

Detecção Multiusuário Ótima por Grupos em Sistemas DS/CDMA com Codificação Convolutiva

Fabian David Backx e Raimundo Sampaio Neto

Resumo—Este artigo propõe um receptor multiusuário híbrido para utilização em um sistema DS/CDMA com modulação M-PSK e codificação convolutiva. O receptor proposto é composto por um receptor decorrelador ao final do qual é realizada uma decodificação convolutiva por grupos. Resultados de desempenho obtidos por simulações para grupos de dois usuários são apresentados e comparados com o desempenho do receptor convencional, formado por um banco de filtros casados, e com o desempenho do receptor decorrelador já proposto na literatura.

Palavras-Chave—Detecção Multiusuário, CDMA, codificação convolutiva.

Abstract—This paper proposes a hybrid multiuser receiver for a DS/CDMA system employing M-PSK modulation and convolutional coding. The proposed receiver is composed by a decorrelator receiver followed by a group convolutional decoder. Performance results obtained by simulation for groups of two users are presented and compared to the performance of a conventional receiver, composed of a bank of matched filters, and to the decorrelator receiver itself.

Keywords—Multiuser Detection, CDMA, convolutional coding.

I. INTRODUÇÃO

As técnicas de múltiplo acesso mais cogitadas nas propostas para os padrões de terceira geração envolvem alguma forma de DS/CDMA [1], [2] na qual os usuários podem transmitir simultaneamente na mesma faixa de frequências, sendo separáveis no receptor pela ortogonalidade, ou quase ortogonalidade, entre os sinais utilizados pelos diferentes usuários para transmissão da informação. Contudo, essa técnica de múltiplo acesso tem seu desempenho limitado pela interferência de múltiplo acesso, devido à não ortogonalidade dos sinais dos diferentes usuários na recepção, e pelo efeito *near-far*, caracterizado por sinais com níveis de potência diferentes na recepção. Essas dificuldades acabaram por motivar o surgimento de uma nova área de pesquisa: a detecção multiusuário. Verdú, em [3], propôs o detector ótimo, que padece de uma complexidade exponencial com o número de usuários ativos no sistema. Vários receptores sub-ótimos foram propostos em seguida, como o decorrelador [4] e o MMSE (*Minimum Mean Square Error*) que pertencem à classe dos receptores lineares e o PIC [5] (*Parallel Interference Canceller*) e o SIC [6] (*Serial Interference Canceller*), que pertencem à classe de receptores não-lineares.

Os autores estão com o CETUC/PUC-RIO, 22453-900, Rio de Janeiro - Brasil Fone: +55-21-31141699 Fax: +55-21-22945748. E-mails: fd-backx@uol.com.br, raimundo@cetuc.puc-rio.br

Em [7], é proposto um receptor multiusuário híbrido composto pela concatenação de um receptor decorrelador ao final do qual é realizada uma detecção ótima por grupos. O presente artigo propõe estender e adaptar o receptor proposto em [7] para o caso do enlace reverso de um sistema celular DS/CDMA com modulação M-PSK e codificação convolutiva. O receptor proposto é composto por três estágios: banco de filtros casados, estágio decorrelador e estágio de decodificação convolutiva conjunta por grupos.

Este artigo é organizado da seguinte forma. A seção II descreve o modelo dos sinais DS/CDMA. Na seção III, o receptor proposto é abordado. Resultados de simulações são discutidos na seção IV. A seção V apresenta as conclusões.

II. MODELO DOS SINAIS

O sistema de interesse é o enlace reverso de uma célula, na qual K terminais móveis de usuários transmitem seus respectivos sinais de dados para a estação rádio base (ERB). O agregado de sinais $x(t)$, presente na entrada do receptor (da ERB) e composto pela superposição dos K sinais transmitidos corrompidos por ruído aditivo gaussiano branco, é trazido para banda-base, no estágio de R.F., por um demodulador em fase e quadratura. Em seguida, as componentes em fase e quadratura são filtradas por filtros casados ao formato do pulso de chip na transmissão e amostradas à taxa de N chips por símbolo. Admitindo-se o caso de recepção síncrona e supondo-se que o desvanecimento é constante durante o intervalo de um símbolo, o vetor $\tilde{\mathbf{x}}(i)$ contendo as N amostras da envoltória complexa de $x(t)$ relativas ao i -ésimo intervalo de sinalização é dado por:

$$\tilde{\mathbf{x}}(i) = \mathbf{P}\mathbf{A}(i)\mathbf{b}(i) + \tilde{\mathbf{n}}_w(i), \quad (1)$$

onde a matriz \mathbf{P} , de dimensões $N \times K$, é a matriz de espalhamento do sistema tal que $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \dots \mathbf{p}_k \dots \mathbf{p}_K]$. O vetor \mathbf{p}_k representa a seqüência de espalhamento normalizada utilizada/atribuída pelo k -ésimo usuário ativo no sistema, com $\|\mathbf{p}_k\|^2 = 1$. Ainda em (1), $\mathbf{A}(i)$ é a matriz de amplitudes dos K sinais recebidos. $\mathbf{A}(i)$ é diagonal e seus elementos são dados por $A_{kk}(i) = \alpha_k(i)\sqrt{E_k}$, onde E_k representa a energia por símbolo do usuário k . O complexo $\alpha_k(i)$ incorpora um possível desvanecimento plano introduzido pelo canal, podendo ser caracterizado por uma função determinística ou ainda por um processo estocástico. Contudo, em ambos os casos, é considerado que $\mathbb{E}[|\alpha_k(i)|^2] = 1$ para que os níveis de potência na entrada e na saída do canal sejam iguais. Para o caso aleatório, é comum modelar $\alpha_k(i)$ como as

