

# **Tópicos em Engenharia: Fundamentos de Modelagem e Simulação do Canal de Comunicações Sem Fio**

**Geração dos Parâmetros do Canal de Comunicação Sem Fio**

**Prof: Higo Thaian Pereira da Silva<sup>1</sup>**  
**[higo.silva@unb.br](mailto:higo.silva@unb.br)**

<sup>1</sup>Universidade de Brasília  
UnB

**07 de Abril de 2025**



Universidade de Brasília

# Sumário

1. Modelo 3GPP TR 38.901
2. Geração dos Parâmetros Multipercurso
  - Atraso Multipercurso
  - Potência Multipercurso
  - Direções de Chegada
  - Desvios Doppler
  - Fases Multipercurso
3. Espalhamento Temporal no Sinal Recebido
4. Banda de Coerência e Tempo de Coerência



# Modelo 3GPP TR 38.901

# Modelo 3GPP TR 38.901

- Modelo apresentado no relatório técnico: ***Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (TR 38.901)***
- Baseado em extensas campanhas de medição que caracterizaram estatisticamente as propriedades do canal em **diferentes ambientes**
- O 3GPP 38.901 é um **modelo estocástico não geométrico de canal** (*Non-Geometric Stochastic Channel Model – NGSM*)
- Abordagem baseada na geração de **variáveis aleatórias** para representar as características do canal de propagação

# Modelo 3GPP TR 38.901

- **Intervalo de frequências:** Válido para **0,5 GHz a 100 GHz**
- **Largura de banda:** Suporta **grandes larguras de banda** (até 10% da frequência da portadora)
- **Mobilidade:** Permite simulações com velocidades de até **500 km/h**
- **Cenários de propagação suportados:**
  - **Microcelular urbano (UMi)**  
*Urban Microcell – Cobertura típica de 200 m*
  - **Macrocelular urbano (UMa)**  
*Urban Macrocell – Cobertura típica de 500 m*
  - **Ambiente interno**  
*Indoor Office/Residential*
  - **Ambiente industrial interno (InF)**  
*Indoor Factory*



# Geração dos Parâmetros Multipercuso

# Atraso Multipercurso

- Revisitando a **resposta ao impulso do canal**:

## Resposta ao Impulso Variante no Tempo do Canal

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{-j\varphi_n(t)} \delta(\tau - \tau_n), \quad (1)$$

em que  $h(t, \tau)$  é a resposta ao impulso do canal em um instante  $t$  e  $\delta(\cdot)$  é o delta de Dirac.

- O **perfil de atraso de potência (power delay profile – PDP)** do canal é:

## Perfil de Atraso de Potência

$$P(\tau) = \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 \delta(\tau - \tau_n), \quad (2)$$

# Atraso Multipercurso

- Como quantificar o **nível de dispersão temporal** introduzido pelo canal?

## Espalhamento de Atraso Eficaz (*RMS Delay Spread*)

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 (\tau_n - \bar{\tau})^2} \quad (3)$$

Ganho total do canal:

$$\Omega_c = \sum_{n=1}^N \alpha_n^2$$

Atraso médio ponderado:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 \tau_n$$

## Interpretação

Quanto maior  $\sigma_\tau$ , maior a dispersão temporal e mais estreita é a banda de coerência

# Atraso Multipercurso

- O espalhamento de atraso é um parâmetro de **larga-escala** que depende de:
  - **Frequência da portadora** ( $f_c$ )
  - **Tipo de ambiente de propagação**
  - **Condição LoS/NLoS** (*Line-of-Sight/Non-Line-of-Sight*)
- No modelo 3GPP 38.901,  $\sigma_\tau$  é modelado como:
  - Variável aleatória **Gaussiana** (em escala logarítmica)
  - Variável aleatória **lognormal** (em escala linear)

**Tabela 1:** Estatísticas de  $\sigma_\tau$  (expressas em unidades logarítmicas) para diferentes cenários de propagação, em que  $f_c$  é a frequência da portadora expressa em GHz.

Ambiente de propagação		Estatísticas de $\sigma_\tau$	
		Média	Des. Padrão
UMi	LoS	$-0.24 \log_{10}(1 + f_c) - 7.14$	0.38
	NLoS	$-0.24 \log_{10}(1 + f_c) - 6.83$	$-0.16 \log_{10}(1 + f_c) + 0.28$
UMa	LoS	$-0.0963 \log_{10}(1 + f_c) - 6.955$	0.66
	NLoS	$-0.204 \log_{10}(1 + f_c) - 6.28$	0.39

# Atraso Multipercurso

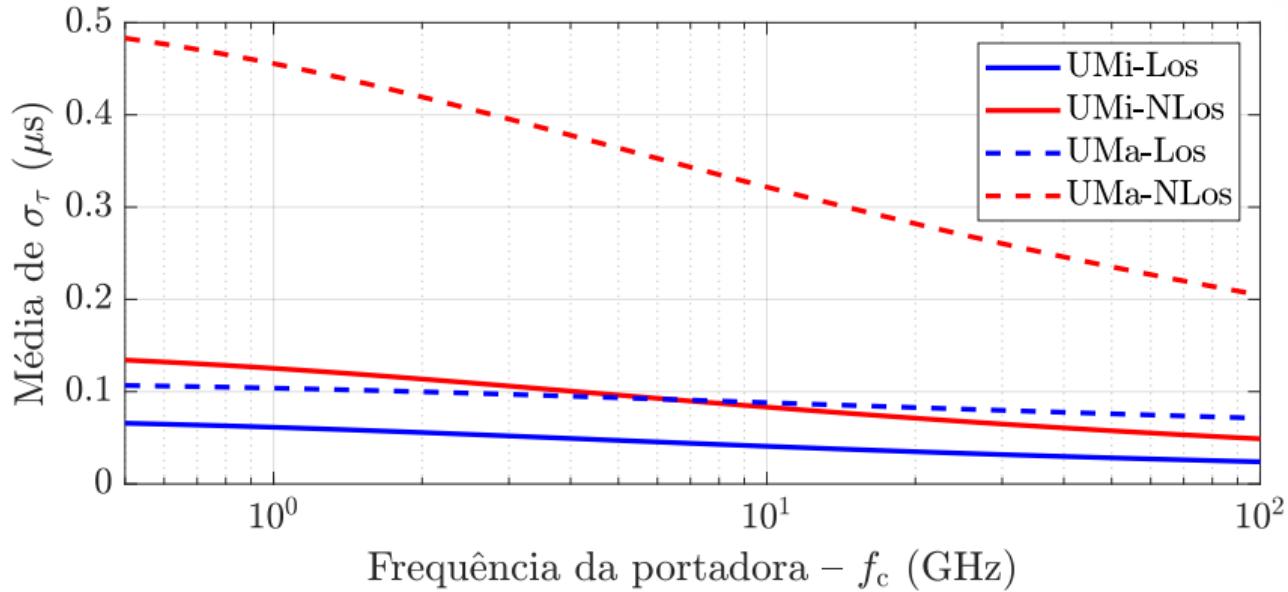


Figura 1: Média de  $\sigma_\tau$  como uma função da frequência  $f_c$  considerando os diferentes cenários de propagação.

# Atraso Multipercurso

## Como determinar $\sigma_\tau$ ?

### 1. Defina os parâmetros:

- Tipo de ambiente (UMi, UMa, etc.)
- Condição de visada (LoS/NLoS)
- Frequência da portadora  $f_c$  [GHz]

### 2. Calcule os parâmetros estatísticos:

- Consulte a Tabela 1
- Calcule as estatísticas

### 3. Gere uma amostra aleatória:

$$\circ \sigma_{\tau,\log} \sim \mathcal{N}(\mu_{\sigma_\tau;\log}, \sigma_{\sigma_\tau;\log}^2)$$

### 4. Converta para escala linear:

$$\circ \sigma_\tau = 10^{\sigma_{\tau,\log}} \quad [\text{s}]$$

### 5. O valor resultante representa o espalhamento de atraso eficaz do canal simulado

# Atraso Multipercurso

## Implementação em diferentes linguagens

### MATLAB (`normrnd`)

- `g = normrnd(mu, sigma, [M,1])`
- `mu`: Média (valor esperado)
- `sigma`: Desvio padrão
- `M`: Número de amostras

### Python NumPy (`random.normal`)

- `g = np.random.normal(mu, sigma, M)`
- `mu`: Média (valor esperado)
- `sigma`: Desvio padrão
- `M`: Número de amostras

## Exemplo Prático

Para gerar 1000 amostras com  $\mu = -7$  e  $\sigma = 0.4$ :

- MATLAB: `g = normrnd(-7, 0.4, [1000,1]);`
- Python: `g = np.random.normal(-7, 0.4, 1000)`

# Atraso Multipercurso

- Definindo  $\sigma_\tau$ , é possível determinar os **atrasos multipercurso**  $\tau_n$
- Frequentemente modelados como **variáveis aleatórias exponenciais**

## Distribuição Exponencial dos Atrasos

$$f_{\tau_n}(\tau) = \frac{1}{r_\tau \sigma_\tau} e^{-\tau/(r_\tau \sigma_\tau)}, \quad \tau \geq 0, \quad (4)$$

em que  $r_\tau$  é um fator de proporcionalidade. De acordo com esta distribuição, a média estatística é igual a  $r_\tau \sigma_\tau$

