

PROF.: PAULO GOMES

MATÉRIA: TELE 3 – MOURA LACERDA

Conceitos em Telefonia Móvel Celular

Em sistemas de comunicações tradicionais, o objetivo básico do engenheiro projetista sempre foi o de maximizar o alcance e cobertura dos transmissores, de forma a minimizar custos de implantação e operação. Esta concepção de sistema é efetiva no caso de enlaces ponto a ponto, nos quais o uso de antenas altamente diretivas constitui-se num fator limitante da interferência intra e inter sistemas e permite, dentro de limites, o reuso de freqüências numa mesma região geográfica. É efetiva ainda no caso de sistemas unidirecionais de rádio difusão, nos quais um mesmo canal serve um grande número de usuários. Já no caso de sistemas ponto-área bidirecionais, a interferência impede a reutilização de freqüências dentro da área de cobertura limitando o número de canais disponíveis e, conseqüentemente, o número de usuários do sistema.

O conceito de um sistema celular, utilizando a redução geográfica do alcance para permitir o reuso de espectro de freqüências foi proposto inicialmente na década de 1950 pelo Bell Labs para aplicação em um sistema de comunicações móveis. Entretanto, a necessidade de interconectar usuários do sistema móvel servidos por diferentes transceptores (estações rádio base) e usuários do sistema móvel a usuários do sistema fixo, implicava num sistema de controle que requeria grande capacidade de computação, inclusive no terminal móvel (unidade do usuário). Assim, embora extremamente bem concebido, o sistema não era implementável com a tecnologia disponível na época.

Um sistema de telefonia móvel convencional seleciona um ou mais canais de RF para utilização em áreas geográficas específicas. A área de cobertura é planejada para ser a mais ampla possível, o que implica em uma potência de transmissão elevada.

No sistema de telefonia móvel celular, a área de cobertura é dividida em regiões chamada células, de modo que a potência transmitida seja baixa e as freqüências disponíveis venham a ser reutilizadas.

Fundamentos e Conceitos Básicos

Segue um comparativo listando as diferenças básicas entre sistemas móveis convencionais e sistemas celulares.

Sistemas móveis convencionais	Sistemas celulares
- baixa densidade de usuários	- alta densidade de usuários
- não reutilizam freqüências	- fazem reuso de freqüências
- alta potência de transmissão	- baixa potência de transmissão
- antenas elevadas	- antenas pouco elevadas
- grande área de cobertura	- área de cobertura dividida em células
- sem expansão modular	- expansão modular teoricamente ilimitada

A figura 1 exemplifica o conceito convencional e celular de telefonia móvel.



Figura 1 – Telefonia móvel convencional e celular

A célula é a área geográfica coberta por sinais de RF de determinada estação base. Cada célula é, em essência, um centro de radiocomunicações onde um assinante móvel pode estabelecer uma chamada para um telefone móvel ou fixo através da **Central de Comutação Móvel (MSC, ou CCC - Central de Comutação e Controle)** e da **Rede de Telefonia Pública Comutada (PSTN)**. Essa plataforma composta permite que usuários comuniquem-se entre si estando em qualquer lugar da área de cobertura, seja essa comunicação entre usuários móveis ou entre usuários móveis e fixos. O tamanho e forma da célula dependem de vários fatores, tais como **ERP (Effective Radiated Power, potência efetiva irradiada), diagrama de radiação das antenas e ambiente de propagação**. Tradicionalmente, embora o formato real das células seja altamente irregular, para efeito de projeto e gerência dos sistemas é assumida uma forma geométrica (usualmente, um hexágono), como será mais bem explicado adiante.

Todo o processo de comunicação é controlado e monitorado pela inteligência do sistema, que reside na MSC. O projeto, implementação e manutenção dessa complexa rede exige estudos de propagação de ondas de RF (rádio-freqüência), antenas, planejamento de freqüências e engenharia de tráfego.

Com o acréscimo da demanda, ou seja, aumento do número de canais necessários numa determinada região, o número de estações base pode ser aumentado (em conjunto com a diminuição da potência de transmissão), gerando assim um aumento na capacidade sem necessidade de ampliar o espectro alocado. Esse princípio fundamental é a base para todos os sistemas modernos de comunicação móvel, pois ele permite que um número fixo de canais (dado pela disponibilidade de espectro) sirva um grande número de assinantes através do reuso dos mesmos canais pela região total de cobertura.

A alocação de canais no espectro, a título de exemplo, para o padrão AMPS, sistema analógico e um dos primeiros a ser utilizados, servindo como base para os demais, o canal de rádio utiliza freqüências separadas para a transmissão da EM e para a transmissão da ERB (operação duplex). A diferença entre as duas freqüências é de 45 MHz. O sistema AMPS utiliza a faixa de 825 a 845 MHz (824 a 849 MHz no sistema estendido) para a transmissão no sentido EM - ERB e 870 a 890 MHz (869 a 894 MHz no sistema estendido) para a transmissão no sentido inverso. A maior parte dos canais (com 30 kHz de banda) é designada para conversação telefônica. Os restantes transmitem sinalização na forma digital. Tais canais são chamados *setup* e são utilizados para a troca de mensagens necessárias para estabelecer a ligação. A figura 2 ilustra a alocação de canais no espectro para o sistema AMPS.

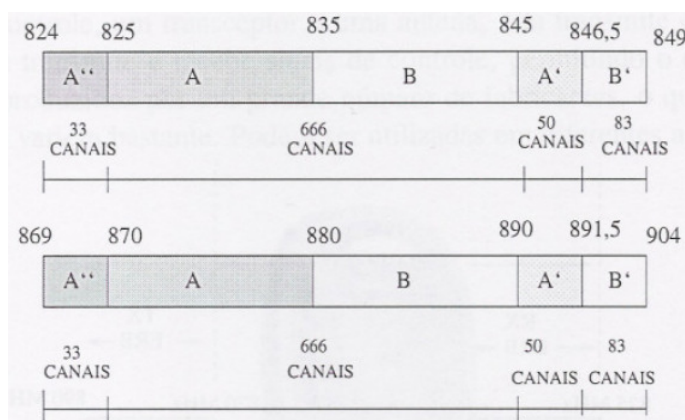


Figura 2: Alocação de Canais no Espectro AMPS

A respeito do que foi exposto e inserindo algumas novas informações, pode-se citar como características típicas de sistemas macro-celulares (células maiores que 2 km, aproximadamente):

- cerca de 650 canais disponíveis;
- potências de transmissão da base variando de 10 a 45 Watts;
- alturas de antenas da base variando de 30 a 100 m;
- raio de cobertura de célula entre 2 e 15 km;
- cada célula utiliza de 25 a 75 canais.

1.1.1 Componentes básicos de um sistema celular

Os três elementos principais em uma rede celular são:

- **Estação base**
- **Estação móvel**
- **Central de Comutação Móvel (MSC)**

Embora não conste entre os componentes da rede celular, pode-se também incluir a Rede de Telefonia Pública Comutada (PSTN), devido à sua interligação estreita com a rede de telefonia celular.

A Figura 3 esquematiza uma rede de comunicação celular, com sua interligação à PSTN. Desse ponto em diante a representação de células será feita através de hexágonos. A escolha é conveniente, como será mostrado na seqüência do texto.

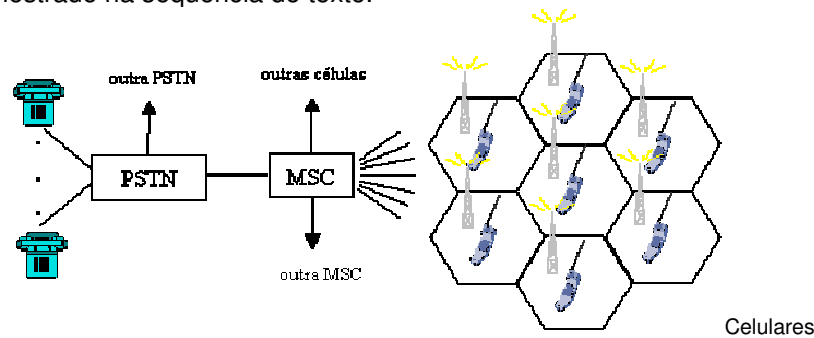


Figura 3: Rede de comunicação celular

Estação base

As estações base são responsáveis pela realização das chamadas vindas ou destinadas aos móveis localizados em cada uma das células. São o elo de conexão dos móveis com o restante do sistema. São conectadas à Central de Comutação e Controle através de ligações terrestres ou via rádio. Consistem de dois elementos básicos: à parte de rádio e o controle. O rádio engloba todo o conjunto de transmissão e recepção, além de torres e antenas. O controle é uma unidade com microprocessador responsável pelo controle, monitoração e supervisão das chamadas. A alocação e realocação de canais aos móveis também são feitas pela estação base. E ainda, a estação base monitora os níveis de sinal dos móveis para verificar a necessidade de **handoff** - que é um processo de troca de frequência das portadoras alocadas ao móvel, conforme este muda da região de cobertura de uma base para a de outra.

Os canais utilizados na comunicação entre móveis e bases são divididos em dois grupos: canais de voz e canais de controle. Nos canais de voz ocorre a conversação (ou troca de dados) propriamente dita. Pode também ser feita alguma forma de sinalização para a manutenção da chamada, como sinalização de **handoff**, por exemplo. Os canais de controle, que existem em número bem menor que os de voz, carregam as informações necessárias ao estabelecimento de uma chamada, bem como informações sobre o estado atual do sistema. Canais de voz podem ser analógicos ou digitais, dependendo do sistema. Canais de controle são sempre digitais.

Estação móvel

A unidade móvel do assinante constitui-se basicamente em um transceptor portátil de voz / dados, desenvolvido para comunicar-se com os rádios das estações base em qualquer dos canais alocados. Opera em modo *full-duplex*, possuindo um caminho de ida e um de retorno em relação à estação base, que são os *links* reverso (móvel para base) e direto (base para móvel). Além da comunicação de voz, a estação móvel também se comunica com a estação base através de suas funções de controle e sinalização. Alguns exemplos de mensagens de controle trocadas entre móvel e base são:

- pedido do móvel para acessar um canal e efetuar uma chamada;
- registro do móvel na área de serviço atual (outra MSC);
- mensagem de alocação de canal para o móvel, oriunda da estação base;
- mensagem de *handoff* oriunda da estação base, para que o móvel sintonize outro canal.

Ressalta-se nesse ponto que o que está sendo chamado de "canal" constitui-se na dupla *link* direto e reverso.

Central de Comutação Móvel (MSC) ou CCC

É o centro de comutação celular, que interliga um conjunto de células. Também provê interligação com a rede de telefonia pública (PSTN). Entre as funções desempenhadas por uma MSC estão: gerência e controle dos equipamentos da base e de conexões; suporte a múltiplas tecnologias de acesso; provisão de interligação com a PSTN; provisão de registros de assinantes locais; provisão de registros de assinantes visitantes; suporte a conexões entre sistemas; suporte de funções de processamento de chamadas e funções necessárias a tarifação.

O número de células conectadas e, portanto, controladas por uma MSC varia de acordo com as necessidades. Uma MSC pode ser responsável por uma grande área metropolitana ou por um pequeno

grupo de pequenas cidades vizinhas. A área servida por uma MSC é denominada *área de serviço* e o assinante de uma determinada área de serviço é chamado assinante *local (home)*. É possível que um assinante desloque-se para uma outra área diferente daquela na qual ele está cadastrado. Nesse caso, o assinante é denominado *visitante (roamer)*.

Características do sistema celular

Mobilidade

A mobilidade é uma das principais características dos sistemas de comunicação celular. Esse conceito significa que uma chamada celular, originada em qualquer lugar e em qualquer momento dentro da área de serviço, pode ser mantida sem interrupção enquanto o assinante está em movimento. Isso se deve ao mecanismo de *handoff*, que é um processo de troca de frequência das portadoras alocadas ao móvel, conforme este muda da região de cobertura de uma base para a de outra.

Cobertura da célula

A cobertura provida por uma célula depende de parâmetros pré-definidos como, potência de transmissão, altura, ganho e localização de antena. Vários outros fatores como, presença de montanhas, túneis, vegetação e prédios afetam de forma considerável a cobertura RF de uma base. Esses últimos fatores, obviamente, não são definidos pelo projetista de sistema e variam de uma região para outra.

Devido às características variáveis e complexas das diversas regiões a serem cobertas por sistemas celulares, vários modelos de predição de propagação foram e têm sido desenvolvidos, com a intenção de fornecer estimativas de atenuação de sinal nos diversos ambientes.

A perda de propagação predita pelos modelos pode ser, de forma geral, representada pela seguinte expressão:

$$L \text{ (dB)} = L_0 \text{ (dB)} + 10\gamma \log(d/d_0)$$

onde:

d_0 - é uma distância de referência

d - é a distância total de cobertura

γ - é a constante de perda de propagação (função do ambiente)

L_0 - é a perda na distância de referência d_0

L - é a perda de propagação

1.2 Cluster e Reuso de frequência

Cluster é o nome dado ao conjunto de células vizinhas que utiliza todo o espectro disponível. Uma configuração muito utilizada é a de *cluster* de sete células, como exemplificada na Figura 4a.

Sistemas celulares baseiam-se em um sistema inteligente de alocação e reuso de canais através da área de cobertura. A cada estação base é alocado um grupo de canais de rádio que serão usados em uma região geográfica relativamente pequena, a célula. Estações base de células adjacentes possuem grupos de canais diferentes de suas células vizinhas, para que não haja interferência. Através da limitação da área de cobertura até os limites da célula, um mesmo número de canais pode ser usado em outra célula desde que as células estejam separadas um da outra de uma distância suficientemente grande para que os níveis de interferência sejam aceitáveis. Dessa forma, usuários em diferentes áreas geográficas podem usar um mesmo canal simultaneamente. O conceito de reuso de frequência é fundamental para o uso eficiente do espectro. O processo de seleção e alocação de grupos de canais para todas as estações bases faz parte do *planejamento de frequência*.

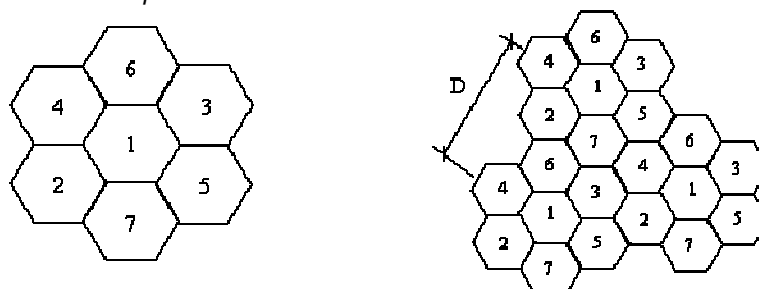


Figura 4: a-exemplo de cluster, b-reuso de frequência.

