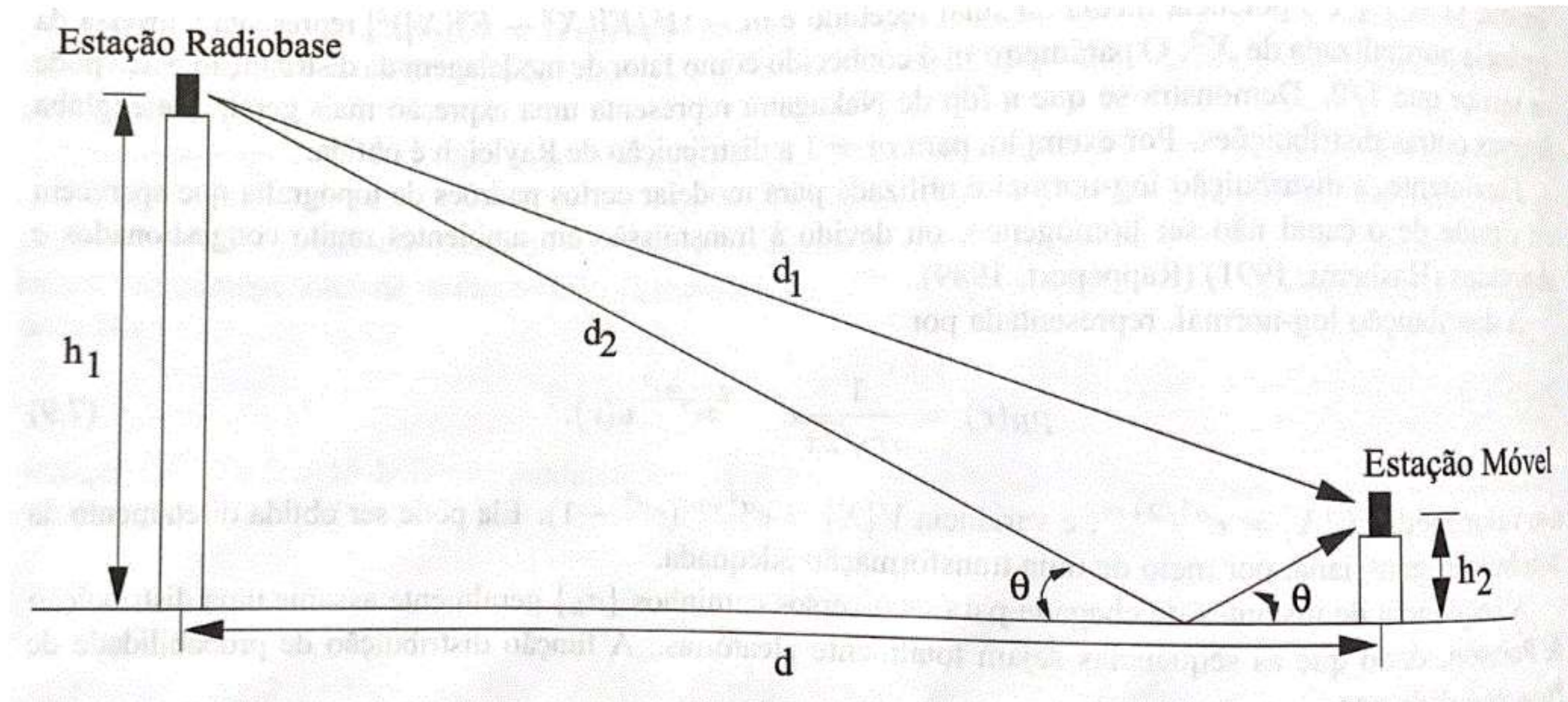
- A outra causa do desvanecimento temporal é a **natureza variante no tempo do canal, causado por mudanças nas características de propagação**, resultante de mudanças na temperatura ambiente, mudanças na umidade relativa, fechamento e abertura de portas.

# Desvanecimento seletivo em frequência

- Caracterizado como uma **variação da intensidade do sinal em função da frequência**, também conhecido como **desvanecimento de faixa larga**.
- A principal causa do desvanecimento seletivo em frequência é a **propagação em multipercurso**. Em certas frequências, a **combinação dos sinais em percursos múltiplos provoca a redução do sinal recebido, para sinais defasados, ou sua elevação, no caso de sinais em fase**

# Modelagem de multipercursos

- Modelo de dois raios





# Modelagem de multipercursos

- Modelo de dois raios

Pode-se definir matematicamente a potência recebida, aplicando-se o modelo de dois raios, pela aplicação da fórmula

$$P_r = P_o \cdot \left( \frac{h_1 \cdot h_2}{d^2} \right)^2$$

# Modelagem de multipercursos

- Modelo de dois raios com seletividade de frequência
  - O modelo admite o **ruído aditivo**.
  - Supõe-se **funções de atenuação**,  $\alpha$  e  $\beta$ , que têm um efeito multiplicativo no sinal direto e refletido, respectivamente.
  - O efeito líquido do multipercurso é introduzir o desvanecimento seletivo em frequência no sinal transmitido.
  - O atraso no tempo  $\sigma$  para o sinal refletido é considerado constante.