amostras de um processo gaussiano onde as partes real e imaginária são processos gaussianos independentes e identicamente distribuídos [8]. Assim, decorre que $|\alpha_k(i)|$, amplitude do desvanecimento, é variável aleatória de Rayleigh, e $\angle\alpha_k(i)$, mudança de fase introduzida no sinal transmitido, é variável aleatória uniforme no intervalo $(-\pi; \pi]$. As componentes $b_k(i)$ do vetor $\mathbf{b}(i)$ presente em (1) são variáveis aleatórias complexas que representam o ponto da constelação de sinais M-PSK associado ao i -ésimo símbolo transmitido pelo usuário k . Para o presente modelo é considerado que os dados de cada usuário são previamente tratados por um codificador convolucional antes de serem modulados. Finalmente, $\tilde{\mathbf{n}}_w(i)$ é vetor gaussiano branco com vetor média nulo e matriz covariância $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_w}$ dada por $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_w} = N_0\mathbf{I}$, onde \mathbf{I} é a matriz identidade e $N_0/2$ é a densidade espectral de potência bilateral do ruído branco, na recepção.

III. DETECÇÃO DOS SINAIS DS/CDMA

A. Detecção Convencional e Detecção Multiusuário

O receptor convencional utilizado para detecção dos sinais M-PSK DS/CDMA é composto por um banco de filtros casados às seqüências de espalhamento (na transmissão) dos usuários ativos no sistema. O banco de filtros casados efetua simultaneamente a correlação do sinal observado, vetor $\tilde{\mathbf{x}}(i)$, com cada uma das K seqüências de espalhamento. O vetor $\tilde{\mathbf{y}}(i)$, presente na saída do banco de filtros casados é dado por:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{y}}(i) &= \mathbf{P}^T \tilde{\mathbf{x}}(i) \\ &= \mathbf{R}\mathbf{A}(i)\mathbf{b}(i) + \tilde{\mathbf{n}}_{fc}(i),\end{aligned}\quad (2)$$

onde $\mathbf{R} = \mathbf{P}^T\mathbf{P}$ é a matriz de correlação normalizada entre as seqüências de espalhamento e $\{\cdot\}^T$ indica a operação de transposição. Para seqüências de espalhamento ortogonais na recepção, a matriz \mathbf{R} é diagonal e assim a componente $\tilde{y}_k(i)$ de $\tilde{\mathbf{y}}(i)$ depende apenas da componente $b_k(i)$ de $\mathbf{b}(i)$. Para seqüências de espalhamento não-ortogonais na recepção, $\tilde{y}_k(i)$ depende de $b_k(i)$ e de componentes de $\mathbf{b}(i)$ associadas a outros usuários, caracterizando assim a Interferência de Múltiplo Acesso (ou IMA). Ainda em (2), $\tilde{\mathbf{n}}_{fc}(i) = \mathbf{P}^T \tilde{\mathbf{n}}_w(i)$ é vetor gaussiano colorido, com matriz covariância $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_{fc}}$ dada por $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_{fc}} = N_0\mathbf{R}$. No caso de sinais codificados convolucionalmente $\tilde{y}_k(i)$ é então encaminhado para o decodificador convolucional do k -ésimo usuário, onde os seus dados são detectados de forma independente dos dados dos demais usuários. Supondo que o decodificador opera com *soft-decision*, que a matriz $\mathbf{A}(i)$ é conhecida ou estimada pelo receptor e sabendo que o detector convencional trata a IMA como ruído branco, o Algoritmo de Viterbi [2] pode ser usado para a decodificação. A métrica de ramo utilizada é portanto o quadrado da distância euclidiana, ou seja $|\tilde{y}_k(i) - A_{kk}(i)b_k^r|^2$, onde b_k^r é o símbolo transmitido correspondente à palavra-código do ramo r da treliça associada ao código adotado pelo usuário k . Porém, como a IMA de fato não é um ruído gaussiano, a detecção é sub-ótima no sentido de máxima verossimilhança. Note-se que a presença do complexo $A_{kk}(i)$ na métrica permite a compensação do efeito da rotação de fase introduzida pelo canal. O detector convencional para sinais

codificados convolucionalmente, assim como seu equivalente para sinais não codificados, tem seu desempenho prejudicado pela IMA presente nas componentes de $\tilde{\mathbf{y}}(i)$ e pelo efeito *near-far*.

