

Comunicações Móveis

Hugerles S. Silva, PhD

Universidade de Brasília (UnB)

Evolução dos Sistemas de Comunicações

- Os primeiros sistemas celulares a operarem tinham como principais características a transmissão da voz.
 - ▶ Canais de voz: modulação em frequência (FM).
 - ▶ Sinalização: modulação FSK (*Frequency Shift Keying*).
- A técnica de acesso ao meio era puramente FDMA (30 kHz).
- Baseiam-se no AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), desenvolvido nos Estados Unidos na década de setenta.
- AMPS (EUA e Brasil), NTT (Japão), etc.

Evolução dos Sistemas de Comunicações

- Os sistemas celulares de primeira geração europeu eram incompatíveis devido às diferentes frequências e protocolos de comunicação utilizados.
- A própria capacidade das redes era limitada, devido ao fato de ser analógica.
- Taxas de dados: 2,4 kbps.
- Usuários faziam chamadas em um único país (sem roaming internacional).

Evolução dos Sistemas de Comunicações

- A segunda geração de sistemas móveis celular surgiu das técnicas digitais para codificação da voz e compressão.
- A técnica de acesso ao meio era TDMA. Essa técnica consiste em dividir o tempo de um canal em *slots* de tempo.
- A segunda geração de sistemas móveis oferece uma capacidade superior em mais de três vezes aos primeiros sistemas celulares.
- Serviços: SMS.
- Taxas de dados: 64 kbps.
- Sistema semi-global.

Evolução dos Sistemas de Comunicações

- A Europa procurou convergir em suas pesquisas para o padrão GSM.
- O padrão GSM permitia a adoção de equipamentos de diferentes fabricantes. Resolvia o problema de incompatibilidade!
- Erros na transmissão são tratados através de: i) Códigos de bloco e convolucionais, ii) *Interleaving*.

Evolução dos Sistemas de Comunicações

■ 2,5G: Sistemas celulares que oferecem serviços de dados a taxas de até 384 kbps. São um passo intermediário na evolução para 3G.

■ 3G: Sistemas celulares que oferecem serviços de dados por pacotes e taxas de até 2 Mbps.

- ▶ Serviços: streaming de vídeo.
- ▶ Qualidade de voz superior vídeo-conferência
- ▶ Aplicações: e-mail, jogos, compras online, home-banking
- ▶ Roaming global

Evolução dos Sistemas de Comunicações

■ 4G:

- ▶ “Beyond 3G” (Após 3G)
- ▶ “Anywhere, anytime” (Qualquer lugar, sempre conectado)
- ▶ Interconectividade.
- ▶ Taxas de 100 Mbit/s a 1 Gbit/s.

■ Modulação: QPSK, 16QAM ou 64QAM. Com 64QAM, cada elemento de recurso transporta 6 *bits*.

■ Uso de OFDM/arranjo de antenas.

Evolução dos Sistemas de Comunicações

- Comercialmente no mundo (EUA, Canadá, etc) desde de 2011
- Brasil (Copa das Confederações – 2013): Salvador, Recife, Fortaleza, Brasília, Belo Horizonte e Rio de Janeiro.
- Taxas de dados: 100 Mbit/s (móvel) e 1 Gbps (fixo).
- Banda de frequência: 5–20 MHz (escalonável).

Evolução dos Sistemas de Comunicações

■ 5G

- ▶ Taxa de dados: 1 Gbps (móvel) e 10 Gbps (baixa mobilidade).
- ▶ Baixa latência: 1ms.
- ▶ Alta densidade de dispositivos (IoT).
- ▶ Alta densidade de tráfego: Até 1000 vezes (4G).
- ▶ Confiabilidade: Disponibilidade de 99,999%.
- ▶ Tempo de vida das baterias: 10 anos para IoT.
- ▶ Baixo consumo de energia: Redução de 90%.

Evolução dos Sistemas de Comunicações

■ Três palavras-chaves em 5G:

- ▶ eMBB (*enhanced Mobile BroadBand*).
- ▶ URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communication*).
- ▶ mMTC (*massive Machine-Type Communication*).

Sistemas de Rádio Móvel Convencional

- Os primeiros sistemas de comunicação por rádio móvel possuíam uma única estação base.
 - ▶ Antena posição em uma região elevada.
 - ▶ Alta potência de transmissão
 - ▶ Tráfego limitado.

Sistemas Móvel Celular

- A princípio, uma determinada região ou área de cobertura geográfica a ser atendida pelo serviço móvel celular é dividida em sub-regiões, que são chamadas células.
- A célula é a área no sistema móvel celular, na qual canais específicos (ou estações radiobase específicas) são usadas preferencialmente (de forma não exclusiva!).

Sistemas Móvel Celular

■ A extensão da área de cobertura de uma ERB é dependente dos seguintes fatores:

- ▶ Potência de saída do rádio transmissor.
- ▶ Altura e localização da antena.
- ▶ Tipo da antena.
- ▶ Topografia da área (sombreamento).