# Modelagem de multipercursos

- O sinal recebido é dado por

$$r(t) = a(t).s(t) + \beta(t) s(t - \sigma) + n(t)$$

- Três casos importantes são considerados:
  - no primeiro caso, as funções de atenuação são consideradas independentes do tempo;
  - no segundo caso, elas são consideradas variantes no tempo, mas determinísticas;
  - finalmente, considera-se que as duas funções têm natureza aleatória.

# Modelagem de multipercursos

- No caso de funções de atenuação constante, o módulo ao quadrado da função de transferência do canal pode ser obtido diretamente da equação

$$|H(w)|^2 = \alpha^2 + \beta^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \cos(w\sigma)$$

# Modelagem de multipercursos

- Modelo de múltiplos raios

- Um modelo mais acurado pode ser imaginado, considerando um grande número de raios para o sinal transmitido. A expressão geral para o sinal recebido por um dos usuários é

$$r(t) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot s(t - \sigma_k)$$

- Os parâmetros de atenuação são considerados dependentes apenas do caminho seguido pelo sinal, além do instante de tempo. Os atrasos, da mesma forma.

# Modelagem de multipercursos

- Modelo de múltiplos raios
  - A função de transferência do canal pode ser obtida e definida por

$$h(t) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot \delta(t - \sigma_k), \text{ de onde se obtém que}$$

$$H(w) = \sum_{k=1}^n A_k * e^{-j\omega\sigma_k},$$

em que  $A_k$  representa a transformada de Fourier de  $\alpha_k$ .

# Modelagem de multipercursos

- Modelo de múltiplos raios

Parâmetros importantes:

- **ganho de potência de multipercurso**, dado por

$$G_M = \sum_{k=1}^n \alpha_k^2$$

- e o **espalhamento de atraso eficaz** (*RMS delay spread*), dado por

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{E(\sigma^2) - E^2(\sigma)}$$



# Modelo estatístico do canal

- Um modelo apropriado para o canal deve levar em conta os três efeitos de desvanecimento
- Os fatores que influenciam o desvanecimento são normalmente a propagação multipercurso; ...
- a velocidade (relativa) dos terminais móveis; ...
- a velocidade de objetos do ambiente eletromagnético do canal; e ...
- a largura de banda do sinal transmitido.

# Modelo estatístico do canal

- Os **desvanecimentos temporal e de seletividade de frequência** estão relacionados mais intensamente com as flutuações rápidas do canal **relacionadas com o deslocamento entre transmissor e receptor**, por esse motivo chamado de **desvanecimento rápido**.
- A resposta em frequência de um canal variante no tempo é denotada por  $H(w,t)$  e obtida por meio da transformada de Fourier da resposta ao impulso em relação à variável  $\tau$ ,  $h(\tau, t)$ .