Com o objetivo de combater os efeitos nocivos acima citados, foi introduzido o conceito de detecção multiusuário. De fato, os receptores multiusuário realizam o processamento do sinal desejado conjuntamente com os sinais interferentes, resultando em uma melhora de desempenho em relação ao esquema de detecção convencional, que considera os sinais interferentes como mero ruído de fundo. Uma desvantagem do receptor multiusuário ótimo é que a sua complexidade aumenta exponencialmente com o número de usuários ativos no sistema[3]. Para contornar esse problema, vários receptores multiusuário sub-ótimos foram desenvolvidos, sendo o decorrelator um dos mais populares [4]. O decorrelator pode ser implementado aplicando-se na saída do banco de filtros casados uma transformação linear $\mathbf{T} = \mathbf{R}^{-1}$ com o objetivo de eliminar a IMA no sistema. Todavia, o nível de potência do ruído no estágio de decodificação é aumentado. De (2) resulta que o vetor $\tilde{\mathbf{z}}(i)$ na saída do estágio decorrelator é dado por:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{z}}(i) &= \mathbf{R}^{-1}\tilde{\mathbf{y}}(i) \\ &= \mathbf{A}(i)\mathbf{b}(i) + \tilde{\mathbf{n}}_d(i),\end{aligned}\quad (3)$$

Observa-se que como $\mathbf{A}(i)$ é diagonal, a componente $\tilde{z}_k(i)$ só depende de $b_k(i)$, caracterizando assim a eliminação da IMA. Ainda em (3), $\tilde{\mathbf{n}}_d(i) = \mathbf{R}^{-1}\tilde{\mathbf{n}}_{fc}(i)$ é vetor gaussiano colorido com matriz covariância $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_d}$ dada por $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_d} = N_0\mathbf{R}^{-1}$. Para sinais codificados convolucionalmente e *soft-decision*, $\tilde{z}_k(i)$ é então encaminhado para o decodificador convolucional do k -ésimo usuário onde os seus dados são decodificados de forma independente dos outros usuários. O Algoritmo de Viterbi pode ser usado para detectar de forma ótima, no sentido de máxima verossimilhança, uma seqüência de escalares, $\{b_k(i)\}$, em presença de ruído gaussiano, $\{\tilde{n}_{dk}(i)\}$, de variância $N_0(\mathbf{R}^{-1})_{kk}$. A métrica de ramo é o quadrado da distância euclidiana, ou seja $|\tilde{z}_k(i) - A_{kk}(i)b_k|^2$.

B. Detecção Ótima por Grupos

Note que as componentes do vetor $\tilde{\mathbf{z}}(i)$ não são estatisticamente independentes uma vez que $\tilde{\mathbf{n}}_d(i)$ é vetor gaussiano colorido. Esta dependência, que não é aproveitada nas abordagens descritas na seção III-A, pode ser explorada utilizando-se o conceito de detecção multiusuário, mais uma vez, na saída do estágio decorrelator, para detectar conjuntamente os sinais dos K usuários ativos no sistema. Detectar conjuntamente os sinais dos K usuários equivale a detectar de forma ótima, no sentido de máxima verossimilhança, uma seqüência de vetores, $\{\mathbf{b}(i)\}$, em presença de uma seqüência de vetores, $\{\tilde{\mathbf{n}}_d(i)\}$, gaussianos coloridos e estatisticamente independentes, cada um com matriz covariância $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_d}$. Nestas condições, a detecção de uma seqüência de M vetores, $\{\mathbf{b}(i)\}_{i=1}^M$, a partir de M vetores observação, $\{\tilde{\mathbf{z}}(i)\}_{i=1}^M$, consiste na escolha da seqüência que minimiza a função custo dada por:

$$J = \sum_{i=1}^M \|\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_d}^{-1/2}(\tilde{\mathbf{z}}(i) - \mathbf{A}(i)\mathbf{b}(i))\|^2 \quad (4)$$

