

## Sumário

<b>1.</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Acesso Múltiplo para Comunicações sem Fio</b>	<b>2</b>
2.1.	Reuso de Frequência	2
2.2.	Setorização de Antenas	3
2.3.	Uma Comparação entre as Tecnologias de Acesso Múltiplo	4
<b>3.</b>	<b>Spread Spectrum</b>	<b>7</b>
3.1.	Direct Sequence	7
3.2.	Frequency Hopping	9
3.3.	Time Hopping	9
3.4.	Outros	10
<b>4.</b>	<b>A Revolução do CDMA</b>	<b>11</b>
4.1.	O Princípio do CDMA	11
4.2.	A Questão da Distância	12
4.3.	Controle de Potência	13
4.4.	Capacidade Associada à Célula	14
4.5.	Codificação de Voz	15
4.6.	Desvanecimento em Propagação Multi-Percurso	15
<b>5.</b>	<b>Capacidade versus Cobertura</b>	<b>17</b>
5.1.	Compromisso entre Capacidade e Cobertura no Link Reverso	17
<b>6.</b>	<b>Controle de Potência</b>	<b>20</b>
6.1.	O Ambiente de Propagação Móvel	20
6.2.	Controle de Potência no Link Reverso	20
6.3.	Controle de Potência no Link Direto	22
<b>7.</b>	<b>Handoff</b>	<b>23</b>
7.1.	Taxa de Handoff	23
7.2.	Passos em um Processo de Handoff	24
7.3.	Handoff no CDMA	24
<b>8.</b>	<b>Forward CDMA Channel</b>	<b>28</b>
8.1.	Parâmetros de Transmissão	28
8.2.	Estrutura do Sinal	28
8.3.	Canais de Overhead	30
8.4.	Traffic Channel	31
<b>9.</b>	<b>Reverse CDMA Channel</b>	<b>32</b>
9.1.	Parâmetros de Transmissão	32
9.2.	Estrutura do Sinal	33
9.3.	Access Channel	34
9.4.	Traffic Channel	35
9.5.	Temporização	35
<b>10.</b>	<b>Conclusão</b>	<b>36</b>
10.1.	O CDMA para Sistemas Celulares	36
10.2.	CDMA para Personal Communications Services	36
10.3.	CDMA para Wireless Local Loop	37
	<b>Bibliografia</b>	<b>38</b>

## 1. Introdução

O CDMA (*Code Division Multiple Access*) é um conceito radicalmente novo nas comunicações sem fio. Esta tecnologia ganhou aceitação internacional por operadores de sistemas celulares como um avanço que pode aumentar tanto a capacidade dos sistemas quanto a qualidade de serviço.

CDMA é uma forma de *spread spectrum*, uma família de técnicas de comunicação digital que foram utilizadas para aplicações militares durante anos. O princípio do *spread spectrum* é a utilização de ondas portadoras similares ao ruído e com largura de banda muito maior do que a requerida para uma simples comunicação ponto a ponto com a mesma taxa de dados. Originalmente, isto se deve a dois motivos: resistir a esforços inimigos para confundir as comunicações (anti-jam) e até mesmo esconder o fato que alguma comunicação estava sendo realizada, baixa probabilidade de interceptação (LPI). O CDMA gasta pouca energia, usa as frequências disponíveis de forma eficiente, simplifica o planejamento com um padrão de reuso de frequência único, usa um sistema de códigos que permite receber o sinal em situações adversas, impede a interferência e o rastreamento da transmissão [RNT].

O uso de CDMA para aplicações civis em rádio móvel foi teoricamente proposta no fim da década de 1940, mas nenhuma aplicação prática tomou lugar no mercado civil até 40 anos depois. As aplicações comerciais se tornaram viáveis devido a dois desenvolvimentos evolucionários. Um foi a disponibilidade de circuitos digitais com baixo custo e alta densidade de integração, que reduziam o tamanho, peso e custo das estações de assinante a um valor aceitável. O outro foi a descoberta que, para a otimização de comunicações de acesso múltiplo, era requerido que todas as estações de assinante regulassem a potência de seus transmissores para o mais baixo nível que permitisse adequada qualidade de sinal.

O CDMA muda a natureza da estação de assinante de um aparelho predominantemente analógico para um aparelho predominantemente digital. Antigos modelos de receptores separavam estações ou canais pela filtragem no domínio da frequência. Receptores CDMA não eliminam totalmente o processo digital, mas separam os canais de comunicação através de uma modulação pseudo-aleatória que é aplicada e removida no domínio digital, não na base da frequência. Múltiplos usuários ocupam a mesma banda de frequência. Esta reutilização de uma frequência universal não é por acaso. Ao contrário, é crucial para uma altíssima eficiência espectral que é característica do CDMA.

O CDMA está alterando a forma das comunicações celulares e PCS por:

- Melhorar a capacidade de tráfego telefônico (*Erlang*);
- Aprimorar a qualidade de voz e eliminar efeitos audíveis de desvanecimento de sinal por propagação em caminhos múltiplos (*multipath fading*);
- Reduzir a incidência de quedas de chamada e falhas de *handoff*;
- Fornecer um mecanismo de transporte confiável para comunicação de dados, como facsímile e internet;
- Reduzir o número de locais (*sites*) necessários para suportar qualquer quantidade de tráfego;
- Simplificar a seleção de *sites*;
- Reduzir custos de implantação e de operação, pois menos ERBs (Estações Rádio Base) são necessárias;
- Reduzir a potência média transmitida;
- Reduzir a interferência de outros dispositivos eletrônicos;
- Reduzir riscos potenciais à saúde.

## 2. Acesso Múltiplo para Comunicações Sem Fio

Um dos mais importantes conceitos para qualquer sistema de telefonia celular é o de acesso múltiplo, significando que vários usuários podem ser suportados simultaneamente. Em outras palavras, um grande número de usuários compartilham um grupo comum de canais de rádio e qualquer usuário pode ter acesso a qualquer canal (o usuário não está sempre designado ao mesmo canal). Um canal pode ser entendido simplesmente como uma porção do limitado espectro de rádio que é temporariamente alocada para uma específica finalidade, como um telefonema. Um método de acesso múltiplo define como o espectro de rádio é dividido em canais e como estes são alocados para os usuários do sistema.

Os objetivos de sistemas de comunicação com acesso múltiplo são:

- Qualidade de serviço de voz próxima ao sistema convencional com fio;
- Cobertura geográfica quase universal;
- Baixo custo de equipamentos, tanto da unidade de assinante quanto da planta fixa;
- Número mínimo de estações rádio base (ERBs)

Agências reguladoras alocaram uma largura de banda limitada para estes serviços, tal que as soluções devam alcançar alta eficiência espectral, medida em Erlangs por unidade de área de serviço, por MHz.

Implementações práticas de sistemas celulares com centenas de canais se tornaram possíveis com a disponibilidade de sintetizadores de frequência compactos e de baixo custo. O controle por microprocessadores permite complexo gerenciamento de mensagens que implementam sofisticados protocolos de controle de chamada.

Cada site serve a um certo número de unidades de assinante dentro de uma área geográfica limitada. Quando um assinante se move entre células, a transferência do controle de uma célula para a outra é feita através de mensagens pelo ar (*over-the-air messaging*), que descontinuam o uso do canal de uma célula e sintonizam um outro canal em uma nova célula. Esse processo é designado como *handoff* ou, no caso de mudança entre setores de uma mesma célula, *handover*.

### 2.1. Reuso de Frequência

Um conceito importante para sistemas celulares é o de reutilização de frequência. Apesar de haver vários canais disponíveis, se cada frequência for designada para somente uma célula, a capacidade total do sistema será igual ao número total de canais, ajustados para a probabilidade de bloqueio de Erlang, somente alguns milhares de assinantes por sistema. Através da reutilização de frequência em células múltiplas, o sistema pode crescer sem limites geográficos.

O reuso é criticamente dependente ao fato de que a atenuação do campo eletromagnético, nas bandas de celular, tende a ser mais rápida com a distância do que é no espaço livre. Medidas tem apresentado repetidamente que a intensidade de campo decai tipicamente com  $R^{-n}$ ,  $3 < n < 5$ . No espaço livre,  $n = 2$ . De fato, é facilmente demonstrado que o conceito celular falha devido ao crescimento sem fronteiras da interferência quando a propagação é feita no espaço livre.

Considerando um sistema ideal, assumindo propagação uniforme  $R^{-n}$  e que as fronteiras das células se encontram a pontos equidistantes, então uma área de serviço plana é coberta pelo clássico modelo de células hexagonais.

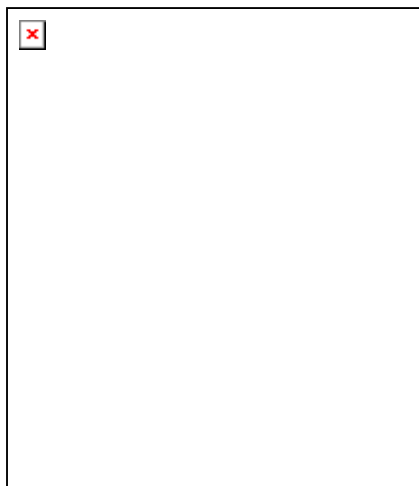


Figura 2.1. Modelo de *cluster* com células hexagonais

Sete conjuntos de canais são utilizados, cada conjunto em uma célula. Esta unidade de sete células (*cluster*) é então replicada sobre toda a área de serviço.

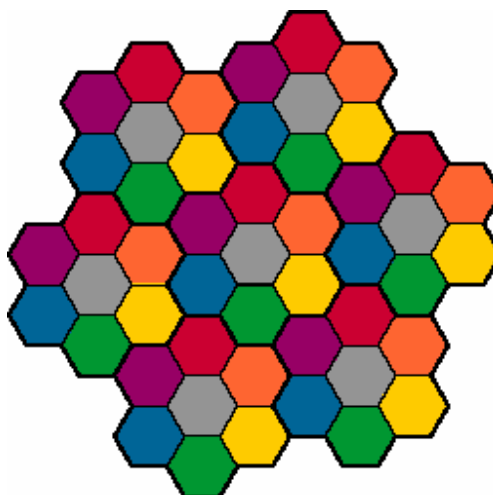


Figura 2.2. Configuração de *clusters*.

Não há células adjacentes usando o mesmo canal. Enquanto sistemas reais nunca parecem com a estilização hexagonal idealizada, a reutilização de frequência com *clusters* de 7 células é típica do que é alcançado na prática.

A capacidade associada a um padrão de reuso  $n$  é simplesmente o total de número de canais dividido por  $n$ . Com  $n=7$  e 416 canais, há aproximadamente 57 canais disponíveis por célula. A uma carga típica oferecida de 0,05 *Erlangs* por assinante, cada site pode suportar em torno de 1140 assinantes.

## 2.2. Setorização de Antenas

As figuras 2.1 e 2.2 apresentam células que utilizam antenas omnidirecionais. Deve-se esperar que a capacidade do sistema possa ser aumentada pela setorização de antenas. De fato, os sites são geralmente divididos em 3 setores. Cada site é equipado com 3 conjuntos de antenas direcionais, com

azimutes separados de  $120^\circ$ . Se um conjunto de canais é designado para cada uma das 7 células, então o padrão pode ser repetido sem violar a requisição de adjacência de cada *cluster*.

Infelizmente, a setorização, na prática, não implica num aumento de capacidade. A razão disto é porque o isolamento setor a setor, geralmente poucos dBs, não é suficiente para garantir um nível aceitável de interferência. O resultado prático da setorização é um aumento na cobertura por causa do ganho de diretividade da antena direcional. Nada é ganho com reuso na setorização, pois a capacidade do sistema continua sendo determinada pela largura de banda por canal. Do ponto de vista dos setores, o fator de reuso  $n = 7 \times 3 = 21$ .