A Figura 4b ilustra o conceito do reuso de freqüência, onde células com o mesmo número utilizam os mesmos grupos de canais. Nessa figura, D é a distância de reuso cocanal, que separa duas células pertencentes a *clusters* adjacentes que utilizam o mesmo conjunto de freqüências. O plano de reuso de freqüências é sobreposto a um mapa para mostrar onde serão usados diferentes grupos de canais. A forma hexagonal das células é conceitual, sendo um modelo simplista da cobertura provida por cada estação base. A cobertura real de uma célula é conhecida como planta (*footprint*) e é determinada por medições ou estimada por modelos de predição de propagação. A planta real de cobertura é irregular por natureza, porém um formato regular de célula é necessário para o planejamento sistemático e adaptação a futuro crescimento. Embora pareça natural a escolha de um círculo para representar a área de cobertura de uma estação base, a superposição de círculos adjacentes sobre um mapa gera áreas descobertas (*gaps*) ou regiões de sobreposição. Quando se considera o formato geométrico que podem cobrir uma região sem que haja falhas ou sobreposições, as três melhores escolhas recaem em: quadrado, triângulo equilátero e hexágono, como apresentado na Figura 5.

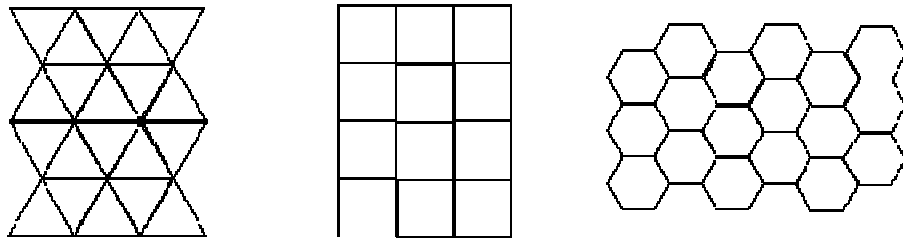


Figura 5: Forma triangular, quadrada e hexagonal.

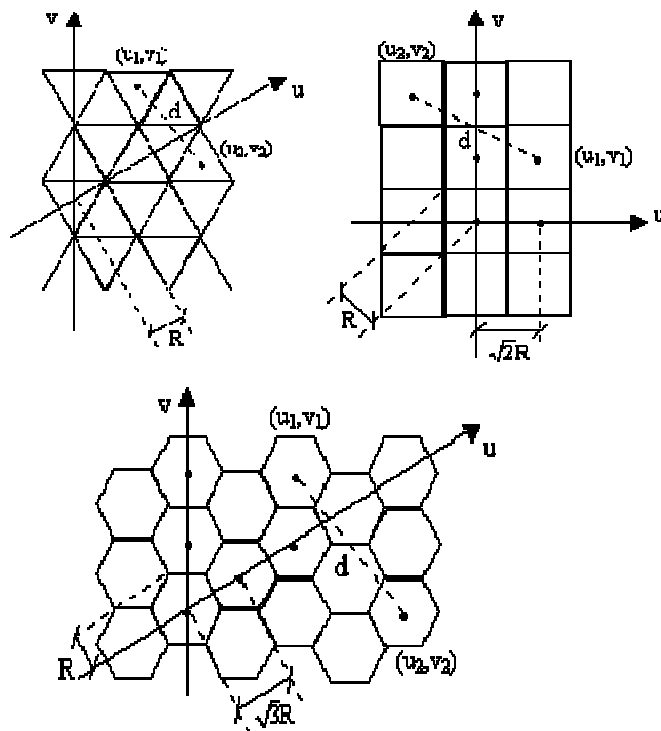


Figura 6: Sistema de coordenadas para análise da geometria

Interferência

Interferência é o maior fator limitante no desempenho de sistemas celulares. Fontes de interferência incluem outro móvel na mesma célula, uma chamada em andamento em uma célula vizinha, outras estações base operando na mesma faixa de freqüências ou algum sistema não-celular que cause interferência ao sistema celular. Interferência em canais de voz provoca efeitos de *cross talk* enquanto que interferência em canais de controle pode causar a perda e o bloqueio de chamadas devido a erros na sinalização digital. Os dois principais tipos de interferência gerada no próprio sistema celular são a interferência *cocanal* e a interferência de *canal adjacente*.

Interferência cocanal e capacidade de sistema

O reuso de freqüência implica em que, em uma dada área de cobertura, existam algumas células que utilizam um mesmo conjunto de freqüências. A interferência entre essas células é denominada

interferência cocanal. Ao contrário do ruído térmico, que pode ser combatido através do aumento da relação sinal-ruído (SNR), o aumento na potência de transmissão é prejudicial nesse caso, pois essa medida aumentaria a interferência em células cocanal vizinhas. Para reduzir a interferência cocanal às células cocanal devem ser espaçadas por uma distância mínima, de forma que seja garantido um isolamento adequado entre elas.

O cálculo de interferência é feito através da relação entre o sinal desejado e os sinais interferentes, S/I. Para uma geometria hexagonal de *clusters* o cálculo baseia-se na Figura 10.

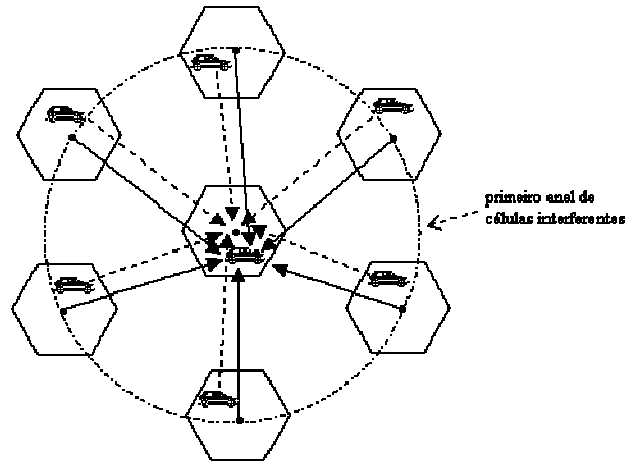


Figura 10 - Interferência cocanal

Na figura 10 estão representadas as seis primeiras células cocanal da célula central. As células são pertencentes aos seis *clusters* vizinhos ao *cluster* central. As seis células interferentes constituem o que se chama de primeiro anel interferente. Será apresentado o cálculo da relação sinal desejado / interferência relativa à interferência que as bases vizinhas geram em um móvel que se comunica na mesma frequência com a base de sua célula (analogamente, o cálculo também funciona para a interferência que móveis nas células vizinhas causam na base central).

Interferência de canal adjacente

Interferências que resultam de sinais que estão numa faixa de frequências adjacente à faixa do sinal desejado são chamadas interferências *de canal adjacente*. Essa forma de interferência resulta de imperfeições no filtro do receptor, que permite que frequências em faixas próximas da faixa desejada sejam recebidas. O problema pode ser particularmente sério se um usuário em um canal adjacente estiver transmitindo muito próximo ao receptor de um outro usuário, enquanto o receptor deste último tenta receber sinal de uma estação base no canal desejado. Esse problema é conhecido como *efeito perto-distante (near-far effect)*, onde um transmissor próximo (podendo inclusive não fazer parte do sistema celular) causa forte interferência de canal adjacente em outro receptor. De outra maneira, o efeito perto-distante também ocorre quando um móvel próximo à estação base transmite em um canal próximo ao canal sendo usado por um móvel cujo sinal está fraco (certamente um móvel que esteja mais distante da estação base em questão). Nesse caso, a estação base pode ter dificuldade em discriminar o usuário cujo sinal está mais fraco.

A interferência de canal adjacente pode ser minimizada através de filtragem adequada e uma correta alocação de canais entre células. Como para cada célula é alocada apenas uma fração dos canais disponíveis, deve ser evitada a alocação, para uma mesma célula, de canais que são adjacentes em frequência. Através da alocação de canais na célula de forma que eles sejam o mais afastado possível em frequência, a interferência de canal adjacente pode ser consideravelmente reduzida. Dessa forma, dado o tamanho N de cluster, é possível que se crie vários esquemas de alocação de canal entre as células de forma a maximizar a separação entre canais em uma mesma célula. Esquemas de alocação de canal devem também prevenir uma outra fonte de interferência de canal adjacente, que é o uso de canais adjacentes em células vizinhas. Esse é um problema de solução ainda mais complexa.

Controle de potência

Em sistemas celulares digitais, os níveis de potência transmitidos por cada unidade móvel estão sob constante controle das estações base. Isso é feito para assegurar que cada terminal móvel transmita com um nível de potência apenas suficiente para manter um bom nível de qualidade no *link* reverso. O controle de potência não apenas permite economia de bateria no terminal do usuário como também permite uma redução considerável na relação S/I de *link* reverso no sistema. Em sistemas CDMA

(Code Division Multiple Access), como será visto, um eficiente controle de potência passa a ser fundamental para o desempenho do sistema.

Estratégias de alocação de canal e Handoff

Para um uso eficiente do espectro rádio disponível, é requerido um esquema de reuso de frequências que seja consistente com os objetivos de aumento de capacidade e redução de interferência. Com o intuito de aumentar a eficiência na utilização do espectro, uma variedade de estratégias de alocação de canais foi então desenvolvida. Tais estratégias podem ser classificadas como *fixas* ou *dinâmicas*. A escolha da estratégia impacta no desempenho do sistema, particularmente em como uma chamada é gerenciada quando um móvel desloca-se de uma célula para outra.

Numa estratégia de alocação fixa de canais, é alocado um determinado conjunto de canais de voz a cada célula. Qualquer tentativa de chamada dentro da célula só poderá ser servida pelos canais desocupados pertencentes àquela célula. Há algumas variantes da estratégia de alocação fixa de canais. Em uma delas, chamada de estratégia de *empréstimo* (*borrowing strategy*), uma célula pode pedir canais emprestados de uma célula vizinha se todos os seus canais estiverem ocupados. A Central de Comutação Móvel supervisiona os procedimentos de empréstimo e garante que o empréstimo do canal não interfere em nenhuma chamada que esteja em progresso na célula de origem do canal.

Na estratégia de alocação dinâmica de canais, os canais de voz não são alocados às células permanentemente. Ao invés disso, cada vez que há uma tentativa de chamada, a estação base requisita canal para a MSC. A Central então aloca um canal para a célula que o requisitou.

A MSC apenas aloca uma determinada frequência se essa frequência não está em uso na célula nem em nenhuma outra célula que esteja a uma distância menor que à distância de reuso, para evitar interferência. A alocação dinâmica de canais diminui a probabilidade de bloqueio de chamadas, aumentando a capacidade de troncalização do sistema, pois todos os canais disponíveis estão acessíveis a todas as células. Esse tipo de estratégia requer que a MSC colete dados em tempo real de ocupação de canais, distribuição de tráfego, e de indicações de intensidade de sinal de rádio (RSSI- *Radio Signal Strength Indications*) de todos os canais, continuamente. Isso sobrecarrega o sistema em termos de capacidade de armazenamento de informações e carga computacional, mas prevê vantagem de aumento de utilização dos canais e diminuição da probabilidade de bloqueio.

Quando um móvel desloca-se entre células enquanto uma conversação está em andamento, a MSC automaticamente transfere a chamada para um novo canal pertencente à nova estação base. Esse procedimento de *handoff* não apenas envolve a identificação de uma nova estação base, mas também requer que os sinais de voz e de controle sejam transferidos para canais associados à nova célula.

O processamento de *handoffs* é uma tarefa muito importante em qualquer sistema celular. Muitas estratégias de *handoff* priorizam os pedidos de *handoff* em relação a pedidos de inicialização de novas chamadas, quando da alocação de canais livres em uma célula. *Handoffs* devem ser realizados com sucesso (e o menor número de vezes possível) e deveriam ser imperceptíveis aos usuários. Projetistas de sistemas devem especificar um nível ótimo de sinal que iniciará o processo de *handoff*. Uma vez que um nível particular de potência de sinal tenha sido estabelecido como sendo o nível que oferece a qualidade de voz mínima aceitável no receptor da estação base (normalmente entre -90 dBm e -100 dBm), um nível de sinal ligeiramente superior é usado como limiar no qual o *handoff* é feito. Essa margem, dada por $\Delta = P_r$ *handoff* - P_r mínimo usável, onde P_r é a potência recebida na base, não pode ser muito grande nem muito pequena. Se Δ é muito grande, podem ocorrer *handoffs* desnecessários, que sobrecarregam a MSC e, se Δ é muito pequena, o tempo pode ser insuficiente para que o *handoff* se complete, e então a chamada será perdida devido ao enfraquecimento do sinal. Dessa forma, Δ é escolhida cuidadosamente para atender a esses requisitos conflitantes.

Para se decidir se um *handoff* é necessário ou não, é importante garantir que a queda no nível do sinal medido não é devida a um desvanecimento momentâneo e que o móvel está realmente afastando-se da estação base que o serve. Para se certificar disso, a estação base monitora o nível de sinal por um certo tempo antes do *handoff* ser iniciado. Esse procedimento deve ser otimizado de forma que *handoffs* desnecessários não ocorram e que *handoffs* necessários sejam realizados antes da chamada ser interrompida.

Em sistemas celulares analógicos de primeira geração, a medição dos níveis de sinal é feita pelas estações base e supervisionada pela MSC. Cada estação base constantemente monitora a intensidade de sinal de todos os seus *links* de voz reversos (móvel para base) para determinar a posição relativa de todos os usuários em relação à torre da base. Além de medir a RSSI de chamadas em progresso dentro da célula, um receptor adicional em cada estação base, chamado de *locator receiver*, é usado para determinar o nível de sinal de usuários que estão em células vizinhas. Esse receptor é comandado pela MSC e é usado para monitorar a intensidade de sinal de usuários em células vizinhas que possam ser candidatos a *handoff* e reportar os valores de RSSI medidos a MSC. Baseada na informação de nível de

sinal fornecida pelo *locator receiver* de cada estação base, a MSC decide se o *handoff* é necessário ou não e, caso seja, para que célula ele deverá ser feito.

Em sistemas celulares de segunda geração que utilizam tecnologia TDMA (*Time Division Multiple Access*), as decisões de *handoff* são *assistidas* pelo móvel. No *handoff assistido pelo móvel* (MAHO), cada estação móvel monitora o nível de sinal recebido de estações vizinhas e continuamente reporta essas medições para a estação base que a serve no momento. Um *handoff* é iniciado quando a potência recebida de uma estação base vizinha começa a exceder a potência recebida da estação base que serve o móvel de um determinado valor ou por um certo período de tempo. Esse método permite que a chamada seja transferida entre estações base muito mais rapidamente do que o método da primeira geração permite, já que as medições são feitas por cada móvel e a MSC não precisa mais da constante monitoração de níveis de sinal. O esquema MAHO é particularmente bem adaptado a ambientes de microcélulas, onde *handoffs* são mais freqüentes.

Sistemas diferentes possuem diferentes políticas e métodos para gerenciar os pedidos de *handoff*. Alguns sistemas tratam pedidos de *handoff* da mesma forma que os pedidos de inicialização de novas chamadas. Nesses sistemas, a probabilidade de que um pedido de *handoff* não seja atendido por uma nova estação base é igual à probabilidade de bloqueio de novas chamadas. Entretanto, do ponto de vista do usuário, ter sua chamada abruptamente interrompida no decorrer da ligação parece ser muito mais incômodo do que ser bloqueado eventualmente na tentativa de fazer uma nova chamada. Para melhorar a qualidade dos serviços sob esse aspecto, vários métodos foram desenvolvidos para priorizar os pedidos de *handoff* sobre os pedidos de inicialização de novas chamadas quando da alocação de canais de voz.

