

## Capítulo 4

### Técnicas de Acesso Múltiplo para Comunicações *Wireless*

Técnicas de acesso múltiplo são utilizadas para permitir a múltiplos usuários dividirem simultaneamente uma porção finita do espectro de rádio, resultando em alta capacidade para o sistema celular.

A alocação da banda disponível a múltiplos usuários precisa ser realizada sem degradar severamente o desempenho do sistema.

Técnicas de acesso múltiplo constituem a base para as redes de comunicações *wired* e *wireless* presentes e futuras, tais como redes de satélites, redes de comunicações móveis e celulares.

A Figura 4.1 mostra um sistema de acesso múltiplo em que um grande número de usuários divide um canal de comunicações comum para transmitir informação a um receptor.

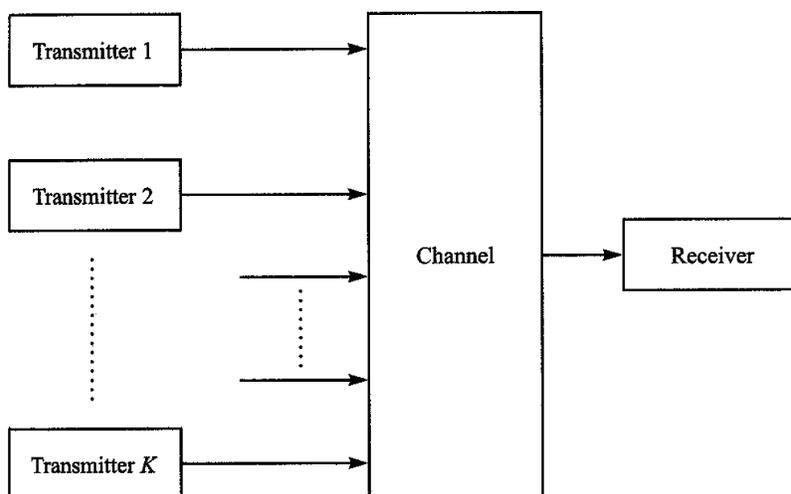


Figura 4.1: Um sistema de acesso múltiplo.

O canal comum pode ser o *uplink* de um sistema de comunicações via satélite ou um cabo, ao qual está conectado um conjunto de terminais que acessam um computador central, ou alguma banda de frequência no espectro de rádio que é usada por múltiplos usuários para estabelecer comunicação com um receptor de rádio. Por exemplo, em um sistema celular, os usuários são os transmissores móveis em qualquer particular célula do sistema e o receptor reside na estação-base da particular célula.

Um segundo tipo de sistema de comunicações multi-usuários é uma rede de radiodifusão (*broadcast*) na qual um único transmissor envia informação a múltiplos receptores, conforme Figura 4.2. Exemplos de sistemas *broadcast* incluem sistemas de rádio e televisão, assim como *downlinks* em um sistema de comunicações por satélite.

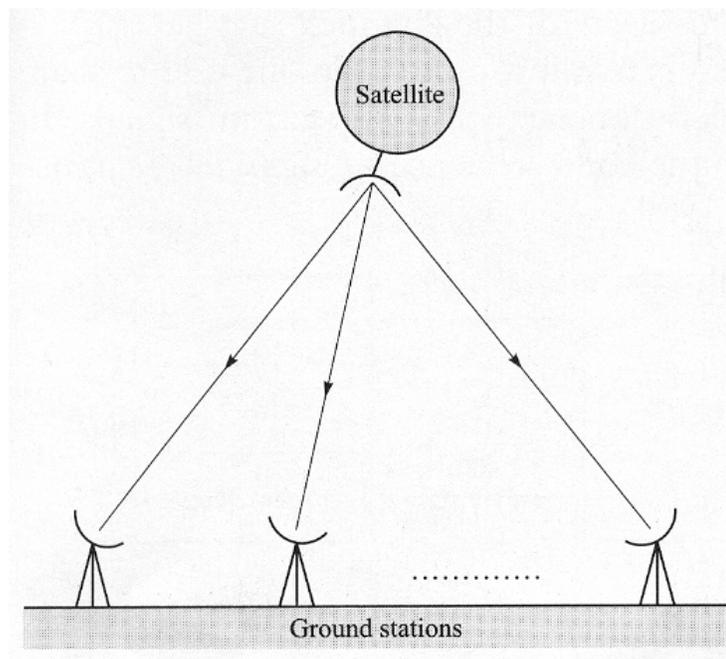


Figura 4.2: Uma rede *broadcast*.

As redes de acesso múltiplo e de *broadcast* são possivelmente os sistemas de comunicações multi-usuários mais comuns. Um terceiro tipo de sistema multi-usuários é uma rede do tipo *store-and-forward*, conforme ilustrado na Figura 4.3 e, ainda, um quarto tipo é o sistema de comunicações bidirecional mostrado na Figura 4.4.

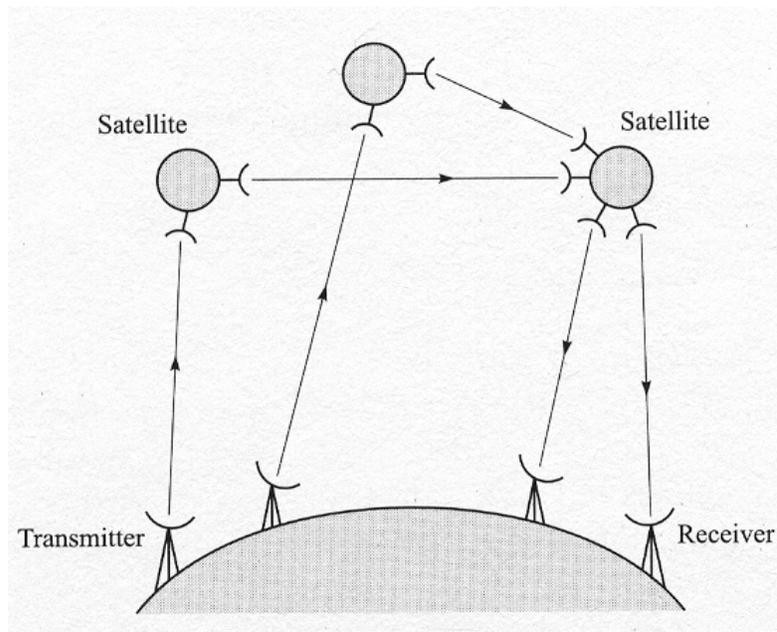


Figura 4.3: Rede de comunicações do tipo *store-and-forward* com retransmissão por satélite.

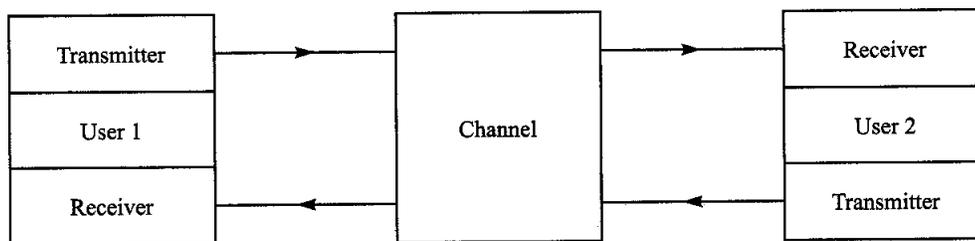


Figura 4.4: Um canal de comunicações bidirecional.

Neste capítulo estaremos estudando técnicas de acesso múltiplo para comunicações multi-usuários. Há diferentes técnicas que sistemas multi-usuários podem utilizar para enviar informações para o receptor, através do canal de comunicações.

Uma técnica simples é subdividir a largura de banda disponível para o canal em um número  $K$  de sub-canais ou frequências não sobrepostas (conforme Figura 4.5) e atribuir um sub-canal a cada usuário, sob demanda. Este método é conhecido como Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA - *Frequency Division Multiple Access*) e é comumente utilizado em canais *wired* para acomodar múltiplos usuários para transmissão de voz e dados.

