# Algoritmos para Projeto de Redes de Telecomunicações: Modelagem de Canais de Rádio

Programa de Pós-Graduação em Informática PPGIA - PUCPR

Prof. Marcelo E. Pellenz
http://www.ppgia.pucpr.br/~marcelo
marcelo@ppgia.pucpr.br



## Introdução

- Porque Redes Wireless ?
  - Não há necessidade de instalação de cabos ou re-cabeamento.
  - A técnica de *roaming* permite permanecer conectado em qualquer lugar, a qualquer hora.
  - O rápido crescimento do mercado devido a necessidade de mobilidade e acesso sem interrupção.
  - Crescente dependência das atividades comerciais em relação aos serviços de telecomunicações.

## Tópicos

- Introdução
- Fundamentos de Transmissão Digital
- Unidades de Medida em Telecomunicações
- Aspectos Regulatórios de Uso do Espectro
- Modelos de Propagação de Sinais
- Fundamentos de Antenas
- Parâmetros de Transmissores de Rádio

## Introdução

## Referências


- Wireless Communications: Principles and Practice, Theodore S. Rappaport, Prentice Hall, 1996.
- 802.11 Wireless LAN Fundamentals, Pejman Roshan and Jonathan Leary, ISBN 1-58705-077-3, Cisco Press, 2005.
- Hotspot Networks: Wi-Fi for Public Access Locations, Daniel Minoli, Ed. McGraw-Hill, 2003, ISBN:0071409785.
- Deploying License-Free Wireless Wide-Area Networks, Jack Unger, Cisco Press, 2003, ISBN: 1-58705-069-2.
- Espectro: Panorama Regulatório, Gerência Geral de Certificação e Engenharia de Espectro, Francisco Carlos Giacomini Soares, ANATEL.
- Agência Nacional de Telecomunicações: www.anatel.gov.br
- Wi-Fi Alliance: www.wi-fi.org


## Introdução

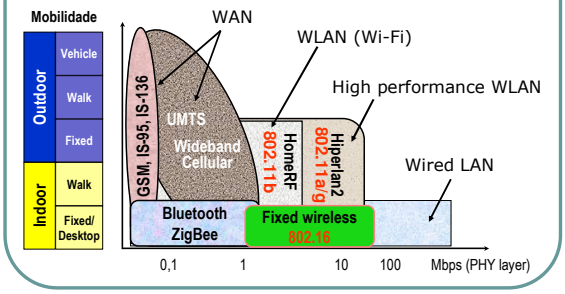
- Arquitetura das Redes Wireless
  - Infra-Estrutura
    - Os computadores se conectam a um elemento de rede central denominado ponto de acesso (Access Point).
    - Funciona de maneira similar as redes celulares.
    - Uma WLAN pode ter vários access points conectados entre si através de uma rede física.
    - Ponto-Multiponto
      - WLL, 802.11, Telefones Celulares, Satélites
    - Ponto-a-Ponto
      - Enlaces (links) de comunicação dedicados entre dois pontos.

## Introdução

- Arquitetura das Redes Wireless
  - Ad-Hoc
    - Sem estrutura pré-definida.
    - Cada computador é capaz de se comunicar com qualquer outro sem a necessidade de pontos de acesso.
    - Pode ser implementado através de técnicas de broadcasting ou mestre escravo.
    - WLAN Ad-Hoc: Independent Basic Service Set (IBSS)
  - Multiponto-Multiponto
    - Redes Mesh
    - Redes de comunicação pessoal (PAN)
    - Redes de Sensores (Automação / Telemetria)

## Introdução

- Exemplos de Tecnologias Wireless




## Introdução

Qual a melhor topologia ?

Infra-Estrutura ou Ad-Hoc ?

Aplicações ?

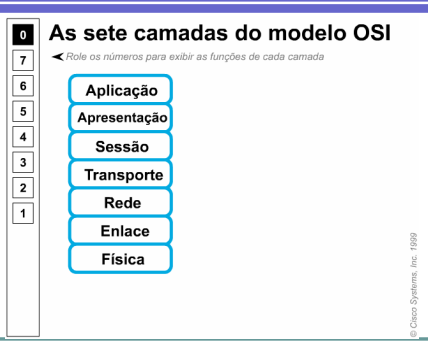
## Introdução

Como os padrões Wireless estão relacionados com o Modelo de Referência OSI ?

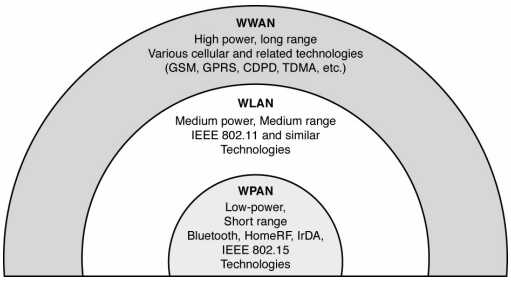
## Introdução

- Redes Wireless
  - Serviços
    - Acesso a Internet
    - Voz + Vídeo Streaming
    - Automação e Telemetria (kits de RF de baixo custo)
  - Mercado
    - Residencial (802.11, 802.16, Redes Celulares)
    - Comercial (802.11, 802.16, Satélite)
    - Industrial

## Introdução



## Introdução

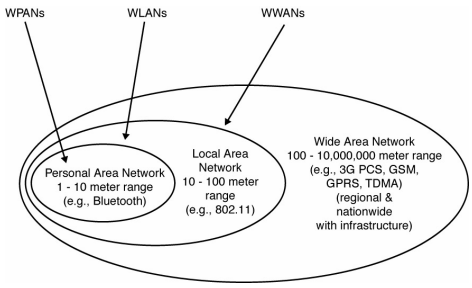



## Transmissão Digital

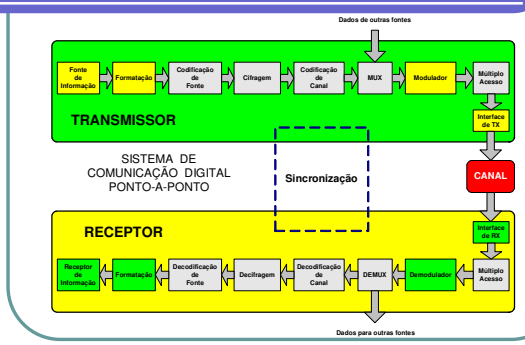
- ❑ Sistemas de Comunicação Digital
  - ❑ O que caracteriza um sistema digital ?
  - ❑ Quais as vantagens em relação a sistemas analógicos ?
  - ❑ Existem desvantagens ?

