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

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

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

- 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.

Introdução

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

Qual a melhor topologia ?

Infra-Estrutura ou Ad-Hoc ?

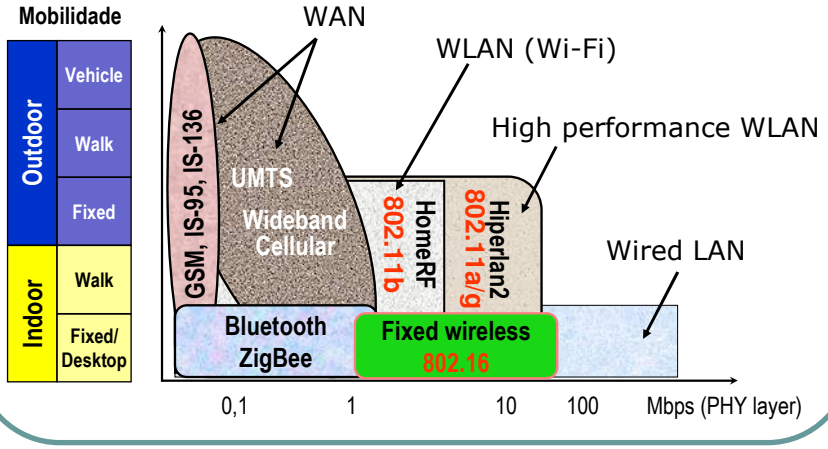
Aplicações ?