**Tabela 2:** Valores do fator  $r_\tau$  para diferentes cenários de propagação.

Ambiente de propagação		Fator de proporcionalidade – $r_\tau$
UMi	LoS	3
	NLoS	2.1
UMa	LoS	2.5
	NLoS	2.3

# Atraso Multipercurso

## Implementação em diferentes linguagens

### MATLAB (exprnd)

- `tau = exprnd(mu, [M, 1])`
- $\mu$ : Média ( $r_\tau \sigma_\tau$ )
- $M$ : Número de amostras

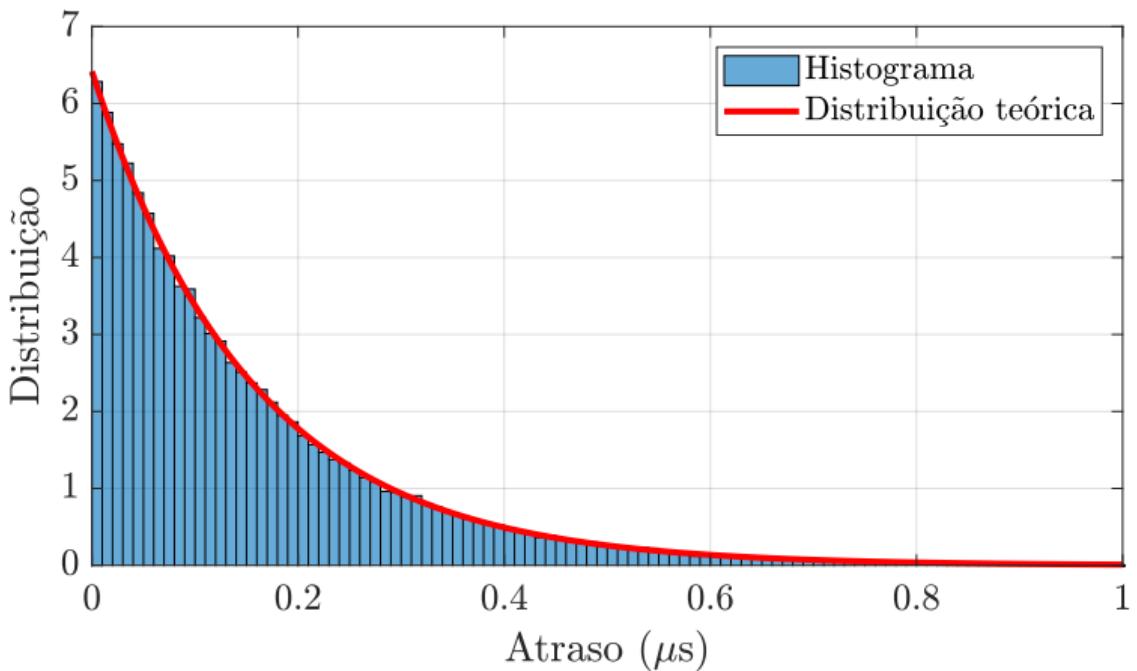
### Python NumPy (random.exponential)

- `tau = np.random.exponential(mu, M)`
- $\mu$ : Média ( $r_\tau \sigma_\tau$ )
- $M$ : Número de amostras

## Importante

- O parâmetro `mu` deve ser calculado como  $r_\tau \sigma_\tau$
- Consulte a Tabela 2 para valores de  $r_\tau$  por cenário
- $\sigma_\tau$  deve estar em segundos para obter atrasos corretos

# Atraso Multipercurso



**Figura 2:** Histograma de amostras geradas com a função `exprnd` sobreposto pela distribuição teórica. Foram consideradas  $10^5$  amostras para gerar esta figura.

# Atraso Multipercurso

## Algoritmo para geração de $\tau_n$

### 1. Defina parâmetros:

- Número de multipercursos  $N$
- Consulte o valor de  $r_\tau$  na Tabela 2
- Aplique o  $\sigma_\tau$  calculado anteriormente

### 2. Calcule média: $\mu_\tau = r_\tau \sigma_\tau$

### 3. Gere atrasos exponenciais:

- $\tau_n'' \sim \text{Exp}(\mu)$  para  $n = 1, \dots, N$

### 4. Normalize:

- $\tau_n' = \tau_n'' - \min(\{\tau_n''\})$

### 5. Ordene:

- $\{\tau_n\} = \text{sort}(\{\tau_n'\})$

# Potência Multipercuso

- O modelo 3GPP 38.901 descreve o **comportamento da potência multipercuso** com:
  - **Decaimento exponencial** com o atraso
  - Variação devido ao **sombreamento** ( $\xi_n$ )

## Perfil de Potência Multipercuso

$$\hat{\alpha}_n^2 = \exp\left(-\tau_n \frac{r_\tau - 1}{r_\tau \sigma_\tau}\right) \cdot 10^{-\xi_n/10} \quad (5)$$

em que  $\xi_n$  é o termo de sombreamento

## Características Importantes

- Caminhos com **maiores atrasos** terão **menor potência**
- O **sombreamento** introduz **variações aleatórias** em cada percurso

# Potência Multipercuso

- O termo de **sombreamento**  $\xi_n$  caracteriza variações de larga escala na potência:
  - Modelado como uma **Gaussiana**  $\xi_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\xi^2)$
  - Média nula e desvio padrão  $\sigma_\xi$  dependente do cenário

**Tabela 3:** Desvio padrão do sombreamento  $\sigma_\xi$  (expressos em dB).

Ambiente de propagação		Desvio padrão do sombreamento – $\sigma_\xi$ (dB)
UMi	LoS	4
	NLoS	7.82
UMa	LoS	4
	NLoS	6

## Impacto no Modelo

- Valores maiores de  $\sigma_\xi$  indicam maior variabilidade
- Cenários NLoS apresentam maior sombreamento

# Potência Multipercuso

- O **Fator de Rice**  $K_R$  caracteriza a razão entre a **potência da componente LoS** e soma da **potência dispersa (NLoS)**
- Modelado estatisticamente como:
  - **Variável Gaussiana** (em dB)
  - **Variável lognormal** (em escala linear)

**Tabela 4:** Estatísticas do fator de Rice  $K_R$  (expressas em dB) para diferentes cenários de propagação.

Ambiente de propagação		Estatísticas do Fator de Rice – $K_R$ (dB)	
		Média	Desvio Padrão
UMi	LoS	9	5
	NLoS	–	–
UMa	LoS	9	3.5
	NLoS	–	–

## Interpretação

- Apenas cenários LoS fator de Rice não nulo ( $K_R > 0$ )
- Valores maiores indicam predominância da componente LoS

# Geração de Potência Multipercuso

## Algoritmo para cálculo de $\alpha_n^2$

### 1. Gere os termos de sombreamento:

- Consulte  $\sigma_\xi$  na Tabela 3
- $\xi_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\xi^2)$  para  $n = 1, \dots, N$

### 2. Calcule potência preliminar – Eq. (5):

- $\hat{\alpha}_n^2 = \exp\left(-\tau_n \frac{r_\tau - 1}{r_\tau \sigma_\tau}\right) \cdot 10^{-\xi_n/10}$

### 3. Gere fator de Rice (dB) e converta para linear:

- $K_R = 10^{K_{R,\log}/10}$

### 4. Normalize as potências dispersas:

- $\alpha_n^2 = \frac{1}{K_R + 1} \frac{\hat{\alpha}_n^2}{\hat{\Omega}_c}$ , em que  $\hat{\Omega}_c = \sum_{n=2}^N \hat{\alpha}_n^2$  é potência total dispersa

# Geração de Potência Multipercuso

## Algoritmo para cálculo de $\alpha_n^2$

### 5. Ajuste da componente LoS:

- Identifique o caminho com menor atraso ( $\tau_1$ )
- Recalcule sua potência:

$$\alpha_1^2 = \frac{K_R}{K_R + 1} \quad (6)$$

- Mantenha as demais potências  $\alpha_n^2$  ( $n > 1$ )
- Ao fim deste processo, teremos um canal com ganho unitário  $\Omega_c = 1$

## Exemplo Prático

Para UMi-LoS com  $K_{R,\log} = 9$  dB:

- $K_R \approx 7.94$  (linear)
- $\alpha_1^2 \approx 0.888$  (88.8% da potência total)
- Componentes dispersas compartilham os 11.2% restantes

# Potência Multipercuso

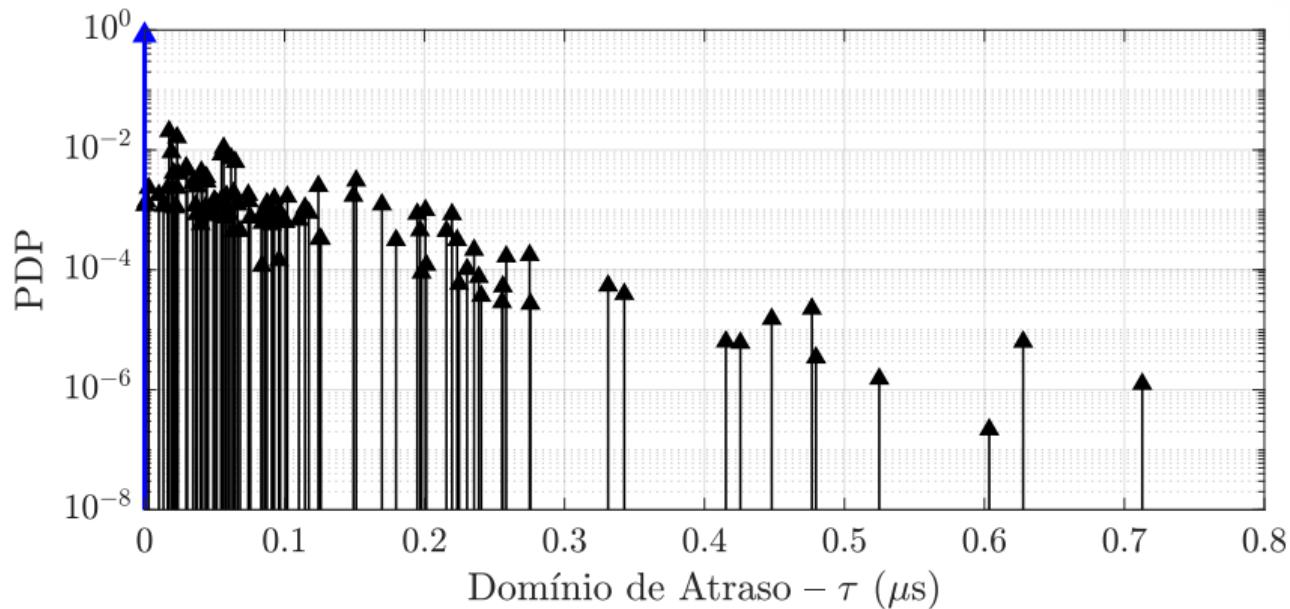


Figura 3: Perfil de atraso de potência considerando  $N = 100$  componentes multipercuso.