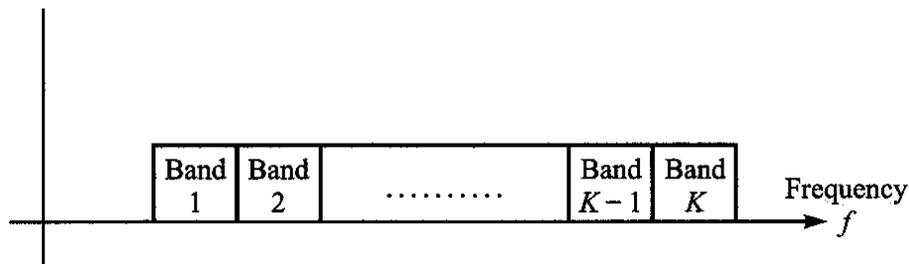


Figura 4.5: Subdivisão do canal em bandas de frequência não sobrepostas.

Um outro método para criar múltiplos sub-canais para acesso múltiplo é subdividir a duração  $T_f$ , chamada duração do *frame* em, por exemplo,  $K$  sub-intervalos não sobrepostos, cada um deles de duração  $T_f/K$ . Cada usuário que deseja transmitir informação é, então, designado a um particular *time slot* dentro de cada *frame* (*time slot* = intervalo ou espaço de tempo). Este método para Acesso Múltiplo é chamado Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*) e é frequentemente utilizado em transmissão de dados e voz digital.

Em sistemas em que o sinal transmitido tem a característica de apresentar surtos (períodos de transmissão separados por períodos de não transmissão) como acontece, por exemplo, em sinais de voz que tipicamente contêm longas pausas, tanto a técnica FDMA quanto a técnica TDMA se mostram ineficientes. Neste caso, uma percentagem de *slots* de tempo ou frequência atribuídos a usuários não estarão transportando informação, característica que acaba por limitar o número de usuários simultâneos do canal.

Uma alternativa às técnicas FDMA e TDMA é permitir o compartilhamento de um canal ou sub-canal por mais do que um usuário, de forma que cada usuário receba uma sequência de código única (ou sequência assinatura), permitindo ao usuário espalhar o sinal através da banda de frequência designada. Nesta técnica, os sinais de vários usuários são separados no receptor por correlação cruzada do sinal recebido com cada uma das possíveis sequências de código. A demodulação no receptor é possível desde que as sequências de código possuam relativamente pequena correlação cruzada. Esta técnica é chamada Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA - *Code Division Multiple Access*).

Ainda, em adição às técnicas de acesso múltiplo FDMA, TDMA e CDMA, uma outra técnica estará sendo utilizada em um futuro próximo para canais de comunicações: a técnica que permite Acesso Múltiplo por Divisão do Espaço (SDMA - *Space Division Multiple Access*). A tecnologia SDMA emprega técnicas avançadas de processamento para localizar as coordenadas e rastrear terminais fixos ou móveis, concentrando adaptativamente o sinal do sistema irradiante na direção dos usuários e afastando dos interferentes. Esta tecnologia adaptativa permite atingir níveis superiores de supressão de interferência, melhorando o reuso de frequências comparativamente às técnicas padrão de reuso de frequências. A técnica SDMA adapta a alocação de frequências de acordo com a localização da maior parte dos usuários. Através de técnicas de processamento espacial, a tecnologia de acesso SDMA pode criar dinamicamente um diferente setor para cada usuário, realizando uma alocação de frequências/canal em tempo real.

A Tabela 4.1 mostra as diferentes técnicas de acesso múltiplo que são presentemente utilizadas em vários sistemas de comunicações *wireless*.

<b>Sistema Celular</b>	<b>Técnica de Acesso Múltiplo</b>
<i>Advanced Mobile Phone System (AMPS)</i>	FDMA/FDD
<i>Global System for Mobile (GSM)</i>	TDMA/FDD
<i>US Digital Cellular (USDC)</i>	TDMA/FDD
<i>Pacific Digital Cellular (PDC)</i>	TDMA/FDD
<i>CT2 (Cordless Telephone)</i>	FDMA/TDD
<i>Digital European Cordless Telephone (DECT)</i>	FDMA/TDD
<i>US Narrowband Spread Spectrum (IS-95)</i>	CDMA/FDD
W-CDMA (3GPP)	CDMA/FDD CDMA/TDD
cdma2000 (3GPP2)	CDMA/FDD CDMA/TDD

Tabela 4.1: Técnicas de acesso múltiplo usadas em vários sistemas de comunicações *wireless*.

Em sistemas de comunicações *wireless*, freqüentemente é desejável permitir ao usuário enviar simultaneamente informação para a estação-base enquanto, ao mesmo tempo, recebe informação enviada pela estação-base.

As operações de multiplexação, no caso, duplexação podem ser efetuadas por técnicas no domínio tempo ou no domínio freqüência.

A duplexação por divisão em freqüência (FDD - *Frequency Division Duplexing*) provê duas bandas de freqüências distintas para cada usuário. A banda direta provê tráfego no sentido da estação-base para a estação-móvel, e a banda reversa provê tráfego no sentido da estação-móvel para a estação-base. Em FDD, qualquer canal duplex consiste, na verdade, de dois canais simplex (um direto e um reverso) e um dispositivo multiplexador (no caso, duplexador). O duplexador é utilizado no equipamento do assinante e na estação-base para permitir transmissão e recepção de rádio bidirecionais simultâneas, tanto para a unidade do assinante, quanto para a estação-base. A separação de freqüências entre cada canal (direto e reverso) é constante para um sistema, independente de qual particular canal está sendo usado.

A duplexação por divisão no tempo (TDD - *Time Division Duplexing*) utiliza o domínio tempo ao invés do domínio freqüência para prover tanto um *link* direto quanto um *link* reverso. Em TDD, múltiplos usuários dividem um único canal de rádio, utilizando "em turnos" o tempo. O acesso aos canais é permitido a usuários individuais em *time slots* designados, e cada canal duplex tem tanto um *time slot* direto quanto um *time slot* reverso, para facilitar comunicação bidirecional. Se a separação no tempo entre os *time slots* direto e reverso é uma separação pequena, então a transmissão e a recepção de dados aparenta ser simultânea ao usuário do sistema.

A Figura 4.6 ilustra as técnicas de multiplexação FDD e TDD. A técnica TDD permite comunicação sobre um único canal (em oposição à necessidade de utilização de dois canais simplex), o que simplifica o equipamento do assinante, já que dispensa a necessidade do dispositivo duplexador.

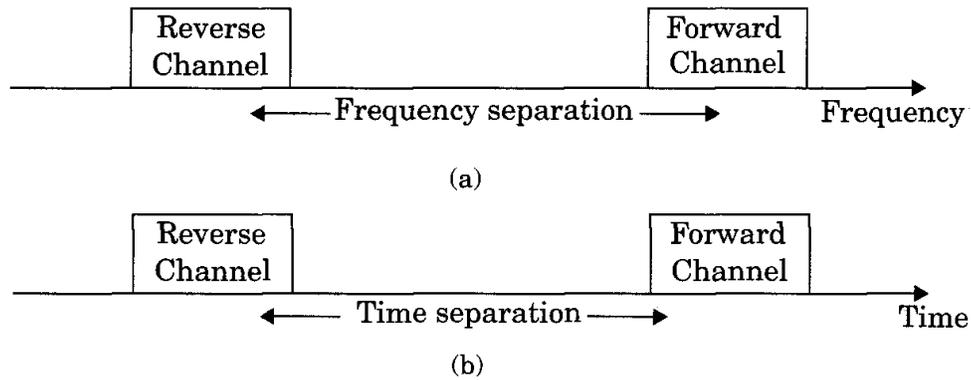


Figura 4.6: (a) FDD provê dois canais simplex ao mesmo tempo; (b) TDD provê dois *slots* de tempo simplex na mesma frequência.

#### 4.1 Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA)

A técnica de Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA - *Frequency Division Multiple Access*) atribui canais individuais a usuários individuais. Conforme pode ser visto na Figura 4.7, uma única banda de frequência ou canal é alocada a cada usuário. Estes canais são alocados sob demanda a usuários que requisitam serviço e, durante o período da chamada, nenhum outro usuário pode compartilhar o mesmo canal.