Transmissão Digital

## Introdução

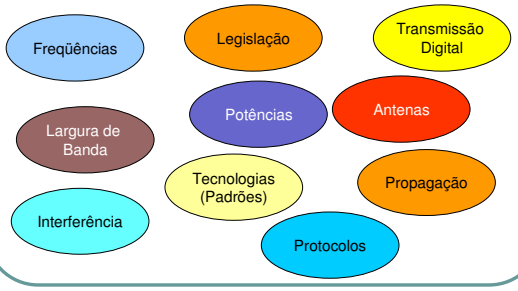



## Transmissão Digital




## Introdução

- Projeto e Desempenho de Redes Wireless




Exemplo Data Sheet

## Transmissão Digital

- Vantagens
  - Deteção e Correção de Erros (Codificação de Canal)
  - Compressão da Informação (Codificação Fonte)
  - Facilidade de Multiplexação dos Dados
  - Equalização de Canal
  - Criptografia (Privacidade)

## Transmissão Digital

- Vantagens
  - Facilidade de Regeneração do Sinal
  - Processamento Digital de Sinais (DSPs)
  - Baixo Custo dos Circuitos Digitais
  - Flexibilidade no Ajuste de Parâmetros (Configurações via Software)
  - Diversidade de Serviços (Aplicações Multimídia)

## Transmissão Digital

- Imperfeições do Canal
  - Atenuação (efeito atenuacao.vsm)
  - Ruído (efeito ruido.vsm)
  - Multipercurso/Desvanecimento (fading) (efeito multipercurso.vsm)
  - Distorção (efeito distorcao.vsm)
  - Interferência

Demonstração VISSIM

## Transmissão Digital

- Desvantagens
  - Grande Expansão de Faixa (Processo de Digitalização)
  - Erro de Quantização (Processo de Digitalização)
  - Necessidade de Sincronização

## Transmissão Digital

- 1 - Como a informação digital é transmitida na camada física das redes cabeadas e redes wireless ?
- 2 - Como são os sinais no tempo ?
  (Exemplo: formas de onda no tempo.vsm)
- 3 - Como são os sinais na freqüência ?
- 4 - Qual a relação tempo versus freqüência ?
- 5 - Como relacionar taxa de transmissão com banda ?

## Transmissão Digital

- Modelos Básicos de Comunicação
  - Comunicação Ponto-a-Ponto (Enlaces)
  - Comunicação Multiusuário (Broadcasting)
    - Ponto-Multiponto
    - Multiponto-Ponto
    - Multiponto-Multiponto
  - Comunicação Simplex / Half Duplex / Full Duplex

## Unidades de Medidas

Unidades de Medidas Comumente utilizadas na especificação de equipamentos e no projeto de Sistemas Wireless

## Unidades de Medidas

- Exercício
  - Consultar a ficha técnica de um bridge/router wireless.
    - Identificar as potências de transmissão.
    - Calcular os valores de potência em Watts.
  - Consultar a ficha técnica de um kit de RF

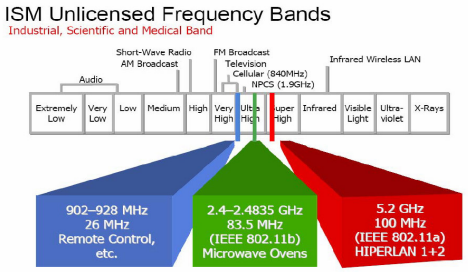
## Espectro de Radiofreqüências

- Conceitos
  - Recurso
    - Limitado
    - Único
    - Bem Público
  - Deve ser bem administrado
    - Alto Custo
  - Uso deve ser otimizado e universalizado

## Unidades de Medidas

| Nível de Potência Relativo a 1mW (0 dBm) | Nível (dBm) | Potência em Watts (W) | Abreviação de Potência |
|---|---|---|---|
| 4000 vezes mais que 0 dBm | +36 dBm | 4 Watts | 4W (4000 mW) |
| 1000 vezes mais que 0 dBm | +30 dBm | 1 Watts | 1W (1000 mW) |
| Duas vezes mais que 0 dBm | +3 dBm | 2 miliwatts | 2 mW |
| **0 dBm Nível de Referência** | **0 dBm** | **1 miliwatts** | **1 mW** |
| 1/2 de 0 dBm | -3 dBm | 1/2 miliwatt | 0,5 mW |
| 1/1000 de 0 dBm | -30 dBm | 1/1000 miliwatt | 0,001 mW |
| 1/4000 de 0 dBm | -36 dBm | 1/4000 miliwatt | 0,00025 mW |

## Espectro de Radiofreqüências




## Espectro de Radiofreqüências

Regulamentação de Uso
(Aspectos Legais)

## Planejamento e Engenharia de Espectro

- Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)

| Ações | Radiofreqüências |
|---|---|
| Atribuição | Serviços de Radiocomunicações (ITU) |
| Destinação | Aplicações Específicas (ANATEL) |
| Distribuição | Região e Localidade |
| Regulamentação | Condições de Uso |