# Direções de Chegada

- Uma dada componente multipercuso incide no receptor com **vetor de incidência  $r_n$**

## Vetor direção de chegada da $n$ -ésima componente multipercuso

$$\mathbf{r}_n = \begin{bmatrix} \cos(\theta_n) \sin(\phi_n) \\ \sin(\theta_n) \sin(\phi_n) \\ \cos(\phi_n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

em que  $\theta_n$  é um ângulo em azimute e  $\phi_n$  é um ângulo em elevação.

- Para calcular a **direção de chegada** da componente multipercuso, deve-se caracterizar os **ângulos de chegada**  $\theta_n$  e  $\phi_n$ .

# Direções de Chegada

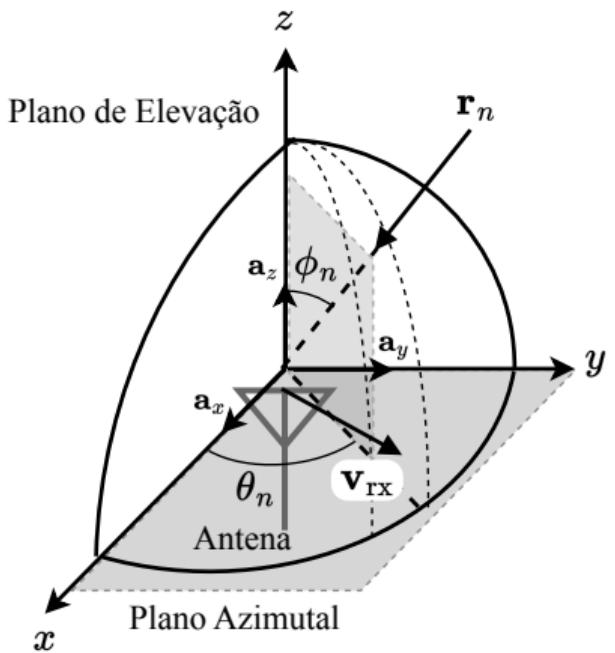


Figura 4: Ilustração da incidência de uma componente multipercorso em um receptor móvel.

# Direções de Chegada - Ângulo Azimutal

- O **ângulo de chegada azimutal**  $\theta_n$  de cada componente multipercorso está correlacionada com sua potência relativa  $\alpha_n^2$  através da relação:

## Modelo de ângulos azimutais iniciais

$$\theta'_n = 1.42 \sigma_\theta \sqrt{-\ln \left( \frac{\alpha_n^2}{\max_k(\alpha_k^2)} \right)} \quad (8)$$

onde:

- $\sigma_\theta$ : espalhamento angular azimutal [rad]
- $\max(\alpha_k^2)$ : potência da componente mais forte

- O parâmetro  $\sigma_\theta$  quantifica a **dispersão angular das componentes multipercorso** no plano azimutal, caracterizando a abertura do leque de chegadas

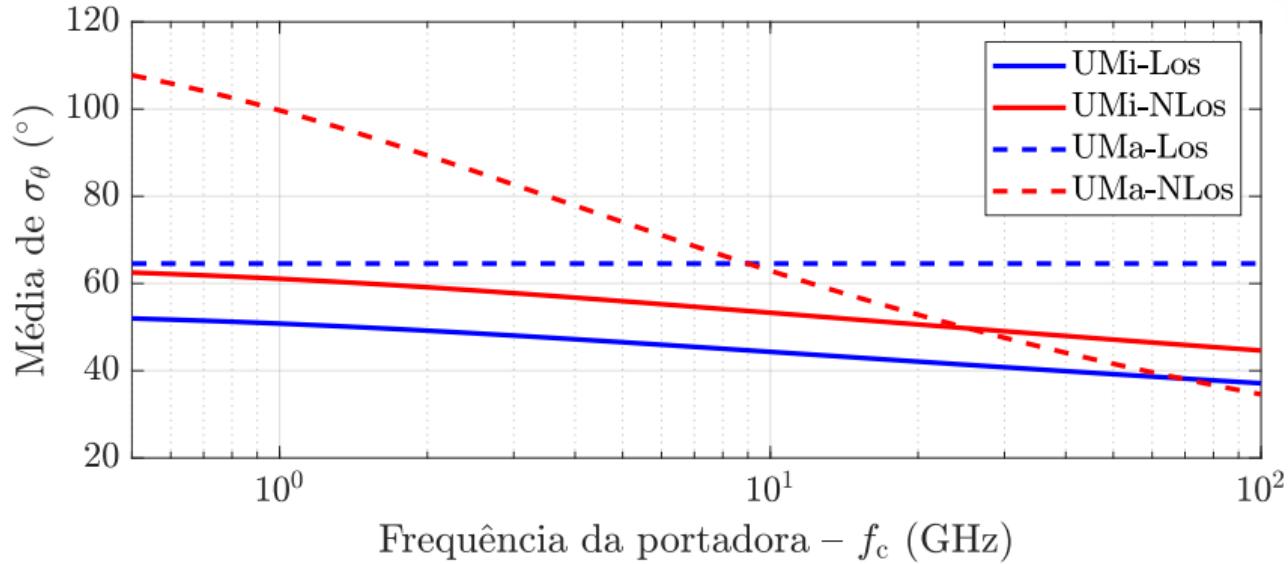
# Direções de Chegada – Ângulo Azimutal

- O **espalhamento angular azimutal** ( $\sigma_\theta$ ) é um parâmetro de larga escala modelado como:
  - Variável aleatória Gaussiana (em escala logarítmica)
  - Variável aleatória lognormal (em escala linear)

**Tabela 5:** Estatísticas de  $\sigma_\theta$  (expressas em unidades logarítmicas) para diferentes cenários de propagação, em que  $f_c$  é a frequência da portadora expressa em GHz.

Ambiente de propagação	Estatísticas de $\sigma_\theta$	
	Média	Desvio Padrão
UMi	LoS	$-0.08 \log_{10}(1 + f_c) + 1.73$
	NLoS	$-0.08 \log_{10}(1 + f_c) + 1.81$
UMa	LoS	1.81
	NLoS	$-0.27 \log_{10}(f_c) + 2.08$

# Direções de Chegada – Ângulo Azimutal



**Figura 5:** Média de  $\sigma_\theta$  como uma função da frequência  $f_c$  considerando os diferentes cenários de propagação.

# Direções de Chegada

## Algoritmo para geração de $\theta_n$

### 1. Defina parâmetros:

- Consulte as estatísticas de  $\sigma_{\theta;\log}$  na Tabela 5
- Gere uma amostra do espalhamento angular azimutal  $\sigma_{\theta;\log}$

### 2. Converta para escala linear e converta para radianos:

- $\sigma_{\theta;dg} = 10^{\sigma_{\theta;\log}} [^\circ]$
- $\sigma_\theta = \sigma_{\theta;dg} \times \frac{\pi}{180}$

### 3. Gere ângulos iniciais:

- $\theta'_n$  conforme Eq. 8 [°]

### 4. Gere sinais aleatórios:

- $U_n \sim \mathcal{U}\{-1, 1\}$  para  $n = 1, \dots, N$  (Conjunto discreto  $\{-1, 1\}$ )
- **MATLAB**: `randsample([-1,1], N, true)`
- **Python**: `random.choices([-1,1], k=N)`

# Direções de Chegada

## Algoritmo para geração de $\theta_n$ (Parte 2)

### 5. Gere flutuações aleatórias:

- $Y_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\theta/7)$  para  $n = 1, \dots, N$
- Onde  $\sigma_\theta$  é o espalhamento angular calculado anteriormente

