

INTRODUÇÃO ÀS COMUNICAÇÕES MÓVEIS

Dayani Adionel Guimarães

Resumo

Este tutorial aborda conceitos básicos relacionados às comunicações móveis. Os fundamentos relacionados à transmissão de informação nos canais de rádio móveis via satélite e terrestre, os fenômenos observados nesses canais e os métodos para viabilização da comunicação nesses ambientes são descritos. Várias técnicas de acesso em sistemas de comunicação móvel são também apresentadas. São apresentadas ainda as principais características de alguns dos sistemas de comunicação móvel existentes e emergentes em todo o mundo.

Abstract

This tutorial presents basic concepts related to mobile communications. It is concerned with the fundamentals of the transmission of information over satellite and terrestrial mobile radio channels, with the observed phenomena in these channels and with the methods for turning the communication feasible in these environments. Several access techniques for mobile communication systems are also presented. The work also presents the main characteristics of some today's and emerging mobile communication systems around the world.

I. INTRODUÇÃO

Vivemos uma época na qual é percebido um avanço tecnológico ímpar nas telecomunicações. São inúmeros os diferentes sistemas existentes e a cada dia parece nos ser apresentado um novo. Mas qual é a tecnologia adequada? – perguntam, confusos, os profissionais de telecomunicações. Cada fabricante defende de forma ferrenha sua idéia e ainda diz que a do concorrente é a menos indicada, embora, muitas vezes, seja a adequada. Se não se conhece a tecnologia, corre-se o risco de deixá-la ditar as decisões importantes nas organizações, decisões estas muitas vezes regadas de um modismo inerente a um lançamento tecnológico de impacto. É importante conhecer a tecnologia para bem poder utilizá-la. Conhecendo-a e tomando as ações em função do mercado, as organizações deixam de simplesmente “empurrar” essa ou aquela tecnologia para o cliente. A ele deve ser oferecido aquilo que lhe é necessário, que realmente se adequa às suas necessidades.

Não bastasse essa demanda por conhecimento da tecnologia, o profissional, especialmente o profissional de telecomunicações, precisa se adequar à nova equação do mercado: $\frac{1}{2} \cdot 2.3 = P + L$, que significa que metade das pessoas chave nas organizações vêm sendo pagas duas vezes mais que antes, tendo que produzir três vezes mais e ainda manter (ou até superar) a produtividade e o lucro anteriores [2]. Para atender a esses requisitos é preciso acesso à informação e a capacitação para utilizá-la. De um lado as organizações precisam se antecipar às necessidades dos clientes, estar próximo deles. De outro é preciso velocidade na tomada das decisões internas. E é nesse cenário que surgem as comunicações móveis. A cada dia há maior necessidade dos profissionais se deslocarem para fora de seus escritórios, para perto do cliente e da tecnologia e apresentarem um desempenho no mínimo igual àquele que seria alcançado se estivessem dentro da organização. As informações precisam ser consultadas e atualizadas quase que em tempo real, sejam estas informações de caráter tecnológico ou relacionadas ao cliente. A variedade de serviços oferecidos a cada dia pelos sistemas de comunicação móvel é o reflexo de toda essa necessidade de acesso e utilização da informação como fator determinante do sucesso das organizações.

Em 1947 a AT&T Bell Laboratories introduziu o conceito de telefonia celular com um sistema de comunicação móvel que utilizava modulação AM. O baixo desempenho desse sistema levou a AT&T Bell Laboratories, em 1962, a implementar um sistema com modulação em FM na faixa de VHF e com canais de 30KHz. Esse sistema teve sua primeira utilização comercial em 1979, tendo o nome de sistema AMPS (*Advanced Mobile Phone System*). Hoje, através da elaboração de normas mundiais, tem-se buscado constantemente a interoperabilidade dos sistemas de comunicação móvel e a possibilidade de comunicação global que permita a transmissão de voz, dados e aplicações multimídia.. Devido principalmente à possibilidade de implementação de novos serviços e também pela segurança na comunicação, os sistemas digitais têm se mostrado, cada vez mais, candidatos a serem a base definitiva dos futuros sistemas, principalmente com o avanço da micro-eletrônica e com o desenvolvimento das ferramentas de *software*.

Esse *tutorial* apresenta-se organizado da seguinte forma: a seção II aborda os principais fundamentos teóricos necessários ao entendimento dos sistemas de comunicação móvel. A seção III é dedicada às técnicas que permitem a um número elevado de usuários o compartilhamento dos recursos desses sistemas. Na seção IV são então

resumidamente descritos alguns dos principais sistemas de comunicação móvel e os padrões por eles atendidos.

Com sua modesta abrangência, este trabalho pretende servir como motivação ao leitor para a busca de novos conhecimentos no campo das comunicações móveis. Não houve a pretensão de esgotar aqui o assunto, que seja de maneira resumida, mas sim de fornecer ao leitor um texto condensado reunindo conceitos fundamentais e essenciais ao entendimento de publicações e norma relacionadas, abordando ainda as principais características de alguns dos sistemas de comunicação móvel atuais e emergentes.

II. A COMUNICAÇÃO MÓVEL – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

II.1. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL DE COMUNICAÇÃO

Pode-se definir como comunicação móvel aquela onde existe a possibilidade de movimento relativo entre partes ou as partes sistêmicas envolvidas. Como exemplo tem-se a comunicação entre aeronaves, entre aeronaves e uma base terrena, entre veículos, a telefonia celular, a computação móvel, algumas classes de sistemas de telemetria, etc.. Uma comunicação fixa (por exemplo um *link* de microondas entre uma estação rádio base e uma central de comutação e controle de um sistema de telefonia celular) não caracteriza uma comunicação móvel, mas pode fazer parte de um sistema de comunicação móvel. Vários exemplos dessa natureza podem ser encontrados na prática.

Os canais associados a sistemas de comunicação móvel podem ser agrupados em dois tipos: um pode ser chamado de canal via satélite e o outro de canal terrestre.

O canal de comunicação via satélite é um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) onde predominam fortes atenuações e muitas vezes grandes atrasos de propagação do sinal. O termo AWGN é utilizado em modelamentos matemáticos para caracterizar aqueles canais onde o tipo de ruído responsável por degradar a comunicação é um ruído branco adicionado ao sinal. Este tipo de ruído é um dos mais “bem comportados” e a teoria acerca do desenvolvimento de receptores ótimos¹ para utilização em canais AWGN já se tornou clássica [8]. O ruído branco é um sinal aleatório e tem um modelamento matemático que o considera como possuindo largura de faixa infinita, média nula e correlação nula entre suas amplitudes tomadas a instantes de tempo distintos, ou seja, o valor da amplitude do ruído em um determinado instante independe daquele observado em outro instante de tempo qualquer. O termo gaussiano se deve ao fato desse tipo de ruído possuir uma função densidade de probabilidade gaussiana com média nula, com desvio padrão igual à sua tensão rms (*root-mean-square*) e variância igual à potência dissipada em um resistor de 1Ω . [11].

¹ Um receptor é dito ótimo sob algum critério de optimalidade, por exemplo, máxima relação sinal ruído, mínima probabilidade de erro de decisão (para sistemas de comunicação digital), etc..

Há três categorias nas quais se encaixam todos os sistemas de comunicação móvel via satélite. A primeira se refere aos satélites de órbita geossíncrona (GEO – *Geostationary Earth Orbit*). Esses satélites parecem estar parados para um observador na terra. Os satélites de órbita média (MEO – *Medium Earth Orbit*) e os de órbita baixa (LEO – *Low Earth Orbit*) estão mais próximos da superfície da terra e para que se mantenham nessa órbita necessitam viajar a uma velocidade superior à de rotação da terra, não possuindo, portanto, cobertura fixa. A distância dos vários satélites à terra, a porcentagem da superfície da terra “vista” por cada um (*footprint*), a largura de faixa de operação e o atraso de propagação (somente subida ou descida) típicos podem ser visualizados na Tabela 1 [2].

Tipo	Altitude	Footprint	Banda (GHz)	Atraso
GEO	~35781Km	34%	20 a 30 (Ka) 11 a 17 (Ku) 4 a 8 (C)	0.25s
MEO	13000Km a 10000Km	~24%	1 a 3 (L)	0.09s a 0.07s
LEO	1390Km a 755Km	5% a 2.5%	20 a 30 (Ka) 1 a 3 (L) 0.8	0.01s a 0.005s

Tabela 1 – Características das órbitas para satélites

O canal de comunicação terrestre tem como características principais a propagação por multipercursos e o efeito Doppler. O sinal recebido pelo terminal móvel é composto pela soma (vetorial) dos vários sinais oriundos de diferentes caminhos entre o transmissor e o receptor. Esses multipercursos são formados pela reflexão e/ou difração e/ou espalhamento do sinal transmitido em estruturas próximas ao receptor, tais como edifícios, árvores, postes, morros, etc.. A soma vetorial dos vários sinais dos multipercursos pode resultar em uma interferência construtiva ou destrutiva no sinal recebido. Com o movimento, as estruturas em torno do receptor vão se modificando e, por consequência, as interferências passam constantemente da situação construtiva para a destrutiva, fazendo com que a intensidade do sinal recebido varie rapidamente. Quanto maior a velocidade de movimentação, mais rápidas serão as variações no sinal recebido. Esse fenômeno de alteração na intensidade do sinal recebido é denominado desvanecimento por multipercursos.

O efeito Doppler é a percepção de uma frequência diferente daquela que está sendo transmitida por uma determinada fonte. Esse efeito acontece devido ao movimento relativo entre a fonte e o receptor. Quanto maior a velocidade de deslocamento do receptor em relação à direção de propagação da onda de rádio, maior o desvio de frequência percebido. Pode-se deduzir o valor do desvio Doppler em função da velocidade de movimento através de uma abordagem relativística [19] ou por simples geometria [14]. Ambos os resultados levam à expressão:

$$fD = \frac{v}{\lambda} \cos \theta \quad (1)$$

onde fD é o desvio Doppler, v é a velocidade do móvel e θ é o ângulo entre a direção do movimento e a direção de propagação da onda eletromagnética.

Em uma situação real, como o sinal é recebido por várias direções e como as características das estruturas variam conforme a posição do terminal móvel, cada um dos sinais dos multipercursos sofrerá diferentes desvios Doppler e como resultado tem-se não mais um desvio, mas um espectro Doppler. Esse espectro é formado a partir da variação aleatória da frequência percebida em cada multipercurso, conforme a variação das estruturas ao redor do receptor, dando origem ao que é denominado Ruído FM Aleatório (*Random FM Noise*), ruído esse que é o responsável pela existência de um patamar mínimo para a probabilidade de erro de bit em vários sistemas de comunicação móvel digital. Esse patamar não pode ser reduzido mesmo com o aumento da potência de transmissão [19].

A resposta ao impulso de um canal de rádio móvel terrestre pode ser descrita pela expressão (2) e visualizada através da Figura 1.

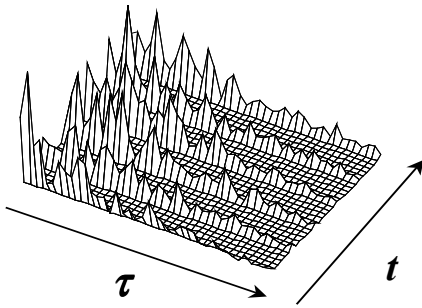


Figura 1 – Ilustração da resposta ao impulso de um canal de rádio móvel terrestre para vários instantes de observação

$$h(t, \tau) = \sum_{l=1}^L g_l(t, \tau) \delta(t - \tau_l(t)) \quad (2)$$

Em (2) L é o número de percursos causados pelo canal, $\tau_l(t)$ é o atraso de propagação do l -ésimo percurso, no instante t e g_l é uma variável aleatória complexa de média nula, cuja envoltória segue uma distribuição de Rayleigh [13]. A função densidade de probabilidade de Rayleigh tem o aspecto ilustrado pela Figura 2 e normalmente caracteriza o desvanecimento percebido em uma comunicação móvel onde não há predominância de visada direta entre a antena transmissora e a receptora.. Esse desvanecimento indica que existe uma maior probabilidade da amplitude da envoltória do sinal recebido estar abaixo de um valor médio, de acordo com a interpretação da função densidade de probabilidade de Rayleigh da Figura 2.

Na Figura 1 pode-se observar dois efeitos: a variação temporal do canal (ilustrada pelo eixo em t) e o espalhamento temporal causado pela propagação por multipercursos (eixo em τ).

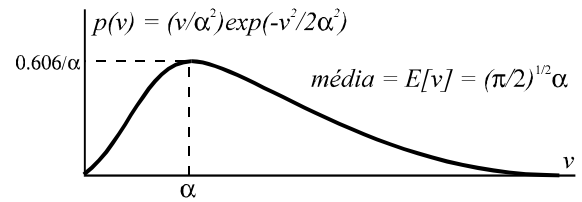


Figura 2 – Ilustração da função densidade de probabilidade Rayleigh (de Feher, 1995, p. 448)

Para se avaliar um sistema de comunicação digital em um canal de rádio móvel terrestre, ou mesmo para que seja projetado um outro sistema, faz-se necessária a utilização de parâmetros que forneçam o maior número de informações acerca das características e do comportamento do canal. Uma breve síntese desses parâmetros é abordada a seguir [5].

Quando um sinal é transmitido em um canal de rádio móvel terrestre, no receptor tem-se réplicas desse sinal oriundas de vários multipercursos. O resultado é um espalhamento temporal do sinal, espalhamento este que pode ser quantificado (valor médio, *rms* ou máximo) através do Perfil de Intensidade de Potência, mais conhecido como MIP (*Multipath Intensity Profile*) e de onde se obtém o Espalhamento por Atraso entre Multipercursos (*Multipath Delay Spread*) ou simplesmente Espalhamento Temporal. O MIP fornece o comportamento da energia recebida durante um intervalo de tempo correspondente ao máximo espalhamento do sinal recebido causado pelos multipercursos do sinal transmitido.