## Administração e Gerenciamento

- Estações transmissoras estão sujeitas:
  - Licença de Operação
  - Fiscalização Permanente
- Equipamentos emissores de radiofreqüência estão sujeitos:
  - Certificação Emitida ou Aceita pela ANATEL (Equipamentos de Redes Wireless)

Para operar em banda não licenciada os equipamentos wireless devem:

- Operar com baixos níveis de potência
- Utilizar técnicas de modulação robustas contra interferência
- Transmitir em faixas de freqüência específicas

## Principais Faixas de Freqüência

- Faixas de Freqüência em Destaque:
  - 900 MHz
  - 2,4 – 2,5 GHz
  - 5,7 – 5,8 GHz
  - Tabela 1 ANATEL
  - Tabela 2 ANATEL

## Ferramentas para Gerenciamento

- Regulamentação
  - Plano de Atribuição de Freqüências
  - Condições de Uso do Espectro
  - Custo do Espectro
  - Fórum (Nacional & Internacional)
- Certificação
  - Regulamentação se aplica a todos os sistemas
  - (Inclui Equipamentos de Radiação Restrita)
- Licenciamento
  - Autorização de Uso de Radiofreqüência
  - Licenciamento de Estação
- Controle do Espectro/Fiscalização
  - Monitoramento e Banco de Dados

## Principais Faixas de Freqüência

- Faixa de 900 MHz
  - Abriga diversos serviços (envolve vários Regulamentos):
    - **Serviço Móvel Celular/Pessoal**
  - Abriga ainda o uso por equipamentos de radiação restrita.

## Gerenciamento do Espectro

- Novas tecnologias representam desafio constante para o Órgão Regulador:
  - Demanda por novas faixas (Exemplo: WiMAX)
  - Compartilhamento acentuado com diversos serviços. (Exemplo: 802.11b/g + Bluetooth+ZigBee)
  - Busca constante de uso otimizado do espectro.
  - Licitações cada vez mais concorridas.
  - Destinação de faixas potencialmente viáveis para diversas aplicações concomitantes.

## Principais Faixas de Freqüência

- Faixa de 2,4 GHz e 5,7 GHz
  - Cenário para uso do espectro por equipamentos de radiação restrita.
    - Resolução 365 (10/05/2004).
  - Estações isentas de licença para instalação/funcionamento.
  - Não necessitam autorização de uso de radiofreqüências.
  - Devem ter certificado homologado pela Anatel.

Para uso na prestação de serviço aplica-se Resolução: Nº 73, de 25/11/1998.

## Principais Faixas de Freqüência

- Faixa de 2,4 GHz
- Alterações em Estudo
  - Consulta Pública No. 541
    - Proposta de Regulamento sobre uso da faixa por sistemas utilizando potências superiores às utilizadas pelos equipamentos de radiação restrita (localidades acima de 500 mil habitantes).
    - Modulações previstas - Espalhamento Espectral e OFDM (Multiplexação Ortogonal por Divisão de Freqüências)

Estações devem ser licenciadas para localidades com população acima 500 mil habitantes e potência acima de 400mW EIRP

## Principais Faixas de Freqüência

- Características Gerais das Faixas de 2,4 GHz e 5,7 GHz
  - Potência EIRP <= 4W
    - Potência de Transmissão <= 1W
    - Ganho da Antena <= 6 dBi
    - Caso seja utilizada antena com ganho direcional superior a 6 dBi, a potência do transmissor deve ser reduzida da mesma quantidade em dB que exceder a 6 dBi.

## Principais Faixas de Freqüência

| Regulamento Aplicável (Faixa 2,4 – 2,4835 GHz) | EIRP | População | Licenciamento das Estações |
|---|---|---|---|
| Consulta Pública No. 541 (Regulamento Específico) | > 400mW | > 500 mil habitantes | Sim |
| Resolução No. 365 (Equipamentos de Radiação Restrita) | <= 400mW | >= 500 mil habitantes | Não |
| | > 400mW | < 500 mil habitantes | Não |
| | < 400mW | < 500 mil habitantes | Não |

## Principais Faixas de Freqüência

- Faixa de 5 GHz
  - Sistema de Acesso Sem Fio em Banda Larga (BWA)

| Faixas de Radiofreqüências | Exigências | | Potência EIRP | | Densidade Espectral de Potência EIRP |
|---|---|---|---|---|---|
| | DFS | TPC | Com TPC | Sem TPC | |
| 5150 – 5250 MHz | Não | Sim | 200 mW | 100 mW | 10 mW/MHz |
| 5250 – 5350 MHz | Sim | Sim | 200 mW | 100 mW | 10 mW/MHz |
| 5470 – 5725 MHz | Sim | Sim | 1 W | 500 mW | 50 mW/MHz |

## Principais Faixas de Freqüência

- Faixa de 5,7 GHz
- A atualização da regulamentação permitiu o uso por equipamentos WLAN
  - Incorpora facilidades como:
    - DFS (Dynamic Frequency Shifting)
    - TPC (Transmit Power Control)
  - Possibilidade de uso das técnicas de modulação:
    - Spread Spectrum (SS)
      - Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
      - Frequency Hopping
      - Esquema Híbridos
    - OFDM/COFDM

## Principais Faixas de Freqüência

- Faixa de 2,6 GHz
  - Faixa destinada para Serviço de Distribuição de Sinais Multiponto Multicanal (MMDS).
  - Resolução 236 (6/10/2000)
    - Faixa 2170-2182MHz para canal de retorno (480 canais de 25kHz com possibilidade de agregação).
    - Faixa 2500-2686MHz (31 blocos de 6MHz) para o serviço.
  - Estabelece condições de uso das faixas permitindo sistemas analógicos e digitais.
  - Permite uso das faixas por outros serviços por intermédio de exploração industrial.
  - A Resolução 371 (17/5/2004) revoga Resolução 236:
    - Altera valores de potência da estação terminal.
    - Elimina a necessidade de autorização da Anatel para canal de retorno.