Priorizando *handoffs*

Um método para dar prioridade a *handoffs* é descrito pelo conceito de *reserva de canal* (*guard channel*), onde uma fração dos canais da célula é reservada exclusivamente para pedidos de *handoff* oriundos de células vizinhas. Esse método possui a desvantagem de reduzir o tráfego total permitido a chamadas originadas na própria célula. Entretanto, esse método pode oferecer um uso eficiente do espectro se for utilizado em conjunto com uma estratégia de alocação dinâmica de canais, que minimizará o número de canais reservados requeridos através de uma alocação por demanda eficiente.

Considerações práticas sobre *handoff*

Na prática, problemas podem surgir pelo fato dos móveis trafegarem nas mais diferentes velocidades. Veículos a altas velocidades passam pela região de cobertura em questão de segundos enquanto que pedestres podem não precisar de nenhum *handoff* no decorrer de uma chamada. Particularmente, com a adição de microcélulas (células de algumas centenas de metros de raio) para prover capacidade, a MSC pode rapidamente ficar sobrecarregada se usuários a altas velocidades estão constantemente sendo transferidos entre células muito pequenas. Muitos esquemas foram e estão sendo desenvolvidos para lidar com o tráfego simultâneo de móveis a altas e baixas velocidades, ao mesmo tempo em que minimizam a intervenção da MSC para o *handoff*.

Embora o conceito celular ofereça claramente um aumento de capacidade através da adição de células, na prática é difícil para provedores de serviços celulares encontrar novas localidades para instalar estações base, especialmente em áreas urbanas. Devido às dificuldades encontradas, fica mais atraente para os provedores instalar canais adicionais e novas estações base na mesma localidade de uma célula já existente, ao invés de procurar novas localidades. Através do uso de diferentes alturas de antenas (freqüentemente no mesmo prédio ou torre) e de diferentes níveis de potência, é possível se prover células maiores e menores localizadas numa mesma região. Essa abordagem é conhecida como *célula guarda-chuva* (*umbrella cell approach*) e é usada para prover grandes áreas de cobertura a usuários em alta velocidade e pequenas áreas de cobertura para usuários a mais baixa velocidade. A figura 11 mostra o conceito. Essa abordagem garante que o número de *handoffs* será minimizado para usuários a altas velocidades. A velocidade de cada móvel pode ser estimada pela estação base ou pela MSC através, por exemplo, da medição de quão rapidamente a intensidade média em pequena escala (*short-term*) do sinal varia no tempo. Se um móvel, deslocando-se a grande velocidade na célula maior está aproximando-se da estação base e sua velocidade está decrescendo rapidamente, a estação base poderá decidir transferir o móvel para uma célula menor, sem intervenção da MSC.

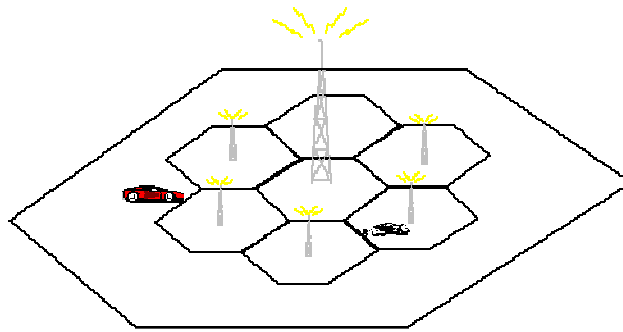


Figura 11 - Conceito de célula "guarda-chuva"
(algumas bases não estão representadas, para facilitar a leitura da figura).

Roaming

Numa situação prática, pode haver mais de um operador de serviços celulares em uma mesma cidade e, certamente, dentro de um mesmo país/continente. Porém, o usuário é assinante de uma operadora apenas. Dessa forma, é necessário que haja interligações entre as diversas operadoras, no sentido de que o assinante de uma operadora possa utilizar os serviços de outra, como visitante (*roamer*).

Durante o curso de uma chamada, se o móvel desloca-se da área de serviço de uma MSC para a de outra, é necessário um *roaming*. Portanto, o *roaming* pode inclusive ocorrer na área de prestação de serviço de uma mesma operadora. Há vários aspectos a serem considerados na implementação do *roaming*. Por exemplo, uma chamada local pode transformar-se numa chamada a longa distância quando a MSC visitada está em outro estado. Da mesma forma, deve ser dada atenção à compatibilidade de sistemas entre as MSC's envolvidas.

Troncalização e Grau de Serviço

Sistemas celulares baseiam-se em troncalização para acomodar um grande número de usuários em um espectro limitado. O conceito de troncalização permite que um grande número de assinantes compartilhe um número consideravelmente menor de canais numa célula permitindo acesso de cada usuário, por demanda, ao conjunto de canais disponíveis. Num sistema troncalizado, um canal é alocado ao usuário apenas durante sua chamada. Após o término da chamada, o canal volta a fazer parte do conjunto de canais disponíveis.

O conceito de troncalização baseia-se no comportamento estatístico das conexões, de forma que um número fixo de canais possa acomodar uma grande comunidade de usuários. Em um sistema troncalizado, quando um usuário requisita serviço e todos os canais estão ocupados, a tentativa de chamada é bloqueada (é negado acesso ao sistema).

Os fundamentos da teoria de troncalização foram desenvolvidos por um pesquisador chamado Erlang, no final do século XIX, e por esse motivo a medida de tráfego telefônico leva o seu nome. Um Erlang representa a quantidade de tráfego cursada por um canal ocupado por um período de tempo completo, ou seja, uma chamada de uma hora de duração, em uma hora terá um tráfego de 1 Erl; uma chamada de um minuto, em um minuto terá um tráfego de 1 Erl. Por exemplo, um canal rádio que ficou ocupado por trinta minutos em uma hora, cursou 0,5 Erl.

O Grau de Serviço (GOS) é uma medida da probabilidade de um usuário acessar um sistema troncalizado, ou seja, que o usuário encontre um canal disponível para efetuar sua chamada, na hora de maior movimento. É função do projetista do sistema estimar a capacidade máxima requerida e alocar o número apropriado de canais de forma a obter o grau de serviço desejado.

A intensidade de tráfego oferecida por cada usuário é dada pelo produto do número de requisições de chamada pelo tempo de retenção de cada chamada. Ou seja, cada usuário gera uma intensidade de tráfego A_u , em Erlangs (Erl) dada por:

$$A_u = \lambda H \quad (18)$$

onde :

H - duração média de uma chamada

λ - número médio de requisições de chamada por unidade de tempo

Para um sistema contendo U usuários, a intensidade total de tráfego oferecido, A, é dada por:

$A = UA_n = U\lambda H$, ou seja, o tráfego oferecido pode ser expresso por :

$$A = \frac{\text{número de chamadas requisitadas} \times \text{tempo médio de duração de chamadas (minutos)}}{60 \text{ minutos}} \text{ erl} \quad (19)$$

Deve ser observado que o tráfego oferecido não necessariamente é igual ao tráfego *curtido* pelo sistema. Quando o tráfego oferecido excede a capacidade máxima do sistema, o tráfego curtido fica limitado, devido à limitação no número de canais.

Como um exemplo prático do conceito de troncalização e GOS, pode-se considerar o sistema AMPS americano. Esse sistema de primeira geração está designado para um grau de serviço de 2% de bloqueio, que é típico em sistemas celulares. Isso implica que a alocação de canais às células é feita de forma que apenas duas em cem tentativas de chamada serão bloqueadas por falta de canal, na hora de maior movimento. Apenas para comparação, o grau de serviço em dois sistemas móveis convencionais (não celulares), MK e MJ, que operavam em Nova Iorque, em 1976, era de 30% e 50%, respectivamente. Ou seja, neste último, metade das tentativas de chamada eram bloqueadas e os usuários não conseguiam conexão.

Existem dois tipos de sistemas troncalizados comumente usados. No primeiro tipo, é assumido que não há tempo de *setup* (tempo requerido para alocar um canal a um usuário que o requisita), sendo que um canal é imediatamente alocado ao usuário, desde que haja pelo menos um canal livre. Se não há canais livres, o usuário é bloqueado, ficando sem acesso ao sistema e livre para tentar novamente posteriormente. Esse tipo de troncalização é denominado *chamadas bloqueadas liberadas (blocked calls cleared)* e assume que as chamadas chegam de forma determinada por uma distribuição de Poisson. E ainda, é assumido que há um número infinito de usuários, bem como: (a) qualquer usuário, incluindo usuários bloqueados, pode requerer um canal a qualquer momento; (b) a probabilidade de ocupação de canal por um usuário é distribuída exponencialmente, de forma que chamadas mais longas são menos prováveis de ocorrer; e (c) há um número finito de canais disponíveis no sistema de troncalização. Essas propriedades levam à fórmula conhecida por *Erlang B*.

A fórmula Erlang B é dada por:

$$Pr = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} = \text{GOS} \quad (20)$$

ou, de outra forma,

$$Pr = \frac{A^C e^{-A}}{C!} \quad (21)$$

onde :

C - número de canais oferecidos pelo sistema troncalizado

A - tráfego total oferecido

Embora seja possível que se modele sistemas com número finito de usuários, as expressões resultantes são muito mais complexas que a obtida. O uso das expressões mais complexas não compensa, especialmente em sistemas onde o número de assinantes supera em várias ordens de grandeza o número de canais disponíveis. Sendo assim, a fórmula Erlang B provê uma estimativa conservadora da GOS, pois como o número real de usuários é finito, a probabilidade de bloqueio acaba por ser um pouco inferior à calculada.

A expressão erlang-B é tabelada (Tabela erlang-B), de maneira que fica mais prático de se analisar as combinações de GOS desejada, tráfego e número de canais necessários.

No segundo tipo de sistema troncalizado é prevista uma fila para as chamadas que foram bloqueadas. No caso de não haver um canal disponível imediatamente, a requisição da chamada pode esperar algum tempo na fila até que um canal seja liberado. Essa forma de troncalização é chamada de *chamadas bloqueadas retardadas (blocked calls delayed)*, e sua medida de GOS é definida pela probabilidade de que uma chamada seja bloqueada após aguardar determinado tempo na fila. Esse método dá origem à outra formulação e, conseqüentemente, à outra tabela, a erlang-C. Usualmente, os cálculos de troncalização são feitos utilizando-se a tabela erlang-B.

A *eficiência de troncalização* é uma medida do número de usuários para os quais pode-se oferecer um determinado GOS com uma determinada configuração de canais. A forma pela qual os canais são agrupados pode alterar substancialmente o número de usuários que podem ser suportados pelo sistema. Por exemplo, dez canais a uma GOS de 0,01 (1%) podem suportar 4,46 Erlangs de tráfego, enquanto que dois grupos de cinco canais cada podem suportar $2 \times 1,36 = 2,72$ Erlangs de tráfego, onde 1,36 erl é o tráfego suportado por cinco canais para oferecer uma GOS de 0,01. Ou seja, no caso de se

troncalizar os canais conjuntamente (um grupo de dez canais), conseguiu-se 60% a mais de tráfego do que se consegue com dois grupos de cinco canais. Fica claro dessa forma que a alocação de canais em um sistema troncalizado tem um grande impacto na capacidade final do sistema.

Essa diferença de eficiência conforme a distribuição de canais deve-se à não linearidade da expressão erlang-B, explicitada na figura 12. A eficiência de troncalização é calculada por:

$$\eta_T(\%) = \frac{\text{tráfego em erlangs}}{\text{número de canais}} \times 100 \quad (22)$$

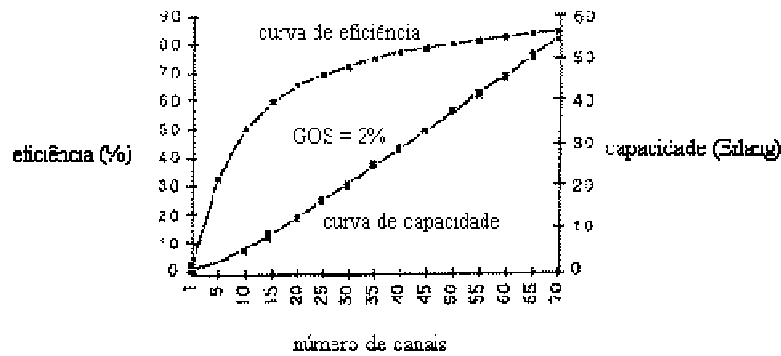


Figura 12 Eficiência de troncalização

Para um número de canais inferior a quinze, o agrupamento fica ineficiente, tornando-se desfavorável à operadora de telefonia celular.

Divisão Celular

Com o aumento da demanda por serviços celulares, o número de canais alocados a determinada (ou a várias) célula(s) pode tornar-se insuficiente para suportar o número crescente de usuários, ou seja, para suportar o aumento de tráfego. Em situações como essa, algumas técnicas devem ser utilizadas para prover mais canais por unidade de área de cobertura. Técnicas como *divisão celular* e *setorização* são duas das técnicas usadas na prática para aumentar a capacidade dos sistemas.

Divisão celular é o processo de se subdividir células congestionadas em células menores, cada uma com sua nova estação base e correspondente redução de altura de base e potência de transmissão. Através da criação de novas células, menores que as originais, entre as células existentes, a capacidade aumenta devido ao acréscimo no número de canais por unidade de área. A Figura 13 ilustra um exemplo de divisão celular.

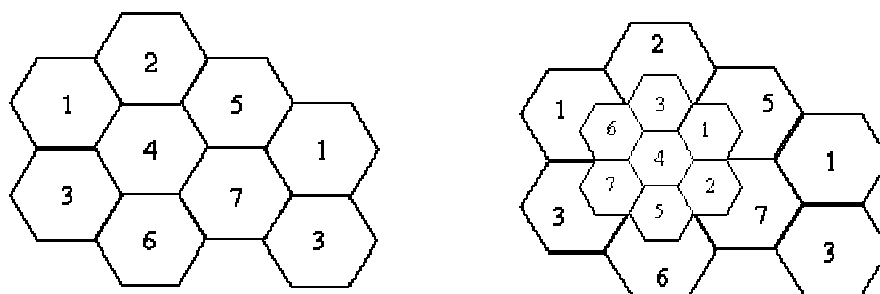


Figura 13 - Divisão celular

Como desvantagens do processo, pode-se citar: 1) aumento no número de estações rádio-base, gerando aumento de custo. Uma redução do raio da célula por um fator k aumenta o número de ERB's (estações rádio-base) por um fator k^2 ; 2) aumento do número de *handoff's*, gerando aumento de *overhead* (sobrecarga de controle) para a MSC. Uma redução no raio por um fator 4 aumenta o número de *handoff's* por um fator 10.

Na prática, não são todas as células que são subdivididas. Dessa forma, diferentes tamanhos de célula existem simultaneamente. Nesse tipo de situação, deve-se ter um cuidado especial para que seja mantida a distância mínima requerida entre células cocanal. A alocação de canais entre as células pode tornar-se mais complicada.

Para exemplificar esse problema, considere a figura 14, onde foi realizada divisão celular. A distância entre cocélulas (células cocanal) grandes é mantida, $D = 4,6R$, onde R é o raio das células

grandes. Da mesma forma, pelo fato da divisão seguir o mesmo arranjo de *clusters* original, à distância entre duas cocélulas pequenas é de $4,6r$, onde r é o raio de células pequenas (foi escolhido $r = R/2$).