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

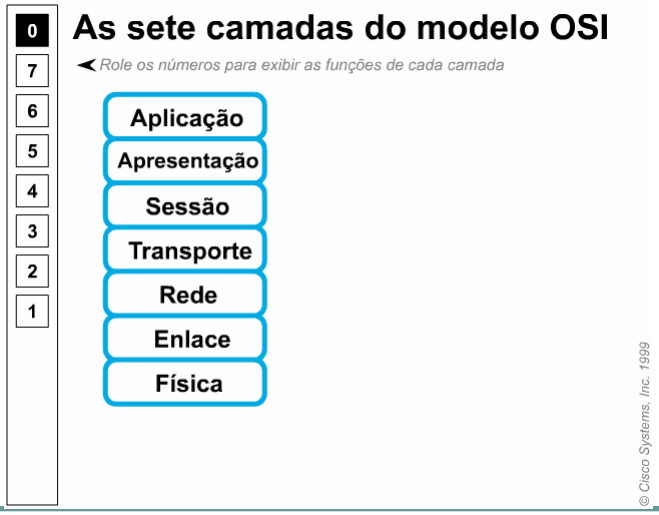
- Exemplos de Tecnologias Wireless



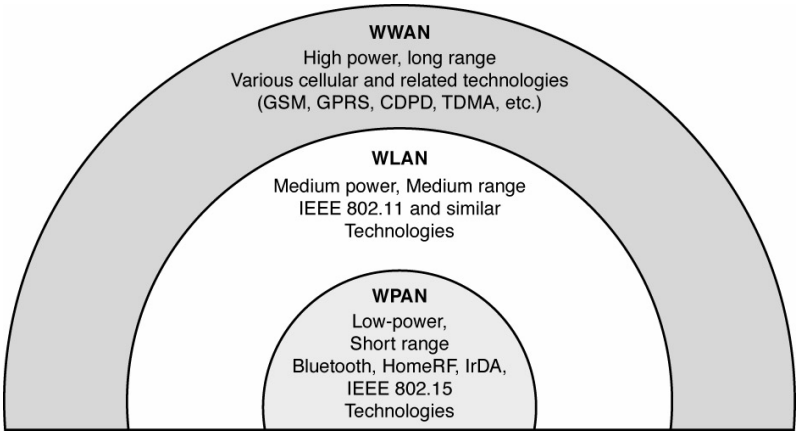
Introdução

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

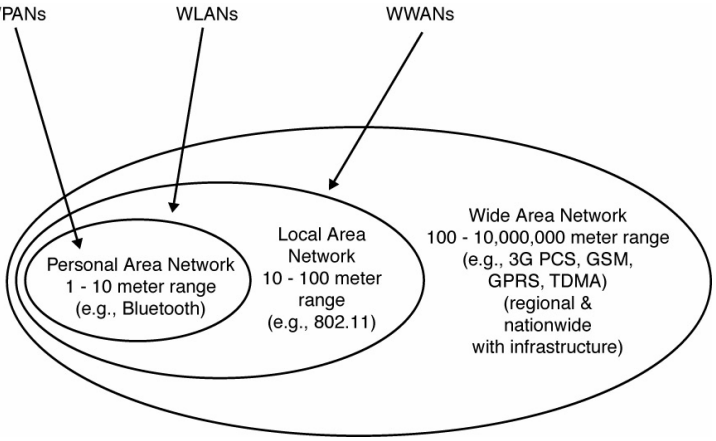
Introdução



Introdução

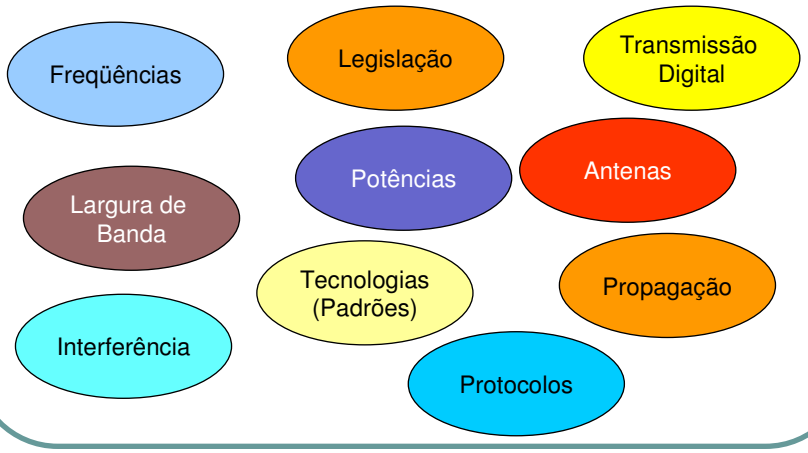


Introdução



Introdução

- Projeto e Desempenho de Redes Wireless



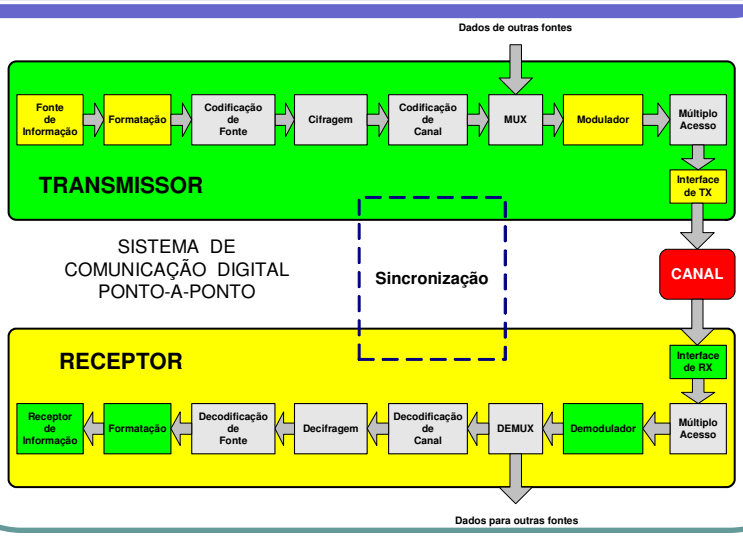
Exemplo Data Sheet

Transmissão Digital

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

Transmissão Digital

Transmissão Digital



Transmissão Digital

- <u>Vantagens</u>
  - 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

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

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

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

- 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 ?

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

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

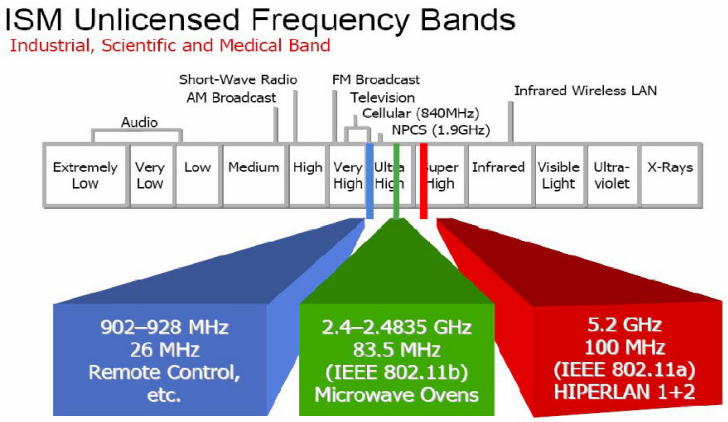
Espectro de Radiofreqüências

Regulamentação de Uso
(Aspectos Legais)

Espectro de Radiofreqüências

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

Espectro de Radiofreqüências



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

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

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

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

  - Tabela 1 ANATEL
  - Tabela 2 ANATEL

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.