### 6. Calcule ângulos finais:

- $\theta_n = U_n \theta'_n + Y_n$

### 7. Ajuste para cenário LoS:

- Se existir visada direta (LoS):

$$\theta_n \leftarrow \theta_n - \theta_1 \tag{9}$$

- Garantindo  $\theta_1 = 0$  para o componente direto

# Direções de Chegada – Ângulo Azimutal

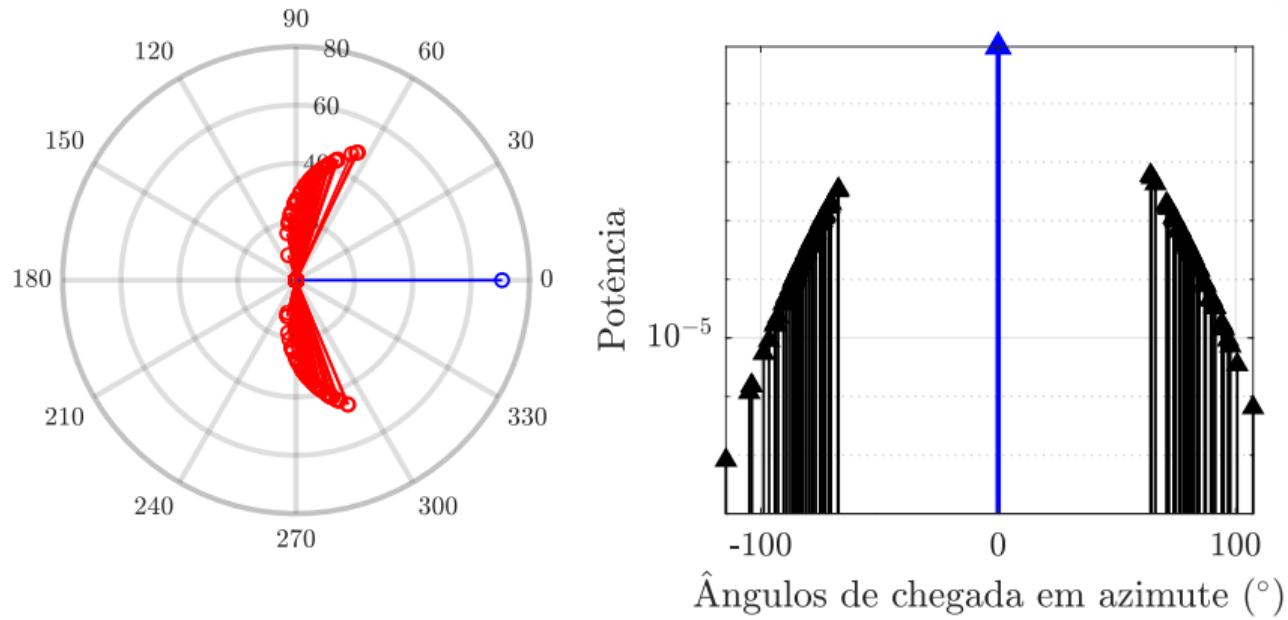


Figura 6: Espectros de potência angulares (ângulo azimutal).

# Direções de Chegada – Ângulo em Elevação

- Os ângulos de chegada em elevação  $\phi_n$  relacionam-se com as potências das componentes  $\alpha_n^2$  por:

## Ângulos de chegada em elevação iniciais

$$\phi_n = -\sigma_\phi \ln \left[ \frac{\alpha_n^2}{\max(\alpha_n^2)} \right], \quad (10)$$

em que  $\sigma_\phi$  é o espalhamento angular em elevação (expresso em radianos)

- O espalhamento angular em elevação ( $\sigma_\phi$ ) é uma medida da dispersão angular da potência no plano de elevação

# Direções de Chegada – Ângulo em Elevação

- O **espalhamento angular em elevação** ( $\sigma_\phi$ ) é um parâmetro de larga escala modelado como:
  - Variável aleatória Gaussiana (em escala logarítmica)
  - Variável aleatória lognormal (em escala linear)

**Tabela 6:** Estatísticas de  $\sigma_\phi$  (expressas em unidades logarítmicas) para diferentes cenários de propagação.

Ambiente de propagação	Estatísticas de $\sigma_\phi$	
	Média	Desvio Padrão
UMi	LoS	$-0.1 \log_{10}(1 + f_c) + 0.73$
	NLoS	$-0.04 \log_{10}(1 + f_c) + 0.92$
UMa	LoS	0.95
	NLoS	$-0.3236 \log_{10}(f_c) + 1.512$

# Direções de Chegada – Ângulo em Elevação

Como gerar os ângulos em elevação de chegada?

1. Consulte a Tabela 6 e gere o espalhamento angular em elevação em unidades logarítmicas
2. Converta o espalhamento para unidades lineares (radianos)

$$\sigma_{\phi;dg} = 10^{\sigma_{\phi;\log}} [{}^\circ], \quad \sigma_\phi = \sigma_{\phi;dg} \times \frac{\pi}{180} \quad (11)$$

3. Gere os ângulos  $\phi'_n$  de acordo com a Eq. 10
4. Gere  $N$  variáveis aleatórias  $U_n$  com distribuição uniforme no conjunto discreto  $[-1, 1]$

## randsample (Matlab)

- `u_n = randsample([-1,1], num_samples, true)`, em que `num_samples` é o número de amostras

# Direções de Chegada – Ângulo em Elevação

Como gerar os ângulos em elevação de chegada?

5. Gere  $N$  amostras de uma variável aleatória Gaussiana de média nula e desvio padrão igual a  $\sigma_\phi/7$ , denotada como  $Y_n$ , para representar a flutuação aleatória da dispersão angular
6. Escolha arbitrariamente um ângulo entre  $0$  e  $\pi/2$  para representar o ângulo em elevação médio, denotado como  $\bar{\phi}$
7. Faça a seguinte operação com as variáveis aleatórias geradas

$$\phi_n = U_n \phi'_n + Y_n \quad (12)$$

8. Caso o cenário tenha visada direta (ambientes LoS), faça a seguinte operação para normalizar a direção de visada direta

$$\phi_n \leftarrow \phi_n - \phi_1 + \bar{\phi} \quad (13)$$

# Direções de Chegada – Ângulo em Elevação

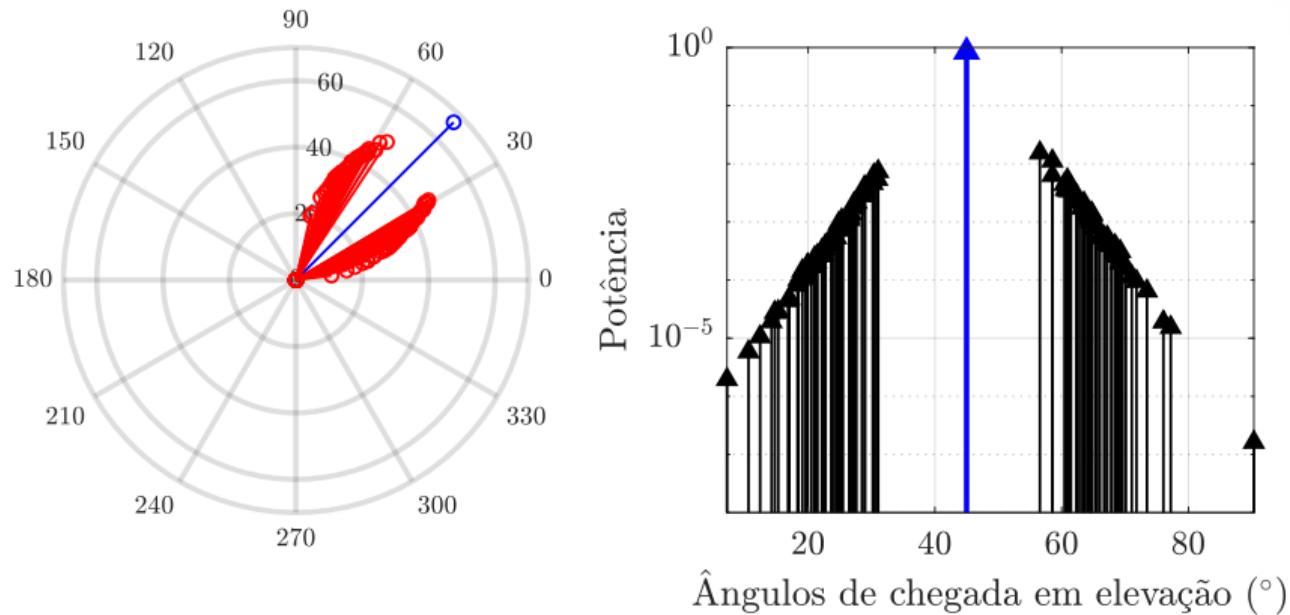


Figura 7: Espectros de potência angulares (ângulo em elevação).

# Direções de Chegada

Como gerar os vetores de direção de chegada?

1. Aplique os ângulos  $\theta_n$  (azimute) e  $\phi_n$  (elevação) encontrados nas etapas anteriores na expressão em (7)

# Direções de Chegada

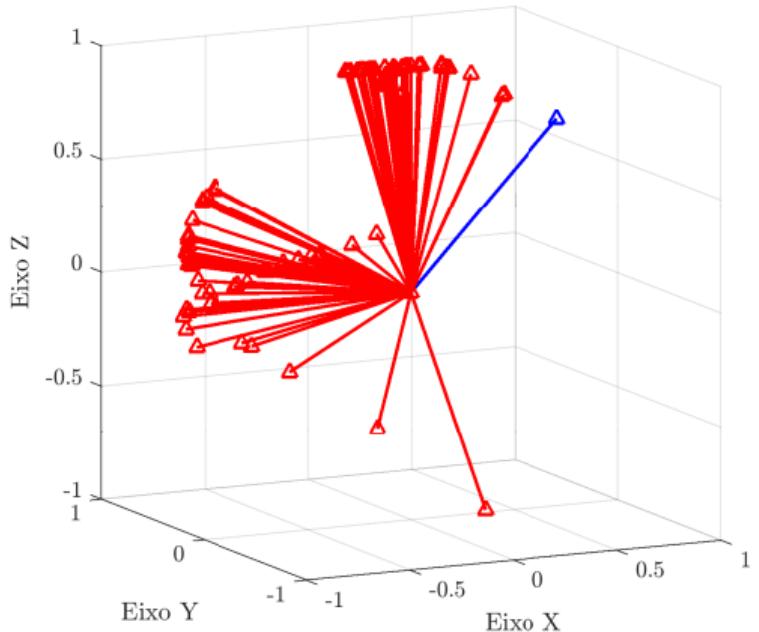


Figura 8: Vetores direção das componentes multipercuso.