### **2.3. Uma Comparação entre as tecnologias de Acesso Múltiplo**

É mais fácil entender o CDMA se comparado a outras tecnologias de acesso múltiplo [Motorola]. Os itens seguintes descrevem as diferenças fundamentais entre FDMA, TDMA e CDMA.

#### **2.3.1. FDMA (Frequency Division Multiple Access)**

Diferentes tipos de sistemas celulares empregam diversos métodos de acesso múltiplo. O tradicional sistema celular analógico, assim como os baseados em AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) e TACS (*Total Access Communications System standards*), utilizam acesso múltiplo por divisão de frequência, FDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência). Canais FDMA são definidos por uma faixa de frequências de rádio, usualmente expressas em kilohertz (kHz).

Por exemplo, sistemas AMPS usam fatias de espectro de 30 kHz para cada canal. O NAMPS (*Narrowband AMPS*) requer somente 10 kHz por canal. Canais TACS tem largura de banda de 25 kHz. Com FDMA, somente um assinante é designado para o canal ao mesmo tempo. Nenhuma outra conversação pode acessar este canal até que a chamada corrente seja terminada ou até que haja um *handoff* para outro canal diferente do sistema.

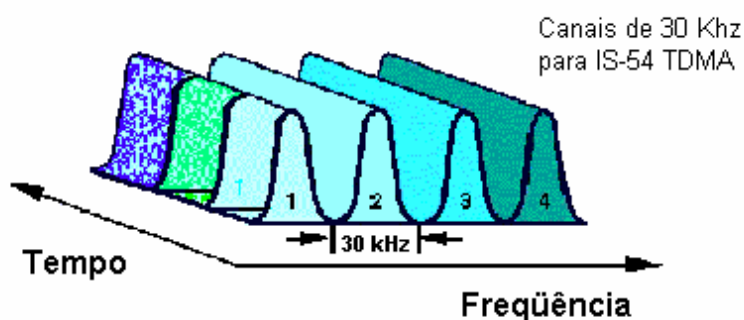
Figura 2.3. FDMA

#### **2.3.2. TDMA (Time Division Multiple Access)**

Um método comum de acesso múltiplo empregado nos novos sistemas celulares digitais é o TDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo). Sistemas TDMA normalmente iniciam com uma fatia do espectro, chamada de portadora. Cada portadora é então dividida em intervalos de tempo (*time slots*). O ponto chave sobre TDMA é que os usuários ainda estão designados a fatias discretas do espectro de

RF, mas múltiplos usuários compartilham agora a mesma portadora de RF, utilizando o canal em diferentes intervalos de tempo.

Um *time slot* particular é designado a um assinante em uma portadora, o qual somente pode enviar ou receber informação no respectivo intervalo, independente dos outros *time slots* estarem ou não sendo usados. O fluxo de informação não é contínuo para qualquer usuário, e sim enviado ou recebido através de rajadas (*bursts*). Os *bursts* são remontados no receptor e aparentam fornecer som contínuo devido a velocidade do processo e ao respeito ao princípio de Nyquist.

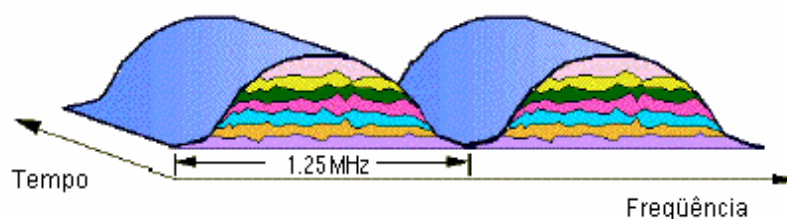


3 usuários por canal de banda estreita

Figure 2.4. TDMA

### 2.3.3. CDMA (Code Division Multiple Access)

O IS-95 usa uma técnica de acesso múltiplo por espalhamento espectral (*spread spectrum*) conhecida como Sequência Direta (*Direct Sequence*), DS-CDMA. Durante uma chamada, um código binário é designado a cada assinante. O código DS é um sinal gerado por modulação linear através de seqüências de Ruído Pseudo-aleatório (PN) em banda larga. Como resultado, o DS-CDMA utiliza sinais muito mais longos dos que os utilizados nas outras tecnologias. Sinais de banda larga reduzem interferência e permitem reuso de frequência em cada célula. Não há divisão no tempo, e todos os usuários usam toda a largura de banda da portadora durante todo o tempo.



N usuários por banda estreita

Figure 2.5. DS-CDMA

### 2.3.4. Ilustração das Diferenças

Para ilustrar as diferenças conceituais entre as técnicas de múltiplo acesso, vamos fazer uma analogia com uma festa internacional. Imaginando um grande salão e um número de pessoas conversando em pares, supõe-se que cada par só tem interesse na própria conversa. Para que estas conversações se apresentem, entretanto, é necessário definir o ambiente para cada uma delas.

Inicialmente, definindo a analogia ao sistema FDMA, o ambiente seria simulado criando pequenas salas, onde cada par de pessoas pudesse manter sua conversação. Uma vez que esta tivesse terminado, deixariam a sala para que outro par pudesse iniciar outra conversa.

Num ambiente TDMA, cada uma destas pequenas sala poderia acomodar múltiplas conversas quase simultaneamente. Por exemplo, em relação ao IS-54 (TDMA com 3 slots), cada sala conteria até 3 pares de pessoas, com cada par falando em turnos específicos, mesmo que houvesse somente um par na sala.

Agora, para o CDMA, as pequenas salas não são necessárias. Os pares estarão todos no mesmo salão. Se cada par utiliza um idioma diferente, podem usar o ar da sala como portadora de suas vozes e experimentar uma pequena interferência de outros pares. A analogia é que o ar é uma portadora de banda larga e os diferentes idiomas representam os códigos designados pelo sistema CDMA. Ainda mais, pode-se dizer que há uma filtragem incorporada, pessoas que falam alemão não vão entender virtualmente nada das que falam espanhol.

Pode-se continuar adicionado pares, cada um falando um idioma diferente até que o ruído de fundo (*background noise*), interferência de outros usuários, torne extremamente difícil o entendimento entre os pares, a taxa de sobreposição de quadros torna-se muito alta. Controlando o volume da voz, intensidade de sinal, de todos os pares para nada mais que o necessário, pode-se maximizar o número de conversações que podem tomar lugar no salão, maximizar o número de usuários por portadora.

Assim, o número máximo de usuários, ou de canais de tráfego efetivo, por portadora depende da quantidade de atividade que está ocorrendo em cada canal, que é imprecisa. É um conceito de sobrecarga suave (*soft overload*) quando um usuário adicional é acomodado no sistema ao custo de um pouco mais de interferência para outros usuários.

### 3. Spread Spectrum

Uma importante característica da Modulação por Espalhamento de Espectro é que esta provê uma proteção contra interferência externa com potência finita. O sinal causador de interferência pode consistir de um ruído de banda larga bastante poderoso ou de uma forma de onda de múltiplas frequências que são dirigidas ao receptor de forma a degradar a comunicação. A proteção contra estas interferências é obtida fazendo com que o sinal contendo a informação ocupe propositadamente uma largura de banda maior do que a necessária para transmiti-lo. Isto faz com que o sinal transmitido tenha uma aparência semelhante ao ruído. O sinal pode então propagar-se através do canal sem ser impropriamente detectado.

Existem várias técnicas para gerar sinais *spread spectrum* [Dino].

#### 3.1. Direct Sequence

O padrão IS-95 é baseado na modulação DS-SS-SS-SS. Nos protocolos DS-SS-SS-SS a informação do sinal é multiplicada diretamente por um código PN  $\pm 1$  na transmissão. Para se obter o espalhamento do sinal desejado, a taxa do sinal PN deve ser maior que a taxa do sinal de informação.

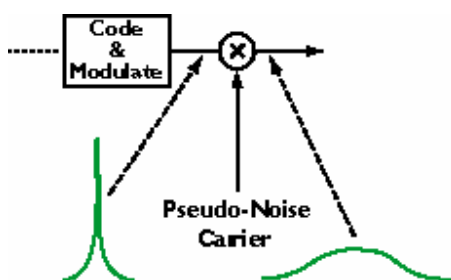


Figura 3.1. Geração da DS no transmissor

O espalhamento toma lugar em relação a qualquer modulação, totalmente no domínio binário, e o sinais transmitidos são cuidadosamente limitados em banda.

Após a transmissão, o receptor usa uma demodulação coerente para juntar o sinal, usando uma seqüência de código gerada localmente. O sincronismo deve ser perfeito no início da recepção e mantido até que todo o sinal seja recebido. Uma segunda multiplicação por uma réplica da mesma seqüência  $\pm 1$  no receptor recupera o sinal original.

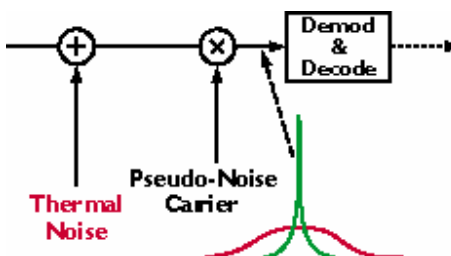


Figura 3.2. Demodulação da DS no receptor

O ruído e a interferência, sendo descorrelacionados com a sequência PN, tornam-se como ruído unicamente e apresentam um aumento em largura de banda quando atingem o detetor. A relação sinal/ruído (SNR) pode ser aumentada por filtragem em banda estreita que rejeita a maioria da potência de interferência. A SNR é aumentada pelo ganho de processamento denominado W/R, onde W é a largura de banda de espalhamento e R é a taxa de dados.

Tabela 3.1. *Direct Sequence*

Vantagens	Desvantagens
O espectro do sinal é espalhado instantaneamente, através de uma simples multiplicação pelo código.	É difícil adquirir e manter o sincronismo entre o sinal PN gerado localmente e o sinal recebido.
O sintetizador de frequência é simples, pois uma única portadora é gerada.	A sincronização deve agir em uma fração de tempo de chip, limitando a largura de banda de espalhamento.
É possível realizar demodulação coerente.	A potência recebida por usuários perto da ERB é muito maior do que os distantes ( <i>near-far problem</i> ), necessitando de algoritmos para controle de potência para que todos os usuários sejam recebidos na estação com a mesma potência média.
Não é necessária nenhuma sincronização entre os usuários.	
Sinal com baixa probabilidade de interceptação.	

O espalhamento do CDMA comercial (DS-SS) é em quadratura em ambos os canais direto e reverso. A razão para o espalhamento em quadratura é realmente assegurar que a interferência mútua entre os usuários e entre as ERBs seja distribuída uniformemente em fase. Ao contrário, isso não contribuiria em nada para a performance do sistema [2, Motorola].

No canal direto, o efeito da ortogonalização dos canais é reduzir a interferência mútua entre os usuários. Enquanto o cancelamento não é perfeito em um sistema real devido a multivias indesejáveis, ele ajuda e contribui para a capacidade do link direto.

No canal reverso, o resultado primário é que o efeito da interferência mútua e *jamming* é o mesmo de um nível de ruído efetivo

$$\begin{aligned}
 N_{\text{eff}} &= N_0 + \sum_{\text{other users}} \mathcal{E}_m + \int_{-\infty}^{\infty} J(f) |H(f)|^2 df \\
 &\approx N_0 + \sum_{\text{other users}} \mathcal{E}_m + P_{\text{interf}} / W
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

onde  $N_0$  é o nível de ruído térmico do receptor, e  $P_{\text{interf}}$  é a potência de interferência total na banda (dentro da banda de espalhamento de largura  $W = 1.25$  MHz).

### 3.2. Frequency Hopping

Nos protocolos FH-CDMA, a frequência da portadora do sinal modulado não é constante, mas muda periodicamente. Durante intervalos de tempo  $T$ , a portadora se mantém em uma determinada frequência, mas a cada intervalo a portadora muda para outra, ou talvez a mesma, frequência. O salto em frequência (*frequency hopping*) é tipicamente acompanhado por rápido chaveamento entre sintetizadores de frequência de rápido-ajuste em um padrão pseudo-aleatório.