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

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 5,7 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

- 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

- 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

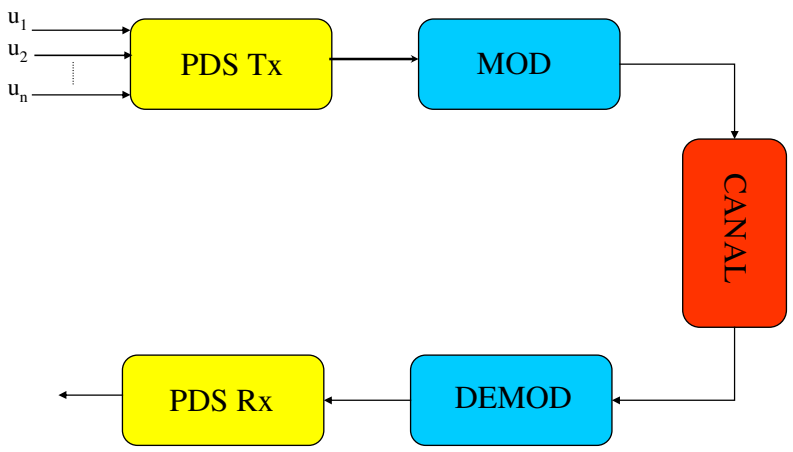
- Faixa de 2,6 GHz
  - Faixa destinada para Serviço de Distribuição de Sinais Multiponto Multicanal (MMDS).
  - Resolução 236 (6/10/2000)
    - Faixa 2170-2182MHz para canal de retorno (480 canais de 25kHz com possibilidade de agregação).
    - Faixa 2500-2686MHz (31 blocos de 6MHz) para o serviço.
  - 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

Comunicações Móveis



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

Modelos de Canal

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

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 ?

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.

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

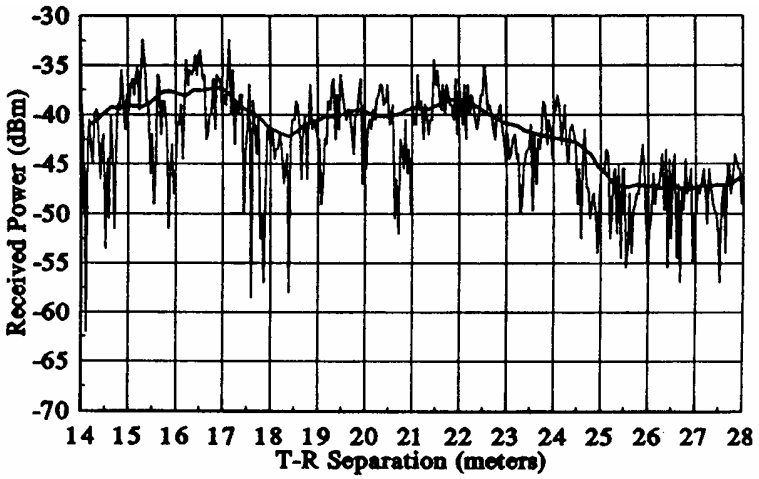
Modelos de Pequena Escala

- 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.

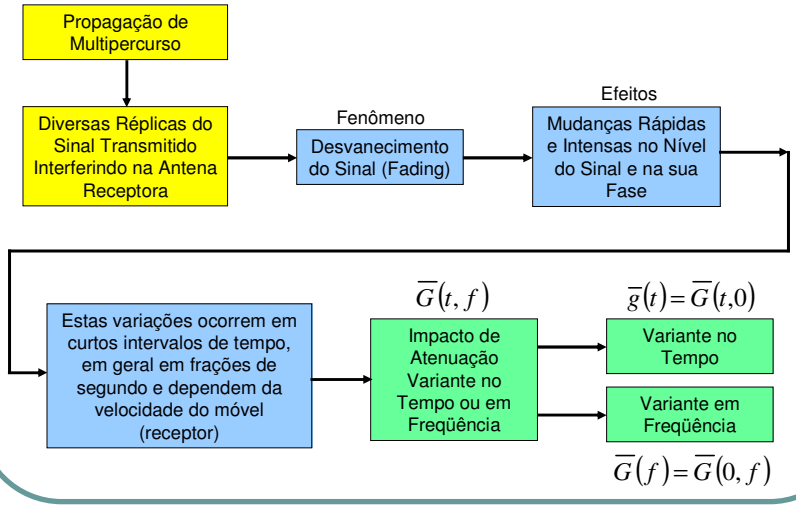
Fenômeno de Desvanecimento

- 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 ?