# Modelo estatístico do canal

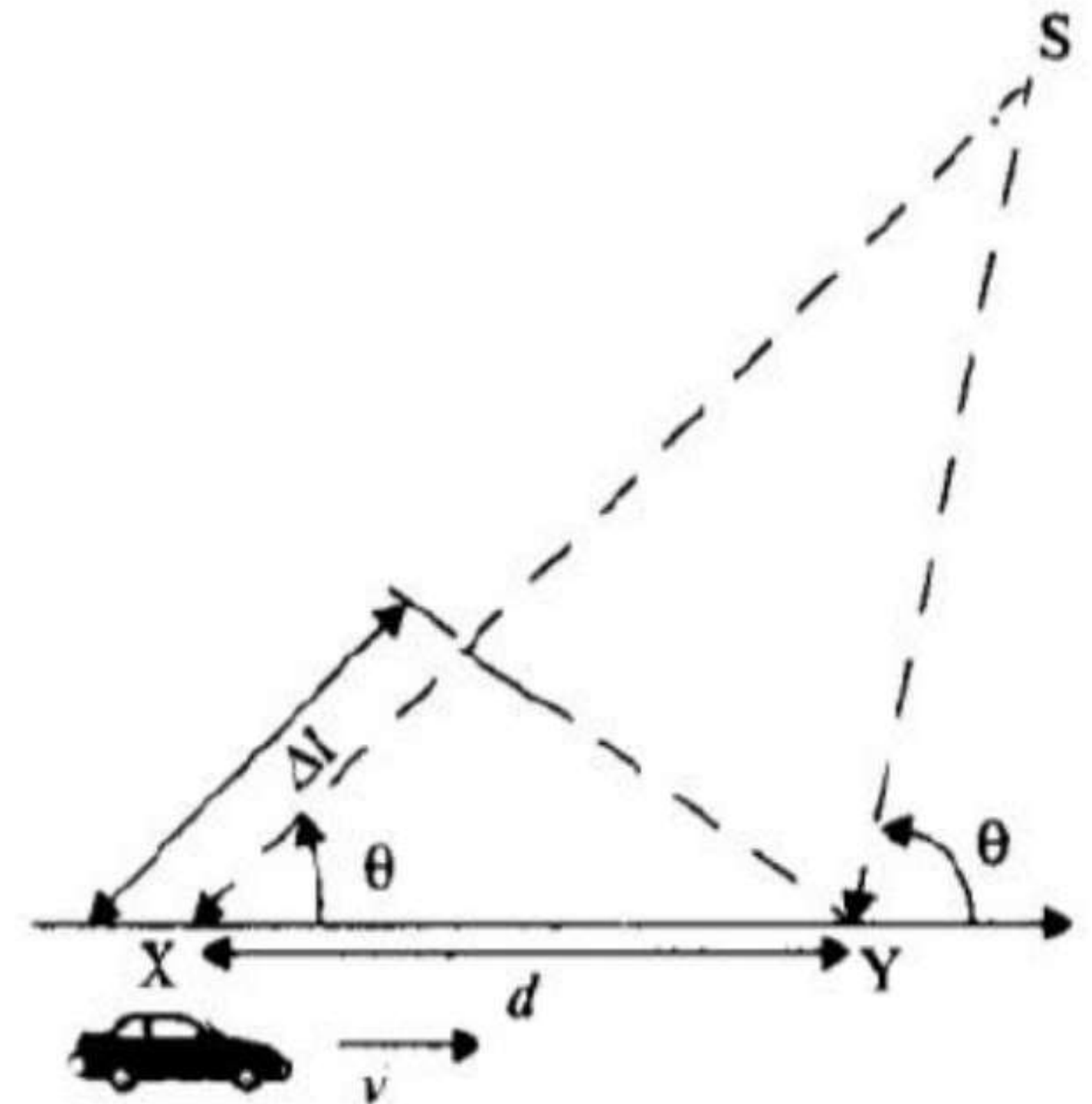
- A variável  $\tau$  indica o **comportamento aleatório da resposta do canal em função do tempo**. Ambos,  $h(\tau, t)$  e  $H(w, t)$  são ditos processos estocásticos ou aleatórios.
- Modelos:
  - Estacionário em sentido amplo (*wide sense stationary* – WSS).
  - De espalhamento descorrelacionado (*uncorrelated scattering* – US)
  - Estacionário em sentido amplo de espalhamento descorrelacionado (wide sense stationary uncorrelated scattering – WSSUS).

# Modelo estatístico do canal

- Parâmetros:
  - Banda passante de correlação ( $w_c$ ): sinais transmitidos em que a banda é menor do que a banda passante de correlação, então todos os componentes espectrais sofrem variações similares.
  - Espalhamento de atraso  $\sigma_{RMS}=1/w_c$ .
  - Tempo de coerência ( $t_c$ )
  - Frequência ou banda Doppler ( $f_D$ ): 
$$f_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos\theta$$

# Modelo estatístico do canal

- A frequência percebida é diferente da portadora.
- Se o movimento é de aproximação do transmissor:  $f = f_c + f_d$ , em caso contrário é igual a  $f = f_c - f_d$ .
- $f_D = 1/t_c$ .





# Perdas em propagação

- O sinal sofre perdas de propagação relacionadas com alguns fatores, além das causas já mencionadas, como:
  - Perda de propagação na área próxima à antena da ERB
  - Perda de propagação a grandes distâncias
  - Perda de propagação em espaço livre
  - Perda ao longo da superfície terrestre
  - Propagação sobre a água
  - Perda por folhagem





IBMEC.BR

 /IBMEC

 IBMEC

 @IBMEC\_OFICIAL

 @IBMEC

 **ibmec**