dentre todas as seqüências $\{\mathbf{b}(i)\}_{i=1}^M$ possíveis. Observa-se que $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_d}^{-1/2}$ em (4) é a matriz branqueadora do ruído colorido $\tilde{\mathbf{n}}_d(i)$. Sabe-se que a seqüência de escalares $\{b_k(i)\}_{i=1}^M$ corresponde a um percurso na treliça de decodificação original do k -ésimo usuário. Assim, as seqüências possíveis de vetores $\{\mathbf{b}(i)\}_{i=1}^M$ podem ser representadas por percursos em uma supertreliça, obtida a partir de uma composição das treliças individuais que geram as componentes dos vetores $\mathbf{b}(i)$. O Algoritmo de Viterbi pode ser utilizado para a decodificação conjunta ótima. De acordo com (4), a métrica de ramo usada neste caso é da forma $\|\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_d}^{-1/2}(\tilde{\mathbf{z}}(i) - \mathbf{A}(i)\mathbf{b}^r)\|^2$, onde \mathbf{b}^r é o vetor associado ao ramo r da supertreliça. Uma forma alternativa de justificar a existência da supertreliça é abordada sucintamente à seguir. Considere, por questões de simplicidade, que todos os K usuários utilizem o mesmo código convolucional (n, l, m) . É possível representar os K codificadores de l entradas e n saídas cada um, por um codificador equivalente, com Kl entradas e Kn saídas, ou seja, um codificador do tipo (Kn, Kl, m) , que pode ser descrito por uma treliça. A essa treliça dá-se o nome de supertreliça. A treliça do codificador individual (n, l, m) possui 2^{lm} estados diferentes e 2^l ramos saindo de cada um desses estados. A supertreliça do codificador equivalente a K codificadores individuais em paralelo é composta por 2^{lKm} estados diferentes e de cada estado originam-se 2^{lK} ramos. Assim, a complexidade envolvida na decodificação conjunta torna o seu uso proibitivo para sistemas com muitos usuários. No intuito de estabelecer um compromisso entre complexidade e desempenho, utiliza-se a detecção por grupos. O conceito clássico de detecção por grupos consiste no particionamento, em grupos, dos sinais dos usuários, na saída do banco de filtros casados. Esquemas de detecção multiusuário (possivelmente diferentes) são aplicados a cada um dos grupos que formam a partição, ou agrupamento. Contudo, esse mesmo conceito de detecção por grupos pode ser considerado na saída do estágio decorrelator. Receptores que combinam mais de um esquema de detecção multiusuário são chamados receptores multiusuário híbridos. O receptor multiusuário híbrido deste trabalho aplica, para cada grupo formado na saída do estágio decorrelator, o esquema de detecção ótima no sentido de máxima verossimilhança. O receptor proposto realiza assim uma decodificação convolucional ótima por grupos. Note que caso os sinais fossem agrupados na saída do banco de filtros casados, cada grupo iria conter IMA composta pelos sinais dos usuários do grupo e possivelmente por sinais de usuários que não pertencem ao grupo, sendo portanto a detecção sub-ótima; este fato justifica a inserção do estágio decorrelator. Obviamente, o compromisso entre complexidade e desempenho está diretamente relacionado com a formação dos grupos. De fato, a complexidade do receptor pode variar desde K vezes a complexidade do decorrelator, para o caso em que são formados K grupos com um único usuário, até a complexidade do detector ótimo, para o caso em que apenas um grupo, contendo todos os K usuários do sistema, é formado. Observa-se que os grupos não precisam ter o mesmo número de usuários. Convém frisar que qualquer que seja o agrupamento, o desempenho do k -ésimo usuário na saída do estágio de detecção ótima por grupos é sempre melhor ou igual ao respectivo desempenho na saída do estágio

decorrelator. Em [7], é proposto um critério a partir do qual, uma vez fixados os tamanhos dos grupos, define-se o agrupamento ótimo como sendo aquele que minimiza a taxa de erro de bit (TEB) do usuário com pior desempenho do sistema, na saída do estágio de detecção ótima por grupos. Ainda em [7], é apresentado um limitante para a probabilidade de erro de bit em sistemas que utilizam detecção ótima por grupos, a partir do qual formula-se uma métrica com vistas a fornecer um método para formar, a partir da matriz de correlação das seqüências de espalhamento e da matriz de amplitudes dos sinais dos usuários, o agrupamento ótimo. Para sistemas com codificação convolucional, uma expressão semi-analítica para um limitante da probabilidade de erro de bit pode ser obtida [2], [9] utilizando-se as técnicas de análise de códigos convolucionais. Contudo, esse limitante depende da estrutura do código utilizado, ou, de forma equivalente, da treliça associada ao código, o que, além da complexidade envolvida para sua obtenção, torna sua utilização muito particularizada. A seguir, propõe-se uma abordagem alternativa, que não depende da estrutura do código, mas que não garante contudo a obtenção do agrupamento ótimo. Considera-se, para fins de praticidade que o agrupamento é formado por grupos de dois usuários. Caso K , o número de usuários ativos no sistema, seja ímpar, um dos grupos conterá o sinal de apenas um usuário. Os sinais dos usuários são então agrupados observando-se a matriz covariância, $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_d}$, do ruído presente na saída do estágio decorrelator, $\tilde{\mathbf{n}}_d$. A idéia central é colocar no mesmo grupo pares de sinais cujas componentes do ruído sejam as mais correlatadas, já que quanto maior for a correlação, maior será o benefício proporcionado pela detecção conjunta (ótima) do grupo. No caso geral, para grupos com mais de dois usuários (acarretando um aumento na complexidade), e com usuários tendo possivelmente níveis de potência diferentes na recepção, a estratégia de agrupamento utilizada em [7] para sistemas não codificados poderia indicar bons agrupamentos para o caso de sistemas codificados.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Nesta seção, é avaliado o desempenho na saída de cada um dos estágios que compõem o receptor proposto, para dois canais distintos. O primeiro é um simples canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). No segundo canal, além do ruído aditivo, é considerada a presença de desvanecimento de Rayleigh, tal como descrito na Seção II. O sistema CDMA compreende $K = 6$ usuários ativos. O espalhamento espectral é realizado utilizando-se seqüências de assinatura normalizadas, com componentes independentes $\pm \frac{1}{\sqrt{N}}$ geradas aleatoriamente, e de comprimento $N = 6$. O sistema pode ser portanto considerado bastante carregado. A matriz \mathbf{R} de correlação dos sinais é dada por:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1.0 & 0.33 & 0 & 0.33 & 0.67 & 0 \\ 0.33 & 1.0 & 0.67 & -0.33 & 0 & 0 \\ 0 & 0.67 & 1.0 & 0 & -0.33 & 0.33 \\ 0.33 & -0.33 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0 & -0.33 & 0 & 1.0 & 0.33 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0 & 0.33 & 1.0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

e sua inversa, $\mathbf{H} = \mathbf{R}^{-1}$ dada por:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 6.0 & -3.0 & 0.0 & -3.0 & -4.5 & 1.5 \\ -3.0 & 6.0 & -4.5 & 3.0 & 0.0 & 1.5 \\ 0.0 & -4.5 & 6.0 & -1.5 & 3.0 & -3.0 \\ -3.0 & 3.0 & -1.5 & 3.0 & 1.5 & 0.0 \\ -4.5 & 0.0 & 3.0 & 1.5 & 6.0 & -3.0 \\ 1.5 & 1.5 & -3.0 & 0.0 & -3.0 & 3.0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