## Principais Faixas de Freqüência

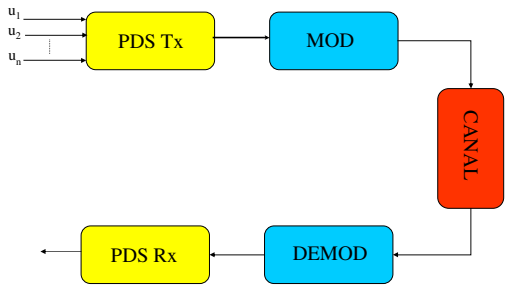
- Faixa de 3,5 GHz
- Resolução 309 (13/09/2002) – Abrange faixa de 3400 - 3600MHz
  - Estabelece condições de uso da faixa para sistemas digitais serviço fixo (aplicações ponto-multiponto).
  - Autorização de uso dos blocos poderá ocorrer de forma individual ou agregada.
  - Admite uso de tecnologia FDD e TDD.
  - Segmentação:
    - 3400-3450 / 3500-3550MHz – Blocos de 5MHz
    - 3450-3500 / 3550-3600MHz – Blocos de 1,75MHz

WiMAX em banda licenciada

## Modelos de Canal

- Canais com Fio (Rede Cabeada)
  - Estacionários
  - Previsíveis
- Canais de Rádio (Rede Wireless)
  - Extremamente aleatórios
  - Difícil análise (modelagem probabilística)

## Comunicações Móveis




## Propagação do Sinal de Rádio

Modelos de Propagação

O que são estes modelos ?

Qual a aplicação ?

Quais os tipos de modelos ?

Qual a importância no projeto de Sistemas Wireless ?

## Modelos de Canal

- Canal de Rádio Móvel
  - Impõe limitações no desempenho dos sistemas de comunicação sem fio.
- Caminhos de Transmissão
  - Linha de Visão (Visada) – Line-of-Sight (LOS)
  - Obstáculos - Non Line-of-Sight (NLOS)
    - Prédios / Montanhas

## Fenômenos de Propagação

- Propagação de Ondas Eletromagnéticas
  - Reflexão
    - Ocorre quando a onda propagada se encontra com objetos muito grandes, quando comparados com o comprimento de onda.
  - Múltiplas Reflexões
    - Na prática a onda se propaga por diversos caminhos de distâncias diferentes, ou seja, sofre múltiplas reflexões.
    - A interação destas ondas causa um fenômeno chamado desvanecimento do sinal (fading).

## Fenômenos de Propagação

- Difração
  - Ocorre quando o caminho entre o transmissor e o receptor é obstruído por uma superfície que tem irregularidades pontiagudas.
- Espalhamento
  - Ocorre quando o meio através do qual a onda se propaga consiste de objetos com dimensões que são muito pequenas quando comparadas com o comprimento de onda.

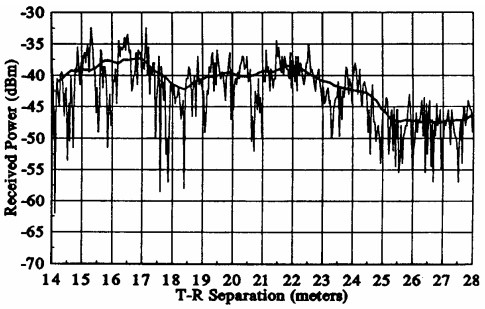
## Fenômeno de Desvanecimento

- Desvanecimento do Sinal (Fading)
  - Quando um móvel se desloca distâncias muito pequenas, a potência instantânea do sinal pode sofrer flutuações rápidas.
  - A razão disso é que o sinal recebido é a soma de muitas contribuições vindas de diferentes direções.
  - A potência do sinal recebido pode variar da ordem de 30dB ou 40dB.
  - O quanto isso significa na prática ?

## Modelos de Larga Escala

- Modelos de Propagação
  - Modelos de Larga Escala
    - Modelos para a predição da potência média do sinal numa distância de separação arbitrária entre transmissor e receptor.
    - A distância entre transmissor e receptor pode ser da ordem de centenas ou milhares de metros.
    - Atenuação/Perda de Percurso (Path Loss)
    - Sombreamento: sinal bloqueado por obstrução de estruturas

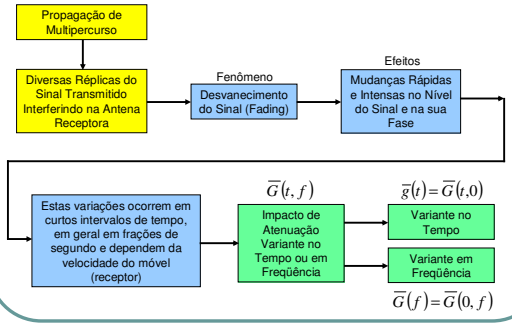
## Exemplo



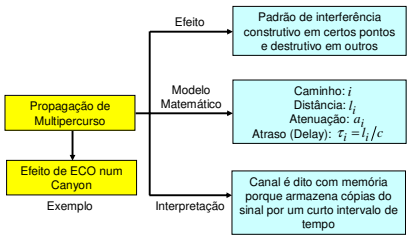

## Modelos de Pequena Escala

- Modelos de Propagação
  - Modelos de Pequena Escala
    - Modelos que caracterizam as variações rápidas da potência do sinal em deslocamentos de distância muito curtos ou durações de tempo muito curtas.
    - As variações de distância são da ordem de pequenos comprimentos de onda.
    - As durações de tempo são da ordem de segundos.

