

Acesso Múltiplo por Divisão de Código CDMA

Técnicas de Acesso Múltiplo

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 de comunicações.

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.

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 sequência 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).

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 1 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.

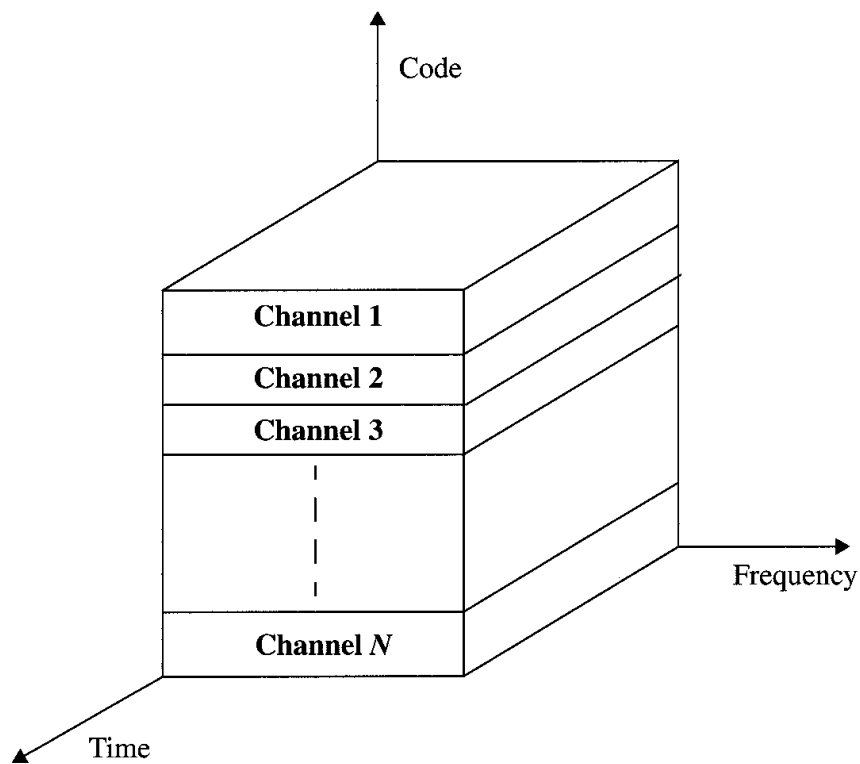


Figura 1: SSMA, em que cada canal recebe um código PN único, o qual é ortogonal ou aproximadamente ortogonal aos códigos PN utilizados por outros usuários.

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.

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 2 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.