O esquema de modulação utilizado é o QPSK. É suposto também que os sinais de todos os 6 usuários têm mesma potência na recepção, e que a matriz de amplitudes $\mathbf{A}(i)$ em (1) é conhecida pelo receptor. Com relação ao esquema de codificação, é suposto que todos os 6 usuários utilizam o mesmo codificador convolucional (2, 1, 2) ilustrado na Figura 1 e que todos os decodificadores operam com *soft-decision*. A treliça associada ao codificador convolucional individual (Figura 1) tem $2^2 = 4$ estados e $2^1 = 2$ ramos santes por estado. Para o estágio de detecção ótima por grupos, são considerados grupos de dois usuários. O codificador equivalente ao qual está associado a super treliça de codificação para dois usuários está ilustrado na Figura 2. A título de comparação, convém observar que a super treliça para detecção conjunta dos 6 usuários é formada por $2^{12} = 4096$ estados distintos e $2^6 = 64$ ramos santes por estado. A super treliça de decodificação conjunta para dois usuários é composta por $2^4 = 16$ estados distintos e $2^2 = 4$ ramos santes por estado. Os

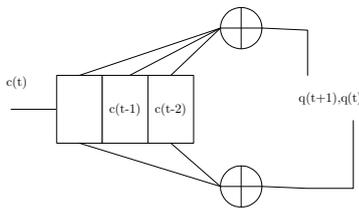


Fig. 1. Codificador convolucional (2,1,2) utilizado por todos os seis usuários.

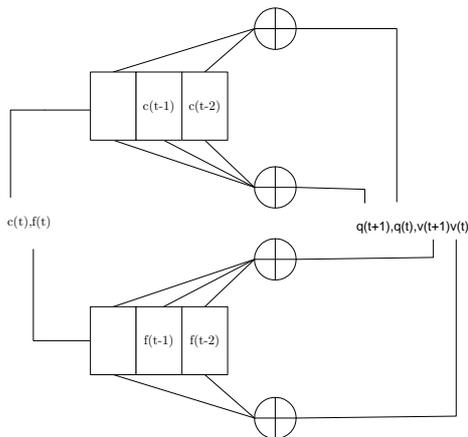


Fig. 2. Codificador convolucional (4,2,2) equivalente associado à supertreliça utilizada no estágio de detecção ótima por grupos de dois usuários.

resultados de simulação obtidos para o caso do canal AWGN e apresentados a seguir foram obtidos utilizando-se seqüências aleatórias e independentes de 10^5 bits de informação por

usuário. A Figura 3 mostra o desempenho, na saída do banco de filtros casados, para cada um dos seis usuários ativos no sistema, em termos da TEB, variando-se a relação $\frac{E_B}{N_0}$, onde E_B é a energia por bit de informação. Nota-se na figura dois "grupos" de usuários com desempenhos semelhantes. Isso pode ser explicado observando-se na matriz \mathbf{R} que os usuários 1,2,3 e 5 têm mesmo padrão de IMA, assim como os usuários 4 e 6. Como era esperado, os usuários 4 e 6, cujos sinais são afetados por menos IMA, têm desempenho superior aos demais usuários. A Figura 4 mostra o desempenho, na saída

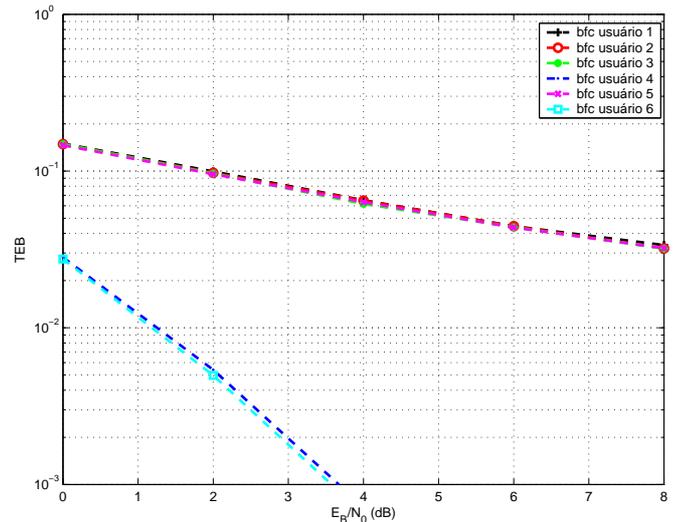


Fig. 3. Desempenho na saída do estágio convencional (banco de filtros casados - bfc), por usuário, para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolucional, canal AWGN.