O sistema DS ocupa toda a banda de frequência quando transmite, enquanto o sistema FH usa somente uma pequena parte da banda, mas a localização desta difere no tempo. Se o número de saltos (*hops*) é maior que a taxa de dados, chama-se F-FH (*fast frequency hopping*), assim a frequência da portadora muda várias vezes durante a transmissão de um bit, e um bit é transmitido em diferentes frequências. Se o número de hops é menor que a taxa de dados, chama-se S-FH (*slow frequency hopping*) e múltiplos bits são transmitidos em uma mesma frequência.

A largura de banda do sinal FH depende não só da largura de banda do sinal a ser transmitido, mas também da forma do sinal de *hopping* e da frequência de *hopping*.

Tabela 3.2. *Frequency Hopping*

Vantagens	Desvantagens
A realização de sincronismo é mais fácil que o DS-CDMA. O sincronismo deve ser realizado em uma fração do tempo de salto que é maior que o tempo de processamento do chip, permitindo um erro maior de sincronismo.	O espectro do sinal é espalhado sequencialmente, ao invés de instantaneamente como no DS-CDMA.
As bandas de frequência que o sinal FH pode ocupar não precisam ser contíguas, permitindo bandas com larguras maiores.	É necessário um sintetizador de frequências mais sofisticado.
A probabilidade de múltiplos usuários transmitindo simultaneamente na mesma banda frequência é pequena.	Uma mudança abrupta do sinal enquanto troca de frequência conduz a um aumento de banda. Para evitar isso, o sinal deve ser desligado e ligado quando estiver trocando de frequência.
A performance para resolução de problemas do tipo <i>near-far</i> é superior, pois os usuários estão transmitindo em frequências diferentes.	A demodulação coerente é difícil pelos problemas de se manter as relações de fase durante as mudanças de frequência.
Por poder utilizar uma largura de banda maior, oferece maior possibilidade de redução de interferência de faixa estreita que os sistemas DS.	

### 3.3. Time Hopping

Nos protocolos TH-CDMA, os sinais de dados são transmitidos em rápidas rajadas (*bursts*) em intervalos de tempo determinados pelo código designado ao usuário.

O eixo de tempo é dividido em quadros (*frames*) e cada quadro é dividido em  $M$  slots de tempo. Durante cada quadro o usuário transmitirá em um dos  $M$  slots. O slot de tempo será determinado pelo código do usuário. Dado que um usuário transmite os seus dados em 1, ao invés de  $M$  slots, a frequência que este precisa para a sua transmissão aumenta em um fator de  $M$ .

Tabela 3.3. *Frequency Hopping*

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
A implementação é mais simples que os protocolos FH-CDMA.	Não possui nenhum ganho em relação ao <i>multipath fading</i> .
	Tempo tomado para a sincronização do código é longo.
	Se ocorrem múltiplas transmissões, é necessário um bom código de correção de erros e predição de dados, pois a quantidade de bits perdida é grande.

### 3.4. Outros

Existem ainda outras formas de *spread spectrum* como o *Chirp spread spectrum*, que se baseia no espalhamento da largura de banda através de uma modulação linear da portadora, e os sistemas híbridos.

A utilização de sistema híbridos busca combinar as vantagens específicas de cada uma das técnicas de modulação apresentadas. Por exemplo, um sistema híbrido DS/FH-CDMA tem as vantagens da propriedade de caminhos múltiplos do *Direct Sequence* combinadas com a maior facilidade do sistema *Frequency Hopping* para operação com o problema *near-far*. O sinal é primeiramente espalhado usando o código DS e posteriormente modulado em uma portadora com outro código de espalhamento.

A desvantagem de utilizar sistemas híbridos se localiza na complexidade de implementação dos transmissores e receptores.

## 4. A Revolução do CDMA

A grande atração da tecnologia CDMA desde o seu começo foram as promessas de extraordinário aumento de capacidade em relação a outras tecnologias de acesso múltiplo. Modelos simples sugeriam que a melhoria em capacidade poderia ser de até 20 vezes o que havia nos padrões celulares de faixa estreita existentes, como o AMPS. Contudo, os diversos fatores dos sistemas reais, como áreas de cobertura altamente irregulares, carga não uniformemente distribuída, mudanças em relação a hora do dia e outras influências incontroláveis, mostraram que os modelos idealizados não poderiam chegar a tal aumento.

### 4.1. O Princípio do CDMA

A chave para a alta capacidade do sistema CDMA está no uso de ondas portadoras similares ao ruído. Ao invés de particionar o espectro ou tempo em intervalos, uma diferente instância da portadora de ruído é designada para cada assinante. Estas formas de onda não são rigorosamente, mas aproximadamente, ortogonais. Uma aplicação prática deste princípio usa pseudo-ruído (*pseudo-noise*) gerado digitalmente ao invés do verdadeiro ruído térmico. Os benefícios básicos são preservados, e os transmissores e receptores são simplificados, pois grande parte pode ser implementada utilizando dispositivos digitais de alta densidade.

O maior benefício de portadoras similares ao ruído é que a sensibilidade do sistema à interferência é fundamentalmente alterada. Os tradicionais sistemas de divisão na frequência ou no tempo tinham que ser projetados com uma taxa de reuso que satisfizesse o pior caso de interferência, mas somente uma pequena fração dos usuários realmente experimentavam esta situação. O uso de portadoras do tipo ruído, com todos os usuários ocupando o mesmo espectro de frequência, tornou o ruído efetivo na soma de todos os sinais de outros usuários. O receptor faz a correlação da entrada com a portadora de ruído desejada, amplificando a relação sinal-ruído (SNR) para o detetor. A amplificação sobrepõe o ruído aditivo o suficiente para fornecer uma SNR adequada no detetor. Como a interferência é aditiva, o sistema não é mais sensível ao pior caso de interferência, mas à interferência média. O reuso de frequência é universalizado para todo o sistema, ou seja, vários usuários utilizam cada uma das portadoras de frequência do sistema CDMA. O padrão de reuso de frequência passa a ser o da figura 4.1.



Figura 4.1. Reuso de Frequência no Sistema CDMA

As células indicam que toda a banda passante de 1,25 MHz é utilizada por cada usuário, e a mesma banda passante é reutilizada em cada célula.

A capacidade é determinada pela relação entre a SNR requerida para cada usuário e o ganho de processamento de espalhamento do espectro. A figura de mérito de um receptor bem projetado é o valor adimensional da SNR (*signal-to-noise ratio*).

$$\frac{E_b}{N_0} \equiv \frac{\text{Energy per bit}}{\text{Power spectral density of noise + interference}} \quad (4.1)$$

A parte de ruído da SNR, num sistema de *spread spectrum*, é realmente a soma do ruído térmico e a interferência de outros usuários. A SNR necessária para alcançar um taxa de erros particular depende de vários fatores, como a codificação de erro de envio utilizada, o desvanecimento e diversidade de caminhos no ambiente de propagação. Para os receptores tipicamente utilizados no CDMA comercial, as faixas variam aproximadamente de 3 a 9 dBs.

A energia por bit (*Energy per bit*) está relacionada à potência do sinal e à taxa de dados.

$$E_b = P_s / R \quad (4.2)$$

O termo referente à soma do ruído e da interferência (*noise + interference*) é a densidade espectral de potência (*power spectral density*). Se o espectro dos sinais for grosseiramente retangular, com uma largura de banda  $W$ , então a densidade espectral de potência da soma do ruído com interferência é

$$N_0 = F_N k_B T_0 + W^{-1} \sum_{\text{other users}} P_i \quad (4.3)$$

onde o primeiro termo representa o nível de ruído térmico do receptor ( $F_N$ ). Reescrevendo a equação SNR em termos da taxa de dados e da largura de banda de espalhamento espectral, temos

$$\left( \frac{E_b}{N_0 + I_0} \right)_j = \frac{P_j / R}{N_0 + W^{-1} \sum_i P_i} \quad (4.4)$$

A interferência nessa equação é a soma dos sinais de todos os usuários com exceção do usuário de interesse.

## 4.2. A Questão da Distância

O CDMA (e tecnologias de *spread spectrum* em geral) sempre foram mistificados como inúteis no ambiente de rádio móvel, devido ao problema de proximidade e distância. Sempre foi assumido que todas as estações transmitiam à potência constante. Entretanto, no sistema móvel celular, alguns assinantes podem estar localizados próximos à base da ERB, e outros, bem distantes dela. A perda por propagação entre os usuários em pontos extremos pode ser de dezenas de dBs. Supondo, por exemplo que somente dois usuários estivessem presentes, e ambos estivessem transmitindo com potência suficiente para que o ruído térmico fosse desprezível, então a SNR, em dB, seria

$$\left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} = \frac{W}{R} + P_j - P_i \quad (4.5)$$

Se houver, digamos, 30 dB de diferença entre a maior e a menor perda no caminho de propagação, então existe uma diferença de 60 dB entre a SNR do usuário mais próximo e a do mais distante, pois estas são as potências recebidas. Para acomodar os usuários distantes, a largura de banda talvez tivesse de ser 40 dB maior, ou 10.000 vezes a taxa de dados. Se a taxa de dados for 10 kbps, então  $W=100$  MHz. A eficiência espectral é muito pior do que qualquer sistema FDMA ou TDMA ineficiente. Por outro lado, se uma largura de banda razoável for escolhida, então os usuários distantes não recebem nenhum serviço.

Essa observação foi durante anos o motivo racional para que nenhuma tentativa de utilizar spread spectrum fosse feita, a não ser em satélites geostacionários, aonde a perda por espalhamento no caminho era muito pequena.

### 4.3. Controle de Potência

A chave para alta capacidade no CDMA comercial é extremamente simples. Se, ao invés de utilizar potência constante, os transmissores pudessem ser controlados de tal forma que a potência recebida de qualquer usuário fosse grosseiramente igual, então os benefícios do espalhamento seriam realizados. Se a potência recebida for controlada, então os assinantes podem ocupar o mesmo espectro e se acumulam os esperados benefícios da interferência média.

Assumindo perfeito controle de potência, então a soma entre o ruído e a interferência agora é

$$\begin{aligned} N_0 + I_0 &= N_0 + (N-1)P_s \\ N_0 &= F_N k_B T_0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

onde  $N$  é o número total de usuários. A SNR torna-se

$$\frac{E_b}{(N_0 + I_0)} = \frac{P_s/R}{N_0 + (N-1)P_s/W} = \frac{W/R}{(N_0 W/P_s) + N - 1} \quad (4.7)$$

A capacidade máxima é atingida se ajustarmos o controle de potência tal que a SNR seja exatamente o necessário para uma dada taxa de erro. Substituindo o valor objetivado para SNR e resolvendo a equação (4.7) em relação a  $N$ , tem-se a equação de capacidade básica para o sistema CDMA:

$$N - 1 = \frac{W/R}{\left( \frac{E_b}{(N_0 + I_0)} \right)_{\text{target}}} - \frac{N_0}{P_s} \xrightarrow{P_s \rightarrow \infty} \frac{W/R}{\left( \frac{E_b}{(N_0 + I_0)} \right)_{\text{target}}} \quad (4.8)$$

Usando os números para IS-95A CDMA com taxa de 9,6 kbps,

$$N \approx \left( \frac{W}{R} \right)_{dB} - \left( \frac{E_b}{(N_0 + I_0)} \right)_{\text{target, dB}} \approx 21.1 - 6 \text{ dB} = 15.1 \text{ dB} \quad (4.9)$$

ou aproximadamente  $N=32$ . A SNR escolhida de 6 dB é uma estimativa nominal. Uma vez que o controle de potência é disponível, o projetista do sistema tem a liberdade de negociar entre a qualidade de serviço e a capacidade do sistema, ajustando o valor de SNR. Nota-se que a capacidade e a SNR são recíprocos, uma melhoria de 3 dB na SNR implica um fator de perda de dois na capacidade e vice-versa.