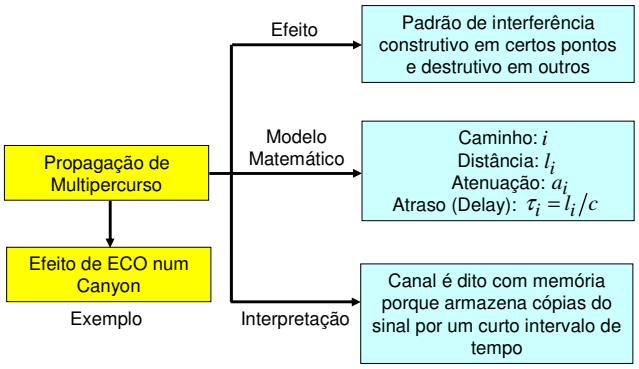
Exemplo



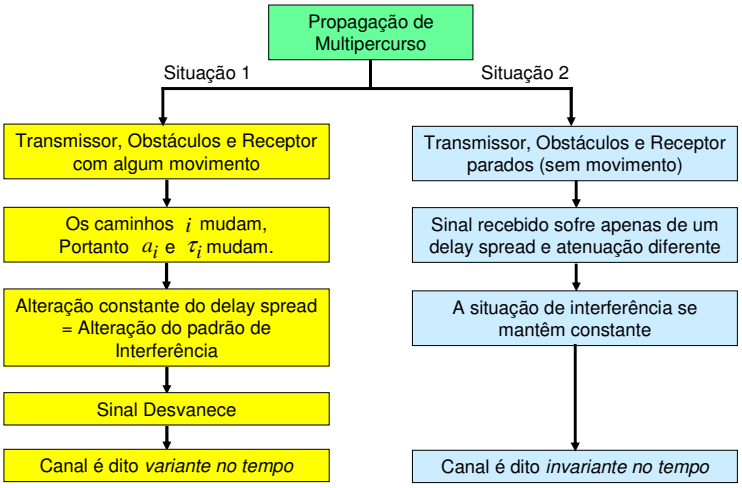
Modelos de Canais de Rádio



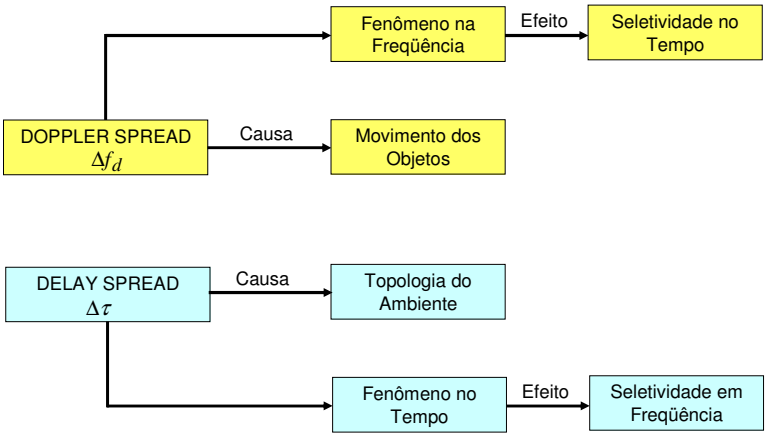
Modelos de Canais de Rádio



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

- 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

- 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 τ_{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

- 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

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

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

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

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

λ = 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
  - Perda de Percurso (Path Loss)

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

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

Propagação no Espaço Livre

- 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

- 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
  - 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
  - Potência do transmissor $P_t = 50\ \text{W}$
  - Ganho das antenas $G_t = G_r = 1$
  - Freqüência da portadora $f_c = 900\ \text{MHz}$

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

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 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 do transmissor (dBW)

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

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

Propagação no Espaço Livre

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

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

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

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 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 $d = 10\ \text{km}$