do decorrelator, para cada um dos seis usuários ativos no sistema, em termos da TEB, variando-se a relação $\frac{E_B}{N_0}$. Uma vez mais, nota-se a presença de dois "grupos" de usuários com desempenhos semelhantes. Esse fato é justificado observando-se a diagonal da matriz \mathbf{H} , que vem a ser proporcional à matriz covariância do ruído na saída do estágio decorrelator. Os ruídos que corrompem os sinais dos usuários 1,2,3 e 5 têm mesmo nível. A mesma observação abrange os ruídos relativos aos usuários 4 e 6. Comparando-se os gráficos das figuras 3 e 4 observa-se que para regiões de razão $\frac{E_B}{N_0}$ baixa, onde o ruído é preponderante com relação à IMA, o desempenho na saída do banco de filtros casados é superior ao desempenho na saída do decorrelator, uma vez que o banco de filtros casados maximiza a relação sinal ruído no instante de amostragem, enquanto que o decorrelator elimina a IMA, às custas de um aumento no nível de ruído. Para regiões de razão $\frac{E_B}{N_0}$ alta, ocorre o inverso: a IMA é preponderante com relação ao ruído e portanto o desempenho na saída do decorrelator tende a ser superior ao desempenho na saída do banco de filtros casados. Nota-se no entanto que para a faixa de TEB considerada, o desempenho dos usuários 4 e 6 na saída do banco de filtros casados é sempre superior ao desempenho na saída do decorrelator. Isso se deve ao fato dos sinais dos usuários 4 e 6 estarem sujeitos a menos IMA do que os demais usuários. Assim, o efeito de aumentar o nível de ruído ao eliminar a IMA, no estágio decorrelator, acaba sendo maléfico para estes usuários na faixa

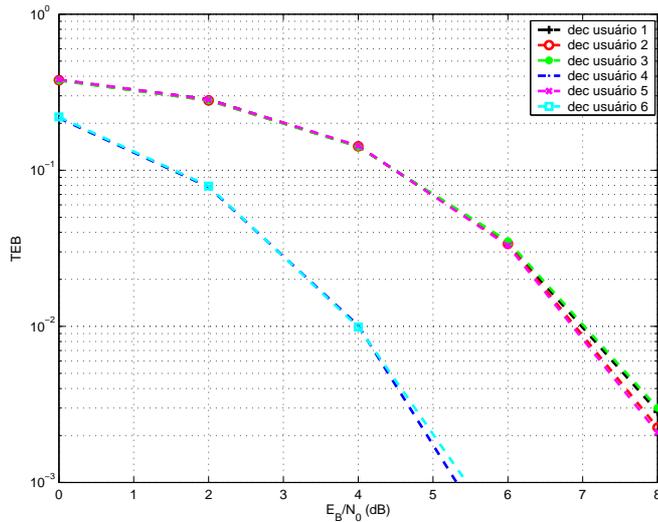


Fig. 4. Desempenho na saída do estágio decorrelator (dec), por usuário, para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolucional, canal AWGN.

considerada. A Figura 5 mostra o desempenho, na saída do estágio de detecção ótima por grupos de dois usuários, para cada um dos seis usuários ativos no sistema, em termos da TEB, variando-se a relação $\frac{E_B}{N_0}$. O agrupamento formado pelos grupos (1,5), (2,3) e (4,6) é ótimo de acordo com o critério descrito na seção III-B. Para determinação do agrupamento ótimo, foram comparadas as curvas de desempenho de todos os usuários obtidas através de simulação para todos os agrupamentos possíveis (em um total de 15). A comparação foi possível uma vez que foi observado que as curvas dos usuários mantinham a hierarquia (i.e. não se cruzavam) para toda a faixa de razão $\frac{E_B}{N_0}$. Comparando-se os gráficos das figuras 4 e 5 observa-se que a utilização da detecção ótima por grupos proporciona ganhos aproximados de 2.5dB com relação ao receptor decorrelator, para os usuários 1, 2, 3 e 5. O ganho ao utilizar esta detecção para os usuários 4 e 6 é de zero dB, uma vez que as componentes de ruído que afetam os sinais destes usuários são decorrelatadas, como nota-se do elemento H_{46} (ou H_{64}) da matriz \mathbf{H} em (6). As curvas da Figura 6 ilustram o desempenho do pior usuário para cada estágio do receptor proposto, em termos da TEB, variando-se a relação $\frac{E_B}{N_0}$. Vale salientar que o usuário de pior desempenho não será necessariamente o mesmo em cada estágio. No entanto, no caso da Figura 6, o usuário 1 resulta como sendo o de pior desempenho na saída de todos os 3 estágios do receptor. Assim, para um receptor convencional seguido de um estágio decorrelator, a operação de um serviço hipotético cuja TEB máxima seja de 10^{-2} fica garantida para uma relação de $\frac{E_B}{N_0}$ maior ou igual a 7.0dB na recepção. Observa-se também que, para o receptor proposto, essa relação cai para aproximadamente 4.3dB. Para um receptor convencional, a operação deste serviço para a TEB máxima considerada é virtualmente impossível. Por fim, a Figura 7 apresenta o desempenho médio do sistema, ao longo dos 6 usuários, na saída dos estágios convencional, decorrelator e para cada um dos grupos que formam o agrupamento considerado. O segundo