Vários fatores ainda não foram tomados em conta, assim como foi negligenciada a diferença entre  $N$  e  $N-1$  na equação (4.9) por ser uma aproximação razoável, dada à capacidade do sistema. Temos, no geral, um sensível avanço em relação às tecnologias de banda estreita.

Verifica-se que com  $E_b/N_0$  na faixa de 3 a 9 dB, a equação (4.9) dá uma capacidade de 16 a 64 usuários na vizinhança. Na mesma largura de banda, um simples setor de uma célula AMPS tem somente 2 canais disponíveis.

#### 4.4. Capacidade Associada a Célula

A discussão que levou à equação (4.9) assumiu somente uma simples célula, sem interferência de células vizinhas. Na verdade, sem interferência das células adjacentes, o sistema AMPS teria uma capacidade de aproximadamente 42 canais (1,25 Mhz/30 kHz), próxima aos valores obtidos para o sistema CDMA.

A grande diferença está em encontrar o que acontece em meio à interferência de células vizinhas. Para isso, deve-se adicionar esta interferência à equação (4.3). Aparece assim que a porcentagem de interferência do link reverso que vem da célula vizinha é de aproximadamente 60% da interferência da própria célula. E, esta resposta não é muito sensível aos parâmetros do modelo, assumindo que as estações móveis tem controle de potência.

Para o cálculo, introduz-se o fator efetivo de reuso de frequência  $F$ , definido como

$$F \equiv \frac{\text{Total interference power}}{\text{Own-cell interference power}} \quad (4.10)$$

O efeito da interferência adicional pode ser levado, substituindo  $N$  por  $FxN$ . A capacidade do polo, assumindo agora que todas as células estão igualmente carregadas é

$$N_{\text{pole}} = \frac{(W/R)}{\left( \frac{E_b}{(N_0 + I_0)} \right)_{\text{target}} \cdot F} \quad (4.11)$$

Na equação (4.11), vê-se porque  $F$  é chamado de fator de reuso de frequência efetivo. Ele representa na equação de capacidade do sistema CDMA (4.11) o mesmo que o fator de reuso de frequência  $K$  representa na capacidade do sistema AMPS. Uma célula omnidirecional CDMA, mesmo com interferência de outras células, tem uma capacidade maior que o sistema AMPS de um fator  $K/F = 7/1,6 = 4,375$ . O aumento em uma célula setorizada é ainda maior, pois a capacidade do sistema CDMA é multiplicada pela setorização. Ou seja, a equação (4.11) se aplica a um setor, com pequenas modificações dada a perda de interferência entre setores. Nesse caso, a capacidade aumenta em  $K/F = 7x3/1,6 = 13,125$  vezes.

#### 4.5. Codificação de Voz

Uma vez que a interferência é calculada pela média, qualquer coisa que seja feita para reduzir a potência média transmitida aprimora a capacidade. Um ponto óbvio para a otimização de potência é a codificação de voz. A fala humana é uma fonte de informação redundante. Medidas realizadas pelos *Bell Laboratories* muitos anos atrás mostravam que o fator de atividade numa conversação humana natural está numa faixa de 35 a 40%. Se essa atividade for traduzida em obstrução de potência, então um maior aumento de capacidade pode ser obtido. Esse fato é realizado em ambos os padrões de interface aérea e serviço de codificação de voz. A capacidade do pólo se torna

$$N_{\text{pole}} = \frac{(W/R)}{\left( \frac{E_b}{(N_0 + I_0)} \right)_{\text{target}} \cdot F \cdot \nu} \quad (4.12)$$

onde  $\nu$  é o fator de atividade de voz, aproximadamente 0,5. A redução alcançada em prática é menor do que a medida com o fator de atividade, pois a taxa de transmissão pelo ar não é reduzida a zero nos períodos ociosos. Este modelo simplificado mostra um aumento de 26 vezes no ganho de capacidade em relação ao sistema AMPS. Apesar de ser uma suposição otimista, a codificação de voz apresenta melhorias substanciais que podem ser obtidas na conversão para CDMA.

Uma taxa de dados variável é ajustada na interface aérea pelo fornecimento de uma taxa de dados de tráfego básica que pode ser reduzida em percentagens binárias (1, 1/2, 1/4, and 1/8). A transmissão nunca é reduzida a zero, porque isso representaria um problema para a supervisão de canal. Hoje, dois conjuntos de taxas de dados proporcionais às percentagens apresentadas são suportados, o primeiro baseado em 9.600 bps e o outro em 14.400 bps.

A codificação de voz utilizada no CDMA é padronizada separadamente da interface aérea como uma opção de serviço. O primeiro codificador foi padronizado na IS-96. Este padrão opera no conjunto de taxas nominais associadas a 9.600 bps e atinge uma taxa média efetiva um pouco acima de 4 kbps.

#### 4.6. Desvanecimento em Propagação Multi-Percurso (Multipath Fading)

A capacidade do sistema é afetada pelo fenômeno de propagação. O desvanecimento do sinal dentro de um veículo em movimento é mais rápido, sendo causado pela movimentação do veículo através de padrões de interferência estacionários, onde a escala espacial é o comprimento de onda. O CDMA é muito mais robusto que as tecnologias analógicas quando há diversidade de percursos, mas isso ainda afeta a capacidade.

Quando as componentes referentes aos múltiplos percursos da forma de onda CDMA tem atrasos separados por, ao menos, o tempo de decorrelação do espalhamento, então elas podem ser diferenciadas no receptor. Elas não interferem, pois cada componente se correlaciona com um diferente atraso. Quando as componentes são separadas por intervalos menores do que o tempo de decorrelação, então não podem ser diferenciadas no receptor e interferem-se entre si, levando a um desvanecimento suave (*flat fading*).

O desvanecimento também é caracterizado como Rayleigh ou Rician. Rayleigh é o resultado de uma soma vetorial de várias componentes do sinal, cada uma com seu valor de amplitude. O desvanecimento Raleigh exibe profundas quedas de sinal devido às interferências destrutivas.

Se há uma componente constante de sinal muito forte se somando aos múltiplos componentes aleatórios de desvanecimento Raleigh, então este passa a ser chamado Rician. O desvanecimento Rician é típico de situações com linha de visada, quando há um caminho direto sem obstruções entre as duas estações (móvel e rádio-base), assim como superfícies refletoras ou dispersoras.

A duração de processamento em um chip de *spread spectrum* é de  $1/1.2288\text{MHz} = 814$  ns, que representa 244 metros na velocidade da luz. Ou seja, diferenças de percursos múltiplos menores que esta distância levam ao desvanecimento suave. Maiores, levam à combinação da diversidade obtida no receptor.

Para analisar os reais efeitos do desvanecimento que aparecem na segunda situação, a resposta é um pouco mais complexa e diferente nos links direto e reverso (*forward and return links*). Também há uma dependência da taxa de desvanecimento, que depende da velocidade da estação móvel. Geralmente, o desvanecimento aumenta a relação sinal ruído média para uma determinada taxa de erros. O aumento pode chegar a 6 dB. No link reverso, o controle de potência reduz os efeitos do enfraquecimento do sinal à baixa velocidade. À alta velocidade, ele tem pouco efeito. Em ambos os links e à alta velocidade, a codificação e interpolação do FEC se torna mais efetiva à medida que o tempo de desvanecimento fica menor que o intervalo de interpolação.

## 5. Capacidade versus Cobertura

Na equação de capacidade do CDMA, observa-se o fato de que a potência requerida para transmissão pelas estações móveis tende ao infinito quando se aproxima ao pólo de capacidade. Como a potência requerida aumenta, os assinantes nas bordas de cobertura começam a ficar sem potência de transmissor, ou seja, eles serão solicitados a transmitir mais que a sua capacidade permite. A consequência prática desta característica é que a carga do sistema deve realmente ser controlada de tal forma que a área planejada de serviço nunca tenha falhas de cobertura por causa deste fenômeno.

Não se pode atingir máxima capacidade e máxima cobertura simultaneamente. É um compromisso de troca entre ambas variáveis.

### 5.1. Compromisso entre Capacidade e Cobertura no Link Reverso

Simple modelos de capacidade no link reverso mostram que a potência RF aumenta com a carga. Há um limite teórico, ou um pólo de capacidade, que é atingido quando todos os usuários estão transmitindo à potência infinita. A partir da capacidade do pólo, nenhuma estação móvel alcança sua SNR, independente da potência de transmissão.

Sistemas reais devem operar abaixo da capacidade do pólo, porque estações de assinante reais tem um limite superior para a sua potência de transmissão. Quando os usuários na fronteira de cobertura estão transmitindo à máxima potência, não se pode permitir o aumento da carga do sistema. Ou por outro lado, se o carregamento do sistema for liberado para crescer, então os usuários na fronteira não conseguirão mais manter o laço de controle de potência, e suas SNRs cairão abaixo do limite estabelecido. De fato, isto mostra porque a cobertura da célula diminui com seu carregamento.

Este fenômeno associa cobertura e capacidade. A capacidade do pólo de uma célula depende somente da SNR média desejada, do ganho de processamento, e do fator de atividade de voz. A área de cobertura de uma célula, quer dizer, a área na qual os usuários obtêm a SNR desejada, depende da carga referente à capacidade do pólo. Esta relação entre capacidade e área de cobertura é um fator fundamental na escolha de localizações das células. Para obter custo mínimo, deseja-se utilizar o número mínimo de sites. Células escassamente dispersas podem ser apropriadas para um sistema novo, ou uma localização com baixa densidade de assinantes. Porém, à medida que a densidade de carga aumenta, a densidade de células também deve ser aumentada. O espaçamento de células deve ser alto o bastante para que todos os usuários possam ser servidos dentro dos limites de projeto para a potência de transmissão. Na realidade, o carregamento da célula é uma variável aleatória, medida em densidade de Erlang. O Grau de Serviço (*Grade of Service*) só pode ser medido com um sentido estatístico. O projeto do sistema, assim como em sistemas telefônicos com fio, se torna um compromisso entre requerimentos competitivos de baixo custo e bom grau de serviço.

A análise detalhada da interação entre cobertura e capacidade de Erlang é uma pergunta complexa, envolvendo controle de potência, mudança suave de células (*soft handoff*), desvanecimento, mobilidade de assinantes, e outros fatores, como também as diferenças entre os links direto e reverso.

É conveniente rescrever a equação de capacidade em termos de um parâmetro de carga adimensional. Começando da equação de capacidade do link reverso.

$$\frac{E_b}{(N_0 + I_0)} = \frac{(W/R)}{(N_0 W/P_s) + Fv(N-1)} \quad (5.1)$$

onde:

$$\frac{E_b}{(N_0 + I_0)} = \text{SNR setpoint}$$

$$W = \text{Spreading bandwidth} = 1.2288 \text{ MHz}$$

$$R = \text{Data Rate} = 9.6 \text{ kbps or } 14.4 \text{ kbps}$$

$$W/R = \text{Processing gain}$$

$$= 21.1 \text{ dB for } 9.6 \text{ kbps rate set}$$

$$= 19.3 \text{ dB for } 14.4 \text{ kbps rate set}$$

$$F = \frac{\text{Total interference power}}{\text{Own-cell interference power}} \approx 1.6$$

$$v = \text{Voice activity factor} \approx 0.5$$

$$N = \text{Number of active users in this cell and sector}$$

A capacidade do pólo é a carga dada pela solução da equação (5.2), quando a potência da estação de usuário tende ao infinito.

$$N_{\text{pole}} = \frac{(W/R)}{\left(\frac{E_b}{(N_0 + I_0)}\right)_{\text{target}} \cdot F \cdot v} \quad (5.2)$$

A capacidade do pólo para  $E_b/N_0 = 6 \text{ dB}$  e o conjunto de taxas de 9.6 kbps é aproximadamente  $N_{\text{pole}} = 40$ .