# Desvios Doppler

- A  $n$ -ésima componente multipercuso incide no receptor com **vetor direção**  $\mathbf{r}_n$
- Considerando que o **receptor se movimenta com vetor velocidade**  $\mathbf{v}_{rx}$ , O **desvio Doppler** causado na incidência da componente multipercuso é calculado por:

## Desvio Doppler – $\nu_n$

$$\nu_n = \frac{1}{\lambda} \mathbf{r}_n \cdot \mathbf{v}_{rx} = \frac{v_{rx}}{\lambda} \mathbf{r}_n \cdot \bar{\mathbf{v}}_{rx}, \quad (14)$$

em que  $x \cdot y$  representa o produto interno entre vetores,  $v_{rx} = \|\mathbf{v}_{rx}\|$ ,  $\|\mathbf{r}_n\| = 1$

# Desvios Doppler

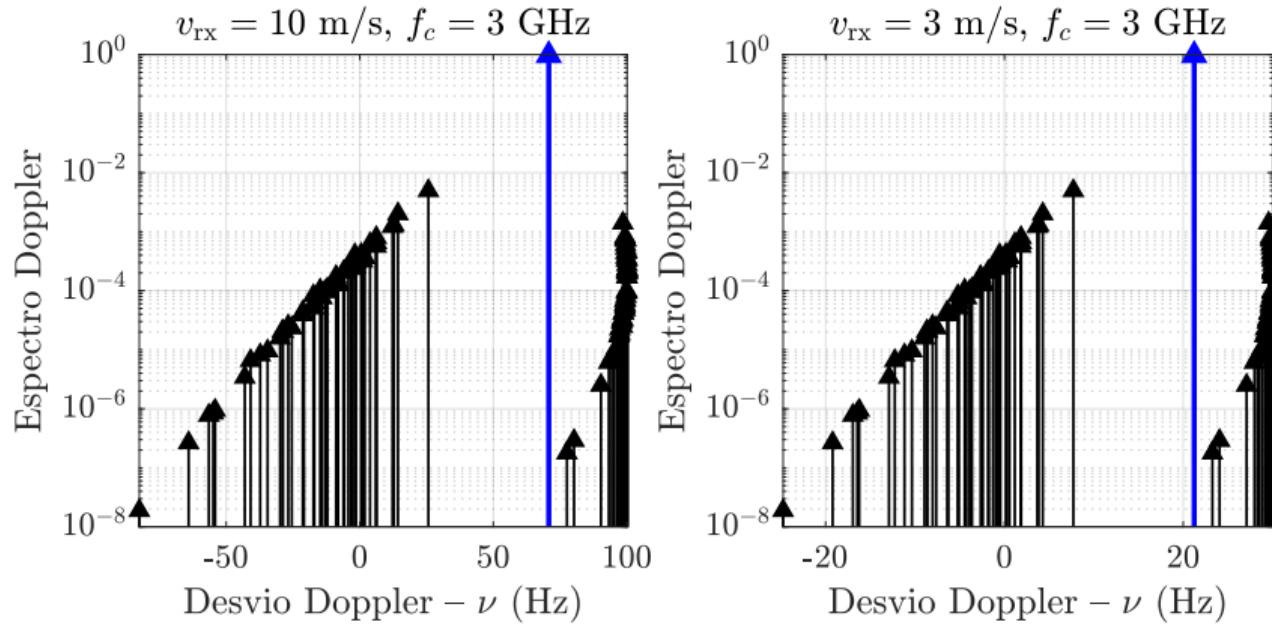
Como calcular os desvios Doppler causados pela incidência das componentes multipercuso?

1. Fixe uma velocidade escalar para a estação móvel  $v_{rx}$  (ex:  $v_{rx} = 10 \text{ m/s}$ )
2. Calcule o comprimento de onda  $\lambda$  de acordo com a frequência escolhida nos passos anteriores ( $\lambda$  deve ser expresso em m)
3. Fixe um ângulo azimutal  $\theta_v$  (entre 0 e  $2\pi$ ) e um ângulo em elevação  $\phi_v$  (entre 0 e  $\pi$ ) para representar a direção de mobilidade do receptor
4. Calcule o vetor velocidade do receptor:

$$\mathbf{v}_{rx} = v_{rx} \begin{bmatrix} \cos(\theta_v) \sin(\phi_v) \\ \sin(\theta_v) \sin(\phi_v) \\ \cos(\phi_v) \end{bmatrix} \quad (15)$$

5. Considerando os vetores de direção de chegada calculados nos passos anteriores, calcule os desvios Doppler  $\nu_v$  como apresentado na Eq. (14)

# Desvios Doppler



**Figura 9:** Espectro Doppler.

# Fases Multipercuso

- As **fases das componentes multipercuso**, denotadas como  $\varphi_n$ , são calculadas de acordo com

**Fases Multipercuso –  $\varphi_n$**

$$\varphi_n(t) = \bar{\varphi}_n - 2\pi\nu_n t \quad (16)$$

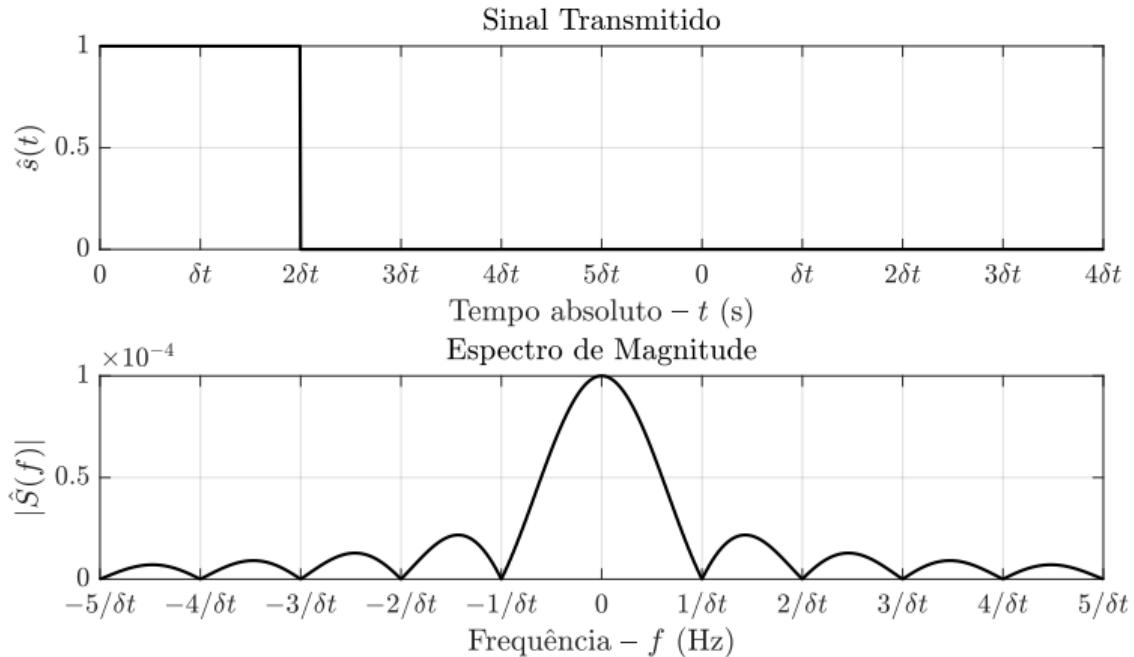
em que

$$\bar{\varphi}_n = 2\pi[(f_c + \nu_n)\tau_n] \quad (17)$$

- As fases são compostas por uma **parte estática** ( $\bar{\varphi}_n$ ) e por uma **parte variante no tempo**

# Espalhamento Temporal no Sinal Recebido

- Vamos considerar um **pulso como sinal transmitido** (equivalente banda básica)