Sistemas Móvel Celular

■ Utilizam o reuso de um mesmo conjunto de canais para conseguir atender o tráfego pelo uso de um grande número de ERBs.

- ▶ Célula (região iluminada por uma ERB).
- ▶ Área celular (área coberta).

■ Reuso de frequências: uso da mesma frequência (canal) na cobertura de diferentes áreas.

Sistemas Móvel Celular

- O reuso de frequência é feito dividindo todo o espectro disponível em grupos de frequências.
 - ▶ É necessário garantir uma separação adequada.
 - ▶ As células que contêm o mesmo grupo de canais são denominadas de co-células.
- Interferência co-canal: interferência entre células que usam a mesma frequência (limites toleráveis).

Sistema Móvel Convencional × Sistema Móvel Celular

■ Sistema Móvel Convencional

- ▶ Baixa densidade de tráfego.
- ▶ Sem reuso de frequências.
- ▶ Transmissores de alta potência montados em altas estruturas.
- ▶ Grande área de cobertura.
- ▶ Capacidade limitada pelo ruído.

Sistema Móvel Convencional × Sistema Móvel Celular

■ Sistema Móvel Celular

- ▶ Alta densidade de tráfego.
- ▶ Permite o reuso de frequências.
- ▶ Transmissores de baixa potência montados em estruturas mais baixas.
- ▶ Pequena área cobertura.
- ▶ Capacidade limitada pela interferência entre usuários.

Estrutura Celular

- **Cluster:** conjunto de células em que não há reutilização de frequências.
- Estruturas mais empregadas (antenas omnidirecionais — células hexagonais)

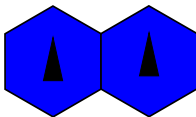


Figure: Uma célula.

Estrutura Celular

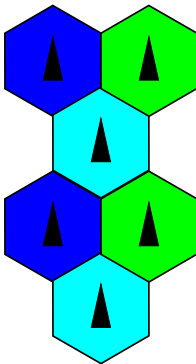


Figure: Três células.

Estrutura Celular

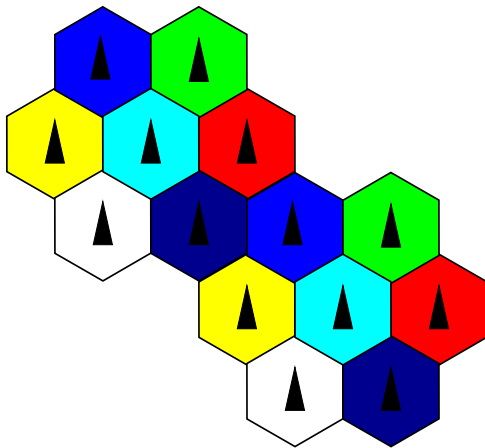


Figure: Sete células.

Estrutura Celular

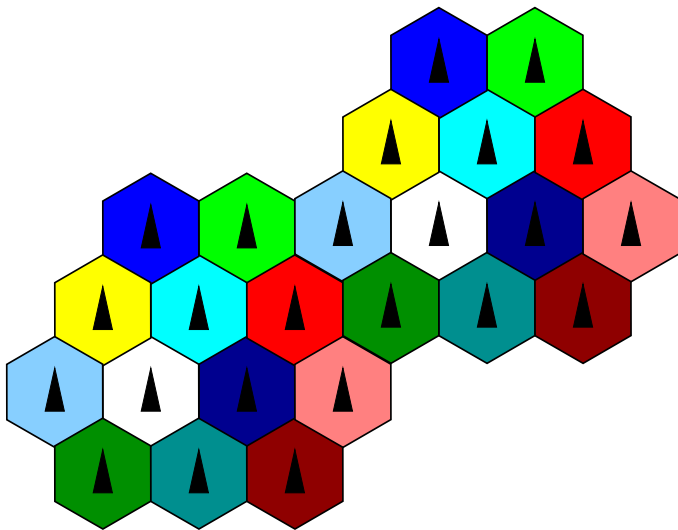


Figure: Doze células.

Tipos de Células

■ **Célula omnidirecional:** Nas células omnidirecionais, a ERB é equipada com uma antena omnidirecional que transmite a mesma potência em todas as direções, no plano azimutal, formando assim uma área de cobertura aproximadamente circular, cujo centro é a própria ERB. Para efeito gráfico, essa célula é representada por um hexágono.

■ **Célula setorizada:** Nas células setorizadas, a ERB é equipada com antenas diretivas, de forma que cada uma cubra determinada região (60° ou 120°).

Tipo de Células

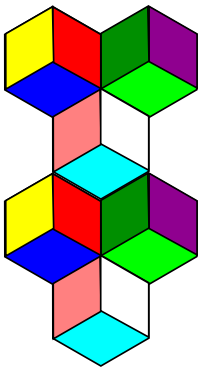


Figure: Célula setorizada (120°).