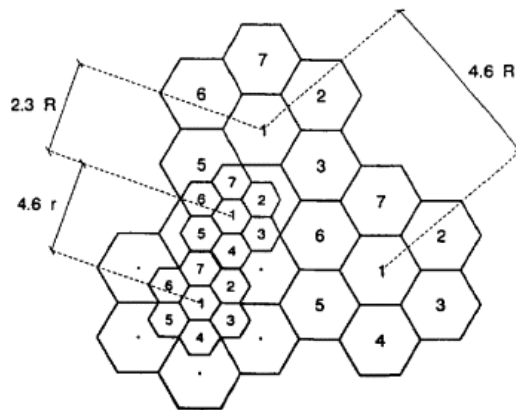


Figura 14 - Divisão celular. Novas distâncias de reuso de frequência

O nível de interferência é, portanto, igual entre células cocanal de mesmo tamanho, e igual ao nível de projeto. Pelo exemplo da figura 14, uma ligação em andamento em uma célula pequena não interferirá em uma célula cocanal grande pois, sendo atendida a distância de reuso D entre as células menores, ao mesmo tempo essa distância é atendida (e é a mesma: $2,3R = 4,6r$) entre células grandes e pequenas. Porém, uma chamada em andamento em uma célula grande interferirá numa célula pequena cocanal, pois à distância de reuso entre células grandes é maior que à distância de reuso entre células grandes e pequenas ($4,6R > 2,3R$).

O aumento de interferência, expresso pela diminuição na relação S/I é calculado a seguir.

O fator de reuso q entre células de mesmo tamanho é, aproximadamente, 4,6 ($N=7$). Entre células de tamanhos diferentes, $q = 2,3$. Então, a relação S/I entre células de tamanhos diferentes, para o exemplo dado é :

$$\frac{S}{I} = \frac{\left(\frac{q}{2}\right)^r}{6} = \left(\frac{1}{2}\right)^r \frac{q^r}{6} \quad (23)$$

o que, em dB, representa uma perda de 3γ na relação S/I original (sem divisão celular).

Embora a seja um exemplo específico, pois a divisão celular pode ocorrer de outras formas, ela ilustra o problema da interferência cocanal que pode ser causada pelo fato de células cocanal estarem mais próximas do que deveriam, segundo o projeto original.

Uma solução possível é a apresentada na figura 15. As células grandes são divididas em duas camadas concêntricas. Na camada mais externa não poderá haver canais em comum entre células grandes e pequenas, evitando, assim, interferência cocanal.

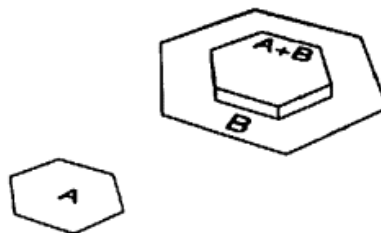


Figura 15 - Solução para o aumento de interferência cocanal na divisão celular

Técnica de *overlay*

A camada mais externa da célula maior só possui canais que não estão presentes na célula menor (grupo B de canais). Assim, é possível que se aumente o isolamento entre as células grandes e pequenas cocanal.

Setorização

Outra forma de se conseguir aumento de capacidade é manter o raio das células inalterado, e procurar formas de diminuir a relação D/R . Nessa abordagem, o aumento de capacidade é obtido através da redução do número de células em um *cluster* e, dessa forma, aumentando-se o reuso de frequência.

Entretanto, deve-se buscar uma solução para o aumento de interferência cocanal gerado pela diminuição do tamanho de *cluster*.

A interferência cocanal pode ser reduzida através da substituição de uma única antena omnidirecional na estação base por algumas antenas direcionais, cada uma irradiando em determinado setor. Essa técnica de decréscimo da interferência cocanal, permitindo um aumento na capacidade do sistema, usando antenas direcionais, é conhecida por *setorização*. O fator pelo qual a interferência cocanal é reduzida depende do número de setores usados. Usualmente, uma célula é particionada em três setores de 120° ou seis setores de 60°, conforme ilustrado na figura 16. A figura também mostra como é reduzida a interferência cocanal.

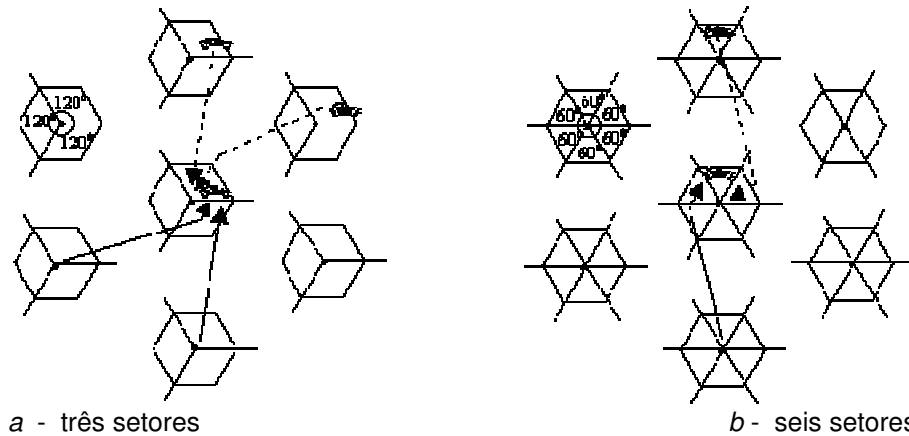


Figura 16 - Setorização

Se a distribuição de canais é idêntica entre os setores de todas as células, pela própria geometria criada pela setorização, verifica-se que : com três setores haverá duas células interferentes e, com seis setores, há apenas uma célula cocanal (no primeiro anel de células interferentes). As novas relações S/I obtidas, seguindo o mesmo desenvolvimento da expressão (16), são :

Para três setores

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\sum_{i=1}^2 \left(\frac{D}{R}\right)^{-\gamma}} \quad \therefore \quad \frac{S}{I} = \frac{q^{\gamma}}{2} \quad (24)$$

ou seja, um ganho de fator 3 em relação à solução omnidirecional. Em dB: aproximadamente 4,8 dB de ganho na relação S/I.

Para seis setores

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\sum_{i=1}^1 \left(\frac{D}{R}\right)^{-\gamma}} \quad \therefore \quad \frac{S}{I} = q^{\gamma} \quad (25)$$

ou seja, um ganho de fator 6 em relação à solução omnidirecional. Em dB: aproximadamente 7,8 dB de ganho na relação S/I.

A redução de interferência obtida pela setorização permite que os projetistas aumentem a capacidade de usuários através da redução do tamanho de *cluster* N, como já dito. A setorização pode ser usada também apenas para reduzir um nível de interferência que esteja acima do aceitável, sem que se altere o valor de N para aumento de capacidade.

Como desvantagens da setorização podem ser citados o aumento do número de antenas em cada estação base, e o decréscimo de eficiência de troncalização devido à repartição de canais entre os setores. Esse último problema pode ser ilustrado da seguinte maneira. Considere o sistema analógico AMPS, com 395 canais de voz em uma das bandas (A ou B). Usando-se um esquema N=7 omni (antenas omnidirecionais), portanto sem setorização, temos :

395 canais de voz / 7 células = 56,4 → 56 canais de voz por célula

Consultando a tabela erlang-B para um GOS = 2%, o tráfego suportado é de 45,9 erl por célula.

Se, por outro lado, parte-se para o uso de setorização, com 3 setores por exemplo :

3 x 7 = 21 setores por *cluster*

395 / 21 = 18,8 → 18 canais de voz por setor

Pela tabela erlang-B, com GOS = 2% :

tráfego por setor = 11,5 erl

tráfego por célula = 3 setores x 11,5 = 34,5 erl por célula.

Ou seja, foi perdida capacidade de tráfego (34,5 < 45,9) devido a setorização.

Portanto, quando se pensa em setorização para o aumento de capacidade de um sistema, projetistas devem observar o aumento real de capacidade que será obtido na redução de N já que, como mostrado, a setorização apresenta perda de capacidade embutida em seu processo.

Ainda, como a setorização reduz a área de cobertura de um grupo particular de canais, o número de *handoffs* é aumentado. Porém, muitas estações rádio base permitem que os móveis façam *handoff* entre setores de uma mesma célula sem intervenção da MSC, ou seja, não há sobrecarga na MSC devido ao excesso de *handoff*. É a perda de capacidade de tráfego o maior motivo pelo qual alguns operadores evitam a solução de setorização.

Técnicas de Modulação

A modulação é o processo através do qual a informação a ser transmitida é convertida em uma forma conveniente à sua transmissão. Geralmente, esse processo envolve a translação da banda básica de informação em bandas muito mais altas, nas quais efetivamente ocorrerá a transmissão. O sinal original, ou seja, a informação propriamente dita é chamada sinal *modulante*. O sinal resultante do processo de modulação é chamado sinal *modulado*. No receptor, ocorre o processo inverso, no qual se extrai a informação do sinal modulado. Esse processo é conhecido por *demodulação*.

Dado o ambiente hostil em termos de condições de propagação encontrada em um ambiente celular, a implementação de um esquema de modulação eficiente e resistente aos problemas apresentados pelo canal móvel não é uma tarefa simples.

Os sistemas celulares de Primeira Geração utilizam modulação analógica para voz, constituindo os sistemas analógicos. Os primeiros sistemas utilizavam AM (Modulação em Amplitude), mas rapidamente adotaram o FM (Modulação em Freqüência), tão logo essa tecnologia mostrou-se de realização viável. Hoje, todos os sistemas de Primeira Geração utilizam o FM para a modulação de voz. Os sistemas conhecidos como sendo de Segunda Geração utilizam modulação digital de voz. Esses sistemas são denominados de sistemas digitais. Existe atualmente um número significativo de técnicas de modulação digital.

O texto que se segue apresenta um sumário das técnicas de modulação empregadas em sistemas celulares, enfatizando os esquemas de modulação digital.

Sistemas Analógicos

A técnica de modulação utilizada nos canais de voz é o FM.

FM

O FM faz parte de uma classe de esquemas de modulação conhecidos por modulação angular. Um sinal modulante senoidal de freqüência f_m e amplitude máxima A_m , modula uma portadora FM gerando o seguinte sinal modulado :

$$S(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + \frac{k_f A_m}{f_m} \text{sen}(\omega_c t) \right] \quad (26)$$

onde :

A_c - amplitude máxima da portadora
 ω_c - freqüência angular da portadora
 k_f - constante relativa ao modulador

A relação entre a amplitude máxima da mensagem e a banda (W , usualmente sua freqüência máxima) do sinal modulante (que, no caso geral, não é senoidal) é dada pelo índice de modulação, β_f :

$$\beta_f = \frac{k_f A_m}{W} = \frac{\Delta f}{W} \quad (27)$$

onde Δf é o máximo desvio de freqüência do sinal modulado em torno da freqüência da portadora.

A banda de transmissão é dada, aproximadamente, por :

$$B = 2(\beta_f + 1).W \quad (28)$$

De) surgem duas possibilidades :

- se $\beta_f \ll 1 \rightarrow B \cong 2W \rightarrow$ chamado FM faixa estreita
- se $\beta_f \gg 1 \rightarrow B \cong 2\Delta f \rightarrow$ chamado FM faixa larga

No FM faixa larga, mais bandas laterais (em relação à portadora) são necessárias para compor o sinal modulado. O FM faixa estreita é especialmente interessante em comunicações móveis (se comparado ao FM faixa larga), onde é crítica a limitação de espectro.

A modulação em frequência oferece muitas vantagens sobre a modulação em amplitude, o que a torna a melhor escolha para sistemas celulares analógicos. O FM apresenta maior imunidade a ruído se comparado ao AM. Como os sinais são representados por variações de frequência, e não de amplitude, os sinais FM são menos susceptíveis a ruídos tanto gaussianos como impulsivos, que tendem a causar flutuações na amplitude do sinal. Essa característica da modulação FM também pode explicar sua vantagem no que se refere a desvanecimentos por multipercurso, que causam flutuações rápidas no sinal, gerando efeitos mais sérios em sinais AM.

Em sinais FM é possível se estabelecer um compromisso entre banda ocupada e desempenho quanto a ruído. O índice de modulação, que possui ligação direta com a banda que será ocupada pelo sinal modulado, pode ser alterado para que se obtenha uma melhor relação sinal-ruído na saída do receptor. Sob certas condições, a relação sinal-ruído pode aumentar em 6 dB a cada duplicação da banda ocupada pelo sinal FM. Essa é talvez a maior vantagem da modulação FM sobre a AM.

Por ser um sinal de envelope constante (pois a variação está na frequência, e não na amplitude), a potência transmitida em um sinal FM é constante independente do nível do sinal modulante. Essa característica permite o uso de amplificadores eficientes para a amplificação de potência dos sinais de RF, uma grande vantagem quando se pensa em economia de bateria no terminal móvel.

A modulação FM também apresenta o chamado efeito de captura (*capture effect*). Se dois sinais na mesma faixa de frequências são recebidos, apenas o que possui maior nível de recepção será aceito e demodulado. Essa característica torna sistemas FM muito robustos quanto à interferência cocanal.

Entre as desvantagens estão : maior banda necessária para se obter às vantagens de melhoria na relação sinal-ruído na saída do receptor e de efeito de captura; os equipamentos de transmissão e recepção FM são mais complexos que os de AM; em algumas situações, o AM pode superar o desempenho do FM em condições de baixos níveis de recepção, uma vez que, no FM, os sinais devem chegar ao receptor com um nível acima de um nível mínimo (limiar) de recepção, determinado pela qualidade desejada.

Sistemas Digitais

Os sistemas celulares de Segunda Geração possuem como característica comum o fato de empregarem esquemas de modulação digital também nos canais de voz, e não apenas nos canais de controle como já era feito nos sistemas de Primeira Geração.

A modulação digital oferece muitas vantagens quando comparada à modulação analógica. Entre elas, pode-se citar: maior imunidade a ruído e a outros efeitos nocivos do canal; maior facilidade e praticidade de se multiplexar várias formas de informação, como voz, dados e vídeo, por exemplo; e maior segurança nas informações. Além disso, esquemas de modulação digital podem comportar códigos de detecção e/ou eliminação de erros e ainda códigos complexos de codificação e equalização, entre outros, para melhorar o desempenho geral do sistema.

Muitos fatores devem ser considerados quando da escolha do esquema de modulação, incluindo: largura de banda requerida, minimização de interferências intersimbólica e de canal adjacente, e desempenho quanto à taxa de erros.

Um esquema de modulação ideal provê baixas taxas de erro de bit (BER) com baixos níveis de relação sinal-ruído na recepção, tem bom desempenho em situações de propagação com multipercursos (e, portanto, sujeito a desvanecimentos), ocupa uma banda mínima, e ainda é fácil e econômico de ser implementado. Nenhum esquema de modulação atual satisfaz a todos esses requisitos simultaneamente. Alguns esquemas possuem melhor desempenho em termos de taxa de erro de bit, enquanto que outros utilizam melhor o espectro alocado. Portanto, um compromisso deve ser estabelecido na escolha do esquema de modulação, dependendo das demandas da aplicação.