## Modelos de Canais de Rádio



## Modelos de Canais de Rádio




## Modelos de Canais de Rádio

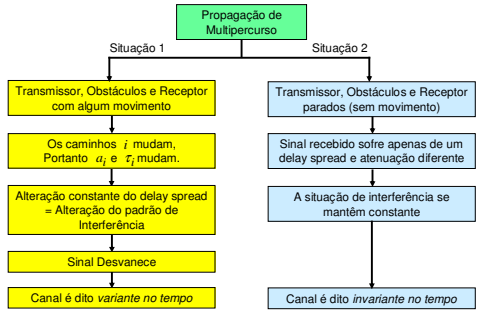
- Análise do Doppler Spread

$$f_d = \frac{f_c \cdot v}{c} = \frac{v}{\lambda}$$ Freqüência Doppler

  - Considerando a transmissão de apenas um tom de freqüência, o sinal recebido será composto de vários tons [-fd,fd].

| Freqüência da Portadora | Pessoa 1 m/s | Carro Lento 10 m/s | Carro Rápido 20 m/s | Trem 100 m/s |
|---|---|---|---|---|
| 1 MHz | 0,003 Hz | 0,03 Hz | 0,066 Hz | 0,33 Hz |
| 100 MHz | 0,33 Hz | 3,33 Hz | 6,6 Hz | 33 Hz |
| 1 GHz | 3,33 Hz | 33,33 Hz | 66 Hz | 333 Hz |
| 2,4 GHz | 8 Hz | 80 Hz | 160 Hz | 800 Hz |
| 5,4 GHz | 18 Hz | 180 Hz | 360 Hz | 1,8 kHz |
| 10 GHz | 33 Hz | 333 Hz | 666 Hz | 3,33 kHz |
| 60 GHz | 200 Hz | 2 kHz | 4 kHz | 20 kHz |

## Modelos de Canais de Rádio



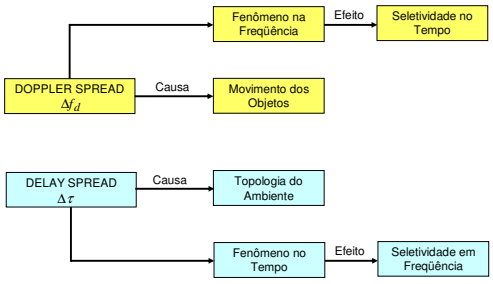

## Modelos de Canais de Rádio

- Análise do Doppler Spread

$$f_d \cdot T_s = \frac{f_d}{R_S} > 1$$ Canal é Seletivo no Tempo (FAST FADING)

$$f_d \cdot T_s << 1$$ Canal é Não Seletivo no Tempo (SLOW FADING)

## Modelos de Canais de Rádio




## Modelos de Canais de Rádio

- Análise do Delay Spread
  - Sem presença de *doppler spread* (receptor estacionário), o canal pode ser modelado como um *filtro linear invariante no tempo*.
  - Se a diferença de atraso entre os caminhos é muito pequena, então nenhuma freqüência é atenuada pelo *delay spread*.

| Ambiente | Desvio Padrão $\tau_{rms}$ |
|---|---|
| Urbano | 1 – 25 µs |
| Suburbano | 0,2 – 2 µs |
| Indoor | 25 – 250 ns |

## Modelos de Canais de Rádio

- Análise do Delay Spread
  - CASO 1 – Se o *delay spread* é muito pequeno comparado com o tempo de símbolo, não terá praticamente impacto no sinal recebido.
  - CASO 2 – Se o *delay spread* é maior comparado com o tempo de símbolo, causa interferência intersimbólica (ISI). Esse fenômeno é chamado de distorção do sinal.

| Condição | Classificação do Canal |
|---|---|
| $\Delta\tau \cdot W = \frac{\Delta\tau}{T_S} << 1$ | Não Seletivo em Freqüência (Plano ou Flat) |
| $\Delta\tau \cdot W = \frac{\Delta\tau}{T_S} > 1$ | Seletivo em Freqüência |

## Modelos de Canais de Rádio

- Análise do Delay Spread
  - Banda de Coerência do Canal: Indica o espaçamento em freqüência para o qual o canal não muda significativamente.

$$W_C = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_{rms}}$$

| Ambiente | Desvio Padrão do Delay Spread | Banda de Coerência |
|---|---|---|
| Urbano | 1 – 25 µs | 6,4 kHz – 160 kHz |
| Suburbano | 0,2 – 2 µs | 80 kHz – 800 kHz |
| Indoor | 25 – 250 ns | 0,64 MHz – 6,4 MHz |

## Modelos de Canais de Rádio

- Classificação do canal de Rádio
  - Quando os dois tipos de espalhamento estão presentes (delay spread + doppler spread) o canal deve ser modelado com um *filtro linear variante no tempo*.

| Critério | | Categoria | |
|---|---|---|---|
| | | Seletivo em Freqüência | Seletivo no Tempo |
| $\Delta\tau / T_S << 1$ | $f_d \cdot T_S << 1$ | Não (Plano/Flat) | Não (Lento) |
| $\Delta\tau / T_S > 1$ | $f_d \cdot T_S << 1$ | Sim | Não (Lento) |
| $\Delta\tau / T_S << 1$ | $f_d \cdot T_S > 1$ | Não (Plano) | Sim (Rápido) |
| $\Delta\tau / T_S > 1$ | $f_d \cdot T_S > 1$ | Sim | Sim |