Tipo de Células

- Número de células por cluster ($N = 1, 3, 4, 7, 12, \dots$)

$$N = i^2 + ij + j^2, \quad i, j \text{ inteiros} \quad (1)$$

- Distância de reuso de frequência

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (2)$$

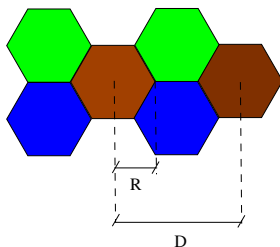


Figure: Exemplo de reuso.

Capacidade de Tráfego e Interferência Co-canal

N	D/R	Canais/célula	Capacidade de tráfego	Qualidade de transmissão
1	1,73	360	Mais alta	Mais baixa
3	3,00	120	↑	—
4	3,46	90	—	—
7	4,58	51	—	↓
12	6,00	30	Mais baixa	Mais alta

Capacidade de Tráfego e Interferência Co-canal

- Seria interessante aumentar consideravelmente o valor de N em um projeto real?

Capacidade de Tráfego e Interferência Co-canal

- A qualidade da transmissão e a capacidade de tráfego operam em sentido opostos. Além disso, quanto menor o conjunto de células, menor o custo do sistema. A determinação da relação D/R é um compromisso entre esses fatores.
- O aumento de N reduz a eficiência espectral do sistema.

Reuso de Frequência: Exemplo

■ **Exercício:** A relação D/R é utilizada na avaliação de desempenho de sistemas móveis. Para uma relação $D/R = 6$, calcule o número de células por cluster e faça um exemplo de distribuição de frequências (f_1, f_2, \dots, f_N) com dos clusters. A frequência f_1 deverá estar em uma célula na interface entre os clusters.

Reuso de Frequência: Exemplo

■ A expressão que relaciona a razão D/R com o número de células no cluster é

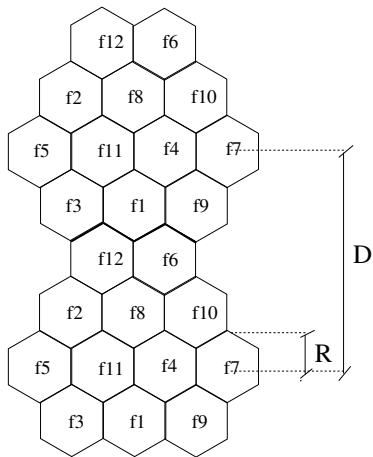
$$D/R = \sqrt{3N}. \quad (3)$$

Logo,

$$N = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{R} \right)^2 = \frac{1}{3} \cdot 6^2 = \frac{36}{3} = 12. \quad (4)$$

Assim: $N = 12$ células.

Reuso de Frequência: Exemplo



Relação Sinal-Interferência

■ Em um modelo de perda de propagação exponencial, a potência recebida é dada por

$$P_r = P_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-\gamma}, \quad (5)$$

em que P_0 é a potência à distância d_0 , d é a distância entre o transmissor e o receptor e γ é o expoente de propagação.

Relação Sinal-Interferência

■ A potência recebida por um terminal de dados que se encontra na borda de uma célula, a partir de uma ERB no centro da célula é dada por:

$$S = P_0 \left(\frac{R}{d_0} \right)^{-\gamma}. \quad (6)$$

Relação Sinal-Interferência

■ Vamos supor que a distância das ERBs situadas no centro de cada có-célula até um usuário na borda da célula central do arranjo de interesse é aproximadamente D .

■ Para células não-setorizadas, a potência de interferência produzida pelas 6 ERBs e recebida por este terminal é dada por

$$I = 6P_0 \left(\frac{D}{d_0} \right)^{-\gamma}. \quad (7)$$

Relação Sinal-Interferência

■ A relação sinal-interferência é igual a:

$$\begin{aligned}\frac{S}{I} &= \frac{1}{6} \left(\frac{D}{R} \right)^\gamma \\ &= \frac{1}{6} (3N)^{\frac{\gamma}{2}}.\end{aligned}\tag{8}$$

Relação Sinal-Interferência

■ Para células setorizadas,

$$I = 2P_0 \left(\frac{D}{d_0} \right)^{-\gamma}. \quad (9)$$

Deste modo,

$$\begin{aligned} \frac{S}{I} &= \frac{1}{2} \left(\frac{D}{R} \right)^{\gamma} \\ &= \frac{1}{2} (3N)^{\frac{\gamma}{2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Células Omnidirecionais x Células Setorizadas

- Para células não-setorizadas,

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{6} (3N)^{\frac{\gamma}{2}}. \quad (11)$$

- Para células setorizadas,

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{2} (3N)^{\frac{\gamma}{2}}. \quad (12)$$

- Ganho de aproximadamente 4,6 dB.