O desempenho de um esquema de modulação é usualmente medido em termos de eficiência de potência e eficiência de uso da banda. Eficiência de potência está relacionada com a habilidade do esquema de modulação em preservar a fidelidade da mensagem original com baixos níveis de potência. Em um sistema de comunicação, para que se obtenha maior imunidade a ruído é necessário que se aumente o nível de potência do sinal. Entretanto, o quanto o nível do sinal deve ser aumentado para que se obtenha determinada qualidade (ou seja, uma taxa de erro de bit aceitável) em um sistema digital depende da técnica de modulação empregada. A eficiência de potência (também chamada eficiência de energia) é uma medida do quão bom é o compromisso entre qualidade e potência do sinal, e é freqüentemente expressa como a razão entre a energia por bit e a densidade espectral de ruído (E_b / N_0) necessária na entrada do receptor para que se obtenha uma dada probabilidade de erro máxima.

Eficiência de uso da banda refere-se à capacidade do esquema de modulação de acomodar dados (bits) em uma banda limitada. De maneira geral, quando se aumenta a taxa de transmissão, a largura de pulsos diminui, aumentando a faixa de frequências ocupada pelo sinal. Dessa forma, há uma relação intrínseca entre taxa de transmissão de dados e banda ocupada. A eficiência de uso da banda é definida como a razão *bits por segundo por hertz*, ou seja, taxa de transmissão por banda. Chamando de R a taxa

de transmissão em bits por segundo, e de B a banda ocupada pelo sinal de RF modulado, a eficiência de uso da banda é dada por:

$$\eta_B = \frac{R}{B} \text{ bps/Hz} \quad (29)$$

A capacidade do sistema é grandemente influenciada pela eficiência de uso da banda, uma vez que um valor mais elevado de η_B significa que mais dados poderão ser transmitidos em um mesmo espectro alocado. Porém, há um limite para o aumento da eficiência de uso da banda. O Teorema de Shannon mostra que, para uma determinada probabilidade de erro muito pequena, a máxima eficiência de uso da banda possível está limitada pelo ruído do canal, e é dada pela fórmula :

$$\eta_{B_{\max}} = \frac{C}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (30)$$

onde :

C - capacidade máxima do canal, em bits por segundo

B - banda de RF

S / N - relação sinal-ruído.

Ou seja, dado um valor máximo de S/N que pode ser obtido na comunicação, há um limite para a máxima taxa de transmissão, C, através de uma banda limitada, B.

Modulações binárias, como FSK (*frequency shift keying*) e PSK (*phase shift keying*), são relativamente robustas e de implementação simples, mas são ineficientes em termos de uso da banda. Nesse sentido, modulações multinível são preferidas, apesar de seu desempenho inferior no que diz respeito à taxa de erro de bit. Como exemplo, considere-se uma taxa de B kbits/s através de um canal. Se agora unirmos os bits em pares 00, 01, 10 e 11, e a eles denominarmos de símbolo 0, 1, 2 e 3, respectivamente, a taxa de símbolos será dividida por um fator 2 (antes símbolos eram bits, agora são pares de bits), com uma correspondente diminuição, pelo mesmo fator, da banda ocupada. Por outro lado, se nada for feito, a BER será degradada, pois agora existem mais níveis a serem distinguidos na recepção (e mais próximos uns aos outros), aumentando a probabilidade de erro.

A partir do que foi exposto no parágrafo anterior, pode-se entender o compromisso freqüente que se faz entre eficiência de potência e eficiência de uso da banda. Exemplificando, ao se acrescentar códigos de detecção e/ou correção de erros, é aumentada a banda ocupada (reduzindo a eficiência de uso da banda); porém, o nível de sinal requerido na recepção, para uma mesma taxa de erro, é diminuído (pois agora se tem os códigos, que tornam a comunicação mais robusta). Então, foi trocada eficiência de uso da banda por eficiência de potência. Por outro lado, esquemas de modulação multinível diminuem a banda ocupada, mas aumentam o nível de recepção necessário (para manter uma mesma taxa de erro de bit). Dessa forma, é trocada eficiência de potência por eficiência de uso da banda.

Uma observação a ser feita é que, embora a taxa de erro de bit dê uma boa informação a respeito do desempenho de determinado esquema de modulação, ela não dá informação a respeito do tipo de erro, por exemplo erros em rajada. Em comunicações móveis, esse é um fator importante, pois os desvanecimentos acentuados podem gerar perda completa do sinal. Uma outra forma de se medir o desempenho do esquema de modulação quanto a erros é através da probabilidade de falha (*outage*), onde uma falha é dada por uma determinada quantidade de bits errados em uma transmissão.

Para uma ampla penetração de sistemas celulares, a complexidade e, portanto, o custo dos terminais deve ser minimizado. Para tanto, um esquema que seja de simples detecção é o mais atraente. O desempenho do esquema de modulação em condições de desvanecimento rápido e de dispersão temporal por multipercursos é outro fator importante. E, por fim, em sistemas celulares, onde interferência é um tópico fundamental, o desempenho da técnica de modulação sob esse aspecto é de extrema importância.

Técnicas de modulação digital

Quando se transmite um feixe digital, o sinal original é convertido em uma forma analógica $A(t) \cos(\omega t + \theta)$. As características desse sinal são amplitude, freqüência e fase; dessa forma, pode-se alterar qualquer uma dessas três características para se formular um esquema de modulação (como nas modulações analógicas). As três formas básicas de modulação usadas na transmissão de sinais digitais são:

- Chaveamento de amplitude (*amplitude shift keying*) – ASK;
- Chaveamento de freqüência (*frequency shift keying*) – FSK;
- Chaveamento de fase (*phase shift keying*) – PSK.

Se ω e θ permanecem inalterados, tem-se ASK. Quando $A(t)$ e θ não são modificados, tem-se o FSK binário, ou M-ário. Finalmente, quando $A(t)$ e ω não são alterados, é obtido o PSK binário, ou M-ário. Há ainda os esquemas híbridos, onde duas características são alteradas a cada novo símbolo. O método

híbrido mais comum é obtido fixando-se w e fazendo variar $A(t)$ e θ . O esquema assim produzido é conhecido por Modulação de Amplitude em Quadratura (*Quadrature Amplitude Modulation*) – QAM. Cada um dos esquemas de modulação obtido resulta em diferentes mecanismos de transmissão e recepção (mais ou menos sofisticados), diferentes larguras de banda ocupadas e diferentes taxas de erro.

ASK

Na técnica ASK, a modulação ocorre através de mudanças na amplitude da portadora. É transmitido um de dois sinais: $s_0(t) = 0$, para o binário “0” e $s_1(t) = A \cos(\omega_0 t)$, para o binário “1”.

É possível agrupar-se bits em símbolos, de forma a se obter esquemas ASK M-ários, porém esses esquemas não são muito usados pelo fato de outros esquemas apresentarem melhor desempenho quanto à taxa de erros. A alta variação de amplitude devido a desvanecimentos rápidos, presentes nas comunicações móveis, faz com que esse tipo de esquema não tenha utilidade prática.

PSK

Esse esquema baseia-se na alteração da fase da portadora, de acordo com a informação a ser transmitida.

O esquema de modulação PSK oferece boa flexibilidade em termos de compromisso entre banda necessária e taxa de erro, gerando assim uma grande variedade de esquemas de modulação com base no PSK original.

No PSK binário, a representação dos bits se dá da seguinte forma: $s_0(t) = A \cos(\omega t)$, para o bit “0” e $s_1(t) = A \cos(\omega t + \pi)$, para o bit “1”. Em um esquema de modulação PSK M-ário, são necessárias M diferentes fases, sendo que a cada $\log_2 M$ bits é gerado um símbolo, transmitido através de um sinal da forma $A \cos(\omega t + \theta_j)$, $j = 1, \dots, M$.

A seguir são apresentadas algumas técnicas que se usam do conceito PSK.

BPSK

Esse é o esquema PSK binário já citado. Apresenta o mesmo desempenho quanto à taxa de erros obtidos pelo esquema ASK. Isso pode ser explicado pelo fato de que, representando-se os sinais BPSK da seguinte maneira: $s_0(t) = A \cos(\omega t)$ e $s_1(t) = -A \cos(\omega t)$, nota-se que o BPSK é constituído de sinais ASK com amplitude A e $-A$.

QPSK

Esquema PSK em quadratura. É criado através da definição de quatro sinais, defasados de 90° . Cada uma das quatro fases possíveis representa dois bits de informação ($2^2 = 4$), ou seja, há dois bits por símbolo. A representação geral de um conjunto de sinais com modulação QPSK é da forma :

$$s_i(t) = A \cos[\omega t + (i-1)\pi/2 + \lambda] \quad (31)$$

onde :

$$i = 1, 2, 3, 4$$

λ - fase inicial.

São gerados, dessa forma, sinais com fases λ , $\lambda + \pi/2$, $\lambda + \pi$ e $\lambda + 3\pi/2$.

Definindo ϕ_i como sendo a fase instantânea :

$$\phi_i = (i-1)\pi/2 + \lambda \quad (32)$$

Assim,

$$s_i(t) = A \cos(\omega t + \phi_i) \quad (33)$$

e expandindo o cosseno da equação, tem-se

$$s_i(t) = I_i A \cos(\omega t) - Q_i A \sin(\omega t) \quad (34)$$

onde :

$$I_i = \cos \phi_i \quad \text{e} \quad Q_i = \sin \phi_i \quad (35)$$

O sinal pode ser visto então como duas portadoras em quadratura, com amplitudes $A \cos \phi_i$ e $A \sin \phi_i$.

A probabilidade de erro no esquema QPSK é a mesma do esquema BPSK. Então, se comparado ao BPSK, o QPSK provê o dobro de eficiência de uso da banda (insere dois bits em um símbolo) e a mesma eficiência de energia (mesma probabilidade de erro).

Esquemas QPSK melhoram a eficiência de uso da banda, porém, requerem detecção coerente (recuperação de informação de frequência e fase da portadora ^[1]). Em ambientes sujeitos a desvanecimentos multipercurso (típico dos ambientes de comunicação celular), o uso de demodulação coerente resulta, em geral, em um pobre desempenho se comparado a demodulação não-coerente.

Através da simples rotação da constelação, pode-se obter diferentes conjuntos de sinais QPSK.

OQPSK

Técnica QPSK com *offset*. Essa técnica surge devido à necessidade de que os sinais QPSK sejam amplificados apenas por amplificadores lineares, caso contrário há a geração de lobos laterais, levando ao alargamento do espectro ocupado. Porém, amplificadores lineares são menos eficientes. Daí o surgimento da técnica OQPSK, que é menos susceptível aos efeitos de alargamento espectral, permitindo amplificação mais eficiente, através de amplificadores não-lineares.

O *offset* vem do fato de que, diferentemente do QPSK, onde os bits dos feixes que serão modulados em fase e em quadratura possuem transição no mesmo instante de tempo, no OQPSK os bits relativos ao feixe em quadratura sofrem um deslocamento no tempo em relação aos bits do feixe em fase, de meio período (metade da duração de um símbolo).

No esquema OQPSK o sinal ocupa a mesma banda ocupada no esquema QPSK, possuindo, inclusive, o mesmo espectro. A vantagem é que o esquema OQPSK mantém sua natureza de limitação em banda mesmo após amplificação não-linear, sendo muito atraente para comunicações móveis, onde limitações de banda e uso de amplificadores não-lineares eficientes, para o baixo consumo de energia, são críticos.

$\pi/4$ QPSK

Esse esquema apresenta a mesma característica de preservar o envelope constante apresentada pelo QPSK, porém o faz de forma melhorada. Uma qualidade muito importante desse esquema é que seus sinais podem ser detectados de forma não-coerente, simplificando o projeto do receptor. Além disso, observa-se que na presença de espalhamento temporal e desvanecimento por multipercurso, o $\pi/4$ QPSK tem melhor desempenho que o OQPSK.

Nesse esquema, os pontos que representam símbolos, são escolhidos de duas constelações QPSK deslocadas de $\pi/4$ entre si. Através de um esquema de alternância na escolha das constelações, o receptor realiza recuperação de relógio e sincronização. Pela forma particular como é feita a modulação nesse esquema, a informação está completamente contida na diferença de fase entre dois símbolos adjacentes. Devido a essa característica, é possível que se realize detecção diferencial mesmo que não se use codificação diferencial na modulação. Em canais com baixa taxa de transmissão e sujeitos a desvanecimentos rápidos, a detecção diferencial provê patamares de erro mais baixos. É comum o uso desse esquema na sua forma diferencial ($\pi/4$ DQPSK), para facilitar a implementação de detecção diferencial.

DPSK

É um esquema PSK não-coerente, ou seja, evita a necessidade de informação coerente de portadora na recepção. Possui a vantagem de que receptores não-coerentes são mais baratos e simples sendo, portanto, amplamente usados em comunicações móveis. Porém, o esquema DPSK possui a desvantagem de que sua eficiência de potência é cerca de 3 dB abaixo da eficiência do PSK, ou seja, para uma mesma taxa de erro, necessita de nível 3 dB acima do PSK não-diferencial.

λ DQPSK

Na modulação DQPSK os símbolos são transmitidos através de variações na fase (característica dos esquemas PSK diferenciais) e não através de valores absolutos de fase. Pode ser vista como uma versão não-coerente do QPSK que, conforme dito, necessita de demodulação coerente.

Para a compreensão do esquema λ DQPSK, primeiro será explicado o funcionamento do BPSK diferencial, DBPSK. Nesse esquema, de maneira geral, um bit "0" é enviado através do deslocamento da fase de λ (por exemplo, 0) radianos. Para o envio do bit "1", a fase é deslocada de $\lambda + \pi$ (segundo o mesmo exemplo, π) radianos. Em um esquema λ DQPSK, os deslocamentos de fase relativos são λ , $\lambda + \pi/2$, $\lambda + \pi$ e $\lambda + 3\pi/2$, onde λ é usualmente 0 ou $\pi/4$.

As técnicas baseadas em PSK descritas têm a característica de requererem alta linearidade na modulação e amplificação do sinal de RF antes da transmissão (são também conhecidas por técnicas de

modulação linear). Têm a vantagem de apresentar maior eficiência de uso da banda se comparadas às técnicas descritas a seguir.

Os esquemas que serão agora apresentados, conhecidos por técnicas de modulação de fase contínua, evitam a necessidade de linearidade de amplificação, permitindo o uso de amplificadores mais eficientes.^{[1],[9]} O sinal modulado ocupa uma faixa estreita (a irradiação fora da banda é da ordem de -70 dB a -60 dB^[1]) embora, por outro lado, essas técnicas apresentem menor eficiência de uso da banda.^[9] Se eficiência de banda é mas importante que eficiência de potência, esses esquemas de modulação não são indicados.

BFSK

Nesse esquema de modulação, a frequência do sinal transmitido é alterada conforme o sinal modulante da seguinte maneira: $s_0(t) = A \cos(\omega + \Delta\omega)t$, para o bit "0" e $s_1(t) = A \cos(\omega - \Delta\omega)t$, para o bit "1".