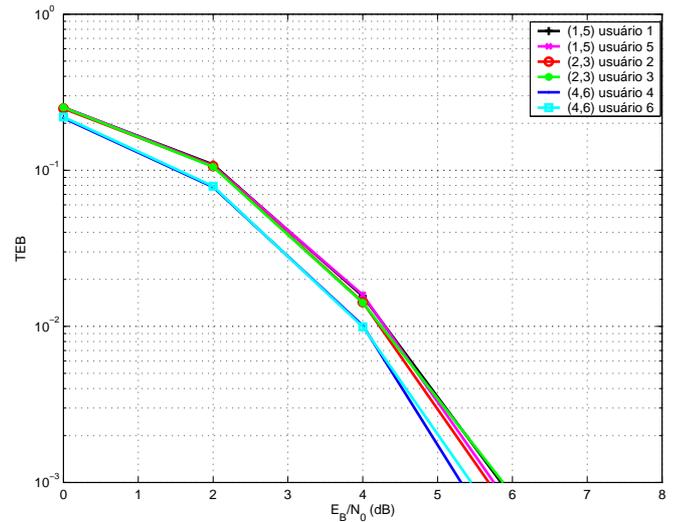


Fig. 5. Desempenho na saída do estágio de detecção ótima por grupos de dois usuários, por usuário, para agrupamento [(1,5),(2,3),(4,6)], para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolucional, canal AWGN.

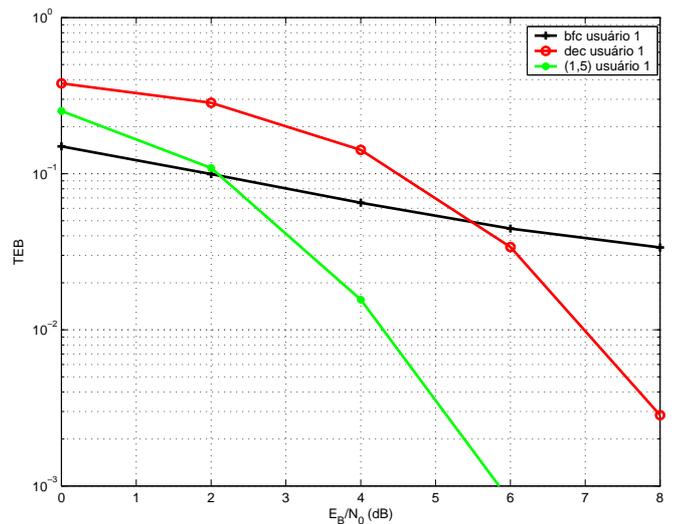


Fig. 6. Desempenho do pior usuário de cada estágio, para agrupamento [(1,5),(2,3),(4,6)], para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolucional, canal AWGN.

canal considerado incorpora ao modelo o desvanecimento de Rayleigh. Foram realizados 100 experimentos independentes com as características descritas como segue. Sequências de 10^3 bits de informação independentes por usuário foram geradas em cada experimento. Para simular o desvanecimento, foi gerada para cada usuário uma sequência de variáveis aleatórias independentes gaussianas complexas $\{\alpha_k(i)\}_{i=1}^M$, com partes real e imaginária independentes e identicamente distribuídas. Assim, o desvanecimento, que também introduz uma alteração na fase do sinal recebido, pode ser considerado "rápido" (ou uso de *interleaving*). As sequências relativas a usuários distintos também são estatisticamente independentes entre si. Por motivos de espaço, são apresentadas somente as figuras 8 e 9, similares às figuras 6 e 7 para o caso de canal

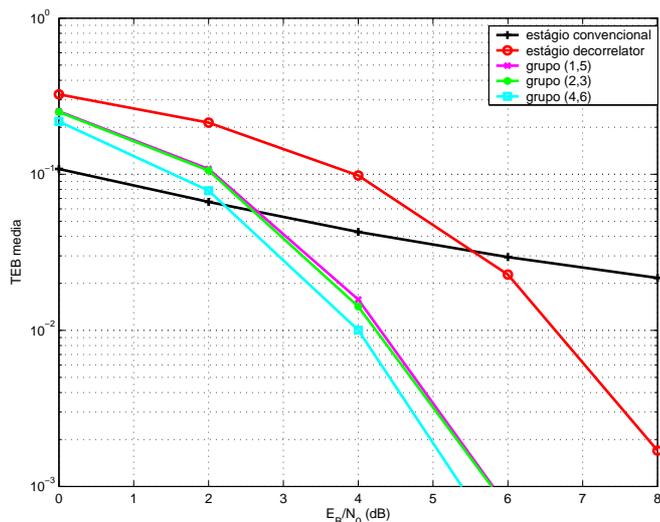


Fig. 7. Desempenho médio na saída dos estágios convencional, decorrelator e detecção ótima por grupos de dois usuários (grupos (1,5),(2,3) e (4,6)), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolucional, canal AWGN.