Questões de Projeto

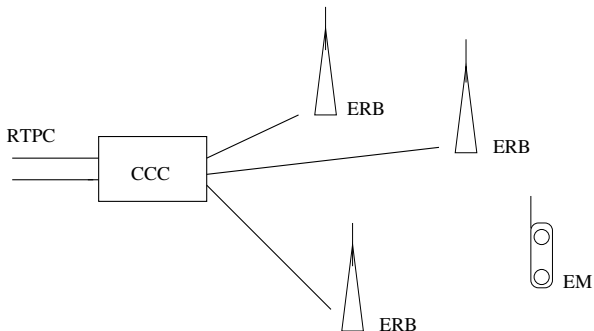
- Na prática, fixa a S/I necessária para um bom desempenho do sistema e determina o número de células no cluster (ou fator de reuso)
- **Exercício:** O padrão de comunicação celular AMPS para ter um bom funcionamento requer que um determinado canal apresente S/I superior a 18 dB. Supondo $\gamma = 4$, qual é o fator de reuso de frequência necessário para satisfazer a relação sinal-ruído mínima? Considere células setorizadas em 3 setores.

Constituição do Sistema Móvel Celular

■ Um sistema celular básico é constituído de três elementos, além das conexões entre esses elementos componentes básicos.

- ▶ Terminal móvel (TM).
- ▶ Estação radiobase (ERB).
- ▶ Centro de comutação e controle (CCC).

Constituição do Sistema Móvel Celular



Terminal Móvel

- A estação ou terminal móvel (EM ou TM) fornece a interface aérea para o usuário do sistema celular.
- Composição:
 - ▶ Unidade de controle.
 - ▶ Transceptor.
 - ▶ Antena.
- Funções:
 - ▶ Transmite e recebe sinais de voz, possibilitando a conversação.
 - ▶ Transmite e recebe sinais de controle, permitindo o estabelecimento da chamada.

Terminal Móvel

■ Tipos:

- ▶ Instaladas em carro (telefone celular veicular);
- ▶ Portáteis (telefone celular portátil);
- ▶ Instaladas em área rural (telefone celular rural).

■ A supervisão da qualidade do sinal que chega aos terminais móveis é realizada pela medida do nível de intensidade dos sinais recebidos das estações móveis, no caso analógico, e pela medida da taxa de erro (*Bit Error Rate* – BER) em sistemas digitais.

Estação Rádio-Base

- São funções básicas das ERBs:
 - ▶ Receber as instruções da CCC;
 - ▶ Prover a interface rádio entre as EMs e o sistema;
 - ▶ Manter controle e informar as EMs em sua área de cobertura;
 - ▶ Verificar e reportar a qualidade de sinal das chamadas em andamento.

Central de Comutação e Controle

- A CCC é considerada principal elemento do sistema móvel celular.
- Coordena todas as atividades de todas as estações base.
- Comuta e controla o *handoff*.
- Interliga as várias ERBs do sistema.
- Controla a tarifação da chamada.
- Faz o controle e comutação dos canais.

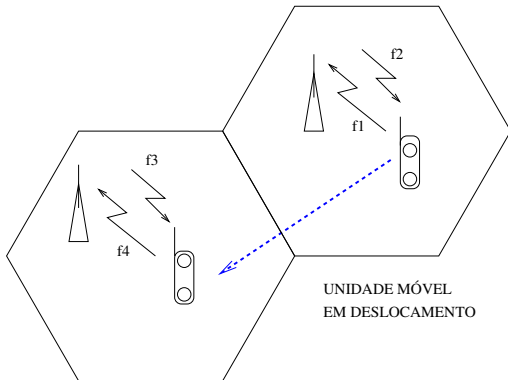
Mobilidade

■ *Handoff*

- ▶ Função que permite manter a continuidade de uma conversação quando o usuário passa de uma célula para outra. O handoff está centralizado no CCC e no AMPS causa uma interrupção na comunicação inferior a 0,5 s.

Mobilidade

- *Handoff*



Mobilidade

■ Tipos de *Handoff*

- ▶ Handoff brusco (*hard handoff*): TDMA
- ▶ Handoff suave (*soft handoff*): CDMA (entre células)
- ▶ Handoff super-suave (*softer handoff*): CDMA (entre setores)

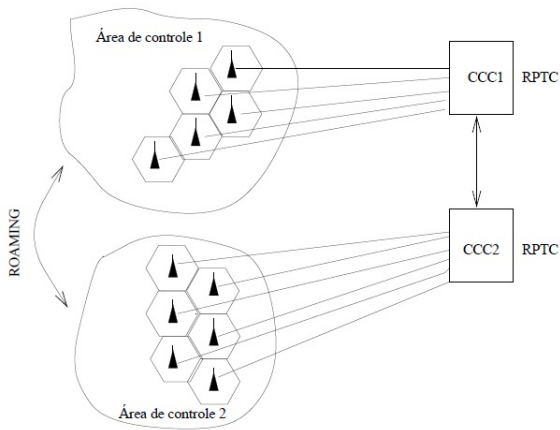
Mobilidade

■ *Mobilidade*

- ▶ Uma EM desloca-se de uma área de controle para outra.
- ▶ O usuário mantém o serviço em uma área diferente daquela em que ele mantém o seu registro.