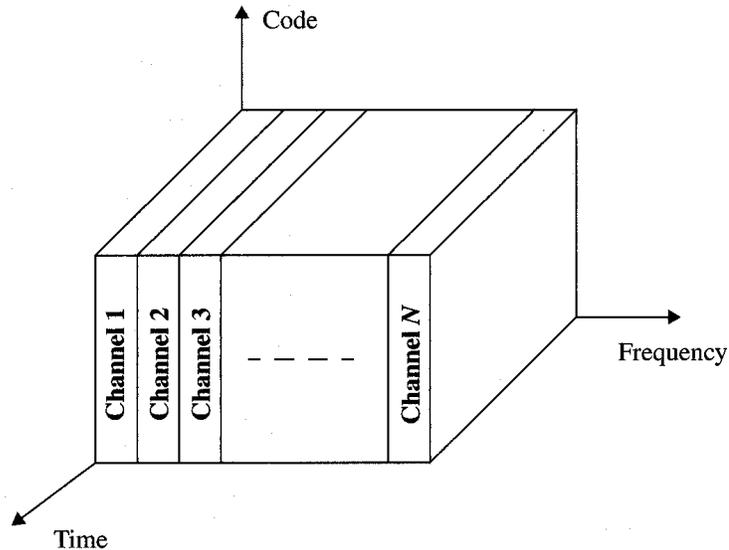


Figura 4.7: Técnica de acesso FDMA, onde diferentes canais são atribuídos a diferentes bandas de frequência.

Consideremos um sistema onde cada um dos  $K$  usuários deseja transmitir sobre um canal, gerando  $f_b$  bits por segundo. Em sistemas que utilizam FDMA, cada um dos  $K$  usuários pode transmitir todo o tempo, mas cada usuário deve usar uma porção  $B_u$  da largura de banda total,  $B$ , tal que

$$B_u = \frac{B}{K} = f_b \text{ Hz} \quad (4.1)$$

Um exemplo de sistema baseado na técnica de acesso FDMA é o sistema analógico AMPS (*Advanced Mobile Phone System*).

No sistema AMPS, um único usuário ocupa um único canal enquanto a chamada está em progresso. Na realidade, o canal único é emulado por dois canais simplex que são multiplexados em frequência.

Quando uma chamada é completada, ou quando ocorre uma operação de *handoff*, o canal é tornado vago, de tal forma que um outro assinante móvel possa utilizá-lo.

Usuários múltiplos ou simultâneos são acomodados no sistema AMPS entregando-se a cada usuário, um único canal.

Algumas características relevantes da técnica de acesso FDMA são as seguintes:

- As larguras de banda dos canais FDMA são relativamente estreitas (30 kHz no sistema AMPs) à medida que cada canal suporta somente um usuário. Ou seja, FDMA é usualmente implementado em sistemas de banda estreita.
- O espaço no tempo entre os símbolos de um sistema FDMA de banda estreita é grande, o que implica em reduzida pequena interferência inter-simbólica, requerendo pouca ou nenhuma equalização.

- A complexidade de sistemas móveis FDMA é menor quando comparada à complexidade dos sistemas TDMA (entretanto, à medida que os métodos de processamento de sinal empregados nos sistemas TDMA estão se aprimorando, esta diferença de complexidade está diminuindo).
- Como a técnica FDMA é uma técnica de transmissão contínua, são usados menos bits para transportar as informações de cabeçalho, do que na técnica TDMA.

## 4.2 Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA)

Em um sistema telefônico móvel celular que utiliza o padrão de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*), vários usuários móveis se revezam, no tempo, na transmissão/recepção sob uma mesma frequência compartilhada.

Sistemas TDMA são baseados em *time slots*, em que apenas um usuário pode tanto transmitir quanto receber (*time slot* = intervalo ou espaço de tempo).

Conforme pode ser visto na Figura 4.8, cada usuário ocupa um *time slot* que se repete em ciclos, de tal forma que um canal pode ser visto como um particular *time slot* que ocorre novamente a cada *frame*, onde  $N$  *time slots* constituem um *frame*.

A transmissão de vários usuários é entrelaçada em uma estrutura de *frames* que se repete. Pode ser observado na Figura 4.9. que cada *frame* é constituído de um determinado número de *slots* e é composto de um cabeçalho, uma mensagem (que constitui a informação) e bits de cauda.

Em sistemas TDMA/TDD metade dos *slots* de tempo na mensagem de informação são usados para os canais do *link* direto e metade para os canais do *link* reverso. Em sistemas TDMA/FDD estruturas de *frame* iguais ou similares são usadas para a transmissão direta e reversa, mas as frequências da portadora devem ser diferentes para os *links* direto e reverso. Em geral, os sistemas TDMA/TDD induzem intencionalmente vários *time slots* de atraso entre

os *time slots* direto e reverso para um particular usuário, de tal forma que não sejam necessários duplexadores na unidade do usuário.

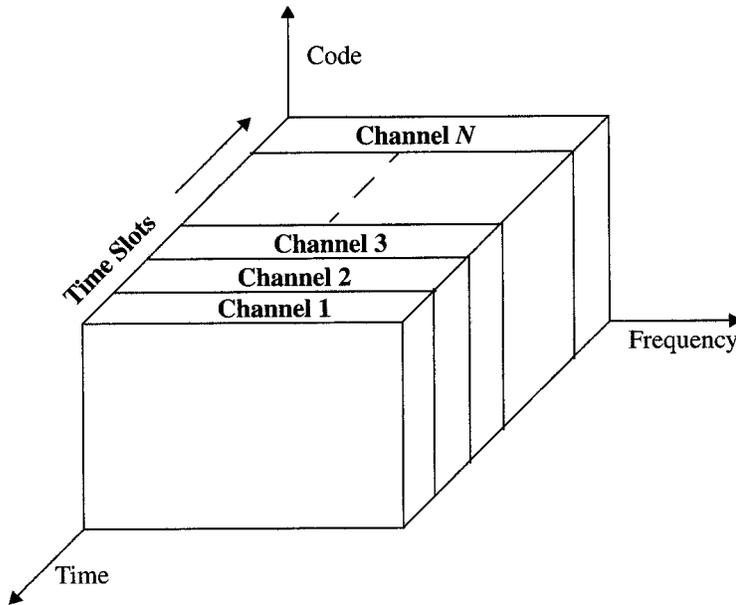


Figura 4.8: Técnica de acesso múltiplo TDMA, onde cada canal ocupa um *time slot* que se repete ciclicamente.

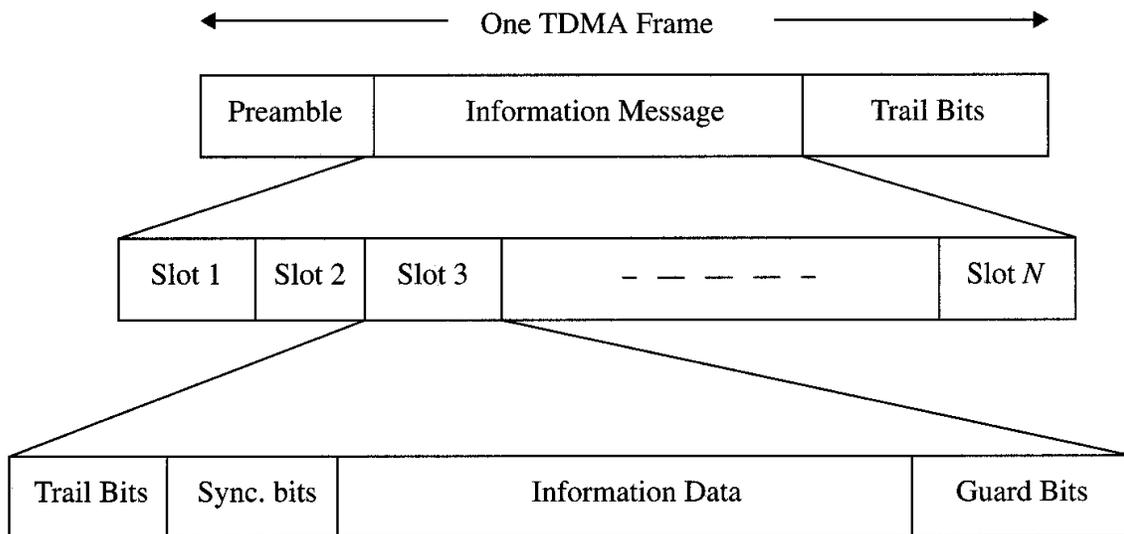


Figura 4.9: Estrutura de *frames* TDMA. O *frame* se repete ciclicamente no tempo.