Sempre que existe espalhamento temporal pode haver a alteração de amplitude das várias componentes do espectro do sinal transmitido. Esta alteração poderá ocorrer de maneira uniforme em toda faixa de frequências do sinal, configurando o chamado Desvanecimento Plano, ou poderá afetar somente uma determinada faixa de frequências, configurando o que é conhecido como Desvanecimento Seletivo ou Canal Seletivo em Frequência. A possibilidade de ocorrência de desvanecimento plano ou seletivo pode ser determinada pela Largura de Faixa de Coerência do canal. Este parâmetro fornece uma medida estatística da faixa de frequências em que o canal pode ser considerado plano ou, de forma análoga, é a faixa de frequências dentro da qual as componentes espectrais do sinal recebido possuem grande correlação de amplitude. A Largura de Faixa de Coerência é inversamente proporcional ao Espalhamento Temporal do canal e o seu valor exato depende da definição de um valor para a correlação entre as amplitudes das componentes espectrais, não existindo, portanto, uma fronteira nítida que separe um canal seletivo daquele que possa ser considerado plano.

O espalhamento temporal leva à possibilidade de ocorrência de desvanecimento seletivo e, nessa situação, em sistemas digitais, pode ocorrer o que é conhecido como Interferência Intersimbólica. Essa interferência é a sobreposição temporal de símbolos vizinhos recebidos na “saída” do canal no momento de decisão dos bits e leva à necessidade de redução da taxa de transmissão através desse canal ou à implementação de técnicas que minimizem os seus efeitos.

Em um canal de rádio móvel pode ocorrer o movimento relativo entre transmissor e receptor e/ou os objetos que circundam o transmissor e o receptor estão em movimento. Em qualquer dos dois casos há variação nos caminhos tomados pelo sinal que trafega do transmissor ao receptor. Essa variação faz com que o sinal recebido apresente uma correspondente variação de fase cuja taxa pode ser vista como uma variação de frequência do sinal recebido em cada multipercurso, formando o já citado Espalhamento Doppler ou Espectro Doppler. Dessa característica pode-se retirar um parâmetro que informe a variabilidade temporal do canal. Tal parâmetro é denominado Tempo de Coerência é uma medida estatística do intervalo de tempo durante o qual a resposta ao impulso do canal pode ser considerada como invariante ou, de maneira análoga, é o intervalo de tempo dentro do qual os sinais recebidos possuem grande correlação de amplitude. O Tempo de Coerência é inversamente proporcional ao Espalhamento Doppler e, de maneira análoga à anterior, não fornece uma fronteira nítida entre um canal que varia rapidamente, configurando um Desvanecimento Rápido, e aquele que varia lentamente, configurando um Desvanecimento Lento. Na prática assume-se que um canal pode ser considerado lento se suas características não se alteram entre dois intervalos de sinalização consecutivos do sinal transmitido [13].

É importante citar que os parâmetros do canal podem ser separados em parâmetros de dispersão temporal e parâmetros de variação temporal. São efeitos independentes, ligados a comportamentos distintos do canal.

Outra característica importante do canal de rádio móvel terrestre está relacionada à atenuação média do sinal em função da distância entre transmissor e receptor. Uma propagação no espaço livre segue a conhecida lei quadrática de variação da potência recebida com a distância, ou seja

$$\Pr_m(d) = \Pr_m(d_0) - 10 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (3)$$

onde $n = 2$, $\Pr_m(d)$ é a potência média recebida a uma distância d qualquer da antena transmissora e $\Pr_m(d_0)$ é a potência média recebida a uma distância de referência d_0 , distância essa igual ou superior à distância de Fraunhofer – ponto fora da região de campo próximo da antena transmissora [14].

No canal de rádio móvel terrestre o expoente de perdas no percurso, n , é diferente de 2 (entre 2.5 e 6, tipicamente), e seu valor depende das características estruturais da região onde a comunicação se estabelecerá. Rappaport em [14] apresenta um simples método para estimação desse expoente a partir de algumas medidas em campo na área sob análise.

Existem vários métodos de predição de perdas no percurso para canais de rádio móvel terrestres, métodos esses comumente utilizados durante o planejamento de sistemas celulares, onde alguns são a base dos *softwares* de planejamento utilizados e encontrados no mercado. Entre tais modelos pode-se citar o Modelo de Durkin, o Modelo de Okumura, o Modelo de Hata e o Modelo de Lee [9], [14].

Devido à grande variabilidade das estruturas tipicamente encontradas em canais de rádio móvel terrestres, a uma mesma distância de um transmissor a potência recebida é variável. Quando grandes obstáculos, como edifícios, morros e similares se situam entre transmissor e receptor de um sistema de comunicação móvel aparece o efeito denominado sombreamento (*shadowing*), efeito esse que pode provocar consideráveis “vales” na potência recebida e interromper instantaneamente a comunicação. Medidas comprovam que a variabilidade do sombreamento segue uma distribuição gaussiana em escala logarítmica, ou seja, segue uma distribuição logonormal. Assim, pode-se rescrever a equação de perdas no percurso de forma a considerar esse novo efeito:

$$\Pr(d) = \Pr_m(d_0) - 10 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)^n + X_\sigma \quad (4)$$

onde $\Pr(d)$ é a potência média recebida em um ponto qualquer a uma distância d da antena transmissora e X_σ é uma variável aleatória com distribuição logonormal (em dB). O desvio padrão dessa variável se situa normalmente na casa dos 7 a 15 dB [14]. Vale observar que o valor da potência $\Pr(d)$ não considera as variações causadas pelos multipercursos.

II.2. VIABILIZAÇÃO DA COMUNICAÇÃO NO CANAL DE RÁDIO MÓVEL

Em qualquer sistema de comunicação é desejada a transmissão da maior quantidade de informação possível no menor intervalo de tempo. Cada tipo de informação (voz, dados, vídeo) necessita, para uma qualidade esperada na recepção, uma determinada largura de faixa e uma potência de transmissão. Por outro lado, se esta informação está sendo transmitida na forma analógica ou digital, os requisitos para o sistema são diferentes. Em uma comunicação móvel analógica, para um determinado tipo de informação qualquer, o aumento na qualidade da transmissão é alcançado às custas de um “proporcional” aumento da potência de transmissão, recurso este normalmente limitado nesses sistemas. Com relação à largura de faixa ocupada, modulações do tipo FM Faixa Estreita e AM-SSB são as que melhor utilizam o espectro disponível [19]. Contudo, é sabido que uma transmissão analógica tem como grandes desvantagens a pequena imunidade a ruídos e o reduzido número de possibilidades de serviços a serem oferecidos, além do pequeno grau de segurança na comunicação. A atratividade da comunicação digital frente à analógica é há muito tempo notável e hoje é certa a substituição da maioria dos sistemas de comunicação analógicos pelos seus equivalentes digitais.

Ainda objetivando transmitir a maior quantidade de informação por unidade de tempo, o que se traduz em uma maior taxa de transmissão para os sistemas digitais e/ou uma melhor qualidade do serviço oferecido, várias técnicas foram desenvolvidas. Dentre elas pode-se citar a codificação de fonte, a codificação de canal, o processo de *interleaving*,

técnicas de modulação digital adequadas, a diversidade, a equalização de canal, os processos de controle de potência e de utilização do ciclo de atividade da voz em sistemas celulares e os processos de cancelamento de interferência. Os parágrafos a seguir apresentam, de forma resumida, as principais finalidades de cada uma dessas implementações.

II.2.1. CODIFICAÇÃO DE FONTE

Segundo define a teoria da comunicação, a quantidade de informação está diretamente ligada à incerteza contida no que se pretende transmitir ou comunicar [6]. Para melhor entender esse raciocínio, imagine uma única frase escrita em uma folha de papel várias vezes. O número de caracteres pode ser elevado, mas seria suficiente ler nessa folha a frase escrita somente uma vez. Na própria frase pode haver palavras que podem ser “descartadas” sem que se perca sua inteligibilidade. Assim acontece com quase todo tipo de informação que se deseja transmitir – há sempre alguma redundância inerente.

As técnicas de codificação de fonte tem o objetivo de reduzir, tanto quanto possível, a redundância existente nos dados, antes que estes sejam transmitidos. A codificação de fonte é a base teórica que levou à implementação dos algoritmos de compressão de voz, dados e imagens hoje existentes nos sistemas de comunicação digital e armazenamento.

No caso dos sistemas de telefonia móvel digital são utilizadas várias técnicas de codificação de fonte nos denominados *vocoders* (codificadores de voz). Esses codificadores têm o poder de reduzir a taxa de transmissão necessária para representar um sinal de voz dos conhecidos 64Kbps utilizados nos sistemas PCM para a casa dos 5 a 15Kbps, sem grande prejuízo para a qualidade na comunicação. Com essa redução pode-se economizar drasticamente o espectro ocupado pelo sinal de rádio frequência que irá transportar essa voz.

No caso de transmissão de dados e imagem há também várias técnicas de codificação de fonte (compressão). O ganho que se obtém com essa compressão reflete diretamente na largura de banda ocupada pelo sinal modulado ou na taxa de transmissão atingível em uma dada banda disponível.

As técnicas de codificação de fonte têm sido objeto de constante pesquisa e grandes avanços para a área de telecomunicações tem sido alcançados.

II.2.2. CODIFICAÇÃO DE CANAL

Claude E. Shannon, em 1948, publicou o artigo sobre a teoria matemática da comunicação que se tornou clássico e até hoje é referência bibliográfica de qualquer texto que aborde esse assunto [15]. Segundo Shannon haveria um limite na quantidade de informação que poderia trafegar por

um canal com ruído. Em se tratando de uma comunicação digital em um canal AWGN, foi demonstrado que a maior taxa de transmissão que pode trafegar nesse canal é dada por:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) \quad (5)$$

onde C é a capacidade do canal em bits por segundo (bps), P é a potência do sinal enviado através desse canal e N é a potência de ruído branco na largura de faixa disponível B .

Shannon demonstrou que, adicionando uma redundância controlada à informação, poder-se-ia reduzir a quantidade de erros na recepção induzidos pelo ruído a um patamar tão pequeno quanto se quisesse, desde que a taxa de transmissão estivesse abaixo do limite determinado pela expressão (5).

A codificação de canal é justamente o processo através do qual a redundância anteriormente citada é adicionada à informação de modo a permitir a detecção e correção de erros. O termo “redundância controlada” está relacionado à restrição das possíveis seqüências de bits de informação na recepção. Tendo uma seqüência detectada um padrão diferente das possíveis seqüências, o decodificador de canal “procura” dentre elas a seqüência que mais se assemelha à seqüência detectada. Essa semelhança é obtida através da correta utilização de critérios de decisão, sendo que os mais conhecidos são o critério do máximo a-posteriori - MAP (*Maximum a-posteriori*) e o de máxima verossimilhança - ML (*Maximum Likelihood*) [8]. Ambos têm como objetivo minimizar o erro de decisão sobre os bits transmitidos.

Existem duas grandes famílias de códigos detectores e corretores de erros: os códigos de bloco e os convolucionais. A codificação de bloco atribui a cada bloco de n bits de informação uma palavra código com k bits codificados, $k > n$. Um código assim formado é descrito na literatura como código de bloco (n,k) , sendo que a relação entre o número de bits de um bloco de informação e o número de bits da palavra código correspondente, n/k , é denominada taxa do código. De maneira geral, quanto menor a taxa de um código, maior a sua capacidade de detecção e correção de erros.

A outra família de códigos se refere aos convolucionais. Nesse tipo de codificação uma seqüência contínua de bits de informação, com tamanho variável, é mapeada em uma seqüência também contínua de bits codificados. Um codificador convolucional é dito com memória, pois um determinado bit codificado depende de um ou mais bits de informação anteriores combinados linearmente.

Existem vários algoritmos de decodificação para códigos de bloco e convolucionais. Destaque maior é dado àqueles caracterizados como algoritmos de decodificação suave (*soft decision decoding algorithms*). Nesse tipo de decodificação não são utilizados os bits “0s” e “1s” detectados no receptor, como acontece nos algoritmos de decodificação abrupta (*hard decision decoding algorithms*), e sim os valores reais dos sinais recebidos. Esse processo apresenta consideráveis ganhos em relação ao processo de decodificação abrupta.

Para os códigos convolucionais, o algoritmo de decodificação suave que minimiza a probabilidade de erro na decisão sobre os bits de informação transmitidos e que, portanto, utiliza o critério de máxima verossimilhança já citado, é o algoritmo de Viterbi [8], [18].

Para os códigos de bloco os processos de decodificação suave podem utilizar o algoritmo de Viterbi, mas atenção maior vem sendo dada a algoritmos de decodificação por treliça menos complexos que o algoritmo de Viterbi [7].

Em vários sistemas de comunicação móvel são utilizadas codificações em cascata. Essa cascata pode conter somente codificadores de bloco, codificadores de bloco e convolucionais ou somente codificadores convolucionais – são os denominados códigos concatenados.

É importante nesse momento ressaltar a diferença entre os processos de codificação de fonte e de codificação de canal. O primeiro tem como objetivo reduzir a quantidade de bits necessários à representação da informação, ou seja, diminuir a redundância existente na informação. O segundo adiciona, de maneira controlada, outro tipo de redundância na informação, objetivando a detecção e a correção de erros causados pelo canal. Esses dois processos normalmente estão presentes nos sistemas de comunicação digital.

II.2.3. ENTRELACEMENTO TEMPORAL - INTERLEAVING

Um dos fatores que reduzem o desempenho dos decodificadores e, por consequência, a qualidade do serviço oferecido pelo sistema de comunicação está ligado ao canal de comunicação. Um canal de comunicação é dito sem memória quando afeta de maneira independente bits adjacentes. Ao contrário, quando vários bits consecutivos são afetados, diz-se que se trata de um canal com memória.

Um canal de rádio móvel terrestre é essencialmente um canal com memória. Nos momentos de profundos desvanecimentos, uma grande quantidade de bits pode ser “destruída”. Os decodificadores, de maneira geral, não têm capacidade de corrigir essas longas seqüências de erros em rajada (ou erros em *burst*).

O que é feito para minimizar esse problema é o chamado *interleaving*. Esse processo “embaralha” os bits codificados de tal sorte que bits anteriormente adjacentes sejam colocados distantes no tempo. Isso faz com que, na ocorrência de erros em *burst*, não sejam afetados bits adjacentes, facilitando o processo de detecção e correção de erros.

Um simples processo de *interleaving* é aquele no qual a seqüência de bits codificados preenche linha a linha uma memória de tamanho definido e os bits entrelaçados são lidos coluna a coluna dessa memória. Na recepção o processo inverso é executado.