Mobilidade

■ Roaming



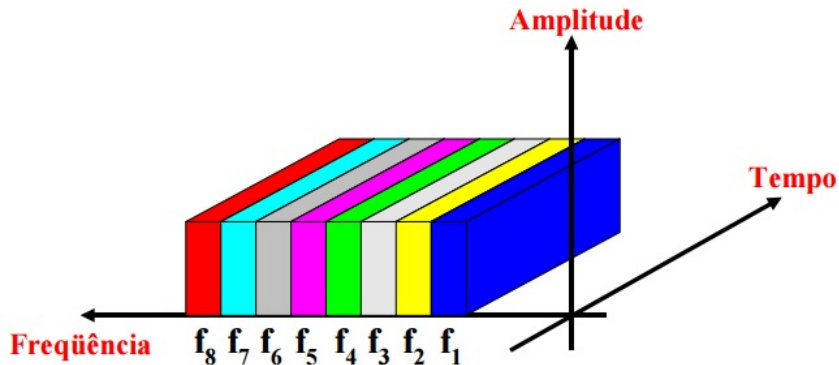
Acesso Múltiplo

- ▶ A alocação eficiente dos recursos entre os usuários é um aspecto de projeto chave em sistemas de comunicações.
- ▶ As técnicas de acesso múltiplo permitem a obtenção de canais dividindo as dimensões de sinalização total e atribuindo estes para diferentes usuários.
- ▶ Os métodos mais comuns para dividir as dimensões de sinalização são: i) FDMA, ii) TDMA e iii) CDMA.
- ▶ A escolha de uma técnica de acesso depende das aplicações do sistema, características de tráfego dos usuários, exigências de desempenho, etc.

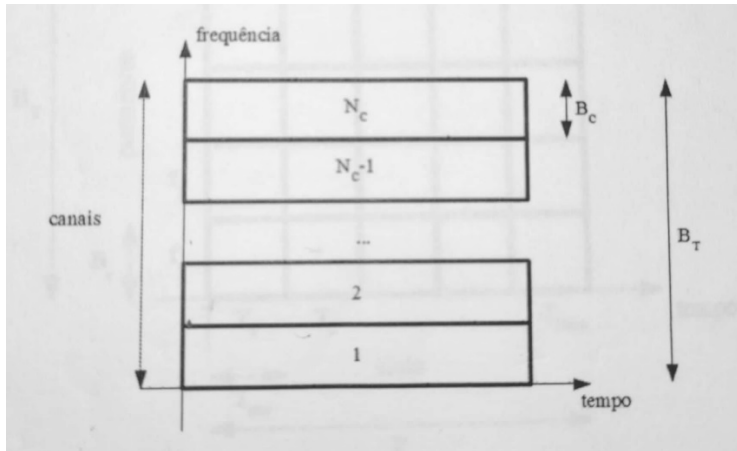
Técnicas de Acesso Múltiplo: FDMA

- ▶ Em FDMA, as dimensões de sinalização são divididas ao longo do eixo da frequência em canais não sobrepostos que serão acessados pelos usuários.
- ▶ Os primeiros sistemas celulares utilizam a técnica FDMA como técnica de acesso ao meio.
- ▶ Os canais frequentemente tem banda de guarda entre eles para compensar a interferência de canais adjacentes.
- ▶ Se os canais são suficientemente banda estreita, então os canais individuais não irão estar sujeito ao desvanecimento seletivo em frequência.

Técnicas de Acesso Múltiplo: FDMA



Exemplo: FDMA



Número de Canais de Tráfego por Célula

- ▶ A banda disponível B_T é dividida em canais de banda B_c . Assim, o número de canais de tráfego disponível por grupos de células é dado por $N_c = B_T/B_c$.
- ▶ O fator de reuso é determinado pela relação S/I mínima desejada. Portanto, o fator de reuso (N) impõe para cada célula um determinado número de canais. Logo,
$$N_u = B/(B_c N) = N_c/N.$$

Exemplo: FDMA

- Uma operadora de telefonia celular utiliza o padrão AMPS na frequência de portadora de 850 MHz dispõe de uma banda de 12,5 MHz para o enlace direto e mais 12,5 MHz para o reverso. Sabendo que cada canal de tráfego utiliza 30 KHz, determine o número de canais de tráfego por célula, supondo que $S/I \geq 18$ dB.