Em um *frame* TDMA, o cabeçalho contém o endereço e a informação de sincronização que tanto a estação-base quanto a estação-móvel utilizam para identificar-se uma a outra. Intervalos de guarda são usados para permitir sincronização dos receptores entre diferentes *slots* e *frames*. Diferentes padrões *wireless* TDMA possuem diferentes estruturas de *frames*.

A Figura 4.10 descreve um sistema TDMA típico. Observe que:

- (1) No sistema, cada um dos  $K$  usuários deseja transmitir  $f_b$  bits por segundo, em pacotes de  $b$  bits (frequentemente  $b \cong 1000$  bits).
- (2) Cada pacote é inicialmente armazenado em um *buffer*, com taxa de entrada no *buffer* de  $f_b$  bits por segundo.
- (3) Uma chave concentradora-comutadora seleciona um particular *buffer*.
- (4) Os bits retirados do *buffer* são enviados para o canal comum, a uma taxa de  $Kf_b$  bits por segundo, portanto a duração de um bit no canal é  $1/Kf_b$ . Como há  $b$  bits no pacote, o tempo de pausa do comutador sobre cada *buffer* é  $b/Kf_b \cong T_p$ , onde  $T_p$  é a duração de um pacote.
- (5) O comutador retorna a cada *buffer* individual a cada  $KT_p \cong b/f_b$  segundos.

A eficiência de um sistema TDMA é uma medida da percentagem de dados transmitidos que efetivamente contêm informação, com relação à necessidade de *overhead*.

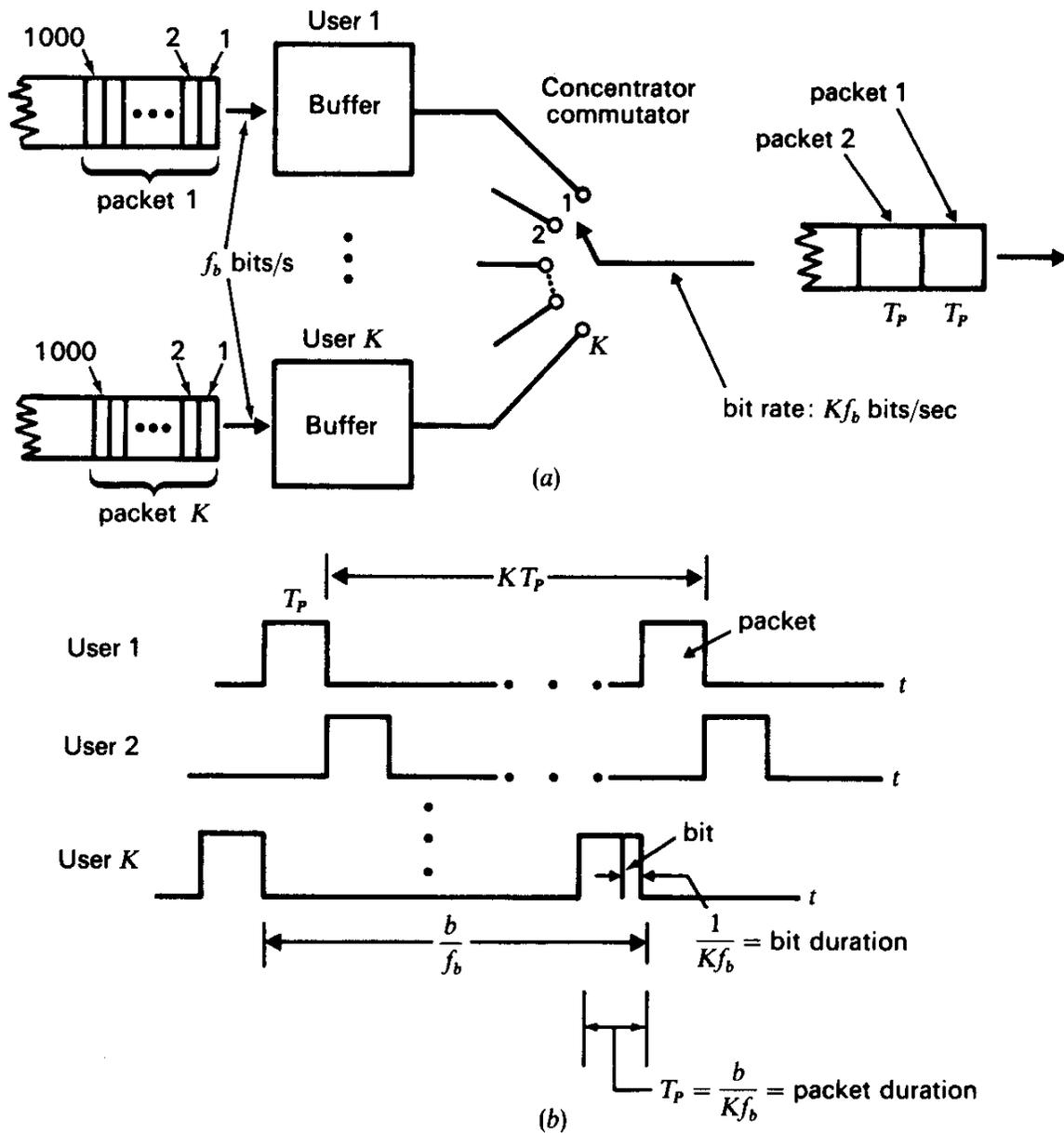


Figura 4.10: (a) Sistema TDMA típico.(b) Padrões de tempo para diferentes usuários.

O número de *slots* de canais TDMA que podem ser providos em um sistema TDMA é determinado multiplicando-se o número de slots TDMA por canal pelo número de canais disponíveis.

Algumas características relevantes da técnica de acesso TDMA são as seguintes:

- Equalização adaptativa é usualmente necessária em sistemas TDMA, já que as taxas de transmissão são geralmente muito altas.
- Devido à característica de transmissão em surtos e como as transmissões TDMA são feitas em *slots*, os receptores precisam ser sincronizados para cada surto de dados. Além disto, também são necessários *slots* de guarda para separar os usuários. Em decorrência, os sistemas TDMA necessitam de muitos bits para transportar as informações de cabeçalho.
- A técnica TDMA tem a vantagem de permitir alocar diferentes números de *time slots* por *frame* a diferentes usuários. Assim, largura de banda pode ser suprida sob demanda a diferentes usuários através da concatenação ou reatribuição de *time slots* baseada em prioridades.

### 4.3 Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA)

A técnica Acesso Múltiplo por Divisão de Código pertence à classe das técnicas de múltiplo acesso denominadas SSMA - *Spread Spectrum Multiple Access*. As técnicas pertencentes a este grupo utilizam sinais que têm uma largura de banda de transmissão muitas ordens de grandeza maior do que a largura de banda de RF mínima requerida. Uma seqüência pseudo-aleatória (PN - *pseudo-noise sequence*) converte um sinal de banda estreita em um sinal semelhante a ruído, de banda-larga, antes da transmissão.

As técnicas SSMA permitem imunidade à interferência, além de robusta capacidade de múltiplo acesso e são consideradas técnicas eficientes no aproveitamento espectral porque muitos usuários podem compartilhar a mesma banda em *spread spectrum* sem interferirem uns com os outros. Esta característica é de especial interesse no projeto de sistemas *wireless*.

Há dois tipos principais de técnicas de múltiplo acesso *Spread Spectrum*: *Frequency Hopped Multiple Access* (FH) e *Direct Sequence Multiple Access* (DS). A técnica *Direct Sequence Multiple Access* é também chamada *Code Division Multiple Access* (CDMA).