Vale citar que o processo de *interleaving* causa um atraso adicional na comunicação, atraso este que pode ou não ser prejudicial, dependendo da natureza da informação que se deseja transmitir. Uma comunicação em tempo real oferece limites menores para o atraso no processo de *interleaving*, enquanto uma comunicação de dados onde há armazenamentos momentâneos é menos restrita em termos desse atraso.

II.2.4. DIVERSIDADE

A diversidade é uma técnica na qual réplicas de um sinal são combinadas na recepção no intuito de se obter maior confiabilidade na detecção desse sinal.

Em um canal de rádio móvel terrestre, devido aos efeitos dos multipercursos, em um determinado instante pode-se ter um sinal recebido com intensidade insuficiente para a recuperação do sinal transmitido. Porém, é sabido que quando dois sinais iguais são transmitidos através desse canal em instantes de tempo distintos e transportados por portadoras distintas, na recepção ter-se-á a situação: quanto maior a separação temporal entre as réplicas do sinal e quanto maior a separação entre as portadoras utilizadas, menor será a correlação entre as envoltórias dos sinais recebidos. Essa observação é de fundamental importância para o entendimento da diversidade, ou seja, se de alguma forma é possível disponibilizar ao receptor réplicas da informação transmitida, sendo essas réplicas afetadas diferentemente (de maneira descorrelacionada) pelo canal, em determinado instante uma réplica poderá estar em situação de desvanecimento profundo, mas será grande a probabilidade de que outras réplicas não estejam nessa situação. Assim, elas podem ser combinadas para fornecer ao processo de detecção um sinal mais “estável” que aquele obtido se não houvesse réplicas não correlacionadas, ou seja, se não houvesse diversidade.

São várias as formas de diversidade. Dentre elas pode-se citar a diversidade espacial, a diversidade temporal, a diversidade em frequência, etc..

Na diversidade espacial, antenas receptoras são fisicamente separadas de tal sorte que os sinais recebidos por cada uma delas estejam descorrelacionados. Os sinais provenientes dessas antenas são então combinados pelo receptor.

Na diversidade temporal, réplicas da informação são enviadas em instantes de tempo distintos, sendo que o intervalo de separação entre essas réplicas deve ser superior ao tempo de coerência do canal para que haja sinais descorrelacionados na recepção.

A diversidade em frequência utiliza o mesmo princípio, ou seja, réplicas da informação são transportadas por portadoras distintas, portadoras estas separadas em frequência de um valor superior à largura de faixa de coerência do canal, também para que haja descorrelação entre as réplicas obtidas na recepção.

Outros tipos de diversidade são encontrados na prática, mas sempre com propósitos similares àqueles aqui apresentados.

Com relação às regras de combinação utilizadas no processo de diversidade, a literatura cita várias. Algumas apresentam desempenho superior, mas são mais complexas; outras são extremamente simples, mas não apresentam desempenho ótimo. Apenas em caráter informativo pode-se citar a regra de combinação com ganhos iguais, EGC (*Equal Gain Combining*), a regra de combinação de máxima razão, MRC (*Maximum Ratio Combining*) e a regra de Seleção [3, p. 335]. A regra EGC simplesmente soma os sinais a serem combinados, eventualmente ponderando-os com ganhos iguais. A regra MRC, antes de somar os sinais a serem combinados pondera suas amplitudes por um valor proporcional à relação entre o nível de tensão do sinal recebido e a potência de ruído associada. Essa regra de combinação é considerada ótima para canais com desvanecimento Rayleigh [13], [19], pois maximiza a relação sinal ruído instantânea na saída do combinador e, portanto, minimiza a probabilidade de erro na decisão posterior. A regra de seleção, como o nome indica, seleciona dentre os sinais a serem combinados aquele com maior intensidade (e em aplicações mais avançadas aquele que produza a menor probabilidade de erro na decisão).

A utilização de diversidade em sistemas de comunicação móvel é vital para que se alcance desempenhos aceitáveis. Pesquisas recentes têm focado a implementação de diversidade em frequência com o uso de multiportadoras. Algumas dessas implementações têm demonstrado a possibilidade de superar o desempenho alcançado com os convencionais receptores RAKE. Basicamente, ao invés de transmitir o sinal modulado fazendo uso de uma única portadora, várias portadoras transportam paralelamente um determinado número de bits, sendo que a taxa de transmissão em cada portadora é reduzida e a taxa total tem a possibilidade de superar aquela atingível com uma única portadora. Uma possível estrutura que combina o uso de multiportadoras e codificação de canal pode ser vista em [5], onde também são citadas várias outras implementações correlatas.

II.2.5. TÉCNICAS DE MODULAÇÃO DIGITAL

Um sistema de comunicação móvel apresenta algumas exigências no que diz respeito aos esquemas de modulação. Dentre essas exigências pode-se citar: reduzida complexidade de implementação, robustez contra desvanecimentos por multipercursos, envoltória filtrada constante e eficiência espectral adequada.

Os terminais móveis devem possuir dimensões reduzidas e baixo custo e, para que isso seja possível, a complexidade do circuitos utilizados também deve ser reduzida. Nesse aspecto, atenção especial é dada às técnicas de modulação baseadas em FSK (*Frequency Shift Keying*) e PSK (*Phase Shift Keying*).

É sabido que existe um compromisso a ser atendido entre a eficiência espectral de um tipo de modulação e a sua eficiência de potência. Por um lado, aumentando-se o número de pontos em uma constelação PSK aumenta-se a eficiência espectral, mas é necessário um aumento na energia de cada símbolo para que o desempenho, em termos da probabilidade de erro de bit, seja equiparável ao anterior. Em um canal de rádio móvel terrestre, devido aos grandes desvanecimentos por multipercursos e à ocorrência de sombreamento, modulações do tipo *M*-QAM ou *M*-PSK com *M* acima de 4 são inviáveis devido à sua pequena eficiência de potência, ou seja, para se atingir uma probabilidade de erro de bit aceitável em um sistema de comunicação móvel que utiliza essas modulações seria necessária uma grande potência de transmissão. Um valor elevado para essa potência faz com que as baterias dos terminais portáteis tenham vida reduzida e tamanho elevado, além de tornar complexos os estágios de amplificação dos transmissores, elevando os custos de aquisição e operação do sistema. Nesse aspecto são preferidas modulações com no máximo quatro pontos em sua constelação.

Em um canal de rádio móvel via satélite, canal este que pode ser considerado essencialmente gaussiano (AWGN), modulações com maior eficiência espectral podem ser implementadas.

Ainda objetivando reduzir o consumo de energia dos transceptores, é desejável a utilização de amplificadores de potência não lineares (Classe C, por exemplo), amplificadores estes que apresentam elevado rendimento. Contudo, quando sinais de amplitudes variáveis são injetados nesses amplificadores, sua não linearidade faz com que o espectro de saída apresente componentes de frequência fora da faixa de interesse. Em um transmissor, antes do sinal modulado ser amplificado, é executada a filtragem, objetivando limitar o espectro do sinal transmitido. Ao passar por um amplificador não linear, esse sinal pode voltar a apresentar um espectro com largura superior à desejada. Esse efeito acontece quando o sinal a ser amplificado não possui envoltória constante, com é o caso de sinais modulados em fase quando passam pelo filtro de transmissão (antes da etapa de amplificação de potência). Então, nesse aspecto, é desejável que as técnicas de modulação sejam baseadas em FSK ou em alguma modulação PSK que não apresente grandes transições de fase.

Devido à escassez do espectro de rádio frequências, uma característica fundamental de qualquer esquema de modulação para comunicações móveis é a eficiência espectral adequada. Todas as técnicas utilizadas em comunicações móveis procuram ao máximo reduzir a largura de faixa ocupada pelo sinal modulado.

II.2.5.1. MODULAÇÃO MSK

A modulação MSK (*Minimum Shift Keying*) é uma modulação FSK com a separação mínima entre as portadoras utilizadas de modo a garantir a ortogonalidade entre elas. Essa ortogonalidade é imprescindível a uma detecção

confiável do sinal recebido, pois sinais ortogonais são independentes, ou seja, facilmente diferenciáveis.

Das técnicas de modulação digital para comunicações móveis a MSK apresenta menor complexidade de implementação. Por se tratar de uma modulação em frequência, a técnica MSK apresenta envoltória filtrada constante, o que viabiliza a utilização de amplificadores de potência não lineares nos transceptores. A robustez contra os efeitos do canal de comunicação é também uma característica da modulação MSK. O espectro do sinal modulado é o que possui largura de faixa do lóbulo principal maior dentre as demais técnicas utilizadas em comunicações móveis, mas apresenta queda de energia com a frequência relativamente abrupta, facilitando o processo de filtragem na transmissão [3].

II.2.5.2. MODULAÇÃO $\pi/4$ -DQPSK

A modulação $\pi/4$ -DQPSK ($\pi/4$ – *Differential Quaternary Phase Shift Keying*) é formada a partir de duas constelações QPSK deslocadas de $\pi/4$ radianos. É feito um mapeamento dos bits de entrada do modulador nos 8 símbolos da modulação de forma a não permitir a ocorrência de transições de fase superiores a 135° no sinal modulado. Ainda, cada símbolo transmitido depende daquele transmitido anteriormente, ou seja, o valor de cada dabit de entrada do modulador não está associado diretamente ao valor absoluto da fase da portadora, como acontece na modulação PSK convencional, mas à diferença entre fases consecutivas. Essa implementação caracteriza uma modulação diferencial e permite a implementação de demoduladores que não utilizam a informação de fase da portadora recebida no processo de detecção – demodulação não coerente. O emprego de portadora piloto pode auxiliar na implementação de um eventual esquema de demodulação coerente, onde as variações causadas pelo canal nessa portadora servem como referência para o circuito de recuperação e rastreamento da fase da portadora.

II.2.5.3. MODULAÇÃO OQPSK

A modulação OQPSK (*Off-set Quaternary PSK*) é também baseada na modulação QPSK e tem como objetivo a redução das transições de fase do sinal modulado, limitando-as a um máximo de 90° e possibilitando assim a sua utilização com amplificadores não lineares [14].

II.2.5.4. MODULAÇÃO GMSK

A modulação GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) é uma modificação da técnica MSK, na qual a sequência de bits de entrada do modulador é filtrada por um filtro passa-baixas com resposta a um pulso retangular gaussiana. A saída desse filtro é então responsável por modular em MSK

as portadoras utilizadas. O efeito do filtro é o de conformar os pulsos de entrada do modulador MSK tornando as transições de frequência mais suaves e, com isso, reduzindo a largura de faixa do lóbulo principal do sinal modulado [3], [14].

Um parâmetro que caracteriza a modulação GMSK é o produto BT , onde B é a largura de faixa (3 dB) do filtro gaussiano e T é a duração de um bit de entrada do modulador. A Figura 3 ilustra a resposta a um pulso retangular do filtro conformador da modulação GMSK. Nota-se que para $BT = \infty$ a modulação GMSK se reduz à modulação MSK.

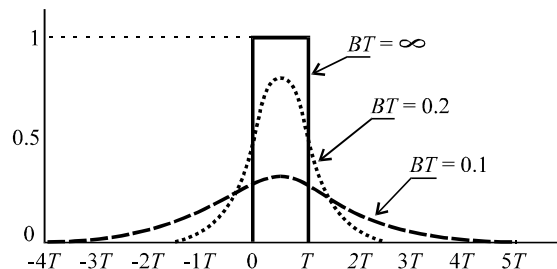


Figura 3 – Resposta de um filtro gaussiano a um pulso retangular para alguns valores de BT (de Feher, 1995, p. 166)

II.2.5.5. ESPALHAMENTO ESPECTRAL

Um sinal espalhado espectralmente é aquele que ocupa uma largura de faixa muitas vezes superior à necessária, independentemente da largura de faixa do sinal original [20]. Um sinal que ocupa uma largura de faixa muito maior que a taxa de transmissão de informação não configura, necessariamente, um sinal espalhado espectralmente, caso este que acontece com algumas modulações com baixa eficiência espectral.

Existem duas formas básicas de se gerar um sinal espalhado espectralmente: o espalhamento por sequência direta e o espalhamento por saltos em frequência.

O espalhamento espectral por sequência direta, DS-SS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), é uma técnica na qual a sequência de símbolos de informação bipolar $\{\pm 1\}$ é multiplicada por uma sequência pseudo aleatória, PN^2 , também bipolar $\{\pm 1\}$ ou, equivalentemente, a sequência de símbolos de informação unipolar $\{0,1\}$ é somada (módulo 2) a uma sequência PN também unipolar $\{0,1\}$. O resultado de uma das operações anteriores modula uma portadora senoidal, normalmente em fase (PSK) [13]. A sequência PN possui taxa muitas vezes superior à taxa de bits originais, de tal forma que o espectro resultante possua uma largura de faixa correspondentemente elevada. A Figura 4 ilustra uma possível implementação do processo.

² Uma sequência PN é uma sucessão periódica de bits de curta duração (*chips*) com comportamento similar a um comportamento aleatório dentro de cada período.

O espalhamento espectral por saltos em frequência, FH-SS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) é uma técnica na qual a sequência de símbolos de informação bipolar modula, normalmente em frequência (FSK) [13], uma portadora que possui sua frequência variável em função de uma sequência pseudo aleatória. Se a sequência PN possui taxa muitas vezes superior à taxa de bits de informação, tem-se a implementação de um sistema FH-SS Rápido (*Fast Frequency Hopping Spread Spectrum*). Se, ao contrário, a sequência PN possui taxa inferior à taxa de bits originais, tem-se a implementação do sistema FH-SS Lento (*Slow Frequency Hopping Spread Spectrum*). A Figura 5 ilustra uma possível implementação do processo.

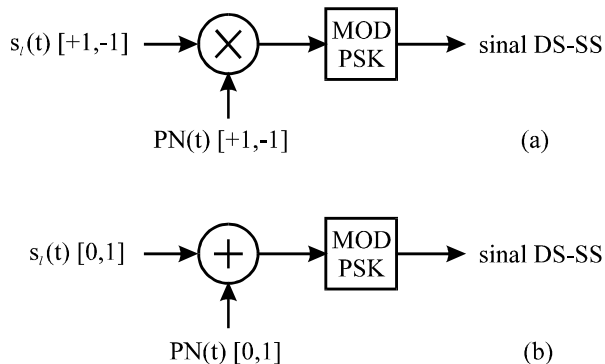


Figura 4 - Ilustração do processo de geração de um sinal DS-SS (a) por multiplicação e (b) por soma módulo 2.