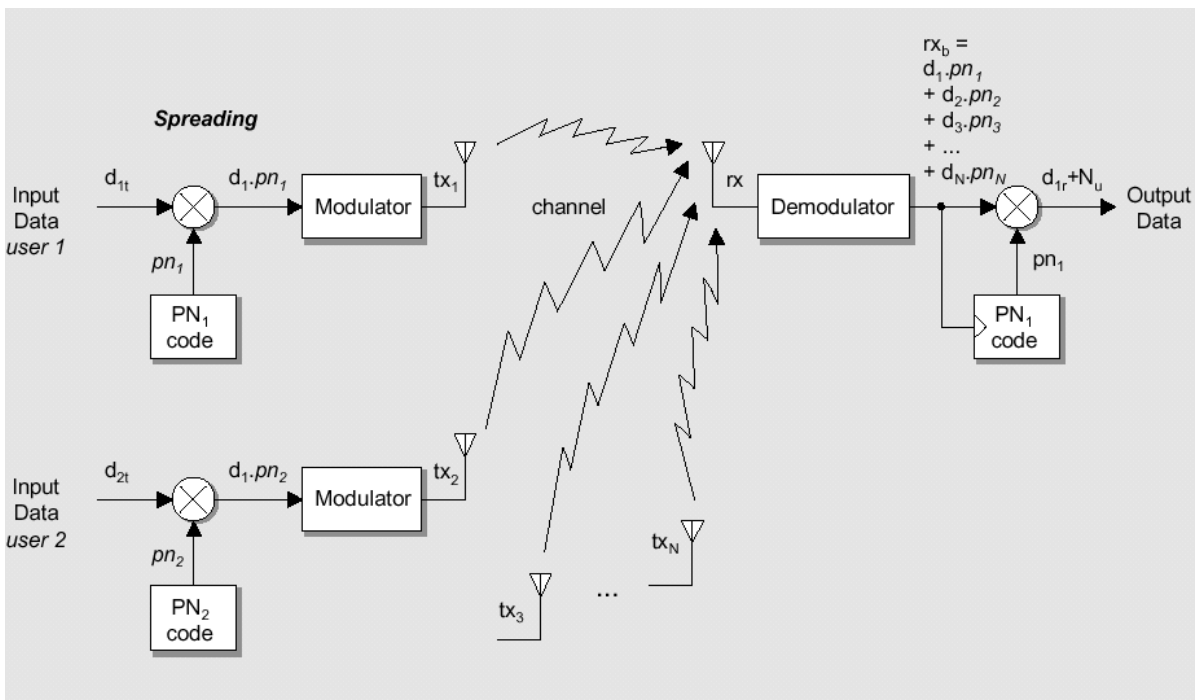


Figura 2: Blocos básicos de um sistema CDMA.

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 1.

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

Código do canal desejado (Canal 0): 1110010.

Como pode ser visto na Tabela 1, 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 1 são mostrados na Figura 3. 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.

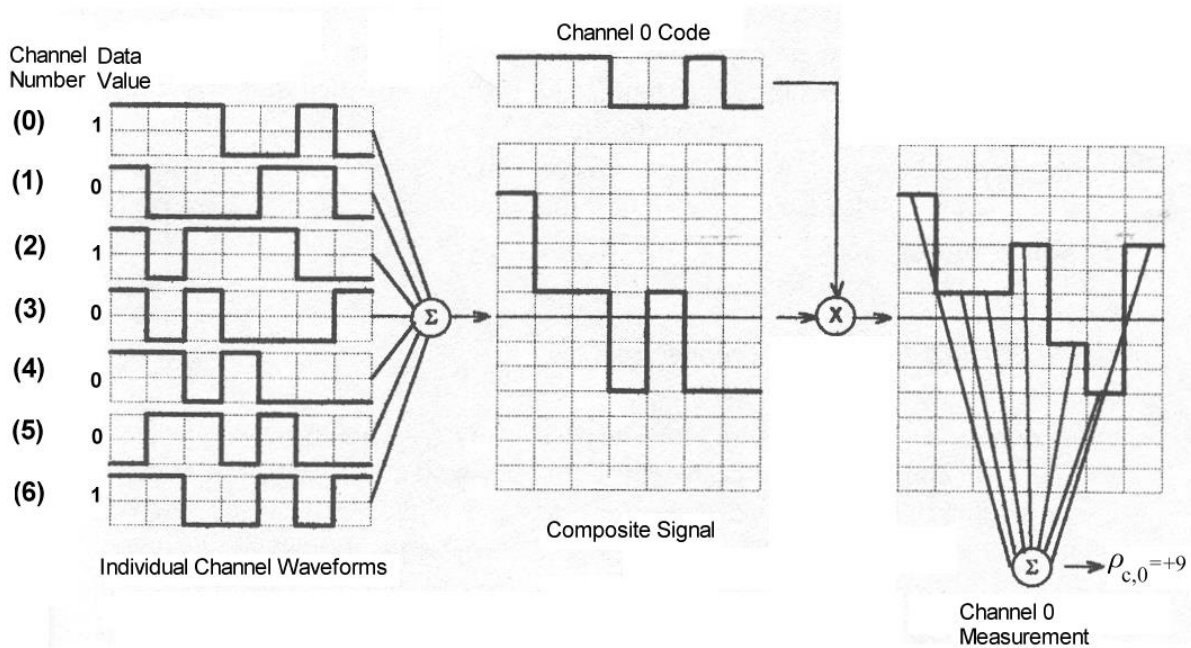


Figura 3: Exemplo de codificação e decodificação CDMA para 7 canais.

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 3 o sinal composto é multiplicado pela sequência PN associada ao Canal 0. A soma dos valores na sequência resultante indica uma medida de correlação $\rho_{c,0}$ entre o sinal composto e a sequência PN associada ao Canal 0. Se o valor absoluto desta medida for maior ou igual ao limiar definido pelo valor máximo de ρ na Tabela 1 ($|\rho_{c,0}| \geq 7$) 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 frequências centrais distintas e ocupando uma banda de 1.25 MHz. Além de serem diferenciadas em frequência, 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 frequências por célula para PCS e de 2 a 4 frequências 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.

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 1. 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*.

Referências Bibliográficas

- [1] Bellamy, John C., *Digital Telephony*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [2] Rappaport, T. S., *Wireless Communications - Principles and Practice*, Second Edition, Prentice Hall, 2002.