### 4.3.1 *Frequency Hopped Multiple Access* (FHMA)

*Frequency Hopped Multiple Access* (FHMA) é um sistema de acesso múltiplo digital no qual as frequências portadoras dos usuários individuais são variadas de forma pseudo-aleatória dentro de um canal de banda larga, ao invés de permanecerem dentro de uma única banda, como em sistemas convencionais de comunicações.

A Figura 4.11 ilustra como a técnica FHMA permite a múltiplos usuários ocuparem simultaneamente o mesmo espectro, cada usuário ocupando um canal específico de banda estreita, em um particular instante de tempo, baseado no código particular daquele usuário.

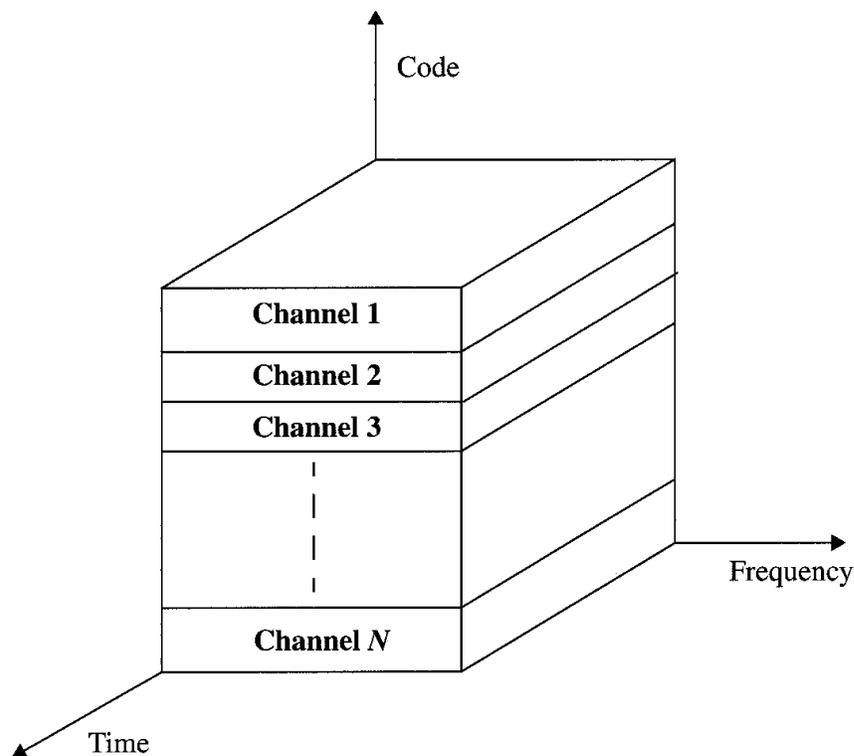


Figura 4.11: SSMA, em que cada canal recebe um código PN único, o qual é ortogonal ou aproximadamente ortogonal aos códigos PN utilizados por outros usuários.

A informação digital de cada usuário é quebrada em blocos de tamanho uniforme, os quais são transmitidos sobre diferentes canais, dentro da banda espectral alocada. A largura de banda instantânea de cada bloco de transmissão é muito menor do que a largura de banda *spread*. A mudança pseudo-aleatória das frequências dos canais dos usuários torna aleatória a ocupação de um canal específico, a qualquer dado instante de tempo, permitindo o múltiplo acesso sobre uma larga gama de frequências. Se, eventualmente, dois usuários ocuparem o mesmo canal em um dado instante de tempo, o efeito perceptível para o usuário é irrelevante porque isto acontece durante um intervalo muito pequeno de tempo.

No receptor FH, um código PN localmente gerado é usado para sincronizar a frequência instantânea do receptor com a frequência instantânea do transmissor. A qualquer instante no tempo, um sinal *frequency hopped* (pulado ou saltado em frequência) somente ocupa um único e relativamente estreito canal.

A diferença entre FHMA e um sistema FDMA tradicional é que o sinal *frequency hopped* muda de canal a rápidos intervalos de tempo. Se a taxa de mudança da frequência portadora é maior do que a taxa de símbolo (ou seja, a frequência da portadora muda mais de uma vez no intervalo de duração de um símbolo), então o sistema é dito um *Fast Frequency Hopping System*. Se o canal muda a uma taxa menor ou igual à taxa de símbolos (ou seja, a frequência da portadora muda após a duração de múltiplos símbolos), o sistema é chamado *Slow Frequency Hopping*.

Um sistema *Frequency Hopped* permite um adequado nível de segurança, especialmente quando um grande número de canais são usados. Neste caso, um receptor não intencionado (ou interceptador) que não conheça a seqüência pseudo-aleatória de *slots* de frequência precisará ajustar o receptor para a frequência correta tão rapidamente quanto necessário, de forma a buscar o sinal que deseja interceptar.

### 4.3.2 Code Division Multiple Access (CDMA)

O padrão CDMA é um padrão digital americano que foi desenvolvido pela Qualcomm, em San Diego, Califórnia e é intitulado *Interim Standard 95 (IS-95)*.

O padrão CDMA foi desenvolvido para uso em comunicações onde a necessidade de sigilo é extrema, porque é muito difícil, se não impossível, interceptar transmissões feitas por sistemas que empregam a tecnologia CDMA.

Assim, tecnologias *spread spectrum* foram originalmente empregadas em aplicações militares, onde um aumento na complexidade de implementação era justificado por duas particulares características:

1. É relativamente difícil detectar a presença de um sinal *spread spectrum* devido ao fato de que a energia do sinal é espalhada no espectro, através de uma larga banda (o sinal detectado se confunde com o ruído térmico de fundo, de baixa potência).
2. É mais difícil impedir que uma transmissão seja corretamente recebida através da transmissão de um forte ruído de interferência na mesma frequência (*jamming signal*), porque a energia do sinal usado para tal fim precisa também ser espalhada através de uma larga banda, não podendo ser focada em uma banda relativamente estreita.

A tecnologia CDMA é uma tecnologia de banda larga *spread spectrum* que consiste na transmissão de sinais por espalhamento espectral, em que os usuários utilizam a mesma faixa de frequência durante todo o intervalo de tempo. Os sinais de todas as chamadas são "espalhados" através de um amplo espectro de frequência.

Na recepção, os sinais são extraídos de um sinal que se assemelha ao ruído térmico de fundo do canal, por meio de um receptor que conhece o código para a específica chamada que deseja decodificar.

Esta técnica permite que inúmeras chamadas telefônicas sejam transmitidas simultaneamente sobre uma única frequência de rádio. Como resultado, sistemas CDMA

podem lidar com 10 a 20 vezes a capacidade de chamadas de sistemas celulares convencionais.

Quando uma chamada telefônica é feita usando a tecnologia CDMA, o som da voz do usuário é convertido em um sinal digital. O sinal digital é primeiro correlacionado com um código com características estatísticas semelhantes às de um ruído branco, chamado código pseudo-aleatório (*pseudo-noise code* - PN).

.O correlator conduz a uma representação digital encriptada do sinal original, que será "espalhada" sobre um espectro de frequência de banda muito larga (1.25MHz).

Cada usuário tem sua própria seqüência de código PN, a qual é aproximadamente ortogonal a todas as outras seqüências PN.

Para detecção do sinal relativo à mensagem, o receptor necessita saber a seqüência PN usada pelo transmissor, pois o decorrelator usará esta seqüência de código única PN para extrair apenas a informação desejada.

Todas as outras palavras-código aparecem como ruído após a operação de decorrelação. Cada usuário opera independentemente, sem qualquer conhecimento dos outros usuários.

Um sinal correlacionado com uma seqüência PN e decorrelacionado com a mesma seqüência PN retorna ao sinal digital original. Uma operação de decorrelação do sinal com o código PN não associado ao usuário resultará em puro ruído, contendo informação não discernível.