Um sinal de faixa estreita, quando transmitido em um canal de rádio móvel, está sujeito a grandes variações temporais e espaciais. Se, ainda, sua largura de faixa não for consideravelmente inferior à largura de faixa de coerência do canal, estará sujeito ao desvanecimento seletivo e tornar-se-á inevitável a utilização de elaborados equalizadores nos receptores.

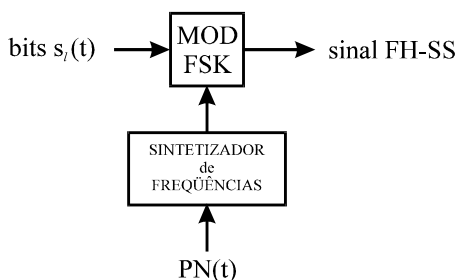


Figura 5 - Ilustração do processo de geração de um sinal FH-SS

Quando recebido, o sinal de faixa estreita é composto pela soma vetorial de vários sinais vindos de multipercursos que se sobrepõem temporalmente. Como as portadoras utilizadas na prática possuem elevada frequência (pequenos comprimentos de onda), pequenos deslocamentos espaciais do receptor ou pequenos movimentos dos objetos vizinhos podem causar alterações nas fases dos sinais nos vários multipercursos levando à possibilidade de uma mudança brusca de situação de interferência construtiva para interferência destrutiva entre esses sinais na recepção. Tão

maior será a taxa de variação da envoltória do sinal recebido quanto maior for a velocidade de movimentação do receptor ou dos objetos vizinhos, o que pode levar à situação de desvanecimento rápido, dificultando o processo de demodulação e detecção do sinal.

Um sinal espalhado espectralmente possui, quase sempre, uma largura de faixa muitas vezes superior à largura de faixa de coerência do canal. Dessa forma, é grande a possibilidade desse sinal sofrer desvanecimento seletivo. Porém, como essa diferença entre a largura de faixa do sinal e a Largura de Faixa de Coerência do canal é grande, uma pequena parcela do espectro total do sinal será afetada. Por esse ângulo, intuitivamente pode-se supor que um desvanecimento seletivo seja menos prejudicial a um sinal espalhado espectralmente do que o é a um sinal de faixa estreita.

No domínio do tempo esta análise se torna mais palpável. Suponha, para isto, que um sinal de um usuário em um sistema de comunicação que utiliza espalhamento espectral seja transmitido simultaneamente com outros usuários e que o canal seja dispersivo. No receptor desejado ter-se-á os sinais dos vários usuários, suas réplicas por multipercursos, o sinal de interesse e também suas réplicas. Através do processo de correlação do sinal recebido com a sequência PN conhecida no receptor pode-se separar o sinal desejado dos demais. Por se tratar de um sinal de faixa larga, as réplicas do sinal desejado com atrasos maiores que a duração de um *chip* da sequência PN não serão sobrepostas e, se estas forem adequadamente combinadas, ter-se-á o efeito de diversidade. Ainda, medidas demonstram que um sinal espalhado espectralmente possui grande correlação de amplitude em um espaço de até 5λ , onde λ é o comprimento de onda do sinal [14]. Estas características tornam esse sinal apropriado para a transmissão no severo canal de rádio móvel.

A Figura 6 ilustra o resultado de um experimento realizado para verificação de um sinal em banda básica recebido em um sistema com espalhamento espectral com 5 usuários, durante um intervalo de tempo correspondente à duração de 1 bit de informação (ou 1 bit codificado) para uma sequência PN de comprimento igual a 800, onde foram considerados quatro percursos significativos para o sinal transmitido. Observa-se que os quatro percursos foram afetados por "ganhos" diferentes do canal, sofreram atrasos diferentes e foram separados pelo sistema devido à elevada largura de faixa do sinal transmitido.

Observa-se ainda que o sinal recebido, após sofrer o processo de correlação com a sequência PN adequada, permitirá a combinação dos multipercursos - uma característica indesejável do canal é explorada para se obter melhor desempenho do sistema de comunicação, configurando o que é conhecido como diversidade de percursos (*path diversity*). O receptor que executa este processo de combinação de multipercursos é o receptor RAKE [13], [14], [17].

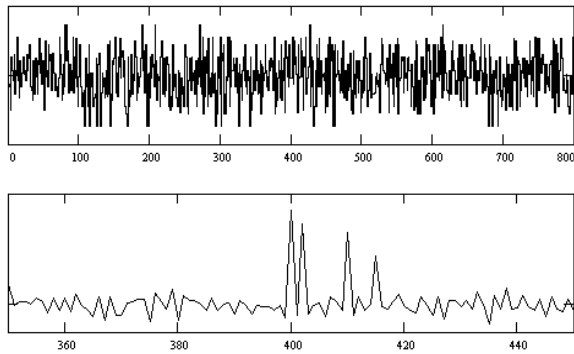


Figura 6 - Ilustração do sinal recebido em um sistema com espalhamento espectral (gráfico superior) e da possibilidade de separação dos multipercursos demonstrada pela função de correlação do sinal recebido com a sequência PN adequada (gráfico inferior em escala ampliada).

Outra característica importante de um sinal espalhado espectralmente se refere à Interferência Intersimbólica. Como pode ser visto na Figura 6, se o atraso provocado pelo canal não for superior à duração de um símbolo transmitido, a interferência intersimbólica será nula. Porém, mesmo que haja certa sobreposição temporal de símbolos vizinhos, é pouco provável que os multipercursos se sobreponham. No processo de detecção os parâmetros do canal são estimados de maneira a informar ao receptor em que instantes de tempo ele deve considerar cada multipercurso como válido para a combinação e posterior decisão. No receptor RAKE, por exemplo, os atrasos entre os multipercursos são estimados através da análise do próprio sinal recebido e dessa forma o receptor consegue combinar somente aqueles percursos que devem ser combinados [17]. Obviamente existem erros e imprecisões no processo de estimação dos parâmetros do canal, mas a possibilidade de diminuição dos efeitos da interferência intersimbólica é nítida e pode levar à possibilidade de um aumento efetivo da taxa de transmissão através do canal.

II.2.6. EQUALIZAÇÃO

Como já citado, em um canal dispersivo a sobreposição temporal de símbolos adjacentes recebidos caracteriza a interferência intersimbólica. Tanto mais prejudicial será essa interferência, quanto mais seletivo em frequência for o canal, ou seja, quanto maior a probabilidade de ocorrência de desvanecimento seletivo.

Se o canal não apresenta resposta em frequência plana em toda a faixa de frequências ocupada pelo sinal transmitido, é inevitável a utilização dos equalizadores. Estes têm a função de compensar as distorções em frequência causadas pelo canal ou, de maneira mais rigorosa, apresentam uma resposta em frequência inversa à resposta do canal.

Os equalizadores podem ser classificados em duas famílias: a dos equalizadores fixos e a dos equalizadores adaptativos. Na primeira família, como o próprio nome indica, a resposta em frequência dos equalizadores é fixa. Tais equalizadores são aplicáveis em sistemas de comunicação fixos em canais

aproximadamente invariantes no tempo, como pares metálicos e fibras ópticas.

Em um canal de rádio móvel, devido à sua variabilidade temporal, é necessária a utilização dos equalizadores adaptativos. Estes possuem sua resposta em frequência variável em função da resposta em frequência do canal. Essa resposta do canal é constantemente estimada pelos equalizadores adaptativos através da utilização de processamento digital de sinais, DSP (*Digital Signal Processing*).

É importante citar que a formatação dos pulsos transmitidos através do canal também é de fundamental importância na redução da interferência intersimbólica. Os filtros de transmissão e recepção devem, sempre que possível, atender ao critério de Nyquist para interferência intersimbólica nula, critério este que estabelece as condições, em termos de resposta ao impulso do conjunto filtro de transmissão, filtro de recepção e canal, que garantem a inexistência de interferência intersimbólica. Um dos formatos de pulso mais utilizados são os denominados pulsos coseno levantado (*raised cosine pulses*) e o filtro responsável pela formação desses pulsos é chamado filtro coseno levantado (*raised cosine filter*) ou filtro de roll-off (*roll-off filter*) [6].

II.2.7. CANCELAMENTO DE INTERFERÊNCIAS

Um dos grandes problemas em sistemas de comunicação móvel é o elevado grau de auto-interferência, ou seja, aquela interferência gerada pelo próprio sistema.

Basicamente pode-se caracterizar as interferências em um sistema de comunicação móvel como Interferência Co-canal e Interferência de Canal Adjacente.

A interferência no sinal desejado causada por sinais adjacentes em frequência é denominada interferência de canal adjacente. Esse tipo de interferência ocorre, principalmente, devido à produtos de intermodulação gerados nos amplificadores dos transmissores e não eliminados pelos filtros de canal dos receptores. Esse tipo de interferência pode ser minimizado através de elaborados filtros de recepção e de uma adequada alocação de frequências para cada usuário. Uma alocação adequada implica na utilização de faixas de frequência não contíguas em uma mesma região geográfica.

Alguns sistemas de comunicação móvel reutilizam um determinado conjunto de frequências em áreas diferentes. A interferência em um sinal desejado causada por um sinal de mesma frequência é denominada interferência co-canal. A redução da interferência co-canal se dá pela adequada separação física entre as fontes dos sinais interferentes. Em um sistema de comunicação móvel celular, por exemplo, se o tamanho de cada célula é aproximadamente o mesmo, a interferência co-canal é independente da potência de transmissão e torna-se função do raio da célula (R) e da distância ao centro da célula que utiliza o mesmo *set* de

freqüências (D), células estas denominadas de co-células. Aumentando a relação D/R a separação entre as co-células relativa à área de cobertura das mesmas torna-se maior.

Um outra forma de redução do nível de interferências em um sistema de comunicação móvel é baseada no controle de potência. A idéia é utilizar nos transceptores, dinamicamente, a menor potência necessária a uma qualidade aceitável do serviço. Além de elevar a vida útil de eventuais baterias utilizadas nos terminais móveis, a quantidade de interferência é drasticamente reduzida.

Hoje, com o aumento considerável da velocidade de processamentos dos DSPs (*Digital Signal Processors*), sofisticadas técnicas de redução de interferências em um sistema de comunicação móvel têm sido consideradas. São basicamente duas as técnicas que utilizam processamento digital de sinais: as antenas adaptativas e o cancelamento direto do sinal interferente. No primeiro caso um arranjo (*array*) de antenas colocado nas estações de rádio base tem as amplitudes e fases das correntes em cada elemento constantemente monitoradas/controladas de forma a maximizar a potência recebida/transmitida de/para um determinado usuário, conformando de maneira adaptativa o padrão de irradiação do arranjo de antenas. Elaborados algoritmos são implementados com a função de maximizar a relação sinal-interferência em um sinal recebido de um determinado usuário, independente da sua posição espacial em relação ao arranjo de antenas.

Em recentes pesquisas, técnicas de codificação de canal têm sido utilizadas com algoritmos de processamento digital de sinais objetivando, por exemplo, estimar os sinais (ou alguns sinais) interferentes no receptor de forma a subtraí-los do sinal recebido e assim minimizar a probabilidade de erro de decisão sobre o sinal desejado.

III. TÉCNICAS DE ACESSO PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL

As técnicas de acesso são utilizadas para permitir o compartilhamento de uma determinada faixa de rádio freqüência entre vários terminais móveis. O compartilhamento se faz necessário, pois objetiva-se maximizar o número de usuários simultâneos nessa faixa de freqüências [10], [14].

Em se tratando de uma comunicação bidirecional, o canal pode ser dividido temporalmente ou na freqüência. No primeiro caso tem-se a duplexação por divisão de tempo (TDD – *Time Division Duplexing*). Quando o canal é dividido em freqüência, tem-se a duplexação por divisão em freqüência (FDD – *Frequency Division Duplexing*). Em ambos os casos uma parcela do canal é destinada à transmissão e outra à recepção, independente do canal estar dividido temporalmente ou na freqüência. A técnica de duplexação TDD elimina a necessidade de utilização de faixa de freqüência distintas para transmissão e recepção, mas possui um atraso inerente – a comunicação não é *full-duplex* no sentido real.

Os sistemas de comunicação móvel podem ser divididos em sistemas de faixa estreita e sistemas de faixa larga. A distinção entre eles é feita baseada na comparação entre a largura de faixa de cada canal de usuário e a largura de faixa de coerência esperada para o canal de comunicação.

III.1. ACESSO FDMA

No método de Acesso Múltiplo por Divisão em Freqüência (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*), a largura de faixa total disponível é subdividida e a cada usuário é alocada uma dessas sub-faixas, normalmente por demanda. São características principais dos sistemas que utilizam FDMA:

- Se um canal não está sendo utilizado há literalmente um desperdício de recurso, posto que nenhum usuário o estará utilizando, o que acarretaria em um aumento da capacidade.
- A largura de faixa de cada canal é normalmente pequena, ou seja, um sistema com FDMA normalmente é um sistema de faixa estreita.
- Sendo cada canal de faixa estreita, em uma transmissão digital tem-se longas durações dos símbolos transmitidos em relação ao espalhamento temporal causado pelo canal, o que leva a uma pequena interferência intersimbólica. Esse fato permite a implementação de equalizadores não muito sofisticados nos receptores.
- A comunicação é contínua no tempo, o que leva à necessidade de poucos bits de *overhead* com o propósito de sincronização e delimitação de *frames* em uma transmissão digital.
- Os filtros de canal são normalmente caros, pois necessitam apresentar seletividade suficiente para reduzir a interferência entre canais adjacentes a patamares aceitáveis.
- Por transmitir e receber ao mesmo tempo, os transceptores necessitam de *duplexers*, o que eleva o custo do sistema.
- Nos casos em que muitos canais compartilham uma mesma antena e, portanto, o mesmo amplificador de potência, pode ocorrer intermodulação. Esse efeito se deve à passagem dos vários canais pelo amplificador de potência que, objetivando maximizar a eficiência de potência, trabalham com os dispositivos de amplificação perto da região não linear. [19]

III.2. ACESSO TDMA

No método de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA – *Time Division Multiple Access*) o espectro disponível é dividido em intervalos (*slots*) de tempo de tal forma que cada usuário possa transmitir ou receber durante o intervalo de tempo a ele reservado, e que é disponibilizado a cada usuário, periodicamente, a cada *frame*. Ao contrário dos sistemas com FDMA, que podem acomodar tanto sinais analógicos quanto digitais, sistemas com TDMA necessitam

operar somente com sinais digitais, pois a transmissão é feita em rajadas uniformemente espaçadas no tempo.