**Figura 10:** Sinal transmitido e seu espectro de magnitude.

# Espalhamento Temporal no Sinal Recebido

- A **largura de banda** deste sinal é  $B_W \propto 1/\delta t$

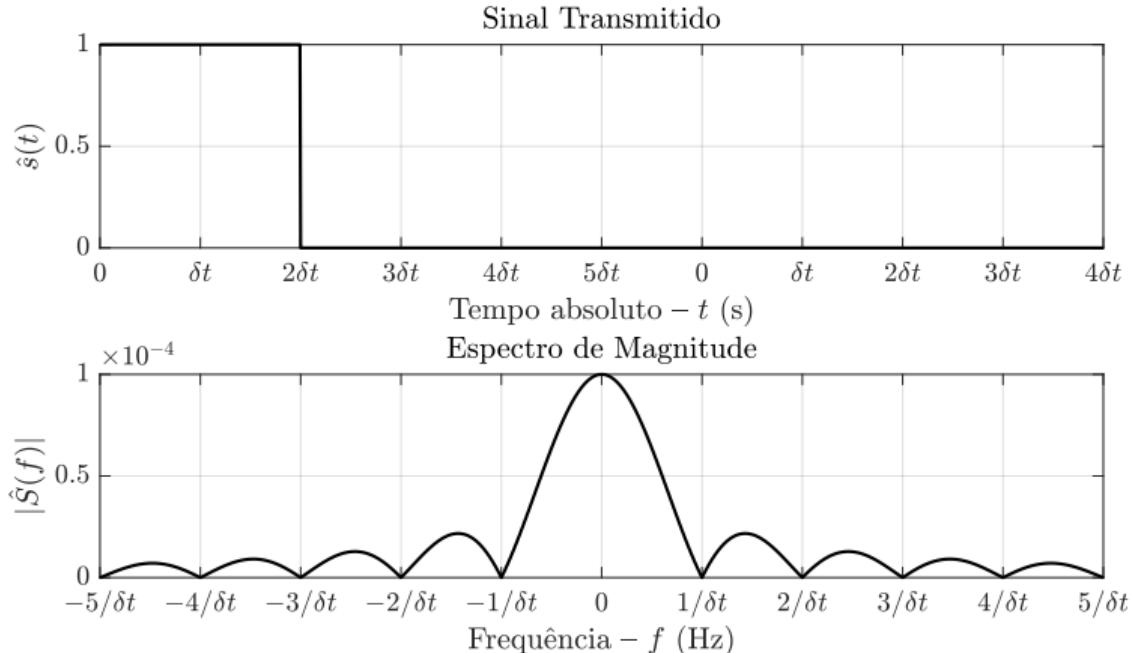


Figura 11: Sinal transmitido e seu espectro de magnitude.

# Espalhamento Temporal no Sinal Recebido

- Considerando um **sinal transmitido**  $\tilde{s}(t)$ , o **sinal recebido**, comprometido pelo canal, é expresso por:

## Sinal recebido

$$\tilde{r}(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{-j2\pi[(f_c + \nu_n)\tau_n - \nu_n t]} \tilde{s}(t - \tau_n). \quad (18)$$

Aplicando a metodologia exposta, todos os parâmetros em (18) foram devidamente caracterizados.

# Espalhamento Temporal no Sinal Recebido

Como gerar o sinal recebido?

- Desenvolva uma função para gerar o pulso transmitido  $\tilde{s}(t)$ 
  - Determine a largura do pulso  $\delta t$
  - Crie um vetor para representar o domínio de tempo absoluto  $t$  no intervalo  $t \in [0, 5 \times \delta t]$  com  $N_t = 10^5$  amostras
  - A função deve receber como entradas o atraso inicial, a largura do pulso e o número de amostras do domínio temporal
- Aplique (18) para gerar o sinal recebido
  - Considere que as componentes de fase  $\varphi_n(t)$  são variantes no tempo

# Espalhamento Temporal no Sinal Recebido

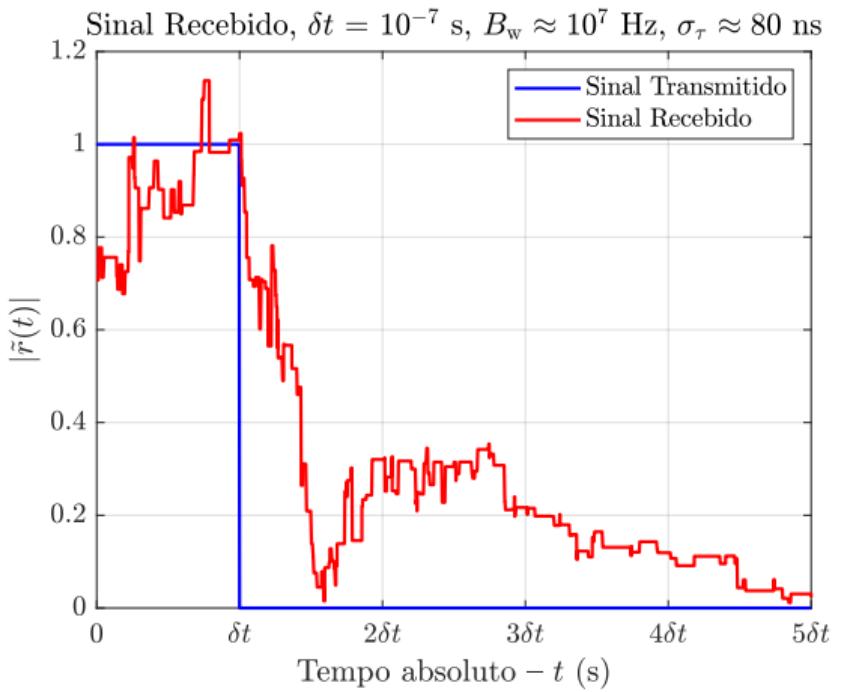
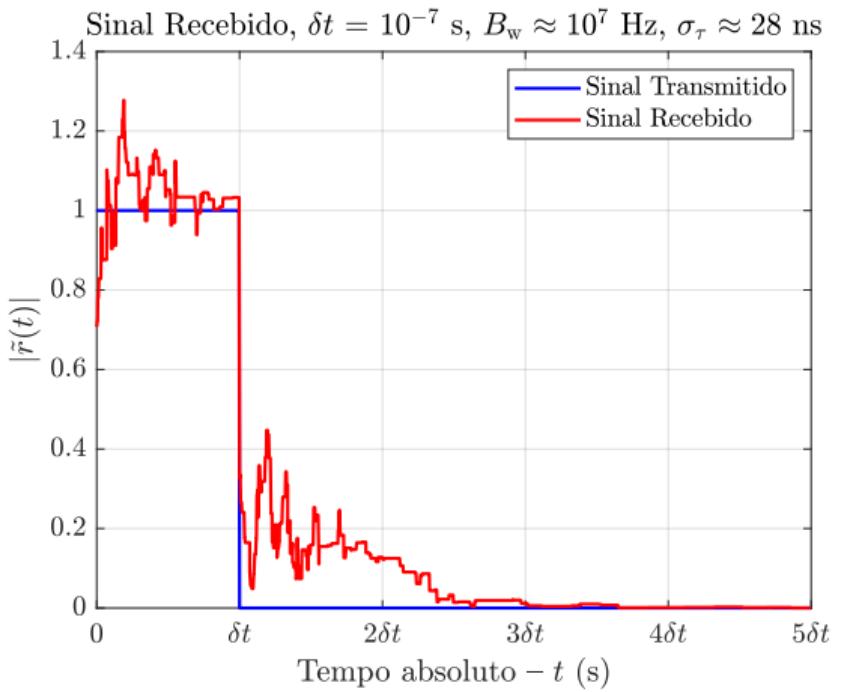


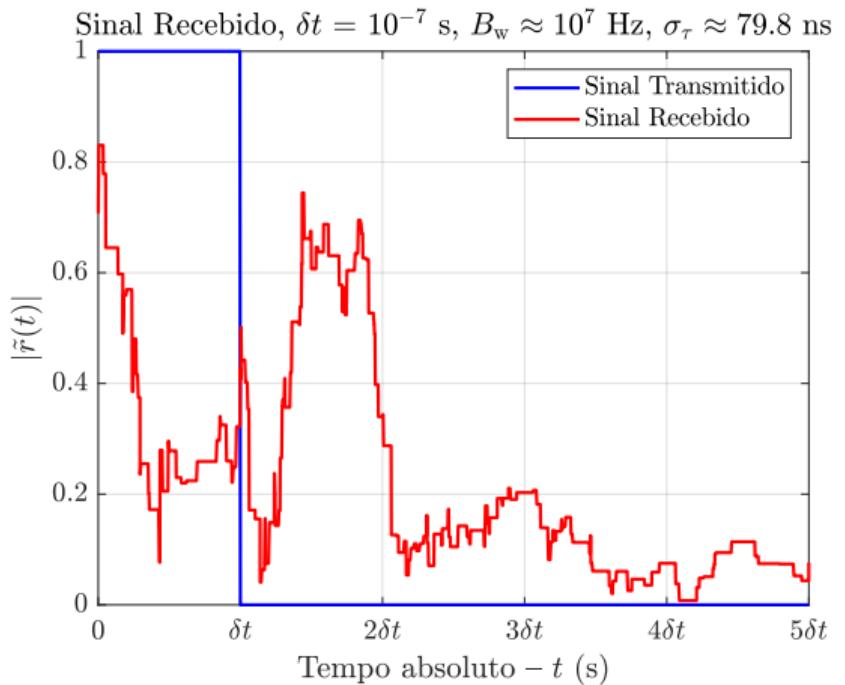
Figura 12: Sinal recebido, considerando  $\delta t = 10^{-7}$  s para um canal com  $\sigma_\tau = 80$  ns.