Apesar de determinística, uma seqüência PN comporta-se como uma portadora com características de ruído branco, a qual é usada para espalhar a energia do sinal ao longo da banda. A seleção de um bom código é importante, porque o tipo e o tamanho do código limitam a capacidade do sistema. Usualmente são utilizados códigos conhecidos por códigos de Walsh. Uma seqüência PN é uma seqüência pseudo-aleatória composta de 0s e 1s.

A Figura 4.12 descreve os blocos básicos de um sistema CDMA. Observe que no transmissor os dados binários dos N diferentes usuários  $(d_{1t}, d_{2t}, \dots, d_{Nt})$  são diretamente

multiplicados (correlação no tempo) pelas seqüências PN  $(pn_1, pn_2, \dots, pn_N)$  para produzir os sinais a serem transmitidos. O efeito da multiplicação dos dados do usuário por cada seqüência PN associada é espalhar a banda original do sinal em uma banda resultante muito maior.

Todos os usuários transmitem ao mesmo tempo, e a cada um é alocado todo o espectro de freqüência disponível para transmissão. Um usuário CDMA tem todo o tempo e toda a banda disponíveis, diferentemente dos usuários FDMA e TDMA, mas a qualidade da comunicação CDMA diminui com o aumento do número de usuários (pois a taxa de erros de bits aumenta, para este caso, devido à interferência entre os sinais dos usuários). Resumindo, em sistemas CDMA cada usuário tem seu próprio código PN, transmitindo sobre a mesma banda de RF, simultaneamente.

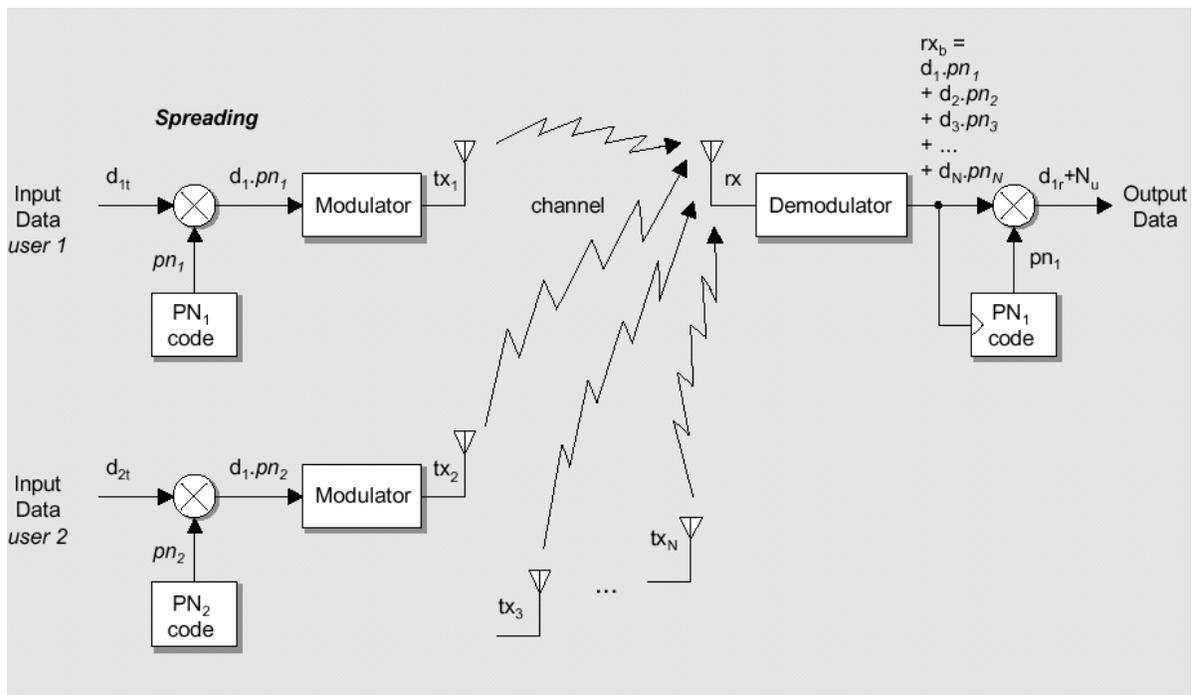


Figura 4.12: Blocos básicos de um sistema CDMA.

A operação "XNOR" (ou exclusivo negado) é realizada entre cada bit dos dados a serem transmitidos pelo usuário e a seqüência PN associada a este usuário. Se o bit proveniente do usuário é "0" então a palavra-código gerada é o complemento dos bits da

seqüência PN. Se o bit proveniente do usuário é "1" então a palavra-código gerada é a própria seqüência PN. Esta operação é denominada *spreading*.

Se uma palavra código contém  $n$  bits, o espectro ocupado pelo sinal transmitido é  $n$  vezes mais largo do que seria se um único bit fosse transmitido. Isto ocorre porque a operação de multiplicação de cada bit de dado do usuário pela seqüência de  $n$  bits do gerador PN estreita a largura dos pulsos elétricos por um fator  $n$ , o que alarga seu espectro na mesma proporção.

Os sinais de outros canais CDMA ocupam a mesma banda de freqüências, mas utilizando diferentes códigos, o que permite a separação dos sinais no receptor. O processo básico de separação dos canais CDMA no receptor envolve a correlação do sinal recebido com cada uma das várias palavras-código (ou canais, em CDMA) atribuídos à célula.

O correlator produz uma medida de correlação através da operação  $\rho = M - \bar{M}$  onde  $M$  representa o número de casamentos (*matches*) entre a seqüência PN do canal em questão e a seqüência do canal desejado e  $\bar{M}$  representa o número de descasamentos (*mismatches*) entre a seqüência PN do canal em questão e a seqüência do canal desejado, conforme exemplificado na Tabela 4.2.

Nº do Canal	Código do Canal	Nº de <i>matches</i> $M$	Nº de <i>mismatches</i> $\bar{M}$	Correlação $\rho = M - \bar{M}$
0	1110010	7	0	+7
1	0111001	3	4	-1
2	1011100	3	4	-1
3	0101110	3	4	-1
4	0010111	3	4	-1
5	1001011	3	4	-1
6	1100101	3	4	-1

Tabela 4.2: Exemplo de Códigos DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).

**Código do canal desejado (Canal 0): 1110010.**

Como pode ser visto na Tabela 4.2, a palavra código do Canal 0 (canal desejado) tem 7 *matches* com ela própria e nenhum *mismatch* com ela própria, resultando em uma medida de correlação +7. Por outro lado a palavra código do Canal 1 tem 3 *matches* com a seqüência do canal desejado e 4 *mismatches* com a seqüência do canal desejado, resultando em uma medida de correlação -1. Note que as mesmas propriedades de correlação existem para todos os códigos de canais com respeito aos outros códigos presentes na Tabela.

Exemplos de formas de onda para os sete canais CDMA mostrados na Tabela 4.2 são mostrados na Figura 4.13. No exemplo são transmitidos simultaneamente os bits de dados 1010001, cada um deles codificado, respectivamente, pelo código (canal), 1110010 (0), 0111001 (1), 1011100 (2), 0101110 (3), 0010111 (4), 1001011 (5) e 1100101 (6). No bloco de bits de dados 1010001, o bit de ordem 0 é codificado pelo Canal 0 e pertence ao usuário 0, o bit de ordem 1 é codificado pelo Canal 1 e pertence ao usuário 1, e assim sucessivamente.