Em sistemas com TDMA/TDD, metade dos *slots* são destinados à transmissão e metade à recepção. No caso de TDMA/FDD um mesmo *slot* é utilizado na transmissão e recepção, sendo a separação feita na frequência.

Principais características da técnica TDMA:

- Devido às discontinuidades na transmissão, o processo de *handoff*³ do usuário móvel se torna mais simples, pois ele pode utilizar os intervalos de tempo sem transmissão para “ouvir” outros transmissores (de outras estações base, por exemplo, no caso de telefonia celular).
- Técnicas de equalização elaboradas normalmente precisam ser implementadas nos receptores, pois a taxa de transmissão em cada intervalo de tempo é alta se comparada com o caso de sistemas com FDMA.
- Os slots de tempo podem ser alocados por demanda para diferentes usuários, baseado em uma prioridade. Dessa forma compartilha-se melhor o espectro e tem-se um aumento na capacidade do sistema.

III.3. ACESSO CDMA

No método de Acesso Múltiplo com Divisão por Código (CDMA – *Code Division Multiple Access*) é utilizada a técnica de espalhamento espectral sendo que o transceptor de cada usuário no sistema utiliza uma sequência pseudo aleatória (código) diferente. Todos os usuários transmitem ao mesmo tempo e utilizam a mesma faixa de frequência. O receptor, através do processo de correlação do sinal recebido com a sequência PN extrai o sinal do usuário desejado. Os sinais dos demais usuários parecerão ruído para o receptor em questão, pois suas sequências PN não são correlacionadas com o sinal desejado.

É comum ouvir falar na eterna incerteza na comparação entre as várias técnicas de acesso múltiplo hoje existentes em termos do número máximo de usuários suportado. Mas, afinal, qual técnica é a superior? - é a pergunta que se ouve. O CDMA tem-se mostrado promissor a superar as demais técnicas de acesso múltiplo existentes, à medida que sua implementação se torna menos onerosa com o domínio de sua tecnologia. Pode-se verificar que o CDMA possui mais méritos que deméritos nesse sentido [4]. A capacidade de um sistema CDMA é o que se pode chamar de limitada pelas interferências (ao contrário dos concorrentes FDMA e TDMA que podem ser classificados como limitados em largura de faixa). Assim, qualquer melhoria nesse sentido reflete diretamente em um aumento no número de usuários no sistema.

Em sistemas FDMA ou TDMA cada faixa de frequências ou *slot* de tempo é alocado a uma chamada. Durante a chamada

nenhum usuário poderá utilizar aquela faixa de frequências ou aquele intervalo de tempo. Pode-se facilmente verificar que, para um sistema celular FDMA ou TDMA com padrão de reuso igual a 7, considerando-se como interferentes as seis células co-canais mais próximas (ver Figura 7), a capacidade em termos de canais por célula pode ser aproximadamente expressa por [9]

$$m = \frac{B_t / B_c}{\sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{C}{I} \right)}} \quad (6)$$

Na expressão acima B_t é a largura de faixa total de transmissão ou recepção, B_c é a largura de faixa equivalente por canal e (C/I) é a mínima relação portadora / interferência por canal ou por *slot* de tempo necessária à uma qualidade aceitável de recepção. Na Figura 7 é mostrada uma configuração típica para um sistema celular com reuso de frequências. Para a geometria da Figura 7 e para um expoente de perdas no percurso igual a n , a C/I para o pior caso pode ser determinada por [9]

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-n}}{2(D-R)^{-n} + (D-R/2)^{-n} + (D+R/2)^{-n} + (D+R)^{-n} + D^{-n}} \quad (7)$$

É importante citar que as expressões (6) e (7) consideraram a perda por propagação variando com a n -ésima potência da distância e, como já citado, o valor de n é dependente das características de propagação de cada área considerada.

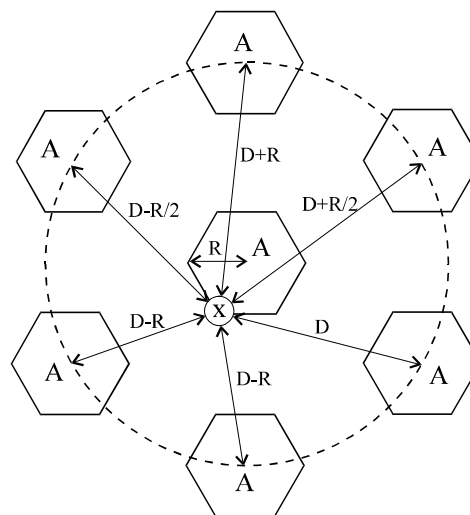


Figura 7 - Ilustração da primeira camada de co-células para *cluster* com $N = 7$. Quando o móvel está localizado no limite de uma célula (ponto X), está sujeito ao pior caso de interferência co-canais na *link* direto. As distâncias do desenho foram obtidas por simples aproximações

O aumento da capacidade dos sistemas FDMA e TDMA além daquela demonstrada por (6) pode ser conseguido através da utilização de técnicas como *Divisão de Células*, *Setorização* e a implementação de *Microcélulas* [14]. Vale, porém, ressaltar que, no caso da setorização, técnica esta comumente empregada, tem-se como efeito colateral a redução da eficiência de entroncamento do sistema [19], [14], pois o número de canais por célula será distribuído

³ *Handoff* é o processo através do qual o sistema transfere a comunicação com um terminal móvel de um canal ou estação base para outro canal ou estação base.

pelos setores, ou seja, a capacidade não será multiplicada pelo número de setores por célula, como normalmente se acredita.

No caso dos sistemas CDMA, o cálculo exato da capacidade envolve um número de variáveis extremamente superior ao número de variáveis envolvidas na análise dos sistemas FDMA ou TDMA [4]. Vários fatores podem ser explorados e levarem a capacidade do CDMA a patamares consideravelmente superiores às técnicas de acesso múltiplo FDMA e TDMA. Isto faz do CDMA um sistema complexo, mas com gradativa facilidade de implementação à medida que o avanço tecnológico permite.

O controle de potência realizado nos sistemas FDMA e TDMA tem como principais objetivos a redução do consumo de energia e do nível de interferências. O primeiro leva a um aumento do tempo de vida das baterias dos terminais móveis, enquanto o segundo melhora a qualidade do serviço (melhor qualidade de voz). Nos sistemas CDMA, que são sistemas inerentemente limitados pela quantidade de interferência, um eficaz controle de potência leva a uma possibilidade de aumento direto na capacidade do sistema.

Como citado anteriormente, nos sistemas de telefonia celular FDMA e TDMA, enquanto ocupados uma faixa de frequência ou um *slot* de tempo durante uma chamada, mesmo que o usuário não esteja transmitindo informação (falando) aquele canal não poderá ser utilizado por outro usuário, a não ser através da utilização de elaboradas técnicas de alocação dinâmica de canais. No CDMA, estando um usuário em silêncio, pode-se desligar ou reduzir a potência transmitida nesses instantes. Isto pode levar a uma redução na quantidade de interferência no sistema, permitindo um proporcional aumento na capacidade. Os modernos *vocoders* naturalmente podem fazer uso deste ciclo de atividade da voz, que normalmente se encontra na casa de 35% a 40% do tempo, enviando comandos de desligamento ou redução da potência transmitida nos intervalos de silêncio. Um aumento médio de capacidade de cerca de 35% pode ser conseguido [4].

A setorização nos sistemas FDMA ou TDMA tem como principal objetivo a redução do nível de interferências com um pequeno aumento na capacidade de tráfego. Nos sistemas CDMA pode-se utilizar a setorização para uma diminuição efetiva do nível de interferências, levando a um aumento direto na capacidade do sistema. Para três setores por célula, a capacidade pode ser realmente triplicada.

Outros fatores importantes a considerar estão relacionados à tecnologia de espalhamento espectral utilizada no CDMA e que permite: sigilo na comunicação, robustez contra as degradações causadas pelo canal rádio móvel, pequena densidade espectral de potência (baixa Interferência Eletromagnética), imunidade a interferências, etc.. Gilhousen e outros em [4] fornecem justificativas técnicas interessantes que, se não convincentes, ao menos demonstram as potencialidades da tecnologia CDMA e indicam o caminho que ela poderá traçar de agora em diante, tornando-se, provavelmente, a mais utilizada para sistemas de comunicação multiusuários.

III.4. ACESSO HÍBRIDO

As técnicas híbridas combinam as três técnicas citadas anteriormente. Elas são: FDMA/TDMA, FDMA/CDMA e TDMA/CDMA.

Na técnica híbrida FDMA/TDMA o espectro disponível é dividido em sub-faixas onde cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários que compartilham essa sub-faixa em instantes de tempo distintos.

Na técnica FDMA/CDMA o espectro disponível é dividido em sub-faixas onde cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários que compartilham essa sub-faixa ao mesmo tempo, porém utilizando seqüências pseudo-aleatórias distintas (códigos distintos).

Na técnica híbrida TDMA/CDMA cada célula utiliza uma seqüência pseudo-aleatória comum, sendo que em uma determinada célula a cada usuário é alocado um instante de tempo distinto dos demais.

III.5. ACESSO ALOHA

As técnicas de acesso aleatório alocam recursos de rádio dinamicamente a um conjunto de terminais que apresentam tráfego tipicamente em rajadas (*bursty traffic*).

Nos anos 70, a técnica ALOHA foi proposta por Norman Abramson como uma solução efetiva para prover acesso via rádio a sistemas de computadores. A rede ALOHA na Universidade do Hawaii empregava transmissores fixos em ilhas localizadas a dezenas de quilômetros. A principal vantagem da técnica ALOHA é a simplicidade. Cada terminal é permitido transmitir a qualquer momento, sem levar em conta se o canal está ocupado ou não. Se um pacote de dados é recebido corretamente, a estação rádio base transmite uma mensagem de reconhecimento. Se nenhum reconhecimento é recebido pelo terminal móvel ele retransmite o pacote após esperar por um intervalo de tempo aleatório. O retardo na comunicação é principalmente determinado pela probabilidade de um pacote de dados não ser recebido devido à interferência de outras transmissões (colisões) e pelo tempo médio esperado antes de uma retransmissão.

Estudos realizados mais tarde revelaram que para uma população de usuários tendendo a infinito e sob certas condições dos canais o sistema ALOHA torna-se instável. Pacotes perdidos devido a uma colisão são retransmitidos, mas essa retransmissão novamente sofre uma colisão, o que pode desencadear um processo de retransmissões sem fim. Um método de eliminar a instabilidade é dinamicamente adaptar o tempo de espera aleatório de todos os terminais se a estação rádio base percebe a ocorrência de um número muito elevado de colisões. Exemplos de métodos que asseguram estabilidade em uma rede ALOHA são o DFL-ALOHA (*Dynamic Frame Length* – ALOHA) e o algoritmo *Stack*. O primeiro utiliza controle centralizado pela estação

rádio base enquanto o segundo utiliza método descentralizado [10].

É importante citar que o processo de inicialização de chamada em quase todos os sistemas de telefonia celular utiliza um certo tipo de acesso aleatório ALOHA.

Em um canal de rádio móvel, pacotes de dados podem ser destruídos devido aos severos desvanecimentos do sinal, mesmo na ausência de colisões. Por outro lado, pacotes podem ser recebidos com sucesso a despeito da interferência de outros usuários devido ao denominado “efeito captura”. Em sistemas que utilizam modulações lineares, como AM e AM-SSB, a razão entre a relação sinal ruído (RSR) na saída do detetor e a relação portadora ruído (C/I) é linear. Contudo, em modulações não lineares, como as modulações em fase e em frequência, a RSR após a detecção pode ser abruptamente melhorada se comparada com as modulações lineares. Essa melhoria abrupta ocorre sempre que a RSR antes da detecção está acima de um determinado limiar, configurando o chamado efeito captura. Esse efeito tem forte influência no *throughput* do sistema.

O conceito de reuso de frequências em redes com acesso aleatório ALOHA difere daquele explorado em redes de telefonia, devido à diferença entre os critérios de avaliação de desempenho desses sistemas. O primeiro leva em conta o *throughput* versus a probabilidade do sinal recebido cair abaixo do limiar de captura do receptor (*outage probability*) e o segundo considera o atraso versus aquela probabilidade. O melhor padrão de reuso para um sistema ALOHA é aquele que utiliza a mesma frequência em todas as células.

Na técnica denominada *Unslotted ALOHA* uma transmissão pode iniciar a qualquer tempo. Na *Slotted ALOHA* o eixo de tempo é dividido em *slots*. É assumido que todos os terminais conhecem os instantes de tempo onde começam novos *slots* e é permitido que os pacotes sejam enviados somente no início de um novo *slot*. O *throughput* no *Slotted ALOHA* é significativamente maior que no *Unslotted ALOHA*.

III.6. ACESSO CSMA

Em situações com tráfego intenso a técnica de acesso aleatório ALOHA reduz o *throughput* do sistema e pode levar a instabilidade devido à constantes colisões nas retransmissões. A técnica CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) minimiza esse problema.

No acesso CSMA todos os terminais “ouvem” o canal de comunicação terminal - estação rádio base e a transmissão de um novo pacote não é iniciada enquanto este canal se encontra ocupado. Esse procedimento requer que cada terminal possa receber os sinais dos demais terminais naquela frequência.

Em redes de comunicação móvel, um terminal pode não ser capaz de perceber a transmissão de um outro terminal remoto. Esse efeito, conhecido como problema do “terminal

escondido” é evitado no método ISMA (*Inhibit Sense Multiple Access*), através do qual a estação rádio base transmite um sinal de ocupado inibindo a transmissão por parte de todos os outros terminais. A desvantagem do ISMA reside na necessidade de um canal de *feedback* em tempo real (contínuo).