A relação entre capacidade e potência toma uma forma particularmente simples com as substituições:

$$Z = \frac{\text{Potência adimensional}}{N_0 W + N P_s F v} = \frac{N_0 W}{N_0 W} \quad (5.3)$$

$$L \equiv \frac{\text{Carga adimensional}}{N/N_{\text{pole}}} \quad (5.4)$$

A equação de capacidade em termos destes parâmetros adimensionais se torna:

$$Z = \frac{1}{1-L} \quad (5.5)$$

Há duas observações importantes destas equações:

1. A capacidade do pólo só depende da  $E_b/N_0$  desejada, do ganho de processamento, do fator de atividade de voz e do fator de reuso de frequência efetivo  $F$ . Não depende da figura de ruído do receptor.
2. A figura de ruído configura a sensibilidade do receptor, e conseqüentemente a escala espacial do sistema. Não afeta a capacidade.

Esta análise negligencia os efeitos de controle de potência imperfeito e da dinâmica do sistema. Não seria prudente rodar um sistema muito próximo à capacidade do pólo, porque as flutuações de carga crescem em amplitude à medida que se aproxima do pólo. Excursões de carga afetarão adversamente o serviço dado aos assinantes marginais (na fronteira da célula) e, possivelmente, causarão falhas intermitentes no estabelecimento do laço (*loop*) de controle de potência e eliminação de quadros excessiva. Cargas de 50% a 75% ( $Z = 3$  a 6 dB) representam um compromisso apropriado entre capacidade e cobertura.

## 6. Controle de Potência

### 6.1. O Ambiente de Propagação Móvel

Um celular móvel pode estar em qualquer lugar dentro da célula, diretamente debaixo da torre da antena da ERB, bem como a 30 km de distância. Em um ambiente onde lei de propagação é  $R^{-4}$ , como é típico de áreas de serviço celulares, a faixa dinâmica total da perda por propagação está na ordem de 80 dB. Para um link típico em um sistema IS-95A, isto significa que o transmissor móvel tem que variar sua potência de aproximadamente 2,5 nW para 0,25 W [CDG].

Além da grosseira dependência de perda de propagação com a distância, a perda pode variar também rapidamente devido ao *Rayleigh multipath fading* induzido. *Multipath fading* acontece quando o sinal chega à antena receptora depois de atravessar rotas diferentes, de direções diferentes. Se a diferença de duração de caminho é pequena comparada a um processamento de espalhamento, ou aproximadamente 244 m, então os *wavelets* interferem de uma maneira estocástica, como resultante há um desvanecimento do processo por Rayleigh. Tal desvanecimento comumente causa flutuações de 20 a 30 dB acima de uma distância de um ou dois comprimentos de onda, 30 a 60 cm. Se o móvel está viajando a 90 km/h, então a taxa de desvanecimento pode exceder 100 Hz. Um enfraquecimento dessa ordem, apesar de comum em sistemas de banda estreita, é menos provável em sistemas CDMA devido à sua habilidade de separar os componentes de múltiplo percurso nos receptores Rake.

Outra consideração é que o processo de desvanecimento para transmissão e recepção, enquanto correlacionados, não é necessariamente idêntico devido à diferença de frequência de 45 MHz (celular) ou 80 MHz (PCS) entre as frequências do canal direto e reverso.

### 6.2. Controle de Potência no Link Reverso

#### 6.2.1. Controle em Loop Aberto

A larga faixa dinâmica é gerenciada por uma técnica de controle de potência em *loop* aberto. O móvel estima a perda de propagação até a célula, medindo o nível do sinal recebido. Tipicamente, esta medida está baseada em um AGC (controle de ganho automático) de voltagem analógico. O *loop* do receptor AGC tenta manter constante o nível quadrático do sinal de seus conversores analógico-digitais (A/D), quer dizer, a potência total que entra no filtro de banda passante de 1,25 MHz. Esta potência inclui tudo na entrada do receptor: sinal, ruído térmico e interferência. O nível de potência medido na entrada é ajustado por uma correção em loop fechado, e então utilizado para controlar a potência de transmissão do móvel conforme a equação (6.1), prescrita na interface aérea do celular:

$$R_x \text{ Power (dB)} + T_x \text{ Power (dB)} = -73 \text{ dB (mW}^2\text{)} \quad (6.1)$$

Note que esta é uma relação recíproca. À medida que a potência de recepção aumenta, a potência de transmissão diminui. O produto de ambas tem dimensões de  $\text{mWatts}^2$  e é numericamente igual à constante de retorno. Em unidades de dB relativo à  $(1 \text{ mW}^2)$ , a constante de retorno é -73. A constante de *turnaround* (retorno) especificada para PCS, a aproximadamente o dobro desta frequência, é -76 dB ( $\text{mW}^2$ ).

Assim, quando a potência recebida pelo móvel é, digamos, -90 dBm, como poderia estar em uma célula nominal, a potência de transmissão do móvel será +17 dBm. É interessante que uma estação

móvel CDMA, quando perto de uma ERB, estará de fato transmitindo menos potência do que está recebendo.

Os comandos de ajuste são transmitidos para o móvel nas mensagens de *overhead*. O comando é usado para ajustar o controle de potência em *loop* aberto para células de tamanhos diferentes e diversas sensibilidades de receptor.

Pode-se questionar porque usar a potência total de entrada para o controle em *loop* aberto. Porém, este compromisso (*tradeoff*) foi feito a favor de um tempo de resposta rápido. Realmente é verdade que a estimativa de *loop* aberto tem um erro de vários dB, mas isto é facilmente compensado pela correção em *loop* fechado. O problema também não poderia ser resolvido eliminando o controle de *loop* fechado e fazendo algo mais sofisticado por via de medidas do *loop* direto. A correção de *loop* fechado ainda seria necessária para lidar com as diferenças de perda devido à diferença de frequência.

### 6.2.2. Controle em Loop Fechado

O controle de potência em *loop* fechado é um tipo de refinamento na estimativa de potência do *loop* aberto. A célula mede os  $E_b/N_0$  recebidos e compara a um ponto fixo (que pode se ajustar dinamicamente, mas é uma função da célula). Se o  $E_b/N_0$  medido está acima do ponto fixo, então um comando de redução é enviado; se abaixo, um comando de aumento é enviado. O móvel ajusta sua potência para cima ou para baixo em aproximadamente 0,75 dB por comando. Não há um comando para manter o móvel na mesma potência. A decisão de fixar um valor de potência tem que ser transmitida em comandos alternados de redução/aumento. Os comandos são enviados uma vez a cada 1,25 ms, ou a uma taxa de 800 correções por segundo.

Este é um mecanismo de controle muito rápido (taxa de mudança de 800 dB por segundo), e provou trabalhar muito bem na prática [4, CDG]. Medidas dos erros de  $E_b/N_0$  em um amplo sistema experimental mostraram que os erros eram aproximadamente log-normais, com um desvio padrão de cerca de 2 dB. Poderia ser esperada uma distribuição log-normal dos erros devido ao fato que os ajustes são de valores discretos em unidades de dB.

O controle em *loop* fechado pode não ser veloz o bastante para se manter ativo em relação ao desvanecimento muito rápido. Nessas taxas de desvanecimento mais altas, a codificação e a interpolação são métodos mais efetivos. Ao contrário, em taxas de desvanecimento mais baixas, o controle de potência é extremamente robusto.

Os *bits* de controle de potência são enviados sem codificação e incluídos na transmissão do canal de tráfego direto em lugar de dois símbolos. O receptor, sabendo onde a inclusão está acontecendo, ajusta o decodificador métrico de Viterbi em zero para os símbolos incluídos, de tal forma que eles tenham efeito mínimo na taxa de erros de tráfego do link direto. Os dois símbolos são combinados coerentemente para fazer a decisão de controle de potência, ou caso contrário não processados.

A decisão de enviar os bits de controle de potência descodificados foi, como no *loop* aberto, um compromisso para obter uma resposta rápida. Qualquer codificação destes bits resultaria em um atraso de processamento e conseqüentemente em um *loop* mais lento.

A faixa dinâmica do *loop* de controle fechado é de  $\pm 24$  dB em relação à estimativa em *loop* aberto.

### 6.2.3. Soft Handoff

Durante o *handoff* suave é crucial que a potência de transmissão do móvel seja controlada pela célula que está recebendo o melhor sinal, de forma que seja transmitida a mínima potência necessária. Esta é uma exigência chave para que a capacidade máxima do sistema seja alcançada. Por isto, cada célula e setor que participam em um *soft handoff* fazem uma determinação separada do bit de controle de potência a ser enviado. O móvel os processa separadamente, e executa uma operação lógica “OU” entre os *bits* de redução. Quer dizer, se quaisquer dos participantes do *soft handoff* enviar um comando de redução, a estação móvel reduzirá a potência.

Uma variação especial é permitida nesta regra. Em algumas circunstâncias, os setores participantes do *soft handoff* podem ver suas decisões entre si e tomar uma decisão em comum, que ambos então transmitem. Este normalmente é o caso quando o *soft handoff* é entre setores de uma mesma célula. Neste caso, a estação móvel está informada que os *bits* de controle de potência são idênticos. Ela pode fazer uma combinação por diversidade e tomar uma decisão sobre um único bit, ao invés de separar as decisões e fazer um “OU” lógico.

### 6.3. Controle de Potência no Link Direto

As exigências no link direto são menos severas que as do link reverso. Enquanto a perda de propagação sofre as mesmas grandes variações devido ao enfraquecimento e sombras, outra interferência de usuário surge da mesma fonte, os sinais desejado e interferente tendem a enfraquecer juntos.

O mesmo não é verdade em relação à interferência de uma célula externa, porém, quando houver potencial para uma interferência prejudicial, já terá sido iniciado um *soft handoff*, de forma que exista um link direto alternativo.

O suporte ao controle de potência no link direto difere entre os padrões de interface celular e PCS. O IS-95A e a taxa fixa 1 do J-STD-008 especificam somente controle de potência direto baseado em mensagens. Quer dizer, quando a estação móvel conclui, por causa de taxa de erro de quadros excessiva, que sua qualidade de sinal direto é ruim, ela envia um relatório à estação base. Este método é relativamente lento, sofrendo impacto do atraso de processamento da análise da mensagem pela estação base. A taxa fixa 2, o conjunto de 14.400 bps, incorpora um mecanismo de controle de potência direta rápido. Cada quadro de tráfego reverso incorpora um bit que informa a taxa de sobreposição de quadros com um leve atraso de processamento de dois quadros. Isto permite um controle de potência mais rápido, e conseqüentemente apurado.

## 7. Handoff

*Handoff* é o processo de transferir uma estação móvel (MS) de uma estação rádio-base (ERB) para outra ou de um canal para outro. A mudança de canal devido ao *handoff* pode ser através de um slot de tempo, de uma banda de frequência, de uma palavra código, ou de uma combinação deles, dependendo da técnica de múltiplo acesso utilizada [Tripathi].

A implementação de *handoff* é radicalmente diferente entre os padrões de *narrowband* (banda estreita) e os padrões de CDMA.

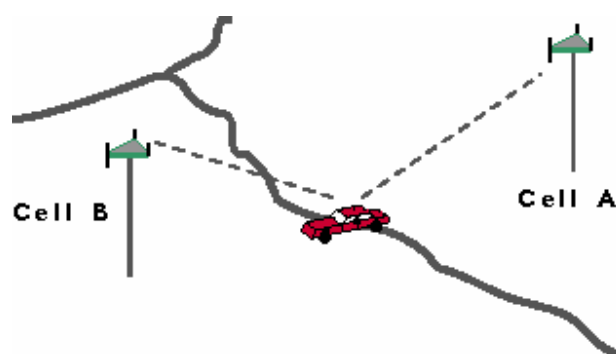


Figura 7.1. Processo de *Handoff*

*Handoffs* AMPS freqüentemente falham e causam chamadas derrubadas. Isto contribui para uma percepção de baixa qualidade de serviço. Além disso, cada *handoff* é precedido e é seguido por longos intervalos com baixa qualidade de link, resultando em um ruído aborrecedor e distorção. Através de comparação, CDMA é projetado especificamente não só para reduzir fracassos de *handoff*, mas também prover um serviço contínuo, mantendo boa qualidade de voz antes, durante e depois do *handoff*.