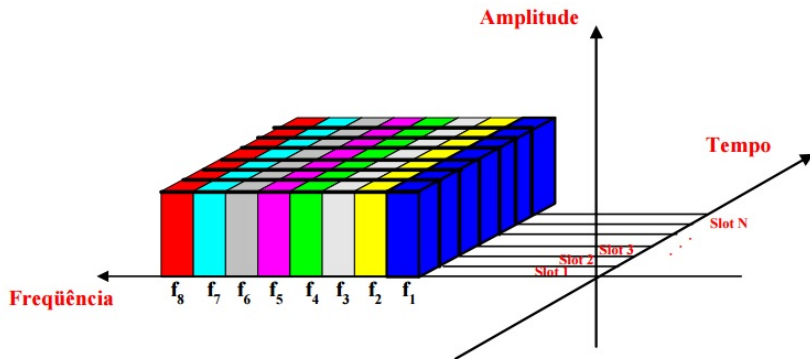
Características do FDMA

- ▶ Os canais são separados no domínio da frequência, de tal modo que cada canal utiliza a sua própria portadora.
- ▶ A transmissão é contínua no tempo, diferentemente do esquema TDMA em que a transmissão ocorre em surtos.
- ▶ A técnica FDMA continua ainda a ser muito utilizada no presente.

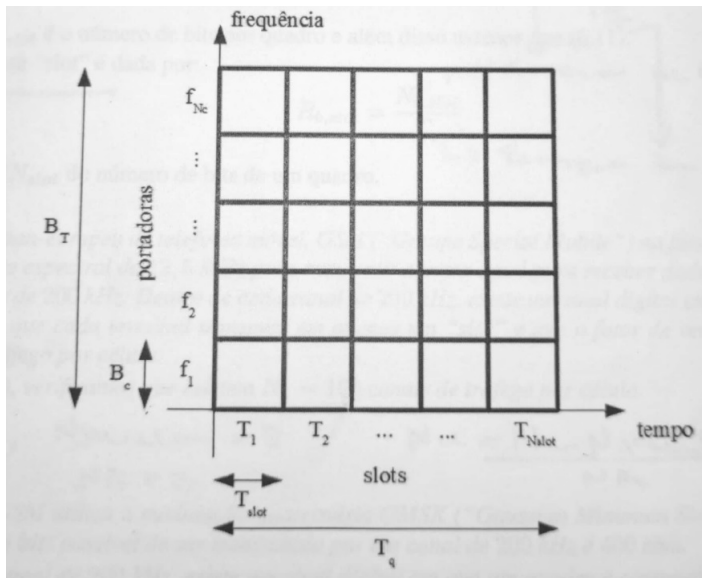
Técnicas de Acesso Múltiplo: TDMA

- ▶ O esquema TDMA consiste da divisão da banda disponível no sistema em canais com largura espectral menor e em cada canal existem um sinal digital composto de intervalos temporais.
- ▶ Facilidade de atribuir múltiplos canais para um único usuário.
- ▶ Ao menos para canais UL, há uma dificuldade na sincronização para os diferentes usuários. A sincronização é tipicamente coordenada pela ERB.
- ▶ TDMA utiliza uma banda de guarda entre os canais, de modo a compensar erros de sincronização e multipercursos.

Técnicas de Acesso Múltiplo: TDMA



Exemplo: TDMA



Número de Canais de Tráfego por Célula

- ▶ A banda disponível B_T é dividida em canais de banda B_C .
Assim, o número de canais de tráfego disponível por grupos de células é dado por $N_c = B_T/B_C$.
- ▶ Em cada banda existe um sinal digital com N_{slots} slots.
Supondo que cada usuário utiliza apenas 1 "slot" e para um fator de reuso N , então o número de canais de tráfego por célula é dado por: $N_u = BN_{slot}/(B_C N)$.

Exemplo: TDMA

- ▶ O padrão GSM utiliza uma largura espectral de 12,5 MHz para transmitir e outra igual para receber dados. Esta banda de 12,5 MHz é dividida em 62 canais de 200 kHz. Dentro de cada canal de 200 kHz existe um sinal digital em que um quadro é composto de 8 slots. Supondo que cada terminal transmite em apenas um slot e que N é igual a 3, determine o número de canais de tráfego por célula.
- ▶ **RESPOSTA:** 166 canais de tráfego por célula.

Características do TDMA

- ▶ Existe uma estrutura de quadros digitais.
- ▶ Para todos os slots de uma mesma faixa existe uma única subportadora.
- ▶ No esquema TDMA a transmissão ocorre em surtos e não de forma contínua.