## Propagação no Espaço Livre

- Propagação de Espaço Livre
  - É o modelo utilizado para predição da potência do sinal recebido quando não existe obstáculo (Line-of-Sight LOS) entre a antena transmissora e receptora.
- Aplicação (Enlaces de Comunicação Ponto-a-Ponto)
  - Projeto de sistemas de comunicação via satélite.
  - Projeto de enlaces de microondas.
  - Projeto de enlaces usando tecnologia 802.11a/b/g

## Modelos de Canais de Rádio

- Análise do Doppler Spread
  - Tempo de Coerência do Canal: Indica o intervalo de tempo em que o canal permanece constante.

$$T_C = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_d}$$

| Freqüência da Portadora | Pessoa 1 m/s | Carro Lento 10 m/s | Carro Rápido 20 m/s | Trem 100 m/s |
|---|---|---|---|---|
| 1 MHz | 68,2 s | 6,82 s | 3,41 s | 0,68 s |
| 100 MHz | 0,68 s | 68,2 ms | 34,1 ms | 6,82 ms |
| 1 GHz | 68,2 ms | 6,82 ms | 3,41 ms | 0,68 ms |
| 2,4 GHz | 28,1 ms | 2,81 ms | 1,4 ms | 0,28 ms |
| 5,4 GHz | 12,5 ms | 1,25 ms | 0,62 ms | 0,12 ms |
| 10 GHz | 6,82 ms | 0,68 ms | 0,34 ms | 68,2 µs |
| 60 GHz | 1,12 ms | 0,11 ms | 56,2 µs | 11,2 µs |

## Propagação no Espaço Livre

- Propagação de Espaço Livre
  - Modelo de Friis

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

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{f}$$

Unidades ??

$d$ = distância Tx - Rx
$G$ = ganho da antena
$\lambda$ = comprimento de onda
$P_t$ = potência de transmissão
$L$ = fator de perda do sistema
$P_r(d)$ = potência recebida

## Propagação no Espaço Livre

- Propagação de Espaço Livre
  - O modelo de Friis só é valido para valores de distância que são bem maiores que o comprimento de onda ou a dimensão física da antena.

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

$$EIRP = P_t \cdot G_t$$

Qual o comprimento de onda de um sistema operando na faixa de 2,4 GHz e 5,8 GHz ?
(por exemplo 802.11b/g e 802.11a)

## Propagação no Espaço Livre

- Propagação de Espaço Livre
  - A fórmula de perda de espaço livre pode ser escrita no seguinte formato:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2$$

$$P_r(d)\ \text{dBm} = P_r(d_0)\ \text{dBm} + 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{d_0}{d}\right)$$

  - $d_0$ - distância próxima ao transmissor
  - $P_0$ - potência próxima ao transmissor
  - $d$ - distância entre transmissor e receptor

## Propagação no Espaço Livre

- Propagação de Espaço Livre
  - Perda de Percurso (Path Loss)

$$PL\ (\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = -10 \cdot \log_{10} \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}\right] \quad L = 1$$

$$PL\ (\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \left[\left(\frac{4\,\pi\, d}{\lambda}\right)^2\right] \qquad G_t = G_r = 1$$

## Propagação no Espaço Livre

- Propagação de Espaço Livre
  - Distâncias de referência típicas para sistemas operando na faixa de 1GHz a 2GHz.
    - Sistemas Indoor - 1 m
    - Sistemas Outdoor - 100 m ou 1 km

## Propagação no Espaço Livre

- Exercício
  - Considerando a especificação técnica do Bridge Dlink DWL-G800-AP, comparar o alcance OUTDOOR especificado com o modelo de perda de percurso para a taxa média de 24Mbps.

## Propagação no Espaço Livre

- Exercício
  - Potência do transmissor
  - Ganho das antenas
  - Freqüência da portadora

$$P_t = 50\ \text{W}$$
$$G_t = G_r = 1$$
$$f_c = 900\ \text{MHz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{900 \cdot 10^6} = \frac{1}{3}\ \text{m}$$

Utilizar as funções desenvolvidas para o Matlab

## Propagação no Espaço Livre

- Determinar
  - Potência do transmissor em dBm e dBW
  - Potência recebida (dBm) para um distância entre transmissor e receptor de

$$d = 100 \text{ m}$$

$$d = 10 \text{ km}$$

## Propagação no Espaço Livre

- Solução
  - Potência recebida (dBm) para $d = 100 \text{ m}$

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

$$P_r = \frac{50\,(1)\,(1)\,(1/3)^2}{(4\pi)^2\,(100)^2\,(1)} = 3{,}5 \cdot 10^{-6} \text{ W} = 3{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ mW}$$

## Propagação no Espaço Livre

- Solução
  - Potência do transmissor (dBm)

$$P_t\,(\text{dBm}) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_t\,(\text{W})}{1 \text{ mW}}\right)$$

$$P_t\,(\text{dBm}) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{50}{10^{-3}}\right) \approx 47 \text{ dBm}$$

## Propagação no Espaço Livre

- Solução
  - Potência recebida (dBm) para $d = 100 \text{ m}$

$$P_r\,(\text{dBm}) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_r\,(\text{W})}{1 \text{ mW}}\right)$$

$$P_r\,(\text{dBm}) = 10 \cdot \log_{10}\left(3{,}5 \cdot 10^{-3}\right) \approx -24{,}5 \text{ dBm}$$

## Propagação no Espaço Livre

- Solução
  - Potência do transmissor (dBW)

$$P_t\,(\text{dBW}) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_t\,(\text{W})}{1 \text{ W}}\right)$$

$$P_t\,(\text{dBW}) = 10 \cdot \log_{10}\,(50) \approx 17 \text{ dBW}$$

## Propagação no Espaço Livre

- Solução
  - Potência recebida (dBm) para $d = 10 \text{ km}$

$$P_r\,(d) \text{ dBm} = P_r(d_0)\,\text{dBm} + 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{d_0}{d}\right)$$

$$P_r\,(10 \text{ km}) = P_r(100 \text{ m}) + 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{100}{10000}\right)$$