### 7.1. Taxa de *Handoff*

O número de células transitadas durante uma chamada pode ser grosseiramente estimado com as seguintes hipóteses:

- As células são circulares com raio uniforme  $R$ ;
- A trajetória de uma MS é um linha reta;
- A MS entre em cada célula numa localização aleatória em sua periferia, com uma direção aleatória entre  $\pm 90$  graus da radial.

Assumindo isso, o caminho médio percorrido numa célula é de aproximadamente  $\pi R/2$ . O número de células transitadas durante uma chamada com duração  $T$  e uma velocidade  $v$  pode então ser estimado por  $0,65vT/R$ . Alguns exemplos para chamadas com duração de 3 minutos são apresentados na tabela 7.1.

Tabela 7.1. Estimativa do número de *Handoffs* para chamadas de 3 minutos de duração

Caso	Velocidade (km/h)	Raio da Célula (km)	<i>Handoffs</i>
Estrada, área rural	100	16	0,20
Estrada, área urbana	80	1,6	1,63
Ruas, área urbana	60	1	1,95
Pedestres, área urbana	2	1	0,07
Pedestres, microcélula	2	0.1	0,65

Percebe-se que o número de *handoffs* pode variar o suficiente para comprometer a performance do sistema. Os raios das células em um sistema CDMA podem ser consideravelmente maiores do que em um sistema AMPS para qualquer distribuição de carga particular. Isto reduz a taxa de *handoff* simplesmente com base na geometria, independente das muitas outras vantagens de desempenho associadas ao CDMA.

## 7.2. Passos em um Processo de Handoff

Independente da tecnologia utilizada, os passos seguintes são parte do *handoff* de qualquer célula.

1. Começando em um ponto em que somente uma célula suporta a chamada em questão.
2. Determinam-se as condições do link aéreo (*over-the-air link*) entre a MS e a célula em que o serviço está se deteriorando e de uma nova célula candidata, com link potencialmente melhor.
3. Informa-se à célula candidata sobre o *handoff* iminente, incluindo parâmetros necessários para identificar a MS e executar o *handoff*.
4. Sinaliza-se ao móvel para iniciar a execução do *handoff*.
5. A nova célula inicia o serviço para a MS.
6. A MS inicia a utilizar a nova célula.
7. Entrando no estágio intermediário de *handoff* (prolongado no CDMA)
8. A MS descontinua o serviço na célula antiga.
9. A célula antiga suspende o serviço para aquela estação móvel.
10. Terminando em um ponto em que somente uma célula suporta a chamada em questão.

As mudanças em redes reais são muito mais complexas, mas esses são os principais eventos. Alguns passos requerem atividades diferentes no AMPS e no CDMA. Por exemplo, os *handoffs* CDMA não requerem sintonização de frequência normalmente, ao invés disso, eles requerem mudança do canal de código no Canal Direto. Entretanto, nenhuma sintonização de frequência ou canal de código é requerida no Canal Reverso em qualquer momento.

## 7.3. Handoff no CDMA

A forma como o processo de *handoff* é executado no CDMA tem características particulares.

1. O processo é suave, ou seja, a comunicação não é interrompida durante o processo.
2. A desconexão da célula anterior não é feita abruptamente, mas há um estágio prolongado, durante o qual há comunicação entre duas ou mais ERBs. A diversidade por comunicação em vários caminhos aumenta a performance durante o *handoff*. O ganho de diversidade compensa parcialmente a perda de propagação na fronteira da célula.
3. A medida de sinal que dispara o processo de *handoff* é realizada pelas estações móveis, ao invés das ERBs.

4. Não há uma fronteira de

### 7.3.4. Softer Handoff

Se os participantes em um *soft handoff* são setores de uma mesma célula, a estação permite que a combinação seja feita por um modem CDMA que veja os múltiplos setores. Tal combinação pode ser feita símbolo a símbolo, ao invés da seleção de quadros inteiros.

Da mesma forma, um modem comum, que sirva a todos os setores de um *handoff*, é capaz de enviar bits de controle de potência idênticos em todos os setores. Isto é permitido para interfaces aéreas. A mensagem de direção de *handoff* que inicia o processo contém um campo que mostra quais estações estão transmitindo os mesmos bits de controle, tal que o móvel possa fazer uma combinação pré-decisória destes bits.

Para a MS, um *softer handoff* é idêntico ao *soft handoff*, exceto pelo tratamento dos bits de controle de potência.

### 7.3.5. O gatilho de um Soft Handoff

O CDMA utiliza o *Handoff* Assistido pelo Móvel (*Mobile Assisted Handoff* - MAHO). Na prática, isto significa que a estação móvel procura continuamente por um código-piloto, utilizando um correlador PN especialmente projetado com esse objetivo. A universalidade do código-piloto (*Short Code*) facilita a busca. Todas as ERBs utilizam o mesmo código. A MS pode procurar no tempo sem ter que mudar a seqüência PN.

Se o móvel já tem uma noção do tempo do sistema CDMA, como ele faz se já estiver envolvido em uma chamada, então ele pode fornecer o tempo relativo de uma novo código piloto detectado. O que distingue as estações base uma da outra é a fase de seus códigos-pilotos. O período de cada piloto é 26,667 ms. Eles são separados por no mínimo 64 *chips*, que representam aproximadamente 52 ms. A temporização do móvel será normalmente suficiente para que um *offset* piloto informado identifique sem ambigüidade a ERB que ele detectou.

As MS informam os códigos-pilotos com base na taxa piloto/interferência (PIR). A PIR, chamada  $E_c/I_0$ , é comparada a um nível absoluto para determinar quando ela deve ser informada como uma candidata ao handoff. Este nível é um parâmetro que as MS obtêm em mensagens de *overhead* transmitidas pelas ERBs. Quando um piloto ultrapassa o primeiro nível, então sua presença é comunicada para a rede através de uma mensagem. A rede irá adicionar aquela ERB ao conjunto ativo, ou seja, ao conjunto de estações participantes no *soft handoff* para a MS em questão.

O segundo nível é relativo, não mais absoluto. Ele é comparado com a diferença entre o maior PIR no conjunto ativo e os PIRs de todos os outros membros. Quando qualquer deles cair abaixo deste nível, então uma mensagem de exclusão é transmitida, e a ERB em questão é excluída do conjunto ativo. O móvel será informado através de uma mensagem de sinalização.

O efeito de dois níveis, um absoluto e outro relativo, é assegurar que qualquer estação, que possa contribuir de forma significativa para a relação sinal/ruído (SNR) total após a combinação por diversidade, esteja no conjunto ativo com alta probabilidade. Da mesma forma, uma ERB só será excluída quando se deteriorar muito abaixo da melhor ERB.

Muitos *handoffs* reduzem a capacidade do sistema por causa do excessivo número de canais de tráfego direto necessários para suportá-los. Isso também gera um impacto no número de elementos de canal (modems CDMA) necessários nas ERBs.

A interface aérea do CDMA, para permitir um balanceamento dos recursos da rede, inclui a possibilidade de reinicializar os quadros de tráfego com a hora do sistema. Estas reinicializações de temporizador são acompanhados por um *hard handoff*.

## 8. Forward CDMA Channel

O canal direto permite a comunicação na direção da célula para o móvel. Ele carrega o tráfego, um sinal piloto, e informação de *overhead*. O piloto é espalhado, mas não-modulado. Os canais piloto e *overhead* estabelecem a temporização do sistema e a identidade da ERB. O canal piloto também é usado no processo de *handoff* auxiliado pelo móvel (MAHO – *Mobile Assisted Handoff*) como uma referência da força do sinal.

### 8.1. Parâmetros de Transmissão

O link direto IS-95A atualmente suporta a família de taxas de dados de 9.600 bps em 4 tipos de canais de dados, como apresentado na tabela 8.1. Em todos os casos, a taxa do código de correção de erros de quadro (FEC) é  $\frac{1}{2}$  e a taxa PN é  $1,2288 \text{ MHz} = 128 \cdot 9600 \text{ bps}$ .

Tabela 8.1. Conjunto de Dados 1 para Parâmetros do Canal Direto

Canal	Sync	Paging		Traffic			
Taxa de dados (bps)	1200	4800	9600	1200	2400	4800	9600
Repetição de Dados	2	2	1	8	4	2	1
Taxa de Modulação de Símbolos (sps)	4800	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200
Símbolo PN chips/modulação	256	64	64	64	64	64	64
PN chips/bit	1024	256	128	1024	512	256	128

O padrão J-STD-008 suporta, além das taxas acima, uma segunda família de taxas de dados com a máxima taxa de 14.400 bps. A taxa de código FEC é de  $\frac{3}{4}$ .

Tabela 8.2. Conjunto de Dados 2 para Parâmetros do Canal Direto

Canal	Traffic			
Taxa de dados (bps)	1800	3600	7200	14400
Repetição de Dados	8	4	2	1
Taxa de Modulação de Símbolos (sps)	19.200	19.200	19.200	19.200
Símbolo PN chips/modulação	64	64	64	64
PN chips/bit	682,67	341,33	170,67	85,33

### 8.2. Estrutura do Sinal

#### 8.2.1. Canalização

O link direto consiste em até 64 canais lógicos (canais de código). Os canais são independentes de tal forma que carregam diferentes conjuntos de dados, possivelmente a diferentes taxas de dados, e são ajustáveis independentemente em amplitude.

#### 8.2.2. Codificação e Interpolação

A figura 8.1 apresenta o processamento principal que gera um canal de código direto, para a taxa de dados 1. A taxa 2 é idêntica, exceto pela taxa de codificação de  $\frac{3}{4}$  ao invés de  $\frac{1}{2}$ , levando à mesma taxa de codificação de símbolos com 1,5 vezes a taxa de dados.

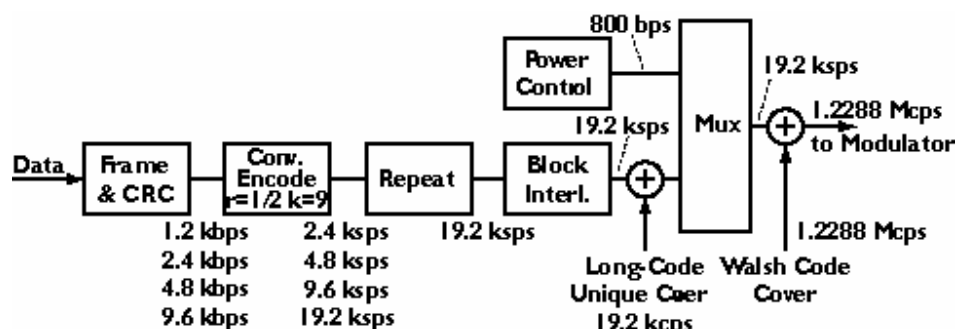


Figura 8.1. Codificação para a taxa de 9.600 bps

### 8.2.3. Códigos de Walsh

Os canais de código transmitidos são matematicamente ortogonais. A ortogonalidade é estabelecida pela máscara dos símbolos de código FEC com uma de um conjunto de 64 funções de Walsh. Quando a correlação cruzada é muito pequena (idealmente zero), os canais são mutuamente ortogonais. Uma vez que, em cada símbolo de código, somente ocorrem períodos completos de funções de Walsh, o efeito da máscara de Walsh torna os canais completamente separados no receptor, ao menos na ausência de multi-percurso. A ortogonalidade não significa somente que não há inter-relacionamento entre os canais, mas que não há interferência entre usuários da mesma célula, também na ausência de multi-percurso. Isto tem um substancial efeito benéfico na capacidade do link direto.