# Espalhamento Temporal no Sinal Recebido



**Figura 13:** Sinal recebido, considerando  $\delta t = 10^{-7}$  s para um canal com  $\sigma_\tau = 28$  ns.

# Espalhamento Temporal no Sinal Recebido



**Figura 14:** Sinal recebido, considerando  $\delta t = 10^{-7}$  s para um canal com  $\sigma_\tau = 79.8$  ns.

# Espalhamento Temporal no Sinal Recebido

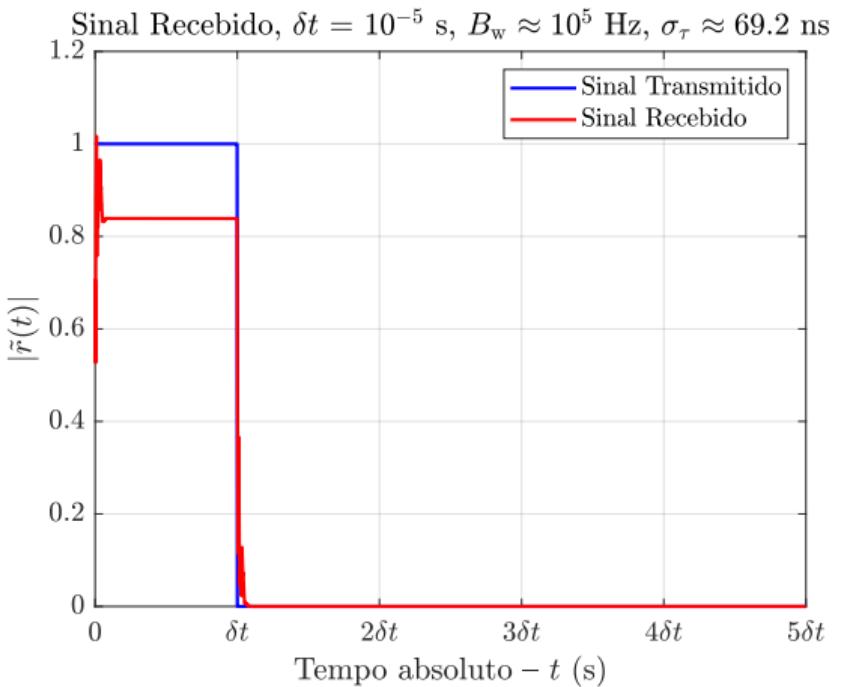


Figura 15: Sinal recebido, considerando  $\delta t = 10^{-5}$  s para um canal com  $\sigma_\tau = 69.2$  ns.

# Espalhamento Temporal no Sinal Recebido

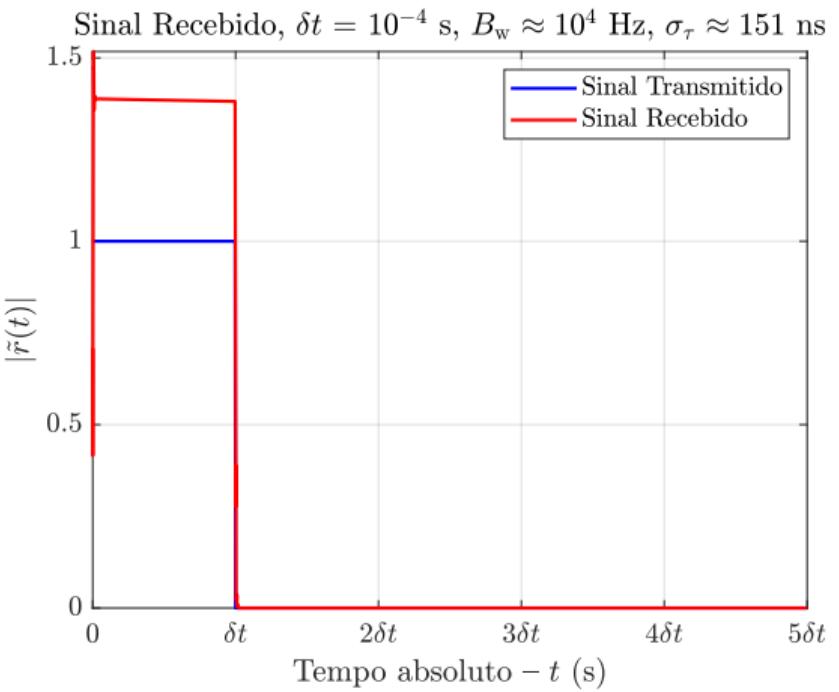


Figura 16: Sinal recebido, considerando  $\delta t = 10^{-4}$  s para um canal com  $\sigma_\tau = 151$  ns.

# Banda de Coerência e Tempo de Coerência

## Função de Autocorrelação do Canal (Normalizada)

$$\rho_{TT}(\kappa; \sigma) = \frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 e^{-j2\pi\tau_n\kappa} e^{j2\pi\nu_n\sigma}, \quad (19)$$

em que  $\kappa$  é um desvio de frequência absoluta e  $\sigma$  é um desvio em tempo absoluto

- Esta função mede o nível de correlação imposta pelo canal para diferentes desvios em tempo e frequência
- Para isolar o domínio em frequência:  $\rho_{TT}(\kappa; 0)$

- **Banda de Coerência:** largura de banda  $\kappa$  máxima que mantém  $|\rho_{TT}(\kappa, 0)| \geq \rho_B$
- **Tempo de Coerência:** duração  $\sigma$  máxima que mantém  $|\rho_{TT}(0, \sigma)| \geq \rho_T$

# Banda de Coerência do Canal

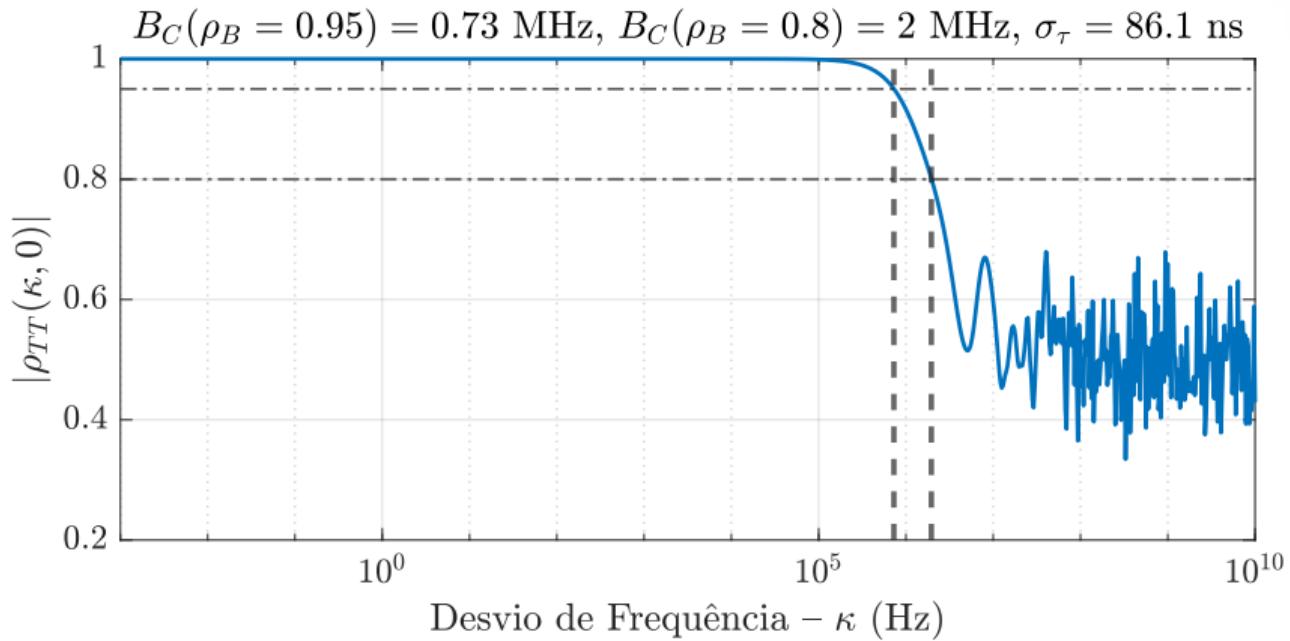


Figura 17: Visualização da banda de coerência do canal.