O esquema BFSK tem o mesmo desempenho que o ASK em termos de E_b / N_0 . A probabilidade de erro de bit em ambos os esquemas de modulação é dependente apenas da relação E_b / N_0 , de forma que o BFSK tem, então, o mesmo desempenho que o ASK quanto à probabilidade de erro de bit. Permite detecção não-coerente.

MSK e GMSK

MSK (*Minimum shift keying*) e GMSK (*Gaussian Minimum shift keying*) são dois casos especiais da técnica FSK, nos quais a informação de fase do sinal recebido é explorada de tal forma que há um aumento considerável no desempenho quanto a ruído. Em ambos os casos, cada símbolo é identificado por uma frequência de portadora.

MSK

MSK é uma técnica FSK com índice de modulação 0,5. O índice de modulação FSK tem definição semelhante à do índice de modulação de FM: $k_{FSK} = (2\Delta f) / R_b$, onde Δf é o desvio máximo de frequência e R_b é a taxa de bit.

A Figura 17 mostra que o espectro MSK tem lobos laterais mais baixos que o QPSK e o OQPSK. No QPSK e no OQPSK, 99% da energia está contida em uma faixa de frequências cerca de sete vezes maior que a ocupada pelo MSK (para a mesma percentagem), ou seja, o MSK possui maior eficiência na ocupação do espectro (espectro mais estreito). A figura também mostra que o lobo principal do MSK é mais largo que o dos outros dois esquemas e, portanto, se comparados em termos de banda até primeiro nulo, o MSK é menos eficiente que as técnicas PSK.

Sinais MSK podem ser amplificados usando-se amplificadores não-lineares de alta eficiência. Uma outra vantagem reside no fato de que o MSK tem circuitos simples de sincronização e demodulação. Quanto à probabilidade de erro, a técnica MSK tem desempenho igual à técnica QPSK.

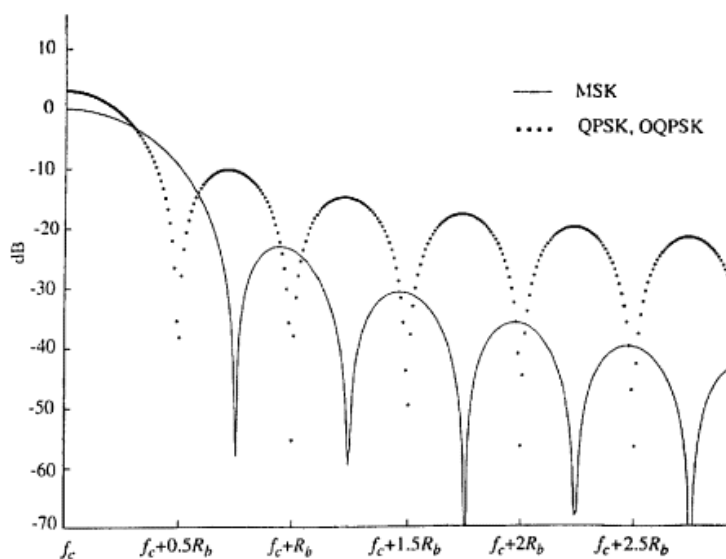


Figura 17 - Espectro MSK, QPSK e OQPSK

f_c é a frequência da portadora

GMSK

A técnica GMSK realiza a modulação utilizando pulsos de formato gaussiano. O GMSK é uma extensão do MSK, onde a amplitude dos lobos laterais é reduzida ainda mais.

Com essa técnica, consegue-se maior diminuição na banda ocupada porém, como o pulso usado não satisfaz ao critério de Nyquist de cancelamento de interferência intersimbólica, há uma degradação no desempenho. Dessa forma, quando o esquema GMSK é usado, deve ser estabelecido um compromisso entre banda de RF desejada e interferência intersimbólica aceitável.

É uma técnica muito atraente por possuir excelente eficiência de potência (por ter envelope constante, como o MSK) e por sua grande eficiência na ocupação do espectro (maior que a alcançada pelo MSK).

As técnicas MSK e GMSK são especialmente atrativas para comunicações móveis dadas as suas características de redução de interferência de canal adjacente (espectro estreito) e alta eficiência de potência (levando a baixas taxas de erro).

A Tabela 2, a seguir, faz uma comparação entre alguns dos esquemas de modulação descritos.

Tabela 2 – Comparação entre algumas técnicas de modulação

Modulação	eficiência de uso da banda (bps/Hz)	relação sinal-ruído requerida (dB)
BPSK	1	11,1
QPSK	2	14,0
PSK (16 níveis)	4	26,0
MSK (2 níveis)	1	10,6
MSK (4 níveis)	2	13,8

Cabe ressaltar que técnicas M-árias em geral, especialmente as que empregam muitos níveis (M grande), não são muito atraentes em comunicações móveis pela sua grande sensibilidade aos problemas apresentados por este canal. Uso de tons piloto e equalização são requeridas em muitos desses sistemas, tornando-os pouco populares.

Como considerações finais, pode-se dizer que: se maior eficiência de uso da banda e equipamentos de complexidade razoável são pontos chave, esquemas como QPSK e $\pi/4$ QPSK são boas escolhas. Por outro lado, se aumento de isolamento espectral e uso de amplificadores não-linear são questões importantes, e o aumento de complexidade de equipamento não é de grande importância, o GMSK é a melhor solução. Um aumento de eficiência de uso da banda pode ser obtido usando-se técnicas de codificação adequadas.

Técnicas de Acesso

O compartilhamento de recursos é uma forma muito eficiente de se obter alta capacidade em uma rede de comunicações. No que diz respeito a comunicações móveis, os recursos são os canais disponíveis ou, de forma mais ampla, a banda de frequências. O mecanismo de acesso deve permitir que qualquer terminal acesse o sistema, provendo um sistema de acesso troncalizado. Se canais são designados a usuários por demanda, o esquema é chamado de Acesso Múltiplo com Alocação por Demanda (DAMA, *Demand-Assigned Multiple Access*), ou simplesmente Múltiplo Acesso.

De acordo com a forma com que o espectro é disponibilizado aos usuários, tem-se a classificação geral de sistemas em *faixa estreita* e *faixa larga*. Em um sistema faixa estreita, a faixa de frequências é subdividida em várias faixas menores, os canais, que são alocadas sob demanda aos usuários. Em sistemas faixa larga, toda ou grande parte da banda de frequências é disponibilizada aos usuários, como um único bloco.

Há três formas básicas de se realizar múltiplo acesso, nomeadas de acordo com o mecanismo chave usado para implementá-las:

- Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência (FDMA);
- Múltiplo Acesso por Divisão de Tempo (TDMA);
- Múltiplo Acesso por Divisão de Código (CDMA).

Enquanto o FDMA e o CDMA são, respectivamente, técnicas faixa estreita e faixa larga por natureza, o TDMA permite ambas as formas de implementação.

Para a implementação de comunicação bidirecional *full-duplex*, pode-se utilizar divisão no tempo (TDD - *Time Division Duplex*) ou na frequência (FDD – *Frequency Division Duplex*). No TDD, as duas direções de comunicação utilizam uma mesma faixa de frequências comum, mas instantes de tempo distintos. Por outro lado, no FDD, cada sentido utiliza faixas distintas de frequências, separadas convenientemente para evitar interferências, permitindo um *full duplex* real, pois a informação pode trafegar nos dois sentidos simultaneamente. O TDD requer sincronização e tempo de guarda entre *slots* de ambos os sentidos, também para evitar interferência. Observa-se que o TDD, por utilizar a mesma faixa de frequências, permite que a comunicação mantenha a mesma qualidade em ambos os sentidos.

Arquitetura faixa estreita

Em geral, a arquitetura faixa estreita está associada a sistemas com alta capacidade – o número de canais em que a banda é dividida dá uma dimensão da capacidade do sistema quanto ao número de usuários – mas, muitas vezes, baixa qualidade de transmissão – muitos canais significam banda pequena para cada canal. Nesse sentido é importante a utilização de técnicas de modulação adequadas para permitir qualidade de voz aceitável, sem que se aumente a banda ocupada pelos canais, ou até, que se reduza à banda ocupada. Outro aspecto é a necessidade de se utilizar filtros estreitos para minimizar a interferência de canal adjacente, o que contribui para o aumento no custo de equipamento. E ainda, em sistemas faixa estreita, o sinal propagante sofre o chamado desvanecimento não-seletivo em frequência, ou seja, quando ocorre um desvanecimento toda a informação contida no canal é afetada, pois o canal é, em geral, muito estreito.

Arquitetura faixa larga

As técnicas de acesso que se utilizam dessa arquitetura são o TDMA faixa larga e o CDMA, sendo que este último freqüentemente usa toda a faixa disponível. Como grande vantagem dessa abordagem, pode-se citar o fato de que a banda utilizada é maior que a banda dentro da qual ocorre desvanecimento não-seletivo (banda de coerência). Ou seja, o sinal faixa larga experimenta desvanecimento seletivo em frequência e, então, apenas uma fração das frequências que o compõem é afetada pelo desvanecimento. Da mesma forma, interferências também podem ser minimizadas com o uso dessa arquitetura.

FDMA

A maneira usual de se realizar um esquema FDMA é através da associação de um canal a cada portadora. Esse esquema é conhecido por Canal Único por Portadora (SCPC – *Single Channel per Carrier*). A representação do FDMA está representada na figura 18 . Os canais possuem bandas de guarda nas suas extremidades, que são pequenas faixas de frequências destinadas a minimizar o efeito causado por filtros e osciladores imperfeitos, ou seja, minimizar a interferência de canal adjacente gerada pela invasão de um canal na faixa ocupada pelos seus canais adjacentes. Usualmente, o que se chama de “canal” são as duas bandas associadas ao par de portadoras, direta (base para móvel) e reversa (móvel para base).

Sistemas FDMA são sempre FDD e usualmente implementados segundo a arquitetura faixa estreita. Tanto sistemas analógicos como digitais podem ser implementados com a técnica FDMA.

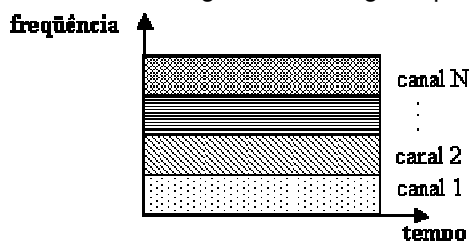


Figura 18 - Técnica de acesso FDMA

Principais características do FDMA

- Implementação usual baseada em SCPC;
- Transmissão contínua – uma vez alocados, os canais são usados continuamente pela base e pelo móvel até o fim da comunicação;

- Banda estreita – como cada porção de frequência é utilizada por um único usuário, a banda necessária é relativamente pequena, variando de 25-30 KHz em sistemas analógicos. Em sistemas digitais, o uso de codificação de voz a baixa taxa pode diminuir ainda mais a banda necessária;
- Baixa interferência intersimbólica – problema que afeta apenas sistemas digitais. Devido à característica de sistemas FDMA digitais trafegarem a baixas taxas de transmissão, esse não é um problema importante;
- Baixa sobrecarga de informações de controle (*overhead*) – os canais de voz carregam também mensagens de controle, como *handoff* por exemplo. Pelo fato dos canais alocados serem usados continuamente, pouco espaço é necessário para controle se comparando ao TDMA, por exemplo;
- Eletrônica simples – pouca ou nenhuma necessidade de processamento digital para combater interferência intersimbólica (em sistemas digitais), entre outras razões, permitem o uso de equipamentos mais simples nas bases e nos terminais;
- Uso de duplexador – como a transmissão é *full-duplex* e usa-se apenas uma antena para transmissão e recepção, deve-se usar um duplexador para fazer a filtragem entre recepção e transmissão e, assim, evitar interferências entre ambas;
- Alto custo de estações base – a arquitetura SCPC requer que um transmissor, um receptor, dois codecs (codificador / decodificador) e dois modems (modulador / demodulador) sejam usados para cada canal numa estação base. A alocação de mais usuários em uma mesma portadora, tornaria o sistema mais econômico nesse aspecto;
- *Handoff* perceptível – pelo fato da transmissão ser contínua, a comutação entre frequências no processo de *handoff* é perceptível (audível) ao usuário.

TDMA

Como dito, o TDMA permite implementação em faixa estreita e faixa larga. No TDMA faixa larga, toda ou grande parte da banda disponível é alocada a cada usuário por determinado intervalo de tempo, denominado *slot*. Em cada *slot* de tempo apenas um usuário terá acesso a toda (ou grande parte) da banda. No TDMA faixa estreita, o usuário tem acesso a uma pequena porção da banda por determinado intervalo de tempo (*slot*). A figura 19 a seguir, ilustra o conceito TDMA faixa estreita. No TDMA faixa larga não haveria as subdivisões faixa 1, faixa 2, ... faixa M, ou elas seriam em número muito reduzido comparado ao faixa estreita.

O canal TDMA é definido pelas duas combinações [porção da banda (faixa), *slot*] alocadas ao usuário, para o *link* direto e reverso. O TDMA permite utilização tanto de FDD como de TDD.

Como visto, uma única portadora é compartilhada em vários *slots* de tempo, ou seja, é compartilhada por vários usuários, cada qual em seu instante determinado. Esse mecanismo diferencia o TDMA do FDMA pois, no último, o esquema SCPC fazia com que cada portadora fosse alocada a apenas um usuário até o fim de sua comunicação.

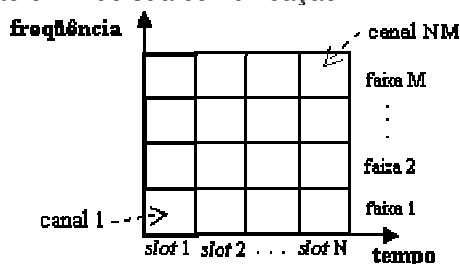


Figura 19 - Técnica de acesso TDMA (faixa estreita)

A transmissão entre móvel e base é feita de forma não-contínua. A transmissão entre móvel-base é feita em rajadas, ocorrendo apenas no instante de tempo (*slot*) reservado para que o móvel transmita e/ou receba. Nos demais instantes de tempo, outros usuários poderão ter acesso à mesma portadora sem, portanto, que as comunicações interfiram entre si.

Pelas características apresentadas, a tecnologia digital é a única adequada para o tipo de transmissão envolvido, de forma que sistemas TDMA são sempre digitais.