O atraso de espalhamento multi-percurso que excede um *chip* introduz interferência mútua entre usuários em uma célula. Em qualquer entrada particular de um receptor Rake, os canais sem correlação contribuem num nível de interferência efetivo. Este nível varia de zero, quando há somente uma componente multi-percurso, até  $(N-1)/N$  do total de potência do sinal se existem  $N$  componentes discretas de multi-percurso com amplitudes iguais.

Nota-se que uma das funções de Walsh é sempre uma constante, código número zero, por convenção. Este canal é reservado para servir como piloto.

### 8.2.4. Espalhamento

Cada canal de código direto é espalhado por um código curto (*Short Code*), que tem as componentes  $I$  e  $Q$ . Portanto, o espalhamento é em quadratura.

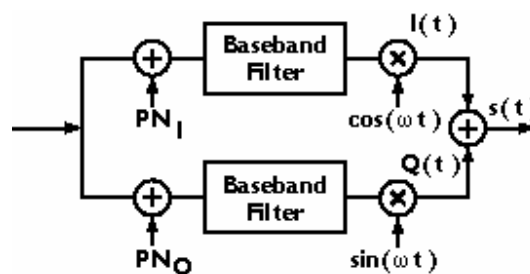


Figura 8.2. Receptor

### 8.2.5. Modulação

As duas seqüências codificadas, mascaradas e espalhadas são moduladas vetorialmente na portadora RF. A modulação de espalhamento é portanto QPSK, sobreposta a uma seqüência de símbolos BPSK.

A forma de espectro do link direto é cuidadosamente descrita na interface aérea IS-95A e na especificação de performance IS-97. Uma medida da correlação entre a saída do transmissor real e a saída do transmissor ideal. A interface aérea também especifica uma característica de fase ligeiramente não-linear.

## 8.3. Canais de Overhead

Existem 3 tipos de canais de *overhead* no link direto: o piloto, o *sync* e o *paging*. O canal piloto é requerido em todas as estações.

### 8.3.1. Pilot Channel

A canal piloto é sempre o canal de código zero. Ele serve como uma referência de demodulação para os receptores móveis e para as medidas de nível de *handoff*. Logo, deve estar presente em todas as estações. Ele não carrega nenhuma informação, é puro *short code*, sem nenhuma máscara de transmissão.

A amplitude do piloto e sua distribuição espacial devem ser controlados cuidadosamente, porque suas amplitudes relativas controlam as fronteiras de *handoff* entre as estações. As seqüências modificadas  $PN_I$  e  $PN_Q$  do LFSR (*Linear Feedback Shift Register*), que abrange o *short code*, tem período  $2^{15}$  *chips*, que é  $80/3 = 26,667$  ms à taxa de *chips* de 1.2288 MHz.

Todas as estações usam o mesmo *short code* e, logo, tem a mesma forma de onda piloto. Elas são distinguidas uma da outra somente pela fase do piloto. O curto período de um *short code*,  $2^{15}$ , facilita rápidas buscas do piloto pelos móveis.

A interface aérea estipula que as fases dos pilotos devem sempre ser designadas à estações em múltiplos de 64 *chips*, dando um total de  $2^{15-6} = 512$  designações possíveis. O número de 9 bits que identifica a fase designada para o piloto é chamado de *Pilot Offset*.

### 8.3.2. Sync Channel

O canal de sincronismo carrega uma mensagem que se repete, identificando a estação, e a fase absoluta da seqüência piloto. A taxa de dados é sempre 1.200 bps. O período de *interleave* é  $80/3 = 26,667$  ms, igual ao período do *short code*. Isso simplifica o processo de encontrar as fronteiras do quadro, uma vez que o móvel tenha encontrado o piloto.

A repetitiva mensagem carregada pelo *sync* transporta a temporização e a informação de configuração do sistema para a unidade móvel. O móvel pode derivar com precisão o tempo do sistema através da sincronização do *short code* para uma fração do *spreading chip* (833 ns). A ambigüidade do período do código é então resolvida pelo estado do código longo (*long code*) e os campos de tempo do sistema, que também fazem parte da mensagem de sincronismo.

### 8.3.3. Paging Channel

O canal de *paging* é o veículo para a comunicação com as estações móveis quando elas não estão designadas a um canal de tráfego. Seu objetivo primário é transmitir avisos, ou seja, notificações de chamadas chegando para o móvel. Ele carrega as respostas aos acessos da estação móvel, tanto respostas de chamadas quanto originações não solicitadas. Acessos com sucesso são normalmente seguidos por uma designação a um canal de tráfego dedicado. Uma vez em um canal de tráfego, a sinalização de tráfego entre a base e o móvel pode continuar intercalada com o tráfego de usuário.

O canal de *paging* pode rodar a 4.800 ou 9.600 bps.

Cada ERB deve ter ao menos um canal de *paging* por setor, em ao menos uma das frequências em uso. Todo o *paging* pode ser feito em uma frequência, ou pode ser distribuída sobre múltiplas frequências.

### 8.4. Traffic Channel

Os canais de tráfego são designados dinamicamente, em resposta a acessos a estações móveis. A estação móvel é informada, através de uma mensagem do canal de *paging*, de qual o canal de código em que deve receber.

O canal de tráfego sempre transporta os dados em quadros de 20 ms. Os quadros incluem códigos CRC (*Cyclic Redundance Checking*) para ajudar a avaliação da qualidade de quadro no receptor.

#### 8.4.1. Soft Handoff

Durante o *soft handoff*, cada ERB participante no *handoff* transmite o mesmo tráfego através do seu canal de código designado. As designações de canal de código são independentes e, em geral, são diferentes em cada célula. Qualquer canal de código que não esteja em uso por canais de *overhead* são disponíveis, até um total de 64 ou o limite de equipamento disponível, o que for menor.

#### 8.4.2. Taxa de Transmissão

Canais de tráfego suportam taxas de tráfego de quadros variáveis: 1, 1/2, 1/4 ou 1/8 da taxa máxima. No padrão IS-95A, somente a família de taxas baseadas em 9.600 bps está disponível. A Taxa de Dados 2, baseada em 14.400 bps, será implementada em uma futura revisão da IS-95.

A variação da taxa é realizada pela repetição dos símbolos de código em 1, 2, 4 e 8 formas. A transmissão é contínua, com a amplitude reduzida nas taxas menores, de forma a manter a energia por bit aproximadamente constante, independente da taxa utilizada. A taxa é variável independentemente em cada quadro de 20 ms.

#### 8.4.3. Subcanal de Controle de Potência

O subcanal do link reverso de 800 bps de controle de potência é transportado no canal de tráfego pela inserção de 2 a cada 24 símbolos transmitidos. Os símbolos inseridos carregam o mesmo bit de controle de potência, por isso podem ser combinados coerentemente no receptor. Cada ERB participando em um *soft handoff* toma sua própria decisão de controle de potência, independente das outras, a não ser que sejam diferentes setores de uma mesma célula, no caso em que todos transmitem a mesma decisão. Esta circunstância especial é avisada ao móvel quando o *handoff* é configurado.

## 9. Reverse CDMA Channel

O canal CDMA reverso estabelece a comunicação na direção do móvel para a célula. Ele transporta tráfego e sinalização. Qualquer canal reverso particular só se encontra ativo durante chamadas à ERB associada, ou quando está havendo sinalização do canal de acesso à ERB associada.

### 9.1. Parâmetros de Transmissão

O padrão IS-95A do canal reverso atualmente suporta a família de taxas baseadas em 9.600 bps nos canais de acesso e tráfego, como apresentado na tabela 9.1. O ciclo de serviço (*duty cycle*) de transmissão varia de acordo com a taxa de dados. Em todos os casos, a taxa de código FEC é 1/3, a taxa de símbolos de código é sempre 28.800 símbolos por segundo depois que haja 6 símbolos de código por símbolo de modulação, e a taxa PN é 1,2288 MHz. A modulação é ortogonal 64-ária, usando as mesmas funções de Walsh que são utilizadas na canalização do link *forward*. Cada período da função de Walsh é repetido para 4 *chips* do código PN. A taxa de símbolos Walsh é então  $1,2288 \text{ MHz} / (4 \text{ chips por Walsh chip}) / (64 \text{ Walsh chips por símbolo Walsh}) = 4.800$  símbolos de modulação por segundo.

Tabela 9.1. Parâmetros do Canal Reverso para o conjunto de taxas 1

Canal	Access	Traffic			
		1.200	2.400	4.800	9.600
Taxa de dados (bps)	4.800	1.200	2.400	4.800	9.600
Taxa de código	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Taxa de símbolos antes da repetição (sps)	14.400	3.600	7.200	14.400	28.800
Repetição de símbolos	2	8	4	2	1
Taxa de símbolos após repetição (sps)	28.800	28.800	28.800	28.800	28.800
Duty Cycle de transmissão	1	1/8	1/4	1/2	1
Símbolos de código/Símbolos de modulação	6	6	6	6	6
PN Chips/Símbolo de modulação	256	256	256	256	256
PN chips transmitidos/bit	256	128	128	128	128

J-STD-008 suporta, além disso, uma segunda família de taxas de canal de tráfego baseadas em 14.400 bps. Este conjunto de taxas de dados 2 utiliza um código de 1/2 em lugar de 1/3 da taxa de dados 1.

Tabela 9.2. Parâmetros do Canal Reverso para o conjunto de taxas 1

Canal	Access	Traffic		
		3.600	7.200	14.400
Taxa de dados (bps)	1.800	3.600	7.200	14.400
Taxa de código	1/2	1/2	1/2	1/2
Taxa de símbolos antes da repetição (sps)	3.600	7.200	14.400	28.800
Repetição de símbolos	8	4	2	1
Taxa de símbolos após repetição (sps)	28.800	28.800	28.800	28.800
Duty Cycle de transmissão	1/8	1/4	1/2	1
Símbolos de código/Símbolos de modulação	6	6	6	6
PN Chips/Símbolo de modulação	256	256	256	256
PN chips transmitidos/bit	256/3	256/3	256/3	256/3

## 9.2. Estrutura do Sinal

### 9.2.1. Canalização

O canal reverso consiste de  $2^{42}-1$  canais lógicos. Um desses canais lógicos é permanente e unicamente associado a cada unidade móvel. Este canal lógico é usado pelo móvel sempre que ele passa por tráfego. O canal não muda em condições de *handoff*. Outros canais lógicos são associados com estações base para acesso do sistema. O endereçamento do link reverso é feito através da manipulação do código longo (*long code*) de período  $2^{42}-1$ , que é parte do processo de espalhamento.

### 9.2.3. Codificação e Interpolação

A figura 9.1 mostra o processamento central que gera um canal CDMA reverso.

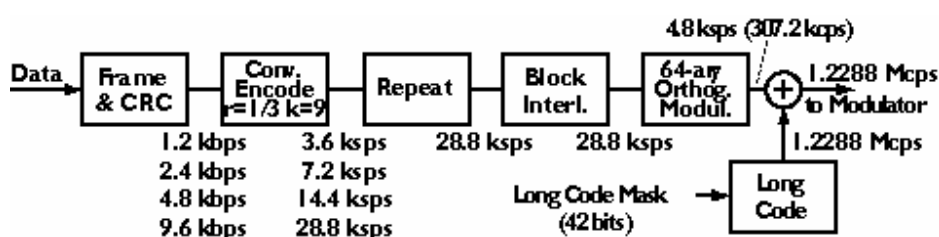


Figura 9.1. Geração do sinal de um canal CDMA reverso

### 9.2.4. Separação de Usuários

O canal reverso, ao contrário do canal direto, não utiliza ortogonalidade estrita de nenhuma forma para separar canais lógicos. Ao invés disso, usa um código de espalhamento de período muito longo em fases distintas. As correlações entre as unidades móveis não são zero, mas são suficientemente pequenas.