Em uma variação do CSMA mais simples, o CSMA-CD (CSMA – *Collision Detection*), o receptor continuamente informa todos os terminais sobre o sinal que está recebendo. Se uma colisão é detectada, a transmissão de todos os terminais é abortada imediatamente. Esse procedimento eleva o *throughput* do sistema em relação àquele que reconhece a recepção após a transmissão de um pacote inteiro.

Outras variações do CSMA são o CSMA 1 – persistente, o CSMA não – persistente, o CSMA p – persistente e o DSMA. No CSMA 1 – persistente o terminal “ouve” o canal e espera para transmitir quando o canal estiver ocioso. Quando isso acontece o terminal transmite sua mensagem com probabilidade igual a 1. No CSMA não – persistente, após receber um reconhecimento negativo, o terminal espera por um tempo aleatório antes da transmissão do pacote. A estratégia CSMA p – persistente é aplicada a canais com divisão temporal. Quando um canal encontra-se ocupado, o pacote é transmitido no primeiro *slot* de tempo disponível com uma probabilidade p ou no próximo *slot* de tempo com probabilidade $1 - p$. No DSMA (*Data Sense Multiple Access*) cada terminal tenta detectar uma mensagem do tipo “ocioso-ocupado” em um canal de controle no *link* direto (estação rádio base para terminal). Quando a mensagem ocioso-ocupado indica que nenhum usuário está transmitindo no *link* direto (terminal para estação rádio base), a transmissão pelo terminal é permitida.

III.7. ACESSO RESERVATION ALOHA

O *Reservation ALOHA* é um esquema de acesso baseado em multiplexação por divisão de tempo, TDM (*Time Division Multiplexing*). Nesse protocolo de acesso certos *slots* de tempo são alocados com prioridade e é possível a “reserva” de *slots* pelos terminais. Essa reserva pode ser feita permanentemente ou requisitada quando necessário. Em um tipo de *Reservation ALOHA*, terminais em situação de transmissão com sucesso (ausência de colisão) reservam um *slot* permanentemente até que sua transmissão seja completada, embora transmissões de duração muito longa possam ser interrompidas pelo sistema. Um outro esquema permite ao terminal a transmissão de uma requisição em um *subslot* reservado em cada quadro (*frame*). Se durante a transmissão nenhuma colisão é detectada, o próximo *slot* no quadro é reservado a esse terminal para a transmissão dos dados.

III.8. ACESSO PRMA

A técnica de acesso PRMA (*Packet Reservation Multiple Access*) aplica o método TASI (*Time Assigned Speech Interpolation*) ou DSI (*Digital Speech Interpolation*) como método de acesso em redes sem fio, e é similar ao *Reservation ALOHA*. O método DSI explora o fato que a voz humana contém períodos de atividade e períodos de silêncio. Isso permite a multiplexação de N conversações telefônicas em N_v canais, onde N pode ser maior que N_v . A idéia básica é a de que uma conversação necessita ocupar um determinado canal somente nos períodos de atividade. Durante os períodos de silêncio outros usuários podem utilizar o canal.

O PRMA é um método de acesso múltiplo que utiliza quadros (*frames*) com um determinado número fixo de *slots*. Se um terminal tem uma série de pacotes a transmitir ele compete com outros terminais por um *slot* livre. Tendo “capturado” um determinado *slot*, ao terminal são reservados os *slots* correspondentes nos próximos quadros, até que ele libere essa reserva.

III.9. ACESSO STRMA

O STRMA (*Space-Time Reservation Multiple Access*) é um método de acesso múltiplo que permite que vários terminais portáteis acessem uma infra-estrutura de comunicações. Ele combina reuso de frequência com acesso múltiplo e utiliza a técnica digital de interpolação de voz DSI. O objetivo do STRMA é o de dar suporte ao tráfego de aplicações multimídia.

O STRMA pode ser interpretado como uma extensão “espacial” da técnica PRMA. No PRMA células adjacentes utilizam frequências diferentes, de acordo com o planejamento de reuso do sistema celular, mas no STRMA há o sincronismo entre estação rádio base e terminais em nível de *slot*. Os *slots* de tempo são comuns a todas as células e todas as células utilizam a mesma frequência de portadora. Contudo, se certos *slots* são reservados a um terminal em uma célula, as estações de rádio base do primeiro conjunto de células vizinhas proibirá a todos os outros terminais utilizarem os mesmos *slots* de tempo. Assim, as reservas não ocorrem somente no domínio do tempo, como no PRMA, mas também no espaço.

Resumindo, no protocolo STRMA a reserva de um *slot* de tempo não é restrita à célula na qual o terminal está localizado. O *slot* será também reservado em células vizinhas para evitar colisões com pacotes transmitidos nessas células vizinhas e no mesmo *slot* de tempo.

IV. PADRÕES EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL

Apesar da busca constante pela padronização ou pela interoperabilidade entre os sistemas de comunicação móvel, o número de diferentes sistemas existentes é extremamente elevado. A rápida evolução tecnológica e o surgimento, a cada dia, de novas necessidades de comunicação são os principais responsáveis por essa miscelânea.

As seções anteriores abordaram fundamentos relacionados às comunicações móveis. Esses fundamentos servirão como requisitos necessários ao entendimento dos vários padrões e sistemas atualmente em funcionamento em todo o mundo e apresentados resumidamente nessa seção. Mais detalhes sobre cada sistema aqui apresentado podem ser vistos nas referências [3], [10], [14], [16], [19] e [20] e recomendações pertinentes.

Os sistemas de comunicação móvel podem ser agrupados em seis grandes categorias: os sistemas de telefonia sem fio (*cordless telephony*), os sistemas celulares, os sistemas de *Paging*, os sistemas de comunicação de dados móvel LAN e WAN e os sistemas de comunicação móvel via satélite. Com relação à evolução tecnológica e cronológica tem-se os sistemas de primeira geração, segunda geração e os futuros sistemas de terceira geração. Dentre os sistemas de primeira geração predominam aqueles com tecnologia analógica. Os sistemas digitais marcam o início da segunda geração e os serviços de comunicação pessoal de voz, dados e multimídia (PCS – *Personal Communication Systems*) são alvo dos futuros sistemas de terceira geração. Para a terceira geração existem duas visões até certo ponto contraditórias: uma visão idealizada da convergência de todos os serviços nos sistemas PCS e uma realidade prática tendendo ao desenvolvimento de inúmeros sistemas diferentes, baseados nos sistemas de segunda geração, interoperáveis e oferecendo as mais variadas formas de serviços.

Um conceito amplamente explorado em sistemas celulares e que foi brevemente abordado em parágrafos anteriores é o conceito de reuso de frequências – usuários em diferentes áreas geográficas (diferentes células) podem utilizar um canais com a mesma frequência. Este conceito se aplica tanto a sistemas analógicos quanto digitais. O reuso de frequência aumenta drasticamente a eficiência de utilização do espectro disponível, mas apresenta como efeito colateral a interferência co-canal. Essa interferência deve ser considerada quando do planejamento de sistemas celulares [14].

Um conjunto de células que utiliza todo o conjunto de frequências disponíveis em um sistema celular é denominado de *cluster*. De um *cluster* para outro tem-se a reutilização de todo o conjunto de frequências. Para uma geometria didática hexagonal das células, um *cluster* pode somente possuir um número N de células dado por

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad (8)$$

onde i e j são inteiros não negativos.

Em sistemas celulares o valor de N é escolhido de forma a assegurar uma determinada qualidade de serviço quando o terminal móvel se encontra próximo aos limites de cobertura

de uma célula. É importante citar que não existe um limite físico exato para a cobertura de uma determinada célula. O termo “limite” é aqui utilizado no sentido de identificar as regiões extremas de uma célula com intensidade de sinal tendendo à inoperabilidade do terminal móvel atendido por aquela célula.

Basicamente tem-se três tipos de células: as macro-células, as micro células e as pico-células, classificação esta baseada em seus diâmetros típicos que são, respectivamente, 1 a 30Km, .200 a 2000m e 4 a 200m. O tamanho das células diminui com o crescimento do sistema e com esse decréscimo no tamanho das células tem-se, basicamente:

- Aumento na capacidade de usuários.
- Aumento do número de *handoffs* por chamada.
- Aumento na complexidade de localização do usuário.
- Menor consumo de potência do terminal móvel.
- Diferentes ambientes de propagação, o que leva a espalhamentos por multipercursos mais curtos.
- Diferentes arranjos das células, o que leva a maiores interferências e maior dificuldade de planejamento do sistema.

IV.1. SISTEMAS CELULARES ANALÓGICOS DE PRIMEIRA GERAÇÃO

Os sistemas analógicos de primeira geração foram desenvolvidos para prover serviços de telefonia celular. Dentre eles pode-se citar: AMPS, NMT, TACS, C450 e NTT. As características básicas comuns a esses sistemas são: modulação analógica em FM, sinalização feita através de modulação FSK, técnica de acesso FDMA com duplexação FDD, tamanho das células de 0.5Km a 10Km, potência de transmissão do terminal móvel de 1 a 8 Watts e reutilização de frequência.

A Tabela 2 resume as principais características dos sistemas de telefonia celular analógicos utilizados em todo o mundo [10].

	Japão	Vários países	Vários países	Vários países	Ale- manha
Sistema	NTT	AMPS	TACS	NMT	C450
Frequência de transmissão (MHz)	870-885	869-894	917-950	463 - 467.5	461.3 - 465.74
Estação rádio base	925-940	824-849	872-905	453 - 457.5	451.3 - 455.74
Terminal móvel	600	832	1320	180	222
Número de canais	5 a 15	2 - 20	2 - 20	1.8 - 40	5 - 30
Raio de cobertura (Km)	±4.5	±8	±6.4	±3.5	±2.5
Desvio de freq. da modulação digital (KHz)	±5	±12	±9.5	±5	±4
Desvio de freq. da modulação analógica (KHz)	0.3	10	8	1.2	5.28
Taxa na sinalização (Kbps)					

Tabela 2 – Sistemas de telefonia celular analógicos (de Lee, 1995, p. 100)

IV.2. SISTEMAS CORDLESS ANALÓGICOS DE PRIMEIRA GERAÇÃO

A diferença básica entre os sistemas de telefonia celular e os chamados telefones sem fio podem ser visualizadas na Tabela 3.

	Celular	<i>Cordless</i>
Tamanho das células	Grandes células (0.5 a 30Km)	Pequenas “células” (50 a 500m)
Velocidade de movimentação	Alta (até 150km/h)	Baixa (menor que 6Km/h)
Cobertura	Área extensa	Pequena zona
Complexidade da estação rádio base	Alta	Baixa
Potência de transmissão do terminal móvel	Alta (100 a 600mW)	Baixa (5 a 10mW)

Tabela 3 – Diferenciação entre os sistemas celulares e os sistemas de telefonia sem fio (*cordless telephony*)

Os principais padrões para sistemas *cordless* são: US *Cordless*, MPT1322 (CT0), CEPT/CT1 e NTT. As características básicas desses padrões são: modulação de voz analógica FM, sinalização digital com modulação FSK, acesso múltiplo FDMA, duplexação FDD, principal aplicação em uso residencial e terminais móveis com baixa potência de transmissão (sempre inferior a 1W).

IV.3. SISTEMAS DE PAGING

Os serviços de *paging* são aqueles onde há o envio de pequenas mensagens para um usuário móvel. Estas mensagens podem ser um simples *beep*, um número ou mensagens alfanuméricas curtas. Esses serviços têm crescentemente sido operacionalizados através do uso de sub-portadoras adicionadas a sinais de rádio difusão FM. A recomendação 584 (1982) do CCIR define: *Paging* é um sistema de chamada pessoal, seletivo, unidirecional, sem transmissão de voz, com alerta do tipo sem mensagem ou com mensagem numérica ou alfanumérica. Devido ao baixo custo esse tipo de serviço tem sido explorado por um número expressivo de usuários.

Os dois principais padrões para os serviços de *paging* são o POCSAG e o ERMES.

As características básicas do POCSAG são:

- Hardware consistindo de um *chip* receptor, um *chip* decodificador, um microcontrolador, memória, um módulo *display* de cristal líquido e um circuito de temporização (*clock*). Seu consumo é extremamente pequeno e permite operação a 1.5 Volts.
- Frequência de trabalho na faixa de VHF e UHF (25 a 512MHz) para os *paggers* (terminais de *paging*) digitais.

- Existem chips disponíveis no mercado para uso em *paggers* extremamente finos do tipo relógios de pulso ou cartões de crédito.
- Modulação FM pelos dados do tipo NRZ (*non return to zero*) – o que às vezes faz com que o padrão POCSAG seja chamado de analógico.
- Receptores mais modernos utilizam demodulação com conversão direta (não utilizam frequência intermediária).
- Taxa de operação de até 2400 símbolos por segundo (*bauds*).

O padrão ERMES (*European Radio Message Service*) é um padrão europeu para serviços de *paging* desenvolvido pela ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) e que começou a operar em fevereiro de 1996. Utiliza uma rede terrestre de estações rádio base transmitindo em 16 canais na faixa de 169 a 170MHz. A largura de faixa de cada canal é de 25KHz. A modulação utilizada é do tipo 4-PAM FM (4FSK) a 6.25Kbps. O *pager* precisa somente “ouvir” um canal por vez.

No padrão ERMES, 30 bits formam uma palavra código que é transmitida em 4.8ms. Desses 30 bits, 18 carregam os dados do usuário e os 12 restantes são utilizados para detecção e correção de erros.

IV.4. SISTEMAS CELULARES DIGITAIS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Dentre os sistemas de comunicação móvel celular digitais pode-se destacar os padrões: GSM, DCS-1800, PCS-1900, IS-54 D-AMPS e CDMA IS-95.

O sistema GSM foi desenvolvido com o objetivo de solucionar o problema da fragmentação existente nos primeiros sistemas celulares na Europa e de proporcionar uma série de serviços através da utilização de uma Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI). Sua introdução na Europa foi em 1991 e desde então vários países da América do Sul, Ásia e Austrália têm adotado o GSM e sistemas equivalentes, tal como o DCS-1800.

Dentre os principais serviços suportados pelo padrão GSM pode-se destacar:

- Serviços de telefonia, incluindo fax, videotexto e telex.
- Serviços de dados com possibilidade de comunicação de dados por pacotes a taxas de até 9600bps.
- Serviços de RDSI suplementares tais como desvio de chamada, identificação de assinante chamador e serviço de mensagem. Esse último, chamado SMS (*Short Message Service*) permite a recepção de mensagens alfanuméricas mesmo durante uma conversação e ainda permite transmitir repetitivamente mensagens ASCII para todos os assinantes, serviço esse muitas vezes utilizado para fins de segurança e de aviso.