# Banda de Coerência do Canal

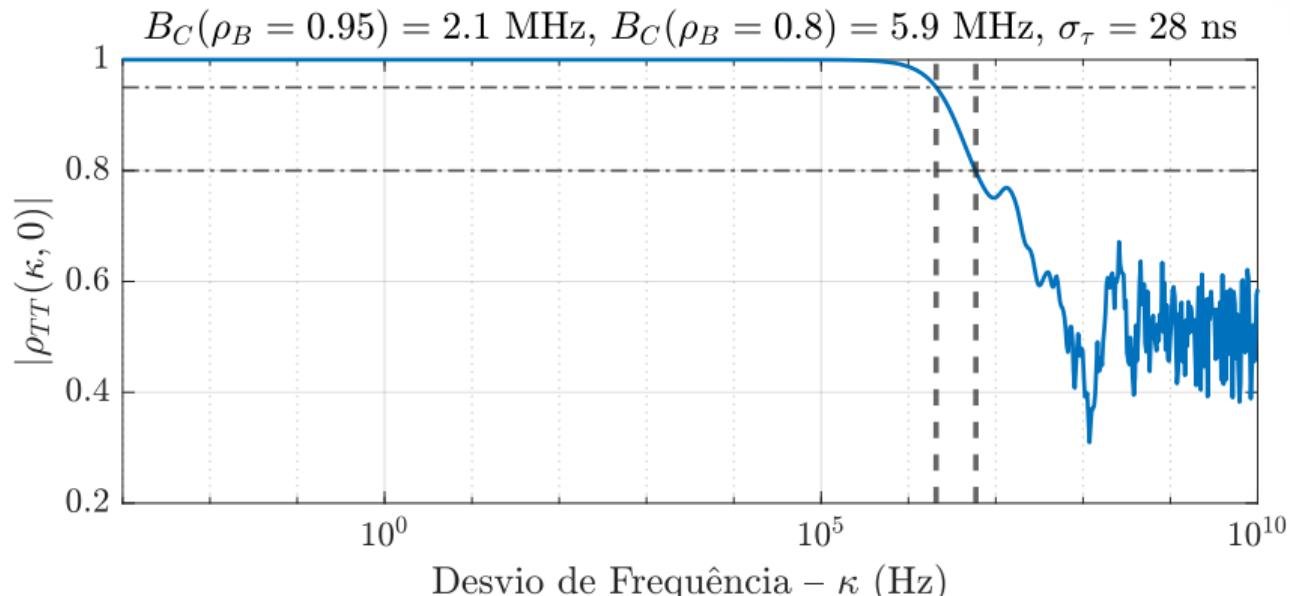
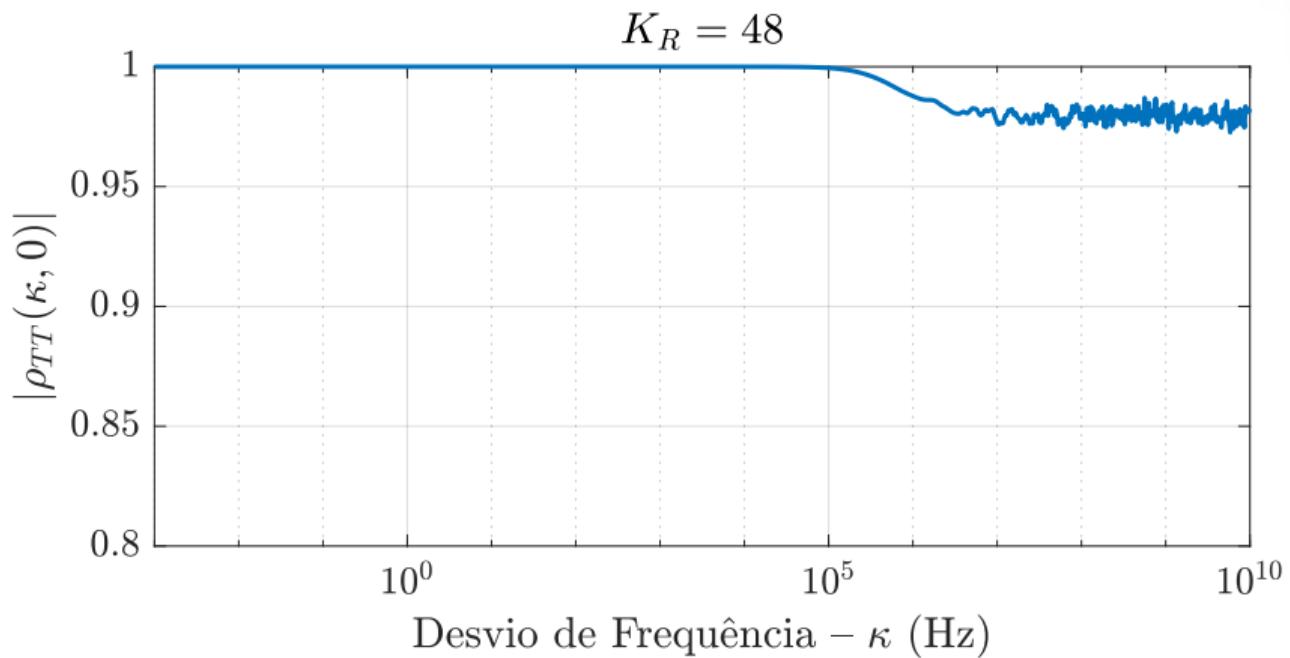


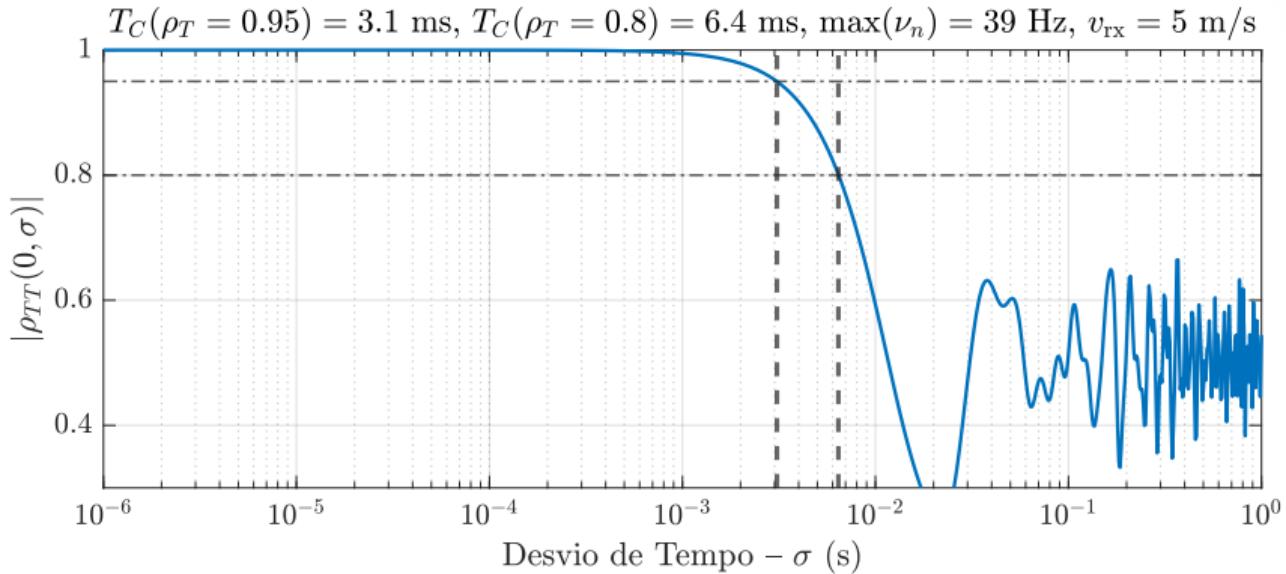
Figura 18: Visualização da banda de coerência do canal.

# Banda de Coerência do Canal



**Figura 19:** Visualização da banda de coerência do canal em um caso com alto fator de Rice.

# Tempo de Coerência do Canal



**Figura 20:** Visualização do tempo de coerência do canal considerando  $v_{\text{rx}} = 5 \text{ m/s}$ .

# Tempo de Coerência do Canal

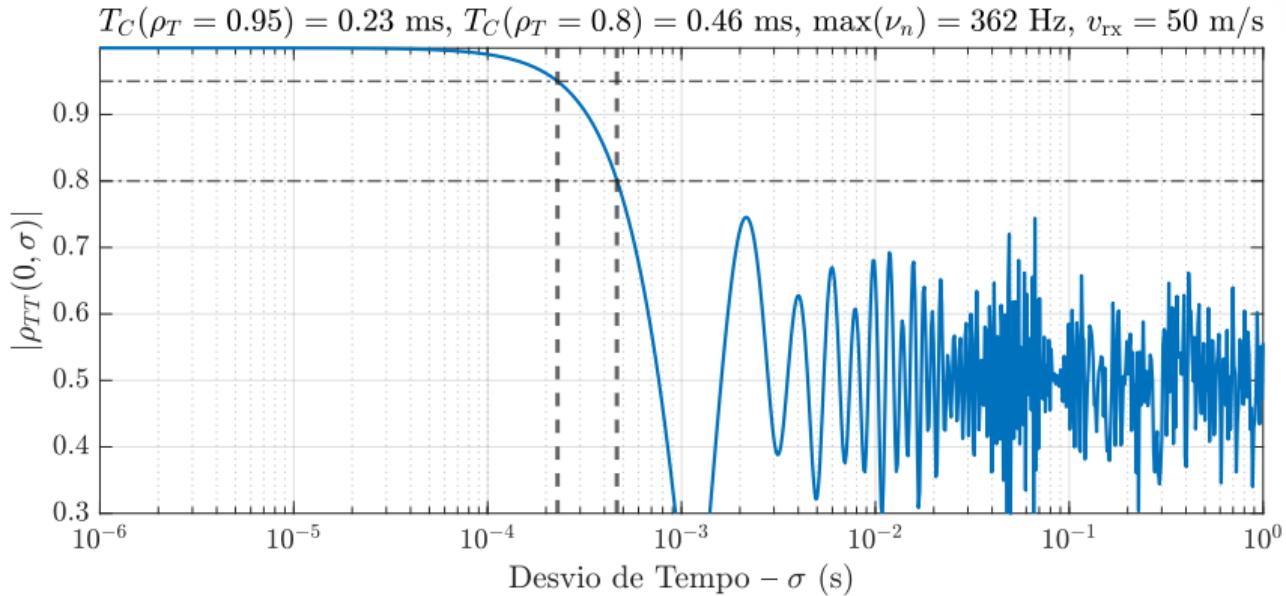


Figura 21: Visualização do tempo de coerência do canal considerando  $v_{\text{rx}} = 50 \text{ m/s}$ .

# **Tópicos em Engenharia: Fundamentos de Modelagem e Simulação do Canal de Comunicações Sem Fio**

**Geração dos Parâmetros do Canal de Comunicação Sem Fio**

**Prof: Higo Thaian Pereira da Silva<sup>1</sup>**  
**[higo.silva@unb.br](mailto:higo.silva@unb.br)**

<sup>1</sup>Universidade de Brasília  
UnB

**07 de Abril de 2025**



Universidade de Brasília