### 9.2.5. Modulação Ortogonal

A modulação de dados no link reverso é ortogonal 64-ária, e é aplicada antes do espalhamento. Grupos de 6 símbolos de código selecionam uma de 64 seqüências ortogonais. As seqüências ortogonais são as mesmas funções de Walsh que são usadas no canal *forward*, com uma finalidade totalmente diferente. Cada período da seqüência Walsh (um *Walsh Chip*) tem duração de 4 PN *chips*. A taxa de modulação de símbolos é, portanto, sempre 4.800 sps.

### 9.2.6. Spreading

Cada canal reverso é espalhado por um único *long code* do canal e pelo *short code*, que tem componentes I e Q. O espalhamento é assim realizado em quadratura. Ou seja, de uma simples seqüência de símbolos binários são geradas 2 seqüências binárias pela adição em “OU Exclusivo” das seqüências PN de *short code* (figura 9.2). O efeito de adicionar os códigos longo e curto é produzir uma superseqüência que tem um período extraordinariamente longo, aproximadamente  $2^{57}$ , ou 3700 anos a uma taxa de espalhamento de 1,2288 MHz .

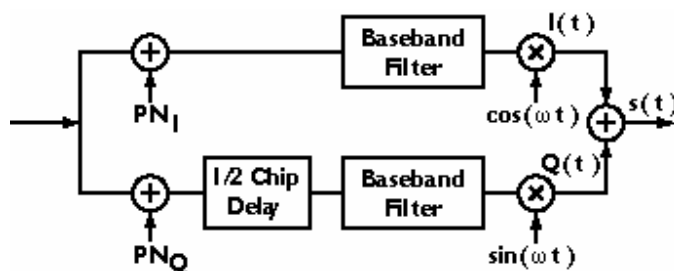


Figura 9.2. Modulação no Canal Reverso

### 9.2.7. Modulação RF

As duas seqüências de espalhamento codificadas e formatadas são moduladas vetorialmente na portadora de RF. A modulação no eixo Q é atrasada por  $\frac{1}{2}$  chip. A modulação de espalhamento é portanto *Offset QPSK*. Esta modulação foi escolhida num esforço para reduzir a modulação do envelope do sinal de RF e diminuir os requerimentos de performance nos amplificadores de potência na estação de assinante.

O modelamento do espectro no link reverso é cuidadosamente prescrito na interface aérea do IS-95A e na especificação de performance do IS-98. No IS-98, é uma medida da correlação entre a saída do transmissor real com a saída do transmissor ideal. A interface aérea também especifica uma ligeira característica de fase não-linear, a finalidade disso é uma pré-equalização parcial no receptor móvel.

O *ripple* (ondulação) na banda é especificado como menor que  $\pm 1,5$  dB. A rejeição fora de banda é de 40 dB, começando em 740 kHz do centro da banda. Sugere-se a utilização de um filtro FIR (*finite impulse response*) de banda básica com 48 taps e *ripple* equilibrado, apesar de não ser necessário [4, CDG].

### 9.3. Access Channel

Só há um tipo de canal de *overhead* no link reverso CDMA: o Canal de Acesso.

O canal de acesso é o veículo para a comunicação com as unidades móveis quando estas não estão designadas a um canal de tráfego. Sua finalidade principal é servir para originar serviço e respostas de *paging* pela estação móvel. Acessos com sucesso são normalmente seguidos pela designação de um canal de tráfego. Uma vez em um canal de tráfego, a sinalização de tráfego entre a ERB e o móvel pode continuar intercalada com o tráfego de usuário.

O canal de acesso sempre funciona a 4.800 bps.

Cada ERB deve servir ao menos um canal de acesso, em ao menos uma das frequências em uso. A máscara de *long code* para o canal de acesso se deriva da identidade da unidade, do número do canal de *paging* com o qual o canal de acesso está associado, e do número do canal de acesso dentro daquela ERB.

#### **9.4. Traffic Channel**

O canal de tráfego no link reverso é único para o móvel. Ou seja, cada unidade tem uma única *long code mask*, baseada em seu ESN (*electronic serial number*). Sempre que um canal de tráfego é designado para o móvel, ele utiliza sua máscara específica.

O canal de tráfego sempre transporta dados em quadros de 20 ms, incluindo CRC para ajudar a assegurar a qualidade de quadros no receptor.

##### **9.4.1. Soft Handoff**

Durante o *soft handoff*, a unidade móvel transmite a mesma informação que transmitiria na ausência do *handoff*, ou seja, não há mudanças no conteúdo das transmissões do móvel. Há uma mudança na forma com que o controle de potência é aplicado no link reverso. Comandos de redução do controle de potência de todos os participantes no *handoff* são logicamente ordenados juntos e, se qualquer dos participantes enviar um comando de redução, então a MS reduz sua potência de transmissão.

##### **9.4.2. Taxa de Transmissão**

A variação da taxa de dados é feita pela variação do *duty cycle* de transmissão de acordo com os planos de 1, 1/2, 1/4 e 1/8, conforme for solicitado pela fonte de dados. A transmissão sempre ocorre em segmentos de 1,25 ms. Os segmentos que são realmente transmitidos são selecionados pseudo-aleatoriamente, usando um seqüência decimada de *long code*.

#### **9.5. Temporização**

As MSs sempre são solicitadas a ajustar seu tempo de transmissão de acordo com a temporização que elas podem calcular dos canais piloto e de sincronismo, e ajustada pelo *offset* piloto da ERB conhecida. Assim, o índice do *offset* piloto lido do canal de sincronismo deve ser usado para corrigir a temporização de transmissão, tal que o sinal do canal reverso chegue à ERB alinhado em tempo com o tempo do sistema, para um ciclo completo do atraso de propagação na interface aérea.

## 10. Conclusão

Para atender às necessidades das operadoras e seus assinantes, há um número de objetivos que devem ser alcançados com a migração dos sistemas analógicos para digitais. Verificou-se, por exemplo pelo Grupo de Infra-estrutura Celular da Motorola, que o IS-54 TDMA era muito limitado para atingir requerimentos de uma nova geração de sistemas celulares. Apesar de apresentar um aumento de capacidade em 3 vezes, ele não pareceu atender às especificações de qualidade de voz, novos serviços e ampliação de capacidade no futuro.

As características técnicas de qualidade e capacidade do IS-95 CDMA se traduziram em uma comunicação extremamente confiável, de boa relação custo/benefício para ser competitiva e lucrativa no futuro das comunicações sem fio, trazendo vantagens econômicas qualitativas para as operadoras e assinantes.

### 10.1. O CDMA para Sistemas Celulares

Quando implementado em sistemas telefônicos celulares, a tecnologia CDMA oferece numerosos benefícios para a operadora e seus assinantes:

- Aumento de capacidade de 8 a 10 vezes o de um sistema AMPS e de 4 a 5 vezes do sistema GSM.
- Qualidade de chamada melhorada: CDMA fornece um sinal melhor e mais consistente, trazendo maior qualidade de voz e chamadas do que as outras tecnologias.
- Projeto simplificado de sistema: não é mais necessário fazer um planejamento de frequências detalhado como em sistemas analógicos e TDMA.
- Privacidade avançada: dada à baixa probabilidade de interceptação e à codificação do sinal CDMA.
- Maior tempo de conversação e *standby* para telefones portáteis: permitido pelo preciso controle de potência e outras características do sinal, assim a unidade móvel pode transmitir a frações inferiores aos sistemas AMPS e TDMA.
- Características avançadas: vocoders múltiplos de alta qualidade, SMS (serviço de mensagens curtas), ativação do móvel pelo ar, *sleep mode*, dados/fax.

### 10.2. CDMA para Personal Communications Services (PCS)

Os serviços de comunicação pessoal (PCS) são uma tentativa de antecipar os sistemas de comunicação sem fio do futuro, através dos quais pessoas podem se comunicar com quem, quando e aonde queiram.

O CDMA é uma excelente solução para PCS, pois oferece alta capacidade e maior faixa de cobertura. Requerendo menos células que os outros tradicionais sistemas, o CDMA também é visto como a solução mais efetiva em custo para esta tecnologia.

Desde a ampliada eficiência espectral à aprimorada qualidade de chamada e flexibilidade de características, o CDMA oferece benefícios chave para as operadoras PCS *wireless*, alguns que são especialmente relevantes:

- Capacidade aumentada: ao longo do tempo, operadoras que fornecem maior capacidade dentro do mesmo espectro terão menores despesas operacionais.

- Qualidade de áudio: o CDMA tem um número de características únicas que fornecem uma robusta transmissão RF, assegurando também melhor performance em relação a chamadas derrubadas.
- Flexibilidade de Vocoders: vocoders diferentes podem ser usados para diferenciação de produto e serviço.
- Menor bloqueio: a capacidade no CDMA é flexível, e tem um limite suave. Como resultado, a taxa de bloqueio é reduzida uma vez que a capacidade pode crescer em resposta à demanda.
- Cobertura ampliada: redução do número de células necessárias para a mesma cobertura em comparação com outras interfaces aéreas, preservando a mesma qualidade de áudio.
- Baixa custo de implantação: com uma larga vantagem na margem do link (por volta de 5 dB), um sistema CDMA requer aproximadamente metade do número de células para a mesma cobertura e carga do sistema. Essa eficiência diminui os custos de aquisição de equipamentos e sites, e é especificamente efetiva para novas implantações.

### **10.3. CDMA para Wireless Local Loop (WLL)**

Em muitos países em desenvolvimento, há uma grande demanda por novos serviços telefônicos residenciais e comerciais. Cada vez mais operadoras buscam tecnologias sem fio para rapidamente fornecer milhares de novas linhas com alta qualidade e preço razoável.

Os benefícios do CDMA fazem dele uma excelente tecnologia a ser escolhida pelas companhias de telefonia fixa. Num ambiente de telefonia fixo, estima-se que o CDMA pode fornecer de 15 a 20 vezes a capacidade de um sistema AMPS, resultando na maior capacidade por célula oferecida para aplicações WLL [Motorola]. Assinantes em um sistema fixo requerem menos potência RF para atender a qualidade necessária, portanto mais assinantes podem ser incluídos em um canal de código.

Além disso, o CDMA otimiza o uso do espectro de rádio, o qual é um recurso progressivamente escasso a nível mundial. A capacidade de reuso simples de freqüências e possibilidade de bandas descontínuas, além de sua faixa ampliada de cobertura, simplifica o projeto de RF e implantação. Isso permite às operadoras investir em menos sites com instalação mais rápida, diminuindo o tempo de retorno do investimento.

## Bibliografia

[RNT] RNT, ano 18 – no. 208 A – Dezembro/1996 – ISSN 0102-3446

[Motorola] “CDMA Technology & Benefits. An Introduction to the Benefits of CDMA for Wireless Telephony.” Motorola, Inc. – Cellular Infrastructure Group – Abstract Version 1.3 – Março/1996

[Dino] “CDMA, Introdução, Projeto, Comunicações Wireless” – Adriana Gonçalves B. de F. Dino – Tese de Mestrado – Junho/1997

[CDG] [www.cdg.org](http://www.cdg.org)

[Tripathi] “Handoff in Cellular Systems” – Tripathi, Reed & Van Landingham – IEEE Personal Communications, The Magazine of Nomadic Communications and Computing – vol. 5 no. 6 – Dezembro/98

[Lee] “Overview of Cellular CDMA” – Lee, William C. Y. – Transactions on Vehicular Technology, vol. 40, no. 2 – Maio/1991

[Viterbi] “CDMA, Principles of Spread Spectrum Communication” – Viterbi, Andrew J. – Addison-Wesley Publishing Company – Junho/1995

[Dinan] “Spreading Codes or Direct Sequence CDMA and Wideband CDMA Cellular Networks” – Dinan, Esmael H. e Jabbari, Bijan – IEEE Communications Magazine – vol. 36 no. 9 – Setembro/1998