Outra grande inovação do sistema GSM é o módulo de identificação do usuário, o SIM (*Subscriber Identification*

Module) que contém a identificação completa do usuário, chaves de código de privacidade e outras informações específicas sobre o usuário. O SIM pode apresentar-se sob a forma de um cartão de crédito ou de um *plug-in* que é conectado ao terminal GSM. Sem o SIM o terminal fica inoperante.

A privacidade é outra característica marcante no padrão GSM. Isto é possível através da criptografia (embaralhamento) da sequência de bits do usuário através de uma “chave” (regra de embaralhamento) que se altera frequentemente.

Sumário das principais características técnicas do sistema GSM:

- Acesso FDMA/TDMA com canais de 200KHz e 8 *slots* temporais por canal (8 usuários por canal).
- Codificação de voz LPC-RPE (13Kbps).
- Equalização adaptativa de canal.
- Taxa de transmissão no canal: 270Kbps.
- Taxa de transmissão por usuário (incluindo bits de codificação de canal): 22.8Kbps.
- Modulação GMSK com $BT = 0.3$.
- Máximo tamanho das células (limitado pelo tempo de guarda): 30Km.
- Potência de transmissão: equipamento de mão – máx. 2W; equipamento portátil – máx. 8W.
- Sinalização fora da faixa útil.

Os padrões DCS-1800 e PCS-1900 são baseados na arquitetura de rede do sistema GSM, sendo que o PCS-1900 é o equivalente nos Estados Unidos do padrão GSM.

O padrão IS-54, conhecido como D-AMPS (Digital AMPS) é o equivalente digital do sistema analógico AMPS. No sistema D-AMPS cada canal de 30KHz é compartilhado por três usuários em slots de tempo distintos. A capacidade é triplicada em relação ao AMPS. A principal motivação para o desenvolvimento desse sistema foi a possibilidade de transição suave da tecnologia analógica para a digital, ocupando a mesma faixa de frequências. Uma recente variação do padrão IS-54, o IS-136 (anteriormente IS-54 Rev.C), tem as mesmas características do IS-54, diferenciando no tipo de modulação utilizada nos canais de controle ($\pi/4$ DQPSK) de forma a elevar a taxa de transmissão nesses canais e prover serviços adicionais tais como *paging* e envio de mensagens curtas entre usuários em grupos privados.

Uma outra evolução do padrão D-AMPS e que se encontra em fase de normalização é o E-AMPS (*Extended AMPS*). Nesse padrão é utilizada alocação dinâmica de canais baseada na atividade da voz, utilizando a técnica DSI (*Digital Speech Interpolation*). Essa técnica pode elevar a capacidade em 15 vezes em relação ao sistema analógico AMPS (ver Acesso Múltiplo PRMA, item III.8.).

Sumário das principais características técnicas do padrão IS-54 (D-AMPS):

- Método de acesso FDMA/TDMA, com canais de 30KHz e 3 *slots* de tempo por canal (3 usuários por canal).
- Taxa de transmissão no canal: 48.6Kbps.
- Codificação de voz VSELP (13Kbps).
- Triplica a capacidade do sistema analógico AMPS.
- Modulação $\pi/4$ DQPSK.
- Eficiência de largura de faixa: 1.62bps/Hz.
- Complexo processo de gerenciamento temporal.

O padrão IS-95, baseado em tecnologia com espalhamento espectral (acesso múltiplo CDMA), foi desenvolvido também com o objetivo de possibilitar a transição suave da tecnologia analógica para a digital. No padrão IS-95 todos usuários utilizam a mesma faixa de frequências, mesmo aqueles usuários em células adjacentes, sendo que cada canal IS-95 ocupa 1.25MHz (cerca de 10% da banda disponível para o padrão AMPS). Na prática as portadoras do sistema AMPS devem prover uma faixa de guarda de 270KHz (9 canais) em cada lado da faixa dedicada ao IS-95.

Os primeiros terminais *dual-mode* (IS-95/AMPS) foram disponibilizados pela Qualcomm em 1994.

No padrão IS-95 a taxa de transmissão no canal é variável em função dos requerimentos do terminal e do ciclo de atividade da voz. São possíveis 4 taxas de transmissão: 9600bps, 4800bps, 2400bps e 1200bps, sendo que a transmissão acontece sempre em rajadas de 9600bps em cada quadro (*frame*). A cada vez que a taxa é reduzida em função da atividade da voz são gerados intervalos durante os quais a potência de transmissão do terminal móvel é reduzida de no mínimo 20dB em relação ao período prévio de atividade. Esse procedimento reduz significativamente a quantidade de interferência no sistema, proporcionando um correspondente aumento da capacidade em termos do número médio de usuários ativos.

Sumário das principais características técnicas do padrão IS-95 (CDMA):

- Taxa de *chip* de 1.2288Mchips/s = 128 vezes 9600bps.
- No *link* direto (base para terminal móvel): Utilização de 64 códigos Walsh-Hadamard combinados – para ortogonalidade entre os usuários; utilização de uma sequência PN do tipo *m* [12] – para um espalhamento efetivo e robustez contra os efeitos dos multipercursos.
- No *link* reverso (terminal móvel para base): Utilização de sequências PN tipo *m* – melhores propriedades para sincronismo.
- Largura de faixa de transmissão: 1.25MHz.
- Codificação de canal convolucional com taxa 1/2 no *link* direto e taxa 1/3 no *link* reverso.
- Uso de portadora piloto para sincronismo e detecção coerente nos terminais móveis.
- *Soft handoff* (mesma portadora para todo o sistema).
- Degradação suave na qualidade do *link* reverso quando há sobrecarga de usuários no sistema (*soft capacity*).
- Controle de potência do terminal móvel atualizado a cada 1ms (ou conforme variação do desvanecimento) – imperfeito devido a desvanecimentos muito profundos e/ou muito rápidos.

- Utilização do receptor RAKE [13], [14], [17] ao invés de equalizador de canal.

IV.5. SISTEMAS CORDLESS DIGITAIS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Os sistemas de telefonia sem fio digitais tem como principais padrões: CT2, CT2+, DECT, PHS e PACS. Essas padronizações surgiram como resposta ao mercado não padronizado e ilegal que começou a tomar força em todo o mundo. A primeira normalização nesse sentido teve o nome de CT1. Nela cada assinante de uma rede de telefonia fixa convencional poderia comprar sua própria “estação rádio base” e um terminal portátil. A cobertura do sistema CT1 abrange somente as imediações da base.

Os sistemas CT2 têm as principais características:

- Utiliza método de acesso FDMA.
- A separação entre as frequências das portadoras é de 100KHz.
- Utiliza duplexação TDD com uma duração de quadro de 2ms.
- A taxa de transmissão por canal é de 72Kbps.
- Utiliza modulação FSK binária.
- Utiliza codificador de voz do tipo ADPCM (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation*) a 32Kbps [6].
- Apresenta eficiência espectral de 0.72bps/Hz.
- Possibilita acesso à rede de telefonia pública fixa.
- Não pode receber chamadas, mas pode prover serviços de *paging*.
- Pode prover serviços de fax.
- Pode ser utilizado como modem de dados – oficialmente anunciado para trabalhar a 2400bps, mas pode apresentar taxas superiores.
- Com antenas para interiores o sistema CT2 tem um alcance aproximado de 100m. Com antenas exteriores esse alcance pode subir para cerca de 500m.

Outro importante padrão para sistemas *cordless*, talvez um dos mais importantes, é o padrão DECT (*Digital Enhanced Cordless Telephone*). Inicialmente este padrão foi desenvolvido para atender somente ao sistema europeu também sob o nome DECT - *Digital European Cordless Telephone*. Posteriormente ele foi otimizado para uso profissional, mas recentemente equipamentos com padrão DECT tem sido encontrados comercialmente para uso doméstico. Suas características o tornam viável também para comunicação de dados. Uma versão para esse fim está sendo desenvolvida nos Estados Unidos com um nome de PWT (dados de 1997 [10]).

São características básicas do padrão DECT:

- Utiliza acesso TDMA em um sistema com 10 portadoras, cada uma transportando 12 canais de voz.
- Utiliza duplexação TDD e alocação dinâmica de canais.
- Suporta serviços de transmissão de dados com taxas de até 1Mbps por usuário.
- A taxa de transmissão no canal é de 1.152Mbps.

- De forma a manter o consumo de potência do terminal portátil o menor possível, o padrão DECT não utiliza equalização, operando com espalhamentos por multipercursos rms de até 90ns, ou seja, apresenta melhor funcionamento em ambientes internos (micro-celulares).
- Ainda objetivando baixo consumo de potência e alta qualidade de voz, o padrão DECT não prevê o uso de sofisticados codificadores de voz, mas um simples ADPCM de 32Kbps.
- A modulação utilizada é a GMSK.

Para o padrão DECT também foram desenvolvidos protocolos para transmissão de dados que permitem o acesso a redes sem fio, serviços de mensagem e acesso transparente a serviços de dados oferecidos pelo padrão GSM.

Equipamentos desenvolvidos a partir do padrão DECT podem incluir:

- Adaptadores para redes sem fio para *laptops* ou PCs convencionais (*desktops*).
- *Pagers*.
- Sistemas de telemetria.

O sistema PACS é, em algumas literaturas, considerado de segunda geração [10] e em outras é considerado um sistema de terceira geração [14] – uma das dualidades de classificação comumente encontradas nas referências bibliográficas.

Originalmente desenvolvido e proposto pela Bellcore em 1992, o sistema PACS pode prover serviços de voz, dados e imagens de vídeo para uso em sistemas de comunicação interior (*indoor*) e estruturas com micro-células. O principal objetivo desse sistema é o de integrar todos os serviços disponíveis em estruturas WLL (*Wireless Local Loop*) em um único sistema.

São características técnicas básicas do sistema PACS:

- Acesso múltiplo TDMA com duplexação FDD ou TDD.
- Faixa de frequências de 1 a 3GHz com canais de 300KHz.
- Potência média de transmissão do equipamento portátil: 200mW.
- Potência média de transmissão da base: 800mW.
- Codificação para detecção de erros do tipo CRC (*Cyclic Redundance Check*) [18].
- Codificação de voz ADPCM [6] a 32Kbps.
- Usuários por quadro (2.5ms): 8 para FDD e 4 para TDD.
- Taxa de transmissão no canal: 384Kbps com modulação $\pi/4$ DQPSK.

O sistema Japonês PHS apresenta grande semelhança com o sistema DECT. Suporta 77 canais de rádio, cada um com 300KHz de banda, na faixa de 1895 a 1918.1MHz, onde 40 canais na faixa de 1906.1 a 1918.1MHz são designados para sistemas públicos, enquanto os 37 restantes são utilizados para comunicação pessoal doméstica ou em escritórios.

IV.6. FUTUROS SISTEMAS CORDLESS E CELULARES DE TERCEIRA GERAÇÃO

Dentre os objetivos almejados para a terceira geração de sistemas de comunicação móvel celulares e do tipo *cordless* espera-se:

- Maximizar a semelhança entre as várias interfaces de rádio.
- Possibilitar operação do tipo *dual-mode* (analogico e digital).
- Permitir mobilidade global ao usuário.
- Se apresentar como uma evolução das tecnologias de segunda geração.

As atividades de normalização em todo o mundo estão girando em torno das idéias básicas: os sistema global IMT-2000 = FPMTS (*Future Public Land Mobile Telecommunications System*), na Europa o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) e o MBS (*Mobile Broadband System*) e nos Estados Unidos o PCS (*Personal Communications System*).

O padrão UMTS está sendo elaborado pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) e pretende ser uma evolução dos sistemas GSM, DCS1800 e DECT.

O IMT-2000 está sendo padronizado pelo ITU e pretende ser uma evolução dos padrões GSM, DECT, IS-54, IS-95 e DCS1800, nas faixas propostas de 1885 a 2025MHz e 2110 a 2200MHz. O objetivo do sistema IMT-2000 é o de unificar diversos sistemas em um único, tendo um terminal móvel mundialmente utilizável. Os serviços propostos incluem voz, multimídia e dados com taxas de 64Kbps a 2Mbps, para uso interior e exterior. Pretende-se alcançar desempenho equiparável ao de redes locais fixas.

São várias as possíveis configurações para os sistemas PCS, mas pode-se dividi-las em duas categorias [14]: os sistemas que suportam altas velocidades de mobilidade e estruturas de macro-células e os sistemas otimizados para baixo consumo, baixa complexidade e baixa velocidade de movimentação. Duas dessas configurações são baseadas em acesso múltiplo híbrido TDMA/CDMA com tecnologia W-CDMA (*Wideband CDMA*) oferecida pela empresa Interdigital. Todos os tipos de modulação estão sendo considerados, inclusive as técnicas FH-SS e DS-SS.

IV.7. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DE DADOS MÓVEL

Até muito recentemente a única possibilidade de transmissão de dados sobre redes de comunicação móvel era através da conexão de modems de baixa velocidade a terminais telefônicos móveis analógicos. Isso resultava em altíssimas taxas de erro de bit devido às rápidas flutuações do sinal pelo efeito dos multipercursos, aos profundos desvanecimentos ocorridos em momentos de sombreamento e aos frequentes *handoffs* inerentes ao sistema. Mesmo com

a utilização de poderosos codificadores de canal o *throughput* nessa situação ainda era muito reduzido.

Com o advento do GSM, pensava-se que esse problema seria resolvido, mas apesar da evolução tecnológica desse sistema, muitos fatores inviabilizam a transmissão de dados através dele. Dentre esses fatores pode-se citar: o processo de estabelecimento de chamada no GSM é muito longo e chega a ser proibitivo em algumas aplicações computacionais; com um adequado esquema de codificação de canal pode-se transmitir dados já armazenados como arquivos. Por outro lado, ter que pagar uma conexão telefônica para transmitir dados pode ser um tanto ineficiente e caro.

O serviço de transmissão de pacotes oferecido pelo GSM é aplicável em situações como informatização de transportes rodoviários. Nessa aplicação tem-se, entre outros serviços, a transmissão de informações sobre o tráfego e guia de rotas para os motoristas [10].