Principais características do TDMA

- Vários canais por portadora – como dito, uma portadora é utilizada em vários instantes de tempo distintos, cada qual correspondendo a um canal (usuário). No sistema Americano IS-54, usa-se três *slots* por portadora, enquanto que no sistema Europeu GSM cada portadora atende a oito *slots*;

- Transmissão em rajadas (*bursts*)– como cada portadora é compartilhada no tempo, cada usuário transmite ou recebe sua informação numa rajada dentro dos respectivos *slots*. Essa forma de transmissão também leva a uma maior economia de bateria se comparado ao FDMA;
- Faixa larga ou faixa estreita – a banda de cada canal depende de vários fatores, como o esquema de modulação. Dependendo do sistema os canais variam de dezenas a centenas de kHz. Como exemplo, o GSM usa canais de 200 KHz, enquanto que no IS-54 os canais são de 30 kHz;
- Alta interferência intersimbólica – como a taxa de transmissão é muito mais alta no TDMA do que no FDMA digital, começa a haver problemas pelo fato da duração de símbolos ser comparável ao espalhamento por retardo (*delay spread*). É requerido tratamento especial para minimizar esse problema, em especial em sistemas com taxas mais altas, como o GSM;
- Alta sobrecarga de informações de controle (*overhead*) – a característica de transmissão em rajadas requer um tratamento mais minucioso no que diz respeito à sincronização. Os bits requeridos nesse tratamento em conjunto com o fato de haver tempos de guarda entre *slots* (equivalente à banda de guarda, na frequência), gera um alto *overhead*;
- Eletrônica complexa – por usar tecnologia digital, muitos recursos podem ser agregados na unidade móvel, aumentando sua complexidade;
- Não requer o uso de duplexador – como transmissão e recepção acontecem em *slots* distintos, é desnecessário o uso de duplexador. O que há é um *switch* que liga / desliga o transmissor / receptor quando este não está em uso. O uso de duplexador é dispensável mesmo no TDMA/FDD pois, nesse caso, o que se faz usualmente é acrescentar intencionalmente alguns intervalos de tempo entre os *slots* de transmissão e recepção para que a comunicação nos dois sentidos não ocorra exatamente no mesmo instante;
- Baixo custo de estações base – como são usados múltiplos canais por portadora, o custo pode ser reduzido proporcionalmente;
- *Handoff* eficiente – o *handoff* pode ser realizado nos instantes em que o transmissor do móvel é desligado, tornando-se imperceptível ao usuário;
- Uso eficiente da potência, por permitir que o amplificador de saída seja operado na região de saturação;
- Vantagens inerentes a sistemas digitais, como capacidade de monitoração da comunicação quadro a quadro, por exemplo.

A Figura 20 ilustra um quadro (*frame*) de informação usado em sistemas TDMA. Cada *slot* é composto de um preâmbulo e bits de informação associados a cada usuário (exemplo de quadro da base para usuários). O preâmbulo tem como função prover identificação, controle e sincronização na recepção. Tempos de guarda são utilizados para minimizar a interferência entre canais (*cross talk*). Ainda na Figura 20, cada usuário de um mesmo *slot* ocupa a sua respectiva faixa de frequências. Uma vantagem do TDMA é que se pode alocar diferentes números de *slots* por quadro para cada usuário, provendo uma forma de banda por demanda, de acordo com as necessidades de comunicação (de dados, no caso) de cada usuário.

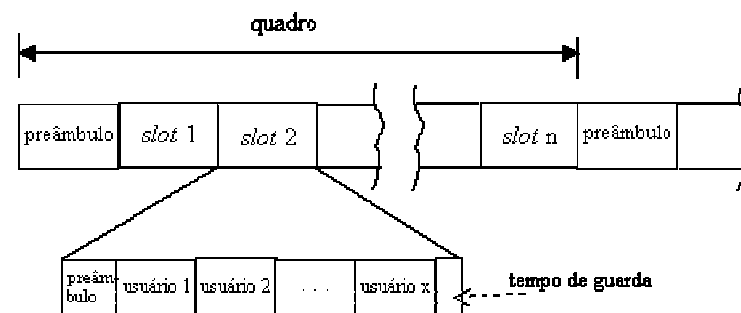


Figura 20 - Quadro (*frame*) do TDMA

CDMA

A técnica CDMA possui as seguintes características básicas : todos os usuários podem transmitir simultaneamente, nas mesmas frequências e utilizando toda a banda disponível.

Ao invés de se fazer à separação entre usuários através de frequência ou frequência / tempo, a cada usuário é designado um código, de forma que sua transmissão possa ser identificada. Os códigos usados têm baixa correlação cruzada (idealmente zero), ou seja, são ortogonais, fazendo com que as informações contidas nas várias transmissões não se confundam. No outro extremo da comunicação, o receptor tem conhecimento do código usado, tornando possível à decodificação apenas da informação de seu interlocutor. A Figura 21 ilustra o sistema.

O CDMA baseia-se em um conceito denominado Espalhamento Espectral (*Spread Spectrum*), que será resumidamente descrito.

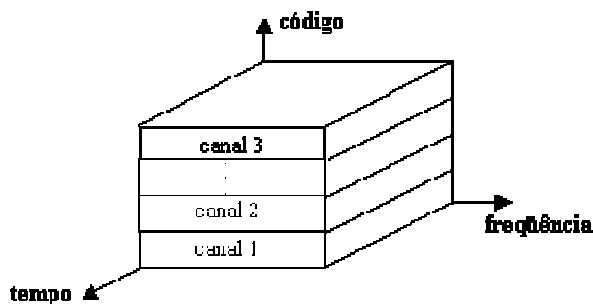


Figura 21 - Técnica de acesso CDMA

Espalhamento Espectral

Através dessa técnica, o sinal original que se deseja transmitir é espalhado por uma banda muito maior que a necessária a sua transmissão. Esse efeito é obtido, no caso do CDMA (espalhamento espectral por seqüência direta, como será explicado), pela multiplicação do sinal por um código com taxa de transmissão muito superior, de forma que o sinal resultante ocupe uma faixa muito larga. A energia total é mantida, sendo distribuída uniformemente por toda a banda, assemelhando-se ao espectro de ruído branco. Todos os sinais oriundos dos diversos usuários / estações base e o próprio ruído agregado à transmissão são superpostos no espectro. Através do código apropriado, a informação do usuário desejado é extraída em meio ao “ruído”.

Nessa breve descrição já é possível observar a alta imunidade intrínseca do espalhamento espectral a ruído e interferência. Isso se baseia no fato de que sinais de outros usuários bem como ruído / interferência são tratados da mesma forma e seus danos à informação de determinado usuário são eliminados, teórica e idealmente, quando da aplicação do código de recuperação.

Há duas formas principais de se realizar o espalhamento espectral: Salto em Frequência – *Frequency Hopping* (FH) e Seqüência Direta – *Direct Sequence* (DS). O que se chama comumente de CDMA é, na verdade, a técnica de múltiplo acesso por seqüência direta.

Salto em Frequência (FH)

Nessa técnica, a portadora “salta” entre as várias freqüências do espectro alocado. A faixa original do sinal é mantida, porém, como a portadora percorre rapidamente uma faixa muito grande de freqüências, o efeito final é de espalhamento espectral. Um sistema FH pode ser pensado como um sistema FDMA com diversidade de freqüência.

Esta técnica provê um alto nível de segurança, uma vez que um receptor que queira interceptar a comunicação e que não saiba a seqüência pseudo-aleatória usada para gerar a seqüência de “saltos”, necessitará buscar por freqüências de forma muito rápida e acertar a freqüência em uso em cada instante (e no *slot* de tempo exato). Pode apresentar problemas de colisão entre usuários e é crítico quanto à necessidade de sincronização entre transmissor e receptor. A figura 22 ilustra essa técnica, através de dois usuários, “x” e “o”.

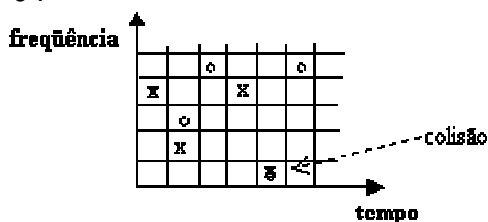


Figura 22 - Salto em freqüência (*Frequency Hopping*)

Seqüência Direta – CDMA

Como dito, a técnica baseia-se em associar códigos ortogonais aos usuários, de forma que suas comunicações não interferem entre si mesmo compartilhando o mesmo espectro e tempo. Para determinado usuário, todos os outros são vistos como sendo ruído. O processo de espalhamento do sinal e o posterior retorno à banda original são ilustrados na Figura 23 e na Figura 24, respectivamente.

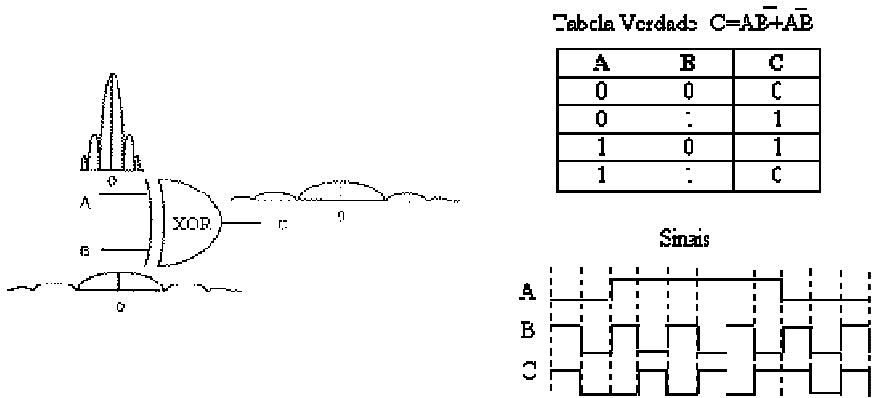


Figura 23 - Processo de espalhamento espectral – seqüência direta

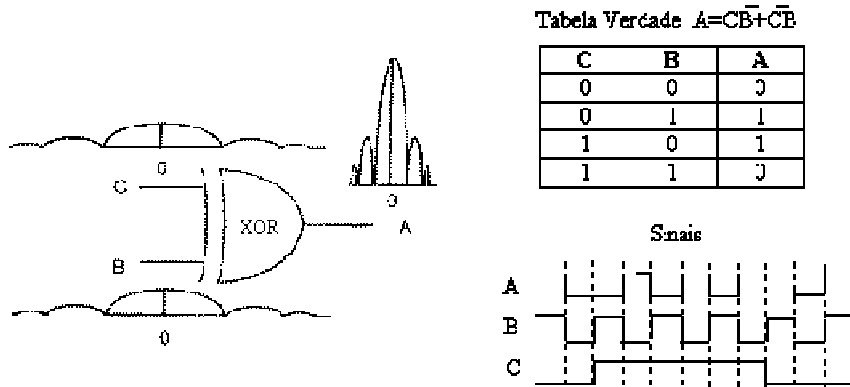


Figura 24 - Processo de retorno à banda original – seqüência direta

A Figura 25 ilustra a recuperação do sinal desejado, C_k , em meio aos outros sinais da banda (“ruído”).

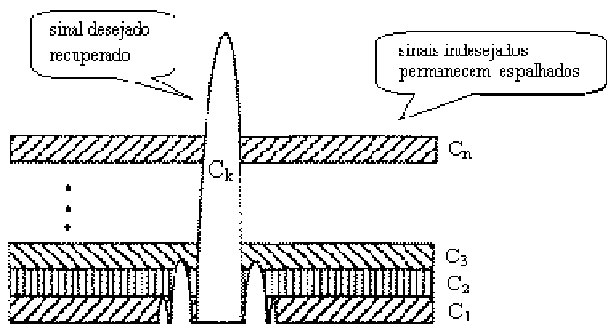


Figura 25 - Recuperação do sinal desejado

A alta imunidade do CDMA a sinais diferentes do desejado (incluindo ruído) pode ser mais bem compreendida através da Figura 26.

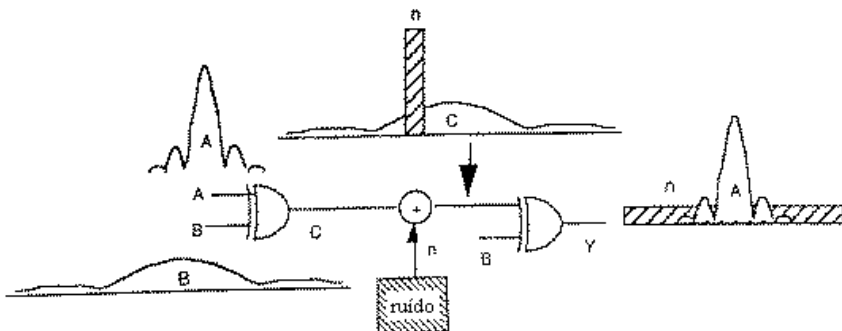


Figura 26 - Alta imunidade provida pelo CDMA

Na Figura 26, o ruído entra quando o processo de espalhamento espectral já ocorreu. Na recepção, quando for aplicado o código para extrair o sinal desejado, o ruído será espalhado, tendo o seu efeito muito atenuado.

No CDMA, a potência de todos os usuários, com exceção do usuário desejado, é o nível mínimo de ruído no receptor quando do momento da descorrelação (retirada da informação desejada através da aplicação do código apropriado). Se a potência de cada usuário não é controlada, de forma que elas não apareçam com a mesma intensidade no receptor da base, ocorre o problema perto-distante (*near-far*). Se isso ocorre, sinais mais fortes elevarão o nível mínimo de ruído na recuperação dos sinais mais fracos e tenderão a mascará-los, de forma que se reduz a chance de que os sinais mais fracos sejam recuperados. Para combater o problema, é necessário que se adote no CDMA um rígido esquema de controle de potência, através do qual a estação base monitora os terminais de maneira que a potência que chega à base oriunda de cada terminal tenha, idealmente, o mesmo nível. Isso evita que um móvel afastado da base não consiga comunicação pelo fato de um móvel próximo à base estar despejando muita potência.

Algumas características do CDMA

- usuários comunicam-se usando as mesmas freqüências, simultaneamente, por divisão de código;
- ao contrário do FDMA e do TDMA, o CDMA não tem um limite de capacidade bem definido, e sim o que se chama de limite *soft*. Ao aumentar o número de usuários, o nível mínimo de ruído é aumentado linearmente, de forma que há um decréscimo gradual de desempenho do sistema, percebido por todos os usuários;
- efeitos do canal nocivo e seletivo em freqüência podem ser minimizados pelo fato do sinal original estar espalhado por uma banda muito grande. E ainda, o receptor utilizado – RAKE - permite que se faça um especial tratamento nos sinais recebidos por multipercurso, de maneira que o sinal recebido tenha a melhor qualidade possível;
- no caso de *handoff* entre células cocanal (todo o espectro é utilizado pelas células – possível no CDMA), o processo pode ser suave. Mais de uma estação base monitora o nível do móvel e a central de controle pode escolher a melhor versão do sinal, sem necessitar comutar freqüências;
- problema perto-distante, caso não haja controle de potência eficiente.

Outra técnica de acesso, ainda menos desenvolvida e utilizada, é o Múltiplo Acesso por Divisão Espacial (SDMA). Nessa técnica, é controlada a direção de irradiação de energia para os usuários, através da alocação de diferentes *spots* de irradiação das antenas da estação base. As diferentes áreas cobertas por cada *spot* podem ser servidas pela mesma freqüência (TDMA ou CDMA) ou por diferentes freqüências (FDMA). No canal reverso (móvel para base), a identificação de usuários é feita através do ângulo de chegada do sinal. A Figura 27 dá a idéia do conceito envolvido.