## Propagação no Espaço Livre

- Solução
  - Potência recebida (dBm) para $d = 10\ \text{km}$

$$P_r(10\ \text{km}) = -24{,}5\ \text{dBm} - 40\ \text{dB}$$

$$P_r(10\ \text{km}) = -64{,}5\ \text{dBm}$$

## Modelo de 2 Raios

- Modelo de Reflexão no Solo (2 Raios)
  - Distâncias percorridas pelas componentes direta e refletida:

$$d_1 = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2}$$

$$d_2 = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_t - h_r}{d}\right)$$

## Propagação de Sinais

- Atenuação de Sinais na Faixa de 2,4GHz
  - Chuva Torrencial – 0,05 dB/km
  - Neblina – 0,02 dB/km
- Atenuação de Sinais na Faixa de 5,8GHz
  - Chuva Torrencial – 0,5 dB/km
  - Neblina – 0,07 dB/km

## Modelo de 2 Raios

- Modelo de Reflexão no Solo (2 Raios)
- Usando o modelo de espaço livre a potência recebida devido a componente direta é dada por:

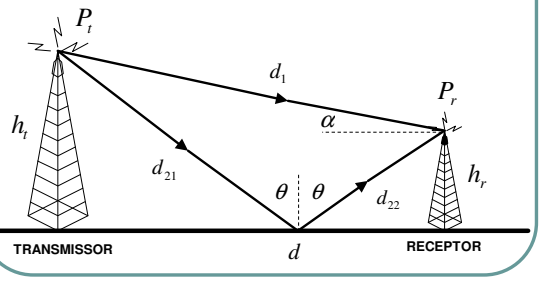
$$P_{R1} = P_t \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1}\right)^2 \cdot G_t \cdot G_r$$

- Potência recebida pela componente refletida:

$$P_{R2} = P_t \cdot R(\theta, \varepsilon_{eff}) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2}\right)^2 \cdot G_t \cdot G_r$$

## Modelo de 2 Raios

- Modelo de Reflexão no Solo (2 Raios)




## Modelo de 2 Raios

- Modelo de Reflexão no Solo (2 Raios)

$$P_r = P_t \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot G_t \cdot G_r \cdot 4 \cdot \text{sen}^2\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right)$$

## Modelo de 2 Raios

- Modelo de Reflexão no Solo (2 Raios)
  - Modelo Aproximado (Lei da Quarta Potência)

$$P_r = P_t\, G_t\, G_r\, \frac{h_t^2\, h_r^2}{d^4}$$

$$PL\,(\mathrm{dB}) = 40\log_{10}(d) - [10\log_{10}(G_t) + 10\log_{10}(G_r) + 20\log_{10}(h_t) + 20\log_{10}(h_r)]$$

## Modelos Empíricos e Semi-Empíricos

- Log-Distance Model
- Exemplo – Se a medida de atenuação for 70dB em $d_o$=10m e 110dB em $d$=100m.
  - Qual é o expoente de perda de percurso ?
  - Qual o tipo de ambiente mais provável ?

## Modelos Empíricos e Semi-Empíricos

- Modelos Empíricos
  - São baseados em medidas extensivas em diferentes ambientes
- Log-Distance Model

$$\overline{P}_L(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n$$

$$\overline{P}_L(d) = \overline{P}_L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

## Modelos Empíricos e Semi-Empíricos

- Log-Distance Model

$$P_L(d) = \overline{P}_L(d) + X_\sigma$$

$$P_L(d) = \overline{P}_L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$$

- $X_\sigma$ é uma variável aleatória com distribuição normal (em dB), média zero e variância $\sigma^2$

## Modelos Empíricos e Semi-Empíricos

- Log-Distance Model

| Expoentes de Path Loss para Diferentes Ambientes | |
|---|---|
| Ambiente | Expoente de Path Loss (n) |
| Espaço Livre | 2 |
| Celular em Área Urbana | 2,7 a 3,5 |
| Celular em Área Urbana Sombreada | 3 a 5 |
| Ambiente Indoor com Visada | 1,6 a 1,8 |
| Ambiente Indoor sem Visada | 4 a 6 |
| Ambiente Industrial Indoor sem Visada | 2 a 3 |

## Modelos Empíricos e Semi-Empíricos

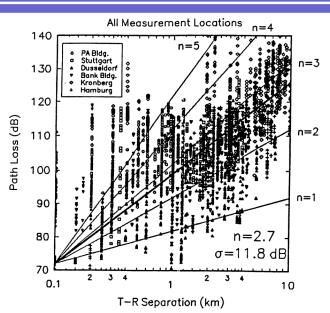



**Figure 4.17** Scatter plot of measured data and corresponding MMSE path loss model for many cities in Germany. For this data, $n$ = 2.7 and $\sigma$ = 11.8 dB [from [Sei91] © IEEE].