Dentre os sistemas provedores de serviços de comunicação de dados móvel dedicados pode-se citar: Modacom, Mobitex, RDS ou RBDS e CDPD.

Modacom é uma rede de comunicação de dados móvel Alemã baseada em uma “extensão” sem fio da rede pública de pacotes X.25. A empresa Motorola, com a tecnologia DataTAC, baseada na utilização do protocolo LAP RD, adotou o padrão Modacom através da empresa Hutchinson, em Hong Kong e na Ucrânia e da IBM nos EUA e Canada.

A rede Mobitex foi introduzida na Ucrânia, Holanda e França. Aplicações incluem transmissão de dados por computadores portáteis a taxas de até 19.2Kbps, limite esse duas vezes maior que o esperado no sistema GSM.

O sistema RDS (*Radio Broadcast Data System*) é um sistema europeu que usa transmissões de rádio difusão em FM. Ele provê comunicação unidirecional e as aplicações incluem *paging* e serviços para transporte rodoviário a 1200bps. Os receptores RDS podem sintonizar-se automaticamente a uma determinada estação que transporta um determinado tipo de mensagem. Nos Estados Unidos a versão do RDS é chamada de RBDS (*Radio Broadcast Data System*). Outros sistemas similares ao RDS são o HSDS (*High Speed Data System*) da empresa Seiko e os sistemas FMSS e STIC que estão sendo utilizados nos EUA.

O CDPD (*Cellular Digital Packet Data*) é um sistema de transmissão de dados por pacotes que utiliza canais ociosos dos sistemas AMPS e IS-54. Suas aplicações incluem: e-mail, telemetria, verificação de crédito, fax, serviços para transporte rodoviário e dados adicionais que melhoram o desempenho do sistema de posicionamento global GPS (*Global Positioning System*).

Outras características técnicas importantes do sistema CDPD:

- Taxa de transmissão de 19.2Kbps com *throughput* máximo de 11.8Kbps no *link* direto e 13.3Kbps no *link* reverso.
- Acesso similar ao ISMA.

- Codificação de canal: código Reed Solomon (63,47) [18].

IV.8. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL VIA SATÉLITE

Os serviços oferecidos pelas comunicações móveis via satélite e alguns dos correspondentes sistemas podem ser agrupados nas categorias:

- Serviços de faixa estreita – telefonia e/ou comunicação de dados: Iridium, redes VSAT, Inmarsat Mini-M, ICO, GlobalStar, Odyssey, Aries, Ellipso, Super-GEO.
- Serviços de faixa larga – multimídia: Teledesic, M-Star, Sativod, Spaceway, Astrolink, Cyberstar, KaStar.
- Serviços de mensagem *store and forward*: Orbcomm, GE Starsys, LEO One, KITComm.
- Serviços de navegação: GPS, Glonass, GNSS-2.

Muitos dos sistemas anteriormente citados ainda estão em fase de planejamento e, dentre aqueles já implantados, os sistemas VSAT, Inmarsat, Iridium e GPS são os mais populares e serão brevemente abordados nos parágrafos seguintes.

Os VSATs (*Very Small Aperture Terminals*) são pequenas estações de satélite terrenas transportáveis e normalmente conectadas a uma rede VSAT. O tamanho da antena VSAT é limitado em aproximadamente 2.4m. Com o desenvolvimento de satélites operando na faixa de 30 ou 20GHz é possível reduzir o tamanho das antenas VSAT, sendo que os chamados pico-terminais portáteis podem possuir antenas da ordem de 10 a 20cm de diâmetro, com uma capacidade de tráfego reduzida, mas que pode permitir a transmissão de voz codificada a cerca de 4.8Kbps.

As redes VSAT são formadas por um número de terminais e satélites com os quais os terminais se comunicam. Normalmente existe uma estação de maior porte, chamada de *hub-station*, que pode ser utilizada como estação intermediária e para controle da rede. O acesso pode ser do tipo híbrido FDMA/CDMA.

Os sistemas VSAT são adequados para transmissão de dados a até 64Kbps e suas principais aplicações incluem coleta de informações climáticas e serviços para transporte rodoviário.

O Inmarsat é um sistema de faixa estreita com satélites geo-estacionários (GEO) que iniciou sua operação em 1982. Primeiramente os satélites cobriam regiões oceânicas de modo a atender a comunicação entre navios e portos. Os satélites Inmarsat eram simples repetidores passivos. Hoje os terminais são parcialmente portáteis, apesar de requererem um alinhamento rigoroso e uma preparação para o recebimento de chamadas, e as variações em relação ao sistema original são consideráveis [2]. Os principais serviços oferecidos são voz, fax, telex e dados.

Originalmente planejado para 77 satélites (número de elétrons do elemento iridium), o sistema Iridium hoje tem

lançados um total final de 66 satélites de órbita baixa (LEO). Nesse sistema os satélites podem comunicar-se entre si e com os terminais terrestres. A idéia foi inicialmente concebida pela empresa Motorola, mas foram formados uma série de consórcios em todo o mundo para o desenvolvimento e a implantação do sistema.

A cobertura do sistema Iridium é global e uma chamada pode iniciar-se e terminar pela ação do próprio sistema, apesar de terem sido instalados *gateways* em vários países e que permitem interconectividade com os sistemas de comunicação terrestres – no Brasil um *gateway* foi instalado no Rio de Janeiro.

Os terminais do sistema Iridium são *dual-mode* e, além dos serviços de voz, serão oferecidos serviços de fax e transmissão de dados com taxas de até 9600bps.

O sistema Teledesic, suportado por Bill Gates e Craig McCaw, é o mais complexo e caro sistema de comunicação global até hoje concebido. Originalmente planejado para ter 840 satélites, a constelação está hoje reduzida a aproximadamente 288 satélites que ocuparão uma órbita circular a 700Km de altitude (LEO). Estima-se cerca de 20 milhões de usuários em todo o mundo.

Como no Iridium, os satélites do sistema Teledesic se comunicarão entre si e a terra, utilizando a banda *Ka* do espectro. Estão sendo planejados canais com taxas variáveis que vão desde 16Kbps a 1.24Gbps.

O sistema GPS foi desenvolvido para e é controlado pelo Departamento de Defesa dos EUA (DOD – *Department of Defence*). Apesar de haver milhões de usuários civis em todo o mundo, o sistema tem caráter essencialmente militar.

Através dos sinais recebidos e processados pelos terminais GPS, pode-se computar a posição em três dimensões (latitude, longitude e altitude) e também a hora local do terminal. A constelação de satélites do sistema GPS é composta por 24 satélites de órbita baixa (LEO). Cada satélite descreve uma órbita completa em torno da terra em 12 horas, sendo que a cada 24 horas (aproximadamente) cada satélite percorre o mesmo caminho em relação à terra. Desses 24 satélites, um número de 5 a 8 pode apresentar visada direta pelo terminal GPS. O sistema conta ainda com uma rede de controle central localizada na base aérea Falcon AFB, no Colorado, EUA. Esta rede de controle tem a função de corrigir periodicamente a órbita e o relógio interno de cada satélite.

Além de suporte à navegação para aviões, navios, veículos e para a navegação pessoal, o sistema GPS é utilizado como fonte de referência de frequência e tempo para equipamentos de propósito específico (exemplo: geradores de RF), devido à precisão dos dispositivos de temporização internos de cada satélite. Pesquisas recentes têm apontado a utilização do sistema GPS também para medida de parâmetros atmosféricos (fonte: <http://www.fugawi.com/gpslinks.html>).

A Tabela 4 mostra as principais características técnicas de alguns dos vários sistemas de comunicação móvel via satélite.

Uma outra tecnologia de sistemas de comunicação móvel para interiores em grande escala de pesquisa e já com propostas de normalização é aquela que utiliza transmissões na faixa do infravermelho. O IEEE recentemente propôs uma padronização para uma rede local de comunicação móvel por infravermelho, batizada como padrão IEEE 802.11 e com grande semelhança com o padrão IEEE 802.3 (*Ethernet*), exceto na interface com o meio de comunicação.

Sistema	INMARSAT M	IRIDIUM	ORBCOMM
Órbita	GEO	LEO	LEO
Propósito	Voz, dados	Voz	Dados, <i>paging</i>
Infra-estrutura fixa	Gateways	Gateways	Gateways
Comunicação	Digital	Digital	Digital
Cobertura	Global	Global	Global
Frequências	1.6GHz	1.6; 2.4GHz	137, 149, 400MHz
Método de acesso	FDMA	FDMA/TDMA	
Atraso total	500ms	10ms	10ms
Com. Bidirecional	Sim	Sim	Sim
Acesso à rede fixa	Sim	Sim	Sim
Nº de satélites	4	66	26
Altitude da órbita (Km)	36000	780	765
Lançamento	1980s	1998	1997
Operação	1988	1998	1997
Banda	L	L	UHF, VHF

Tabela 4 – Características de alguns sistemas de comunicação móvel via satélite (de Linnartz, 1997).

V. SUMÁRIO

Este *tutorial* abordou conceitos básicos relacionados às comunicações móveis. Os fundamentos relacionados à transmissão de informação nos canais de rádio móveis via satélite e terrestre, os fenômenos observados nesses canais e as métodos para viabilização da comunicação nesses ambientes foram descritos. Várias técnicas de acesso em sistemas de comunicação móvel foram também apresentadas. Em caráter informativo foram apresentadas as principais características de alguns dos sistemas de comunicação móvel existentes e emergentes em todo o mundo. Como anteriormente citado, o objetivo desse trabalho é servir como motivação ao leitor para a busca de novos conhecimentos no campo das comunicações móveis, fornecendo um texto condensado reunindo conceitos fundamentais e essenciais ao entendimento de publicações e normas relacionadas e servir também como uma fonte de referência sobre algumas características das principais tecnologias na área das comunicações móveis.

Referências

- [1] Abramson, N., "Multiple Access in Wireless Digital Networks", *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, No. 9, pp. 1360-1370, September 1994.
- [2] Emmerson, Bob and Greetham, David, "Computer Telephony and Wireless Technologies – Future Directions in Communications", Computer Technology Research Corp.. South Carolina, 1997.
- [3] Feher, Kamilo, "Wireless Digital Communications - Modulation & Spread Spectrum Applications", Prentice Hall. New Jersey, 1995.
- [4] Gilhousen, K. S., Jacobs, Irwin M., Padovani, Roberto, Viterbi, Andrew J., Weaver, Lindsay A. Jr., Wheatley, Charles E., "On the Capacity of a Cellular CDMA System", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, No. 2, pp. 303-312, May 1991.
- [5] Guimarães, D. A., "Esquemas de Codificação para um Sistema DS-CDMA com Portadoras Ortogonais", Dissertação de Mestrado, FEEC – UNICAMP, junho de 1998.
- [6] Haykin, S., "Communication Systems", 3rd edition: John Wiley and Sons, Inc..New York, 1994.
- [7] Honary, Bahram, "Trellis Decoding of Block Codes", Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, 1997.
- [8] Lee, E. A. and Messerschmitt, D. G., "Digital Communication", 2nd edition: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [9] Lee, W. C. Y., "Mobile Cellular Telecommunications – Analog and Digital Systems", 2nd edition: McGraw-Hill, USA, 1995.
- [10] Linnartz, J. P., "Wireless Communication – The Interactive Multi-Media CD-ROM": Baltzer Science Publishers. Amsterdam, 1997.
- [11] Papoulis, Athanasios, "Probability, Random Variables, and Stochastic Processes", 3rd edition, McGraw Hill, USA, 1991
- [12] Pickholtz, R. L., "Spread Spectrum for Mobile Communications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, No. 2, pp. 313-322, May 1991.
- [13] Proakis, J. G., "Digital Communications", 3rd edition: McGraw Hill. New York, 1995.
- [14] Rappaport, T. S., "Wireless Communications - Principles and Practice": IEEE Press, Inc.. New York and Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996.
- [15] Shannon, Claude E., "A mathematical theory of communications", *Bell Systems Technical Journal*, vol.27, pp. 379-423 and 623-656, 1948
- [16] Steele, Raymond, "Mobile Radio Communications". IEEE Press. New York, 1992.
- [17] Turim, G. L., "Introduction to Spread-Spectrum Antimultipath Techniques and Their Application to Urban Digital Radio", *Proceedings of the IEEE*, vol. 68, No. 3, pp. 328-353, March 1980.
- [18] Wicker, Stephen B., "Error Control Systems for Digital Communication and Storage", Prentice Hall. New Jersey, 1995.
- [19] Yacoub, Michel Daoud, "Foundations of Mobile Radio Engineering", CRC Press, New York, 1993.
- [20] Ziemer, Rodger E. et. ali., "Introduction to Spread Spectrum Communications", Prentice Hall. New Jersey, 1995.

Sobre o autor

Dayani Adionel Guimarães, nasceu em Carrancas, MG no ano de 1969. Em 1987, 1994, e 1998 obteve, respectivamente, os títulos de Técnico em Eletrônica pela Escola Técnica de Eletrônica de Santa Rita do Sapucaí, MG – ETE "FMC", Engenheiro Eletricista pelo Instituto Nacional de Telecomunicações de Santa Rita do Sapucaí, MG – INATEL e Mestre em Engenharia Elétrica nas áreas de Eletrônica e Comunicações pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Em 1988 ingressou na SENSE Sensores e Instrumentos, onde trabalhou por 5 anos em projetos de sensores e equipamentos para instrumentação industrial e controle e, por 1 ano, como Supervisor de Produção e Supervisor de Engenharia de Produtos. Em 1996 concluiu o curso de especialização em Administração com Ênfase em Gerência de Recursos Humanos da Faculdade de Administração e Informática de Santa Rita do Sapucaí, MG – FAI e vários módulos do curso de especialização em Engenharia de Comunicação de Dados no INATEL. Tendo sido admitido em janeiro de 1995, hoje é Professor Assistente do INATEL, onde também coordena as atividades de ensino prático. Suas pesquisas incluem aspectos gerais das comunicações móveis, especificamente sistemas CDMA Multiportadoras e esquemas de codificação para canais com desvanecimento.

Endereço para contato: INATEL - Av. João de Camargo, 510, 37540-000, Santa Rita do Sapucaí, MG. Tel. (035)471-9214, e-mail: dayani@inatel.br.