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

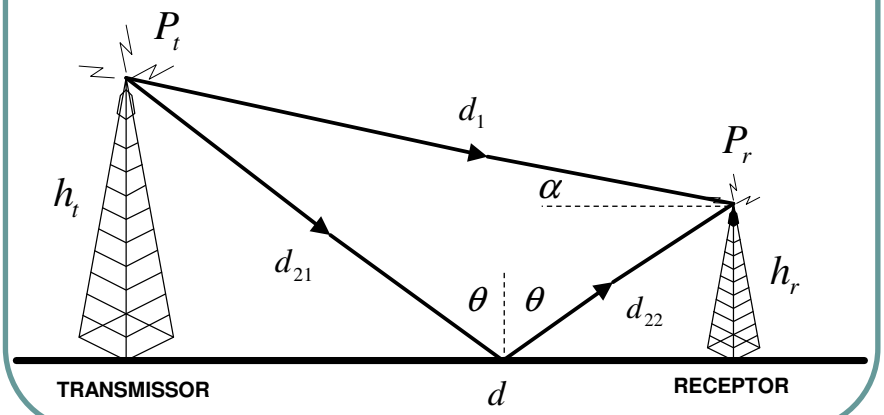
$$P_r(10\ \text{km}) = -64{,}5\ \ \text{dBm}$$

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)



Modelo de 2 Raios

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

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

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

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

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)

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

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

- 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

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

- 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

- <u>Log-Distance Model</u>

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

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

- X_σ é uma variável aleatória com distribuição normal (em dB), média zero e variância σ^2

Modelos Empíricos e Semi-Empíricos

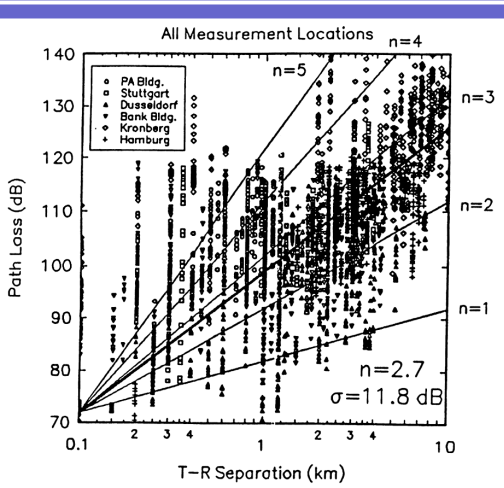


Figure 4.17 Scatter plot of measured data and corresponding MMSE path loss model for many cities in Germany. For this data, $n = 2.7$ and $\sigma = 11.8$ dB [from [Sei91] © IEEE].

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

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

Referência

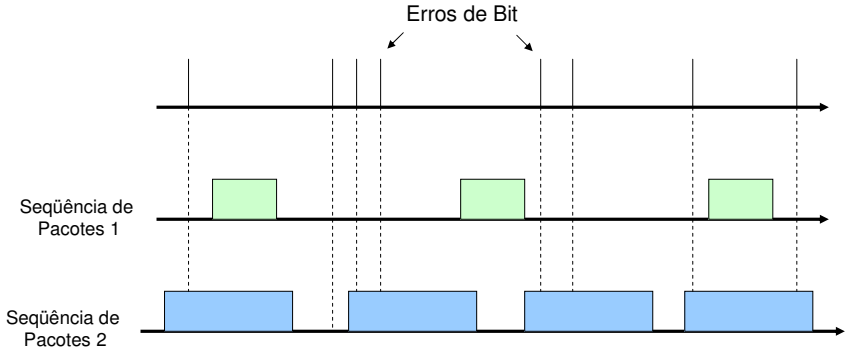
- *A Gilbert-Elliot Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation*, Jean-Pierre Ebet and Andreas Willig, Telecommunication Networks Group, Technical University Berlin, Berlin, March 1999.

Introdução

- 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)

Introdução

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



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.

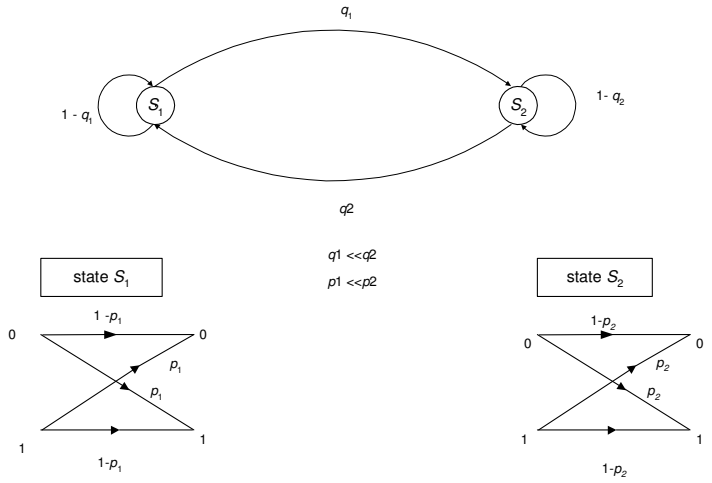
Canal de Rádio

- 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

- 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



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

- 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

- 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

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