AWGN. O agrupamento escolhido é o mesmo considerado ótimo para canal AWGN, não sendo portanto necessariamente o ótimo para canal com desvanecimento Rayleigh. Tomando como exemplo mais uma vez um serviço hipotético que exija TEB máxima de 10^{-2} , foi constatado que sua operação fica garantida para uma relação de $\frac{E_b}{N_0}$ maior ou igual a 9.8dB na recepção, para um receptor decorrelator. Para o receptor proposto, essa relação cai para aproximadamente 8.2dB. Para o receptor convencional, a operação deste serviço para a TEB máxima considerada é mais uma vez virtualmente impossível. Assim, o desvanecimento introduzido tem forte impacto negativo no desempenho de todos os receptores considerados. A adição de um estágio de detecção ótima por grupos ao final do estágio decorrelator torna-se não somente vantajosa como necessária.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um receptor composto por 3 estágios, a saber: banco de filtros casados, estágio decorrelator e estágio de decodificação convolucional por grupos. Através de simulações, o desempenho do receptor foi comparado com o desempenho do receptor convencional e com o desempenho do receptor decorrelator. Mesmo utilizando grupos de dois usuários, por motivos de complexidade, o receptor proposto mostrou ganhos significativos com relação aos outros receptores de referência mencionados. É importante ressaltar que o receptor proposto pode ser igualmente aplicado na decodificação de sinais TCM, que se diferenciam do esquema utilizado basicamente no projeto do código convolucional.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Zeng and V. Bhargava, "Recent advances in cellular wireless communications", *IEEE Commun. Mag.*, pp. 128-138, Sept 1999.
- [2] A. J. Viterbi, *CDMA - Principles of Spread Spectrum Communication*, Addison-Wesley, 1995.

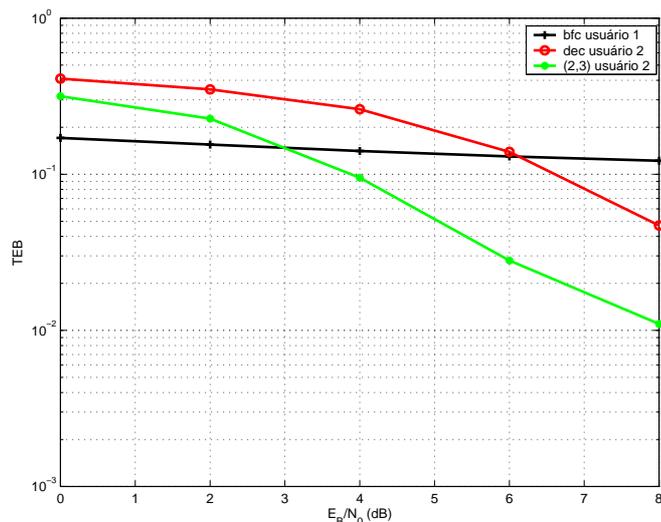


Fig. 8. Desempenho do pior usuário de cada estágio, para agrupamento [(1,5),(2,3),(4,6)], para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolucional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase).

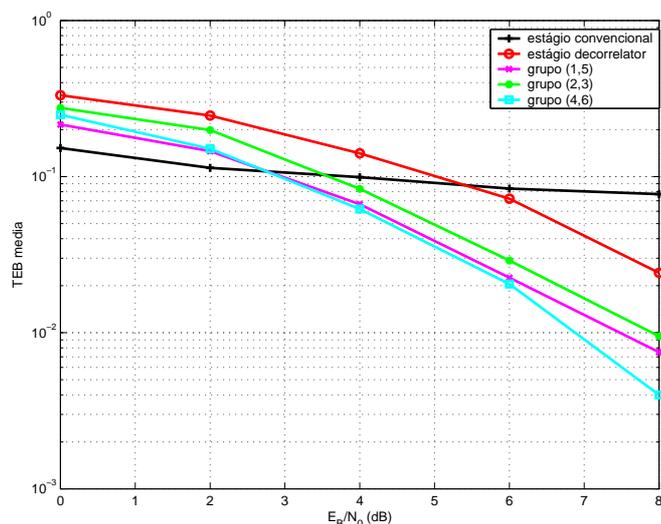


Fig. 9. Desempenho médio na saída dos estágios convencional, decorrelator e detecção ótima por grupos de dois usuários (grupos (1,5),(2,3) e (4,6)), para sistema DS/CDMA QPSK síncrono com codificação convolucional, canal com desvanecimento Rayleigh (módulo e fase).

- [3] S. Verdú, "Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-32, pp.85-89, Jan. 1986.
- [4] R. Lupas and S. Verdú, "Linear multiuser detectors for synchronous cdma channels", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 35, pp. 123-36, January 1986.
- [5] M. K. Varanasi and B. Aazhang, "Multistage detection in asynchronous cdma communications", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 38, pp. 509-19, April 1990.
- [6] P. Patel and M. Holtzman, "Analysis of a single successive interference cancellation scheme in a ds/cdma system",
- [7] M. F. Marçal, *Recepção Multiusuário com Detecção Ótima por Grupos em Sistemas com Múltiplo Acesso CDMA*, Dissertação de Mestrado, CETUC/PUC-Rio, 2002.
- [8] S. Verdú, *Multiuser Detection*, Cambridge, 1998. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, pp.796-807, June 1994.
- [9] A. J. Viterbi e J. K. Omura, *Principles of Digital Communication and Coding*, McGraw-Hill, 1979.