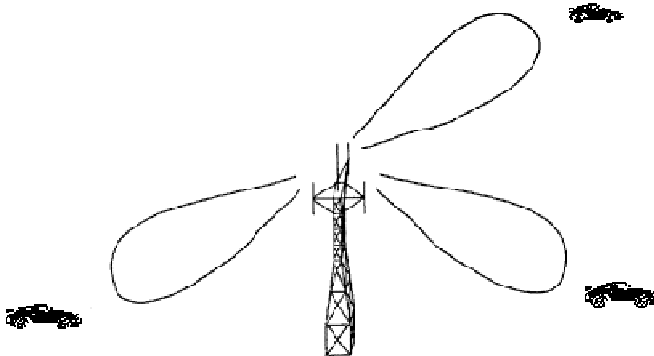


Figura 27 - Técnica de acesso SDMA

Comparação entre FDMA, TDMA e CDMA

Uma vantagem básica do CDMA é sua capacidade muito maior de tolerar sinais interferentes, se comparado a FDMA e a TDMA. Como resultado dessa qualidade, problemas de alocação da banda e interferência entre células adjacentes são simplificados, enquanto que sistemas FDMA e TDMA precisam de cauteloso estudo de alocação de freqüência e *slots* para evitar interferência, exigindo filtros sofisticados e tempos de guarda entre *slots*. Aumento de capacidade no CDMA pode ser conseguido através do fator de atividade de voz, utilizando-se os instantes de tempo nos quais não é detectada voz para prover aumento de usuários atendidos.

Em termos de capacidade, teoricamente o CDMA possui uma vantagem sobre sistemas analógicos por um fator de 20. Por outro lado, toda a vantagem teórica do CDMA exige que uma série de requisitos como, controle de potência eficiente, ortogonalidade entre códigos e necessidade de sincronismo perfeito (bases são sincronizadas por GPS – Sistema de Posicionamento Global, e passam o sincronismo aos móveis), entre outros, sejam atendidos. Na prática, dada a dificuldade de se implementar todos os requisitos, sistemas CDMA em geral não exploram toda a capacidade teórica prevista para essa técnica, embora os avanços tecnológicos os levem cada vez mais próximos a esse ideal.

Planejamento de Frequências

O planejamento de frequências é essencial para a otimização do uso do espectro, aumento da capacidade e redução de interferências.

Os órgãos regulamentadores de telecomunicações permitem que os sistemas operem em determinadas bandas de frequência, desde que as operadoras estejam de acordo com algumas normas. O uso eficiente da banda requer planejamento de frequências, envolvendo numeração de canais, agrupamento de canais em subgrupos, planejamento celular e alocação de canais dentro de células. Um bom planejamento de frequências deve garantir um isolamento adequado entre canais, para que a interferência de canal adjacente seja mantida em níveis aceitáveis. E ainda, deve ser escolhida uma distância de reuso adequada de forma a evitar interferência cocanal e ainda assim permitir a capacidade desejada de usuários. O planejamento de frequências é, portanto, tarefa da maior importância em sistemas de comunicações celulares.

Um exemplo de alocação de banda é o mostrado na Figura 28, que constitui as bandas conhecidas como A e B utilizadas no sistema AMPS. Cada banda ocupa 12,5 MHz na sua versão estendida, que será a tratada. Usando canais com espaçamento de 30 kHz, tem-se $12,5 \text{ MHz} / 30 \text{ kHz} = 416,7 \rightarrow 416$ canais por banda. Desses canais, 21 são usados para controle, de forma que $416 - 21 = 395$ canais são usados para voz em cada banda.

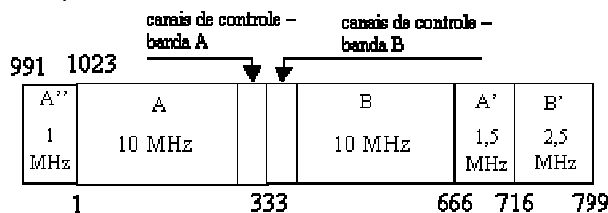


Figura 28 - Alocação de frequências para celular (800 MHz) – bandas A e B
A', B' e A'' foram acrescentadas para formar a versão estendida.

Cabe lembrar que o conceito de canal engloba as porções da banda usadas nos sentidos direto e reverso. O esquema mostrado na permite uso FDD, de maneira que a uma certa distância espectral (45 MHz, nesse caso) do conjunto de frequências mostrados, está um outro arranjo idêntico, correspondente ao sentido oposto de comunicação, como ilustra a Figura 29.

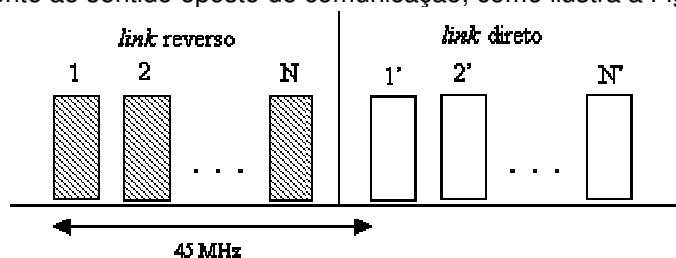


Figura 29 - Espaçamento espectral entre links direto e reverso (FDD)

Assim, quando se fala em “canal de 30 kHz” está se fazendo referência às duas faixas de 30 kHz alocadas a um usuário: uma no sentido direto e outra, a 45 MHz de afastamento, no sentido reverso. A distância de 45 MHz foi considerada suficiente para evitar interferências entre os links direto e reverso.

A alocação de frequências está relacionada aos números dos canais da seguinte forma:

- frequência de transmissão da base = $0,03 (N - 1023) + 870 \text{ MHz}$

- frequência de recepção da base = $0,03 (N - 1023) + 825 \text{ MHz}$

onde N é o número do canal ($N = 1, \dots, 1023$), de acordo com a Figura 28.

Dessa forma, conhecendo-se o número do canal, pode-se calcular o par de frequências portadoras associadas a ele.

A forma inicial de se especificar um plano de frequência é através da escolha do número de células por *cluster* e, dessa forma, o fator de reuso. Entre os planos mais conhecidos pode-se citar: $N = 3, 4, 7$ e 9 , onde N é, como já visto, o número de células por *cluster*. Entre os quatro planos citados, $N = 3$ e $N =$

9 são menos usados, porém há tendência a terem seu uso aumentado, especialmente em sistemas TDMA; e $N = 7$ é de uso bastante amplo nos sistemas celulares atuais.

Como um exemplo de como pode ser realizado um planejamento de freqüências, será citado o plano $N = 7 / 21$ utilizando antenas omnidirecionais. Nesse esquema, as freqüências disponíveis são divididas em 21 grupos, aproveitando o fato de que existem 21 canais de controle. A divisão para a Banda A está mostrada na Figura 30, onde cada coluna da tabela corresponde a um grupo e os números correspondem aos canais. Possíveis divisões de canais pelas células do *cluster* são mostradas na Figura 31, onde também são mostradas as possibilidades de interferência de canal adjacente.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147
148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189
190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231
232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252
253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273
274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294
295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312			
313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333
															667	668	669	670	671	672
673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693
694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714
715	716																			
									991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002
1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023

Figura 30 - Planejamento de freqüências 7 / 21 , para a banda A

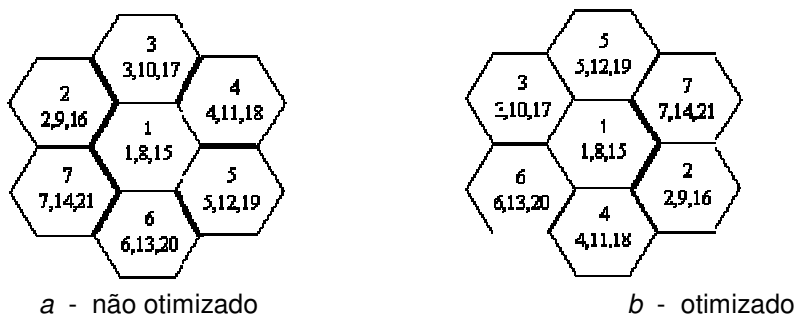


Figura 31 - Alocação de freqüências em *cluster* (as linhas grossas representam interferência de canal adjacente)

Como há sete células por *cluster*, o número de grupos por célula é: $21 / 7 = 3$ grupos distintos por célula em um *cluster*. A alocação dos grupos às células é feita da seguinte forma: cada célula recebe os grupos iniciados por $(n, n + 7, n + 14)$, onde n é o número da célula no *cluster* ($n = 1, \dots, 7$). Ou seja, de acordo com a , a célula 1, por exemplo, receberia três colunas: a iniciada pelo canal 1, a iniciada pelo canal 8 e a iniciada pelo canal 15. Na Figura 31, os números em cada célula correspondem ao primeiro canal de seus grupos de canais.

Quanto a interferências, o afastamento entre grupos nas células provê um eficiente isolamento entre canais, porém, como mostra a Figura 31, mesmo a versão otimizada de distribuição dos canais não permite a eliminação completa da possibilidade de interferência de canal adjacente entre células vizinhas. O reuso das freqüências através da região a ser coberta faz com que esse problema se propague. Esse é um ponto fraco do esquema 7 / 21 omnidirecional.

Variações do plano 7 / 21 são empregadas, com setorização de antenas em 120° e 60° , para que se diminua a interferência cocanal entre *clusters*, como já explicado. Outra variação, também se utilizando $N = 7$, é o esquema trapezoidal. O plano é assim denominado pelo fato do arranjo de células no *cluster* ter formato trapezoidal. Como características, pode-se citar: elimina a interferência de canal adjacente entre células vizinhas; pelo seu formato, é especialmente adaptado para o uso em estradas; embora seja um esquema $N = 7$, a geometria do *cluster* (não hexagonal) fornece uma relação $D/R \neq 4,58$. $D/R = 6,25$ nesse esquema.

Há alguns outros planos em uso, como: 4 / 24 omni (N = 4, 24 grupos por *cluster*, omnidirecional); 12 / 24 omni (N = 12, 24 grupos por *cluster*, omnidirecional); e planos em que a base está localizada no vértice das células, alimentando um grupo de três células, por exemplo (vantagem de custo, entre outras).

Cada plano possui sua própria característica quanto a interferências (cocal e de canal adjacente), custo, capacidade de usuários e capacidade de expansão. Cabe aos projetistas a decisão do melhor plano a ser usado em cada situação.

Características de Sistemas

Utilizando as tecnologias de acesso e modulação já descritas, bem como as diferentes soluções de planejamento de frequências, foram criados inúmeros sistemas de comunicações celulares, de Primeira (analógicos) e Segunda Geração (digitais).

Na Tabela 3 e na Tabela 4 está um resumo das características dos principais sistemas criados. Alguns dos sistemas / tecnologias possuem aplicação não só na telefonia celular convencional, mas também – e, em alguns casos, principalmente – em *cordless*, WLL (*Wireless Local Loop*) e PCS (*Personal Communication Systems*).

Tabela 3 - Sistemas de Primeira Geração

Parâmetros do sistema	AMPS (EUA)	TACS (Reino Unido)	NMT (Escandinávia)	C450 (Alemanha Ocidental)	NTT (Japão)
frequência de transmissão (MHz) - base - móvel	870 – 890 825 – 845	935 – 960 890 – 915	463 – 467,5 453 – 457,5	461,3 – 465,74 451,3 – 455,74	870 – 885 925 – 940
espaçamento entre banda de transmissão e recepção (MHz)	45	45	10	10	55
largura do canal (kHz)	30	25	25	20	25
número de canais	666 (NES) / 832 (ES)	1000	180	222	600
raio de cobertura da base (km)	2 – 25	2 – 20	1,8 – 40	5 – 30	5 (urbano) 10 (suburbano)
sinal de áudio - modulação - Δf máximo (kHz)	FM ± 12	FM ± 9,5	FM ± 5	FM ± 4	FM ± 5
taxa de transmissão de dados (kbps)	10	8	1,2	5,28	0,3

() - NES: espectro não-expandido (bandas A e B com 10 MHz, cada)
 - ES: espectro expandido (bandas A e B com 12,5 MHz, cada)
 (a nação associada ao sistema é a de origem do sistema)

Tabela 4 - Sistemas de Segunda Geração

Parâmetros do sistema	IS-54 (EUA)	GSM (Europa)	IS-95 (EUA)	CT-2 (Europa, Ásia)	CT-3, DCT-900 (Suécia)	DECT (Europa)
técnica de acesso	TDMA	TDMA	CDMA	FDMA	TDMA	TDMA
uso principal	celular	celular	celular	<i>cordless</i>	<i>cordless</i>	Celular / <i>cordless</i>
frequência de transmissão (MHz) - base - móvel	869 – 894 824 – 849	935 – 960 890 – 915	869 – 894 824 – 849	864 – 868 ***	862 – 866 ***	1800 – 1900 ***
técnica de duplexação	FDD	FDD	FDD	TDD	TDD	TDD
largura do canal (kHz)	30	200	1250	100	1000	1728

Parâmetros do sistema	IS-54 (EUA)	GSM (Europa)	IS-95 (EUA)	CT-2 (Europa, Ásia)	CT-3, DCT-900 (Suécia)	DECT (Europa)
modulação	$\pi/4$ DQPSK	GMSK	BPSK / QPSK	BFSK	GMSK	GMSK
potência máxima / média (mW)	600 / 200	1000 / 125	600	10 / 5	80 / 5	250 / 10
alocação de freqüências p/ células	fixa	dinâmica	-	dinâmica	dinâmica	dinâmica
controle de potência - base - móvel	Sim Sim	Sim Sim	Sim Sim	Não Não	Não Não	Não Não
codificação de voz	VSELP	RPE-LTP	QCELP	ADPCM	ADPCM	ADPCM
taxa de codificação de voz (kbps)	7,95	13	8 (variável)	32	32	32
nº de canais de voz por portadora	3	8	-	1	8	12
taxa de transmissão do canal (kbps)	48,6	270,833	-	72	640	1152
tamanho do quadro (frame) (ms)	40	4,615	20	2	16	10

(*) - uso também em WPBX.

(**) - celular: para alguns usos específicos. Uso também em grandes WPBX e WLL.

(***) - sistemas unidirecionais: base – móvel.

(a nação/continente associada ao sistema é a de origem do sistema)

Referências

RAPPAPORT, Theodore S.; **Wireless Communications – Principles & Practice**. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 1996.

MEHROTRA, Asha. **Cellular Radio: Analog and Digital Systems**. Mobile Communications Series - Artech House Publishers, 1994.

Notas de Aula do Curso de Planejamento de Sistemas Celulares - Professor Luiz Alencar Reis da Silva Mello, CETUC - PUC/Rio, 1998.

FARUQUE, Saleh. **Cellular Mobile Systems Engineering**. Mobile Communications Series – Artech House Publishers, 1996.

YACOUB, Michel Daoud. **Foundations of Mobile Radio Engineering**. CRC Press, 1993.

LEE, William C. Y. **Mobile Cellular Telecommunications Systems**. Mc Graw-Hill International Editors, 1989.

BARRADAS, Gilberto Silva. **Sistemas de Radiovisibilidade**. Embratel, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 3ª edição.

WILKES, Vijay K. Garg and Joseph E. **Wireless and Personal Communications Systems**. Prentice Hall PTR, 1996.

MUNDRAL, Pritpal Singh; Kapur, T. L. Singal and Rakesh. **The Choice of a Digital Modulation Scheme in a Mobile Radio System**. 43rd IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 61-64, Meadowlands Hilton, Secaucus, New Jersey, USA, 18-20 de Maio, 1993.

Apostila do Curso de Sistemas Móveis - Professor Mauro S. Assis, UFF.

ALENCAR, Marcelo Sampaio de. **Telefonia Celular Digital**. 1ª Ed, São Paulo: Erica, 2004.