## Modelos Empíricos e Semi-Empíricos

**Table 4.6** Path Loss Exponent and Standard Deviation Measured in Different Buildings [And94]

| Building | Frequency (MHz) | *n* | σ (dB) |
|---|---|---|---|
| Retail Stores | 914 | 2.2 | 8.7 |
| Grocery Store | 914 | 1.8 | 5.2 |
| Office, hard partition | 1500 | 3.0 | 7.0 |
| Office, soft partition | 900 | 2.4 | 9.6 |
| Office, soft partition | 1900 | 2.6 | 14.1 |
| **Factory LOS** | | | |
| Textile/Chemical | 1300 | 2.0 | 3.0 |
| Textile/Chemical | 4000 | 2.1 | 7.0 |
| Paper/Cereals | 1300 | 1.8 | 6.0 |
| Metalworking | 1300 | 1.6 | 5.8 |
| **Suburban Home** | | | |
| Indoor Street | 900 | 3.0 | 7.0 |
| **Factory OBS** | | | |
| Textile/Chemical | 4000 | 2.1 | 9.7 |
| Metalworking | 1300 | 3.3 | 6.8 |

## Introdução

- Simulações de protocolos de comunicação podem ser complexas computacionalmente (muito tempo computacional).
- É apropriada a simulação a nível de pacote para reduzir o número de eventos processados:
  - Modelo de canal a nível de pacote
- Em canais de rádio o desempenho do protocolo depende muito do comportamento do canal:
  - Nem todos os bits de um pacote são afetados igualmente, o que justifica o uso de modelos de canal a nível de bit
- É difícil obter modelos de canal precisos a nível de pacotes:
  - O canal tem um comportamento a nível de erro de bit
  - Depende do tipo de modulação e codificação
  - Depende do formato dos pacotes (características da fonte)

## Algoritmos para Projeto de Redes de Telecomunicações:

Simulação de Canais de Rádio

Modelagem de Erros de Bit e sua Aplicação na Simulação a Nível de Pacotes

Programa de Pós-Graduação em Informática PPGIA - PUCPR

Prof. Marcelo E. Pellenz

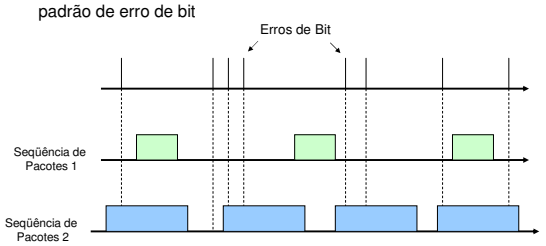
http://www.ppgia.pucpr.br/~marcelo

marcelo@ppgia.pucpr.br



## Introdução

- Exemplo de características de erro de pacotes para o mesmo padrão de erro de bit




## Referência

- *A Gilbert-Elliot Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation*, Jean-Pierre Ebet and Andreas Willig, Telecommunication Networks Group, Technical University Berlin, Berlin, March 1999.

## Introdução

- A utilização de modelos de canal a nível de bit degradam o desempenho da simulação do protocolo, pois para processar cada bit é necessário um evento de simulação.
  - Se forem assumidos diferentes canais entre cada par de estação móvel, a complexidade da simulação aumento muito.
- Modelos de canal a nível de pacote necessitam apenas um evento de simulação para processar o pacote, onde um pacote pode conter milhares de bits.

## Canal de Rádio

- Efeitos do Canal de Rádio:
  - Perda de Percurso
  - Desvanecimento Rápido (Fast Fading) devido a movimentação ou propagação de multipercurso.
  - Desvanecimento Lento (Slow Fading) devido a movimentação entre grandes obstáculos.
  - Ruído e interferência de outras redes ou dispositivos operando na mesma faixa.

## Modelo de Canal de Gilbert-Elliot

- Probabilidade de erro no estado bom: $e_G$
- Probabilidade de erro no estado ruim: $e_B$
- Dentro de um estado os erros de bit são assumidos ocorrer de maneira independente (sem memória).
- A taxa de erro de bits depende da freqüência, esquema de modulação, codificação e das condições do ambiente (canal).

$$\begin{bmatrix} p_{GG} & p_{GB} \\ p_{BG} & p_{BB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{GG} & 1-p_{GG} \\ 1-p_{BB} & p_{BB} \end{bmatrix}$$

$$T_G = \frac{1}{1-p_{GG}} \qquad T_B = \frac{1}{1-p_{BB}}$$

## Modelo de Canal de Gilbert-Elliot

- Aplicação na modelagem das características de erro do canal de rádio entre duas estações.
- Considera uma cadeia de Markov com dois estados, denominados estados *bom* e *ruim*.
- A cada estado é atribuído uma probabilidade constante de taxa de erro de bit (BER).

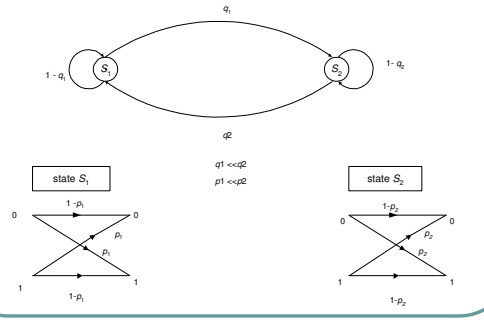
## Modelo de Canal de Gilbert-Elliot

- Exemplo 1
  - Parâmetros aplicados em estudos de esquemas de Polling e ARQ em canais de rádio:

$$e_G = 10^{-4} \qquad p_{GG} = 0{,}995$$
$$e_B = 10^{-3} \qquad p_{BB} = 0{,}96$$

  - Mudanças de estado ocorrem apenas em limites de slots, com duração de slot de 1ms.
  - A duração média do estado bom é 200ms e do estado ruim é 25ms.

## Modelo de Canal de Gilbert-Elliot




## Modelo de Canal de Gilbert-Elliot

- Exemplo 2
  - Taxa de transmissão de 8Mbps
  - Tamanho do quadro de 8 bytes

$$e_G = 10^{-5} \qquad p_{GG} = 0{,}9999918$$
$$e_B = 10^{-2} \qquad p_{BB} = 0{,}999184$$

## Modelo de Canal de Gilbert-Elliot

- Exemplo 3
  - Duração média do período bom: 1 a 10s
  - Duração média do período ruim: 50ms a 500ms
  - Para tamanho dos pacotes de 512 bytes e taxa de 10Mbps

$$e_G = 0 \qquad e_B = 0{,}8$$