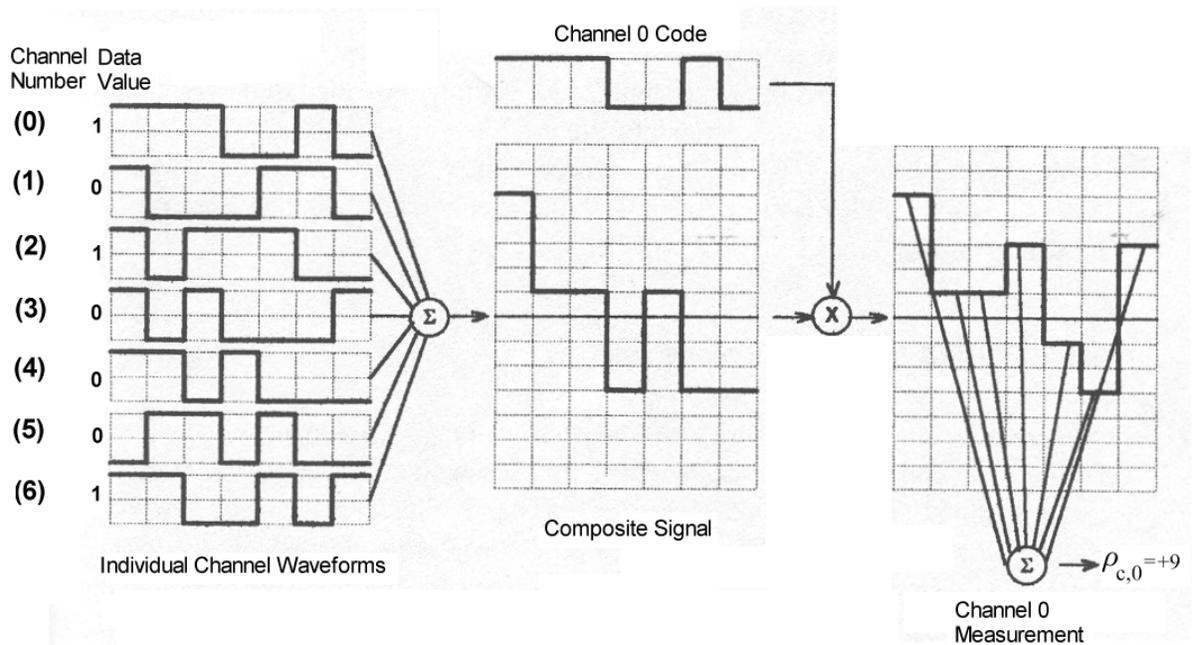


Figura 4.13: Exemplo de codificação e decodificação CDMA para 7 canais.

Todas as formas de onda são somadas, resultando no sinal composto (*composite signal*), que é o sinal efetivamente transmitido.

Na etapa de decodificação, no receptor, o sinal composto é multiplicado por cada um dos 7 possíveis códigos, para separar os dados que foram codificados. Esta operação é denominada *despreading*.

Na operação de *despreading* mostrada na Figura 4.13 o sinal composto é multiplicado pela seqüência PN associada ao Canal 0. A soma dos valores na seqüência resultante indica uma medida de correlação  $\rho_{c,0}$  entre o sinal composto e a seqüência PN associada ao Canal 0. Se o valor absoluto desta medida for maior ou igual ao limiar definido pelo valor máximo de  $\rho$  na Tabela 4.2 ( $|\rho_{c,0}| \geq 7$ ) então isto significa que o um bit do usuário de Canal 0 está sendo decodificado. Se  $\rho_{c,0} > 0$  o bit do usuário 0 será decodificado como tendo o valor lógico 1 e se  $\rho_{c,0} < 0$  o bit do usuário 0 será decodificado como tendo o valor lógico 0. De fato, no exemplo  $\rho_{c,0} = +9$  significando que o bit do usuário 0 será decodificado com valor lógico 1.

No padrão CDMA IS-95, os códigos são compostos por 64 palavras-código, cada uma com 64 bits, significando um limiar  $|\rho_c| \geq 64$  para a medida de correlação utilizada na decisão de qual usuário está sendo decodificado no receptor.

Devido à natureza da tecnologia *spread spectrum*, sistemas CDMA empregam o formato de reuso  $N=1$ . Uma estação-base CDMA pode usar mais de uma portadora *spread spectrum* ao mesmo tempo, cada uma delas com freqüências centrais distintas e ocupando uma banda de 1.25 MHz. Além de serem diferenciadas em freqüência, cada uma das portadoras possui um conjunto diferente de códigos. Quando são utilizados Códigos Walsh, há um máximo de 64 possíveis códigos Walsh pseudo-aleatórios por portadora de 1.25 MHz.

Teoricamente, podem existir 9 portadoras CDMA por célula. Alguns sistemas que empregam CDMA utilizam com sucesso 11 freqüências por célula para PCS e de 2 a 4 freqüências por célula para sistemas celulares. Em sistemas celulares, teoricamente, cada uma das portadoras pode lidar com 22 a 40 chamadas de voz. Entretanto, tanto em sistemas

celulares quanto em sistemas PCS, o número médio de chamadas por portadora está situado entre 12 e 16.

As estações-base de sistemas CDMA controlam a potência de todas as unidades móveis, com o objetivo de reduzir a interferência. Todos os sinais de usuários móveis devem chegar na estação-base com um mesmo nível de potência, evitando a ocorrência do problema conhecido por efeito *near-far*. Este problema ocorre quando muitos usuários móveis compartilham o mesmo canal. Em geral, o sinal do usuário móvel mais forte recebido irá "capturar" o demodulador na estação-base para si, obliterando os sinais de outros usuários móveis mais distantes, na mesma célula.

Uma vez que os usuários são separados por correlação, e uma vez que correlação é uma grandeza estatística apenas de segunda ordem, a discriminação entre usuários CDMA não é tão precisa quanto aquela obtida com os filtros de banda passante de corte abrupto utilizados em FDMA ou quanto aquela obtida pela distribuição dos usuários em *slots* de tempo utilizados em TDMA. Por esta razão, em sistemas CDMA, os níveis de sinal recebidos mais fortes aumentam o nível de ruído (*noise floor*) nos demoduladores da estação-base, com relação aos sinais mais fracos, diminuindo, portanto, a probabilidade de que sinais mais fracos sejam detectados.

Portanto, o controle de potência é um parâmetro operacional requerido em sistemas digitais CDMA. Por exemplo, se uma estação-móvel que está próxima da estação-base está transmitindo a uma potência muito alta e uma estação-móvel distante 10 milhas da estação-base está transmitindo a uma potência muito baixa, a potência do usuário móvel próximo à estação-base é diminuída a um dado nível, enquanto que a potência do usuário móvel distante 10 milhas da estação-base é aumentada a um dado nível. Se os níveis de potência dos usuários móveis são controlados, não atingindo um valor maior do que o absolutamente necessário, todos os canais podem ser igualmente utilizados usados, aumentando a capacidade do sistema.

O controle de potência também está presente em sistemas FDMA e TDMA. No entanto, é simplesmente um benefício que pode ser utilizado para melhorar o desempenho. Já

em sistemas CDMA o controle de potência é um item crítico e é absolutamente requerido para que o sistema opere adequadamente.

Outra interessante característica dos sistemas CDMA é que estes são tolerantes e até beneficiados pelo desvanecimento resultante de multi-percurso ocorrido no canal de transmissão. A razão básica para a tolerância dos sistemas CDMA a multi-percursos pode ser apreciada examinando o exemplo de códigos mostrado na Tabela 4.2. Note que cada código constitui um deslocamento cíclico com relação a todos os outros códigos presentes na Tabela. Como os códigos selecionados possuem, por definição, baixa correlação entre eles, uma versão atrasada de qualquer código particular terá a mesma baixa correlação com uma versão não atrasada de si próprio. Então, o efeito do atraso por multi-percurso em um ou mais bits *spread spectrum* representa nada mais do que o efeito da interferência intersimbólica de outro canal CDMA – efeito desprezível, portanto – mesmo que a versão atrasada tenha o mesmo nível de potência do que o sinal primário.

Um *rake receiver* é um dispositivo que reagrupa a fase de sinais recebidos com diferenças de fase entre si. Portanto, um *rake receiver* é capaz de alinhar a fase de diferentes sinais recebidos sob reflexão (ecos) em canais de transmissão com desvanecimento resultante de multi-percurso. A função do *rake receiver* nos dois lados (receptores da estação-móvel e da estação-base) é somar a potência dos sinais recebidos com diferenças de fase originadas pelos ecos resultantes de propagação sob multi-percurso ocorrida no canal de transmissão. Se não fosse utilizado o *rake receiver* o sistema CDMA operaria sem interferência intersimbólica pelos motivos discutidos no parágrafo anterior. Mas, uma vez que sinais atrasados resultantes de multi-percurso transportam a mesma informação contida no sinal primário e uma vez que em sistemas CDMA os sinais multi-percurso não geram interferência intersimbólica sobre o sinal primário, então é altamente vantajoso somar as potências dos sinais multi-percurso à potência do sinal primário através de um *rake receiver*.