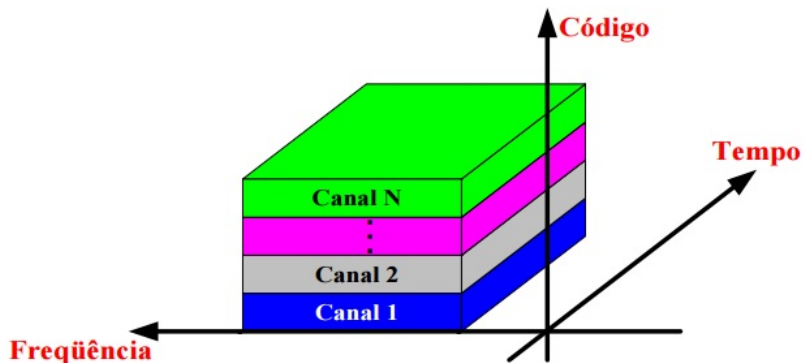
Técnicas de Acesso Múltiplo: CDMA

- ▶ Em CDMA, os sinais de informação dos diferentes usuários são modulados por códigos com espalhamento ortogonal ou não.
- ▶ Os sinais espalhados simultaneamente ocupam o mesmo tempo e largura de faixa.
- ▶ O receptor usa a estrutura de espalhamento do código para separar os diferentes usuários.
- ▶ A forma mais comum de CDMA é o espalhamento espectral multiusuário com sequência direta (DS) ou salto em frequência (FH).
- ▶ Canais DL usam códigos de espalhamento ortogonais. Já canais UL utilizam, geralmente, códigos não ortogonais.

Técnicas de Acesso Múltiplo: CDMA

- ▶ Uma vantagem de CDMA não ortogonal é que uma pequena coordenação dinâmica dos usuários no tempo e na frequência é necessária.
- ▶ Códigos não ortogonais causam interferência mútua entre os usuários.
 1. O alto nível de interferência pode degradar o desempenho do sistema para todos os usuários.
- ▶ O esquema CDMA não ortogonal requer o controle de potência em canais UL para compensar o efeito perto-longe.
- ▶ Detecção multiusuário também pode ser utilizada para redução da interferência.

Técnicas de Acesso Múltiplo: CDMA



Técnicas de Acesso Múltiplo: SDMA

- ▶ SDMA usa a direção como outra dimensão no espaço de sinais, que pode ser dividida e atribuída a diferentes usuários.
- ▶ Na prática, SDMA é implementada frequentemente usando arrays de antenas setorizadas, cuja faixa angular de 360° é dividida em N setores.
 1. Provê alto ganho direcional em cada setor.
 2. Diminui a interferência entre os setores.
- ▶ A técnica de acesso múltiplo CDMA é bastante utilizada em comunicações celulares.

Técnicas de Acesso Múltiplo Híbridas

- ▶ Muitos sistemas usam uma combinação de diferentes esquemas de múltiplo acesso.
- ▶ A escolha da técnica de múltiplo acesso irá depender das exigências do sistema, custo e complexidade.
- ▶ Questão de projeto: como realizar uma comparação justa entre os esquemas FDMA, TDMA e CDMA?

O Canal de Comunicações Móveis

■ Em geral, os modelos para canais de comunicação sem fio classificam-se em:

- ▶ Modelos determinísticos (modelo físico exato do meio)
- ▶ Modelos estatísticos (modelo empírico).
- ▶ Modelos teóricos (campo interessante de pesquisa).

■ Complexidade da análise: Infinitos parâmetros para descrever um ambiente.

O Canal de Comunicações Móveis

■ Desvanecimento

- ▶ Atenuações de até 40 dB
- ▶ Montanhas, túneis, espelho d'água, etc
- ▶ Multipercurso e sombreamento.

■ Ruído

- ▶ A assunção gaussiana não é adequada!

■ Interferência co-canal e entre canais adjacentes

Fórmula de Friis

- Transmissão no espaço-livre
- Densidade de potência considerando uma casca esférica hipotética de raio d

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

W_r – potência recebida

W_t – potência transmitida

G_r (ou G_t) – ganho da antena receptora (ou transmissora)

λ – comprimento de onda

d – distância

Perdas na Propagação

■ Perdas

$$L_p = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

■ Em decibéis (dB)

$$L = -10 \log \frac{W_r}{W_t} = -10 \log W_r + 10 \log W_t$$

■ Perda no espaço-livre

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

$$L = -10 \log G_t - 10 \log G_r - 20 \log \lambda + 20 \log d + 21,98$$

O Canal de Comunicações Móveis

- Qual a importância da equação de Friis?

O Canal de Comunicações Móveis

- Qual a importância da equação de Friis?
 - ▶ Descreve as perdas no espaço livre relacionadas à potência transmitido e recebida por antenas genéricas.
 - ▶ Fundamental para o planejamento do enlace.
 - ▶ Requisitos necessários para que o balanço da equação

$$L = -10 \log G_t - 10 \log G_r - 20 \log \lambda + 20 \log d + 21,98$$

forneça potência suficiente ao receptor.

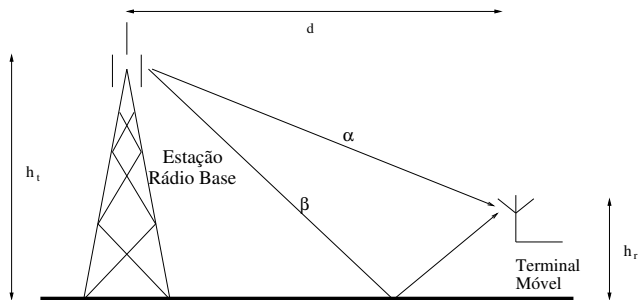
Exercício

■ Nos enlaces de microondas terrestres, o requisito de direcionalidade das antenas de transmissão e recepção limita a distância de separação entre transmissor e receptor a cerca de 40 km. Se um transmissor, transmitindo a 4 GHz e com potência de saída de 100 mW, for utilizado em conjunto com antenas (transmissora e receptora) de área efetiva de $0,5 \text{ m}^2$, qual será o nível de potência recebido em dBm?