Algumas características da técnica CDMA:

- Do ponto de vista filosófico, a intenção básica de um sistema CDMA é equalizar o desempenho de todos os canais utilizados no sistema. Em sistemas FDMA ou

TDMA alguns canais operam com alto desempenho, enquanto outros operam com baixo desempenho ou mesmo não podem ser utilizados (devido, principalmente ao desvanecimento por multi-percurso). A existência de canais de alto desempenho não compensa a presença de canais de baixo desempenho. Assim, um sistema que equaliza o desempenho de todos os canais certamente terá uma maior capacidade total.

- A técnica CDMA permite um aumento de capacidade ao sistema, comparativamente às tecnologias TDMA e FDMA, porque permite o reuso da mesma frequência em todas células. Estudos mostraram um aumento estimado de 6 a 18 vezes em capacidade, com relação aos sistemas AMPS (baseados em FDMA).
- Devido ao padrão de reuso  $N = 1$ , os sistemas CDMA não necessitam de grande custo de implantação adicional quando se torna necessária expansão ou modificação.
- Desempenho superior devido à possibilidade de utilização de *rake receivers* para beneficiar-se do desvanecimento por mutipercorso.
- Níveis de potência de transmissão menores, significando economia de energia na estação-base e maior duração da vida de baterias para os equipamentos portáteis dos usuários. Desde que um sistema CDMA é limitado em ruído, quanto menor a interferência introduzida por uma conversação, maior a capacidade deixada para o sistema.
- Maior segurança, devida à encriptação resultante da codificação dos sinais CDMA.
- *Soft handoff*, que é a habilidade de uma estação-móvel receber sinais simultaneamente, de mais de uma fonte. Como cada célula em um sistema CDMA transmite em uma mesma frequência, um mesmo receptor móvel recebe o sinal *spread spectrum* de todas as estações-base adjacentes. Em uma operação de *soft*

*handoff* o mesmo sinal de voz é distribuído a células selecionadas adjacentes à célula ativa. Um usuário móvel ativo pode, então, comparar a qualidade dos sinais e chavear para a melhor estação-base antes de desconectar da estação-base estabelecida (esta operação é chamada *make-before-break*).

- *Self-jamming* é um problema em sistemas CDMA. *Self-jamming* surge do fato de que seqüências originadas pelo **spreading** da informação proveniente de diferentes usuários não são perfeitamente ortogonais, o que gera, na operação de **despreading** de um particular código PN, contribuições não-nulas para a estatística de decisão do receptor, para um particular usuário.

#### 4.4 Acesso Múltiplo por Divisão de Espaço (SDMA)

A técnica de Acesso Múltiplo por Divisão de Espaço (SDMA) controla a energia irradiada pelo sistema irradiante para cada usuário no espaço. Pode ser visto na Figura 4.14 que a técnica SDMA serve a diferentes usuários através do uso de antenas *spot beam* (antenas de feixe pontual).

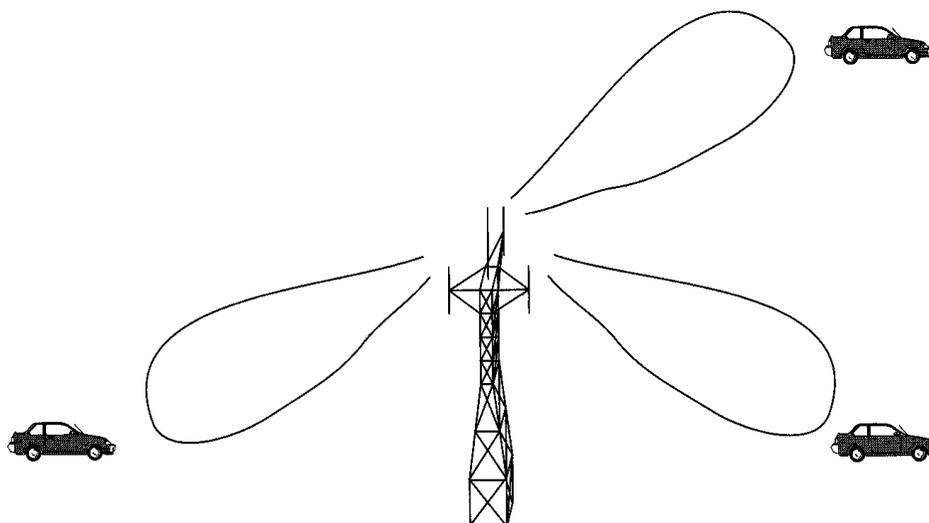


Figura 4.14: Uma antena espacialmente filtrada, em uma ERB, servindo a diferentes usuários através do uso de *spot beams*.

As diferentes áreas cobertas pelo feixe da antena podem ser servidas pela mesma frequência (em um sistema TDMA ou CDMA) ou diferentes frequências (em um sistema FDMA). Antenas setorizadas podem ser consideradas uma aplicação primitiva de SDMA.

O *link* reverso representa a maior dificuldade em sistemas celulares, por várias razões. Primeiro, a estação-base tem controle completo sobre a potência de todos os sinais transmitidos no *link* direto. Entretanto, devido aos diferentes caminhos de propagação entre cada usuário e a estação-base, a potência transmitida por cada unidade do assinante deve ser controlada dinamicamente para prevenir que qualquer usuário particular aumente o nível de interferência para todos os outros usuários. Segundo, a potência de transmissão é limitada pelo consumo de bateria na unidade do usuário, portanto, há limites no grau de controle que pode ser aplicado no *link* reverso. Se a antena da estação-base é projetada de forma a filtrar espacialmente cada usuário desejado, de tal forma que a máxima energia seja detectada de cada usuário, então o *link* reverso para cada usuário é melhorado, sendo requerida menor potência e resultando em diminuição da interferência.

Desta forma, antenas adaptativas (*smart antennas*) usadas nas estações-base deverão diminuir alguns dos problemas no *link* reverso. No caso limite de largura de banda de feixe infinitesimal e infinita capacidade de rastreamento, antenas adaptativas implementam uma técnica SDMA ótima, provendo um único canal que é livre da interferência de todos os outros usuários na célula. Na técnica SDMA todos os usuários dentro do sistema podem estar aptos a comunicar ao mesmo tempo, usando o mesmo canal. Em adição, um sistema de antenas adaptativas perfeito deve poder rastrear componentes de multi-percurso individuais para cada usuário e combiná-los de forma ótima para coletar toda a energia do sinal disponível de cada usuário. O sistema de antenas adaptativas perfeito não é realizável porque requer antenas infinitamente grandes, entretanto ganhos podem ser obtidos usando *arrays* de tamanhos razoáveis, com diretividade moderada.

## 4.5 Referências Bibliográficas

- [1] Yacoub, M., *Celular Communication Systems*, Prentice Hall, 1992.
- [2] Waldman, H. e Yacoub, M. D., *Telecomunicações - Princípios e Tendências*, Editora Érica, 1997.
- [3] Brodsky, I., *Wireless – The Revolutions in Telecommunications*, Artech House, 1995.
- [4] Wong, P. & Britland, D., *Mobile Data Communication Systems*, Artech House, 1995.
- [5] Bedell, P., *Wireless Crash Course*, McGraw-Hill, 2001.
- [6] A. B. Carlson, *Communication Systems*, McGraw-Hill, 1965.
- [7] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 2001.
- [8] H. Taub and D.L. Schilling, *Principles of Communications Systems*, McGraw-Hill, 1986.
- [9] Lee, W. C. Y., *Elements of Cellular Mobile Radio Systems*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 38, Número 2, Páginas 69 a 75, Maio de 1989.
- [10] Kartalopoulos, S. V., *Understanding SONET/SDH and ATM - Communications Networks for the Next Millennium*, IEEE Press, 1999.
- [11] Bellamy, John C., *Digital Telephony*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.