O Canal de Comunicações Móveis

- A equação para propagação em espaço livre é simplista.
 - ▶ Desconsidera o efeito da superfície da terra.
 - ▶ Considera a existência de um percurso livre de obstáculos.
- **Pergunta:** em geral, qual modelo de sistema de comunicação atende as condições acima?
- A incorporação no modelo da dependência da altura da antena faz sentido intuitivo?

Modelo de Dois Raios (Lee)



Modelo de Dois Raios (Lee)

- Equação de propagação plano-terra:

$$W_R = W_T \cdot G_T \cdot G_R \left(\frac{h_T \cdot h_R}{d^2} \right)^2$$

- Difere da equação da propagação no espaço livre de três formas:

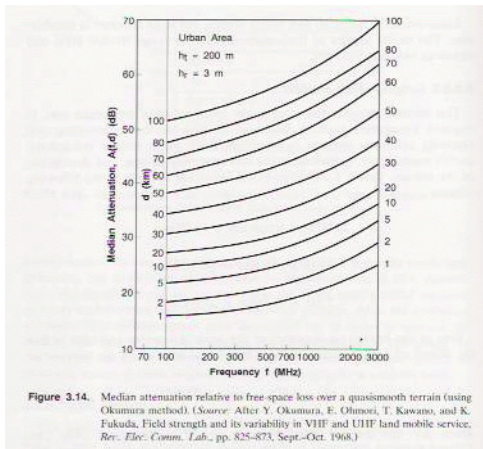
- ▶ É independente da frequência.
- ▶ Exibe uma dependência com o inverso da quarta potência da distância.
- ▶ Evidencia o efeito das alturas das antenas de transmissão e recepção nas perdas de propagação.

Exercício

■ Desenhe e compare a perda de percurso (em dB) para os modelos de propagação no espaço livre e plano-terra em função da distância, considerando uma onda de 800 MHz, na escala logarítmica de 1m a 400 km. Presumo que as antenas são isotrópicas e que foram colocadas na mesma altura, 10 m.

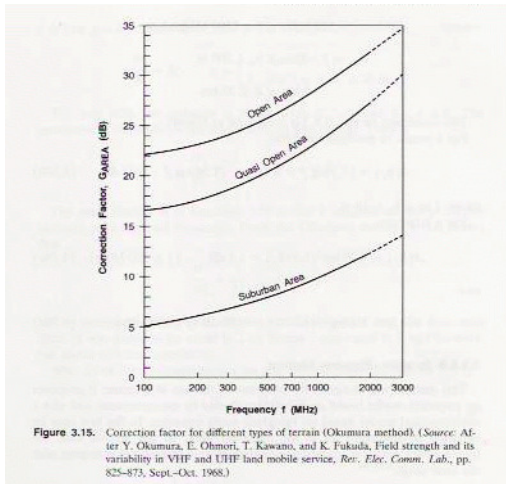
Método de Okumura

■ Atenuação média: $A(f, d)$



Método de Okumura

■ Fator de correção: G_{area}



Método de Okumura

- Correção (Alturas das antenas)

- Antena transmissora

$$G(h_t) = 20 \log(h_t/200) \quad h_t > 10 \text{ m}$$

- Antena receptora

$$G(h_r) = 10 \log(h_r/3) \quad h_r < 3 \text{ m}$$

$$G(h_r) = 20 \log(h_r/3) \quad 3 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$$

Fórmula de Hata

- O Método de Okumura não pode ser automatizado de forma eficiente (consulta a várias curvas)
- Hata desenvolveu uma fórmula empírica baseada nos resultados de Okumura
- Perda em dB

$$L = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_T - A(h_R) \\ + (44,9 - 6,55 \log h_T) \log d$$

- Fator de correção: $A(h_r)$

$$A(h_R) = (1,1 \log f - 0,7) h_R - (1,56 \log f - 0,8) \quad [\text{cid. peq/média}]$$

$$A(h_R) = 3,2 \log^2(11,75 h_R) - 4,97 \quad [\text{cid. grandes}]$$

Exemplo

- Enlace com raio médio de 10 km
- Frequência de operação: 1 GHz
- Altura da antena transmissora: 100 m
- Altura da antena receptora: 3 m
- Antenas com ganho unitário: $G_t = G_r = 1$
- Cidade de porte médio
- Perdas de propagação:
 - ▶ Okumura: 137,96 dB
 - ▶ Hata: 148,27 dB
 - ▶ Erro: 6,95%